

Mit tehetünk, hogy ne essünk csöbörből vödörbe a zöldátmenet oltárán?

Megoldások a ritkaföldfémek környezetszennyezésének csökkentésére és az ellátási láncukban felmerülő gondokra

What can we do not get out of the frying pan into the fire due to the green transition? Solutions to reduce the pollution and problems arising in the supply chain of rare earth metals

MÁKSZEM Boglárka, dr. SZABÓ Loránd

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Gépek és Hajtások Tanszék

E-mail: Lorand.Szabo@emd.utcluj.ro

Abstract

To reduce the effects of climate change and environmental damage, the EU announced the "European Green Deal" strategy, which is based on the increased use of renewable energy resources and the wide spread of e-mobility. For this reason, the demand for permanent magnet electrical machines (generators in wind farms and the drive motors of hybrid and electric cars) has increased rapidly in both strategic areas. For this reason, the demand for rare-earth-based permanent magnets is increasing greatly. Paradoxically, the more rare earth metals we use to achieve climate neutrality, the more we pollute our environment, since the mining of rare earth metals is highly polluting. Following a thorough study of the literature, the paper explores the economic, environmental, and technical concerns related to the use of rare earth metals, and the often contradictory options for mitigating them, and tries to make suggestions for solving this paradox.

Keywords: circular economy, environmental protection, permanent magnets, rare earth metals, recycling, reverse logistics, supply chains

Kivonat

Az éghajlatváltozás és a környezetkárosítás komoly fenyegetést jelent mind Európa, mind a világ számára. E problémák kezelése érdekében az EU-ban meghirdették az "Európai zöld megállapodás – Az első klímasemleges kontinens megteremtése" stratégiát. Ennek szerves részei a megújuló energiaforrások fokozott felhasználása és az e-mobilitás széleskörű elterjesztése. Mindkét stratégiai területen nagyfokú szükség van a nagy- és nagyon nagy teljesítményű állandó mágneses villamos gépekre (generátorok a szélerőművekben, illetve a hibrid és elektromos gépkocsik meghajtó motorjai). Emiatt nagymértékben nő a ritkaföldfém-alapú állandó mágnesek iránti kereslet világszerte. Azonban, a ritkaföldfémek bányászása és előállítása igen nehéz és környezetkárosító folyamat, kitermelésük során nagy mennyiségű mérgező és radioaktív anyag keletkezik, amelyek egyaránt veszélyesek a környezetre és az emberi szervezetre. Paradox módon, minél több ritkaföldfémot használunk fel a klímasemlegesség eléréséhez, annál jobban szennyezzük a környezetiünket ezek bányászatával. A ritkaföldfémek kitermelése és az állandó mágnesek előállítása szinte kizárólagosan Kínában koncentrálódik, ahol a környezetvédelem még gyerekcipőben jár. Mit tehetünk európai szakemberek ennek tudatában? Egyetlen lehetőségünk maradt: a körkörös gazdaság kiépítése ezen a területen is, amely a fordított logisztikával kombinálva jobb anyagfelhasználást és újrahasznosítást biztosíthat. Gyakorlatilag csökkenteni kell kitermelésüket és behozatalukat, ezáltal kímélve Földünket. Ezt három úton érhetjük el. Első sorban széles körben elterjedté és hatékonyabbá kell tenni a kifutott berendezések és készülékek ritkaföldfém tartalmának újrahasznosítását. Továbbá optimalizált tervezéssel csökkenteni kell a különböző berendezésekben felhasznált ritkaföldfémek mennyiségét, illetve olyan berendezéseket kell tervezni, amelyekből könnyebben (olcsóbban, kisebb energiaráfordítással és kevesebb környezetszennyezéssel) lehet kinyerni ezeket a kritikus anyagokat. A tanulmány körbejárja a szakirodalom alapos tanulmányozása nyomán a ritkaföldfémek felhasználásához kapcsolódó gazdasági, környezetvédelmi és technikai gondokat, és ezek enyhítésének többször ellentmondásos lehetőségeit.

Kulcsszavak: állandó mágnesek, ellátási láncok, fordított logisztika, körkörös gazdaság, környezetvédelem, ritkaföldfémek, újrahasznosítás

1. BEVEZETŐ

A ritkaföldfémek számos kulcsfontosságú csúcstechnológiás területen nélkülözhetetlenek, mint például az elektronika, távközlés, űrkutatás, egészségügy, hadiipar stb. Napjainkban a világgazdaság egyre inkább függ tőlük.

Ugyanakkor a ritkaföldfém-alapú állandó mágnesek fontos összetevői a villamos gépeknek, amelyek elengedhetetlenek a megújuló energiaforrások fokozott hasznosításában, valamint az elektromobilitás elterjesztésében.

Az elektromos generátorok biztosítják a világ szinte teljes villamos energia szükségletét. Az elektromos energia legnagyobb részét nagy és nagyon nagy teljesítményű, elektromágneses gerjesztésű szinkrongenerátorok alakítják át. A megújuló energiaforrások felhasználásának széles körű elterjedése és a kisebb teljesítményű háztartási generátorok iránti kereslet megnövekedése miatt azonban az állandó mágneses elektromos generátorok iránti kereslet napjainkban drámaian emelkedik. A legtöbb ilyen villamos generátorban nagyenergiájú ritkaföldfém állandó mágneseket használnak.

A járműipar elektromos átállásának jegyében rohamosan terjednek a villamos gépkocsik különböző formái: a tisztán elektromos, hibrid, konnektoros (*plug-in*) hibrid vagy az üzemanyagcellás autók. Ezen járműhajtások számottevő része állandó mágneses szinkrongépekkel működik, amelyekben szintén nagyrészt ritkaföldfém-alapú állandó mágneseket találunk.

Mindez világossá teszi, hogy a ritkaföldfémek nagyfokú felhasználása nélkül megvalósíthatatlan az anynyira áhítatott zöldátmenet, amely környezetünk megóvását hivatott biztosítani.

A ritkaföldfémek bányászata és primer feldolgozása egyetlen országba koncentrálódása, az áruk nagymértékű ingadozása, a fenntarthatatlan bányászatuk (környezetszennyezés, társadalmi gondok), a szállítási szűk keresztmetszetek stb. miatt ellátási láncuk számos kockázatnak van kitéve. A Covid-világjárvány és a közelünkben jelenleg is zajló háború még jobban felhívta a figyelmet a ritkaföldfémek ellátási láncával kapcsolatos problémákra, és ez óriási gazdasági és politikai érdeklődést váltott ki mind a tudományos, mind a vállalati szférában [1].

Sajnos a globális ipari szereplők egymagukban nem képesek ezeket a problémákat áthidalni. Csak úgy tudnak lépéseket tenni e valóban ritka nyersanyagok behozatalának csökkentésére, ha aktívan bekapcsolódnak a körforgásos gazdaság kiépítésébe és hathatós működtetésébe. Ez az egyre jobban elterjedő gazdasági modell, a fordított logisztika segítségével jobb anyagfelhasználást és nagymértékű újrahasznosítást képes biztosítani. Ezáltal növelni lehet a ritkaföldfémek ipari felhasználását kitermelésük és behozataluk csökkentése mellett, ami nagyban hozzájárul Földünk megóvásához.

A ritkaföldfémek újrahasznosítása azonban még csak gyerekcipőben jár. Nincs még eléggé kiforrott technológia és megfelelően kialakított begyűjtési lánc. Maga a kritikus anyagok kinyerése is környezetszennyező és energiaigényes. Korlátozza a körkörös gazdaságba bevonható anyagmennyiséget az, hogy természetesen csak a már egyszer kitermelt nyersanyagokat lehet kizárólag újra feldolgozni. Így biztosan nem lehetséges az exponenciálisán növekvő igényeket kielégíteni.

