



**FARKLI TİP BALAST MALZEMELERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI: BALAST KİRLİLİĞİ,
BAKIM KOLAYLIĞI VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YÖNÜNDEN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Yüksek Lisans Tezi
Berkay Turgay CANLI
Eskişehir 2025**

**FARKLI TİP BALAST MALZEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: BALAST
KİRLİLİĞİ, BAKIM KOLAYLIĞI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YÖNÜNDEN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Berkay Turgay CANLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burak IŞIKDAĞ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Berkay Turgay CANLI'nın FARKLI TİP BALAST MALZEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: BALAST KİRLİLİĞİ, BAKIM KOLAYLIĞI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ başlıklı çalışması 08/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Doç. Dr. Burak IŞIKDAĞ

Üye

: Prof. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK

Üye

: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

08/07/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm YÜKSEK LİSANS đrencisi Berkay Turgay CANLI, FARKLI TİP BALAST MALZEMELERİNİN KARşILAşTIRILMASI: BALAST KİRLİLİğİ, BAKIM KOLAYLIğI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YÖNÜNDEN DEğERLENDİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı
Doç. Dr. Burak IşIKDAğ

ÖZET

FARKLI TİP BALAST MALZEMELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI: BALAST KİRLİLİĞİ, BAKIM KOLAYLIĞI VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK YÖNÜNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

Berkay Turgay CANLI

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2025

Danışman: Doç. Dr. Burak IŞIKDAĞ

Demiryolu hatlarının güvenli ve verimli işletilmesi için uygun altyapı ve özellikle balast malzemesi seçimi büyük önem taşımaktadır. Balast olarak granit, bazalt, kireçtaşı, çakıl ve cüruf gibi çeşitli malzemeler kullanılmakta; her biri mekanik dayanım, drenaj kapasitesi, kimyasal direnç ve maliyet açısından farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Balast seçimi; hattın coğrafi koşulları, malzeme kaynağına uzaklık, lojistik imkânlar, maliyet ve sürdürülebilirlik gibi faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır. Uygun olmayan balast, ray geometrisinin bozulmasına, drenaj sorunlarına ve işletme maliyetlerinin artmasına neden olabilir. Bu çalışmada, mevcut demiryolu hatlarında kullanılan balast malzemeleri ve karşılaşılan sorunlar incelenecek; alternatif balast malzemeleri, mekanik ve kimyasal dayanım, sürdürülebilirlik, temin kolaylığı gibi açılardan karşılaştırılacaktır. Ayrıca, balast üretiminde kullanılan madencilik yöntemlerinin çevre ve insan sağlığına etkileri, balast kirliliği ve bakım süreçleri de değerlendirilecektir. Farklı malzemelerin avantaj ve dezavantajları tablo ve Şekillerle sunulacak, hangi koşullarda hangi balast malzemesinin daha uygun olduğu ortaya konacaktır.

Anahtar Sözcükler: Demiryolu, Balast, Sürdürülebilirlik, Balast kirliliği, Balastlı altyapı.

ABSTRACT

COMPARISON OF DIFFERENT TYPES OF BALLAST MATERIALS: EVALUATION IN TERMS OF BALLAST POLLUTION, MAINTENANCE EASE, AND SUSTAINABILITY

Berkay Turgay CANLI

Department of Railway Systems Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak IŞIKDAĞ

The safe and efficient operation of railway lines relies heavily on the selection of appropriate infrastructure, particularly ballast materials. Various materials such as granite, basalt, limestone, gravel, and slag are used as ballast, each offering different advantages and disadvantages in terms of mechanical strength, drainage capacity, chemical resistance, and cost. The choice of ballast must consider factors like geographical conditions of the line, distance to material sources, logistics, cost, and sustainability. Inadequate ballast selection can lead to track geometry deterioration, drainage issues, and increased operating costs. This study will examine the ballast materials currently used on railway lines and the problems encountered, comparing alternative ballast materials in terms of mechanical and chemical resistance, sustainability, and ease of supply. Additionally, the environmental and health impacts of mining methods used in ballast production, ballast contamination, and maintenance processes will be evaluated. The advantages and disadvantages of different materials will be presented in tables and graphs, highlighting which ballast type is most suitable under specific conditions.

Keywords: Railway, Ballast, Sustainability, Ballast pollution, Subballast layer.

TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca bana destek olan ve motivasyon sağlayan aileme, kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Burak IŞIKDAĞ'a, Doç. Dr. Ömür AKBAYIR hocama, çalışma hayatımda öğrenimime devam edebilmem için desteğini esirgemeyen saygıdeğer amirim İnş. Müh. Burak DEMİRAL'a ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Berkay Turgay CANLI



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Berkay Turgay CANLI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
GÖRSELLER DİZİNİ	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1. Temel Kavramlar	3
2.2. Balastlı Demiryolu Hatları	3
2.3. Balastsız Demiryolu Hatları.....	3
2.4. Üstyapı Elemanları	4
2.4.1. Raylar.....	4
2.4.2. Bağlantı elemanları.....	5
2.4.3. Cebire (balık sırtı plakası)	6
2.4.4. Rondela	6
2.4.5. Traversler	7
3. BALAST	8
3.1. Balast Türleri.....	8
3.1.1. Granit.....	8

3.1.2. Bazalt	9
3.1.3. Kireçtaşı.....	9
3.1.4. Çakıl.....	10
3.1.5. Cüruf.....	10
3.2. Altbalast	11
3.3. Üstbalast.....	11
4. ALTBALAST VE ÜSTBALASTA UYGULANAN TEMEL DENEYLER	12
4.1. Elek Analizi (TS EN 933-1)	12
4.2. Los Angeles Aşınma Deneyi (TS EN 1097-2).....	12
4.3. Su Emme ve Doygunluk Deneyi.....	12
4.4. Proktor Deneyi (Standart ve Modifiye).....	13
4.5. CBR (California Bearing Ratio) Deneyi	13
4.6. Serbest Düşme Darbe Deneyi.....	13
4.7. Yerinde Plaka Yükleme Deneyi (TS 1901).....	14
4.8. Balast Kirlilik Analizi	14
5.ALTBALAST VE ÜSTBALASTIN KARŞILAMASI GEREKEN STANDARTLAR.....	15
5.1. TSE ve Uluslararası Standartlar	15
5.2. Altbalast ve Üstbalastın Fonksiyonları	15
6. BALAST MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	16
7. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMA	17
8. BALAST KİRLENMESİ VE BAKIMI	19
8.1. Balast Temizleme ve Bakım Yöntemleri:.....	20
9. TÜRKİYE DEMİRYOLU HATLARINDA BALAST MALZEMESİNİN ÜSTYAPI GERİLMELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	22
9.1. Demiryolu Üstyapısında Gerilme Kavramı.....	22
9.2. Boussinesq Teorisi.....	22
9.3. Westergaard Teorisi	23
10. BALAST MALZEMELERİNİN GERİLMEME ETKİSİ.....	24

10.1. Elastik Modül ve Sönümleme Özelliği	24
10.2. Tane Boyutu ve Yoğunluk	24
11. DEMİRYOLU RAYLARINDA OLUŞAN KUVVETLER VE YAPISAL ETKİLERİ.....	25
11.1. Düşey Kuvvetler	25
11.2. Düşey Gerilme Denklemleri	26
11.3. Yatay Kuvvetler (Enine Kuvvetler).....	26
11.3.1. Enine kuvvet denklemleri	26
11.4. Yatay Kuvvetler (Boyuna Kuvvetler)	27
11.5. Boyuna Kuvvet Denklemleri	27
12. TÜRKİYE HATLARINDAKİ UYGULAMALAR VE DENEYLER.....	28
12.1. Konvansiyonel Hatlarda Kullanılan Balastlar	28
12.2. Yüksek Hızlı Tren (YHT) Hatlarında Kullanılan Balastlar	28
12.3. Balast Türü – Hat Tipi Eşleşmesi	29
13. TÜRKİYE DEMİRYOLU SİSTEMLERİNDE BALAST MALZEMELERİNİN KAYNAK, LOJİSTİK, PERFORMANS AÇISINDAN GENİŞLETİLMİŞ İNCELEMESİ.....	30
13.1. Türkiye’de Balast Malzemelerinin Kaynağı ve Jeolojik Dağılımı.....	30
13.2. Balast Malzemelerinde Lojistik Zorluklar ve Maliyet Parametreleri	31
14. HAT GEOMETRİSİ VE BALAST UYUMU.....	34
15. DEPREM GİBİ AFETLERDE BALAST PERFORMANSI	35
16. RAYLI SİSTEMLERDE BALASTIN GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM KONTROLÜNDEKİ ROLÜ	37
16.1. Gürültü Kaynakları ve Balastın Önemi.....	37
16.2. Balast Malzemelerinin Titreşim ve Gürültü Sönümlemedeki Performansı	37
16.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri.....	39
16.4. Değerlendirme	39
17. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE BALAST PERFORMANSI	40

17.1. Aşırı Yağış ve Drenaj Sorunları.....	40
17.2. Don–Çözülme ve Sıcaklık Dalgalanmaları	41
17.3. Literatür ve Saha Gözlemleri.....	41
17.4. Değerlendirme	42
18. BALAST VE RAYLI SİSTEM GÜVENLİĞİ İLİŞKİSİ	43
18.1. Güvenlik Açısından Balastın İşlevleri	43
18.2. Balast Türlerinin Güvenliğe Etkileri.....	43
18.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri.....	44
18.4. Değerlendirme	44
19. BALAST ALTI ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	45
19.1. Zemin İyileştirme Teknikleri	45
19.1.1. Mekanik stabilizasyon	45
19.1.2. Geosentetik takviyeler	45
19.1.3. Kimyasal stabilizasyon	46
19.1.4. Enjeksiyon yöntemleri.....	47
19.2. Balast Türlerinin Zemin İyileştirmesiyle Etkileşimi.....	47
19.3. Türkiye’den Uygulama Örnekleri.....	48
19.4. Değerlendirme	48
20. BALAST YÖNETİMİNDE DİJİTALLEŞME VE AKILLI SİSTEMLER	49
20.1. Akıllı Balast İzleme Sistemleri	49
20.1.1. Sensörler	49
20.1.2. Uzaktan izleme ve veri analitiği	50
20.1.3. Yapay zekâ destekli bakım planlaması.....	50
20.2. Balast Türlerinin Dijital Yönetimde Karşılaştırılması.....	50
20.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri.....	51
21. BALASTIN GERİ DÖNÜŞÜMÜ VE YENİDEN KULLANIMI	52
21.1. Geri Dönüşüm Yöntemleri	52
21.1.1. Balast eleme ve temizleme.....	52
21.1.2. Yeniden kullanım ve alternatif değerlendirme	52
21.1.3. Geri dönüşüm tesisleri ve standartlar	52
21.2. Balast Türlerinin Geri Dönüşüm Uygunluğu	53

21.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri.....	53
21.4. Değerlendirme	53
22. BALASTIN DEMİRYOLU SİNYALİZASYON VE ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİNE ETKİSİ.....	54
22.1. Elektriksel Özellikler ve Sinyalizasyon	54
22.2. Elektrifikasyon Sistemleri ve Balastın Rolü	54
22.3. Uygulama Örnekleri	55
22.4. Değerlendirme	55
23. BALASTLI ÜSTYAPIDA BAKIM STRATEJİLERİ VE PLANLAMASI	56
23.1. Literatür ve Uygulama Örnekleri.....	56
23.2. Değerlendirme	56
24. ESKİŞEHİR-ANTALYA YÜKSEK HIZLI TREN HATTI İÇİN BALAST SEÇİMİNİN YAPILMASI.....	57
24.1. Hızlı Tren Altyapısı için Gerekli Balast Özellikleri	57
24.2. Bölgesel İklim ve Jeolojik Koşullar	57
24.2.1. İklim özellikleri	57
24.3. Önerilen Balastlar için Maliyet Analizi	58
24.3.1. Lojistik maliyetler ve nakliye	58
24.4. Değerlendirme	62
25. SONUÇ	63
KAYNAKÇA.....	65
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 6.1. Balast Mekanik Özellikleri.....	16
Tablo 7.1. Balast Sürdürülebilirlik Özellikleri	18
Tablo 12.2.1. Balast Tipi- Oturma Miktarı	28
Tablo 12.3.1. Hat tipi- Balast önerisi	29
Tablo 13.2.1. Balast- Maliyet- ömür karşılaştırması.....	33
Tablo 16.2.1. Balast Türlerinin Gürültü ve Titreşim Sönümleme Karşılaştırması	39
Tablo 17.3.1. İklima bağlı balast dayanımı.....	42
Tablo 18.2.1. Balast Türlerinin Güvenlik Performansı.....	44
Tablo 19.2.1. Balast Türlerinin Zemin İyileştirmesi Sonrası Performans Karşılaş.	48
Tablo 20.2.1. Balast Türlerinin Dijital Yönetim Sistemlerine Uygunluğu	50
Tablo 21.2.1 Balast Türlerinin Geri Dönüşüm Uygunluk Karşılaştırması	53
Tablo 22.2.1. Balast Türlerinin Elektriksel ve Sinyalizasyon Performansı	55
Tablo 23.1. Balast Türlerine Göre Bakım Planlaması	56
Tablo 24.1.1. Hızlı Tren Hattı Balast Teknik Özellikleri	57
Tablo 24.2.1.1. İklima dayalı balast önerisi	58
Tablo 24.3.1.1. Granit Balast Nakliye Maliyetleri (Eskişehir Bölgesi).....	59
Tablo 24.3.1.2. Bazalt Balast Nakliye Maliyetleri (Burdur - Isparta Bölgesi).....	59
Tablo 24.3.1.3. Çakıl / Cüruf Balast Nakliye Maliyetleri (Antalya Bölgesi)	59
Tablo 24.3.1.4. Bölge 1: Eskişehir ve Çevresi (180 km) - Granit Balast.....	60
Tablo 24.3.1.5. Bölge 2: Burdur - Isparta (180 km) - Bazalt Balast.....	60
Tablo 24.3.1.6. Bölge 3: Antalya ve Çevresi (180 km) - Çakıl / Cüruf Balast.....	61
Tablo 24.3.1.7. Genel Toplam Maliyet Tablosu	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Balastlı demiryolu üstyapı kesiti	3
Şekil 2.4.1. Ray Kesiti	4
Şekil 2.4.2. Oluklu ray ve tip kesiti	4
Şekil 2.4.3. Rayın maruz kaldığı etkenler	5
Şekil 2.4.2.1. Rayın maruz kaldığı kuvvetler	5
Şekil 6.1. Balast malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	16
Şekil 8.1.1. Sürdürülebilirlik-Dayanıklılık-Bakım gereksinimi	20
Şekil 11.1. Balast türlerine göre ortalama oturma değerleri	25
Şekil 13.2.1. İlk yapım ve yıllık işletme maliyetlerinin balast türlerine göre karşı.....	32
Şekil 13.2.2. Balast toplam maliyet grafiği	33

GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel 2.4.1. Rayı raya bağlayan malzemeler.....	6
Görsel 2.4.4.1. Travers bağlantı elemanları	6
Görsel 2.4.5.1. Travers çeşitleri	7
Görsel 3.1.1.1. Granit	8
Görsel 3.1.2.1. Bazalt	9
Görsel 3.1.3.1. Kireçtaşı.....	9
Görsel 3.1.4.1. Çakıl	10
Görsel 3.1.5.1. Cüruf.....	10
Görsel 4.8.1. GPR	14
Görsel 8.1. Kirli Balast.....	19
Görsel 15.1. Deprem hasarı almış demiryolu.....	36
Görsel 17.1.1. Yetersiz drenaj.....	40
Görsel 19.1.1.1. Balast sıkıştırma makinesi.....	45
Görsel 19.1.1.2. Geogrid	46
Görsel 19.1.1.3. Geosentetik	46
Görsel 20.1.1.1. Ray deformasyon sensörü.....	49
Görsel 21.1.3.1. Balast Geri Dönüşüm Tesisi	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat derece
Cm	: Santimetre
Cu	: Üniformluk katsayısı
E	: Elastik Modül
°F	: Fahrenheit derece
Gr	: Gram
I	: Atalet momenti
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
km/sa	: Kilometre bölü saat
Kn	: Kilonewton
kPa	: Kilopascal
M	: Metre veya moment
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
m/sn	: Metre bölü saniye
Mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	: Uluslararası Demiryolu Birliği
VSD	: Vitesli Sürüş Donanımı
YHT	: Yüksek Hızlı Tren

1. GİRİŞ

Ulaşım, yerleşim alanları arasındaki ilişkileri kurmak, bireylerin bir noktadan diğerine ulaşımını sağlamak ve belirli bir bölgede üretilen ürünlerin diğer bölgelere sevk edilmesi gibi birçok önemli işlevi yerine getirir. Bu nedenle ulaşım, hayati bir öneme sahiptir.

Ulaşımın sağlanması için çeşitli yollar bulunmaktadır. Karayolu, havayolu, deniz yolu ve demiryolu gibi farklı seçenekler mevcuttur. Her seçeneğin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, karayolu ulaşımı bireylerin evlerine kadar ulaşabilme imkânı sunarken, diğer ulaşım türleri için bu mümkün olmayabilir. Ancak şehirlerarası seyahatlerde yüksek hızlı demiryolları veya havayolu tercih edildiğinde zaman tasarrufu açısından kara yoluna göre daha etkili olacaktır. Bu nedenle her ulaşım yöntemi belirli koşullar altında kullanılmaktadır.

Demiryolu ile yük ve yolcu taşımacılığı giderek daha fazla önem kazanmaktadır çünkü bu yöntem yüksek verimlilik sağlamaktadır. Demiryolu hatlarının inşasında raylar ve hat ekipmanlarının yanı sıra hat geometrisinin korunması, drenaj sisteminin sağlanması gibi unsurlar dikkat edilmelidir; ayrıca raylı sistem aracı nedeniyle ray üzerinde oluşan kuvvetlerin zemine aktarılması amacıyla balastlı üstyapı kullanılmaktadır.

Her demiryolu hattında aynı balast türünün kullanılması mümkün değildir; hattın kullanım şekline bağlı olarak balast malzemesi değişiklik göstermektedir. Farklı balast türleri çeşitli mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olduğundan, yük taşımacılığı yapan bir hat ile yolcu taşımacılığı yapan bir hat arasında raylı sistem aracının ağırlığı ve hızı farklılık gösterecek ve bu durum hattaki kuvvetleri etkileyecektir. Bu sebeple hattın gereksinimlerine uygun balast seçimi yapılmalıdır.

