

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZALT AGREGA MALZEMESİNİN FARKLI MEKANİK VE ÇEVRESEL**  
**KOŞULLAR ETKİSİNDE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Ekin KÖKEN**

**OCAK 2019**

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZALT AGREGA MALZEMESİNİN FARKLI MEKANİK VE ÇEVRESEL**  
**KOŞULLAR ETKİSİNDE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Ekin KÖKEN**

**DANIŞMAN : Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN**

**İKİNCİ DANIŞMAN : Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BACAĞ**

**ZONGULDAK**

**Ocak 2019**

**KABUL:**

Ekin KÖKEN tarafından hazırlanan “Bazalt Agregalı Malzemesinin Farklı Mekanik ve Çevresel Koşullar Etkisinde Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 14/01/2019

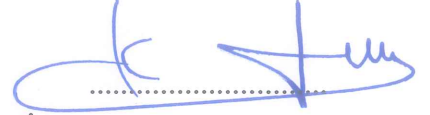
**Danışman:** Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Maden Mühendisliği Bölümü



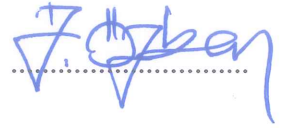
**Üye:** Prof. Dr. Ahmet Mahmut KILIÇ

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,  
Maden Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri  
Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Doç. Dr. Hamit AYDIN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Maden Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü



**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../2019



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Ekin KÖKEN

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **BAZALT AGREGA MALZEMESİNİN FARKLI MEKANİK VE ÇEVRESEL KOŞULLAR ETKİSİNDE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Ekin KÖKEN**

**Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN**

**İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BACAĞ**

**Ocak 2019, 165 sayfa**

Bu çalışmada iki farklı bazaltik kayaktan (ince ve iri taneli bazaltik kayalar) üretilen agregaların farklı mekanik ve çevresel koşullar altındaki özelliklerinin değişimi araştırılmıştır. Öncelikle genel olarak kayaların ve agregalarının duraylılığına etki eden faktörler özetlenmiş, balast agregası (31.5 – 63.0 mm) ve balast tabakası üzerine gerçekleştirilmiş önemli çalışmalar ifade edilmiştir. Ülkemizde kullanılan balast agregalarının sahip olması gereken teknik özellikleri verilmiş ve balast tabakasında gözlenen önemli sorunlara değinilmiştir.

Arazi çalışmalarında agregaların üretildiği kaya kütlelerinin jeoteknik özellikleri belirlenmiş ve sahada farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri ayırt edilerek sınıflandırılmıştır. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya kütlelerinden elde edilen numuneler kullanılarak bu kayalara ait temel fiziksel, mekanik ve agrega özellikleri belirlenmiştir.

## ÖZET (devam ediyor)

Farklı boyut grubunda (10 – 14 mm ve 31.5 – 50 mm) gerçekleştirilen agrega deneyleri sonucunda, ayrışmamış ( $W_0$ ) ve az ayrışmış ( $W_1$ ) kaya kütlelerinden üretilen agregaların olası kullanım alanları mevcut yaklaşımlar ışığında belirlenmiştir.

Tren hattına serilen balast agregalarının dayanımının belirlenmesi için bir deney yöntemi geliştirilmiş, daha sonra kaya malzemesi ve balast agrega (31.5 – 50.0 mm) özelliklerinin farklı çevresel ve mekanik koşullar altındaki değişimleri araştırılmıştır. Çevresel koşullar farklı döngü sayılarındaki magnezyum sülfat don kaybı deneyleri ile, mekanik koşullar ise sırasıyla tek tane parçalanma ve farklı devir sayılarındaki Los Angeles aşınma kaybı deneyleri ile temsil edilmiştir.

Laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, balast agregasındaki şekilsel özelliğindeki değişimin balast dayanımı ve parçalanma derecesi üzerine önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Farklı döngü ve devir sayılarında gerçekleştirilen Los Angeles aşınma kaybı deneylerine göre, araştırılan balast agregalarının uzun dönem duraylılıkları araştırılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, balast agregasındaki parçalanma derecesinin mineralojik değişim ve tane boyutu ile ilgili olduğu söylenebilir.

Ayrıca araştırılan balast agregalarının Los Angeles aşınma kaybı ve kirlenme derecelerinin kestirimi için birkaç görgül bağıntı geliştirilmiştir. Balast agregasının yerindeki parçalanma mekanizmasının araştırılması için önerilerde bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Agrega, Bazaltik kayaçlar, Balast, Demiryolu, Donma – çözünme, Los Angeles aşınma kaybı

**Bilim Kodu:** 607.01.00.

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **INVESTIGATION OF BASALTIC AGGREGATE MATERIAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT MECHANICAL AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS**

**Ekin KÖKEN**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mining Engineering**

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN**

**Co-Advisor: Asst. Prof. Dr. Gürkan BACAĞ**

**January 2019, 165 pages**

In this study, the variation in aggregate properties, which are produced from two different basaltic rocks (i.e. fine and coarse grained basaltic rocks), are investigated under different mechanical and environmental conditions. Firstly, effecting factors on rock and aggregate durability are mainly summarized and remarkable studies based on ballast aggregates (31.5 – 63.0 mm) and ballast stratum are expressed. Desired technical properties of ballast aggregates used in our country are given and important problems observed in ballast stratum are referred.

During field studies, geotechnical properties of rock masses, from which the aggregates are produced, are determined and they are classified in terms of distinguishing different weathering grades.

General physical, mechanical and aggregate properties of the rocks are determined by using the samples obtained from rock masses with different weathering grades.

## **ABSTRACT (continued)**

As a result of aggregate tests carried out on different size fractions (i.e. 10 – 14 mm and 31.5 – 50.0 mm) of aggregates, potential usage areas of aggregates produced from unweathered ( $W_0$ ) and slightly weathered ( $W_1$ ) rock masses are determined in terms of present approaches.

An experimental procedure are developed to determine the strength of ballast aggregates in the train route and then the variations in rock material and ballast aggregate (31.5 – 50 mm) properties are investigated under different environmental and mechanical conditions. Environmental conditions are represented by magnesium sulfate soundness tests with different cycles and mechanical conditions were represented by single particle breakage and Los Angeles abrasion loss tests with different number of revolutions, respectively.

As a result of laboratory studies, the variation in shape properties of ballast aggregates has enormous effects on ballast strength and fragmentation degree. The long-term durability of ballast aggregates are investigated in terms of Los Angeles abrasion loss tests with different cycles and number of revolutions. According to the results obtained from these studies, it can be claimed that the fragmentation degree of ballast aggregates is associated with mineralogical variation and grain size.

Moreover, in order to predict Los Angeles abrasion loss and the degree of fouling of ballast aggregates, several empirical formulae are developed. Suggestions are given in order to investigate the actual fragmentation mechanism of ballast aggregate in-situ.

**Keywords:** Aggregate, Basaltic rocks, Ballast, Railway, Freezing - Thawing, Los Angeles abrasion loss.

**Science Code:** 607.01.00.



## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlangıcından bitişine kadar desteğini esirgemeyen, yapıcı eleştiri ve önerileri ile tezin zenginleşmesinde önemli payı olan danışmanım sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN'a, deneysel programın hazırlanması konusundaki desteklerinden dolayı ikinci danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BACAK'a, çeşitli konularda yapıcı eleştiri ve katkılarda bulunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR ve Doç. Dr. Hamit AYDIN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları sırasında gösterdikleri anlayış, verilen destek, ve tecrübelerini aktarmaları sebepleriyle sayın Ercüment AYDIN, değerli arkadaşlarım Göksel KESERCİ ve Gürkan AYDIN'a, ince kesitlerin hazırlanmasında büyük emek veren sayın Mehmet GÜNGÖR'e, kimyasal analizleri yapan ALS laboratuvar çalışanlarına, laboratuvar çalışmaları sırasında verdikleri destek ve anlayışlarından dolayı başta Arş. Gör. Mehmet BİLEN, Koray SELYANI, Sefa KUKUL ve Hüsnü Samet AKDUMAN olmak üzere destek veren değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Akademik hayatımda beni her daim destekleyen, öneri ve tecrübelerinden yararlanmaya çalıştığım değerli hocam, Prof. Dr. Yalçın KOCA, Doç. Dr. Ali Hakan ÖREN ve Doç. Dr. Kemal BARIŞ'a teşekkür ederim. Bu çalışmanın incelenmesinde ve değerlendirilmesinde değerli eleştiri ve katkılarda bulunan sayın jüri üyelerine ayrıca teşekkür ederim.

Hazırlanan bu çalışmayı, yoğun çalışma koşulları altında hoşgörülü anlayışını her daim muhafaza eden, varlığından güç aldığım sevgili annem merhume Ayşen SAVAŞ, babam Ahmet KÖKEN, dayım Mehmet Aykut SAVAŞ ve eşim Burcu KÖKEN'e ithaf ediyorum.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 KONUNUN ÖNEMİ .....	1
1.2 TEZİN AMACI .....	2
1.3 TEZİN KAPSAMI .....	2
BÖLÜM 2 KAYAÇLARIN DURAYLILIĞINA ETKİ EDEN DEĞİŞTİRGELER .....	5
2.1 ISLANMA – KURUMA .....	5
2.2 DONMA – ÇÖZÜNME .....	6
2.3 ISINMA – SOĞUMA .....	8
2.4 TUZ KRİSTALLENMESİ .....	9
2.5 AYRIŞMA – BOZUNMA .....	11
BÖLÜM 3 DEMİRYOLU BALASTI .....	17
3.1 AGREGA MALZEMESİ OLARAK BAZALTİK KAYAÇLAR .....	17
3.2 BALAST AGREGASININ DURAYLILIĞINA ETKİ EDEN DEĞİŞTİRGELER .....	23
3.2.1 Trafik yükleri .....	23
3.2.2 Balast tabakasında gözlenen donma – çözünme .....	29
3.3. BALAST TABAKASINDA GÖZLENEN SORUNLAR .....	32

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 ARAZİ VE LABROTAVUAR ÇALIŞMALARI .....	39
4.1 MATERYAL VE METOT .....	39
4.1.1 Materyal .....	39
4.1.2 Metot .....	39
4.2 ARAZİ ÇALIŞMALARI .....	40
4.2.1 Kütahya Işıkkara köyü civarında gerçekleştirilen arazi çalışmaları .....	40
4.2.2 Karabük Kayadibi - Yenice civarında gerçekleştirilen arazi çalışmaları .....	51
4.3 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI .....	59
4.3.1 Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi .....	59
4.3.1.1 Fiziksel özellikler .....	60
4.3.1.2 Kızdırma kaybı .....	63
4.3.1.3 Nokta yükü dayanımı .....	64
4.3.1.4 Dolaylı çekme dayanımı .....	75
4.3.1.5 Tek eksenli basınç dayanımı .....	76
4.3.1.6 Statik elastik sabitler .....	78
4.3.2 Mineralojik ve petrografik özellikler .....	81
4.3.3 Agrega özellikleri .....	85
4.3.3.1 Yassılık indeksi .....	86
4.3.3.2 Los Angeles aşınma kaybı .....	87
4.3.3.3 Magnezyum sülfat don kaybı .....	89
4.3.3.4 S <sub>20</sub> kırılgenlik indeksi .....	92
4.3.3.5 Agrega darbe dayanım değeri .....	94
BÖLÜM 5 ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	97
5.1 ARAZİ ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	97
5.2 LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	101
BÖLÜM 6 KAYA MALZEMESİ VE BALAST AGREGASI DURAYLILIK ARAŞTIRMALARI .....	109

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
6.1 ÇEVRESEL KOŞULLARIN LABORATUVAR ORTAMINDA BENZETİMİ .....	109
6.2 MEKANİK KOŞULLARIN LABORATUVAR ORTAMINDA BENZETİMİ .....	116
6.2.1 Tek tane deneyleri .....	116
6.2.2 Farklı devir sayılarındaki Los Angeles aşınma kaybı deneyleri .....	119
6.3 ÇEVRESEL VE MEKANİK KOŞULLARIN BERABER DEĞERLENDİRİLMESİ .....	122
6.4 GENEL DEĞERLENDİRME .....	133
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	143
KAYNAKLAR .....	147
EK AÇIKLAMALAR .....	163
ÖZGEÇMİŞ .....	165



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Donma çözünme etkisi ile granitlerde oluşan mikro çatlaklar AL: Alpedrete graniti, CA: Cadalso graniti, CO: Colmenar graniti, ZA: Zarzalejo graniti.....	7
Şekil 2.2 Farklı donma – çözünme döngülerinde mağmatik kayalara ait $\sigma_{ci}$ 'deki değişim.....	7
Şekil 2.3 Artan temsili donma – çözünme döngüsü ile kireçtaşlarının mekanik özelliklerindeki değişim a) Nokta yükü dayanımındaki değişim b) Dolaylı çekme dayanımındaki değişim c) Tek eksenli basınç dayanımındaki değişim d) P dalgası hızındaki değişim .....	8
Şekil 2.4 Tuz kristallenmesi ile kaya malzemesinde gerçekleşen parçalanma .....	10
Şekil 2.5 Tuz kristallenmesi döngü sayısı ile tüflerin $V_p$ değerindeki değişim .....	10
Şekil 2.6 Andezitik ve granodiyoritik kayalarda ayrışma – bozunmanın bazı kaya özelliklerine olan etkisi .....	13
Şekil 2.7 Andezitik kayalarda ayrışma – bozunmanın $n_e$ ve $\sigma_{ci}$ üzerine etkileri .....	14
Şekil 2.8 İlerleyen ayrışma – bozunma ile granitik kayalarda AIV değerindeki değişim.....	14
Şekil 3.1 Demiryolu alt yapı elemanları a) Tipik bir üst balast tabakası b) Beton travers altındaki demiryolu altyapı elemanlarının temsili düşey kesiti.....	18
Şekil 3.2 Balast agrega özellikleri arasındaki bazı ilişkiler a) $MI_{dd}$ ile LAA arasındaki ilişki b) $w_a$ ile LOI arasındaki ilişki.....	22
Şekil 3.3 Trafik yükü ve balast tabakasındaki kirlenmenin balast tabakasındaki oturma üzerindeki etkileri.....	24
Şekil 3.4 Artan trafik yükü ile balast tabakasındaki eksenel deformasyonların değişimi.....	25
Şekil 3.5 Yoğun kış koşulları altında bazı demiryolu hatlarının görüntüleri.....	29
Şekil 3.6 Donma – çözünme döngüsünün kaya malzemesini parçalama süreci .....	31
Şekil 3.7 Balast tabakasındaki kirlenmeye sebep olan deşirtirgeler .....	32
Şekil 3.8 Yük aktarımı sorunları sebebiyle çatlamış beton traversler .....	33

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.9 Optimum üst balast tabakasının belirlenmesine ait bir yaklaşım .....	34
Şekil 3.10 Tren lokomotifinin geçiş esnasında oluşan yanıl titreşim.....	35
Şekil 3.11 Balast tabakasının iyi sıkılanmaması sonucu taş fırlama sorunlar .....	35
Şekil 3.12 Balastın kirlenmesinden dolayı travers altında biriken yüzey suyu .....	36
Şekil 3.13 Alt temel ile balast tabakası arasındaki asfalt tabakası .....	37
Şekil 4.1 Işıkkara köyü ve civarının basitleştirilmiş jeoloji haritası .....	41
Şekil 4.2 İnceleme alanında hat etüdü gerçekleştirilen bazı İlica bazaltik kaya kütlelerinin genel görünümü .....	42
Şekil 4.3 İnceleme alanında farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki İlica bazaltik kayaların genel görünümleri ( $W_0$ : Ayrışmamış, $W_1$ : Az ayrışmış, $W_2$ : Orta derecede ayrışmış $W_3$ : İleri derecede ayrışmış, $W_4$ : Tamamen ayrışmış) .....	43
Şekil 4.4 İlica bazaltik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerindeki süreksizlik aralığındaki değişim .....	45
Şekil 4.5 Hat etütlerinde süreksizlik pürüzlülüğünün belirlenmesi (Şekil ölçeksizdir.) .....	45
Şekil 4.6 Süreksizlik pürüzlülük sınıflaması.....	46
Şekil 4.7 Orta derecede ayrışmış bir bazaltik kaya kütesinde ( $W_2$ tip) gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyleri .....	49
Şekil 4.8 İlica bazaltik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerindeki $R_1$ değerinin değişimi .....	50
Şekil 4.9 Kayadibi ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası .....	52
Şekil 4.10 Kale batısındaki ultra-bazik kayaların genel görünümleri .....	53
Şekil 4.11 Farklı ayrışma – bozunma içeren ultra-bazik kayaların genel görünümleri .....	53
Şekil 4.12 Kayadibi ultra-bazik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde süreksizlik aralığındaki değişim .....	54
Şekil 4.13 Kayadibi ultra-bazik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerindeki $R_1$ değerinin değişimi.....	58
Şekil 4.14 NX tip karotiyer kullanarak kaya bloklarından silindirik numune alma işlemi.....	60
Şekil 4.15 Porozite prizması ile fiziksel özelliklerin belirlenmesi.....	61
Şekil 4.16 Kaya malzemesinin doygun hale getirilmesi.....	61



## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.17 Kızdırma kaybı deneyi a) Hazırlanan numuneler (-0.106 mm) b) Numunenin tartılması c) Numunenin krozeeye konulması d) Numunenin yüksek sıcaklıklı fırına yerleştirilmesi .....	63
Şekil 4.18 Nokta yükü dayanım indeks deneyi .....	65
Şekil 4.19 Balast agregasında boyut ölçümü işlemi: l: agregası boyu, w: agregası genişliği, t: agregası kalınlığı .....	66
Şekil 4.20 Nokta yükü deneyi için araştırılan balast agregalarının şekilsel özelliklerine göre sınıflandırılması .....	67
Şekil 4.21 Düzensiz örneklerde eksenel nokta yükü deneyleri .....	69
Şekil 4.22 Düzensiz örneklerde eş değeri karot çapının belirlenmesine ilişkin yaklaşımlar .....	70
Şekil 4.23 New base map komutu ile çekilen fotoğrafın yazılıma aktarılması .....	71
Şekil 4.24 Digitize komutu ile yüzey alanının sayısallaştırılması .....	72
Şekil 4.25 Yenilme yüzey alanının sayısallaştırılması .....	73
Şekil 4.26 Sayısallaştırılmış koordinatların Microsoft Excel programına aktarılması .....	73
Şekil 4.27 Yazılım üzerindeki referans noktaları arasındaki uzunluğun "Measure" komutu ile belirlenmesi.....	74
Şekil 4.28 Dolaylı çekme dayanım deneyi .....	76
Şekil 4.29 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi .....	77
Şekil 4.30 Statik elastik sabitler deneyi .....	78
Şekil 4.31 Farklı ayrışma bozunma derecelerindeki Ilıca bazaltik kayalarına ait tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri .....	80
Şekil 4.32 Farklı ayrışma bozunma derecelerindeki Kayadibi ultra-bazik kayalarına ait tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri .....	80
Şekil 4.33 Farklı ayrışma bozunma derecelerindeki kayaların ince kesit görüntüleri .....	82
Şekil 4.34 İncelenen kayaların toplam alkali – silis diyagramındaki gösterimi .....	85
Şekil 4.35 W <sub>0</sub> tip balast agregalarında gerçekleştirilen bir yassılık indeksi deneyi .....	86
Şekil 4.36 Los Angeles aşınma deneylerinde kullanılan bazı agregası malzemeleri ve kullanılan deney düzeneği a) 31.5 mm – 50 mm boyut grubundaki W <sub>0</sub> tip balast agregası malzemeleri b) 10 mm – 14 mm boyut grubundaki W <sub>0</sub> tip agregası malzemeleri c) Balast agregalarında gerçekleştirilen Los Angeles aşınma kaybı deneyi d) Deney sonrası aşınmış ve parçalanmış balast agregaları .....	88

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.37 Magnezyum sülfat don kaybı deneyleri a) 10 mm – 14 mm boyut grubundaki $W_1$ tip agrega örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen deney b) 31.5 mm – 50 mm boyut grubundaki $W_1$ tip balast agregası örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen deney.....	90
Şekil 4.38 $S_{20}$ kırılgenlik indeks deneyi metodolojisi.....	92
Şekil 4.39 AIV deneyi metodolojisi.....	95
Şekil 5.1 $R_1$ ile $\sigma_{ci}$ arasındaki doğrusal ilişkiler.....	100
Şekil 5.2 İlerleyen ayrışma – bozunma ile $\sigma_{ci}$ ve $n_e$ değerlerindeki değişim a) Ilıca bazik kayalar b) Kayadibi ultra-bazik kayalar.....	102
Şekil 5.3 İlerleyen ayrışma – bozunma ile önceki çalışmalarda ifade edilen $\sigma_{ci} - n_e$ veri çiftindeki değişimler.....	102
Şekil 5.4 İlerleyen ayrışma – bozunma ile LOI ve $w_a$ değerlerindeki değişim.....	103
Şekil 5.5 $\psi$ ile $I_{s50}$ arasındaki doğrusal ilişkiler.....	105
Şekil 6.1 Artan $N_{ft-m}$ koşullarında kaya malzemeleri mekanik özelliklerindeki değişim.....	111
Şekil 6.2 Artan $N_{ft-m}$ koşullarında balast agrega özelliklerindeki değişim .....	113
Şekil 6.3 Tek tane deneyleri.....	117
Şekil 6.4 $\psi$ ile $FI_{TT}$ arasındaki doğrusal azalan ilişkiler.....	118
Şekil 6.5 Artan $N_{rev}$ koşullarında balast agregalarında LAA ve $FI_{LAA}$ değerlerindeki değişim.....	120
Şekil 6.6 Farklı $N_{ft-m}$ koşullarında gerçekleştirilen tek tane deney sonuçlarından elde edilen tipik tane boyu dağılım eğrileri.....	123
Şekil 6.7 Farklı $N_{ft-m}$ ve $N_{rev}$ koşullarında LAA değerlerindeki değişim a) Ilıca bazaltik kayalar b) Kayadibi ultra-bazik kayalar.....	126
Şekil 6.8 LAA deneyleri sonrası bazı balast agregalarındaki morfolojik değişimler .....	127
Şekil 6.9 LAA deneyleri sonucu bazı balast agregalarının tane boyutu dağılım eğrilerindeki değişimi.....	129
Şekil 6.10 Farklı balast agregaları için $N_{ft-m} = 0$ ve artan $N_{rev}$ koşullarında $FI_{LAA}$ değerindeki değişim.....	132
Şekil 6.11 İlerleyen Ayrışma – bozunma ve $N_{ft-m}$ koşulları sonucu $\sigma_{ci} - w_a$ veri çiftindeki değişim a) Ilıca bazaltik kayalar b) Kayadibi ultra-bazik kayalar.....	135

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.12 LOI değerlerinin karşılaştırılması a) Ilıca bazaltik kayalar b) Kayadibi ultra-bazik kayalar.....	136
Şekil 6.13 $M_{w1}$ değerlerinin kestirimi için geliştirilen yüzey modelleri a) Ilıca bazaltikkayalar b) Kayadibi ultra-bazik kayalar .....	138





## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Arazide ayrışma – bozunmanın tanımlanabilmesi için önerilen gözlemsel sınıflama .....	12
Çizelge 2.2 İlerleyen ayrışma – bozunma ile dunit ve gabrolara ait fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi .....	13
Çizelge 2.3 İlerleyen ayrışma – bozunmanın kuvarsit kayacının agrega özelliklerindeki değişimi .....	15
Çizelge 3.1 Demiryolu balastının sahip olması gereken teknik özellikler .....	19
Çizelge 3.2 Tren hatlarının trafik yüklerine göre sınıflandırılması .....	26
Çizelge 3.3 Tren hızına göre $S_p$ ve $S_{ft}$ sabitlerinin değişimi .....	26
Çizelge 3.4 $k_{fr}$ sabitinin tren dingil yüküne göre değişimi.....	27
Çizelge 3.5 Trafik yüklerinin hesaplanmasını gösteren iki örnek .....	28
Çizelge 3.6 Ortalama tren hızı ile balast malzemesi LAA değeri arasındaki değişim.....	29
Çizelge 3.7 Tren hızı, dingil yükü ve tren hattının kullanım amacına göre optimum üst balast tabakası kalınlıkları .....	33
Çizelge 3.8 İngiliz demiryolları şartnamesine göre optimum üst balast kalınlıkları .....	34
Çizelge 3.9 Balast agregası ve tabakası konusunda gerçekleştirilen çalışmalarda izlenen yöntemler .....	37
Çizelge 4.1 Farklı ayrışma – bozunma türündeki Ilıca bazaltik kaya kütlelerine ait süreksizlik aralığı değerleri.....	44
Çizelge 4.2 Süreksizlik aralığı sınıflaması.....	44
Çizelge 4.3 Farklı ayrışma – bozunma türündeki Ilıca bazaltik kaya kütlelerine ait süreksizlik pürüzlülük değerleri.....	47
Çizelge 4.4 Ilıca bazaltik kayaların ayrışma – bozunma açısından tanımlayıcı kriterler.....	47
Çizelge 4.5 Farklı ayrışma – bozunma türündeki Ilıca bazaltik kaya kütlelerine ait tipik L tipi Schmidt çekici geri sıçrama sayıları.....	49
Çizelge 4.6 Farklı ayrışma – bozunma türündeki Kayadibi ultra-bazik kaya kütlelerine ait süreksizlik aralığı değerleri .....	54

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.7 Farklı ayrışma – bozunma türündeki Kayadibi ultra-bazik kaya kütlelerine ait süreksizlik pürüzlülük değerleri.....	55
Çizelge 4.8 Kayadibi ultra-bazik kayaların ayrışma – bozunma açısından tanımlayıcı kriterler.....	56
Çizelge 4.9 Kayadibi ultra-bazik kayaların farklı ayrışma – bozunma türündeki bazaltik kaya kütlelerine ait tipik L tipi Schmidt çekici geri sıçrama sayıları.....	57
Çizelge 4.10 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki Ilıca bazaltik kayalarının fiziksel özellikleri.....	62
Çizelge 4.11 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki Kayadibi ultra-bazik kayalarının fiziksel özellikleri.....	62
Çizelge 4.12 Kızdırma kaybı deney sonuçları .....	64
Çizelge 4.13 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin düzeltilmiş nokta yükü dayanım değerleri .....	65
Çizelge 4.14 Düzensiz örneklerde hesaplanan nokta yükü dayanım değerleri.....	74
Çizelge 4.15 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin dolaylı çekme dayanım değerleri .....	76
Çizelge 4.16 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri .....	78
Çizelge 4.17 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin Teğetsel Young Modülü değerleri .....	79
Çizelge 4.18 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin Teğetsel Poisson Oranı değerleri .....	81
Çizelge 4.19 $W_0$ tip kayalarda gözlenen minerallerin yüzdesel dağılımı .....	83
Çizelge 4.20 Kimyasal analizlerde kullanılan numune kodları ve ayrışma dereceleri .....	84
Çizelge 4.21 Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kayalara ait tipik ana oksit element içerikleri.....	84
Çizelge 4.22 Yassılık indeksi deney sonuçları.....	87
Çizelge 4.23 Los Angeles aşınma kaybı deney sonuçları .....	89
Çizelge 4.24 Magnezyum sülfat don kaybı deney sonuçları .....	91
Çizelge 4.25 $S_{20}$ Kırılma indeksi sınıflaması .....	93
Çizelge 4.26 $S_{20}$ kırılma indeksi deney sonuçları .....	94
Çizelge 4.27 AIV deney sonuçları .....	95

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 R <sub>1</sub> 'nin bazı ayrışma – bozunma sınıflamalarındaki aralık değerleri.....	98
Çizelge 5.2 W <sub>0</sub> ve W <sub>1</sub> tip kaya kütlelerine ait temel kaya ve agrega özellikleri.....	102
Çizelge 5.3 Kaya malzemesi parçalanabilirlik sınıflaması.....	103
Çizelge 5.4 KGM (2013) teknik şartnamelerine göre W <sub>0</sub> tip agregaların uygunluğu.....	106
Çizelge 5.5 TCDD (2017) teknik şartnamesine göre incelenen W <sub>0</sub> tip agregaların uygunluğu.....	107
Çizelge 6.1 Artan N <sub>ft-m</sub> koşullarında Ilıca bazaltik kayaçlarının bazı mekanik özelliklerindeki değişim.....	110
Çizelge 6.2 Artan N <sub>ft-m</sub> koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının bazı mekanik özelliklerindeki değişim .....	110
Çizelge 6.3 Artan N <sub>ft-m</sub> koşullarında balast agregalarına ait wa değerlerindeki değişim.....	111
Çizelge 6.4 Artan N <sub>ft-m</sub> koşullarında balast agregalarına ait LOI değerlerindeki değişim.....	112
Çizelge 6.5 Artan N <sub>ft-m</sub> koşullarında balast agregalarına ait M <sub>wl</sub> değerlerindeki değişim ....	112
Çizelge 6.6 Artan N <sub>ft-m</sub> koşullarında balast agregalarına ait LAA değerlerindeki değişim .....	113
Çizelge 6.7 Tek tane deneylerinden elde edilen FI <sub>TT</sub> değerleri .....	117
Çizelge 6.8 Artan N <sub>rev</sub> koşullarında LAA değerindeki değişim.....	119
Çizelge 6.9 LAA deneylerinden elde edilen FI <sub>LAA</sub> değerleri .....	120
Çizelge 6.10 Tek tane deney sonuçlarından elde edilen C <sub>uTT</sub> değerlerinin değişimi.....	124
Çizelge 6.11 Eşitlik 6.5 ve Eşitlik 6.6'ya ait istatistiksel analiz sonuçları .....	125
Çizelge 6.12 Farklı N <sub>ft-m</sub> ve N <sub>rev</sub> koşullarında gerçekleştirilen LAA deney sonuçları .....	126
Çizelge 6.13 Farklı N <sub>ft-m</sub> ve N <sub>rev</sub> koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri sonrası elde edilen C <sub>uLAA</sub> değerleri .....	128
Çizelge 6.14 Eşitlik 6.7 ve Eşitlik 6.8'e ait istatistiksel analiz sonuçları .....	130
Çizelge 6.15 Farklı N <sub>ft-m</sub> ve N <sub>rev</sub> koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri sonrası elde edilen FI <sub>LAA</sub> değerleri.....	131
Çizelge 6.16 Eşitlik 6.9 – 6.12'ye ait istatistiksel analiz sonuçları .....	133
Çizelge 6.17 Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat don kaybının kestirimi için önerilen görgül bağıntılar .....	138





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan ( $\text{mm}^2$ )
AIV	Agrega darbe dayanım değeri (%)
Bt.	Biyotit
B <sub>3</sub>	B <sub>3</sub> Kırılgenlik indeksi ( $\text{MPa}^2$ )
C <sub>60</sub>	28 gün sonunda silindirik beton numunesi dayanımı (60 MPa)
C <sub>70</sub>	28 gün sonunda silindirik beton numunesi dayanımı (70 MPa)
c <sub>i</sub>	kaya malzemesi kohezyonu (KPa)
Cpx.	Klino-piroksen
C <sub>u</sub>	Derecelenme katsayısı
C <sub>uLAA</sub>	Los Angeles aşınma kaybı deneylerinden elde edilen derecelenme katsayısı
C <sub>uTT</sub>	Tek tane deneylerinden elde edilen derecelenme katsayısı
D	Numune Çapı (mm)
De	Eş değer karot çapı (mm)
d <sub>10</sub>	Toplam agrega miktarının %10'unun geçtiği tane boyutu (mm)
D <sub>50</sub>	Ortalama tane boyutu ( $\mu\text{m}$ )
d <sub>60</sub>	Toplam agrega miktarının %60'ının geçtiği tane boyutu (mm)
e	Boşluk oranı
E <sub>ti</sub>	Teğetsel Young Modülü (GPa)
F	Yenilme yükü (N)
FI	Kirlenme indeksi (%)
FI <sub>LAA</sub>	Los Angeles aşınma kaybı deneylerinden elde edilen kirlenme indeksi değeri
FI <sub>TT</sub>	Tek tane deneylerinden elde edilen kirlenme indeksi değeri
FS	Güvenlik katsayısı
FS <sub>LAA</sub>	Los Angeles aşınma kaybı güvenlik katsayısı
FS <sub>Mwl</sub>	Magnezyum sülfat don kaybı güvenlik katsayısı
GPR	Yer radarı yöntemi
h	Yükseklik (cm)
H	Silindirik numune kalınlığı (mm)

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

Hbl.	Hornblend
$I_f$	Yassılık indeksi (%)
$I_{s50}$	Düzeltilmiş nokta yükü dayanımı (MPa)
JRC	Eklem pürüzlülük katsayısı
$k_{fr}$	Yük taşıyan trenin dingil yüküne göre ifade edilen bir sabit
$k_t$	Yolcu ve yük taşıyan lokomotifin çekiş gücünü ifade eden bir sabit ( $k_t = 1.40$ )
L	Silindirik numune boyu (mm)
l	Agrega numunesi boyu (mm)
LAA	Los Angeles aşınma kaybı (%)
$l_{min}$	En kısa agrega boyu (mm)
LOI	Kızdırma kaybı (%)
$l_{ort}$	Ortalama agrega boyu (mm)
$l_{mak}$	En uzun agrega boyu (mm)
LVDT	Doğrusal değişken türevsel dönüştürücü
MAV	Budapeşte (Macaristan) demiryolları araştırma grubu
$m_a$	Havanın kütlesi (g) (0 kabul edilir.)
MD	Mikro-deval kaybı (%)
mgt	Milyon gros ton (1 gros ton = 1.01 ton)
$MI_{dd}$	Modifiye İsveç darbe değeri
$m_k$	Katı kütle (g)
$m_s$	Suyun kütlesi (g)
$m_t$	Toplam kütle (g)
$m_0$	İlk numune ağırlığı (g)
$m_1$	Numune yakıldıktan sonraki ağırlık (g)
$m_2$	Uzun şerit eleklerden geçen agrega miktarı (g)
$m_3$	1.6 mm'lik elekten geçen agrega miktarı (g)
$m_4$	10 mm'lik elekten geçen agrega miktarı (g)
$m_5$	22.4 mm'lik elekten geçen agrega miktarı (g)
$m_6$	11.2 mm'lik elekten geçen agrega miktarı (g)
$m_7$	2.36 mm'lik elekten geçen agrega miktarı (g)
$M_{wl}$	Magnezyum sülfat don kaybı (%)
n	Örnek sayısı

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$n_e$	Görünür gözeneklilik (%)
$N_{ft-d}$	Donma – çözünme kabinindeki donma – çözünme döngü sayısı
$N_{ft-m}$	Magnezyum sülfat don kaybı deneyindeki temsili donma – çözünme döngü sayısı
$N_{rev}$	Los Angeles aşınma kaybındaki devir sayısı
$N_{tk}$	Tuz kristallenmesi döngü sayısı
$NX$	İç çapı 54 mm olan karotiyer türü
$N_{wl}$	Sodyum sülfat kaybı (%)
$Op.$	Opak mineral
$Opx.$	Orto-piroksen
$p$	Yassılık oranı
$Pl.$	Playijoklas
$P_{1-2}$	Boşluk suyu basıncı
$P_4$	4.75 mm'lik elekten geçen kümülatif malzeme miktarı (%)
$P_{200}$	0.075 mm'lik elekten geçen kümülatif malzeme miktarı (%)
$q$	Uzama oranı
$R^2$	Belirtme katsayısı
$R_1$	L tipi Schmidt çekici geri sıçrama sayısı
$RQD$	Kaya kalite göstergesi (%)
$S$	Doygunluk derecesi (%)
$S_{fr}$	Yük taşıma amaçlı hizmet eden trenin hızına göre ifade edilen bir sabit
$S_m$	Ortalama süreksizlik aralığı (mm)
$S_p$	Sadece yolcu taşıyan trenlerin hızına göre ifade edilen bir sabit
$S_s$	Sefer sayısı
$s.s$	Standart sapma
$S_{20}$	$S_{20}$ kırılmanlık indeksi (%)
$t$	Agrega kalınlığı (mm)
$T$	Çevre sıcaklığı (°C)
$TCDD$	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
$T_{fr}$	Yük taşıyan trende bulunan toplam yük miktarı (ton)
$T_{tf}$	Yük taşıyan trenin boş haldeki ağırlığı (ton)
$T_p$	Trende bulunan yolcuların toplam ağırlığı (ton)

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$T_{pt}$	Yolcu trenin boş ağırlığı (ton)
$T_y$	Günlük trafik yükü (ton/gün)
UIC	Uluslararası Demiryolu Sendikası
$V$	Tren hızı (km/s)
$V_a$	Havanın hacmi ( $cm^3$ )
$V_b$	Boşluk hacmi ( $cm^3$ )
$V_k$	Katının hacmi ( $cm^3$ )
$V_p$	P dalgası hızı (km/s)
$V_s$	Suyun Hacmi ( $cm^3$ )
$V_t$	Toplam hacim ( $cm^3$ )
$\nu_{ti}$	Teğetsel Poisson Oranı (-)
$w$	numune / agrega genişliği (mm)
$w_a$	Ağırlıkça su emme (%)
$W_0$	Ayrışma – bozunma derecesi (Ayrışmamış)
$W_1$	Ayrışma – bozunma derecesi (Hafif ayrılmış)
$W_2$	Ayrışma – bozunma derecesi (Orta derecede ayrılmış)
$W_3$	Ayrışma – bozunma derecesi (İleri derecede ayrılmış)
$W_4$	Ayrışma – bozunma derecesi (Tamamen ayrılmış)
$W_5$	Ayrışma – bozunma derecesi (Kalıntı zemin)
$\bar{x}$	Ortalama
$x_{mak}$	%95 güven aralığında x'in alabileceği en yüksek değer
$x_{min}$	%95 güven aralığında x'in alabileceği en düşük değer
$\rho_d$	Kuru yoğunluk ( $g/cm^3$ )
$\rho_{sat}$	Doygun yoğunluk ( $g/cm^3$ )
$\sigma_{ci}$	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
$\sigma_{tB}$	Dolaylı çekme dayanımı (MPa)
$\sigma_{z50}$	Tek eksenli basınç dayanımı yarısı ( $\sigma_{ci}/2$ , MPa)
$\phi_i$	Kaya malzemesi içsel sürtünme açısı ( $^\circ$ )
$\psi$	Küresellik katsayısı
$\epsilon_{z50}$	Tek eksenli basınç dayanımı yarısına denk gelen eksenel birim deformasyon
$\epsilon_{a50}$	Tek eksenli basınç dayanımı yarısına denk gelen çapsal birim deformasyon
$\beta$	Beta katsayısı

## **BÖLÜM 1**

### **GİRİŞ**

#### **1.1. KONUNUN ÖNEMİ**

Günümüzde özellikle inşaat ve madencilik sektöründe agregalara olan talebin artması ve bunun bir sonucu olarak agregaların kullanım alanlarının genişlemesi, agregaların farklı çevresel ve mekanik koşullarda altındaki davranışlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesini gerekli kılmaktadır. Agreganın özelliklerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak agregaların kullanım alanları konusunda getirilen öneri ve yaklaşımlar, agregaların üretildiği anda sağladığı standart özelliklerine dayanmaktadır. Ancak agregaların kullanılmaya başlandığı andan sonraki zamana ve kullanım koşullarına göre sergileyeceği davranışı başka bir ifade ile agreganın performansının araştırılması, bu agregaların uzun dönem davranışının belirlenmesi ile açığa kavuşturulabilir.

Agregaların kullanılacağı alan gözetilerek onların uzun dönem davranışları, laboratuvar koşullarında agreganın kullanılacağı alanın benzetimini temel alan deneyler ile araştırılmaktadır. Bu kapsamda farklı çevresel ve mekanik koşullar altında agreganın özelliklerinin belirlenmesi, pratik mühendislik yaklaşımları için büyük kolaylık sağlamaktadır.

Agregaların kullanım süresi boyunca ilksel özelliklerini yitirmeden veya belirli sınırlar dahilinde temel özelliklerini muhafaza etmesi beklenmektedir. Agreganın performansının araştırılmasını amaçlayan çalışmalar, standart deney yöntemlerinin dışında agregaların farklı çevresel ve mekanik koşullar altındaki özelliklerinin değişimini temel almakta ve bu araştırmalar sonucunda bazı teorik çıkarımlar yapılmaktadır.

Ülke madenciliği açısından kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması, çeşitli mühendislik yapılarında kullanılacak agregaların en üst düzeyde performans sağlaması ve agregaların kullanım alanlarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için bu tip çalışmaların önemi her geçen gün artmaktadır.

## 1.2. TEZİN AMACI

Bu çalışma ile bazaltik kayalardan üretilen agrega malzemelerinin farklı çevresel ve mekanik koşullar altındaki özelliklerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bazaltik kayalardan üretilen agregalar çoğunlukla yüksek dayanımlı beton üretiminde agrega olarak ve hızlı tren yolu hatlarında balast agregası olarak kullanılmaktadır. Söz konusu bu iki agrega türünden balast agregaları bu çalışmanın asıl konusunu oluşturmaktadır. Ülkemizde hali hazırda çeşitli demiryolu hatlarında kullanılan iki farklı balast agregası üzerinde gerçekleştirilmiş detaylı çalışmalar ifade edilmiş, balast agregalarının duraylılıkları çeşitli deneyler ile araştırılmıştır.

Öncelikle agrega kalitesini araştırmak amacıyla balast agregalarının üretildiği kaya kütleleri ayrışma – bozunma özellikleri açısından arazi çalışmaları ile değerlendirilmiş ve ilgili kaya kütleleri farklı ayrışma – bozunma dereceleri açısından sınıflandırılmıştır. Daha sonra araştırma konusu olan bazaltik kayalara ait temel özellikler (fiziksel, mekanik ve agrega özellikleri) belirlenerek bu kayalardan üretilen agrega malzemelerinin kullanım alanları mevcut yaklaşımlar ışığında ortaya konmuştur.

Demiryolu balast agregasının dayanımının yerinde kestirimini amaçlayan bir deney yöntemi tanıtılmış ve balast agregalarının uzun dönem performanslarının araştırılması adına detaylı laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

## 1.3. TEZİN KAPSAMI

Yukarıda ifade edilen temel amaçlar doğrultusunda hazırlanan bu çalışma yedi bölümden oluşmakta ve her bir bölümde ifade edilen konular aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

- a) Birinci bölümde, tez konusunun önemi, çalışmanın amacı ve kapsamı konusunda genel bilgiler verilmiştir.
- b) İkinci bölümde, genel itibari ile kayaların duraylılığına etki eden değişirgeler özetlenmiştir.
- c) Üçüncü bölümde, demiryolu balastı tanımı yapılarak, demiryolu balastının sahip olması gereken temel özellikler verilmiş, balast agregasının duraylılığına etki eden değişirgeler tanımlanmış ve balast tabakasında gözlenen önemli sorunlar ele alınmıştır.

- d) Dördüncü bölümde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar çalışmaları verilmiştir.
- e) Beşinci bölümde, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.
- f) Altıncı bölümde, balast agregası duraylılığının araştırılmasına ilişkin gerçekleştirilen çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulguların genel olarak değerlendirilmesi yer almaktadır.
- g) Son bölümde ise doktora tezinden edinilen sonuçlar ifade edilerek, ileride yapılması faydalı olabilecek bazı çalışmalara değinilmiştir.







## BÖLÜM 2

### KAYAÇLARIN DURAYLILIĞINA ETKİ EDEN DEĞİŞTİRGELER

Kayaçların duraylılığı onların kullanım alanları, mineralojik bileşim, fiziksel ve mekanik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Kayaçların oluştuğu ortamın değişmesi (çevresel ve mekanik ortam) ile kayaçların zaman ile ilksel özellikleri değişmeye başlar. Genel olarak kayaçların duraylılığına etki eden çevresel değiştirgeler, ıslanma – kuruma, donma – çözünme, tuz kristallenmesi, ısınma – soğuma ve bu dört değiştirgenin bir bileşkesi olarak ifade edilebilen ayrışma – bozunma olarak tanımlanabilir. Bu bölümde bu dört değiştirgenin kayaçların duraylılığı üzerine olan etkileri hakkında yapılmış çalışmalardan bazıları özetlenmiştir. Ayrıca sözü edilen dört etkenin bir bileşkesi olarak tanımlanabilen ayrışma – bozunma olgusu ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

#### 2.1. ISLANMA – KURUMA

Doğada ıslanma – kuruma döngüsü, iklimsel değişiklikler sonucu ortaya çıkan mevsimsel bir süreçtir. Bu süreç, özellikle zayıf kayaçlar ve bu kayaçlardan üretilen agregalar üzerinde olumsuz etkilere sebep olur. Ancak sağlam ve gözenekliliği düşük kayaçlarda ıslanma – kuruma etkisi ihmal edilebilir (Loubser 2013).

Zhou vd. (2017) kumtaşları üzerine yaptığı araştırmalarda ilerleyen ıslanma – kuruma döngüsünün kaya malzemesi görünür gözenekliliğini ( $n_e$ , %) artırdığını belirlemiştir. Xu vd. (2017) zayıf kireçtaşlarında gerçekleştirdiği ıslanma – kuruma deneylerinde, ilerleyen ıslanma – kuruma döngüsünün söz konusu kireçtaşı agregalarının ortalama tane boyutunu ( $D_{50}$ ) yaklaşık beş kat azalttığını ifade etmiştir. Tovar ve Colmenares (2011), killi kayaçlarda ıslanma – kuruma döngüsünün kaya malzemesinde kuruma çatlakları oluşturduğunu belirtmiştir. Ayrıca araştırmacılar deneysel çalışmalar ile ilerleyen ıslanma – kuruma döngüsü ile bu kaya malzemelerinin kohezyonu ( $c_i$ , kPa) ve içsel sürtünme açısının ( $\phi_i$ , °) azaldığını ifade etmiştir.

## 2.2. DONMA – ÇÖZÜNME

Tekrarlanan donma – çözünme döngüsünün kayaç ve diğer yapı malzemeleri üzerindeki olumsuz etkileri pek çok çalışma ile ortaya konmuştur (Reed vd. 1979, Wu vd. 1998, Ruedrich ve Siegesmund 2006, Liso vd. 2007, Ondrasik ve Kopecky 2014, Chen ve Qiao 2015, Momeni vd. 2016, Wang vd. 2016, Wu vd. 2017).

Genel itibari ile donma – çözünmenin agregaların fiziksel özellikleri üzerine olan etkileri,  $n_e$  değerinin artması ve nispeten kuru yoğunluğun ( $\rho_d$ , g/cm<sup>3</sup>) azalması şeklindedir (Laughlin 1965, Muethel 1989).

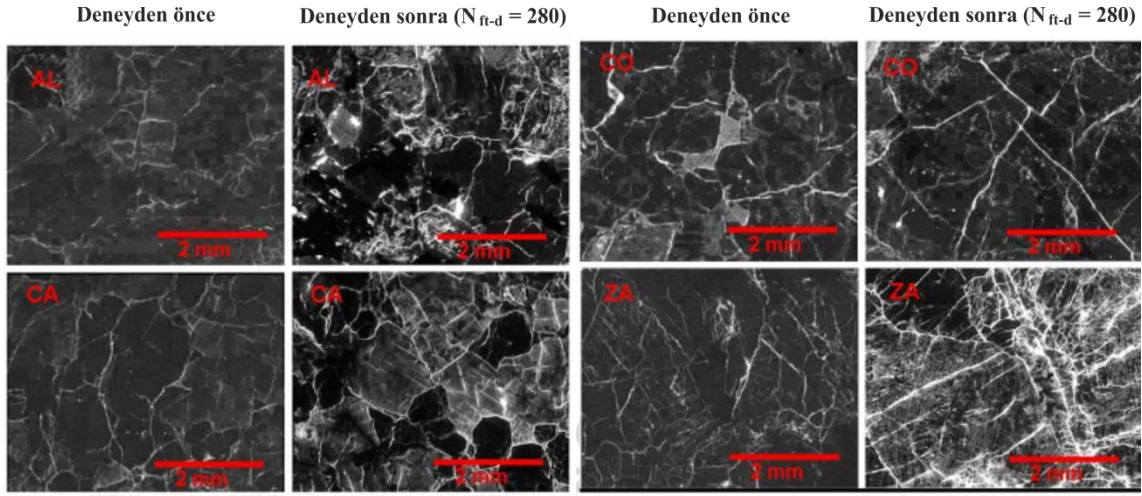
Ondrasina vd. 2002 mermerler üzerinde donma – çözünme kabini kullanarak gerçekleştirdiği çalışmalarda 204 donma – çözünme döngüsü sonunda ( $N_{ft-d} = 204$ ) donma – çözünme döngüsünün kaya malzemesi teğetsel Young Modülünün ( $E_{ti}$ , GPa) ortalama %50 azaldığını (donma – çözünme öncesi  $E_{ti} = 55$  GPa) buna karşın,  $n_e$  değerinin ise (donma – çözünme öncesi  $n_e = \%0.25$ ) ortalama %148 arttığını belirlemiştir.

Fener ve İnce (2015) andezitlerde gerçekleştirdiği çalışmalarda donma – çözünmenin kaya malzemesi fiziko-mekanik etkileri üzerine olan etkilerini detaylı bir şekilde araştırmıştır. Donma – çözünme kabini kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda,  $N_{ft-d} = 30$  koşulunda andezitlerdeki tek eksenli basınç dayanımının ( $\sigma_{ci}$ , MPa) ortalama % 24 (donma – çözünme öncesi  $\sigma_{ci} = 60.31$  MPa) ve P dalgası ( $V_p$ , km/s) değerinin ise ortalama %4 (donma – çözünme öncesi  $V_p = 3.78$  km/s) oranında bir azalmanın olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan andezitik kayaçların  $n_e$  değeri ise  $N_{ft-d} = 30$  koşulunda ortalama %20 (donma – çözünme öncesi  $n_e = \%5.65$ ) oranında artmıştır.