Az újrahasznosítással kapcsolatban is felmerül egy paradoxon: mivel a jelenleg ismert és alkalmazott módszerek nagyrésze veszélyes vegyi anyagokat (például sósavat) és nagymennyiségű hőt (ezáltal sok energiát) igényel, minél több hulladékot dolgozunk fel annak érdekében, hogy csökkentsük a bányászattal járó környezetszennyezést, annál jobban terheljük meg az újrahasznosítással saját ökoszisztémánkat.

A mérnökök legfőbb szerepe ezen gondok enyhítésében, hogy olyan ritkaföldfémeket is tartalmazó eszközöket és berendezéseket tervezzenek, amelyek kritikus anyagigénye minimális, illetve könnyen szétszerelhetők, ezáltal megkönnyítve újrahasznosításuk első fázisát. Sajnos, mindezt nagyon nehéz a gyakorlatban kivitelezni, és éppen ezért a fentebb említettek gyakorlatba ültetése nagyon komoly mérnöki kihívást jelent.

Azonban, munkájuk nem elégséges a ritkaföldfémek importjának csökkentésére és ezáltal környezetromboló bányászatuk visszafogására. Számottevő haladáshoz csak a kritikus anyagok körkörös gazdasága valamennyi láncszemében érdekelt gazdasági szereplő szakértelmére és innovatív képességére szükség van, valamint munkájukat támogató törvényi keretekre is.

E dolgozat a szakirodalom alapos tanulmányozása alapján megvizsgálja a ritkaföldfémek felhasználásához kapcsolódó fontosabb gazdasági, környezetvédelmi és technikai nehézségeket, és ezek enyhítésének többször ellentmondásos lehetőségeit.

2. A RITKAFÖLDFÉM-ALAPÚ ÁLLANDÓ MÁGNESEK

A csúcstechnológiás iparágak számos területén (köztük az autóiparban, a repülőgépiparban, a hadiparban, a villamos erőművekben, a kőolaj-finomításban, az egészségügyben, az elektronikában, a kohászatban, az üvegyártásban, a háztartási gépekben, a biztonságtechnikai berendezésekben stb.) alkalmazzák a

ritkaföldfém-alapú anyagokat. Mindezek kiváló kémiai, fémipari, mágneses és elektro-optikai tulajdonságokkal rendelkeznek [2].

A nagy energiasűrűségű állandó mágnesek a ritkaföldfémek anyagainak legismertebb felhasználásai közé tartoznak, azonban ez a terület csak egy kisebb részét (kb. 20% -át az összes globális fogyasztásuknak) jelenti [2-3]. Ezek a mágnesek két fő anyagtypusból készülnek: SmCo (szamárium-kobalt) és NdFeB (neodímium-vas-bór).

A SmCo állandó mágneseket samárium és kobalt szintetizálásával készítik. Ezek magas hőmérsékleten is tudnak dolgozni, és jól megőrzik mágneses erősségüket.

A neodímium (NdFeB) mágnesek a legerősebbek és a legsokoldalúbban felhasználhatóak az ipar számos területén. Ezeknek az állandó mágneseknek a maximális remanens indukciója (B_r) elérheti az 1,4 T-ot, a koercitív térerősségük (H_c) pedig a 2000 kA/m-et. Az általuk elérhető maximális energetikai összeg (BH_{max}) akár 440 kJ/m³ is lehet. Hátrányuk, hogy alacsonyabb hőmérsékleten tudnak működni és érzékenyek a korrózióra [4]. Ezeknek a mágneseknek nagy mennyiségű ritkaföldfém összetevőjük van: akár 35% neodímiumot (Nd) és kevesebb, mint 10% praeodímiumot (Pr), terbiumot (Tb), diszpróziumot (Dy) és gadolíniumot (Gd) is tartalmazhatnak [5].

A ritkaföldfém-alapú állandó mágnesek, különösképpen a neodímium mágnesek használata elengedhetetlen többek között a villamos gépek gyártásában, mivel csak ezek a nagy energiájú állandó mágnesek használhatóak nagyon nagy teljesítmény-, illetve nyomatéksűrűségű villamos gépek készítésére, amelyek kulcsfontosságúak a különböző (köztük számos kritikus) alkalmazási területeken, többek között az e-mobilitásban és a megújuló energiaforrások átalakításában.

Az elektromos járművek legnagyobb része állandó mágneses vontatómotorral rendelkezik, amelyekhez átlagosan 1,25 kg neodímium állandó mágnesre (NdFeB) van szükségük [6]. Az állandó mágneses villamos gépeket gyakran alkalmazzák a gépkocsik különböző kiegészítő elektronikus berendezéseiben és rendszereiben, amelyeknek célja többek között a menetbiztonság növelése, vagy egyszerűen kényelmesebbé tenni a vezető munkáját és az autóban ülők utazását, mint például a szervokormány, az elektronikusan rásegített fékezőrendszer, az ablakok és tükrök vezérlése, a klímaberendezések kompresszorai stb. A szélturbinákban alkalmazott nagy teljesítményű közvetlen hajtású szinkrongenerátorok (amelyek nem igényelnek drága sebességváltót) akár 4 tonna ritkaföldfémeket is tartalmazhatnak [7].

Természetesen, a ritkaföldfém-alapú állandó mágneseket számos további alapvető alkalmazási területen is megtalálhatjuk úgy, mint mikrohullámú kommunikációs berendezésekben, az elektroakusztikus eszközökben (hangszórók, mikrofonok, hallókészülékek, stb.), mágneses szeparátorokban és gyógyítóeszközökben, a kőolajfinomításban, valamint számtalan mágneses gépészeti eszközben (mint például a mágneses fékekben, sebességváltókban, szivattyúkban, szelepekben, mágneses tömítésű ajtóknak, mágneses zárakban, stb.), és a listát tovább lehetne bővíteni [8].

Nem szabad megfeledkezni a ritkaföldfémek, az állandó mágneseken kívüli, sokféle alkalmazási területeiről sem, mint például a mobiltelefonok, a számítógépek merevlemezei, síkképernyős monitorok és televíziók, katonai irányítórendszerek, lézerek, radar- és szonár-rendszerek, a mágneses rezonanciás képalkotó (MRI-*Magnetic Resonance Imaging*) készülékek. Továbbá megtalálhatók festék-, lumineszcens- és fluoreszkáló-anyagokban, egyes világító diódákban (LED-*Light-Emitting Diode*), röntgen- és szcintillációs-foszforokban [9].

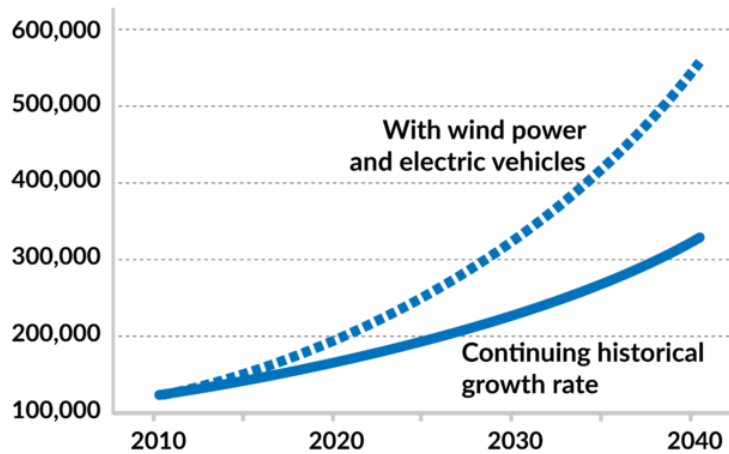
Mindezt figyelembe véve, nem férhet kétség ahhoz, hogy mind a ritkaföldfém anyagok, és mind az ezekből előállított állandó mágnesek ipari, de más szempontból is, kiemelkedő jelentőséggel bírnak.

