



MAKÜ FEBED
ISSN Online: 1309-2243
<http://dergipark.ulakbim.gov.tr/makufebed>

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 6(1): 11-17 (2015)
The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University 6(1): 11-17 (2015)

Derleme Makale / Review Paper

Demiryolu Üstyapısında Balast Kirliliği

Altan YILMAZ

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Burdur

Geliş Tarihi (Received): 10.12.2015, Kabul Tarihi (Accepted): 24.12.2015

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author): altanyilmaz@mehmetakif.edu.tr

☎ +90 248 2132740 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Türkiye'deki şehirlerarası demiryolu hatlarının hemen hemen tamamı balastlı üstyapı niteliğindedir. Granit, bazalt, kireçtaşı, yüksek fırın cürufu, kırılmış kaya ya da granüle çakıl balast olarak kullanılmaktadır. Zamanla balast agregalarının arasına ince taneli agregaların, metal tozlarının ve kömür tozlarının girerek balastın boşluklu yapısını bozmasına "*Balast kirliliği*" denilmektedir. Balast agregasındaki bu kirlilik kritik bir eşiğe ulaştığı zaman balastın yapısal bütünlüğü bozulmakta ve drenaj yeteneği ve esnekliği kaybolmaktadır. Bu durum demiryolu üstyapısının stabilitesini bozmakta ve hatta demiryolu araçlarında deraymana (raydan çıkmaya) sebep olmaktadır. Son 5 yıl içinde Türkiye'de gerçekleştirilen demiryolu yük taşımacılığına baktığımızda, toplam 25,422 milyon-ton yükün yaklaşık %35'i balast kirliliğine sebep olan yüklerden (kömür, linyit ve kok gibi katı mineral yakıtlar, demir cevheri ve metal atıkları) oluşmaktadır. Dolayısıyla emniyetli, ekonomik ve sürdürülebilir bir demiryolu taşımacılığı için büyük öneme sahip olan balast kirliliği konusu bu çalışmada etraflıca incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balast kirliliği, demiryolu üstyapısı, granüler malzemeler, kömür tozu

Railroad Track Ballast Fouling

ABSTRACT

Almost the entire inter-state railroad in Turkey made of ballasted track. Granit, basalt, lime-stone, furnace slag, crushed stone or granular aggregate is used as ballast. As ballast ages, it is progressively fouled with fine-grained materials filling the void spaces. Some of these fine grained materials are; coal dust, metal dust and fine parts of crushed aggregate. If ballast fault reaches a critical level, the track's stability and flexibility and drainage ability of ballast fails. Even, ballast fault can cause the derailment of trains. In Turkey, approximately 35% of all rail freight comes from coal, lignite, coke, iron ore and metal waste in last five years. In other word, approximately 35% of all rail freight occurred in Turkey has potential to make ballast fault. So, as railroads become widespread day by day in Turkey, such an investigation deals with ballast fault is very important in the meaning of safe, economical and sustainable rail freight.

Keywords: Ballast fouling, railroad track, granular materials, coal dust

GİRİŞ

Demiryolu üstyapısında traverslerin üzerinde oturduğu kırmataş tabakasına “balast” denilmektedir. Granit, bazalt, kireçtaşı, yüksek fırın cürufu, kırılmış kaya ya da granüle çakıl balast olarak kullanılmaktadır. Zamanla balast agregalarının arasına ince taneli agregaların, metal tozlarının ve kömür tozlarının girerek balastın boşluklu yapısını değiştirmesi, balastın yapısal bütünlüğünü bozulmakta ve drenaj yeteneğini ve esnekliğini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu durum demiryolu üstyapısının stabilitesini bozmakta ve hatta demiryolu araçlarında deraymana, demiryolu araçlarının raydan çıkması olayına, sebep olmaktadır. Dolayısıyla balast kirliliğinin tespit edilmesi ve alınabilecek önlemlerin araştırılması demiryolu operasyonlarının etkinliği açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada balast tabakası malzeme özellikleri ve balast kusurları hakkında genel bilgiler verildikten sonra balast kusurlarının oluşum mekanizması, kirlilik seviyeleri ve üstyapıya etkileri literatür bilgileri ışığında kapsamlı olarak ele alınmıştır.

Demiryolu balastları üzerinde yurtdışında yapılan bilimsel çalışmalar; genellikle balast tabakasının yanallı stabilitesinin ve sıkışma miktarının sahada incelenmesi, GPR (Ground Penetrating Radar) ile yapılan saha çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır (Hay ve ark., 1977; Li and Davis, 2005; Roberts ve ark., 2006; Tutumluer ve ark., 2008). Geosentetik kullanımı ile balast tabakasının iyileştirilmesi üzerine araştırmalar halen devam etmektedir (Hussaini ve ark., 2012; Tutumluer ve ark., 2012). Balast kusurları üzerine yapılan en kapsamlı çalışmalardan birisi USA’de Tutumluer ve ark. (2008) tarafından yapılmıştır. Çalışmada kömür taşımacılığının yoğun olarak yapıldığı bir demiryolu hattından örnekler alınarak balast içerisindeki kömür tozlarının fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve direkt kesme deneyi ile kusurlu ve temiz (orijinal) balastın maksimum kesme dayanımları ve kayma açısı karşılaştırılmıştır. Çalışmada kömür tozlarının kesme dayanımını belirli oranda düşürdüğü tespit edilmiştir.