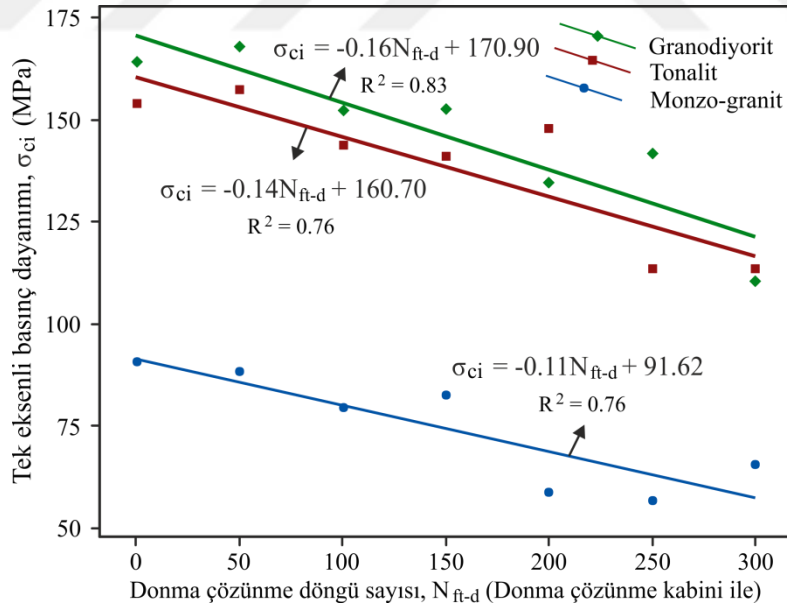
Lista vd. (2015) ise granitlerde gerçekleştirdiği çalışmalarda donma – çözünmenin granitlerde makro ve mikro çatlaklar oluşturduğunu deneysel çalışmalar ile ortaya koymuş ve söz konusu mikro çatlakların gözenek şekli ve geometrisini değiştirdiğini (artırdığını) belirlemiştir (Şekil 2.1).

Momeni vd. (2016) granitik kayaçlarda gerçekleştirdiği çalışmalarda, donma çözünmenin kaya malzemesinin  $\sigma_{ci}$  değeri üzerinde belirgin bir azalmaya sebep olduğunu belirlemiştir. İlerleyen donma – çözünme döngüsünün tek eksenli basınç dayanımı üzerine olan etkileri

Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekil 2.2'ye göre  $N_{ft-d} = 300$  koşulunda mağmatik kayaçların  $\sigma_{ci}$  değerleri ortalama %27 ile %32 arasında azalmaktadır.



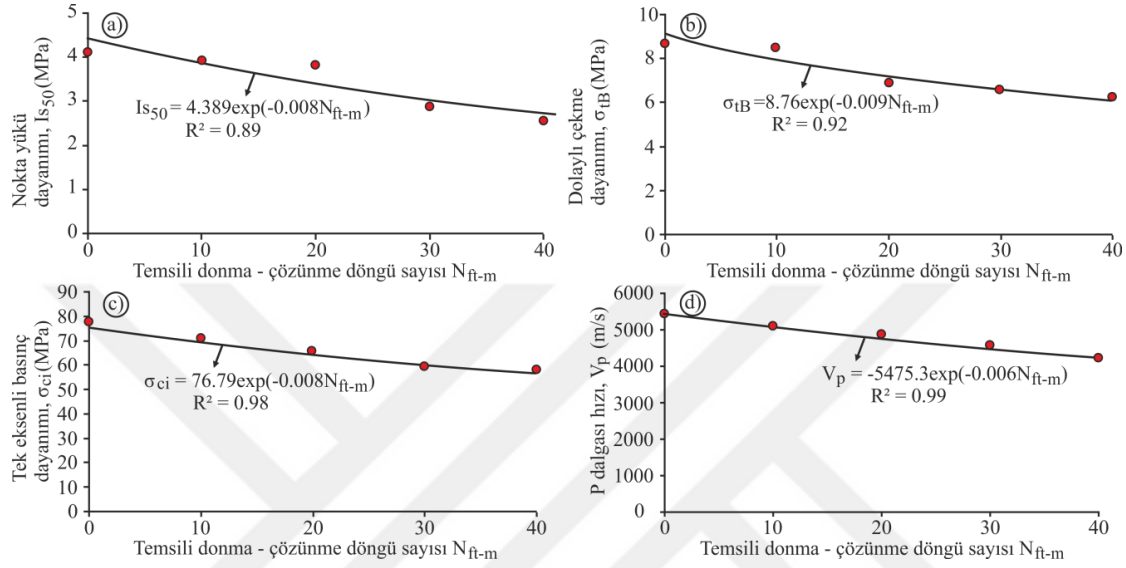
**Şekil 2.1** Donma çözünme etkisi ile granitlerde oluşan mikro çatlaklar (Lista vd. 2015). AL: Alpedrete graniti, CA: Cadalso graniti, CO: Colmenar graniti, ZA: Zarzalejo graniti.



**Şekil 2.2** Farklı donma - çözünme döngülerinde mağmatik kayaçlara ait  $\sigma_{ci}$ 'deki değişim (Momeni vd. 2016'dan düzenlenerek).

Heidari vd. (2017) kireçtaşları üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda, doğada meydana gelen donma - çözünme olayının laboratuvar ortamındaki benzetimini magnezyum sülfat don kaybı

deneyleri ile temsil etmiş olup, toplamda 40 magnezyum sülfat don kaybı döngüsü ( $N_{ft-m} = 40$ ) geçiren kireçtaşlarına ait mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekil 2.3'e göre artan döngü sayısı ile kireçtaşlarının  $\sigma_{ci}$ ,  $V_p$ , dolaylı çekme dayanımı ( $\sigma_{tB}$ , MPa) ve düzeltilmiş nokta yükü dayanımı ( $I_{s50}$ , MPa) değerlerinde belirgin azalmalar olduğunu belirlenmiştir.



**Şekil 2.3** Artan temsili donma – çözünme döngüsü ile kireçtaşlarının mekanik özelliklerindeki değişim a) Nokta yükü dayanımındaki değişim b) Dolaylı çekme dayanımındaki değişim c) Tek eksenli basınç dayanımındaki değişim d) P dalgası hızındaki değişim (Heidari vd. 2017'den düzenlenerek).

### 2.3. ISINMA – SOĞUMA

Aşırı kurak ve çöl ikliminin hakim olduğu bölgelerde kayalar ısınma – soğuma döngüsüne maruz kalır. Isınma – soğuma genellikle kil içeren kayalarda kuruma çatlaklarına sebep olmakla birlikte, ısınma soğumanın kayalar üzerindeki olumsuz etkileri önceki çalışmalarda ifade edilmiştir (Saiang 2011, Xing vd. 2011, Niry vd. 2013, Bernhart vd. 2014).

Saiang (2011) diyabaz, granit ve şist kayalarında gerçekleştirdiği ısınma – soğuma deneylerinde sözü edilen kayalar 1100 °C'de 1 saat süreyle ısıtılmış ve daha sonra kayalar oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiştir. Daha sonra bu kayalar üzerinde tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiş ve diyabaz kayacında  $\sigma_{ci}$  ortalama %54 (ısıtılmadan önceki  $\sigma_{ci} = 194$  MPa), granit kayacında ortalama %92 (ısıtılmadan önceki

$\sigma_{ci} = 231$  MPa) ve şist kayacında ise ortalama %70 (ısıtılmadan önceki  $\sigma_{ci} = 254$  MPa) oranında bir azalma belirlemiştir.

Benzer çalışmalar ülkemizdeki araştırmacılar tarafından da gerçekleştirilmiştir. Karahan vd. (2018) yüksek sıcaklıklarda (1000 °C'ye kadar) gerçekleştirdiği ısınma – soğuma deneylerinde; tefritik kayaçları 1000 °C'de 2 saat süreyle ısıtmış ve kayaçların oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda tefritik kayaçların  $\sigma_{ci}$  değerinde %55 (ısıtılmadan önceki  $\sigma_{ci} = 128$  MPa), P dalga hızında ise ortalama %64 (ısıtılmadan önceki  $V_p = 5.33$  km/s) oranında bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

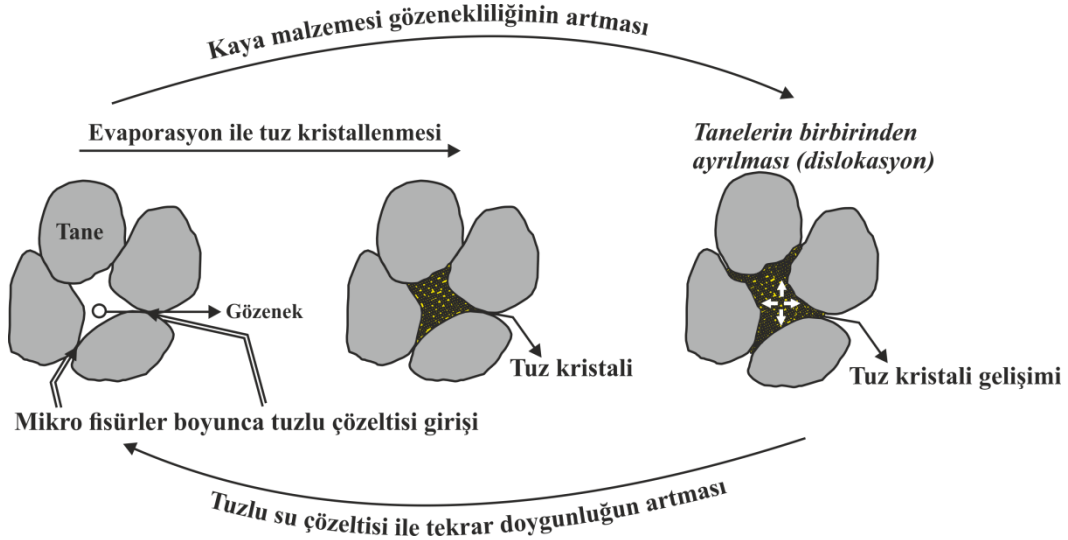
Benzer bir çalışma da kireçtaşları üzerinde Sünnetçi vd. (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. 1000 °C'de 2 saat süreyle ısıtılan ve oda sıcaklığına gelene kadar soğuması beklenen kireçtaşlarında tek eksenli basınç dayanımı ortalama %83 (ısıtılmadan önceki  $\sigma_{ci} = 169$  MPa) ve P dalga hızı ( $V_p$ , km/s) da ortalama %48 (ısıtılmadan önceki  $V_p = 5.87$  km/s) oranında azalmıştır (Sünnetçi vd. 2018).

## 2.4. TUZ KRİSTALLENMESİ

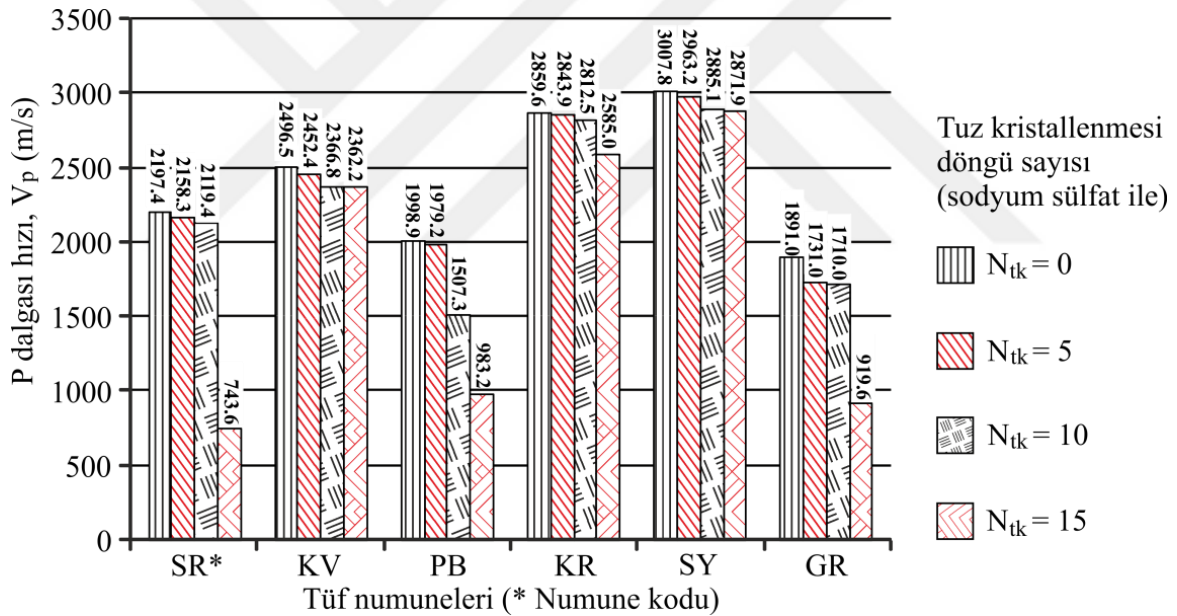
Tuz kristallenmesi, genellikle dalgakıran olarak kullanılan kayaçlarda gözlenen ve duraylılığı azaltıcı diğer bir çevresel değişirgedir. Genellikle tuzlu ortamlara maruz kalan kayaçlar zamanla tuzlu su çözeltisi ile doymun hale gelir. Kuruma veya evaporasyon süreçleri ile kayaçlar bünyesindeki suyu bırakır, mikro çatlak ve gözeneklerde dehidrasyon ile tuz kristalleri meydana gelir.

Bu döngünün tekrarlanması ile gözeneklerde ve mikro çatlaklardaki tuz kristalleri artar ve taneler arasında bir ayrılma (dislokasyon) başlar. Gözenek ve mikro çatlaklardaki tuz kristallerinin artmasıyla kayaçlarda belirgin bir parçalanma meydana gelir. Bu durum şematik olarak Şekil 2.4'te verilmiştir.

Ünal ve Gündoğdu (2011) tüfler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda 15 tuz kristallenme döngüsü ( $N_{tk} = 15$ ) sonunda tüflerin  $V_p$  değerinde azalmalar olduğunu ifade etmiştir. İlerleyen tuz kristallenme döngüsü sonunda altı farklı tüfe ait  $V_p$  değerlerindeki değişim Şekil 2.5'te verilmiştir.



**Şekil 2.4** Tuz kristallenmesi ile kaya malzemesinde gerçekleşen parçalanma (Ouacha vd. 2013'ten değiştirilerek).



**Şekil 2.5** Tuz kristallenmesi döngü sayısı ile tüflerin  $V_p$  değerindeki değişim (Ünal ve Gündoğdu 2011'den düzenlenerek).

Tuz kristallenmesinin kaya malzemesi fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine olan etkileri Heidari vd. (2017) tarafından da detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Kireçtaşı örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında 16 tuz kristallenmesi döngüsü ( $N_{tk} = 16$ ) sonunda kireçtaşlarının bazı mekanik özelliklerinde ( $I_{s50}$ ,  $\sigma_{tB}$ ,  $\sigma_{ci}$  ve  $V_p$ ) önemli değişimler olduğunu belirlemiştir.

## 2.5. AYRIŞMA – BOZUNMA

Kayaçlar oluştuğu andan itibaren fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörlerden etkilenecek ilksel yapılarını kaybeder. Yukarıda ifade edilen dört faktörün bir bileşkesi aslında kayaçlarda ayrışma – bozunma adı altında birleştirilebilir.

Ayrışma – bozunma mağmatik kayaçlarda çoğunlukla hidrotermal çözeltilerin etkisi altında kayaçlarda gözlenen değişiklikler olarak tanımlanabilir. Sedimanter ve metamorfik kayaçlar için ise kayaçların bulunduğu ortamın değişimini (su etkisi altında sıcaklık ve basınç değişimi) takiben kayaçlarda ağırlıklı olarak gözlenen kimyasal bir ayrışma olarak gerçekleşmektedir.

Kayaçlarda ayrışma – bozunma farklı şekillerde gözlenirse de genel itibari ile ayrışma – bozunma kayaçların hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini azaltıcı önemli bir kriterdir. Bu sebepten taş ocağı ve agrega madenciliğinde ayrışma – bozunma öncelikle arazide sağlıklı bir şekilde belirlenmelidir.

Kayaçların kullanım alanları gözetilerek sergileyeceği performans (kullanım ömrü) hiç şüphesiz agrega kalitesi ile doğru orantılıdır. Arazide ayrışma – bozunma derecelerinin belirlenmesi, farklı ayrışma – bozunma içeren birimlerin yanal ve düşey sınırlarının belirlenmesi kayaçların ve bu kayaçlardan üretilen agregaların kullanım performansı ve uzun ömürlü olması konularında oldukça önemlidir.

Beavis (1985) ayrışma – bozunmanın belirlenmesi için bazı göstergelerin olduğunu ifade etmiştir. Bu göstergeler aşağıdaki gibi listelenebilir.

- a) Kaya malzemesi ve kütledeki renk ve doku değişiklikleri
- b) Dayanımdaki azalma (tek eksenli basınç dayanımı, nokta yükü dayanımı vb.)
- c) Süreksizlik aralıklarında ve pürüzlülüğünde azalma
- d) Kaya malzemesinin ağırlıkça su emme ve gözenekliliğinin artması
- e) Kaya kalite göstergesi (RQD, %)'nin azalması
- f) Mineralojik ve petrografik özelliklerin değişmesi (mineral dönüşümleri vb.)
- g) Süreksizlikler arası su gelirindeki artışlar

Arazi ve laboratuvar çalışmalarında farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri genel itibari ile ISRM (1981) tarafından önerilen gözlemsel sınıflama doğrultusunda ayırtlanmaktadır (Çizelge 2.1).

**Çizelge 2.1** Arazide ayrışma – bozunmanın tanımlanabilmesi için önerilen gözlemsel sınıflama (ISRM 1981’den düzenlenerek).

Tanımlama	Sembol	Tanımlayıcı Özellikler
Ayrışmamış	$W_0$	Diri görünümlü, yapı ve dokuda bir değişiklik yoktur, süreksizlik yüzeylerinde ayrışma –bozunma işaretleri gözlenmez, jeolog çekiciyle kolay kırılmaz, çekiçle darbe yapıldığında çekiç seker.
Hafif derecede ayrışmış	$W_1$	Süreksizlik yüzeylerinde hafif bir değişim söz konusu olabilir, hafif renk değişimleri gözlenebilir. Yapı ve dokuda bir değişiklik yoktur.
Orta derecede ayrışmış	$W_2$	Yapı ve dokuda belirgin değişimler söz konusudur ancak ayrışmamış kayalardaki yapı ve doku kısmen tanımlanabilir. Ciddi renk değişimleri gözlenir. Süreksizlik yüzeylerinde ayrışma – bozunma işaretleri kolaylıkla belirlenebilir. El numuneleri el ile kırıp parçalamak oldukça güçtür.
İleri derecede ayrışmış	$W_3$	Yapı tamamen değişmiş olup, doku kısmen tanımlanabilir. Süreksizlik yüzeylerinde ayrışma – bozunma işaretleri kolaylıkla belirlenebilir. Renk değişimleri belirgindir.
Tamamen ayrışmış	$W_4$	Yapı ve doku tamamen değişmiştir, kalıntı zemin içinde küçük kaya blokları sayesinde ilgili kaya kütlesi tanımlanabilir. El numuneleri ve kaya kütlesi yüzeyleri bıçakla kolaylıkla çizilebilir.
Kalıntı zemin	$W_5$	Yapı ve doku tamamen değişmiştir. Kalıntı zeminlerde renk ve doku ayrışmamış kaya külesinden tamamen farklıdır. Kaya kütlesi kalıntı zemine dönüştüğünden süreksizlikler gözlenmez.

Ündül ve Tuğrul (2016) ultra-bazik kayalar üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, ilerleyen ayrışma – bozunmanın kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmıştır. Gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında ilerleyen ayrışma – bozunma ile ağırlıkça su emme ( $w_a$ , %) ve kızdırma kaybı (LOI, %) değerleri artarken  $\sigma_{ci}$  değerleri azalmaktadır (Çizelge 2.2).

Köken vd. (2016) ve Köken ve Özarıslan (2018) sırasıyla granodiyorit ve andezitler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, ilerleyen ayrışma – bozunmanın kaya malzemesi fiziksel ve mekanik özellikler üzerine olan olumsuz etkilerini deneysel çalışmalar ile ortaya koymuştur.

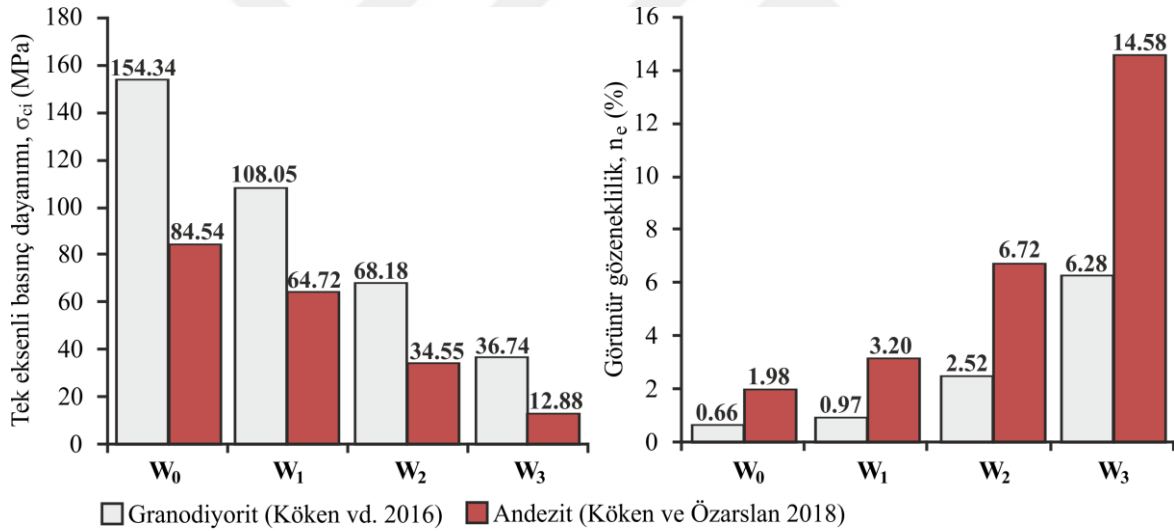


Bu çalışmalara göre ilerleyen ayrışma – bozunma ile bazı kaya özelliklerindeki değişimler Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Şekil 2.6'ya göre ilerleyen ayrışma – bozunma ile kaya malzemesindeki  $n_e$  değeri artarken  $\sigma_{ci}$  değeri azalmaktadır.

**Çizelge 2.2** İlerleyen ayrışma – bozunma ile dunit ve gabrolara ait fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişim (Ündül ve Tuğrul 2016).

Parametre	Ayrışma Derecesi							
	Ayrışmamış ( $W_0$ )		Hafif derecede ayrılmış ( $W_1$ )		Orta derecede ayrılmış ( $W_2$ )		İleri derecede ayrılmış, ( $W_3$ )	
Ağırlıkça su emme, $w_a$ (%)	0.17 <sup>I</sup>	0.13 <sup>II</sup>	0.20	0.50	0.83	1.26	1.16	6.55
Tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_{ci}$ (MPa)	242	236	124	201	106	127	–	–
Kızdırma kaybı, LOI (%)	4.36	1.60	8.85	2.65	13.36	2.96	16.89	4.70

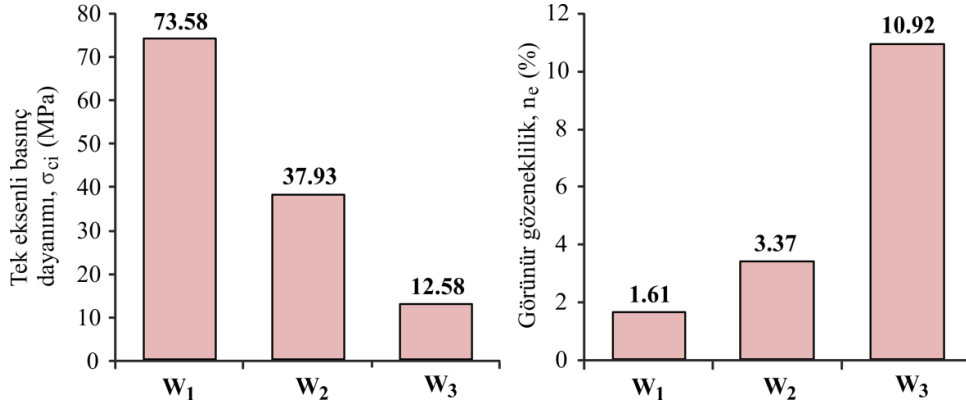
Not: Sol kolondaki veriler dunit (<sup>I</sup>), sağ kolondaki veriler diyorit (<sup>II</sup>) kayalarına aittir.



$W_0$  : Ayrışmamış  $W_1$  : Hafif derecede ayrılmış  $W_2$  : Orta derecede ayrılmış  $W_3$  : İleri derecede ayrılmış

**Şekil 2.6** Andezitik ve granodiyoritik kayalarda ayrışma – bozunmanın bazı kaya özelliklerine olan etkisi (Köken vd. 2016 ve Köken ve Özarslan 2018'den düzenlenerek).

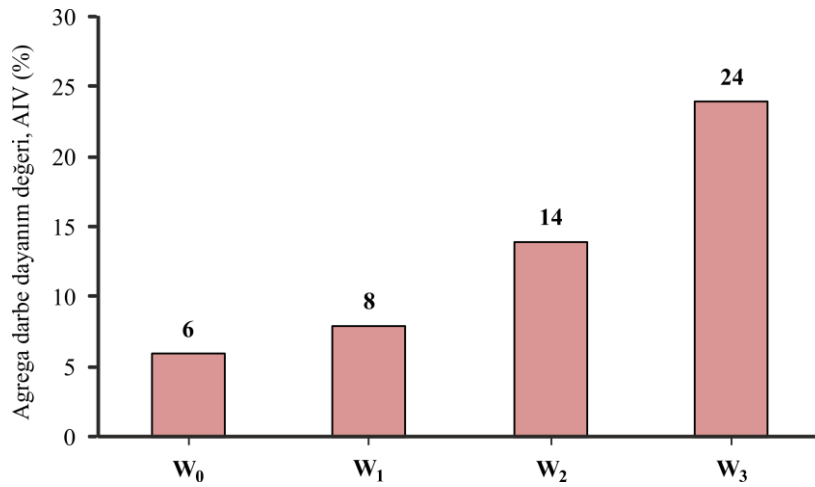
Koca ve Kıncal (2015) İzmir'deki andezitler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda Şekil 2.6'daki bulgulara benzer şekilde ilerleyen ayrışma – bozunma ile andezitlerde  $n_e$  değerinin arttığını ve  $\sigma_{ci}$  değerinin ise azaldığını belirlemiştir (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7** Andezitik kayalarda ayrışma – bozunmanın  $n_e$  ve  $\sigma_{ci}$  üzerine etkileri (Koca ve Kınca 2015'ten düzenlenerek).

Agregalarda da ayrışma – bozunma üzerine gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar mevcut olup, bu çalışmalar çoğunlukla agregaların kullanılmaya başlandıktan sonraki ayrışma süreçlerini ifade etmektedir (Caricato vd. 2010, Boler vd. 2012, Stalheim 2014, Ergüler vd. 2016). Diğer taraftan farklı ayrışma – bozunma derecesi içeren kaya kütlelerinden üretilen agregaların özelliklerindeki değişimlerin incelendiği çalışmalar da mevcuttur (Irfan ve Dearman 1978, Bragg 1989, Asamoah vd. 2014, Rigopoulos vd. 2015).

Irfan ve Dearman (1978) farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki granitlerde gerçekleştirdiği çalışmalarda, ilerleyen ayrışma – bozunma ile agrega darbe dayanım değerlerinde (AIV, %) belirgin artışlar olduğunu belirlemiştir (Şekil 2.8).



**Şekil 2.8** İlerleyen ayrışma – bozunma ile granitik kayalarda AIV değerindeki değişim (Irfan ve Dearman 1978'den düzenlenerek).

Bragg (1989) farklı ayrışma – bozunma içeren pek çok kaya kütlelerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerini petrografik analizler ile ortaya koymuş ve ilerleyen ayrışma – bozunma ile agrega kalitesi arasında ters orantılı bir ilişkinin olduğunu ifade etmiştir.

Asamoah vd. (2014) kuvarsitler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmalarda, ilerleyen ayrışma – bozunmanın agrega özelliklerine olan etkilerini araştırmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında hafif derecede ( $W_1$ ) ve ileri derecede ayrılmış ( $W_3$ ) kuvarsitler üzerinde çeşitli agrega deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ifade edilen deney sonuçlarına göre, ağırlıkça su emme ( $w_a$ , %), agrega darbe değeri (AIV, %) ve Los Angeles aşınma (LAA, %) değerleri ilerleyen ayrışma – bozunma ile artmaktadır (Çizelge 2.3).

**Çizelge 2.3** İlerleyen ayrışma – bozunmanın kuvarsit kayacının agrega özelliklerindeki değişimi (Asamoah vd. 2014).

Parametre	Ayrışma Derecesi	
	Hafif ayrılmış ( $W_1$ )	İleri derecede ayrılmış, ( $W_3$ )
Ağırlıkça su emme, $w_a$ (%)	2	3
Agrega darbe değeri, AIV (%)	19	32
Los Angeles aşınma kaybı, LAA (%)	46	71

Rigopoulos vd. (2015) Yunanistan'daki ultra-bazik kayalar üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarda, ultra-bazik kayaların agrega olarak kullanılabilir potansiyellerini araştırmış ve ilerleyen ayrışma – bozunma ile ultra-bazik kayalarda  $w_a$  ve LOI değerlerinde artışlar olduğunu ifade etmiştir.

Caricato vd. (2010) dalgakıran olarak kullanılan kireçtaşlarında gerçekleştirdikleri çalışmalarda, tuzlu suyun kireçtaşı bloklarını ayrıştırma derecesini analitik bir dizi eşitlikle açıklamaya çalışmıştır.

Boler vd. (2012) kireçtaşı ve granit gibi kayalardan üretilen balast malzemelerinin fiziksel olarak ayrışma ve aşınma durumlarını görüntü analiz teknikleri ile araştırmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında balast agregalarının (31.5 – 50.0 mm) aşınma durumları fiziksel bir ayrışma süreci olarak tanımlarken ilerleyen sürtünme hareketleri ile balast agregalarının köşeliliğinin azaldığını ortaya koymuştur.

Stalheim (2014) Güney Afrika'daki granitik kayaçlarda gerçekleştirdiği çalışmalarda ilerleyen ayrışma – bozunma ile granitik kayaçların LAA ve AIV değerlerinde artışlar olduğunu belirlemiştir.

Diğer taraftan Ergüler vd. (2016) eskiden beri hizmet veren demiryolu balast malzemelerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarda hizmet süresi artan balast malzemelerinde  $w_a$  değerlerinin arttığını ifade etmiştir.

Agregalardaki ayrışma – bozunmanın bir başka önemli etkisi ise betonlardaki alkali – silis reaktivitesidir. Ayrışmış bir başka ifade ile su içeren kuvars, ince kesitlerde dalgalı sönme gösteren meta-kuvars, kalsedon, opal gibi mineraller içeren agregalar beton agregası olarak kullanıldığında, söz konusu betonlarda ilerleyen zaman içerisinde alkali – silis reaktivitesi gözlenmektedir.

Gerçekleşen alkali – silis reaktivitesi sonucunda betonda çatlama ve beton dayanımında ciddi azalmalar meydana gelmektedir. Bu konuda yapılmış önemli çalışmalar mevcuttur (Castro vd. 2009, Fatt vd. 2013, Sachlova 2013, Murlidhar vd. 2016).

## BÖLÜM 3

### DEMİRYOLU BALASTI

Bu bölümde demiryollarında balast malzemesinin kullanım amacı ve sahip olması gereken temel özellikleri ifade edilmiş, balast malzemesi ve balast tabakası üzerine yapılmış önemli çalışmalara değinilmiş, balast malzemesinin duraylılığına etki eden değıştirmeler ve balast tabakasında gözlenen önemli sorunlar özetlenmiştir.

Farklı ülkeler kendi rezerv kaynakları ve kayaçların özellikleri ölçüsünde farklı litolojideki kayaçlardan üretilen balast agregalarını kullanmaktadır. Ülkemizde yürürlükte olan mevcut demiryolu balast teknik şartnamesinde (TS 7043 EN 13450) teknik gereksinimlere uyan ve litolojik olarak bazaltik kayaçlardan üretilen doğal malzemeler demiryolu balastı olarak kullanılmaktadır. Bu sebepten bu bölümde bazaltik kayaçlar odağında demiryolu balast malzemelerine ilişkin genel bilgiler özetlenmiştir.

#### 3.1. AGREGA MALZEMESİ OLARAK BAZALTİK KAYAÇLAR

Doğaltaş üretiminin hızla arttığı günümüzde, kayaçların mühendislik uygulamalardaki kullanım alanları geniş bir yayılım göstermekte, özellikle inşaat ve madencilik sektöründe teknik şartnamelere uygun kayaçlardan çeşitli amaçlara yönelik agrega malzemeleri üretilmektedir.

Bu kapsamda bazaltik kayaçlar ( $\text{SiO}_2 \leq 52\%$ ), agrega madenciliğinde aşağıdaki genel özellikleri sebebiyle tercih edilen önemli kayaç grupları arasında yer almaktadır.

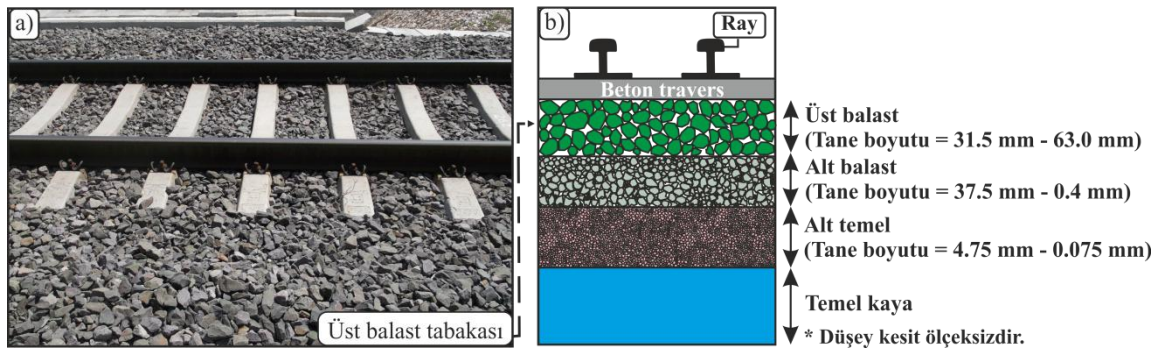
- a) Yüksek dayanım özelliği
- b) Düşük su emme
- c) Mineralojik ve petrografik açıdan uygunluk
- d) Ayırışma – bozunmaya karşı diğer kayaçlardan daha dirençli olması
- e) Rezerv açısından yeterli bollukta bulunması

Demiryolu sektöründe bazaltik kayalardan üretilen farklı boyut grubundaki agregalar genel olarak yüksek dayanımlı beton travers ( $\geq C60/70$  : 28 gün sonunda, silindirik numunedeki tek eksenli basınç dayanımı  $\geq 60$  MPa, küp numunedeki tek eksenli basınç dayanımı  $\geq 70$  MPa) üretiminde, bunun dışında bazaltik kayalardan üretilen iri boyuttaki (31.5 – 63 mm) agregalar ise balast malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Demiryolu balastı, tane boyutu çoğunlukla 31.5 – 63.0 mm arasında değişen ve beton traversin hemen altındaki 20 – 50 cm kalınlığındaki balast tabakasını oluşturan agregalar için kullanılan bir terimdir. Tren hattı altyapısında balast malzemesinin kullanılmasının çeşitli sebepleri olup, bunlardan en önemlileri Profillidis (2014) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

- Raylara ve traverslere gelen trafik yüklerinin alt temele aktarımını sağlamak
- Trenden kaynaklanan titreşimleri en aza indirmek
- Ray ve traverslerin yanal ve düşey olarak hareketinin engellenmesine yardımcı olmak
- Yüzey sularının drenajını sağlamak

Gerek hızlı trenlere olan talebin artması, gerekse de tren hızlarının artmasıyla artan dingil yükleri sebepleriyle, balast malzemesinin kalitesi ve kontrolü hakkındaki araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 3.1'de tipik bir demiryolu balast tabakası (Şekil 3.1a) ve beton travers altındaki altyapı katmanlarının temsili bir düşey kesiti (Şekil 3.1b) verilmektedir.



**Şekil 3.1** Demiryolu alt yapı elemanları a) Tipik bir üst balast tabakası b) Beton travers altındaki demiryolu altyapı elemanlarının temsili düşey kesiti.

Beton travers altında oluşturulan balast tabakası Profillidis (2014) tarafından ifade edilen amaçlar doğrultusunda kullanılmakta olup, söz konusu bu tabakayı oluşturan balast agregalarının bazı temel özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Balast malzemesinin kalitesi demiryolu hattının duraylılığı için oldukça önemli bir altyapı elemanı olup, Chrismer (1985), Selig ve Waters (1994) ve Profillidis (2014) balast agregasının sahip olması gereken temel özellikleri aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

- a) Balast malzemesi tamamen kırılmış ve köşeli parçalardan oluşmalıdır.
- b) Yüksek dayanımlı kayalardan üretilmelidir.
- c) Aşınma, parçalanma ve donma – çözünmeye karşı yüksek dirençte olmalıdır.
- d) Balast malzemesi şekilsel olarak uzamış (ortalama boy (l) / ortalama kalınlık (t)  $\geq$  3) olmamalıdır.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD), TS 7043 EN 13450 demiryolu balastı teknik şartnamesine göre, ülkemizde yüksek hızlı tren hatlarında sadece bazaltik kayalardan üretilen balast agregalarının kullanılmasına izin verilmektedir.

Ülkemizde herhangi bir hızlı demiryolu hattına serilecek olan balast malzemesinin Çizelge 3.1'deki özelliklere sahip olması gerekmektedir. Teknik özellikleri sağlayan bir balast malzemesinin bulunduğu tren hattının yoğunluğu ve çevresel koşullara bağlı olarak beklenen servis süresi boyunca hizmet vermesi beklenmektedir.

**Çizelge 3.1** Demiryolu balastının sahip olması gereken teknik özellikler (TCDD 2017; TS 7043 EN 13450)

Özellik	Deney Standardı	Limit Değer
Tane boyutu (mm)	TS EN 933-1	31.50 – 63.00
Los Angeles Aşınma Kaybı, LAA (%) (31.50 mm – 50.00 mm, 1000 devir)	TS EN 1097-2	$\leq$ 14
Magnezyum sülfat don kaybı, M <sub>wl</sub> (10 döngü sonunda) (%)	TS EN 1367-2	$\leq$ 3
Ağırlıkça su emme, w <sub>a</sub> (%)	TS EN 1097-6	$\leq$ 1.5
Yassılık indeksi, I <sub>f</sub> (%)	TS EN 933-3	$\leq$ 20
Kaya türü	TS 10088 EN 932-3/A1	Bazaltik kayalar

Beklenen kullanım süresinden önce özelliğini yitiren balast malzemesi, balastın izin verilen oturma miktarından daha fazla bir oturmaya sebep olmakta ve bu durumda trenden

kaynaklanan statik ve dinamik yüklerin alt temele aktarılması zorlaşmaktadır. Yüklerin aktarılamaması da ray, beton travers ve bağlantı elemanlarında sorunlara sebep olmaktadır (Shenton 1985, Raymond ve Bathurst 1987, Klassen vd. 1987, Cope 1993, Selig ve Waters 1994, Stoecker 2002, Nurmikolu 2005).

Genel olarak balast kalitesi, balast kirlenmesi ve balast agregası parçalanma mekanizmasının araştırılmasını ve alt temele yük aktarımı konularında önemli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan önemli olanları aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Koohmishi ve Palassi (2017) tekrarlanan dinamik yükler altında gerçekleştirdiği deneylerde balast dayanımındaki azalmanın laboratuvar ortamında oluşturdukları küçük ölçekli balast tabakasındaki eksenel deformasyonları artırdığını ifade etmiştir.

Balast agregasında şekilsel özellik – dayanım konusunda çalışmalar gerçekleştiren Okonta (2014), balast agregasındaki yassılaştırmanın LAA değerini artırdığı belirtilmiştir. Bu açıdan agregaların şekilsel özelliğindeki değişimin balast tabakasındaki kirliliğe etki edeceği sonucuna ulaşılabilir.

Moaveni vd. (2014) ve Qian vd. (2014) balast kirlenmesini Los Angeles aşınma kaybı deneyleri ile ortaya koymuştur. Trafik yüklerini farklı devir sayılarındaki Los Angeles aşınma deneyleri ile temsil eden yazarlar balast kirlenmesinin balast tabakası bakım aralığı süresi üzerinde etkili olacağını ifade etmektedir.

Diğer taraftan Tennakoon vd. (2012) ile Parsons vd. (2014) balasttaki kirlenmenin balast tabakasının hidrolik iletkenliğini azalttığını ve bu gibi durumlarda ciddi drenaj sorunlarının yaşanabileceğini vurgulamaktadır.

Balast tabakası kirlenmesinde en önemli ön koşul olan balast kalitesi çeşitli deney yöntemleri ile araştırılmaktadır. Raymond (1985) geometrik olarak yaprak şekilli veya uzamış agregaların ( $l/t > 3$ ) demiryolu balast malzemesi olarak kullanılmaması gerektiğini ifade etmiştir. Araştırmacının gerçekleştirdiği çalışmalarda yaprak şekilli agregaların dayanımlarının kübik veya kübiğe benzer şekilli agregaların dayanımından daha düşük olduğunu ve yükler altında yaprak şekilli agregaların daha kolay kırılıp parçalanabildiğini ifade etmiştir.



Bu açıdan agregalarının üretildiği taş ocaklarında üretilecek agreganın geometrik özellikleri gözetilerek kırıcı seçimi de oldukça önemli bir olgu olarak değerlendirilmektedir (Mitchell vd. 2008). Endüstride demiryolu balast agregaları genelde dik milli kırıcılar kullanılarak üretilmektedir (Aydın 2018).

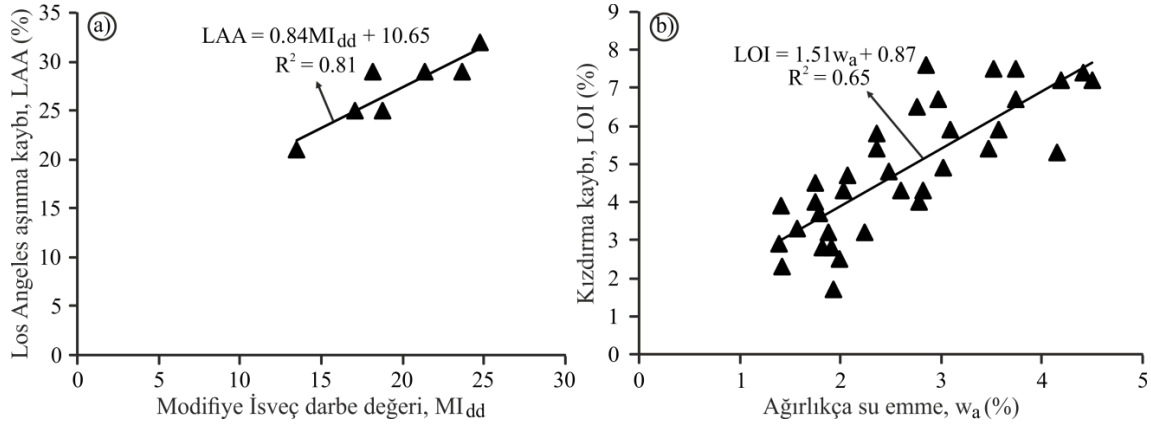
Indraratna vd. (1998) balast agregaların üç eksenli basınç koşulu altındaki dayanım ve deformasyon özelliklerini araştırmıştır. Gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre, balast tabakasındaki yanal basınç artması ile agregaların kesme dayanımı artmaktadır. Ancak artan yanal basınçlarda agregaların kenetlenmesi artarken balast tabakasındaki kirlenme de artmaktadır. Aşırı kenetlenme balast tabakasındaki yük aktarımında zorluklara, balast tabakasında kirlenmeye ve drenaj problemlerine yol açabilir (Indraratna vd. 1998). Bu açıdan balast tabakasında sıkılama derecesi oldukça önemli bir olgu olarak öne çıkmaktadır.

Balast tabakasında optimum kenetlenmenin sağlanması konusundaki önemli bir araştırma Salim (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacının gerçekleştirdiği üç eksenli basınç deneylerinde artan yanal basınç ile balast tabakasındaki kirlenmenin de arttığı belirlenmiştir. Trafik yükleri hariç tutulmak koşulu ile kirlenme derecesi, balast kalitesi ve balast tabakası sıkılama derecesi ile doğrudan ilişkilidir (Salim 2004).

McDowell vd. (2003) balast agregası dayanımını statik yükleme altındaki parçalanma deneyleri ile araştırmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde agregası tane boyutunun azalması ile agregası dayanımının arttığı ve parçalanmanın azaldığı belirlenmiştir.

Lim (2004) demiryolu balast malzemelerinin parçalanma mekanizmasının araştırılmasını amaçlayan çalışmada, temel agregası deneyleri ile statik yükleme altında büyük ölçekli parçalanma deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışma sonunda agregaların yassılık indeksi ile Los Angeles aşınma kaybı arasında anlamlı bir ilişki elde edilememiştir. Buna karşın agregaların ağırlıkça su emme değerindeki artışın Mikro-deval aşınma kaybı değerlerini artırdığı ifade edilmiştir.

Nurmikolu (2005) balast dayanımını çeşitli deney yöntemleri ile araştırmış olup, LAA ile Modifiye İsveç darbe değeri ( $MI_{dd}$ ) arasında anlamlı bir ilişki elde etmiştir (Şekil 3.2a). Ayrıca balast agregalarında  $w_a$  ile LOI arasında da doğrusal bir ilişki belirlenmiştir (Şekil 3.2b).



**Şekil 3.2** Balast agregası özellikleri arasındaki bazı ilişkiler a) MI<sub>dd</sub> ile LAA arasındaki ilişki b) w<sub>a</sub> ile LOI arasındaki ilişki (Nurmikolu 2005'ten düzenlenerek).

Bach (2013) balast agregalarındaki aşınma türlerini çeşitli deney yöntemleri ile araştırmıştır. Bu çalışmada, Los Angeles aşınma kaybı deneyi öncesi ve sonrası bazı agregaların yüzeyleri üç boyutlu tarama teknikleri ile sayısallaştırılmış ve LAA deneyleri öncesi ve deney sonrası agregaların köşelilik durumları araştırılmıştır. Çalışmada Los Angeles aşınma deneyleri sonucunda artan LAA değeri ile agregası köşeliliğindeki değişim arasında anlamlı bir ilişki belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile dayanımı yüksek agregaların dayanımı düşük agregalara göre daha az aşındığı sonucuna varılmıştır.

Nalsund (2014) balast agregası seçim kriterleri ve performans analizi konularında gerçekleştirdiği çalışmalarda, donma – çözünmenin balast agregası üzerine etkilerini ayrıntılı laboratuvar çalışmaları ile ortaya koymuştur. Gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında agregaların don kaybı değerleri donma – çözünme kabini kullanılarak belirlenmiştir. Toplamda 60 donma – çözünme döngüsüne ( $N_{ft-d} = 60$ ) tabi tutulan balast agregalarında Los Angeles aşınma kaybı deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak 60 donma – çözünme döngüsü sonunda agregaların Los Angeles aşınma kaybının ortalama %5 ile %20 arttığı belirlenmiştir.

Koohmishi ve Palassi (2016) balast agregası kalitesini nokta yükü dayanım testi ile araştırmıştır. Farklı litolojideki kayalardan (bazalt, marn, dolomit ve trakit) üretilen demiryolu agregası malzemeleri üzerinde gerçekleştirdikleri nokta yükü deneylerinde, araştırmacılar agregası büyüklüğündeki azalmanın nokta yükü dayanımını artırıcı bir unsur olduğunu belirlemiştir.

Guo vd. (2018) Los Angeles aşınma kaybı deneyleri öncesi ve sonrasında granitik kayalardan üretilen balast agregalarının yüzey morfolojilerini üç boyutlu tarama teknikleri kullanarak çıkartmıştır. Gerçekleştirilen taramalar sonunda Los Angeles aşınma kaybı deneyinde 1000 devir sonunda 40 – 50 mm boyut grubundaki uzamış agregaların kübik şekle yakın agregalara oranla ortalama 3.5 kat daha fazla aşındığı belirlenmiştir.

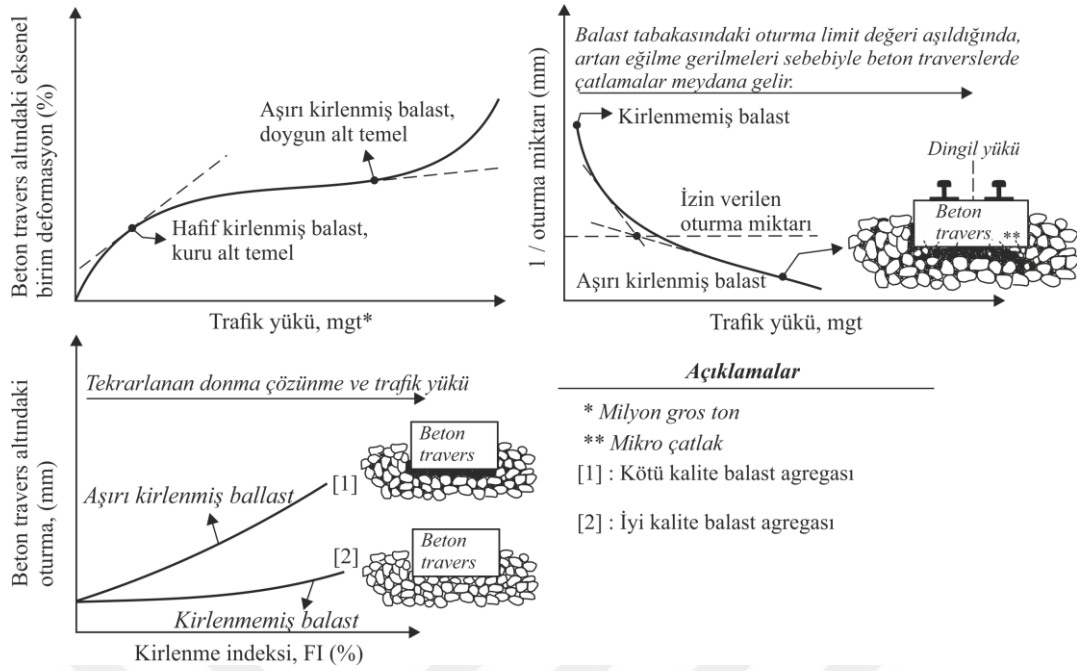
### **3.2. BALAST AGREGASININ DURAYLILIĞINA ETKİ EDEN DEĞİŞTİRGELER**

Balast agregasının duraylılığına etki eden pek çok değiştirge söz konusu olup, bu değiştirgeler genel olarak agrega kalitesi, trafik yükü ve çevrenin meteorolojik özellikleri olarak ifade edilebilir. Pratik uygulamalarda kullanılacak olan balast agregasının kalitesi ve uygunluğu Çizelge 3.1'deki özelliklere sahip olmasıyla ifade edilirken, balast tabakasına etki eden diğer değiştirgeler (trafik yükleri ve donma – çözünme) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

#### **3.2.1. Trafik yükleri**

Balast agregasına uygulanan trafik yüklerinin belirlenmesi, balast tabakasının kalite kontrol süresinin kestirimi açısından önemlidir. Tren geçişi esnasında alt temele aktarılan yükler balast agregalarında aşınma ve parçalanmaya sebep olmaktadır. Bu aşınma ve parçalanma sonucunda balast tabakası kirlenmeye başlayarak bu tabakada oturmalar artmaktadır (Han ve Selig 1997, Feldman ve Nissen 2002, Huang vd. 2009). Ayrıca balast tabakasındaki boşluk oranının azalması sebebiyle yüzey sularının drenajı zorlaşmaktadır (Duong vd. 2013, Su vd. 2015). Trafik yükleri sebebiyle balast tabakasındaki kirlenme ve oturmanın değişimi şematik olarak Şekil 3.3'te verilmiştir.

