

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN UYGULAMA ALANLARI

Naim ASLAN^{1*}, Yakup SAY²

¹Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye

²Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Tunceli, Türkiye

Öz

Madenler insanlık tarihi boyunca hep vazgeçilmez bir öneme sahip olmuştur. Tarih boyunca toplumlarda madencilik faaliyetleri ile gelişmişlik düzeyi ve dolayısıyla refah seviyesi arasında doğrudan bir ilişki kurulabilir. Dünyada stratejik olarak bilinen hammadde kaynaklarından biri de nadir toprak mineralleridir. Zenginleştirme ve saflaştırma proseslerinde sonra nadir toprak elementleri (NTE'ler), nadir toprak metalleri (NTM'ler) ve nadir toprak oksitleri (NTO'lar) gibi çeşitli isimlerle tanımlanmaktadır. Nadir toprak elementlerinin (NTE) keşfi ve beraberinde getirdiği teknolojik gelişmeler de neredeyse hayatımızın her alanında etkisini göstermektedir. NTE'ler eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. NTE'ler başlıca mıknatıs, katalizör, metal alaşımları, elektronik aygıtlar, lazerler, cam-seramikler, şarj edilebilir piller, medikal görüntüleme, telekomünikasyon, aydınlatma ve yeni nesil yarıiletken aygıtlar içeren yüksek teknolojik uygulamalarda komponent olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, samaryum (Sm), neodimium (Nd) disprosyum (Dy), praseodimium (Pr) ve erbiyum (Er) gibi bazı önemli NTE'ler savunma sanayi ve yenilenebilir enerji teknolojilerinde (rüzgar ve güneş enerjisi) kullanılmaktadır. Kritik teknolojilerde kullanılan bu hammaddelere olan talep gelecekte büyük oranda artacaktır. Bu derleme makalesinde, NTE'lerin metalurji, seramik-cam, katalizör, aydınlatma ve ekran teknolojileri, telekomünikasyon ve lazer, batarya, mıknatıs, medikal, savunma sanayi ve nükleer alanında uygulamaları ve kritik önemleri ayrıntılı bir şekilde tartışıldı.

Anahtar Kelimeler: Aydınlatma, batarya, kullanım alanları, medikal görüntüleme, nadir toprak elementleri, NdFeB mıknatıs, savunma sanayi

APPLICATION AREAS OF RARE EARTH ELEMENTS

Abstract

Mines have always had an indispensable importance in the history of humankind. Historically, a direct relationship can be established between mining activities and the level of development and thus the level of well-being in societies. Rare earth minerals are one of the strategically known raw materials in the world. Following enrichment and purification processes, it is identified by different names such as rare earth elements (REEs), rare earth metals (REMs) and rare earth oxides (REOs). The discovery of REEs and its technological developments have an impact on almost all aspects of our lives. Rare earth materials have unique physical and chemical properties. REEs are used as components in high-tech applications including magnets, catalysts, metal alloys, electronic devices, lasers, glass-ceramics, rechargeable batteries, medical imaging, telecommunications, lighting, and new generation semiconductor devices. In addition, some important REEs elements such as samarium (Sm), neodymium (Nd), dysprosium (Dy), praseodymium (Pr) and erbium (Er) are used in the defense industry and renewable energy technologies (wind and solar energy). The demand for this raw materials used in the critical technologies will largely increase in the future. In this review article, the applications and critical importance of REEs in metallurgy, ceramic-glass, catalyst, lighting and display technologies, telecommunications and laser, battery, magnet, medical, defense industry and nuclear fields are discussed in detail.

Keywords: Lighting, battery, usage areas, medical imaging, rare earth elements, NdFeB magnet, defense industry

1. GİRİŞ

Nadir toprak elementler (NTE'ler) ile yeni nesil malzemelerinin mekanik, termal, korozyon, elektrik, optik ve manyetik özelliklerinin geliştirilebileceğinin keşfinden bu yana bu elementler neredeyse her alanda hayatımıza girmiştir. Cep telefonlarından televizyona, bilgisayarlardan elektrikli araçlara, rüzgar türbinlerinden askeri teçhizatlara ve hatta zirai faaliyetlerden kanser tedavisi uygulamalarına kadar her alanda karşımıza çıkmaktadır [1, 2]. NTE'ler başta metalurji, kimya, makina, otomotiv (özellikle elektrikli araçlarda; elektrik motorları ve bataryalar), savunma sanayi, enerji, sağlık, elektrik-optik ve manyetik olmak üzere pek çok alanda kritik bir öneme sahiptir [3]. NTE'lerin enerji ve ileri teknoloji malzeme uygulamalarındaki kullanımı son 50 yılda önemli ölçüde artmıştır [4]. Bununla birlikte tedarik riski bulunan bu elementler için ikame element arayışları da halen devam etmektedir [5].

NTE'ler, oksit, silikat, karbonat, nitrat, fosfat, hidrat, klorür ve florür gibi formlarda, yüksek saflıkta metalik formlarda veya mischmetal formlarında üretilip kullanılmaktadır [6-9]. Bu elementler kullanılarak malzemelerin; mekanik, kimyasal, elektrik ve termal özellikleri belirgin bir şekilde geliştirilebilir. Her ne kadar tek başlarına önemli ticari değerlere sahip olmasalar da bu elementler kullanılarak geliştirilen ileri teknoloji malzemeler oldukça yüksek katma değerlere sahiptir [10]. Özellikle hızla büyüyen elektrikli ve hibrit araç sektörünün, elektrik motorları ve batarya ihtiyacını arttıracığı ve dolayısıyla buna paralel olarak NTE ihtiyacının da hızla artmasına neden olacağı tahmin edilmektedir. Atom numarası 57 olan La ile atom numarası 71 olan Lu arasında yer alan lantanit grubu 15 elementi ve ek olarak benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan Sc ve Y'ü kapsayan bu element grubuna ait bazı temel özellikler ve uygulama alanları Tablo 1'de özetlenmiştir. Dünyadaki genel ekonomik büyüme, özellikle yüksek katma değere sahip teknolojilerin gelişimi ile doğrudan ilişkilidir. İleri teknoloji malzemelerin gelişiminde, NTE'lerin çok kritik bir rol oynadığı dikkate alındığında, bu elementlere olan ihtiyacın da her geçen gün biraz daha artacağı tahmin edilmektedir. Örneğin; Nd, Sm, Gd, Dy veya Pr içeren alaşımlarla geliştirilen kalıcı mıknatıslar, ileri teknoloji uygulamalarda devrim yaratmıştır [11].

Spesifik mukavemeti (mukavemet/yoğunluk) yüksek ve küçük boyutlarda bile yüksek performans gösteren bu kalıcı mıknatıslar sayesinde ses ve görüntü ekipmanlarında, bilgisayarlarda, otomobillerde, iletişim sistemlerinde ve askeri teçhizatlarında daha küçük boyutlarda daha yüksek performansa sahip cihazların üretimi mümkün olmaktadır [12].

Tablo 1. NTE'lerin önemli bazı fiziksel özellikleri yanı sıra yaygın kullanım alanları [12]

İsim	Sembol	Atom No	Elektron Konf.	Belirgin Uygulamaları
Skandiyum	Sc	21	3d ¹ 4s ²	Alüminyum alaşımları, aydınlatma
İtriyum	Y	39	4d ¹ 5s ²	Lazerler, kırmızı fosforlar, kanser ilaçları
Lantanum	La	57	4f ⁰ 5d ¹ 6s ²	Petrol katalizörü, kamera lensleri, düşük yoğunluk
Seryum	Ce	58	4f ¹ 5d ¹ 6s ²	Otomobil katalitik konvertörleri, Cam parlatma, düşük yoğunluk
Praseodimium	Pr	59	4f ³ 5d ⁰ 6s ²	Mıknatis, düşük yoğunluk, yeşilimsi-sarı cam ve seramikler
Neodimium	Nd	60	4f ⁴ 5d ⁰ 6s ²	Nd ₂ Fe ₁₄ B mıknatısları, lazerler, viyoleto cam ve seramikler
Prometyum	Pm	61	4f ⁵ 5d ⁰ 6s ²	Radyoaktif; fosforlu boya, kalp pilleri
Samaryum	Sm	62	4f ⁶ 5d ⁰ 6s ²	SmCo ₅ mıknatısları, kanser terapisi, nükleer reaktör çubukları
Evropiyum	Eu	63	4f ⁷ 5d ⁰ 6s ²	Aydınlatma ve renkli ekranlar için kırmızı fosforlar
Gadolinyum	Gd	64	4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	Refraktif cam, MRG kontrast ajanı, nükleer reaktör kalkanı
Terbiyum	Tb	65	4f ⁹ 5d ⁰ 6s ²	Aydınlatma için yeşil fosforlar, manyetostriksiyon alaşımları
Disprosyum	Dy	66	4f ¹⁰ 5d ⁰ 6s ²	Mıknatıslarda stabilize edici, lazerler
Holmiyum	Ho	67	4f ¹¹ 5d ⁰ 6s ²	Lazerler, mıknatıslar
Erbiyum	Er	68	4f ¹² 5d ⁰ 6s ²	Lazerler, fiber optikler, nükleer reaktör kontrol çubukları
Tulyum	Tm	69	4f ¹³ 5d ⁰ 6s ²	Portatif X-ray kaynağı, ışık filamanları, lazerler
İtterbiyum	Yb	70	4f ¹⁴ 5d ⁰ 6s ²	Lazerler, kimyasal indirgeme ajanı, paslanmaz çelik katkı maddesi, kanser terapisi
Lutesyum	Lu	71	4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	PET tarama dedektörü, refraktif cam, petrol katalizörü,
Tulyum	Tm	69	4f ¹³ 5d ⁰ 6s ²	Portatif X-ray kaynağı, ışık filamanları, lazerler

NTE'lerin ileri teknoloji uygulamaların gelişimine yapmış olduğu katkılar aşikârdır. Ancak teknolojik gelişim ile birlikte sağlık ve çevresel etkileri de değerlendirilmeli ve bu konuda güven vermelidir. Bu durum NTE'lerin çevresel etkilerine olan ilginin son yıllarda artmasına neden olmuştur. Özellikle küresel ısınma ve enerji verimliliği konusunda artan endişeler, yüksek enerji verimliliği ve düşük CO₂ salınımına sahip teknolojilerin geliştirilmesi için yürütülen Ar-Ge faaliyetlerinin de artmasına neden olmuştur [13, 14]. NTE oksitleri fizyolojik olarak inert

malzemeler olduğunda dolayı çevre için tehdit oluşturmadıklarını söyleyebiliriz [1]. Ayrıca NTE'lerin özellikle katalizörlerde ve katalitik konvertörlerde kullanımı ile daha çevreci teknolojilerin geliştirilmesi mümkün olmuştur [15]. Yine benzer olarak, NTE esaslı kalıcı mıknatıs teknolojileri ile üretimi mümkün olan elektrikli veya hibrit araçlar sayesinde hem yüksek enerji verimliliği sağlanmakta hem de CO₂ emisyon değerleri önemli ölçüde azalmaktadır [16]. Bir diğer önemli nokta da düşük toksite değerlerinin sağladığı avantajdır. Pek çok uygulamada kullanılan Cd veya Pb içeren şarj edilebilir bataryaların yerini lantan-nikel-hidrit (La-Ni-H) bataryalara bırakması sayesinde bataryaların geri dönüşüm proseslerindeki toksik etkiler de azaltılabilmektedir. La-Ni-H bataryalar her ne kadar daha yüksek bir maliyet gerektirse de Cd veya Pb içeren bataryalara kıyasla, daha fazla şarj yoğunluğu ve daha iyi şarj-deşarj özellikleri sağlamaktadır [17]. Yine Cd veya diğer ağır metal içerikli toksik etkilere sahip pigmentlerin yerine La veya Ce içeren kırmızı-turuncu pigmentler sayesinde daha çevreci uygulamalar mümkün olmaktadır. NTE ler sayesinde, yanıcı ve toksik gazların sıkıştırılması ile sağlanan gaz sıkıştırılmalı soğutma teknolojisi yerine manyetik soğutma teknikleri geliştirilmiştir [18]. Manyetik soğutma gaz sıkıştırılmalı soğutmadan çok daha verimlidir. Daha da önemlisi manyetik soğutma sayesinde ozon tabakasını olumsuz etkileyen toksik ve yanıcı gazların kullanımına gerek kalmamıştır. Sonuç olarak NTE'lerin endüstriyel uygulamaları çevresel bir tehdit değil tam tersine enerji verimliliği ve CO₂ salınımının azaltılmasına yönelik katkıları sayesinde çevre dostu özellikleri açısından son derece önemlidirler.

