

Askeri Alanlardaki Kirliliklerin Gideriminde Biyoremediasyon Teknikleri

Gülin ÖZCAN¹, F. İlder TÜRKDOĞAN^{1*}

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

ÖZET: 100 yılı aşkın süredir askeri alanlarda patlayıcı olarak kullanılan TNT, RDX ve HMX gibi nitrat senteziyle oluşan patlayıcılar toprak, yeraltı suyu ve diğer çevresel ortamlara zarar vermektedir. Eskiden beri kullanılan askeri mühimmat atıklarının bertaraf yöntemleri olan, derin deniz deşarjı, özel depolama alanına gömme ve yakma (insinerasyon) uygulamaları yerine maliyet açısından daha uygun ve çevresel açıdan daha güvenilir sistemler olan biyoremediasyon yönteminin birçok yeni biyolojik metodu geliştirilmiştir. Patlayıcılar ile kontamine olmuş askeri alanların arıtımı için uygulanan bu metotlar, biyo reaktör, kompostlama ve fitoremediasyondur. Askeri alanlardaki kirliliklerin gideriminde biyoremediasyon tekniklerinin ve bu tekniklerin uygulanmasına ait çalışmalar literatür kaynaklarından yararlanılarak derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Patlayıcılarla Kontamine Toprak, Biyoremediasyon, Askeri Alanlar*

Bioremediation Techniques of The Removal of Impurities On Military Areas

ABSTRACT: Over the past 100 years, the explosive used in military areas, TNT, RDX and HMX synthesis of nitrate explosives, such as soil, groundwater and other environmental media is damaging. The ammunition waste disposal methods used since time immemorial, deep-sea discharge, custom built-in storage space and combustion (incineration) applications rather than the more appropriate and reliable systems in terms of cost and environmental, many new biological method of bioremediation methods have been developed. These methods for treatment of military sites contaminated with explosives, bioslurry, composting and phytoremediation. Bioremediation techniques and studies for the implementation of these techniques for the removal of impurities on military areas has been compiled using literature sources.

Keywords: *Explosives-Contaminated Soil, Bioremediation, Munition Sites*

1. GİRİŞ

Organik kimyanın gelişimden, 1830'lerden beri, kimyagerler nitratlarla oluşan birçok yeni bileşik sentezlemişlerdir. Yine o yıllarda, nitrat içeren bileşiklerin bazılarının patlayıcı özellikleri keşfedilmiş ve endüstriyel ve askeri amaçlarla kullanılmaları için yollar geliştirilmiştir. 19. yüzyılların sonlarında, 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) gibi nitroaromatik patlayıcılar oluşturulmuştur. Birçok askeri endüstri alanında bu patlayıcıların ve mühimmatların üretimi, toprak ve sediment kontaminasyonuna sebep olmuştur. Amerika'da, sadece askeri birimler, yaklaşık 1,2 milyon ton toprağı patlayıcılar ile kirletmiştir (Lewis ve ark., 2004). EPA'ya göre, savaş malzemeleri içinde TNT, en sık karşılaşılan patlayıcıdır. Ayrıca askeri alanlardaki toprakların çoğu 2,4,6-trinitrotoluene (TNT), octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX), ve hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) gibi patlayıcılarla kontamine olmuştur (Clark ve Boopathy, 2007).

Eskiden beri askeri mühimmat atıklarının bertarafı için derin deniz deşarjı, özel depolama alanına gömme ve insinerasyon metotları kullanılmıştır. Fakat