Dombrow ve ark. (2009) granit ve kireçtaşı kökenli balast agregaları üzerinde bir çalışma yapmış ve balast içindeki ince madde oranı ile birlikte su muhtevasının artmasının balast tabakasının kesme dayanımını önemli ölçüde olumsuz etkilediğini tespit etmiştir.

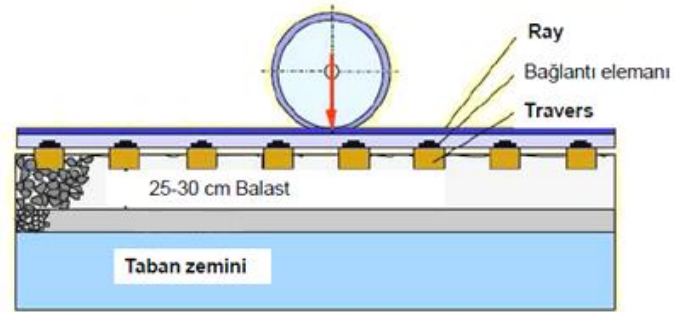
McDowell ve ark. (2005) demiryolu üst yapısında trafik yüklerinin ve buraj işlemlerinin balast tabakası üzerindeki etkilerini simule edebilmek amacıyla box test (kutu testi) denilen bir test yöntemi kullanarak laboratuvar deneyleri uygulamıştır. Bu deneylerde milyon defa tekrarlı dinamik yükler uygulayarak numunelerde deformasyon ve oturmalar incelenmiştir. Elde edilen sonuçların sahadaki sonuçlara çok yakın olduğunu tespit etmiştir.

Böylelikle söz konusu laboratuvar deneyleriyle balast tabakasının ekonomik ömrünü ne zaman tamamlayacağı hususunda ön bilgi elde edilebileceğini belirtmiştir.

Türkiye’deki duruma bakıldığında, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve TÜBİTAK proje arşivinde yapılan taramalarda balast kirliliği üzerine herhangi bir bilimsel çalışmaya rastlanmamıştır.

DEMİRYOLU ÜSTYAPISI VE YÜK TAŞIMA ÖZELLİĞİ

Demiryollarında üstyapı tren yükünün tabana doğru yayılmasını sağlar. Günümüzde kullanımda olan geleneksel üstyapılar tabakalı (ayrık) sisteme sahiptir. Bu sistemde; raylar, traversler ve balast tabakası mevcuttur. Şekil 1’de tipik bir demiryolu üstyapısı görülmektedir.



Şekil 1. Tipik bir demiryolu üstyapısı-boykesit (Esveld, 2001)

Demiryolu üstyapısı tabana doğru gerilmeyi azaltma prensibine dayanmaktadır. Tabakalı bir demiryolu üstyapısında yükler üst tabakalardan alt tabakalara doğru dağıtılarak yayılır. En büyük gerilme tekerlek ile ray arasında oluşur, büyüklüğü 30 KN/cm^2 hatta bazı durumlarda daha fazladır. Travers ve balast’a doğru inildikçe gerilmeler de azalır. Balast tabakasında 30 N/cm^2 , tabana ulaşınca yaklaşık 5 N/cm^2 ye kadar düşer (Esveld, 2001).

BALAST TABAKASI

Demiryolu mühendisliğinde traverslerin üzerinde oturduğu kırmataş tabakasına balast denilmektedir (Arlı, 2002). Teknik şartnamede, TS 7043 EN 13450: Demiryolu Balastları İçin Agregalar, balast şöyle tanımlanmıştır; Tane yüzeylerinin %100 ‘ünün tamamen kırılmış olduğu, demiryolu hatlarının inşasında kullanılan agrega; doğal, yapay veya geri kazanılmış tipte olabilir. Mekanik işlemler dışında herhangi bir işlem uygulanmayan mineral kaynaklardan elde edilen doğal demiryolu balastı, ısıl veya diğer değişik işlemleri içeren endüstriyel işlem sonucunda elde edilen mineral kökenli yapay

demiryolu balastı, önceden kullanılmış olan demiryolu balastlarının işlemlerden geçirildikten sonra kullanılanı na da geri kazanılmış demiryolu balastı denir.