NTE'lerin optik alanda ise ilk uygulamaları Auer ışıldayan fitilleri ve ark ışık karbonlarıdır. 1964 yılında Levine ve Patilla tarafından yapılan kapsamlı laboratuvar araştırmalarının bir sonucu olarak, renkli televizyon ekranları için kırmızı fosfor olarak itriyum (Y) ile birlikte gerçekten nadir ve pahalı Eu'nun kullanılması, NTE endüstrisi için büyük bir adım olmuştur [19]. Eu elementinin sarı renk bileşen içermeyen 610⁰A'da güçlü ve keskin emisyon spektrumuna/dalga boyuna sahip olması, göz tarafından mükemmel doygunlukta kırmızı renk tonu olarak algılanmasını sağlamaktadır. Bu durum renkli televizyonlarda eşit renkte görüntü elde edilmesinin yansın renkli ekran TV'lerin doğuşu olarak da nitelendirilmektedir. Bir diğer önemli örnek ise oksit formuna sahip Gd bileşiğin X-ışını yoğunlaştırıcı alanında önemli bir rol oynaması olmuştur. Bu durumu açıklayacak olursak; röntgen filminin üzerine Gd₂O₃ yerleştirildiğinde, X-ışınları tarafından

uyarılır ve spektrumun görünür bölge aralığında yayılır. Bu sayede minimum radyasyonla çekim gerçekleştirilebilir. Bu durum Gd_2O_3 nadir toprak oksidinin aşırı hassasiyetini göstermektedir [20]. Nd veya Pr kullanılarak camın renklendirilmesi, spektrumun görünür aralığında seçici soğurma/absorbsiyon yeteneğine dayanmaktadır. Cam yüzeylerin renklerinin giderilmesinde, dört değerli Ce^{+4} 'nin oksidasyon etkisi, düşük miktarlarda Nd veya Pr katkısı ile gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde, her zaman bir miktar Nd ve Pr içeren Ce konsantreleri cam eriyiklerine eklenmektedir. Burada optik dengeleme ile seçici olarak didimiyum (Nd ve Pr elementlerini içeren bir karışım) emilimi ile renk giderimi sağlanabilmektedir. Bu olay, kimyasal ve optik özelliklerin bir kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Özellikle koruyucu gözlüklerde kullanımları ön plana çıkmaktadır. NTE'lerin elektro-optik özelliklerinin önemini ortaya koymak adına diğer bir önemli örnek La-oksit bileşenidir. La_2O_3 , yüksek kırılma indeksi ve renksiz olması nedeniyle cam uygulamalarında kullanılmaktadır [21]. Günümüzde optik camlarda korozyon direncini artırmak için % 40'a kadar La-oksit kullanılmaktadır [22]. Ek olarak, NTE'ler cam bazlı lazerlerde aktivatör görevi görür. Bu tür lazerler arasında, Nd bazlı lazer iyi bilinmekte olup verimlilik, optik stabilite ve uyumluluk gibi temel gereksinimler olduğunda yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. NTE'lerin atomik yapıları, minimum ağırlık ve boyutun temel tasarım gereksinimleri olarak görüldüğü uygulamalarda, üstün manyetik özellikler sergilemesini sağlamaktadır. Sm, Nd ve Pr gibi NTE'ler, yüksek sıcaklık uygulamaları, radarlar, elektrik motorları ve jeneratörlerde, kalıcı mıknatısların geliştirilmesi için öncü elementler olarak görülmektedir. NTE'ler, yüksek mukavemetli manyetik malzemelerin üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Termal, mekanik, manyetik kararlılık, güvenilirlik ve uzun süre kullanılabilirlik gibi etmenler göz önünde bulundurulduğunda kalıcı mıknatıs olarak NTE esaslı mıknatıslar ön plana çıkmaktadır. NdFeB esaslı mıknatıslar orta sıcaklık ve güçlü mıknatıslık veya koersivite gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Sm-Co esaslı mıknatıslar ise sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek kararlılık ve yüksek maliyetleri nedeniyle daha çok savunma sanayi için uygundur [24]. NTE'lerin sahip olduğu manyetik özellikler, sadece mıknatıs uygulamalarıyla sınırlı olmayıp manyetik depolama ve okuma gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Örneğin: günümüzde güvenli bilgi depolamada, gadolinyum-galyum esaslı manyetik kabarcık bellekleri kullanımı söz konusudur. Ayrıca manyetik görüntüleme ve tanılama cihazlarında da filtreleyici ve kontrast ajanı

olarak uygulama alanı bulmuşlardır [25].

1.1. Metalurji Alanında Kullanımı

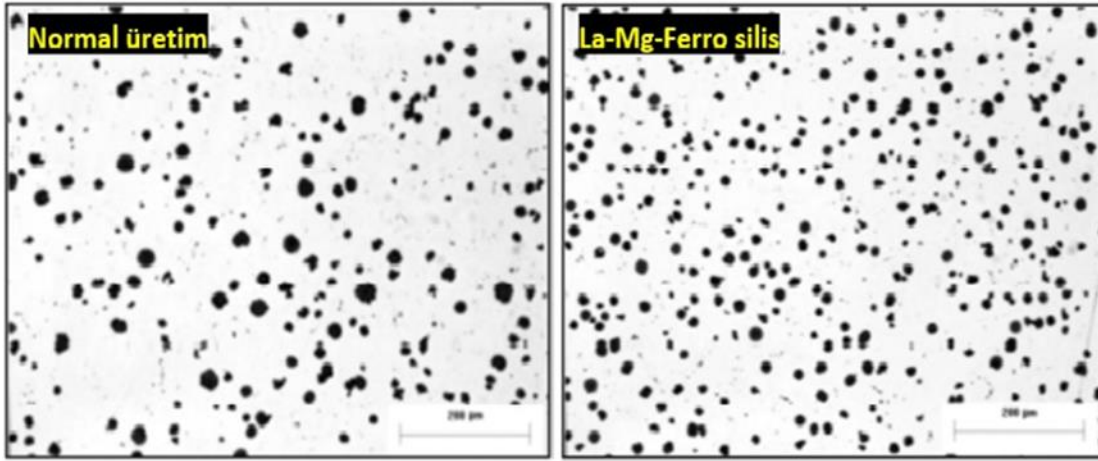
NTE'ler hem demir esaslı hem de demir dışı metallerin üretiminde kritik bir öneme sahiptir. Metal esaslı mühendislik malzemeleri geliştirilirken mukavemet, yoğunluk, korozyon dayanımı, darbe dayanımı vb. pek çok özellik uygulama alanı dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Demir esaslı ve demir dışı alaşımların üretiminde küçük miktarlarda NTE katkılandırılması ile alaşımların nihai fiziksel özelliklerinde belirgin farklar oluşturulabilmektedir. Bu katkılar genellikle NTE'lerin ferro alaşımları, metalik formları veya mischmetal (genellikle Ce-oksit ve La-oksit karışımı) şeklinde yapılmaktadır [26].

NTE'ler, metal alaşımlarının üretiminde oksijen, kükürt ve diğer zararlı elementlerin giderimi için kullanılabilir. Bu uygulama, özellikle küresel grafitli dökme demir üretimi için oldukça önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte NTE'ler, iletken bakır ve alüminyum üretiminde de oksijen ve kükürdün gideriminde nadiren de olsa kullanılmaktadır. Ayrıca NTE'ler, yüksek termal kararlılığa sahip intermetalik fazların çökmesini sağlayarak magnezyum alaşımlarında sertleştirici olarak da kullanılmaktadır [1].

Küre grafitli dökme demirler endüstriyel uygulamalar için oldukça önemli malzemelerdir. 1960'larda 170 bin ton olan üretim 1980'lere gelindiğinde 2.9 milyon tona çıkmış ve 20 yıllık periyotta yaklaşık 17 kat artış göstermiştir [27]. Küre grafitli dökme demirlerde karbür içermeyen bir matris arzu edilmekte ve bunun için genellikle katılaşmada grafit çekirdek sayısının artırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla genellikle Mg ile aşılama yapılmaktadır. Mg ile NTE'lerin birlikte kullanımı ise nodüler grafit çekirdek sayısını artırmaktadır. Araştırmalar % 0.01 – 0.02 Ce ve % 0.02 – 0.04 diğer NTE katkıları ile karbürlerin kontrolünün sağlandığını ve grafit çekirdek sayısının arttığını göstermektedir [1].

Çok küçük miktarlardaki Kükürt varlığı (% 0.01 – 0.1) bile dökme demirin mikroyapısındaki grafit morfolojisi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Dökme demirlerde NTE'lerin varlığı, çok küçük miktarlarda olsa bile, grafit morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Grafitin morfolojisi değiştirilerek dökme demirlerin bazı fiziksel özellikleri geliştirilebilir. Bu nedenle küre formunda grafit elde edebilmek amacıyla dökme demir üretiminde küçük miktarlarda La, Ce, Pr ve Nd

kullanılmaktadır [28]. NTE'lerin dökme demir üretiminde üç ana rolü vardır; nodüler grafitleştirici, katılaşmada çekirdek sayısının artırılması ve zararlı bileşenlerin uzaklaştırılması (oksijen ve sülfür gibi). Bu elementler küresel grafitlerin büyümesini engelleyen oksijen ve sülfür gibi elementlerin negatif etkilerini ortadan kaldırmaktadır. Bu sayede gri dökme demire (pik) kıyasla çok daha yüksek mukavemet değerlerine ve deformasyon kabiliyetine sahip olan küre grafitli dökme demirler elde edilebilir [1]. Şekil 1'de aşılایıcı olarak lantanın dökme demirin mikro yapısı üzerindeki etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir. Sadece %1 oranında La-Mg-Ferrosilis aşılایıcı kullanımı ile aynı kesitte, daha küresel formda ve daha fazla sayıda grafit oluşmuştur.



Şekil 1. Küre grafitli dökme demir üretiminde NTE kullanımının mikroyapıya etkisi [29].

Mischmetal % 95 - 98 NTE içeren (% 45-58 Ce, % 17-30 La, % 11-20 Nd % 4-8 Pr) ve çelik üretiminde oldukça kritik bir öneme sahip olan alaşımlardır. Çelik üretimi için yıllık yaklaşık 3000 ton mischmetal kullanılmakta ve 35 milyon dolarlık bir maliyeti bulmaktadır. Mischmetal kullanımı, bazı NTE malzemeleri içeriğine sahip çeşitli alaşımlar içeren bastnazit cevheri için büyük bir talebe yol açmıştır. Bu alaşımlarda, NTE'lerin kabaca % 50' si Ce esaslıdır [29]. Nadir toprak silisit alaşımı, Vanadium Corporation of America (Foote Mineral Company'nin bir parçası haline geldi) ve Molibden Corporation of America tarafından 1965 yılında geliştirilmiştir. Mischmetale göre daha ucuzdur. Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çeliklerin üretimi için kullanılmaktadır. Alaşım esasen mischmetal, silika ve demirden oluşmaktadır. NTE silisit alaşımlarının, özellikle otomotiv sektörü için önemli olan düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelik

üretiminde yaklaşık 2 dolar/ton luk makul bir maliyeti mevcuttur [29]. Bu düşük maliyete karşın çeliğin mekanik özelliklerinde oldukça önemli artışlar sağlamaktadır. Çelik üretiminde silisitlerin kullanımı ABD, Kanada ve Avrupa ülkelerinde hızla yayılmaktadır.