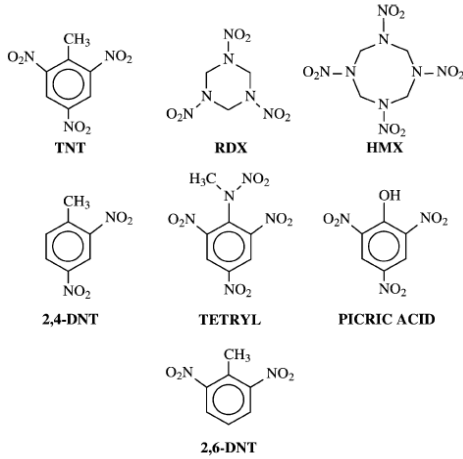
bu metotların çevreye olumsuz etkileri vardır. Kontaminantların gömülmesi yer altı suyuna ve toprak içeriğine zarar verirken, yakma ise hava (külden dolayı) ve yine toprak içeriğine zarar verir. Son zamanlarda, insinerasyon, en verimli ve yaygın remediasyon alternatifidir. Ancak bu metod, insinerasyonun enerji, taşıma ve toprak kazısını içeren maliyetlerinden dolayı pahalıdır.

Geçmiş yıllarda, patlayıcılarla kontamine olmuş topraklar için biyoremediasyonun birçok yeni biyolojik metodu geliştirilmiştir. Bu metotlar, biyo reaktör (bioslurry), kompostlama (composting) ve fitoremediasyondur (phytoremediation). Diğer metotlara göre biyoremediasyon uygulamaları, maliyet açısından daha uygun ve çevresel açıdan daha güvenilir sistemlerdir (Lewis ve ark., 2004).

*Sorumlu Yazar: İlder TÜRKDOĞAN, ilter@yildiz.edu.tr

2. PATLAYICILARIN TÜRLERİ, ÖZELİKLERİ, ÇEVRESEL GİRİŞİM VE AKİBETLERİ

Askeri mühimmat olarak kullanılan patlayıcıların yapısal formülleri, kısaltma isimleriyle Şekil 1. de gösterilmiştir.



Şekil 1. Patlayıcılarla kontamine olmuş toprak içinde bulunan bileşikler (Lewis ve ark., 2004).

2.1. TNT

TNT, tarihsel olarak kullanılan en popüler kuvvetli askeri patlayıcıdır. Sülfürik asidin katalitik etkisinde, toluen ile nitrik asidin reaksiyonundan elde edilir. TNT, diğerlerine göre basit ve ekonomik üretim, kimyasal ve termal stabilite, bomba olarak eritilmeye ve kalıplar halinde döküme uygunluğunda kullanılması yaygın olan bir patlayıcıdır.

TNT atıksuyu, toksik, patlayıcı ve oldukça renkli olan nitro bileşikler içerir. TNT üretimi süresince çeşitli karakterlerde atıksular oluşmaktadır. TNT üretiminden kaynaklanan atık akıntısı, 'red water' (kırmızı su) ya da 'pink water' (pembe su) olarak isimlendirilir. Bunun nedeni, TNT'nin safsızlık olarak küçük miktarlarda dinitrotoluene içermesi ve böylece nötr pH altında işığa maruz kaldıktan sonra pembeye dönmesidir. TNT'çeren pink water, hidrolik madencilik olarak adlandırılan, askeri aletlerden patlayıcıların giderilmesi ve temizlenmesi sırasında ortaya çıkar.

TNT'nin çevresel akıbeti çalışmaları, çeşitli kırılım ürünlerinin meydana gelmesine yol açan fotolitik ve oksidasyon-redüksiyon reaksiyonlarıyla tanımlanır. TNT'nin fizikokimyasal özellikleri, topraktan yer altı suyuna faal bileşiklerin taşınımına neden olur. Suda düşük çözünürlük ve suyu absorblamama özellikleri, nemli ortamlarda kullanımı kolaylaştırır. Kore ve Vietnam çatışmaları sırasında, askeri alanlardan

toplam atık deşarjının 26,410 kg TNT olduğu tahmin edilmektedir (Spalding ve Fulton, 1988). Yapılan çalışmalardan, TNT'nin yeraltı suyunda veya toprakta taşınabilirliğinin, humik asit, akifer sedimentleri ve toprakla birlikte belirlenen sorbsiyon ve desorbsiyon izotermelerinden kaynaklandığı sonucu çıkarılmıştır (Comfort ve ark., 1995).