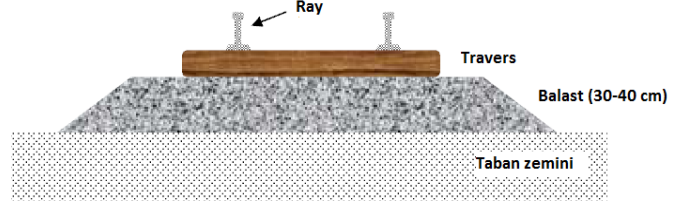
Düzgün bir yük dağılımı ve hat stabilitesini elde etmek için uygun granülometride balast ve balastın da iyi bir şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. Balastlı üstyapılarda, esnek bir mesnet mevcuttur, maliyeti daha düşüktür, yeterli yanıl destek sağlar, bakımı kolaydır, hızlı tren projelerinde dahi kullanılmaktadır.

Balastın Başlıca Görevleri;

- Platforma gelecek yüklerin uniform şekilde tabana doğru geniş bir alana dağılmasını sağlamak,
- Tren titreşiminin büyük bir kısmını absorbe etmek,
- Yağmur suyu drenajını sağlamak,
- Hattın kaymasını engellemek, boyuna yönde ve yanıl yönde stabilize sağlamak,
- Hat geometrisini ve hat hatalarının düzeltilmesini sağlamaktır.

İyi bir yük dağılımı ve hat stabilitesini elde etmek için uygun granülometride balast ve balastın da iyi bir şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. Ancak bu durum suyun drenajını zorlaştırmaktadır. Bu iki durumu dengelemek için optimum çözüm bulunmalıdır.

Klasik demiryolu üstyapısının göstergesi, yol çerçevesinin balast yatağı içinde "yüzer" şekilde yerleştirilmesidir. Balastlı üst yapının bu özelliği, yol çerçevesinin çok hızlı ve kolay şekilde döşenebilmesini, hat geometrisinin, hızların ve ağırlıkların artırılması hallerinde, son derece basit şekilde değiştirilebilmesini sağlar. "Yüzer" şeklindeki esnek hareket sonucu; balast tabakasına kuvvet uygulandığında, yolun kuvvet, şiddet ve yönüne paralel olarak şekil değiştirmesine ve kuvvet ortadan kalktığında tekrar eski şeklini almasına olanak tanır. Balastlı üst yapı inşaatları yapım aşamasında, balastsız üst yapı inşaatlarına göre daha düşük maliyetlidir. Geniş kapsamlı laboratuvar araştırmaları ve işletme hatlarında uzun yıllar yürütülen inceleme ve gözlemlere dayanarak, balastın oturma davranışının, bir yandan balastın basınçla sıkışmasına; öte yandan işletme ve hava şartlarına bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle balastlı üst yapılarda taban iyi hazırlanmadığı zaman; işletme etkileri altında balast yatağındaki dane yer değiştirmeleri ve bununla birlikte de yol çerçevesinin düzensiz yerleşip oturması gibi olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Diğer bir deyişle hat kalitesinde giderek bir kötüleşme meydana gelmektedir (Sözal, 2005). Bu nedenle balast üstyapısının düzenli aralıklarla buraj ve dresajının yapılması gerekmektedir. Şekil 2'de taban zemini üzerine oturan balastlı bir üstyapı kesiti görülmektedir.



Şekil 2. Demiryolu hattında taban zemini üzerine oturan balastlı üstyapı

Balast Malzeme Özellikleri

Demiryolu altına serilen, yüklerin alttabaka yada direk olarak toprağa aktarılmasını sağlayan balast tabakası granit, kireçtaşı, yüksek fırın cürufu, kırılmış kaya ya da granüle çakıl gibi malzemelerden oluşmaktadır. Ağır tonajlı trenlerin çalıştığı hatlar ve/veya hızlı tren hatları için kırma taş kullanılması gereklidir.

Kullanılan malzeme, çevre ve su etkilerine karşı dayanıklı, su drenajını sağlayabilecek kadar büyük parçalı, yerleştirme kolaylığı açısından yeterince küçük ve taşların hareket etmesine karşı açılı bir şekilde olmalıdır.

Balast, hat döşenmeden karayolu taşıtlarıyla döşenir ve hat daha sonra üzerine döşenir yada hat doğrudan alt balast tabakası üzerine döşenir. Balast, hattın üzerine vagonlardan boşaltılır. Balast, buraj makineleri ile hattın profiline uygun hale gelmesi için toleransları sağlayacak şekilde sıkıştırılır.

Balast malzemesi sert, dayanıklı, köşeli, tozsuz ve nispeten büyük boşluklara sahip olmalıdır (Lim, 2004). Balast bir çeşit granüler malzeme olduğu için, böylesi bir malzemenin davranışı granüler malzeme literatüründe tanımlanmıştır.

Fiziksel Özellikler

Gerektiğinde parçalanma, aşınma, donma ve çözülme direnci ve su emme oranı deneyleri yapılarak demiryolu balast malzemenin fiziksel özellikleri belirlenir.