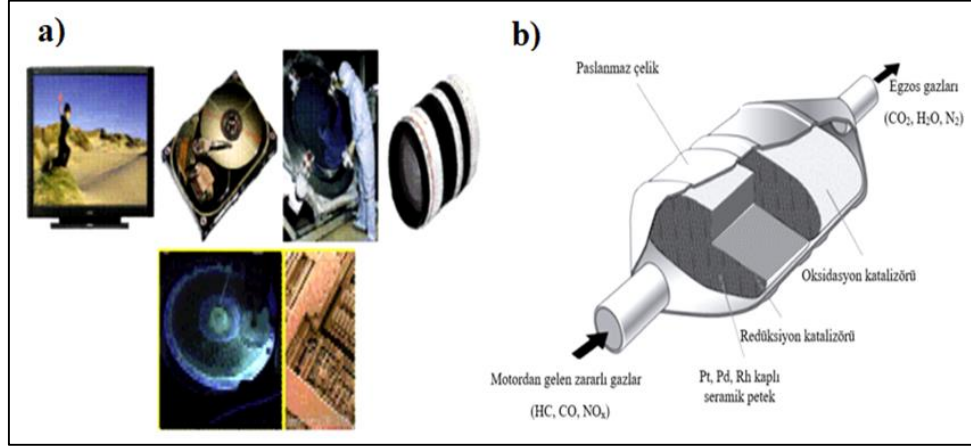
Süper alaşımlar; esasen gaz türbini motorlarında, elektrik jeneratörlerinde, jet motoru egzoz memelerinde, reaksiyon kaplarında ve genellikle yüksek sıcaklıkta oksitleyici ortamlarda malzeme olarak kullanılan ısıya dayanıklı bir alaşım sınıfı şeklinde tanımlanabilmektedir. Süper alaşımlara oksidasyon direncini arttırmak amacıyla bazı NTE'ler eklenmektedir. İtiryum (Y), süper alaşımların M-Cr-Al-Y (Fe-Cr -Al-Y, Ni-Cr-Al-Y, Co-Cr-Al-Y) ailesindeki aktif bileşen olarak bilinmektedir. Burada itiryum alaşımların stabilitesini arttırmakla birlikte kaplama arayüzeylerinde oluşan boşlukları doldurarak yapışma dayanımını arttırabilmektedir [30]. Lantan (La) ve seryum (Ce) da bazı nikel ve kobalt süperalaşım bileşimlerinde benzer bir rol oynamaktadır. Örneğin; seryum kükürt ve oksijeni kontrol etmek için bazı yüksek mukavemetli nikel alaşımlarında kullanılır. Benzer şekilde lantan ise gaz türbinlerinde kullanılan nikel ve kobalt bazlı yüksek sıcaklık alaşımların çalışma sıcaklığını arttırmak için bu alaşımlara eklenmektedir. % 0.03-0.05 aralığında yapılan çok küçük katkıları ile elde edilen ürünlerin çalışma ömürlerini 10 kat'a kadar arttırdığı bilinmektedir [31]. Havacılık alanında yüksek sıcaklık alaşımı olarak kullanılan Al-8Fe-4Ce'de oksidasyon direncini arttırmak için seryum katkısının yapılması önemli endüstriyel uygulamalarından bir tanesidir. Bu tür alaşımlara ağırlıkça %1 ve altında yapılan katkıları ürünlerin performansını önemli derecede geliştirmektedir [32].

Alüminyum alaşımları, az miktarda itiryum stabilize edilmiş zirkonyum kombinasyon ile enerji iletim hatlarında iletimi %50 oranında artırdığı ortaya konulmuştur. Yine yüksek gerilim iletim hatlarında kullanılan alüminyum esaslı alaşımlara mischmetalın eklenmesiyle akma mukavemeti, ısıl direnci, titreşim direnci, korozyon direnci ve ekstrüde edilebilirlik gibi önemli özelliklerin geliştirilmesinde etkili olmaktadır. Yüksek sıcaklık özelliklerine ve yüksek yorulma mukavemetine sahip 22Si-1MM ve 2.5Cu-1.5Ni-0.8Mg-1.2Fe-1.2Si-0.15MM alüminyum alaşımları otomobil endüstrisinde, hava taşıtlarında ve küçük motorlarda kullanılmaktadır [33]. Burada temel husus, 90 ile 315 °C aralığındaki spesifik uygulamalarda kullanılan titanyum esaslı komponentlerin yerine alüminyum, demir ve seryumdan oluşan alüminyum alaşımı geliştirmektir. Bununla birlikte, alüminyuma skandiyum (Sc) ilavesiyle yüksek mukavemete sahip yeni nesil alaşımların

üretmesinde öncülük etmiştir. Örneğin: alüminyuma skandiyum ilavesi ile, tane büyümesi azaltılarak ince taneli yapı oluşturulabilir ve bu sayede kaynak uygulamalarında sıcak çatlama riski azaltılıp, mukavemet artırılabilir ve daha iyi yorulma direnci sağlanabilir [34]. Bu nedenle son yıllarda Al-Sc esaslı alaşımların geliştirilmesi noktasında önemli gelişmeler yaşanmaktadır.

1.2. Seramik-Cam Alanında Kullanımı

Seramik ve cam endüstrisinde NTO katkılarının ana amaçları; ultraviyole absorpsiyonu, kırılma indisinin değiştirilebilmesi, renklendirme veya renk açma şeklinde sıralanabilir [26]. Endüstriyel seramik uygulamalarında limon sarısı pigmentler Pr ile sağlanmaktadır. Bununla birlikte diğer NTE'ler, renk kontrolü sağlayabilmek için seramik sıralara eklenmektedir [35]. La-oksit, yüksek kırılma indeksi nedeniyle cam uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra günümüzde optik camlarda korozyona direncini artırabilmek için % 40'a kadar La-oksit kullanılmaktadır [1]. NTE'lerin en önemli uygulamalarından birisi de parlatıcı olarak kullanımındır. Özellikle CeO_2 cam parlatma uygulamaları için vazgeçilmez bir malzemedir.



Şekil 2. CeO_2 tozlarının parlatma tozu olarak en sık kullanıldığı uygulamalar; ekranlar, harddiskler, optik lensler, silikon plakalar (a), Katalitik konvertör (b) [36].

Şekil 2a'da bu uygulamalar için bazı örnekler verilmiştir. Parlatılmış pürüzsüz bir cam yüzeyi elde edebilmek için, abrazyon aşındırıcılar ve kimyasal çözücüler ile birlikte NTE içeren parlatma tozları kullanılmaktadır. Parlatma tozu olarak kullanılan NTO'ların % 90'ından fazlasını Ce-oksit ve La-oksit oluşturmaktadır (özellikle Ce-oksit). Bununla birlikte düşük miktarlarda Pr-oksit, Nd-oksit

ve Y-oksit de bu amaçla kullanılmaktadır. Ce-oksitin bir parlaticı olarak performansı sulu çözelti içerisindeki oksit yapısına bağlıdır (Ce^{+3} ve Ce^{+4}). Bu nedenle oksitin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak cilalama performansı farklılık gösterebilir [26].

1.3. Katalizör Alanında Kullanımı

NTE'lerin bir diğer önemli kullanım alanı da katalizörlerdir. Bu alanda en önemli uygulamaları; petrol rafinasyonu ve katalitik konvertörlerdir. Katalizörlerin genel uygulamaları polimerizasyon, egzoz emisyon kontrolü, perovskite, amonyak sentezi, izomerizasyon, oksidasyon, hidrojenasyon ve dehidrojenasyon şeklinde sıralanabilir. Egzoz emisyon kontrolü için kullanılan katalizörlerde Ce ve La oldukça önemli bir bileşendir. Ticari uygulamalar için bulunabilirlik ve maliyet oldukça önemlidir. Monazit (% 45 CeO_2 - % 20 La_2O_3) ve Basnazitin (% 49 CeO_2 - % 32 La_2O_3) Ce ve La tenörü oldukça yüksektir. Bu nedenle CeO_2 ve La_2O_3 bol bulunabilirliği ve makul maliyetleri nedeniyle katalizör uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. La ve Ce ile birlikte Pr ve Tb oksitleri de bu uygulamalarda kullanılmaktadır [1].

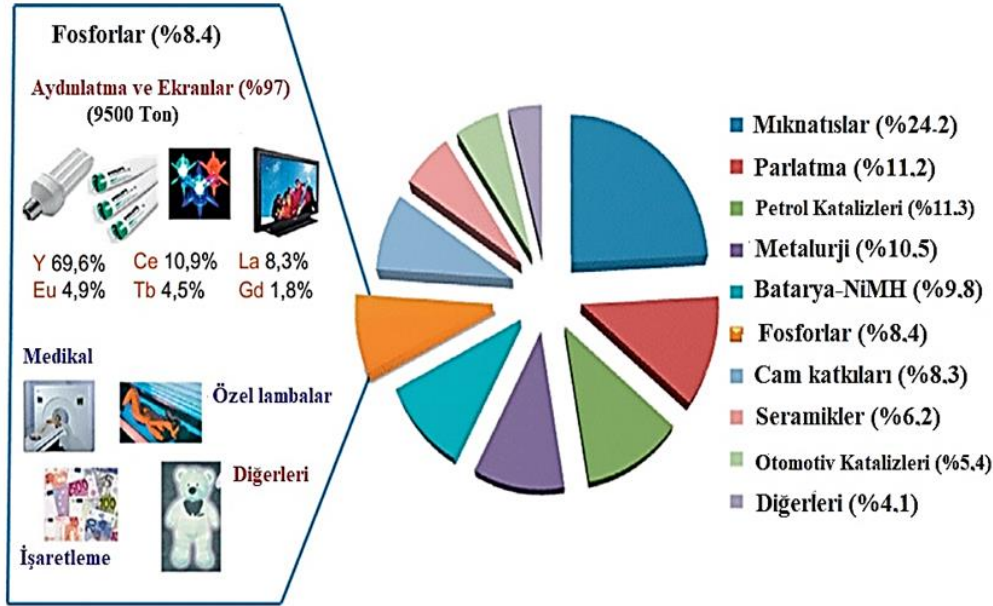
Petrol rafinasyonu, ağır bir hidrokarbon girdisini, daha hafif hidrokarbon fraksiyonlarına dönüştüren bir işlemdir. Parçalanmanın verimi; sıcaklığa, basınca ve aynı zamanda istenen reaksiyonları gerçekleştirebilecek katalizöre bağlıdır. Katalizörlerde NTO konsantrasyonu ağırlıkça yüzde 1.5 ile 5.0 arasında değişmektedir (genellikle %3.5) [37]. Katalizörlerde kullanılan oksitlerin neredeyse % 99'unu La-oksit ve Ce-oksit oluşturmaktadır. La-oksitin tüketiminin önemli bir kısmını da petrol rafinasyonu için kullanılan katalizörler oluşturmaktadır [2]. Şekil 2b'de tipik bir katalitik konvertörün kesit görüntüsü verilmiştir. Egzoz gazlarının olumsuz çevresel etkilerini en aza indirmek için NTO'lar (özellikle CeO_2), Pt, Pd ve Rh ile birlikte kullanılmaktadır. Sadece ABD'deki üretilen otomobil katalizörlerinin NTO ihtiyacı yıllık yaklaşık 100 ton'a yakındır. Otomobillerde kullanılan katalitik konvertörlerde NTO'lar ana katalitik bileşenler değildir. Çok daha değerli olan paladyum ve platin gibi katalitik elementler için koruyucu bir kaplama olarak kullanılmaktadır [26].