Demiryollarında kullanılan malzemelerin seçiminde güvenlik ön planda tutulmalıdır. Yanlış altyapı veya üstyapı bileşenlerinin düşük dayanımı, hat elastikiyetini sağlayamaması ya da kısa sürede bozulma yaşaması gibi olumsuz durumlar meydana getirebilir; bu da ciddi kazalara hatta ölümlere neden olabilir. Seçilen malzemeler, belirli testlerden geçirilerek yeterlilikleri kanıtlanmalı ve sonuçların istenildiğinde tekrarlanabilir olması sağlanmalıdır.

Bu tez çalışmasında farklı balast malzemelerinin artıları ve eksileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilecektir. Seçilen malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri analiz edilerek demiryolu hatlarında en verimli ve sürdürülebilir malzemenin tespit edilmesi

hedeflenmektedir. Ayrıca madencilik ve lojistik açısından bu malzemelerin temin edilebilirliği değerlendirilecek ve ekonomik açıdan en uygun seçenekler belirlenecektir.

Günümüzdeki konvansiyonel ve yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki mevcut balast malzemeleri incelenerek bunlara alternatif olarak daha dayanıklı, düşük bakım gerektiren ve çevresel sürdürülebilirliği yüksek olan malzemelerin araştırılması yapılacaktır. Böylelikle demiryolu hatlarında güvenliği artırarak daha ekonomik ve çevre dostu çözümler sunulması amaçlanmaktadır.



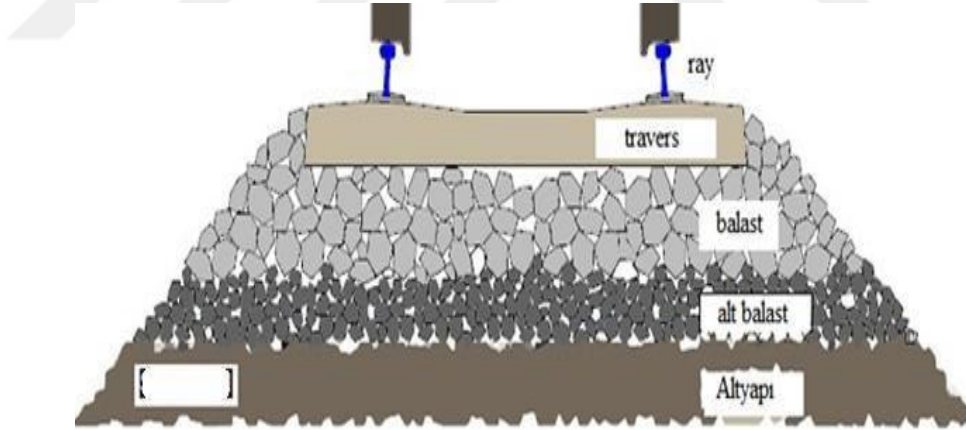
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1. Temel Kavramlar

Raylı sistem aracı tasarlanırken, aracın dış etkenler ve kuvvetlere karşı yolcu konforunu koruması amaçlanır. Bu sebeple hattın geometrisi; hat eğimi, eğrilik yarıçapı, dever, azami hız gibi parametreler, sınır değerlere sadık kalmak şartıyla belirlenir. (Lichtberger 2011).

2.2. Balastlı Demiryolu Hatları

Demiryolları, modern taşımacılık sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Yüksek taşıma kapasitesi, güvenli seyahat imkânı ve enerji verimliliği açısından diğer ulaşım türlerine kıyasla avantajlar sunar. Demiryolu hatlarının dayanıklılığını ve uzun ömürlü olmasını sağlayan en önemli unsurlardan biri ise balastlı üstyapı sistemidir (Esveld, 2001). Balastlı demiryolları, rayların altına serilen malzemeler sayesinde yük dağılımını sağlar, hat stabilitesini artırır ve drenaj sistemine katkıda bulunur. Şekil 1.1.' de bir balastlı demiryolu altyapısı görülmektedir.



Şekil 1.1. Balastlı demiryolu üstyapı kesiti. (TCDD, 2023)

2.3. Balastsız Demiryolu Hatları

Balastsız demiryolları, ray ve traverslerin doğrudan beton veya başka bir rijit yüzey üzerine monte edildiği sistemlerdir (Çelik, 2018). Özellikle yüksek hızlı tren hatları, tüneller ve köprülerde balastsız sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Balastsız demiryolu sistemleri, uzun ömürleri ve az bakım gerektirmeleri sayesinde modern raylı taşıma projelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek hızlı tren yolları, tüneller ve köprülerde sunduğu avantajlar düşünüldüğünde, gelecekte daha fazla kullanım alanı bulması muhtemeldir. Ancak, yüksek başlangıç yatırım maliyetleri ve bakım süreçlerinin zorlukları nedeniyle her proje için uygunluklarının dikkatlice analiz edilmesi gerekmektedir.

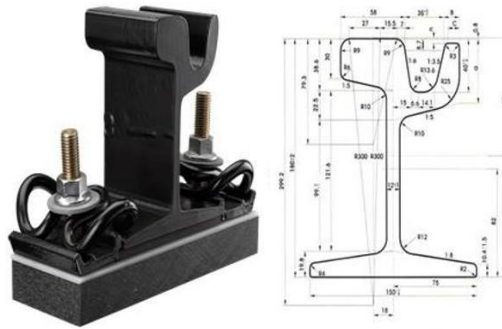
2.4. Üstyapı Elemanları

2.4.1. Raylar

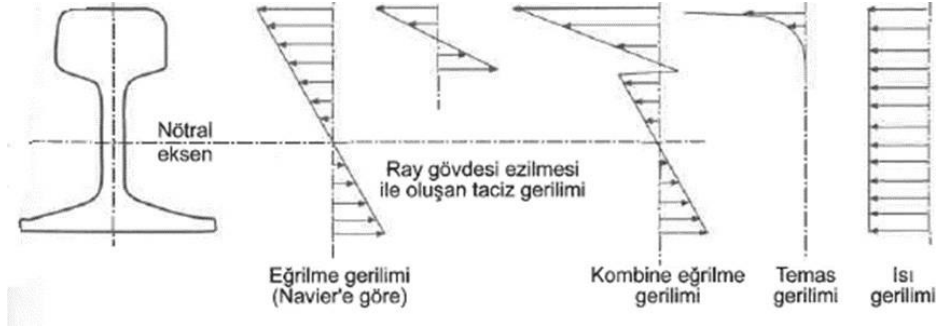
Demiryolları, raylardan oluşmaktadır. Üretim kapasitesi, güvenlik seviyesi ve konfor, bu durumdan olumsuz etkilenir. Bu nedenle, büyük gerilmelere dayanabilmesi için yüksek mukavemet gerektiren malzemelerle inşa edilirler. Geleneksel olarak demir veya çelikten üretilmektedirler. Rayların uzunluğu, taşınan yük miktarına ve hattın hizalanma durumuna bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ayrıca, raylar arasındaki mesafe (hat genişliği), demiryolu taşımacılığının yanı sıra karayolu taşımacılığı için de kullanılacaksa farklılık arz edebilir.



Şekil 2.4.1 Ray Kesiti (Esveld, C. 2001)



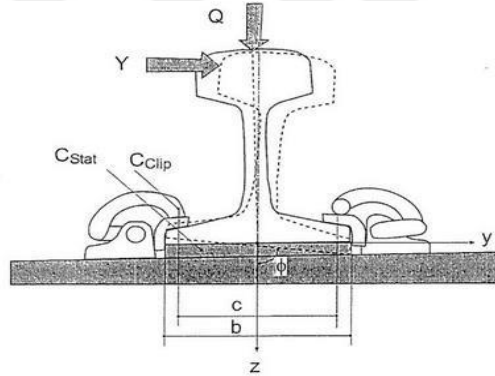
Şekil 2.4.2 Oluklu ray ve tip kesiti (Eroğlu 2014).



Şekil 2.4.3. Rayın maruz kaldığı etkenler (Lichtberger 2011)

2.4.2. Bağlantı elemanları

Ray ile travers arasında esnek bir yay görevi gören bağlantı malzemeleri, şekil 2.4.2.1.' de görüldüğü gibi bu sayede yukarıdan gelen kuvvetlerin ve aşağıdan yukarı etkiyen tepkilerin sönümlenmesini sağlarlar. En önemli görevlerinden biri de rayı elektrik akımına karşı izole etmektir. Şekil 2.4.2.1.'de rayın maruz kaldığı kuvvetler görülmektedir.



Şekil 2.4.2.1. Rayın maruz kaldığı kuvvetler (UIC 2022)

Y: Yatay Kuvvet [Kn/cm]

Cstat: Pedin sertliği [Kn/cm]

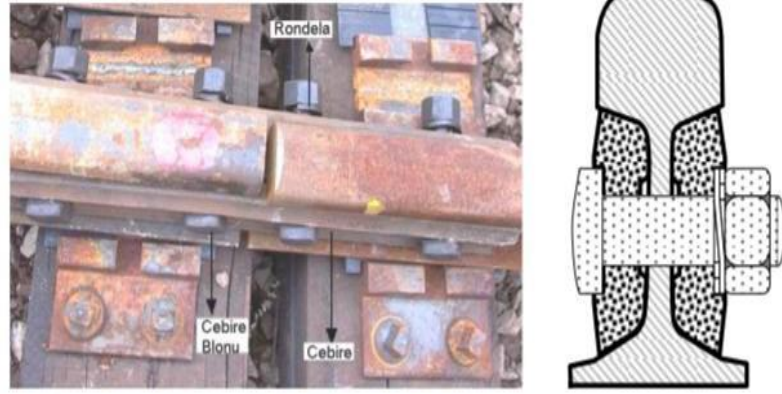
Cclip: Gergi kısıkaçı sertliği [Kn/cm]

b: Ray temas genişliği (cm)

c: Gergi kısıkaçı genişliği (cm)

z: Rayın merkezi

Rayı raya bağlayan malzemeler; cebire, cebire bulonu ve rondeladan oluşur. Cebire; Rayları iki ucundan birbirlerine bağlamak için kullanılan demir çubuklara denir. Görsel 2.4.1.' de rayı raya bağlayan malzemeler görülmektedir.



Görsel 2.4.1. Rayı raya bağlayan malzemeler. (TCDD 2023)

Rayı traverse bağlayan malzemeler travers çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Günümüzde en çok tercih edilen beton traverslerde HM tipi malzeme kullanılmaktadır. Bu tip bağlantı elemanları travers henüz fabrikadan çıkmadan ön montajla raya bağlanabilir. Rayın gerdirme kısıncı başına 13 mm yaylanma boyu ve 10 Kn gerdirme kuvvetiyle bağlanması boşta olan iki yay kolu ile sağlanır. Rayın devrilme hareketleri gergi kısıncının ortasındaki boyun kısmı yumuşatılarak sağlanır.

2.4.3. Cebire (balık sırtı plakası)

Cebire, ray uçlarının birleştirilmesi için kullanılan çelik bir levhadır. Genellikle iki rayın uç noktalarına her iki tarafından yerleştirilerek, rayların düzgün hizalanmasını ve aksenal yüklerin etkili bir şekilde iletilmesini temin eder.

2.4.4. Rondela

Rondela (pul), cıvata ve somun sistemlerinin bağlantı yüzeyinde düzgün bir basınç dağılımı sağlamak ve gevşemeyi önlemek için tasarlanmış ince metal disklerdir. Görsel 2.4.4.1.' de travers bağlantı elemanları görülmektedir.



Görsel 2.4.4.1. Travers bağlantı elemanları. (TÜDEMSAŞ 2021)

2.4.5. Traversler

Traversler, rayların yerleştirildiği yatay yapılar olup, rayları birbirine bağlar ve balast üzerinde dengede tutar. Traversler genellikle beton, çelik veya ahşap malzemelerden yapılır. Beton traversler, dayanıklılıkları ve uzun ömürleri nedeniyle modern demiryollarında yaygın olarak kullanılır. Traversler, rayların doğru hizalanmasını sağlayarak demiryolunun düzgün bir şekilde çalışmasını temin eder. Görsel 2.4.5.1.'te travers çeşitleri görülmektedir.



Görsel 2.4.5.1. Travers çeşitleri. (Alarko 2020)

Raydan traverse aktarılan yükün fazla olması üstyapının elastiki yapısından kaynaklanmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, klasik esnek bir demiryolu üstyapısında traverslerin yükün en fazla %50 sini karşılayacağı tespit edilmiş olup tasarımlar buna göre yapılmaktadır.

3. BALAST

Balast, demiryolu altyapısında rayların altında yer alan ve yüklerin düzgün bir şekilde zemine iletilmesini sağlayan kırmataş malzemedir. Ayrıca drenaj sağlamak, yatay ve düşey yükleri karşılamak, geometrik stabiliteyi korumak gibi görevleri vardır. Balast, hat üstyapısının en önemli bileşenlerinden biridir ve sistemin dayanıklılığı büyük ölçüde kullanılan balast malzemesinin kalitesine bağlıdır.

Balast tabakası genellikle 30–50 cm kalınlıkta olacak şekilde yerleştirilir. Taşların keskin kenarlı ve granülometri dağılımının uygun olması gerekir. TS EN 13450 ve TCDD Teknik Şartnamelerine göre balast agregaları 31,5 mm – 63 mm arası dane boyutuna sahip olmalıdır.

Balastın başlıca görevleri şunlardır;

- Raylara gelen yükleri alt yapıya homojen olarak dağıtmak
- Geometrik düzeni sağlamak ve korumak
- Vibrasyon ve gürültüyü azaltmak
- Yağmur suyunun drenajını sağlamak
- Ray ve traverslerin hareketini önlemek

3.1. Balast Türleri

3.1.1. Granit

Granit, yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip, demiryolu balastı için ideal bir doğal taştır. Yoğunluğu ve basınç dayanımı oldukça yüksektir. Türkiye’de özellikle Ege ve İç Anadolu bölgelerinde granit ocaklarından elde edilen malzemeler demiryolu projelerinde sıkça kullanılmaktadır. Uzun ömürlü olması ve düşük bakım gerektirmesi nedeniyle tercih edilmektedir.



Görsel 3.1.1.1. Granit (MTA 2022)

3.1.2. Bazalt

Bazalt, volkanik kökenli bir kayaç olup granitten sonra en sık kullanılan balast malzemelerinden biridir. Sert yapısı, yüksek yoğunluğu ve düşük su emme oranı sayesinde demiryolu yüklerine karşı iyi performans sağlar. Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde bol miktarda bazalt kaynağı bulunmaktadır.



Görsel 3.1.2.1. Bazalt (JMO 2021)

3.1.3. Kireçtaşı

Kireçtaşı, daha yumuşak ve daha kolay işlenebilir bir malzeme olmasına rağmen ekonomik olması nedeniyle bazı bölgelerde tercih edilmektedir. Ancak aşınma direncinin düşük olması, bakım aralıklarının sıklaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle daha az yük taşıyan veya düşük hızlı hatlarda kullanılması önerilmektedir.



Görsel 3.1.3.1. Kireçtaşı (ÇEİS 2022)

3.1.4. akıl

akıl taşı, doğal olarak dere yataklarından veya taş ocaklarından elde edilen bir malzemedir. Yuvarlak yapısı nedeniyle kilitlenme özelliği granüler taşlara göre daha düşüktür. Bu nedenle genellikle yardımcı balast tabakası olarak ya da drenaj sistemlerinde kullanılmaktadır.



Görsel 3.1.4.1. akıl (DSİ 2020)

3.1.5. Cüruf

Yüksek fırın cürufu, endüstriyel bir yan ürün olarak demiryolu balastı yerine kullanılabilen alternatif bir malzemedir. (Ersoy ve Baykal, 2020) Yeniden kullanım ve geri dönüşüm açısından sürdürülebilir bir seçenek sunar. Ancak yoğunluğu doğal taşlara göre daha düşüktür ve bazı çevresel etkiler bakımından özel değerlendirme gerektirir.



Görsel 3.1.5.1. Cüruf (Ersoy, H., & Baykal, G. 2020)

3.2. Altbalast

Altbalast, rayların yerleştirildiği zemin katmanını oluşturan ve genellikle iri, sert taneli agregalardan oluşan bir malzemedir. Bu malzeme, demiryolu altyapı sisteminin önemli bir parçasıdır ve trenlerin taşıdığı yükü zemine dengeli bir şekilde aktarır. Ayrıca altbalast, yeraltı suyu drenajını sağlama işleviyle demiryolunun dayanıklılığını artırarak uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur.

3.3. Üstbalast

Üstbalast, rayların doğrudan üzerine yerleştirilen ve destekleyen bir malzeme türüdür. Altbalastın üst kısmına serilen bu katman, rayların sağlamlığını artırırken yolun düzgün kalmasını sağlar ve titreşimleri minimize eder. Genellikle daha ince taneli agrega bileşenlerinden oluşur.

4. ALTBALAST VE ÜSTBALASTA UYGULANAN TEMEL DENEYLER

4.1. Elek Analizi (TS EN 933-1)

Elek analizi, agrega malzemesinin tane boyut dağılımını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Altbalast ve üstbalast malzemelerinde tane boyutu aralıklarının standarda uygun olup olmadığı bu yöntemle belirlenir. TS EN 933-1 standardına göre farklı elek çaplarında malzeme elenerek yüzdelik geçişler hesaplanır ve granülometri eğrisi oluşturulur.

- Deney Yöntemi: Kuru elek seti kullanılarak farklı eleklerden geçirilen malzemenin her bir elek üstünde kalan miktarı tartılır.

- Kullanılan Standart: TS EN 933-1

- Deneyin Amacı: Granülometri eğrisinin belirlenmesi, malzemenin sınıflandırılması.

4.2. Los Angeles Aşınma Deneyi (TS EN 1097-2)

Los Angeles aşınma deneyi, agregaların darbeye karşı dayanıklılığını ölçmek için uygulanır. Bu deney, döner tambur içinde çelik bilyelerle birlikte döndürülen numunenin ne kadar parçalandığını tespit eder. Altbalast ve üstbalastın mekanik sağlamlığını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

- Deney Yöntemi: 5000 devir döndürülen tambur sonrası malzeme tekrar elenerek kayıp oranı hesaplanır.

- Kullanılan Standart: TS EN 1097-2

- Deneyin Amacı: Aşınma direncinin belirlenmesi.

4.3. Su Emme ve Doygunluk Deneyi

Bu deney, malzemenin su alma kapasitesini ve doyma düzeyini belirlemek amacıyla yapılır. Altbalast malzemesi genellikle su emme özelliğine sahiptir ve bu özelliğin kontrolü, yolun uzun vadeli performansı için önemlidir.