3. A RITKAFÖLDFÉMEK ELLÁTÁSI LÁNCÁVAL KAPCSOLATOS GONDOK

Ahogy azt korábban már láthattuk, számos fontos iparágban van feltétlen szüksége a ritkaföldfémekre. A digitalizáció elterjedése, a közlekedés villamosítása, az energetikai átállás, valamint számos egyéb jövőbeli technológia mind-mind szélsőségesen növeli a ritkaföldfémek iránti keresletet.

Az 1. ábra mutatja a világgazdaság jövőbeni ritkaföldfém (tonnában kifejezett) igényének növekedését. Folytonos vonallal az elmúlt évek növekedési trendjének extrapolálását ábrázolták, míg szaggatott vonallal az igény növekedését, ha figyelembe vesszük az szélerőművek és villamos gépkocsik elterjedésének köszönhető radikális kereslet-növekedést. Mint látható, e két iparág radikálisan megnöveli ezen kritikus anyagok iránti igényt.

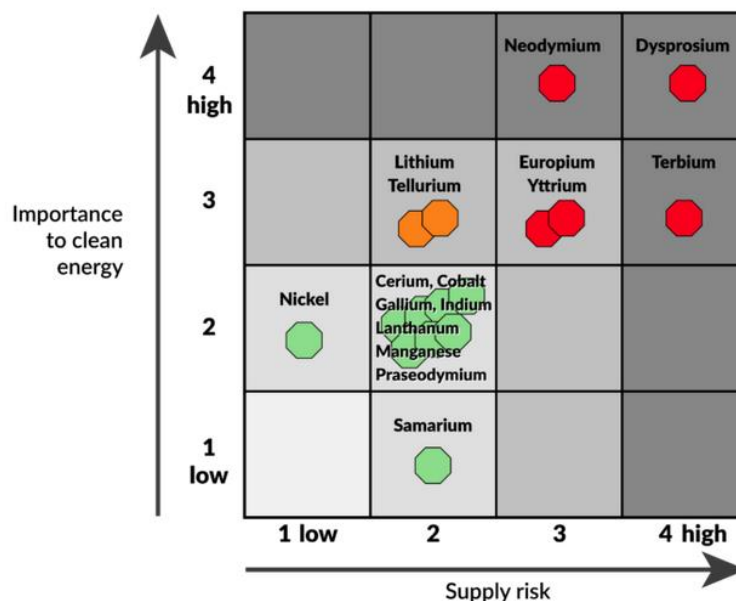
Projections of demand (tons)



1 ábra

A ritkaföldfém-felhasználás jövőbeni igényének előrejelzése [10]

Következésképpen ezeket a ritkaföldfémeket a "kritikus ásványok" vagy "kritikus fémek" kategóriába sorolják [11]. A ritkaföldfémek a kritikus fémek között is a legkritikusabbnak számítanak, mint a 2 ábrán is láthatjuk, ahol a különböző fémek helyét határozták meg a tiszta energiaátalakítás fontosságának és az ellátási kockázatuk függvényében. Mint láthatjuk, a jó minőségű állandó mágnesek előállításához elengedhetetlen valamennyi ritkaföldfém fellelhető az ábrán. Ezek közül a neodímium, a terbium és a diszprózium mind a szükségességi és a kockázatosági lista élen áll.



2 ábra

A különböző kritikus fémek besorolása a tiszta energiaátalakítás fontosságának és az ellátási kockázatuk függvényében [10]

Számunkra szomorú tény, hogy az Európai Unió a legtöbb az iparban szükséges fémfajta magas százalékában importfüggő. Az Unió által a "kritikus" jelzővel minősített 30 nyersanyag közül 19-ben a Kínai Népköztársaság az elsődleges vagy szinte kizárólagos beszállítónak számít. Példának okául, mind a magnézium, mind a bizmut 93%-át Kínából importálják Európába [11]. Hasonló a probléma a ritkaföldfémek esetében is, mivel napjainkban Kína rendelkezik a világ teljes ritkaföldfém feldolgozó képességének 85 százalékával. Ami

a ritkaföldfém-alapú állandó mágneseket illeti, 2022-ben a világ termelésének több mint 90 százaléka ebből az országból származott [12].

Mindez az összes többi fejlett ország esetében jelentős geopolitikai kockázati tényezőnek számít, akárcsak az Oroszországból származó energia-behozattal való függőség [11]. Mindezek miatt, a ritkaföldfémek fokozottan ki vannak téve az ellátási lánc kockázatainak [13]. További rossz hír, hogy ez a nyersanyag függőség a közeljövőben várhatóan egyre jobban erősödik, a magas technológiájú termékek iránti rohamos kereslet miatt.

Sajnos, a távolabbi kilátások is adnak okot némi aggodalomra. A Kínai Népköztársaság vezetősége a jelenlegi ötéves tervében előírta, hogy visszaszorítja az ország intenzív nyersanyag exportját, mivel ezek nagyrészt inkább a hazai iparban szándékozik felhasználni a kínai ipar további felfuttatásának és minőségének javítása érdekében. Mindez annak az irányzatnak az eredménye, amely szerint Kína a nyersanyagok exportja helyett, a jövőben inkább az elsődleges technológiákban szeretne vezető pozícióra szert tenni a világgazdaságban.

Mindemellett, 40 éven belül Kína is egy klímasemleges országgá szeretne válni. Ezen ambíciózus terv teljesüléséhez, akárcsak a fejlett világ többi országának, fokozottan lesz szüksége kritikus nyersanyagokra. Erre készülve, a kínai vezetés az utóbbi években, gazdasági erejét felhasználva és még az Amerikai Egyesült Államokat is lekörözve, külföldön (főleg Afrikában) nagyon komoly beruházásokkal és szerződésekkel további kritikus nyersanyag-forrásokhoz tudott hozzájutni. Ezzel a lépéssel gyakorlatilag más országok hozzáféréseit ezekhez a pótolhatatlan nyersanyagokhoz csaknem ellehetetlenítette [11, 14].

Paradoxon módon, a legnagyobb ritkaföldfém lelőhelyek nem Kínában, hanem Észak Amerikában, Délkelet-Ázsiában, Afrikában és Ausztráliában vannak, mégis Kína az egyeduralkodó a ritkaföldfémek előállításában. Ennek oka, hogy itt a legkevésbé szigorúak a környezetvédelmi törvények és ezek betartatása. Emiatt, a világ más részein a ritkaföldfém bányászat sokkal költségesebb és éppen ezért teljesen versenyképtelen a kínai kitermelőkkel szemben [15].

Mindezt figyelembe véve, világos, hogy az Európai Unió országainak nagyon szűk mozgástere maradt a ritkaföldfémek piacán, de más kritikus nyersanyagokén is.

Az egyik (nagyon korlátolt) lehetőség a nyersanyagbiztonság növelésére a kritikus anyagok importjának diverzifikálása. Ennek megfelelően, növelni szándékozzák a ritkaföldfémek importját más országokból [11]. Brazília az elsődleges célpont, mivel itt található a Föld harmadik legnagyobb ritkaföldfém tartaléka, amit 21 millió tonnára becsülnék [16].