1.4. Aydınlatma ve Ekran Teknolojileri Alanında Kullanımı

Fosforlar, küresel NTE pazarının yaklaşık % 9'unu temsil eden yüksek değerli malzemelerden oluşmaktadır (bkz. Şekil 3). Fosforların % 97'si aydınlatma ve görüntüleme uygulamalarına ayrılmıştır. NTE'ler, ışık emisyonunun bir performans kriteri olarak görüldüğü uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde aydınlatma cihazları ve ekranlarda kullanımlarına bakılacak olursa;

- ❖ Rengi kontrol etmek için çoğunlukla La, Y, Ce, Tb ve Eu enerji tasarruflu lambalarda kullanılmaktadır.
- ❖ Işık yayan diyotlar (LED'ler)'da esas olarak Y, Ce ve Eu kullanılmaktadır.
- ❖ Plazma ekranlar, eski katot ışın tüpleri ve arkadan aydınlatmalı sıvı kristal ekranlarda (LCD'ler) La, Y, Ce, Tb ve Eu kullanımı söz konusudur.
- ❖ Fototerapi lambaları, medikal ekipman (Lu, Gd, Ce), son parlatma pigmentleri (Eu, Dy) ve sahtecilik önleyici işaretlemeleri diğer önemli uygulama alanlarıdır.

Özellikle 20. yy. başlarında kırmızı renk ışık yayan $Y_2O_3:Eu^{3+}$ ürünlerin keşfi, NTE içeren fosforların, aydınlatma ve ekran teknolojisinde kullanımı ile ilgili teknolojik gelişmeleri beraberinde getirmiştir. Bu gelişme sadece kırmızı renk ile sınırlı kalmayıp yeşil ($CeMgAl_{11}O_{19}:Tb^{3+}$, $La:Ce,Tb)PO_4$) ve mavi ($BaMgAl_{10}O_{17}:Eu^{2+}$) renk ışık yayan fosforlarında keşfedilmesini de sağlamıştır [38]. Bu teknolojilerin kullanılmasının en önemli sebebi, aydınlatma ve ekranlarda ışığı dönüştürmede sağladıkları veya geliştirdikleri verimden kaynaklanmaktadır. Son yıllarda endüstriyel anlamda TV ekranlarında kullanıma sunulan inorganik ışık yayan diyotların (LED) geliştirilmesinde ve cep telefonu ekranlarında, Lantanit esaslı malzemelerin kullanımı önemli rol oynamaktadır [39]. Özellikle LED'lerde enerji toplayıcı rolü üstlenerek elektrik enerjisinin daha fazla ışığa dönüştürülmesini sağlayarak verimliliği arttırmaktadır [40]. Yine son zamanlarda en önemli ticari gelişmelerden biri olan beyaz ışık yayan diyotlar için ise La^{3+} , Eu^{3+} ve Tb^{3+} NTE'lerin kombinasyonu kullanılmaktadır [41].

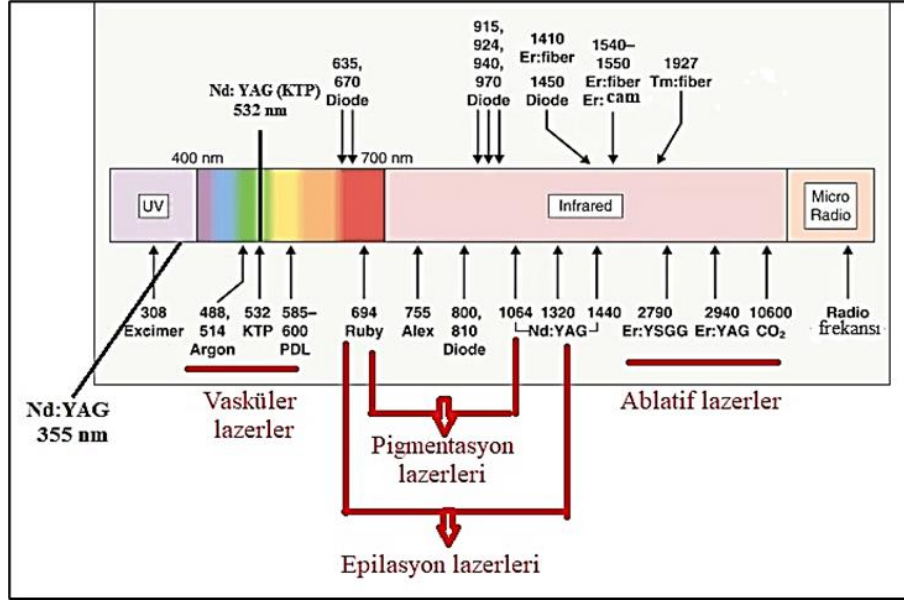


Şekil 3. Fosfor malzemelerin başlıca uygulamaları [36].

1.5. Telekomünikasyon ve Lazer Alanında Kullanımı

Bazı NTE'ler birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Bunlardan biri de hibrit elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan Nd elementidir. Nd, öngörülemez uzay ortamlarında, uzay tabanlı optik iletişim uygulaması için son teknoloji performans sergileyen neodimyum bazlı Nd:YAG lazerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır[42]. Ayrıca Y, ışın odaklayıcı performansının temel tasarım gereksinimi olduğu mikrodalga "yttrium iron garnet (YIG)" filtrelerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Dahası, Y elementi "yttrium alüminum garnet (YAG)" lazerlerde kullanımı da ön plana çıkmaktadır. Bu lazerler, 1 mikroradyandan daha düşük (1-9 radyan arası) açı hataları ile uçak ve uydular arasındaki iki yönlü uzay iletişiminde mükemmel performans sağlamlarının yansısı 6 saniyeden daha kısa bir sürede işlem süresine sahiptir. Haberleşme veya iletişim için frekansı arttırılmış 532 nm'ye sahip Nd:YAG lazer kullanılmaktadır. Bu lazer sistemi, güvenilir olması yansısı elektrik performansında herhangi bir azalma olmaksızın yaklaşık olarak 40.000 km'lik bir menzilde çalışma kapasitesine sahiptir. Ayrıca değişik optik dalgalarına sahip olmalarından dolayı, epilasyon cihazlarında, damarsal leke tedavilerinde, seramik

malzemelerin işlenmesinde ve ameliyatta kullanılan robotik cihazlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar (Bkz. Şekil 4) 43].

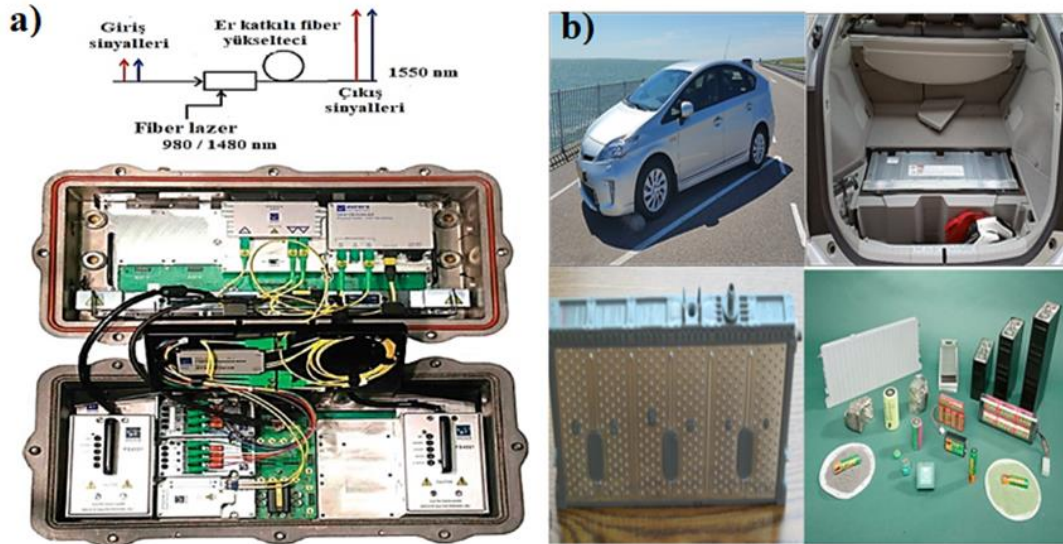


Şekil 4. Lazer dalga boyları (nm) [44].

Er katkılı fiberler ise, Şekil 5a'da gösterildiği gibi geniş spektral bant genişlikleri üzerinde daha yüksek kazanç sağlayan silika esaslı fiber optik amplifikatörlerin tasarımında ve geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [40]. Bu amplifikatörler, zorlu çalışma ortamlarında spektral bant genişlikleri üzerinden optimum kazanç ve düşük gürültü sunmaktadır. Er bazlı optik kristaller, Er: YLF (çift değerlik) ve Er: Ho: YLF (üç değerlikli) gibi çift lazer sistemlerinin tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu lazer sistemleri, minimum maliyet ve karmaşıklıkla daha yüksek diferansiyel kuantum verimliliği, gelişmiş elektrik-optik verimlilik ve önemli ölçüde iyileştirilmiş ışın kararlılığı sergiledikleri bilinmektedir [1].

Belirtildiği gibi NTE katkılı lazer kristalleri birçok uygulamada kullanılmaktadır. Günümüzde saniye mertebesinde gigabayt (Gb/s) veri iletimi sağlamasını gerçekleştirebilen 5G teknolojisi dikkat çekmektedir. Bu teknoloji, yüksek hızda kablosuz veri aktarımı olarak da bilinen ve diğer adı 4.5G olan LTE ağ teknolojisine nazaran coğrafi olarak dağınık hücre kuleleri yerine Gb/s mertebesinde veri aktarımı gerçekleştiren daha küçük hücre kulelerine ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla mm dalga boyuna sahip radyo frekansı sinyalleri, yüksek hızda veri iletimi için kullanılacak

en iyi çözüm olarak görülmektedir. Fotonik tabanlı çözümler, NTE katkılı lazerleri (Er, Th, Yb) kullanarak bu tür sinyalleri oluşturabilirliği ortaya koyan bilimsel veriler mevcuttur [45, 46].



Şekil 5. (a) Erbiyum katkılı fiber yükseltece ait çalışma devresi ve ünitesi, (b)Toyota hibrit araçlarında kullanılan Ni-MH batarya ve diğer uygulama pilleri [47, 48].

1.6. Ni-MH Batarya Alanında Kullanımı

1990'li yıllarda pazara dahil olan nikel metal hidrit (Ni-MH) bataryaları, özellikle La, Ce, Pr ve Nd olmak üzere önemli ölçüde NTE metalleri içermektedir [49]. Ni-MH bataryalar, şarj edilmiş bir pilin alایشim elektrotunda bulunan hidrojeni oksitleyerek güç sağlama prensibine dayanmaktadır. Bu alایشimdaki NTE'lerin rolü, ihtiyaç duyulan yüksek güç ve hızlı şarj için hidrojenin hızlı bir şekilde desorbe ve yeniden absorbe etmesidir [50]. Günümüzde Ni-MH esaslı pillerin çoğu hibrit otomobillerin elektrik motorlarına güç sağlamak için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hibrit elektrikli motor pazarın büyüyor olması bataryalarda kullanılan NTE'lerin kullanımını da arttırmaktadır. Tipik bir Ni-MH bataryada, batarya ağırlığının %60'i Ni (%18), Co (%15), Fe (%4) ve NTE (%17) gibi metal bileşenlerden oluşmaktadır. Burada, NTE'lerin kendi içerisindeki dağılımı ise %65 La, %25 Ce, %1-8 Nd ve %3-8 Pr şeklindedir [51]. Batarya sektöründe kullanılan NTE'lerin toplam NTE tüketim oranı içerisinde %10'luk bir pazar payına sahiptir (Bkz. Şekil 3).

