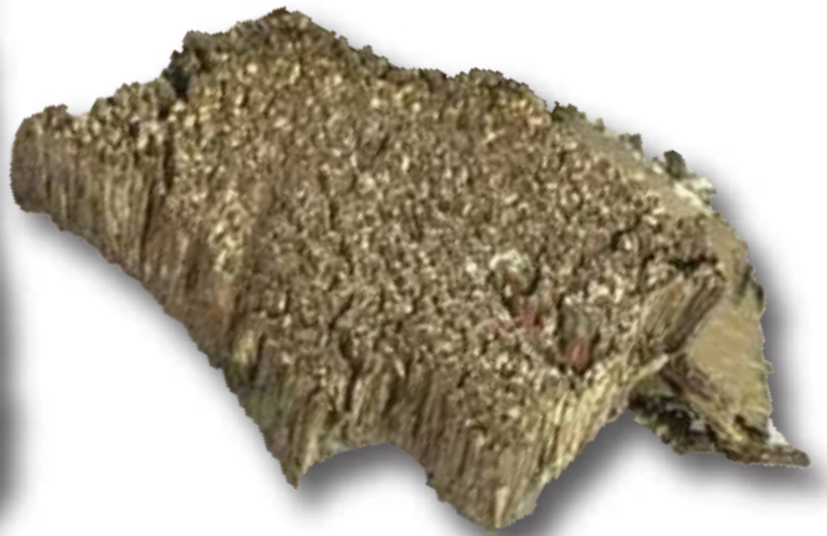
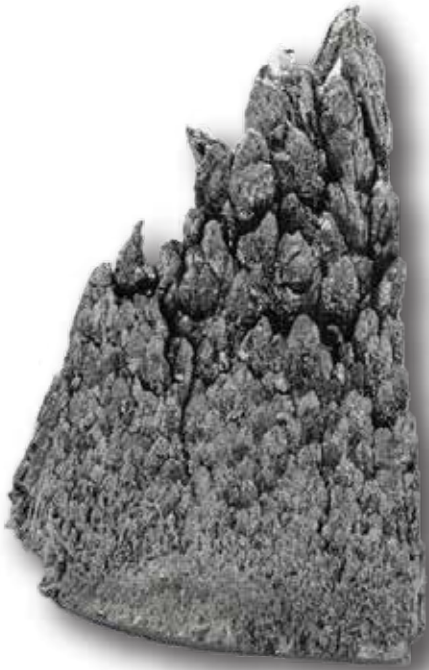




MADEN TETKİK ve ARAMA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

Dünyada ve Türkiye'de Skandiyum ve İttriyum



Maden Serisi : 38
Ankara



MADEN TETKİK VE ARAMA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

Dünyada ve Türkiye’de Skandiyum ve İttriyum

Hazırlayan

Dilek KILIÇ
Maden Mühendisi

Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı

2024

SKANDİYUM

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
1.1. NTE Genel Özellikler	2
1.2. Skandiyum Genel Özellikleri.....	8
1.2.1. Skandiyum atomik özellikleri	10
1.2.2. Skandiyum kimyasal özellikleri	11
1.2.3. Skandiyum izotopları	12
1.3. Skandiyum Madeninin Tarihçesi	14
1.4. Skandiyum Madeninin Kullanım Alanları.....	14
2. SKANDİYUM YATAKLARININ OLUŞUMU	16
2.1. Skandiyum yataklarının sınıflandırılması	16
2.1.1. Magmatik cevher yatakları.....	17
2.1.2. Hidrotermal cevher yatakları.....	21
2.1.3. Süperjen cevher yatakları	22
3. SKANDİYUM REZERV ve KAYNAK DURUMU	25
3.1. Dünya Rezervleri ve Kaynakları.....	25
3.1.1. Birincil Kaynaklardan Gelen Skandiyum	25
3.1.2. İkincil Kaynaklardan Gelen Skandiyum (Madencilik Süreci ve Ömrünü Tamamlamış Ürünler)	26
3.2. Türkiye Rezervleri ve Kaynakları.....	28
4. SKANDİYUM ÜRETİM DURUMU	29
4.1. Dünyada Üretim Miktarı.....	29
4.2. Türkiye’de Üretim Miktarı	30
4.3. Dünyada Üretim Yapan Şirketler	31
4.4. Türkiye’de Üretim Yapan Şirketler	31
4.5. Uluslararası Birlikler (Kuruluşlar).....	31
5. SKANDİYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ	32
5.1. Skandiyum Geri Kazanımına İlişkin Olası Akış Şemaları	33
5.2. Skandiyum Geri Kazanımı İçin Ayırma Süreçleri.....	35
5.2.1. Kimyasal Liç	36
5.2.2. Biyolojik Liç	36
5.3. Skandiyumu Kazanım Süreçleri	37
5.3.1. Sıvı/Sıvı Ekstraksiyonu	37
5.3.2. Adsorpsiyon	38

5.3.3. İyon Değişimi	39
5.3.4. Hareketsiz Ekstraktanlar	40
5.3.5. Biyosorpsiyon.....	41
6. SKANDİYUM TİCARETİ	42
6.1. Pazar/Piyasa ve Fiyat Durumu.....	42
6.1.1. Skandiyum piyasa trendleri.....	42
6.1.2. Çin'in pazara hakim olması bekleniyor	43
6.1.3. Skandiyum fiyatı	44
6.2. Dünyada İthalat ve İhracat	45
6.3. Türkiye'de İthalat ve İhracat.....	47
7. SKANDİYUMUN ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ.....	51
8.DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	56

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Dünya'da ki Önemli NTE Projeleri [3].	4
Tablo 2. NTE Mineralleri [1].	6
Tablo 3. NTE mineralleri kullanım alanları [1].	7
Tablo 4. Skandiyum Fiziksel Özellikleri [6].	10
Tablo 5. Skandiyum Atomik Özellikleri [6].	11
Tablo 6. Skandiyum Diğer Özellikler [6].	12
Tablo 7. Skandiyum İzotoplar [6].	13
Tablo 8. Skandiyum Yatakları Sınıflandırması [9].	17
Tablo 9. Magmatik Yataklar [9].	20
Tablo 10. Hidrotermal yataklar [9].	22
Tablo 11. Süperjen yataklar [9].	24
Tablo 12. İkincil Skandiyum Kaynakları [9].	28
Tablo 13. Dünya'da ki NTE Üretim Değerleri [12].	30
Tablo 14. Skandiyum Fiyat [15][16].	44
Tablo 15. NTE Dünya İhracat Miktar ve Değerleri [17].	45
Tablo 16. NTE İthalat Miktar ve Değerleri [17].	46
Tablo 17. Türkiye 2023 yılı NTE İhracat ve İthalat Değerleri [19]. (TUİK)	48
Tablo 18. ITC GTİP Kodundaki NTE Ürünlerinin Yıllara Göre İthalat ve İhracat Değerleri [17].	48
Tablo 19. 2023 Türkiye NTE ihracat miktar ve değerleri [17].	49
Tablo 20. 2023 Türkiye NTE İthalat Miktar ve Değerleri [17].	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Periyodik tabloda NTE. Skandiyum ve İttriyum [2]	3
Şekil 2. Skandiyum elementi [4]	8
Şekil 3. Skandiyum [5].....	9
Şekil 4.Skandiyum Kullanım Alanı . Beyzbol Sopası [8].....	15
Şekil 5. Bayan Obo Madeni Akım Şeması [10].	35
Şekil 6. NTE Dünya İhracat Payları [17].	46
Şekil 7. NTE Dünya İthalat Payları [17].	47
Şekil 8. 2023 Türkiye NTE İhracat Payları [17].	49
Şekil 9. 2023 Türkiye NTE İthalat Payları [17].	50

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi kadar eski olan madencilik, geçmişten günümüze, bizler için vazgeçilemez olan madenlerin elde edilebilmesini sağlayan önemli bir faaliyettir. Madenler bugün hayatımızın her alanında çok önemli bir yer tutmaktadır.

'Mucize metal' olarak bilinen Scandium (Sc), malzeme bilimlerinde benzersiz özelliklere sahip olup, düşük tedariki ancak ileri teknolojideki geniş uygulamaları nedeniyle dünyada kritik bir kaynaktır. Sc, yer kabuğunda olağanüstü derecede seyrek olmamasına rağmen sıklıkla dağılmıştır ve cevher yatakları oluşturamamaktadır. Bununla birlikte, Sc zaman zaman magmatik, hidrotermal veya süpergen yatakları oluşturacak şekilde yoğunlaşmıştır.

Skandiyum geçiş metallerinin ilkidir. Bazen itriyum ve lantanitler yani nadir toprak elementleri ile birlikte sınıflandırılır. Bunun sebebi, bileşiklerinin özelliklerinin, alüminyum ve itriyum metallerinin özelliklerinin arasındaki değerlerde olmasıdır. Periyodik tabloda kalsiyum ve titanyum arasında yer alır. Metalik gri renkte yumuşak bir metaldir.

Skandiyum, 1879 yılında İsveçli bilim adamı Lars Fredrik Nilson tarafından keşfedilmiştir. Nilson, İskandinavya'dan gelen öksenit ve gadolinit minerallerinde spektral analiz yöntemi ile skandiyumu tespit etmiştir.

Skandiyumun uzun vadeli üretimi olmadığı için kullanımı da sınırlıdır. Her ne kadar her yıl skandiyum talebi artsa da henüz geniş uygulama alanı yoktur. Refrakter özellikler gösterir. Skandiyumun en önemli kullanımı alüminyum gibi metallerin alaşımlarıdır. Alüminyum alaşımlarına yüzde 0,5 oranında skandiyum katıldığında alaşımı güçlendirmektedir

Çin, küresel satış için bilinen en büyük skandiyum ürünleri üreticisidir. Rusya, otuz yıldan uzun süredir aktif olan, özellikle Avrupa olmak üzere küresel pazarlara ikinci önemli tedarikçi olmuştur.

Bu yayımla skandiyum madenciliğinin ülkemiz ve Dünya da ki durumuna ilişkin son veriler derlenip genel bir bakış açısı sağlanması amaçlanmıştır.

Skandiyum mineralinin özellikleri, skandiyum mineralleri, skandiyum yataklarının oluşumu, Dünya da ve Türkiye de skandiyum minerali kaynakları, üretimi, ticareti ile çevresel etkilerine değinilmiştir. Yararlanılan kaynaklar, bölümlerin uygun yerlerinde parantezler halinde numaralandırılarak verilmiştir.

1.1. NTE Genel Özellikler

Nadir toprak elementleri ya da kısaca NTE, lantanitlerle birlikte itriyum ve skandiyum elementlerinin oluşturduğu bir grubu kapsamaktadır. Lantanitler atom numaraları 57'den 71'e kadar olan ve kimyasal olarak benzer elementlerin oluşturduğu bir gruptur. Atom numarası 39 olan itriyum ve atom numarası 21 olan skandiyum da lantanitlerle benzer kimyasal özellikleri ile nadir toprak elementlerinin içine dâhil edilmiştir (Şekil 1). Yerkabuğunda diğer minerallere oranla daha fazla bulunmadıkları sanıldığından dolayı bu ismi almışlardır.

İlk keşfedilen nadir toprak elementi, Carl Axel Arrhenius tarafından 1787 yılında İsveç'in Ytterby köyünde keşfedilmiştir. Bulunduğu yerden dolayı bu siyah mineral iterbiyum adını almıştır.

Ana yatakları alkali kayaç kompleksleri, karbonatitler ve plaserlere bağlıdır. Ayrıca ikinci derecede pegmatitler ile çeşitli metamorfik kayaçların yapısında da yer alırlar. Nadir toprak elementleri genellikle birlikte cevherleşmiştir.

Genellikle nadir toprak elementleri hafif nadir toprak elementleri ve ağır nadir toprak elementleri olarak kategorize edilmiştir. Lantan, seryum, praseodim, neodimyum, prometyum ve samaryum hafif nadir toprak elementleri olarak kabul edilirken itriyum, evropiyum, gadolinyum, terbiyum, disprosyum, holmiyum, erbium, tulyum, iterbiyum ve lütesyum ağır nadir toprak elementleri olarak kabul edilmiştir [1]. Nadir toprak elementleri kararlı bileşiklerinde +3 değerliklidir. Seryum, terbiyum ve praseodim +4; samaryum, evropiyum, tulyum ve iterbiyum +2 değerlik de alabilir.

Nadir toprak elementleri nabit halde bulunmazlar. Prometyum hariç tamamı bileşik halde bulunmaktadır. Prometyum da yerkürede az rastlanmakta ve ekonomik bir önemi bulunmamaktadır.

Nadir toprak elementleri yerkürede düşük konsantrasyonlarda geniş bir alana yayılmış durumdadırlar. 160'tan fazla mineralde bulunmaktadır. Ekonomik işlenebilir mineral sayısı ise oldukça azdır. Dünya genelinde üretiminin %95'i bastnazit, monazit ve ksenotim olmak üzere üç mineralden sağlanmaktadır

Nadir toprak elementleri 1948 yılına kadar Hindistan ve Brezilya'daki plaser yataklarından elde edilmekteydi. 1950'lerde Güney Afrika'da keşfedilen büyük monazit damarıyla dünyanın nadir toprak elementleri kaynağı burası haline geldi. 1965 ile 1985 yılları arasında ise Mountain Pass madeninden elde edilmiştir. 1985 yılından sonra da

Çin'deki bastnazit ve monazit yataklarından elde edilmiştir. Çin'deki en büyük nadir toprak elementleri madeni İç Moğolistan Özerk Bölgesi'nin Baotou şehrinin 120 km güneyinde bulunan Bayan Obo madenidir.

Nadir toprak elementleri cam ve seramik sanayi, metalürji sanayi, lazer üretimi, mıknatıs üretimi, petrol katalizörü ve ileri teknoloji cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nadir toprak elementleri günümüzde hibrid arabalarını, elektrikli taşıt araçlarını, rüzgâr türbinlerini, güneş enerjisi panellerini, MR makinelerini ve birçok temiz enerji teknolojilerini hayata geçirmektedir. Nadir toprak elementleri birçok yeşil enerji teknolojilerinde gerekli olmalarından dolayı yeşil elementler olarak da bilinmektedir [1]. Tablo'1 dünyadaki önemli NTE projelerini, Tablo'2 NTE minerallerini, Tablo'3 NTE kullanım alanlarını göstermektedir.

1	2											13	14	15	16	17	18	
1	H	2																He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lantanitler	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra																
			Lantanitler	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Şekil 1. Periyodik Tabloda NTE, Skandiyum ve İtiryum [2].

Tablo 1. Dünya'da ki Önemli NTE Projeleri [3].

Proje	Şirket	Bölge	Kayaç türü	NTE Minerali	Toplam kaynak (x10 ⁴ ton NTEO)	Tenör (Ağırlıkça %)
Bayan Obo	Çin Northern Rare Earth (Group)	Asya	Karbonatit	Bastnazit, monazit	10.000	5.6
Tanbreez	Tanbreez Madencilik Grönland AS	Grönland	Alkali kaya	Ödialit	2900	0,617
Güney Çin	Çin Nadir Toprak Grubu CO., LTD.	Asya	İyonik Kil	ONTE	840	0,02
Kvanefjeld	Grönland Mineraller Limited	Grönland	Alkali kaya	Steenstrupin -(Ce), lovozerit	1114	1.1
Lovozersky	LLC Lovozersky GOK	Avrupa	Alkali kaya	Loparit	717.4	1.12
Nam Xe	Vietnam	Asya	Karbonatit	Parisit	770	
Longonjo	Pensana Nadir Topraklar Plc	Afrika	Karbonatit	NTE karbonatlar ve fosfatlar	447	1.43
Aşram	Ticaret Kaynakları Şirketi	Kuzey Amerika	Karbonatit	Bastnazit, monazit, ksenotim	468.686	1.88
Ngualla	Kaynakların Zirvesi	Afrika	Karbonatit	Bastnazit	462	2.15
Fen	NTE Minerals Holding A.Ş.	Avrupa	Karbonatit	Bastnazit	437	0,9
Katalonya		Güney Amerika	Karbonatit	Monazit	654.5	5.5
Maonuping	Çin Nadir Toprak Grubu CO., LTD.	Asya	Karbonatit	Bastnazit	317	2.95
Tomtor	ThreeArc Madencilik LLC	Asya	Karbonatit	Monazit, ksenotim, piroklor grubu	323.29	11.99
Mount Weld	Lynas Nadir Topraklar	Avustralya	Karbonatit	Psödomorflar, monazit	300	5.4
Mountain Pass	Çok Amaçlı Malzemeler	Kuzey Amerika	Karbonatit	Bastnazit	418.3	8.9
Dongpao	Toyota Tsusho ve Sojitz Şirketi	Asya	Karbonatit	Bastnazit	31	10
Nechalacho (Thor Gölü)	Hayati Metaller	Kuzey Amerika	Alkali kaya	Fergusonit-(Y), zirkon, monazit, bastnazit, allanit, parisit	138.7	1.464

Proje	Şirket	Bölge	Kayaç türü	NTE Minerali	Toplam kaynak (x10 ⁴ ton NTEO)	Tenör (Ağırlıkça %)
Olympic Dam	BHP	Avustralya	IOCG (Atıklar)	Bastnazit, glorensit	6111.05	0,55
Nolan'lar	Arafura Kaynakları	Avustralya	Hidrotermal/IOCG	Apatit, monazit, allanit	145.6	2.6
Serra Verde	Serra Verde mineraçao	Güney Amerika	İyonik Kil	ONTE	109.32	0.12
Elk Deresi	NioCorp Gelişmeleri	Kuzey Amerika	Karbonatit	Bastnazit, allanit	104	0,3504
Araxa	CBMM	Güney Amerika	Karbonatit	Monazit, gorceiksit	120	3
Zandkopsdrift	Frontier Nadir Toprak Ltd.	Afrika	Karbonatit	Monazit	86.8	2.04
Garip Göl	Tornat Metaller Limited	Kuzey Amerika	Alkali granit	Bastnazit, zirkonosilikatlar, ferriallanit-(Ce), gadolinit-(Y)	49.2	0,89
Round Top	Texas Mineral Resources Corp. ABD Rare Earth LLC	Kuzey Amerika	Riyolit	İttroflorit, ittroselit, bastnazit, ksenotim	57	0,06
Dubo	Avustralya Stratejik Malzemeleri	Avustralya	Alkali kaya	NTE karbonatlar, ödialit grubu	55.63	0,74
Makuutu	İyonik Nadir Topraklar	Afrika	İyonik Kil	Alüminosilikat kat kil	34.48	0,064
Bear Lodge	Nadir Element Kaynakları Ltd.	Kuzey Amerika	Karbonatit	NTE karbonat ve florokarbonat, monazit	49.8	3.05
Yangibana	Hasting Teknoloji Metalleri	Avustralya	Karbonatit	Monazit	26.64	0,97
Red Wine (İki Tom)	Kanada Nadir Toprak Şirketi	Kuzey Amerika	Alkali kaya	Monazit, seryum-kalsiyum silikat	48.38	1.18

Tablo 1 in devamı

Tablo 2. NTE Mineralleri [1].

Atom numarası	Sembolü	Element adı
57	La	Lantan
58	Ce	Seryum
59	Pr	Praseodim
60	Nd	Neodimyum
61	Pm	Prometyum
62	Sm	Samaryum
63	Eu	Evropiyum
64	Gd	Gadolinyum
65	Tb	Terbiyum
66	Dy	Disprozyum
67	Ho	Holmiyum
68	Er	Erbiyum
69	Tm	Tulyum
70	Yb	İterbiyum
71	Lu	Lutesyum
39	Y	İtriyum
21	Sc	Skandiyum


Tablo 3. NTE Mineralleri Kullanım Alanları [1].





	Başlıca kullanım alanları
Skandiyum	Havacılık endüstrisinde hafif alüminyum-skandiyum alaşımı üretiminde, metal halide lambası ve cıva buharlı lamba üretiminde
İtriyum	Lazerlerde, yüksek sıcaklık süper iletkenlerinde, LCD ve LED ekranlarda, bujilerde, enerji tasarruflu lamba üretiminde
Lantan	Çelik endüstrisinde, yüksek kırılma indeksine ve alkaliye karşı dayanıklı cam üretiminde, çakmak taşı üretiminde, hidrojen depolamada, pil elektrotlarında, kamera lenslerinde
Seryum	Kimyasal oksidan olarak, cam ve seramiğe sarı rengi vermede, kendi kendini temizleyen fırınlarda katalizör olarak, petrol rafinerilerinde sıvı katalitik parçalama katalizörü olarak, çakmak taşı üretiminde
Praseodim	Nadir toprak mıknatıslarında, lazerlerde, karbon ark lambalarında, cam ve emayelerde renklendirici olarak, kaynak gözlüğü üretiminde
Neodimyum	Nadir toprak mıknatıslarında, lazerlerde, cam ve seramiğe mor rengi vermede, kaynak gözlüğü üretiminde, seramik kondansatörlerde
Prometyum	Nükleer bataryalarda
Samaryum	Nadir toprak mıknatıslarında, lazerlerde, nötron yakalamada,
Evropiyum	Kırmızı ve mavi fosfor üretiminde, lazerlerde, cıva buharlı lambalarda, floresan lambalarda
Gadolinyum	Nadir toprak mıknatıslarında, yüksek kırılma indeksine sahip cam ve garnet üretiminde, lazerlerde, x-ray tüplerinde, bilgisayar belleklerinde, nötron yakalamada, manyetik rezonans görüntüleme
Terbiyum	Yeşil fosfor üretiminde, lazerlerde, floresan lambalarda, Terfenol-D
Disprozyum	Nadir toprak mıknatıslarında, lazerlerde, Terfenol-D
Holmiyum	Lazerlerde, mıknatıslarda
Erbiyum	Kızılötesi lazerlerde, vanadyum çeliği üretiminde, fiber optik
Tulyum	Taşınabilir x-ray cihazlarında, metal halide lambalarında, lazerlerde
İterbiyum	Kızılötesi lazerlerde, alev topu üretiminde, paslanmaz çelik üretiminde, nükleer tıpta

Lutesyum	Pozitron emisyon tomografisinde, yüksek kırılma indeksine sahip cam üretiminde
-----------------	--

1.2. Skandiyum Genel Özellikleri

Skandiyum geçiş metallerinin ilkidir. Bazen itriyum ve lantanitler yani nadir toprak elementleri ile birlikte sınıflandırılır. Bunun sebebi, bileşiklerinin özelliklerinin, alüminyum ve itriyum metallerinin özelliklerinin arasındaki değerlerde olmasıdır. Periyodik tabloda kalsiyum ve titanyum arasında yer alır. Metalik gri renkte yumuşak bir metaldir (Şekil 2).

Atom numarası	21	44.955908	Atom ağırlığı
Sembol	Sc	D	Yüksek değerlikli oksitlerin asit-baz özellikleri
Elektron dizilimi	[Ar]3d ¹ 4s ²		Kristal yapısı
Adı	Skandiyum	—	Fiziksel durum 20°C (68°F)

	Nadir toprak elementi
	Hekzagonal
	Zayıf bazik
	Katı

Şekil 2. Skandiyum Elementi [4].

Skandiyum, havada oksitlendiğinde hafif sarımsı ve pembemsi bir döküntü meydana gelir. Çoğu seyreltik asitte çözünür. Nitrik asit ve hidroflorik asit karışımında yüzeyinde pasif bir tabaka oluşturur ve reaksiyona girmez. Havada parlak ve sarı bir alevle tutuşarak skandiyum oksit oluşturur. Suyula reaksiyona girer. Bir dizi organometalik bileşik ve kararlı kompleks bileşikler oluşturabilir. İyonik bileşikleri genellikle +3 oksidasyon durumu sergileme eğilimindedir. Tuzları renksizdir.

Doğada nadir değildir. Yerkabuğunda yüzde 0,0006 oranında dağılmış olarak bulunur. En bol bulunan elementler arasında 23.sıradadır. Güneşte en bol bulunan 50. elementtir. Skandiyum, nadir toprak metalleri minerallerinde ve uranyum bileşiklerinde doğal olarak bulunur. En önemli skandiyum kaynağı mineraller tortveitit, öksenit ve gadolinit adlı nadir toprak metalleri mineralleridir. İskandinavya’da yaygın olarak bulunan tortveitit minerali, yaklaşık yüzde 45 oranında skandiyum oksit içerir. Bununla birlikte dağılmış olarak birçok mineralde eser miktarlarda rastlanabilir. 800’den fazla mineralde bulunduğu belirtilmektedir. Okyanus suyu da eser miktar skandiyum içerir. Uranyumun öğütülmüş atıklarından yan ürün olarak elde edilebilir (Şekil 3) [5]. Tablo’4 skandiyumun fiziksel özelliklerini göstermektedir.



Şekil 3. Skandiyum [5].

Tablo 4. Skandiyum Fiziksel Özellikleri [6].


Fiziksel Özellikleri															
Fiziksel hali (NŞA)	Katı														
Erime noktası	1814 K (1541°C, 2806°F)														
Kaynama noktası	3109 K (2836°C, 5136°F)														
Yoğunluk	2.985g/cm ³														
Sıvı hali (mp)	2.80 g/cm ³														
Füzyon ısısı	14.1kJ/mol														
Buharlaşma ısısı	332.7 kJ/mol														
Molar ısı kapasitesi	25.52 J/(mol K)														
Buhar basıncı	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>P(Pa)</th> <th>1</th> <th>10</th> <th>100</th> <th>1k</th> <th>10k</th> <th>100k</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>T(K)</th> <td>1645</td> <td>1804</td> <td>(2006)</td> <td>(2266)</td> <td>(2613)</td> <td>(3101)</td> </tr> </tbody> </table>	P(Pa)	1	10	100	1k	10k	100k	T(K)	1645	1804	(2006)	(2266)	(2613)	(3101)
P(Pa)	1	10	100	1k	10k	100k									
T(K)	1645	1804	(2006)	(2266)	(2613)	(3101)									

1.2.1. Skandiyum atomik özellikleri

Grup 3'te atom yarıçapını artırma eğilimi vardır ve skandiyum gruptaki en küçük elementtir. İyonlaşma enerjisi dönemler boyunca artar çünkü bir periyot boyunca değerlik kabuğuna daha fazla elektron eklendikçe, pozitif yüklü çekirdek ile elektronlar arasındaki çekim artar. Bu nedenle 4. periyottaki tüm geçiş metalleri arasında skandiyum en düşük iyonlaşma enerjisine sahiptir. Ancak iyonlaşma enerjisi alt grupları azaltır. Bunun nedeni grupta aşağı doğru atom yarıçapının artması ve dolayısıyla değerlik elektronlarının çekirdekten uzaklığının artmasıdır. Mesafe, pozitif yüklü çekirdeğe olan çekimi zayıflatır. Yani skandiyum grup 3'te en yüksek iyonlaşma enerjisine sahiptir. Bu bize reaktivite

hakkında ne söylüyor? Genel olarak düşük iyonlaşma enerjisi, bir elektronun uzaklaştırılmasını kolaylaştırır ve dolayısıyla düşük iyonlaşma enerjisine sahip bir element daha reaktif olur. Bu eğilime dayanarak, skandiyum grup 3'te en az reaktif element, ancak 4. periyotta en reaktif element olacaktır. Aynı eğilim, bir atomun bir bağ elektron çiftini çekme eğilimi olarak tanımlanan elektronegatiflik için de geçerlidir (Tablo 5) [7].

Tablo 5. Skandiyum Atomik Özellikleri [6].

Atomik Özellikleri	
Oksidasyon durumu	0, +1, +2, +3 (amfoterik bir oksit)
Elektronegatiflik	Paul ölçeği: 1.36
İyonlaşma enerjileri	Birinci: 633.1 kJ/mol İkinci: 1235.0 kJ/mol Üçüncü: 2388.6 kJ/mol (vb.)
Atom yarıçapı	Emprikal: 162 pm
Kovalent yarıçapı	170±7 pm
Van der Waals yarıçapı	211pm
Spektrum çizgileri	

1.2.2. Skandiyum kimyasal özellikleri

Skandiyumun en dıştaki yörüngesi olan 4s'de 2 değerlik elektronu bulunurken, iç yörüngesi olan 3d, tam olarak dolmadan kalır. İncelediğiniz diğer birçok elementte ise elektronlar öncelikle kendi periyotlarına karşılık gelen yörüngeleri doldururlar. Bu, 4'ten 7'ye kadar olan periyotlarda geçiş metallerine ulaşıncaya kadar geçerlidir. Bunun nedeni, elektronların yörüngeleri artan enerji sırasına göre doldurmasıdır. 4s yörüngesi 3d yörüngesinden daha az enerjiye sahiptir, bu nedenle ilk önce doldurulur. Bu, elektronların neden iç kabukları tamamen doldurmadan değerlik kabuğuna eklenebileceğini açıklıyor. Skandiyumun en yaygın oksidasyon durumu, 3d ve 4s elektronlarının tümünü ortadan kaldıran +3'tür. Diğer oksidasyon durumları nadirdir ve genellikle yalnızca laboratuvarlarda

üretir. Skandiyum zayıf asitlerle reaksiyona girer. Skandiyum oksitler zayıf asitler veya zayıf bazlar oluşturabilir [7]. Tablo 6 skandiyumun diğer özelliklerini göstermektedir.

Tablo 6. Skandiyum Diğer Özellikler [6].

Diğer Özellikler	
Doğal bulunuşu	İlkel
Termal genişleme	A, poly: 10.2b μ m/m·K (o.s.)
Termal iletkenlik	15.8 W/(m·K)
Elektriksel direnç	α , çoklu: 562 n Ω ·m (o.s. ölçülen)
Manyetik sıralama	Paramanyetik
Molar manyetik duyarlılık	315x10 ⁻⁶ cm ³ /mol (292 K)
Young katsayısı	74.4 GPa
Kayma katsayısı	29.1 GPa
Hacimsel katsayı (sıkışmazlık)	56.6 GPa
Tek eksenli gerilme oranı	0.279
Brinell sertliği	736-1200 MPa
CAS numarası	7440-20-2

1.2.3. Skandiyum izotopları

Doğada sadece Sc-45 izotopu olarak bulunur. Bu izotop, tek kararlı izotopudur ve nükleer bir omurgaya sahiptir. İzotoplarının atom kütle numaraları 36 ila 60 arasında değişir. İzotoplarının 13'ü radyoaktiftir. Bunlar arasında Sc-46 en stabil olanıdır ve yarılanma ömrü 83,8 gündür. Sc-47 izotopunun yarılanma ömrü de 3,35 gündür. Pozitron verici özelliği bulunan Sc-44 izotopu, 4 saat, Sc-47 izotopu da 43,7 saat yarılanma ömrüne sahiptir. Diğer

radyoaktif izotoplarının çoğunun yarılanma ömürleri 4 saatten azdır. Bazılarının da 2 dakikadan daha kısa yarılanma ömrü vardır. Sc-39'un yarılanma ömrü 300 nano saniyedir.

Skandiyumun ayrıca meta durumu sergileyen 5 izotopu daha bulunur. Bu izotoplar arasında en kararlı olan Sc-45m izotopunun yarılanma ömrü 6 saattir. Tek kararlı izotopu Sc-45 izotopundan daha düşük kütle numaralı izotoplarının birincil bozunma modu elektron yakalama şeklindedir. Daha yüksek kütle numaralı izotoplarının birincil bozunma modu ise beta emisyonudur. Sc-45'in atom ağırlığının altındaki izotoplarının birincil bozunma ürünü kalsiyum izotoplarıdır. Atom ağırlıkları yüksek izotoplarının birincil bozunma ürünü ise titanyum izotoplarıdır. Yani Sc-45'in altındaki izotoplar kalsiyuma, üstündekiler titanyuma bozunur (Tablo 7) [8].

Tablo 7. Skandiyum İzotoplar [6].

Başlıca İzotoplar			Bozunma	
	Bulunuşu	Yarılanma süresi ($t_{1/2}$)	Işıma modu	Ürün
^{44m2}Sc	Sentetik	58.61 h	IT	^{44}Sc
			γ	^{44}Sc
			ϵ	^{44}Ca
^{45}Sc	100%	Kararlı		
^{46}Sc	Sentetik	83.79 d	β^-	^{46}Ti
			γ	—
^{47}Sc	Sentetik	80.38 h	β^-	^{47}Ti
			γ	—
^{48}Sc	Sentetik	43.67 h	β^-	^{48}Ti
			γ	—

1.3. Skandiyum Madeninin Tarihçesi

Skandiyum, 1879 yılında İsveçli bilim adamı Lars Fredrik Nilson tarafından keşfedilmiştir. Nilson, İskandinavya'dan gelen öksenit ve gadolinit minerallerinde spektral analiz yöntemi ile skandiyumu tespit etmiştir.