2.2. Diğer Nitroaromatik Patlayıcılar

Pikrik asit, sülfürik asit ve nitrik asit kullanılarak fenolün nitrasyonu tarafından ya da hidrolizi takip eden klorobenzenin nitrasyonu tarafından sentezlenir. Pikrik asitin kararsız metal tuzlar oluşturma eğilimi ve yüksek erime sıcaklıkları, diğer patlayıcılardan daha az tercih edilmesine neden olmuştur.

Tetrit ise N,N-dimethylanilin nitrasyonu tarafından sentezlenir. Tetrit, kuvvetlendirici bir patlayıcı olmasından dolayı, Amerika'da üretilmektedir ve büyük bir ölçüde RDX'in yerini almıştır (Lewis ve ark., 2004).

2.3. Nitraminler

Savaş malzemelerinde kullanılan nitramin patlayıcıları Royal Tahrir Patlayıcıları (RDX, hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine) ve Yüksek Erime Patlayıcılarıdır (HMX, octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine) (Lewis ve ark., 2004).

İkinci dünya savaşı boyunca önemli bir patlayıcı olarak kullanılan RDX, günümüzde TNT gibi diğer patlayıcılarla karışım olarak kullanılmaktadır. Kore Savaşı süresince spesifik bir mühimmat tesisinin 7,300 kg RDX'i tükettiği ve başka bir tesisin ise günde 450 kg RDX'i, tesisinin yakınındaki bir nehre deşarj ettiği belirtilmektedir (Maleki ve Stenstrom, 1996; Hesselmann ve Stenstrom, 1994).

RDX'in çevreye yayılması, sadece üretim tesislerinden değil, aynı zamanda RDX'in deşarj edildiği yüzeysel sularda ve demilitarizasyon alanlarına yakın yer altı sularında da olabilmektedir (Yinon, 1990). Savaş gereçleri üreten bir tesisinin atık kalıntılarının 6,5 km² boyunca yer altı suyu akiferini kirlettiğini ve bu çalışmadan yola çıkarak RDX'in TNT'ye göre daha kalıcı olduğunu rapor etmişlerdir.

RDX ile yapılan sorbsiyon çalışmalarına göre ise, RDX, toprak yüzeyi için daha az afiniteye sahiptir ve kesikli reaktör çalışmalarında ve toprak kolonunda meydana gelen lineer izotermelerle birlikte TNT'den daha taşınabilir bir kontaminanttır.

Yüksek yoğunluğundan dolayı enerji ve hacmin önemli olduğu uygulamalarda ise RDX yerine HMX kullanılmaktadır. HMX, kimyasal özellikler yönünden

RDX'e benzemektedir. Bundan dolayı, çevresel anlamda gösterdiği özellikler de RDX'e paralellik göstermektedir.

Çevresel ortama girme yolları, TNT ve RDX'inkine benzemektedir. Pal ve Ryon (1986) tarafından yapılan çalışmada, Holston Askeri Mühimmat Tesisi'nin (HAAP) üretim sahası ve bertaraf alanında, patlayıcılardan oluşan yakma külleri ve arıtma çamurunun düzenli depolanmasından kaynaklanan RDX ve HMX kontaminasyonuna rastlanmıştır.

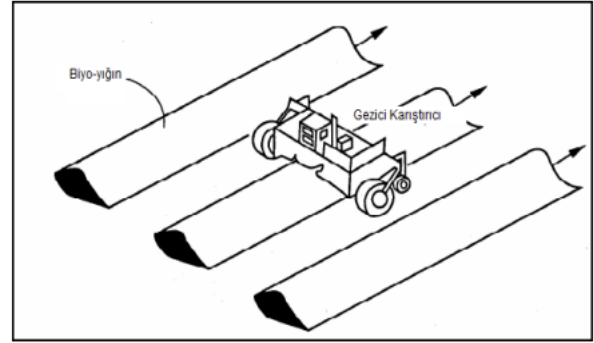
RDX ve HMX genellikle kontamine olmuş alanlarda, suda düşük çözünürlüğe bağlı olarak TNT'den daha düşük konsantrasyonlarla bulunurlar. RDX ve HMX, TNT'nin patlayıcı gücünden yaklaşık 1.5 kat daha yüksek patlayıcılık özelliğinde ve TNT'ye göre daha düşük toksik özelliktedir.