- Deney Yöntemi: Kuru tartılan numune suya daldırılır. Belirli bir süre sonra tekrar tartılarak su alma yüzdesi hesaplanır.

- Kullanılan Standart: TS EN 1097-6

- Deneyin Amacı: Malzemenin suya karşı davranışının belirlenmesi.

4.4. Proktor Deneyi (Standart ve Modifiye)

Proktor deneyi, zeminin optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemeyi amaçlar. Altbalast malzemelerinin sıkıştırılabilirliğini değerlendirmede kullanılır. Standart ve modifiye versiyonları, uygulanan darbe enerjisine göre farklılık gösterir.

- Deney Yöntemi: Farklı su içerikleriyle hazırlanan numunelere düşen ağırlıklı darbe uygulanır. Elde edilen kuru birim hacim-su içeriği grafiği analiz edilir.

- Kullanılan Standart: TS EN 13286-2

- Deneyin Amacı: Sıkıştırma koşullarının belirlenmesi, optimum nem oranının tayini.

4.5. CBR (California Bearing Ratio) Deneyi

CBR deneyi, balast ve alt yapı malzemelerinin taşıma gücünü belirlemek için kullanılır. Altbalast tabakalarında sıklıkla uygulanan bu deney, yük altında malzemenin şekil değiştirme kapasitesini ölçer.

- Deney Yöntemi: Silindirik numune üzerine uygulanan yük altında batma miktarları ölçülerek taşıma oranı hesaplanır.

- Kullanılan Standart: TS 1900 EN 13286-47

- Deneyin Amacı: Taşıma gücünün belirlenmesi, balast sınıflandırması.

4.6. Serbest Düşme Darbe Deneyi

Serbest düşme darbe deneyi, altbalast malzemesinin darbeye karşı dayanıklılığını ölçmek amacıyla uygulanır. Bu deneyde, belirli bir yük belirli bir yükseklikten serbest bırakılarak malzeme üzerine düşürülür ve meydana gelen kırılma ve dağılmalar değerlendirilir.

- Deney Yöntemi: Belirli kütledeki çelik top, standart yükseklikten malzeme üzerine düşürülür. Gözlemlenen hasar derecesi kaydedilir.

- Kullanılan Standart: ASTM D1557'ye benzer yerel uygulama esas alınır.

- Deneyin Amacı: Ani yüklemeler altındaki dayanımın değerlendirilmesi.

4.7. Yerinde Plaka Yükleme Deneyi (TS 1901)

Yerinde plaka yükleme deneyi, balast veya alt yapı malzemelerinin yerinde taşıma gücünü ölçmek için uygulanır. Demiryolu albalast tabakasında, ray altı deformasyonlarını değerlendirmek amacıyla kullanılır.

- Deney Yöntemi: Dairesel çelik plaka zemine yerleştirilir ve üzerine kontrollü yük uygulanarak oturma miktarı ölçülür.
- Kullanılan Standart: TS 1901
- Deneyin Amacı: Zeminin taşıma gücünün ve balast modülünün yerinde tespiti.

4.8. Balast Kirlilik Analizi

Zamanla üstbalast içerisinde biriken toz, kil ve maddeler nedeniyle malzeme işlevini yitirir. Balastın kirlenme düzeyini belirlemek için çeşitli görsel, laboratuvar ve jeofizik yöntemler uygulanır.

- Yöntemler:
 - Görsel analiz ve örnekleme
 - Laboratuvar elek analizi ile ince malzeme oranı tespiti
 - Zemin Radarı (GPR) ile boşluk ve birikinti haritalaması (Görsel 4.8.1.'da GPR cihazı görülmektedir.)



Görsel 4.8.1. GPR (Geoscanners AB 2022)

- Kullanılan Yöntemler: GPR, TS EN 933-1, yerel saha gözlemleri
- Deneyin Amacı: Balastın temizleme veya yenileme gerekliliğinin belirlenmesi.

5.ALTBALAST VE ÜSTBALASTIN KARŞILAMASI GEREKEN STANDARTLAR

Altbalast ve üstbalastın kalitesi, belirli mühendislik kriterlerine uygun olmalıdır. Bu standartlar, demiryolu hatlarının güvenli, etkili ve uzun ömürlü olmasını garanti altına almak amacıyla geliştirilmiştir. Türkiye’de bu kriterler, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) ile demiryolu işletmeleri tarafından belirlenmektedir. Ek olarak, uluslararası standartlar da önemli bir referans noktası olarak değerlendirilmektedir.

5.1. TSE ve Uluslararası Standartlar

- **TSE 12860:** Demiryolu altyapısının inşasında kullanılan balast malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen bir Türk standardıdır.
- **UIC 719:** Uluslararası Demiryolu Birliği’nin (UIC) önerdiği balast malzemeleri standartlarını belirleyen belgedir. Bu belge, balastın seçimi, test edilmesi ve kullanılması için belirli kriterler sunar.

5.2. Altbalast ve Üstbalastın Fonksiyonları

Her iki balast tipi de demiryolu sisteminin çeşitli işlevlerini yerine getirir:

- **Yük Dağılımı:** Altbalast, rayların taşıdığı yükü eşit bir şekilde zemine ileterek, demiryolunun yerinde kalmasını sağlar. Üstbalast, rayların stabilitesini artırarak, raylar arasında uygun mesafenin korunmasını sağlar.
- **Titreşim ve Gürültü Azaltma:** Altbalast ve üstbalast, demiryolunun üzerine uygulanan titreşimleri azaltarak, çevresel etkiyi en aza indirir.
- **Drenaj:** Altbalast, suyun demiryolu hattından uzaklaştırılmasını sağlar. Bu, demiryolunun zeminindeki su birikintilerinin engellenmesine yardımcı olur.
- **Ray Sabitleme:** Altbalast ve üstbalast, rayları sabitleyerek, hareketli yükler altında rayların doğru hizalanmasını sağlar.

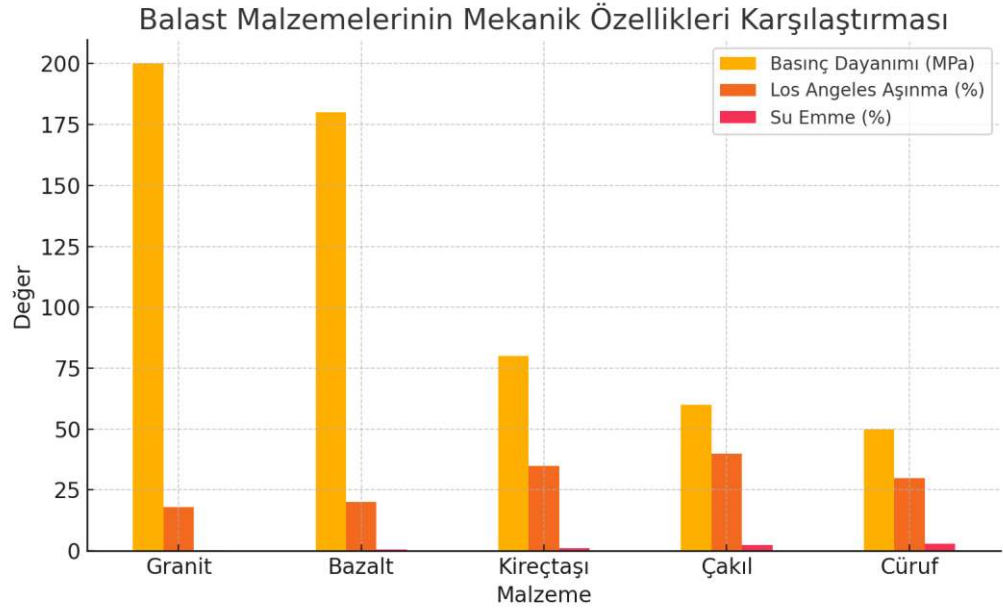
6. BALAST MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Balast malzemesinin mekanik özellikleri, demiryolu hatlarının dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması açısından belirleyicidir. Bu özellikler arasında basınç dayanımı, aşınma direnci (Los Angeles deneyi) ve su emme oranı ön plana çıkmaktadır. Aşağıdaki tabloda Türkiye’de kullanılan başlıca balast malzemelerinin bu üç temel mekanik özelliğe göre karşılaştırması sunulmuştur.

Tablo 6.1. Balast Mekanik Özellikleri

Malzeme	Basınç Dayanımı (Mpa)	Los Angeles Aşınma (%)	Su Emme (%)
Granit	200	18	0.3
Bazalt	180	20	0.5
Kireçtaşı	80	35	1.2
Çakıl	60	40	2.5
Cüruf	50	30	3.0

Şekil 6.1.’ de aynı verilerin Şekilsel gösterimi sunulmuştur:



Şekil 6.1. Balast malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

7. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMA

Günümüzde altyapı projelerinde sadece teknik yeterlilik değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik de önem kazanmaktadır. Demiryolu balastı olarak kullanılan malzemelerin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi; doğal kaynakların verimli kullanımı, karbon ayak izi, enerji tüketimi, geri dönüştürülebilirlik ve çevresel etki gibi kriterler üzerinden yapılmaktadır. (Yıldız ve Çakır, 2018)

Sürdürülebilirlik sadece demiryolunda değil, neredeyse her sektörde büyük öneme sahiptir çünkü artan nüfus ve ihtiyaçlarla beraber, mevcut olan kaynakların miktarı giderek azalmakta ve geri dönüşüm, var olan sistemlerin sürdürülebilir hale getirilmesi konuları giderek önem kazanmaktadır. Balast malzemeleri de genellikle madenlerden elde edilen malzemeler olup, çıkarılmaları ve işlenmeleri birçok kaynak kullanımı gerektirir.

Türkiye’de kullanılan balast malzemeleri bu açıdan aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

- Granit: Uzun ömrü nedeniyle fazla bakım gerektirmez. Ancak, çıkarılması ve işlenmesi için çok fazla enerji gerektirir ve buna bağlı karbon dioksit emisyonları yüksektir.
- Bazalt: Doğada çeşitli renklerde bulunur, kolayca temin edilir ve kullanılır, üretimi için daha az enerji gerektirir. Üstün aşınma direnci ile dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Granitten daha çevreci (ya da en azından daha sürdürülebilir) bir seçenektir.
- Kireçtaşı: Çıkarılması kolay ve nispeten ucuzdur. Ancak zayıf mekanik dayanımı nedeniyle daha fazla bakım gerektirir, bu da uzun vadede daha fazla enerji maliyeti demektir.
- Çakıl: Doğal olarak oluşan malzemeden ve madencilik yapılmadan elde edilen bir üründen yapılır. Ancak düşük dayanımı nedeniyle daha az alanda kullanılır.
- Cüruf: Endüstriyel atık kullanılarak üretilen cüruf, yeniden kullanılan en çevre dostu ürünlerden biridir. Geri dönüşüm fikri, hammadde tüketimini zorlamaz. Ancak yine de tamamen zararsız olduğunu söylemek tam olarak mümkün değildir.

Tablo 7.1.’de bu değerlendirmeler özetlenmiştir. Tablo incelenecek olursa farklı tip balastların karbon ayak izi, enerji tüketimi, geri dönüşüme gösterdiği uyumluluk ve doğal kaynak tüketimleri açısından özellikleri görülebilir. Granit ve bazaltın karbon ayak izi, enerji tüketimi yüksek olmakla birlikte, geri dönüştürülmeleri oldukça zordur. Bu durumda mekanik özellikler açısından üstünlük gösterebilirler de, sürdürülebilirlik açısından dezavantajlıdır.

Tablo 7.1. *Balast Sürdürülebilirlik Özellikleri*

Malzeme	Karbon Ayak İzi	Enerji Tüketimi	Geri Dönüşüm Uygunluğu	Doğal Kaynak Tüketimi
Granit	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Bazalt	Orta	Orta	Düşük	Orta
Kireçtaşı	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Çakıl	Düşük	Çok Düşük	Düşük	Çok Düşük
Cüruf	Çok Düşük	Çok Düşük	Yüksek	Yok

8. BALAST KİRLENMESİ VE BAKIMI

Demiryolu balast tabakasının zamanla verimliliğini yitirmesine yol açan en kritik etkenlerden biri, balastın kirlenmesidir. Balast kirlenmesi; dış kaynaklardan gelen malzemelerin, toprak, ince taneli maddeler, yağmurla taşınan tortular ve ray aşınması sonucu meydana gelen metal parçacıkları gibi unsurların balast arasına girmesiyle oluşur. Bu durum, drenaj yeteneğinin azalmasına, rayların kaymasına ve titreşim sönümleme kapasitesinin düşmesine sebep olur. Görsel 10'da kirlenmiş balast görülmektedir.

Balast Kirlenmesinin Nedenleri:

- Travers ve raylardan kaynaklanan metal aşınma ürünleri
- Yağmurla taşınan toprak ve kil parçaları
- Yakındaki tarımsal veya sanayi faaliyetlerinden kaynaklanan ince materyaller
- Yanlış bakım uygulamaları sonucunda parçalanmış balast taşları

Kirlenmenin Sonuçları:

- Drenaj kapasitesinin azalması ve su birikintileri oluşması
- Ray geometrisinin bozulması ve hat eğriliklerinin meydana gelmesi
- Titreşimlerin artışı ve yolculuk konforunun düşmesi
- Bakım maliyetlerinin yükselmesi



Görsel 8.1. *Kirli Balast (TÜBİTAK MAM 2019)*

8.1. Balast Temizleme ve Bakım Yöntemleri:

Elle Temizlik: Geleneksel bir yöntem olup, yoğun iş gücü gerektirmekte ve zaman alıcıdır. Küçük alanlarda uygulanabilir. Ancak büyük hatlarda uygulanabilir değildir.

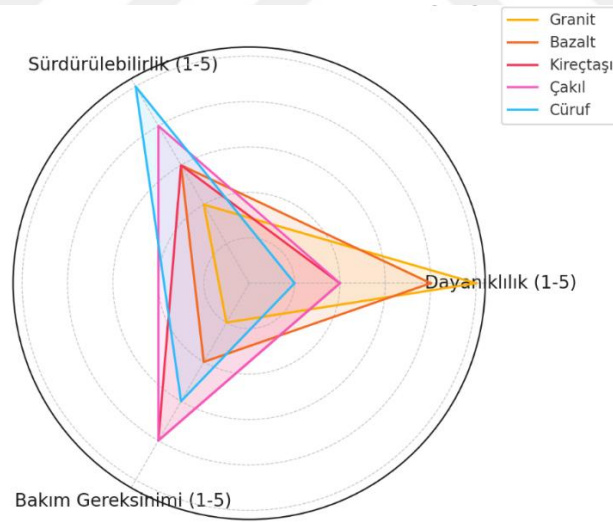
Balast Eleme Makinesi (Ballast Cleaner): Balastı kaldırarak içindeki ince maddeleri ayırır ve yeniden kullanılabilir hale getirir.

Yer Radarı (GPR – Ground Penetrating Radar): Kirli balast bölgelerini tespit etmek için kullanılır; zemin içi analizler ile bakım yapılacak alanlar belirlenir.

Tam Otomatik Yenileme: Balastın tamamen yenilendiği, genellikle ciddi deformasyon yaşanan hatlarda tercih edilen bir yöntemdir.

Günümüzde modern demiryolu hatlarında balast temizliği için mekanik sistemler ve radar destekli teknolojiler kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, bakım sürelerini kısaltmakta ve altyapının ömrünü uzatmaya yardımcı olmaktadır.

Aşağıdaki şekilde balast malzemelerinin dayanıklılık, aşınma direnci, su emme oranı, karbon ayak izi ve geri dönüşüm uygunluğu gibi kriterlerdeki genel performansları sunulmaktadır.



Şekil 8.1.1. Sürdürülebilirlik-Dayanıklılık-Bakım gereksinimi

- Granit ve bazalt gibi sert taşlar mekanik dayanım açısından üstün performans sergilemektedir.
- Kireçtaşı ve çakıl, düşük maliyetli ancak yüksek bakım gereksinimi olan malzemelerdir.

- Cüruf, çevresel sürdürülebilirlik bakımından en avantajlı seçenek olmakla birlikte, mekanik özellikler açısından sınırlıdır.

Dolayısıyla;

1. Yoğun yük taşımacılığı yapılan ana hatlarda granit ve bazalt gibi yüksek dayanımlı malzemeler tercih edilmelidir.
2. Düşük trafik yoğunluğuna sahip hatlarda daha ekonomik çözümler olan kireçtaşı ve çakıl kullanılabilir.
3. Cüruf gibi endüstriyel atıkların kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda teşvik edilmelidir.
4. Yer radarı gibi teknolojilerin kullanımı ile kirlenen balast bölgeleri erken tespit edilmeli, uygun bakım stratejileri geliştirilmelidir.
5. Türkiye genelinde balast kaynağı haritalaması yapılmalı, lojistik ve sürdürülebilirlik açısından en uygun taş ocakları belirlenmelidir.

Doğru balast malzemesinin seçimi sadece altyapının teknik başarısını değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik verimliliği de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle malzeme seçimi multidisipliner bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

9. TÜRKİYE DEMİRYOLU HATLARINDA BALAST MALZEMESİNİN ÜSTYAPI GERİLMELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Demiryolu sistemleri ve altyapıları, güvenlik ve dayanıklılık açısından kritik öneme sahip yapılar olarak tanımlanabilir. Demiryolu üstyapısının yük taşıma kapasitesi hem yol güvenliğini hem de konforunu belirleyen önemli unsurlardan biridir. Raylar, traversler, balast, alt balast ve zemin gibi elemanlardan oluşan bir yapı içinde, balast tabakasının yük transferi ve gerilme sönmülme işlevi son derece önemlidir. Bu çalışmada, Türkiye’deki demiryolu hatları için balast malzemelerinin üstyapı gerilmeleri altında sergilediği davranış incelenmiş ve elde edilen bulgular hipotezlerle ve saha deneyleriyle karşılaştırılmıştır.

9.1. Demiryolu Üstyapısında Gerilme Kavramı

Üstyapı bileşenlerine uygulanan yükler, ray-travers sistemi aracılığıyla balast tabakasına ve ardından alt katmanlara geçiş yapar. Bu yük transferi sonucunda oluşan gerilmeler, malzemenin elastik özellikleri, yükleme durumu ve geometrisi ile ilişkilidir. Elastisite teorisi, gerilme analizlerinde sıkça başvurulanan bir yöntemdir ve zemin tepkisi, dikey yükler altında çeşitli tekniklerle simüle edilmektedir.