A másik (szintén nehezen járható út) a hazai, jóval kisebb volumenű ritkaföldfém értelepek kibányászása. Noha ezen nyersanyagok nagy része Európában is megtalálható (főként az északi országokban, Görögországban és Szerbiában), kibányászásuk nagy társadalmi ellenállásba ütközik az elkerülhetetlen helyi környezetszennyezés miatt [11, 17]. Ez az alternatíva egyéb okok miatt is nehezen véghezvihető. Európában a kitermelés nagyon drágának ígérkezik és a bányai beruházások sok évig is eltarthatnak, mivel a tervezéstől a kitermelés beindításáig akár 10-15 év is eltelhet. A legígéretesebb ritkaföldfém-bányászati beruházást a legészakibb svédországi város, Kiruna környékére tervezik, egy már meglévő bánya továbbfejlesztésével [18]. Itt több mint 1 millió tonna ritkaföldfém nyersanyagot feltételeznek, foszfor és fluor értelepek társaságában. Az új technológiával való kitermelést 2027-ben szeretnék beindítani [19].

A távolabbi jövőt illetően reményre adhat okot a mélytengeri bányászat gyors felfuttatása. Japán szakemberek hatalmas (a becslések szerint 16 millió tonna ritkaföldfém-oxid) lelőhelyet fedeztek fel a Csendes-óceán fenekén, a Minamitori-sziget mellett, Tokiótól mintegy 1850 kilométerre délkeletre, Japán kizárólagos gazdasági övezetében. Speciális bányászati technológiát alkalmazva az óceánfenéki iszapból lehet a ritkaföldfémeket kinyerni. A feltárt lelőhelyek hatalmasak, az innen mélytengeri robotokkal kibányászott egyes ritkaföldfémek többszáz évig fedezni tudják a világgazdaság egyre növekvő igényeit: az európiumot 620 évig, a terbiiumot 420 évig és a diszpróziiumot pedig 730 évig [10].

Ennél még utópisztikusabb a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) hosszú távú terve, hogy a Holdon található ritkaföldfémeket termeljék ki (több más kritikus nyersanyag mellett) és szállítsák a Földre, még akkor is, ha az ottani készletek jóval kisebbek, mint a Földünkön levők [20].

4. A RITKAFÖLDFÉMEK KÖRNYEZETI ÉS EGÉSZSÉGÜGYI ÁRTALMAI

A ritkaföldfémek többsége erősen mérgező, ezért a hozzájuk kapcsolódó valamennyi technológiai folyamat veszélyes és kifejezetten környezetszennyező.

4.1. A ritkaföldfémek egészségkárosító hatásai

Szinte valamennyi ritkaföldfémnek van valamilyen káros hatása. A neodímium por belélegzése tüdőembóliát okozhat és hosszútávon károsíthatja a májat. A cériummal érintkezők viszketést, hőérékenységet és bőrelváltozásokat tapasztaltak, míg az itrium vegyületeknek kitetteknel légszomj, köhögés, mellkasi fájdalom

és cianózis jelentkezhet. A diszprózium por robbanásveszélyes, ha levegővel keveredik és gyújtóforrás közelében található [21].

A mérgező ritkaföldfémek több úton (leginkább antropogén tevékenység következtében) kerülhetnek be az emberi szervezetbe, beléggzéssel, lenyeléssel, vagy a bőrrel való érintkezés révén. Sajnos, ritkaföldfémeket adagolnak növényvédő- és gyomirtó szerekhez is, valamint műtrágyákhoz, a termés hozamának és minőségének javítására, de ez által a mérgező anyagok, még ha nagyon kis mennyiségben is, bekerülhetnek a szervezetünkbe a legkisebb tudomásunk nélkül [22].

Mindezek miatt, a ritkaföldfémekkel kapcsolatos munkahelyi, közbiztonsági és egészségügyi kockázatokat a bányászat, szállítás, feldolgozás, hulladékártalmatlanítás, valamint a leszerelés szakaszában egyaránt kötelező lenne megfelelően kezelni.

4.2. A ritkaföldfémek bányászatának környezeti ártalmai

Noha bőségesen elérhetőek, a ritkaföldfémek gyakran nem találhatóak meg nagy koncentrációban, hanem radioaktív elemekkel, például tóriummal és uránnal keveredve. Kémiai tulajdonságaik miatt nehéz lehet őket szétválasztani a környező anyagoktól és egymástól, valamint nehéz tisztítani őket [23].

A ritkaföldfémek bányászata két alapvető technikával történik. Az első szerint, nagy nyílt gödröket ásnak a földbe, hogy kitermeljék őket (lásd a 3 ábrát). Ez a módszer ellenben tonnaszámba termel veszélyes szilárd hulladékot, amely szennyezi a levegőt, a vizet és a talajt.



3. ábra
Ritkaföldfém bánya Kínában [24]

A bányászat második módszerében vegyszereket pumpálnak a talajba, hogy feloldják a ritkaföldfémeket tartalmazó anyagokat és lehetővé tegyék finomításukat. Mindkét módszer visszamaradt bányatavakat és zagy-tározókat (lásd a 4 ábrát) eredményez, amelyek savakat, nehézfémeket és radioaktív anyagokat szivárogtathatnak a talajvízbe és szennyezhetik azt [25].



4. ábra
Ritkaföldfém bánya zagy-tározója Kínában [26]

Minden tonna ritkaföldfém kibányászása 13 kg mérgező porral, 75 m³ szennyvízzel, 12.000 m³ hulladékgázzal és 1 tonna radioaktív maradvánnyal jár [27]. Emellett kitermelésük számos negatív társadalmi hatást is okoz, beleértve a nehéz és koszos fizikai munkát, erőszakot, gyermekmunkát, a nemi egyenlőtlenség növekedését stb., a már említett környezeti hatások mellett [28].

A kormányoknak és a bányavállalatoknak be kellene fektetniük a környezetbarátabb kitermelési technikákba, és további lépéseket kellene tenniük az ásatási terület kutatása érdekében, hogy mérsékeljék ezeket a problémákat, azonban az összes ilyen intézkedés kétségtelenül növelni fogja a bányászati költségeket.

A jövő bányászataként tekintett mélytengeri kitermelés is óriási ökológiai károkkal jár. A több kilométer mélységben, a tengerfenéken dolgozó bányászrobotok, amelyek már ma is ki tudják termelni a tengerfenék gazdag nyersanyagkészleteit, gyakorlatilag felbolygatják és legyalulják a tengerfeneket és ezáltal teljesen kiirtják az ottani, még ma sem százszázalékosan feltárt igen változatos élővilágot. Másodlagos kárként, a tengerfeneket felkotró és felporszívózó hatalmas bányászrobotok a megbolygatott igen mérgező nehézfémeket tartalmazó ásványok porát jókora területre juttatják el, így még azok a messzi környéken élő élőlények is elpusztulnak, amelyeket a robotok nem taposnak el közvetlenül. A korallak a legveszélyeztetettebbek, mivel nagyon elterjedtek az északi Csendes-óceán elsődleges kérgi zónájában, amely igen gazdag ásványi anyag tartalommal rendelkezik [29].