3. ASKERİ ALANLARIN (PATLAYICILARLA KİRLENMİŞ) BİYOREMEDİASYONU İÇİN ARITIM TEKNİKLERİ

3.1. Kompostlama

Kompostlama, askeri alanlarda iyileştirme için kullanılan, test edilmiş ve uygulanmış ilk biyolojik arıtma işlemidir (Craig ve ark., 1995). Durgun yığın (static piles) ve gübrelerin sıra sıra yığılması (windrow composting), patlayıcıların iyileştirmesinde kullanılan en sıradan yöntemlerdir. Herhangi bir kompostlama sisteminde, gübre ve bitkisel atıklar gibi organik materyallerin biyobozunabilir kısmı, optimal havalandırmayı sağlamak için kontamine olmuş toprakla karıştırılır. Bu organik madde ilavesi, kontamine olmuş topraktaki patlayıcı konsantrasyonunu seyreltir ve mikrobiyal aktiviteyi teşvik etmeyi amaçlar. Mikrobiyal aktivitenin artması, mikrobiyal solunumun etkisiyle adsorbe olmuş kirleticilerin parçalanmasını sağlar. Yığınlar, nem içeriği, oksijen seviyesi ve sıcaklık gözlemlenirken havalandırmayı sağlamak için periyodik olarak döndürülür. Organik maddenin aerobik ve anaerobik olarak bozunması ısı ile sağlanır. Windrow kompostlamada, basit bir kaplama ya da asfalt örtüsü ihtiyacı vardır ve havalandırma donanımına ihtiyaç yoktur. Bu sebeple, işletme maliyetinin düşük ve arıtma veriminin yüksek olduğu bir prosestir (Funk ve ark., 1996).

Maliyete etki eden faktörler arasında ayrıca, arıtma tesisinin yapısı, organik ilaveler, yığının döndürülmesi amacıyla kullanılacak ekipmanlar, nakliye ve toprağın kazılması yer alır. Maliyetler, windrow kompostlama için ton başına 364TL-1355TL (\$206-\$766) ve 1200-30000 ton ölçektedir ve insinerasyona göre %40-50 oranında tasarruf sağlar (Lewis ve ark., 2004).



Şekil 2. Ex -situ kompostlama: windrow sistemi (USEPA, 1993)

Oregon Umatilla Askeri Deposu'ndaki bir Superfund alanında kompostlama yöntemi ile kirlilik giderimi çalışması yapılmıştır. TNT, RDX ve HMX gibi patlayıcıları giderim çalışmalarına başlandığı zaman Umatilla'nın, 15 yıllık bir periyodu aşkın süredir kontamine olduğu görülmüştür. Kontamine haldeki bu alanda, 1858,06 m² lagün içinde 303 litreden fazla pembe su (pink water) oluşumu gözlenmiştir. Pembe sudan oluşan su birikintisi, TNT seviyeleri 4800 ppm olan çok büyük bir toprak kontaminasyonu yaratmıştır. Patates atığı ve gübre, windrow kompostlama kullanılarak kontamine olmuş toprakla karıştırılarak giderim hedeflenmiştir. Arıttımdan 40 gün sonra TNT konsantrasyonu 1600 ppm'den 4 ppm'e düşerek % 99.7, RDX konsantrasyonu 1000 ppm'den 7 ppm'e düşerek % 99.3, HMX konsantrasyonu 200 ppm'den 47 ppm'e düşerek % 76.5 giderim sağlanmıştır. Tam ölçekli windrow kompostlamanın uygulandığı bu alanda, 20,000 ton toprağın arıtılmış olup, proje süresinin 5 yıl olduğu, havalandırmasız kompostlama yapıldığı ve hergün karıştırıldığı ve % 30 toprak yüklemesi yapıldığı, 30 günlük arıtma periyodunun olduğu ve RCRA Atık Yığın standardının uygulandığı gözlenmiştir. Tam ölçekli bu uygulama için yatırım maliyetinin 3,171,090 TL (\$2,118,000) ve yıllık işletme maliyetinin 924,885 TL (\$527,000) olduğu tahmin edilmektedir (Weston, 1993).