Ni-MH bataryaların bu alandaki en önemli üstünlükleri, aracın kendisi kadar uzun ömürlü (10 yaş üstü ve 150.000 km üzerinde) ve yüksek duyarlılıklı olmalarıdır [52]. Çeşitli tip ve büyüklükte bu bataryaların kullanıldığı yaklaşık 10 milyon elektrikli araç söz konusudur. Şekil 5b’de Toyota hibrit araçlara ait batarya ve diğer piller görülmektedir. 2013 yılında yaklaşık 1.3 milyonu Ni-MH bataryaya sahip elektrikli tahrik motorlu Toyota hibritleri olmak üzere 2 milyona yakın hibrit araç üretilip satıldığı bilinmektedir [53].

Son yıllarda, Li-iyon batarya sistemleri özel şekillerde daha kolay üretilebilmesi, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha uzun kullanım ömrü nedeniyle NiMH bataryaların yerini almaya başlamıştır. 2013 yılı verisine göre hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya oranları %80 Ni-MH ve %20 Li-iyon şeklinde olmuştur. Ancak yüksek sıcaklık uygulamalarında Li-iyon bataryaları güvensiz olduğundan, Ni-MH bataryaları kullanım alanlarını ciddi oranda korumaya devam etmektedir. Ayrıca, son yıllarda yapılan Ar-Ge faaliyetleri Li-iyon batarya sistemlerinde de NTE’lerin dop edilerek kullanılması daha iyi performans sağladığını ortaya koymaktadır [54, 55]. Bu nedenlerle NTE’ler batarya sektöründeki kritik hammadde rolünü korumaya devam etmektedir [56].

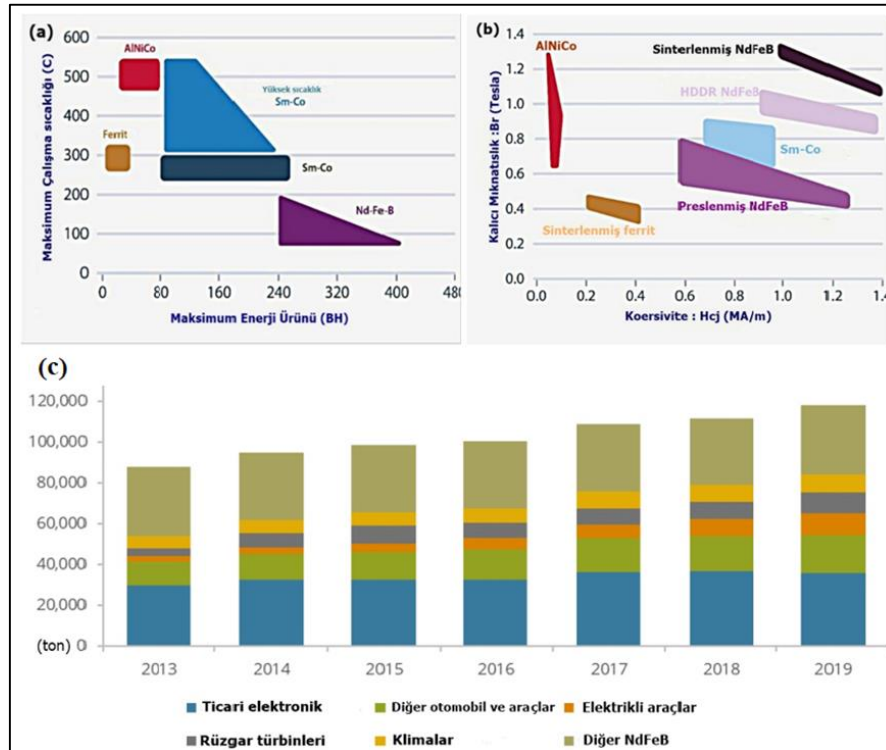
1.7. Kalıcı Mıknatıs Alanında Kullanımı

Kalıcı mıknatısların sektör içerisinde, akustik güç vericiler, motorlar ve jeneratörler, manyeto mekanik araçlar, manyetik alan ve görüntüleme sistemleri gibi çok değişik kullanım alanları mevcuttur. Örneğin bir arabada, mıknatıslar daimi mıknatıs motoru, elektrikli cam kontrolü, cam silecekleri, jeneratörler ve sensör sistemlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, hoparlör, mikrofon, akıllı telefonlar ve diğer iletişim araçlarında da kullanılmaktadır [57]. Bunlara ek olarak, rüzgâr tribünleri sektörü de mıknatısların ana tüketicileri pozisyonundadır. Evlerimizde veya ticari amaçlarla kullanılan dondurucularda dahi enerji verimliliğini arttırması amacıyla mıknatıslar kullanılmaktadır. Bu pazar büyük oranda NdFeB mıknatısları tarafından domine edilmekle birlikte, AlNiCo ve SmCo mıknatısları da kullanılmaktadır. Örneğin NdFeB mıknatıslarının 2015 yılındaki pazar hacmi 13.4 milyar USD civarında olmuştur [56].

2015 yılındaki verilere göre bu sektör toplam NTE tüketiminin % 24’lük kısmını oluşturarak piyasa değerinin yaklaşık % 66’sını temsil etmektedir (bkz. Şekil 3). Mıknatıslar için en fazla kullanılan NTE’ler Nd ve Pr olup, daha az oranda ise Dy, Gd ve Sm kullanılmaktadır. Burada, NdFeB

mıknatıslar diğer mıknatıs türlerine göre maksimum enerji kapasitesine sahip olup, NTE içeriği olarak %31 oranında Nd ve %4.5 oranında Dy ihtiva etmektedir ve çalışma sıcaklıkları 80 °C' den 200 °C' ye kadar çıkabilmektedir.

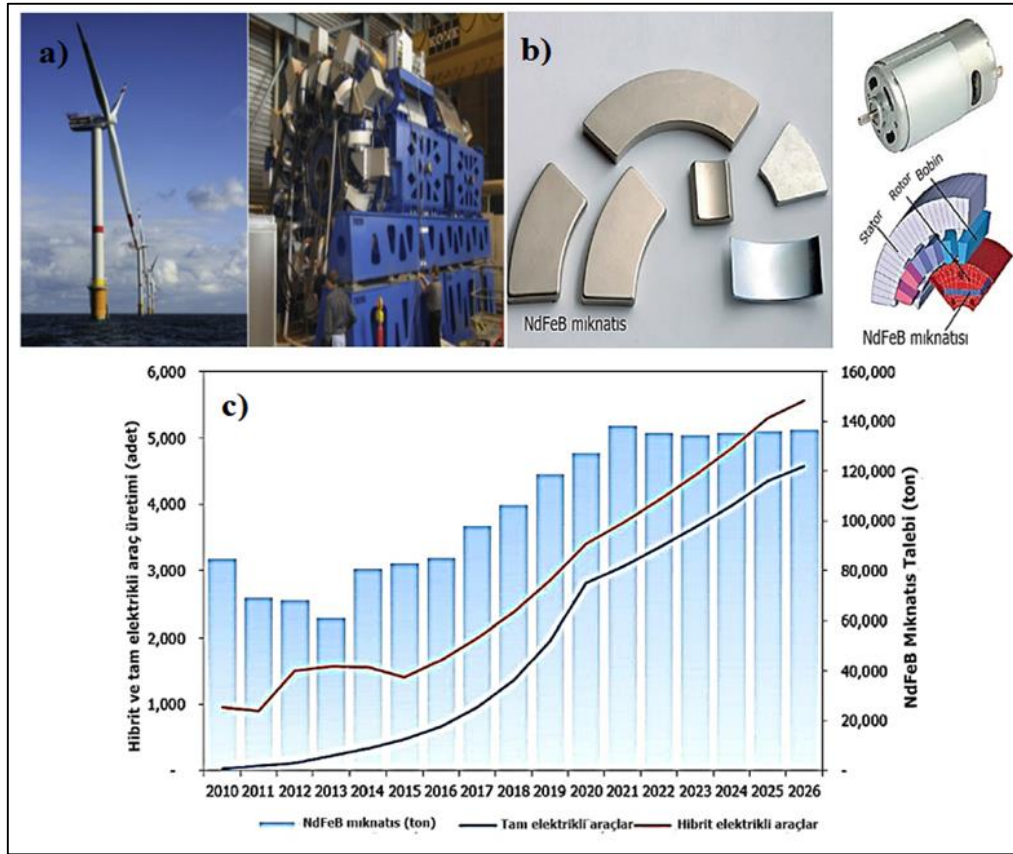
Şekil 6a ve 6b'de görüldüğü gibi yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren durumlarda AlNiCo ve Sm-Co mıknatıslar tercih edilmektedir. Ayrıca kalıcı manyetiklik özelliklerine bakıldığında özellikle sinterlenmiş NdFeB ve AlNiCo mıknatıslar ön plana çıkmaktadır. Kalıcı mıknatıslar için koersivite (ferromanyetik bir malzemenin manyetikliğinin giderilmesine karşı gösterdiği direnç) değeri önem arz etmektedir. Nitekim AlNiCo esaslı mıknatısların manyetik kalıcılığı NdFeB mıknatıslarıyla kıyaslanabiliyor olsa da koersiviteyi kıyaslanamayacak derecede düşüktür. Bu nedenle mıknatıs alaşımları için önemli olan kararlılık ve çalışma performansı parametreleri göz önüne alındığında NdFeB alaşımların kullanımı giderek artmakta olup pazar hacmi 2019 yılında %29'a çıkmış ve çeşitli uygulamalar için yaklaşık 110.000 ton üretim kapasitesini aşmış bulunmaktadır (bkz. Şekil 6c).



Şekil 6. Farklı mıknatıs türlerinin çalışma sıcaklığı (a), Koersivite (b) özelliklerinin karşılaştırılması [46] (c) 2013-2019 yılları arsında ton cinsinden uygulama başına NdFeB mıknatıs talebi [58].

Günümüzde ülkeler, enerji alanında dışa bağımlılığını azaltmak için alternatif enerji kaynaklarına yönelmektedir. Son zamanlarda alternatif enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç rüzgâr türbinlerine olan ilgiyi yeniden uyandırmıştır. Nitekim rüzgâr türbinleri üretiminde kullanılan jeneratör, alternatör ve manyetoların içerisinde ciddi miktarda NdFeB mıknatısı varlığı, bu alanda pazar hacmini gittikçe arttırmaktadır. Örnek olarak 3.5 MW enerji üreten açık deniz rüzgâr türbinlerinde yer alan jeneratör, alternatör gibi bileşenlerde 2 ton NdFeB kalıcı mıknatısı kullanılmaktadır [59]. Bu değer 1kW başına yaklaşık olarak 0.6 kg NdFeB mıknatısına denk gelmektedir.

Klasik bir rüzgâr türbinindeki en önemli mekanik parçalardan biri, pervane hızını normal rüzgâr koşullarında yaklaşık 10 ila 20 rpm'den çok daha hızlı bir hıza dönüştüren dişli kutusudur. Mekanik gerilimler nedeniyle dişli kutusu, bir türbinin en zayıf noktasıdır. Nitekim NdFeB mıknatısların kullanılması, dişli kutularına ihtiyaç duymadan yeni düşük hızlı jeneratör tasarımlarına olanak tanımaktadır (Şekil 7a). NdFeB kalıcı mıknatıs jeneratörü, temelde titreşimleri ve hareketli parça sayısını %50 azaltarak rüzgâr türbini güvenilirliğini ve ömrünü arttırmakta ve bakım oranını azaltmaktadır [60].