5. A FENNTARTHATÓ FEJLŐDÉS EGYIK PARADOXONA ÉS ENNEK MEGOLDÁSA

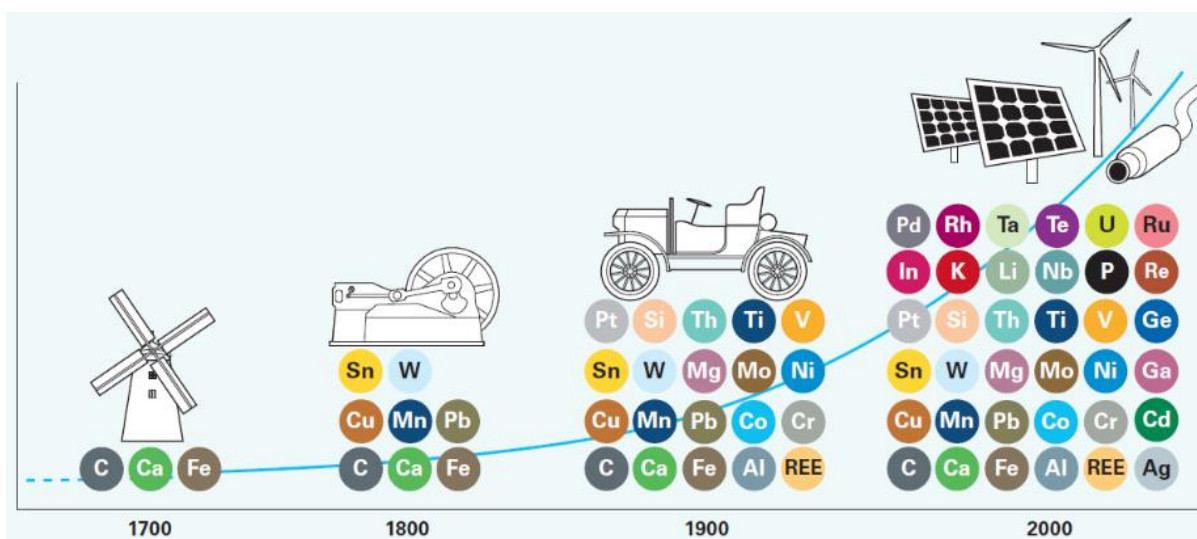
Mint láttuk, ellentmondásos módon, minél több ritkaföldfémeket használnak fel a klímasemlegesség eléréséhez, annál jobban szennyeződik a környezetünk ezek bányászatával és felhasználásával. Mit tehetnek az európai szakemberek ezen ambivalencia megoldásáért?

A ritkaföldfémek kitermelése és az állandó mágnesek előállítása szinte kizárólagosan Kínába koncentráldik, ahol a környezetvédelem még gyerekcipőben jár. Sajnos, főleg politikai okokból jóformán semmilyen kényszerítést nem lehet rájuk alkalmazni ennek megváltoztatására.

Az egyetlen lehetőség, amivel napjainkban élni lehet, az a körkörös (körforgásos) gazdaság kiépítése ezen a területen is, amely a fordított logisztikával kombinálva jobb anyagfelhasználást és újrahasznosítást biztosíthat. Ezáltal növelni lehet a ritkaföldfémek használatbavételét úgy, hogy gyakorlatilag csökkentjük ezek behozatalát, így kímélve Földünket.

5.1. Ritkaföldfémek a körkörös gazdaságban

Több száz éven át az egyszeri fogyasztásra épülő gazdasági lineáris modell határozta meg a termelési tevékenységeket. Ez az egyszeri fogyasztásra épült (vásárlás-használat-eldobás). Emiatt a termékeket olcsó, könnyen hozzáférhető alapanyagokból készítették és tartósságuk nem volt alapvető elvárás. Ezen modell alkalmazásához a múltban nem kapcsolódtak különleges gondok, mivel az előállított termékek kis volumenben készültek és anyagfelhasználásuk alacsony és szűkkörű volt, amint a 3 ábrán is látható [30].



5. ábra

A felhasznált nyersanyagok sokféleségének növekedése a technológiai fejlődés során [31]

5.1.1. A körforgásos gazdaság

A körforgásos gazdaság termelési és fogyasztási modellje arra épül, hogy megszüntetjük, vagy legalábbis csökkentjük a termékek egyszeri fogyasztását. A termékek és az elkészítésükhöz szükséges nyersanyagok élettartamát a lehető legjobban meg kell hosszabbítani. Csak a legszükségesebb termékeket kell megvásárolni. Amennyiben elromlanak meg kell próbálkozni a javításukkal, illetve, ha eléri életciklusuk végét, akkor az alapanyagait újra lehet hasznosítani. Így redukálható a felhalmozódó hulladék mennyisége. Mindemmellett az alapanyagok ismételt felhasználása gazdaságilag is értékteremtő. Tehát ezen gazdasági modell kulcsszavai: csökkenteni, felújítani és újrahasznosítani.

A körforgásos gazdaság elsősorú célja visszafogni a környezetszennyezést és lassítani a nyersanyagforrások kimerülését. A ritkaföldfémek (és valamennyi egyéb kritikus nyersanyag) esetében a gazdasági és politikai függőségek hangsúlyosan mérséklődnének. Javítani tudná az Európai Unió gazdasági versenyképességét és a számítások szerint 700.000 új munkahelyet tudna helyileg teremteni. Továbbá számottevő megtakarítást jelentene a fogyasztók számára. Ebből adódóan, az EU komoly erőfeszítéseket tesz ezen gazdasági modell mihamarabbi népszerűsítése érdekében. Az Európai Bizottság már 2020 elején előterjesztett egy hatásonnak ígérkező cselekvési programot a körforgásos gazdaság megteremtésére, amely jó néhány javaslatot tartalmazott a fenntarthatóbb terméktervezésre, a hulladékok csökkentésére, valamint a termékek javításhoz való jog kiterjesztésére vonatkozóan. Ezen cselekvési tervezetet évente újították fel a pillanatnyi gazdasági helyzet függvényében, illetve a megszerzett tapasztalatok alapján. Ugyancsak számos intézkedést írtak elő a karbonsemleges, környezetbarát, fenntartható körforgásos gazdaság 2050-ig történő kivitelezése érdekében. Ennek keretében nagy hangsúlyt kaptak a nyersanyagok újrafeldolgozását magiszabó komolyabb szabályok. Továbbá meghatározták az alapanyagok (és különösképpen a kritikus anyagok) felhasználására és fogyasztására vonatkozó, a jövőben kötelező célértékeket [32].

Megjegyzendő, hogy feltétlenül több ágazat szakembereinek szoros összefogására van szükség a körforgásos gazdaság hathatós működéséhez.

5.1.2. A fordított logisztika

A körforgásos gazdaság a ritkaföldfémek esetében is szervesen kapcsolódik a fordított logisztikához. Ez egy olyan logisztikai folyamat, amelyik az ellátási lánc valamennyi fázisában keletkező hulladék kezelésével foglalkozik. Fő célja az anyagok újrahasznosítása vagy környezetkímélő megsemmisítése.

Fordított (vagy inverz) logisztikának nevezik, mert ellentétes irányú a logisztika hagyományos folyamatával, amely az alábbi útvonalat követi: a nyersanyagok befogadása és bevétele a gyártási folyamatba, maga a gyártás, a termékek forgalmazása és értékesítése a végfelhasználók számára. A folyamat fordítva haladva, a végtermékekből indul ki, innen nyeri vissza az új termékek gyártáshoz szükséges nyersanyagokat [33].

A ritkaföldfémeket tartalmazó berendezések és eszközök esetében a fordított logisztika felelős a gyártás során keletkező hulladékok értékesítéséért, vagy esetenkénti újrahasznosításáért és az így keletkező nyersanyagok visszajuttatásáért a termelési folyamatokba. Ugyanakkor, előtérbe helyezi az elromlott berendezések javítását újak vásárlása helyett, mivel ezáltal is csökkenthető a rendszerbe bevitt újonnan kitermelt nyersanyagok mennyisége [34].

Megjegyzendő, hogy a fordított logisztika egy tágabb kifejezés mint a körforgásos gazdaság, mivel magában foglalja azokat az üzleti gyakorlatokat is, amelyeket nemcsak kizárólag a nyersanyagok megtakarítása, illetve a környezet megkímélése motivál [33].