Rezaei ve ark. (2010) tarafından TNT ile kontamine olmuş toprakta yapılan bir çalışmada, kentsel katı atığın (MSW) organik fraksiyonuna uygun kompost materyali seçilerek, yeterli karbon ve nitrojen dengesi ile kompostun gerçekleşebilmesi için gerekli biyolojik aktivite ve ulaşılabilecek en yüksek TNT giderimi belirlenmeye çalışılmıştır. 7 faktör belirlenmiştir. Bu faktörler sırası ile TNT ile kontamine olmuş toprak (%w/w), iz element çözeltisi (%v/w), tavuk gübresi (%w/w), TNT konsantrasyonu (mg/Kg), TNT ile kontamine olmuş alandan seçilmiş ve izole olmuş mikroorganizmaların mikrobiyal süspansiyonu (%v/w), inek gübresi (%w/w) ve kompostlama şartları (aerobik ve anaerobik)'dir .TNT gideriminin maksimum olduğu optimum şartlar, aerobik koşullar, %35 (w/w) oranında TNT ile kontamine olmuş toprak, %5 (w/w) inek gübresi, %5 (v/w) mikrobiyal süspansiyon ve 50000 (mg/Kg) TNT konsantrasyonu olarak bulunmuştur.

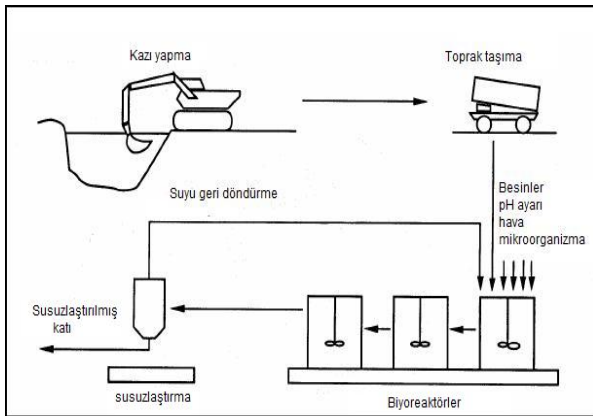
Optimum şartlarda, TNT giderimi 15 günlük inkübasyon süresinde %99.99'dur. Araştırmacılar İran'da kentsel katı atığın organik içeriğinin hayli yüksek olması (%70) kontamine olmuş toprakların arıtımı için gerekli kompost üretimi ihtiyacını karşılamakta olduğunu belirtmişlerdir.

3.2. Biyoreaktör

Biyoreaktörler, özel bir tank kullanılarak, mikroorganizma, nutrient ve toprak ilavesi ile TNT gibi patlayıcıların ve diğer kirleticilerin parçalanması işlemidir. Kontamine olmuş toprak yerinden kazılarak özel vasıtalarla alınır ve özel tanklarda su ile karıştırılır. Oksijen ve besinler daha sonra eklenir. Kirleticilerin parçalanmasında mikroorganizmaların biyoaktivitelerini devam ettirmek ve optimum koşulları sağlamak için sıcaklık, pH, besin ve oksijen konsantrasyonları kontrol edilir. Atık su arıtımında kullanılan aktif çamur yöntemiyle benzer işletme şartları göstermektedir, fakat biyoreaktörler TNT'yi bozundurabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Belli bir bozunma oranına erişmek için, iyi bir çalkalama, havalandırma ya da toprak önarıtımına ihtiyaç vardır (Haselhorst, 1999).