Balasttaki kirlenmenin trafik yükü göz önünde bulundurularak araştırılması konusundaki önemli çalışmalardan biri 1991 yılında Amerikan Demiryolları Birliği ile Santa Fe (Meksika) Demiryolları ortaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya göre, üç farklı demiryolu balast malzemesi (dolomit, kuvarsit ve demir cürufu) 7 yıl süreyle ortalama 300 milyon gros ton (mgt, 1 gros ton = 1.01 ton) trafik yüküne maruz bırakılmıştır. İlgili tren hatlarından her yıl yapılan sistematik örnekleme sonucunda 7 yıl sonunda balastlardaki kirlenmenin %5 ile %7 arasında olduğu tespit edilmiştir (Chrismer vd. 1991).



**Şekil 3.3** Trafik yükü ve balast tabakasındaki kirlenmenin balast tabakasındaki oturma üzerindeki etkileri (Selig ve Waters 1994'ten değiştirilerek).

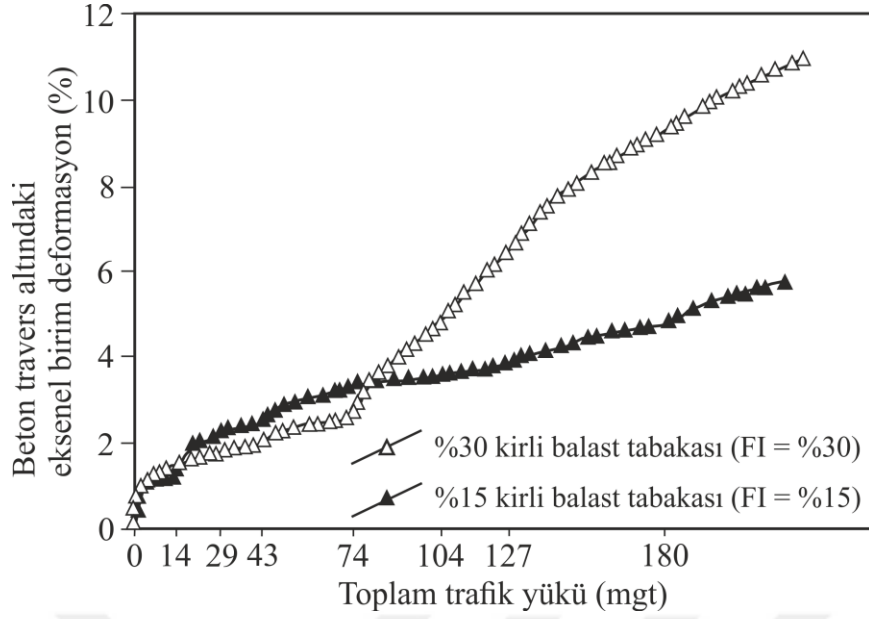
Kashani vd. (2017) balast tabakasındaki kirlenmenin beton travers altındaki tabakanın aksel birim deformasyonu üzerine değişimlerini laboratuvar ortamında farklı trafik yükleri uygulamak suretiyle araştırmıştır.

Çalışmada balast tabakasına ait kirlenme indeksi (Fouling index, FI) Selig ve Waters (1994) tarafından önerilen görgül bağıntı (Bkz. Eşitlik 3.1) kullanılarak belirlenmiş olup, %15 ve %30 kirlenme indekslerinde olan balast tabakalarına farklı trafik yükleri uygulanmıştır.

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (3.1)$$

Burada  $P_4$  4.75 mm'lik elekten geçen malzeme miktarı (%) ve  $P_{200}$  ise 0.075 mm'lik elekten geçen malzeme miktarı (%) olarak tanımlanmaktadır.

Balast tabakasına artan trafik yükleri uygulanırken, beton travers altındaki aksel birim deformasyonlar doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre kirlenme indeksindeki artışın aksel deformasyonları önemli bir şekilde artırdığı belirlenmiştir (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4** Artan trafik yükü ile balast tabakasındaki eksenel deformasyonların değişimi (Kashani vd. 2017'den düzenlenerek).

Tren hatlarına serilmiş balast agregalarındaki kirlenme, agrega türü, sıkılama derecesi, agregaların serildiği hatta ait trafik yükü ve hattın bulunduğu bölgenin meteorolojik özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir (Esveld 2001).

Bu sebepten balast agregasının serildiği bölgedeki tren hattına ait trafik yüklerinin niceliksel olarak belirlenmesi ve bu verilerin düzenli olarak kaydedilmesi, tren hattındaki balast tabakasının kirlenme sürecinin açığa kavuşturulması için önem arz etmektedir.

Herhangi bir tren hattına ait trafik yüklerinin hesaplanması “Uluslararası Demiryolu Sendikası (International Union of Railways, UIC)” tarafından geliştirilen görgül bir yaklaşım ile hesaplanabilir (Bkz. Eşitlik 3.2). Tren hattına ait günlük trafik yükü ( $T_y$ ) ile ifade edilmekte olup, UIC tren hatları farklı trafik yükü yoğunluğuna göre altı grup olarak sınıflandırmıştır (Çizelge 3.2).

Pratik uygulamalarda ise günlük trafik yükü ( $T_y$ ), Eşitlik 3.2 kullanılarak ifade edilmektedir. Eşitlik 3.2 UIC (1989) tarafından önerilmiş olup, eşitlik iki kısımda değerlendirilmektedir. Eşitliğin 3.2'in ilk kısmında ifade edilen bölüm, yolcu taşıma amaçlı trenlerden kaynaklanan trafik yükü, ikinci bölüm ise yük taşıma amaçlı trenlerden kaynaklanan trafik yükünü ifade etmektedir.

**Çizelge 3.2** Tren hatlarının trafik yüklerine göre sınıflandırılması (UIC Code 714R, 1989)

Grup	Trafik yükü, $T_y$ (ton/gün)	Tanımlama
I	> 130000	Çok yüksek
II	130000 – 80000	Yüksek
III	80000 – 40000	Orta
IV	40000 – 20000	Orta – Düşük
V	20000 – 5000	Düşük
VI	< 5000	Çok düşük

Eşitlik 3.2 tren hattının bir tren seferinden kaynaklanan trafik yükünün kestiriminde kullanılan bir yaklaşım olup, Çizelge 3.5'te Eşitlik 3.2'nin kullanımına ilişkin iki ayrı örnek verilmiştir. Örnek 1'de sadece yolcu taşıyan bir hızlı tren hattının trafik yükü hesaplanmışken, Örnek 2'de yük ve yolcu taşıma amaçlı kullanılan bir tren hattının günlük trafik yükü hesaplanmıştır.

$$T_y = 1.01 \times S_p \times \left( T_p + k_t \times T_{pt} \right) \times S_s + S_{fr} \times \left( k_{fr} \times T_{fr} + k_t \times T_{tf} \right) \times S_s \quad (3.2)$$

Burada;

$S_p$  : Sadece yolcu taşıyan trenlerin hızına göre ifade edilen bir sabit (Bkz. Çizelge 3.3)

$S_s$ : Sefer sayısı

$T_p$  : Trende bulunan yolcuların toplam ağırlığı (ton)

$k_t$  : Yolcu ve yük taşıyan lokomotifin çekiş gücünü ifade eden bir sabit ( $k_t = 1.40$ )

$T_{pt}$  : Yolcu trenin boş ağırlığı (ton)

$S_{fr}$  : Yük taşıma amaçlı hizmet eden trenin hızına göre ifade edilen bir sabit (Bkz Çizelge 3.3)

$k_{fr}$  : Yük taşıyan trenin dingil yüküne göre ifade edilen bir sabit (Bkz. Çizelge 3.4)

$T_{fr}$  : Yük taşıyan trende bulunan toplam yük miktarı (ton)

$T_{tf}$  : Yük taşıyan trenin boş haldeki ağırlığı (ton)

**Çizelge 3.3** Tren hızına göre  $S_p$  ve  $S_{fr}$  sabitlerinin değişimi (UIC Code 714R, 1989)

Tren hızı, $V$ (km/s)	< 60	80 – 100	100 – 130	130 – 160	160 – 200	200 – 250	> 250
$S_p, S_{fr}$	1.00	1.05	1.25	1.35	1.40	1.45	1.50

**Çizelge 3.4**  $k_{fr}$  sabitinin tren dingil yüküne göre değişimi (UIC Code 714R, 1989)

Tren dingil yükü (ton)	$k_{fr}$
< 20	1.15
20 – 22.5	1.30
> 22.5	1.45

Eşitlik 3.2 kullanılarak herhangi bir tren hattına ait günlük trafik yükleri belirlenebilir. Böylece balast agregasındaki parçalanma mekanizması ile trafik yükleri arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılabilir. Diğer taraftan trafik yükleri ile balast tabakası bakım aralığı süresi arasında pratik yaklaşımlar mevcuttur.

Almanya demiryolları tren ana hatlarından 25 – 28 mgt trafik yükü geçtikten sonra balast tabakasında bakım yapmaktadır. Hollanda demiryollarında ise ortalama 10 yılda bir balast tabakasında düzenleme (balast tabakasında eleme, yenileme ve sıkılama işlemleri) yapılmaktadır (Tuna 2000, Şahin 2011). Ülkemizdeki pratik yaklaşımlara göre; İstanbul'daki Aksaray – Yenibosna konvansiyonel demiryolu hattından yıllık ortalama 12 mgt trafik yükü geçmiş ve her iki yılda bir balast tabakasında düzenleme işlemleri gerçekleştirilmiştir (Tuna 2000, Şahin 2011).

Trafik yükleri dışında, tren hattının hızına göre balast agregasının özelliklerinin kestirimi Budapeşte demiryolları araştırma grubu (MAV) tarafından önerilen bir yaklaşım ile ifade edilmiştir. MAV, balast malzemesi seçiminde tren hızını göz önünde bulundurarak, seçilecek olan balast malzemesinin Los Angeles aşınma kaybı değerini tren hızına bağlı olarak düzenlemiştir (MAV 2010). Tren hızı arttıkça trenden kaynaklanan dinamik yükün ve buna bağlı yanal titreşimlerin arttığını ifaden söz konusu çalışmada tren hızı gözetilerek kullanılması amaçlanan balast agregalarına ait Los Angeles aşınma kaybı değerleri arasındaki değişim Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6'daki yaklaşıma göre, artan tren hızına göre düşük LAA değerlerine sahip balast agregalarının kullanılması istenmektedir. Böylece aşınma ve parçalanmaya karşı daha dirençli balast agregaları kullanılmak hususu ile artan dinamik yükler altındaki parçalanma azaltılmak istenmektedir.

**Çizelge 3.5** Trafik yüklerinin hesaplanmasını gösteren iki örnek.

<b>Örnek 1</b>		<b>Örnek 2</b>	
(Sadece yolcu taşıma amaçlı hizmet veren bir hızlı tren hattı)		(Yolcu ve yük taşıma amaçlı hizmet veren bir tren hattı)	
Yolcu trenin ortalama hızı, V (km/s)	150	Yolcu trenin ortalama hızı, V (km/s)	80
Yolcu treninde bulunan yolcu sayısı	400	Yolcu treninde bulunan yolcu sayısı	180
Bir yolcunun ortalama ağırlığı (kg)	75	Bir yolcunun ortalama ağırlığı (kg)	75
Yolcu trenin boş haldeki ağırlığı, $T_{pt}$ (ton)	447 <sup>I</sup>	Yolcu trenin boş haldeki ağırlığı, $T_{pt}$ (ton)	200 <sup>II</sup>
Trende bulunan yolcuların toplam ağırlığı $T_p$ (ton)	$\frac{75 \times 400}{1000} = 30$	Trende bulunan yolcuların toplam ağırlığı $T_p$ (ton)	$\frac{75 \times 180}{1000} = 13.50$
$S_p$	1.35	$S_p$	1.05
$k_t$	1.40	$k_t$	1.40
1 sefer için trafik yükü (ton)	894.18	1 sefer için yolcu trenin trafik yükü (ton)	338.99
Yolcu trenlerinin günlük sefer sayısı (Karşılıklı gidiş – geliş)	20	Yolcu trenlerinin günlük sefer sayısı (Karşılıklı gidiş – geliş)	10
<b>Trafik yükü, <math>T_y</math> (ton/gün)</b>	<b>17883.66</b>	Yük taşıyan trenin ortalama hızı, V (km/s)	40
		Yük taşıyan trenin dingil yükü (ton)	< 17
		Yük taşıyan trende bulunan toplam yük miktarı, $T_{fr}$ (ton)	1000 <sup>III</sup>
		Yük taşıyan trenin boş haldeki ağırlığı $T_{tr}$ (ton)	580 <sup>IV</sup>
		$S_{fr}$	1.00
		$k_{fr}$	1.15
		1 sefer için yük treninin trafik yükü (ton)	1962
		Yük trenini günlük sefer sayısı (Sadece gidiş)	2
		<b>Trafik yükü, <math>T_y</math> (ton/gün)</b>	<b>7313.90</b>
		$T_y = \left( \frac{1}{1.10 \times 1.05 \times (13.50 + 1.40 \times 200)} \right) \times 10$ $+ \left( \frac{2}{1.00 \times (1.15 \times 1000 + 1.40 \times 580)} \right) \times 2 = 7313.90$	

**Açıklamalar**

<sup>I</sup> Valero CRH3 tipi hızlı tren, yolcu treni olarak kabul edilmiştir. (URL-1)

<sup>II</sup> M10 Pulman vagonların kullanıldığı klasik bir yolcu treni kabul edilmiştir. (URL-2)

<sup>III</sup> Yük treni 1000 ton kömür taşıyor kabul edilmiştir.

<sup>IV</sup> Yük trenine 20 adet  $E_a$  serisi açık vagonun bağlı olduğu kabul edilmiştir. (URL-3)



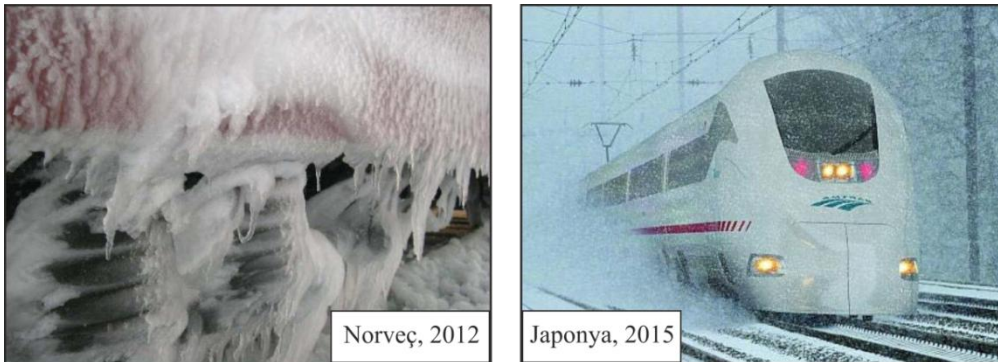
**Çizelge 3.6** Ortalama tren hızı ile balast malzemesi LAA değeri arasındaki değişim (MAV 2010)

Ortalama tren hızı, V (km/s)	Los Angeles aşınma kaybı, LAA (%)
> 160	16
160 – 120	16
120 – 80	16
80–40	20
< 40	24

### 3.2.2. Balast tabakasında gözlenen donma – çözünme

İstenen kalitede balast kullanılmaması durumunda balast agregasındaki ayrışma sebebiyle ile balast tabakasındaki oturmalar artacak ve söz konusu tabakanın hidrolik iletkenliği azalacaktır. Bu durumda yüzey sularının balast tabakasından drenajı güçleşecektir. Drene olamayan yüzey suları balast tabakası içerisinde hapis kalacak ve balast agregalarının doygunluk derecesi zamanla artacaktır.

Çevre sıcaklığının düştüğü ve özellikle yoğun kış şartlarında (Şekil 3.5) bu bölgelerde donma – çözünme olayı meydana gelmektedir. Kayaçların gözenekleri içindeki suyun donma süresi, kayaçların içerdiği süreksizlikler (makro ve mikro çatlaklar ile mikro fisürler), gözenek boyutu ve geometrisi ile kayacın termodinamik özelliklerine göre değişmektedir (Helgeson vd. 1978, Geving ve Thue 2002, Ondrasik vd. 2014). Walder ve Hallet (1985) süreksizlikler içindeki suyun donması içeren bir matematiksel model geliştirmiştir. Bu modele göre süreksizlik içindeki buz kristalleşmesinin en hızlı olduğu sıcaklık aralığının - 4 °C ile - 15 °C olduğunu belirtmiştir.



**Şekil 3.5** Yoğun kış koşulları altında bazı demiryolu hatlarının görüntüleri (Jing 2016).

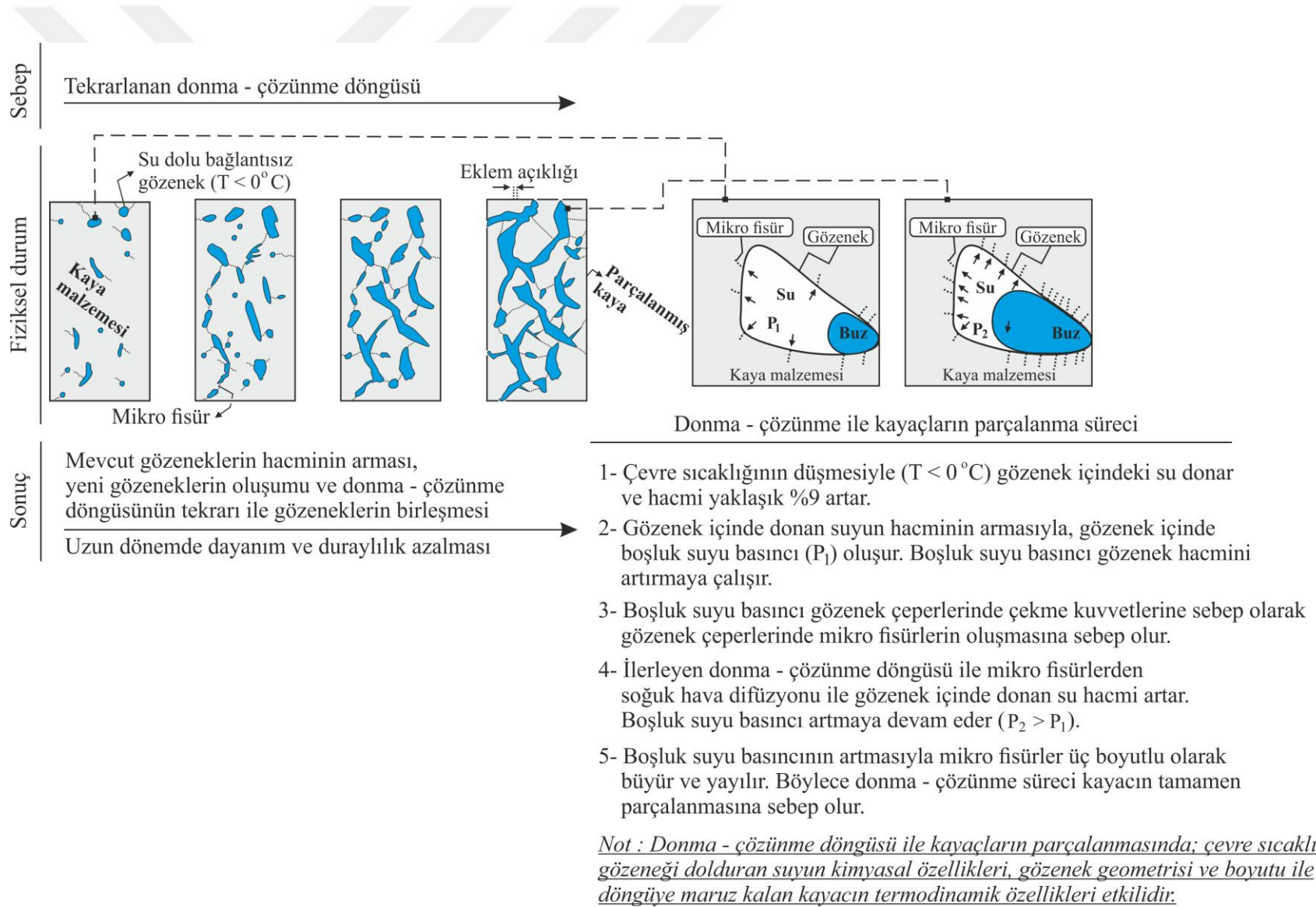
Bir kaya malzemesindeki donma – çözünme süreci ve bu süreç ile kaya malzemesindeki ayrışma şematik olarak Şekil 3.6'da verilmiştir. Doygunluk derecesi artan bir kaya malzemesinde çevre sıcaklığının düşmesiyle ( $T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) kaya malzemesindeki su zamanla donar ve donan suyun hacmi yaklaşık %9 artar. Donan su kütlesi etrafındaki çevre kayacına ve henüz donmamış su çeperine bir baskı yaratarak kayaç içerisinde bir boşluk suyu basıncı meydana getirir. Meydana gelen boşluk suyu basıncı da gözenek çeperleri etrafında çekme kuvvetleri oluşturarak bu bölgelerde mikro fisürler oluşmasına sebep olur. Tekrarlanan donma – çözünme döngüsüne bağlı olarak, mikro fisürler büyür, yayılır ve mevcut gözeneklerin boyut ve geometrisi de aynı derecede genişleyerek bir değişime uğrar. Zamanla yeni boşluklar meydana gelerek, bağlantısız gözenekler birbirleriyle birleşir. Bu sürecin tekrarlanması ile kaya malzemesindeki ayrışma ilerler ve trafik yüklerinin etkisiyle bu agregaların parçalanmaya olan eğilimi artarken statik ve dinamik yükler karşısındaki duraylılıkları da aynı oranda azalır.

Unutmamak gerekir ki, donma – çözünme döngüsünün meydana gelebilmesi için kayaçların su ile teması gereklidir ve kayaçlarda etkin bir donma – çözünme olayının meydana gelebilmesi için kayaçların doymunluk derecesinin en az %50'ye ulaşması gerekir (Chen vd. 2004 ve Binal 2009).

Bir diğer önemli bulgu ise gözenekliliği yüksek kayaçların donma – çözünme döngüsünden daha fazla etkilendiğidir (Hudec 1980). Ayrıca donma – çözünme döngüsü esnasında gözenek içindeki suyun kimyasal bileşimine bağlı olarak bir kimyasal ayrışma da söz konusu olabilir (Geving ve Thue 2002, Ondrasik ve Kopecky 2014).

Balast agregası ve tabakası için donma – çözünme olayının yaratabileceği potansiyel sorunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Aşağıda ifade edilen sorunlar birbirini izleyerek zaman içerisinde balast tabakasındaki oturmaların artması ile raylarda eğilme, beton traverslerin kırılma ve çatlama, raylarda eğilme ve travers bağlantı elemanlarının kopması gibi sorunlara sebep olabilmekte ve böylece tren hattının duraylılığını önemli ölçüde etkilemektedir (Cope 1993, Feldman ve Nissen 2002, Al-Qadi vd. 2008).

- a) İlerleyen donma – çözünme döngüsü ile balast tabakasındaki kirlenmenin artması
- b) Balast tabakasındaki kirlenme sebebiyle (Balast tabakasında boşluk oranının azalması) meydana gelen oturma ve drenaj sorunları



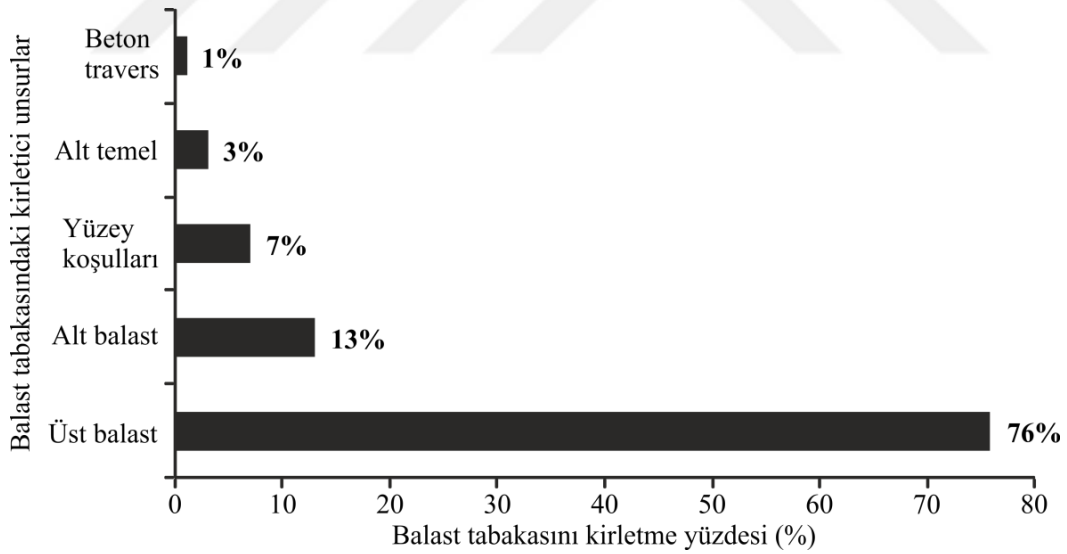
**Şekil 3.6** Donma – çözünme döngüsünün kaya malzemesini parçalama süreci (Geving ve Thue 2002'den değiştirilerek).

### 3.3. BALAST TABAKASINDA GÖZLENEN SORUNLAR

Balast tabakasında gözlenen sorunlar genel olarak balast agregasının istenen kalitede olmaması ve alt temel ve balast tabakasının yeterli sıklıkta ve kalınlıkta serilmemesinden kaynaklanmaktadır.

Selig ve Waters (1994) balast tabakasındaki kirlenmenin sebeplerini ayrıntılı petrografik analizler ile araştırmış ve balast tabakasındaki kirlenmenin büyük çoğunluğunun (yaklaşık %76'sının) balast agregasının (üst balast malzemesi) ayrışmasından kaynaklandığını ifade etmiştir. Balast tabakasındaki kirlenmenin diğer sebepleri ise oransal olarak Şekil 3.7'de ifade edilmiştir.

Yetersiz kalitede balast agregası kullanımı yanı sıra alt yapı elemanlarının yeteri kalınlıkta ve sıklıkta serilmemesi de trafik yüklerinin alt temele aktarılmasını güçleştirmekte ve bu durum beton traverslerde çatlama (Şekil 3.8), raylarda eğilme ve bağlantı elemanlarında kopmalara sebep olmaktadır (Lakusic vd. 2010, Zakeri ve Rezvani 2012).



Şekil 3.7 Balast tabakasındaki kirlenmeye sebep olan değişirgeler (Selig ve Waters 1994).

Tren hızı, tren hattının kullanım amacı ve dingil yüklerine bağlı olarak üst balast tabakası kalınlığının değişimi UIC (1989)'a göre Çizelge 3.7'de verilmiştir. İngiliz demiryolları ise üst balast tabakası kalınlığını tren hızı ve tren hattının yıllık trafik yüküne göre düzenlenmiştir (Çizelge 3.8).



**Şekil 3.8** Yük aktarımı sorunları sebebiyle çatlamış beton traversler (Zakeri ve Rezvani 2012)

Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'e göre artan tren hızı ile optimum üst balast tabakasının arttığı görülmektedir. Benzer şekilde artan tren hızı ve günlük trafik yükü etkisi altında yüksek hızlı trenden kaynaklanan statik ve dinamik yüklerin alt temele sağlıklı bir şekilde aktarılması optimum üst balast tabakası kalınlığı ve bu tabakanın optimum seviyede sıkılanması ile ilişkilidir (Profillidis 2014, Li vd. 2016).

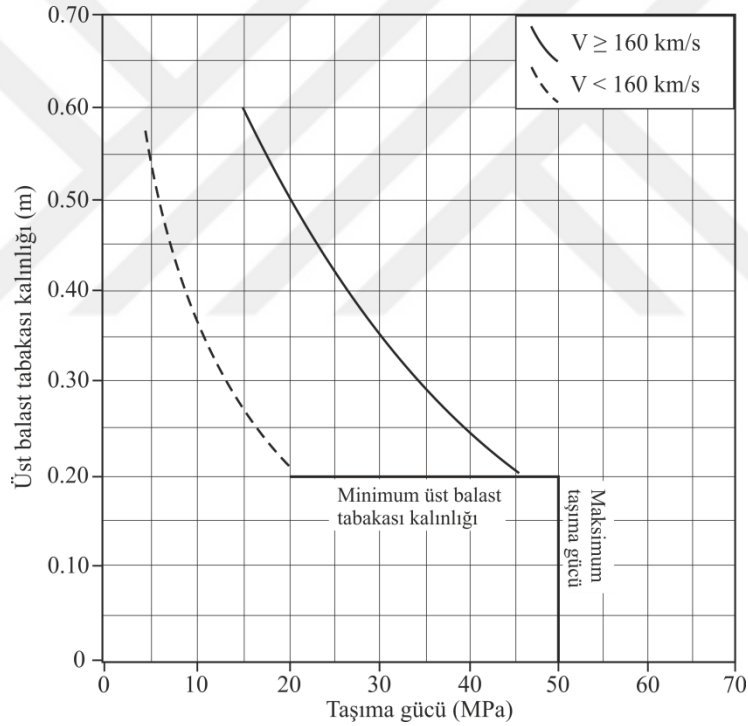
**Çizelge 3.7** Tren hızı, dingil yükü ve tren hattının kullanım amacına göre optimum üst balast tabakası kalınlıkları (UIC 1989).

Ortalama tren hızı, V (km/s)	Dingil yükü (ton)	Tren hattının kullanım amacı	Optimum üst balast kalınlığı (cm)
160	13	Sadece yolcu	25 – 30
120	16	Yolcu ve yük	20 – 25
100	20	Sadece yük	25 – 30
80	> 25	Yolcu ve yük	20 – 25
60	16	Ağırlıklı olarak yük	10 – 15

Üst balast tabakası kalınlığı ile ilgili bir diğer yaklaşım ise Yalçın ve Erel (2007) tarafından önerilmiştir (Şekil 3.9). Şekil 3.9'da görülen abakta optimum üst balast tabakası kalınlığı, plaka yükleme deneyleri ile belirlenen balast tabakasına (Üst ve alt balast tabakası beraber değerlendirilir) ait taşıma gücü değeri ve tren hattındaki planlanan tren hızı ile birlikte Şekil 3.9'daki grafiğe düşürülmesi yoluyla belirlenmektedir.

**Çizelge 3.8** İngiliz demiryolları şartnamesine göre optimum üst balast kalınlıkları (Profillidisi 2014).

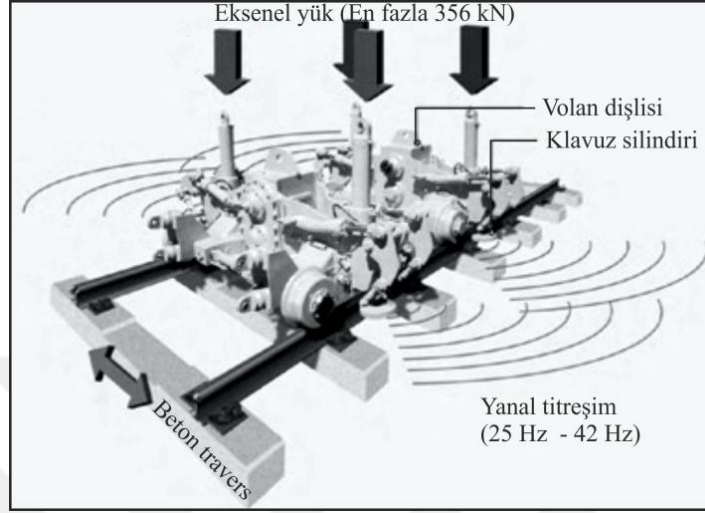
Ortalama tren hızı, V (km/s)	Yıllık trafik yükü (milyon ton)	Günlük trafik yükü (ton/gün)	Optimum üst balast kalınlığı (cm)
160 – 200	–	–	38
160 – 120	> 12	> 32000	38
160 – 120	2 – 12	5400 – 32000	30
160 – 120	< 2	< 5400	23
120 – 80	> 12	> 32000	30
120 – 80	< 12	< 32000	23
< 80	> 2	> 5400	23
< 80	< 2	< 5400	20
< 80	< 2	< 5400	15



**Şekil 3.9** Optimum üst balast tabakasının belirlenmesine ait bir yaklaşım (Yaşar ve Erel 2007'den düzenlenerek).

Üst balast tabakası kalınlığının optimum kalınlıktan fazla olduğu durumlarda ise trafik yüklerinin aktarımı kolaylaşmakta ve tren titreşimlerinin daha iyi sönümlenmesi gerçekleşmektedir. Ancak balastın sıkılama işleminde problemler meydana gelmektedir (Lakusic vd. 2010). Bu sebepten üst balast tabakası optimum kalınlığı hem yük aktarımının sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi hem de optimum sıkılama açısından son derece önemlidir.

Alt yapı elemanlarının yeteri sıklıkta serilmemesinin bir diğer yarattığı sorun ise uçan kaya sorunlarıdır (Kwon ve Park 2006, Jing 2016). Tren geçişi esnasında balast tabakası içinde yanal bir titreşim meydana gelmekte (Şekil 3.10) ve bu titreşim iyi sıkılanmamış balast tabakasında uçan kaya sorunlarına sebep olabilmektedir (Şekil 3.11).



**Şekil 3.10** Tren lokomotifinin geçiş esnasında oluşan yanal titreşim (Li vd. 2016'dan düzenlenerek).

Balast tabakasının kirlenmesinden kaynaklanan bir diğer önemli sorun ise yüzey sularının drenajının sağlanamamasından kaynaklanmaktadır. Balast tabakasının kirlenmesi ile yüzey sularının drenaj miktarı azalmakta ve bu bölgelerde balast tabakası içinde su birikintileri meydana gelmektedir (Şekil 3.12).



**Şekil 3.11** Balast tabakasının iyi sıkılanmaması sonucu taş fırlama sorunları (Jing 2016).



**Şekil 3.12** Balastın kirlenmesinden dolayı travers altında biriken yüzey suyu (Paiva vd. 2015).

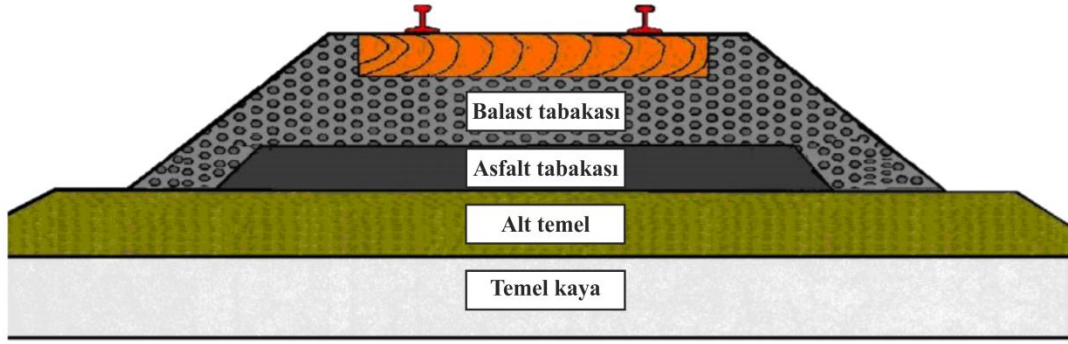
Söz konusu su birikintisi çevresinde bulunan balast agregalarının doygunluk derecesini artırmakta ve çevre sıcaklığın azalmasıyla bu bölgelerde donma – çözünme döngüleri zaman içerisinde meydana gelmektedir. Bu durum da balast agregasının ayrışmasını kolaylaştırmakta ve böylece balast tabakasının kirlenmesini artırmaktadır.

Bölüm 3.3'te ifade edilen sorunların çözümlenmesi adına gerçekleştirilmiş çalışmalar çoğunlukla balast tabakasındaki oturmaların azaltılmasını konu almaktadır. Bu anlamda balast tabakasındaki kirlenmenin nispeten azaltılması ve balast tabakası duraylılığını artırmak adına gerçekleştirilen önemli çalışmalar mevcuttur (Atalar vd. 2001, Kwon 2006, Nimbalkar ve Indraratna 2016, Sadeghi vd. 2018).

Söz konusu bu çalışmalarda farklı tip geosentetikler kullanılarak balast tabakasındaki kirlenme ve oturma miktarları araştırılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilecek ortak bulgu ise uygun tip geosentetik kullanılmasının balast tabakasındaki oturmaları önemli derecede azaltabileceği yönündedir.

Demiryolu hattı alt temel hattındaki oturmaların azaltılması konusunda yapılmış bir diğer uygulama ise alt temel ile balast tabakası arasına belirli kalınlıkta bir asfalt tabakası oluşturulmasıdır (Momoya ve Sekine 2007, Teixeira vd. 2010). Bu çalışmalar sonucunda alt temel ile balast tabakası arasına 8 – 12 cm kalınlığında bir asfalt tabakasının yerleştirilmesi durumunda (Şekil 3.13) alt temeldeki oturmaların ciddi şekilde azaldığı belirtilmiştir.





**Şekil 3.13** Alt temel ile balast tabakası arasındaki asfalt tabakası (Rose vd. 2011).

Özetle, balast agregası ve balast tabakası duraylılığı konularında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalarda izlenen deney yöntemleri Çizelge 3.9’da ifade edilmiştir. Çizelge 3.9’a göre sağlıklı bir demiryolu alt yapısının inşası için beş önemli değiştirgeye dikkat etmek gerekir. Bu beş değiştirgenin dikkate alınması koşulu ile balast agregasının seçimi ve balast tabakasının sağlıklı bir şekilde oluşturulması mümkün olmakla birlikte, son zamanlarda balastsız demiryolu hatları oluşturulma konusunda da çalışmalar devam etmektedir (Liu vd. 2011, Zhu 2012, Pichler ve Fenske 2013).

**Çizelge 3.9** Balast agregası ve tabakası konusunda gerçekleştirilen çalışmalarda izlenen yöntemler.

Konu	Kullanılan deney yöntemleri	Araştırmacı
Agrega kalitesi	Los Angeles aşınma kaybı, Mikro-deval, nokta yükü, ağırlıkça su emme, kızdırma kaybı, Modifiye İsveç darbe değeri, üç eksenli basınç dayanımı deneyleri ve görüntü analiz yöntemleri	Shenton 1985, Raymond 1985, Cope 1993, McDowell vd. 2003, Nurmikolu 2005, Bach 2013, Qian vd. 2014, Moaveni vd. 2014, Okonta 2014, Nalsund 2014, Koomishi ve Palassi 2016, Köken vd. 2018, Guo vd. 2018
Balast tabakası sıkılama derecesi ve balast kirlenmesi	Büyük ölçekli kesme kutusu, büyük ölçekli üç eksenli basınç dayanımı, büyük ölçekli plaka yükleme, döngüsel yükleme, üç boyutlu tarama teknikleri ve dinamik yükleme deneyleri	Chrismer 1985, Shenton 1985, Raymond ve Bathurst 1987, Han ve Selig 1997, Indraratna vd. 1998, Feldman ve Nissen 2002, Lim 2004, Nurmikolu 2005, Lakusic vd. 2010, Huang vd. 2009, Bach 2013, Koohmishi ve Palassi 2017, Kashani vd. 2017.
Balast tabakası drenajı	Sabit seviyeli hidrolik iletkenlik deneyleri	Selig ve Waters 1994, Tennakoon vd. 2012, Duong vd. 2013, Parsons vd. 2014, Su vd. 2015
Çevresel koşullara direnç	Donma çözünme kabini ile donma kaybı, Mikro-deval aşınma kaybı ve magnezyum sülfat don kaybı deneyleri	Nurmikolu 2005, Nalsund 2014, Köken vd. 2018,
Mekanik koşullara direnç	Farklı devir sayılarında gerçekleştirilen Los Angeles aşınma kaybı deneyleri	Moaveni vd. 2014, Qian vd. 2014, Köken vd. 2018



## BÖLÜM 4

### ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamındaki arazi çalışmaları, iki farklı bazaltik kayacın yüzelediği Kütahya ili, Ilıca bölgesi, Işıkkara Köyü ve Karabük ili Yenice ilçesindeki Kayadibi bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerdeki bazaltik kayalardan üretilen balast malzemeleri ülkemizdeki bazı klasik ve hızlı demiryolu tren hatlarında demiryolu balastı olarak hali hazırda kullanılmaktadır. Bu bölümde incelenen bazaltik kayaların bulunduğu bölgelere ait arazi çalışmalarına ilişkin bilgi ve bulgular yer almaktadır.

#### 4.1. MATERYAL VE METOT

##### 4.1.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında araştırma konusu olan kayalar, Ege ve Karadeniz bölgesinde yer almaktadır. Ege bölgesinden temin edilen bazaltik kayalar Kütahya Ilıca bölgesine yer almakta olup, bu bölgedeki bazaltik kayalar genel olarak Karacaören Volkanitleri olarak bilinen Pliyosen yaşlı volkanizmanın ürünleridir. Karadeniz bölgesinden temin edilen kayalar ise Karabük ili, Yenice ilçesi, Kayadibi civarında gözlenen Devoniyen yaşlı gabrolardır.

##### 4.1.2. Metot

Öncelikle araştırma konusu olan bazaltik kayaların inceleme alanlarındaki mevcut koşulları arazi çalışmaları ile ortaya konmuş ve farklı – ayrışma bozunma içeren kaya kütlelerine ait genel özellikler hat etütleri ile belirlenmiştir. Her bir ayrışma – bozunma derecesindeki kaya kütlelerinde en az 10 adet hat etütü gerçekleştirilmiş olup, söz konusu bu hatlar yatay düzleme paralel ve dik olacak şekilde oluşturulmuştur. Yatay düzleme paralel oluşturulan hatlar ortalama 4 – 6 m, düşey hatlar ise ortalama 2 m uzunluğundadır.

Hat etütleri esnasında temin edilen kaya bloklarından hazırlanan agrega ve silindirik örnekler kullanılarak farklı ayrışma – bozunma derecesindeki kaya kütlelerinin fiziksel, mekanik ve agrega özellikleri belirlenmiştir.

Daha sonra agregaların şekilsel özelliklerinin dayanımı üzerine olan etkileri nokta yükü dayanım indeksi deneyleri ile araştırılmış ve balast malzemesinin yerinde dayanımının kestirimini amaçlayan bir deney yöntemi geliştirilmiştir.

İncelenen kayalardan üretilen mıcır (10 – 14 mm ) ve balast boyutundaki (31.5 – 50 mm) agregaların kullanım alanları ilgili şartnamelere göre değerlendirilmiş ve daha sonra farklı çevresel ve mekanik koşullar altında kaya ve balast malzemelerinin duraylılığı araştırılmıştır.

Çevresel koşullar farklı döngülerdeki magnezyum sülfat don kaybı deneyleri ile, farklı mekanik koşullar ise agrega darbe dayanım aleti kullanılarak gerçekleştirilen tek tane deneyleri ve farklı devir sayılarındaki Los Angeles aşınma kaybı deneyleri ile ortaya konmuştur.

Ayrıca, çevresel ve mekanik şartların beraber değerlendirildiği durumlar da göz önünde bulundurulmuş ve magnezyum sülfat çözeltisine tabi tutulan balast agregaları üzerine tek tane ve Los Angeles aşınma kaybı deneyleri gerçekleştirilerek, bu malzemelerin uzun dönem duraylılıkları araştırılmıştır.

## **4.2. ARAZİ ÇALIŞMALARI**

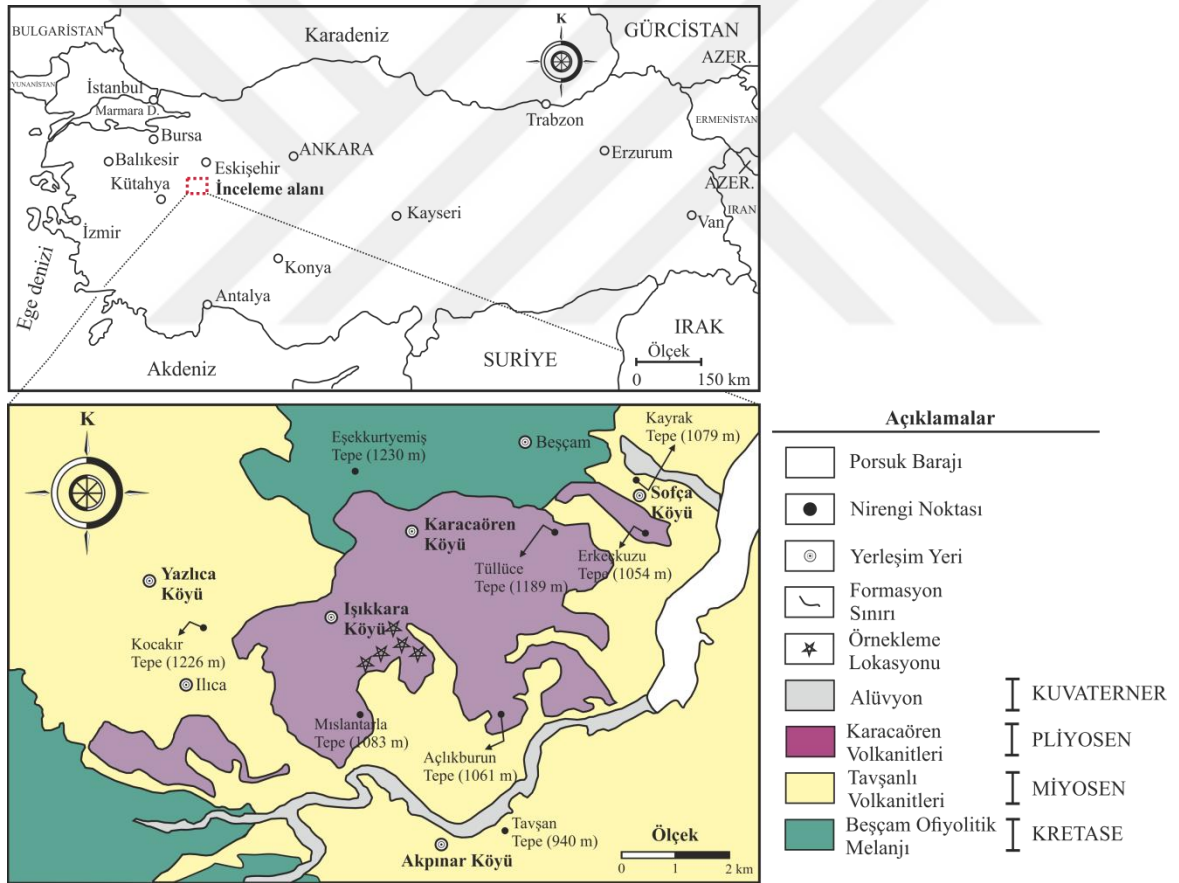
### **4.2.1. Kütahya Işıkkara Köyü civarında gerçekleştirilen arazi çalışmaları**

İnceleme alanı Kütahya ili Işıkkara köyünün yaklaşık 1.5 km güneydoğusunda yer almaktadır. İnceleme alanı çevresinde genel olarak dört farklı litolojik birim bulunmakta olup, bu birimlerden en yaşlı olanı Üst Kretase yaşlı Beşçam ofiyolitik melanjdır. Beşçam ofiyolitik melanji Kızılcıören Köyü kuzeyi ile Ilıca mevki güney kesimlerinde yüzeylemektedir. Beşçam melanji üzerinde Senozoyik yaşlı volkanitler yüzeylemektedir.

Senozoyik yaşlı Tavşanlı Volkanitleri genel olarak tüf ve tüfitlerden oluşmakta olup, birimin alt kesimlerinde konglomera ve aglomera ile bu birimler arasında marn ve dolomitik

kireçtaşları ara bantlar şeklinde bulunmaktadır (Demirbilek 2005). Tavşanlı volkanitleri, inceleme alanı çevresinde Yazlıca, Sofça ve Akpınar Köyleri civarında yüzeylemekte olup, Karacaören Volkanitleri ile yapı ve dokusal özellikler açısından önemli farklılıklar göstermektedir.

Araştırma konusu olan bazaltik kayalar ise Karacaören Volkanitleri içerisinde yer almaktadır. Söz konusu bazaltik kayalar çoğunlukla Karacaören ve Işıkkara Köyü ve civarında yüzeylenmektedir. Karacaören Volkanitleri piroksence zengin bazaltlar ile başlayıp bazaltik andezitle devam eden bir litolojiye sahiptir. İnceleme alanındaki en genç birim ise Kuvaterner yaşlı alüvyon şeklindedir. İnceleme alanı ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası Şekil 4.1’de verilmiştir.



**Şekil 4.1** Işıkkara Köyü ve civarının basitleştirilmiş jeoloji haritası (Demirbilek 2005'ten düzenlenerek).

Arazi çalışmaları farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri farklı yapısal bölgeler olarak tanımlanmış olup, hat etütleri bu yapısal bölgelerde gerçekleştirilmiştir.

Arazi çalışmaları esnasında bazaltik kaya kütleleri ISRM (1981) tarafından önerilen ayrışma – bozunma sınıflamasına göre ayırtlanmıştır (Bkz. Çizelge 2.1) olup, hat etütlerinde bazaltik kayalar ayrışma derecelerine göre gri, kahverengi, sarı, yeşil ve tonlarında izlendiği gözlenmektedir (Şekil 4.2).