Periyodik tablonun mucidi Dimitri Mendeleev, 1869 yılında 40 (kalsiyum) ile 48 (tityum) arasında atom kütleli bir elementin varlığını öngörmüş ve bu elemente bor ile benzer özellikler içerdiğini tahmin ederek "bor gibi" anlamındaki "ekaboron" adını vermiştir. Nilson, bu elementi sekiz farklı metal içeren 10 kilogram öksenit mineralinden ayırtırmayı başarmış ve yüksek saflıkta 2 gram skandiyum oksit elde etmiştir. Bulduğu elementin minerallerinin bulunduğu İskandinavya'nın Latince anlamı "Scandia" sözcüğünden esinlenerek "scandium" adını vermiştir. Mendeleev'in tahmininden habersiz olarak skandiyumu keşfeden Nilson'un bulunduğu yeni element daha sonra Mendeleev'e bildirilmiştir.

Skandiyumun metal formu ilk olarak 1937 yılında elde edilmiştir. Metalik skandiyum, ilk olarak potasyum, lityum ve skandiyum klorür karışımının elektrolizi yöntemi ile izole edilmiştir. Yüzde 99 saflıkta metal skandiyum ise, ilk olarak 1960 yılında elde edilebilmiştir. Az elde edildiği ve kullanım alanı sınırlı olduğu için 1970'li yıllara kadar uygulamaları geliştirilememiştir. 1971 yılında ilk olarak alüminyum alaşımlarında kullanılmaya başlanmıştır. 1980 ve 1990'lı yıllarda alanları geliştirilerek savunma uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. İlk stratejik savunma uygulaması gadolinyum, skandiyum ve galyum granat lazer kristalleridir [8].

1.4. Skandiyum Madeninin Kullanım Alanları

Skandiyumun uzun vadeli üretimi olmadığı için kullanımı da sınırlıdır. Her ne kadar her yıl skandiyum talebi artsa da henüz geniş uygulama alanı yoktur. Refrakter özellikler gösterir. Skandiyumun en önemli kullanımı alüminyum gibi metallerin alaşımlarıdır. Alüminyum alaşımlarına yüzde 0,5 oranında skandiyum katıldığında alaşımı güçlendirmektedir. Zirkonyum ile alaşımı da yakıt pillerinde yüksek verimli elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu alandaki kullanımı giderek artmaktadır. Savaş uçaklarının parçalarında kullanılan alaşımlar, skandiyum içerir. Hafifliği sebebiyle tityum alaşımlar daha ucuzdur ve daha yaygın kullanılmaktadır. Skandiyum ile alüminyum, magnezyum, lityum ve tityum karışımı alaşım; tityum kadar dayanıklı ve güçlü, alüminyum kadar hafif ve seramik kadar sert bir alaşımdır.

Yüksek renk oluşturma indeksi olan beyaz ışık kaynağı metal halide lambalarda da yaygın olarak skandiyum kullanılmaya başlanmıştır. Skandiyum iyodür, cıva buharlı lambalara çok az miktarda eklendiğinde güneş ışığına benzer ışık kaynağı oluşturur. Bu özelliğine “suni doğal ışık kaynağı” nitelemesi yapılır. Yüksek yoğunluklu stadyum lambaları gibi ışık kaynaklarında kullanılmaktadır. Radyoaktif Sc-46 izotopu, petrol rafinerilerinde izleme ajanı olarak kullanılır. Skandiyum oksit, seramik yapımında katalizör görevi görür. Bileşiklerinin organik kimyada kullanımı yaygındır.

Skandiyum, bileşikleri ve alaşımlarının kullanıldığı bazı alan ve ürünler şunlardır; hafif uçak alaşımları, spor malzemeleri, golf ve beyzbol sopaları (Şekil 4), bisiklet gövdesi ve parçaları, hokey lakros çubukları, revolver tabancalar, dişçilik, metal halide lambaları, deşarj lambaları, tohum kimyasalları, alkali piller, koruyucu boyalar, böcek ilaçları, yakıt ve egzoz sistemleri, motor parçaları, oltalar, gözlükler [8].



Şekil 4. Skandiyum Kullanım Alanı Beyzbol Sopası [8].

2. SKANDİYUM YATAKLARININ OLUŞUMU

'Mucize metal' olarak bilinen Scandium (Sc), malzeme bilimlerinde benzersiz özelliklere sahip olup, düşük tedarikli ancak ileri teknolojideki geniş uygulamaları nedeniyle dünyada kritik bir kaynaktır. Skandiyum, yerkabuğunda olağanüstü derecede seyrek olmasına rağmen sıklıkla dağılmıştır ve cevher yatakları oluşturmaz. Bununla birlikte, skandiyum zaman zaman magmatik, hidrotermal veya süpergen yatakları oluşturacak şekilde yoğunlaşmıştır. Magmatik yatakların, küresel skandiyum kaynaklarının yaklaşık %90'ını oluşturduğu tahmin edilmektedir; burada skandiyum, mafik-ultramafik oluşumlarda öncelikle klinopiroksen ± amfibolde içermektedir. Skandiyumun hidrotermal zenginleşmesi genellikle kuvars damar sistemlerinde W-Sn mineralizasyonu ile ilişkilidir. Süpergen yatakları esas olarak mafik-ultramafik protolitlerin ve deniz tortusu içeren yatakların aşınmasından oluşan regolit içeren yataklardan oluşur. Skandiyumun magmatik zenginleşmesi, bu farklı Sc yatak türlerinin çoğunu oluşturmak için gereklidir. Susuz verimli spinel peridotitlerin kısmi erimesi, Sc açısından zengin birincil eriyikler üretebilirken, granat peridotitlerden türetilen eriyikler genellikle düşük Sc konsantrasyonlarına sahiptir. Kısmi erime sırasında suyun dahil edilmesi, ilkel eriyiklerdeki Sc konsantrasyonlarını arttırmayabilir, ancak fraksiyonel kristalleşme sırasında yüksek su içeriği, ortopiroksenin kristalleşmesini ve ortopiroksen tarafından Sc süpürülmesini yeterince bastırabilir. Böylece Sc, eriyiklerde zenginleştirilebilir ve ardından klinopiroksen ve amfibolde konsantre edilebilir. Sulu mafik-ultramafik eriyiklerin üretilebildiği dalma-batma ortamı, Sc açısından zengin Alaska tipi mafik-ultramafik sokulumlar gibi Sc yataklarını araştırmak için muhtemelen uygun bir konumdur. Tropikal ve subtropikal iklim gibi uygun süpergen koşulları altında, regolit içeren Sc yatakları, Sc açısından zengin bu mafik-ultramafik komplekslerin hava etkisiyle aşınması sonucu gelişebilir [9].

2.1. Skandiyum yataklarının sınıflandırılması

Sc yataklarının sistematik bir sınıflandırması, metalojenezin daha iyi anlaşılması için temel teşkil etmektedir, ancak Sc'nin doğada yaygın fakat dağınık oluşumu, onu kesin bir sınıflandırma için zorlaştırmaktadır. İlk çalışmalarda, Sc yatakları endojenetik ve eksogenetik olarak ikiye ayrılmıştı, sırasıyla Dünya'nın iç kısmında ve Dünya yüzeyinde meydana gelen zenginleşme süreçlerine atıfta bulunarak. Ancak bu sınıflandırma yeterince

kapsamlı olamamıştır. Daha sonraları, Sc yatakları için magmatik, hidrotermal ve süperjen yataklar olarak zenginleştirme süreçlerine dayalı yeni bir sınıflandırma şeması ortaya konmuştur (Tablo 8). Cevher tenörleri, farklı Sc yatak türleri arasında (ve ayrıca ülkeler arasında benimsenen farklı standartlar nedeniyle bölgeler arasında) büyük farklılıklar gösterir. Ortalama Sc konsantrasyonu >60 ppm olan magmatik kayalar Sc yatakları olarak kabul edilebilir. Lateritlerin Sc kesme dereceleri, Çin'deki Shazi yatağında 33 ppm, Avustralya'daki Lucknow yatağında 70 ppm ile Avustralya'daki Syerston-Flemington yatağında 300 ppm arasında değişmektedir [9].

Tablo 8. Skandiyum Yatakları Sınıflandırması [9].

Skandiyum yatakları	Magmatik	Mafik-ultramafik sokulumlar
		Karbonatit ve alkalin kayaç kompleksleri
		Ferrodiyorit
		Granitik pegmatit
	Hidrotermal	W-Sn içeren kuvars damarları
	Süperjen	Mafik- ultramafik kayalardan oluşan regolit
		Karbonatitlerden oluşan regolit
		Deniz dibi çökelleri

2.1.1. Magmatik cevher yatakları

Pek çok Sc yatağı, Sc açısından zengin klinopiroksenit ± hornblendit mafik-ultramafik oluşumlarda, özellikle Rusya'daki Ural Dağları'ndakiler gibi Alaska tipi mafik-ultramafik oluşumlarda bulunmaktadır (toplu Sc konsantrasyonu 75-135 ppm;), Amerika'da Duke Island (54–110 ppm;) ve Dongwanzi (65–99 ppm), Gaositai (88–108 ppm) ve Zhongtiao (71-78 ppm). Bu sokulumlar genellikle wehrlit, klinopiroksenit ± hornblendit, monzonit ve gabro ile çevrelenmiş bir dünit çekirdeğinden oluşur . Gabro sıklıkla diğer ultramafik kayalarla keskin temaslar göstermesine rağmen, farklı litolojiler arasındaki genetik ilişkiler hala belirsizdir . Baskın Sc-barındırıcı mineraller klinopiroksen ve amfiboldür ; ancak Sc içerikleri literatürde nadiren rapor edilmektedir. Tipik Alaska tipi sokulumların

aksine, Çin'de monzogabro çekirdeği ve syenogabbro, gabro, manyetit ve olivin klinopiroksenitlerin ardışık dışa doğru kenarlarından oluşan zonlu, Sc açısından zengin bir mafik-ultramafik sokulum bildirilmiştir. Olivin klinopiroksenit ve syenogabbro arasındaki sınırlar kademelidir ve sürekli bir kristalleşmeyi akla getirir. Yapılan araştırmalar hem olivin hem de manyetit klinopiroksenitlerin, birbirine yakın kenetlenmiş klinopiroksen taneleri ve ara yer Fe-Ti oksitler + biyotit içeren kümülat yapısı sergilediğini göstermektedir. Klinopiroksen tanelerinin çoğu yarı öz şekilliden öz şekilliye kadar olup uzunlukları 0,5 ila 2 mm arasındadır ve bazen bu kristaller bileşimsel olarak zonludur. Klinopiroksen birincil Sc konakçısıdır ve Sc konsantrasyonu 57 ile 88 ppm arasında değişir.

Rusya'daki Kovdor karbonatit-foskorit kompleksi ve Kanada'daki Misery siyenitik girişi gibi skandiyum açısından zengin karbonatit ve alkali kaya kompleksleri de rapor edilmiştir. Bu komplekslerde çeşitli, Sc açısından zengin mineraller keşfedilmiştir, ancak zenginleşme mekanizmaları hala belirsizdir. Kovdor kompleksi, kalsiyo-karbonatitik damarların yoğun gelişimi ile dikey olarak zonlanmış bir boru şeklinde oluşur. Dikey zon, kalsit bakımından zengin fosforit ve fosforitle ilişkili karbonatitten oluşan bir iç bölge, manyetitçe zengin ve kalsitçe fakir fosforitten oluşan bir ara bölge ve az miktarda kalsit ve kalsit içeren birincil (apatit)-forsterit fosforitten oluşan bir dış bölgeden oluşur. Baddeleyit bu yataktaki başlıca Sc içeren mineraldir ve Sc konsantrasyonu dış zonda ~275 ppm'den orta zonda ~305 ppm'e ve ayrıca iç zonda ~700 ppm'e yükselir. Kalsiyo-karbonatitik dayklarda baddeleyitteki Sc içeriği 960 ppm'e ulaşabilmektedir. Önemli miktarlarda Sc içeren diğer mineraller arasında piroklor (130 ppm), zirkonolit (196 ppm), juonniit $[Ca Mg Sc(PO_4)_2(OH) \cdot 4H_2O]$ (82,930 ppm), ilmenit (261 ppm), geikielit $[MgTiO_3]$ (130 ppm), pirofanit $[MnTiO_3]$ (1473 ppm) ve kampelit $[Ba_6 Mg_3 Sc_8 (PO_4)_{12} (OH)_6 \cdot 7H_2O]$ (105,423 ppm) sayılabilir.

Kanada'daki Misery siyenitik sokulumu temel olarak iki birimden oluşur: erken dönem ferrosyenit ve geç felsik siyenit. Ferrosyenit, fayalit, hedenbergit, ferropargasit ve Ti açısından zengin manyetit dahil olmak üzere hacimce %50'ye kadar ferromagnezyen mineralleri içermektedir. Aynı zamanda hacimce %1-2 oranında birincil zirkon ve florapatit içermektedir. Felsik siyenit esas olarak fayalit, hedenbergit, ferropargasit ve Ti açısından zengin manyetit dahil olmak üzere K-feldspat ve minör ferromagnezyen minerallerini (~%5 hacim) içermektedir. Yüksek Sc bolluğu yalnızca ferrosyenitte, dereceleri 150 ila 300 ppm arasında değişen ancak yerel olarak 1000 ppm'e

ulaşan skandiyum çoğunlukla hedenbergitik klinopiroksen içerisinde genel olarak 800 ppm konsantrasyonunda bulunmaktadır. Ferrosyenitteki Sc mineralizasyonu nun nedeni hala bilinmemektedir ve bu muhtemelen metasomatize olmuş alt kabuktan türetilmiş NTE-Nb-Zr zenginleşmesiyle ilişkilidir.

Genel olarak Sc'nin Fe ile büyük bir yakınlık gösterdiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, Fe'ce zengin magmalara genellikle Sc'nin zenginleşmesi eşlik etmemektedir. Yukarıda bahsedilen ferrosyenitin dışında, Sc açısından zengin olduğu bildirilen tek ferrodiyorit, ortalama 163 ppm tenörlü 13,4 Mt cevher içeren Finlandiya'nın Kiviniemi kentindedir. Sc içeren mineraller esas olarak amfibol, klinopiroksen ve apatittir . Apatitte yüksek Sc konsantrasyonu fark edilmekle birlikte (692-739 ppm), zenginleşme mekanizması hala gizemini korumaktadır. Orta seviye sokulumlar genellikle düşük Sc konsantrasyonlarına sahiptir, çünkü gelişmiş magma, fraksiyonel kristalleşme sırasında mafik minerallere temizlendikten sonra Sc'de tükenmektedir. Her ne kadar birincil magmatik yapılarda yoğun yeniden kristalleşme ve daha sonra üst baskı gözlenmiş olsa da Sc'ce zengin minerallerin Sc'ce zengin zirkonla (86-230 ppm,) birlikteliği, bu yatakta Sc'nin magmatik kökenine işaret etmektedir.

Granit pegmatit ve aplitde , Norveç'teki Evje-Iveland ve Tordal yatakları, Madagaskar'daki Befanamo yatağı, ABD'deki Crystal Mountain yatağı, İtalya'daki Baveno ve Cuasso al Monte yatakları ve Hagendorf gibi Sc zenginleşmeleri zaman zaman gözlemlenmektedir. Almanya'nın Pleystein eyaleti ayrıca Çin'in güneybatısındaki Yunnan Eyaleti (örneğin, Yingjiang bölgesi) ve Rusya'nın Kola yarımadasında da Sc açısından zengin pegmatit seyrek olarak dağılmaktadır. Bu pegmatitlerin geniş anlamda bölgesel mafik kayalarla ilişkisi vardır ; örneğin Evje-Iveland'da, Sc açısından zengin pegmatit, bantlı amfibol gnays , gabroik amfibolit ve metadiyorit içine girmektedir. Tordal'da, Sc bakımından zengin pegmatitlerin gnaysik bir temel üzerinde geliştiği ve yerel olarak amfibolit (yeşiltaş), riyolit tuf, hornblend-biyotit gnays, porfirik gnays ve bir dizi mafik, orta ve asit sokulumları ile birleştiği görülmektedir. Crystal Mountain'da ise pegmatit metagabroya girmiştir. Thortveitit $[(Sc, Y)_2 Si_2O_7]$ ve bazzit $[Be_3 (Sc, Al)_2 Si_6 O_{18}]$ bu pegmatitlerde en yaygın ve bol Sc içeren minerallerdir, ancak bunların dağılımları son derece düzensizdir. Bu durum, Sc minerallerinin tüm serideki 400'den fazla dayk arasında yalnızca birkaç pegmatitik daykta gözlemlendiği Evje-Iveland'daki örnekte iyi bir şekilde gösterilmektedir. Kaskandit $[Ca (Sc, Fe) Si_3 O_8 (OH)]$, jervisit $[(Na, Ca, Fe) (Sc, Mg, Fe)Si_2 O_6]$, skandiobabingtonit $[Ca_2 (Fe^{2+}, Mn)$

ScSi₅O₁₄(OH)], iksiolit [(Ta, Nb, Sn, Mn, Fe)₄O₈], piroklor [(Na,Ca)₂Nb₂O₆(O,OH,F)], kolbekit [Sc(PO₄)₂·2H₂O] ve bazı isimsiz Zr-Sc mineralleri, Sc açısından zengin bu pegmatit ve aplit içindeki diğer Sc içeren minerallerdir, ancak oluşumları genellikle nadirdir. Özel bir durum olarak, Sc'nin esas olarak 30-440 ppm Sc konsantrasyonuna sahip biyotitte barındırıldığı Çin'deki Yingjiang madeni gösterilebilir (Tablo 9) [9].

Tablo 9. Magmatik Yataklar [9].

Magmatik Yataklar					
No	Bölge	Ülke	Rezerv (ton)	Tenör (ppm)	Anakaya
1	Mouding	Yunnan, Çin	470	40–72	Klinopiroksenit
2	Lajisan	Çinghay, Çin	-	> 50	Klinopiroksenit
3	Dük Adası	Alaska	2.673.060	54–110	Klinopiroksenit
4	Ural Dağları	Rusya	1.914.607	75–135	Klinopiroksenit
5	Dongwanzi	Çin	24.817	65–99	Klinopiroksenit
6	Gaositai	Çin	7.595	88–108	Klinopiroksenit
7	Çelan	Amerika	859.320	61–97	Klinopiroksenit
8	Tiema	Hebei, Çin	> 100.000	> 60	Hornblendit
9	Wang Nam Khiao	Tayland	-	93–115	Hornblendit
10	Zhongtiao	Çin	-	71–78	Hornblendit
11	Sunjialing	Gansu, Çin	162	69	Hornblendit
12	Kiviniemi	Finlandiya	2.184	163	Ferrodiorit
13	Misery Gölü	Quebec, Kanada	-	> 150	Ferrosyenit
14	Kovdor	Kola Yarımadası,	274	-	Foskorit-
15	Evje-lveland	Norveç	-	-	Pegmatit
16	Tørdal	Norveç	-	-	Pegmatit
17	Befanamo/Berere	Madagaskar	-	-	Pegmatit
18	Kristal Dağ	Montana, ABD	-	-	Pegmatit
19	Baveno ve Cuasso al Monte	İtalya	-	-	Pegmatit
20	Yingjiang	Yunnan, Çin	-	-	Pegmatit
21	Kumir	Altay, Rusya	4	50–2.400	Alaskit

2.1.2. Hidrotermal cevher yatakları

Hidrotermal süreçler, bazı hidrotermal damar sistemlerinde Sc zenginleşmesinin gösterdiği gibi Sc'nin harekete geçirilmesinde ve birikmesinde rol oynayabilmektedir. Sc³⁺ hidrotermal akışkanlarda OH ve F gibi sert ligandlarla kompleks oluşturma ve taşıma için uygun olan yüksek bir kimyasal sertliğe sahiptir. Sc'nin hidrotermal akışkanlardaki davranışı hala belirsiz olmasına rağmen, hidrotermal Sc zenginleşmesi genellikle Güney Çin'in Nanling bölgesi gibi bölgesel W-Sn-(Nb-Ta) mineralizasyonu ile ilişkilidir. Almanya'nın Erzgebirge bölgesi, Nanling bölgesi dünyanın en önemli W-Sn metalojenik bölgesidir ve Baishishan, Dangping, Xihuashan ve Yaogangxian yatakları gibi çok sayıda dünya standartlarında damar tipi W-Sn yataklarına ev sahipliği yapar. Bu yataklarda W-Sn içeren kuvars damarları başlıca kuvars, mika, kalsit, florit, wolframit, arsenopirit, kasiterit, pirit, kalkopirit ve stannitten oluşmaktadır. Skandiyum esas olarak wolframit ve kasiteritte bulunur. Örneğin, Dangping, Xihuashan ve Yaogangxian yataklarındaki wolframitin ortalama Sc içeriği sırasıyla 254, 463 ve 228 ppm'dir. Erzgebirge bölgesinde W-Sn içeren kuvars damarlarında wolframit ve kasiteritte Sc konsantrasyonları sırasıyla 8.800 ve 10.000 ppm'e ulaşmaktadır. Zirkon ve şelit de bu yataklarda az miktarda Sc barındırır.

Avusturya'daki Australpine Grobgnais kompleksinde W-Sn mineralizasyonu ile belirgin bir ilişki göstermeyen kuvars damarı içeren bir Sc yatağı rapor edilmiştir. Bu komplekste kuvars damarları esas olarak kuvars, muskovit, biyotit, lazulit, granat, klorit ve kloritoyidden oluşmakta olup Sc tenörleri 200 ppm'e kadar çıkmaktadır. Jeokimyasal korelasyonlara dayanarak baskın Sc içeren minerallerin pretulit [ScPO₄] gibi fosfatlar olduğu sonucuna varılmaktadır. Diğer olası hidrotermal Sc yataklarının Rusya'nın Kumir şehrinde ve Zhovti Vody'de, Ukrayna'da da rapor edildiği görülmektedir. Kumir yatağında Sc cevherleşmesi alaskit ile çevredeki tortul kayaçlar arasındaki dokanak zonlarında meydana gelir. Mineral toplulukları albit + turmalin + florit + sülfitten florit + biyotit + demir oksit + feldispat + tortveite kadar alaskitten yan kayaçlara doğru değişmektedir. Metasomatik kökenli tortveit ve turmalin bu yataktaki başlıca Sc içeren minerallerdir (Tablo 10) [9].

Tablo 10.Hidrotermal Yataklar [9].

Hidrotermal Yataklar					
No	Bölge	Ülke	Rezerv (ton)	Tenör (ppm)	Anakaya
1	Nanling	Hunan, Çin	–	–	Kuars damarı
2	Erzgebirge	Almanya	–	–	Kuars damarı
3	Austroalpin Grobgnais	Avusturya	–	<200	Kuars damarı
4	Zhovti Vody	Ukrayna	777	105	Amfibolit

2.1.3.Süperjen cevher yatakları

Superjen Sc yatakları esas olarak regolit ve deniz tortusu barındıran yataklardır. Son zamanlarda Avustralya'da, Yeni Kaledonya'da, Kuzeydoğu Arjantin'de regolit barındıran bir dizi yatak keşfedilmiştir. Küba, Dominik Cumhuriyeti ve Guizhou, Hunan, Yunnan ve Jiangxi Güney Çin'deki eyaletler, Batı Fildişi Sahili ve Gine Cumhuriyeti'nde de olasılıklar araştırılmaktadır. Sc açısından zengin deniz çökeltileri yakın zamanda Pasifik ve Hint Okyanuslarında keşfedilmiştir.

Regolitin barındırdığı Sc yataklarının çoğu, bazaltlar (örneğin Çin'deki Shazi yatağı; peridotitler (örneğin, Sc açısından zengin regolit) gibi mafik-ultramafik kayaların ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Yeni Kaledonya, Kuzeydoğu Arjantin; Alaska tipi sokulumlar (örn. Avustralya'daki Syerston-Flemington yatakları) ve ofiyolitik masif, bunun aksine genellikle granitoidlerden türetilen regolit bakımından zengin olan diğer NTE'ler, mafik-ultramafik kayaların ayrışması sırasında regolitteki skandiyum konsantrasyonları 4-10 kat zenginleşebilmektedir. Özellikle Alaska tipi sokulumlardan geliştirilen regolitlerde genellikle bazalt, peridotit ve ofiyolitlerden daha yüksek Sc içeriği sergilenir ve protolitteki Sc konsantrasyonunun süperjen cevher oluşumu üzerinde birinci dereceden bir kontrol olduğunu göstermektedir. Bu nedenle regolit içeren Sc yatakları,

Alaska tipi oluşumlar gibi Sc açısından zengin protolitleri yansıtmaktadır. Regolitin barındırdığı bu yataklarda Sc, ayrışma sırasında esas olarak klinopiroksen ve amfibolden salınır ve ilk olarak simektit içerisine daha sonra goetit veya hematit içerisine dahil edilmektedir. Bu nedenle Fe oksitler ve hidroksitler Sc zenginleştirmesinde önemli bir rol oynamaktadırlar. *K*-kenarlı X-ışını absorpsiyonu yakın kenar yapı spektrumları ile yapılan ileri çalışmalar, Sc'nin yüzey adsorpsiyonu ve yapısal birleşme yoluyla götit tarafından yakalanabileceğini ortaya koymaktadır. Sc içeriği düşük olduğunda adsorpsiyonun yapısal birleşmeden daha belirgin olması muhtemeldir. Sc'nin goetit veya hematite tercihli afinitesi karmaşıktır ve kristalizasyon fizikokimyasal koşulları, spesifik yüzey alanı ve farklı öncü mineraller gibi birçok faktörden etkilenebilmektedir.

Mafik-ultramafik sokulumların yanı sıra, Sc açısından zengin karbonatitler de uygun bir protolit olabilmektedirler. Tipik bir örnek, genel olarak üst limonitik katman ve alt limonitik-frankolitik (kuvars) katmana bölünebilen Rusya'daki Tomtor yatağıdır. Monazit, goyazit $[SrAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6]$, florensit $[(La,Ce)Al_3(PO_4)_2(OH)_6]$ ve ksenotim bu yataktaki ana Sc konakçılarıdır ve toplu Sc konsantrasyonu 65 ila 489 ppm arasında değişmekte ve ancak 1.297 ppm'ye kadar ulaşabilmektedir.

Son zamanlarda Pasifik ve Hint Okyanuslarının deniz çökeltlerinde, genellikle NTE'lerin anormal zenginleşmesiyle ilişkilendirilen (> 400 ppm) önemli miktarda Sc zenginleşmesi keşfedilmiştir. Sc-NTE açısından zengin çökelti, esas olarak kil boyutunda ve silt ila kum boyutunda tanelerden oluşmakta ve Sc zenginleşmesinin kökeni biyojenik olabilmektedir. Tortunun ortalama Sc derecesi ~ 60 ppm'dir, ancak rezerv çok büyük olabilir. Örneğin, Kuzey Pasifik Okyanusu'ndaki bir hedef bölgede 2.000-3.928 ton Sc tahmin edilmektedir (Tablo 11) [9].

Tablo 11.Süperjen yataklar [9].

Süperjen Yatakları					
No	Bölge	Ülke	Rezerv (ton)	Tenör (ppm)	Anakaya
1	Batı Kuzey Pasifik Okyanusu	153°30'~154°00'D; 21°58'K	>2.000	56	Derin deniz çökeltileri
2	Tomtor	Rusya	39.000	390	Regolit
3	Nyngan	Yeni Güney Galler, Avustralya	3.972	235	Regolit
4	Syerston-Flemington	Yeni Güney Galler, Avustralya	1.350	434	Regolit
5	Lucknow ve Kokomo	Queensland, Avustralya	1.055	169	Regolit
6	Yeni Kaledonya	Yeni Kaledonya	–	>100	Regolit
7	Şazi	Guizhou, Çin	1.747	49	Regolit

3. SKANDİYUM REZERV ve KAYNAK DURUMU

3.1. Dünya Rezervleri ve Kaynakları

Skandiyum nadiren konsantre miktarlarda oluşur ve genellikle ferromagnezyum rezervleri içeren kayalarda eser miktarda dağılmış halde bulunur. Dünya çapında yaklaşık 2 milyon ton skandiyum rezervi bulunmaktadır ve Çin toplam rezervlerin %27,5'ini oluşturmaktadır. Ancak rezervlerin çoğu teknik, ekonomik ve çevresel zorluklar nedeniyle kullanılamamaktadır. Bu nedenle skandiyumun saf formda ekstraksiyonu hem karmaşık hem de pahalıdır. Dünya çapında skandiyum, düşük konsantrasyonlarda ve oldukça karmaşık bir durumda 800'den fazla mineral çeşidinde ortaya çıkar. Önemli miktarlarda metal içeren (yani ağırlıkça %20'den fazla) skandiyum mineralleri tortveit ($\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), pretulit (ScPO_4) ve kolbekittir ($\text{ScPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [10].

3.1.1. Birincil Kaynaklardan Gelen Skandiyum

Önemli skandiyum cevheri yatakları ABD, Norveç, Avustralya, Çin, Rusya, Madagaskar, Kazakistan ve Ukrayna'da bulunmuştur. Skandiyum konsantrasyonu 20-50 ppm arasında olan herhangi bir kaynak, işletilecek cevher olarak değerlendirilebilir. ABD ve Kazakistan'da skandiyum kaynakları esas olarak alüminyum uranyum, zirkonyum ve tantal cevherleridir. Avustralya'da nikel laterit cevherlerinde bulunmaktadır. Çin, Rusya ve Ukrayna'da tungsten, demir ve kalay cevherlerinde skandiyum bulunurken, Madagaskar ve Norveç'te pegmatit kayalarında bulunmaktadır. Küresel olarak, skandiyumun ana kaynağı, dünyadaki en büyük NTE kaynağı ve ikinci en büyük skandiyum kaynağı olan niyobyum-nadir toprak elementi-demirdir (Nb-NTE-Fe). Çin'in İç Moğolistan bölgesinde bulunmaktadır ve küresel skandiyum üretiminin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Bayan Obo'da skandiyum, diğer NTE'lerin ve demir madenciliğinin bir yan ürünü olarak yeniden üretilmektedir. Bu nedenle ikincil skandiyum kaynağı olarak ta sınıflandırılabilir. Bayan Obo yatağının skandiyum içeriği çeşitli cevherlerde 26-110 ppm arasında değişmekte olup, NTE cevheri artıklarında 163 ppm skandiyuma ulaşmaktadır. Bayan Obo yatağındaki Scandium esas olarak aegirine'de barındırılmaktadır. Doğu Avustralya'da (Yeni Güney Galler ve Queensland) muhteşem skandiyum içeriğine sahip çok sayıda lateritik yatak vardır ve geçerli madencilik için değerlendirilmektedir. Avustralya'nın Yeni Güney Galler

kentindeki Nyngan yatağı için madencilik kira sözleşmesi imzalanmıştır. Bu yataklardaki lateritler, ultramafik ve mafik kayaçların yoğun hava şartlandırması nedeniyle oluşmaktadır. Bu kayalar, jeotitin adsorpsiyonu veya hematit yapısına katılmasıyla 100-400 ppm aralığında konsantrasyonlara sahiptir. Rusya'daki Zhovti cevher yatağı 105 ppm skandiyum derecesine sahiptir ve ana skandiyum içeren mineral olarak aegirin içerir. Rusya'daki en önemli ve en büyük skandiyum kaynağı Kovdor baddeleyit-manyetit-apatit yatağıdır. 420 tonluk skandiyum rezervi içerir ve cevherin tenörü 800 ppm skandiyumdur. Rusya'daki diğer önemli skandiyum kaynağı, dünyanın en büyük karbonatit yataklarından biri olan ve skandiyum da dahil olmak üzere 570 ppm'e kadar yüksek NTE konsantrasyonlarına sahip olan Tomtor'dur. Madagaskar ve Norveç'teki tortveit bakımından zengin pegmatitlerde yüksek skandiyum içeriği (%45) bulunur. Ayrıca Norveç'in Iveland-Evje bölgesinde skandiyum içeren pegmatitlerin yaklaşık 1000 ppm skandiyum içerdiği bildirilmektedir. Skandiyum yataklarının oluşumu kısmında verilmiş olan Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11' de skandiyumun diğer birincil kaynaklarından bazılarını göstermektedir [10].