Demiryolu balastının TS EN 1097-2 Madde-5'te belirtildiği gibi tayin edilen Los Angeles aşınma dayanımı LA < %15 olacaktır.

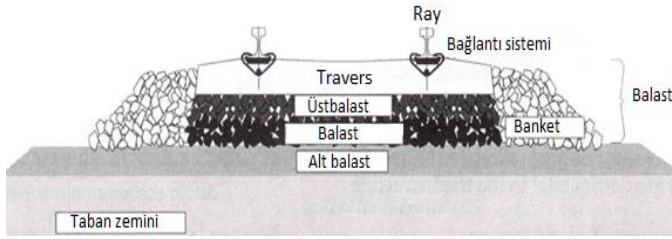
Demiryolu balastının donma/çözülme direnci bakımından dayanıklılığı, TS EN 1367-1'e uygun donma/çözülme sodyum sülfat etkisine dayanıklılık deneyleri ile değerlendirilmelidir. Bu deneyler sonucunda don kaybı %25'denaz olacaktır.

Su emme oranı TS EN 1097-6 e uygun olarak yapılmıştır, bu deney sonucuna göre su emme oranı maksimum %1 olacaktır. Maksimum dane çapı 63 mm olacaktır.

Altbalast (Sub-Balast)

Demiryolu üstyapısında genel prensip balast ile taban zemini arasında sub-balast (altbalast) denilen bir tabaka kullanmak şeklindedir. Sub-balast tekerlek yüklerine dayanabilen ve bu yükleri alt temele aktarabilen geçirimli kırmataş malzemedir (Şekil 3).

Sub-balast malzemesi; Taban zemininin doygun hale gelip yük altında zayıflamasını engellemek için, hattan gelen suyun büyük bir kısmını yan hendeklere aktarabilecek düzeyde geçirimli olmalıdır. Donma ve çözülmeye karşı yeterli kalınlıkta olmalıdır. Sub-balast tabakası hem yukarıdan gelebilecek olan ince taneli malzemelerin tabana ulaşmasını hem de tabandan yukarı balast tabakasına doğru geçmesi muhtemel olan killi malzemelerin geçişine engel olmaktadır.



Şekil 3. Altbalastlı demiryolu üstyapısı - enkesit (Selig ve Waters, 1994).

BALAST KUSURLARI

Zamanla balast agregalarının arasına ince taneli agregaların, metal tozlarının ve kömür tozlarının girerek balastın boşluklu yapısını değiştirmesi, balastın yapısal bütünlüğünü bozmakta ve drenaj yeteneğini ve esnekliğini kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu durum demiryolu üstyapısının stabilitesini bozmaktadır. (Erel, 2005; Tutumluer ve ark., 2008). Balast içerisindeki ince taneler sadece dışarıdan gelen maddeler değil, bir kısmı da agreganın kendi bünyesinden gelmektedir. Agregalar zamanla trafik yükleri altında aşınarak-kırılarak ince taneli agregaların oluşumuna sebep olmaktadır.

Balast kirliliğinin muhtemel kaynakları şu şekildedir;

- Balast malzeme ile gelen yabancı maddeler (tozlar vb.)
- Balast agregalarının kırılması
- Vagonlardan malzeme düşmesi (dökülmesi)

- Rüzgâr ile gelen tozlar
- Taban zemininden yukarı sızan ince taneli malzemeler
- Yağmur suyunun taşıdığı kirlilik
- Meteorolojik kirlilik

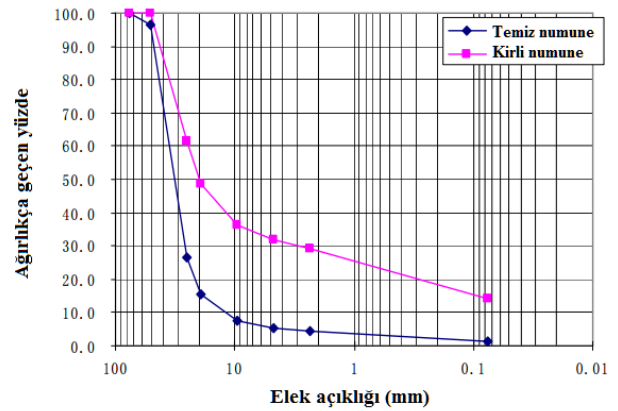
Devlet Demiryolları İstatistik Yıllığı verilerine göre 2011 yılı için gerçekleştirilen toplam demiryolu yük taşımacılığı 25,422 milyon-ton mertebesindedir. Bunun yaklaşık %10'unu kömür, linyit ve kok dediğimiz katı mineral yakıtlar ve %25'ini demir cevheri ve metal atıkların taşınması oluşturmaktadır. Balast kirliliğine neden olan bu yükler toplamda demiryolu yük taşımacılığının yaklaşık %35'ini oluşturmaktadır. Balast içerisine dışarıdan giren temel maddeler çoğunlukla kömür ve demir cevheri taşımacılığından kaynaklanan ince taneli maddeler, tozlardır. Şekil 4'de katı mineral yakıtların taşınmasından kaynaklanan balast kirliliği görülmektedir.