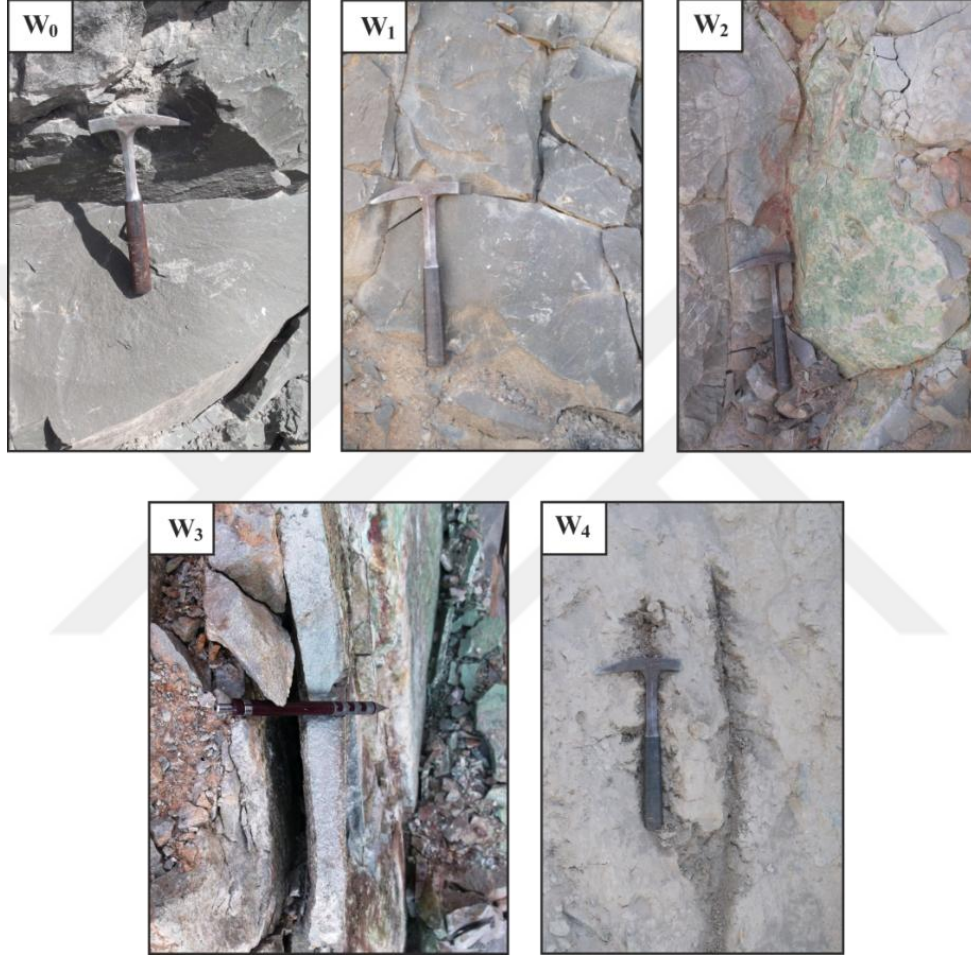
**Şekil 4.2** İnceleme alanında hat etüdü gerçekleştirilen bazı Ilıca bazaltik kaya kütlelerinin genel görünümü.

Gerçekleştirilen hat etütlerinde farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri üzerinde süreksizlik aralığı, pürüzlülüğü, dolgu durumu ve süreksizlik yüzey dayanımı gibi jeoteknik özellikler ayrıntılı olarak belirlenmiştir. Süreksizlik aralığı ve dolgu kalınlığı şerit metre ile, süreksizlik pürüzlülüğü ise profil metreye benzer bir yaklaşım ile belirlenmiştir. Süreksizlik yüzey dayanımı ise L tipi Schmidt çekici deneyleri ile ortaya konmuştur.

Arazi çalışmaları esnasında ayrışmamış kaya kütleleri  $W_0$ , az ayrışmış kaya kütleleri  $W_1$ , orta derece ayrışmış kaya kütleleri  $W_2$ , ileri derecede ayrışma gösteren kaya kütleleri  $W_3$  ve tamamen ayrışmış kaya kütleleri  $W_4$  simgeleri ile ifade edilmiştir. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki bazaltik kayaların arazideki genel görünümleri Şekil 4.3'te verilmiştir.

Hat etütlerinde farklı ayrışma – bozunma içeren birimlerdeki süreksizlik aralıklarının ölçümü yatay düzleme paralel ve dik olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiş olup, birbirini dik kesen süreksizlikler arasındaki mesafeler şerit metre kullanılarak ölçülmüş ve yapılan ölçümlerin ortalaması ilgili hat etüdüne ait süreksizlik aralığı ( $S_m$ ) olarak belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen hat etütleri sonucunda farklı ayrışma – bozunma içeren birimlere ait süreksizlik aralığı değerleri Çizelge 4.1'de, süreksizlik aralıklarının değişimi de Şekil 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.1'de farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerine ait süreksizlik aralığı değerleri ISRM (1981) tarafından önerilen süreksizlik aralık sınıflamasına (Çizelge 4.2) göre değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.3** İnceleme alanında farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki Ilıca bazaltik kayaçlarının genel görünüşleri (W<sub>0</sub>: Ayrışmamış, W<sub>1</sub>: Az ayrışmış, W<sub>2</sub>: Orta derecede ayrışmış W<sub>3</sub>: İleri derecede ayrışmış, W<sub>4</sub>: Tamamen ayrışmış).

Çizelge 4.1'e göre farklı ayrışma – bozunma içeren birimlerde ortalama S<sub>m</sub> değeri 30 – 600 mm arasında değişmekte olup, W<sub>0</sub> tip kaya kütlelerinden W<sub>3</sub> tip kaya kütlelerine geçişte S<sub>m</sub> değeri ortalama %95 oranında azalmaktadır. Ayrıca, W<sub>0</sub> ve W<sub>1</sub> tip kaya kütlelerindeki süreksizlikler Çizelge 4.2'ye göre çoğunlukla "Orta aralıklı", W<sub>2</sub> tip kaya kütlelerinde gözlenen süreksizlikler "Yakın aralıklı", W<sub>3</sub> tip kaya kütlelerindeki süreksizlikler ise "Çok yakın aralıklı" olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 4.4'teki süreksizlik aralık değerlerinin değişimi dikkate alındığında  $S_m$  değerlerinin belirli sınırlar teşkil ettiği söylenebilir. Diğer taraftan  $W_0$  tip kaya kütlelerinde  $S_m$  değerlerinin diğer ayrışma – bozuma derecelerine ait  $S_m$  değerlerinden daha geniş bir yayılım gösterdiği Şekil 4.4'ten anlaşılmaktadır.  $W_0$  tip kaya kütlelerinde  $S_m$  değerinin daha geniş yayılım göstermesinin sebebi, hat etütlerinde ayrışma – bozunma emaresi göstermeyen ancak çatlaklı kaya kütlelerinin  $W_0$  tip kaya kütlesi olarak tanımlanmasından kaynaklanmaktadır. İlerleyen bölümlerde farklı ayrışma – bozunma derecelerinin hangi kriterler doğrultusunda tanımlandığı ayrıntıları ile verilmiştir.

**Çizelge 4.1** Farklı ayrışma – bozunma türündeki Ilıca bazaltik kaya kütlelerine ait süreksizlik aralığı değerleri.

$S_m$ (mm)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	591.60	382.30	148.90	31.40
s.s	260.30	116.32	58.41	16.75
n	100	100	100	100

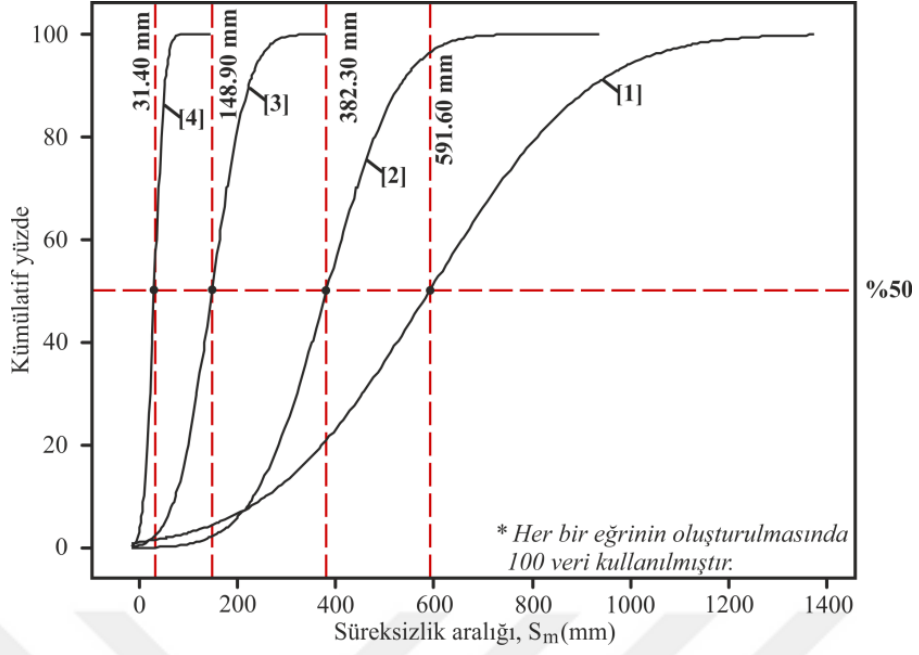
Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma,  
n: Örnek sayısı

**Çizelge 4.2** Süreksizlik aralığı sınıflaması (ISRM 1981).

Süreksizlik aralığı, $S_m$ (mm)	Tanımlama
> 6000	Çok fazla geniş aralık
6000 – 2000	Çok geniş aralık
2000 – 600	Geniş aralık
600 – 200	Orta aralık
200 – 60	Yakın aralık
60 – 20	Çok yakın aralık
< 20	Çok fazla yakın aralık

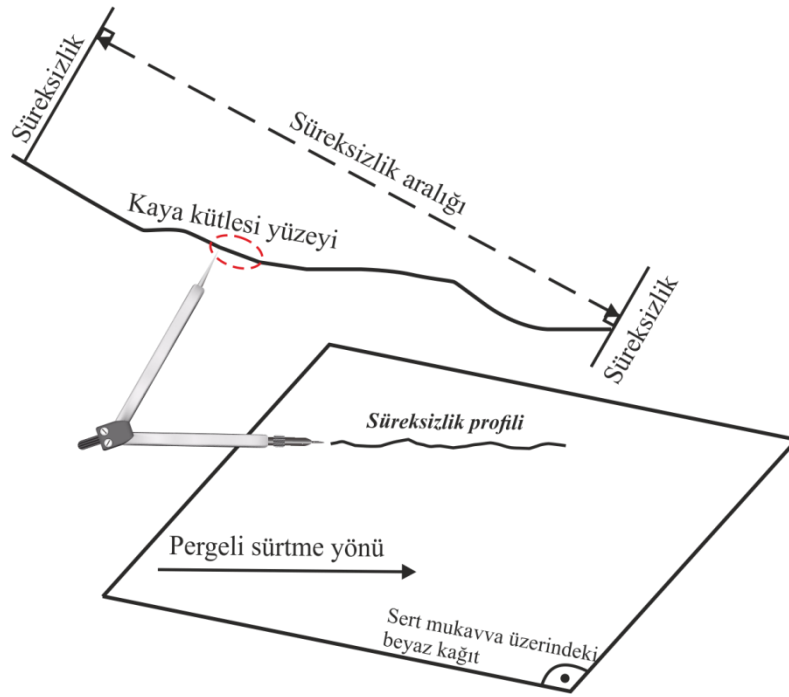
Süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü profilmetreye benzer bir yaklaşım ile belirlenmiştir. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya kütlelerindeki uygun yüzeylerde süreksizlik pürüzlülüğü bir pergeli yardımı belirlenmiştir. Pergelin sivri ucu birbirine dik iki süreksizlik arasına sürtülürken aynı anda kalemin ucu sert mukavva üzerindeki kağıda sürtmekte (yaklaşık 10 cm uzunluğunda) ve bu aralığa ait süreksizliğin profili çıkartılmaktadır (Şekil 4.5).





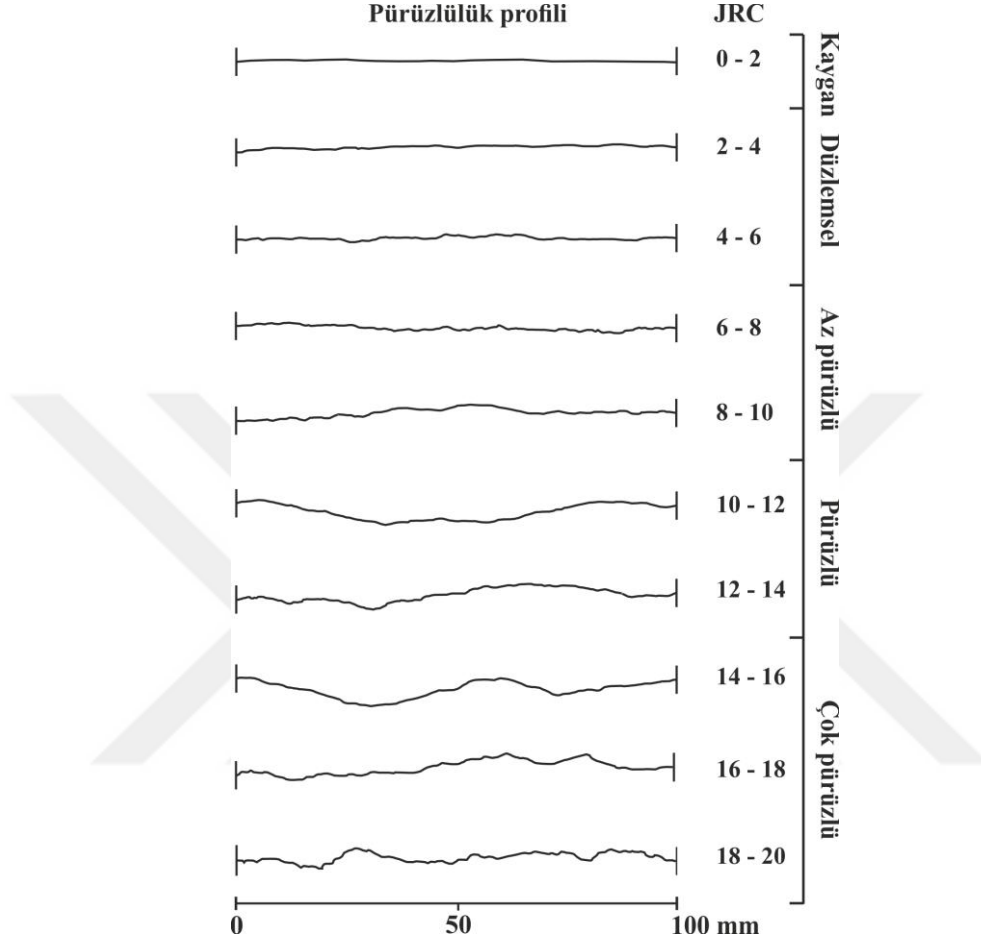
- [1] Ayrışmamış kaya kütlesi ( $W_0$ )
- [2] Hafif derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_1$ )
- [3] Hafif derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_2$ )
- [4] Hafif derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_3$ )

**Şekil 4.4** Ilıca bazaltik kayalar için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerindeki süreksizlik aralığındaki değişim.



**Şekil 4.5** Hat ettütlerinde süreksizlik pürüzlülüğünün belirlenmesi (Şekil ölçeysizdir.).

Çıkartılan süreksizlik profili Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen eklem pürüzlülük katsayısı (Joint roughness coefficient, JRC) sınıflamasına göre belirlenmekte (Şekil 4.6) ve çıkartılan pürüzlülük profiline göre uygun bir pürüzlülük puanı Şekil 4.6'ya göre verilmektedir.



Şekil 4.6 Süreksizlik pürüzlülük sınıflaması (Barton ve Choubey 1977).

Gerçekleştirilen pürüzlülük ölçümlerine göre, farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerine ait süreksizliklerin JRC değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'teki verilere göre, ortalama JRC değeri 4 – 15 arasında değişmekte olup, Şekil 4.6'da ifade edilmiş sınıflamaya göre  $W_0$  tip kütlelerine ait süreksizlik yüzeyleri "*Çok pürüzlü*",  $W_1$  tipe ait süreksizlikler "*Pürüzlü*"  $W_2$  tipteki süreksizlikler "*Az pürüzlü*" ve  $W_3$  tip kaya kütlelerine ait süreksizlik yüzeyleri ise "*Düzlemsel*" olarak belirlenmiştir.

Süreksizlik pürüzlülüğündeki azalma, kaya kütle yüzeylerindeki alterasyonun önemli bir göstergesi olup, özellikle uygulama esnasında  $W_4$  tip kaya kütlelerinde pergelin sivri ucununun kaya külesine batmaya başladığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.3** Farklı ayrışma – bozunma türündeki Ilıca bazaltik kaya kütlelerine ait süreksizlik pürüzlülük değerleri.

JRC	W <sub>0</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
$\bar{x}$	15.55	12.75	7.10	4.05
s.s	1.43	1.02	1.62	1.46
n	20	20	20	20

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma,  
n: Örnek sayısı

Kaya kütlelerinin dolgu durumları, hat etütleri esnasında karşılaşılan süreksizliklerin sert (kuvars vb.) veya yumuşak (kil vb.) olarak sınıflandırılması ve bu dolguların kalınlıklarının ölçümüne dayanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalarda W<sub>0</sub> tip kaya kütlelerinde çoğunlukla dolgu bulunmamakla birlikte nadiren kalınlığı 2 mm'den düşük kuvars dolgulara rastlanmıştır. W<sub>1</sub> tip kaya kütlelerinde yine dolgu kuvars bileşiminde olup, bu dolguların kalınlığı 1 – 6 mm arasında değişmektedir. W<sub>2</sub> ve W<sub>3</sub> tip kaya kütlelerinde ise kuvars bileşimindeki dolgunun yanı sıra yumuşak kil ve kalsit dolgular gözlenmekte olup, bu dolguların kalınlıkları 60 mm'ye kadar ulaşmaktadır.

Hat etütleri esnasında yapılan gözlem ve değerlendirmelere göre farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerini gözlemsel olarak ayırt etmek için dikkat edilmesi gereken önemli hususlar Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.4** Ilıca bazaltik kayaçlarını ayrışma – bozunma açısından tanımlayıcı kriterler.

**Ayrışmamış kaya kütlesi (W<sub>0</sub>)**



- Kaya kütlelerindeki renk genelde koyu gri ve koyu yeşildir. Kaya kütlelerinde kırılma yüzeyleri genelde konkoidaldir.
- Ortalama süreksizlik aralığı 500 – 800 mm civarındadır.
- Süreksizlikler genelde çok pürüzlü ve pürüzlü olup, ortalama JRC değeri 15 – 16 arasında değişmektedir.
- Süreksizliklerde genelde dolgu gözlenmez. Nadiren kalınlığı 2 mm'den düşük kuvars dolgu gözlenebilir.
- Hidrotermal ayrışma ürünleri (hematitleşme, limonitleşme, kloritleşme, killeşme, opaklaşma vb.) gözlenmez. Ancak yer yer hafif okside yüzeylere rastlanabilir.
- Jeolog çekici ve keski ile kaya kütlelerinden numune almak çok zordur ve el numuneleri jeolog çekici ile kırılmaz.

#### Çizelge 4.4 (devam ediyor).

##### Hafif ayrılmış kaya kütlesi ( $W_1$ )



- Kaya kütlesindeki renk  $W_0$  tip kaya kütlesi ile aynıdır.
- Ortalama süreksizlik aralığı 300 – 450 mm civarındadır. Süreksizlikler kaya kütlelerini belirgin bloklara ayırır. Bu özellik sayesinde  $W_0$  ile  $W_1$  tip kaya kütleleri ayırt edilebilir.
- Süreksizlikler genelde pürüzlü olup, JRC değeri 12 – 13 arasında değişmektedir.
- Süreksizliklerde yer yer kuvars dolgu gözlenmekte olup, dolgu kalınlığı 1 – 6 mm arasında değişmektedir.
- Hidrotermal ayrışma ürünleri genelde gözlenmez. Ancak yer yer okside yüzeyler (hematitleşme vb.) gözlenebilir.
- Keski ve levye yardımı ile süreksizlikler tarafından çevrelenen küçük kaya blokları çıkartılabilir.

##### Orta derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_2$ )



- Kaya kütlesindeki renk gri, sarı, kırmızı ve yeşil tonlarındadır.
- Ortalama süreksizlik aralığı 100 – 200 mm civarında olup, süreksizler kaya kütlesinde homojen olarak gözlenmez.
- Süreksizlikler genelde az pürüzlü olup, JRC değeri 6 – 8 arasında değişmektedir.
- Süreksizliklerde kuvars, kalsit ve kil dolgular gözlenmekte olup, dolgu kalınlığı 25 – 30 mm'ye ulaşabilir.
- Hidrotermal alterasyon ürünü olarak kloritleşme hematitleşme ve limonitleşme belirgindir. Nadiren silisleşme gözlenebilir. Kloritleşme  $W_2$  ile  $W_1$  tip kaya kütlelerini ayırt etmede belirleyicidir.
- Kaya kütlesi yüzeyleri çekiçle çizilebilir, keski ve levye yardımı ile küçük kaya blokları çıkartılabilir.

##### İleri derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_3$ )



- Kaya kütlesinde renk çoğunlukla sarı, yeşil ve çoğunlukla kırmızı tonlarında gözlenmektedir.
- Ortalama süreksizlik aralığı 20 – 40 mm arasındadır. Küçük kaya blokları etrafında kalınlığı 100 mm'ye ulaşabilen gevşek zonlar bulunabilir.
- Süreksizlikler düzlemsel olup, JRC değeri 3 – 5 arasında değişmektedir.
- Süreksizliklerde genelde kil ve kalsit dolgu gözlenmektedir. Ayrıca kaya kütlesinde süreksizlik yüzeyleri boyunca tabaka ayrılmasını andıran boşluklu, kesikli yapılar gözlenmektedir. Bu tabaka ayrılmaları sayesinde  $W_2$  ile  $W_3$  tip kaya kütleleri birbirinden ayırt etmek mümkündür.
- Hidrotermal alterasyon ürünü olarak kloritleşme, hematitleşme, limonitleşme ve killeşme belirgindir.
- Kaya kütlesi jeolog çekici veya bir çakı ile çizilebilir. Kaya kütlesinden küçük ve orta ölçekli kaya blokları çıkartılabilir.

Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki bazaltik kaya kütleleri üzerinde Schmidt çekici deneyleri, L tipi çekicinin uygulandığı yüzeylere dik olacak şekilde uygulanması hususu ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).



**Şekil 4.7** Orta derecede ayrılmış bir bazaltik kaya kütlelerinde ( $W_2$  tip) gerçekleştirilen Schmidt çekici deneyleri.

L tipi Schmidt çekici kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, edilen Schmidt çekici geri sıçrama sayıları ( $R_1$ ) Çizelge 4.5'te verilmiştir. Farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde  $R_1$  değerinin değişimi de Şekil 4.8'de verilmiştir.

**Çizelge 4.5** Farklı ayrışma – bozunma türündeki Ilıca bazaltik kaya kütlelerine ait tipik L tipi Schmidt çekici geri sıçrama sayıları.

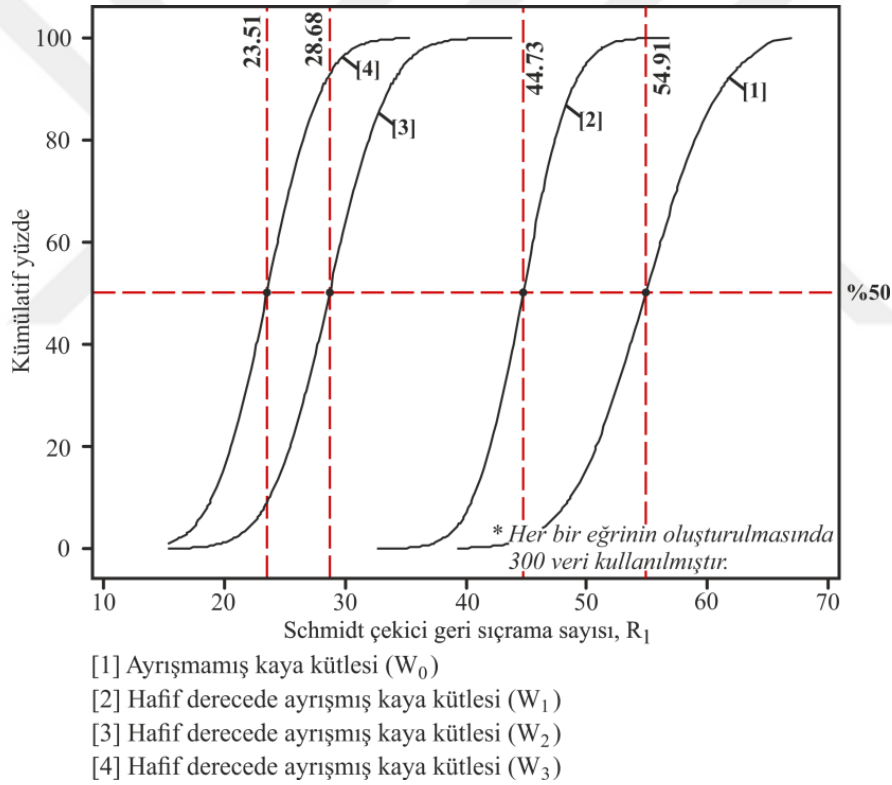
$R_1$	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	54.91	44.73	28.68	23.51
s.s	4.87	3.19	3.85	3.53
n	300	300	300	300

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma,  
n: Örnek sayısı

Gerçekleştirilen Schmidt çekici deneylerine göre, farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya kütlelerinde ortalama  $R_1$  değeri 23 – 55 arasına değişmekte olup,  $W_1$  tip kaya kütlelerinden  $W_3$  tip kaya kütlelerine geçişte  $R_1$  değeri ortalama %57 oranında azalmaktadır.

Farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinden elde edilen  $R_1$  değerlerinin değişimi incelendiğinde (Bkz. Şekil 4.8),  $R_1$  değerlerinin ayrışma – bozunma derecelerine göre belirgin sınırlar teşkil ettiği görülmektedir.

Belirgin sınırlar teşkil eden  $R_1$  değerleri, farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya kütlelerinin niceliksel olarak sınıflandırılmasında kullanılmış olup, elde edilen bulgular Bölüm 5'te verilmiştir.



**Şekil 4.8** İlica bazaltik kayalar için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerindeki  $R_1$  değerinin değişimi.

İlica bazaltik kayalarında gerçekleştirilen hat etütlerine göre ayrışma – bozunma gösteren kaya kütleleri çoğu kez farklı yapısal bölgeler teşekkül edecek şekilde arazide gözlenmektedir. Bu anlamda Çizelge 4.4'te ifade edilen tanımlayıcı kriterleri göz önünde bulundurmak kaydı ile farklı ayrışma – bozunma içeren birimler biribirinden kolaylıkla ayırt edilebilir.

#### 4.2.2. Karabük Kayadibi – Yenice civarında gerçekleştirilen arazi çalışmaları

İnceleme alanı Zonguldak – Gökçebey şehir merkezinin yaklaşık 10 km güneydoğusunda ve Karabük Yenice şehir merkezinin yaklaşık 14 km batısında yer almaktadır. İnceleme alanı temelini Bolu Plütönu karmaşığı oluşturmaktadır. Erendil vd. (1991) Bolu Plütönu granodiyorit, tonalit, granit, gabro gibi plütönik kayalar ve bunları kesen damar kayaları (lamprofir ve kuvars aplit) kayalarından oluşan bir mağmatik çekirdek kaya topluluğu olarak tanımlamıştır.

Bolu Plütönu üzerine uyumsuz olarak gelen Ulus Formasyonu, kumtaşı ve şeyl ardalanmasından oluşmakta olup, formasyon Bartın ili doğusuna kadar yayılım göstermektedir (Akyol vd. 1974). Ulus Formasyonu üzerinde volkanojenik kumtaşı, şeyl, tüfit ve pelajik kireçtaşları ile temsil edilen Yemişliçay Formasyonu yer almaktadır. Yemişliçay Formasyonu üzerindeki Akveren Formasyonu ise marn, çamurtaşı ve yer yer resifal kireçtaşları ile temsil edilmektedir.

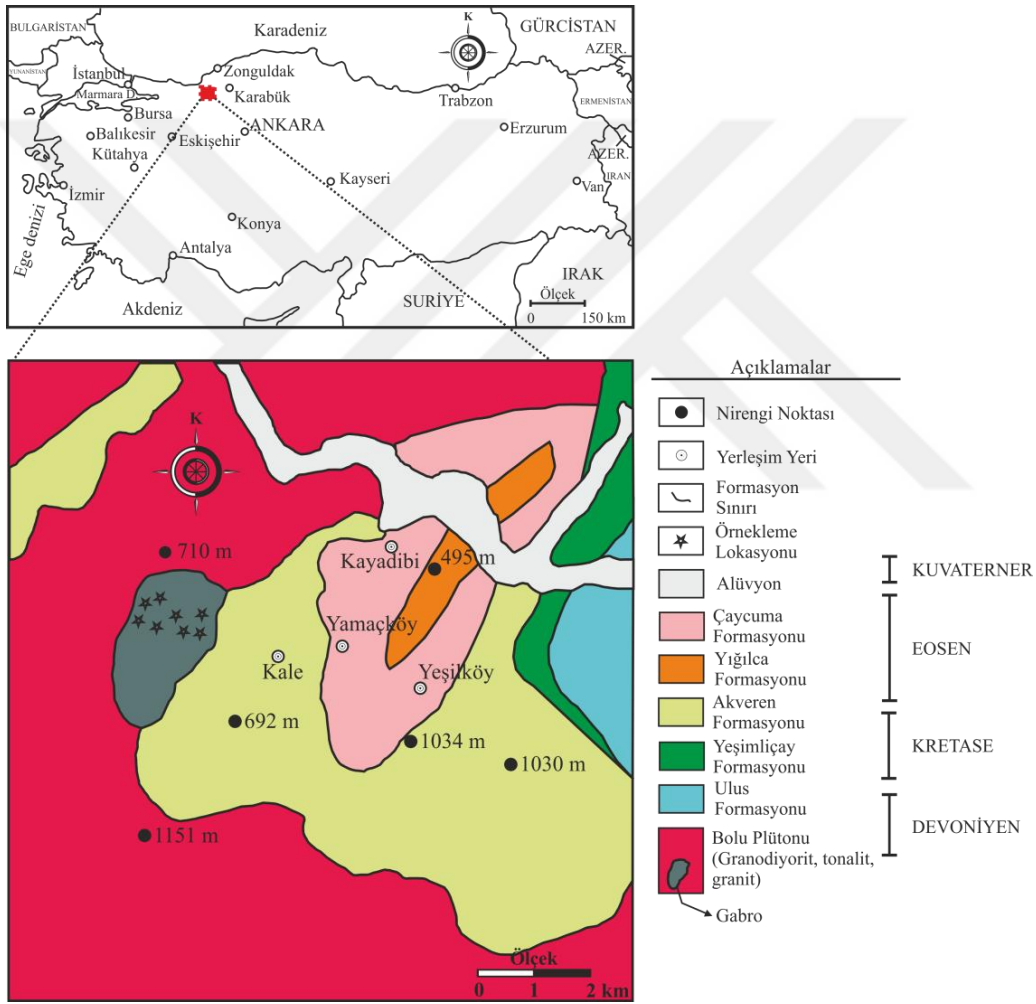
Akveren Formasyonunda marnlar genellikle beyaz, gri tonlarda, çamurtaşları sarı tonlarda ve resifal kireçtaşları da grimsi yeşil ve kırmızı tonlarda izlenmektedir (Ünal 2009). Akveren Formasyonu üzerindeki Yığılca Formasyonu genel olarak andezit, bazalt, tuf, aglomera ve volkanojenik kumtaşlarından oluşmakta olup, volkanojenik kumtaşları arasında ince katmanlı marn seviyeleri dikkat çekmektedir. Marn seviyelerinde izlenen ve sığ denizel ve resifal ortamı karakterize eden *Nummulites* fosillerinin varlığı sebebiyle formasyon yaşının Alt – Orta Eosen olduğu düşünülmektedir (Bürkan vd. 1982).

Yığılca Formasyonu üzerinde ise genellikle sığ denizel ve resifal kireçtaşları ile tanımlanan Çaycuma Formasyonu yer almaktadır. Bu formasyon içerisinde gözlenen gri, grimsi yeşil kireçtaşlarında bol miktarda *Nummulites* fosilleri gözlenmekte olup, bu formasyon Yığılca Formasyonu ile yanal – düşey geçişlidir. Bu açıdan Çaycuma Formasyonu yer yer tüfit ve aglomera gibi volkanik kökenli birimler içerebilir. İnceleme alanındaki en genç birim ise Kuvaterner yaşlı alüvyon olarak tanımlanmış olup, bölgenin basitleştirilmiş jeoloji haritası Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

İnceleme alanında Kale bölgesi batı kesimlerinde bulunan ultra-bazik kayaların altere olmuş yüzeyleri kırmızımsı ve yeşilimsi tonlarda izlenmektedir.

Sözü edilen ultra-bazik kayaların taze yüzeyleri siyah ve koyu yeşil tonlarda olup, iri kristalli bir yapıdadır. İnceleme alanındaki bu ultra-bazik kayalar yer yer kuvars apilit damarları ile kesilmiş olup, kayaların arazideki genel görünümü Şekil 4.10'da verilmiştir.

Gerçekleştirilen hat etütlerinde farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri çoğu kez bir arada zaman zaman da farklı yapısal bölgeler teşekkül edecek şekilde gözlenmektedir. Hat etütlerinde farklı ayrışma – bozunma içeren ultra-bazik kayaların genel görünümü ise Şekil 4.11'de görülmektedir.



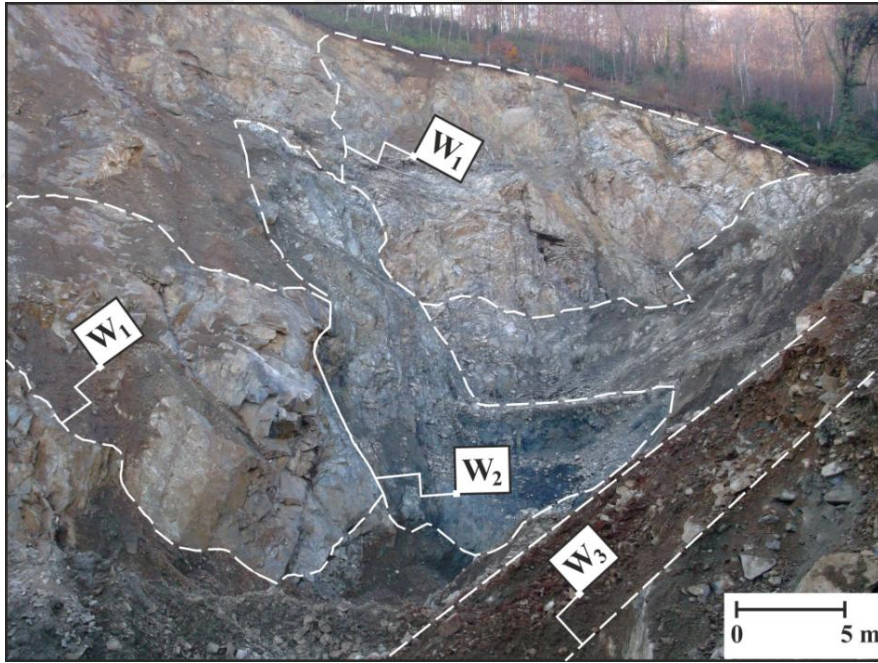
**Şekil 4.9** Kayadibi ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Erendil vd. 1991'den düzenlenerek).

Gerçekleştirilen hat etütleri sonucunda farklı ayrışma – bozunma içeren birimlere ait süreksizlik aralığı değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.  $S_m$  değerlerinin ayrışma – bozunmaya göre değişimi de Şekil 4.12'de verilmiştir.





Şekil 4.10 Kale batısındaki ultra-bazik kayaçların genel görünümüleri.



Şekil 4.11 Farklı ayrışma – bozunma içeren ultra-bazik kayaçların genel görünümüleri.

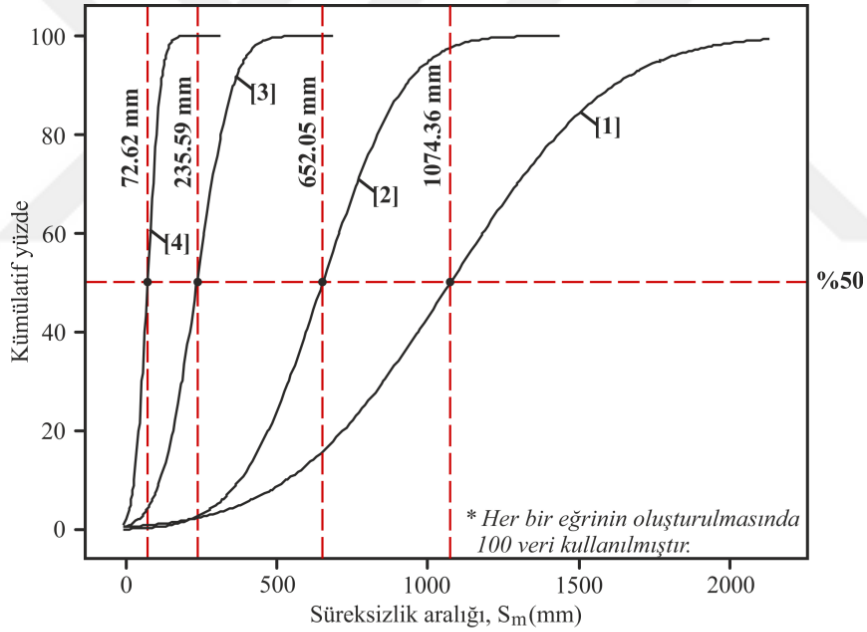
Hat etütlerinden elde edilen verilere göre, farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde ortalama  $S_m$  değeri 70 – 1000 mm arasında değişmektedir (Çizelge 4.6).  $S_m$  değerlerinin değişimi incelendiğinde ise,  $W_0$  tip kaya külesinden  $W_3$  tip kaya külesine olan geçişte  $S_m$  değeri ortalama %93 oranında azalmaktadır.

Ayrıca, Çizelge 4.6'daki verilere göre,  $S_m$  değerleri Çizelge 4.2'deki sınıflamaya göre  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya kütlelerindeki süreksizlikler "Geniş aralıklı",  $W_2$  tip kaya kütlelerinde gözlenen süreksizlikler "Orta aralıklı" ve  $W_3$  tip kaya kütlelerindeki süreksizlikler ise "Yakın aralıklı" olarak tanımlanmaktadır.

**Çizelge 4.6** Farklı ayrışma – bozunma türündeki Kayadibi ultra-bazik kaya kütlelerine ait süreksizlik aralığı değerleri.

$S_m$ (mm)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	1074.36	652.05	235.59	72.62
s.s	422.95	214.54	94.71	34.71
n	100	100	100	100

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma,  
n: Örnek sayısı



- [1] Ayrışmamış kaya kütlesi ( $W_0$ )
- [2] Hafif derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_1$ )
- [3] Hafif derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_2$ )
- [4] Hafif derecede ayrılmış kaya kütlesi ( $W_3$ )

**Şekil 4.12** Kayadibi ultra-bazik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde süreksizlik aralığındaki değişim.

Farklı ayrışma – bozunma grubundaki kaya kütlelerinin pürüzlülük durumları ise Çizelge 4.7'de verilmiştir. Farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde ortalama JRC 4 – 17 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.7'deki JRC değerleri Şekil 4.6'daki sınıflamaya göre,  $W_0$  tip kaya kütlelerine ait süreksizlikler "*Çok pürüzlü*",  $W_1$  tipe ait süreksizlikler "*Pürüzlü*",  $W_2$  tipe ait süreksizlikler "*Az pürüzlü*" ve  $W_3$  tipi kaya kütlelerine ait süreksizlikler ise "*Düzlemsel*" olarak tanımlanmaktadır.

**Çizelge 4.7** Farklı ayrışma – bozunma türündeki Kayadibi ultra-bazik kaya kütlelerine ait süreksizlik pürüzlülük değerleri.

JRC	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	17.07	13.73	7.87	3.93
s.s	1.03	1.44	2.10	0.96
n	15	15	15	15

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma,  
n: Örnek sayısı

Ultra-bazik kaya kütlelerinin dolgu durumları ayrışma – bozunma derecelerine göre değişkenlik göstermektedir.  $W_0$  tip kaya kütlelerinde dikkate değer bir dolgulanma bulunmamakla birlikte nadiren laminalanma (kalınlık  $< 1$  mm) şeklinde çok ince dolgular kaya kütlelerinde ara bantlar şeklinde teşekkül etmektedir.  $W_1$  tip kaya kütlelerinde dolgu kuvars bileşiminde olup, bu dolguların kalınlığı 6 – 10 mm arasında değişmektedir.  $W_2$  ve  $W_3$  tip kaya kütlelerinde ise dolgu çoğunlukla kil ve demir oksitlerce zengin ve gevşek bir yapıda gözlenmektedir. Nadiren kuvars dolgular da gözlenmektedir. Sözü edilen gevşek dolguların kalınlığı 150 mm'ye kadar çıkabilmektedir.

$W_2$  ve  $W_3$  tip kaya kütlelerinde kuvars bileşimindeki dolguların kalınlığı ise 200 mm'ye kadar ulaşmaktadır. Bu bölgelerde sistematik örnekleme süreksizlik ve dolguların sınırladığı kaya bloklarının temin edilmesi hususu ile gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen hat etütleri esnasında elde edilen veri, gözlem ve değerlendirmeler ışığında, ultra-bazik kayaları ayrışma – bozunma açısından ayırtlayabilmek amacıyla bazı tanımlayıcı kriterler belirlenmiş olup, bu kriterler toplu olarak Çizelge 4.8'de verilmiştir. Çizelge 4.8'deki tanımlayıcı kriterler doğrultusunda farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri birbirinden ayırt edilebilmektedir. Sistematik örneklemenin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi ve farklı yapısal bölgeler arasındaki sınır ilişkisinin (yanal ve düşey sınırlar) tespit edilebilmesi için söz konusu bu kriterlerin faydalı olacağı düşünülmektedir.

**Çizelge 4.8** Kayadibi ultra-bazik kayaçlarını ayrışma – bozunma açısından tanımlayıcı kriterler.

<p><b>Ayrışmamış kaya kütlesi (<math>W_0</math>)</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kaya kütlesindeki renk koyu yeşil ve siyah tonlarındadır. Kaya kütleleri yüzeylerinde genelde mantar oluşumları gözlenmektedir.</li><li>• Ortalama süreksizlik aralığı 600 – 1000 mm civarındadır.</li><li>• Süreksizlik yüzeyleri genelde pürüzlü olup, JRC değeri 16 – 18 arasında değişmektedir.</li><li>• Süreksizliklerde dolgu gözlenmemekle birlikte, nadiren laminalar şeklinde (kalınlık &lt; 1 mm) kuvars bantları gözlenmektedir.</li><li>• Hidrotermal ayrışma ürünleri genelde gözlenmez. Ancak kaya kütleleri yüzeyinde hafif okside yüzeyler (hematitleşme vb.) belirgindir.</li><li>• Jeolog çekici ve keski ile kaya kütlesinden numune almak çok zordur ve el numuneleri jeolog çekici ile kırılmaz.</li></ul>
<p><b>Hafif derecede ayrışmış kaya kütlesi (<math>W_1</math>)</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kaya kütlesindeki renk koyu yeşil ve yeşil tonlarında gözlenmektedir. Bu özellik sayesinde <math>W_0</math> ile <math>W_1</math> tip kaya kütleleri ayırt edilebilir.</li><li>• Ortalama süreksizlik aralığı 500 – 800 mm civarında olup, süreksizler kaya kütlelerini belirgin kaya bloklarına ayırmaktadır.</li><li>• Süreksizlikler genelde pürüzlü olup, JRC değeri 12 – 15 arasında değişmektedir.</li><li>• Süreksizliklerde genellikle kil ve gevşek bir yapıdaki okside dolgular gözlenmekte olup, bu gevşek dolguların 6 – 10 mm arasında değişmektedir. Yer yer kaya blokları kalınlığı 50 mm'ye kadar ulaşan gevşek dolgular ile ayrılmaktadır.</li><li>• Yüzey alterasyonu dışında, hidrotermal alterasyon ürünü olarak hematitleşme ve serisitileşme belirgindir.</li><li>• Kaya kütlesi yüzeyleri çekiçle zor çizilebilir, keski ve levye yardımı ile küçük kaya bloklarını çıkartmak güçtür.</li></ul>
<p><b>Orta derecede ayrışmış kaya kütlesi (<math>W_2</math>)</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kaya kütlesinde renk çoğunlukla yeşil, koyu sarı kırmızı ve kahverengi tonlarındadır.</li><li>• Ortalama süreksizlik aralığı 150 – 300 mm arasındadır. Süreksizlikler küçük kaya bloklarını sınırlayıcı özelliktedir.</li><li>• Süreksizlikler genellikle az pürüzlü ve nadiren düzlemsel olup, JRC değeri 4 – 10 arasında değişmektedir.</li><li>• Süreksizliklerde genelde kil ve gevşek okside dolgular gözlenmektedir. Gevşek dolgu kalınlığı 150 mm'ye ulaşabilir. Nadiren kuvars bileşimindeki dolgulara da rastlanır. Kalın kuvars damarları <math>W_2</math> tip kaya kütleleri için belirgindir.</li><li>• Hidrotermal alterasyon ürünü olarak, killeşme, opaklaşma, hematitleşme ve yer yer limonitleşme belirgindir.</li></ul>

**Çizelge 4.8** (devam ediyor).

**İleri derecede ayrılmış kaya kütlesi (W<sub>3</sub>)**



- Kaya kütleindeki renk genelde koyu gri, turuncu, kahverengi ve açık yeşil tonlarındadır.
- Ortalama süreksizlik aralığı 40 – 100 mm arasındadır. Belirgin süreksizlikler genelde gözlenmez. Kesikli ve geliş güzel süreksizlikler genelde kaya kütlesi yüzeyinde homojen bir yapı sunar.
- Süreksizlikler düzlemsel olup, ortalama JRC değeri 3 – 5 arasında değişmektedir.
- Süreksizliklerde dolgu genelde kil ve okside gevşek zonlar olarak gözlenir. Dolgu renkleri genelde kahverengi tonlarında olup, bu dolgunun belirginliği sayesinde W<sub>2</sub> ile W<sub>3</sub> tip kaya kütleleri birbirinden kolaylıkla ayırt edilebilir. Dolgu kalınlıkları değişken olmakla birlikte 150 mm'ye ulaşabilen gevşek dolgular gözlenebilir.
- Hidrotermal ayrışma ürünleri olarak limonitleşme belirgindir. Açık çatlaklarda silisleşme ve yoğun limonitleşme W<sub>3</sub> tip kaya kütleleri için belirleyicidir.
- Jeolog çekici ve keski ile kaya kütlelerinden küçük boyutlu kaya blokları çıkartılabilir. El numuneleri jeolog çekici ile çizilebilir.

Farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde gerçekleştirilen Schmidt çekici deney sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Gerçekleştirilen Schmidt çekici deney sonuçlarına göre farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde ortalama R<sub>1</sub> 26 – 57 arasında değişmektedir. W<sub>1</sub> tip kaya kütlelerinden W<sub>3</sub> tip kaya kütlelerine geçişte R<sub>1</sub> değeri ortalama %53 oranında azalmaktadır. Farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinde R<sub>1</sub> değerinin değişimi de Şekil 4.13'te verilmiştir.

**Çizelge 4.9** Kayadibi ultra-bazik kayaçların farklı ayrışma – bozunma türündeki bazaltik kaya kütlelerine ait tipik L tipi Schmidt çekici geri sıçrama sayıları.

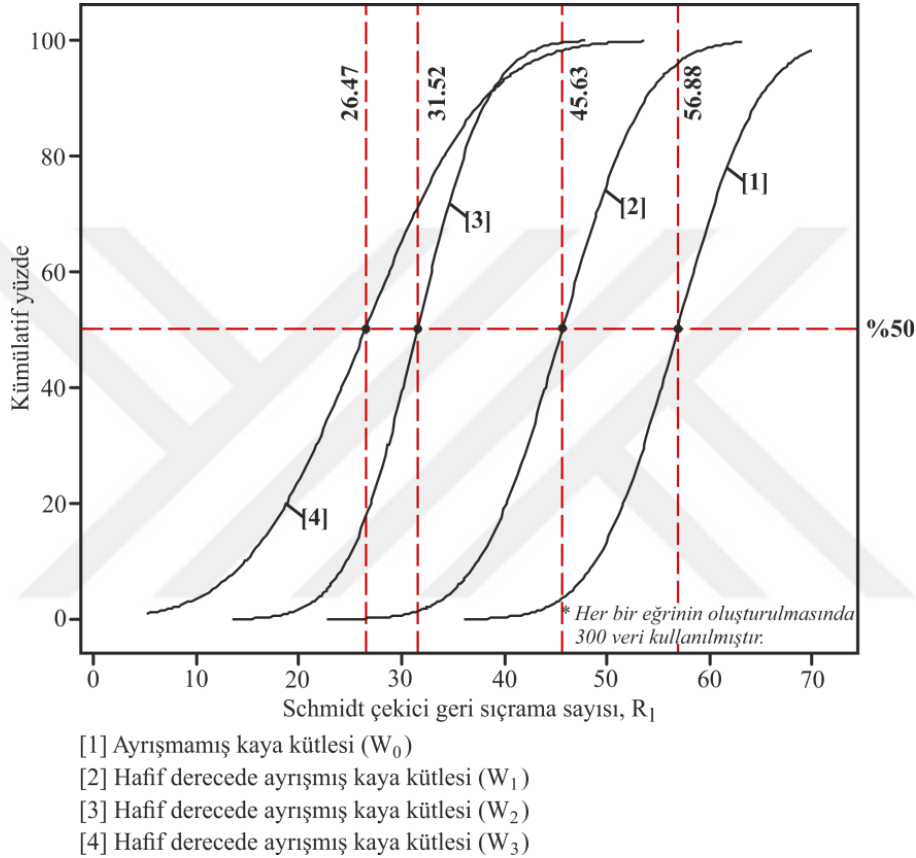
R <sub>1</sub>	W <sub>0</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>
$\bar{x}$	56.88	45.63	31.52	26.47
s.s	6.24	6.41	5.39	9.11
n	300	300	300	300

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma,  
n: Örnek sayısı

Şekil 4.13'e göre farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinin farklı yüzey dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir. W<sub>0</sub> ve W<sub>1</sub> tip kaya kütleleri belirgin olarak farklı

$R_1$  değer aralığına sahip olmakla birlikte,  $W_2$  ve  $W_3$  tip kaya kütlelerinin  $R_1$  değişimi açısından daha yakın değerler ile temsil edildiği söylenebilir.