3.1.2. İkincil Kaynaklardan Gelen Skandiyum (Madencilik Süreci ve Ömrünü Tamamlamış Ürünler)

Skandiyum, talepteki hızlı artış nedeniyle kritik bir metal olarak sınıflandırılmaktadır. Ekonomik açıdan karlı bir seçenek, skandiyumun, skandiyumla ilişkili cevher işleme birimlerinin atık akışlarından geri kazanılmasıdır. Skandiyum büyük oranda alüminyum cevherlerinde bulunur. Boksit, yüksek miktarda skandiyum içeren en yaygın alüminyum cevheridir. Alüminyum ekstraksiyonuyla ilişkili Bayer prosesi, boksit kalıntısındaki skandiyum konsantrasyonunun zenginleşmesiyle sonuçlanmaktadır. Boksitteki nadir toprak elementlerinin konsantrasyonu, menşei bölgelerine göre değişir. Son yıllarda kırmızı çamurdaki skandiyum konsantrasyonundan geri kazanımı için yapılan çalışmalar oldukça yaygındır. Bu çalışmalar sonucunda kırmızı çamurdan, kaynaklar, konsantrasyon ve skandiyumun geri kazanımı hakkında ayrıntılı bir tartışma ortamı doğmuştur. Kırmızı çamurda, nadir toprakların yaklaşık konsantrasyonu 500-1700 ppm aralığında değişirken, skandiyum konsantrasyonları 130-390 ppm arasında değişmektedir. Kırmızı çamurda bulunan skandiyumun tamamı geri kazanılabilirse, o zaman 6.600-20.400 ton üretim mevcut olacaktır. Boksit kalıntısında çeşitli nadir toprak metalleri mevcuttur. Bununla birlikte, varlık bakımından maksimum konsantrasyon, atıkta bulunan diğer nadir toprak metalleriyle karşılaştırıldığında %95 civarında olan skandiyuma aittir. Bununla birlikte, demir, alüminyum vb. gibi diğer metallerin büyük konsantrasyonlarda bulunması,

hidrometalurjik prosesleri engellemekte ve bu kadar yüksek konsantrasyonların geri kazanılmasını zorlaştırmaktadır [10].

Skandiyumun önemli bir kaynağı kömür/kömür yanma yan ürünleridir (coal combustion products) (CCP'ler). CCP'ler yalnızca Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllık 115 milyon ton oranında birikmekte ve 1000 ppm'e kadar nadir toprak metalleri (NTE'ler) ile birlikte ortalama 36-70 ppm skandiyum konsantrasyonu içermektedir. Teknoekonomik analizler, skandiyumun mevcut fiyatlarla toplam NTE değerinin %90'ından fazlasını oluşturması nedeniyle, bu atık kalıntılarında skandiyum ekstraksiyonunun, NTE'lerin endüstriyel olarak uygulanabilir şekilde geri kazanılması için kritik öneme sahip olacağını ileri sürmektedir. Düşük konsantrasyonlarda skandiyum ayrıca molibden, tungsten, titanyum, tantal, itriyum, zirkonyum vb. gibi geçiş ve nadir toprak elementleriyle birlikte bulunmaktadır. Bastnazit ve monazit gibi nadir toprak mineralleri 20-50 ppm aralığında skandiyum içermektedir. Skandiyum ayrıca Rusya, Kazakistan, Avustralya, Namibya ve Kanada'da uranyum cevherlerinde uraninit olarak bulunmaktadır. Ayrıca Çin'in Panzhihua kentinde bulunan magnetovana-ilmenit benzeri titanyum cevherinden %0,04 kadar yüksek bir konsantrasyonda geri kazanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırması tarafından hazırlanan bir rapor (Mineral emtia özetleri, 2019), dünya genelinde yıllık olarak yaklaşık 5.400.000 metrik ton ilmenit ($FeTiO_3$) ve 750.000 metrik ton rutil (TiO_2) çıkarıldığını belirtmektedir. Bunun dışında, önemli titanyum cevherleri Hindistan, Norveç, Avustralya, Kanada ve Güney Afrika'da bulunmaktadır ve bu da 96-194 ton aralığında potansiyel küresel skandiyum (Sc_2O_3) verimine karşılık gelmektedir. Tungsten, nikel ve kobalt cevherlerinde de dikkate değer miktarda skandiyum bulunmaktadır. Küba, Dominik Cumhuriyeti ve Yeni Kaledonya'dan gelen nikel laterit cevherleri, 100 ppm'ye kadar yüksek skandiyum konsantrasyonuna sahiptir ve olası bir kullanım kaynağıdır. Yukarıda belirtilen kaynakların dışında, elektronik ve elektrik atıkları, belediye atıkları, uçucu kömür külü, fosfor-alçı taşı ve fosfat kayaları gibi tanımlanmış birçok yeni potansiyel kaynak ve geri kazanılabilir miktarlarda karbonat içerdiği tespit edilen çok daha fazlası bulunmaktadır. Bu kaynakların kullanımındaki temel sorun metal konsantrasyonundaki düzensizliktir. Örneğin, e-atığın skandiyum kaynağı olarak kullanılması, atığın toplanmasını ve ayrıştırılmasını gerektirir ki bu da ek bir zorluktur. Ayrıca fosfor rezervlerinin skandiyum kaynağı olarak kullanımı, yetersizlikleri nedeniyle kısıtlanmaktadır (Tablo 12) [10].

Tablo 12. İkincil Skandiyum Kaynakları [9].

İkincil Sc Kaynakları [9]					
No	Bölge	Ülke	Rezerv (ton)	Tenör (ppm)	Anakaya
1	Bayan Obo	İç Moğolistan, Çin	100	14.000	NTE madenciliği
2	Panzhuhua	Şıçuan, Çin	–	25.232	V-Ti manyetit madenciliği
3	Alcan, Alpart, Rerere	Jamaika	–	154	Boksit madenciliği
4	Parnassos-Ghiona	Yunanistan	–	98	Boksit madenciliği
5	Guizhou Al tesisi	Guizhou, Çin	–	70	Boksit madenciliği
6	Yaklinsk	Sibirya, Rusya	–	612	Kömür külü
7	Karajira	Kazakistan	–	80	Kömür külü
8	Bayanteeg	Moğolistan	–	78	Kömür külü
9	Zapadno-Sibirskiy	Sibirya, Rusya	–	150	Kömür külü

3.2. Türkiye Rezervleri ve Kaynakları

Yapılan literatür çalışmasında skandiyumla ilgili Türkiye’de herhangi bir rezerv ve kaynak bilgisine ulaşılamamıştır.

4. SKANDİYUM ÜRETİM DURUMU

4.1. Dünyada Üretim Miktarı

Çin, küresel satış için bilinen en büyük skandiyum ürünleri üreticisidir. Rusya, otuz yıldan uzun süredir aktif olan, özellikle Avrupa olmak üzere küresel pazarlara ikinci önemli tedarikçi olmuştur. Pazara son girenler arasında Sumitomo Mining (Filipinler'de Taganito HPAL Nikel) ve Rio Tinto (Quebec'te RT-IT) yer almaktadır. Bu yeni skandiyum yan ürün projelerinin her birinin, pazarlar skandiyum talep ederse ve fiyatlar genişlemeleri desteklese üretimi genişletebileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bugün üretilen tüm skandiyum, üretimde özel bir skandiyum madeni olmadan, başka bir maden veya mineral işleme faaliyetinin yan ürünüdür. SCY (Scandium International Mining Corp), küresel oksit üretimini yılda yaklaşık **30 ton** olarak tahmin etmektedir [11].

Yaygın Skandiyum Ürün Formları. Skandiyum genellikle oksit olarak fiyatlandırılır ve genellikle +%99 saflıkta belirtilir, elektrik uygulamaları için tipik olan %99,9 dereceleri vardır. Fiyatlandırma bugün alıcılar ve satıcılar arasında gizlice müzakere edilir ve saflıktan, mevcut envanterlerden ve bireysel satışlardaki parti büyüklüğünden çok etkilenir. Fiyat teklifleri bu üç parametreye göre %100'den fazla değişebilir.

Müşteriler tarafından belirlenen skandiyum ürün formu, uygulamalarına bağlıdır ve üç standarda uygundur:

- **Oksit tozları** bazı teknik uygulamalarda, genellikle daha yüksek derecelerde gereklidir.
- **Saf metal**, skandiyum oksitten daha çok tercih edilebilir, ancak üretimi çok daha maliyetli ve zordur. Sc metalinin temini zor olabilmektedir.
- **Scandium ana alaşımı**, alüminyum alaşımı üretimi için tercih edilen formdur. Bu ürün formu (%2 Al-Sc), nihai alüminyum alaşımını yapmak için

doğrudan erimiş bir alüminyum pota içine sokulabilen %2 skandiyum içeren bir alüminyum külçesidir.

Skandiyumun maden üretimi ve metal işleme işlemleri genellikle ilk geri kazanım kaynağında bir skandiyum konsantresi veya toz oksit formunda olmaktadır. Pazarlanabilir saflıkta elde edildiği her yerde, ilk ürün formu oksit olacaktır ve bu doğrudan satılabilir veya daha sonra alt akış müşteri satışı için skandiyum meteline veya skandiyum ana alaşımına yükseltilebilmektedir [11].

Ülkelere göre Skandiyum üretim değerleri bilinmediğinden veya hiçbir istatistik kuruluşunda beyan edilmediği için, aşağıdaki tabloda NTE üretim miktarları verilmiştir.

Tablo 13. Dünya'da ki NTE Üretim Değerleri [12].

NTE Üretim (ton)		
Ülke	2022	2023
Çin	210.000	240.000
ABD	42.000	43.000
Burma	12.000	38.000
Avustralya	18.000	18.000
Tayland	7.100	7.100
Hindistan	2.900	2.900
Rusya	2.600	2.600
Madagaskar	960	960
Vietnam	1.200	600
Brezilya	80	80
Malezya	80	80
Toplam	300.000	350.000

4.2. Türkiye’de Üretim Miktarı

Yapılan literatür çalışmalarında Türkiye’de skandiyum üretimi bilgisine ulaşılamamıştır.

4.3. Dünyada Üretim Yapan Şirketler

1. Hunan Nadir Toprak Metal Malzemeleri Enstitüsü
2. MCC Grup
3. Sunrise Enerji Metalleri
4. Hunan Oriental Scandium Co., Ltd.
5. Henan Rongjia skandiyum vanadyum Teknolojisi A. Ş. [13]

4.4. Türkiye’de Üretim Yapan Şirketler

Yapılan literatür çalışmasında Türkiye’de skandiyum üretimi yapan herhangi bir şirket bilgisine ulaşılamamıştır

4.5. Uluslararası Birlikler (Kuruluşlar)

Skandiyum Uluslararası Madencilik Şirketi (SCY)

Scandium International Mining Corp. (SCY), teknoloji odaklı maden projelerinden oluşan bir portföy oluşturmaktadır. Projeleri, diğer teknoloji uygulamalarının yanı sıra, daha verimli ve daha yeşil bir küresel ulaşım sektörünün ihtiyaçlarına yöneliktir.

Hedef çalışmaları teknoloji odaklı pazarlar üzerinedir. Metaller ve teknoloji, taşımacılığın karbondan arındırılması ve elektrifikasyonuna yönelik küresel hareketin temel kolaylaştırıcılarıdır. Bu karışımdaki metaller genellikle potansiyel pazar fırsatı açısından yetersiz tedarik edilmektedir. Lityum-iyon pil teknolojisi bu evrimin ön saflarında yer almakta ve kendisi de hızla gelişmektedir. Bu geçişte önemli bir rol oynayabilecek küçük metallerin yenilikçi ve ekonomik olarak geri kazanılmasına yönelik çalışmaların planlanması şirketin hedeflerinden biridir [14].

5. SKANDİYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Skandiyum, zor ekstraksiyonu ve zayıf dağılımı nedeniyle hem pahalı hem de nadir bir metal olarak kabul edilmektedir. Cevher işleme yan ürünü olarak üretilmekte ve genellikle atık sınıflarda, atıklarda, cüruflarda ve kalıntılarda bulunmaktadır. Bununla birlikte, kirletici metallere karşılaştırıldığında skandiyumun konsantrasyonu çok düşük olduğundan, geri kazanımı zorlu, pahalı ve çevreye zararlı hale gelmektedir. Buna ek olarak, yeşil teknolojilerde yeri doldurulamaz bir uygulama olan geri dönüşüm, oranı düşük olmakla birlikte, sınırlı madencilik bölgelerine rağmen yüksek ekonomik öneme sahiptir. Bu nedenle yüksek verimli geri kazanıma odaklanmayı önemli kılmaktadır. Aynı zamanda Brezilya, ABD ve Avrupa Birliği tarafından da kritik metal olarak anılmaktadır.

Skandiyum, yer kabuğunda en çok bulunan metallere biridir, ancak dağınık yapısı nedeniyle madencilik ve ekstraksiyon için uygun değildir. Skandiyumun %40'ın üzerinde konsantrasyona sahip bir cevher olduğu yalnızca Norveç'te rapor edilmiştir.

Skandiyum yer kabuğunda bol miktarda bulunmasına rağmen cevher oluşturan bir metal değildir. Bu nedenle, birincil kaynak olarak nadiren 100 ppm' in üzerindeki konsantrasyonlarda meydana gelmekte ve bu da ekstraksiyonu nu ekonomik açıdan çekici kılmamaktadır. Dolayısıyla bu döngünün kırılması için yeni kaynaklara ve geri kazanım süreçlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

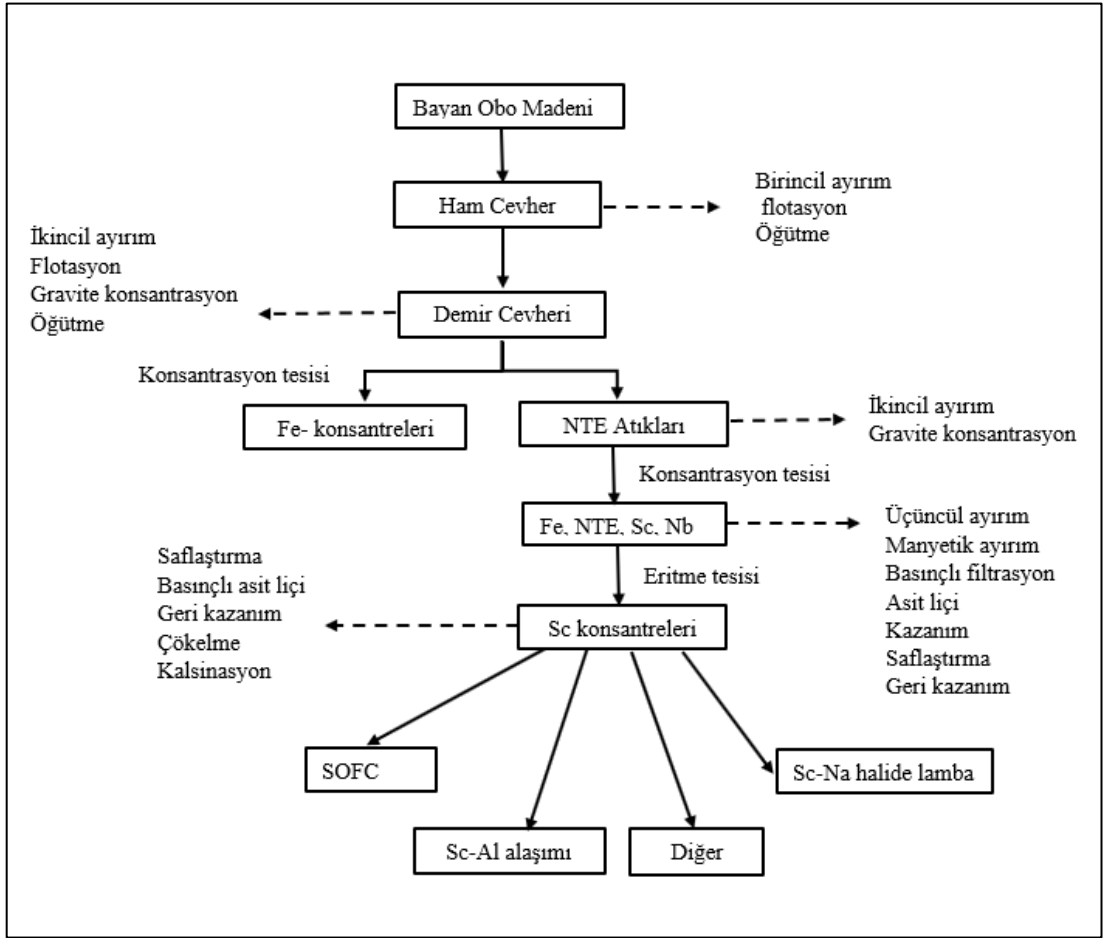
Skandiyumun ayrılması ve farklı kaynaklardan geri kazanılması üzerine çok az inceleme makalesi yayınlanmıştır. Skandiyumun geri kazanım performanslarının yanı sıra ekstraksiyon mekanizmalarına odaklanılarak sinerjistik solvent ekstraksiyonu ve şelatlayıcı ekstraktantlarla solvent ekstraksiyonu yoluyla skandiyumun ayrılması ve saflaştırılması incelenmiştir. Ayrıca skandiyumun geri kazanılması için iyon değişimi ve sıvı membran ekstraksiyonu da tartışılan konular arasındadır. Farklı ekstraksiyon sistemlerinde skandiyumun ekstraksiyon kimyası ayrıntılı olarak incelenmiş, skandiyum cevherleri, kalıntılar, atıklar ve atık sınıflar da dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan metalurjik yoluyla skandiyum geri kazanımı gözden geçirilmiş, skandiyumun küçük bir element olarak geri kazanılmasına yönelik süreçlerin seçimine odaklanılmış ve skandiyum geri kazanım süreci üretimin ana akış şemasına dahil edilmiştir. Ayrıca farklı kaynaklardan skandiyum

ekstraksiyonunu da incelenmiştir. Bu incelemelerde asıl odak noktası çevre dostu işleme ve temiz teknolojiler olmuştur. Hem endüstriyel hem de laboratuvar sistemlerinde cevherler, elektronik atıklar (e-atık), su, tortu, toprak ve bitkiler gibi farklı kaynaklardan skandiyumun ayrılması, saflaştırılması ve ön-deriştirilmesine ilişkin araştırmalarda son zamanlarda kaydedilen bazı ilerlemelerde olmuştur. Bununla birlikte, skandiyumun çeşitli kaynaklardan, özellikle de madencilik atıklarından/e-atıklardan geri kazanılmasındaki ilerlemelere ilişkin bilgiler gerektiği gibi tartışılmamaktadır. Ayrıca, arıtma prosesindeki çeşitlilik ve bu metodolojilerin çevresel etkileri ve metalurjik kazançları açısından ilgili beklentileri ve sonuçları gerektiği gibi tartışılmamıştır. İkincil kaynaklardan skandiyumun geri kazanılması için farklı metalurjik işlemler kullanılmıştır. Böyle bir seçenek, farklı türdeki atıklardan farklı metallerin geri kazanılmasına yönelik geleneksel bir yöntem olan pirometalurjidir. Ancak yüksek enerji tüketimi ve toksik maddelerin üretimi pirometalurjinin dezavantajlarıdır. Son zamanlarda, ikincil kaynaklardan skandiyumun geri kazanılması için kullanılan başlıca teknolojiler, hidrometalurjik işlemlere dayanmaktadır. Hidrometalurjik prosesler, maliyet etkinliği, zehirli gaz ve toz oluşumunun azaltılması, operasyonel seçicilik, prosedürün basit kontrolü ve etkinliği nedeniyle endüstriyel malzeme atıklarının arıtımı için uygun alternatiflerdir. Pirometalurjiyle karşılaştırıldığında, hidrometalurjik işlemlerde düşük sıcaklıklar kullanılır ve daha öngörülebilir ve kontrol edilebilirdir, bu da onları daha çevre dostu kılmaktadır. Bu nedenle, mevcut incelemelerin ana amacı, çeşitli kaynaklardan, özellikle de madencilik atıklarından/e-atıklardan skandiyumun geri kazanılmasına ilişkin hidrometalurjik süreçlerdeki büyümenin net bir portresini vermektir [10].

5.1. Skandiyum Geri Kazanımına İlişkin Olası Akış Şemaları

Cevherinden veya diğer metal ekstraksiyon işlemlerinin yan ürünlerinden geri kazanılan herhangi bir metali elde etmek ve saflığını arttırmak için genellikle farklı işlemler gerekmektedir. Madencilikten, en saf formunun çıkarılmasına kadar olan temel adımlar, serbest bırakma, ayırma/yükseltme ve saflaştırmayı içermektedir. Hidrometalurji de küçük elementler için metal işlemede en yaygın kullanılan işlemler arasında liç, solvent ekstraksiyonu, iyon değişimi, çökeltme ve elektrokimyasal rafinasyon yer almaktadır. İşlemlerin seçimleri, işlenen cevherin türüne bağlıdır. Ancak klasik yaklaşıma ek olarak farklı seçenekler de geliştirilmiştir. Klasik yaklaşımda, Rusya'daki uranyum cevherlerinden skandiyum elde edilmekteydi. İşlem, düşük konsantrasyonlu sülfürik asit liçi ile başladı, ardından uranyumun çıkarılması için kerosen içerisinde 0.1 M dodesil fosforik asit solventi ile solvent ekstraksiyonu yapıldı. Bu, organik fazda konsantre skandiyum, titanyum ve

toryumun birikmesine yol açarak solvent zehirlenmesine yol açtı. Organik çözücünün HF asit ile etkileşimi sonucu, skandiyum-toryum florür kekinin çökmesine yol açmıştır. Daha sonra kek, skandiyum hidroksite dönüştürülmek üzere NaOH ile iki kez birleştirildi. Ham skandiyum hidroksit, toryum, titanyum, uranyum vb. yabancı maddeleri çıkarmak için tekrar hidroklorik asitle birleştirilmiştir. Çökelti çıkarıldıktan sonra, skandiyum oksalat çökeltisini geri kazanmak için süzüntü kontrollü oksalik asitle daha da işlenmiştir. Skandiyum oksalat keki daha sonra skandiyum oksit oluşturmak için 800 °C'nin altında kalsine edilmiştir. Elde edilen oksidin saflığını arttırmak için hidroklorik asit içerisinde daha da çözülmüş ve amonyakla ayrıştırılmıştır. Oluşan skandiyum oksit, %99,5 saflıkta skandiyum oksit üretmek üzere tekrar 700°C'de kalsine edilmiştir. Bu işlem, aşındırıcı ve zehirli olan, toksik yan ürünlerin oluşmasına ve salınmasına neden olan reaktifleri uygulamaktadır. Dolayısıyla, bu prosesin büyük miktarlarda tehlikeli kimyasallar kullanması ve toksik ürünler üretmesi nedeniyle çevresel yüke katkıda bulunduğu açıkça anlaşılabilir. Ancak, uranyum cevherlerinden klasik yaklaşıma göre skandiyumun geri kazanımı konusunda herhangi bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yapılmadığından göstergelerle doğrudan bir ilişki kurulamaz. Son zamanlarda Bayan Obo Madenlerindeki skandiyum üretiminin çevresel etkisi tartışılmıştır. Şekil5, Sc₂O₃ ün geri kazanılmasında takip edilen süreçleri göstermektedir. Süreç Bayan Obo Madeninin NTE atıklarından, cevher madenciliğinden son skandiyum ürünlerine kadar incelenmektedir. Ayrıca demirin, diğer NTE'lerin, skandiyumun ve niyobyumun birincil, ikincil ve üçüncül ayrımını içermektedir. Diğer ana safsızlıklar ayrıldıktan sonra skandiyum, basınçlı filtrasyon, basınçlı asit liçi, ekstraksiyon, geri ekstraksiyon, kalsinasyon, çökeltme ve çok daha fazlası gibi işlemlerle daha da konsantre edilmekte ve saflaştırılmaktadır. 1 kg Sc₂O₃ üretiminin çevresel etkisi, bazıları Ekotoksisite, İnsan Toksisitesi olan potansiyel çevresel göstereyi içeren kimyasalların ve diğer çevresel etkilerin azaltılması ve değerlendirilmesine yönelik araçlar yardımıyla analiz edilmiştir. Değerlendirmeden, sürecin büyük bir çevresel yüke sahip olduğu, çıkarma ve ayırmanın en büyük katkıyı sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, skandiyumun cevherin yalnızca %0,01'ini oluşturduğu mevcut durumda, diğer NTE'lerin ve demirin çıkarılması, malzemenin yanı sıra büyük miktarda enerji de gerektirmektedir. Bu nedenle, yeni potansiyel skandiyum kaynaklarının belirlenmesinin yanı sıra, bu yükü azaltabilecek teknolojinin geliştirilmesi de çok önemlidir. Zaman ilerledikçe, kaynakta mevcut olan maksimum skandiyumu geri kazanma çalışmalarının yanı sıra çevre sorunlarının üstesinden gelmek için yeni yöntemler geliştirilmiştir ve önerilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde skandiyumun geri kazanılması için belirlenen tüm olası alternatifler tartışılmaktadır [10].



Şekil 5. Bayan Obo Madeni Akım Şeması [10].

5.2. Skandiyum Geri Kazanımı İçin Ayırma Süreçleri

Skandiyum diğer metallerin cevherlerinde %0,002-0,005 civarında konsantrasyonlarda olduğundan, geri kazanım süreçleri hem karmaşık hem de pahalı hale gelmektedir. Skandiyumun geri kazanılması için kullanılan başlıca işlemler, ekstraksiyon, adsorpsiyon filtrasyonu, iyon değişimi, solvent ekstraksiyonu vb. gibi doğası gereği hidrometalurjiktir. Bu süreçlerin akışı, ilk kaynağa bağlıdır ve sürecin çoğu, liç ile başlamakta ve bunu bir dizi farklı hidrometalurjik proses takip etmektedir. Bu nedenle, skandiyumun nadir bulunurluğu, karmaşık geri kazanım süreçleriyle birleştiğinde, üretim maliyetine katkıda bulunarak onu oldukça pahalı hale getirmektedir. Artan maliyete rağmen, otomotiv, optik, elektronik ve ilgili endüstrilerdeki modern teknolojilere yönelik skandiyum talebi artmaktadır. Bu nedenle skandiyumun geri kazanılması ve saflaştırılması için farklı işlemlere acil ihtiyaç duyulmaktadır [10].

5.2.1. Kimyasal Liç

Kimyasal liç, metalurji endüstrilerinde metallerin cevherlerinden çıkarılmasına yönelik en eski ve en önemli işlemlerden biridir. Cevher ve endüstriyel işlem atıklarında sıkışan metallerin güçlü mineral asitler kullanılarak geri kazanıldığı bir işlemdir. Yapılan çalışmalarda liç maddesi olarak hidroklorür asit (HCl) kullanılarak skandiyumun geri kazanılması incelenmiştir. Ayrıca çalışmalar diğer mineral asitlerle karşılaştırılmış ve skandiyum liç oranının yüksek veya diğer liç ajanlarına benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Boksit kalıntısından skandiyum liçi için liç maddesi olarak H_2SO_4 'ü kullanılmıştır, ancak test edilen tüm sistemler arasında zayıf liç verimliliği göstermiştir. Boksit kalıntısının doğrudan liçinde karşılaşılan en büyük engel silika jelin gelişmesidir. Bunun için Hidrojen Peroksit H_2O_2 kullanılarak silika jel sentezini önleyecek bir çözüm geliştirilmiştir. Ancak bu uygulama liç verimini düşürdüğü için geri kazanımı etkilemiştir. Dolayısıyla, gözlemlendiği gibi, H_2O_2 kullanımı silikon sızıntısını ve bunun sonucunda silika jel oluşumunu önleyebilmektedir [10].

5.2.2. Biyolojik Liç

Mikrobiyal liç veya biyomadencilik olarak da bilinen biyoliç, metallerin, bakteriler tarafından doğrudan metabolizma veya mikropların metabolizma ürünleri yoluyla çözünmeyen katı maddeden çözündürüldüğü bir işlemdir. Bu işlem, değerli metallerin, düşük dereceli cevherlerden, endüstriyel proses atıklarından, maden atıklarından vb. daha etkili ve çevre dostu bir şekilde geri kazanılmasına yardımcı olmaktadır. Bu fenomen tipik olarak mikropların metabolik yollarında organik veya inorganik asitler üretmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Biyoliç, heterotrofik veya ototrofik mikroorganizmalar kullanılarak yapılabilmektedir. Ototrofik süreç, inorganik asitlerin varlığında biyo-oksidasyon/indirgeme döngülerini takip ederken, heterotrofik süzme, metalle kompleksleşerek çözünür şelatların oluşumuna yol açan üretilen organik metabolitler tarafından gerçekleştirilmektedir. Heterotrofik mikroorganizmalar skandiyumu öncelikle boksit ve uçucu kül kalıntılarında başarıyla süzmüştür. Skandiyumun liçi için incelenen mikropların çoğu esas olarak oksalik asit üretmiştir. Yüksek oksalik asit üretimi, sistemin yüksek pH'ı (6-10) tarafından desteklenmektedir. Oksalik asit dışında mikropların ürettiği diğer organik asitler asetik asit, süksinik asit, glukonik asit, malik asit, sitrik asit ve laktik asittir. Burada bahsi geçen tüm biyoliç çalışmalarında sistem, düşük pulp yoğunluğunu ve tek adımlı biyoliç işlemini takip

etmektedir. Ayrıca, hamur yoğunluğunun artması mikrobiyal metabolik aktivitelerin kaybına neden olmakta, büyümeyi engellemekte ve metalin zayıf süzülmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, kırmızı çamurdan' Gluconobacter oxydans' kullanılarak liç yapıldığında olağanüstü derecede yüksek süzme verimliliği (%94) görülmüştür. Gluconobacter oxydans tarafından üretilen glukonik asit yoluyla kırmızı çamurdan skandiyumun süzüldüğünü gösteren yalnızca bir iki çalışma mevcuttur.

Geleneksel liç yöntemleriyle karşılaştırıldığında biyolojik liç, safsızlıkların varlığında skandiyuma karşı daha yüksek seçiciliğe sahiptir. Üstelik operasyonel esnekliğe sahip olması, düşük maliyetli olması, toksik yan ürün üretimi olmaması, daha az enerji tüketimi ve çevre dostu olması nedeniyle katı malzemelerden metalin çıkarılması için daha yeşil ve daha iyi bir seçenektir. Gözlemlenen en önemli dezavantaj, geleneksel mineral asit liçiyle karşılaştırıldığında düşük liç verimi ve yüksek liç süresidir. Biyolojik liç, NTE'lerin çıkarılması için önemli ölçüde daha az kullanılan bir işlemdir. Neodimyum, disprosiyum, lantan, skandiyum ve itriyumun yanı sıra çinko, nikel, bakır ve altın içeren atık baskı devre kartları gibi diğer kaynaklardan skandiyumun geri kazanımını keşfetme konusunda geniş bir kapsama sahiptir [10].

5.3. Skandiyumu Kazanım Süreçleri

5.3.1. Sıvı/Sıvı Ekstraksiyonu

Solvent ekstraksiyonu olarak da bilinen sıvı/sıvı ekstraksiyonu, kimya endüstrisinde, iki farklı karışmayan sıvıdaki göreceli çözünürlüklerine dayalı olarak bileşiklerin ayrılması için yaygın olarak kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Çeşitli işleme sıvı atıklarından ve sızıntı sularından skandiyumun geri kazanılması için solvent ekstraksiyonu yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü genellikle iyi işleme kapasitesi, daha büyük ölçeklerde işletme kolaylığı ve daha düşük işletme maliyetleri gibi avantajlar sunmaktadır. Skandiyumun ekstraksiyonu ve saflaştırılması için asidik, bazik, nötr, şelatlayıcı ve ayrıca sinerjik ekstraksiyon sistemleri gibi farklı ekstraktant türleri araştırılmıştır. Literatürde bildirilen ekstraksiyon çalışmaları incelendiğinde birtakım çalışmalar gözlenmiştir. Bu çalışmalar, di-(2-etilheksil) fosforik asit (DEHPA) ve bis (2,4,4-trimetilpentil) fosfonik asit (Cyanex 272) gibi asidik organofosfor özütleyici maddelerin, skandiyumun ayrıştırılması için en çok uygulanan özütleyici maddeler olduğunu göstermektedir. Skandiyum genellikle diğer nadir toprak elementlerine göre daha yüksek bir ekstraksiyon kabiliyeti göstermektedir. Sülfürik asit ortamında Cyanex 272 ve 923'ün (dört tri-alkilfosfin oksit karışımı) uygulanması

üzerine, skandiyumun geri kazanımı >%98 olurken, skandiyumun toryum ve zirkonyumdan seçici ayrılması Cyanex 572 (fosfinik içeren organo-fosfor) kullanılarak sağlanmaktadır. HCl ortamında, skandiyumun Fe'den seçici olarak ayrılması, sulu ortamda betainyum bis (triflorometansülfonil)imid ([Hbet][TF2N]) kullanılarak rapor edilmiştir. D2EHPA + tribütül fosfat (TBP) kullanılarak skandiyumun ekstraksiyon yüzdesi %99 iken, ekstraktant olarak D2EHPA + birincil amin (N1923) uygulandığında, skandiyumun %90'ı çıkarılmaktadır. Ekstraksiyon yüzdesi, farklı ortamlarda ekstraktant olarak 2-etilheksil fosfonik asit mono-2etilheksil ester (P507) + TBP ve tryalkilfosfin oksit (TRPO) kullanıldığında %99'dan fazla olmaktadır. Verilen verilerden, sülfirik asit ortamının skandiyumun geri kazanılmasında yaygın olarak kullanıldığı açıkça görülmektedir. Bildirilen ekstraktanların çoğu kullanıldığında ekstraksiyon yüzdesi %90'ın üzerindedir; bu, bu ekstraktanların skandiyumun geri kazanılması için uygulanmasının mümkün olduğunu göstermektedir [10].