Şekil 7. (a) Rüzgar türbininde kullanılan NdFeB kalıcı mıknatıs jeneratörü, (b) Çeşitli uygulamalarda kullanılan NdFeB mıknatısları [61], (c) 2010-2026 yılları arasında tahmini hibrit ve tam elektrikli araçların üretimine karşı NdFeB mıknatısı talebi [62].

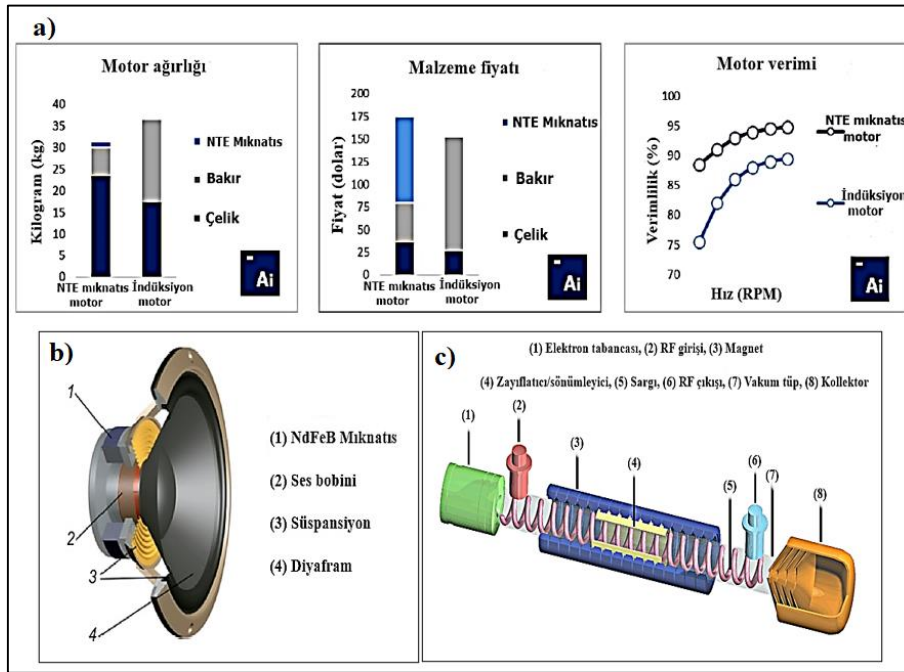
NdFeB mıknatıslar, rüzgâr türbinleri yansın endüstriyel motorlarda, araba motorlarında, elektrikli bisiklet motorlarında ve bilgisayarlarımızın sabit disklerini çalıştıran küçük karmaşık motorlar/sürücülerde de kullanılmaktadır (bkz. Şekil 7b). Gelecek on yılda, belki de NTE tüketimi için en can alıcı husus, hammadde hacimlerinde ve türlerinde toptan değişikliklere neden olması beklenen hibrit elektrikli araçlarda ve tam elektrikli araçlarda pazar payının önemli ölçüde büyüme gerçekleştirecek olmasıdır. Bu olasılığı güçlendiren temel etmen tüm büyük otomotiv üreticilerinin hibrit ve tam elektrikli araç modellerini geliştiriyor olmalarıdır. Şekil 7c'de gösterilen grafikte, 2016'da 2.3 milyon adet olan hibrit ve tam elektrikli araç üretim sayısının, 2026'da 10.1 milyon adete çıkacağı tahmin edilmektedir [63].

2018 yılında, dünya çapında satılan tüm yolculu elektrikli araçların %93'ü (örneğin BMW i3'te), NTE içeren kalıcı mıknatıslı senkron motorları (KMSM) kullanılmıştır. Şekil 8a'da karşılaştırmalı

olarak verilen grafiklerde de görüleceği üzere; kalıcı mıknatıslı senkron motorlar, indüksiyon motorlarından (İM) %15'e kadar daha verimlidir ve piyasada bulunan en güç yoğunluklu (kW/kg ve kW/cm³) çekiş motoruna sahiptirler. Ancak NTE esaslı motorlarda maliyet daha yüksektir. NTE içermeyen motorlar, indüksiyon motorları (İM) ve elektriksel uyarmalı elektrik motorlar (EUEM) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu motorlar hâlihazırda Tesla S ve Renault Z modellerinde kullanılmaktadır. Hibrit ve tam elektrikli araçların standart motorunda yaklaşık olarak 1-3 kg NdFeB mıknatısı tüketimi söz konusudur. Örnek olarak, 55 kW gücünde bir motor için 0.65 kg Nd-Dy-Co-Fe-B alaşımı gereklidir. Bu da 200 gr Nd (3.6 gr/kW)'a ve 30 gr Dy (0.55 gr/kW)'a karşılık gelmektedir [46]. Son yıllarda, hızlı şekilde büyüyen pazarlardan bir tanesi de hafif, kompakt ve NdFeB tabanlı minyatür elektrikli motorları içeren elektrikli bisikletlerdir. Bisiklet başına yaklaşık olarak 350 gr NdFeB veya 86 gr Nd kullanılmaktadır. Alan ve ağırlık faktörleri nedeniyle elektrikli bisikletlerde NdFeB mıknatıslara henüz bir alternatif olmayışı bu alanda rakipsiz olarak görülmektedir [64]. Bu mıknatısların diğer bir uygulama alanı ise transdüser ve ses sistemleridir. Transdüserler, bir elektrik sinyalini mekanik sinyale dönüştüren önemli aygıtlardır. Ses sistemlerinde/hoparlörlerde elektrik enerjisi akustik sinyale dönüştürürler [65]. Şekil 8b'de gösterildiği gibi statik bir mıknatıs ile diyaframa bağlı salınan bir metal bobin arasındaki dinamik etkileşime dayanmaktadır. NdFeB mıknatıslar, ses sistemi ürünleri için hala ciddi bir uygulama alanıdır. Bununla birlikte, son yıllarda geliştirilen piezoelektrik transdüserlerin kullanımı ile mıknatısların bu alandaki kullanım miktarının azalacağı öngörülmektedir.

Alaşım yapısında %25-36 arasında Sm içeren samaryum-kobalt (Sm-Co) mıknatıslar, radar ve elektronik harp ekipmanları gibi saldırı ve savunma silah sistemi bileşenlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [66]. Bu kalıcı mıknatıslar, 300 °C'ye yakın çalışma sıcaklıklarında manyetik özelliklerini koruyabilmektedir. Nitekim bu sıcaklıklarda diğer mıknatıs gruplarının çalışması neredeyse imkansızdır. Radarlar ve savaş ekipmanlarında yürüyen dalga tüpleri (TWT'ler) tarafından kullanılan magnetronlar veya klistronlar gibi yüksek güçlü radyo frekansı (RF) kaynakları, muharebe/savaş operasyonları sırasında 100 ile 250 °C arasında değişen çalışma sıcaklıklarına maruz kalabilmektedirler. Sm-Co mıknatıslar, şiddetli titreşim ve sıcaklık değişimlerinin olduğu durumlarda yüksek kararlılık ve güvenilirlik sağlayarak radarların yüksek sinyal/frekans alması ve dağıtması açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin yüksek güçlü bir

elektronik savaş ekipmanı, düşman radarları ve füzelerinin oluşturduğu tehditlere karşı genellikle yürüyen dalga tüpleri (TWTA'lar) kullanılmaktadır (bkz. Şekil 8c). Bu TWTA'lar, düşman radarlarını ve gelen füzeleri karıştırmak için hava ve gemi ile taşınan elektronik savaş ekipmanlarında konuşlandırılmaktadır [67].



Şekil 8. (a) Elektrikli araç motorlarında ağırlık, fiyat ve verim karşılaştırması [68], (b) NdFeB mıknatısının kullanıldığı tipik bir hoparlör [61], (c) Yürüyen dalga tüpü yükselticine ait bileşenler [69].

Sm-Co esaslı mıknatıslar, yapısında bulunan kobalt ve samaryum elementlerinin yüksek fiyatlarından dolayı özellikle hava savunma sistemlerinde daha çok tercih edilmektedir. Sm-Co mıknatısların tedarik maliyeti, aynı manyetik performans parametrelerine sahip seramik ferrit mıknatısların yaklaşık 20 ile 50 katı ve aynı fiziksel boyuttaki Nd mıknatısların maliyetinin ise üç katıdır. Bununla birlikte, neodimium mıknatısı aynı fiziksel boyuttaki SmCo mıknatıstan yaklaşık %40 daha güçlüdür. Bu nedenle spesifik uygulamalar dışında genellikle NdFeB mıknatıslar tercih edilmektedir [70].

1.8. Medikal Alanında Kullanımı

NTE'ler, sahip oldukları eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde, yüksek teknolojik ürünler, kalıcı mıknatıslar ve lazer teknolojisi yanı sıra optik özellikleri nedeniyle, bilgisayarlı tomografi taramaları (BT), manyetik rezonans görüntü (MRG), pozitron emisyon tomografi (PET) görüntüleme ve X-ışınları gibi birçok görüntüleme tekniğinde kullanılmaktadır [71]. Örneğin Gd, MRG'de tıbbi tanıda en çok kullanılan NTE'dir. Gd^{+3} iyonları, MRG görüntülerini geliştirmekle birlikte, tanısal görüntülerin duyarlılığını ve belirginliğini geliştirmek için intravenöz kontrast maddelerinde de kullanılmıştır [25]. Dahası, deri kanseri tedavisinde Nd:YAG lazerleri, tıbbi ve dental uygulamalarda Er esaslı lazerler, MRG ve radyoterapi tekniklerinde La ve Pr nano oksitleri, biyo görüntüleme ve biyo tanılarda Eu kullanılmaktadır [71]. Aslında manyetik rezonans görüntüleme (MRG) ve tomografi cihazlarında manyetiklik sağlayan süper iletkenler yerine NdFeB mıknatısların kullanılması, bu cihazların 3 boyutlu görüntüleme ve tanılamada sağlayacağı yüksek çözünürlük ve doğruluk gibi avantajlar açısından önemlidir. Çünkü NTE mıknatısları kullanıldığında rahatsız edici yüksek gürültü seviyeleri ve titreşimler azalır, penetrasyon artar. Bununla birlikte, birkaç ton ağırlığındaki bu cihazlarda kullanılacak Nd esaslı mıknatıs miktarı kritik hammadde açısından pek mümkün görünmemektedir. Gelecek yıllarda bu cihazların daha küçük, kompakt, verimli ve taşınabilir seviyeye getirilmesiyle, Nd esaslı mıknatısların bu alanda da kullanılması teknolojik açıdan imkânsız görünmemektedir.

1.9. Savunma Sanayi Alanında Kullanımı

NTE üretiminde Dünyada olduğu gibi Ülkemizin, özellikle savunma sanayiinde ihtiyaç duyulacak miktarlarda üretim yapabilmesi, stratejik anlamda hayati bir öneme sahiptir. Örneğin; radar sistemleri ve elektronik harp sistemlerinde eşsiz termal ve manyetik özelliklerinden dolayı Sm-Co ve NdFeB mıknatıslar kullanılmaktadır. 35 yıllık kullanım ömrü belirlenen Aegis Spy-1 radar sistemlerinde, Sm esaslı manyetik bileşenler kullanılmakta ve radarın performans özelliklerini koruyabilmesi için bu malzemelerin belirli periyotlarla değiştirilmesi gerekmektedir [1]. Bu durum hem mevcut sistemler için hem de geliştirilecek yeni sistemler için elektronik savunma sistemlerinde uzun vadede NTE'lere olan ihtiyacın devam edeceği anlamına gelmektedir.