Gerçekleştiren hat etütleri sonucunda, Kayadibi ultra-bazik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren birimlerin çoğu kez bir arada, zaman zaman da farklı yapısal bölgeler oluşturacak şekilde arazide gözlemlendiği tespit edilmiştir.



**Şekil 4.13** Kayadibi ultra-bazik kayaları için farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerindeki  $R_1$  değerinin değişimi.

Bu farklı yapısal bölgelerin arazideki tespiti üretilecek agreganın kalitesini artırıcı bir unsur olacak değerlendirilmelidir. Gerek üretilecek agreganın kalitesi, işletmenin ekonomik kısıtları ve sürdürülebilirliği açısından, ayrışma – bozunma içeren bu tip yapısal bölgelerin sınıflandırılması ve her bir sınıf aralığındaki kaya kütlerine ilişkin temel özelliklerinin tanımlanması, kırmataş madenciliğinde üretim planlaması, ilk yatırım maliyeti ve agrega kalitesinin artırılması açısından işletmelere büyük kolaylık sağlayacaktır.

Bu açıdan balast agrega kalitesi ve balast agregasına etki eden çevresel ve mekanik koşulların araştırılmasından önce, agregaların üretildiği sahalar önemli bir inceleme konusu olarak ele alınmış, farklı ayrışma – bozunma içeren birimler detaylı bir şekilde araştırılmış ve farklı ayrışma – bozunma içeren birimlere ilişkin tanımlayıcı kriterler ortaya konmuştur.

Zira, üretim esnasında ayrışma – bozunma içeren birimlerin bir arada değerlendirilmesi ihtimali düşünüldüğünde, agrega kalitesinin artırılmasında öncelikli kısıt, bu birimlerin yanal ve düşey sınırlarının doğru tespit edilmesidir.

Ayrışma – bozunmadan tamamen kurtularak bir agrega üretimi yapmak mümkün olmasa da, sınırları doğru tanımlanmış bölgelerde yapılacak olan delme – patlatma ve kırma – eleme işlemlerini takiben üretilen agregaların olabildiğince ayrışma – bozunma emarelerinden kurtulması söz konusu olabilir.

### **4.3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI**

#### **4.3.1. Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi**

Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için hat etütleri esnasında temin edilen kaya bloklarından alınan silindirik örnekler kullanılmıştır. NX tip karotiyer (karotiyer iç çapı 54 mm) kullanılarak gerçekleştirilen karot alma işlemini (Şekil 4.14) takiben, alınan silindirik numuneler ilgili deney yönteminde ifade edilen geometrik koşullara göre kesilmiş, alt ve üst yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir.

Daha sonra geometrik olarak istenen özelliklere getirilen numuneler  $105 \pm 1$  °C sıcaklığındaki etüvde 24 saat kurutulmuş, numuneler oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiş ve böylece numune hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Hazırlanan numunelerin boy, çap ve kuru ağırlık gibi özellikleri ilgili deney öncesinde belirlenmiştir.

Laboratuvara getirilen  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya bloklarının boyutları ortalama 20 cm (eninde) x 20 cm (kalınlığında) x 30 cm (boyunda) boyutlarında olup,  $W_2$  ve  $W_3$  tipindeki kaya bloklarının ortalama boyutları ise 15 cm (eninde) x 15 cm (kalınlığında) x 10 cm (boyunda) şeklindedir. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya bloklarından silindirik numune alma işlemi farklı şekillerde gerçekleştirilmiştir.

$W_0$  ve  $W_1$  tip kaya bloklarından silindirik numune alma işlemi, karot alma makinesinde ortalama 600 Nm tork ve 400 rpm devir koşullarında gerçekleştirilmiştir.  $W_2$  ve  $W_3$  tip kaya bloklarında silindirik numune alma işlemi ise ortalama 350 Nm tork ve 700 rpm devir koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar altında optimum uzunlukta silindirik numuneler temin edilebilmiştir. Silindirik karotların elde edilmesinden sonra numuneler taş kesme makinasında uygun L / D oranlarına göre kesilmiş ve taşlama makinasında alt ve üst yüzeyleri pürüzsüz bir hale getirilmiştir.



**Şekil 4.14** NX tip karotiyer kullanarak kaya bloklarından silindirik numune alma işlemi.

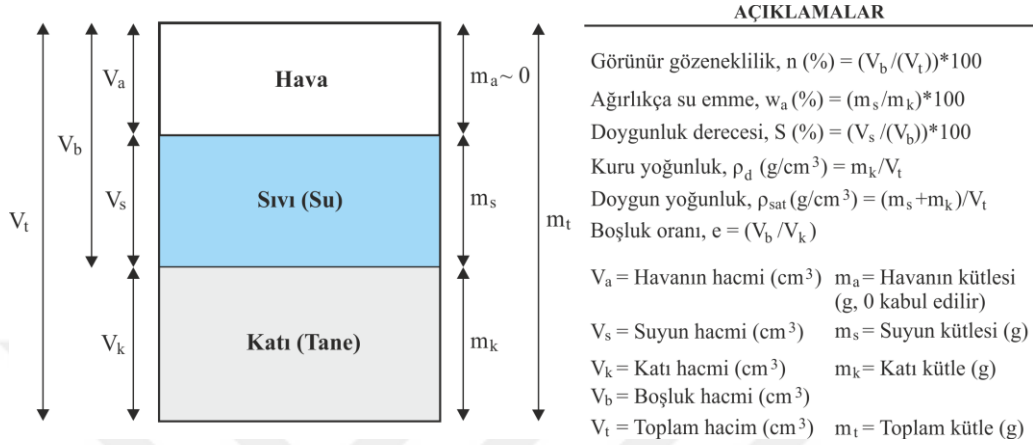
Fiziksel özelliklerin belirlenmesinde  $L/D = 1 - 2.5$ , eksenel nokta yükü deneylerinde  $H/D = 0.3 - 1.0$ , tek eksenli basınç dayanımı ve statik elastik sabitlerin belirlenmesinde  $L/D = 2.5 - 3.0$  ve dolaylı çekme dayanım deneylerinde ise  $H/D = 0.5 - 1.0$  oranında silindirik numuneler kullanılmıştır.

#### **4.3.1.1. Fiziksel özellikler**

Kaya malzemesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde zemin mekaniği ilkelerinden porozite prizması kullanılmıştır. Kaya malzemesinin en önemli fiziksel özellikleri yoğunluk, ağırlıkça su emme ve görünür gözenekliliği olarak kabul edilebilir.



Fiziksel özellikler ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere uygun olarak belirlenmiştir. Buna göre öncelikle hacmi belli olan silindirik kaya numuneleri hazırlanır. Hazırlanan silindirik numuneler 24 saat boyunca 105 °C'de kurutulur. Kurutulan silindirik numune oda sıcaklığına gelince ağırlığı tartılır.



**Şekil 4.15** Porozite prizması ile fiziksel özelliklerin belirlenmesi.

Daha sonra numune içinde saf su bulunan desikatör içerisine konularak (Şekil 4.16) 48 saat boyunca bağlantılı gözeneklerin tamamen doymun hale gelmesi beklenir. Desikatör içindeki suyun sıcaklığı  $20 \pm 1$  °C civarında olup, desikatöre bağlanan vakum pompası desikatör içerisindeki havayı çekerek numunedeki doymunluk derecesinin artırılması konusunda işlev görür. Doymunluğa ulaşan numuneler tekrar tartılarak doymun ağırlıkları belirlenir ve Şekil 4.15'teki eşitlikler kullanılarak kaya malzemesinin fiziksel özellikleri belirlenir.



**Şekil 4.16** Kaya malzemesinin doymun hale getirilmesi.

Burada ifade edilen metot uygulanarak incelenen kayalara ait fiziksel özellikler belirlenmiştir. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerin fiziksel özellikleri, Ilıca bazaltik kayaları için Çizelge 4.10 ve Kayadibi ultra-bazik kayaları için ise Çizelge 4.11'de verilmiştir. Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'e göre ilerleyen ayrışma – bozunma derecesi ile kaya malzemelerindeki kuru yoğunluk değeri azalırken, ağırlıkça su emme ve görünür gözeneklilik değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Örneğin, Ilıca bazaltik kayalarında  $W_0$  tip kaya türünden  $W_3$  tip kaya türüne geçişte  $w_a$  değeri ortalama %500 oranında artmaktadır. Aynı artış oranı Kayadibi ultra-bazik kayaları için ortalama %370 civarındadır.

**Çizelge 4.10** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki Ilıca bazaltik kayalarının fiziksel özellikleri.

Ilıca bazaltik kayaları									
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	2.74	2.66	2.57	2.49	$\bar{x}$	2.76	2.68	2.60	2.53
s.s	0.02	0.03	0.04	0.02	s.s	0.10	0.03	0.05	0.04
n	26	20	16	10	n	26	20	10	10
$w_a$ (%)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$n_e$ (%)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	0.32	0.37	0.71	1.93	$\bar{x}$	0.88	1.07	2.58	4.96
s.s	0.09	0.10	0.14	0.53	s.s	0.20	0.21	0.05	1.21
n	26	20	16	10	n	26	20	16	10

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $\rho_d$  : Kuru yoğunluk,  $\rho_{sat}$  : Doygun yoğunluk,  $w_a$  : Ağırlıkça su emme,  $n_e$  : Görünür gözeneklilik.

**Çizelge 4.11** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki Kayadibi ultra-bazik kayalarının fiziksel özellikleri.

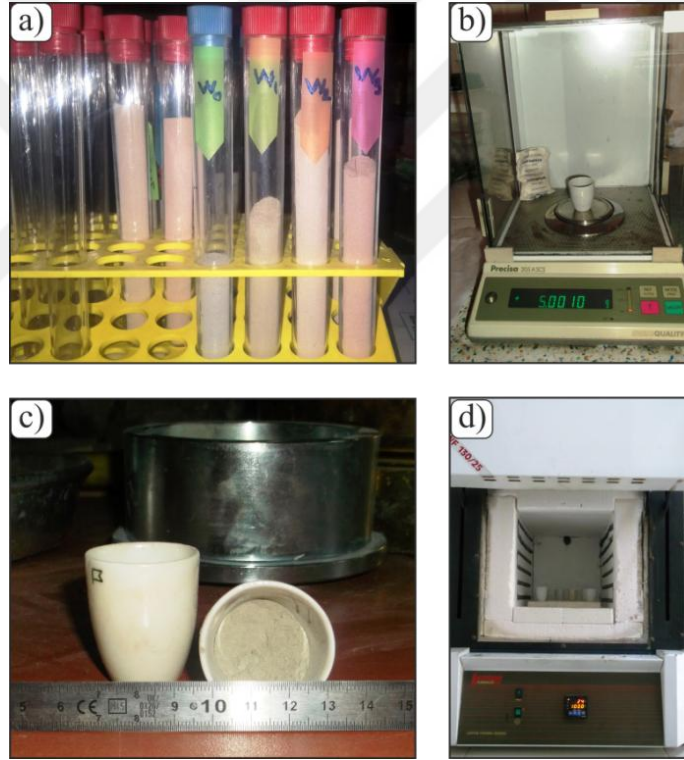
Kayadibi ultra-bazik kayaları									
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	2.88	2.85	2.79	2.70	$\bar{x}$	2.89	2.87	2.82	2.74
s.s	0.03	0.03	0.04	0.03	s.s	0.02	0.02	0.03	0.02
n	16	14	11	10	n	16	14	11	10
$w_a$ (%)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$n_e$ (%)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	0.11	0.16	0.27	0.52	$\bar{x}$	0.17	0.28	0.38	0.68
s.s	0.02	0.03	0.05	0.09	s.s	0.03	0.05	0.09	0.17
n	16	14	11	10	n	16	14	11	10

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $\rho_d$  : Kuru yoğunluk,  $\rho_{sat}$  : Doygun yoğunluk,  $w_a$  : Ağırlıkça su emme,  $n_e$  : Görünür gözeneklilik.

İlerleyen ayrışma – bozunma ile kayaçların kuru yoğunluk değerlerinin de azaldığı Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'den anlaşılmaktadır.  $W_0$  tip kaya kütesinden  $W_3$  tipe geçerken Ilıca bazaltik kayaçlarında  $\rho_d$  ortalama %9 azalırken, aynı azalma oranı Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ortalama %6 civarındadır.

#### 4.3.1.2. Kızdırma kaybı

Kızdırma kaybı (Loss of ignition, LOI) son zamanlarda ayrışma – bozunmanın niceliksel olarak belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler arasında önemini artırmış bir deney yöntemidir. Kızdırma kaybı deneyleri (Şekil 4.17) ASTM D7348-13'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.17** Kızdırma kaybı deneyi a) Hazırlanan numuneler (-0.106 mm) b) Numunenin tartılması c) Numunenin kroze konulması d) Numunenin yüksek sıcaklıklı fırına yerleştirilmesi.

Kızdırma kaybı deneylerinde 0.106 mm'lik elekten geçen yaklaşık  $5 \pm 0.5$ g numune kroze konarak 950 °C'lik fırında bir saat süre ile yakılır. Daha sonra etüv kapatılarak numunenin bulunduğu kroze oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenir.

Daha sonra tekrar krozenin ağırlığı tartılır. LOI değeri Eşitlik 4.1 kullanılarak belirlenmiş olup, deney sonuçları Çizelge 4.12'de verilmiştir.

$$LOI = \left( \frac{m_0 - m_1}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Burada:  $m_0$  krozeeye konulan numunenin ilk ağırlığı ( $5 \pm 0.5$  g) ve  $m_1$  ise numune yakıldıktan sonraki ağırlığı (g) olarak tanımlanmaktadır.

Kızdırma kaybı deney sonuçları ilerleyen ayrışma – bozunma ile LOI değerinin arttığını göstermektedir. Daha ayrıntılı bir ifade ile, Ilıca bazaltik kayaçları için,  $W_0$  tip kaya kütlesinden  $W_3$  tip kaya kütlesine geçildiğinde LOI değeri ortalama %467 artmaktadır. Aynı artış oranı Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise ortalama %1550 civarındadır.

**Çizelge 4.12** Kızdırma kaybı deney sonuçları.

Ilıca bazaltik kayaçları					Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
LOI (%)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	LOI (%)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	0.95	2.19	4.86	5.39	$\bar{x}$	0.40	1.14	2.91	6.60
s.s	0.45	0.64	0.71	0.98	s.s	0.14	0.59	0.86	1.15
n	9	8	10	10	n	7	7	6	6

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, LOI : Kızdırma kaybı

#### 4.3.1.3. Nokta yükü dayanım indeksi

Nokta yükü dayanım indeksi deneyleri eksenel yükleme koşullarında ve ISRM (1981)'in önerildiği yöntem doğrultusunda, hacmi belirli silindirik örnekler üzerinde ayrıca alt ve üst yüzeyleri düzlenen düzensiz şekilli balast malzemeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Düzenli geometrideki örneklerin geometrik koşulları  $0.3 \leq H / D \leq 1$  şeklinde olup, 50 mm'ye göre düzeltilmiş eksenel nokta yükü dayanımı Eşitlik 6.2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$I_{.50} = \frac{F}{De^2} \times \left( \frac{De}{50} \right)^{0.45} \quad (4.2)$$

Burada F nokta yükü deneyinden elde edilen numune kırılma yükü (kN) ve De eşdeğer karot çapı (mm) (Bkz. Eşitlik 4.3) olarak tanımlanmaktadır.

$$De = \frac{4A}{\pi} \quad (4.3)$$

Burada A silindirik numunenin çapı (D, mm) ile kalınlığının (H, mm) çarpımı olarak ( $A = D \times H$ ) ifade edilmektedir.



**Şekil 4.18** Nokta yükü dayanım indeks deneyi.

Gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar Çizelge 4.13'te verilmiştir. Çizelge 4.13'e göre her iki kayacın  $W_0$  tipine ait olan örnekleri Biewniawski (1975)'e göre "*Çok Yüksek*" dayanımlı kayalar olarak tanımlanmaktadır. Yine her iki kayaç için;  $W_1$  tip kaya örnekleri "*Yüksek*" dayanımlı" kayalar olarak tanımlanmaktadır.

**Çizelge 4.13** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin düzeltilmiş nokta yükü dayanım değerleri.

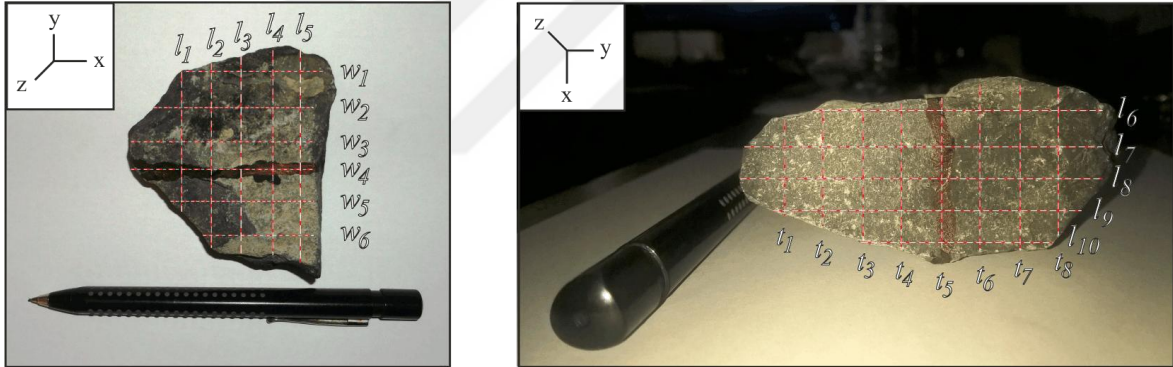
Ilıca bazaltik kayaçları					Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
$I_{s50}$ (MPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$I_{s50}$ (MPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	10.50	7.62	5.50	1.96	$\bar{x}$	12.96	8.85	3.89	1.57
s.s	0.85	1.03	0.52	0.68	s.s	1.42	1.74	1.18	0.58
n	19	14	10	8	n	10	10	10	9

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  
 $I_{s50}$  : Düzeltilmiş nokta yükü dayanımı

$W_0$  tip kaya kütlesinden  $W_3$  tip kaya kütlesine geçerken Ilıca bazaltik kayaçlarında  $I_{s50}$  değeri ortalama %80 azalırken, aynı azalma oranı Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ortalama %88 civarındadır.

Nokta yükü dayanım indeks deneylerinin ikinci aşaması, balast agregasının demiryolu hattına serildiği yerindeki dayanımının kestirimi için nokta yükü deneyinin kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda düzensiz geometrideki örnekler üzerinde de nokta yükü deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar silindirik örneklerden elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Öncelikle düzensiz balast agregalarının boyutları kumpas kullanılarak detaylı olarak belirlenmiştir. Agreganın boyutlarının belirlenmesi kalınlık, genişlik ve uzunluk olmak üzere birbirine dik üç eksende en az beş ölçü olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Örnek bir balast agregasında klasik (kumpas ile) boyut ölçüm işlemi Şekil 4.19'da görülmektedir.



**Şekil 4.19** Balast agregasında boyut ölçümü işlemi: l: agreganın boyu, w: agreganın genişliği, t: agreganın kalınlığı (Köken ve Özarslan 2016).

Düzensiz geometrideki numuneler şekilsellik açısından incelenmiş ve her bir deney numunesine ilişkin küresellik katsayısı, Janoo (1998) tarafından önerilen görgül bağıntılar yardımı ile belirlenmiştir. Her bir eksende ölçülmüş boyutların en küçük, en büyük ve ortalama değerleri kaydedilmiş ve incelenen agreganın numunelerine ait küresellik katsayısı değerleri Eşitlik 4.4 – Eşitlik 4.6 kullanılarak belirlenmiştir.

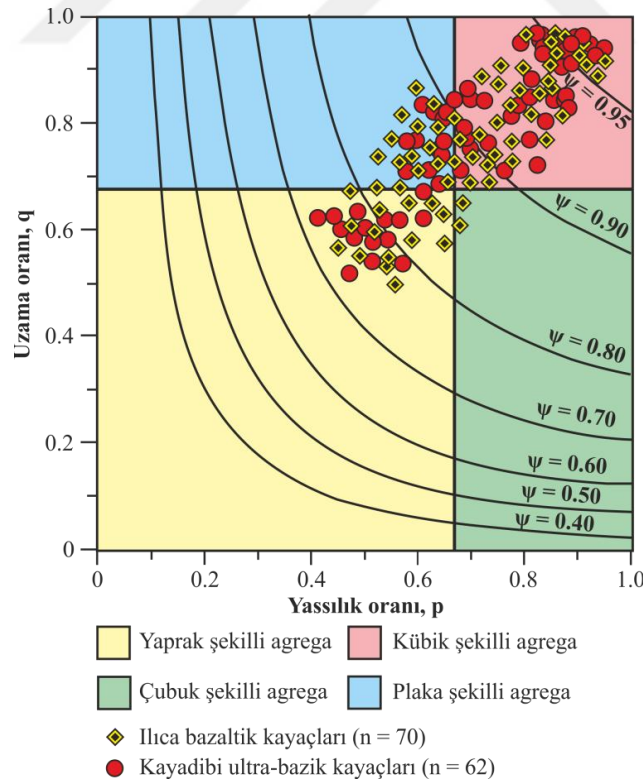
$$\text{Yassılık Oranı, } p = \frac{\text{En Kısa Agreganın Boyu, } (l_{\min})}{\text{Ortalama Agreganın Boyu, } (l_{\text{ort}})} \quad (4.4)$$

$$\text{Uzama Oranı, } q = \frac{\text{Ortalama Agregat Boyu, } (I_{\text{ort}})}{\text{En Uzun Agregat Boyu, } (I_{\text{mak}})} \quad (4.5)$$

$$\psi = \frac{12.8\sqrt{p^2q}}{1 + p(1+q) + 6\sqrt{1+p^2(1+q^2)}} \quad (4.6)$$

Janoo (1998) düzensiz geometrideki agregaları şekilsellik açısından sınıflandırmak için yaptığı çalışmalarda yassılık oranı (p), uzama oranı (q) ve küresellik katsayısı ( $\psi$ ) gibi üç farklı değişirgeyi kullanmıştır. Buna göre araştırmacı agregaları bu üç değişirgeye bağlı olarak agregaları "Yaprak şekilli agregat", "Plaka şekilli agregat", "Çubuk şekilli agregat" ve "Kübik şekilli agregat" olmak üzere toplam dört sınıfta değerlendirmektedir.

Düzensiz geometrideki örnekler kullanılarak gerçekleştirilen nokta yükü dayanım deneylerinde sadece  $W_0$  tip kayaçlardan üretilen balast agregaları kullanılmıştır. Düzensiz geometride iki kaya türü için toplam 132 balast agregat örneklerinin boyut ölçüm işlemleri gerçekleşmiş ve bu agregaların küresellik katsayılarının  $\psi = 0.72 - 0.96$  arasında değiştiği belirlenmiştir. (Şekil 4.20).



**Şekil 4.20** Nokta yükü deneyi için araştırılan balast agregalarının şekilsel özelliklerine göre sınıflandırılması (Janoo 1998'den düzenlenerek).

Farklı küresellik katsayılarındaki balast agrega numuneleri nokta yükü deneyleri için 3 alt grup şeklinde sınıflandırılmıştır. Birinci grupta  $\psi$  değeri 0.7 – 0.8, ikinci grupta  $\psi$  değeri 0.8 – 0.9 ve üçüncü grupta ise  $\psi$  değeri  $> 0.9$  olan balast agregaları yer almaktadır.

Küresellik katsayısı kullanılarak sınıflandırılan balast agregaları nokta yükü aletine yerleştirilmeden önce konik başlıklara temas edecek alt ve üst yüzeyler deneyin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için taş motoru ile düzleştirilmiştir (Şekil 4.21a). Yükleme noktaları düzleştirilen bazı balast agregaları (Şekil 4.21b) nokta yükü aletine aksel olarak yerleştirilerek (Şekil 4.21c) kırılmış ve yenilme yükleri belirlenmiştir.

Geçerli sayılabilecek nokta yükü deneyleri numunelerin yükleme aksel boyunca yenilmesi ve kırılan parçaların nispeten birbirine eş boyutlu olabilmesine bağlıdır (Şekil 4.21d). Diğer bir ifade ile, yenilme sonrasında oluşan küçük parça veya parçaların ağırlığının büyük parça ağırlığına oranı  $\geq 0.60$  olmalıdır. Deney esnasında yükleme akseni boyunca oluşmayan yenilme yüzeyleri geçersiz deney olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.21e).

Düzensiz geometrideki örneklerde gerçekleştirilen nokta yükü dayanım deneyinde, konik başlıklar arasındaki numune içinde meydana gelen yük dağılımının ortaya konması ve nokta yükü dayanım değerinin belirlenmesi açısından Eşdeğer Karot Çapı ( $D_e$ , mm) oldukça önemli bir kavramdır.

Yükleme sonucunda meydana gelen gerilme izini (stress path) çevreleyen eşdeğer karot çapı çapsal nokta yükü deneyinde numune çapına eşit kabul edilmektedir (ISRM 1981). Aksel nokta yükü deneylerinde ise eşdeğer karot çapı kavramı yükleme akseni hattında koniye benzeyen bir geometridir. Düzensiz geometrideki balast agregalarında ise eşdeğer karot çapının belirlenmesi numune düzensizliği nedeniyle zor bir iştir. Numune kalınlığının yatay mesafe ile arttığı düşünüldüğünde (Örneğin plaka şekilli bir agregada) eş değer karot çapı yanal olarak şişkin bir koni olarak düşünülebilir.

Bu açıdan Thuro (2010) yaptığı çalışmalarda düzensiz örneklerdeki eşdeğer karot çapının gerek hesaplama yöntemine getirdiği kolaylık, gerekse sonuçlarının tutarlılığı göz önünde bulundurulduğunda yenilme yüzey alanının bir dikdörtgen olarak düşünülebileceğini ifade etmiştir.

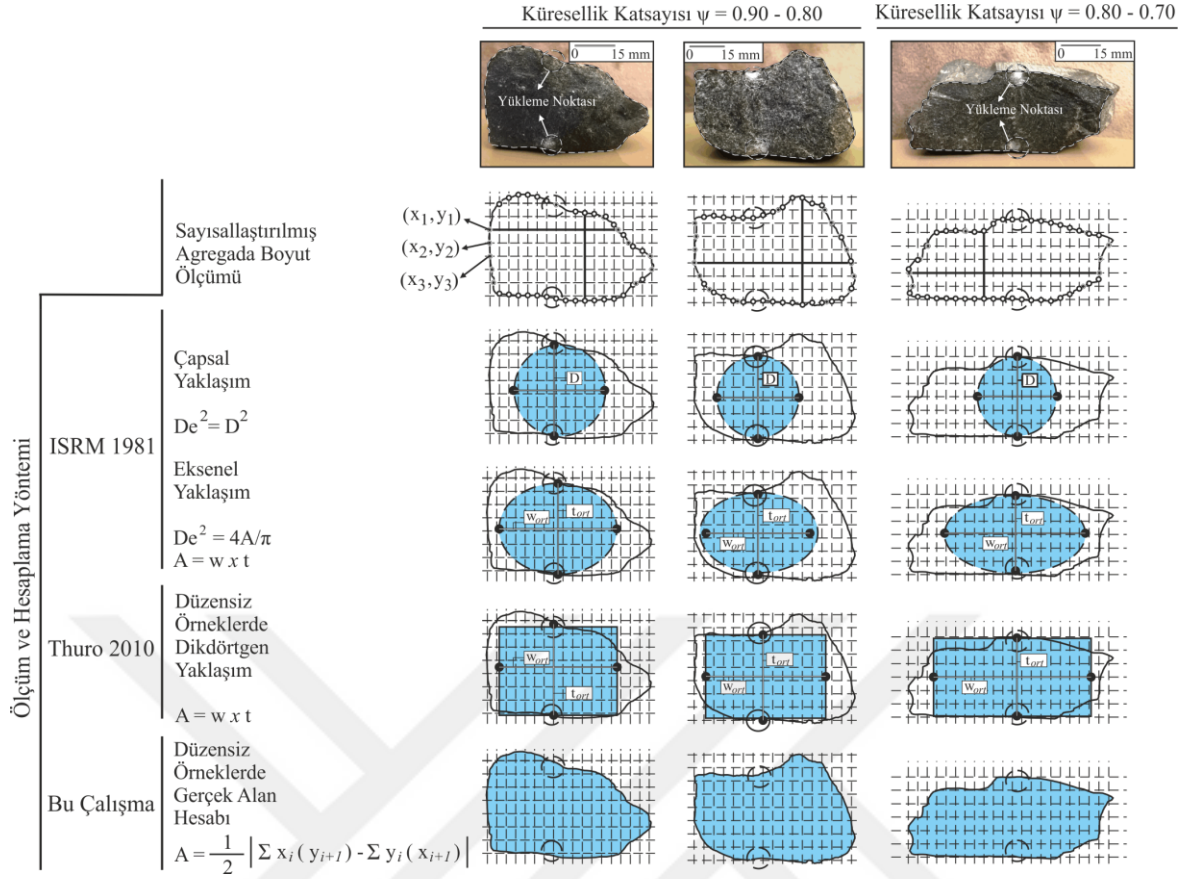


Düzensiz örneklerde eşdeğer karot çapının ISRM (1981) tarafından önerilen hesaplama yöntemi, Thuro (2010) tarafından önerilen dikdörtgen alan yaklaşımı dışında, bu çalışmada düzensiz örneklerde eşdeğer karot çapı, yenilmiş balast agregası yüzeyinin sık noktalar ile tanımlanması hususuyla sayısallaştırılması ve "Poligon Yöntemi" ile gerçek yüzey alanının ( $A$ ,  $\text{mm}^2$ ) belirlenmesi ile araştırılmıştır. Bu işlem, agregası sınırlarının belirli aralıklarla noktalar şeklinde ifade edilmesi ve her bir noktanın kendine özgü koordinatlar ( $x_i$ ,  $y_i$ ) ile tanımlanmasına şeklinde ifade edilebilir (Bkz. Şekil 4.22).



**Şekil 4.21** Düzensiz örneklerde aksenal nokta yükü deneyleri (Köken ve Özarslan 2016).

Şekil 4.22'de farklı küresellik katsayılarındaki yenilmiş balast agregası yüzeylerinin sayısallaştırılması ve farklı yaklaşımlara göre nokta yükü deneyinde meydana gelen gerilme alanları (Şekil 4.22'de mavi tarama ile gösterilen bölgeler) gösterilmiştir.

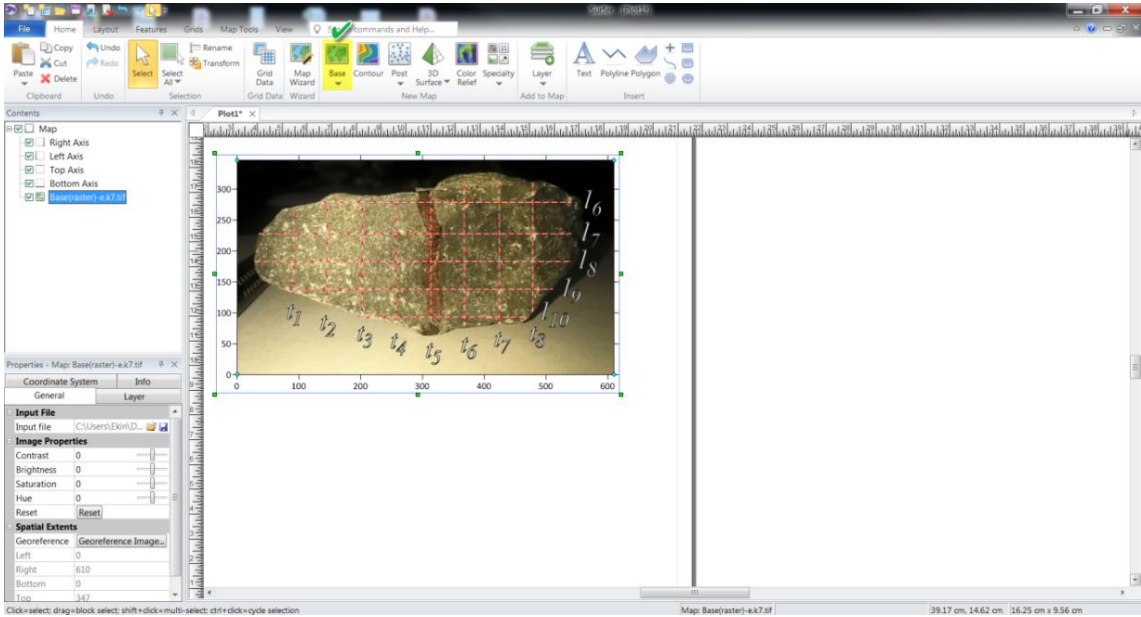


**Şekil 4.22** Düzensiz örneklerde eş değer karot çapının belirlenmesine ilişkin yaklaşımlar (Köken ve Özarslan 2016).

Farklı yaklaşımlara göre hesaplanan yüzey alanları dikkate alınarak belirlenen nokta yükü dayanım değerleri birbirleri ve düzenli silindirik örneklerden elde edilen dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Gerçek alan yaklaşımı ile yenilme yüzey alanının hesaplanmasına ilişkin bir örnek ayrıntıları ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

- Alt ve üst yüzeyleri taş motoru ile düzeltilmiş bir balast agrega numunesi nokta yükü deneyine tabi tutulur.
- Deney tamamlandıktan sonra yenilme yüzeylerinin her ikisi de bir fırça yardımı ile temizlenir. Birbirine dik iki nokta referans noktası belirlenerek, bu iki nokta silinmez bir kalem ile işaretlenir. İşaretlenen iki nokta arasındaki dik mesafe bir kumpas yardımı ile ölçülür.
- Yenilme yüzeylerine dik bir şekilde konumlandırılan bir fotoğraf makinesi ile yenilme yüzeylerinin fotoğrafları çekilir.

- d) Çekilen fotoğraflar Surfer v15. yazılımına "New base map" komutu ile aktarılır (Şekil 4.23).
- e) Yazılıma aktarılan fotoğrafta yenilme yüzeyinin sınırları görülmektedir. Bu sınırların sayısallaştırma işlemi yazılımdaki "Digitize" komutu ile başlar (Şekil 4.24).
- f) Digitize komutu çalıştıktan sonra, yüzey alanlarına sık noktalar atmak sureti ile bütün yüzey alanı taranarak agrega yüzey alanı sayısallaştırılır (Şekil 4.25).
- g) Digitize komutu çalıştıktan sonra çıkan pencerede sayısallaştırılmış bütün noktalara ait x ve y koordinat değerleri görülecektir. Bu pencere üzerine File → Save as komutları ile veriler .dat uzantılı şekilde kaydedilir.
- h) Daha sonra Surfer programında yeni bir "Worksheet" dosyası açılarak kaydedilen .dat uzantılı dosya açılır. Açılan dosyada yüzey alanlarına ait koordinatlar görülecektir.
- i) Daha önce açılan Worksheet dosyasında iki kolon şeklinde gözükken veriler Microsoft Excel veya başka veri analizi programlarına aktarılarak bu koordinatlar hesaplamaya hazır hale getirilir (Şekil 4.26).
- j) Sayısallaştırılmış koordinatlar kullanılarak yazılımda tanımlanan yenilme yüzeyine ait alan  $A = \frac{1}{2} \left| \sum x_i (y_i + 1) - \sum y_i (x_i + 1) \right|$  eşitliği ile belirlenir.
- k) Hesaplanan yüzey alanı yazılımdaki koordinat sistemine göre belirlenmiştir. Bu sebepten bu alanın birimi  $br^2$  olarak tanımlanır.



Şekil 4.23 New base map komutu ile çekilen fotoğrafın yazılıma aktarılması.

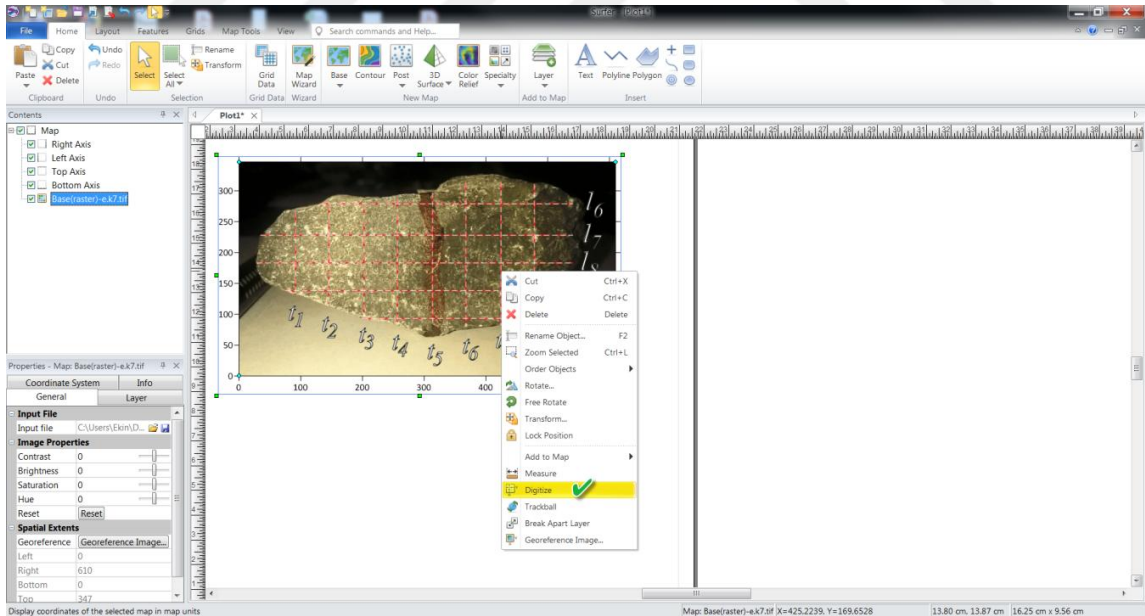
l) Daha önce gerçek uzunluğu kumpas ile ölçülmüş iki referans noktası yazılımda "Measure" komutu ile ölçülerek, yazılımdaki alan değeri ile gerçek alan değeri arasındaki ilişki tespit edilir (Şekil 4.27). Şekil 4.27'de iki referans noktası arasındaki uzunluk gerçekte 75 mm, yazılım üzerinde ise 508.81 br olarak belirlenmiştir. Öyleyse yazılım üzerindeki 1 br gerçekte 0.147 mm olarak ifade edilmektedir.

m) Bu şartlar altında 1 br<sup>2</sup>'lik alan gerçekte 0.0217 mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Yukarıda ifade edilen denklemden (j maddesindeki denklem) elde edilen yazılım alan değerinin 0.0217 değerinin çarpılması ile yenilme yüzeyine gerçek alan değeri elde edilir. Yukarıdaki işlemlerin tamamlanması ile bu örnek için gerçek yenilme yüzey alanı

$$A = 100730br^2 \times 0.0217 \frac{mm^2}{br^2} = 2188.62mm^2 \text{ olarak hesaplanmış olup, bu numuneye}$$

ait eş değer karot çapı  $De = \sqrt{2188.62} = 46.78mm$  olarak hesaplanır.

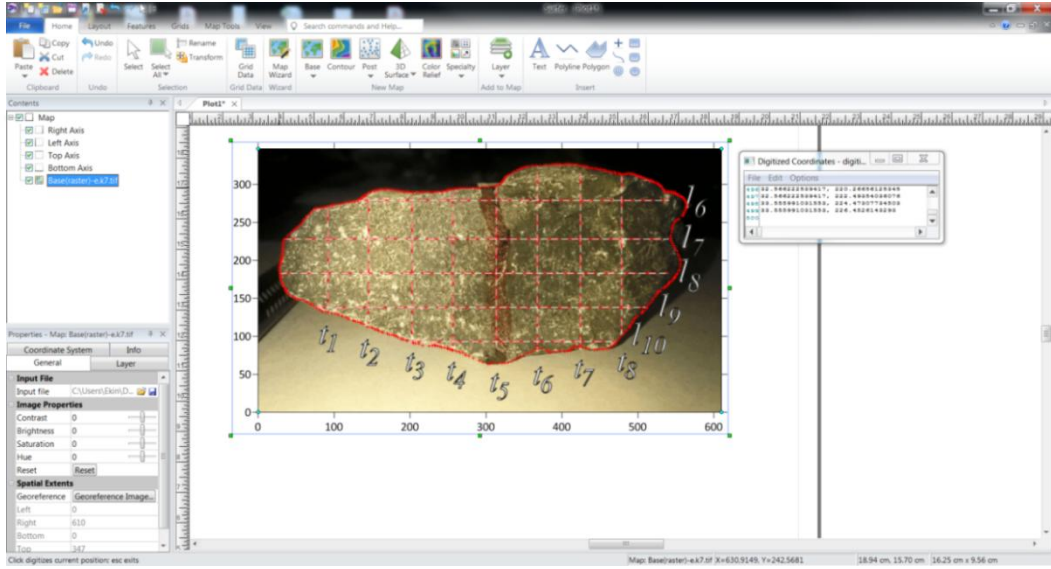
n) Bir yüzey alanı için tekrarlanan işlem ikinci yenilme yüzey alanı için de tekrar edilir. Elde edilen iki yenilme yüzey alanının ortalaması söz konusu numuneye ait gerçek yüzey alanı olarak kabul edilerek, numuneye ait nokta yükü dayanımı Eşitlik 4.2 kullanılarak belirlenir.



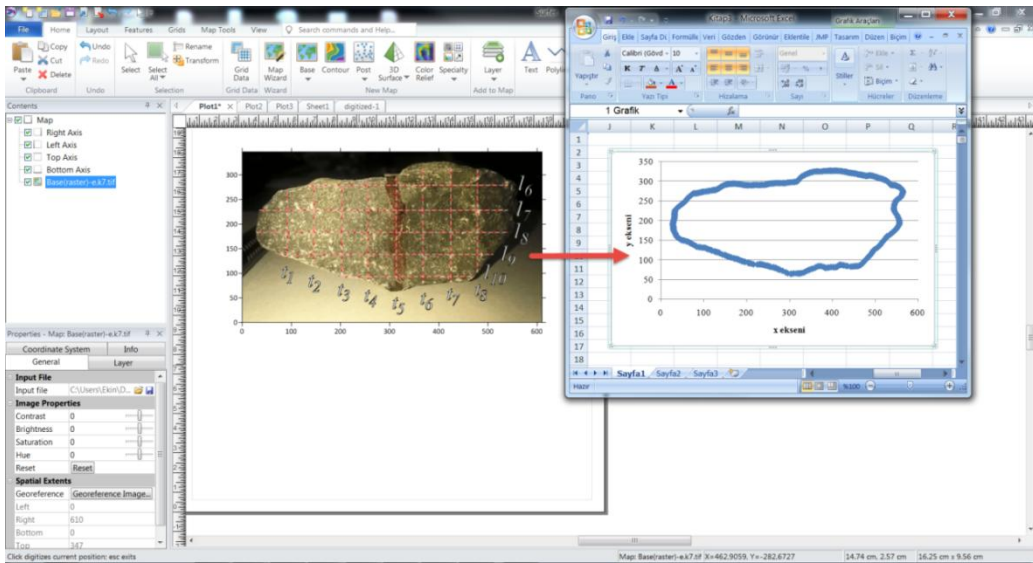
Şekil 4.24 Digitize komutu ile yüzey alanının sayısallaştırılması.

Böylece Şekil 4.20'de ifade edilen eş değer karot çapının hesaplanmasına ilişkin çalışmada kullanılan bütün yöntemler ifade edilmiş olup, sözü edilen 4 farklı yöntemle göre nokta yükü dayanım indeksi değerleri hesaplanmıştır.

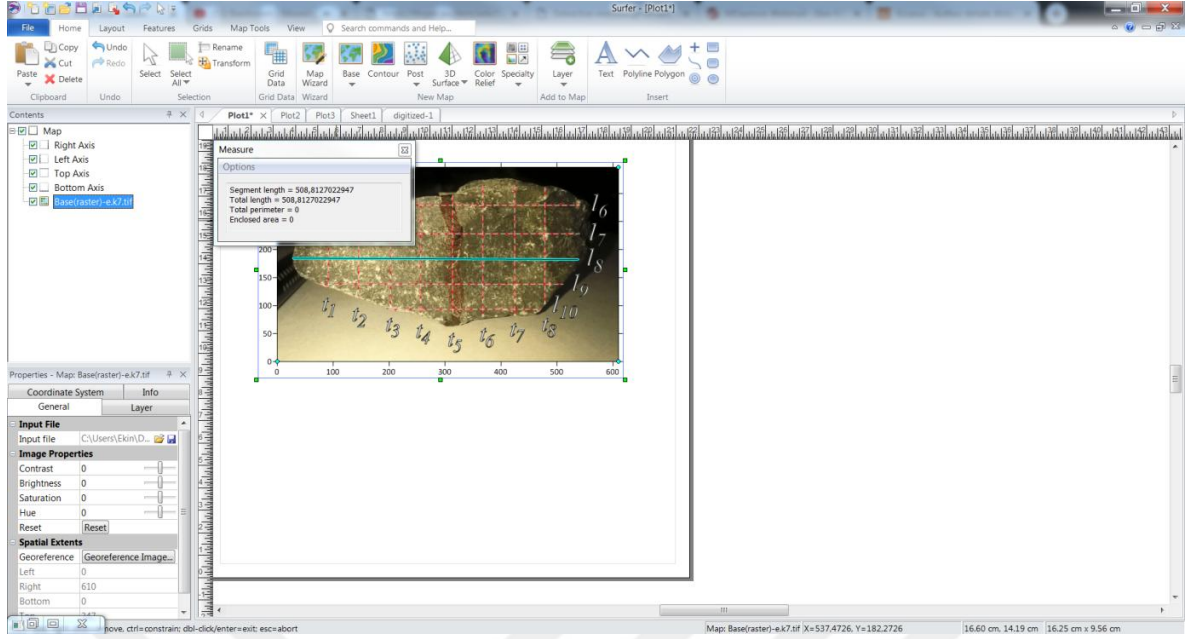
Düzensiz örneklerde gerçekleştirilen nokta yükü dayanım değerleri için, küresellik katsayısı gözlemlenmeden çapsal yaklaşıma göre hesaplanan nokta yükü dayanım değerlerinin diğer yaklaşımlardan elde edilen değerlerden yaklaşık %50 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Düzensiz örneklerde aksel yaklaşım, dikdörtgen yaklaşım ve bu çalışmada önerilen gerçek alan yaklaşımından elde edilen değerler karşılaştırıldığında,  $\psi \geq 0.90$  koşulunda düzensiz örneklerde aksel yaklaşım ve dikdörtgen yaklaşımdan elde edilen değerlerin nispeten benzer olduğu, gerçek alan yaklaşımından elde edilen değerlerin ise bu değerlerden ortalama % 10 daha düşük olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.14).



Şekil 4.25 Yenilme yüzey alanının sayısallaştırılması.



Şekil 4.26 Sayısallaştırılmış koordinatların Microsoft Excel programına aktarılması.



Şekil 4.27 Yazılım üzerindeki referans noktaları arasındaki uzunluğun "Measure" komutu ile belirlenmesi.

Çizelge 4.14 Düzensiz örneklerde hesaplanan nokta yükü dayanım değerleri.

(a) Düzensiz örneklerde eksenel yaklaşım (ISRM 1981)							
İlca bazaltik kayaçları				Kayadibi ultra-bazik kayaçları			
$I_{s50}$ (MPa)	$\psi$ (0.7 – 0.8)	$\psi$ (0.8 – 0.9)	$\psi$ (> 0.9)	$I_{s50}$ (MPa)	$\psi$ (0.7 – 0.8)	$\psi$ (0.8 – 0.9)	$\psi$ (> 0.9)
$\bar{x}$	7.44	8.21	9.98	$\bar{x}$	10.14	10.25	11.45
s.s	0.78	1.66	1.53	s.s	0.69	1.75	1.04
n	8	32	30	n	11	19	32

(b) Düzensiz örneklerde dikdörtgen yaklaşım (Thuro 2010)							
İlca bazaltik kayaçları				Kayadibi ultra-bazik kayaçları			
$I_{s50}$ (MPa)	$\psi$ (0.7 – 0.8)	$\psi$ (0.8 – 0.9)	$\psi$ (> 0.9)	$I_{s50}$ (MPa)	$\psi$ (0.7 – 0.8)	$\psi$ (0.8 – 0.9)	$\psi$ (> 0.9)
$\bar{x}$	7.92	9.40	10.75	$\bar{x}$	10.93	10.87	12.40
s.s	1.27	0.87	0.96	s.s	1.44	0.92	0.55
n	8	32	30	n	11	19	32

(c) Düzensiz örneklerde gerçek alan yaklaşımı (Bu çalışma)							
İlca bazaltik kayaçları				Kayadibi ultra-bazik kayaçları			
$I_{s50}$ (MPa)	$\psi$ (0.7 – 0.8)	$\psi$ (0.8 – 0.9)	$\psi$ (> 0.9)	$I_{s50}$ (MPa)	$\psi$ (0.7 – 0.8)	$\psi$ (0.8 – 0.9)	$\psi$ (> 0.9)
$\bar{x}$	7.16	8.68	9.60	$\bar{x}$	8.85	9.73	10.80
s.s	0.62	1.25	0.72	s.s	0.39	1.53	0.84
n	8	32	30	n	11	19	32

Sonuç olarak, balast agregasında küresellik katsayısındaki artışın nokta yükü dayanımı değerinde artışa yol açtığı, düzenli silindirik aksenal nokta yükü dayanımı değerleri ile en uyumlu değerlerin  $\psi \geq 0.90$  şekilsel özelliğine sahip balast agregaları için Thuro (2010) tarafından önerilen dikdörtgen alan yaklaşımından elde edildiği belirlenmiştir. Silindirik örneklerden elde edilen ortalama  $I_{s50}$  değeri ise düzensiz örneklerde gerçek alan yaklaşımından elde edilen  $I_{s50}$  değerinden ortalama %10 – %15 daha yüksektir.

Bu bulgular ışığında, yukarıda ifade edilen metodoloji kullanılarak, balast agregasının yerindeki dayanımının kestirilmesi için nokta yükü deneyi kullanılabilir. Ancak arazi deneyleri esnasında gerçek yüzey alanının belirlenmesi güç olabilir. Bu nedenle nokta yükü dayanım değerinin hesaplanmasında Thuro (2010) tarafından önerilen dikdörtgen alan yaklaşımı benimsenebilir. Nokta yükü dayanım deneyinde gerçekleştirilen aksenal yüklemenin düzgün bir şekilde gerçekleşmesi için taş motoru ile yükleme temas noktaları düzgün bir hale getirilmiş ve dayanım hesaplamalarında 50 mm düzeltmesi göz önünde bulundurulmuştur. Bu düzenlemelere rağmen, farklı şekilsel özelliklere sahip balast agregalarında gerçekleştirilen nokta yükü dayanım değerleri birbirinden farklı çıkmıştır.