9.2. Boussinesq Teorisi

Yarı sonsuz izotropik ortamda tekil bir düşey yükün oluşturduğu gerilme, Boussinesq tarafından tanımlanmıştır. Bu modele göre yüzeydeki bir yük, zeminin daha derinlerinde yayılı bir şekilde dağılarak iletilir. Özellikle gerilme hesaplanmasında bu teori temel alınır.

Burada denklem verilirse;

Düşey gerilme denklemi:

$$\sigma_z = (3 * P * z^3) / (2 * \pi * (r^2 + z^2)^{(5/2)}) \quad (9.2.1)$$

Burada:

P = Yük (N)

z = Derinlik (m)

r = Yükün merkezine olan yatay uzaklık (m)

σ_z = Z derinliğindeki düşey gerilme (Pa)

9.3. Westergaard Teorisi

Westergaard, zemini tabakalı ve rijit davranış gösteren bir 23allas olarak modellemiştir. Bu yaklaşım, özellikle travers genişliğinde yük dağılımını ve alt tabakalarda oluşan gerilmeleri anlamada tercih edilir. Westergaard modeli, tabakaların rijit veya yarı rijit olduğu varsayımıyla daha geniş tabanlı yük dağılımı gösterir.

Westergaard düşey gerilme denklemi:

$$\sigma_z = (P / \pi) * [a^2 / (a^2 + r^2)] \quad (9.3.1)$$

Burada:

P = Yük (N)

a = Yarı yükleme genişliği (m)

r = Yatay uzaklık (m)

σ_z = Z derinliğindeki düşey gerilme (Pa)

10. BALAST MALZEMELERİNİN GERİLMEME ETKİSİ

Balast malzemesinin türü, yükün altyapıya nasıl iletileceğini etkiler. Eğer elastisite modülü, yoğunluk, tane şekli ve aşınma direnci yüksekse, üstyapı bileşenleri artan yükler altında ağır strese maruz kalmazlar. Sert taşlardan (örneğin bazalt ve granit) elde edilen balast, daha az deformasyona uğrarken; kireçtaşı ve çakıl gibi yumuşak malzemeler ise daha fazla oturma yapabilir.

10.1. Elastik Modül ve Sönümlenme Özelliği

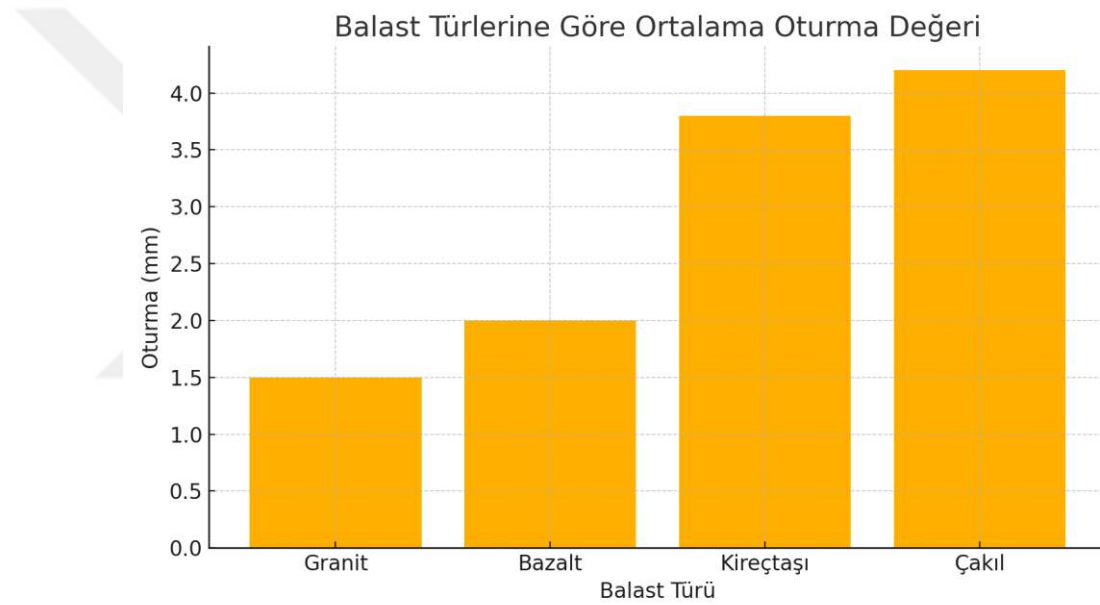
Balastın elastisite modülünün pratikteki önemi nedir? Yüksek elastisite modülüne sahip balastlar, yükleri daha az deformasyon ile taşır. Ayrıca, balastta kullanılan malzemelerin iç sürtünme düzeyi ve taneler arasındaki bağlanma, titreşimleri emme kapasitesini etkiler. Bu noktada bazalt ve granit gibi taşlar, benzer koşullar altında diğer malzemelere göre daha üstün performans gösterir.

10.2. Tane Boyutu ve Yoğunluk

Derinliğe doğru yayılan stres, balastın tane boyutuyla ilişkilidir. Taneler büyük ve boyut olarak yaklaşık olarak uniform olduğunda, yükü zemine daha iyi dağıtırlar. Ayrıca sıkı paketlenmiş, yoğun malzemeler, yük taşıyan bir ortamda daha stabil bir yapı oluşturur.

11. DEMİRYOLU RAYLARINDA OLUŞAN KUVVETLER VE YAPISAL ETKİLERİ

Demiryolu altyapısı, hareketli yükler altında çalışan ve sürekli dinamik zorlanmalara maruz kalan mühendislik yapılarıdır. Raylar, traversler ve balast gibi üstyapı elemanları; düşey, enine (yatay) ve boyuna kuvvetlere karşı dayanım göstermek zorundadır. Bu kuvvetler raylarda deformasyonlara, raydan çıkma riskine ve yapısal yorulmaya sebep olabilir. Bu nedenle demiryolu mühendisliğinde kuvvetlerin büyüklüğü, yönü ve etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Şekil 11.1.'de kullanılan balasta göre oturma grafiği verilmiştir.



Şekil 11.1. Balast türlerine göre ortalama oturma değerleri

11.1. Düşey Kuvvetler

Düşey kuvvetler, taşıt yüklerinin raylar aracılığıyla zemine iletilmesini sağlayan temel kuvvetlerdir. Tekerlek-ray temas noktasında oluşan bu kuvvetler, hem statik hem de dinamik etkiler içerir.

Başlıca düşey kuvvetler şunlardır:

- Tekerlek kuvvetleri (statik/dinamik yükler)
- Kurp kuvvetleri (ek yükler)
- Düzensizliklerden kaynaklanan dinamik darbeler

11.2. Düşey Gerilme Denklemleri

Ray-zemin sisteminde düşey kuvvetlerin zemine yayılması aşağıdaki genel formüller ile ifade edilir:

- Ortalama basınç gerilmesi:

$$\sigma = P / A \quad (11.2.1)$$

Burada: σ = düşey gerilme (Pa), P = yük (N), A = temas alanı (m^2)

- Boussinesq teorisine göre derinlikteki gerilme:

$$\sigma_z = (3 * P * z^3) / (2 * \pi * (r^2 + z^2)^{(5/2)}) \quad (11.2.2)$$

TCDD tarafından yapılan izleme çalışmaları, Ankara-Konya hızlı tren hattında, dinamik düşey kuvvetlerin sabit eksen yüküne göre %30 oranında arttığını göstermiştir. Özellikle hat geçişleri, kurp bölgeleri ve bağlantı noktalarında bu artışlar ray ve balast deformasyonlarını artırmaktadır.

11.3. Yatay Kuvvetler (Enine Kuvvetler)

Raylar üzerinde hareket eden taşıtların yön değiştirmesi veya sinüzoidal hareketleri sırasında enine yönde kuvvetler oluşur. Bu kuvvetler, özellikle virajlarda ve hat bozukluklarında raylara yatay yükler bindirir. Bu durum raydan çıkma riski ve travers bağlantı elemanlarında gevşeme gibi sonuçlar doğurabilir.

Başlıca enine kuvvetler şunlardır:

- Sinüzoidal yönlendirme kuvveti
- Merkezkaç kuvveti (kurplarda)
- Rüzgar kuvveti (özellikle viyadüklerde)

11.3.1. Enine kuvvet denklemleri

- Kurplarda oluşan merkezkaç kuvveti:

$$F_c = (m * v^2) / r \quad (11.3.1.1)$$

Burada: F_c = merkezkaç kuvveti (N), m = kütle (kg), v = hız (m/s), r = yarıçap (m)

- Rüzgar kuvveti:

$$F_r = q * A \quad (11.3.1.2)$$

Burada: F_r = rüzgar kuvveti (N), q = dinamik basınç (N/m^2), A = yanal etki alanı (m^2)

Doğu Anadolu bölgesinde yer alan Erzurum-Kars hattında, yüksek rakımlı kurplarda özellikle kış aylarında sinüzoidal hareketin ve kar yükünün birleşmesiyle enine yüklerin artışı gözlemlenmiştir. Bu durum bazı kesimlerde traverslerde çatlama ve bağlantı gevşemelerine neden olmuştur.

11.4. Yatay Kuvvetler (Boyuna Kuvvetler)

Boyuna kuvvetler, taşıtın hızlanması, frenlemesi veya rayların sıcaklık değişimleri gibi etkilerle oluşur. Bu kuvvetler ray boyunca sürtünme, çekme veya itme şeklinde yayılır. Uzun sürekli raylarda sıcaklık farkları nedeniyle yüksek genlikli boyuna kuvvetler meydana gelebilir.

Başlıca boyuna kuvvetler şunlardır:

- Aderans kuvveti (sürtme / frenleme)
- Termal gerilmeler (kaynaklı raylarda)

11.5. Boyuna Kuvvet Denklemleri

- Termal kuvvet (sıcaklık kaynaklı):

$$F_t = E * A * \alpha * \Delta T \quad (11.5.1)$$

Burada: F_t = termal kuvvet (N), E = balast modül (Pa), A = kesit alanı (m^2), α = genleşme katsayısı ($1/^\circ C$), ΔT = sıcaklık farkı ($^\circ C$)

Kaynaklı uzun rayların kullanıldığı Eskişehir-İstanbul hattında yaz aylarında ray sıcaklıklarının $60^\circ C$ 'ye ulaşmasıyla termal gerilmeler önemli düzeye ulaşmakta, ray ekseninde bükülme riskleri doğmaktadır. Bu nedenle sabitlenmiş travers mesafesi ve balast sıklığı büyük önem taşımaktadır.

12. TÜRKİYE HATLARINDAKİ UYGULAMALAR VE DENEYLER

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD), demiryolu hatlarında çeşitli balast malzemeleri ile deneyler ve uygulamalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmaların amacı, farklı balast türlerinin gerilme altında sergiledikleri performansı analiz etmektir. Özellikle yüksek hızlı tren hatlarında (YHT) kullanılan balastın, geleneksel hatlara göre daha yüksek mekanik dayanım göstermesi beklenmektedir.

12.1. Konvansiyonel Hatlarda Kullanılan Balastlar

Anadolu'daki pek çok geleneksel demiryolu hattında, yerel taş ocaklarından temin edilen kireçtaşı ve çakıl balastları sıkça tercih edilmektedir. Bu tür balastların aşınma dayanıklılığı daha azdır ve bu durum uzun vadede bakım ihtiyaçlarını artırmaktadır. Yapılan testlerde, kireçtaşı balast kullanılan alanlarda oturma miktarlarının bazalt veya granit ile kullanılan bölgelere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

12.2. Yüksek Hızlı Tren (YHT) Hatlarında Kullanılan Balastlar

Ankara-Eskişehir, Ankara-Konya ve İstanbul-Edirne gibi YHT hatlarında genellikle granit ve bazalt balastlar tercih edilmiştir. Bu malzemeler, yüksek dayanım ve düşük aşınma katsayısı sayesinde hızlı tren yüklerini sönmülemde daha başarılıdır. Yapılan saha testlerinde (örneğin; plaka yükleme ve hızlandırılmış yükleme testleri), granit balastın deformasyon miktarı kireçtaşına göre %30 daha düşük bulunmuştur.

Tablo 12.2.1.'de farklı hatlarda yapılan deneysel çalışmaların bazı sonuçları tablo hâlinde sunulmuştur:

Tablo 12.2.1. Balast Tipi- Oturma Miktarı

HAT ADI	KULLANILAN BALAST	GERİLME ALTINDA OTURMA (mm)	YORUM
Ankara - Eskişehir YHT	Granit	1.5	Yüksek dayanım, düşük oturma
Konya – Karaman	Bazalt	2.0	Orta seviye deformasyon
Sivas – Samsun	Kireçtaşı	3.8	Yüksek deformasyon, sık bakım
Afyon – Uşak	Çakıl	4.2	Zayıf performans, tavsiye edilmez

12.3. Balast Türü – Hat Tipi Eşleşmesi

Demiryolu hatlarının hizmet tipi, taşıdığı yük ve hıza bağlı olarak balast malzemesi seçimi değişmektedir. Bu nedenle her hat türü için optimum performans sağlayacak balastın seçimi büyük önem taşır. Tablo 12.3.1’de hat türüne göre önerilen balast tipleri sunulmuştur:

Tablo 12.3.1. *Hat tipi- Balast önerisi*

HAT TİPİ	ÖNERİLEN BALAST	AÇIKLAMA
Yüksek Hızlı Tren (YHT)	Granit	Yüksek dayanım ve düşük deformasyon sağlar.
Yoğun Yük Taşımacılığı	Bazalt	Aşınmaya karşı dirençlidir, taşıma kapasitesi yüksektir.
Kırsal Konvansiyonel Hatlar	Kireçtaşı	Yerel temin edilebilir, düşük maliyetlidir.
İkincil Hatlar ve Depo Hatları	Çakıl	Düşük maliyetli ancak sık bakım gerektirir.

Yapılan teorik analizler, deneysel bulgular ve saha uygulamaları, balast seçimlerinin demiryolu üstyapısının dayanıklılığı açısından kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. Türkiye’de gerçekleştirilen saha testleri, granit ve bazalt balastların gerilme altında daha az deformasyon gösterdiğini ve bakım gereksinimini azalttığını göstermiştir. Yüksek hızlı ve yüksek tonajlı hatlarda bu tür malzemelerin kullanımı zorunludur. Öte yandan, daha düşük kapasiteli veya kırsal hatlarda ekonomik nedenlerden dolayı kireçtaşı ve çakıl tercih edilebilir; ancak bu durumda periyodik bakımın yapılması kaçınılmaz hale gelir.

13. TÜRKİYE DEMİRYOLU SİSTEMLERİNDE BALAST MALZEMELERİNİN KAYNAK, LOJİSTİK, PERFORMANS AÇISINDAN GENİŞLETİLMİŞ İNCELEMESİ

Bir demiryolu sisteminde, balast tabakası rayların sabitlenmesi, yük aktarımı, titreşim sönümlleme ve uzun vadede hat geometrisinin korunması için temel bir elemandır. Türkiye gibi geniş topraklara sahip ve jeolojik kaynak bölgeleri birbirinden çok farklı olan bir ülkede, balast tipi seçimi sadece teknik ihtiyaçları karşılamakla kalmaz, aynı zamanda bölgesel bazlı malzemelere erişim, lojistik ve afet riski gibi faktörleri de içerir. Bu tür bir yapının sürdürülebilirliği; ekonomik olup olmadığı, bakımın ne sıklıkla yapılması gerektiği ve yol güvenliği, kullanılan balast türüne bağlıdır.

Mühendislik ile saha gerçekliği karşılaştırılarak, Türkiye’de yaygın olarak kullanılan bazalt ve granit, cüruf veya kireçtaşı ve çakıl gibi balast malzemelerinin hangi koşullarda kullanılacağı, aynı zamanda, bu malzemelerin kaynaklarını, taşıma ve lojistik süreçleri, hat geometrisine etkileri ve özellikle depremler gibi doğal afetler sırasında afet performansı incelenecektir.

13.1. Türkiye’de Balast Malzemelerinin Kaynağı ve Jeolojik Dağılımı

Türkiye’nin zengin jeolojik yapısı, çeşitli balast türlerinin doğal kaynaklarının ülke genelinde yayılmasını sağlamaktadır. Bu durum, demiryolu projelerinde yerel kaynaklardan yararlanma imkânı sunarken kalite ve erişilebilirlik açısından da farklılıklar oluşturmaktadır.

Bazalt, volkanik kökenli bir sert kayaç olup, yüksek aşınma direnci ve mekanik dayanıklılığı nedeniyle balast uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Türkiye’de Doğu Anadolu (Erzurum, Ağrı), İç Anadolu (Kayseri, Sivas) ve Güneydoğu Anadolu (Diyarbakır, Batman) bölgeleri bazalt açısından zengin alanlara sahiptir. Bu bölgelerdeki TCDD’ye bağlı taş ocakları aracılığıyla elde edilen bazalt, genellikle yüksek hızlı tren hatları gibi ana hat projelerinde kullanılmaktadır.

Granit, metamorfik süreçlerle oluşmuş son derece sert ve ağır bir kayaçtır; özellikle Batı Anadolu’da (Manisa, Aydın, İzmir çevresi) çıkarılmaktadır. Yüksek sıkışma dayanımı ve kenetlenme yeteneği sayesinde İstanbul çevresindeki banliyö ve şehir içi hatlarda tercih edilmektedir. Granit ocaklarından çıkarılan malzeme, kırma-eleme işlemlerinden geçirilerek istenilen tane dağılımına ulaşır.

Cüruf, demir-çelik endüstrisinin yan ürünü olarak endüstriyel geri dönüşüm kapsamında değerlendirilir. Karabük, Kocaeli (Gebze, Dilovası) ve İskenderun gibi sanayi bölgelerinde üretilen cüruf, genellikle düşük trafik yoğunluğuna sahip sanayi hatlarında geçici bağlantılar ve bakım hatlarında balast alternatifi olarak kullanılır. Ekonomik ve çevre dostu bir seçenek olmasının yanı sıra içeriğindeki metal artıklar nedeniyle drenaj kapasitesi düşüktür.

Kireçtaşı, sedimanter bir kayaç olarak Türkiye'nin hemen her bölgesinde bulunabilir. Özellikle Konya, Afyonkarahisar ve Toros Dağları çevresinde büyük kireçtaşı ocakları mevcuttur. Kolay işlenmesi ve uygun maliyeti dolayısıyla bölgesel hatlar ile kısa mesafeli hatlarda sıklıkla tercih edilir; ancak düşük aşınma direnci ve kırılgan yapısı nedeniyle sık bakım gerektirmektedir.

Çakıl, nehir yataklarından (örneğin Kızılırmak, Sakarya, Fırat ve Dicle) ile dere kaynaklarından doğal olarak toplanan gevşek agregalardır. Bu malzeme genellikle ekonomikliği sebebiyle depo yolları, geçici hatlar ve düşük hızlı yük taşıma hatlarında kullanılmaktadır; ancak mekanik zayıflığı nedeniyle ana hatlarda tercih edilmemektedir.