Biyoreaktör için başlıca maliyetler, karıştırma ekipmanları, lagünün inşası, toprak için izgara sistemi ve kazıdır. Potansiyel problem olarak, düşük ortam sıcaklığı ve mikroorganizmaların TNT'yi yavaş bir şekilde parçalanması görülebilir.

Arıtma için maliyetler ise, 3823 m³ toprak için m³ başına 260 TL'dir (353TL-1061TL ton başına) (\$147'dır (\$200-\$600 ton başına). Hem TNT için hem de RDX ve HMX için bütün biyoreaktör arıtım prosesleri, 35-150 gün arası değişen zaman diliminde arıtma hedeflerine ulaşırlar (Lewis ve ark., 2004).



Şekil 3. Biyoreaktör yöntemi ile biyoremediasyon (EPA, 1995)

Amerika Joliet Askeri Mühimmat Tesisi'ndeki, patlayıcılarla kontamine olmuş bir alanda yapılan bir biyoremediasyon çalışmasında, aerobik ve anaerobik olarak değişken döngülü bir biyoreaktör kullanılmış ve %99'dan fazla TNT giderimi sağlanmıştır. Bu iki fazla

aerobik/anaerobik arıtımla, CO₂, basit organik asitler ve karbon parçalarının içindeki TNT'yi hemen hemen bozundurmuştur (Haselhorst, 1999).

Clark ve ark. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, Almanya'da bulunan Louisiana Askeri Mühimmat Tesisi'ndeki patlayıcılarla kontamine olmuş toprağın giderimi için biyoreaktör ve arazi düzenlemesi tekniği kullanılmıştır. Toprak, 10,000 mg/kg TNT, 1900 mg/kg RDX ve 900 mg/kg HMX içermektedir. Sonuçlar, melasla birlikte eş metabolik koşullar altında, biyoreaktörün TNT giderim veriminin, arazi düzenlemesi tekniğinden daha fazla olduğu görülmüştür. 182 günün sonunda, TNT giderim verimleri karşılaştırıldığında, biyoreaktör ile %99, arazi düzenlemesi tekniği ile %82 giderim sağlanmıştır. HMX ve RDX iki yöntemle de giderilmiş fakat giderim verimlerinin düşük olduğu gözlenmiştir.

3.3. Fitoremediasyon

Çeşitli bitki türlerinin kullanıldığı fitoremediasyon tekniği ile, patlayıcıların parçalanabilmesine ait çalışmalar yapılmaktadır. Bitkiler, kirleticileri zeminden giderirken, kökleri vasıtasıyla su ve nütrientleri, kirlenmiş topraktan, akarsulardan ve yer altı sularından temin ederler. Bitkiler kirleticileri bünyelerine aldıktan ya da adsorbladıktan sonra biçilerek bertaraf edilebilir ya da geri dönüştürülebilir. Kirliliğin bitki tarafından gideriminde bitkinin türü ve organik kirleticinin fiziksel ve kimyasal özellikleri oldukça önemli parametrelerdir

Fitoremediasyon boyunca, bitkiler, hücre duvarları ve kofulları yardımıyla TNT'yi bünyesine alarak parçalar ve stabilize ederler. TNT'nin bloke olmasıyla, yer altı sularına TNT sızıntısı olma ihtimali azalır. Fitoremediasyon, düşük ya da orta seviyedeki kontaminasyonu temizleme bakımından iyi bir yöntemdir (Haselhort, 1999). TNT, RDX ve HMX ile kontamine olmuş alanlardaki iyileştirme verimliliği, her bir patlayıcı türü için farklıdır ve birçok faktöre göre değişiklik gösterir (Panz ve Miksch, 2012). Fitoremediasyonun avantajlarından biri, TNT'nin daha hızlı bozunması ve hidroksitoluenlerin bitki maddesine kolayca bağlanabilmesidir. Bu durum, bitkileri, yüksek seviyelerdeki TNT konsantrasyonu için toleransı kılar ve böylece bitkilerin biyoremediasyon ajanı olma potansiyelleri artar (Lewis ve ark., 2004). İkinci avantaj ise, düşük maliyet, özel ekipman gereksinimi ve ortama yeni kimyasal girişimi olmamasıdır (Panz ve Miksch, 2012).