Bu anlamda farklı küresellik katsayılarındaki düzensiz örneklerde nokta yükü deney sayısının artırılması ve düzensiz örneklerde nokta yükü dayanım değerinin hesaplanmasında eş değer karot çapı kavramının sayısal analiz yöntemleri ile araştırılması dikkate değer bir çalışma araştırma alanı olarak düşünülebilir.

#### **4.3.1.4. Dolaylı çekme dayanımı**

Dolaylı çekme dayanımı deneyleri ISRM (1981) tarafından önerilen yöntem göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.28). Dolaylı çekme dayanım deneyleri numune geometrik özellikleri  $D / H \leq 0.5$  olan disk numuneler hazırlanmış olup, dolaylı çekme dayanımı Eşitlik 4.7 kullanılarak belirlenmiştir. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kayaçların dolaylı çekme dayanım deney sonuçları ise Çizelge 4.15'te verilmiştir.

$$\sigma_{tB} = \frac{2F}{\pi DH} \quad (4.7)$$

Burada: F yenilme yükü (N), D numune çapı (mm) ve H ise numune kalınlığı (mm) olarak ifade edilmektedir.



**Şekil 4.28** Dolaylı çekme dayanım deneyi.

Çizelge 4.15'e göre Ilıca bazaltik kayaçları için ilerleyen ayrışma bozunma derecesi ile,  $W_0$  tip kaya külesinden  $W_3$  tip kaya külesine geçerken  $\sigma_{tB}$  değeri ortalama %88 oranında azalırken, Kayadibi ultra-bazik kayaçları için bu azalma oranı ortalama %72 civarındadır.

**Çizelge 4.15** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin dolaylı çekme dayanım değerleri.

Ilıca bazaltik kayaçları					Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
$\sigma_{tB}$ (MPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$\sigma_{tB}$ (MPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	15.27	9.94	4.78	1.81	$\bar{x}$	20.25	17.92	9.30	5.61
s.s	1.70	1.29	0.58	0.83	s.s	1.51	2.58	1.55	1.20
n	8	9	6	6	n	11	10	10	7

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  
 $\sigma_{tB}$  : Dolaylı çekme dayanımı

#### 4.3.1.5. Tek eksenli basınç dayanımı

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi ISRM (1981) tarafından önerilen geometrik koşullar ve deney yöntemleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.29). Gerçekleştirilen deneylerde numune geometrik özelliği  $L / D$  oranı 2.5 – 3 arasında olup, deneylerde yükleme hızı 0.5 – 1.0 MPa/s olacak şekilde kaya malzemelerinde yenilme gerçekleşmiştir.





**Şekil 4.29** Tek eksenli basınç dayanımı deneyi.

Farklı ayrışma – bozunma derecelerine ait kayaçların tek eksenli basınç dayanımı Eşitlik 4.8 ile belirlenmiş olup, deney sonuçları Çizelge 4.16'da toplu olarak verilmiştir.

$$\sigma_{ci} = \frac{F}{A} \quad (4.8)$$

Burada: F yenilme yükü (N), A ise eksenel yüklemenin yapıldığı yüzey alanı (mm<sup>2</sup>) olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 4.16'ya göre incelenen W<sub>0</sub> tip kayaçların her ikisi de ISRM (1981)'e göre "Yüksek dayanımlı" kayaç sınıfında yer almaktadır. Ayrıca, ilerleyen ayrışma – bozunma ile, W<sub>0</sub> tip kaya külesinden W<sub>3</sub> tip kaya külesine geçerken Ilıca bölgesi bazaltik kayaçlarında  $\sigma_{ci}$  değeri ortalama %54 oranında azalırken, aynı azalma oranı Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ortalama %56 civarındadır.

İlerleyen ayrışma – bozunma ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımındaki azalma ile arazi çalışmalarında elde edilen R<sub>1</sub> değerindeki azalmalar benzerlikler göstermektedir. Bu açıdan söz konusu bu iki değiştirge arasındaki anlamlı ilişkiler saha çalışmalarında farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinin dayanımlarının kestirimi adına fayda sağlayabilir.

Benzer şekilde ilerleyen – ayrışma bozunma ile eksenel nokta yükü dayanımındaki azalma da bu açıdan değerlendirilebilir. Ancak söz konusu bu benzerlikler (ilerleyen ayrışma – bozunma ile gözlenen dayanım azalması ve Schmidt çekici geri sıçrama sayısındaki azalmalar) kayaların dayanım değerlerinin tasarım aşamasında kullanılabileceği anlamına gelmeyebilir. Söz konusu kestirimler sadece farklı yapısal bölgelerin ayırtlanması ve kayaların dayanım sınıflarının kabaca tahmin edilmesi açısından değerlendirilmelidir.

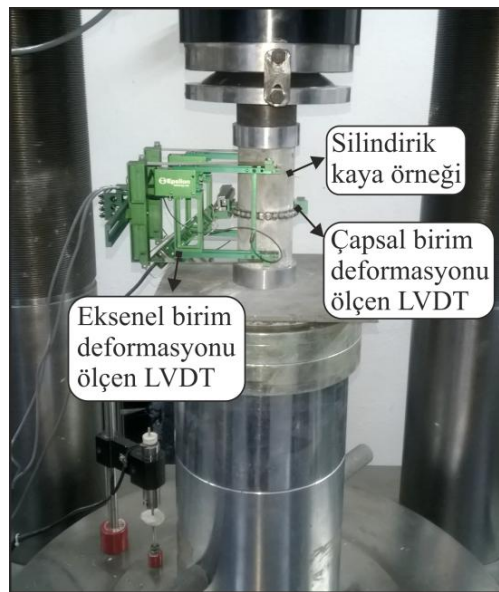
**Çizelge 4.16** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri.

Ilica bazaltik kayaları					Kayadibi ultra-bazik kayaları				
$\sigma_{ci}$ (MPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	143.66	120.44	82.57	66.74	$\bar{x}$	188.29	153.47	93.30	82.10
s.s	15.26	8.62	6.46	5.76	s.s	21.18	14.34	18.14	20.50
n	10	7	5	6	n	7	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  
 $\sigma_{ci}$  : Tek eksenli basınç dayanımı

#### 4.3.1.6. Statik elastik sabitler

Farklı ayrışma – bozunma içeren kaya malzemelerine ait teğetsel Young modülü, ( $E_{ti}$ , GPa) ve teğetsel Poisson Oranı ( $\nu_{ti}$ ) servo kontrollü katı yükleme makinası kullanılarak belirlenmiştir. Gerilme – birim deformasyon eğrilerinin çıkartılmasında birim deformasyon ölçer olarak LVDT (Linear Variable Differential Transformer) kullanılmıştır (Şekil 4.30).



**Şekil 4.30** Statik elastik sabitler deneyi.

Gerçekleştirilen deneylerde Ilıca bazaltik ve Kayadibi ultra-bazik kayalarına ait farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri sırasıyla Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de örnek olarak ifade edilen gerilme – birim deformasyon eğrileri kullanılarak farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kayaların teğetsel Young Modülü ve teğetsel Poisson Oranı sırasıyla Eşitlik 4.9 ve Eşitlik 4.10 kullanılarak belirlenmiştir.

$$E_{ii} = \frac{\sigma_{z50}}{\varepsilon_{z50}} \quad (4.9)$$

Burada:  $\sigma_{z50}$  kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımının yarısını (MPa),  $\varepsilon_{z50}$  ise kayacın tek eksenli basınç dayanımının yarısına denk gelen eksenel birim deformasyon olarak tanımlanmaktadır.

$$\nu_{ii} = -\frac{\varepsilon_{a50}}{\varepsilon_{z50}} \quad (4.10)$$

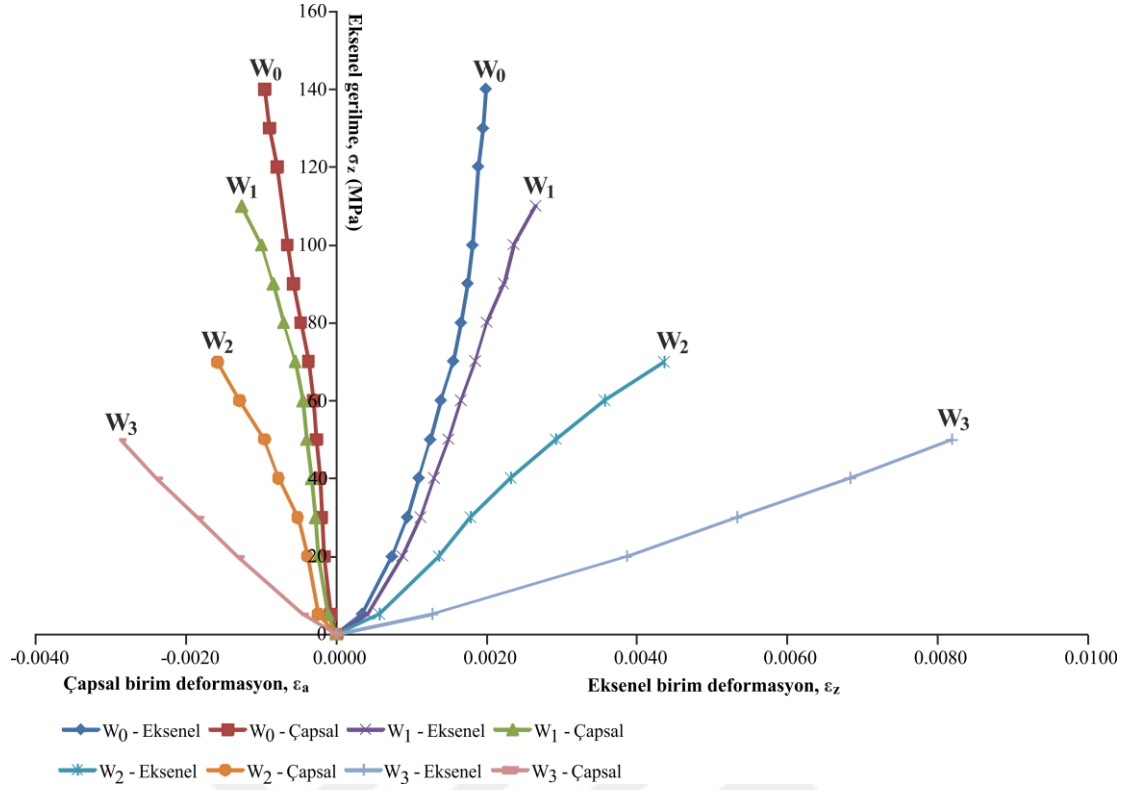
Burada:  $\varepsilon_{a50}$  kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımının yarısına denk gelen çapsal birim deformasyon,  $\varepsilon_{z50}$  ise kayacın tek eksenli basınç dayanımının yarısına denk gelen eksenel birim deformasyon olarak tanımlanmaktadır.

Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kayaların Teğetsel Young Modülü değerleri Çizelge 4.17'de, Poisson Oranı değerleri ise Çizelge 4.18'de verilmiştir. Ilıca bölgesi bazaltik kayaları için  $W_0$  tip kaya türünden  $W_3$  tip kaya türüne geçerken  $E_{ii}$  değeri ortalama %89 azalırken, aynı azalma oranı Kayadibi ultra-bazik kayaları için ortalama %78 civarındadır.

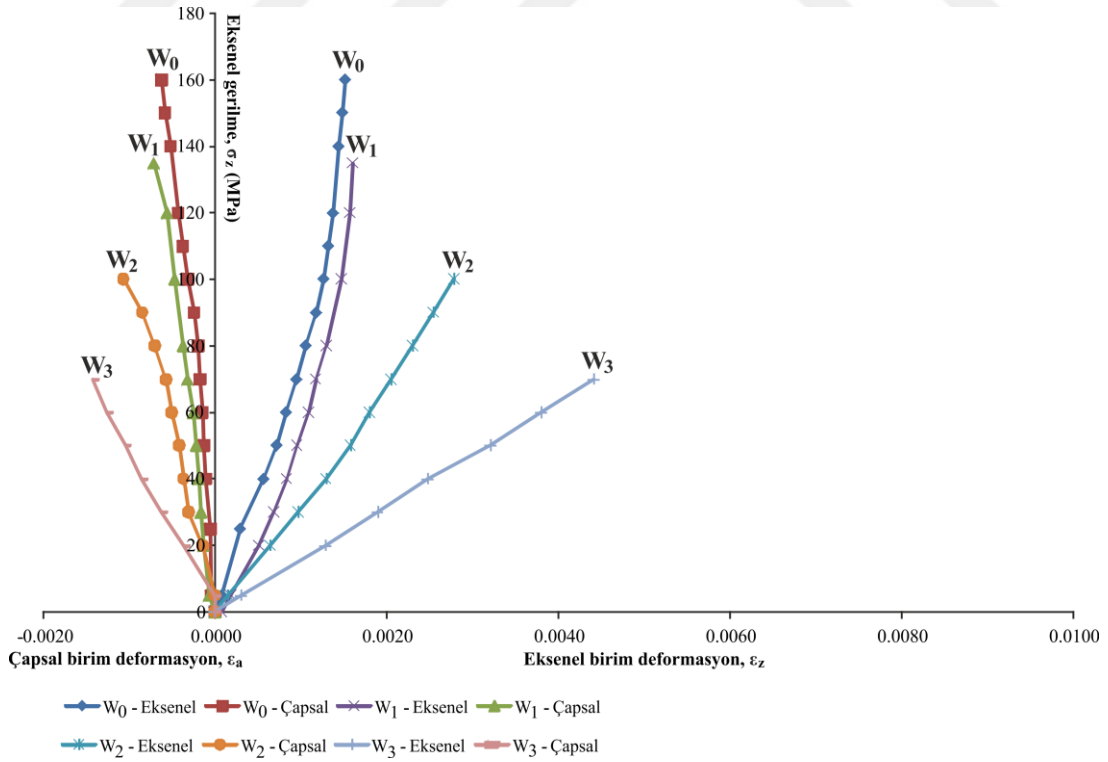
**Çizelge 4.17** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin Teğetsel Young Modülü değerleri.

Ilıca bazaltik kayaları					Kayadibi ultra-bazik kayaları				
$E_{ii}$ (GPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$E_{ii}$ (GPa)	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	50.32	37.58	16.43	5.69	$\bar{x}$	70.98	59.21	33.26	15.75
s.s	4.88	2.89	0.98	1.20	s.s	3.75	9.38	2.72	3.81
n	5	5	5	5	n	5	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  
 $E_{ii}$  : Teğetsel Young Modülü



Şekil 4.31 Farklı ayrışma bozunma derecelerindeki Ilıca bazaltik kayaların ait tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri.



Şekil 4.32 Farklı ayrışma bozunma derecelerindeki Kayadibi ultra-bazaltik kayaların ait tipik gerilme – birim deformasyon eğrileri.

**Çizelge 4.18** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerinin teğetsel Poisson Oranı değerleri.

Ilıca bazaltik kayaçları					Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
$v_{ti} (-)$	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$v_{ti} (-)$	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
$\bar{x}$	0.21	0.24	0.28	0.30	$\bar{x}$	0.17	0.23	0.25	0.32
s.s	0.03	0.03	0.02	0.01	s.s	0.04	0.04	0.02	0.03
n	5	5	5	5	n	5	5	5	5

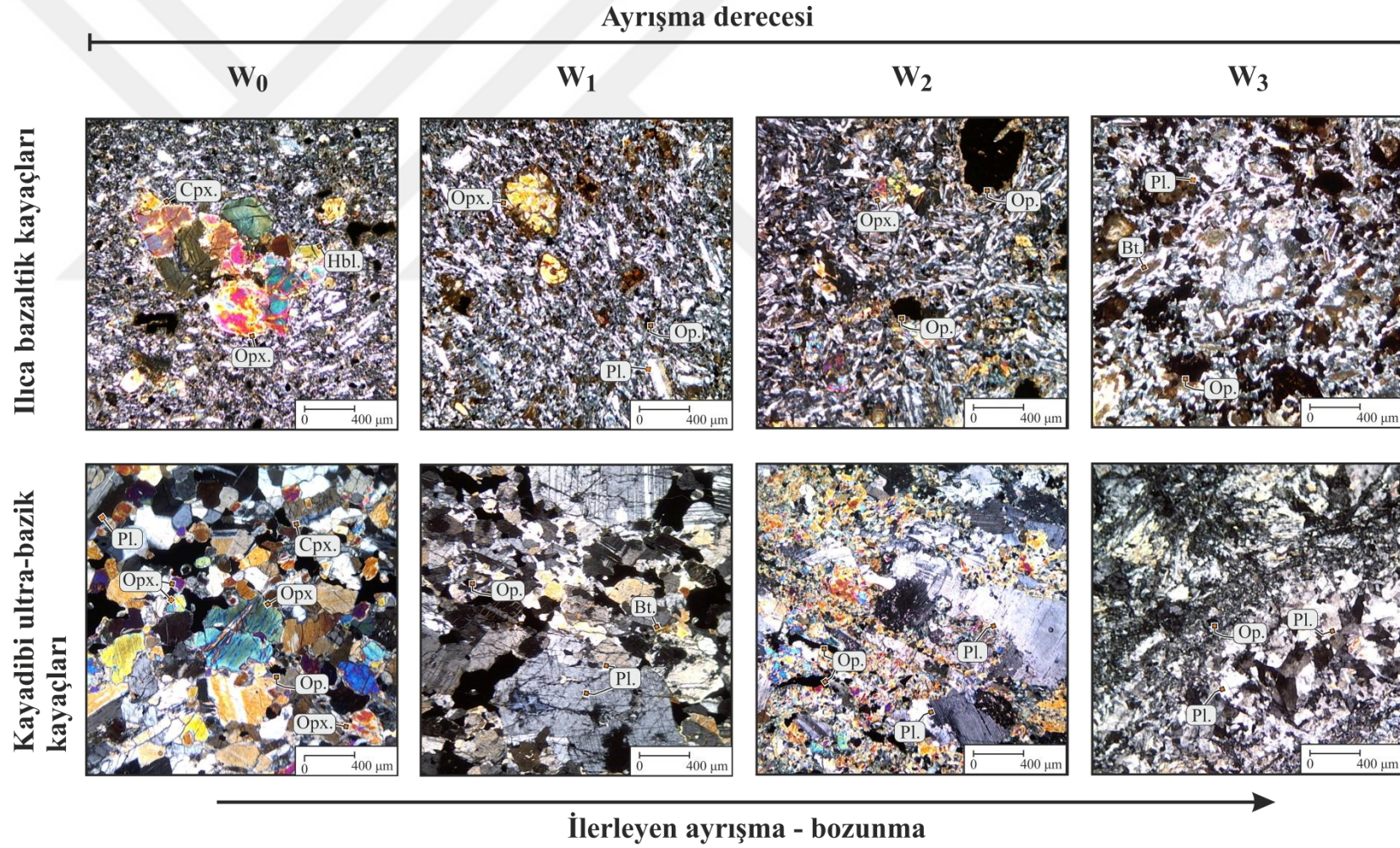
Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  
 $v_{ti}$  : Teğetsel Poisson Oranı

### 4.3.2 Mineralojik ve petrografik özellikler

Farklı ayrışma – bozunma içeren bütün birimlerden ince kesitler hazırlanmış ve ince kesit görüntüleri Leica DM-750P marka polarize bir mikroskop ile Logitech C910 marka bir kamera kullanılarak elde edilmiştir. İlıca bölgesi bazaltik kayaçları ile Kayadibi ultrabazik kayaçlarına ait ince kesit görüntüleri Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekil 4.33'e göre kayaçlarda ilerleyen ayrışma-bozunmanın kayacın dokusunda önemli değişimler olduğu görülmektedir.

İlıca bölgesi bazaltik kayaçları hiyalopilitik dokuda ve fenokristaller hamur fazında yüzüyor şeklinde gözlenmektedir. Söz konusu hiyalopilitik doku ilerleyen ayrışma – bozunma ile kısmen kaybolursa da, yine de tanımlanabilmektedir. Kayadibi ultra-bazik kayaçları ise poikilitik dokudadır. Bu doku tipine sahip kayaçlarda fenokristaller daha küçük kristalli nispeten prizmatik yapıdaki mineraller tarafından çevrelenmektedir. Özellikle araştırma konusu kayaçların her ikisinin ince kesitlerde de ilerleyen ayrışma – bozunma ile serisitleşme, opasitleşme, kloritleşme, limonitleşme ve killeşme gözlenmektedir.

Ayrıca ilerleyen ayrışma – bozunma ile özellikle Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında  $W_0$  tipten  $W_3$  tipe geçerken kayaçların tane boyutlarında nispeten bir azalma gözlenmiştir.  $W_1$  ve  $W_2$  tip kayaçlar için kayaç yapıcı minerallerde (özellikle playijoklas ve piroksenlerde) dilinimler boyunca gelişmiş güzel mikro çatlakların varlığından söz edilebilir. İlıca bazaltik kayaçlarında ise ilerleyen ayrışma – bozunma genelde killeşme ve opasitleşme şeklindedir. Killeşme özellikle  $W_2$  ve  $W_3$  tip kayaçlarda mikro çatlaklar boyunca, opasitleşme ise çoğunlukla piroksen ve hornblendlerde gözlenmektedir. İnce kesit araştırmalarında diğer dikkate değer bulgu ise kayaçlarda ortalama tane boyutundaki azalmadır.



Pl. : Plajiyoklas    Opx.: Orto-piroksen    Cpx. : Klino-piroksen  
 Hbl.: Hornblend    Bt. : Biyotit            Op. : Opak mineral (Manyetit, Rutil)

**Şekil 4.33** Farklı ayrışma bozunma derecelerindeki kayaların ince kesit görüntüleri.

W<sub>0</sub> tip kayaçlarda gerçekleştirilen ince kesit çalışmalarında kayaçlarda gözlenen mineraller yüzdesel olarak Çizelge 4.19'da verilmiştir. Gerçekleştirilen ince kesit çalışmalarına göre Ilıca bölgesi bazaltik kayaçlarının tane boyutu 10 – 500 µm arasında değişmektedir. Diğer taraftan Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının tane boyutu ise 80 – 2000 µm arasındadır. Bu açıdan bu kayaçlar tane boyutu açısından ince taneli ve iri taneli bazaltik kayaçlar olarak tanımlanabilir.

**Çizelge 4.19** W<sub>0</sub> tip kayaçlarda gözlenen minerallerin yüzdesel dağılımı (Köken vd. 2018).

Mineral	Ilıca bazaltik kayaçları	Kayadibi ultra-bazik kayaçları
Plajiyoklas	44	62
Piroksen (Opx+Cpx)	12	15
Olivin	2	3
Hornblend	10	5
Biyotit	6	2
Muskovit	1	–
Epidot	1	1
Gedrit	2	–
Opak mineral (Manyetit, rutil)	7	10
Hamur fazı (volkanik cam)	15	2
Toplam	100	100

Kayaçlara ait petrografik analizler ALS laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Her bir ayrışma – bozunma derecesinden en az 2 adet toplamda ise 24 adet kimyasal analiz yaptırılmıştır. Ana oksitlerinde belirlenmesinde ICP metodu kullanılmış olup, kimyasal analizi yaptırılan numune kodları ve ayrışma dereceleri Çizelge 4.20'de verilmiş olup, bu numunelere ait analiz sonuçları Ek Açıklamalar bölümünde verilmiştir.

Farklı ayrışma – bozunma içeren kayaçlara ait tipik ana oksit elementlerinin niceliksel bollukları Çizelge 4.21'de verilmiştir. Çizelge 4.21'deki değerler incelendiğinde ilerleyen ayrışma – bozunma ile LOI değerleri artmaktadır. ALS laboratuvarlarına yaptırılan bu analizler ile Çizelge 4.12'deki LOI değerleri karşılaştırıldığında, sonuçların uyum içinde olduğu görülmektedir. LOI değeri dışında ayrışma – bozunma ile MgO değerinin nispeten azaldığı söylenebilir. Diğer taraftan ayrışma – bozunma ile diğer ana oksit değerlerinde anlamlı değişimler gözlenmemektedir. Bu açıdan ayrışma – bozunma derecesinin sağlıklı bir şekilde ayırt edilebilmesi için LOI değerleri güvenilir bir şekilde kullanılabilir.

**Çizelge 4.20** Kimyasal analizlerde kullanılan numune kodları ve ayrışma dereceleri.

Ilica bazaltik kayalar		Kayadibi ultra-bazik kayalar	
Numune Kodu	Ayrışma Derecesi	Numune Kodu	Ayrışma Derecesi
4B	W <sub>0</sub>	KW <sub>0</sub>	W <sub>0</sub>
4C	W <sub>0</sub>	KW <sub>9</sub>	W <sub>0</sub>
4E	W <sub>1</sub>	KW <sub>5</sub>	W <sub>1</sub>
5A	W <sub>1</sub>	KW <sub>8</sub>	W <sub>1</sub>
2A	W <sub>2</sub>	KW <sub>10</sub>	W <sub>1</sub>
2B	W <sub>2</sub>	KS <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>
2D	W <sub>2</sub>	KS <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>
5H	W <sub>2</sub>	KS <sub>4</sub>	W <sub>2</sub>
3C	W <sub>3</sub>	KW <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>
3D	W <sub>3</sub>	K3	W <sub>3</sub>
3E	W <sub>3</sub>	K5	W <sub>3</sub>
5B	W <sub>3</sub>	K6	W <sub>3</sub>

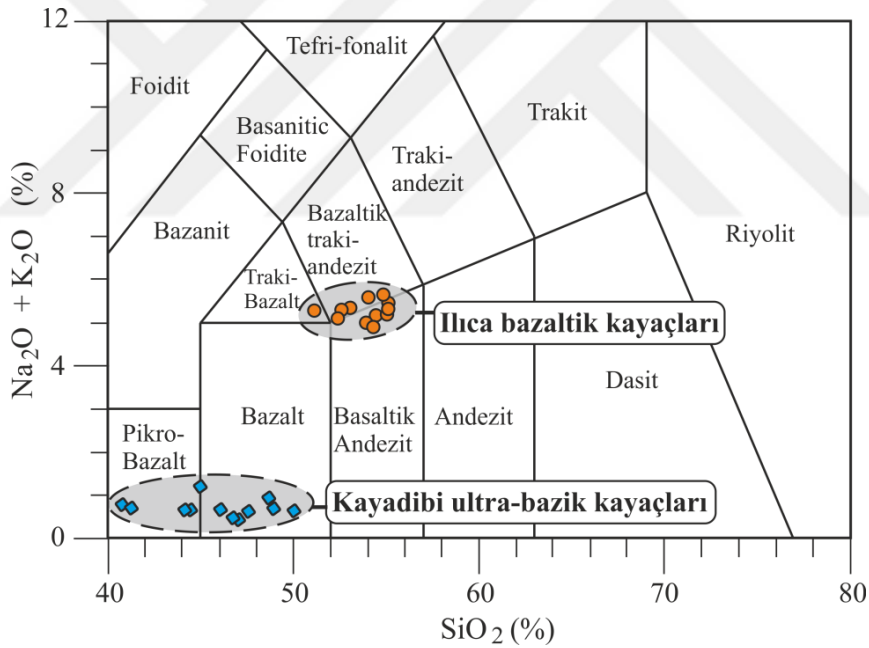
**Çizelge 4.21** Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kayalara ait tipik ana oksit element içerikleri.

Parametre	Birim	Ilica bazaltik kayalar				Kayadibi ultra-bazik kayalar			
		Örnek Kodu				Örnek Kodu			
		4C	4E	2A	3D	KW <sub>9</sub>	KS <sub>1</sub>	KW <sub>2</sub>	K <sub>5</sub>
		(W <sub>0</sub> )	(W <sub>1</sub> )	(W <sub>2</sub> )	(W <sub>3</sub> )	(W <sub>0</sub> )	(W <sub>1</sub> )	(W <sub>2</sub> )	(W <sub>3</sub> )
SiO <sub>2</sub>	%	54.10	54.10	52.90	55.60	46.30	48.50	44.00	49.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	16.20	16.05	16.80	16.95	16.90	20.30	12.80	16.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	7.42	7.81	6.44	7.52	11.85	7.07	8.74	6.95
CaO	%	8.08	8.04	9.62	7.04	13.25	15.60	13.10	12.00
MgO	%	4.73	4.75	1.49	0.97	10.05	7.58	16.60	8.86
Na <sub>2</sub> O	%	2.88	2.88	3.09	2.92	0.48	0.81	0.55	0.35
K <sub>2</sub> O	%	2.19	2.11	2.36	2.49	0.02	0.07	0.01	0.24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.11	0.02
TiO <sub>2</sub>	%	0.93	0.95	0.95	0.98	0.25	0.13	0.07	0.08
MnO	%	0.12	0.10	0.13	0.03	0.17	0.14	0.13	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.25	0.27	0.27	0.29	< 0.01	0.02	0.01	< 0.01
SrO	%	0.09	0.10	0.10	0.09	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01
BaO	%	0.13	0.13	0.16	0.14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01
<b>LOI</b>	<b>%</b>	<b>1.34</b>	<b>1.74</b>	<b>5.09</b>	<b>5.97</b>	<b>0.24</b>	<b>1.06</b>	<b>4.10</b>	<b>7.64</b>
Total	%	98.48	99.04	99.42	101.0	99.52	101.32	100.22	101.78



Çizelge 4.21'deki bazı verilerin kullanılması ile ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ) araştırma konusu olan kayaların jeokimyasal adlamaları Le-maitre vd. 2002'ye göre yapılmış olup, Le-maitre toplam alkali – silis diyagramı (TAS diyagramı) Şekil 4.34'te verilmiştir. Şekil 4.34'e göre, Ilıca bazaltik kayaları Le-maitre vd. (2002)'ye göre "*Bazaltik Andezit*", "*Traki-bazalt*" ve "*Bazaltik Traki-andezit*", Kayadibi ultra-bazik kayaları ise "*Bazalt*" ve "*Pikro-Bazalt*" olarak tanımlanmıştır.

İlerleyen ayrışma – bozunma ile kayaların yapısal ve dokusal özelliklerinde ciddi değişimler olduğu belirlenmiş ve Kayadibi ultra-bazik kayalarında ortalama tane boyutunda azalmalar gözlenmiştir.  $W_0$  tip Kayadibi ultra-bazik kayalarının ortalama tane boyutu  $D_{50}$  600  $\mu\text{m}$  iken,  $W_3$  tip kayalara geçildiğinde  $D_{50}$  100  $\mu\text{m}$  değerine düşmektedir. Ilıca bazaltik kayalarında ise  $W_0$  tip kayalarda  $D_{50}$  50  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiş olup, ilerleyen ayrışma – bozunma ile  $D_{50}$  değerinde ciddi değişimler belirlenememiştir.



Şekil 4.34 İncelenen kayaların toplam alkali – silis diyagramındaki gösterimi.

### 4.3.3. Agrega özellikleri

Bu çalışma kapsamında araştırma konusu olan kayalara ait belirlenen agrega özellikleri, yassılık indeksi ( $I_f$ , %), Los Angeles Aşınma kaybı (LAA, %), magnezyum sülfat don kaybı ( $M_{wl}$ , %),  $S_{20}$  kırılgenlik indeksi, ve Agrega darbe dayanım değerleri (AIV, %) 'dir.

Agrega deneyleri sadece  $W_0$  ve  $W_1$  tip olarak tanımlanan kayalardan üretilen agregalar üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bu özellikler 2 farklı boyut grubu (10 – 14 mm ve 31.5 – 50 mm) için belirlenmiştir.

#### 4.3.3.1. Yassılık indeksi

Yassılık indeksi deneyleri TS EN 933-3 (2012) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yassılık indeksi deneyi banttın akan agregaların yassılık durumunun kestirilmesinde kullanılan önemli bir değiştirge olarak öne çıkmakta ve deneyde uzun şerit elekler kullanılmaktadır (Şekil 4.35). Deneyde farklı tane boyut grubunda iki farklı örnek hazırlanmaktadır. Bunlar 31.5 – 40 mm ve 40 – 50 mm boyutundaki balast agregalarıdır. Her iki boyut grubundaki numunelerden  $5.0 \pm 0.01$  kg toplamda ise  $10.0 \pm 0.02$  kg numune tartılır. 30 – 40 mm boyut grubundaki agregaların yassılık indeksi için 20 mm genişliğinde uzun şerit elekler kullanılırken, 40 – 50 mm boyut grubundaki agregalar için ise 25 mm genişliğindeki uzun şerit elekler kullanılmıştır.



Şekil 4.35  $W_0$  tip balast agregalarında gerçekleştirilen bir yassılık indeksi deneyi.

10 – 14 mm boyut grubundaki agregalardan toplamda  $5.0 \pm 0.01$  kg tartılmış ve yassılık indeks deneyleri için 6.3 mm'lik uzun şerit elek kullanılmıştır. Farklı boyut grubundaki agregaların yassılık indeksi değerleri ( $I_f$ , %) Eşitlik 4.11 kullanılarak belirlenmiştir. Farklı ayırma – bozunma derecesi ve boyut gruplarında gerçekleştirilen yassılık indeksi deney sonuçları Çizelge 4.22'de toplu olarak verilmiştir.

$$I_f = \left( \frac{m_2}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.11)$$

Burada  $m_2$  uzun şerit elekten geçen agrega miktarı (g),  $m_0$  ise deneyde kullanılan toplam agrega miktarı (g) olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 4.22'ye göre Ilıca bazaltik kayalarında 10 – 14 mm boyut grubundaki  $W_0$  tip agregalarda  $I_f$  %3 – %4 arasında, aynı boyut grubu ve ayırışma derecesinde Kayadibi ultra-bazik kayaları için ise  $I_f$  %5 – %7 arasında değişmektedir. 31.5 – 50.0 mm boyut grubunda ise Ilıca bazaltik kayalarında  $W_0$  tip balast agregalarında  $I_f$  %4 – %10, Kayadibi ultra-bazik kayaları için ise  $I_f$  %3 – %11 arasında değişmektedir.  $W_1$  tip balast agregalarından elde edilen  $I_f$  değerleri ise  $W_0$  tipinden elde edilen değerlere benzerlik göstermekte olup, ayırışma – bozunmanın yassılık indeksi arasında herhangi bir ilişki belirlenememiştir.

**Çizelge 4.22** Yassılık indeksi deney sonuçları.

Ilıca bazaltik kayaları ( $W_0$ )				Kayadibi ultra-bazik kayaları ( $W_0$ )			
$I_f$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 40 mm	40 – 50 mm	$I_f$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 40 mm	40 – 50 mm
$\bar{x}$	4.30	5.41	8.66	$\bar{x}$	6.41	3.85	9.18
s.s	0.35	0.86	1.12	s.s	1.34	0.38	1.50
n	5	5	5	n	5	5	5
Ilıca bazaltik kayaları ( $W_1$ )				Kayadibi ultra-bazik kayaları ( $W_1$ )			
$I_f$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 40 mm	40 – 50 mm	$I_f$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 40 mm	40 – 50 mm
$\bar{x}$	5.77	4.85	7.20	$\bar{x}$	4.22	7.30	10.56
s.s	0.88	1.39	1.40	s.s	0.51	1.29	1.84
n	5	5	5	n	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $I_f$  : Yassılık indeksi

#### 4.3.3.2. Los Angeles aşınma kaybı

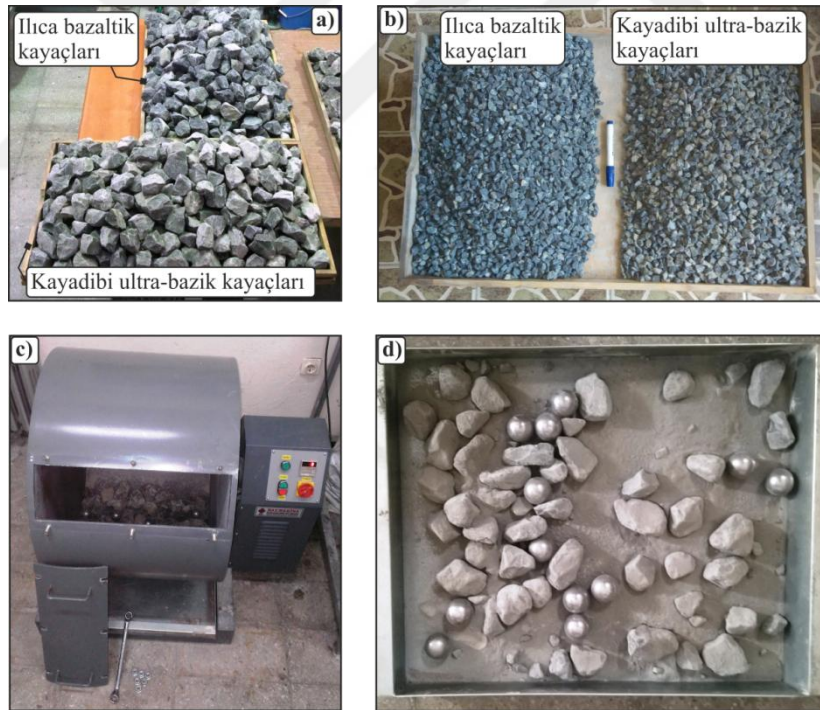
Los Angeles aşınma kaybı deneyleri TS EN 1097-2 (2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 10 mm – 14 mm boyut grubunda gerçekleştirilen Los Angeles aşınma kaybı deneylerinde  $5.0 \pm 0.01$  kg numune ve 11 adet standart çelik bilya kullanılmış olup, Los Angeles tamburu  $33 \pm 1$  devir/dak hızında toplam 500 devir çevrilmiştir.

31.5 mm – 50 mm boyut grubunda gerçekleştirilen deneylerde ise  $10.0 \pm 0.02$  kg numune ve 12 adet standart çelik bilya kullanılmış, tambur yukarıda ifade edilen aynı devir hızında bir deney için toplamda 1000 devir çevrilecek şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan farklı boyut grubundaki numunelerden bazıları ve deneylerde kullanılan Los Angeles aşınma kaybı deney aleti Şekil 4.36'da görülmektedir.

Los Angeles aşınma kaybı (LAA, %) Eşitlik 4.12 kullanılarak belirlenmiş olup, deney sonuçları toplu olarak Çizelge 4.23'te verilmiştir.

$$LAA = \left( \frac{m_3}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.12)$$

Burada:  $m_3$  1.6 mm'lik elekten geçen agrega miktarı (g) ve  $m_0$  ise deneyde kullanılan toplam agrega miktarı (g) olarak tanımlanmaktadır.



**Şekil 4.36** Los Angeles aşınma deneylerinde kullanılan bazı agrega malzemeleri ve kullanılan deney düzeneği a) 31.5 mm – 50 mm boyut grubundaki  $W_0$  tip balast agrega malzemeleri b) 10 mm – 14 mm boyut grubundaki  $W_0$  tip agrega malzemeleri c) Balast agregalarında gerçekleştirilen Los Angeles aşınma deneyi d) Deney sonrası aşınmış ve parçalanmış balast agregaları.

**Çizelge 4.23** Los Angeles aşınma kaybı deney sonuçları.

İlıca bazaltik kayaçları ( $W_0$ )			Kayadibi ultra-bazik kayaçları ( $W_0$ )		
LAA (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	LAA (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm
$\bar{x}$	15.40*	12.72**	$\bar{x}$	14.66	10.91
s.s	1.08	0.96	s.s	0.79	0.33
n	5	5	n	5	5

İlıca bazaltik kayaçları ( $W_1$ )			Kayadibi ultra-bazik kayaçları ( $W_1$ )		
LAA (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	LAA (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm
$\bar{x}$	18.33	16.82	$\bar{x}$	16.28	15.30
s.s	1.24	1.55	s.s	1.60	0.75
n	5	5	n	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, LAA: Los Angeles aşınma kaybı, \* 500 devir sonrası, \*\* 1000 devir sonrası

Çizelge 4.23'teki verilere göre 10 – 14 mm boyut grubundaki  $W_0$  tip agrega malzemeleri için İlıca bazaltik kayaçlarına ait LAA değerleri ortalama %14 – %16 arasında değişmektedir. Aynı boyut grubu için  $W_0$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait LAA değerleri ise %13 – %15 arasındadır. 31.50 – 50 mm boyut grubundaki  $W_0$  tip agrega malzemeleri için ise İlıca bazaltik kayaçlarına ait LAA değerleri ortalama %12 – %14 arasındadır. Aynı boyut grubu için  $W_0$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait LAA değerleri ise ortalama %10 – %11 arasında değişmektedir.

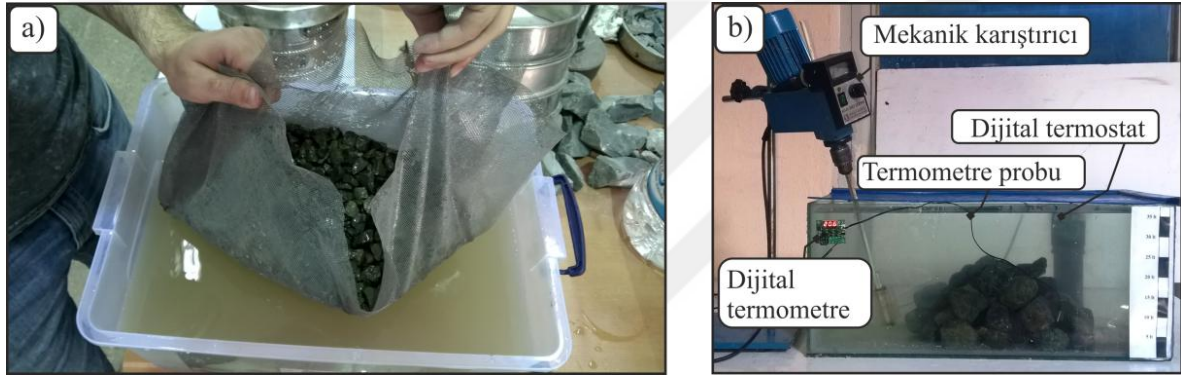
Boyut grubu gözetmeksizin bu kayaçların  $W_1$  tipindeki LAA değerleri ise  $W_0$  tipteki LAA değerlerine göre ortalama %25 daha fazladır. Ayrıca boyut grubundaki artışın LAA değerini nispeten azalttığı söylenebilir. Bunun sebebi tambur içindeki agregaların düşüş yüksekliği, agrega boyutundaki artışın bilyaların agregalar üzerindeki hareket ve etkilerini kısıtlaması şeklinde ifade edilebilir.

#### 4.3.3.3. Magnezyum sülfat don kaybı

Donma – çözünme deneyleri laboratuvar koşullarında iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi donma – çözünme kabini kullanılarak gerçekleştirilen deneylerdir. Genelde zayıf ve gözenekli kayaçlarda anlamlı bir deney olarak öne çıkan bu deney yöntemi, dayanımı yüksek ve gözenekliliği düşük kayaçlar için tercih edilmemektedir.

Magnezyum sülfat don kaybı deneyleri TS EN 1367-2 (2010) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney, belirli bir sıcaklıktaki ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) doymun magnezyum sülfat çözeltisine belirli ağırlıktaki agrega malzemesinin (10 – 14 mm boyut grubu için  $5 \pm 0.01$  kg, 31.5 – 50 mm boyut grubu için  $10 \pm 0.02$  kg) ortalama  $17 \pm 1$  saat boyunca daldırılması ile başlatılır (Şekil 4.37).

Daha sonra çözelti içinde doymunluğa ulaşmış agregalar, 4 – 6 saat boyunca yüzey sularının süzülmesi için bekletilir ve  $24 \pm 1$  saat boyunca  $105^\circ\text{C}$  sıcaklığındaki bir etüvde kurutulur. Etüvde kurutulan numune oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilir. Yukarıda ifade edilen bu süreç bir donma – çözünme döngüsü olarak tanımlanır.



**Şekil 4.37** Magnezyum sülfat don kaybı deneyleri a) 10 mm – 14 mm boyut grubundaki  $W_1$  tip agrega örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen deney b) 31.5 mm – 50 mm boyut grubundaki  $W_1$  tip balast agregası örnekleri kullanılarak gerçekleştirilen deney.

Magnezyum sülfat don kaybı deneyleri, 10 – 14 boyut grubundaki agregalar için toplam 5 döngü, 31.5 – 50 mm boyut grubundaki balast agregalarında ise toplam 10 döngü şeklinde gerçekleştirilmiş olup, 10 – 14 mm boyut grubu için magnezyum sülfat don kaybı ( $M_{wl}$ , %) Eşitlik 4.13, 31.5 – 50 mm boyut grubundaki balast agregaları için ise Eşitlik 4.14 kullanılarak belirlenir.

$$M_{wl} = \left( \frac{m_4}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.13)$$

Burada:  $m_4$  10 – 14 mm boyut grubu için deney sonrası 10 mm'lik elekten geçen agrega miktarını (g) ve  $m_0$  ise deneyde kullanılan toplam agrega miktarını (g) ifade etmektedir.

$$M_{wl} = \left( \frac{m_5}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.14)$$

Burada:  $m_5$  31.5 – 50 mm boyut grubu için deney sonrası 22.4 mm'lik elekten geçen agrega miktarını (g) ve  $m_0$  ise deneyde kullanılan toplam agrega miktarını (g) ifade etmektedir.

Farklı boyut grubundaki agregalar üzerinde gerçekleştirilen magnezyum sülfat don kaybı deney sonuçları Çizelge 4.24'te görülmektedir. Çizelge 4.24'e göre, iki kaya türü için 10 – 14 mm boyut grubu ve  $W_0$  tipindeki agregalarda  $M_{wl}$  değeri %0.6 – %1.5 arasında değişmektedir. 31.5 – 50 mm boyut grubundaki  $W_0$  tip agregalarda ise  $M_{wl}$  değeri %1 – %2.5 arasındadır. Boyut grubu gözetmeksizin bu agregaların  $W_1$  tipindeki  $M_{wl}$  değerleri ise  $W_0$  tipteki  $M_{wl}$  değerlerine göre ortalama %70 daha fazladır. Diğer önemli bir bulgu ise, Ilıca bazaltik kayalar için  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya türünde 31.5 – 50 mm boyut grubundan elde edilen  $M_{wl}$  değerlerinin 10 – 14 mm boyut grubundaki  $M_{wl}$  değerlerinden ortalama %100 oranında fazla olduğudur. Kayadibi ultra-bazik kayalar için ise aynı değerlendirmedeki artış oranı ortalama %85 civarındadır. Bunun sebebi  $M_{wl}$  değerlerinin hesaplanmasında kullanılan eleklerin farklı oluşundan (10 – 14 mm boyut grubu için 10 mm ve 31.5 – 50 mm boyut grubu için 22.4 mm'lik eleklerin kullanılması) kaynaklanabileceği gibi, boyut grubundaki azalmanın, atmosferik şartlarda doygun magnezyum sülfat çözeltisinin agrega içine difüzyonunu azaltıcı bir unsur olması şeklinde de yorumlanabilir.

**Çizelge 4.24** Magnezyum sülfat don kaybı deney sonuçları.

Ilıca bazaltik kayalar ( $W_0$ )			Kayadibi ultra-bazik kayalar ( $W_0$ )		
$M_{wl}$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	$M_{wl}$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm
$\bar{x}$	1.17*	2.20**	$\bar{x}$	0.83	1.30
s.s	0.30	0.26	s.s	0.15	0.27
n	5	5	n	5	5
Ilıca bazaltik kayalar ( $W_1$ )			Kayadibi ultra-bazik kayalar ( $W_1$ )		
$M_{wl}$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	$M_{wl}$ (%)	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm
$\bar{x}$	1.82	3.59	$\bar{x}$	1.40	2.97
s.s	0.42	0.65	s.s	0.51	1.05
n	5	5	n	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $M_{wl}$ : Magnezyum sülfat don kaybı, \* 5 döngü sonrası, \*\* 10 döngü sonrası

Zira, kaya ve agregalar için boyutun azaltılması kaya kütesinden kaya malzemesine olan bir geçiş şeklinde ifade edilebilir. Yine de boyut etkisinin magnezyum sülfat don kaybı üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir şekilde araştırılması yerinde olacaktır.

#### 4.3.3.4. S<sub>20</sub> kırılma indeksi

S<sub>20</sub> kırılma indeksi deneyi, Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (NTNU) ve bu üniversiteye bağlı araştırma şirketi SINTEF ortaklığı tarafından geliştirilmiş olup, deney yöntemi 1960 yılından beri özellikle kayaların delinebilirliği ve kazılabilirliği üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu deney yöntemi hakkındaki genel bilgiler Dahl vd. (2012) tarafından ayrıntılı şekilde ifade edilmiş ve yöntem Şekil 4.38'de özetlenmiştir.



Şekil 4.38 S<sub>20</sub> kırılma indeksi deneyi metodolojisi (Dahl vd. 2012'den düzenlenerek).

S<sub>20</sub> kırılma indeksi deneyi, 11.2 – 16 mm boyut grubundaki agregalar üzerinde uygulanmaktadır. 75 mm derinliğinde ve 125 mm genişliğindeki havana belirli ağırlıktaki agrega malzemesi yerleştirilir ve 14 kg ağırlığındaki bir çekiç agrega üzerine 25 cm yükseklikten 20 defa düşürülerek agregaların tekrarlanan yükler altında parçalanması sağlanır. Havanın içine koyulacak malzeme miktarının belirlenmesinde agregalara ait kuru yoğunluk değerinin bilinmesi gerekmektedir, havanın içine koyulacak agrega miktarı Eşitlik 4.15 ile belirlenmektedir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda farklı ayrışma – bozunma derecelerine ait S<sub>20</sub> kırılma indeksi değerleri Eşitlik 4.16 kullanılarak belirlenmektedir.



Dahl vd. (2012), Şekil 4.36'da özetlenen deney metodolojisine göre kayaçları kırılma açısından yedi sınıfta değerlendirmekte (Çizelge 4.25) ve gerçekleştirilen deney sonuçları Çizelge 4.26'da görülmektedir.

$$m_0 = \frac{500 \times \rho_d}{2.65} \quad (4.15)$$

Burada:  $m_0$  havan içine koyulacak toplam numune miktarını (g),  $\rho_d$  ise numuneye ait kuru yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ ) ifade etmektedir.

$$S_{20} = \left( \frac{m_6}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.16)$$

Burada:  $m_6$  deney sonrasında 11.2 mm'lik elekten geçen malzeme miktarını (g), ve  $m_0$  ise deneyde kullanılan toplam agrega miktarını (g) ifade etmektedir.