5.2. A ritkaföldfémek újrahasznosítása

Mint már említettük, a ritkaföldfémek iránti meredeken növekvő globális keresletre vonatkozó előrejelzések, illetve az ellátási láncukban meglévő problémák arra kényszerítik a gazdaságokat, hogy az újrahasznosításnak a kritikus anyagok jelentős forrásává kell válnia, hathatósan kiegészítve a megnövekedett elsődleges termelést.

Ebben hatalmas lehetőség rejlik. Elég, ha csak az állandó mágnesekből visszanyerhető ritkaföldfémeket említjük. Az állandó mágnesek mennyisége a kisméretű fogyasztói elektronika 1 g alatti tömegétől az elektromos és hibrid járművekben 1-2 kg körüliig terjed, a szélturbinákban használt állandó mágneses generátorokban pedig elérheti az 1-2 tonnát is.

Európában a következő két évtizedben csak az elhasználandó elektromos járművekből több mint 11 kt neodímium és közel 1 kt diszprórium hasznosítható újra [35].

Jelenleg a kifutott fogyasztási cikkekből vagy ipari hulladékokból származó ritkaföldfémek újrahasznosítása minimális, főként a technikai módszerek kiforratlansága, illetve költségessége miatt. Az újrafeldolgozást nagyban nehezíti a nem hatékony (vagy egyáltalán nem létező) begyűjtés, a termékek szétszerelésének magas költsége, valamint a költséghatékony módszerek hiánya az újrahasznosított alapanyagokból történő

termeléshez. Szintén lényegbeli akadályt jelent, hogy sok potenciálisan újrahasznosítható terméknek nagyon alacsony a ritkaföldfém tartalma, és a rendelkezésre álló anyagmennyiség nem elegendő ahhoz, hogy gazdaságos legyen az újrafeldolgozásuk. Például egy merevlemez-meghajtó csak néhány gramm ritkaföldfémot tartalmaz, míg más termékek csupán milligrammokat. Ezekből a termékekből számottevő mennyiséget kell begyűjteni és tárolni ahhoz, hogy megérje a bennük rejlő kritikus anyagok újrahasznosítása. Több esetben az alapanyagok végéletciklusa nehezíti a bennük található ritkaföldfém-tartalmú komponensek elérését. Tehát mielőtt a kifutott laptopokban lévő ritkaföldfémot olyan módszeresen újrahasznosíthatnánk, mint az üres üdítősdobozban lévő alumíniumot, több komoly technológiai, gazdasági és logisztikai akadályt kell a szakembereknek leküzdenie. Mindezt tovább nehezíti (főként napjainkban, amikor a nemzeti gazdaságok válságközeli állapotokban vannak) az újrahasznosító létesítményekbe történő beruházások hatalmas költségei [36].

Mindazonáltal a kínálat és a kereslet közötti szakadék miatt a ritkaföldfémek újrafeldolgozására irányuló igények várhatóan növekedni fognak.

Az elmúlt években jelentős erőfeszítések történtek világszerte az élettartamuk végén lévő termékek vagy másodlagos forrásokból származó nyersanyagok hasznosításához szükséges technológiák kidolgozására és elterjesztésükre.

A szakirodalomban több kiváló áttekintés található a ritkaföldfémek újbóli feldolgozásáról, különös tekintettel az állandó mágnesekből kinyerhetőkre. Ezek részletesen ismertetik az iparágak helyzetét, valamint az újrahasznosítással kapcsolatos kutatási fejlesztéseket [36].

A javasolt technológiák viszonylag újak, nagyon változatosak és eredményességük még nem bizonyított széles ipari mértékben.

A ritkaföldfémek két fő újrafeldolgozási módszere az extrakció (vagy kilúgozás) és az elválasztás. A hulladékokból savakkal, például kénsavval, sósavval vagy salétromsavval kilúgozzák a ritkaföldfémeket. Miután a ritkaföldfémek és a más egyidejűleg oldható összetevők kioldódtak a vizes fázisba, hidrometallurgiai módszerrel a ritkaföldfémeket elválasztják a többi ásványi anyagoktól, majd az egyes ritkaföldfémeket egymástól.

A vegyészek és anyagtudósok azonban intelligensebb újrahasznosítási módszereket is próbálnak kidolgozni. A javasolt technológiák mikrobákat alkalmaznak a ritkaföldfémek kinyerésére, és ezáltal kiküszöbölik az extrakciót, az elválasztási fázisokat és a környezetre ártalmas savak intenzív használatát. Ezek környezetkímélő hatása is jelentős, mivel a többnyire alkalmazott bakteriális eredetű savak kevésbé károsak a környezetre, mint a sósav vagy más hagyományos fémkioldó sav [37]. Sajnos viszont a hatékonyságuk terén a "rosszabb" irányba billen a mérleg nyelve, ugyanis a kísérletek során a bakteriális savak a ritkaföldfémeknek csak mintegy negyedét-felét tudták visszanyerni a hulladékokból, míg a sósavat alkalmazó technológiák sokkal jobb eredményre képesek, bizonyos esetekben akár a hulladékban levő ritkaföldfémek 99 százalékát is ki tudták nyerni.

Egy másik, már ipari mértékben alkalmazott technológia mellőzi a savak használatát, és helyettük rézsókat használ a ritkaföldfém-alapú állandó mágneseket is tartalmazó hulladékok újrahasznosítására. Ha a hulladékot szobahőmérsékleten egy réz-só oldatba áztatják, a ritkaföldfémek kioldódnak. Ezután ezeket megszilárdítják, majd további vegyszerek és melegítés segítségével porított ásványokká, úgynevezett ritkaföldfém-oxidokká alakítják. Az eljárással, amelyet az állandó mágnesek gyártása során visszamaradt anyagok újrafeldolgozására is alkalmazhatnak, a ritkaföldfémek 90-98 százalékát is vissza lehet nyerni, és a kinyert nyersanyag elég tiszta ahhoz, hogy új mágneseket készíthessenek belőlük. E szisztéma ökológiai lábnyoma csak a fele a Kínában jelenleg alkalmazott bányászati és feldolgozási módszereknek. Feltétlenül meg kell említeni, hogy ez az újrahasznosítási módszer sem teljesen "zöld", mivel a technológiához mérgező ammónium-hidroxid és energiaigényes égetés szükséges, ami természetesen szén-dioxid kibocsátással jár [37].

Ugyancsak ez a cég fejlesztette ki a *Taz* és *Dave* nevű robotpárt, amelyek szintén megkönnyítik a ritkaföldfémek újrahasznosítását. *Taz* egy új iratmegsemmisítő-szerű technológiát használ, amely segítségével a készülékek audio moduljaiból össze tudja gyűjteni a ritkaföldfémeket tartalmazó állandó mágneseket, míg *Dave* képes szétszedni a *Taptic Engine* modulokat, ezáltal segítve az értékes ritkaföldfémek, valamint a vörfém és acél kinyerését [38].

Még akkor is, ha a kutatók elhárítják a technológiai korlátokat a ritkaföldfémek újrafeldolgozását illetően, még mindig felmerülnek különböző más akadályok is.

Az élelciklusuk végén lévő termékekből a legtöbb esetben nem nyerhetőek ki az értékes nyersanyagok, ugyanis ezek általában összetettek és sokféle anyagból állnak, éppen ezért a kimondott vegyszeres vagy akár biológiai visszanyerési folyamat megkezdése előtt a különböző anyagokból készült alkatrészeket szét kell szelnie és válogatni, ami bonyolult, időigényes és költséges feladat. Az automatizált szétszerelést támogató technológiák fejlesztése valószínűleg nagymértékben hozzá tud járulni a kritikus anyagok újrahasznosításának hatékonyabbá tételében.