5.3.2. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, moleküllerin kütle akışkanından transferinin katı parçacık üzerinde meydana geldiği bir yüzey durumudur. Transfer, doğası gereği fiziksel veya kimyasal olabilir; ancak doğası gereği genellikle geri dönüşümlüdür. Adsorpsiyonun tersi, molekülün geri salındığı ve adsorbanın kimyasını değiştirmeden adsorbanı yeniden oluşturduğu desorpsiyondur. Yapılan çalışmalarda iyon değiştirme reçineleri, solvent emdirilmiş reçineler, biyo-sorbentler ve çok daha fazlası gibi skandiyumun geri kazanılması için kullanılan farklı adsorban türleri irdelenmiştir. Ağaç tozu biyokömürü, hindistancevizi kabuğu aktif karbon nanotüpleri ve bozulmamış karbon bazlı adsorbanlar, asidik ortamda seryum ve neodimyum gibi nadir toprak elementleri üzerinde seçici olarak skandiyumu adsorbe edebilmektedir. Odun tozu biyokömürü, ticari olarak mevcut olanlarla karşılaştırıldığında düşük adsorpsiyon kapasitesi gösterse de ucuzdur ve tarımsal atıklardan geliştirilerek sürdürülebilirlik ve ekonomik avantaj sağlamaktadır. Çift işlevli iyonik sıvı trioktilmetilamonyum 1-fenil-3-metil-4-benzoilpirazol-5-onat ve birleştirme maddesi (3-aminopropil) trietoksisilan ile işlevselleştirilmiş Fe₃O₄ ve SiO₂ nanopartikülleri ile katkılı sol-jel ile işlenmiş silika (APTES) ve etilendiamin tetraasetik asit (EDTA), bir ligand olarak, diğer nadir toprak elementleriyle karşılaştırıldığında skandiyuma karşı yüksek seçiciliğe sahip adsorban olarak da kullanılmıştır. İkincisi, %95 kadar yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine sahip ve aynı zamanda kullanımı kolay bir manyetik adsorbandır. Yakın zamanda yapılan bir çalışma, zirkonyum fosfatın (ZrP), adsorban olarak kullanıldığında,

demir (III) ile karşılaştırıldığında yaklaşık 23 ayırma faktörü ile skandiyuma karşı yüksek seçicilik gösterdiğini göstermiştir. Adsorpsiyon, solvent ekstraksiyonunun solvent kaybı, kimyasal çamur oluşumu, çok aşamalı işlem, emülsifikasyon vb. gibi dezavantajlarının çoğunun üstesinden gelmektedir. Bununla birlikte, yavaş işlem, zaman alıcı, seçici iyonlara karşı düşük özgüllük gibi kendi dezavantajları da vardır [10].

5.3.3. İyon Değişimi

İyon değişimi, solventteki metal iyonlarının reçine üzerindeki iyonlarla değiştirildiği bir kimyasal arıtma işlemidir. Bu süreçte çözeltildeki iyonların yerini katı faza bağlı iyonlar alır. Böylece çözeltilerde bulunan iyonların yerini, reçinede orijinal olarak bulunan farklı iyonlar alır. Bu iyonlar farklı tipte fakat aynı polaritededir. Dowex 1'in yardımıyla skandiyum, vanadyum ve titanyumdan oluşan bir karışımdan geri kazanıldığı 1957 yılından itibaren skandiyumun geri kazanılması için iyon değişimi uygulanmıştır. İyon değiştirme tekniği yeni olmasa da zamanla büyük değişikliklere uğramıştır; katı/sıvı arayüzünde iyonların tersinir adsorpsiyonu ilkesine dayanmaktadır. Maksimum ekstraksiyon için reçine kullanımında ve aktivite geliştirmede gelişmeler sağlanmıştır. Bugüne kadar, diğerleriyle birlikte skandiyuma sahip olan zirkonyum atık atığı, uranyum sızıntı suyu, bakır sızıntı suyu, kömür külü sızıntı suyu, kırmızı çamur sızıntı suyu vb. gibi gerçek endüstriyel olarak işlenmiş farklı türlerdeki beslemelerden skandiyumun geri kazanılması için çeşitli türde reçineler kullanılmıştır. NTE'ler ve geri kazanım sürecine güçlü bir şekilde müdahale eden toryum, demir, alüminyum vb. gibi yüksek konsantrasyondaki yabancı maddeler, skandiyum içeren çoğu besleme kaynağı doğası gereği asidik olduğundan katyonik reçineler geri kazanım için birincil tercihtir. Bununla birlikte, skandiyumun geri kazanılması için anyonik reçinelerin de kullanıldığı rapor edilmiştir. Reçinelerin çoğu skandiyuma karşı yüksek seçiciliğe sahip değildir. Dolayısıyla skandiyum ile diğer NTE'ler ve safsızlıklar adsorbe edilir. Skandiyum ile birlikte elüsyon sırasında alüminyum, NTE'ler, toryum ve demir gibi bazı safsızlıklar da desorbe edilir. Skandiyumun reçineden diğer NTE'lerin varlığında seçici elüsyonunun bir dereceye kadar sağlandığı elüsyon yöntemleri daha da geliştirilmiştir ve değiştirilmiştir.

Skandiyumun liç çözeltilisinden geri kazanılmasında karşılaşılan en büyük engel, skandiyumun kimyasal benzerlikleri nedeniyle başta demir olmak üzere diğer metallere ayrılması ve ayrıştırılmasıdır. Bu sorunun üstesinden gelmek için işlevselleştirilmiş reçine malzemeleri kullanılmıştır. Etilenglikol tetraasetik asit (EGTA) ile işlevselleştirilmiş kitosan-silika parçacıkları ve 732 reçineleri, skandiyumu demir üzerinde seçici olarak

adsorbe edebilmiştir. Reçinenin skandiyum, demir ve alüminyuma afiniteye sahip olduğu iki aşamalı bir adsorpsiyon sisteminde 732 reçinesi kullanılmıştır. İlk aşamada Fe^{3+} içeren elüent askorbik asit varlığında indirgenir ve ardından skandiyum EDTA ile kompleksleştirilir. Reçinenin demir (Fe^{2+}) ve alüminyum (Al^{3+}) için afinitesi olduğundan, eluent'te yalnızca Sc-EDTA kalacak şekilde ikinci aşama adsorpsiyonunda adsorbe edilirler. EGTA işlevselleştirilmiş kitosan-silika, demirden ziyade skandiyuma karşı çok daha yüksek bir afiniteye sahiptir. Bu nedenle iyon değiştirme reçineleri, metallerin seyreltik çözeltilerden geri kazanılması için uygulanabilir bir ayırma tekniği olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, hasarlı reçine, kirlenme ve yüksek maliyetler gibi birçok operasyonel zorluğu da beraberinde getirebilirler. Yeniden kullanılabilirler, dayanıklıdırlar, daha az karmaşıktırlar, bakım maliyetleri düşüktür ve ayarlanabilir seçicilik ile çalıştırılmaları kolaydır. Bununla birlikte, metalin geri kazanılması birincil hedef olduğundan elüsyon önemli bir parametredir ve tam ve optimize edilmiş bir adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesinin geliştirilmesine yönelik daha fazla dikkat gerektirmektedir [10].

5.3.4. Hareketsiz Ekstraktanlar

Bu teknik, sıvı ekstraktantların farklı substratlar üzerinde immobilizasyonundan oluşan yeni bir tekniktir. İyonların şelatlayıcı maddeler veya reçinelere emdirilmiş çözücüler ile değişimini içermektedir. Metal iyonlarını sulu çözeltilerden ve atık sulardan seçici olarak ayırmak için basit ve etkili bir araçtır. Şelatlayıcı reçineler ve solvent emdirilmiş reçineler hem ekstraksiyon hem de adsorpsiyon avantajlarına sahip olan destek matrisine asimile edilen fonksiyonel grup(lar) nedeniyle belirli metallere açık bir afinite gösterebilmektedir. Çözücünün etkili bir şekilde çalışması için ekstraktantın polimerik destek tarafından uygun şekilde emilmesi çok önemlidir. Bu genellikle hidrofobik etkileşimler yoluyla ve bazen de kısmen polar veya elektrostatik kuvvetler yoluyla elde edilmektedir. Solvent emdirilmiş reçine kullanılarak skandiyum, yüksek miktarda safsızlık içeren düşük konsantrasyonlu çözeltilerden yüksek seçicilikle geri kazanılabilmektedir. Beslemeler skandiyum ve diğer NTE'ler le işlenirken, solvent emdirilmiş reçine skandiyumu etkili bir şekilde adsorbe etmekte ve bu, skandiyum metalini geri kazanmak için başarılı bir şekilde elüt edilmektedir. Seçici skandiyum adsorpsiyonunu büyük ölçüde engelleyen, yüksek konsantrasyonlarda demir ve alüminyum içeren, boksit ve lateritle işlenmiş cevherlerden elde edilen beslemeleri işlerken, solvent emdirilmiş reçineler, skandiyum> demir> alüminyum sırasıyla seçicilik göstermektedir. Bununla birlikte, skandiyumun elüsyonu zor olmaktadır. Solvent emdirilmiş reçine, tek başına iyon değiştirme ve solvent ekstraksiyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında

herhangi bir iyonla karşı ayarlanabilir seçiciliğe sahip, çevre dostu, daha hızlı ve kullanımı nispeten kolay olan alternatif bir ayırma yöntemidir. Ancak prosesin dezavantajları, sulu fazdaki çözünürlüğü nedeniyle emdirilmiş solventin zamanla kaybı ve başarılı bir geri kazanım için metal iyonunun zorlu elüsyon prosesisidir [10].

5.3.5. Biyosorpsiyon

Biyosorpsiyon, bakteri, mantar vb. gibi biyolojik ajanların emici (biyosorbent) olarak hareket ederek ağır metalleri metabolik yollar veya fiziko-kimyasal yöntemlerle hücrelerinde biriktirdiği bir süreçtir. Mikrobiyal yüzeyde bulunan polisakkaritlerin, lipitlerin ve glikoproteinlerin amino, karboksil, hidroksil, sülfhidril ve fosfat grupları, metaller için bağlanma bölgesi görevi görmektedir. Biyosorbentler adsorpsiyonu iyileştirmek için kimyasal veya genetik olarak değiştirilebilirler. Kimyasal modifikasyonda, bağlanma bölgeleri ya güçlendirilir ya da adsorpsiyon kapasitesini ve adsorbanın metal iyonuna karşı seçiciliğini artıran matrisler üzerine emprenye edilirler. Biyosorbentler, düşük konsantrasyonlu safsızlıkların varlığında düşük konsantrasyonlu çözeltilerden skandiyumu seçici olarak adsorbe etme kapasitesine sahiptir. Safsızlıkların konsantrasyonu arttığında, sorbent, skandiyumu asit maden drenajı veya kırmızı çamur sızıntısı gibi besleme kaynaklarından seçici olarak ayırmada başarısız olmaktadır. Skandiyumun demir, alüminyum ve titanyum ile birlikte çökmesini önlemek için sistemde pH 0,6 tutulmuştur. Biyosorbent skandiyuma karşı olağanüstü seçicilik göstermekte ve dört adsorpsiyon ve desorpsiyon döngüsünden sonra skandiyumun %98,9'u ekstrakte edilmektedir. Biyosorpsiyon işleminin kolay işlem görmesi, kimyasal çamur oluşmaması ve çevre dostu olması gibi birçok avantajı vardır. Tartışılan biyosorbentler, düşük safsızlıkla seyreltilmiş akışlardan skandiyumu başarılı bir şekilde geri kazanmayı başarmıştır. Bununla birlikte, skandiyumla benzer kimyasal özelliklere sahip, yüksek miktarda kirletici metal içeren besleyicilerden seçiciliğinin artırılması konusunda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir [10]

6. SKANDİYUM TİCARETİ

6.1. Pazar/Piyasa ve Fiyat Durumu

Skandiyum Pazarı büyüklüğünün 2024 yılında 0,67 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmekte ve tahmin döneminde (2024-2029) %14,70'lik bir bileşik yıllık büyüme oranıyla 2029 yılına kadar 1,34 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir.

COVID-19 salgını skandiyum pazarını olumsuz etkilemiştir. Karantina nedeniyle havacılık ve savunma, seramik ve elektronik gibi büyük son kullanıcı sektörleri askıya alınmış ve skandiyum kullanımı azalmıştır. Ancak pandemiden sonra pazar, büyük son kullanıcı sektörlerindeki devam eden faaliyetler nedeniyle istikrarlı bir şekilde genişlemiştir.

Kısa vadede katı oksit yakıt hücrelerinde (SOFC's) (soft oxide fuel cells) kullanımının artması; havacılık ve savunma sanayiinde alüminyum-skandiyum alaşımlarına olan talebin artması bu pazarın itici güçleri olmuştur. Ancak skandiyumun yüksek fiyatı, bu pazarın 2024-2029 yılları arasındaki büyümesini engelleyebilir.

Otomotiv sektöründeki potansiyel uygulamalar ve enerji depolamaya yönelik gelişen teknoloji, önümüzdeki yıllarda pazara fırsatlar sunabilmektedir. Pazarın Çin tarafından domine edilmesi beklenmekte ve Avrupa Birliği'nin 2024-2029 yılları arasında en yüksek bileşik yıllık büyüme oranını görmesi beklenmektedir [13].

6.1.1. Skandiyum piyasa trendleri

katı oksit yakıt hücreleri (SOFC'ler) sektörünün pazara hâkim olması beklenmekte:

- SOFC'ler, negatif oksijen iyonlarını katottan anoda taşımaya yardımcı olan elektrolit adı verilen katı bir oksit malzeme kullanmaktadır. Bu hücrelerde, anotlar ve katotlar elektroliti kaplayan özel mürekkeplerden yapılmakta. Bu nedenle, SOFC'ler herhangi bir değerli metal, aşındırıcı asit veya erimiş malzeme gerektirmemektedir.
- Elektrolit malzemeler, doğal gaz dönüşümünü enerjiye katalize etmek için yüksek sıcaklıklara tabi tutulmakta. Ancak, katalizleme dönüşüm süreci için yüksek sıcaklık, seramik elektrolitlerin hızlı bozulmasına yol açabilmekte ve sermaye ve bakım maliyetlerine eklenmektedir.
- Katı elektrolitlerde skandiyum kullanılması sistemin geleneksel SOFC'lere göre çok daha düşük sıcaklıklarda çalışmasına yardımcı olmakta. Bu nedenle, skandiyum kullanımı SOFC'lerin maliyetini düşürmeye yardımcı olmuştur ve bu da onları birçok yerde güç üretimi için kullanmayı kolaylaştırmıştır.

- Elektrik fiyatları arttıkça, insanların enerji üretmek için daha çevre dostu yollar kullanması gerekmektedir; bu da SOFC'ler için birçok pazar fırsatı yaratmakta ve skandiyumu daha da önemli hale getirmektedir.

- Kömür ve doğal gaz gibi geleneksel enerji kaynaklarına yönelik artan çevresel endişeler nedeniyle, gelecekte katı oksit yakıt hücrelerine olan talebin artması muhtemeldir.

- Kömür ve doğal gaz gibi geleneksel kaynaklardan enerji üretiminin çevresel endişeleri nedeniyle temiz enerjiye olan talebin artmasının, gelecekte katı oksit yakıt hücrelerine olan talebi artırması beklenmektedir. Katı oksit yakıt hücreleri yüksek verimlilik sunmakta ve çevresel ve finansal faydalar sağlamaktadır. Katı oksit yakıt hücrelerinin elektrik verimliliği %60'a kadar ulaşmaktadır. Bu, yakıtta depolanan enerjinin %60'ının faydalı elektrik enerjisine dönüştürüldüğü anlamına gelmektedir. Bu, kömür santrallerinin verimliliğinden çok daha yüksektir.

- ABD Enerji Bilgi İdaresi'ne göre ayrıca 2023 yılında enerjiye yaklaşık 2,8 trilyon ABD doları yatırım yapılmış ve bunun 1,7 trilyon ABD doları yenilenebilir enerji, nükleer, şebekeler, depolama, düşük emisyonlu yakıtlar, verimlilik iyileştirmeleri ve son kullanım yenilenebilir kaynakları ve elektrifikasyon dahil olmak üzere temiz enerji için kullanılmıştır.

- Ayrıca ABD Enerji Bakanlığı'na göre, 2030 yılında temiz kaynaklardan elde edilen elektriğin payı, Enflasyon Azaltma Yasası'nın geçmesinden önce beklenen miktarın neredeyse iki katı olan yüzde 80'e çıkabilmektedir.

- Ayrıca, SOFC pazarındaki çeşitli genişlemeler skandiyum talebini körüklemektedir.

- Katı oksit yakıt hücresi pazarının yakın gelecekte skandiyum talebinde büyük bir artışa tanık olması muhtemeldir [13].

6.1.2. Çin'in pazara hâkim olması bekleniyor

- Çin'deki skandiyum, titanyum, demir cevheri ve zirkonyum gibi diğer malzemelerin yan ürünü olarak üretilmektedir. Günümüzde, Çin'deki skandiyum üretiminin %60-70'inden fazlası titanyum yan ürünleridir. Ülkedeki önemli miktarda skandiyum, Çin'in Panzhihua kentinde bulunan manyetovan-ilmenit gibi titanyum cevheri gibi pigment tesislerindeki titanyum dioksit (TiO₂) liç akışlarından gelen kalıntıların %0,04 kadar yüksek bir konsantrasyonda kullanılmasıyla da üretilmektedir.

- Küresel olarak, skandiyumun başlıca kaynağı niyobyum-nadir toprak elementi-demirdir (Nb–NTE–Fe), dünyanın en büyük NTE kaynağı ve ikinci büyük skandiyum

kaynağıdır. Çin'in İç Moğolistan bölgesinde yer almakta ve küresel skandiyum üretiminin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Bayan Obo'da skandiyum, diğer NTE'lerin ve demir madenciliğinin bir yan ürünü olarak yeniden üretilmektedir.

- Çin, hükümetin düşük karbonlu bir ekonomiye geçmek için temiz enerji teknolojisini kullanmaya giderek daha fazla odaklanmasıyla yakıt hücresi pazarında büyük bir potansiyele sahiptir. Son 2-3 yıldır Çin hükümeti, ülkede yakıt hücresi mobilitesinin yaygınlaştırılmasına büyük önem vererek, kamuoyunun destek odağını tamamen elektrikli olan araçlar (Battery Electric Vehicle) (BEV)'den yakıt hücreli elektrikli araçlar olan (Fuel Cell Electric Vehicle) (FCEV)'ye doğru hafifçe kaydırmıştır. Ulusal hükümet, her araç için 500.000 CNY (73 bin ABD doları) sübvansiyon sunmaktadır.

- Ayrıca Çin hükümeti, 2025 yılına kadar yaklaşık 50.000 sıfır emisyonlu yakıt hücreli aracı destekleme planlarını duyurmuştur ve 2030 yılına kadar hizmete girecek FCEV sayısını hızla 1 milyona çıkarmayı planladığını açıklamıştır. Bu, ülkedeki SOFC'lere ve skandiyum pazarına fırsatlar sağlayacaktır.

- Çin, en büyük uçak üreticilerinden biri ve iç hat yolcuları için en büyük pazarlardan biridir. Ayrıca, ülkenin uçak parçaları ve montaj üretim sektörü, 200'den fazla küçük uçak parçası üreticisinin varlığıyla hızla büyümektedir. Ayrıca, Çin hükümeti, iç üretim kapasitelerini artırmak için büyük yatırımlar yapmaktadır.

- Çin, dünyadaki en büyük elektronik üretim üssüdür. Çin, akıllı telefonlar, televizyonlar, teller, kablolar, taşınabilir bilgisayar cihazları, oyun sistemleri ve diğer kişisel elektronik cihazlar gibi elektronik ürünlerin üretiminde aktif olarak yer almaktadır. Çin'deki ekonomik kalkınma ve nüfus arasında iyileşen yaşam standartları tüketici elektroniği talebini yönlendirmektedir. Akıllı telefonlar, OLED TV'ler ve tabletler gibi elektronik ürünler, talep açısından pazarın tüketici elektroniği sektöründe en yüksek büyüme oranlarına sahiptir. Gelirin 2025 yılına kadar yıllık %2,04 büyüme oranı göstermesi beklenmektedir.

- Dolayısıyla yukarıda belirtilen faktörlerin skandiyum pazarına olan talebi etkilemesi beklenmektedir [13].

6.1.3. Skandiyum fiyatı

Kıtlığı ve sınırlı üretimi nedeniyle skandiyum, tüm doğal elementlerin en pahalılarından biridir. Aşağıdaki tabloda 2019 yılı skandiyum fiyat aralığı ve 2024 yılı fiyatları gösterilmiştir.

Tablo 14. Skandiyum Fiyat [15][16].

		08.07.2019 Fiyat (USD/kg)	19.06.2024 Fiyat (USD/kg)
Skandiyum Metal	99.99 min. EXW Çin	3194–3339	3041,12
Skandiyum Metal	99.999 min. EXW Çin	5735–6025	5044,80
Skandiyum Oksit	99.99 min. EXW Çin	1016–1089	650,15
Skandiyum Alüminyum	%2 Sc EXW Çin	45.7–48.6	33,43

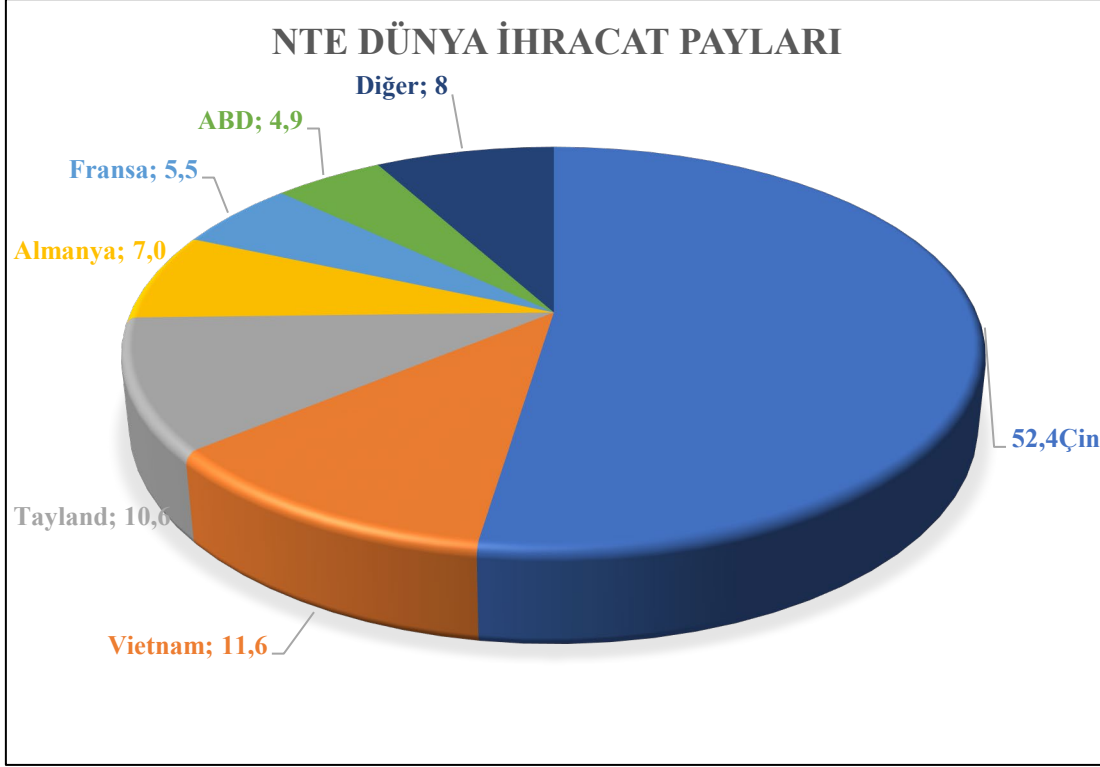
6.2. Dünyada İthalat ve İhracat

Skandiyum un Dünya ithalat ve ihracat rakamları (skandiyum olarak) Dünya ticaret merkezleri tarafından beyan edilmemektedir. Bundan dolayı dört haneli GTİP kodu ile verilen ürünlerin (Alkali veya alkali toprak metaller; nadir toprak metalleri, skandiyum ve itriyum, karıştırılmış veya alaşımlanmış cıva olsun veya olmasın.) ithalat ve ihracat rakamları Tablo 15’ te gösterilmiştir. Aşağıdaki tabloda ve Şekil’6 da görüldüğü gibi Dünya NTE ihracatında Çin ilk sırada yer almakta, onu Vietnam Tayland ve Almanya takip etmektedir.

Tablo 15.NTE Dünya İhracat Miktar ve Değerleri [17].

ÜLKELER		MİKTAR (TON)	DEĞER (USD x 1000)
1	Çin	48.928	542.151
2	Vietnam	2.413	119.424
3	Tayland	1.132	109.897
4	Almanya	623	72.424
5	Fransa	16.231	56.753
6	ABD	2.721	50.842
	Diğer (63) *	16.675	82.468
GENEL TOPLAM (69) *		88.723	1.033.960

*Ülkeler Sayısı



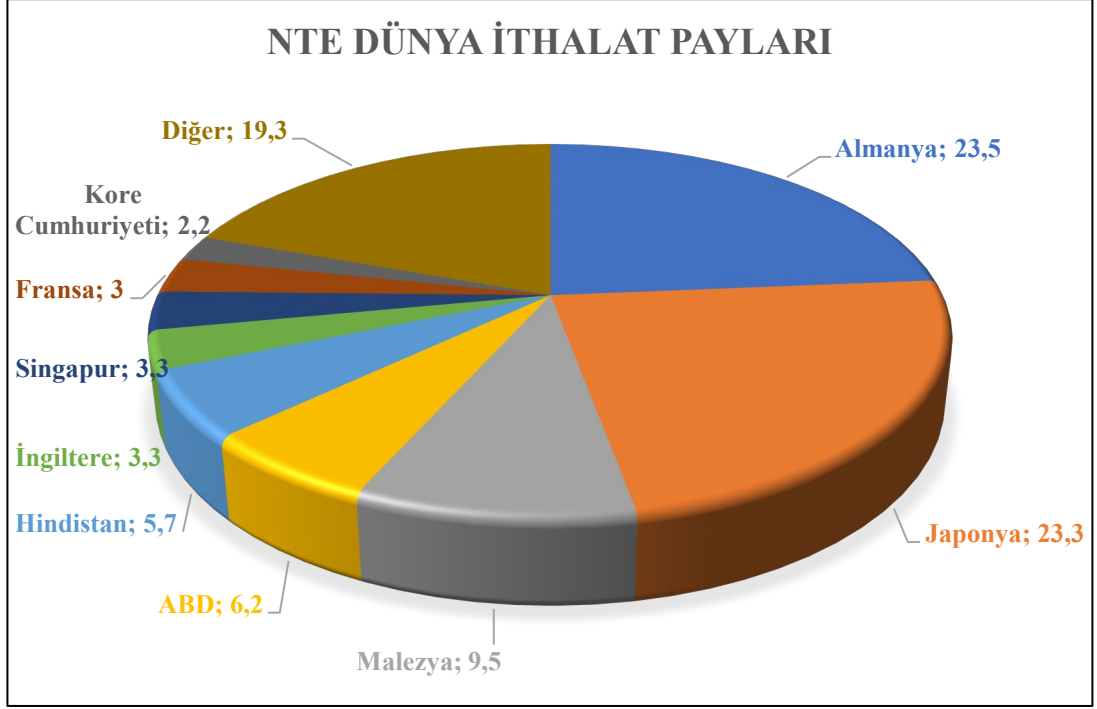
Şekil 6. NTE Dünya İhracat Payları [17].

Tablo 16. NTE İthalat Miktar ve Değerleri [17].

	ÜLKELER	MİKTAR (TON)	DEĞER (USDx1000)
1	Almanya	4.522	372.049
2	Japonya	9.983	369.361
3	Malezya	29.311	151.101
4	ABD	18.449	97.580
5	Hindistan	17.074	89.747
6	İngiltere	697	51.606
7	Singapur	167	51.555
8	Fransa	4.182	47.728
9	Kore Cumhuriyeti	1.309	35.351
	Diğer (140) *	43.494	318.537
	GENEL TOPLAM (149) *	129.190	1.584.619

*Ülke sayısı

Tablo.16 da ve Şekil.7 de görüldüğü gibi Dünya NTE ithalatında Almanya ilk sırada yer almakta. Onu Japonya Malezya ve ABD takip etmektedir.



Şekil 7. NTE Dünya İthalat Payları [17].

6.3. Türkiye’de İthalat ve İhracat

Uluslararası ticarete konu olan tüm mallar; malın bileşimindeki maddelere göre, kullanım alanı veya amacı ile imalat ve işleme derecesine göre Dünya Gümrük Örgütü tarafından Armonize Sistemde (Harmonized System) fasıllar halinde gruplandırılırlar. Armonize Sistemin, kullanıcı ülkelerin kendi ulusal ihtiyaçlarına göre alt açılımlar yapmasına imkân veren bir mimarisi vardır. Bir ürünün ülkemizin tarife sınıflandırmasındaki yerini belirleyen 12 basamaklı koduna *Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu (GTİP)* adı verilir. GTİP, Dünya gümrük örgütünden alınan bir koddur. Bu kodlar standart hale getirilmiş olan Armonize sistemden alınmaktadır. Bu kod sayesinde tüm dünyada bulunan ürünlerin sınıflandırılması kolay bir şekilde yapılmaktadır.

30.12.2023 tarih 32415 sayılı (mükerrer) Resmî gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren 8040 sayılı cumhurbaşkanlığı kararı doğrultusunda aşağıdaki gümrük tarife istatistik pozisyon (GTİP) kodları güncellenerek yeniden düzenlenmiştir.

NTE’ler ile ilgili ülkemizde bir adet Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu (GTİP) mevcuttur. Ayrıca uluslararası ticaret örgütlerinde kullanılan dört haneli GTİP numarası aşağıda belirtilen pozisyonlarda NTE’ le re uygulanmaktadır. Bu pozisyonlara ait bölüm, fasıl ve GTİP numaraları şunlardır:

253090500000- Nadir toprak metalleri, skandiyum veya itriyum ekstraksiyonuna uygun bastnaezit, ksenotim ve benzeri mineraller.

2805- Alkali veya alkali toprak metaller; nadir toprak metalleri, skandiyum ve itriyum, karıştırılmış veya alaşımlanmış cıva olsun veya olmasın.

Kurumumuzca her yıl hazırlanan “Madencilik Sektörüne Ait Temel Ekonomik Göstergeler” yayımında yer alan madenlerimiz ile ilgili ithalat ve ihracat bilgileri, madenlerin GTİP numaralarına ait Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinden hazırlanmaktadır. Ayrıca Uluslararası Ticaret Merkezinin kullandığı dört haneli (2805) numaralı GTİP kodu ile belirtilmiş ürünlerin Ülkemiz ihracat ve ithalat değer ve payları ilgili tablo ve şekillerde gösterilmiştir.