**Çizelge 4.25**  $S_{20}$  Kırılma indeksi sınıflaması (Dahl vd. 2012).

$S_{20}$ (%)	Kırılma
$\geq 66$	Oldukça Yüksek
65.9 – 60	Çok Yüksek
59.9 – 51.0	Yüksek
50.9 – 41	Orta
40.9 – 35	Düşük
34.9 – 29.1	Çok Düşük
$\leq 29$	Oldukça Düşük

Araştırma konusu olan kayaçlar Çizelge 4.25'teki sınıf aralıkları açısından incelendiğinde,  $W_0$  tip Ilıca bazaltik kayaçları "*Düşük*" ve "*Orta*" derece kırılma, aynı ayrışma bozunma derecesinde Kayadibi ultra-bazik kayaçları ise "*Oldukça düşük*" derecede kırılma'dır.

Ilıca bazaltik kayaçları için  $W_1$  tipindeki kayaçlardan üretilen agregalarda gerçekleştirilen  $S_{20}$  kırılma indeksi deney sonuçları ise  $W_0$  tipinden elde edilen değerlerden ortalama %20 oranında daha fazladır. Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise  $W_1$  tipine ait kayaçların  $S_{20}$  değeri de  $W_0$  tipinden elde edilen değerlerden ortalama %40 daha fazladır.

**Çizelge 4.26** S<sub>20</sub> kırılgenlik indeksi deney sonuçları.

İlica bazaltik kayaçları (W <sub>0</sub> )		Kayadibi ultra-bazik kayaçları (W <sub>0</sub> )	
S <sub>20</sub> (%)	11.2 – 16 mm	S <sub>20</sub> (%)	11.2 – 16 mm
$\bar{x}$	40.70	$\bar{x}$	25.41
s.s	2.91	s.s	1.65
n	5	n	5

İlica bazaltik kayaçları (W <sub>1</sub> )		Kayadibi ultra-bazik kayaçları (W <sub>1</sub> )	
S <sub>20</sub> (%)	11.2 – 16 mm	S <sub>20</sub> (%)	11.2 – 16 mm
$\bar{x}$	48.19	$\bar{x}$	36.57
s.s	4.30	s.s	6.05
n	5	n	5

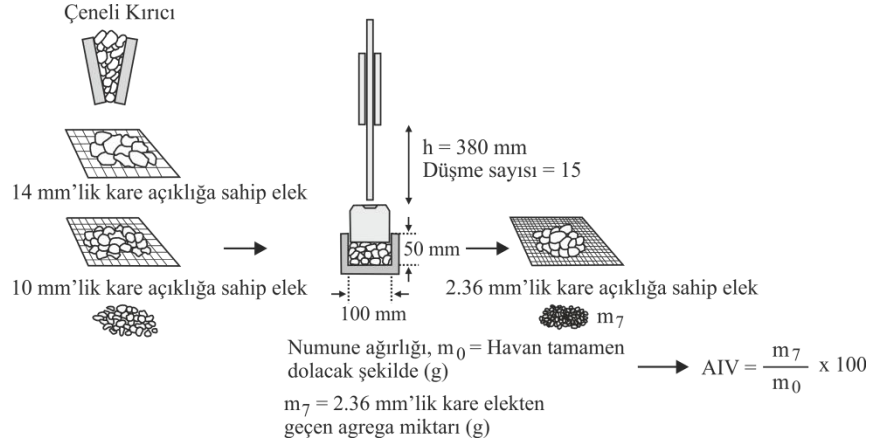
Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, S<sub>20</sub>: S<sub>20</sub> kırılgenlik indeksi

Çizelge 4.26'daki sonuçlardan tekrarlanan yükler altında Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının İlica bazaltik kayaçlarından daha dirençli olduğu söylenebilir. Bu kapsamda Köken vd. (2017) tarafından önerilen kaya malzemesi parçalanabilirlik sınıflaması araştırma konusu olan kayaçların parçalanabilirliği açısından değerlendirilmiş ve sonuçlar Bölüm 5'te verilmiştir.

#### 4.3.3.5. Agregada darbe dayanım değeri

Agregada darbe dayanımı agregaların tekrarlanan dinamik yükler altındaki davranışının kestirilmesi için gerçekleştirilen bir deney yöntemi olup, bu deney BS 812-112 (1990) standardına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Deney, 10 – 14 mm boyut grubundaki agregalar için uygulanmaktadır. Agregalar 50 mm derinliğinde ve 100 mm genişliğindeki havana, havan dolacak şekilde yerleştirilir. Agregalar havana 3 eşit tabaka halinde serilir ve her bir tabaka havana serildikten sonra şişleme çubuğu ile havan içindeki agregalar sıkıştırılarak havan doldurulur. Doldurulan havanın ne kadar agregada aldığı hassas bir terazi ile belirlenerek deney aşamasına geçilir. Havan doldurulduktan sonra agregaların 14 kg ağırlığındaki standart bir çekicinin 38 cm yükseklikten ve 15 kez düşürülmesi ile parçalanması sağlanır. Burada ifade edilen deney yöntemi şematik olarak Şekil 4.39'da gösterilmiştir.

Kayaçların dinamik yükler altındaki direncinin bir ifadesi olarak tanımlanan AIV değeri Eşitlik 4.17 kullanılarak belirlenir. AIV değeri ne kadar düşükse agregaların tekrarlanan yükler altındaki direnci o denli yüksektir (Smith ve Collis 2001).



Şekil 4.39 AIV deneyi metodolojisi.

$$AIV = \left( \frac{m_7}{m_0} \right) \times 100 \quad (4.17)$$

Burada:  $m_7$  deney sonrası 2.36 mm'lik elekten geçen agrega miktarını (g) ve  $m_0$  ise deneyde kullanılan toplam agrega miktarını (g) ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen AIV deney sonuçları Çizelge 4.27'de verilmiştir. Buna göre,  $W_0$  tip agregaların ortalama AIV değeri %11 – %12 arasında, aynı ayrışma – bozunma durumunda Kayadibi bazaltik kayaları için ise ortalama AIV değeri %8 – %10 arasındadır. Ilıca bazaltik kayalarının  $W_1$  tipine ait ortalama AIV değeri  $W_0$  tipe ait değerden ortalama %45 daha fazladır. Aynı koşullardaki artış oranı Kayadibi ultra-bazik kayaları için ortalama %30 civarındadır.

Çizelge 4.27 AIV deney sonuçları.

Ilıca bazaltik kayaları ( $W_0$ )		Kayadibi ultra-bazik kayaları ( $W_0$ )	
AIV (%)	10 – 14 mm	AIV (%)	10 – 14 mm
$\bar{x}$	11.50	$\bar{x}$	9.02
s.s	0.59	s.s	1.21
n	8	n	10
Ilıca bazaltik kayaları ( $W_1$ )		Kayadibi ultra-bazik kayaları ( $W_1$ )	
AIV (%)	10 – 14 mm	AIV	10 – 14 mm
$\bar{x}$	16.11	$\bar{x}$	11.58
s.s	1.52	s.s	0.93
n	8	n	10

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, AIV: Agrega darbe dayanım değeri.



## BÖLÜM 5

### ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen bilgi ve bulguların genel bir değerlendirmesi yer almaktadır.

#### 5.1. ARAZİ ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İlerleyen ayrışma – bozunma ile  $S_m$ , JRC ve  $R_1$  değerleri azalmaktadır. Bu değerler arasında  $S_m$ , özellikle  $W_0$  tip kaya kütlelerinde geniş bir yayılım göstermektedir. Ayrışma – bozunma derecesi arttıkça  $S_m$  değerlerinin yayılımı azalmakta ve farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri için  $S_m$  ayırt edici bir unsur olarak önem kazanmaktadır.  $W_0$  tip kaya kütlelerinde  $S_m$  değerinin geniş bir yayılım göstermesi, hat etütlerinde ayrışma – bozunma emaresi göstermeyen ancak nispeten sık aralıklı çatlak içeren kaya kütlelerinin  $W_0$  olarak tanımlanmasından kaynaklanmaktadır.

Çatlaklı ancak ayrışma – bozunma açısından herhangi bir bulgunun belirlenemediği, aynı zamanda herhangi bir dolgu ve damarın olmadığı ve JRC değerlerinin yüksek olduğu bu çatlaklı zonların  $W_0$  tip kaya kütlesi olarak tanımlanması, agrega kalitesi ve üretiminin optimizasyonu için önemlidir. Zira, ayrışma – bozunma emaresi içermeyen, çatlaklar ile sınırlanmış bu kaya bloklarının kırılması ile elde edilebilecek balast agrega malzemeleri için  $S_m$  değerinin herhangi bir rolü bulunmamaktadır. Bu açıdan  $W_0$  ile  $W_1$  tip kaya kütlelerinin tanımlanmasında daha önemli olan kriterlerin dolgu durumu, JRC ve  $R_1$  değerindeki değişimler olduğu söylenebilir. Bu açıdan farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinin niceliksel olarak sınıflandırılmasında hat etütlerinde elde edilen  $R_1$  ve JRC kullanılması, daha sağlıklı ayrışma – bozunma sınıflamalarının geliştirilmesi için tercih edilmelidir. Önceki çalışmalarda da  $R_1$  değeri ayrışma – bozunma sınıflamalarında sıklıkla kullanılmıştır (Karpuz ve Paşamehmetoğlu 1997, Arıkan vd. 2007, Woo vd. 2009, Jobli vd. 2017, Köken ve Özarslan 2018).

Bu çalışmada  $R_1$  değerinin belirli bir güven aralığında alabileceği sınır değerleri basit istatistiksel bir yaklaşım ile değerlendirilmiş olup, Bölüm 4'te her bir ayrışma – bozunma derecesi için belirlenen  $R_1$  değerlerinin %95 güven aralığındaki değer aralığı Eşitlik 5.1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$x_{mak-min} = \bar{x} \pm z \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}} \quad (5.1)$$

Burada  $x_{mak}$  ve  $x_{min}$  sırasıyla %95 güven aralığında ilgili veri setinin teorik olarak alabileceği en yüksek ve en düşük değerlerini,  $\bar{x}$  ortalama değeri, %95 güven aralığında  $z$  değeri ise 1.96 olarak ifade edilmektedir.

Bu yaklaşıma göre her bir ayrışma – bozunma derecesindeki  $R_1$  değerinin %95 güven aralığındaki alabileceği değerler belirlenmiş olup, bu çalışma ve önceki çalışmalarda  $R_1$ 'nin bazı ayrışma – bozunma sınıflamalarındaki aldığı değerler Çizelge 5.1'de verilmiştir. Aynı yaklaşım ile farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerine ait JRC değer aralıkları da belirlenebilir. Ancak örnek sayısı yetersizliğinden böyle bir sınıflamaya gidilmemiştir.

**Çizelge 5.1**  $R_1$ 'nin bazı ayrışma – bozunma sınıflamalarındaki değer aralıkları.

Araştırmacı	Karpuz ve Paşamehmetoğlu (1997)	Arıkan vd. (2007)	Woo vd. (2009)	Jobli vd. (2017)	Köken ve Özarlan (2018)	Bu çalışma	
Kaya kütle litolojisi	Andezitik	Andezitik	Granitik	Granitik	Andezitik	Bazaltik	Ultra-bazik
$W_0$	$\geq 54$	$\geq 53$	$\geq 51$	$\geq 52$	$\geq 45$	$\geq 48$	$\geq 45$
$W_1$	54 – 39	53 – 40	44 – 51	52 – 45	45 – 30	45 – 40	45 – 33
$W_2$	39 – 28	40 – 30	44 – 34	45 – 33	30 – 20	40 – 24	33 – 21
$W_3$	< 28	< 30	< 34	< 33	< 20	< 24	< 21

Hat etütleri sırasında yapılan ölçüm, gözlem ve değerlendirmeler ışığında, agrega üretimi açısından farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinin belirlenmesinde esas önemli kriterin kaya kütlelerine ait yapısal ve dokusal değişiklikler olduğu düşünülmektedir.

Bölüm 4'te farklı ayrışma – bozunma derecelerini ayırt edici kriterlerin ayrıntılarıyla verildiği çizelgelere (Bkz. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.8),  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya kütleleri için  $S_m$  delme – patlatma için (özgül şarj hesaplamalarında) dikkat edilmesi gereken önemli bir kriterdir.

Ancak her iki kaya türü içinde geçerli olmak kaydıyla, gerçekleştirilen hat etütlerinde çatlaklı ancak ayrışma – bozunma emaresi göstermeyen pek çok yapısal bölgenin olduğu tespit edilmiştir. Bu sebepten  $W_0$  tip kaya kütlelerinde  $S_m$  değer aralığı geniş bir yayılım göstermektedir. Bu gibi bölgelerin ayrışma – bozunma açısından  $W_1$  hatta  $W_2$  tip olarak değerlendirilmesi, söz konusu çatlaklı zonlarda bulunan sağlam ve diri görünümlü kaya kütlelerinin değerlendirilememesine sebep olabilir.

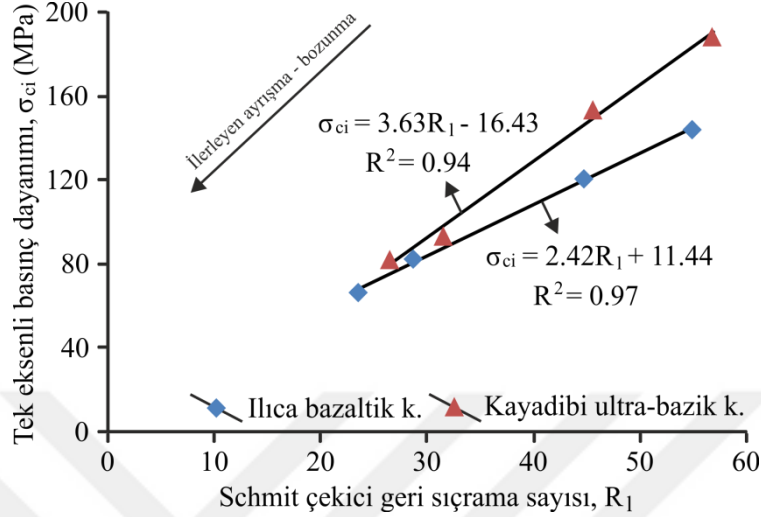
Diğer taraftan, agrega üretimi ve kalitesi açısından sözü edilen ayırt edici kriterler tartışıldığında, dikkat edilmesi gereken hususların, kaya kütlelerindeki yapısal ve dokusal değişiklikler (JRC,  $R_1$  ve alterasyon ürünleri) olması gerekir. Agreganın kalitesi basit bir ifade ile dayanım ile ilişkilidir ve dayanım hat etütlerinde kabaca  $R_1$  ile değerlendirilebilir. Ancak Schmidt çekici deneyleri kaya kütlelerinde lokal olarak gerçekleştirilebileceği unutulmamalıdır. Bu gibi durumlarda yüksek  $R_1$  değerleri ile karşılaşılmasına rağmen büyük ölçekte kaya kütleleri kimyasal bir ayrışmaya maruz kalmış olabilir. Bu duruma verilebilecek en güzel örnek,  $W_2$  tip ayrışma – bozunma gösteren kaya kütlelerinde gözlenen silisleşmedir.

Yüksek kalitede agrega üretimi amaçlanan bölgelerde Schmidt çekici deneylerine destek olarak, süreksizlikler arasındaki pürüzlülüğün belirlenmesi ve kaya kütleleri yüzeylerinde gözlenen ayrışma – bozunma emarelerinin dikkatli bir şekilde etüt edilmesi gerekmektedir.

Kaya kütlelerinde limonitleşme, killeşme ve silisleşme gözlenen bölgeler ayrıntılı olarak incelenmeli, bu bölgelerin görüldüğü yerlere ait yanal ve düşey sınırlar tespit edilmeli ve bu ayrışma – bozunma zonu sadece bir yüzey alterasyonundan ibaret olup olmadığı belirlenmelidir. Zira, yüzey alterasyonu arkasında kalan kaya kütleleri daha az ayrışmış bir zona geçiş gösterebilir. Bu gibi bölgelerde belki bir veya iki kez gevşetme patlatması yapılarak kaya kütleleri arkasındaki yapı araştırılabilir.

Hat etütleri esnasında elde edilen  $R_1$  değerleri kullanılarak bu kaya kütlelerine ait kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin tahmin edilmesine ilişkin de bir dizi çalışma yürütülmüştür. Bölüm 4'te verilen her bir ayrışma – bozunma derecesindeki ortalama  $R_1$  değerleri ile bu kaya kütlelerine ait ortalama  $\sigma_{ci}$  değerleri karşılaştırılmış ve her iki kaya türü için bu iki değişirge arasında anlamlı ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 5.1). Şekil 5.1'de ifade edilen görgül bağıntılar kullanılarak farklı ayrışma – bozunma derecelerine ait kaya malzemelerine ilişkin  $\sigma_{ci}$  değerleri tahmin edilebilir.

Bu farklı yapısal zonlar dayanım açısından sınıflandırılabilir. Bu tip sınıflamalar doğrultusunda farklı yapısal bölgelerde üretilecek agregaların kullanım alanlarına göre planlanarak bir üretim planlaması yapılabilir.



Şekil 5.1  $R_1$  ile  $\sigma_{ci}$  arasındaki doğrusal ilişkiler.

$\sigma_{ci}$  değerleri dışında farklı yapısal zonlara ait agrega özellikleri de ortaya konabilir. Bu kapsamda farklı boyut grubundaki agregalara ait LAA değerleri ve bu agregaların üretildiği kayalara ait dayanım değerleri arasında bir karşılaştırma yaparak agrega kalitesi konusunda da bir takım çıkarımlar yapmak mümkün olabilir. Bu kapsamda Çizelge 5.2'de  $W_0$  ve  $W_1$  tip kayalara ait LAA,  $M_{wl}$ ,  $w_a$ ,  $\sigma_{ci}$ , düzenli geometrideki  $I_{s50}$  ve  $R_1$  değerleri toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya malzemelerine ait temel kaya ve agrega özellikleri.

İlıca bazaltik kayaları								
Ayrışma – bozunma derecesi	$I_{s50}$ * (MPa)	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$w_a$ (%)	LAA (%)		$M_{wl}$ (%)		$R_1$
				10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	
$W_0$	10.50	143.66	0.32	15.40	12.72	1.17	2.20	54.91
$W_1$	7.62	120.44	0.37	18.33	16.82	1.82	3.59	44.73
Kayadibi ultra-bazik kayaları								
Ayrışma – bozunma derecesi	$I_{s50}$ (MPa)	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$w_a$ (%)	LAA (%)		$M_{wl}$ (%)		$R_1$
				10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	10 – 14 mm	31.5 – 50 mm	
$W_0$	12.96	188.29	0.11	14.66	10.91	0.83	1.30	56.88
$W_1$	8.85	153.47	0.16	16.28	15.30	1.40	2.97	45.63

\* Düzenli geometrideki silindirik numunelerden elde edilmiş düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi değerleridir.



Çizelge 5.2'de özetlenen veriler,  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya kütlelerinden elde edilmiş temel kaya ve agrega özelliklerini yansıtmaktadır. Bu anlamda yanal ve düşey sınırları doğru tespit edilmiş kaya kütlelerinde kaya ve agrega üretimi yapılması durumunda  $W_0$  ve  $W_1$  tipindeki kaya yapılarında Çizelge 5.2'de ifade edilen özelliklerin sağlanacağı söylenebilir.

## 5.2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

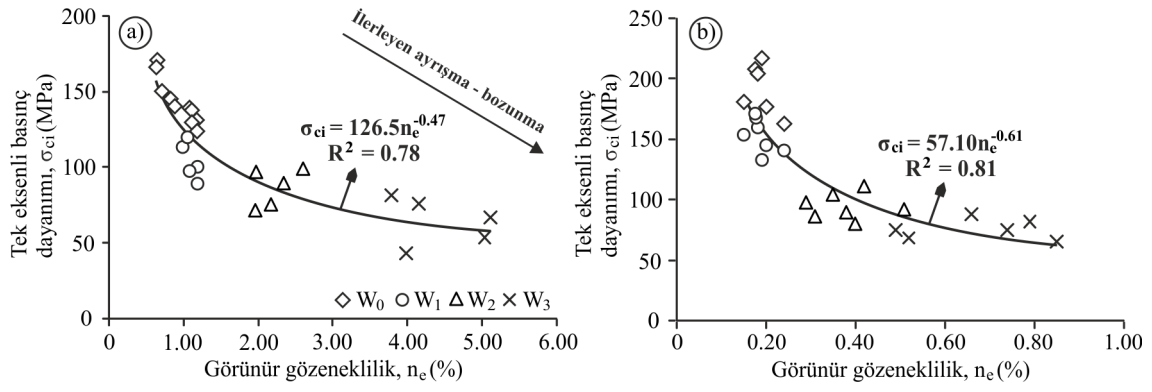
Gerçekleştirilen laboratuvar çalışmaları iki açıdan değerlendirilmiştir. Birinci değerlendirme kriteri, ayrışma – bozunmanın kaya malzemesi üzerindeki olumsuz etkilerinin ortaya konması ikinci değerlendirme kriteri ise agrega özellikleri açısından kayaların kullanım potansiyellerinin araştırılması ve agrega duraylılığına etki eden faktörlerin ortaya konması şeklindedir.

İlerleyen ayrışma – bozunmanın kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikler üzerine olan etkileri aşağıdaki gibi listelenebilir.

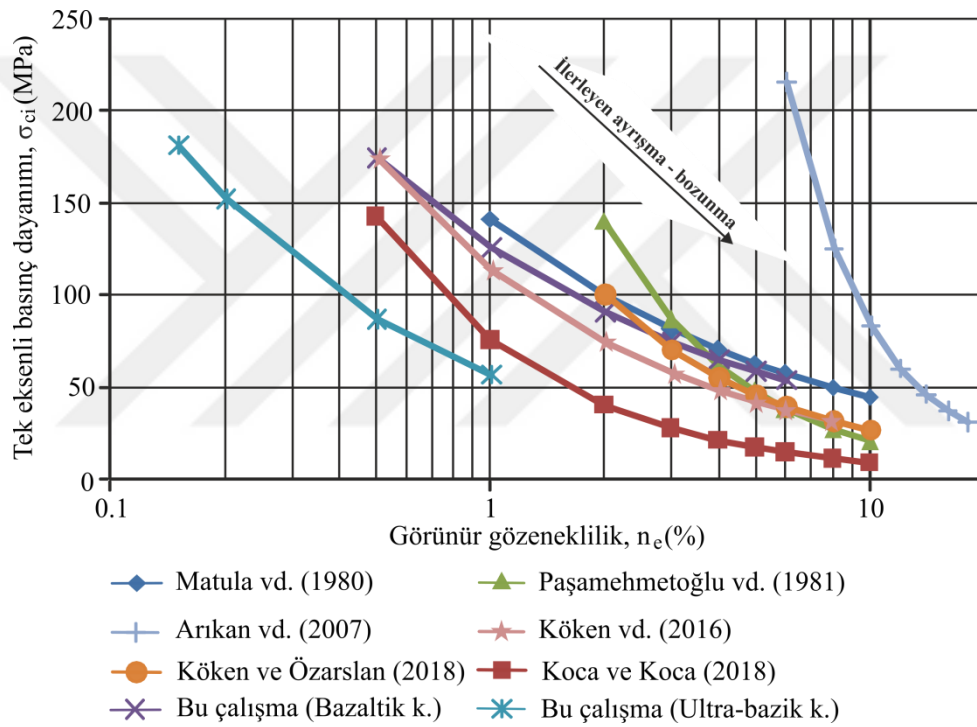
- a) Ağırlıkça su emme ve görünür gözenekliliğin artması
- b) Kuru yoğunluk, dayanım, deformasyon ve agrega özelliklerinin azalması
- c) İnce kesitlerde gözlenen ayrışma – bozunma işaretleri (kloritleşme, limonitleşme, killeşme vb.)
- d) LOI değerindeki artış ve nispeten MgO değerindeki azalma

Gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında aynı silindirik numuneden hazırlanan örnekler kullanılarak farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya malzemelerine ilişkin  $\sigma_{ci}$  ve  $n_e$  değerleri belirlenmiş ve bu iki değişirge aralarında anlamlı ilişkiler elde edilmiştir (Şekil 5.2). Şekil 5.2'ye göre ilerleyen ayrışma – bozunma ile kaya malzemesindeki  $n_e$  ile  $\sigma_{ci}$  arasında azalan üssel bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Benzer ilişkiler önceki çalışmalarda da ifade edilmiştir (Şekil 5.3).

Ayrışma – bozunma buraya kadar ifade edilen değişirgeler dışında LOI ve  $w_a$  değerleri kullanılarak ta niceliksel olarak ifade edilebilir. Laboratuvar deney sonuçlarına göre ilerleyen ayrışma – bozunma ile LOI ve  $w_a$  değerlerinde artışlar tespit edilmiş olup, farklı ayrışma – bozunma içeren kaya örneklerine ait ortalama LOI ve ortalama  $w_a$  değerleri arasında logaritmik ilişkiler belirlenmiştir (Şekil 5.4).

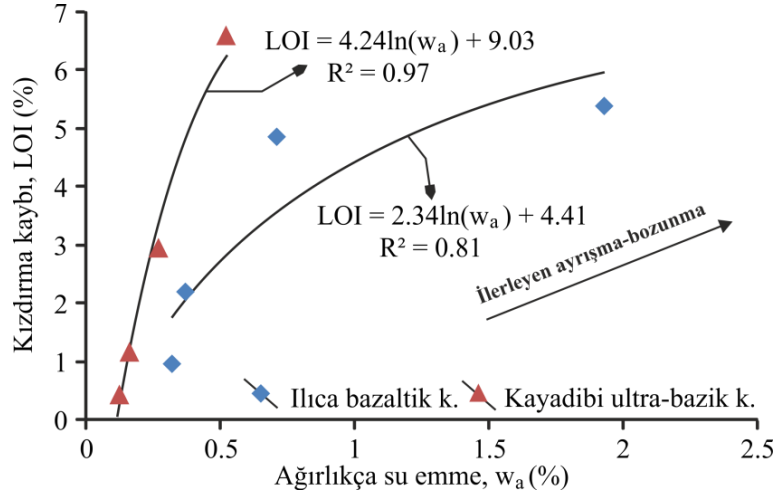


**Şekil 5.2** İlerleyen ayrışma – bozunma ile  $\sigma_{ci}$  ve  $n_e$  değerlerindeki değişim a) Ilıca bazik kayaçları b) Kayadibi ultra-bazik kayaçları.



**Şekil 5.3** İlerleyen ayrışma – bozunma ile önceki çalışmalarda ifade edilen  $\sigma_{ci}$  –  $n_e$  veri çiftindeki değişimler.

Şekil 5.4'te ifade edilen ilişkilerde kullanılan bağımlı ( $w_a$ ) ve bağımsız (LOI) değiştirgelerin laboratuvar ortamında belirlenmesi nispeten kolay olması sebebiyle, ayrışma – bozunma konularında yapılan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca söz konusu bu iki değiştirge, hızlandırılmış bir bozunma testi olarak ta ifade edilen magnezyum sülfat don kaybı deneyleri sonundaki agregalara da uygulanarak temsili donma – çözünme döngüleri sonunda agrega özelliklerin ne derecede değiştiği ortaya konabilir.



**Şekil 5.4** İlerleyen ayrışma – bozunma ile LOI ve  $w_a$  değerlerindeki değişim.

İncelenen kayaçların parçalanabilirlik açısından sınıflandırılması ise Köken vd. (2017) tarafından önerilen sınıflama (Çizelge 5.3) doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.3'te  $S_{20}$ , AIV ve  $B_3$  kırılgenlik indeksi değerleri ışığında kaya malzemelerinin tekrarlanabilir yükler altındaki parçalanma dirençleri göreceli olarak ifade edilebilir.

Çizelge 5.3'e göre  $W_0$  tip Ilıca bazaltik kayaçları "*Düşük*" ve "*Oldukça Düşük*",  $W_1$  tip Ilıca bazaltik kayaçları "*Orta*" ve "*Çok Düşük*",  $W_0$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçları "*Oldukça Düşük*",  $W_1$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçları ise "*Düşük*" ve "*Oldukça Düşük*" parçalanabilirlik sınıflarında değişkenlik göstermektedir.

**Çizelge 5.3** Kaya malzemesi parçalanabilirlik sınıflaması (Köken vd. 2017).

$S_{20}$ (%) <sup>*</sup>	AIV (%)	$B_3 = \frac{\sigma_{ci}\sigma_{tB}}{2}$ (MPa <sup>2</sup> )	Parçalanabilirlik
$\geq 66$	$\geq 40$	$\leq 65$	Oldukça Yüksek
65.9 – 60	40 – 35	65 – 100	Çok Yüksek
59.9 – 51.0	35 – 28	100 – 200	Yüksek
50.9 – 41 ( <b>a<sub>1</sub></b> )	28 – 22	200 – 430	Orta
40.9 – 35 ( <b>a<sub>0</sub>, b<sub>0</sub></b> )	22 – 18	430 – 720 ( <b>a<sub>1</sub></b> )	Düşük
34.9 – 29.1	18 – 14 ( <b>a<sub>1</sub></b> )	720 – 1200 ( <b>a<sub>0</sub></b> )	Çok Düşük
$\leq 29$ ( <b>b<sub>0</sub></b> )	$\leq 14$ ( <b>a<sub>0</sub>, b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub></b> )	$\geq 1200$ ( <b>b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub></b> )	Oldukça Düşük

<sup>\*</sup> Dahl vd. (2012) tarafından önerilen kırılgenlik indeksi sınıflamasına ait değer aralıkları,

$a_0$  :  $W_0$  tip Ilıca bazaltik kayaçları,  $a_1$  :  $W_1$  tip Ilıca bazaltik kayaçları,  $b_0$  :  $W_0$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçları  $b_1$  :  $W_1$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçları.

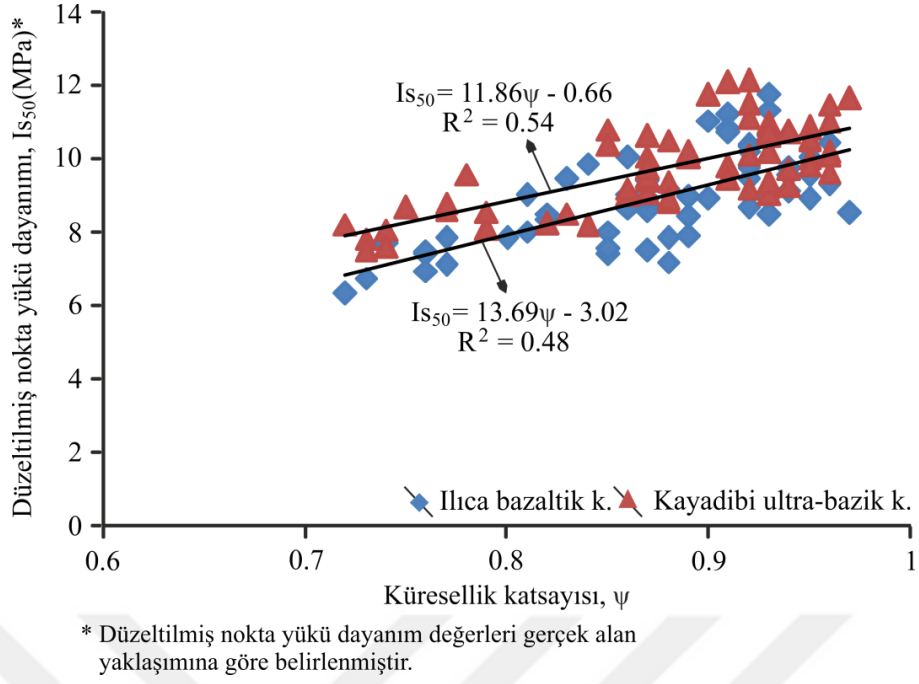
İlica bazaltik kayaçlarında farklı ayrışma – bozunma içeren birimler genellikle farklı yapısal bölgeler şeklinde gözlenmektedir. Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında ise farklı ayrışma – bozunma içeren birimler çoğu kez bir arada zaman zaman da farklı yapısal bölgelere ayrılmaktadır. Ancak pratik uygulamalarda  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya kütlelerini tek bir yapısal bölge olarak değerlendirmek söz konusu olabilir. Böyle durumlarda bu yapısal bölgelerden üretilen kaya malzemesi ve agregalara ait özellikler  $W_0$  ve  $W_1$  tiplerinden elde edilen değerlerin arasında kalacaktır. Bu açıklamalar doğrultusunda her iki kaya türüne ait  $W_0$  ve  $W_1$  tiplerinin yüksek dayanımlı ve tekrarlanan yükler altındaki dirençlerinin de genel olarak yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

$W_0$  tip düzensiz örneklerde gerçekleştirilen nokta yükü deneyleri sonucunda, balast agregalarındaki  $\psi$  değerinin azalması ile nokta yükü dayanımının azaldığı Şekil 5.5'te görülmektedir. Ancak bu deneysel çalışmada balast dayanımına etki eden tek değişirgenin  $\psi$  olmadığı, Şekil 5.5'te verilen doğrusal ilişkiye ait belirtme katsayılarının (İlica bazaltik kayaçları için  $R^2 = 0.48$ , Kayadibi ultra-bazik kayaçları için  $R^2 = 0.54$ ) nispeten düşük olmasıyla açıklanabilir. Belirtme katsayısının düşük çıkmasındaki olası nedenler ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- a) Agregalardaki mineralojik bileşim ve mikro yapısal özelliklerindeki değişim
- b) Küresellik katsayısının doğru bir şekilde belirlenemeyişi (Ölçüm hatası)
- c) Taş motoru ile yüzey düzeltmesi yapılmasına rağmen, aksenal yüklemenin tam olarak gerçekleştirilememesi (Deneysel hata)

Yukarıda ifade edilen olası nedenlerin ayrıntılı bir deneysel program ile açığa kavuşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda nokta yükü deneyinden önce her bir balast agregasına ait mineral sertliği (Shore skeleroskopu ile) belirlenerek, agregalardaki mineralojik değişimlerin olup olmadığı araştırılabilir. Küresellik katsayısının belirlenmesinde 3 boyutlu tarama teknikleri kullanılarak olası ölçüm hataları en aza indirgenebilir. Eğer yüzey düzeltmesinden kaynaklanan bir hata söz konusu ise deney sayıları artırılarak araştırma detaylandırılabilir.

Balast agregalarında küreselliğin azalması, söz konusu agregaların kübik şekilden yassı veya yaprağımsı bir şekil ile ifade edildiği anlamına gelir. Yassı agregalar balast tabakası içinde aksenal yükler dışında eğilme kuvvetlerine de maruz kalabilir ve bu gibi durumlarda yassı agregalarda üç nokta eğilme dayanımını andıran bir yükleme söz konusu gerçekleşebilir.



**Şekil 5.5**  $\psi$  ile  $I_{s50}$  arasındaki doğrusal ilişkiler.

Bu tip agregaların eğilme mukavemeti kübik veya kübik şekle benzeyen agregalardan daha düşük olacağından,  $\psi$  değeri düşük agregalar, balast tabakasını kirletici bir unsur olarak değerlendirilebilir. Ancak balast tabakasındaki her bir agreganın eş boyutlu olması durumunda balast tabakasını istenen seviyede sıkılaşmak mümkün olmayabilir. Zira eş boyutlu malzemelerin kenetlenmesi farklı şekilsel özellikteki malzemelerin sıkıştırılabilirliğinden daha zordur (Wang vd. 2017).

Bu problemin balast tabakasına yansması ise yani eş boyutlu malzemelerin yeterince kenetlenememesi şeklindedir. Tren geçişi esnasında meydana gelen yanal titreşimler sebebiyle kenetlenemeyen balast tabakası bozulur ve taş sıçrama sorunları ile karşılaşılabilir. Bu sebepten optimum kenetlenme için balast tabakasında limitler dahilinde yassı balast agregaları bulunmalıdır (Aydın 2018).

İncelenen kayalardan üretilmesi planlanan agregaların endüstriyel kullanım potansiyelinin belirlenmesi için de Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından önerilen teknik şartnameler göz önünde bulundurulmuş olup,  $W_0$  ve  $W_1$  tip kayalardan üretilen agregaların olası kullanım alanları araştırılmıştır.

Buna göre,  $W_0$  tip kayaçlardan üretilen agregalar temel özellikler itibariyle gabion, asfalt agregası, beton agregası, pere, alt temel malzemesi, parke taşı ve tahkimat taşı olarak kullanıma uygundur (Çizelge 5.4).

**Çizelge 5.4** KGM (2013) teknik şartnamelerine göre  $W_0$  tip agregaların uygunluğu.

Kullanım Alanı	Boyut (mm)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$I_f$ (%)	$w_a$ (%)	$M_{wl}$ (%)	LAA (%)	$\sigma_{ci}$ (MPa)	Uygunluk	
									Ilıca bazaltik kayaçları	Kayadibi ultra-bazik kayaçları
Gabion	≤ 100	≥ 2.20	—	—	≤ 2.00	≤ 10	≤ 35	—	√	√
Asfalt agregası	≤ 12	—	—	≤ 20	≤ 2.50	≤ 18	≤ 30	—	√*	√*
Beton agregası	≤ 16	≥ 2.30	≥ 2.55	≤ 20	≤ 3	≤ 18	≤ 35	—	√**	√**
Pere	≤ 500	≥ 2.30	—	—	≤ 1.80	≤ 8	≤ 30	—	√	√
Alt temel	≤ 75	—	—	≤ 30	≤ 3.50	≤ 25	≤ 45	—	√	√
Parke taşı	≤ 220	—	—	—	≤ 0.50	≤ 3	—	≥ 150	√	√
Tahkimat taşı	Değişken	≥ 2.40	—	—	≤ 1.80	≤ 8	≤ 30	—	√***	√***

\* Detaylı asfalt agregası çalışmaları için soyulma mukavemeti ve çivili lastik testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. \*\* Beton agregası olarak kullanım için alkali – silis reaktivite testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. \*\*\* Tahkimat taşı olarak kullanım için tuz kristallenmesi testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Ancak asfalt agregası olarak kullanılacak kayaçlara ait soyulma mukavemeti ve çivili lastik deneyleri, beton agregası için kullanılacak agregalara ait alkali – silis reaktivitesi deneyleri ve tahkimat taşı için kullanılacak kayaçlara ait tuz kristallenme deneylerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında demiryolu balast malzemesi araştırıldığından burada sözü edilen ilave deneyler gerçekleştirilmemiştir.

Ayrıca Ilıca bazaltik kayaçları için  $W_1$  tipindeki kaya kütlelerinden üretilen agregalar parke taşı hariç diğer alanlarda kullanılabilir. Kayadibi ultra-bazik kayaçları için  $W_1$  tipindeki agregalar ise Çizelge 5.4'te ifade edilen alanlarda kullanılabilir.

Araştırma konusu olan bazaltik kajaçlardan üretilen agregaların üst ve alt balast malzemesi olarak kullanılabilirliği ise TCDD (2017) tarafından ifade edilen teknik şartnamelere (Çizelge 5.5) göre belirlenmektedir. Buna göre  $W_0$  tip kajaçlardan üretilen agregalar hem alt hem de üst balast malzemesi olarak kullanıma uygundur.

$W_1$  tipindeki kayalardan üretilen agregaların ise teknik şartname gereği üst balast malzemesi olarak kullanılması uygun değildir. Ancak  $W_1$  tip kaya kütlelerinden üretilen bu agregalara ait önemli özellikler ( $M_{wl}$ ,  $w_a$  ve LAA gibi) itibari ile TS 7043 EN 13450 şartnamesinde ifade edilen değerlere çok yakın olması dikkat çekicidir. Bu anlamda  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya kütlelerinin beraber değerlendirildiği durumlarda bu yapısal bölgelerden üretilecek agregaların şartname değerlerini sağlayabileceği söylenebilir.

Diğer taraftan  $W_1$  yapısal bölgesi tek başına değerlendirdiğinde bu bölgelerden üretilecek bu agregaların alt balast malzemesi olarak sağlıklı bir şekilde kullanılabilir olduğunu söylemek mümkündür. Bu agregaların alt balast malzemesi olarak kullanılabilmesi için ilave deneylerden Atterberg Limitleri (likit ve plastik limit), organik madde içeriği, kil topaklanması ve ince boyuttaki agregaların sıkışma özelliklerinin laboratuvar ortamında belirlenmesi gerekmektedir.

**Çizelge 5.5** TCDD (2017) teknik şartnamesine göre incelenen  $W_0$  tip agregaların uygunluğu.

Kullanım Alanı	Boyut (mm)	$I_f$ (%)	$w_a$ (%)	$M_{wl}$ (%)	LAA (%)	Uygunluk	
						İlca bazaltik kayaçları	Kayadibi ultra-bazik kayaçları
Demiryolu üst balastı	31.5 – 50	$\leq 20$	$\leq 1.5$	$\leq 3$	$\leq 14$	√	√
Demiryolu alt balastı	< 37.5	$\leq 28$	—	—	$\leq 24$	√*	√*

\* Atterberg limitleri (likit ve plastik limit), organik madde içeriği, kil topaklanması ve sıkışma özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Balast malzemesinin serilme esnasında istenen özellikleri sağlaması elbette önemlidir. Ancak balast malzemesinin bakım aralığının kestirimi agrega kalitesi, sıkılama derecesi ve balast agregasının çevresel ve mekanik etkiler altındaki davranışı ile doğrudan ilişkilidir. Bu açıdan balast malzemesinin farklı çevresel ve mekanik etkiler altındaki davranışının araştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda Bölüm 6'da balast agregası duraylılık araştırmaları ayrıntılı bir deneysel program ile ele alınmıştır.





## BÖLÜM 6

### KAYA MALZEMESİ VE BALAST AGREGASI DURAYLILIK ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde kaya malzemesi ve balast agregalarının farklı çevresel ve mekanik koşullar altındaki duraylılıkları araştırılmıştır. Laboratuvar ortamında değişen çevresel koşullar farklı döngü sayılarındaki magnezyum sülfat don kaybı deneyleri ile, mekanik koşullar ise tek tane ve farklı devir sayılarındaki Los Angeles aşınma kaybı deneyleri ile ifade edilmiştir.

#### 6.1. ÇEVRESEL KOŞULLARIN LABORATUVAR ORTAMINDA BENZETİMİ

Kaya malzemesi ve agregaların duraylılığını azaltıcı önemli etkenlerden önemli bir tanesi, doğada gerçekleşen donma – çözünme olayıdır. Burada donma – çözünme olayı laboratuvar ortamında magnezyum sülfat don kaybı deneyleri ile temsil edilmiştir. Donma – çözünme olayının şiddeti ise magnezyum sülfat don kaybı deneylerinde farklı döngü sayıları ile ifade edilmiştir.

Bu kapsamda kaya malzemesi ve balast agregaları (31.5 – 50.0 mm) farklı temsili – donma çözünme döngülerine ( $N_{ft-m}$ ) tabi tutulmuş ve söz konusu döngüler sonunda kaya malzemesi ve balast agregalarındaki dayanım ve diğer özelliklerinin ne derecede değiştiği araştırılmıştır. Kaya malzemesi ve balast agregaları toplamda 40 temsili donma – çözünme döngüsüne tabi tutulmuş olup, 10., 20. ve 40. döngülerde kaya malzemesi ve balast agregalarının bazı önemli özellikleri belirlenmiştir.

Temsili magnezyum sülfat döngülerine sadece  $W_0$  tip kayaçlardan hazırlanan silindirik kaya numuneleri ile balast agregaları tabi tutulmuş olup, gerçekleştirilen deneyler eldeki numuneler ölçüsünde en az üç kez tekrar edilmiştir. Temsili donma - çözünme döngüleri sonunda ilksel geometrik özelliklerini yitiren numuneler üzerinde herhangi bir deney gerçekleştirilmemiştir.

Yukarıda ifade edilen deneysel programa göre farklı temsili döngü sayılarında incelenen kayalara ait  $I_{s50}$ ,  $\sigma_{ci}$  ve  $E_{ti}$  değerlerindeki değişim Ilıca bazaltik kayaları için Çizelge 6.1'de, Kayadibi ultra-bazik kayaları için ise Çizelge 6.2'de toplu olarak verilmiştir.

**Çizelge 6.1** Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında Ilıca bazaltik kayalarının bazı mekanik özelliklerindeki değişim.

$I_{s50}$ (MPa)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				$\sigma_{ci}$ (MPa)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$			
	0	10	20	40		0	10	20	40
$\bar{x}$	10.50	9.11	7.20	6.72	$\bar{x}$	143.66	137.62	131.56	110.94
s.s	0.85	0.58	0.84	0.92	s.s	15.26	7.99	7.18	9.07
n	19	7	5	5	N	10	5	5	5

$E_{ti}$ (GPa)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				Açıklamalar: $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, $I_{s50}$ : Nokta yükü dayanımı, $\sigma_{ci}$ : Tek eksenli basınç dayanımı, $E_{ti}$ : Teğetsel Young Modülü
	0	10	20	40	
$\bar{x}$	50.32	44.56	35.46	31.13	
s.s	4.88	3.05	2.15	3.44	
n	5	5	5	5	

**Çizelge 6.2** Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayalarının bazı mekanik özelliklerindeki değişim.

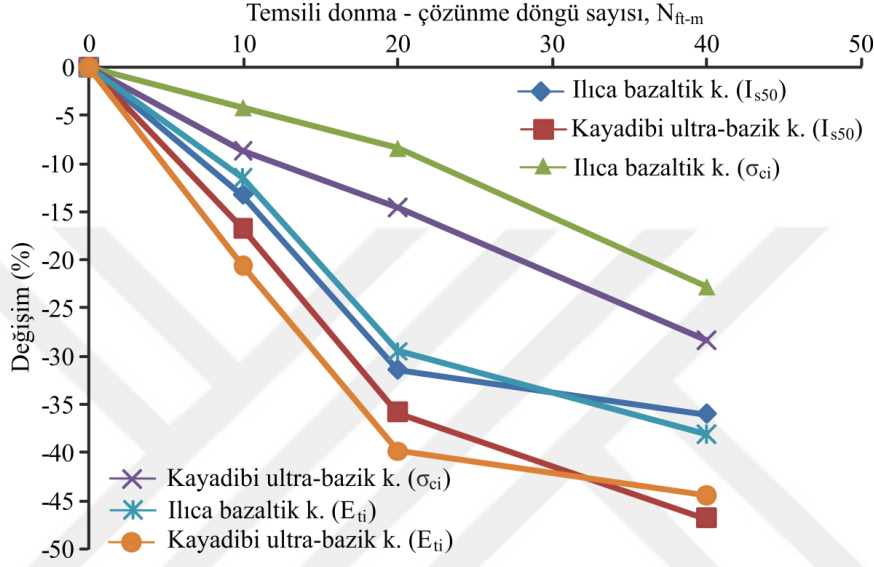
$I_{s50}$ (MPa)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				$\sigma_{ci}$ (MPa)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$			
	0	10	20	40		0	10	20	40
$\bar{x}$	12.96	10.79	8.32	6.89	$\bar{x}$	188.29	172.04	160.89	134.93
s.s	1.42	1.12	0.85	0.34	s.s	21.18	20.64	16.11	16.24
n	10	6	5	5	N	7	5	5	5

$E_{ti}$ (GPa)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				Açıklamalar: $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, $I_{s50}$ : Nokta yükü dayanımı, $\sigma_{ci}$ : Tek eksenli basınç dayanımı, $E_{ti}$ : Teğetsel Young Modülü
	0	10	20	40	
$\bar{x}$	70.98	56.32	42.66	39.41	
s.s	3.75	3.18	5.53	2.31	
n	5	5	5	5	

$N_{ft-m} = 40$  koşulunda elde edilen değerler  $N_{ft-m} = 0$  koşulunda elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, Ilıca bazaltik kayalarının ortalama  $I_{s50}$  değeri ortalama %36,  $\sigma_{ci}$  %23 ve  $E_{ti}$  ise %38 oranında azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, artan  $N_{ft-m}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayalarının ortalama  $I_{s50}$  değeri %46,  $\sigma_{ci}$  %28 ve  $E_{ti}$  ise %45 oranında azalmaktadır.

Artan  $N_{ft-m}$  koşulları ile yukarıda ifade edilen kaya malzemelerine ait mekanik özelliklerdeki değişimler Şekil 6.1'de toplu olarak verilmiştir. Şekil 6.1'e göre, artan  $N_{ft-m}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında dayanım özelliklerinin ( $I_{s50}$ ,  $\sigma_{ci}$  ve  $E_{ti}$ ), Ilıca bazaltik kayaçlarına ait dayanım özelliklerinden (% değişim bazında) daha fazla etkilendiği söylenebilir. Ayrıca her iki kaya türü içinde artan  $N_{ft-m}$  koşullarında en fazla değişime uğrayan kaya özelliği  $I_{s50}$  ve  $E_{ti}$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1 Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında kaya malzemeleri mekanik özelliklerindeki değişim.

Balast agregalarında ise artan  $N_{ft-m}$  koşullarında  $w_a$ , LOI,  $M_{wl}$  ve LAA değerlerinde önemli değişimler tespit edilmiştir. Çizelge 6.3'e göre  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda elde edilen değerler  $N_{ft-m} = 0$  koşulunda elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, Ilıca bölgesi bazaltik kayaçlarında  $w_a$  değeri ortalama %81, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait  $w_a$  değeri ise ortalama %109 oranında artmıştır.

Çizelge 6.3 Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında balast agregalarına ait  $w_a$  değerlerindeki değişim.

$w_a$ (%)	Ilıca bazaltik kayaçları				Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				
	0	10	20	40	0	10	20	40	
$\bar{x}$	0.32	0.36	0.42	0.58	$\bar{x}$	0.11	0.15	0.19	0.23
s.s	0.09	0.04	0.05	0.08	s.s	0.02	0.03	0.02	0.02
n	26	22	17	14	n	16	15	14	10

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $w_a$ : Ağırlıkça su emme

Diğer taraftan,  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda elde edilen LOI değerleri,  $N_{ft-m} = 0$  koşulunda elde edilen LOI değerleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, Ilıca bölgesi bazaltik kayaçlarında LOI değeri ortalama %84, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait LOI değeri ise ortalama %282 oranında artmaktadır (Çizelge 6.4.)

**Çizelge 6.4** Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında balast agregalarına ait LOI değerlerindeki değişim.

Ilıca bazaltik kayaçları				Kayadibi ultra-bazik kayaçları					
LOI (%)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$			LOI (%)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$				
	0	10	20		40	0	10	20	40
$\bar{x}$	0.95	1.14	1.46	1.75	$\bar{x}$	0.40	0.59	1.25	1.53
s.s	0.45	0.34	0.77	1.03	s.s	0.14	0.21	0.60	0.38
n	9	6	5	4	n	7	5	5	3

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, LOI: Kızdırma kaybı

Çizelge 6.4'teki LOI değişimlerine bakıldığında artan  $N_{ft-m}$  koşullarında kayaçlarda belirgin bir kimyasal ayrışma gerçekleştiği söylenebilir. Söz konusu bu kimyasal ayrışma da Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında Ilıca bazaltik kayaçlarına göre daha fazla etkili olmuştur.