13.2. Balast Malzemelerinde Lojistik Zorluklar ve Maliyet Parametreleri

Demiryolu için balast malzemesinin taşınması tedarik zinciri açısından olduğu kadar toplam sahip olma maliyeti (TCO) bakımından da önemli bir faktördür. Taşınacak malzemenin yoğunluğu, taşıma mesafesi, ulaşım altyapısı ile nakliye yöntemi lojistik stratejisinin belirlenmesinde temel unsurlardır. Dağlık alanlara sahip Türkiye gibi ülkelerde bu faktörler yoğunlukla malzeme seçiminde etkili olmaktadır.

Ağır olan bazalt ve granit gibi yüksek yoğunluklu malzemeler genelde maden ocaklarından demiryolu güzergahlarına kara yolu veya demiryolu vasıtasıyla taşınır. Taşıma sürecinde tonaj limitleri, yakıt tüketimi ile hava koşulları gibi etkenler maliyet üzerinde doğrudan etkide bulunmaktadır. Örneğin Sivas'tan İstanbul'a bazalt taşımak zaman anlamında zorlayıcı olduğu kadar yakıt tüketimi açısından da pahalıdır; bu nedenle bu tür malzemeler çıkış noktalarına yakın güzergahlarda değerlendirilmektedir.

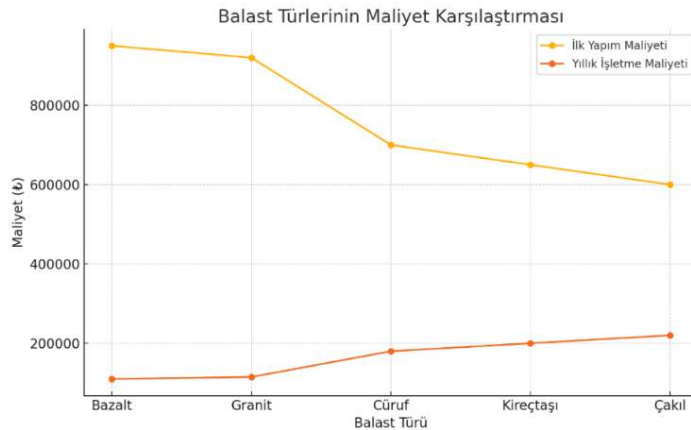
Granitin yeterli demiryolu altyapısının olmadığı durumlarda kamyonlarla taşınması gerekmektedir; Aydın-İzmir gibi bölgelerden İstanbul'a yapılan nakliyelerde otoyol ücretleri ile kamyon bakımı gibi masraflar toplam taşıma maliyetini artırmaktadır. Ayrıca granit gibi ağır materyallerin yükleme-boşaltmasında özel ekipman ihtiyacı operasyon sürelerini uzatmaktadır.

Cürufun lojistiği ise üretim tesisinden balast kullanım noktasına olan mesafeye bağlıdır; örneğin Karabük Demir Çelik Fabrikasından alınan cüruf Ankara civarında etkin kullanılabilirken İzmir'e taşınması hem ekonomik değildir hem de malzeme stabilitesini bozabilir.

Hafif olan kireçtaşı ve çakıl, kısa mesafe taşımalar için uygundur; özellikle Konya, Afyon ve Eskişehir'de çıkarılan kireçtaşı buralardaki ikincil demiryolu hatlarında düşük maliyetli bir çözüm sunar. Çakıl ise genellikle nehir kenarlarında bolca bulunduğundan inşaat alanlarına doğrudan ulaştırılabilir; ancak bu tür materyallerin taşınmasında tozuma veya dağılma gibi sorunların yanı sıra nemlenme de göz önünde bulundurulmalıdır ki bunlar kaliteyi düşürücü etkilere neden olabilir.

Türkiye genelinde balast taşımada yaygın yöntemler arasında kamyonlar, vagonlar veya bantlı konveyör sistemleri bulunmaktadır; her yöntemin kendine has avantajları ile dezavantajları vardır. Kamyon taşımacılığı esnek olsa da şehir içi trafik engelleri ile yakıt masrafları dezavantaj yaratabilmektedir. Vagonla taşımada ise daha fazla miktarda balastı uzak mesafelere ekonomik şekilde ulaştırabilmesine karşın uygun yükleme-boşaltmaya yönelik özel rampalara ihtiyaç duyulması gerekir.

Farklı balast türlerinin ilk kurulum maliyetleri ile yıllık bakım harcamaları arasında belirgin farklar mevcuttur: Bazalt ve granit daha yüksek başlangıç maliyetlerine sahipken uzun ömürlü olmaları sayesinde toplam maliyetleri daha düşüktür; cüruf ise kireçtaşı ile çakıl gibi maddeler başlangıçta daha ucuz görünse de uzun vadede yüksek bakım gereksinimleri sebebiyle daha pahalı hale gelmektedir. Şekil 13.2.1'de ilk yapım ve işletme maliyetlerinin karşılaştırması yapılmıştır.



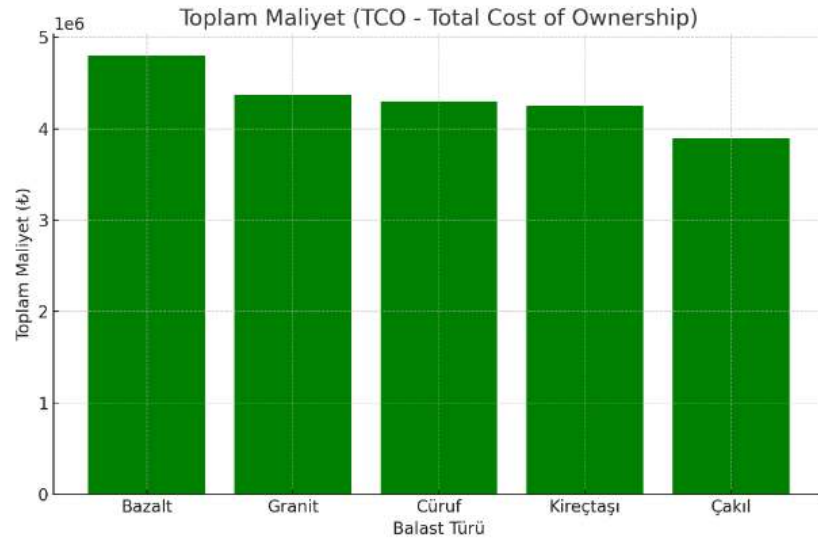
Şekil 13.2.1. İlk yapım ve yıllık işletme maliyetlerinin balast türlerine göre karşılaştırılması.

Maliyetlerin km başına TL olarak masraf karşılaştırması tablo 13.2.1.'de yapılmıştır. Tablodan yola çıkarak, balast ömrü eşit olarak düşünülecek olursa, cüruf, kireçtaşı ve çakıl malzemelerinin toplam maliyeti, bazalt ve graniti geçecektir.

Tablo 13.2.1. *Balast- Maliyet- ömür karşılaştırması*

Malzeme	İlk Yapım Maliyeti (₺/km)	Yıllık İşletme Maliyeti (₺/km)	Ömür (yıl)	Toplam Maliyet (₺)
Bazalt	950000	110000	35	4800000
Granit	920000	115000	30	4370000
Cüruf	700000	180000	20	4300000
Kireçtaşı	650000	200000	18	4250000
Çakıl	600000	220000	15	3900000

Şekil 13.2.2'de ise Tablo 13.2.1'in görselleştirmesi yapılmıştır.



Şekil 13.2.2. *Balast toplam maliyet grafiği*

14. HAT GEOMETRİSİ VE BALAST UYUMU

Demiryolu hatlarının geometrisi, ray açıklığı, eğim, eğrilik yarıçapı ve superelevasyon (dış ray yüksekliği) gibi parametrelerle tanımlanır. Bu parametrelerin korunması, hem hat güvenliği hem de trenlerin sarsıntısız hareket edebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Balast malzemesi, bu geometrik özelliklerin sabit kalmasını sağlayan bir taşıyıcı katman işlevi görür. Kalitesiz veya uygun olmayan balast, zamanla hat geometrisinin bozulmasına, rayların yatmasına ve açıklıkların değişmesine yol açarak hız sınırlarını düşürebilir.

Yüksek mekanik dayanım sergileyen bazalt ve granit gibi açılı taneli malzemeler, taneler arasında kilitleme oluşturarak ray tabanına uygulanan yükü eşit ve kontrollü bir şekilde zemine iletir. Bu tür balastlar özellikle yüksek hızlı tren hatlarında ve keskin eğimlere sahip dağ yollarında tercih edilmektedir. Bazaltın kayma direnci ile granitin sertliği, rayların yatmasını engellemektedir. Örneğin, Ankara-Sivas YHT hattında bazalt balast kullanılarak hat geometrisinin uzun süre korunması sağlanmıştır.

Öte yandan kireçtaşı ve çakıl gibi daha yumuşak yapılı, yuvarlak ve köşesiz taneler zamanla rayların altından kayarak boşluklar oluşturabilir. Bu durum özellikle eğimli arazilerde ray yataklarının yana kaymasına, virajlarda dışa açılma veya içe göçme gibi geometrik bozulmalara sebep olur. Ayrıca sıkışma kapasitesinin zayıf olması nedeniyle superelevasyon farkları gibi ince ayarlar zamanla etkisiz hale gelir. Bu tür malzemeler genellikle düşük hızlı manevra yollarında kullanılsa da geometrik tutarlılık açısından risk taşımaktadır.

Cüruf balast olarak kullanıldığında başlangıçta sert taneli görünse de zamanla su ve yüklere maruz kaldığında parçalanarak çamurumsu bir tabaka oluşturabilir; bu da ray tabanında stabil olmayan bir ortam yaratır. Özellikle eğimli hatlarda bu tür çökelmeler hat açıklığını etkileyebilir ve kenar açıklık bozulmalarına neden olabilir.

Hat geometrisi üzerinde balastın etkisini değerlendirmek amacıyla periyodik ölçüm sistemleri kullanılmaktadır. TCDD, yol geometrisi ölçüm trenleri ile ray açıklığı, sehim ve eğim bozulmalarını belirleyerek hangi bölümlerde balast eksikliği veya çökme olduğunu tespit eder. Bu veriler doğrultusunda mekanik özellikleri yüksek olan balast malzemelerine öncelik verilmektedir. Ayrıca geogrid ile takviye edilmiş balast sistemleri bu deformasyonları azaltmak için umut vaat eden çözümler arasında yer almaktadır.

15. DEPREM GİBİ AFETLERDE BALAST PERFORMANSI

Türkiye'nin Alp-Himalaya kuşağında bulunması nedeniyle aktif bir deprem kuşağındadır; bu durum demiryolu altyapısının depreme dayanıklı olmasını zorunlu kılmakta ve özellikle hat altı yapılarının (balast, alt balast, zemin) yüksek performans göstermesi gerekmektedir. Balastın afet koşullarındaki performansı sıkışabilirlik, yer değiştirme direnci, titreşim sönümleme kapasitesi ve drenaj özelliklerine bağlıdır.

Yüksek dayanımlı bazalt ve granit gibi malzemeler deprem sırasında ray açıklığı bozulmalarını minimize ederler; sert ve açılı taneleri sayesinde deformasyonlara karşı direnç gösterirler. Örneğin 2020 Elazığ Depremi sonrası yapılan teknik incelemelerde bazalt balast kullanılan hatlarda ray açıklığına ilişkin bozulmaların çok düşük seviyelerde kaldığı bildirilmiştir. Benzer şekilde 2023 Kahramanmaraş merkezli depremlerde granit balast kullanılan bölümlerde herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir.

Diğer yandan kireçtaşı ve çakıl gibi daha yumuşak yapıli malzemeler dinamik yükler altında yer değiştirme eğilimindedirler; bu nedenle deprem anında çökme veya boşluk oluşumu gibi sorunlara yol açabilmektedirler. Özellikle gevşek çakıl dolgulu hatlarda ray kaymaları ve superelevasyon bozulmaları yaşanmıştır.

Cürufun deprem dayanıklılığı homojenliğine ve üretim kalitesine bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir; bazı sanayi hatlarında drenaj eksikliğinden dolayı balast altında su birikip sıvılaşmaya benzer zemin davranışları gözlemlenmiştir ki bu durum depremler sırasında ray hattının oturmasına veya devrilmesine yol açabilir.

Son yıllarda geliştirilmiş neoballast ve geosentetik takviyeli balast sistemleri deprem enerjisini sönümleme konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Elastomerik kaplamalı taşlar titreşimleri emerek ray altı hareketini azaltırken; geogrid destekli sistemler ise kesme direncini artırarak balastın kaymasını engellemektedir. Bu sistemlerin TCDD altyapısına entegrasyonu için pilot çalışmalar İstanbul ve Eskişehir'de başlatılmıştır.

Depremler sonrası sahada gerçekleştirilen ölçümler göstermiştir ki hat geometrisinin korunmasında yalnızca balastın kalitesi değil aynı zamanda serme kalınlığı, sıkıştırma yöntemi ile alt tabaka durumu da büyük önem arz etmektedir; bu nedenle TCDD'nin aktif fay zonlarından geçen hatlarda yüksek kaliteli balast kullanımı ve düzenli bakım stratejisine yönelmesi gereklidir. Görsel 15.1.'de depremden hasar görmüş bir ray görülmektedir.



Görsel 15.1. *Deprem hasarı almış demiryolu (AFAD 2023)*

16. RAYLI SİSTEMLERDE BALASTIN GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM KONTROLÜNDEKİ ROLÜ

Raylı sistemlerde gürültü ve titreşim hem yolcu konforu hem de çevresel etkiler açısından önemli bir mühendislik sorunu teşkil etmektedir. Modern kentleşme ve hızlı tren uygulamalarının artmasıyla birlikte, demiryolu hatlarının geçtiği bölgelerdeki gürültü ve titreşimin azaltılması gerekliliği ön plana çıkmıştır. Bu noktada, balast tabakası yalnızca rayların stabilitesini sağlamakla kalmaz; aynı zamanda raydan zemine iletilen mekanik enerjinin emilmesi ve sönümlenmesinde de önemli bir rol oynar.

16.1. Gürültü Kaynakları ve Balastın Önemi

Demiryolu kaynaklı gürültü, esasen tekerlek-ray teması, ray bozuklukları, tren hızları ve altyapı bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Tekerlekler ile raylar arasındaki etkileşim sonucu oluşan titreşimler, raydan traverslere geçerek oradan da balast ve altyapıya aktarılır. Raylı taşıtlardan yayılan gürültüler üç ana kategoriye ayrılabilir: tekerlek-ray etkileşimi nedeniyle oluşan yuvarlanma gürültüsü, ray hatalarından kaynaklanan darbe gürültüsü ve araçlardan yayılan mekanik gürültü. Bu sesler yer üzerinden binalara ve çevreye yayılırken, balastın sönümleme etkisi sayesinde belirli bir ölçüde azalabilmektedir.

Titreşim ise trenin hareketiyle ortaya çıkan dinamik yüklerin zemin ile yapı elemanlarına iletilmesiyle meydana gelir. Titreşimin şiddeti; balastın türüne, kalınlığına ve serme yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Balastın elastik yapısı sayesinde raydan gelen titreşimleri sönümlendirerek hem ray hattının ömrünü uzatır hem de çevresel konforu artırır.

16.2. Balast Malzemelerinin Titreşim ve Gürültü Sönümlemedeki Performansı

Balastın titreşim ve gürültüyü sönümleme kapasitesi, malzemenin elastik modülü, tane şekli, boyutu, yoğunluğu ve taneler arasındaki bağlantı ile doğrudan ilişkilidir. Granit ve bazalt gibi yüksek yoğunluklu malzemeler, titreşimi etkili bir şekilde emme yeteneğine sahiptir. Mekanik olarak dayanıklı olan köşeli taneler arasında meydana gelen sürtünme ve kilitlenme sayesinde titreşim enerjisinin büyük bir kısmını sönümlendirebilirler.

Özellikle yüksek hızlı tren hatlarında granit veya bazalt balast kullanımı tercih edilmektedir; bu durum yüksek frekanslı titreşimlerin ve ani darbelerin etkili biçimde sönümlenmesi açısından kritik önem taşır. Granit ve bazalt balastlar, enerji yayılımını

yatay ve dikey olarak gerçekleştirir; bu da enerjinin zemine emilmesini kolaylaştırır ve ray-travers sisteminin ömrünü uzatır.

Titreşim ve gürültü azaltımı aynı zamanda yolcu konforu, taşınan hassas yüklerin titreşimlerden etkilenmemesi gibi nedenler için de önemlidir. Yolcu konforunun yüksek olması, daha fazla insanın yolculuklarında demiryolunu tercih etmesi, dolayısıyla da demiryolu yolcu taşımacılığının devamlılığını sağlamak için de önemli bir etkidir. Aynı zamanda bir tren yapısını oluşturan parçaların birleşim noktalarında zamanla titreşime bağlı yorulmaların önüne geçilmesi içinde, titreşimin azaltılması önemlidir.

Kireçtaşı daha yumuşak yapısıyla granit veya bazalt gibi sert malzemelere kıyasla daha düşük bir titreşim sönümleme kapasitesine sahiptir. Kireçtaşı taneleri zamanla aşındıkça yuvarlaklaşmakta olup bu durum aralarındaki sürtünme oranını azaltmaktadır. Sonuç olarak kireçtaşı balast tabakasında titreşim enerjisi daha az sönümlenirken zemine daha fazla iletilmektedir. Kireçtaşı balast genellikle düşük hızlı tren hatlarında ya da kırsal alanlarda tercih edilirken; şehir içindeki hatlar veya yüksek hızlı tren projelerinde gürültü yönetimi konusunda yeterli olmayabilir.

Çakıl, doğada genellikle yuvarlak ve düzgün taneler halinde bulunur. Bu tanelerin birbirine kilitlenmesi, köşeli agregalara kıyasla daha az etkilidir. Bu nedenle, titreşim ve gürültü sönümleme yetenekleri düşüktür. Çakıl balastı, düşük hızlı hatlarda veya geçici projelerde kullanılma potansiyeline sahiptir. Yuvarlak yapısı nedeniyle dinamik yükler altında tanelerin kayması kolaydır; bu da ray açıklığı ile hat geometrisinde bozulmalara yol açabilir. Ayrıca, çakıl balastlı sistemlerde çevresel gürültü şikayetleri daha sık rastlanır.