Şekil 4. Katı mineral yakıt tozlarının (kömür tozu) balast tabakasına dağılması

Şekil 5'de orijinal balast gradasyonu ile kirliliği numune gradasyonu birlikte görülmektedir.

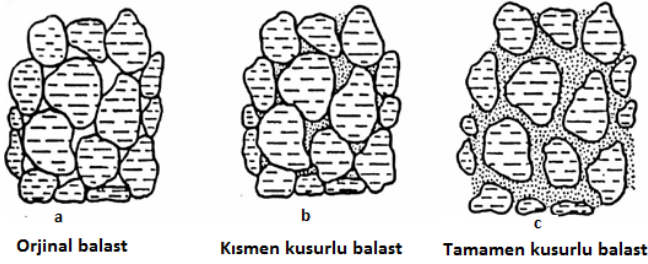
Orijinal temiz balast tabakasının gradasyonu, kirliliği balast tabakası ile oldukça farklılık gösterir. Normal şartlarda iri taneli ve boşluklu olması gereken balast gradasyonu, küçük boyuttaki taneçiklerin, tozların balast arasına girmesi ile birlikte önemli oranda değişmekte ve tane boyutu incelmekte mevcut boşluklar azalmaktadır.



Şekil 5. Orijinal ve kusurlu balast örneklerinin gradasyon eğrisi (Tutumluer ve ark., 2008)

Balast Kusurunun Oluşum Mekanizması

Orijinal balast örneğinde, hemen hemen tüm agregalar birbiri ile temas halindedir ve arada boşluklar vardır (Şekil 6a). Kısmen kusurlu balastta agrega taneleri arasına girmiş olan ince taneler nedeniyle temas noktalarında boşluklar oluşmaktadır (Şekil 6b). Tamamen kusurlu balastta ise aşırı miktarda ince madde nedeniyle agregalar arası temas büyük ölçüde kaybolmuştur ve agrega tanelerinin hareketi boşlukları tamamen dolduran ince taneler nedeniyle bloke olmuştur (Şekil 6c). Bu kusurlu durum ileri seviyede oluşunca ince taneli maddeler tüm boşlukları doldurduktan sonra üstyapıdan gelen yükün etkisi ile yukarı doğru pompalanmakta ve demiryolu traverslerinin hemen altında üstyapısının zayıflamasına sebep olmaktadır.



Şekil 6. Balast tabakasında kirlilik kusuru oluşum mekanizması

Balast Kusurlarının Sınıflandırılması

Balast içerisindeki ince tanelerin oluşturduğu kusurun sınıflandırılması ilk kez Selig ve Waters (1994) tarafından yapılmıştır. Bu kusur FI (Ballast Failing) indeksi olarak tanımlanmış ve No.4 elekten geçen malzeme yüzdesi ile No.200 elekten geçen malzeme yüzdesinin toplamı şeklinde hesaplanmıştır. Balast agregaları için FI değeri balast kusurunun belirlenmesi açısından oldukça yararlı bir parametredir. Tablo.1'de balast kusurunun FI değerine bağlı kategorileri verilmiştir.

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (1)$$

Tablo 1. Balast kusurunun FI değerine bağlı olarak sınıflandırılması

Balast kusuru kategorisi	FI indeksi
Temiz	< 1
Hafif kusurlu	1 ile 10 arası
Orta seviyede kusurlu	10 ile 20 arası
Kusurlu	20 ile 40 arası
Yüksek seviye kusurlu	> 40

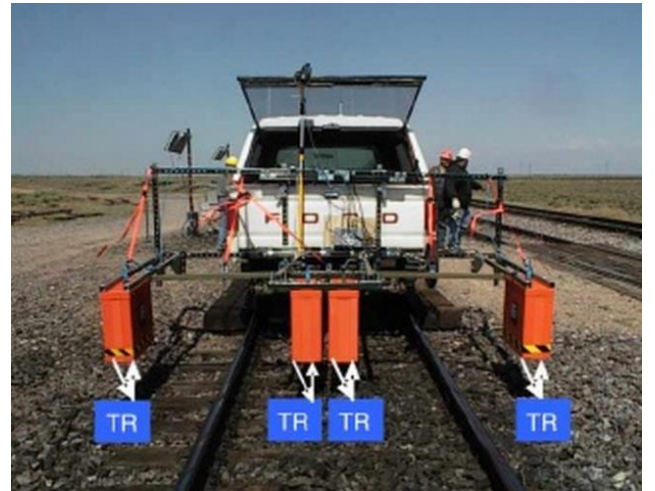
Lenescu, (2004) farklı bir kusur indeksi tanımlamıştır. FID isimli sınıflandırma indeksinde elekten %90 geçen malzeme tane çapının %10 geçen tane çapına oranını dikkate almıştır.