NTE'ler savunma sanayi uygulamalarında vazgeçilmez bileşenlerdir. Nitekim günümüzde hedeflerin işaretlenmesi için lazer üretiminde, hassas güdümlü mühimmatlarda, askeri iletişim sistemlerinde, elektronik harp teçhizatlarında, radar sistemlerinde, aviyoniklerde (görev bilgisayarlarında), gece görüş gözlüklerinde, gözetleme ve keşif uydularında, bilgisayar sabit disklerinde, TWTA'lar (*Traveling Wave Tube Amplifiers*) için odaklanma mıknatıslarında, yüksek tork ve yüksek verimli elektrik motorlarında (samaryum ve neodimyum kalıcı mıknatıslar) kullanılmakta ve bu uygulamalar, NTE'lerin savunma sanayisi için vazgeçilmez bileşenler olduğunu göstermektedir [1, 72].

NTE esaslı intermetalik bileşikler, özellikle mikrodalga teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. NTE intermetalik bileşiklerin tipik örnekleri; GdAg, PrAl₂, CeNi, Er₃Ni, LaNi₅ ve HoCo₁₇ şeklinde sıralanabilir [73, 74]. SmCo₅ ve Sm₂Co₁₇ intermetalikleri özellikle savunma sanayi için oldukça önemlidir. Bu intermetalikler kullanılarak üretilen mıknatıslar zorlu koşullarda (yüksek sıcaklık ve yüksek titreşim) bile manyetik özelliklerini koruyabilmektedir. Bu mıknatıslar, askeri radarlarda ve elektronik harp sistemlerinde yüksek güçlü hareketli dalga tüplü amplifikatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [75, 76]. Bu NTE mıknatısları, zorlu mekanik ve termal ortamlarda yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlamak ve diğer mıknatısların hiçbiri bu koşullarda manyetik özelliklerini koruyamamaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında genellikle Sm-Co mıknatıslar tercih edilmektedir. Ancak güçlü bir manyetik alan gerekli olduğunda neodimyum esaslı mıknatıslar daha uygundur. Sm-Co kalıcı mıknatıslar, 300 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda bile manyetik performanslarını sürdürdükleri için gelişmiş savaş alanı tanklarının navigasyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu mıknatıslar şiddetli titreşim ve sıcaklık değişimlerinin olduğu çatışma alanlarında, muharebe silahları için en uygun mıknatıslardır. Benzer bir şekilde, askeri amaçlarla kullanılan bilgisayarlar geliştirilirken, atmosferik ve nükleer radyasyon ortamlarında bile güvenle çalışabilecek devreler ve yarı iletken malzemeler üretilirken NTE'ler kullanılmaktadır [77]. NTE'ler, havacılık alanında da kritik bir öneme sahiptir. Jet motorlarında, scram jetlerde, yüksek güçlü piller için pil elektrotlarında ve diğer birçok havacılık ürününde kullanılmaktadır [1]. Y-Fe-granat filtreleri, keskin kesme frekansı, minimum geçiş bandı kaybı ve durdurma bandı bölgelerinde yüksek zayıflamanın temel tasarım gereksinimleri olduğu uydu ve hava sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [78]. Yüksek performanslı diyet

pompalı katı hal kızılötesi lazerleri, kızılötesi frekanslarda üstün lazer performansı elde etmek için Ho, Tm, Y ve Er gibi NTE'ler kullanılmaktadır [79]. Bu nedenlerle, NTE'lerin savunma sanayisinde çok kritik bir rol üstlendiğini ve pek çok savunma sanayi uygulamasında henüz ikame bir alternatifinin olmadığı bilinmektedir.

1.10. Nükleer Alanında Kullanımı

NTE'lerin nükleer enerji alanında birçok uygulaması mevcuttur. Bu alanda en fazla kullanılan NTO'lardan biri de Gd_2O_3 'tür. Gadolinyum (Gd) oksit, enerji üretiminde kullanılan kaynar su reaktörlerinde, nötron tutucu veya yanabilen bir zehir olarak kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde 26 operasyonel kaynar su reaktöründe, yaklaşık 2 ton Gd oksit kullanıldığı tahmin edilmektedir [32]. Yaklaşık olarak %5 oranında gadolinyum oksit, yakıt içindeki uranyum oksit ile doğrudan karıştırılarak yakıt elemanının ömrü boyunca muntazam bir nötron akısı elde etmesine yardımcı olmaktadır. Gadolinyum sadece yüksek bir nötron soğurma kesitine değil, aynı zamanda fiziksel ve kimyasal özelliklerinin UO_2 'e yakın olması nedeniyle ^{235}U 'unkine benzer bir yanma oranına da sahiptir [80].

Gadolinyumun yanı sıra, Eu, Sm ve Dy elementleri de termal nötronlar için geniş bir yakalama kesitine sahiptir. Örneğin; ^{151}Eu , ^{152}Eu , ^{153}Eu , ^{154}Eu ve ^{155}Eu gibi kesintisiz beş izotop serisine sahip Evropiyumun (Eu) her bir nötronun bir kütle numarası daha az olan izotop tarafından yakalanmasıyla oluşmaktadır ve hepsi nötronlar için büyük yakalama kesit alanına sahiptirler. Evropiyumun sahip olduğu bu özellik, kompakt nükleer silahlarda kontrol çubukları için kullanımı önem arz etmektedir. Bununla birlikte, Evropiyum hekzaborit (EuB_6) sahip olduğu kararlı yapısından dolayı nükleer denizaltılarda nötron tutucu/emici malzeme olarak kabul görmüştür [81]. Bununla birlikte Disprosyum (Dy) katkılı $CaSO_4$ ve CaF_2 kristalleri, gama ışınları veya nötronlar gibi iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalındığı durumlarda kullanılan dozimetrelerde uygulama alanı bulmuştur [82].

2. SONUÇ

NTE'ler sahip oldukları eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde modern teknolojik uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Özellikle elektrik, optik, elektro-optik ve manyetik alanlarda kullanımları ele alındığında; savunma sanayi, otomotiv, uydu haberleşme, temiz enerji ve modern tıp teknolojileri gibi stratejik öneme sahip uygulamalar göze çarpmaktadır. NTE'ler günlük yaşantımızda çokça yer alan cep telefonları, güneş gözlükleri, bilgisayarlar, LCD ekranlar, fiber kablolar, lazerler, kamera lensleri, rüzgâr türbinleri, jeneratörler, şarj edilebilir hibrit bataryalar, uydu haberleşme, harp sistemleri, bilgi depolama, güneş enerjisi ve medikal görüntüleme gibi birçok alanda/üründe tercih edilmektedir. NTE'ler kullanıldığı ürünlerde, ürünün ana hammaddesi olmayıp belirli oranlarda katkı maddesi olarak ilave edilmektedir. Bu durum özellikle düşük katkılar ile yüksek performanslı teknolojik ürünlerin elde edilmesinde kritik hammaddeler açısından son derece önemlidir. Tüm dünyada olduğu gibi kritik ve stratejik öneme sahip NTE'lerin, Ülkemizin gelecek hedeflerine ulaşması açısından ulusal bir tedarik zinciri kurulması ve yüksek teknolojik ürünlerin milli ekonomiye kazandırılması ciddi önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Jha, A. R. Rare earth materials: properties and applications. London: CRC Press, s. 114-325, 2014.
- [2] Bade, R., Rare Earths Review—Is the Hype Justified? Londo : Libertas Corporate Finance Limited, 2010.
- [3] Yeliz, İ. P. E. K., & Ayhan, N. K. Rare Earth Element Doped ZnO Thin Films and Applications. International Journal of Pure and Applied Sciences.Cilt 7, 2, s. 305-313, 2021.
- [4] Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., ... & Dissanayake, K. The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. Ore Geology Reviews, 122, 103521, 2020.
- [5] Pavel, C. C., Marmier, A., Tzimas, E., Schleicher, T., Schüler, D., Buchert, M., & Blagoeva, D. Critical raw materials in lighting applications: Substitution opportunities and implication on their demand. physica status solidi (a), 213(11), 2937-2946, 2016.
- [6] Akıska, E., Karakaş, Z., & Öztürk, C. Uranium, thorium and rare earth element deposits of Turkey. In Mineral Resources of Turkey, Springer, Cham. pp. 655-679, 2019.

- [7] Kürüm, S. & Özdemir, N. Erzurum Bölgesinde Palandöken Volkanik Kayaçlarının Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri, Doğu Anadolu, Türkiye. International Journal of Pure and Applied Sciences, 6 (2), 42-60, 2020.
- [8] C. Özcan, "A Review On Various Analytical Techniques for Determining REEs", International Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 7, no. 2, pp. 265-275, Jul. 2021.
- [9] Kurşun, F., Dağcı, B. & Özcan, C. Determination of Titanium in Zinc ash by FAAS After Digested using Ultrasound-Assisted Extraction. Kırklareli University Journal of Engineering and Science, 7 (1), 147-154, 2021.
- [10] Haxel, G. Rare earth elements: critical resources for high technology. US Department of the Interior, US Geological Survey.Vol. 87, No. 2, 2002.
- [11] Ramprasad, C., Gwenzi, W., Chaukura, N., Azelee, N. I. W., Rajapaksha, A. U., Naushad, M., & Rangabhashiyam. Strategies and options for the sustainable recovery of rare earth elements from electrical and electronic waste. Chemical Engineering Journal, 135992, 2022.
- [12] Charalampides, G., Vatalis, K. I., Apostoplos, B., & Ploutarch-Nikolas, B. Rare earth elements: industrial applications and economic dependency of Europe. Procedia Economics and Finance, 24, 126-135, 2015.
- [13] Ali, S. H. Social and environmental impact of the rare earth industries. Resources, 3(1), 123-134, 2014.
- [14] Balaram, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geoscience Frontiers, 10(4), 1285-1303, 2019.
- [15] Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. Environmental science & technology, 46(6), 3406-3414, 2012.
- [16] Zhou, B., Li, Z., Zhao, Y., Zhang, C., & Wei, Y. Rare Earth Elements supply vs. clean energy technologies: new problems to be solve. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 32, 2016.
- [17] Christopher, M., & Holweg, M. Supply chain 2.0 revisited: a framework for managing volatility-induced risk in the supply chain. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2017.
- [18] Strässle, T., Furrer, A., Hossain, Z., & Geibel, C. Magnetic cooling by the application of external pressure in rare-earth compounds. Physical Review B, 67(5), 054407, 2003.
- [19] Hardy, A. E. (1968). The performance characteristics of yttrium oxysulfide-A new red phosphor for color television. IEEE Transactions on Electron Devices, 15(11), 868-872.