Cüruf balastı ise bir endüstriyel atık malzeme olarak değerlendirilir ve başlangıçta gözenekli yapısı sayesinde titreşim ve gürültü sönümlemede olumlu etkiler gösterebilir. Ancak zamanla tanelerin parçalanması ve ince malzeme oranının artışı, balastın sıkışmasına ve sönümleme kapasitesinin azalmasına neden olur. Cüruf balastının etkinliği, üretim kalitesi ile uygulama detaylarına bağlı olarak değişiklik gösterir.

Tablo 16.2.1.'de farklı tip balastların titreşim sönümleme, gürültü azaltma, uzun vadede dayanım ve uygulama alanları biçimlerinde karşılaştırmaları yapılmıştır. Tabloda görülebileceği üzere, yüksek hızlı hatlarda granit ve bazalt malzemeleri yüksek titreşim sönümleme, iyi gürültü azaltma ve uzun vadedeki yüksek dayanımları sebebiyle tercih edilmektedir. Yine de hattın kullanım amacı ve ekonomik nedenler dolayısıyla alternatif balast malzemeleri tercih edilebilir.

Tablo 16.2.1: *Balast Türlerinin Gürültü ve Titreşim Sönümleme Karşılaştırması*

Balast Türü	Titreşim Sönümleme	Gürültü Azaltma	Dayanım (Uzun Vadede)	Uygulama Alanı
Granit	Çok İyi	İyi	Yüksek	Ana hatlar, YHT
Bazalt	Çok İyi	İyi	Yüksek	Ana hatlar, YHT
Kireçtaşı	Orta	Orta	Orta	Kırsal, ikincil hatlar
Çakıl	Zayıf	Düşük	Düşük	Depo yolları
Cüruf	Orta	Orta	Düşük/Orta	Geçici hatlar

16.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri

İsviçre ve Almanya gibi ülkelerde yapılan saha çalışmaları, granit ve bazalt balast kullanılan hatlarda çevresel gürültü seviyesinin %30'a kadar azaldığını göstermektedir (Selig & Waters, 1994; Indraratna et al., 2011). Türkiye'de, TCDD'nin Ankara-Eskişehir yüksek hızlı tren hattında granit balast kullanımı, yolcu konforu ve çevresel gürültü açısından başarılı sonuçlar vermiştir. Kireçtaşı balast kullanılan konvansiyonel hatlarda ise, sık bakım ve periyodik balast temizliği yapılmasına rağmen, titreşim ve gürültü şikayetleri daha fazladır.

16.4. Değerlendirme

Gürültü ve titreşim sönümlemesi için balast seçimi, yolcu konforu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından son derece önemlidir. Granit ve bazalt balast, uzun dönemli düşük bakım maliyetleri, yüksek performans ve çevre dostu çözümler sağlarken; kireçtaşı, çakıl ve cüruf gibi malzemelerin yalnızca düşük hızlı veya ikincil hatlarda kullanılması önerilmektedir.

17. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE BALAST PERFORMANSI

Küresel iklim değışikliğı, demiryolu altyapılarında yeni mühendislik zorluklarını ortaya çıkarmıştır. Artan sıcaklık dalgaları, yoğun yağışlar ve don-çözölme döngülerindeki sıklık artışı, balast malzemelerinin performansında önemli dalgalanmalara yol açmaktadır. Demiryolu hatlarının güvenliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla, balast malzemelerinin iklimsel strese dayanıklılığı mühendislik tasarımı ve malzeme seçiminde kritik bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

17.1. Aşırı Yağış ve Drenaj Sorunları

İklim değışikliğinin en belirgin etkilerinden biri, ani ve şiddetli yağış olaylarının artış göstermesidir. Yoğun yağışlar sırasında balast tabakasında su birikmesi, drenaj kapasitesinin azalmasına, balastın kirlenmesine ve taşıma gücünün düşmesine neden olmaktadır. Balastın gözenekliliğı, tane boyu dağılımı ve taneler arası boşluk oranı, suyun hızla uzaklaştırılmasında önemli rol oynar.

Granit ve bazalt, düşük gözeneklilikleri ile açılı tane yapıları sayesinde yağış sonrası suyun hızlı bir şekilde drene edilmesini sağlar. Ayrıca bu malzemelerin düşük su emme oranları, tanelerin su ile temas ettiğı durumda şişmesini engeller. Kireçtaşı ise gözenekli yapısı nedeniyle daha fazla su emer; bu durum zamanla taneler arasındaki boşlukların ince malzeme ile dolmasına yol açarak drenaj kapasitesini azaltır. Çakıl yüksek gözenekliliğıne sahipken ince malzeme birikimiyle sıkça tıkanma riski taşımaktadır. Cüruf başlangıçta iyi drenaj sağlasa da zaman içinde parçalanma ve ince malzeme oluşumu nedeniyle drenaj yeteneğı bozular. Görsel 17.1.1.'de suyu drene edememiş hat görölmektedir.



Görsel 17.1.1. Yetersiz drenaj (KGM 2021)

17.2. Don-Çözülme ve Sıcaklık Dalgalanmaları

Don-çözülme döngüleri kış aylarında balast tabakasında ciddi hasarlara neden olabilir. Balast içindeki suyun donması, taneler arasında genişlemeye sebep olur; bu durum tanelerin çatlamasına ve balastın ayrışmasına yol açabilir.

Granit ve bazalt gibi malzemeler düşük su emme özellikleri ile yüksek mekanik dayanımları sayesinde don-çözülme etkilerine karşı en dayanıklı seçeneklerdir; uzun vadede tanelerin bütünlüğünü korurlar. Kireçtaşı ise suya yatkınlığı nedeniyle don-çözülme esnasında hızla parçalanır; bu durum balast tabakasının genel performansını olumsuz etkiler. Çakıl ise içerdiği su nedeniyle donma halinde gevşeyip hareketlilik kazanır. Cüruf ise gözenekli yapısı gereği donma-çözülme döngüsünden oldukça fazla etkilenir.

Sıcaklık dalgalanmaları ise raylarda genişleme ve daralmaya, balastın gevşemesine veya sıkışmasına yol açar. Özellikle uzun süreli sıcak hava dalgalarında, düşük yoğunluklu balastlar ray açıklığında bozulmalara neden olabilir.

İklim şartlarının gündelik hayatta kullanılan tüm araç, yapı ve yol gibi elemanlara etkisi olduğu gibi, demiryolu hattına da etkisi büyüktür. Bu noktada hatta kullanılmak üzere seçilen balast malzemesinin yetersiz özelliklerde seçilmesi, hatta birçok olumsuzluğa sebep olabileceği gibi, kazaların oluşmasına varan sonuçları olabilir. Dolayısıyla balast seçimi yapılırken iklim etkisi göz ardı edilmemelidir.

17.3. Literatür ve Saha Gözlemleri

Avrupa’da yapılan araştırmalarda (Indraratna et al., 2011; Selig & Waters, 1994), granit ve bazalt balast kullanılan hatlarda don-çözülme kaynaklı deformasyonların %80 oranında daha az olduğu belirtilmiştir. Türkiye’de, Doğu Anadolu Bölgesi’nde bazalt balast kullanılan hatlarda, kış aylarında hat geometrisinin daha iyi korunduğu gözlenmiştir. Kireçtaşı kullanılan hatlarda ise, kış sonrası bakım maliyetlerinin arttığı, balast tabakasının sık sık yenilenmesi gerektiği rapor edilmiştir. Dolayısıyla hat balast seçimi yapılırken, hat özelliklerine bulunduğu coğrafi bölgenin şartları göz önüne alınarak seçim yapılmalıdır.

Tablo 17.3.1.’de iklime bağlı balast dayanımı karşılaştırması yapılmış ve bu bağlamda granit ve bazalt balastların iklime karşı daha dayanıklı özellikler sergilediği görülebilen, çakıl, kireçtaşı ve cürufun performans olarak iklime karşı yetersiz performans gösterdiği görülmektedir.

Tablo 17.3.1. İklimle ilgili balast dayanımı

Balast Türü	Don-Çözülme Direnci	Su Emme	Sıcaklık Dayanımı	İklimsel Risk
Granit	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Bazalt	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Kireçtaşı	Orta	Orta	Düşük	Orta
Çakıl	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek
Cüruf	Düşük-Orta	Orta	Orta	Yüksek

17.4. Değerlendirme

İklim değişikliğine bağlı riskler, mühendislik uygulamalarında balast seçimlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Granit ve bazalt gibi yüksek donma-çözülme direncine ve su emme kapasitesine sahip olan balast türleri, iklimsel streslere karşı en iyi performansı göstermektedir. Kireçtaşı, çakıl ve cüruf ise sadece düşük riskli ve ekonomik hatlarda tercih edilmelidir. Ayrıca, iklim değişikliği etkilerine karşı balast altındaki drenaj sistemlerinin geliştirilmesi ve düzenli bakım süreçlerinin artırılması önem arz etmektedir.

18. BALAST VE RAYLI SİSTEM GÜVENLİĞİ İLİŞKİSİ

Demiryolu sistemlerinde güvenlik, altyapının bütünlüğü ile üstyapının sağlamlığı arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Balast tabakası, rayların doğru konumda kalmasına, dinamik yüklerin etkilerinin azaltılmasına ve raydan çıkma olasılığının düşürülmesine yardımcı olur. Yanlış seçilen ya da zamanla işlevini yitiren balast, rayların kaymasına, hat geometrisinin bozulmasına ve ciddi güvenlik sorunlarına yol açabilir.

18.1. Güvenlik Açısından Balastın İşlevleri

Raylı sistemlerde güvenlik, yolcuların ve yüklerin emniyetle taşınmasını sağlamak ve altyapı hasarlarını en aza indirmek demektir. Balastın güvenlikle ilişkili önemli işlevleri şunlardır:

- **Ray Geometrisinin Korunması:** Rayların açıklığı, eğimi ve hizası balast tabakasının stabilitesiyle doğrudan ilişkilidir. Yetersiz veya zayıf balast, ray açıklığındaki değişikliklere ve olumsuz durumlara neden olabilir.
- **Yük Dağılımı:** Balast, raylardan gelen dinamik yükleri geniş bir alana yayarak altyapıyı korur. Dayanıklı balastlar, yükün altyapıya daha dengeli bir şekilde iletilmesini sağlar.
- **Darbe ve Titreşim Sönümleme:** Dinamik yüklerin etkisini azaltarak altyapı bileşenlerinin yorulmasını önler.
- **Bakım Sıklığı ve Güvenlik:** Sürekli bakım gerektiren balast türleri bakım sırasında hat güvenliğini geçici olarak azaltabilir; bakım aralıklarının uzaması ise güvenlik risklerini artırır.

18.2. Balast Türlerinin Güvenliğe Etkileri

Granit ve bazalt gibi malzemeler yüksek mekanik dayanım ve aşınma direnci sunarak ray açıklığı ile hattın geometrik stabilitesinin korunmasında en iyi performansı gösterir. Bu malzemeler yüksek hızlı tren hatlarında tercih edilirken; raydan çıkma riski ile deformasyon oranı minimum düzeyde kalır.

Kireçtaşı ise mekanik dayanımı düşük olduğundan zamanla aşınmakta; taneler yuvarlaklaşmakta ve bu nedenle sık sık bakım ihtiyacı doğmaktadır. Eğer düzenli bakım yapılmazsa, bu durum ray geometrisinin bozulmasına yol açarak güvenlik açıkları oluşturabilir.

Çakıl ise düşük kilitlenme kapasitesi nedeniyle rayların kaymasını kolaylaştırmakta olup yalnızca düşük hızlı veya geçici hatlarda kullanılmalıdır.

Cüruf başlangıçta yeterli görünse de zamanla parçalanıp ince malzeme oranı arttığında balast tabakası sıkışmakta; drenaj ve stabilite kaybolmakta böylece güvenlik riskleri artmaktadır.

Tablo 18.2.1. *Balast Türlerinin Güvenlik Performansı*

Balast Türü	Mekanik Dayanım	Geometrik Stabilite	Bakım Sıklığı	Güvenlik Açısından Risk
Granit	Çok Yüksek	Yüksek	Az	Düşük
Bazalt	Yüksek	Yüksek	Az	Düşük
Kireçtaşı	Orta	Orta	Sık	Orta
Çakıl	Düşük	Düşük	Çok sık	Yüksek
Cüruf	Orta	Düşük	Sık	Orta/Yüksek

18.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri

TCDD, yüksek hızlı tren hatlarında granit ve bazalt balast kullanarak raydan çıkma ve hat deformasyonu riskini minimize etmiştir (TCDD, 2021). Kireçtaşı ve çakıl balast kullanılan konvansiyonel hatlarda ise, özellikle yağış ve don-çözülme sonrası hat geometrisinde bozulmalar ve güvenlik riski artmaktadır (Yıldız & Çakır, 2018).

18.4. Değerlendirme

Hat güvenliğinin sağlanabilmesi için balast malzemesinin yüksek mekanik dayanım ve tane kilitlenmesine sahip olması şarttır. Granit ve bazalt, güvenlik öncelikli hatlarda tercih edilirken; düşük dayanıklılığa sahip malzemeler yalnızca az yük taşıyan ve düşük hızlı hatlarda kullanılmalıdır.

19. BALAST ALTI ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Balast tabakasının bulunduğu zemin, hattın uzun vadeli stabilitesi ve yük taşıma kapasitesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Zayıf zemin koşullarında, balast altı iyileştirme yöntemleri hem yük taşıma kapasitesini artırır hem de ray açıklığı ile geometrisinin korunmasına yardımcı olur. Balast altı zemin iyileştirmesi, özellikle zayıf, gevşek veya suya doygun alanlarda balast performansını artırmak amacıyla gereklidir.

19.1. Zemin İyileştirme Teknikleri

19.1.1 . Mekanik stabilizasyon

Zemin sıkıştırılması, taşıma kapasitesini yükseltir. Ağır silindirlerle yapılan sıkıştırma işlemi, zemindeki boşluk oranını azaltarak balast tabakasının yer değiştirme riskini minimize eder. Görsel 19.1.1.1.'de balast sıkıştırma makinesi görülmektedir.



Görsel 19.1.1.1. Balast sıkıştırma makinesi (Plasser & Theurer 2022)

19.1.2. Geosentetik takviyeler

Geotekstil ve geogrid uygulamaları, balast tabakasının kaymasını engeller, yükün zemine daha geniş bir alanda dağılmasını sağlar ve oturma miktarını azaltır. Ayrıca, geosentetikler drenajı artırarak balastın kirlenmesini önler. Görsel 19.1.1.2 ve Görsel 19.1.1.3.' te sırasıyla geogrid ve geosentetik malzemeler görülmektedir.



Görsel 19.1.1.2. *Geogrid (Maccaferri 2023)*



Görsel 19.1.1.3. *Geosentetik (TenCate 2021)*

19.1.3. Kimyasal stabilizasyon

Kireç, çimento veya özel katkı maddeleri kullanılarak zemin mukavemeti artırılır. Özellikle killi zeminlerde kimyasal stabilizasyon ile balastın taşıyıcı tabakası güçlendirilir.

19.1.4. Enjeksiyon yöntemleri

Zemine enjeksiyon yoluyla çimento veya kimyasal bağlayıcılar eklenerek mukavemet artırılır; bu yöntem özellikle bataklık veya suya doymun alanlarda uygulanmaktadır.

19.2. Balast Türlerinin Zemin İyileştirmesiyle Etkileşimi

- Granit ve Bazalt: Sert ve açılı taneler, iyileştirilmiş zeminlerde yüksek performans sergileyerek geosentetiklerle birlikte uzun ömürlü ve stabil bir üst yapı oluşturur; bu kombinasyon özellikle yüksek hızlı ve ağır yük hatlarında tercih edilmektedir.
- Kireçtaşı: Zemin iyileştirme ile performansı arttırılabilir; ancak mekanik dayanımı düşük olduğu için uzun vadede granit ve bazalt kadar etkili olamaz.
- Çakıl: Zemin iyileştirilmese bile yeterli stabiliteye ulaşması zor olabilir; yuvarlak taneler oturma ve kayma riskini azaltmaz.
- Cüruf: Drenaj ve stabiliteyi arttırmak için zemin iyileştirmesi yapılabilir; ancak tanelerin parçalanma riski devam etmekte olup uzun vadede performans kaybı yaşanabilir.

Tablo 19.2.1.' de zemin iyileştirmesi işlemleri yapıldığı takdirde farklı tür balast malzemelerinin iyileştirmeye karşı verdikleri tepkiler görülmektedir. Bu bağlamda granit ve bazaltın iyileştirme işlemine karşı daha başarılı tepkiler verildiği görülmektedir.

Yine de diğer balast malzemeleri de zemin iyileştirmesine karşı tamamen cevapsız değildir. Kireçtaşı balast kullanılan bir hatta orta vadeli bir kazanç sağlanabilirken, çakıl ve cüruf balastları, zemin iyileştirme uygulansa dahi, kimyasal uygulamalara karşı uyumlulukları da az olduğundan, istenilen sonuçlara ulaşılamaz.

Dolayısıyla zemin iyileştirme uygulaması balastlı altyapı için bakım periyodlarının artması, hat stabilizasyonun artması gibi birçok olumlu etkiye sahiptir. Bu bağlamda kullanılan balast malzemesi ne olursa olsun, iyileştirme yapılabilir. Zemin iyileştirme balast malzemesinden fark etmeksizin yapılabilir olsa da, maliyetli bir işlemdir. Ancak uzun vadede hat bakım maliyetlerinin azaltılması yönünden avantaj sağlayacağından, uzun vadeli avantajları sebebiyle demiryolu projelerinde uygulanması mutlaka değerlendirilmelidir. Zemin iyileştirme uygulamaları yapılırken, mutlaka dikkatli olunmalı, kullanılan malzemeye zarar verilmemelidir. Dolayısıyla alanında uzman çalışanlar tarafından uygulanması büyük önem taşımakta, uzun vadede işlemin doğru yapılması büyük oranda avantaj sağlamaktadır.