Ülkemizin 2023 yılı toplam maden ihracatı 2022 yılına göre %1,29 oranında azalarak 232.215.312.209 Amerikan Doları (\$); ithalat ise 2022 yılına göre %0,92 oranında azalarak 339.056.071.567 Amerikan Doları (\$) olarak gerçekleşmiştir [18]. Gerek Ülkemizde gerekse Dünya’da skandiyumun tek başına ihracat ve ithalat değerleri verilmemektedir. Bu nedenle skandiyumunda dahil olduğu NTE cevherine ait veriler bu bölümde verilmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu verilerine göre yukarıda belirtilen GTİP numarasındaki (**253090500000**) ürünleri kapsayan, ülkemizin 2023 yılı NTE ihracat ve ithalat değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 17. Türkiye 2023 yılı NTE İhracat ve İthalat Değerleri [19]. (TÜİK)

2023 yılı	Miktar (kg)	US Dolar
İhracat	97.650	38.875
İthalat	107.176	48.916

Dünya Ticaret Merkezinin beyan etmiş olduğu verilere göre (**2805 GTİP**) Ülkemiz NTE ürünlerinin Yıllara göre İthalat ve ihracat değerleri aşağıdaki tabloda gösterildiği gibidir.

Tablo 18. ITC GTİP Kodundaki NTE Ürünlerinin Yıllara Göre İthalat ve İhracat Değerleri [17].

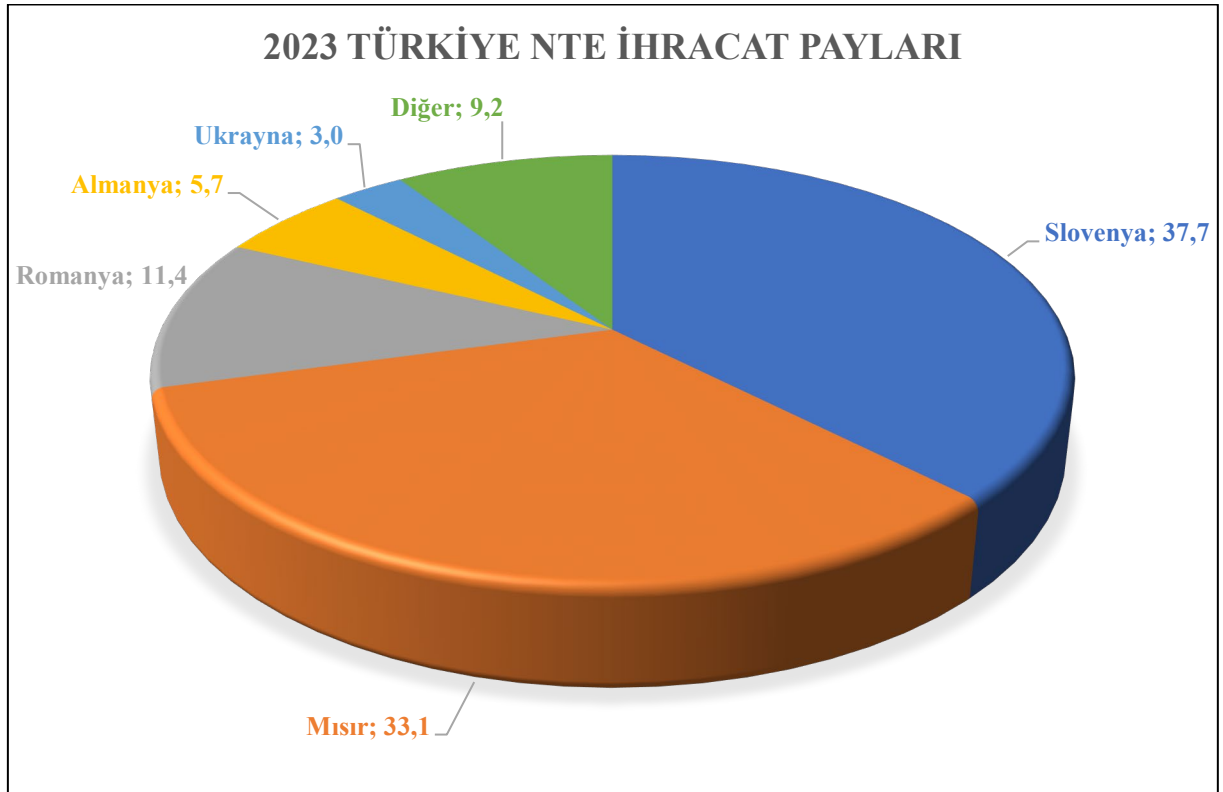
Yıllar	2019	2020	2021	2022	2023
İthalat (USDx1000)	4.949	4.251	6.089	15.770	8.697
İhracat (USDx1000)	1.006	341	346	1.178	1.642

Yine Dünya Ticaret Merkezi verilerine göre Ülkemiz NTE ürünlerinin ihracat miktar ve değerleri Tablo.19 da gösterildiği gibidir. Tabloda verilen bilgiler doğrultusunda 2023 yılı Türkiye NTE ihracat payları da Şeki.8 de gösterildiği gibidir.

Tablo 19.2023 Türkiye NTE ihracat miktar ve değerleri [17].

	ÜLKELER	MİKTAR (TON)	DEĞER (USDx1000)
1	Slovenya	91	619
2	Mısır	86	543
3	Romanya	35	188
4	Almanya	13	93
5	Ukrayna	84	50
	Diğer (34) *	35	149
GENEL TOPLAM (39) *		344	1.642

*Ülke sayısı



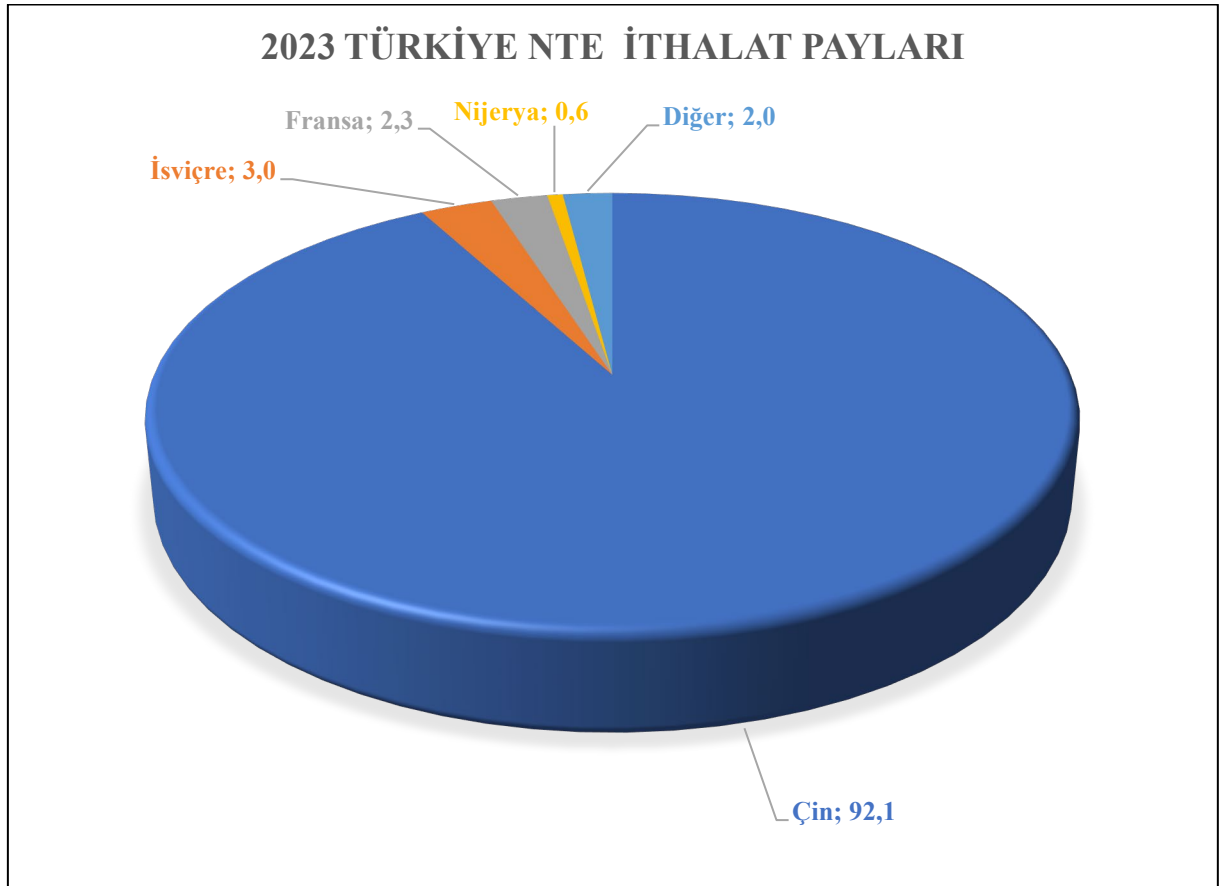
Şekil 8. 2023 Türkiye NTE İhracat Payları [17].

Tablo. 20 de ve Şekil. 9 da Dünya Ticaret Merkezinin beyan etmiş olduğu veriler ışığında Ülkemiz NTE mineralleri ürünlerinin ithalat değer ve payları yer almaktadır.

Tablo 20.2023 Türkiye NTE İthalat Miktar ve Değerleri [17].

	ÜLKELER	MİKTAR(TON)	DEĞER(USDx1000)
1	Çin	2356	8.008
2	İsviçre	7	257
3	Fransa	62	202
4	Nijerya	54	55
	Diğer (18) *	21	175
	GENEL TOPLAM (22) *	2.500	8.697

*Ülke sayısı



Şekil 9. 2023 Türkiye NTE İthalat Payları [17].

7. SKANDİYUMUN ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

NTE'lerin birincil kaynaklarından çıkarılması ciddi çevresel tehlikelere yol açmıştır. Şu anda skandiyum esas olarak titanyum dioksit, NTE'ler ve alüminyum gibi diğer metallerin işlenmesinden bir yan ürün olarak geri kazanılmaktadır. Bu, skandiyumun geri kazanılmasını teknik olarak zorlu ve çevreye zararlı hale getirmektedir. Onlarca yıldır küresel NTE pazarını kontrol eden Kaliforniya'daki Mountain Pass madeni, yarattığı kirlilik ve çevresel tehlike nedeniyle 2002 yılında kapatılmıştır. Benzer şekilde, Çin'deki NTE kaynakları artık H₂S, HF ve H₂SO₄ gibi, tehlikeli gazların emisyonu gibi, ciddi sağlık ve çevre kaygılarını gündeme getirmiştir. Aynı zamanda ağır metallerin yer altı sularına sızmasına ve maden sahaları çevresinde radyoaktif metallere maruz kalınmasına neden olmaktadır. Dahası, uzun süreli madencilik, ince toz parçacıklarını havada asılı bırakır ve bunların uzun süre solunması pnömokonyoza (siyah akciğer) yol açar. Bayan Obo madenininde yakınında bulunan Baotou Şehri, madencilik ve yakındaki NTE'lerin işlenmesinden kaynaklanan birçok kirlilik sorununa maruz kalmıştır. Bu nedenle Çin hükümeti birçok tesisi kapatmış ve çevreye verilen zarar nedeniyle sınırlı üretimi kapatmıştır.

LCA, (Life Cycle Analysis) (yaşam döngüsü değerlendirmesi) bir ürünün ham maddeden dağıtımına veya geri dönüşümüne kadar tüm yaşam aşamalarına eşlik eden çevresel etkileri değerlendirmek için kaynaktan hurdaya ve bazen özellikle geri dönüşüm birimleriyle kaynaktan kaynağa araştırma teknikleridir. Karar vericilere, birimin sürdürülebilirlik performansını iyileştirmek için gereken araçları uygulama konusunda yardımcı olabilmektedir. Kısaca LCA, ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkilerinin eksiksiz bir görünümünü sağlamaktadır. Hammaddenin çıkarılması ve elde edilmesiyle başlar ve ardından üretim, nakliye, tedarik, bakım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm, imha ve atık yönetimi gelir. LCA'nın temel özellikleri, çevresel sonuçların bir coğrafi alan, kaynak ve aşamadan diğerine kaydırılmasını önlemesidir. LCA'nın dört ana aşamasından söz edilebilir. LCA analizinin ilk aşaması, ürünün yaşam döngüsünün hangi bölümünün analiz için kullanılacağını ve dolayısıyla değerlendirmenin sınırlarını tanımlar. İkinci aşama, bu süreçlerde tüketilen hammaddelerle ilgili olarak belirlenen sınır boyunca kütle ve enerji akışı hakkında bilgi sağlar. Bu aşamada enerji tüketimi, emisyon ve etkileşimler açısından çevresel etkilere ilişkin ayrıntılar da verilmektedir. Bir sonraki aşamada etki değerlendirmesi için bir envanter görevi görür. Üçüncü aşamada bir önceki aşamada oluşturulan envanter detaylı bir şekilde analiz edilir. Kanseri dışı insan toksisitesi

(HTNC), Küresel Isınma Havası (GWA), Ötrofikasyon, Toksikite ve diğerleri gibi göstergeler açısından sonuçlar, tüm etki kategorileri için ayrıntılı olarak incelenmektedir. Üçüncü aşamada her etki kategorisi tartılıp normalleştirilerek ayrıntılı olarak değerlendirilmektedir. Değerlendirme bittikten sonra LCA'nın dördüncü ve son aşamasında değerlendirmenin yorumlanması yapılmaktadır. Verilerin eleştirel bir şekilde gözden geçirilmesini, değerlendirmenin hassasiyetinin anlaşılmasını ve sonuçların temsil edilmesini içermektedir. Böylece LCA ile her aşamadan sonra ortaya çıkan kirleticiler ve atıklar gibi çevre yükleri ile bu aşamalar için ayrı ayrı enerji ve hammadde tüketimi arasında bir harita çizilebilmektedir. Bu, belirli bir ürünle ilişkili girdi ve çıktı parametrelerinin etkisinin ve enerji kaynaklarının, insan sağlığının, iklimin, biyolojik çeşitliliğin ve daha pek çok şeyin uzun vadeli sürdürülebilirliğine yönelik eşlik eden yolun değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Böylece LCA, en düşük çevre yüküne sahip belirli bir ürün için en uygun yolun belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasına yönelik adımların ve alternatif yaklaşımların belirlenmesine yönelik bir kapsam oluşturur. Skandiyum da dahil olmak üzere NTE'lerin kritik ve spesifik doğası, endüstrilerin NTE'lerin alt havzalarına yönelik daha çevre dostu yaklaşımlar benimsemeleri için uygun rehberlik sağlayacak bir LCA'yı gerektirmektedir. NTE'lerin çevresel etkilerine erişim için birçok LCA çalışması yapılmıştır. Bununla birlikte, skandiyumun çevresel etkileri spesifik olarak yalnızca Wang ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Çalışmalarından, HTNC ve GWA'nın Sc_2O_3 'ün en önemli iki sorunu olduğu sonucuna varılmıştır. Buhar ve oksalik asit, üretim aşamasında dolaylı olarak HTNC ve GWA üzerinde en büyük etkiye sahip ilk iki girdidir. Dolayısıyla yukarıdaki iki girdinin tüketiminin azaltılması, skandiyum madenciliğiyle ilişkili genel etkiyi azaltabilir. Ayrıca, çevresel etkisi daha düşük olan alternatif reaktiflerin kullanılması veya etkinin azaltılması için dozajın azaltılması da sunulan önerilerden bazılarıdır. Skandiyum ağırlıklı olarak boksit kalıntılarında elde edildiğinden LCA, çevresel etkisine yönelik daha iyi bir bakış açısı sağlayabilmektedir. Yakın zamanda Joyce ve Björklund tarafından, değerli metallerin boksit kalıntısından geri kazanılmasının çevresel etkisini anlamak amacıyla "Sıfır Atık Değerlemesi" hedefiyle yeni bir LCA çalışması yapılmıştır. Yazarlar tarafından çok az gözlem yapılmıştır; bunlardan biri teknolojilerin birleştirilmesinin faydalı olduğunun kanıtlanmasıydı. Örneğin, değerlemenin ön arıtma ile kombinasyonu çevresel faydalara yol açabilmektedir. Ayrıca yol kalıntılarının inşaat gibi başka amaçlarla değiştirilmesi ve kullanılması da çevresel etkileri azaltacaktır. Dikkat çekilen bir diğer önemli parametre, geri dönüşümün dahil edilmesi ve yol reaktiflerinin yeniden kullanılmasıydı. Bu nedenle, LCA analizinin anahtarı, izolasyonda çevreye zararsız

gibi görünen yolun basit parametrelerinin, işleme aşamalarında kullanıldığında dolaylı olarak büyük çevresel etkiye sahip olabileceğinin kabul edilmesidir. Dolayısıyla bu analiz bize sürecin, farklı parametrelerin ve bunların çevre üzerindeki etkilerinin yakından anlaşılmasını sağlamaktadır.

Ancak LCA analizi başka kaynaklara veya coğrafi lokasyonlara aktarılamadığı için diğer birincil ve ikincil kaynakların da çevresel etkilerinin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca, ekoloji üzerindeki etkiyi anlamak için geri dönüşüm ve yeniden kullanıma ilişkin süreç yolları değerlendirilmelidir. Geri dönüşüm kaynağı yollarının, cevher madenciliği, liç vb. gibi çevresel etkilere önemli ölçüde katkıda bulunduğu görülen bir dizi prosesin ortadan kaldırılması gibi, işlenmemiş birincil kaynaklara göre pek çok ek avantajı vardır. Ayrıca, madencilik için temel olan istenmeyen yan ürünleri de önlemektedir. Birincil kaynaklar, kaynak olarak geri dönüşümün tüm faydalarına rağmen, LCA'nın çevresel etkilerini anlaması gerektiği gibi araştırılmamıştır. Madencilik yükü bugüne kadar yeterince çevresel hasara neden olduğundan, en azından ilk kaynağın değerli ve kritik metallerin geri dönüşümü olduğu bir Yaşam Döngüsü Düşüncesi (LCT) yaklaşımı geliştirmek önemlidir. Yolların daha iyi anlaşılmasını sağlayacak ve hatta çevresel faydalara odaklanan süreçlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu, karar vericilerin ve politika yapıcıların uygun kararları almasına yardımcı olacaktır. Ayrıca, büyük metal cevherlerinin madenciliği yükünün değerli ve kritik metallere kaydırılmasına, bu metallerin ilgili küresel ekonomik pazarının iyileştirilmesine, eşlik eden çevresel etkilerin azaltılmasına ve bu alanda daha fazla teknolojik ilerleme için bir kapsam sağlanmasına yardımcı olacaktır [10].

8. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

- Skandiyum geçiş metallerinin ilkidir. Bazen itriyum ve lantanitler yani nadir toprak elementleri ile birlikte sınıflandırılır. Bunun sebebi, bileşiklerinin özelliklerinin, alüminyum ve itriyum metallerinin özelliklerinin arasındaki değerlerde olmasıdır. Periyodik tabloda kalsiyum ve titanyum arasında yer alır. Metalik gri renkte yumuşak bir metaldir
- Skandiyum, 1879 yılında İsveçli bilim adamı Lars Fredrik Nilson tarafından keşfedilmiştir. Nilson, İskandinavya'dan gelen öksenit ve gadolinit minerallerinde spektral analiz yöntemi ile skandiyumu tespit etmiştir.
- 'Mucize' metal olarak nitelendirilen skandiyum minerali oldukça yüksek fiyatı ile dikkat çekmektedir.
- Skandiyum kritik mineraller kategorisinde yer almaktadır. Çok spesifik kullanım alanlarının olması ayrıca onu hem kritik hammadde hem de talep edilen bir mineral yapmaktadır.
- Dünya'da skandiyum talebi yıldan yıla artsa da henüz çok büyük çaplı üretimlerden söz etmek zordur.
- Skandiyumun henüz geniş çaplı uygulama alanları bulunmamaktadır. Kullanım alanları son yıllarda gelişme göstermektedir.
- Skandiyumun en önemli kullanımı alüminyum gibi metallerin alaşımlarıdır. Alüminyum alaşımlarına yüzde 0,5 oranında skandiyum katıldığında alaşımı güçlendirmektedir
- Dünya çapında yaklaşık 2 milyon ton skandiyum rezervi bulunmaktadır ve Çin toplam rezervlerin %27,5'ini oluşturmaktadır.
- Rezervlerin çoğu teknik, ekonomik ve çevresel zorluklar nedeniyle kullanılamamaktadır. Bu nedenle skandiyumun saf formda ekstraksiyonu oldukça karmaşık bir mineraldir.
- Bugün üretilen tüm skandiyum, üretimde özel bir skandiyum madeni olmadan, başka bir maden veya mineral işleme faaliyetinin yan ürünüdür.
- Küresel oksit üretimini yılda yaklaşık **30 ton** olarak tahmin edilmektedir.
- Dünya skandiyum üretiminde Çin ilk sırada, Rusya ise ikinci sırada yer almaktadır.
- Skandiyum geri kazanımı zorlu, pahalı ve çevreye zararlı bir üründür
- . Skandiyum yer kabuğunda bol miktarda bulunmasına rağmen cevher oluşturan bir metal değildir. Bu nedenle, birincil kaynak olarak nadiren 100 ppm'in

üzerindeki konsantrasyonlarda meydana gelmekte ve bu da ekstraksiyonu nu ekonomik açıdan çekici kılmamaktadır

- Skandiyum Pazarı büyüklüğünün 2024 yılında 0,67 milyar ABD doları olacağı tahmin edilmekte ve 2029 yılına kadar 1,34 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir
- Son yıllarda ülkemizde NTE aramaları hız kazanmakla birlikte, henüz yeterli seviyede değildir. NTE arama ve araştırmalarına daha fazla kaynak ayrılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] https://tr.wikipedia.org/wiki/Nadir_toprak_elementi, 12 Ocak 2024
- [2] <https://www.ceyrekmuhendis.com/nadir-toprak-elementleri/>, 8 Ocak 2024
- [3] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii>, Ocak 2024
- [4] <https://www.britannica.com/science/scandium>, Per Teodor Cleve ,8 Ocak 2024
- [5] <https://madencilikturkiye.com/wp-content/uploads/2018/09/Madencilik-Turkiye-Dergisi- Sayi-104.pdf> ,8 Ocak 2024
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Scandium>, 12 Ocak 2024
- [7] <https://chemistrydictionary.org/scandium>, 5 Ocak 2024
- [8] <https://www.makaleler.com/skandiyum-nedir>, 8 Ocak 2024
- [9] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii>, 9 Ocak 2024
- [10] <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/1/>, 7 Şubat 2024
- [11] <https://scandiummining.com/products/scandium-markets-and-uses-1>, Temmuz 2024
- [12] <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries>, Temmuz 2024
- [13] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/scandium-market>, Tem.2024
- [14] <https://scandiummining.com/>, Temmuz 2024
- [15] <https://en.institut-seltene-erden.de/aktuelle-preise-von-seltenen-erden>, Tem.2024
- [16] <https://www.scrapmonster.com/metal-prices/rare-earth/scandium/957> Tem.2024
- [17] <https://intracen.org/resources#data-and-analysis-1>, Temmuz 2024
- [18] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/ekonomik-gostergeler>, Temmuz 2024
- [19] <https://www.tuik.gov.tr/>, Temmuz 2024

İTRİYUM

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Özellikler.....	2
1.1.1. Fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	3
1.1.2. İtiryum İzotopları	6
1.2. İtiryumun Tarihçesi.....	7
1.3. İtiryumun Kullanım Alanları	8
2. İTRİYUM YATAKLARININ OLUŞUMU	10
2.1. Karbonatit İlişkili Yataklar	10
2.2. Peralkalin Kaya ile İlişkili Yataklar.....	11
2.3. Hematitik Granit Breş Tipi Yataklar.....	12
2.4. Skarn Yataklar	12
2.5. Plaser Yataklar	12
2.6. Tortul Yataklar.....	13
2.6.1. Lateritler	13
2.6.2. Diğer tortul yataklar	13
3. İTRİYUM REZERV ve KAYNAK DURUMU	14
3.1. Dünya Rezervleri ve Kaynakları.....	14
3.1.1. Birincil kaynaklar	14
3.1.2. Bir NTY kaynağı olarak kömür uçucu külü.....	15
3.2. Türkiye Rezervleri ve Kaynakları.....	19
4. İTRİYUM ÜRETİM DURUMU	20
4.1. Dünyada Üretim Miktarı.....	20
4.2. Türkiye’de Üretim Miktarı	20
4.3. Dünyada Üretim Yapan Şirketler	20
4.4. Türkiye’de Üretim Yapan Şirketler	20
4.5. Uluslararası Birlikler (Kuruluşlar).....	21
5. İTRİYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ	22
5.1. Cevherlerden İtiryumun Geri Kazanımı	22
5.2. Kirlenmiş Çözeltilerden ve Atık Sulardan İtiryumun Geri Kazanılması.....	26
5.3. Jenerik Atıklardan ve WEEE'den İtiryumun Geri Kazanımı.....	27
6. İTRİYUM TİCARETİ	34
6.1. Pazar/Piyasa ve Fiyat Durumu.....	34
6.2. Dünyada İthalat ve İhracat	34
6.3. Türkiye’de İthalat ve İhracat.....	34

7. İTRİYUMUN ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ	35
8. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	36
KAYNAKLAR.....	38

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. İtiryum Fiziksel Özellikleri [4].	4
Tablo 2. İtiryum Atomik Özellikleri [4].	5
Tablo 3.İtiryum Diğer Özellikler [4].	5
Tablo 4.İtiryum mineralleri [6].	6
Tablo 5.İtiryum İzotopları [4].	7

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İtiryum Özellikleri [2].	3
Şekil 2.İtiryum Heinrich Pniok [4].	9
Şekil 3.Fava ve Arkadaşları Akım Şeması [14].	22
Şekil 4.Coltinary ve Kidding Akım Şeması [14].	23
Şekil 5.Vijayalakshmi Akım Şeması [14].	25
Şekil 6.Herman R. Heymeijer Akım Şeması [14].	27
Şekil 7.Tooru ve ark. Akım Şeması [14].	29
Şekil 8.De Michelis ve ark. Akım Şeması [14].	31

1. GİRİŞ

İtriyum lantanitlere kimyasal olarak benzeyen gümüşü metalik bir geçiş metalidir ve "nadir toprak elementi" olarak sınıflandırılmıştır. İtriyum, Dünya'nın kabuğunda orta derecede bol bulunan bir elementtir. "İtriyum" kelimesi, İsveç Vauxholm yakınlarındaki Ytterby kasabasından esinlenerek türetilmiştir. İtriyumun keşif tarihi 18. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır.

İtriyum genellikle NTE mineralleri ile birlikte bulunmaktadır. NTE esas olarak birincil olarak magmatik sokulumlar ve ilgili damarlar, dayklar ve pegmatitler de bulunur. İkincil olarak kumsal, kumul ve alüvyon plaserlerinde bulunur. Başlıca kaynaklar güney Kaliforniya' da ki Dağ Geçidi. Ve Çin Halk Cumhuriyeti 'n de ki Bayan Obo, yataklarıdır.

Küresel talep ile arz arasındaki fark arttıkça, alternatif kaynakların aranması daha önemli hale gelmiştir. Kullanılmayan kömür uçucu külü CFA, bir atık olarak kabul edilir ve birçok elementin, NTY dahil, potansiyel bir kaynağı olabilmektedir.

İtriyum, genellikle nadir toprak elementlerinin (NTE' ler) işlenmesi sırasında yan ürün olarak üretilir ve bu alanda Çin, dünya üretiminde başı çekmektedir. 2022 yılında, dünya itriyum arzının büyük bir kısmı Çin tarafından sağlanmıştır ve önemli bir üretim de Burma (Myanmar) gibi ülkelerde gerçekleşmektedir. Dünyada nadir toprak minerallerinden elde edilen itriyum üretiminin yıllık olarak **10.000** ila **15.000** ton arasında olduğu tahmin edilmektedir.

İtriyumun çeşitli atık türlerinden geri kazanılması oldukça kolaydır ve ilgi çekicidir. İtriyum, cevherlerden, kirlenmiş çözeltilerden ve atık sulardan, jenerik atıklardan ve elektrikli veya elektronik ekipman (WEEE)' lar dan kazanılmaktadır.

Genel olarak, itriyum pazarı, yüksek teknoloji ve yeşil enerji sektörlerinde kritik uygulamalar nedeniyle güçlü bir büyüme göstermektedir. Fiyatlandırma ise bölgesel üretim maliyetleri, belirli endüstrilerden gelen talep ve küresel ticaret politikaları tarafından etkilenmektedir.

Bu yayımla itriyum madenciliğinin ülkemiz ve Dünya da ki durumuna ilişkin son veriler derlenip genel bir bakış açısı sağlanması amaçlanmıştır. İtriyum mineralinin özellikleri, itriyum mineralleri, itriyum yataklarının oluşumu, Dünya da ve Türkiye de itriyum minerali kaynakları, üretimi, ticareti ile çevresel etkilerine değinilmiştir. Yararlanılan kaynaklar, bölümlerin uygun yerlerinde parantezler halinde numaralandırılarak verilmiştir.

1.1. Genel Özellikler

İtriyum, Y sembolü ile gösterilen ve atom numarası 39 olan kimyasal bir elementtir. Lantanitlere kimyasal olarak benzeyen gümüşü metalik bir geçiş metalidir ve "nadir toprak elementi" olarak sınıflandırılmıştır. İtriyum hemen hemen her zaman nadir toprak minerallerindeki lantanit elementleri ile kombinasyon halinde bulunur ve doğada serbest olarak bulunmaz. Y- 89 tek kararlı izotoptur ve yer kabuğunda bulunan tek izotoptur. Yttrium, ismini, ilk kez bulunduğu yer olan İsveç, Ytterby'den almıştır.


İtriyum, gümüşü beyaz, orta derecede yumuşak, sünek bir metaldir. Hava ortamında oldukça kararludur; hızlı oksidasyonu yaklaşık 450 °C (840 °F) üzerinde başlar ve Y₂O₃ ile sonuçlanır. İtriyum havada beyaz yanarak kolayca tutuşur. Metal, 10 ile 300 K (-263 ile 27 °C veya -442 ve 80 °F) arasında sıcaklıktan bağımsız manyetik duyarlılığa sahip paramanyetik bir madde haline gelmektedir. 110 kilo barı aşan basınçlarda 1,3 K (-271,9 °C veya -457 °F) süper iletken hale gelir. Kararlı itriyum-89, doğal olarak oluşan tek izotoptur. Kütle olarak 77 ila 109 arasında değişen ve yarı ömrü 41 milisaniye (itriyum-108) ila 106,63 gün (itriyum-88) arasında değişen, toplam 33 (nükleer izomerler hariç) itriyumun radyoaktif izotopu bulunmaktadır.





İtriyum kimyasal olarak +3 oksidasyon durumuna sahip tipik bir nadir toprak elementi gibi davranır. İyonik yarıçapı, disprosyum ve holmiyumun yarıçaplarına yakındır ve bu elementlerden ayrışmasını zorlaştırır.

İtriyum, Dünya'nın kabuğunda orta derecede bol bulunan bir elementtir. Bolluğunun milyonda 28 ila 70 parça olduğu tahmin edilmektedir. Bu oran itriyumu, kobalt, bakır ve çinko kadar bol yapmaktadır. Diğer elementlerde olduğu gibi, güneş sisteminin diğer kısımlarında da itriyum bulunma oranı oldukça farklıdır. Örneğin Ay'dan getirilen kayalar yüksek bir itriyum içeriğine sahiptir. İtriyum, çoğu nadir toprak mineralinde bulunur. En önemli nadir toprak minerali monazit tir. Monazit dünyanın birçok yerinde, özellikle Brezilya, Avustralya, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri'nin bazı bölgelerinde bulunur. Tipik bir monazit, yaklaşık %3 itriyum içerir [1].

1.1.1. Fiziksel ve kimyasal özellikleri

İtriyumun **kimyasal sembolü** “Y”dir. Periyodik element cetvelinin 3-B grubunda yer alan kimyasal bir elementtir. **Atom numarası** 39, atom ağırlığı 88,90’dir. Erime noktası 1522 derece, kaynama noktası 3338 derecedir. 1509 derecede baz özelliği gösterir. 450 derecenin üzerinde hızla oksidasyon olur. Katı, gümüşî beyaz renginde geçiş metalidir (Şekil 1).

Atom numarası	39	88.90584	Atom ağırlığı
Sembol	Y	D	Yüksek değerlikli oksitlerin asit-baz özellikleri
Elektron dizilimi	[Kr]4d ¹ 5s ²		Kristal yapısı
Adı	İtriyum	—	Fiziksel durum 20°C (68°F)

	Nadir toprak elementi
	Hekzagonal
	Zayıf bazik
	Katı

Şekil 10. İtriyum Özellikleri [2].

Metalik bir parlaklığa sahiptir. Sünek, orta derecede yumuşak ve tepken bir metaldir. Yüzeyindeki oksit filmi sebebiyle havada oldukça kararlardır. Yüksek korozyon ve oksidasyon direncine sahiptir. Suda çözülebilen bileşikler toksiktir. Bileşiklerinin çoğu renksizdir.