- [20] Aslan, N., Ceylan, B., Koç, M. M., & Findik, F. Metallic nanoparticles as X-Ray computed tomography (CT) contrast agents: A review. *Journal of Molecular Structure*. Cilt 1219, 128599, 2020.
- [21] Huang, X., Zhao, D., Ma, L., Deng, C., Li, L., Chen, K., & Yang, X. Effect of La₂O₃ on crystallization of glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 536, 120007, 2020.
- [22] Poscher, A., Luidold, S., & Antrekowitsch, H. Extraction of cerium and lanthanum from spent glass polishing agent. *Materials Science & Technology*, 543-552, 2013.
- [23] Karahan, E., Er, D., & Kaynak, S. An overview of Nd: YAG laser capsulotomy. *Medical hypothesis, discovery and innovation in ophthalmology*, 3(2), 45, 2014.
- [24] An, S., Ma, Z., Li, W., Zhang, H., & Yin, T. Magnetic properties of anisotropic bonded NdFeB/SmCo permanent magnets. *AIP Advances*, 9(12), 125146, 2019.
- [25] Koç, M. M., Aslan, N., Kao, A. P., & Barber, A. H. Evaluation of X-ray tomography contrast agents: A review of production, protocols, and biological applications. *Microscopy Research and Technique*. Cilt 82, (6), s. 812-848, 2019.
- [26] Goonan, T. G. Rare earth elements: End use and recyclability (p. 19Disponível). Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey. 2011.
- [27] Linebarger, H. F., & McCluhan, T. K. The Role of the Rare Earth Elements in the Production of Nodular Iron. *ACS Symposium Series*. Cilt 2, s. 19-42, 1981.
- [28] Glavas, Z., Strkalj, A., Maldini, K., & Kozina, F. Effect of bismuth and rare earth elements on graphite structure in different section thicknesses of spheroidal graphite cast iron castings. *Archives of metallurgy and materials*, 1547-1553, 2018.
- [29] Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A., & Davenport, W. *Rare Earths: Science, Technology, Production and Use*. Elsevier Inc., 2014.
- [30] Guan, K., Huang, Z., Cui, R., & Qin, J. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of a directionally solidified single crystal superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 752, 86-92, 2019.
- [31] Guskov, V. N., & Gavrichev, K. S. Thermal Expansion, Heat Capacity, and Thermodynamic Properties of Monoclinic Lanthanide Orthotantalates: A Review. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 66(13), 1947-1972, 2021.
- [32] Krishnamurthy, N., & Gupta, C. K. *Extractive metallurgy of rare earths*. London : CRC press, s.40-83, 2015.
- [33] Blázquez, J. S., Fazakas, E., Dimitrov, H., Latuch, J., Varga, L., & Kulik, T. Effect of substitution of rare earth by mischmetal on the devitrification process of Al-X-Ni-Co (X= Y, Ce, Mm) alloys. *Journal of non-crystalline solids*, 351(2), 158-166, 2005.

- [34] McGill, I. In Habashi, F. (ed.), Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. III, pp., Rare earth metals. Weinheim: Wiley-VCH, s. 1695–1741, 1997.
- [35] Campbell, Max, and Keane, Chris, Rare earth colorants. Ceramics Today. [Çevrimiçi]. [Alıntı Tarihi: 5 May 2021.] at <http://www.ceramicstoday.com/articles/lanthanides.html>, 2010.
- [36] Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A., & Davenport, W. Applications of rare earth luminescent materials. Rare Earths. s. 281-318, 2015.
- [37] Du, J., Li, Z., Da, Z., & He, M., U.S. Patent No. 7,514,385 Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2009.
- [38] Liu, H., Zhang, S. G., Pan, D. A., Liu, Y. F., Liu, B., Tian, J. J., & Volinsky, A. A. Mechanism of CeMgAl₁₁O₁₉: Tb³⁺ alkaline fusion with sodium hydroxide. Rare Metals, 34(3), 189-194, 2015.
- [39] Escribano, P., Julián-López, B., Planelles-Aragó, J., Cordoncillo, E., Viana, B., & Sanchez, C. Photonic and nanobiophotonic properties of luminescent lanthanide-doped hybrid organic–inorganic materials. Journal of Materials Chemistry, 18(1), 23-40, 2008.
- [40] Eliseeva, S.V., Bünzli, J. C. G. Rare earths: jewels for functional materials of the future. New Journal of Chemistry, Cilt 35, 6, s. 1165-1176, 2011.
- [41] Guo, N., Huang, Y., You, H., Yang, M., Song, Y., Liu, K., & Zheng, Y. Ca₉Lu (PO₄)₇: Eu²⁺, Mn²⁺: a potential single-phased white-light-emitting phosphor suitable for white-light-emitting diodes. Inorganic chemistry. Cilt 49, 23, s. 10907-10913, 2010.
- [42] Barnes, N. P., & Walsh, B.M. Amplified spontaneous emission-application to Nd: YAG lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, 35(1), 101-109, 1999.
- [43] Karahan, E., Er, D., & Kaynak, S. An overview of Nd: YAG laser capsulotomy. Medical hypothesis, discovery and innovation in ophthalmology, 3(2), 45, 2014.
- [44] Gourzoulidis, G. A., Tsilikas, I., Serafetinides, A., Sianoudis, I., Stasinopoulou, P., Ahtipis, A., ... & Makropoulou, M. The Identification of Occupational Exposure to Laser Radiation in Greece. e-Journal of Science & Technology (e-JST). 2017.
- [45] Alavi, S. E., Soltanian, M. R. K., Amiri, I. S., Khalily, M., Supa'At, A. S. M., & Ahmad, H., Towards 5G: A photonic based millimeter wave signal generation for applying in 5G access fronthaul. Scientific reports. Cilt 6, 1, s. 1-11, 2016.
- [46] Commission, EU. Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Factsheets on Critical Raw Materials". 2020.
- [47] Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A., & Davenport, W., Rare earths in rechargeable batteries. Rare Earths. s. 167-180, 2015.

- [48] Kann, Dmitry. The biggest gadget: Toyota Prius PHV. [Çevrimiçi] 10 09 2017. <https://yktoo.com/en/blog/post/2017/09/10-the-biggest-gadget-toyota-prius-phv>.
- [49] Tanaka, T., Kuzuhara, M., Watada, M., & Oshitani, M. Effect of rare earth oxide additives on the performance of NiMH batteries. *Journal of alloys and compounds*, 408, 323-326, 2006.
- [50] Shinyama, K., Nakamura, H., Nohma, T., & Yonezu, I. Improvement of high-and low-temperature characteristics of nickel-metal hydride secondary batteries using rare-earth compounds. *Journal of alloys and compounds*, 408, 288-293, 2006.
- [51] Maroufi, S., Nekouei, R. K., Hossain, R., Assefi, M., & Sahajwalla, V. Recovery of rare earth (ie, La, Ce, Nd, and Pr) oxides from end-of-life Ni-MH battery via thermal isolation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(9), 11811-11818, 2018.
- [52] Wikipedia contributors. (2022, February 4). Electric vehicle battery. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 21:42, February 25, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric_vehicle_battery&oldid=1069947865
- [53] Lucas, J., Pierre Lucas, Thierry Le Mercier, Alain Rollat and William Davenport, Rare Earths in Rechargeable Batteries. [kitap yaz.] Pierre Lucas, Thierry Le Mercier, Alain Rollat and William Davenport Jacques Lucas. *Rare Earths*.s. 167-180, 2015.
- [54] Ding, Y., Zhang, P., Jiang, Y., & Gao, D. Effect of rare earth elements doping on structure and electrochemical properties of LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ for lithium-ion battery. *Solid State Ionics*, 178(13-14), 967-971, 2007.
- [55] Ram, P., Gören, A., Ferdov, S., Silva, M. M., Singhal, R., Costa, C. M., ... & Lanceros-Mendez, S. Improved performance of rare earth doped LiMn₂O₄ cathodes for lithium-ion battery applications. *New Journal of Chemistry*, 40(7), 6244-6252, 2016.
- [56] Machacek, E, Kalvig, P. EURARE European REE market survey. Roadmap for the REE material supply autonomy in Europe. 2016.
- [57] Du, X., & Graedel, T. E. Global rare earth in-use stocks in NdFeB permanent magnets. *Journal of Industrial Ecology*, 15(6), 836-843, 2011.
- [58] Roskill. Rare Earths: Outlook to 2029. Nineteenth Edition. Roskill Information Services Ltd, 2019.
- [59] Boldea, I., Tutelea, L., & Blaabjerg, F. High power wind generator designs with less or no PMs: An overview. In 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE. pp. 1-14, 2014.
- [60] Pyrhönen, J., Nerg, J., Puranen, J., & Haavisto, M. Permanent magnet technology in wind power generators. In The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010, IEEE, pp. 1-6, 2010.

- [61] Lucas, J., Pierre Lucas, Thierry Le Mercier, Alain Rollat, William Davenport. Chapter 14 - Rare Earth-Based Permanent Magnets Preparation and Uses. Rare Earths. Elsevier, 2015.
- [62] Goodenough, Kathryn & Wall, F. & Merriman, David. The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. Natural Resources Research. 2017.
- [63] Roskill. Rare earths: Global industry, markets and outlook. Sixteenth Edition. London, UK. 2016.
- [64] Binnemans, Koen & Jones, Peter & Müller, Torsten & Yurramendi, Lourdes. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? Journal of Sustainable Metallurgy. Cilt 4. 2018.
- [65] Roundy, S., & Takahashi, E. A planar electromagnetic energy harvesting transducer using a multi-pole magnetic plate. Sensors and Actuators A: Physical, 195, 98-104, 2013.
- [66] Kamat, S. V. Samarium-cobalt type rare earth permanent magnets. In Proceedings of the national conference on rare earth processing and utilization-2014: abstracts.
- [67] Liu, J. F., Vora, P., & Walmer, M. Overview of recent progress in Sm-Co based magnets. Journal of Iron and Steel Research, International, 13, 319-323, 2006.
- [68] Intelligence, Adamas. ELECTRIC GROWTH | EVs, Motors and Motor Materials. 2019.
- [69] Wikipedia contributors. (2021, October 13). Traveling-wave tube. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 23:21, February 19, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Traveling-wave_tube&oldid=1049662768.
- [70] Constantinides, S., & De Leon, J. Permanent magnet materials and current challenges. In Adv. Powder Metall. Part. Mater-2011, Proc. 2011 Int. Conf. Powder Metall. Part. Mater. PowderMet, pp. 858-875), 2011.
- [71] Giese, E. C. Rare earth elements: Therapeutic and diagnostic applications in modern medicine. Clin Med Rep, Cilt 2, 1-2, 2018.
- [72] Massari, S., & Ruberti, M. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. Resources Policy, 38(1), 36-43, 2013.
- [73] Khazzan, S., Mliki, N., Bessais, L., & Djega-Mariadassou, C. Rare-earth iron-based intermetallic compounds and their carbides: Structure and magnetic behaviors. Journal of magnetism and magnetic materials, 322(2), 224-229, 2010.
- [74] Li, L. W. Review of magnetic properties and magnetocaloric effect in the intermetallic compounds of rare earth with low boiling point metals. Chinese Physics B, 25(3), 037502, 2016.



- [75] Guo, Y. Q., Li, W., Luo, J., Feng, W. C., & Liang, J. K. Structure and magnetic characteristics of novel SmCo-based hard magnetic alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 303(2), e367-e370, 2006.
- [76] Antoniou, E., Sempros, G., Gjoka, M., Sarafidis, C., Polatoglou, H. M., & Kioseoglou, J. Structural and magnetic properties of SmCo₅-XNiX intermetallic compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 882, 160699, 2021.
- [77] US-GAO. United States Government Accountability Office. Washington DC, 2010.
- [78] Sharma, V., & Kuanr, B. K. Magnetic and crystallographic properties of rare-earth substituted yttrium-iron garnet. *Journal of Alloys and Compounds*, 748, 591-600, 2018.
- [79] Chen, G. Y., Liu, Y., Zhang, Z. G., Aghahadi, B., Somesfalean, G., Sun, Q., & Wang, F. P. Four-photon upconversion induced by infrared diode laser excitation in rare-earth-ion-doped Y₂O₃ nanocrystals. *Chemical Physics Letters*, 448(1-3), 127-131, 2007.
- [80] Dumazert, J., Coulon, R., Lecomte, Q., Bertrand, G. H. V., & Hamel, M. Gadolinium for neutron detection in current nuclear instrumentation research: A review. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 882, 53-68, 2018.
- [81] Pasto, A. E., & Tennery, V. J. Synthesis and fabrication of EuB/sub 6. *Trans. Am. Nucl. Soc.:(United States) Cilt 26*, 1977
- [82] Molycorp, Inc. *A Lanthanide Lanthology*, Mountain Pass, CA: Molycorp, Inc, 1993.