Mueller ve ark. (1995), toksik olmayan bozundurma ürünleri içinde *Datura innoxia* (şeytanelması) ve *Lycopersicon peruvianum* (yabani bir domates cinsi) özellikleriyle TNT'nin alınımı ve biyodönüşümü üzerine bir çalışma yapmışlardır. Her iki bitki türünün de TNT'yi düşük miktarlarda gidermeye

uygun olduğu görülmüştür (< 1000 ppm). Sera koşullarındaki, deney toprağının TNT miktarı, iki haftada %10'dan daha düşük seviyelerde azalma göstermiştir.

Yapılan diğer bir çalışmada, değişik bitki türleri için TNT'nin toksisite eşiği erişimi üzerinde çalışılmıştır. Düşük seviyelerdeki TNT, *Lepidium sativum* (tere) ve *Brassica rapa* (turp) için 5-25 mg/kg ve *Acena sativa* (yulaf) ve *Triticum aestivum* (buğday) için 25-50 mg/kg fide büyümesini uyarmıştır. *Acena sativa* bitkisinin tolere etme kapasitesinin 1600 mg TNT/kg ve toprağı detoksifiye etme kabiliyeti olduğu ve bu bitkinin biyoremediasyon ajanı olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır (Gong ve ark., 1999).

Rockne ve Reddy (2003), Hawaii Makua Askeri Alanı'ndan alınan kontamine olmuş toprağın (RDX ve HMX) arıtılması için Gine çimeniyle biyoremediasyon ve fitoremediasyon üzerinde, melasın potansiyel etkisinin artırılması için 15 haftalık bir arıtma çalışması gerçekleştirmişlerdir. RDX bozunmasının melas varlığında daha hızlı ve bakteri yoğunluğunun çok daha fazla olduğu görülmüştür. Deney süresi boyunca, HMX'in ise ne biyoremediasyonla ne de fitoremediasyonla konsantrasyonunun azalmadığı belirlenmiştir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Askeri alanlardaki patlayıcılar ile kontamine olmuş toprakların arıtımı için 3 farklı arıtım tekniği geliştirilmiştir (Rockne ve Reddy, 2003). Biyoreaktördeki biyodegradasyon oranları kompostlama ve fitoremediasyonla karşılaştırıldığında daha hızlıdır (Rezaei ve ark., 2010). Biyoreaktörün hızlı bir yöntem olması sayesinde kontaminantların yer altı suyuna sızma ihtimalleri de azalır. Bu özelliklerine rağmen biyoreaktör tekniği yüksek işletme maliyeti gerektirir. Büyük ölçekli kompostlama ise, yatırım ve işletme maliyetlerinin her ikisinde de tasarruf sağlar. Kompostlamanın, patlayıcıların bozunmasında efektif bir metod olmasına rağmen büyük ölçekli uygulanması üzerine endişeler vardır. Geleneksel kompostlama metodları, küçük miktardaki toprağı arıtmak için bile saman, yonga ve hayvan gübresi gibi büyük miktarlardaki doğal organik substratları gerektirir. Fitoremediasyon tekniğinin yaygın kullanım alanı olmamasına rağmen, kontaminasyon seviyelerinin düşük olduğu yerlerde ve kompostlama veya biyoreaktör gibi diğer remediasyon teknikleri uygulandıktan sonra, bir temizleme metodu olarak kullanılması uygundur (Haselhorst, 1999).