Tablo 19.2.1. *Balast Türlerinin Zemin İyileştirmesi Sonrası Performans Karşılaştırması*

Balast Türü	Geosentetik ile Uyum	Kimyasal Stabilizasyon Cevabı	Sonuç
Granit	Çok iyi	Çok iyi	Uzun ömür, yüksek stabilite
Bazalt	Çok iyi	Çok iyi	Benzer şekilde yüksek performans
Kireçtaşı	Orta	İyi	Orta vadeli kazanç
Çakıl	Zayıf	Zayıf	Geçici çözüm
Cüruf	Orta	Orta	Kısa vadeli iyileşme

19.3. Türkiye’den Uygulama Örnekleri

TCDD, Konya–Karaman ve Ankara–Sivas hatlarında zayıf zeminler için geosentetik takviyeli balast uygulamış ve stabiliteyi artırmak amacıyla granit/bazalt balast kullanmıştır. Kireçtaşı balast ile döşenmiş hatlarda ise, geosentetik malzeme kullanılsa bile bakım sürelerinin kısaltılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

19.4. Değerlendirme

Balast altındaki zemin iyileştirme yöntemleri, özellikle zayıf zeminlerde balastın performansını artırmak adına kaçınılmazdır. Yüksek dayanımlı balastlarla birlikte uygulandıklarında, raylı sistemlerin güvenliği, ömrü ve bakım maliyetleri daha verimli hale getirilmektedir.

20. BALAST YÖNETİMİNDE DİJİTALLEŞME VE AKILLI SİSTEMLER

Demiryolu altyapısının yönetiminde dijitalleşme ile akıllı sistemlerin entegrasyonu, bakım süreçlerinin etkinliğini artırmakta; kestirimci bakım uygulamaları ve genel sistem verimliliği üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Balast yönetimi alanında büyük veri, IoT (nesnelerin interneti), uzaktan izleme teknolojileri, yapay zekâ destekli analizler ve dijital ikiz uygulamaları, arızaların tahmin edilmesi ve bakım planlaması açısından yeni bir dönem başlatmaktadır.

20.1. Akıllı Balast İzleme Sistemleri

20.1.1. Sensörler

Balast tabakasına entegre edilen titreşim, sıcaklık, nem ve deformasyon sensörleri aracılığıyla sürekli veri toplanır. Bu sensörler, balastın deformasyonunu, titreşim seviyesini ve nem oranını anlık olarak takip ederek bakım ihtiyaçlarının önceden tespitine katkıda bulunur.

Demiryolu yapısında kullanılan bu sensörler, özellikle 21. Yüzyılda oldukça hızlı gelişen çeşitli teknolojilerin demiryolu işletmesini kolaylaştırmakta, bakım gerekliliği ve güncel hat durumu gibi bilinmesi kritik faktörlerin, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha hızlı bir şekilde tespit edilmesini sağlar ve dolayısıyla hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmesini sağlarken, hat güvenliğinin sürekliliğinin izlenmesi konusunda büyük avantajlar sağlarlar. Görsel 20.1.1.1.'te bir ray deformasyon sensörü görülmektedir.



Görsel 20.1.1.1. Ray deformasyon sensörü (ENSCO Rail 2022)

20.1.2. Uzaktan izleme ve veri analitiği

Toplanan sensör verileri merkezi izleme ünitelerine aktarılır ve burada detaylı bir analiz sürecine tabi tutulur. Büyük veri analizi teknikleri sayesinde anomalilerin yanı sıra eğilimler ve bakım ihtiyaçları belirlenir.

20.1.3. Yapay zekâ destekli bakım planlaması

Makine öğrenimi algoritmaları geçmiş bakım kayıtlarını ve sensör verilerini değerlendirerek balastın ne zaman bakıma ihtiyaç duyabileceğini tahmin edebilir; bu sayede bakım ekipleri arızalar meydana gelmeden müdahale edebilir.

20.2. Balast Türlerinin Dijital Yönetimde Karşılaştırılması

- Granit ve Bazalt: Uzun ömürlü olup az bakım gerektiren bu türlerde dijital izleme sayesinde bakım aralıkları optimize edilebilir; böylelikle maliyetler minimum düzeye çekilir.
- Kireçtaşı ve Çakıl: Sık bakıma ihtiyaç duyan hatlarda akıllı izleme sistemleri yardımıyla arızalar erken aşamada tespit edilirken, bakım planlaması daha etkin hale gelir. Özellikle çakıl balasta yerleştirilen sensörler oturma ve kayma risklerini belirlemede faydalıdır.
- Cüruf: Yeniden kullanım potansiyeli ile performans takibi açısından akıllı sistemlerden en fazla yararlanacak malzemedir; parçalanma ve drenaj kaybı gibi sorunlar erken tespit edilebilir.

Tablo 20.2.1. Balast Türlerinin Dijital Yönetim Sistemlerine Uygunluğu

Balast Türü	Sensörle İzleme Avantajı	Yapay Zekâ ile Bakım Optimizasyonu	Notlar
Granit	Orta	Yüksek	Az bakım, uzun ömür
Bazalt	Orta	Yüksek	Benzer özellikler
Kireçtaşı	Yüksek	Yüksek	Sık bakım avantajı sağlar
Çakıl	Yüksek	Orta	Bakım planlama için önemli
Cüruf	Yüksek	Yüksek	Performans takibi kritik

20.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri

Avrupa demiryollarında ve Japonya’da balast izleme sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Kumar & White, 2019). Türkiye’de de TCDD, yüksek hızlı tren hatlarında sensör destekli bakım sistemlerine pilot uygulamalar başlatmıştır.

Dijitalleşme ve akıllı sistemler, demiryolu balast yönetiminde hem bakım maliyetlerini hem de arıza risklerini azaltmakta, sistemin genel verimliliğini artırmaktadır. Özellikle sık bakım gerektiren balastlarda bu teknolojiler büyük avantaj sağlar.



21. BALASTIN GERİ DÖNÜŞÜMÜ VE YENİDEN KULLANIMI

Sürdürülebilir altyapı hedeflerine ulaşma çabaları doğrultusunda, demiryolu endüstrisinde kullanılan balast malzemelerinin geri dönüştürülüp yeniden kullanılması giderek daha önemli hale gelmiştir. Balastın yeniden değerlendirilmesi, doğal kaynakların tüketimini azaltmakla birlikte atık miktarını da minimize ederek ekonomik ve çevresel faydalar sunmaktadır.

21.1. Geri Dönüşüm Yöntemleri

21.1.1. Balast eleme ve temizleme

Kirlenmiş balast, özel balast temizleme makineleri aracılığıyla elenmekte; ince partiküller, toprak ve organik maddeler uzaklaştırılmaktadır. Temizlenmiş balast, ana hatlar veya düşük hızlı raylarda tekrar kullanılabilir hale gelir. Modern eleme makineleri sayesinde balastın 60'a kadar yeniden kullanım oranı sağlanabilmektedir.

21.1.2. Yeniden kullanım ve alternatif değerlendirme

Temizlenen balast, ana hatlarda yeterli kalite seviyesine ulaşmasa bile depo yolları, geçici hatlar ya da yol dolguları gibi alanlarda kullanılabilir. Ayrıca geri dönüştürülmüş balast, inşaat sektöründe dolgu malzemesi olarak da işlev görmektedir.

21.1.3. Geri dönüşüm tesisleri ve standartlar

Gelişmiş ülkelerde, kullanılmış balastın yeniden demiryolu balastı olarak değerlendirilebilmesi için özel tesisler kurulmuştur. Bu tesislerde balast yıkanmakta, kırılmakta ve tekrar granülometrik sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır. Görsel 21.1.3.1.'de balast geri dönüşüm tesisi görülmektedir.



Görsel 21.1.3.1. Balast Geri Dönüşüm Tesisi (Loram 2023)

21.2. Balast Türlerinin Geri Dönüşüm Uygunluğu

Granit ve Bazalt: Yüksek dayanıklılıkları sayesinde defalarca geri dönüştürülmeleri mümkündür ve mekanik özelliklerini uzun süre korurlar.

Kireçtaşı: Aşınmaya yatkın olduğu için geri dönüşüm sırasında kalite kaybına uğrar.

Çakıl: Zaten düşük dayanıklı olduğundan geri dönüşümü ekonomik değildir.

Cüruf: Endüstriyel atık kategorisinde yer aldığı için çevresel yararları bulunmaktadır; ancak tekrar kullanıldıkça performansı düşmektedir.

Tablo 21.2.1. *Balast Türlerinin Geri Dönüşüm Uygunluk Karşılaştırması*

Balast Türü	Geri Dönüşüm Uygunluğu	Yeniden Kullanım Performansı	Çevresel Etki
Granit	Çok iyi	Yüksek	Düşük
Bazalt	Çok iyi	Yüksek	Düşük
Kireçtaşı	Orta	Orta	Orta
Çakıl	Düşük	Düşük	Orta
Cüruf	Çok iyi	Orta	Çok düşük

21.3. Literatür ve Uygulama Örnekleri

Japonya ve Avrupa ülkelerinde, balast temizleme ve geri dönüşüm oranı %70'in üzerindedir (Shenton, 1985). Türkiye'de de TCDD, özellikle YHT hatlarında balast geri dönüşüm projelerine başlamıştır. Geri kazanılan balast, ikincil hatlarda veya dolgu amaçlı kullanılmaktadır.

21.4. Değerlendirme

Geri dönüşüm hem ekonomik hem de çevresel açıdan demiryolu projelerinde sürdürülebilirliği artıran önemli bir yaklaşımdır. Yüksek dayanımlı balastlar geri dönüşümde avantajlıdır; kireçtaşı ve çakıl ise yalnızca düşük kaliteli uygulamalarda tekrar kullanılabilir.

22. BALASTIN DEMİRYOLU SİNYALİZASYON VE ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİNE ETKİSİ

Balast tabakasının elektriksel ve fiziksel özellikleri, demiryolu sinyalizasyon ve elektrifikasyon sistemlerinde altyapı güvenliği ile sinyal bütünlüğü açısından hayati bir rol oynamaktadır. Uygun olmayan balast seçimi, topraklama sorunlarına, sinyal arızalarına ve elektrik kaçaklarına sebep olabilir.

22.1. Elektriksel Özellikler ve Sinyalizasyon

Sinyalizasyon sistemlerinde balastın elektriksel yalıtkanlığı, sinyal devrelerinin düzgün çalışabilmesi ve elektriksel kaçakların önlenmesi bakımından oldukça önemlidir. Düşük iletkenliğe sahip olan balastlar, sinyal devrelerinde arıza olasılığını azaltır. Aynı zamanda, balastın iyi bir drenaj sağlaması su birikintilerinin oluşmasını engelleyerek elektriksel iletkenliği artıran faktörleri ortadan kaldırır.

- **Granit ve Bazalt:** Yüksek elektriksel dirençleri ile düşük su emme oranları sayesinde, bu malzemeler sinyalizasyon sistemleri için ideal balast seçenekleridir.
- **Kireçtaşı:** Elektriksel yalıtkanlık açısından yeterli olsa da su emme eğilimi nedeniyle uzun vadede risk oluşturabilir.
- **Çakıl:** İyi bir yalıtkanlık sağlasa da drenaj sorunları elektrik arızalarının artmasına yol açabilir.
- **Cüruf:** İçerdiği metal bileşenler nedeniyle elektriksel iletkenliği yükselme riski taşır; bu durum sinyalizasyon için tehlike arz edebilir.

22.2. Elektrifikasyon Sistemleri ve Balastın Rolü

Elektrifikasyon hatlarında, balastın elektriksel özelliklerinin önemi daha da artmaktadır. Akım sızıntısı, topraklama sorunları ve kaçak akımların engellenmesi amacıyla balastın yüksek yalıtkanlığa sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, balastın suya doygun hale gelmesi durumu, elektriksel direncini düşürerek potansiyel olarak sinyal arızalarına neden olabilir.

Sinyal arızalarının yaşanması, demiryolu hattında işletmenin kesintiye uğraması, değerli bileşenlerin kullanılamayacak hale gelmesi, demiryolu araçları arasında hat üzerinde otomatik olarak yapılan iletişimlerin kesintiye uğraması gibi birçok soruna sebebiyet verebilir. Dolayısıyla doğru balast seçimi, bu noktada kritiktir. Tablo 22.2.1’ de farklı balastların sinyalizasyon uygunlukları karşılaştırılmıştır.

Tablo 22.2.1. *Balast Türlerinin Elektriksel ve Sinyalizasyon Performansı*

Balast Türü	Elektriksel Yalıtkanlık	Drenaj	Sinyalizasyon Uygunluğu
Granit	Çok Yüksek	Yüksek	Çok iyi
Bazalt	Çok Yüksek	Yüksek	Çok iyi
Kireçtaşı	Yüksek	Orta	İyi
Çakıl	Yüksek	Orta	Orta
Cüruf	Orta	Düşük	Sınırlı/Kısıtlı

22.3. Uygulama Örnekleri

TCDD, elektrikli ve sinyalizasyonlu hatlarda granit ve bazalt balastı tercih etmektedir. Eski hatlarda kireçtaşı ve çakıl balast kullanımı, sinyal arızası ve topraklama sorunlarına yol açmıştır. Avrupa demiryollarında, balast kalitesinin sinyalizasyon güvenliği üzerindeki etkisi birçok vakada ortaya konmuştur (UIC 719, Selig & Waters, 1994).

22.4. Değerlendirme

Demiryolu sinyalizasyon ve elektrifikasyon sistemlerinde balast seçimi, sistem güvenliği ve işletme sürekliliği açısından kritik önemdedir. Yüksek yalıtkanlığa sahip, düşük su emen ve metal içermeyen balastlar tercih edilmelidir.

23. BALASTLI ÜSTYAPIDA BAKIM STRATEJİLERİ VE PLANLAMASI

Demiryolu altyapısının dayanıklı ve güvenli olması için balast tabakasının düzenli ve etkili bir şekilde bakımının yapılması elzemdir. Bakım stratejileri, balastın türü, hattın trafik yoğunluğu ve iklim koşullarına bağlı olarak belirlenmelidir. Tablo 23.1.'de farklı tip balastların bakım planlaması programları ve yöntemleri görülmektedir.

Tablo 23.1. *Balast Türlerine Göre Bakım Planlaması*

Balast Türü	Bakım Sıklığı	Bakım Yöntemi	Maliyet	Uygulama Alanı
Granit	Düşük	Eleme, izleme	Düşük	Ana hatlar
Bazalt	Düşük	Eleme, izleme	Düşük	Hızlı tren
Kireçtaşı	Yüksek	Sık temizlik	Yüksek	Kırsal/ikincil
Çakıl	Yüksek	Sık temizlik	Yüksek	Depo yolları
Cüruf	Orta	Eleme, izleme	Orta	Sanayi hatları

23.1. Literatür ve Uygulama Örnekleri

Almanya, İsviçre ve Fransa'da granit ve bazalt balast kullanılan hatlarda bakım maliyetlerinin %40 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Esveld, 2001; Indraratna et al., 2011). Türkiye'de, YHT hatlarında granit balastın bakım aralığının 12 yıla kadar çıktığı, kireçtaşı balastlı konvansiyonel hatlarda ise 3–5 yılda bir bakım gerektiği görülmüştür.

23.2. Değerlendirme

Bakım stratejileri, balastın türüne ve hattın kullanım koşullarına göre belirlenmeli, yüksek performanslı balastlarda bakım aralıkları uzun tutulabilir. Sık bakım gerektiren balastlarda ise akıllı izleme ve hedefli bakım yöntemleriyle maliyet ve süre optimize edilmelidir.

24. ESKİŞEHİR-ANTALYA YÜKSEK HIZLI TREN HATTI İÇİN BALAST SEÇİMİNİN YAPILMASI

Bu kısımda Eskişehir-Antalya arasına yapılması planlanan hızlı tren hattında kullanılabilecek balast tipleri, lojistik, maliyet, dayanım gibi birçok yönden incelenip, seçimler yapılacaktır. Hat Eskişehir bölgesi, Burdur bölgesi ve Antalya bölgesi olarak üç farklı kısma ayrılarak incelenecektir. Örnek bir toplam maliyet tablosu oluşturulacaktır.

24.1. Hızlı Tren Altyapısı için Gerekli Balast Özellikleri

Hızlı trenler yüksek hızlarda hareket eden raylı system araçlarıdır ve ülkemizde yolcu taşımacılığı için kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla can güvenliğinin sağlanması, yolcu konforunun standartlar dışında olmaması için birçok etken önem gösterir. Bunlardan birisi hat altyapısında kullanılan balasttır. Hızlı tren hatlarında kullanılan balastın özellikleri tablo 24.1.1.'deki gibi olmalıdır:

Tablo 24.1.1. Hızlı tren hattı balast teknik özellikleri

Özellik	Açıklama	Standart Değer
Boyut	Kırma taş çapı	25-60 mm
Sıklık	Maksimum boşluk oranı	%35-40
Su geçirgenliği	Drenaj kapasitesi	$> 10^{-4}$ cm/s
Aşınma direnci	Los Angeles aşınma testi (%)	< 30
Dayanıklılık	Fiziksel ve kimyasal dayanım	Yüksek

24.2. Bölgesel İklim ve Jeolojik Koşullar

24.2.1. İklim özellikleri

Demiryolu hattı için balast seçimi yapılırken, iklim şartları mutlaka göz önüne alınmalıdır. Çünkü her balast malzemesinin iklim şartlarına karşı gösterdiği mukavemet farklılık göstermekte olup, aynı zamanda hat üzerine gelen yağışların drenajının sağlanması konusunda da balast türü önem arz etmektedir.

Eskişehir Bölgesi, karasal iklimin hâkim olduğu bir alan olup, sert kış koşulları ve sıkça yaşanan donma-çözülme döngüleri balast malzemesinin dayanıklılığı üzerinde

doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, bu bölgede kullanılacak balastın çatlama ve parçalanmaya karşı yüksek direnç göstermesi gerekmektedir.

Burdur Bölgesi ise geçiş iklimi özellikleri taşımakta olup, karasal ve Akdeniz iklimlerinin etkileri görülmektedir. Burada balastın hem mekanik dayanıklılığının yeterli olması hem de mevsimsel yağışlara karşı iyi drenaj kapasitesine sahip olması önemlidir.

Antalya Bölgesi ise ılıman Akdeniz iklimine sahip olup, yüksek nem oranı ve yağış miktarı ile karakterizedir. Burada balastın yüksek drenaj kapasitesine sahip olması, suyun birikmesini engellemek ve altyapının uzun ömürlü olmasını sağlamak açısından kritik önem arz eder.

Buradan yola çıkarak, hatta kullanılabilecek balastların drenaj ve donma- çözülme dayanımı özelliklerine göre tercih yapılmalıdır. Tablo 24.2.1.1.'de seçilebilecek balastlar sunulmuştur.