Természetszerűleg, a legoptimálisabb esetben is csak a rendelkezésére álló (az egyszer már kitermelt) mennyiséget lehet újrahasznosítani, ami biztosan nem tudja az exponenciálisan növekvő igényeket (lásd a 3 ábrát) kielégíteni [11].

Továbbá számos logisztikai nehézség is felmerül. Például, nincsenek kiépített és bejáratott módszerek a ritkaföldfémeket tartalmazó, kifutott termékek összegyűjtésére és az újrahasznosítás helyszínére való elszállításukra. Nagy volumenű hulladékról van szó, amelyben csekély mértékű ritkaföldfém található.

Azzal is számolni kell, hogy a nagyméretű (és emiatt sok ritkaföldfémot tartalmazó) berendezések jó részének hosszú az élettartama, emiatt akár 10-15 évre is "lekötvé maradnak" az értékes nyersanyagok.

További gondot jelent, az új technológiai fejlesztések ütemezésének és léptékének kiszámíthatatlansága, amely felgyorsíthatja vagy lelassíthatja az újrahasznosítandó berendezések cseréjét és nehezen kiszámíthatóvá teszi a jövőben kinyerhető anyagok mennyiségét.

Az újrahasznosítással kapcsolatban is felmerül egy paradoxon: mivel a jelenleg ismert és alkalmazott módszerek nagyrésze veszélyes vegyi anyagokat (például sósavat) és nagymennyiségű hőt (ezáltal sok energiát) igényel, minél több hulladékot dolgozunk fel annak érdekében, hogy csökkentsük a bányászattal járó környezetszennyezést, annál jobban terheli meg az újrafeldolgozással saját ökoszisztémánkat.

5.3. Műszaki megoldások, amelyek csökkenthetik a ritkaföldfémek szükségességét

Az ismertetett látszólagos ellentmondások elméletileg legnyilvánvalóbb és legegyszerűbb megoldása az lenne, ha a ritkaföldfémeket is tartalmazó eszközöket és berendezéseket már eleve úgy terveznék meg, hogy kritikus anyagigénye minimális legyen, illetve könnyű szétszerelhetőségükkel megkönnyítsék az újrahasznosításuk első fázisát.

Ezt a tervezési stratégiát alkalmazni kellene valamennyi termékénél, amelyek előállításához kritikus nyersanyagok szükségeltetnek.

Természetesen ezt az elméleti megközelítést nagyon nehéz a gyakorlatban megvalósítani, mert a kritikus nyersanyagokat éppen azért használják, mert kimagasló tulajdonságokkal rendelkeznek, és kiváltásuk, illetve felhasználásuk csökkentése mind a termékek minőségét, mind az árukat rontani tudja.

Mindezt figyelembe véve, a korábban említett szisztémák gyakorlati kivitelezése nagyon komoly mérnöki kihívást jelentenek.

A tervezőmérnököknek nemcsak a fejlesztendő berendezések kiváló műszaki paramétereire kell koncentrálniuk, hanem arra is, hogy amikor ezeket kivonják a használatból, könnyen szétszerelhetők legyenek és előkészítésük az újrafelhasználásra egyszerű legyen [39]. Hasznos lehet a moduláris felépítést alkalmazni, amely sok más előnye mellett megkönnyíti a berendezések szétszedését is az anyagok újrahasznosítása előtt [40].

6. ÖSSZEGRÉS

Az egész emberiség fennmaradása szempontjából kulcsfontosságú környezetünk megóvása. Emiatt az Európai Unió meghirdette az "Irány az 55%!" (*Fit for 55*) környezetvédelmi mentőcsomagot, amelynek célja, hogy összhangba hozza az uniós jogszabályokat annak érdekében, hogy 2030-ra legalább 55%-kal csökkenjen a nettó üvegházhatású gázok kibocsátása [56]. Ez szervesen illeszkedik a már korábban meghirdetett "Európai zöld megállapodás – Az első klímasemleges kontinens megteremtése" globális stratégiához.

Ezen ambiciózus célkitűzés megvalósíthatatlan az energiaszektor még zöldebbé tétele és a közlekedés széleskörű villamosítása nélkül. Emiatt mindkét alapvető ágazatban egyre nagyobb szükség van a ritkaföldfém-alapú állandó mágneses villamos gépekre, amelyeket generátoroként használnak a szél- és vízenergia-átalakításban, és meghajtó motorként a hibrid és elektromos gépkocsikban.

A megnövekedett igények miatt az égből szűkölt a ritkaföldfémek iránti kereslet, ami komoly ellátási gondokat okozott. Mindezt tetézi egy paradoxon helyzet előállása: mivel a kritikus nyersanyagok kitermelése erősen környezetszennyező és energiaigényes, minél több ritkaföldfémot követel a klímasemlegeségi célkitűzések elérése, annál nagyobb környezeti ártalmakat okoz kitermelésük. E bűvös kör egy lyukas zsákhöz hasonló, amelynek befoltozása igencsak nehézkes.

Mivel a kitermelés legnagyobb része Kínában zajlik, ahol még nincsenek szigorú környezetvédelmi törvények, a közeljövőben nehéz elképzelni a ritkaföldfém bányászat káros környezeti hatásainak csökkenését. Emiatt a szakembereknek feladatává vált, hogy más forrásokból biztosítsák, hacsak részlegesen is, a kritikus anyagokat. Bár további elsődleges termelésre mindig szükség lesz, a ritkaföldfémek exponenciálisan fejlődő újrahasznosítása a közeljövőben jelentős ellátási forrássá kell kinőnie magát.

Folyamatos, hosszú távú tudományos kutatásra és mérnöki tervezésre (aminek egyre szigorúbb műszaki-gazdasági és életciklus-értékeléssel kell párosulnia), valamint kereskedelmi elkötelezettségre van

szükség annak felméréséhez, hogy mely újrahaznosítási technológiák a gazdaságilag leginkább életképesebbek, és melyek lehetnek a közeljövőben széleskörben alkalmazhatók.

Remélhetjük, hogyha a ritkaföldfémek bányászatával foglalkozó közösségek is megtapasztalják a zöldtechnológia előnyeit az éghajlatváltozás fékezésében, nemcsak a közvetlen környezetük szennyezését és saját egészségük leépülését érzékelik, akkor úgy ítélik meg, hogy a drágább, de tisztább bányászat kompromisszuma megéri a plusz költségeket.

Ha a ritkaföldfémek bányászatának nem tudják vagy akarják jelentősen csökkenteni a környezeti hatásait, akkor a zöldátmenet célja kérdésessé válik. Ezt a gondot csak enyhíteni tudja a körkörösebb gazdaságba illeszkedő célzott hulladékbegyűjtéssel párosuló innovatív vegyi vagy biológiai szétválasztás.