Sonuç olarak, her metod uygulanacağı alana özeldir ve her alan için büyük ölçekli remediasyon yapılmadan önce bu metotlar geliştirilmeli ve optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

- [1]. Clark, B., Boopathy, R. 2007. Evaluation of bioremediation methods for the treatment of soil contaminated with explosives in Louisiana Army Ammunition Plant, Minden, Louisiana. *Journal of Hazardous Materials*, 143, 643–648.
- [2]. Comfort, S.D., Shea, P.J., Hundal, L.S., Li, Z., Woodbury, B.L., Martin, J.L., Powers, W.L. 1995. TNT transport and fate in contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 24 (6): 1174–1182.
- [3]. Craig H.D., Sisk W.E., Nelson M.D., Dana W.H. 1995. Bioremediation of explosives-contaminated soils: A status review. Great Plains and Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center, Kansas State University, Manhattan, KS, 164-179.
- [4]. EPA 1995. Contaminants and Remedial Options at Select Metals-Contaminated Sites. EPA/540/R-95/512.
- [5]. Funk, S. B., Crawford D. L., Crawford R. L. 1996. Bioremediation of nitroaromatic compounds. Don L. Crawford and Ronald L. Crawford (ed.) *Bioremediation Principles and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 195-205.
- [6]. Gong, P., Mwilke B.M., Fleischmann S., 1999. Soil-Based Phytotoxicity of 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) to Terrestrial Higher Plants. *Archive of Environmental Contamination and Toxicology* 36: 152–157.
- [7]. Haselhorst L. 1999. Bioremediation of 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT) at munitions sites Restoration And Reclamation Review, Vol.4, No.7.
- [8]. Hesselmann, R.M.X., Stenstrom, M.K. 1994. Treatment Concept For RDX-Containing Wastewaters Using Activated Carbon With Offline Solvent Biological Regeneration. School of Engineering and Applied Science Report Eng. 94-23, Civil and Environmental Engineering Department University of California, Los Angeles.
- [9]. Lewis, T.A., Newcombe, D.A., Crawford, R.L. 2004. Bioremediation Of Soils Contaminated With Explosives. *J. Environ. Manage.* 70: 291–307.
- [10]. Maleki, N., Stenstrom, M. K. 1996. Treatment and Biodegradation of the High Explosives HMX, RDX, and TNT: A Literature Review, Civil & Environmental Engineering Dept., UCLA ENG 96-153, Los Angeles.
- [11]. Mueller, W.F., Bedell, G.W., Shojaee, S., Jackson, P.J. 1995. Bioremediation of TNT Wastes by Higher Plants. *Proceedings of the 10th Annual*

- Conference of Hazardous Waste Research. Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center (pub).
- [12]. Pal, B. C. and Ryon, M. 1986. Data Base Assessment of Pollution Control in the Military Explosives and Propellants Production Industry, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, T.N. Contract No. Po833, pp. 3802.
- [13]. Panz K., Miksch K. 2012. Phytoremediation of explosives (TNT, RDX, HMX) by wild-type and transgenic plants. *Journal of Environmental Management*, 113: 85-92.
- [14]. Spalding, R. F., and Fulton, J. W. 1988. Groundwater Munition Residues And Nitrate Near Grand Island, Nebraska, U.S.A. *Journal of Contaminant Hydrology* 2(2), 139-53.
- [15]. Rezaei M.R., Abdoli M.A.,Karbassi A., Baghvand A., Khalilzadeh R. 2010. Bioremediation of TNT Contaminated Soil by Composting with Municipal Solid Wastes Soil and Sediment Contamination, 19:504–514.
- [16]. Rockne, K. J., Reddy, K.R. 2003. Bioremediation Of Contaminated Sites, University of Illinois at Chicago Department of Civil and Materials Engineering, Chicago, Illinois 60607, USA
- [17]. USEPA 1993. Bioremediation Using the Land Treatment Concept: Environmental Regulation and Technology, EPA/600-R93/164.
- [18]. Weston, R.F. 1993. Inc. Windrow composting demonstration for explosives-contaminated soils at the Umatilla Depot Activity. Hermiston. CETHA-TS-CR-93043.
- [19]. Yinon, J. 1990. Toxicity and Metabolism of Explosives, CRC Press Inc., Boca Raton, FL.