Tablo 24.2.1.1. İklima dayalı balast önerisi

Malzeme	Donma Dayanımı	Drenaj Kapasitesi	Uygun Bölge
Granit	Çok İyi	İyi	Eskişehir ve çevresi
Bazalt	İyi	Orta	Burdur, Isparta
Çakıl	Orta	Çok İyi	Antalya ve çevresi
Cüruf	Orta-Düşük	Çok İyi	Antalya ve çevresi

24.3. Önerilen Balastlar için Maliyet Analizi

Eskişehir- Antalya hattında kullanılabilecek balast malzemeleri, granit, bazalt ve çakıl/cüruf malzemelerinin her birinin maliyeti birbirinden farklı olup, malzemelerin hatta kullanılmak için sahaya ulaştırılmasında katedilmesi gereken mesafeler de birbirinden farklıdır. Üç bölgeye ayrılmış hat için, detaylı bir analiz yapılacaktır. (Toplam hat uzunluğu 540 km olarak alınmıştır ve 3 eşit parçada değerlendirilecektir.)

24.3.1. Lojistik maliyetler ve nakliye

Balastın temin edildiği ocak ile inşaat sahası arasındaki mesafe lojistik maliyetleri önemli ölçüde etkiler. Özellikle granit gibi balastlar her bölgede kolay bir şekilde temin

edilemeyebilir. Bu da toplam maliyeti artırır. Bunun yanı sıra, balast malzemelerinin yoğunluğu birbirinden farklı olduğundan aynı hacimde yüklenen balastların ağırlığı birbirinden farklı olmakta ve bu durum da ton-km başına maliyetleri değiştirmektedir. Tablo 24.3.1.1.,24.3.1.2. ve 24.3.1.3’de üç bölge için ayrı olarak lojistik bilgileri ve maliyetleri yer almaktadır.

Tablo 24.3.1.1. Granit Balast Nakliye Maliyetleri (Eskişehir Bölgesi)

Nakliye Yöntemi	Taşıma Kaynağı (Ocak)	İnşaat Sahasına Mesafe(km)	Ton-km Başına Maliyet (₺)	Ton Başına Toplam Maliyet (₺)
Karayolu	Eskişehir Kıрма Taş Ocağı	50	0.15	7.5
Demiryolu	Eskişehir Kıрма Taş Ocağı	150	0.07	10.5

Tablo 24.3.1.2 Bazalt Balast Nakliye Maliyetleri (Burdur - Isparta Bölgesi)

Nakliye Yöntemi	Taşıma Kaynağı (Ocak)	İnşaat Sahasına Mesafe (km)	Ton-km Başına Maliyet (₺)	Ton Başına Toplam Maliyet (₺)
Karayolu	Burdur Bazalt Taş Ocağı	75	0.14	10.5
Demiryolu	Burdur Bazalt Taş Ocağı	150	0.07	10.5

Tablo 24.3.1.3. Çakıl / Cüruf Balast Nakliye Maliyetleri (Antalya Bölgesi)

Nakliye Yöntemi	Taşıma Kaynağı (Ocak / Tesis)	İnşaat Sahasına Mesafe (km)	Ton-km Başına Maliyet (₺)	Ton Başına Toplam Maliyet (₺)
Karayolu	Antalya Çakıl Ocakları / Termik Santral Tesisleri	30	0.12	3.6
Demiryolu	Antalya Çakıl Ocakları / Termik Santral Tesisleri	150	0.07	10.5

Malzemelerin lojistik maliyetlerinin yanı sıra, birim fiyatları, işçilik ücretleri gibi farklı maliyetleri de bulunmaktadır. Her bir balast malzemesinin hat boyunca 180 km kullanılacağı varsayımıyla her bir balast için maliyet hesaplanabilir. Tablo 24.3.1.4,24.3.1.5. ve 24.3.1.6.’ da sırasıyla, granit, bazalt ve çakıl/cüruf için hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 24.3.1.4. Bölge 1: Eskişehir ve Çevresi (180 km) - Granit Balast

Kalem	Değer	Açıklama
Balast Kalınlığı	0.3 m	Standart balast kalınlığı
Balast Genişliği	3 m	Ray yatağı genişliği
Balast Yoğunluğu	1.7 ton/m ³	Granit yoğunluğu
Hacim Hesabı	180,000 m × 3 m × 0.3 m = 162,000 m ³	Hacim hesaplaması
Toplam Balast Ağırlığı	162,000 m ³ × 1.7 = 275,400 ton	Toplam tonaj
Balast Birim Fiyatı	85 ₺/ton	Granit balast piyasa fiyatı
Malzeme Maliyeti	275,400 × 85 = 23,409,000 ₺	Malzeme maliyeti
Nakliye Mesafesi	Ortalama 50 km	Ocak ile inşaat arası mesafe
Nakliye Birim Fiyatı	0.15 ₺/ton-km	Karayolu taşıma fiyatı
Nakliye Maliyeti	275,400 × 50 × 0.15 = 2,065,500 ₺	Nakliye maliyeti
İşçilik ve Serim	25 ₺/ton	İşçilik maliyeti
İşçilik Maliyeti	275,400 × 25 = 6,885,000 ₺	İşçilik ve serim maliyeti
Toplam Bölge Maliyeti		32,359,500 ₺

Tablo 24.3.1.5. Bölge 2: Burdur - Isparta (180 km) - Bazalt Balast

Kalem	Değer	Açıklama
Balast Kalınlığı	0.3 m	Standart balast kalınlığı
Balast Genişliği	3 m	Ray yatağı genişliği
Balast Yoğunluğu	1.65 ton/m ³	Bazalt yoğunluğu
Hacim Hesabı	180,000 × 3 × 0.3 = 162,000 m ³	Hacim hesaplaması
Toplam Balast Ağırlığı	162,000 × 1.65 = 267,300 ton	Toplam tonaj
Balast Birim Fiyatı	80 ₺/ton	Bazalt balast piyasa fiyatı
Malzeme Maliyeti	267,300 × 80 = 21,384,000 ₺	Malzeme maliyeti
Nakliye Mesafesi	Ortalama 75 km	Ocak ile inşaat arası mesafe
Nakliye Birim Fiyatı	0.14 ₺/ton-km	Karayolu taşıma fiyatı
Nakliye Maliyeti	267,300 × 75 × 0.14 = 2,805,525 ₺	Nakliye maliyeti
İşçilik ve Serim	25 ₺/ton	İşçilik maliyeti
İşçilik Maliyeti	267,300 × 25 = 6,682,500 ₺	İşçilik ve serim maliyeti
Toplam Bölge Maliyeti		30,872,025 ₺

Tablo 24.3.1.6. Bölge 3: Antalya ve Çevresi (180 km) - Çakıl / Cüruf Balast

Kalem	Değer	Açıklama
Balast Kalınlığı	0.3 m	Standart balast kalınlığı
Balast Genişliği	3 m	Ray yatağı genişliği
Balast Yoğunluğu	1.5 ton/m ³	Çakıl/cüruf yoğunluğu
Hacim Hesabı	$180,000 \times 3 \times 0.3 = 162,000 \text{ m}^3$	Hacim hesaplaması
Toplam Balast Ağırlığı	$162,000 \times 1.5 = 243,000 \text{ ton}$	Toplam tonaj
Balast Birim Fiyatı	60 ₺/ton	Çakıl/cüruf balast piyasa fiyatı
Malzeme Maliyeti	$243,000 \times 60 = 14,580,000 \text{ ₺}$	Malzeme maliyeti
Nakliye Mesafesi	Ortalama 30 km	Ocak ile inşaat arası mesafe
Nakliye Birim Fiyatı	0.12 ₺/ton-km	Karayolu taşıma fiyatı
Nakliye Maliyeti	$243,000 \times 30 \times 0.12 = 874,800 \text{ ₺}$	Nakliye maliyeti
İşçilik ve Serim	25 ₺/ton	İşçilik maliyeti
İşçilik Maliyeti	$243,000 \times 25 = 6,075,000 \text{ ₺}$	İşçilik ve serim maliyeti
Toplam Bölge Maliyeti		21,529,800 ₺

Görüldüğü üzere herhangi bir balast malzemesinin maliyetini belirleyen birçok etmen bulunmaktadır. Hat içeriğinde kullanılacak balast seçilirken bu maliyet kalemlerinin her biri göz önüne alınmalı ve varsa bütçe kısıtlamalarına göre planlama yapılmalıdır. Projeye başlanmadan hat sahasına yakın bulunan tüm kaynakların bir listesi oluşturulmalıdır. Balast seçimi yapılırken aynı zamanda gerekli olan balast miktarı hesaplanmalı ve bu miktarın temin edilip edilemeyeceği de hesaba katılmalıdır. Tablo

24.3.1.7’de genel maliyet analizi sunulmuştur. Tablo sayesinde her bir malzeme için gerekli maliyet ve toplam maliyet görülebilir.

Tablo 24.3.1.7. Genel Toplam Maliyet Tablosu

Bölge	Balast Tipi	Balast Tonajı	Malzeme Maliyeti (₺)	Nakliye Maliyeti (₺)	İşçilik Maliyeti (₺)	Toplam Maliyet (₺)
Eskişehir	Granit	275,400	23,409,000	2,065,500	6,885,000	32,359,500
Burdur - Isparta	Bazalt	267,300	21,384,000	2,805,525	6,682,500	30,872,025
Antalya	Çakıl/ Cüruf	243,000	14,580,000	874,800	6,075,000	21,529,800
Toplam		785,700	59,373,000	5,745,825	19,642,500	84,761,325

24.4. Değerlendirme

- Eskişehir ve çevresinde granit balast, donma ve aşınmaya karşı üstün dayanıklılığı nedeniyle tercih edilmelidir.
- Burdur - Isparta geçiş bölgesinde bazalt balast, dengeli mekanik performans ve ekonomik avantaj sunar.
- Antalya ve çevresinde nemli ve ılıman iklim koşullarında çakıl ya da cüruf balast, yüksek drenaj kapasitesi ve ekonomik maliyet sebebiyle uygundur.

25. SONUÇ

Sürdürülebilir ulaşım için demiryolu ulaşımının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu sistemin altyapı bileşenlerinden biri olan balast, hat geometrisinin korunmasını, yüklerin emniyetli şekilde zemine iletilmesini, titreşimlerin sönümlenmesini ve drenajı sağlama görevlerinin yerine getirilmesi sağlar. Demiryolu hatlarının performansı, güvenliği, bakım sıklığı ve ömrü, kullanılan balast malzemesinin tipine doğrudan bağlıdır.

Bu çalışmada, Türkiye'deki demiryolu sistemlerinde kullanılan granit, bazalt, kireçtaşı, çakıl ve cüruf gibi çeşitli balast malzemelerini çok yönlü olarak inceleyerek hem teknik hem de sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

Çalışmanın sonuçlarına göre, bazalt ve granit gibi yüksek mekanik dayanım ve düşük su emme oranına sahip sert kayalar, özellikle yüksek hızlı tren (YHT) hatlarında ve ağır yük taşımacılığı yapılan ana arterlerde tercih edilmelidir. Granit, 200 MPa'lık yüksek basınç dayanımı ve %18'lik düşük aşınma oranı ile uzun ömürlüdür ve bakım maliyetleri düşüktür. Bazalt da aynı şekilde benzer özellikler göstermekte olup; özellikle Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yaygın olarak bulunduğu için lojistik açıdan avantajlıdır. Bu malzemelerin başlangıçta yüksek bir yatırım maliyeti olmasına rağmen, düşük yıllık bakım maliyetleri sayesinde uzun vadede ekonomik bir çözüm sağladıkları belirlenmiştir.

Kireçtaşı ve çakıl gibi daha düşük dayanımlı malzemeler daha az yük taşıyan, kırsal veya ikincil hatlarda ekonomik olmasına rağmen, yüksek oturma miktarları ve kısa servis ömürleri nedeniyle sık bakım gerektirir. Deformasyon miktarları bazalt ve granite göre yaklaşık iki kat daha fazladır, (özellikle kireçtaşı ile yapılan uygulamalarda) bu da yol güvenliğini ve uzun vadeli maliyetleri etkiler.

Sanayi yan ürünü olarak elde edildiği için cüruf çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlıdır. Geri dönüştürülmüş bir malzeme olması, karbon ayak izini azaltır ve doğal kaynak tüketimini azaltır. Bununla birlikte, yoğunluğu ve mekanik özellikleri nedeniyle bu malzeme sadece düşük hızlı hatlar ve sanayi içi kısa mesafe taşımacılığında kullanılabilir.

Çalışmada ayrıca balast kirliliği, bakım yaklaşımları, zeminle etkileşim, iklim değişikliği etkileri ve afetsel dayanım gibi parametreleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle balast kirlenmesi, demiryolu altyapısının zamanla performansının azalmasının en önemli nedenlerinden biridir. Dolayısıyla, balastın

düzenli olarak yer radarı (GPR) ve diğer ölçüm yöntemleriyle izlenmesi, gerekirse yerinde eleme sistemleriyle temizlenmesi veya tamamen yenilenmesi gerekir. Ek olarak, deprem riski taşıyan bölgelerde daha rijit ve kenetlenme kapasitesi yüksek balastlar kullanılmalıdır.

Sürdürülebilirlik açısından yapılan değerlendirmeye göre, cüruf geri dönüşüm potansiyeli ve düşük enerji tüketimi ile öne çıkmakta; bazalt ve granit, uzun ömürleri nedeniyle çevresel etkiler açısından orta düzeyde kalmaktadır. Yerel taş ocaklarından elde edilen malzemelerin lojistik maliyetleri ile çevresel etkileri arasındaki ilişki, malzeme seçiminin hem mühendislik hem de ekonomik ve çevresel analizleri içeren kapsamlı bir değerlendirme gerektirdiğini göstermektedir.

Çalışmada aynı zamanda Eskişehir- Antalya yüksek hızlı tren hattı için seçilebilecek balast malzemeleri incelenmiş ve bu doğrultuda hattın farklı bölgeleri için kullanılabilecek farklı balast malzemeleri seçilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada, demiryolu balast malzemelerini sadece teknik yeterliliklerine değil, bakım gereksinimlerine, lojistik sorunlara, ekonomik sürdürülebilirliğe ve çevresel etkilere göre değerlendirilmiştir. Granit ve bazalt gibi dayanıklı malzemelerin yüksek hızlı ve yoğun taşımacılığın olduğu hatlarda kullanılması, cüruf ve kireçtaşı gibi alternatiflerin ise düşük trafikli hatlarda kullanılması daha uygundur. Gelecekteki demiryolu projelerinde bu tür çok boyutlu analizlerin dikkate alınması, altyapı güvenliğini ve ekonomik ve çevresel verimliliği artıracaktır.

KAYNAKÇA

- Afşar, B. A. ve Şahin, M. (2019). Demiryolu altyapısında kullanılan balast malzemelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 15(2), 81–93.
- Arslan, H. ve Kaya, M. (2021). Türkiye demiryollarında kullanılan balast malzemelerinin performans değerlendirmesi. *İnşaat Teknolojileri Dergisi*, 12(3), 45–57.
- Boussinesq, J. (1885). *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris: Gauthier-Villars.
- Çelik, M. (2018). *Demiryolu altyapı sistemleri ve bakım yönetimi*. İstanbul: Demiryolu Yayınları.
- Çelik, T. (2020). *Demiryolu mühendisliği*. İstanbul: TCDD Yayınları.
- Demiryolu Düzenleme Genel Müdürlüğü. (2019). *Demiryolu altyapı rehberi*. Ankara: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Yayınları.
- Demiryolu Genel Müdürlüğü. (2022). *Raylı sistemlerin tasarım ve uygulama standartları*. İstanbul : TCDD Yayınları.
- Esveld, C. (2001). *Modern railway track*. Zaltbommel: MRT-Productions.
- Ersoy, A. ve Baykal, G. (2020). Demiryolu balastı için alternatif malzeme kullanımı: Cüruf örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 88–97.
- Fontserè, V. and López Pita and A., Manzo, N. and Ausilio, A. (2016). NEOBALLAST: New high-performance and long-lasting ballast for sustainable railway infrastructures. *Transportation Research Procedia*, 14, 1847–1854.
- İndraratna, B., Ngo, N. T. and Rujikiatkamjorn, C. (2011). Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(3), 313–322.
- Karaca, S. (2021). Balastlı ve balastsız demiryolu sistemlerinin karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 331–342.
- Karakurt, M. ve Albayrak, A. (2021). Balastlı demiryolu hatlarının performansının değerlendirilmesinde yer radarı (GPR) kullanımı. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Dergisi*, 45(1), 21–34.
- Karaşahin, M. (2014). *Demiryolu mühendisliği*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Kılınç, S. (2017). *Raylı sistem altyapı ve üstyapı tasarımı*. Ankara: Demiryolu Teknik Yayınları.
- Kumar, S. and White, D. (2019). Smart ballast monitoring in rail infrastructure: Global practices and trends. *Journal of Railway Technology*, 7(2), 155–172.
- Lichtberger, B. (2011). *Track compendium: Track, traffic, transport*. Berlin: Eurailpress.
- (2022). *Balast malzeme standartları ve uygulama esasları Teknik Daire Başkanlığı Raporu*. Ankara: TCDD
- TCDD. (2022). *Demiryolu hat elemanları teknik şartnamesi*. Ankara: TCDD Genel Müdürlüğü Yayınları.

- TCDD. (2022). *Demiryolu üstyapı standartları*. Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Teknik Yönetmeliği.
- TCDD (2021) *Demiryolu Altyapı Standartları*. İstanbul: TCDD Yayınları.
- TSE, Türk Standardları Enstitüsü. *TS EN 933-1, TS EN 1097-2, TS EN 13286-2, TS 1901*.
- TSE, Türk Standardları Enstitüsü. *Demiryolu uygulamaları – Raylar – Ray profilleri TS EN 13674-1*.
- Westergaard, H. M. (1938). *A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Yıldız, A. ve Çakır, B. (2017). Yer radarı (GPR) teknolojisinin demiryolu altyapısında kullanımı. *Ulaştırma ve Trafik Güvenliği Dergisi*, 4(1), 25–34.
- Yıldız, A. ve Çakır, B. (2018). Demiryolu balast malzemelerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. *Ulaştırma ve Altyapı Teknolojileri Dergisi*, 6(1), 45–60.
- Yıldız, N. (2011). *Demiryolu üstyapısı ve bakım teknikleri*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Yayınları.
- Yıldırım, A. (2018). *Demiryolu taşımacılığı ve altyapı yönetimi*. İstanbul: Demiryolu Yayınları.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0004-5451-1874

Ad Soyad : Berkay Turgay CANLI

Yabancı Dil : İNGİLİZCE

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- Eskişehir Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği 2017-2022
- 2022-halen, İnşaat Kontrol Mühendisi, TÜMAŞ, Eskişehir ili Odunpazarı İlçesi 3. Etap 1035 konut, 1 adet 32 derslikli ortaokul, 1 adet 32 derslikli ilkokul ile 1 adet Ticaret merkezi yapımı ve çevre düzenlemesi işi