İtriyum oksit, en önemli bileşimidir. İtriyum oksit, sülfat, klorür ve karbonat gibi birtakım tuzlar ve bileşikler oluşturur. İtriyum klorür tuzu renksizdir. Talaşları 400 derecenin üzerine havada kolayca tutuşabilir. Su ile ayrışarak hidrojen gazı salınır ve mineral asitlerle reaksiyona girer.


Doğada saf olarak bulunmaz. Gadolinit, öksenit, sarmarskit ve ksenotim minerallerinden elde edilir. Uranyum cevherlerinde de bulunabilir. Xenotime minerali, yüzde 50 oranında itriyum fosfat içerebilir. Doğada kurşundan daha fazla bulunur. İtريyum klorürden elektroliz yöntemiyle elde edilebilir. Sodyumla indirgenerek de elde etmek mümkündür. Çekirdek bölünmesi (fısyon) ürünü elementler arasında da rastlanabilir. Sanayide iyon değişimi yoluyla ayrıştırılarak üretilir. Tablo.1 de itriyumun fiziksel özellikleri verilmiştir. Ticari anlamda metal formu monazit kumu ve bastnazit minerallerinin kalsiyum ile indirgenmesi sonucu elde edilir [3].

Tablo 21. İtريyum Fiziksel Özellikleri [4].

Fiziksel Özellikleri															
Fiziksel hali (NŞA)	Sağlam														
Erime noktası	1799 K (1526°C, 2779°F)														
Kaynama noktası	3203 K (2930°C, 5306°F)														
Yoğunluk	4,469g/cm ³														
Sıvı hali (mp)	4,24 g/cm ³														
Füzyon ısısı	11,42 kJ/mol														
Buharlaşma ısısı	363 kJ/mol														
Molar ısı kapasitesi	26,53 J/ (mol K)														
Buhar basıncı	<table border="1"> <thead> <tr> <th>P(Pa)</th> <th>1</th> <th>10</th> <th>100</th> <th>1bin</th> <th>10 bin</th> <th>100bin</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T(K)</td> <td>1883</td> <td>2075</td> <td>(2320)</td> <td>(2627)</td> <td>(3036)</td> <td>(3607)</td> </tr> </tbody> </table>	P(Pa)	1	10	100	1bin	10 bin	100bin	T(K)	1883	2075	(2320)	(2627)	(3036)	(3607)
P(Pa)	1	10	100	1bin	10 bin	100bin									
T(K)	1883	2075	(2320)	(2627)	(3036)	(3607)									

Jeokimyasal değerlendirmelere göre, NTY elementleri toplam NTY, hafif, orta ve ağır olarak sınıflandırılabilir. Hafif NTY elementleri (aynı zamanda seryum grubu olarak da adlandırılır; La, Pr, Nd ve Ce; HNTY), orta (Sm, Gd ve Eu; ONTY) ve ağır (aynı zamanda itriyum grubu olarak da adlandırılır Lu, Er, Ho, Tb, Yb, Dy, Sc, Tm ve Y; ANTY) grupları. Ek olarak, bolluğuna ve kullanım potansiyellerine göre, kritik (Y, Dy, Eu, Er, Nd, Tb), ölçsüz (kritik ve kritik olmayan grup dışındaki) (Lferenru, Tm, Ho, Yb, Ce) ve kritik olmayan (La, Pr, Sm Gd) NTY olarak ta sınıflandırılmaktadır [5]. Tablo 2’de itriyumun atomik özellikleri, Tablo 3’de ise itriyumun diğer özellikleri, Tablo 4’te belirli itriyum mineralleri verilmiştir.

Tablo 22. İtiryum Atomik Özellikleri [4].

Atomik Özellikleri	
Oksidasyon durumu	0, +1, +2, +3 (zayıf bazik oksit)
Elektronegatiflik	Paul ölçeği: 1.22
İyonlaşma enerjileri	Birinci: 600 kJ/mol İkinci: 1180 kJ/mol Üçüncü: 1980 kJ/mol (vb.)
Atom yarıçapı	Ampirik: 180 pm
Kovalent yarıçapı	190±7 pm
Spektrum çizgileri	

Tablo 23.İtiryum Diğer Özellikler [4].

Diğer Özellikler	
Doğal bulunuşu	Bileşik halinde
Kristal yapı	Altıgen, sıkı paket (hcp) (hP2) α
Termal genleşme	11,2 x10 ⁻⁶ /K (20 °C'de)
Termal iletkenlik	17,2 W/(m·K)
Elektriksel direnç	α , çoklu: 596 n Ω .m (oda sıcaklığında)
Manyetik sıralama	Paramanyetik
Molar manyetik duyarlılık	+2,15 x 10 ⁻⁶ cm ³ / mol (2928 K)
Young katsayısı	63,5 GPa
Kayma katsayısı	25,6 GPa
Hacimsel katsayı (sıkışmazlık)	41,2 GPa
Tek eksenli gerilme oranı	0,243
Brinell sertliği	200–589 MPa
CAS numarası	7440-65-5

Tablo 24. İtiryum mineralleri [6].

Adı	Formülü	Kristal Sistem
Ksenotim-(Y)	Y(PO ₄)	Tetragonal
Öjenik-(Y)	(Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti) ₂ O ₆	Ortorombik
Samara-(Y)	YFe ³⁺ Nb ₂ O ₈	Monoklinik
Fergusonit-(Y)	YNbO ₄	Tetragonal
Gadolinit-(Y)	Y ₂ Fe ²⁺ Be ₂ Si ₂ O ₁₀	Monoklinik
Aşinit-(Y)	(Y, Ln, Ca, Th) (Ti, Nb) ₂ (O, OH) ₆	Ortorombik
Kaynosit-(Y)	Ca ₂ (Y, Ce) ₂ (Si ₄ O ₁₂) (CO ₃) · H ₂ O	Ortorombik
Agardit-(Y)	YCu ₆ (AsO ₄) ₃ (OH) ₆ · 3H ₂ O	Hekzagonal
Churchite-(Y)	Y(PO ₄) · 2H ₂ O	Monoklinik
Hingganite-(Y)	(Y, NTE, Ca) ₂ (□, Fe ²⁺) Be ₂ [SiO ₄] ₂ (OH) ₂	Monoklinik

1.1.2. İtiryum İzotopları

İtiryum izotopları, nükleer patlamalarda ve nükleer reaktörlerde uranyumun nükleer fisyonunun en yaygın ürünleri arasındadır. Nükleer atık yönetimi bağlamında itiryumun en önemli izotopları ⁹¹Y ve ⁹⁰Y'dir ve yarı ömürleri sırasıyla 58,51 gün ve 64 saattir. ⁹⁰Y kısa bir yarı ömre sahip olmasına rağmen, uzun ömürlü ana izotopu olan stronsiyum-90 (⁹⁰Sr) ile 29 yıllık bir yarı ömre sahiptir.

Tüm grup 3 elementlerinin atom numarası tektir ve bu nedenle az sayıda kararlı izotop vardır. Skandiyumun bir kararlı izotopu vardır ve itiryumun kendisi de yalnızca bir kararlı izotop olan ⁸⁹Y'ye sahiptir ve bu aynı zamanda doğal olarak oluşan tek izotoptur. Bununla birlikte, lantanit nadir toprakları, atom numarası eşit olan elementleri ve birçok kararlı izotopu içerir. Yttrium-89'un, kısmen diğer süreçler tarafından oluşturulan izotopların elektron emisyonu (nötron → proton) yoluyla bozunması için yeterli zaman sağlayan s-süreç nedeniyle, olabileceğinden daha bol olduğu düşünülmektedir. Bu kadar yavaş bir süreç, sırasıyla 50, 82 ve 126 nötronlu olağandışı kararlı atom çekirdeğine sahip olan, atomik kütle numaraları (A = protonlar + nötronlar) 90, 138 ve 208 civarında olan izotopları tercih etme eğilimindedir. Bu kararlılığın, çok düşük nötron yakalama kesitinden kaynaklandığı

düşünülmektedir. Bu kütle sayılarına sahip izotopların elektron emisyonu, bu kararlılık nedeniyle daha az yaygındır, bu da onların daha yüksek bir bolluğa sahip olmasına neden olmaktadır. ⁸⁹Y'nin kütle numarası 90'a yakındır ve çekirdeğinde 50 nötron bulunmaktadır.

İtriyumun en az 32 sentetik izotopu gözlemlenmiştir ve bunların atomik kütle sayıları 76 ile 108 arasında değişmektedir. Bunlardan en az kararlı olanı, >150 ns yarı ömrü olan ¹⁰⁶Y'dir (⁷⁶Y'nin yarı ömrü >200 ns) ve en stabil olanı 106.626 günlük yarılanma ömrüyle ⁸⁸Y'dir. Sırasıyla 58,51 gün, 79,8 saat ve 64 saatlik yarı ömre sahip ⁹¹Y, ⁸⁷Y ve ⁹⁰Y izotopları dışında, diğer tüm izotopların yarı ömürleri bir günden daha kısadır ve çoğu bir saatten azdır.

Kütle numaraları 88 veya altında olan itriyum izotopları, stronsiyum (Z = 38) izotoplarını oluşturmak için öncelikle pozitron emisyonu (proton → nötron) yoluyla bozunur. Kütle numarası 90 veya üzerinde olan itriyum izotopları öncelikle elektron emisyonu (nötron → proton) yoluyla bozularak zirkonyum (Z = 40) izotoplarını oluşturur. Kütle numaraları 97 veya üzerinde olan izotopların ayrıca β- gecikmeli nötron emisyonunun küçük bozunma yollarına sahip olduğu da bilinmektedir [4]. Tablo 5 itriyum izotoplarını göstermektedir.

Tablo 25.İtriyum İzotopları [4].

Ana izotoplar			Bozunma	
	Bolluk	Yarılanma ömrü ($t_{1/2}$)	Mod	Ürün
⁸⁷ Y	Sentetik	3,4 gün	ε	⁸⁷ Sr
			γ	–
⁸⁸ Y	Sentetik	106,6 gün	ε	⁸⁸ Sr
			γ	–
⁸⁹ Y	100%	Stabil		
⁹⁰ Y	Sentetik	2,7 gün	β ⁻	⁹⁰ Zr
			γ	–
⁹¹ Y	Sentetik	58,5 gün	β ⁻	⁹¹ Zr
			γ	–

1.2. İtriyumun Tarihçesi

İttriyumun keşif tarihi 18. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. 1787 yılında Carl Axel Arrhenius, İsveç'in Ytterby kasabası yakınlarındaki bir feldspat-kuars madeninde kömüre benzeyen bir mineral bulmuştur. Yıllar sonra "ittria" adı verilen bu mineralden bir örnek alan Finlandiyalı kimyager Johan Gadolin, 1794 yılında Finlandiya'da minerali incelemiştir. Gadolin'in incelediği mineralde yüzde 31 oranında silika, yüzde 19 alümin, yüzde 12 demir oksit ve yüzde 31 oranında da bilinmeyen yeni bir madde vardı. Gadolin, analiz sonuçlarını "**yeni bir oksit**" olarak yayınlamıştır. Gadolin'in sonuçları 1797 yılında İsveçli kimyager Anders Ekeberg tarafından "yeni bir oksit" olarak teyit edilmiştir.

İttriyum ile ilgili bazı tarihler ise şöyle;

- 1828 yılında itriyumun metal formu ilk olarak Alman kimyager Friedrich Wöhler tarafından susuz itriyum kloridin potasyum ile ısıtılmasıyla gri bir toz olarak elde edilmiştir.
- 1843 yılında Carl Gustav Mosander, itriyum oksidin üç oksitten oluştuğunu keşfetmiştir.
- 1953 yılında en yüksek saflık derecesi olan itriyum, Frank Spedding tarafından iyon değişim tekniği ile elde edilmiştir.
- 1987 yılında Amerikalı profesörler Maw-Kuen Wu ve Paul Chu, itriyum baryum bakır oksit bileşiğinin süper iletkenlik özelliğini keşfetmiştir.

"İttriyum" kelimesi, İsveç Vauxholm yakınlarındaki Ytterby kasabasından esinlenerek türetilmiştir. Stockholm'e de yakın olan bu kasabada, nadir toprak elementleri olarak bilinen elementleri içeren madenler bulunmaktadır. Kasabanın adı, erbiyum, terbiyum ve iterbiyum gibi elementlerin isimlerinin de esin kaynağıdır [3].

İttriyumun Kullanım Alanları

Düz ekran televizyonların ortaya çıkmasından önce, TV setlerinde görüntüleri ekrana yansıtan büyük cam tüpler olan büyük katot ışın tüpleri bulunuyordu. Europium elementi ile katkılanmış itriyum oksit, milyonlarca renkli televizyon setinde kırmızı rengi sağlıyordu.

İttriyum oksit (yttria), normalde sıcaklıkla değişen zirkonyanın kristal yapısını stabilize eden bir alaşım yapmak için zirkonyum okside (zirkonya) eklenir. Uzmanlar, yttria zirkonyanın kübik yapısını kilitleyerek çok yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun, olağanüstü yüksek tokluğa sahip bir seramik yarattığını belirtmektedirler.

Bu tür seramik, elektronikten jet motorlarındaki termal bariyer kaplamalara ve tıbbi implantlara kadar çeşitli amaçlara göre birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. İtiryum-alüminyum kompozitiyle yapılan sentetik garnetlerin 1970'lerde yaygın olarak elmas ve diğer değerli taşların simülasyonu olarak satılmış, ancak sonunda yerlerini kübik zirkonya ya bırakmışlardır. Bugünlerde, itiryum alüminyum granatlar (YAG) endüstriyel lazerlerde ışığı yükselten kristaller olarak kullanılmaktadır. İtiryum demir garnetleri mikrodalga filtrelerin yanı sıra radar ve iletişim teknolojisinde de kullanılmaktadır.

İtiryum çok sayıda uygulamada bulunmasına rağmen, en büyük nihai kullanım alanları seramik ve fosforlardır. Daha az miktarlarda metalürji, cam parlatma ve katkı maddeleri ile katalizörlerde kullanılmaktadırlar. Ayrıca çok sayıda elektronik uygulama vardır, ancak oksijen sensörleri özellikle önemli bir kullanım alanıdır.

İtiryum, cep telefonları ve daha büyük ekranların yanı sıra genel aydınlatmada kullanılan fosforları üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Renkli televizyon tüplerindeki kırmızı fosforlarda bulunan itiryum, 1960'larda ve 70'lerde yaygın kullanıma yol açmıştır. Floresan tüpler (lineer ve kompakt) watt başına LED ampullerden önemli ölçüde daha fazla itiryum kullanmaktadır.

Radyoaktif izotop itiryum-90, karaciğer kanseri ve diğer bazı kanserleri tedavi etmek için radyasyon terapisinde kullanılmaktadır [7]. Şekil 2 de itiryumun SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 11. İtiryum (Heinrich Pniok) [4].

2. İTRİYUM YATAKLARININ OLUŞUMU

Bu kısımda; itriyum minerali NTE mineralleri ile birlikte olduğu için, NTE yatakları hakkında bilgi verilmektedir. NTE esas olarak aşağıdakilerle ilişkili birincil olarak magmatik sokulumlar ve ilgili damarlar, dayklar ve pegmatitler de bulunur. İkincil olarak kumsal, kumul ve alüvyon plaserlerinde bulunur. Ayrıca artık birikintili yataklarında varlığı bilinmektedir ve bunların gelecekte ekonomik açıdan önemli olacağı öngörülmektedir.

2.1. Karbonatit İlişkili Yataklar

Karbonatit ler, %50'den fazlasını karbonatların oluşturduğu magmatik kayalar olarak modal karbonat, karakteristik olarak tüm diğerlerinden daha fazla kaya türlerine nispeten yüksek seviyelerde NTE içerirler (örneğin kalsiyum-%0,37, magnezyum- %0,42 ve ferrokarbonatitler için %1). Bu kayalar dünyanın ana NTE kaynağı olarak kabul edilmektedirler. NTE içeren karbonatitler tipik olarak alkali-karbonatit komplekslerindeki magmatik sürecin son aşamasıdır (örnek: siyenit, nefelin siyenit ve nefelinit). NTE karbonatit yatakları magmatik yataklar ve metasomatik yataklar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Magmatik yataklar, birincil magmatik kristalleşme süreçleriyle ilişkili olarak oluşmaktadır. NTE genellikle bir dizi karbonatitin ferro-karbonatitler içerisinde kristalleşmesi sırasında konsantre edilir (demir açısından zengin dolomit veya ankerit karbonatitler). Magmatik Karbonatit yatakları genellikle küçük (3-4 km) kompozit Plütonlar da ki tıkaç benzeri gövdeler olarak, eş zamanlı mafik ve ultramafik kayalar olarak oluşurlar. Mineralizasyon genellikle magmatik katmanlaşma ve ana kayaların içindeki akışmış yapılarla ilişkilidir. Yataklar genellikle mercek grupları veya düzensiz sürgünler planlı, hilal veya halka biçimli formlara sahiptir. Bu yataklar genel olarak dik eğimlere sahiptir ve sokulum komplekslerinin duvarlarına paralel bir yapı gösterirler.

Metasomatik yataklar önceden var olan karbonatitler ile veya hidrotermal alterasyon üreten yan kayalar ve/veya skarn minerallerinin kristalizasyonu sırasında açığa çıkan sıvıların reaksiyonuyla oluşmaktadır. Hidrotermal değişim alkali metasomatizma veya fenitizasyon ile karakterize edilir; önceden var olan minerallerin yerini alkali feldispat ve sodik piroksen ve amfibol mineralleri alır. Metasomatik birikintiler tipik olarak şu şekildedir:

- 1) dayklar ve dilatan kalsitli veya kalsitsiz ankerit veya dolomit damarları;
- 2) ince hidrotermal damarlar;
- 3) stokvorks; ve

4) yer değiştirmiş kütleler kalsit ve dolomit veya ankerit bakımından zengin kütleler. Bu kayalardaki NTE konsantrasyonları ağırlıkça yaklaşık %1-3'tür. Ve ekonomik bir yatak olabilmesi için düşük sıcaklıkta hidrotermal değişim ve/veya hava etkisiyle aşınmış daha fazla konsantrasyon gerektirir. Karbonatit yataklarında en çok bulunan mineraller üç florokarbonat minerali bastnazit, parisit ve sensit; hidratlanmış karbonat, anasilit ve fosfat monazit. Ağır NTE mineralleri nadirdir.

Başlıca kaynaklar güney Kaliforniya da ki Dağ Geçidi (Mountain Pass), ve Çin Halk Cumhuriyeti 'n de ki Bayan Obo, yataklarıdır (İç Moğolistan). Dağ Geçidi son birkaç on yıldır sürekli olarak dünyanın önde gelen hafif NTE, üreticisi durumundadır. 1949'da keşfedilen bu yatak %7,67 oranında nadir toprak oksitleri (NTO) yaklaşık 36 Mt içermektedir. Bayan Obo 1927'de keşfedilmiştir ve 1950'lerden itibaren geniş ölçekte araştırılmıştır. Ortalama 48 Mt stokworks ve karbonat değişiminde %6 NTO derecesi manyetit-hematit cevheri kütleleri ile dünyanın bilinen en büyük NTE yatağıdır. Çıkarılan ürün iki parçaya bölünür, biri demir için izabe tesisine gönderilir. Diğeri hem bastnazit hem de toryumsuz monazit içeren %60 NTO üretimi için konsantre tesisine gönderilir. NTE açısından zengin diğer karbonatitler. ABD'de Mineral Hill Bölgesi, Idaho-Montana, Quebec, Kanada (%0,2-0,5 NTO'da 23,8 Mt); Araxa ve Tapira, Minas Gerais, Brezilya; Tomtor, kuzey Sibirya'da; Fen Bölgesi, Norveç; Koronge, Burundi ve Kangankunde Tepesi, Malavi olarak bilinmektedir [8].

2.2. Peralkalin Kaya ile İlişkili Yataklar

Peralkalin magmatik kayaçlar, alkali amfibolün ve piroksen mineralleri oluşmasına neden olan alüminyum üzerinde alkali elementlerin bir molar fazlalığı ile karakterize edilir ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (Al_2O_3). Magmatik ve metasomatik NTE cevherleşmeler genellikle peralkalin batolitlerin küçük uydu evreleriyle ilişkilidir. Magmatik yataklarında, NTE içeren ana mineraller yan kayaçlarla birlikte kristalize olurlar ve tipik olarak magmatik kayaçlarla birlikte belirli magmatik birimler boyunca yayılırlar. Yataklarla ilişkili hidrotermal değişim genellikle geç döteryumlu ve yerel niteliktedir ve karakteristik olarak hidrotermal değişim gösteren yatakları çevreleyen zonlarda geniş alanlar yoktur.

Metasomatik yataklar Peralkalin magmatik kayaçların içinde veya yakınında ve önceden var olan kayalar dan meydana gelir. Yataklar sokulum esnasında meydana gelen soğuma ve açığa çıkan akışkanların serbestleşmesi ile ilişkilidir ve hidrotermal alterasyon yaygın olarak görölmektedir.

Magmatik yataklar sokulum kütlesinin şeklini alırken, metasomatik yataklar ise damarlar stokvorklar ve düzensiz yer değiştirme zonlarının şeklini alırlar. Oluşan mineraller tipik olarak ince tanelidir ve geniş çapta yayılmıştır. Sokulum yataklarının subvolkanik analogları pegmatit-aplit daykları ve buradan çıkan damarlardır.

Bu tip yataklara örnekler; Rusya'nın Kola Yarımadasındaki Khibini ve Lovozero kompleksleri, Batı Avustralya'daki; Brockman yatağı, New Mexico; Pajarito Dağı, Kanada Thor Gölü, Kuzeybatı Bölgeler, (Göl Bölgesi %1,99 ile 64 Mt'a sahiptir. NTO); Quebec, Kanada Garip Göl/Lac Brisson, Labrador- (%0,54 NTE ile 52 Mt açık ocak maden rezervi, %0,31 Y₂O₃); ve Oslo bölgesi, Norveç, olarak gösterilebilir [8].

2.3. Hematitik Granit Breş Tipi Yataklar

NTE mineralizasyonu Olympic Dam gibi Proterozoik demir oksitin bir bileşeni yataklarıdır (Cu-U-Au-NTE). Cevherleşme geç Prekambriyan çağı hidrotermal magmatik ve tektonik tortulları içeren hematitik granitik breşlerden oluşmaktadır. Olympic Dam'da birçok büyük dağılık kalkopirit-bornitekalkosit cevherine altın, uranyum, gümüş, nadir toprak elementler baryum ve flor mineralleri eşlik etmektedir. Yatakların ortalamaları %1,6 Cu, %0,05 U, 3,5 g/t Ag, 0,6 g/t Au ve %35 Fe ve kayda değer miktarda NTE içermektedir, özellikle %0,2 La ve %0,3 Ce [8].

2.4. Skarn Yataklar

Skarn yatakları epigenetik, metasomatik yataklardır. Sokulumların kontak zonları içindeki karbonat bakımından zengin kayalardan oluşur. Yukarıda bahsedilen karbonatitlerle ilişkili skarn yataklarına ek olarak Avustralya Mary kathelen de 200.000 ton NTO (çoğunlukla hafif NTE) U-NTE-Th yatağından üretilmiştir. Maden yatağı önceden ortalama %0,13 U₃O₈ tenörlü 9,5 Mt'luk bir rezerve sahipti. Skarn, alkali –granit sokulumuna bitişik garnet içeren kalk-silikat kayalarda meydana gelir. Ana cevher minerali uraninitir. Ve NTE uraninit, apatit ve allanitte bulunmaktadır [8].

2.5. Plaser Yataklar

Özellikle yüksek özgül ağırlığa sahip dirençli NTE mineralleri özellikle monazit ve ksenotim plaserde konsantre olarak bulunur. Bu yataklar esas olarak titanyum ve zirkonyum üretimi için işletilen yataklardır. Sonuç olarak monazit ve ksenotim üretim düzeyi diğer pazarlara bağımlıdır. Ana üreticiler Batı sahil kumu yataklarıdır. Avustralya (Eneabba, Yoganup ve Capel), Hindistan (Alwaye, Kerala Eyaleti) ve Sri Lanka'da esas olarak ilmenit ve rutil, monazit ve ksenotim ayrıca plaserin yan ürünleri olarak da üretilmiştir. [8].

2.6. Tortul Yataklar

2.6.1. Lateritler

NTE laterit yatakları NTE açısından zengin alkali komplekslerin ayrışması ile yoğun subtropikal iklim koşullarında oluşur. Bu yataklar ağırlıklı olarak götit, hematit mineral toplulukları, Al-hidroksitler, kaolinit mineralleri ve kuvars ve tipik olarak ağırlıkça %10-25 NTO içerir, ancak ağırlıkça %42'ye kadar NTO içerir. Lateritlerde NTE ağırlıklı olarak rezidüel magmatik apatit ile bağlıdır, piroklor ve monazit veya ikincil fosfatta krandalit grubuna ait mineraller, ikincil apatit ve monazit, plumbogummit, rabdofan ve/veya demir hidroksitlerdir. Örnekler arasında Brezilya'daki Araxa ve Catalao; Avustralya'da Weld Gabon'da Mabounie ve Zaire'de Lueshe olarak yer almaktadır [8].

2.6.2. Diğer tortul yataklar

Longnan, iyonik veya iyon adsorpsiyonu olarak adlandırılan NTE içeren kil tipi cevher, Güneydoğu Çin'in Jiangxi Eyaleti'nde çıkarılmaktadır. Cevher, granitin hava etkisiyle aşınmasıyla oluşmuştur ve tipik olarak yaklaşık %1 NTO tenörüne sahiptir. Bu yatak çok düşük seryum içeriği ile karakterize edilir (A sınıfında %0,3-1,7 ve B sınıfında %3-5,5) ve samaryum, europium ve terbiyum veya itriyumda açısından zengin bir NTO içeriğine sahiptir. Mombassa, Kenya ve Minas Gerais, Brezilya 'da bu yataklar karbonatitlerle ilişkilidir. Batı ABD'nin ve Florida'nın fosfat bölgeleri oluşumu Apatit Phosphoria'da olduğu gibi fosfat kayasında bulunmaktadır [8].

3. İTRİYUM REZERV ve KAYNAK DURUMU

Nadir toprak elementleri, Dünya'nın kabuğunda nispeten bol bulunur, ancak madenciliği yapılabilir konsantrasyonlar çoğu diğer mineral ürünlerinden daha az yaygındır. Monazit ve ksenotimdeki büyük itriyum kaynakları dünya çapında plaser yataklarında, karbonatitlerde, uranyum cevherlerinde ve bozunmuş kil yataklarında (iyon adsorpsiyon cevheri) mevcuttur. Apatit-manyetit içeren kayalarda, niyobyum-tantal mineral yataklarında, plaser olmayan monazit içeren yataklarda, tortul fosfat yataklarında ve uranyum cevherlerinde itriyum kaynakları oluşur [9].

3.1. Dünya Rezervleri ve Kaynakları

3.1.1. Birincil kaynaklar

Hindistan'da, Hint Okyanusu çevresindeki tüm kara kütlesi, çevredeki kayalar NTY içermektedir ve Hint Okyanusu'nun neredeyse tüm kıyı şeridi 'mineral kumlar' bakımından zengindir. Küresel NTY (nadir toprak elementleri ve itriyum) kaynakları başlıca bastnazit ve monazit te yoğunlaşmıştır. Çin ve ABD, dünya bastnazit rezervlerinin çoğunluğunu oluştururken, Avustralya, Çin, Hindistan, Malezya, Brezilya, Güney Afrika, Sri Lanka, Tayland ve ABD'deki monazit yatakları, ikinci en büyük kısmı oluşturmaktadır. Apatit, eudialit, loparit, çeralit, fosforitler, nadir toprak içeren iyon adsorpsiyon killeri, ikincil monazit, işlenmiş uranyum çözeltileri ve ksenotim, kalan kaynakların çoğunu oluşturmaktadır. Keşfedilmemiş NTY kaynaklarının beklenen talebe göre çok yüksek olduğu varsayılmaktadır.

Küresel NTY rezervlerinin çoğu Çin'de olup, dünya NTY rezervlerinin %36,6'sı (44 milyon ton) buradadır; Vietnam %18,3 (22 milyon ton) ve Brezilya %17,5 (21 milyon ton) ile diğer büyük rezervlere sahiptir. Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya ve Grönland gibi diğer ülkelerin küresel NTY rezervlerindeki payı %5'in altındadır.

NTY+Sc, Lantanid grubundaki 15 elementi ve iki geçiş metali elementini (Skandiyum ve İtriyum) içeren bir grup olup, birçok temiz ve yeşil teknoloji için gerekli olan ham maddeler olarak kabul edilir. Küresel talep ile arz arasındaki fark arttıkça, alternatif kaynakların aranması daha önemli hale gelmiştir, özellikle de ithalata büyük ölçüde bağımlı olan ülkeler için. Kullanılmayan kömür uçucu külü CFA (coal fly ash), bir atık olarak kabul edilir ve birçok elementin, NTY dahil, potansiyel bir kaynağı olabilmektedir [10].

3.1.2. Bir NTY kaynağı olarak kömür uçucu külü

Pulverize kömür yakmanın yan ürünlerinden biri olan uçucu kül, tehlikeli doğası ve büyük miktarlarda üretilmesi nedeniyle küresel bir kirletici olarak kabul edilmektedir. Enerji talebindeki artış nedeniyle, kömür uçucu külü (CFA) üretiminin artması beklenmekte ve bu da CFA'nın kullanımına yönelik araştırmaları gerekli kılmaktadır. CFA, termik santrallerde kömür yanmasından sonra üretilen değerli bir katı atık kalıntısı olabilmektedir. Nadir toprak elementleri ve İtiryum (NTY) çoğunlukla CFA'da bulunmaktadır. Hindistan yılda yaklaşık 217,04 milyon ton CFA üretmekte ve bunun sadece %77,59'unu kullanmaktadır. Bu nedenle kullanılmayan CFA, arazi dolgusu olarak bertaraf edilmekte ve toprak, su ve havayı kirletmektedir. Araştırmacılar, CFA'nın NTY ve stratejik ve ekonomik öneme sahip diğer değerli elementlerin çıkarılmasıyla daha fazla kullanılmasını sağlamak için çeşitli yollar üzerinde çalışmaktadırlar. Yeterli miktarda nadir toprak elementine sahip CFA, bu elementler için iyi bir ikincil kaynak olabilmektedir.

Modern termik santrallerde, kömürün mineral maddesinin çoğu uçucu kül (CFA) (%90) olarak dışarı atılır ve geri kalanı taban külü (BA) (base ash) olarak kalır. İdeal bir durumda, elektrik üretimi için fosil yakıt kullanan ülkeler %100 kül kullanımını hedeflemelidir. Ancak, bu ülkeler bu hedefe ulaşamamaktadır. Son yıllarda, araştırmacılar bu çevresel olarak tehlikeli endüstriyel atığı NTY çıkarımı için bir kaynak olarak kullanmaya çalışmaktadır. Birçok araştırmacı, farklı yöntemler kullanarak (çözücü ekstraksiyonu, iyonik ekstraksiyon, flaş joule ısıtma) CFA'dan NTY çıkarımında başarılı olmasına rağmen, bu elementlerin ekonomik endüstriyel ölçekte çıkarımı için yeterli seçenek bulunmamaktadır. CFA da ki NTY kalitesini belirlemek için çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Bunlardan; bakış katsayısı C_{out} (outlook coefficient) ve kritik yüzde C_p (critical percentage) başlıcalarıdır. Yapılan incelemeler sonucunda %30 üzeri C_p değerine ve 1 in üzerinde C_{out} değerine sahip olan CFA'ların kayda değer kaynaklar olduğu kabul görmektedir. Modern analitik yaklaşımların kömür külünde NTY'i incelemek için uygulama potansiyeli ve çıkarımı araştırmacılar tarafından gözden geçirilmiştir. Aşağıdaki maddelerde çeşitli ülkelerdeki CFA'da ki NTY içerikleri hakkında bilgi verilmektedir [10].