Sajnos nincs olyan megoldás, amely minden felmerülő problémát meg tudna oldani, amely kiküszöbölne az összes negatív tényezőt és nem eredményezne még minimális káros következményt sem, akár a környezetre, akár az egészségre, akár a hatékonyságra, akár a gazdaságosságra stb. nézve. Ennek ellenére a jövőben minél inkább szükség lesz egy részletesen kidolgozott, a lehetséges tényezőket számba vevő, és azokat értékelő stratégiára, amely taglalja az optimális megoldásokat és kiemeli a téma kapcsán az agilitást, amely szükséges a ritkaföldfém ellátási láncok rugalmas és mihamarabbi támogatásához.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Z. Allam, S.E. Bibri, S.A. Sharpe, "The Rising Impacts of the COVID-19 Pandemic and the Russia–Ukraine War: Energy Transition, Climate Justice, Global Inequality, and Supply Chain Disruption," *Resources*, vol. 11, no. 11, paper #99, 2022.
- [2] A.R. Jha, *Rare Earth Materials: Properties and Applications*. Boca Raton (USA): CRC Press, 2014.
- [3] E.A. Nesbitt, J.H. Wernick, *Rare Earth Permanent Magnets*. New York (USA): Academic Press, 1973.
- [4] G. Kovács, "Permanens mágnesek modellezése a villamosmérnöki gyakorlatban," Ph.D. doktori értekezés, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2019.
- [5] O. Dudarko, N. Kobylinska, V. Kessler, G. Seisenbaeva, "Recovery of rare earth elements from NdFeB magnet by mono- and bifunctional mesoporous silica: Waste recycling strategies and perspectives," *Hydrometallurgy*, vol. 210, paper #105855, 2022.
- [6] K. Binnemans, "Rare earths: essential elements for the transition to a low-carbon economy," 2015. Elérhető: http://summerschool.redmud.org/wp-content/uploads/2016/12/07_BinnemansScREE.pdf
- [7] W. Rabe, G. Kostka, K.S. Stegen, "China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries?," *Energy Policy*, vol. 101, pp. 692-699, 2017.
- [8] *Common Applications of Neodymium Magnets*. Elérhető: <https://www.stanfordmagnets.com/common-applications-of-neodymium-magnets.html>
- [9] R. Skomski, J. Shield, D. Sellmyer, "An elemental question," *Magnetic Technology International*, pp. 26-29, 2011.
- [10] F. Umbach, *Uncertain strategies for securing supplies of critical raw materials*. Elérhető: <https://www.gisreportsonline.com/r/rare-elements-demand/>
- [11] I. Juhász, "Túlzott függőség a kritikus fémek behozatalában," Gyártástrend online magazin, Budapest, 2022. Elérhető: <https://gyartastrend.hu/cikk/tulzott-fuggoseg-a-kritikus-femek-behozatalaban>
- [12] D.J. Cordier, "Rare Earths Statistics and Information," National Minerals Information Center, Reston (USA), 2023. Elérhető: <http://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-rare-earths.pdf>
- [13] A. Trench, J.P. Sykes, "Rare earth permanent magnets and their place in the future economy," *Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 115-118, 2020.
- [14] J. Nyabiage, *China-US battle for African influence shifts to green critical minerals*. Elérhető: <https://www.scmp.com/news/china/diplomacy/article/3216457/china-us-battle-african-influence-shifts-green-critical-minerals>
- [15] *A ritkaföldfémek bányászatának nehézségei*. Elérhető: <https://iparnegyed.hu/a-ritkafoldfemek-banyaszatanak-nehezsegei/>
- [16] L. Kelly, *Rare Earths Reserves: Top 8 Countries (Updated 2023)*. Elérhető: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/rare-earth-reserves-country/>
- [17] *Rare earth element deposits in Europe*. Elérhető: <https://www.eurare.org/countries/home.html>
- [18] *Europe's largest deposit of rare earth metals is located in the Kiruna area*. Elérhető: <https://lkab.com/en/press/europes-largest-deposit-of-rare-earth-metals-is-located-in-the-kiruna-area/>
- [19] M.L. Doldi, "Permanent magnets recycling is the key word for Europe," *Electric Motor Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 38-42, 2023.

- [20] M. Sheetz, *Harvesting rare-earth metals from the moon will happen this century, NASA chief says*.
Elérhető: <https://www.cnbc.com/2019/07/18/nasa-chief-bridestine-on-harvesting-rare-earth-metals-from-the-moon.html>
- [21] K.T. Rim, K.H. Koo, J.S. Park, "Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: a literature review," *Safety and Health at Work*, vol. 4, no. 1, pp. 12-26, 2013.
- [22] G. Pagano, M. Guida, F. Tommasi, R. Oral, "Health effects and toxicity mechanisms of rare earth elements— Knowledge gaps and research prospects," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 115, pp. 40-48, 2015.
- [23] X. Yao, "China Is Moving Rapidly Up the Rare Earth Value Chain," Marsh McLennan Inc., New York (USA), 2022.
Elérhető: <https://www.brinknews.com/china-is-moving-rapidly-up-the-rare-earth-value-chain/>
- [24] P.H. O'Neill, *A pro-China online influence campaign is targeting the rare-earths industry*.
Elérhető: <https://www.technologyreview.com/2022/06/28/1055093/a-pro-china-online-influence-campaign-is-targeting-the-rare-earths-industry/>
- [25] C. Gramling, "Rare earth mining may be key to our renewable energy future. But at what cost?," *Science News*, Washington, D.C. (USA), 2023.
Elérhető: <https://www.sciencenews.org/article/rare-earth-mining-renewable-energy-future>
- [26] A. Tan, *This Toxic Lake of Black Sludge Is the Result of Mining to Create Our Tech Gadgets*.
Elérhető: <https://abcnews.go.com/Technology/toxic-lake-black-sludge-result-mining-create-tech/story?id=30122911>
- [27] J. Nayar, "Not So "Green" Technology: The Complicated Legacy of Rare Earth Mining," *Harvard International Review*, Cambridge (USA), 2021.
Elérhető: <https://hir.harvard.edu/not-so-green-technology-the-complicated-legacy-of-rare-earth-mining/>
- [28] S.H. Ali, "Social and environmental impact of the rare earth industries," *Resources*, vol. 3, no. 1, pp. 123-134, 2014.
- [29] C. Molnár, *Elindul a mélytengeri bányászat – óriás profit, ökológiai károkkal*.
Elérhető: <https://tudas.hu/eldorado-a-tenger-melyen-boritekolható-okológiai-katasztrófavál/>
- [30] K. Németh, *A körforgásos gazdaság alapjai*. Veszprém: Pannon Egyetemi Kiadó, 2021.
- [31] V. Zepf, A. Reller, C. Rennie, M. Ashfield, J. Simmons, *Materials critical to the energy industry: an introduction*. London (UK): BP plc, 2014.
- [32] *Körforgásos gazdaság: mit jelent, miért fontos és mi a haszna?*
Elérhető: <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/economy/20151201STO05603/korforgasos-gazdasag-mit-jelent-miert-fontos-es-mi-a-haszna>
- [33] *A fordított logisztika egyre növekvő szerepe a gazdaságban*.
Elérhető: <https://fuvar.hu/blog/fordított-logisztika/>
- [34] H. Jin, Y. Yih, J.W. Sutherland, "Modeling operation and inventory for rare earth permanent magnet recovery under supply and demand uncertainties," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 59-66, 2018.
- [35] N. Akil, S. Loutatidou, D. Arslan, E. Festa, P. Circelli, S. Colella, "REE4EU Market Analysis Report," 2017.
Elérhető: <https://ree4eu.eu/public-documents/market-analysis-report/>
- [36] Y. Fujita, S.K. McCall, D. Ginosar, "Recycling rare earths: Perspectives and recent advances," *MRS Bulletin*, vol. 47, no. 3, pp. 283-288, 2022.
- [37] E. Wayman, *Recycling rare earth elements is hard. Science is trying to make it easier*.
Elérhető: <https://www.sciencenews.org/article/recycling-rare-earth-elements-hard-new-methods>
- [38] *Apple expands the use of recycled materials across its products*.
Elérhető: <https://www.apple.com/cm/newsroom/2022/04/apple-expands-the-use-of-recycled-materials-across-its-products/>
- [39] A. Rassõlkin, A. Kallaste, S. Orlova, L. Gevorkov, T. Vaimann, A. Belahcen, "Re-use and recycling of different electrical machines," *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 55, no. 4, pp. 13-23, 2018.
- [40] C.Y. Baldwin, K.B. Clark, *Design rules: The power of modularity*. Cambridge (USA): MIT Press, 2000.