$$FI_D = D_{90} / D_{10} \times 100 \quad (2)$$

Yukarıda değinilen 2 sınıflandırma yöntemi de ağırlık tartımı esasına göre hesaplanmaktadır. Buna alternatif olarak Feldman ve Nissen (2002) agregalar arası boşlukların hacimsel dolma oranına göre bir kriter getirmişlerdir. PVC (Percentage Void Contamination) isimli bu yöntemde kirlenici malzemenin yığın hacmi, balastın orijinal boşluklu halindeki boşluk hacmine oranı şeklinde hesaplanmıştır (Tennakoon, 2012).

$$PVC = V_{vf} / V_{vb} \times 100 \quad (3)$$

Geleneksel (tahribatlı) numune alma yöntemlerin yanı sıra tahribatsız yöntem olan GPR (Ground Penetration Radar) yöntemi de balast kusurlarının tespitinde kullanılmıştır. Bu yöntemde oldukça fazla zemin verisi ve zemin özellikleri hakkında bilgi gerekli olsa da GPR yöntemi balast tabakasının kirlilik yüzdesini tespit etmek için kullanılmıştır (Han, 1997). GPR balast durumunu değerlendirmekte kullanışlı, pratik bir yöntem olmakla birlikte Leng ve Al Qadi (2010)'ye göre balast kusurlarını tespit etmekte kısıtlı (sınırlı) bir yöntemdir. Çünkü birçok durumda demiryolu balastının dielektrik (yalıtkanlık) sabiti bilinmemektedir. Bir diğer husus ise GPR yönteminde en temel gösterge olan dielektrik sabitinin anlamlı değişim gösterdiği zemin arayüzlerindeki sinyal yansımalarıdır. Balast içerisinde kirlilik oluşan kısım ile temiz balast arasında yansıma oluşturan net bir arayüz bulunmayabilir. Bu yüzden GPR kusurlu balastı tespit etmekte yetersiz kalabilmektedir (Bkz. Şekil 7).



Şekil 7. Demiryolu üstünde GPR ölçümü yapan araç (Al-Qadi, 2010)

Balast Kusurlarının Etkileri

Balast kusurunun etkisi esas olarak balast içerisine giren ve kusuru oluşturan malzemenin miktarı ve fiziksel özellikleri ile ilgilidir. İskeleti oluşturan esas balast agregalarının sağlam ve yerinde olması şartıyla, kusur oluşturan malzemelerin kum ve ince çakıl olması durumunda kesme dayanımını ve stifnis özelliğini artırması beklenir. Ancak Porozite ve esneklik özelliği azalır. Genellikle iri kum ve çakıl nedeniyle kaynaklanan kirlilik kusuru ciddi anlamda bir bakım onarım maliyeti ile sonuçlanmaz (Selig and Waters, 1994).

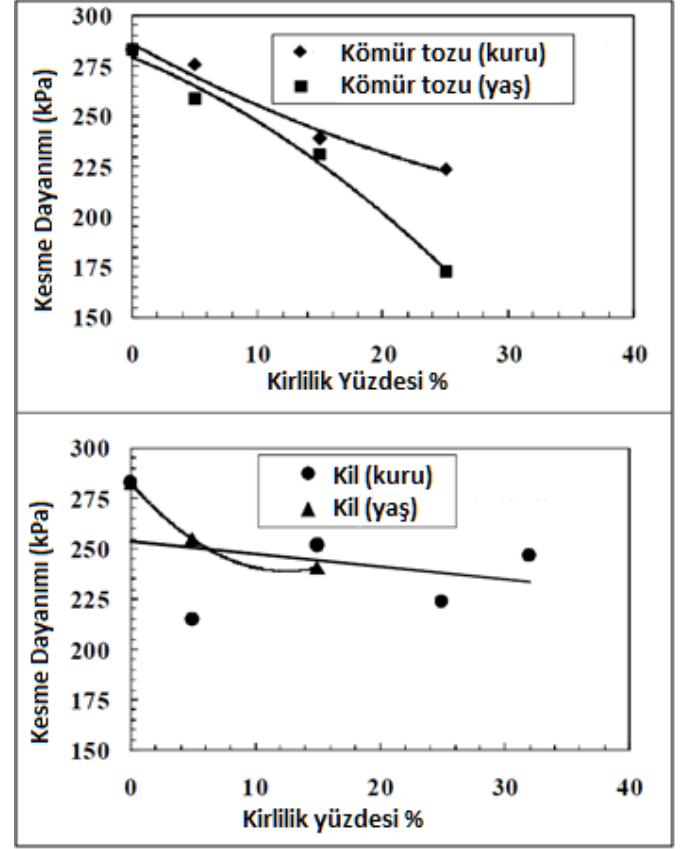
Balast tabakasındaki performans kaybı çoğunlukla kil ve silt boyutundaki malzemelerin oluşturduğu kusur durumlarında gerçekleşir. Balast arasındaki boşluklar ince malzeme ile dolduğu zaman üst yapının drenaj yeteneği ciddi anlamda düşer. İnce tanelerin yağlanma etkisi ile balastın içsel sürtünme açısı düşer ve dolayısıyla kayma dayanımı da azalır.