A- Çin'deki CFA'da ki NTY

Çin'in Sichuan, İç Moğolistan, Guizhou, Yunnan ve Guangxi bölgelerinden otuz örnek rapor edilmiştir. Bu bölgelerin hepsi NTY açısından zengin yataklarıyla bilinmektedir. CFA örnekleri NTY bakımından zengin olup, toplam NTY konsantrasyonu maksimum 2490 ppm ve minimum 720 ppm'dir, bu da küresel ortalamaya kıyasla oldukça yüksektir. Ortalama H NTY içeriği en yüksek paya sahiptir (%74,86), ardından ONTY (%21,1) ve ANTY (%4,1) gelmektedir. C_{out} maksimum 1,6 ve minimum 0,5 değerine ulaşmaktadır. Düşük C_{out} değeri, yüksek C_e (656 ppm) ve diğer aşırı nadir toprak elementlerinin içeriğinden kaynaklanmaktadır. Maksimum C_{out} değeri (1.6), Nd (162 ppm) ve Y (296 ppm) gibi kritik elementlerin yüksek konsantrasyonuna bağlıdır. Bu küller, NTY'nin faydalı geri kazanımı için uygun olabilmektedirler [10].

B- Hindistan'daki CFA'da ki NTY

Toplamda 12 CFA örneği, ile çalışılmıştır. Araştırmacıların çalıştığı termik santraller şunlardır: Mejia Termik Santrali, Raghunathpur Termik Santrali, Durgapur Çelik Termik Santrali, Maithon Private Limited, Farakka Süper Termik Santrali, Ramagundam Süper Termik Santrali, Chandrapur Süper Termik Santrali, Bhusawal, Kaperkheda, Durgapur, Panipat ve Kota'dır.

Tüm CFA örneklerinin ortalama toplam NTY miktarı 180.2 ppm'dir, bu da küresel ortalamanın neredeyse %45 altındadır. Ayrıca, Hint CFA'sı çok yüksek ortalama HNTY oranına sahiptir (%88,2), bunu ONTY (%6,6) ve ANTY (%5,2) takip eder, ortalama C_{out} değeri 0.7 olup maksimum 1.5'tir. Düşük C_{out} değeri, kritik NTY'ye kıyasla yüksek konsantrasyonda bulunan ölçüsüz (kritik ve kritik olmayanın dışındaki NTY) NTY, C_e , varlığından kaynaklanmaktadır [10].

C- Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Güney Afrika Cumhuriyeti (GAC) Kömür Uçucu Külü (CFA) içindeki NTY

Bu bölümde, toplam 157 CFA örneği incelenmiştir. Kullanılan kömürün doğası hakkında ayrıntı verilmediğinden, kömür derecesinin bitümlü, yarı-bitümlü veya karışımı olduğu varsayılmıştır. ABD'den elde edilen CFA'lar da ki ortalama toplam NTY konsantrasyonu 426 ppm olup, bu değer küresel ortalamadan biraz daha yüksektir. HNTY (72.3%) en büyük ortalama paya sahiptir, bunu ONTY (%23,5) ve ANTY (%4,1) takip eder. Ortalama C_{out} değeri de 1 olup, bu iyi olarak kabul edilebilir. Burada çok sayıda CFA örneği, küresel ortalamanın neredeyse iki katı daha fazla ortalama toplam NTY içeriğine sahiptir ve en yüksek değer 775.5 ppm'dir. Bu CFA örneklerinin bazıları, C_e ve Y'nin küresel ortalamasının

neredeysi iki katı konsantrasyonuna sahiptir ve bu nedenle NTY için umut verici ikincil kaynaklar olarak görölmektedir [10].

D- Rusya'daki CFA'da ki NTY

Araştırmacılar tarafından analiz edilen 20 kül örneğinin ortalama toplam NTY içeriğı 2.370,65 ppm'dir, Bu değer küresel ortalamanın yaklaşık 5.9 katıdır. Bir örnek bu incelemedeki tüm örnekler arasında en yüksek NTY içeriğine sahiptir ve 8424 ppm ile C_{out} değeri 3.8'dir. Rusya'daki CFA'da ki minimum NTY içeriğı 841 ppm'dir. Örnekler arasındaki maksimum C_{out} değeri 3.9'dur. HNTY değeri %31 ile %77,9 arasında değişir ve ONTY değeri %18,7 ile %55,5 arasındadır. Bu örnekler, Rusya'dan elde edilen CFA örnekleri arasında NTY'nin ikincil kaynağı olarak en umut verici olanlardır [10].

E- Güney Kore Cumhuriyeti'nden (GKC) CFA'da ki NTY

Araştırmacılar tarafından analiz edilen bir CFA örneğı, Güney Kore Cumhuriyeti'ndeki Batı Termik Santrali'nden (WTPS) alınmıştır. CFA örneğinde toplam NTY miktarı 115.3 ppm olup, bu değer küresel ortalamaya göre düşüktür. NTY kompozisyonu ağırlıklı olarak HNTY (%62,1), ardından ONTY (%31,5) ve ANTY (%6,4) ile karakterizedir. C_{out} değeri 1.2 ve kritik yüzdesi %42,4'tür. Beş BA (taban külü) örneğı analiz edilmiştir; Beş BA örneğinin ortalama toplam NTY miktarı 181.2 ppm olup, bu değer küresel ortalamanın altındadır. Ortalama HNTY yüzdesi %68,3 olup, bunu ONTY (%26,8) ve ANTY (%5) izlemektedir. Kritik yüzde ve C_{out} 'un ortalama değerleri sırasıyla %40,9 ve 2'dir. Taean Termik Santralinden (TPP) alınan toplam NTY miktarı diğerlerinden maksimum olup 346.3 ppm'dir, ancak ölçüsüz yüzde (%36,1) Shin Seochon Termik Santralinden (TPP) alınan BA örneğine kıyasla çok yüksektir ve bu örnekte sadece %8,5'tir. Seochon TPP'den alınan BA'nın C_{out} değeri 5.7 olup, bu yüksek kritik yüzde (%48) ve düşük aşırı yüzde (%8,5) nedeniyle ortaya çıkmıştır. Ancak, hiçbir örnek NTY'nin maliyet etkin çıkarımı için gerekli konsantrasyona ulaşamamıştır [10].

F- Polonya'daki CFA'da ki NTY

Polonya'da, elektrik üretimi ağırlıklı olarak taş kömürü ve linyit kullanılan kömürle çalışan termik santrallerde (TPP) (Thermic Power Plant) gerçekleştirilir. Bu kömürlerin yanmasından kaynaklanan küller, enerji üretimi atıklarının önemli bir bölümünü oluşturur. Araştırmacılar tarafından Polonya'nın dört farklı TPP'sinden toplamda altı CFA örneğı toplanmıştır.

Analiz edilen CFA örneklerindeki NTY içeriğı 146.6 ppm ile 249.9 ppm arasında değişmektedir. Analiz edilen küllerin ortalama toplam NTY içeriğı 206.4 ppm olup, bu değer dünya ortalamasının iki kat daha düşüğüdür. HNTY, toplam nadir toprak elementleri

içeriğinin yaklaşık %75'ini oluşturarak en yüksek paya sahiptir. HNTY'ler, toplam NTY içeriğinin en düşük payına sahiptir (%4) ve ortalama içeriği 43.3 ppm'dir. Tüm örneklerin C_p 'si %33-38 aralığındadır. C_{out} maksimum değeri 1 ve minimum değeri 0.9'dur. Hiçbir örnek, küresel ortalamanın üzerinde bir NTY konsantrasyonuna sahip değildir [10].

G- Endonezya'daki CFA'da ki NTY

Endonezya'nın Kalimantan ve Güney Sumatra bölgelerinde bulunan Tuban, Indramayu, Paitan-1 ve Banjarsari termik santrallerinden alınan uçucu kül (CFA) ve taban külü (BA) örnekleri incelenmiştir. Ortalama toplam NTY içeriği 243.6 ppm olup, bu değer küresel ortalamanın yaklaşık %60 altındadır. HNTY, toplam NTY içeriğinin %67,6-71,3'ünü oluşturarak en yüksek paya sahiptir, bunu ONTY (%23,5-27,2) ve ANTY (%4,6-5,2) takip eder. Hiçbir örnek, küresel ortalamanın üzerinde toplam NTY içeriğine sahip değildir. C_{out} değeri 1.1 ile 1.2 arasında değişir ve ortalama değeri 1.1'dir [10].

H- Birleşik Krallık'ta ki (BK) CFA'da ki NTY

Araştırmacılar tarafından Rock Tron International Ltd. adlı CFA işleme şirketinden altı CFA örneği toplanmış ve incelenmiştir. Ortalama toplam NTY içeriği 340 ppm olup, bu değer küresel ortalamanın %15 altındadır. Ancak bir örnek, küresel ortalama NTY konsantrasyonunun %15 üzerinde toplam NTY içeriğine sahiptir. HNTY, toplam nadir toprak elementleri içeriğinin yaklaşık %75'ini oluşturarak en yüksek paya sahiptir, bunu ONTY (%21) ve ANTY (%4) takip eder. Tüm CFA'ların kritik yüzdesi %33,4-36,1 aralığında olup, C_{out} değeri 0.9 ile 1 arasında değişmektedir [10].

I- Belarus, Moğolistan ve Tacikistan'daki CFA'da ki NTY

Araştırmacılar tarafından bildirilen yedi örnekten biri Belarus'tan, biri Moğolistan'dan ve beşi Tacikistan'dandır. Tüm CA örnekleri toplam NTY içeriği bakımından zengindir. Belarus ve Moğolistan'dan alınan örneklerin toplam NTY içeriği sırasıyla 5035 ve 2262 ppm'dir. Belarus'tan alınan kül, yüksek HNTY içeriğine (%79,8) sahip olup, bunu ONTY (%17,8) ve ANTY (%2,8) izlerken, Moğolistan'dan alınan kül örneği maksimum ONTY içeriğine (%36,8) sahiptir. Moğolistan külünün C_{out} değeri 1.8 olup, bu durum Ce (523 ppm), Nd (315 ppm) ve Y (617 ppm) gibi kritik elementlerin yüksek konsantrasyonlarından kaynaklanmaktadır ve bu nedenle C_p , aşırı yüzdeye göre neredeyse iki katıdır. Bu küller, La, Ce, Gd ve özellikle Y kaynağı olarak değerlendirilebilir [10].

3.2. Türkiye Rezervleri ve Kaynakları

Yapılan çalışmalar sonucunda Türkiye’de itriyum üretimi rezervleri ve kaynakları bilgisi elde edilememiştir.

Ülkemiz sınırları içerisinde Eskişehir-Beylikova bölgesinde Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 1977 yılında yapılan aramalar sonucunda barit ve fluorit mineralleri yanında nadir toprak elementleri de içeren kompleks bir cevher yatağı bulunduğu tespit edilmiştir

Eskişehir-Beylikahır kompleks cevherinin nadir toprak elementi oksitleri içeriği; toplam cevher rezervinin %3,14’ünü teşkil etmektedir ve bu değer, 953 milyon tona tekabül etmektedir. Nadir toprak elementi rezerv büyüklüğü bakımından; Eskişehir-Beylikahır maden yatağı, dünya sıralamasında Çin, ABD, Avustralya ve Hindistan’dan sonra beşinci sırada gelmektedir. Bölge kompleks cevherinde nadir toprak elementleri bastnazit mineralleri yapısında bulunmaktadır. Diğer yandan cevher yapısında toryum ve uranyum elementi de mevcuttur. Cevherde bulunan diğer ana mineraller barit ve fluorittir. Cevher içerisindeki barit ve fluorit oranları sırasıyla %31,04 ve %37,44 tir [11].

4. İTRİYUM ÜRETİM DURUMU

4.1. Dünyada Üretim Miktarı

İtriyum, genellikle nadir toprak elementlerinin (NTE'ler) işlenmesi sırasında yan ürün olarak üretilir ve bu alanda Çin, dünya üretiminde başı çekmektedir. 2022 yılında, dünya itriyum arzının büyük bir kısmı Çin tarafından sağlanmıştır ve önemli bir üretim de Burma (Myanmar) gibi ülkelerde gerçekleşmektedir. Dünyada nadir toprak minerallerinden elde edilen itriyum üretiminin yıllık olarak **10.000** ila **15.000** ton arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bu üretim seviyeleri, özellikle elektronik ve yeşil teknoloji gibi yüksek teknoloji uygulamalarındaki küresel talebe bağlıdır [12].

4.2. Türkiye’de Üretim Miktarı

Yapılan çalışmalar sonucunda Türkiye’de itriyum üretimi bilgisi elde edilememiştir.

4.3. Dünyada Üretim Yapan Şirketler

- Remel Corporation (Çin)
- LLC ALFA SPLAVI (Rusya)
- Sichuan Sheng Ze Yuanlong Kuangye Co., Ltd. (Çin)
- Zibo Weijie Rare Earth Co. (Zibo Shandong Çin)
- Shanghai Heli Rare Earth Group Co. (Çin)
- YICHENG COMPANY LIMITED (Çin)
- Kalpesh Enterprise LLC (Çin)
- Chengdu Beyond Chemical (Çin)
- Interwestma Sdn Bhd (Malezya)
- China Metallurgical Imp. & Exp. Guangdong Company (Çin)
- Anonymous (Çin)
- Taiwan Rare earth (Çin)
- IMC- Innovation Metals Corporation (Çin) [13]

4.4. Türkiye’de Üretim Yapan Şirketler

Yapılan çalışmalar sonucunda Türkiye’de itriyum üretimi yapan şirket bilgisi elde edilememiştir.

4.5. Uluslararası Birlikler (Kuruluşlar)

ASIAN METAL

Asian Metal, kapsamlı metal piyasası fiyatlandırması ve kapsamı sağlama amacıyla metal sektöründeki profesyoneller tarafından 2001 yılında kurulmuştur. Şirket, kullanıcılarına tüm bölgelerdeki metal piyasası fiyatlandırması, verileri ve istatistikleri ile haberlere erişim imkânı sunmaktadır.

Asian Metal, 200'den fazla ülkede 200.000'den fazla metal sektörü uzmanına birinci sınıf bir hizmet olarak benzersiz, doğru ve güncel bilgileriyle tanınmaktadır. Xinhua News, Thomson Reuters ve Bloomberg gibi çeşitli uluslararası haber kuruluşları, müşterilerine üst düzey finansal bilgi terminalleri ve Asian Metal'in metal piyasası bilgilerini sağlamak için Asian Metal ile stratejik iş birliği kurmuştur.

Asian Metal'in referans metal fiyatları, sektörlerdeki şirketler tarafından yetkili, üçüncü taraf ve şeffaf bir piyasa rehberi olarak fiyatları belirlemek için düzenli olarak kullanılmaktadır [13].

5. İTRİYUM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

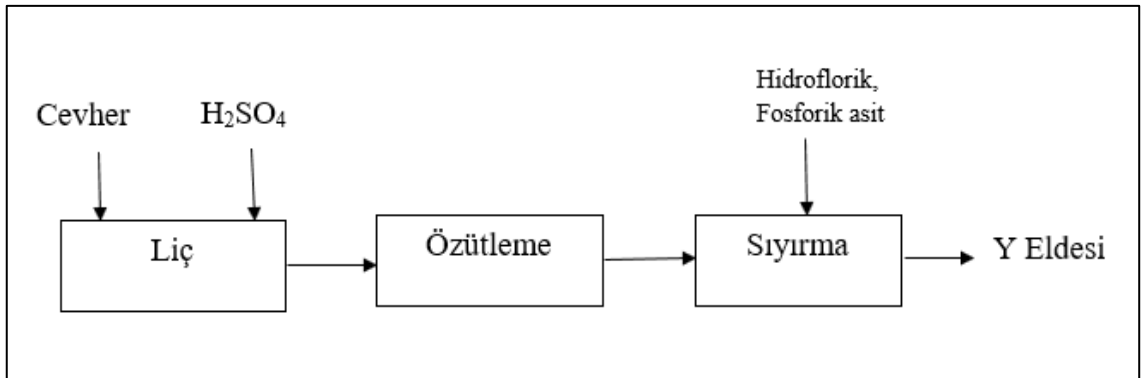
İtriyumun çeşitli atık türlerinden geri kazanılması oldukça kolaydır ve ilgi çekicidir. Bu bölümde itriyumun geri kazanımıyla ilgili son gelişmeler ve literatür çalışmalarına yer verilmektedir. Burada itriyumun cevherlerden ve çözeltilerden atık sulardan, jenerik atıklar ve e-atıklardan (floresan lambalar ve CRT) geri kazanılmasını açıklayan; çalışmalara değinilmiştir.

5.1. Cevherlerden İtriyumun Geri Kazanımı

Nadir toprakların geri kazanılmasına yönelik ilk teknolojiler; bunları madenlerden çıkarmak için benimsenmiş bilimsel çalışmalar, aşağıda sırasıyla özetlendiği gibidir.

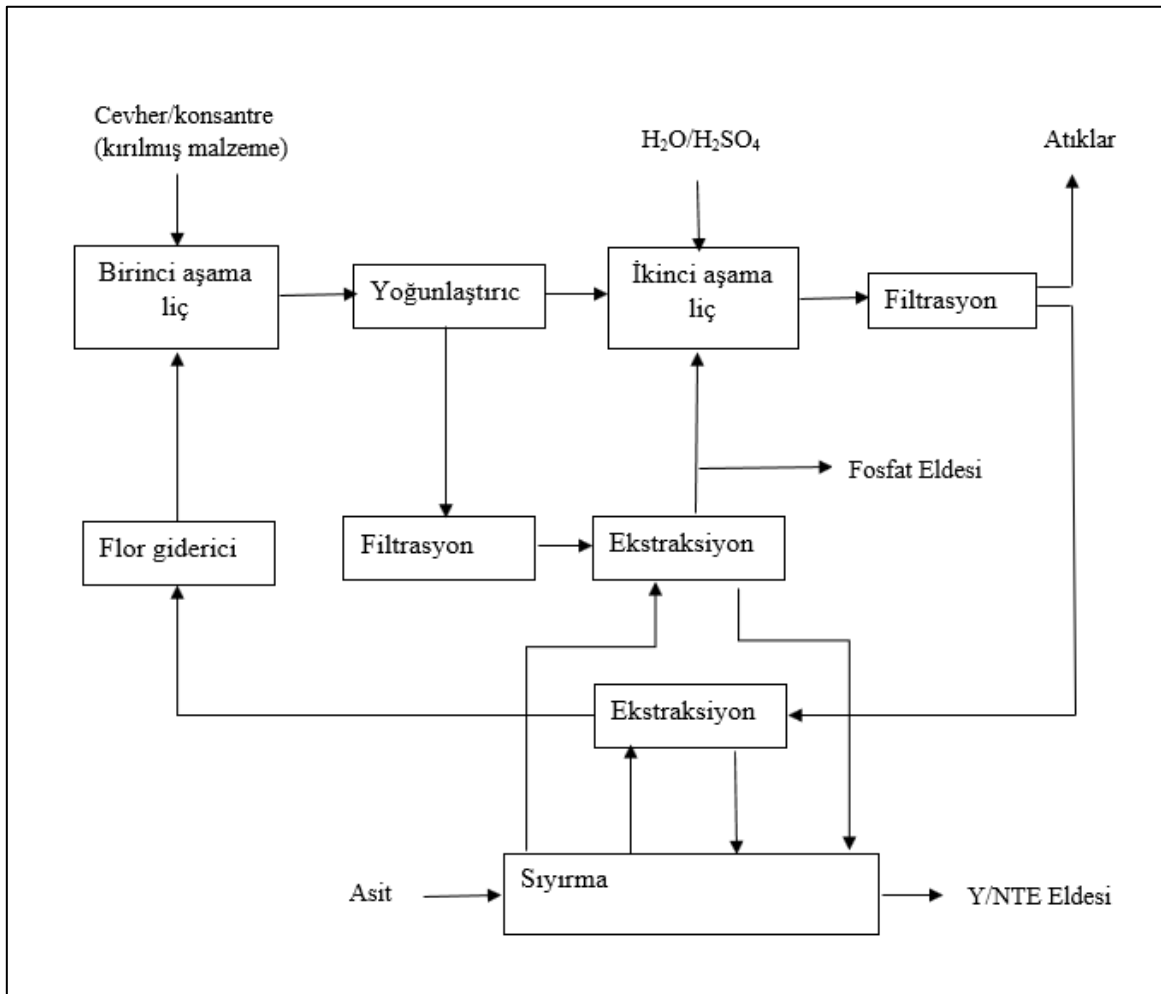
Coltrinary ve Kindig (1972) patentlerinde fosfat, itriyum ve nadir toprak metal değerlerini katı maddeler, fosfat cevherleri veya ticari konsantreler ve özellikle apatitlerden geri kazanmak için bir yöntem tanımladılar. Bu yöntem iki aşamalı bir liç işlemi içermektedir. İtriyum ve nadir toprak değerlerini çıkarmak için, önce: fosfatın ve itriyumun bir kısmını çıkarmak için sulu asit çözeltisiyle ilk ekstraksiyon ve daha güçlü asitle ikinci ekstraksiyon yapılmaktadır. Bu işlemler sonucunda artık fosfat, itriyum ve nadir toprak değerleri kazanılmaktadır. İtriyumun geri kazanım verimi yaklaşık %84,2dir. Tüm süreç organik karışmayan bir solvent kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve Şekil 4' te gösterilmiştir.

Fava ve ark. (1987), fosfat kayalarından fosforik asidin ıslak proses üretimi sırasında uranyum itriyum, toryum ve diğer nadir toprak elementlerinin geri kazanılmasına yönelik bir proses rapor etmiştir. Cevherin asitle buluşması esnasında, ortama alüminyum ve/veya demir ve silika eklenmiştir. Burada fosforik asit di(alkilfenil) çözeltileri organik çözücü içinde ve tryalkilfosfoninin varlığında çözünür. Metaller hidroflorik asit ve fosforik asit içeren bir çözeltiyle sıyırma işlemi ile organik fazdan geri kazanılmıştır (Şekil 3) [14].



Şekil 12.Fava ve Arkadaşları Akım Şeması [14].

Feuling (1991), itriyumun skandiyumun titanyum cevherinden geri kazanılması için bir yöntem tanımlamıştır. Skandiyumun geri kazanılması için titanyum cevherinin işlenmesinden sonra, itriyum kalıntıyla geri kazanılmıştır. Bu element, HCl ile liçleme ve ardından organik fazda polialkil fosfat içeren bir solvent ekstraksiyonu ile geri kazanılmıştır. Son olarak skandiyum, amonyum kullanılarak çöktürülerek geri kazanılmıştır. Kullanılan amonyum çözeltisi skandiyum hidroksiti kalsine ederek skandiyum oksit eldesini sağlamaktadır. Kalıntılar ayrıca itriyum ve lantanitleri içermektedir ve sulu fazda kalsine edilmesiyle de oksitlerin elde edilmesi sağlanmaktadır [14].



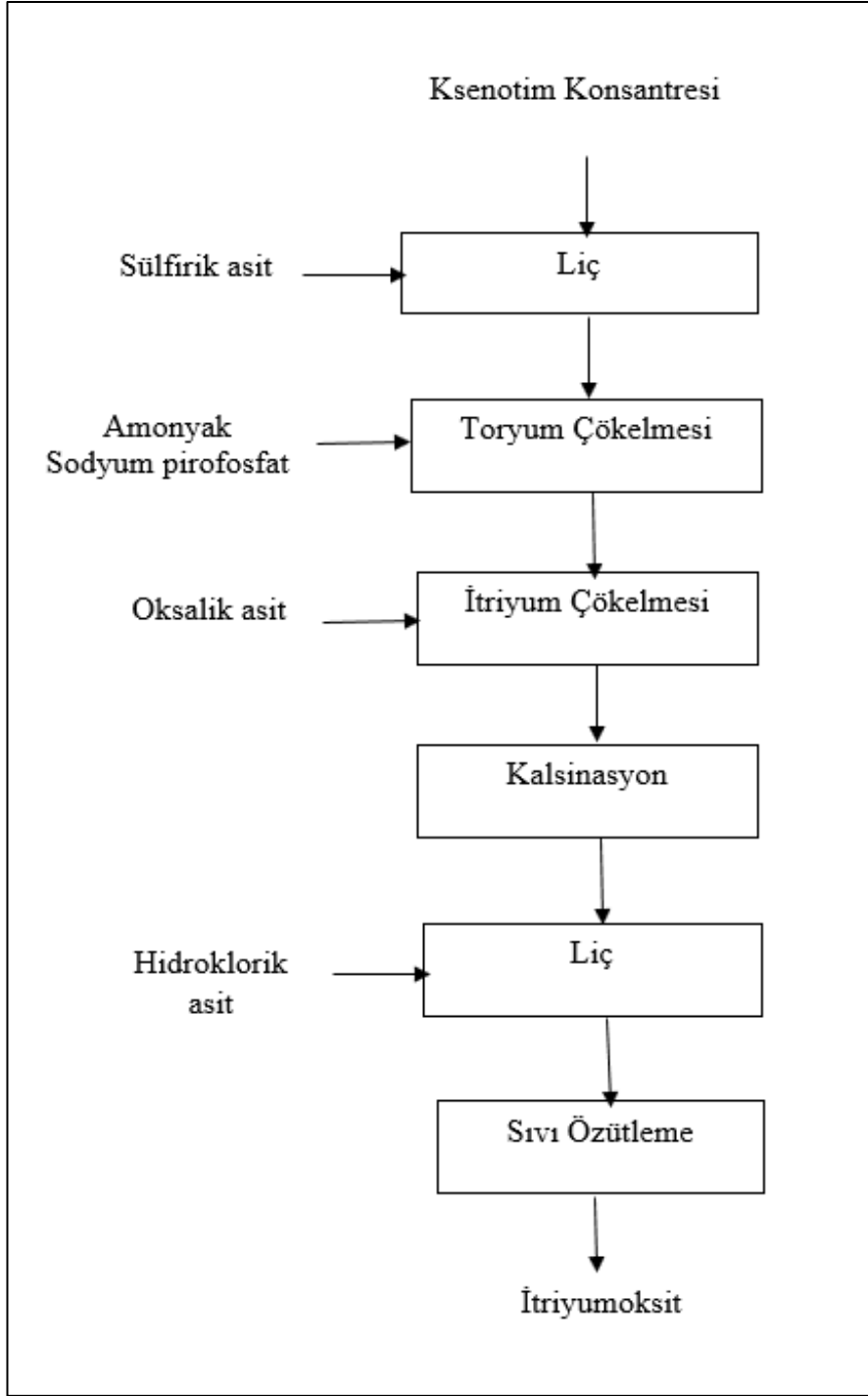
Şekil 13.Coltinary ve Kidding Akım Şeması [14].

Deshande ve ark. (1992) yaklaşık %60'ı Y_2O_3 ' içerikli Y bakımından zengin minerallerden oluşan bir ara konsantreden itriyumu geri kazanmak için bir yöntem tanımlamıştır. %93 saf itriyum oksit içeriği 1,0 M NH_4 varlığında kerosen içeren %50 TBP (tributil fosfat) ile başka bir çözücü döngüsüyle işleme tabi tutulmuştur. Y_2O_3 'ün saflığı ve geri kazanımı, sırasıyla %99,9 ve %90 olmuştur.

Vijayalakshmi ve ark. (2001), ksenotim konsantresinden amonyak veya sodyum pirofosfat kullanarak toryumun çökeltilmesi sonucu sülfürik asitle liçi ile Y'yi geri kazanmıştır. Çözeltilerden toryum çıkarıldıktan sonra, itriyum oksalatların çökeltilmesi için oksalik asit eklenmiştir. Bunlar itriyum oksit elde etmek için kalsine edilmiştir. Bu bileşik HCl ile süzölmüş ve saf itriyum oksit (%99) geri kazanılmıştır. Nihai ürünün toplam geri kazanımı %98 olmuştur. Şekil 5, bu prosesin blok şemasını göstermektedir.

Jun ve ark. (2011), altere olmuş elüsyon yataklardan çıkarılan nadir toprak cevherlerini liç sıvılarından geçirerek nadir toprak elementlerinin eldesini tanımlamıştır. İşlem solvent ekstraksiyonu, iyon değişimi ve sıvı membranı içeriyordu. Çözücü ekstraksiyonu için nadir toprak geri kazanımı çok aşamalı ekstraksiyon ile %96'nın üzerine çıkar ve rafinat çözeltisi liç için geri dönüştürülebilir. İyon değiştirme yöntemi için, adsorpsiyon oranı %98 olurken reçine çalışma kapasitesi 777,4 g/l olmuştur. Sıvı membran yöntemi için nadir toprak geri kazanımı %98'in üzerindeydi ve nadir toprak konsantrasyonu 95,2 g/l'ye kadar çıkmıştır, yaklaşık safsızlıkların%70'i giderilmiş ve ürün saflığı %95'e ulaşmıştır.

Makalelerinde yazarlar verimlilik hakkında tartışmışlar ve bu yöntemlerin yoğunlaşmaya göre avantajlarını karşılaştırarak, kimyasalların, kaynak ve enerji miktarının azaltılmasının mümkün olduğunu tespit etmişlerdir [14].



Şekil 14. Vijayalakshmi Akım Şeması [14].

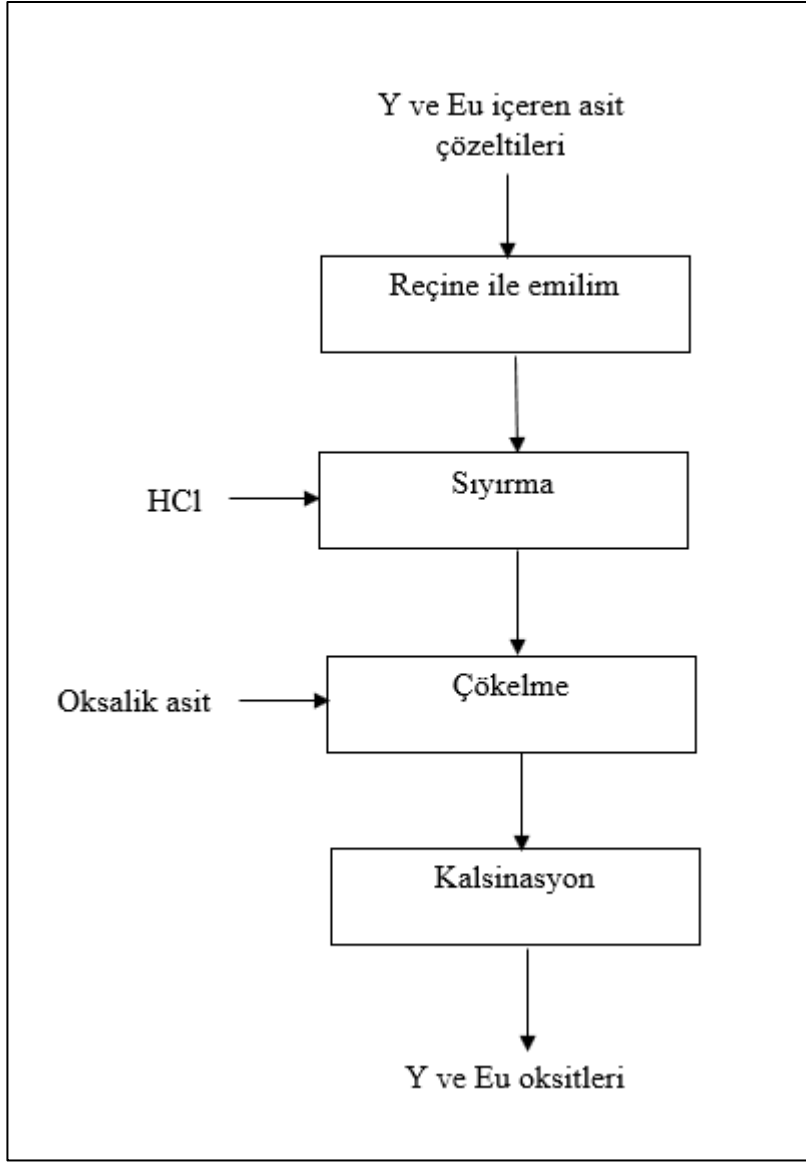
Jorjani ve ark. (2011), İran'ın Chadormalu apatit konsantresinden, nadir toprak elementlerini geri kazanmak için bir yöntem tanımlamışlardır. Bu araştırmacılar, bu tür cevherlerde liç verimini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Apatitin çözünmesi nitrik asit ile gerçekleştirilmiş ve pulp yoğunluğu, asitlik, çalkalama hızı ve reaksiyon süresi gibi faktörler araştırılmıştır. Nadir toprakların filtrelenmesi için en iyi koşullar: %60 asitlik, %30 katı/sıvı oranı, 30 dakikalık liç, 200 rpm ve 60°C olarak açıklamışlardır. Optimize edilmiş

koşullarda geri kazanım oranları sırasıyla; Lantanın %74, seryum%59 neodimyum %72 ve itriyum %73 civarında olmuştur. Çeşitli faktörlerin fonksiyonu olan metallerin matematiksel modellerini tahmin etmek için laboratuvar verileri kullanılmıştır [14].