Tutumlu vd. (2008) University of Illinois'de temiz ve kömür tozu ile kirlenmiş balast karışımları üzerinde büyük ölçekli direkt kesme dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Wyoming demiryolu hattından alınan granit menşeli balast agregası ile yapılan deneylerde dayanım ve deformasyon verileri ölçülmüş, deneylerde kirlilik seviyesi arttıkça kesme dayanımının daime düştüğü gözlenmiştir. Şekil 8'de 200 KPa normal kuvvet altındaki kirliliği balast malzemenin kesme dayanımı değerleri görülmektedir.

Anbazhagan (2010), demiryolu sahasında yaptığı çalışmalarda çok kanallı yüzey dalgası ölçüm yöntemi (MASW) ile balast kusurlarını tanımlamaya çalışmıştır. Çalışmada kömür tozu için max %15 ve kil için max %25 kirlilik seviyelerinde en yüksek kesme dalgası hızını elde etmiştir. Böylece kömür tozu kirliliğinin kil gibi ince taneli mineral malzeme kirliliğine göre daha önce kritik kirlilik seviyesine ulaştığını tespit etmiştir. Ayrıca balast kirliliğinin artması ile birlikte drenaj yeteneğindeki düşüşün hızlı bir şekilde gerçekleştiğini, kirlilik seviyesinin kritik seviyeye gelmeden önce drenaj yeteneğinin kabul edilebilir sınırların altına düştüğünü tespit etmiştir.

Bir başka çalışma Budiono vd. (2004) tarafından yapılmıştır. Balast tabakasının oturması üzerinde kömür tozu kirliliğinin etkisini incelemiştir. Küçük düşey yüklerin uygulandığı deneylerde oturma üzerinde kirlilik seviyesinin büyük bir etkisi yokken büyük düşey yükler altında kirlilik seviyesi arttıkça oturma da arttığı tespit edilmiştir. Tekrarlı yükler altında yapılan oturma deneylerinde %18 PVC kirlilik seviyesinde balast agregalarının gerilme-oturma grafiği kabul edilebilir düzeyde iyi iken %55 PVC kirlilik seviyesinde balast oturma değeri temiz balasttan daha düşük bulunmuştur. Bu durum

göstermektedir ki balast kirliliği oluşturan ince taneler boşlukları doldurduğu için daha fazla elastik şekil değiştirme meydana getirmektedir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen formülasyon aşağıda verilmiştir.



Şekil 8. Farklı oranlarda kömür tozu ve kilden oluşan balast kirliliğinin yaş ve kuru şartlarda kesme dayanımları (Tutumlu vd., 2008)

PVC = %18 için $p = 0.96N$ ($N+2.33$); PVC = %55 için $p = 0.96N$ ($N+1.88$). Burada "p" plastik oturma, "N" ise yük tekrar sayısıdır.

SONUÇ

Normal şartlarda iri taneli ve boşluklu olması gereken balast gradasyonu, küçük boyuttaki taneciklerin, tozların balast arasına girmesi ile birlikte önemli oranda değişmekte ve tane boyutu incelemekte mevcut boşluklar azalmaktadır. Bu durum balast kirliliği adı verilen olumsuzluğa ortaya çıkarmaktadır. Balastın boşluklu yapısının değişmesi ile birlikte balastın yapısal bütünlüğünü bozulmakta ve drenaj yeteneğini ve esnekliğini kaybetmesine sebep olmaktadır.

Balast tabakasındaki performans kaybı çoğunlukla kil ve silt boyutundaki çok ince malzemelerin oluşturduğu kusur durumlarında gerçekleşmektedir. Balast arasın-

daki boşluklar ince malzeme ile dolduğu zaman üstyapının drenaj yeteneği de ciddi anlamda düşmektedir. Literatür çalışmalarında kömür tozu ve kil için %15 - %25 kirlilik seviyelerinin kritik kirlilik seviyeleri olduğu ve balast kirliliğinin artması ile birlikte drenaj yeteneğindeki düşüşün hızlı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür.