5.2. Kirlenmiş Çözeltilerden ve Atık Sulardan İtriyumun Geri Kazanılması

Bu bölümde atık suların zenginleştirilmesini ve daha genel olarak itriyumun geri kazanıma yönelik bilimsel çalışmalar ve çözümler özetlenmiştir. Benimsenen teknikler iyon değişimini, solvent ekstraksiyonu, adsorpsiyonu, membran ve reçine kullanımını içermektedir.

Heymeijer (1983), patentinde fosforlardan veya kirlenmiş çözeltilerden itriyum ve öropyum geri kazanımı için bir yöntem tanımlamıştır. İtriyum, öropyum ve diğerlerini içeren sıvılar, safsızlıklar bir katyon reçine değişim kolonundan geçirilmiştir. Bu sütun sülfonatlanmış stiren divinilbenzen tipindeydi. Değişim reçinesi katyonun tükendiğini gösterdiğinde kolon fazla olan itriyum ve öropyum un uzaklaştırılması amacıyla de iyonize su ile durulanmıştır. Sütun düşük konsantrasyonlu asit çözeltisi ile elute edilmiştir (0,01–0,1 N). Atık su çözeltisinin içerdiği klorür iyonları gibi iki değerlikli safsızlıklar, üç değerlikli ve daha yüksek değerlikli iyonlar yüksek konsantrasyonlu asit ile yıkanarak (>1 N) ve de iyonize su ile durulanarak sıyırma yöntemi ile kazanılmıştır. Elde edilen çözelti itriyum, evropiyum ve diğer yüksek değerlikli iyonları ve klorür iyonları içermekteydi. Çözelti ısıtılmış ve itriyum ve öropyum u oksalatlar olarak çöktirmek için oksalik asit eklenmiştir. Çökelti durulanmış, kurutulmuş ve itriyum oksit ve öropyum oksit elde edilene kadar kalsine edilmiştir [14]. Şekil 6, akış şemasını göstermektedir.



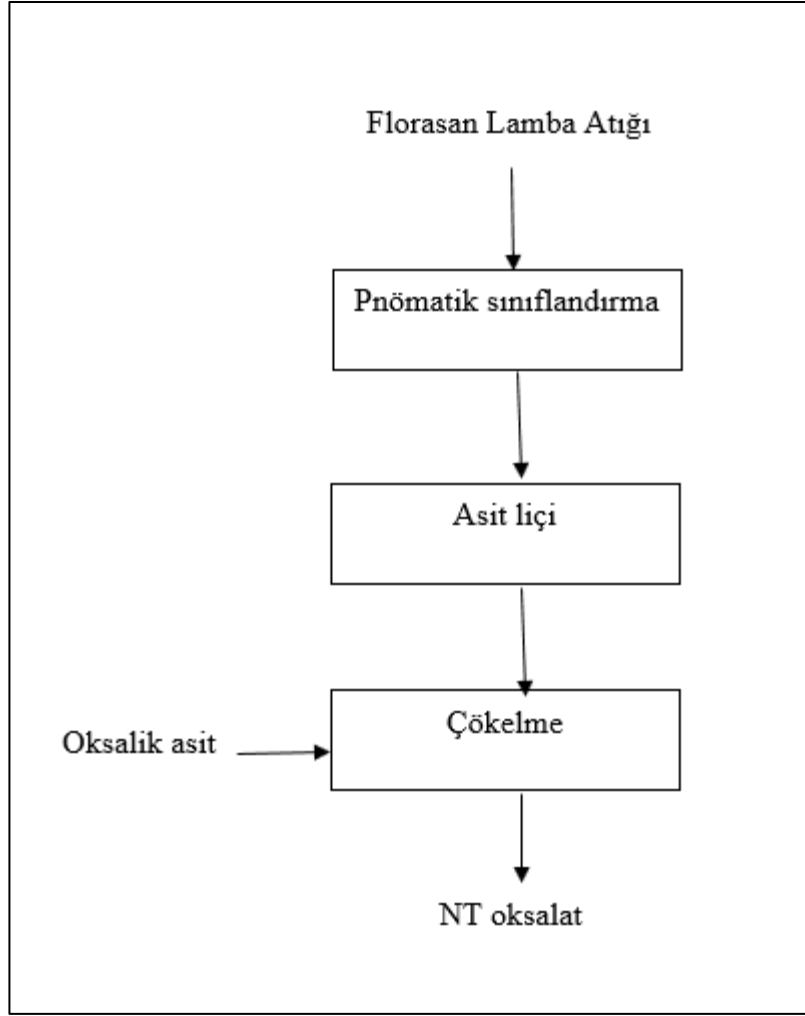
Şekil 15.Herman R. Heymeijer Akım Şeması [14].

5.3. Jenerik Atıklardan ve WEEE'den İttriyumun Geri Kazanımı

Bu bölümde itriyumun atıklardan ve WEEE'den (elektrikli veya elektronik ekipman atığı) geri kazanılması anlatılmaktadır. Özellikle lambaların floresan tozlarından, katottan ışın tüpleri (CRT'ler) (cathode ray tube) ve kullanılmış optik camlardan bahsedilmektedir. WEEE birçok tehlikeli bileşen içermektedir ve genellikle faydalı ömürlerinin sonunda çöplüklere atılmaktadırlar. Yakma fırınlarında imha edilen bu ekipmanlar önemli miktarda çevresel zarara yol açmaktadır. Bu konuda Avrupa Birliği'nde iki direktif kabul edilmiştir. Birincisi Avrupa WEEE Konseyi ve Elektrikli ve elektronik ekipmanlardaki bazı tehlikeli maddeler (RoHS) kısıtlanmasına ilişkin direktif. Bu direktifler, Üye Devletlerin WEEE'nin doğru şekilde atılmamasından sorumludur ve temel amaç bu atıkların arıtımı için yeni

teknolojilerin geliştirilmesini sağlamak ve WEEE'nin çevresel etkisini azaltmak, kullanımlarından sonra üretmek ve temel metalleri geri kazanmaktır. (Nadir toprak elementleri gibi Avrupa Birliği'nde kritik elementler ve değerli metaller olarak sınıflandırılır). Bu nadir toprak elementleri arasında özellikle itriyum bulunmaktadır. Lambaların ve CRT'lerin floresan tozlarında kullanılır. Lamba fosforları ağır nadir toprak elementleri Tb, Eu ve Y açısından zengindir. Günümüzde fosforların içerdiği bu elementleri geri kazanmak için pek çok hidrometalurjik proses geliştirilmiştir. Bu işlemler ekstraksiyon için kullanılan işlemlere çok benzerler. Cevherlerden NTE'lerin çıkarılması gibi ve malzemelerin asitler içerisinde çözülmesini ve NTE'nin çökeltme veya solvent ekstraksiyonu yoluyla geri kazanılmasını içermektedir. Aşağıda floresan lambalardan itriyum kazanımı yöntemlerini açıklayan bilimsel çalışmalardan bahsedilmektedir.

Tooru ve ark. (2001), Floresan lamba atıklarında bulunan NTE'leri ayırma ve kazanma sürecini incelemiştir. İtiryum ve öropyum; pnömatik sınıflandırma, sülfürik asit liçi ve oksalat çökeltme yöntemlerinden oluşan üç işlemle geri kazanılmıştır. Geri kazanım miktarı yaklaşık %65 idi ve ürünlerin saflığı %98,2 olmuştur. En iyi çözünme sonuçları bu çalışmalarda belirtilen koşullarda elde edilmiştir. Koşullar: 1,5 kmol/m³ asit, 343 K, süzme süresi 1 saat ve pulp yoğunluğu 30 kg/m³. Bu koşullarda kazanım derecesi Y için %92 ve Eu için %98 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 7) [14].



Şekil 16. Tooru ve ark. Akım Şeması [14].

Otsuki ve ark. (2007), floresan tozların bir karışımını ayırırken İki sıvının flotasyon mekanizmasını araştırmak için floresans tozlarının (kırmızı, yeşil ve mavi fosforlar). Heterokoagülasyonu nu inceledi DMF (dimetilformamid) çözücüsü içindeki floresan tozlardan biri ve n-heptandan (N, N, dimetilformamid)için, yeşil fosfatlarda yüzey aktif maddenin varlığında DDA (dodesilamin asetat), heterokoagülasyonun mümkün olduğunu bulmuşlardır.

Floresan tozlar ilk olarak yüzey aktif madde ile kaplanmış birleştirilmiştir ve daha sonra yüzey aktif madde ile kaplanan diğer tozlarla birleştirilmiştir. Daha sonra polar olmayan damlacık yüzeyine yapışan birikintiler., iki fazın arayüzüne hareket ederken diğer tozlar polar çözeltilde çökelmiştir. Kazanım ve tenör sırasıyla yeşil ürün için %95,2 ve %90, mavi ürün için %91,8 ve %92,2. ve kırmızı ürün için %90,9 %95,3 olmuştur.

Rabah (2008), floresanstan Y ve Eu'nun fulorasan lambalardan geri kazanımını incelenmiştir. Cıva buharının atmosfere emisyonunu önlemek için tüpler %30 sulu asetonun

altında kırılmış ve meydana gelen toz, fırçalanarak toplanmıştır. Tozun içinde mevcut olan metaller 4 saat süreyle sülfürik/nitrik asit karışımı kullanılarak basınçla liç yapılmıştır. 125° C ve 5 MPa, Y için liç verimi %96,4 ve Eu için %92,8 olmuştur.

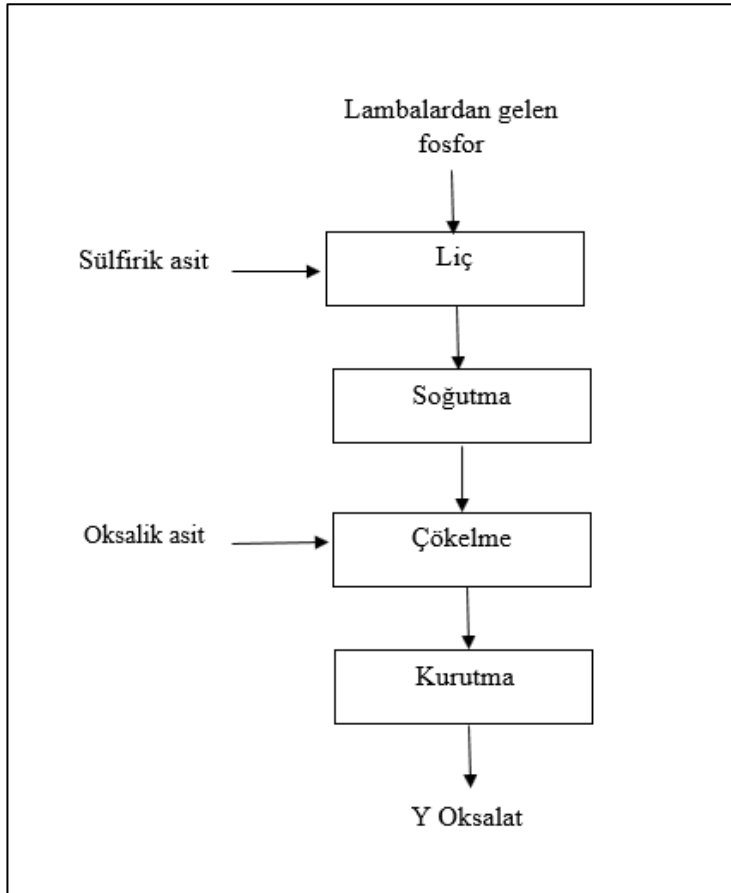
Öropyum ve itriyumun sülfat tuzu düşük sıcaklıkta tiyosiyanata dönüştürülmüştür. Tiyosiyanattan Eu ve Y'yi ayrı ayrı kazanmak için çözücü olarak trimetil-benzilamonyum klorür kullanılmıştır. Organik çözücüye yüklenen metal 125°C'de 1 M nitrik asit içerisinde Eu ve Y'nin nitrat tuzları olarak N-tributilfosfat ile geri kazanılmıştır. Evropiyum nitrat itriyum nitrat etil alkolde çözülmesiyle birbirlerinden ayrılmıştır. Termal azaltma 850° C ve 1575° C'de hidrojen gazı kullanılarak europium üretilmiş ve itriyum metalleri sırasıyla elde edilmişlerdir.

Porob ve ark. (2011), patentlerinde floresan malzemeden Nadir toprak elementlerini geri kazanma yöntemini anlatmıştır. Başlangıçta fosforu bir karışım halinde ayrıştırmak için alkalın bir malzeme kullanılarak fosfor yakılmıştır. Daha sonra kalıntı, NTE tuzlarını veya bileşiklerini ayırmak için karışımdan çıkarılıp işlemde geçirilmişlerdir. Kalıntı yüksek sıcaklıkta HNO₃, H₂SO₄ veya HCl kullanılarak asit ilavesiyle çözülmüştür (yani 150°C). Daha sonra NTE tuzları, solvent ekstraksiyonu, kristalleştirme veya çökeltme yoluyla çözüldükten ayrılabilmiştir.

Otto ve Wojtalewicz-kasprzac (2012) Nadir toprakları floresan tozlardan geri kazanmak için seçici bir yöntem tanımlamışlardır. İlk önce toz mekanik tekniklerle ayrılmış, fosforlar meş aralığı 20 ila 25 µm arasında olan bir elekten elenmiştir. Bu ön işlem sonrasında malzeme şu şekilde işlenmiştir: liç tüm nadir toprak elementlerini çözmek için düşük sıcaklıkta (<20 C) HCl ile liç yapılmış Y₂O₃:Eu³⁺ hariç; daha sonra 60–90°C' de HCl veya sülfürik asit ile liç yapılmış; sonrasında LaPO₄: Ce³⁺, Tb³⁺ yi çözüldürmek için 120-230° C'de sülfürik asitle liç yapılmış ve son olarak (Ce, Tb) MgAl₁₁O₁₉ ve BaMgAl₁₀'u süzmek için 150°C'de %35 NaOH çözeltisiyle çözünme gerçekleştirilmiştir.

Yang ve diğerleri. (2013), nadir toprak metallerini geri kazanmak için iyonik sıvılar kullanarak solvent ekstraksiyonu üzerinde çalışmışlardır. İlk başta atık fosfor toz, çözücü ekstraksiyonundan sonra asit çözeltisiyle süzümüştür. Bu işlem N, N-dioktildiglikol amik asit kullanılarak gerçekleştirildi (DODGAA). Nadir toprak metalleri Y, Eu, La ve Ce'nin etkili bir şekilde geri kazanılması, metal safsızlıklar bertaraf edilerek (Fe, Al ve Zn) den fosfor tozlarının asidik liç çözeltisinden elde edilmiştir.

De Michelis ve ark. (2011), Innocenzi ve ark. (2013) (Şekil 8) lambaların sökülmesinden gelen floresan tozlardan itriyumun geri kazanılması üzerinde çalışmışlardır. Bu araştırmalarda, çeşitli asit türleriyle liç testi ve oksalik asit içerisinde itriyumun çökeltilerek geri kazanılması çalışılmıştır. Üstelik sürecin ön ekonomik analizi de yapılmıştır. Innocenzi ve arkadaşlarının geliştirdiği süreçte, süzme işleminden sonra, kalsiyum ve diğer safsızlıkları uzaklaştırmak için liç sıvısından sodyum sülfür ile saflaştırma aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra artık çözeltilere oksalik asit ilave edilmiş ve oksalatlar itriyum oksitleri elde etmek için kalsine edilmişlerdir. İtriyum ayrıca katot ışın tüplerinin fosforunda da bulunmaktadır ve bu atık, E-atıktaki ana cam kaynağıdır. Metallerin geri dönüşümü için CRT'ler sökülerek, huni camları serbest bırakılmakta ve metalik gölge maskesi çıkarılmaktadır. Huni camının içindeki fosforlar ayrı bir vakum bölümünde emdirilir. Floresan malzeme hidrometalurjik işlemlerle geri kazanılabilmektedir. Fosforlar ağır metaller Cd, Zn, Y ve diğer nadir toprak elementlerini içerirler ve tehlikeli atık gibi bertaraf edilmeli veya metallerin geri kazanılması için işlenmelidir, özellikle Y'nin geri kazanımı için. Literatürde bu konuyu tartışan birçok makale bulunmaktadır [14].



Şekil 17.De Michelis ve ark. Akım Şeması [14].

Dexpert-Ghys ve ark. (2009) birçok kişinin dahil olduğu termo kimyasal işlemleri içeren bir süreci incelemiştir. Al filmi içeren toz (ağırlıkça %16), katkılı çinko sülfür (ağırlıkça %49), öropyum- itriyum oksisülfür (ağırlıkça %32) ve artık safsızlıklar veya metalik katkı maddeleri, silikatlar veya diğerlerini içermektedir. Sonuçlar, ekranların işlenme koşullarının önemli olduğunu göstermiştir. Çünkü silikat kirlilikleri (cam ekrandan) 1200 C'de Y ve Eu ile reaksiyona girebilmekte ve kırmızı fosforlar Y_2O_3 ve Eu^{3+} 'nin daha fazla geri kazanılmasını önleyebilmektedir.

Resende ve Morais (2010) CRT tozlarının sülfürik ile liç konusunu incelemiştir. Elde edilen çözünme verimleri oda sıcaklığında yaklaşık Eu ve Y için %96 olmuştur. Sürecin son adımı nadir toprak elementlerini geri kazanmak için solvent ekstraksiyonudur. Atık CRT tüpleri sökülerek, iki tür cam-metal bileşenin, bunlar, plastikler, itriyum ve öropyum bileşikleri olup geri dönüşümleri mümkün kılınmıştır. Atık fosfor, tehlikeli bileşiklerin kimyasal stabilizasyonuna tabi tutularak önce eritilmiştir. Daha sonra itriyum ve öropyum bileşikleri selektif olarak analiz edilmişler ve oksalatlar halinde birlikte çökeltilmişlerdir. Yeni fosfor üretimi için oksalatlar kullanılmıştır. Ayrıca çöktürme adımındaki sıvılar diğer fosforları çözmek için yeniden kullanılmıştır.

Pan ve ark. (2013), TV ekranlarının atık fosforlarından Y ve Eu'yu geri kazanmak için bir yöntem tanımlamışlardır. Geri kazanım şunları içermektedir: amonyak klorür ile kavurma; itriyum klorür ve öropyum un klorürün su ile çözünmesi; sodyum sülfür ile saflaştırma, oksalik asit yoğunlaştırma ve yüksek sıcaklıkta kalsinasyon 1 g numunenin 8 g amonyak klorür ile reaksiyona girdiğinde (90°C'de 30 dakikalık reaksiyondan sonra), Y ve Eu'nun geri kazanım oranı sırasıyla %92,12 ve %90,38 bulunmuştur.

Ochsenkühn-Petropulu ve ark. (1996) çalışmalarında: kırmızı alüminadan gelen çamurdan itriyum ve lantanitlerin geri kazanımı anlatmışlardır. İşlem, lantanitlerin birer birer ayrılması için orta koşullar altında nitrik asitle liç yapmayı ve solvent ekstraksiyonunu içermekteydi. Ulaşılan araştırılanlar için geri kazanım yüzdeleri Y için yaklaşık %90 olmuştur. Orta olanlar için %70'e kadar ağır lantanitler (Dy, Er, Yb) (Nd, Sm, Eu, Gd) %50'ye kadar ve hafif lantanitler grubu için (La, Ce, Pr) %30'a kadar yükselmektedir.

Jiang ve diğerleri. (2005). %43,12 lantan oksit, %9,37 itriyum oksit ve %4,60 gadolinyum oksit içeren kullanılmış optik camdan itriyum ve diğer nadir toprakların geri kazanımını incelemiştir. Süreç, NTE'nin borosilikat fazından ilk dönüşümünü ve Sodyum hidroksit ve ardından hidroklorik kullanılarak hidroksit formuna dönüştürülen NTE'nin dönüşümünden kalan katıların asitle liçlenmesini içermektedir. Araştırmanın sonuçları,

NTE çözünmesinin NaOH konsantrasyonun sıcaklığı ve sıvı/katı, oranı süre arttıkça artmaktadır. Ayrıca artan HCl konsantrasyonu, sıcaklık, sıvı/katı oranı ve liç süresi arttıkça NTE ekstraksiyon verimi artmaktadır. Yazarlar La için %99,4 ve Y için %100 kazanım yüzdeleri kaydetmişlerdir.

Matsuda ve ark. (2013), çökeltme ve solvent ekstraksiyonu kullanarak atık optik cam içindeki nadir toprak elementlerinin geri kazanımını incelemişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar iki farklı deney türünü tanımlamışlardır. İlkinde La'nın tenörü %83,4 ve kazanımı %71,1 olmuştur ve eşdeğer bir karışımla alkali füzyon kullanılarak sırasıyla sodyum karbonat ve potasyum karbonatın kaynaştırıcı maddesinin ve amonyum oksalat ile çökeltmesi gerçekleştirilmiştir. İkinci test serisinde atık optik camdan alkali liç ve ardından yapılan solvent ekstraksiyonu ile %99,95 La, %98,65 Y ve %95,18 Gd dağılımı elde edilmiştir [14].

6. İTRİYUM TİCARETİ

6.1. Pazar/Piyasa ve Fiyat Durumu

2024 yılında küresel itriyum pazarının yaklaşık 224,5 milyon dolar değerinde olduğu ve önemli bir büyüme göstererek 2032 yılına kadar yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) %14,6 olan bir hızla 667,9 milyon dolara ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu büyüme, fosforlar, seramikler, elektronik cihazlar ve katı oksit yakıt hücreleri (SOFC'ler) (soft oxide fuel cells) gibi uygulamalarda artan talepten kaynaklanmaktadır.

İtriyum fiyatları, üretim maliyetleri, çıkarım teknolojilerindeki gelişmeler ve jeopolitik faktörler gibi etkenlere bağlı olarak bölgeden bölgeye önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. 2024 yılında, Kuzey Amerika ve Avrupa gibi bölgelerde itriyum fiyatları, sırasıyla teknolojik gelişmeler ve sıkı çevre düzenlemelerinden etkilenmiştir. İtriyum oksit fiyatlarının 2019 yılında kilogram başına yaklaşık 3,30 USD olup; 2030 yılına kadar kilogram başına yaklaşık 2,60 dolar olması beklenmektedir. Bu, artan arz ve talep dinamiklerini yansıtarak önceki yüksek fiyatların düşmesiyle sonuçlanmaktadır.

Genel olarak, itriyum pazarı, yüksek teknoloji ve yeşil enerji sektörlerinde kritik uygulamalar nedeniyle güçlü bir büyüme göstermektedir. Fiyatlandırma ise bölgesel üretim maliyetleri, belirli endüstrilerden gelen talep ve küresel ticaret politikaları tarafından etkilenmektedir [15].

6.2. Dünyada İthalat ve İhracat

Dünyada itriyum ithalat ve ihracatı bulunmamakla birlikte NTE ithalat ve ihracat verileri ile birlikte verilmektedir. Dünyada NTE ithalat ve ihracat değerleri bu yayımın skandiyum bölümünde verilmiştir.

6.3. Türkiye’de İthalat ve İhracat

Türkiye’de itriyum ithalat ve ihracatı bulunmamakla birlikte NTE ithalat ve ihracat verileri ile birlikte verilmektedir. Türkiye’de NTE ithalat ve ihracat değerleri bu yayımın skandiyum bölümünde verilmiştir.

7. İTRİYUMUN ÇEVRE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

NTY genellikle geleneksel yöntemlerle üretilir, ancak, NTY talebindeki artış nedeniyle, dünya genelinde birçok, âtıl durumdaki nadir toprak işleme projesi yeniden canlandırılmakta veya başlatılmaktadır. Madencilik ve NTY işleme hem insan sağlığına hem de çevreye birçok çevresel risk yaratabilir. Nadir toprak madenciliği sorunu, NTY cevherlerinin yapılarında alüminyum, arsenik, baryum, kadmiyum, uranyum ve toryum gibi farklı metaller içermesinden kaynaklanır ve bu nedenle NTY içeren cevherlere bağlı olarak üretilen kirleticiler değişiklik gösterir. NTY minerali cevherinden NTY'yi ayırmak, hidroklorik asit, amonyak, sülfatlar gibi büyük miktarda kanserojen toksin gerektirir. Nadir toprakların düzensiz ve sürdürülemez madenciliği, yeraltı sularına ağır metaller, asitler ve radyoaktif elementler sızdırabilecek atık sular ve atık havuzları üretebilir. Nadir toprakların tedarik zincirine ilişkin uluslararası gerilim, bazı ülkelerin veya projelerin fiyatları düşürmek için bu çevresel kısıtlamaları göz ardı etmesine yol açabilir. Örneğin, Çin'deki en büyük nadir toprak projesi olan Bayan-Obo madeni, kırk yılı aşkın süredir faaliyet göstermekte olup, zehirli çamur içeren ve yüksek toryum konsantrasyonlarına sahip 11 km²'lik bir atık havuzuna sahiptir

Tüm NTY madenciliği yapan ülkeler, bu metallerin üretiminde sürdürülebilir madencilğe önem vermektedir. NTY üretimindeki sürekli büyüme nedeniyle, bu endüstrinin çevresel etkilerini tanımlamak ve azaltmak önemli bir adım haline gelmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) (life cycle analysis), bir ürün veya hizmetin çevresel etkisini değerlendirmek için en yaygın kabul gören metodolojidir. Şirketler ve hükümetler tarafından dünya genelinde kullanılmaktadır.

Yeşil teknolojilere olan talep ilgi çekerken, enerji üretimi için nadir toprak metallerine de büyük bir talep vardır. Dolayısıyla, NTY arzını sağlamak, yeşil ve temiz enerji teknolojilerinin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu duruma bir çözüm, NTY'leri ikincil kaynaklarda araştırmaktır [10].

8. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

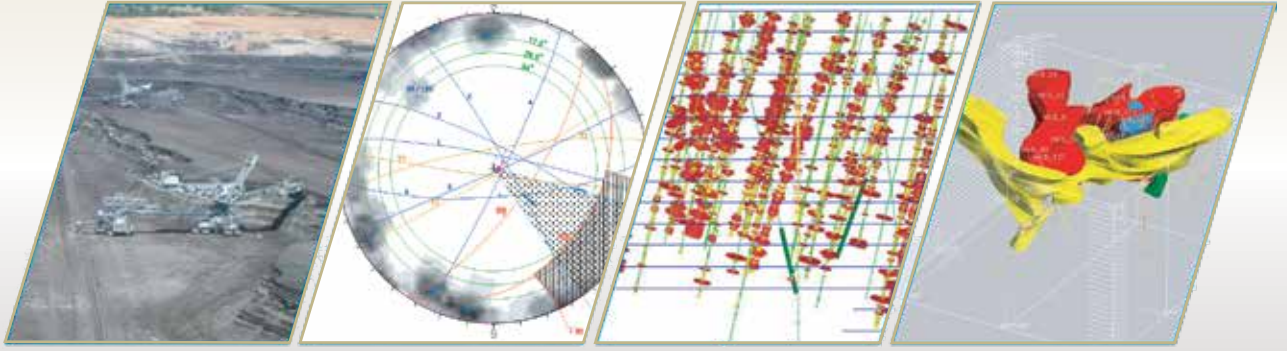
- İtiryum lantanitlere kimyasal olarak benzeyen gümüşü metalik bir geçiş metalidir ve "nadir toprak elementi" olarak sınıflandırılmıştır. İtiryum, Dünya'nın kabuğunda orta derecede bol bulunan bir elementtir.
- “İtiryum” kelimesi, İsveç Vauxholm yakınlarındaki Ytterby kasabasından esinlenerek türetilmiştir. İtiryumun keşif tarihi 18. yüzyılın sonlarına dayanmakta.
- İtiryum, çoğu nadir toprak mineralinde bulunur. En önemli nadir toprak minerali monazittir.
- İtiryum çok sayıda uygulamada bulunmasına rağmen, en büyük nihai kullanım alanları seramik ve fosforlardır. Daha az miktarlarda metalürji, cam parlatma ve katkı maddeleri ile katalizörlerde kullanılmaktadırlar. Ayrıca çok sayıda elektronik uygulama vardır, ancak oksijen sensörleri özellikle önemli bir kullanım alanıdır.
- Radyoaktif izotop itiryum-90, karaciğer kanseri ve diğer bazı kanserleri tedavi etmek için radyasyon terapisinde kullanılır.
- Monazit ve ksenotimdeki büyük itiryum kaynakları dünya çapında plaser yataklarında, karbonatitlerde, uranyum cevherlerinde ve bozunmuş kil yataklarında (ağartma toprakları) mevcuttur. Apatit-manyetit içeren kayalarda, niyobyum-tantal mineral yataklarında, plaser olmayan monazit içeren yataklarda, tortul fosfat yataklarında ve uranyum cevherlerinde ek itiryum kaynakları oluşur
- Bir NTY kaynağı olarak kömür uçucu külü, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından, NTY eldesi için çalışılmaktadır.
- İtiryum, genellikle nadir toprak elementlerinin (NTE'ler) işlenmesi sırasında yan ürün olarak üretilir ve bu alanda Çin, dünya üretiminde başı çekmektedir
- Dünyada nadir toprak minerallerinden elde edilen itiryum üretiminin yıllık olarak **10.000** ila **15.000** ton arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bu üretim seviyeleri, özellikle elektronik ve yeşil teknoloji gibi yüksek teknoloji uygulamalarındaki küresel talebe bağlıdır.
- İtiryum fiyatları, üretim maliyetleri, çıkarım teknolojilerindeki gelişmeler ve jeopolitik faktörler gibi etkenlere bağlı olarak bölgeden bölgeye önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.
- Genel olarak, itiryum pazarı, yüksek teknoloji ve yeşil enerji sektörlerinde kritik uygulamalar nedeniyle güçlü bir büyüme göstermektedir. Fiyatlandırma ise

bölgesel üretim maliyetleri, belirli endüstrilerden gelen talep ve küresel ticaret politikaları tarafından etkilenmektedir.

- NTY minerali cevherinden NTY'yi ayırmak, hidroklorik asit, amonyak, sülfatlar gibi büyük miktarda kanserojen toksin gerektirir. Nadir toprakların düzensiz ve sürdürülemez madenciliği, yeraltı sularına ağır metaller, asitler ve radyoaktif elementler sızdırabilecek atık sular ve atık havuzları üretebilir
- Çin'deki en büyük nadir toprak projesi olan Bayan-Obo, kırk yılı aşkın süredir faaliyet göstermekte olup, zehirli çamur içeren ve yüksek toryum konsantrasyonlarına sahip 11 km²'lik bir atık havuzuna sahiptir.
- Yeşil teknolojilere olan talep ilgi çekerken, enerji üretimi için nadir toprak metallerine de büyük bir talep vardır. Dolayısıyla, NTY arzını sağlamak, yeşil ve temiz enerji teknolojilerinin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir.
- NTY'leri ikincil kaynaklarda araştırmak, çevresel sorunların aza indirilmesinde bir çözüm olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] <https://evrimagaci.org/itriyum-9877>, 14 Mart 2024
- [2] <https://www.britannica.com/science/yttrium>, 20 Ağustos 2024
- [3] <https://www.makaleler.com/itriyum-nedir-ozellikleri-kullanimi>, 14 Mart 2024
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Yttrium>, 14 Mart 2024
- [5] <http://jes.ksu.edu.tr/tr/download/article-file/1831380>, 18 Nisan 2024
- [6] <https://www.mindat.org/element/Yttrium>, 18 Nisan 2024
- [7] [https://www.bilgiustam.com/itriyum-nedir/18 Nisan 2024](https://www.bilgiustam.com/itriyum-nedir/18-Nisan-2024)
- [8] <https://www.nzpam.govt.nz/assets/Uploads/doing-business/mineral-potential/rare-earths.pdf>, 18 Nisan 2024
- [9] <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2024>, 18 Nisan 2024
- [10] <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/jess/131/0188>, 18 Nisan 2024
- [11] <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>, 26 Nisan 2024
- [12] <https://www.researchandmarkets.com/report/yttrium>, 13 Ağustos 2024
- [13] <https://www.asianmetal.com/Yttrium-Producers-Suppliers-Buyers/>, 13 Ağustos 2024
- [14] <http://www.elsevier.com/locate/wasman>, 13 Ağustos 2024
- [15] <https://www.imarcgroup.com/yttrium-pricing-report>, 13 Ağustos 2024



Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı



Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

Çukurambar Mahallesi Dumlupınar Bulvarı No:11 06530 Çankaya / ANKARA

☎ +90 312 210 10 00 PbxII 📠 +90 312 287 91 88II ✉ mta@mta.gov.tr II 🌐 http://www.mta.gov.tr