Türkiye'deki şehirlerarası demiryolu hatlarının hemen hemen tamamı balastlı üstyapı niteliğinde ve toplam demiryolu yük taşımacılığının yaklaşık %35'i balast kirliliği oluşturabilecek yüklerden (kömür, linyit ve kok - katı mineral yakıtlar, demir cevheri ve metal tozlarından) meydana gelmektedir. Dolayısıyla balast kirliliğinin tespit edilmesi ve alınabilecek önlemlerin araştırılması demiryolu operasyonlarının etkinliği açısından önem taşımaktadır. Özellikle kritik noktada olması bakımından traverslerin alt bölgesindeki balastın durumu daha iyi belirlenmelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde destek olan Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Anbazzhaga, P., B. Inraratna, C. Rujikiatkamjorn, L. Su. (2010). "Using a seismic survey to measure the shear modulus of clean and fouled ballast." *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 5, no. 2: 117-126.
- Arlı, V., (2002), Demiryolu Mühendisliği, V.A. Profillidis Railway Engineering – Çeviri, İBB, Ulaşım A.Ş., İstanbul.
- Demiryolları Genel Teknik Şartnamesi (2007). Malzeme, Yapım, Kontrol, Bakım-Onarım.
- Dombrow, W., Huang, H., Tutumluer, E. (2009). Comparison of coal dust fouled railroad ballast behavior, granite vs. limestone. In E. Tutumluer and I. Al-Qadi (Eds.), Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 8th International Conference (BCR2A'09), Volume 2, Champaign, IL, pp. 1349.
- Erel, A., Dündar, S. (2005). Derayman Olaylarının Muhtelif Nedenleri ve Derayman Riskini Azaltmak için Alınacak Önlemler, 6. Ulaştırma Kongresi, İTÜ İstanbul.
- Esveld, C. (2001). Modern Railway Track, Delft University of Technology, MRT Productions.
- Hay, W.W., H.C. Peterson, D.E. Plotkin, and P.T. Bakas, (1997). "Lateral Stability of Ballast," Report for FRA, DOT-FR-30038, Washington, D.C.
- Hussaini, S. K Karimullah., Indraratna, B., Vinod, J. S. (2012). Performance of Geosynthetically-reinforced Rail Ballast in Direct Shear Conditions. In G. A. Narsilio, A. Arulrajah & J. Kodikara (Eds.), 11th Australia - New Zealand Confe-

- rence on Geomechanics: Ground Engineering in a Changing World, Australia, pp. 1268-1273.
- Al-Qadi, I. L., Xie, W., Roberts, R., Leng Z. (2010). "Development of a time-frequency approach to quantify railroad ballast fouling condition using ultra-wide band ground-penetrating radar data", *International Journal of Pavement Engineering* Vol. 11, No. 4, pp. 269-279.
- Indraratna, B., Salim, W., Lonescu, D., Christie D. (2001). Stress-Strain and Degradation Behavior of Railway Ballast Under Static and Dynamic Loading, Based on Large-Scale Triaxial Testing. Faculty of Engineering - Papers.
- Leng, Z., Al-Qadi, I. (2010). "Railroad ballast evaluation using ground penetrating radar: Laboratory investigation and field evaluation." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2159: 110-117.
- Li, D., Davis, D. (2005). "Transition of Railroad Bridge Approaches." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 1392-1398
- Lim, W.L. (2004) Mechanics of railway ballast behaviour. PhD thesis, University of Nottingham.
- McDowell, G., W. Lim, A. Collop, R. Armitage, N. Thom. (2005). Laboratory simulation of train loading and tamping on ballast. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport* 158 (2), pp. 89-95.
- Roberts, R., Rudy, J., Qadi, I.A., Tutumluer, E., Boyle, J. (2006). Railroad Ballast Fouling Detection Using Ground Penetrating Radar – A New Approach Based on Scattering from Voids, ECNDT 2006 Symposium, Berlin.
- Selig E. T., Waters, J. M. (1994). "Track Geotechnology and Substructure Management", Thomas Telford, 446 p.
- Sözal, S. Sırri, (2005). Yol Bilgisi, TCDD Eskişehir Eğitim Merkezi Yayını, Eskişehir.
- Sparrow, R.W., (1976). A Repeated Load Biaxial Shear Box for Tests on Railway Ballast, *Proceedings of the Second Seminar on the Behavior of Granular Materials Under Repeated Loading*, University of Nottingham.
- T.C. Devlet Demiryolları 2007 – 2011 İstatistik Yıllığı, Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü Ankara, TCDD Yayın No: 2012-4.
- Tennakoon, N. C., (2012). Geotechnical Study of Engineering Behaviour of Fouled Ballast,, University of Wollongong, PhD Thesis, 257 p.
- TS 7043 EN 13450, (2004). Demiryolu Balastları için Agregalar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tutumluer, E., Dawson A., (2004). Mechanical Laboratory Testing Methods for Compacted Aggregate, in TRB-2004 Workshop - Describing Aggregate Behavior for Today's Pavements.
- Tutumluer, E., Dombrow, W., Huang, H., (2008). Laboratory Characterization of Coal Dust Fouled Ballast Behavior AREMA 2008 Annual Conference & Exposition, Salt Lake City, UT.
- Tutumluer, E., Huang, H., Bian, X. (2012). Geogrid-Aggregate Interlock Mechanism Investigated through Aggregate Imaging-Based Discrete Element Modeling Approach. *Int. J. Geomech.*, 12(4), pp. 391-398.