Artan  $N_{ft-m}$  koşullarından en fazla etkilenen agrega özelliği ise  $M_{wl}$ 'dir. Bu kapsamda incelenen balast agregalarındaki  $M_{wl}$  değerlerinin değişimi Çizelge 6.5'te verilmiştir. Çizelge 6.5'e göre  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda sonunda elde edilen ortalama değerler  $N_{ft-m} = 10$  koşulundaki değerler ile karşılaştırıldığında, Ilıca bazaltik kayaçlarına ait  $M_{wl}$  değeri ortalama %495, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait  $M_{wl}$  değeri ise ortalama %750 oranında artmıştır (Köken vd. 2018).

**Çizelge 6.5** Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında balast agregalarına ait  $M_{wl}$  değerlerindeki değişim.

Ilıca bazaltik kayaçları			Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
$M_{wl}$ (%)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$		$M_{wl}$ (%)	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$			
	10	20		40	10	20	40
$\bar{x}$	2.20	5.16	13.10	$\bar{x}$	1.30	4.32	11.06
s.s	0.26	0.58	1.27	s.s	0.30	0.70	0.86
n	5	5	5	n	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $M_{wl}$ : Magnezyum sülfat don kaybı.

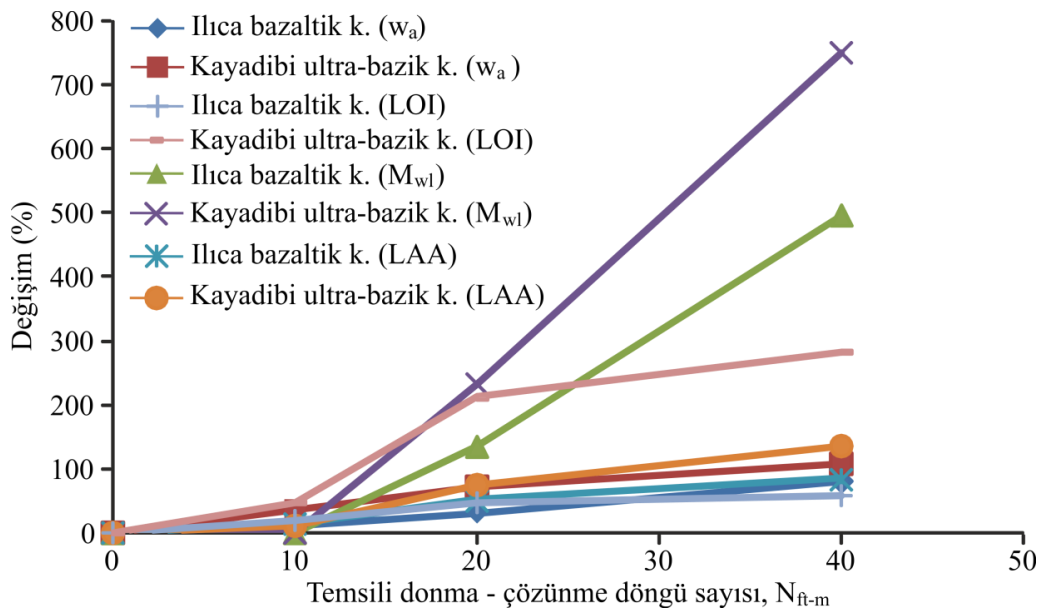
Benzer şekilde, artan  $N_{ft-m}$  koşullarında incelenen balast agregalarındaki LAA değerlerinin değişimi de Çizelge 6.6'da verilmiştir. Çizelge 6.6'ya göre  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda elde edilen LAA değerleri  $N_{ft-m} = 0$  koşulunda elde edilen LAA değerler ile karşılaştırıldığında, Ilıca bölgesi bazaltik kayaçlarında LAA değeri ortalama %85, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait LAA değeri ise ortalama %136 oranında artmaktadır.

Artan  $N_{ft-m}$  koşulları ile yukarıda ifade edilen balast agregasına ait dikkate alınan özelliklerdeki değişimler Şekil 6.2'de toplu olarak verilmiştir. Şekil 6.1'den çıkarılmış sonuçta paralel olacak şekilde,  $N_{ft-m}$  koşulundaki artış, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarından üretilen balast agregalarını, Ilıca bazaltik kayaçlarından üretilen balast agregalarından daha fazla etkilemektedir.

**Çizelge 6.6** Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında balast agregalarına ait LAA değerlerindeki değişim.

LAA (%)	Ilıca bazaltik kayaçları				LAA (%)	Kayadibi ultra-bazik kayaçları			
	Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$					Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$			
	0	10	20	40		0	10	20	40
$\bar{x}$	12.72	14.52	19.25	23.50	$\bar{x}$	10.91	12.22	19.16	25.75
s.s	0.96	1.71	0.43	0.52	s.s	0.33	0.65	0.97	0.83
N	5	4	3	3	n	5	3	3	3

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, LAA: Los Angeles aşınma kaybı.



**Şekil 6.2** Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında balast agrega özelliklerindeki değişim.

Fiziksel ve dayanım bakımından daha iyi özelliklere sahip olan Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının artan  $N_{ft-m}$  koşullarından daha fazla etkilenmesinin ana sebebinin mineralojik bileşim ve tane boyutu olduğu düşünülmektedir. Ilıca ultra-bazik ve Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında kayaç yapıcı mineraller, çoğunlukla feldispat ve piroksendir.

Kayadibi-ultra bazik kayaçlarında ortalama feldispat + piroksen oranı toplamı (% 77), Ilıca bazik kayaçlarından (%56) fazla olmakla birlikte, Kayadibi ultra-bazik kayaçları kalsiyumca zengin feldispatlardan, Ilıca bazaltik kayaçları ise sodyumca zengin feldispatlardan oluşmaktadır.

Kalsiyumca zengin plajiyoklaslar sıcaklık değişiminden (Tribaudino vd. 2011), genel itibari ile plajiyoklas ve piroksenler ise dehidrasyon olayından önemli ölçüde etkilenmektedir (Todd ve Evans 1994, Rajesh vd. 2009, Sundvall vd. 2009, Rajesh vd. 2013, Weis vd. 2016).

Magnezyum sülfat don kaybı, genel itibari ile bir dehidrasyon reaksiyon döngüsü sonucunda kayaçlardaki ayrışma – bozunma derecesinin ortaya konmasını amaçlayan hızlandırılmış bir ayrışma – bozunma deneyidir. Bu kapsamda yukarıda ifade edilen hususlar Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının artan  $N_{ft-m}$  koşullarından neden daha fazla etkilendiğinin bir cevabı olabilir.

Diğer taraftan, oluşum sıcaklıkları itibari ile ultra-bazik kayaçlarda kristal gelişimi ve buna bağlı olarak mineral tane boyutu bazaltik kayaçlara göre daha büyüktür. Mineral tane boyutundaki artış, taneler arası artan temas noktası ve ayrışma – bozunmada gelişmeye müsait mikro fisür oluşturma potansiyeli anlamına gelebilir.

Kayaçlarda ortalama tane boyutu dayanım açısından değerlendirildiğinde ise, artan tane boyutunun kaya malzemesi ve agrega özelliklerini azaltıcı bir unsur olarak değerlendirildiği önemli çalışmalar mevcuttur (Eberhardt vd. 1999, Raisanen 2004, Stalheim 2014). Yine de yukarıda ifade edilen bu düşüncelerin ayrıntılı bir deneysel program ile ele alınması, magnezyum sülfat don kaybı deneylerinde, tane boyutu – dayanım ve mineraloji – dehidrasyon konularının açıklığa kavuşturulması anlamında önemli olabilir.

$N_{ft-m} = 10$  koşulunda ilgili balast agregalarında elde edilen ortalama  $M_{wl}$  değeri ile (Bkz. Çizelge 6.5) ilgili şartnamede ifade edilen limit değer (Bkz. Çizelge 3.1,  $M_{wl} \leq \%3$ )

karşılaştırıldığında, incelenen balast agregaları  $M_{wl}$  duraylılığı bir güvenlik katsayısı (FS) ile değerlendirilebilir. Bu kapsamda Ilıca bazaltik kayaçları için  $M_{wl}$  duraylılığı FS değeri Eşitlik 6.1’de, aynı yaklaşım ile Kayadibi ultra-bazik kayaçları için elde edilen FS değeri ise Eşitlik 6.2’de verilmiştir.

Ilıca bazaltik kayaçları için  $N_{ft-m} = 10$  koşulunda elde edilen ortalama  $M_{wl}$  değerine göre elde edilen FS:

$$FS_{(M_{wl})} = \frac{3.00 \text{ (Şartnamedeki limit değer)}}{2.20 \text{ (Elde edilen ortalama değer)}} = 1.36 \quad (6.1)$$

Kayadibi ultra-bazik kayaçları için  $N_{ft-m} = 10$  koşulunda elde edilen ortalama  $M_{wl}$  değerine göre elde edilen FS:

$$FS_{(M_{wl})} = \frac{3.00 \text{ (Şartnamedeki limit değer)}}{1.30 \text{ (Elde edilen ortalama değer)}} = 2.30 \quad (6.2)$$

Yukarıda ifade edilen eşitliklere göre,  $M_{wl}$  duraylılığı açısından Ilıca bazaltik kayaçlarından üretilen balast agregaları için FS değeri 1.36, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarından üretilen balast agregaları ait FS değeri ise 2.30 olarak belirlenmiştir.

Değişen  $N_{ft-m}$  koşullarında  $w_a$  değerindeki değişimler ele alındığında, her iki balast agregası için de geçerli olmak kaydı ile, uygulanan bütün  $N_{ft-m}$  koşullarında elde edilen ortalama  $w_a$  değerleri şartnamede geçen limit değer (Bkz. Çizelge 3.1,  $w_a \leq \%1.5$ ) oldukça altındadır.

Buraya kadar edinilen bilgi ve değerlendirmeler ışığında, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının artan temsili donma – çözünme döngülerinden Ilıca bazaltik kayaçlarına kıyasla daha fazla etkilendiği söylenebilir. Ancak  $N_{ft-m} = 10$  koşulunda  $M_{wl}$  duraylılığı üzerine yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen FS değerleri dikkate alındığında, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının  $M_{wl}$  açısından Ilıca bazaltik kayaçlarına kıyasla daha duraylı olduğu sonucuna varılabilir.

Artan  $N_{ft-m}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayaçları ilksel temel kaya ve agrega özelliklerini oransal olarak Ilıca bazaltik kayaçlarından daha fazla yitirmektedir.

Söz konusu bu iki kaya türünün uygulama esnasındaki parçalanma süreçlerinin kestirimi, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen magnezyum sülfat don kaybı deneyleri ile doğada gerçekleşen donma – çözünme döngüsü arasındaki ilişkinin ortaya konması ile mümkündür. Diğer bir ifade ile burada açıklığa kavuşturulması gereken husus, doğada hangi şiddette gerçekleşen donma – çözünme olayının hangi  $N_{ft-m}$  koşulu ile temsil edilmesi gerektiğidir.

## **6.2. MEKANİK KOŞULLARIN LABORATUVAR ORTAMINDA BENZETİMİ**

Balast tabakası üzerine etkiyen mekanik değişirgeler trenin ağırlığından kaynaklanan statik ve tren geçişi esnasında meydana gelen dinamik yüklerdir. Bu kapsamda balast agregalarında mekanik koşulların laboratuvar ortamındaki benzetimi tek tane deneyleri ve Los Angeles aşınma kaybı deneyleridir.

Balast tabakası içinde meydana gelen aşınma olayı Los Angeles aşınma kaybı deneyleri ile, tren geçişi esnasında meydana gelen dinamik yükleme ise tek tane ile deneyleri temsil edilmeye çalışılmıştır.

### **6.2.1. Tek tane deneyleri**

Küresellik katsayısı  $\psi$  değeri daha önceden belirlenen bir adet 31.5 mm – 50 mm boyut grubundaki balast agrega malzemesi agrega darbe dayanım indeksi deneyinde kullanılan havan içerisine yerleştirilerek, 14 kg ağırlığındaki standart bir çekicinin yaklaşık 38 cm yükseklikten 15 kez düşürülmesi hususu ile balast agregasının parçalanması sağlanmıştır. Farklı  $\psi$  değerindeki balast agregaları üzerinde gerçekleştirilen tek tane deneyleri sonucunda, parçalanmış balast agregasının parçalanma derecesi Selig ve Waters (1994) tarafından ifade edilen Eşitlik 3.1 ile belirlenmiştir. Her bir tek tane deneyi sonrasında tek tane deneylerinden elde edilen kirlenme indeksi ( $FI_{TT}$ ) belirlenmiş ve  $FI_{TT}$  ile  $\psi$  arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır.

Burada ifade edilen tek tane deneylerinde temsili – donma çözünme döngüleri uygulanmamış olup, deneylere ilişkin bazı deney görselleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.3'te şekilsel özelliği  $\psi \geq 0.70$  olan balast agregaları görülmektedir. Her bir tek tane deneyi farklı şekilsel özelliklerdeki balast agregaları üzerinde ( $\psi = 0.7 - 0.8$ ,  $\psi = 0.8 - 0.9$  ve  $\psi > 0.90$ ) en az 15 kez tekrar edilmiştir.



Balast agregası havana yerleştirilmeden önce kuru ağırlığı tartılır ve tek tane deneyleri gerçekleştirilir. Gerçekleştirilen deneyin kabul edilebilmesi için, tekrarlanan düşme esnasında balast agregası üzerinde ilk meydana gelen büyük çatlağın çekicinin düşey eksenine paralel veya paralele yakın olacak şekilde gelişmesi önem arz etmektedir.



Şekil 6.3 Tek tane deneyleri.

Gerçekleştirilen tek tane deneylerinden elde edilen  $FI_{TT}$  değerleri izelge 6.7'de toplu olarak verilmiştir. Çizelge 6.7'deki veriler kullanılarak  $\psi$  ile  $FI_{TT}$  arasındaki ilişkiler araştırılmış olup, Şekil 6.5'te  $\psi$  ile  $FI_{TT}$  arasında doğrusal azalan bir ilişki gürölmektedir.

Çizelge 6.7 Tek tane deneylerinden elde edilen  $FI_{TT}$  değerleri.

$FI_{TT}$ (%)	Ilıca bazaltik kayalar			Kayadibi ultra-bazik kayalar			
	Küresellik katsayısı, $\psi$			$FI_{TT}$ (%)	Küresellik katsayısı, $\psi$		
	0.7 – 0.8	0.8 – 0.9	> 0.9			0.7 – 0.8	0.8 – 0.9
$\bar{x}$	53.19	31.42	17.08	$\bar{x}$	41.47	20.13	9.34
s.s	8.40	5.10	3.35	s.s	7.19	5.97	1.80
n	15	15	15	n	15	15	15

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $FI_{TT}$ : Tek tane deneylerinden elde edilen kirlenme indeksi

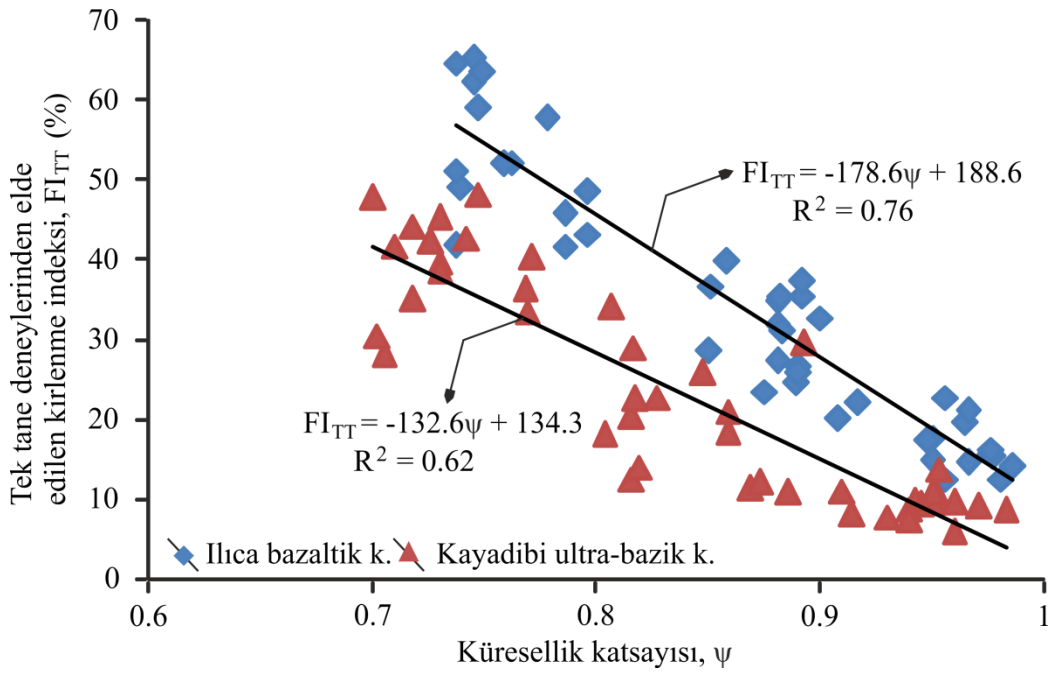
Şekil 6.4'e göre artan  $\psi$  değeri ile Kayadibi ultra-bazik kayalarına ait  $FI_{TT}$  değerlerinin Ilıca bazaltik kayalarına ait  $FI_{TT}$  değerlerinden daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.

Tekrarlanan yükler altında Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının Ilıca bazaltik kayaçlarına oranla daha dirençli olduğu sonucuna varılabilir. Bu sonuç Bölüm 5'te ifade edilen kaya malzemesi parçalanabilir sınıflaması değerleri (Bkz. Çizelge 5.3) ile uyum içerisindedir.

$FI_{TT}$  değerlerinin küresellik katsayısından doğrudan etkilendiği ve  $\psi > 0.9$  değerlerinde balast agregalarının en düşük  $FI_{TT}$  değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Buradan küresellik durumunun balast agrega dayanımını doğrudan etkilediği söylenebilir.

Balast agregasındaki yassılaştırmanın balast tabakasını kirletici bir unsur olabileceğine işaret eden bu bulgu, Şekil 5.5'te ifade edilen küresellik katsayısı – dayanım ilişkisi ile paralellik arz etmektedir.

Tek tane deneylerinde çekiç düşme sayısı 15 ile sabit tutulmuştur. Sabit tutulan düşüş sayısının artırılması ve agregalar üzerinde tekrarlanan eksenel yükler sonucu meydana gelen dinamik etki şiddeti de bu çalışmada araştırılmıştır. Ancak düşüş sayısının artırılması ile havan içinde kompaktlaşan parçalanmış taneler deney esnasındaki parçalanma mekanizmasının gelişmesini engellemekte, ince taneler iri taneleri adeta çevreleyerek iri tanelerin parçalanmasını engelleyici bir tampon görevi görmektedir. Bu sebepten tek tane deneyleri sadece 15 düşüş sayısı baz alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.4  $\psi$  ile  $FI_{TT}$  arasındaki doğrusal azalan ilişkiler.

## 6.2.2. Farklı devir sayılarındaki Los Angeles aşınma deneyleri

Temsili donma – çözünme döngüsünün uygulanmadığı ( $N_{f-m} = 0$ ) ve farklı devir sayılarında ( $N_{rev} = 3000$  devire kadar) gerçekleştirilen LAA deneylerinde her bir deneyden sonra balast agregalarına ait LAA ve LAA deneyleri sonrası elde edilen kirlenme indeksi ( $FI_{LAA}$ ) değerleri belirlenerek, balast agregalarının uzun dönem aşınma durumları araştırılmıştır. Los Angeles aşınma kaybı deneyleri sonra elde edilen  $FI_{LAA}$  değerleri Eşitlik 3.1 ile belirlenmiştir.

Farklı  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deney sonuçları toplu olarak Çizelge 6.8'de verilmiştir. Çizelge 6.8'e göre her iki kaya türü için  $N_{rev} = 1000$  koşulundaki ortalama LAA değerleri baz alındığında,  $N_{rev} = 500$  koşulunda Ilıca bazaltik kayalarında LAA değeri ortalama %24 azalırken,  $N_{rev} = 3000$  koşulunda ise LAA ortalama %48 artmaktadır. Kayadibi ultra-bazik kayaları için  $N_{rev} = 500$  koşulunda LAA değeri ortalama %37 azalırken,  $N_{rev} = 3000$  koşulunda ise LAA değeri ortalama %83 artmaktadır.

**Çizelge 6.8** Artan  $N_{rev}$  koşullarında LAA değerindeki değişim.

LAA (%)	Ilıca bazaltik kayalar				LAA (%)	Kayadibi ultra-bazik kayalar			
	Devir sayısı, $N_{rev}$					Devir sayısı, $N_{rev}$			
	500	1000	2000	3000		500	1000	2000	3000
$\bar{x}$	9.62	12.72	15.01	18.82	$\bar{x}$	6.88	10.91	13.79	19.95
s.s	0.66	0.96	0.73	0.91	s.s	0.29	0.33	0.65	0.45
n	5	5	5	5	N	5	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, LAA: Los Angeles aşınma kaybı.

Farklı  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri sonucunda elde edilen kırılmış agrega örnekleri elek analizine tabi tutulmuş ve her bir  $N_{rev}$  koşuluna ait kirlenme indeksi  $FI_{LAA}$  belirlenmiştir (Çizelge 6.9). Çizelge 6.9'a göre  $N_{rev} = 1000$  koşulundaki ortalama  $FI_{LAA}$  değeri baz alındığında,  $N_{rev} = 500$  koşulunda Ilıca bazaltik kayalarında  $FI_{LAA}$  değeri ortalama %16 azalırken,  $N_{rev} = 3000$  koşulunda ise  $FI_{LAA}$  ortalama %81 artmaktadır.

Kayadibi ultra-bazik kayaları için  $N_{rev} = 500$  koşulunda  $FI_{LAA}$  değeri ortalama %18 azalırken,  $N_{rev} = 3000$  koşulunda ise  $FI_{LAA}$  değeri ortalama %68 artmakta olup, farklı  $N_{rev}$  koşullarında LAA ve  $FI_{LAA}$  değerlerindeki değişim Şekil 6.5'te toplu olarak verilmektedir.

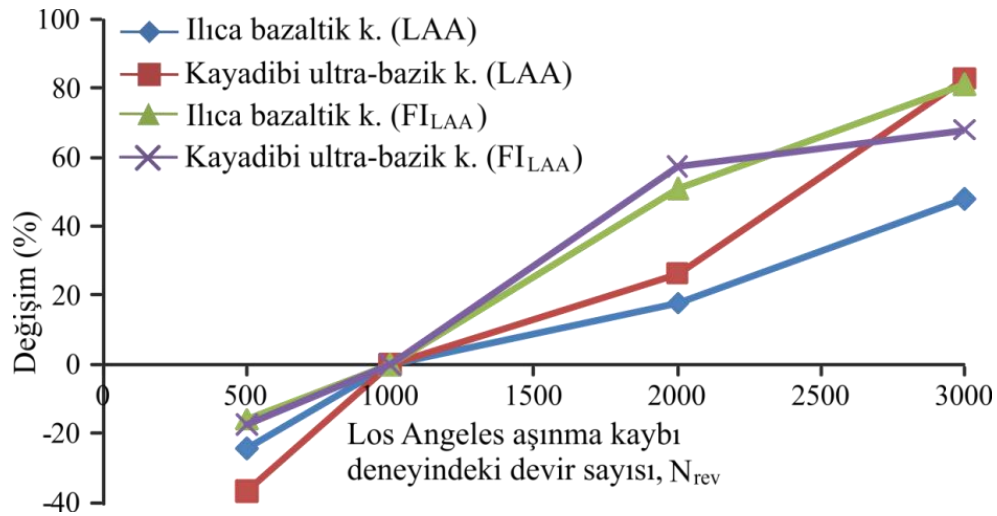
**Çizelge 6.9** LAA deneylerinden elde edilen  $FI_{LAA}$  değerleri.

İlıca bazaltik kayaçları					Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
$FI_{LAA}$ (%)	Devir sayısı, $N_{rev}$				$FI_{LAA}$ (%)	Devir sayısı, $N_{rev}$			
	500	1000	2000	3000		500	1000	2000	3000
$\bar{x}$	13.62	16.17	24.38	29.26	$\bar{x}$	10.04	12.17	19.14	20.45
s.s	2.25	1.54	3.23	2.64	s.s	0.74	1.17	1.05	2.90
n	5	5	5	5	n	5	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $FI_{LAA}$ : Los Angeles aşınma kaybı deneyleri sonrası elde edilen kirlenme indeksi

Temsili donma – çözünme döngüsünün uygulanmadığı ( $N_{ft-m} = 0$ ), ancak  $N_{rev}$  koşullarının artırıldığı LAA deney sonuçlarına göre,  $N_{rev} = 2000$  koşulundan itibaren Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında LAA değeri oransal olarak İlıca bazaltik kayaçlarından daha fazla artmıştır. Ancak bu durum  $FI_{LAA}$  açısından değişkendir. Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında  $N_{rev} = 2000$  koşulunda  $FI_{LAA}$  değişimi ortalama %58 artarken, İlıca bazaltik kayaçları  $FI_{LAA}$  değişimindeki ortalama artış %51'dir.  $N_{rev} = 3000$  koşulunda ise Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında  $FI_{LAA}$  değişimi ortalama %68 artarken, İlıca bazaltik kayaçları için  $FI_{LAA}$  değişimi ortalama %81 artmaktadır (Şekil 6.6).

Bu bulgu,  $N_{rev} = 3000$  koşulunda İlıca bazaltik kayaçlarında aşınma morfolojisinin daha ziyade ufalanma ve nispeten yaprağımsı dökülmeler şeklinde gerçekleştiğini, Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise aşınma morfolojinin daha ziyade balast agregasının yuvarlanma esnasında ufak tanelerin koparak parçalanması şeklinde gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir.



**Şekil 6.5** Artan  $N_{rev}$  koşullarında balast agregalarında LAA ve  $FI_{LAA}$  değerlerindeki değişim.

Söz konusu kayaçların mineralojik bileşimleri dikkate alındığında (Bkz. Çizelge 4.19), Ilıca bazaltik kayaçlarında hamur fazı veya volkanik cam olarak tanımlanan ve mineralleri bağlayıcı özellikte olan bağlayıcı yapı oransal olarak Kayadibi ultra-bazik kayaçlardan ortalama 6.5 kat daha fazladır. İnce taneli bu bağlayıcı hamur fazındaki artış, iki farklı kaya türüne ait aşınma morfolojileri üzerinde etkili olabilir.

$N_{rev} = 1000$  koşulunda elde edilen ortalama LAA değerleri ile (Bkz. Çizelge 6.8) TS 7043 EN 13450 şartnamesinde ifade edilen  $LAA \leq \%14$  değeri karşılaştırıldığında, Ilıca bazaltik kayaçları için elde edilen LAA duraylılığı açısından duraylılık derecesi FS değeri olarak Eşitlik 6.3'de, Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise Eşitlik 6.4'de verilmiştir.

Ilıca bazaltik kayaçları için Los Angeles aşınma deneyinde  $N_{ft-m} = 0$  ve  $N_{rev} = 1000$  koşullarına göre elde edilen FS:

$$FS_{(LAA)} = \frac{14.00 \text{ (Şartnamedeki limit değer)}}{12.72 \text{ (Elde edilen ortalama değer)}} = 1.10 \quad (6.3)$$

Kayadibi ultra-bazik kayaçları için Los Angeles aşınma deneyinde 1000 devir sayısı ve  $LAA \leq \%14$  sınır değerine göre elde edilen FS:

$$FS_{(LAA)} = \frac{14.00 \text{ (Şartnamedeki limit değer)}}{10.91 \text{ (Elde edilen ortalama değer)}} = 1.28 \quad (6.4)$$

Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4'e göre, Ilıca bazaltik ve Kayadibi ultra-bazik kayaçları için LAA duraylılığı açısından elde edilen ortalama FS değerleri sırasıyla 1.10 ve 1.28 olarak belirlenmiştir. Genel olarak  $N_{ft-m} = 0$  ve  $N_{rev} = 1000$  koşulunda LAA duraylılığı açısından Kayadibi ultra-bazik kayaçları Ilıca bazaltik kayaçlarından daha iyi durumdadır. Ancak artan  $N_{rev}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında parçalanma derecesi oransal olarak Ilıca bazaltik kayaçlarından daha yüksektir.

Bu bulgu artan trafik yüklerinde Kayadibi ultra-bazik kayaçlarından üretilen balast agregalarının Ilıca bazaltik kayaçlarından üretilen balast agregalarına kıyasla daha fazla aşınma ve parçalanmaya uğrayacağı şeklinde yorumlanabilir. Ancak  $N_{rev}$  değerlerindeki artışın temsili trafik yüklerini hangi derecede ifade ettiğinin ortaya konulması gerekmektedir.

### 6.3. ÇEVRESEL VE MEKANİK KOŞULLARIN BERABER DEĞERLENDİRİLMESİ

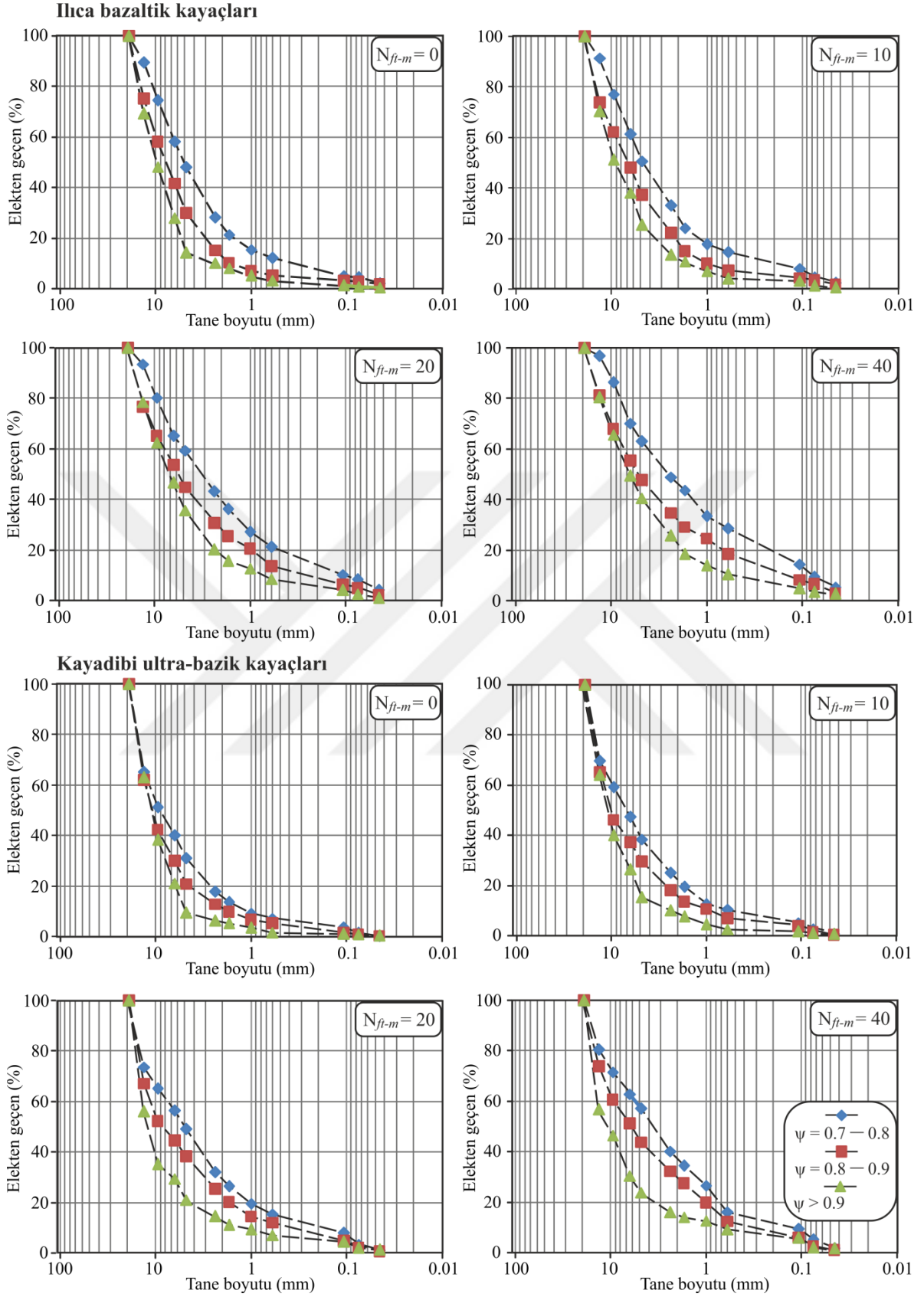
Laboratuvar ortamında farklı çevresel ve mekanik koşulların ayrı ayrı benzetimleri yapılmış ve her iki değiştirgenin de balast agregası üzerindeki olumsuz etkileri ortaya konmuştur. Ancak tren hattının yıl boyu hizmet vermesi, balast agregasının aşınma ve parçalanma süreçlerinin araştırılmasında bu iki değiştirgenin beraber değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Balast agregaları önce farklı  $N_{ft-m}$  döngülerinde gerçekleştirilen magnezyum sülfat don kaybı deneylerine tabi tutulmuş daha sonra aynı balast agregaları kullanılarak LAA ve tek tane deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylece çevresel ve mekanik etkilerin balast agregası üzerine olan etkileri beraber değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen tek tane deneylerinde de daha önce ilgili bölümlerde ifade edilen üç farklı küresellik katsayısındaki ( $\psi = 0.7 - 0.8$ ,  $0.8 - 0.9$  ve  $> 0.9$ ) balast agregaları kullanılmış ve farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında gerçekleştirilen tek tane deneylerinde balast agregalarında gerçekleşen parçalanma ayrıntılı elek analizleri ile araştırılmıştır.

Şekil 6.6'da farklı şekilsel özellikte ve  $N_{ft-m}$  koşullarında gerçekleştirilen tek tane deneylerinden elde edilen tipik tane boyu dağılım eğrileri görülmektedir. Şekil 6.6'ya göre tek tane deneylerinde balast agregasında gerçekleşen parçalanmanın derecesi  $\psi$  ve  $N_{ft-m}$  koşullarına göre değişmektedir. Diğer bir ifade ile  $\psi$  değerinin azalması ve  $N_{ft-m}$  koşullarının artması ile tek tane deneylerinde balast agregasındaki parçalanma artmaktadır.

Şekil 6.6'daki tane boyutu dağılım eğrilerine göre, Ilıca bazaltik kayalarında  $N_{ft-m} = 0$  koşulu ve  $\psi = 0.7 - 0.8$  geometrik özelliğine sahip balast agregası üzerinde gerçekleştirilen tek tane deneyinden elde edilen tane boyu dağılım eğrisinde derecelenme katsayısı ( $C_{uTT} = d_{60}/d_{10}$ ) 13.80 iken, aynı şekilsel özellikte ve  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda  $C_{uTT}$  değeri 54.55 olarak belirlenmiştir. Şekilsel özelliği  $\psi > 0.9$  olan balast agregalarında  $N_{ft-m} = 0$  koşulunda  $C_{uTT}$  5.81,  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda ise  $C_{uTT}$  16.30 olarak belirlenmiştir.

Kayadibi ultra-bazik kayaları için  $N_{ft-m} = 0$  koşulu ve  $\psi = 0.7 - 0.8$  geometrik özelliğine sahip balast agregası üzerinde gerçekleştirilen tek tane deneyinden elde edilen tane boyu dağılım eğrisinde derecelenme katsayısı  $C_{uTT}$  8.73 iken, aynı şekilsel özellikte ve  $N_{ft-m} = 40$  koşulunda  $C_{uTT} = 16.77$  olarak belirlenmiştir.



**Şekil 6.6** Farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında gerçekleştirilen tek tane deney sonuçlarından elde edilen tipik tane boyu dağılım eğrileri.

Küresellik katsayısı  $\psi > 0.9$  ve  $N_{ft-m} = 0$  koşulunda ise ultra-bazik kayalardan üretilen balast agregasında  $C_{uTT}$  değeri 5.37, aynı şekilsel özellikte ve  $N_{ft-m} = 40$  koşulundaki balast agregasında ise  $C_{uTT}$  değeri 19.04 olarak belirlenmiştir

Ancak tek tane deneylerinde gerçekleşen parçalanma olayında yukarıda ifade edilen değiştirgelerin ( $\psi$  ve  $N_{ft-m}$ ) hangisinin daha baskın olduğunun belirlenmesi için, tek tane deneyine tabi tutulan balast agregalara ait  $\psi$  değeri ve farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında elde edilen  $C_{uTT}$  değerlerinin istatistiksel analizi yapılmıştır.

Her bir kaya türü için üç farklı şekilsel grup ve dört farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında toplam 120 adet tek tane deneyi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen deney sonuçlarına ait veriler Çizelge 6.10'da görülmektedir.

**Çizelge 6.10** Tek tane deney sonuçlarından elde edilen  $C_{uTT}$  değerlerinin değişimi.

Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$	$C_{uTT}$	Ilıca bazaltik kayalaları			Kayadibi ultra-bazik kayalaları			
		Küresellik katsayısı, $\psi$			Küresellik katsayısı, $\psi$			
		0.7 – 0.8	0.8 – 0.9	> 0.9	0.7 – 0.8	0.8 – 0.9	> 0.9	
0	$\bar{x}$	15.55	7.88	5.52	$\bar{x}$	8.33	6.77	3.69
	s.s	3.68	2.07	1.70	s.s	2.42	0.94	1.15
	n	5	5	5	n	5	5	5
10	$\bar{x}$	21.59	13.94	8.45	$\bar{x}$	14.36	10.68	7.18
	s.s	4.59	4.99	1.67	s.s	3.60	1.58	2.40
	n	5	5	5	n	5	5	5
20	$\bar{x}$	34.32	28.23	15.82	$\bar{x}$	25.77	19.37	10.2
	s.s	5.55	3.08	3.91	s.s	5.91	4.40	1.68
	n	5	5	5	n	5	5	5
40	$\bar{x}$	46.02	42.32	19.18	$\bar{x}$	38.49	23.89	14.74
	s.s	6.14	5.54	3.64	s.s	3.67	3.90	3.27
	n	5	5	5	n	5	5	5

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $C_{uTT}$ : Tek tane deneylerinden elde edilen derecelenme katsayısı

Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda iki farklı kaya türünde  $C_{uTT}$  değerinin değişimi iki değişkenli doğrusal fonksiyonlar olarak tanımlanmış ve tek tane deneylerindeki parçalanma olayında dikkate alınan değiştirgelerin etki derecesi, istatistiksel analizler sonucu geliştirilen iki değişkenli doğrusal modele ait "Beta katsayısı, ( $\beta$ )" değerlerinin belirlenmesi ile araştırılmıştır.



Beta katsayısı, çok değişkenli doğrusal modellerde hangi bağımsız değiştirgenin bağımlı değiştirge üzerinde etkili olduğunun belirlenmesi amacıyla kullanılmış olup, bu katsayı R programı (Versiyon 3.4.3) kullanılarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.10'da özetlenen verilerin kullanılması ile gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda Ilica bazaltik kayalar için  $C_{UTT}$ 'nin değişimi Eşitlik 6.5, Kayadibi ultra-bazik kayalar için ise Eşitlik 6.6 ile açıklanabilir.

$$C_{UTT} = 82.34 - 86.17\psi + 0.66N_{ft-m}, R^2 = 0.82 \quad (6.5)$$

$$C_{UTT} = 52.53 - 54.60\psi + 0.48N_{ft-m}, R^2 = 0.72 \quad (6.6)$$

Eşitlik 6.5 ve Eşitlik 6.6'ya ait istatistiksel analiz sonuçları Çizelge 6.11'de verilmiştir. Çizelge 6.11'de verilen  $\beta$  katsayısı değerlerine göre, her iki kaya türü için de geçerli olmak kaydı ile, tek tane deneylerinde balast agregasının parçalanmasında temsili donma – çözünme döngüsü küresellik katsayısından daha fazla bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

**Çizelge 6.11** Eşitlik 6.5 ve Eşitlik 6.6'ya ait istatistiksel analiz sonuçları.

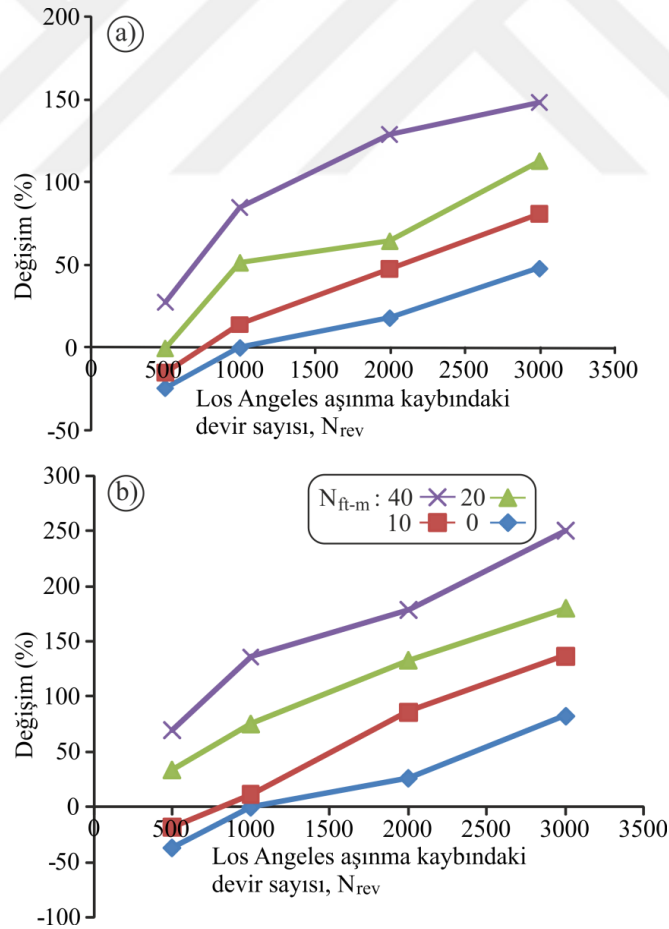
Eşitlik No	Bağımsız değişken	Değer	Standart hata	t değeri	$\beta$ katsayısı	F değeri	$R^2$
6.5	Sabit	82.34	7.80	10.55	–	136.8	0.82
	$\psi$	-86.17	9.16	-9.41	-0.51		
	$N_{ft-m}$	0.66	0.050	13.20	0.74		
6.6	Sabit	52.54	7.34	7.16	–	75.82	0.72
	$\psi$	-54.59	8.63	-6.32	-0.44		
	$N_{ft-m}$	0.48	0.047	10.22	0.71		

Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deney sonuçları Çizelge 6.12'de verilmiş olup, Çizelge 6.12'den artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında LAA değeri belirgin olarak arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 6.7'de  $N_{ft-m} = 0$  ve  $N_{rev} = 1000$  koşulunda elde edilen LAA değerleri baz alınarak, farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında ait LAA değerlerindeki değişimler görülmektedir. Buna göre Ilica bazaltik kayalar için  $N_{ft-m} = 40$  ve  $N_{rev} = 3000$  koşullarında LAA değeri ortalama %148 artarken, Kayadibi ultra-bazik kayalarında  $N_{ft-m} = 40$  ve  $N_{rev} = 3000$  koşullarında LAA ortalama %250 artmaktadır. Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarındaki diğer artış oranları da Şekil 6.7'de görülmektedir.

**Çizelge 6.12** Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deney sonuçları.

Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$	İlca bazaltik kayaçları					Kayadibi ultra-bazik kayaçları				
	LAA (%)	Devir sayısı, $N_{rev}$				LAA (%)	Devir sayısı, $N_{rev}$			
		500	1000	2000	3000		500	1000	2000	3000
0	$\bar{x}$	9.62	12.72	15.01	18.82	$\bar{x}$	6.88	10.91	13.79	19.95
	s.s	0.66	0.96	0.73	0.91	s.s	0.29	0.33	0.65	0.45
	n	5	5	5	5	n	5	5	5	5
10	$\bar{x}$	10.83	14.52	18.76	23.02	$\bar{x}$	8.94	12.22	20.32	25.88
	s.s	0.98	1.64	1.91	2.19	s.s	0.68	1.14	1.15	1.24
	n	5	5	5	5	n	5	5	5	4
20	$\bar{x}$	12.70	19.25	20.90	27.03	$\bar{x}$	14.62	19.16	25.46	30.60
	s.s	0.67	1.20	1.52	2.40	s.s	1.80	1.77	1.74	1.07
	n	5	4	4	4	n	5	4	4	4
40	$\bar{x}$	16.21	23.50	29.07	31.56	$\bar{x}$	18.50	25.75	30.37	38.23
	s.s	1.22	1.90	2.67	1.61	s.s	1.88	2.24	3.47	2.28
	n	5	4	3	3	n	5	3	3	3

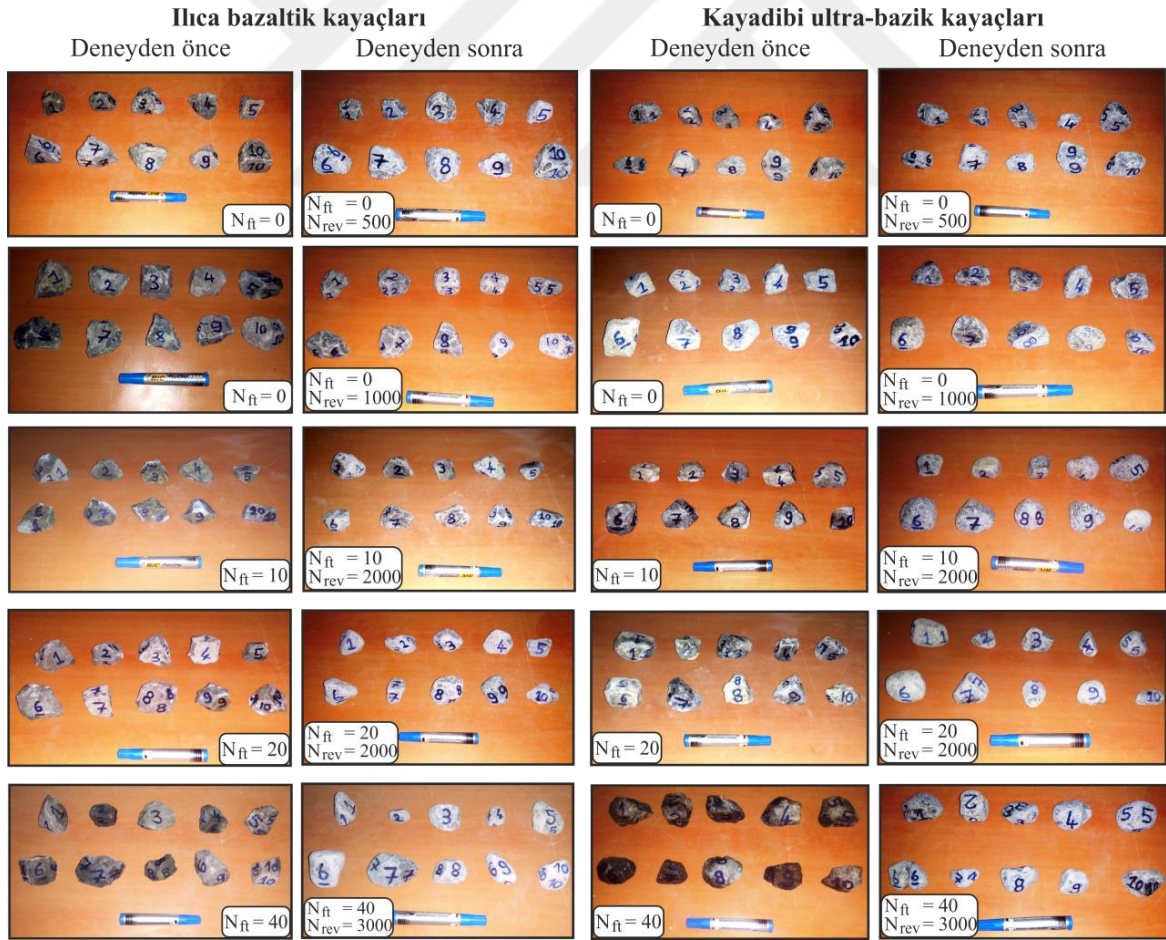
Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı, LAA: Los Angeles aşınma kaybı



**Şekil 6.7** Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında LAA değerlerindeki değişim a) İlca bazaltik kayaçları b) Kayadibi ultra-bazik kayaçları.

Ayrıca farklı  $N_{ft-m}$  koşullarına tabi tutulmuş balast agregalarından farklı küresellik katsayılarında 10 adet balast agregası silinmez kalemle işaretlenmiş ve daha sonra LAA deneyleri gerçekleştirilmiştir. LAA deneylerinden sonra işaretlenmiş agregalar incelenerek bu agregalardaki aşınma türleri ve miktarları gözlemlenmiştir.

LAA deneyleri esnasında farklı  $N_{ft-m}$  döngülerine tabi tutulmuş ve silinmez kalemle işaretlenmiş balast agregalarındaki morfolojik değişimler Şekil 6.8'de verilmiştir. Deneyler esnasında yapılan gözlem ve Şekil 6.8'de verilen morfolojik değişimler göz önünde bulundurulduğunda,  $N_{ft-m} = 20$  ve  $N_{rev} = 2000$  koşullarına kadar balast agregalarındaki aşınma türü daha ziyade yuvarlanma ve dökülmeler şeklinde gözlenirken, bu koşullar aşıldığında kayaçtaki aşınma türü parçalanmaya doğru bir geçiş göstermektedir. Söz konusu bu koşullar aşıldığında işaretlenmiş agregaların ilksel morfolojilerinin önemli ölçüde değiştiği ve balast agregalarının farklı yerlerine rakam ve işaretler konulmasına rağmen tanımlanmalarının güçleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8 LAA deneyleri sonrası bazı balast agregalarındaki morfolojik değişimler (Köken vd. 2018)

Diğer taraftan, farklı  $\psi$  değerlerine sahip işaretlenmiş balast agregalarda LAA deneyleri sonrası ağırlık kayıpları incelendiğinde,  $\psi$  değeri ile ağırlık kaybı arasında bir anlamlı ilişki belirlenmemiştir. Ancak balast agregalarında artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında ciddi morfolojik değişimlerin olduğunu söylemek mümkündür (Bkz. Şekil 6.8).

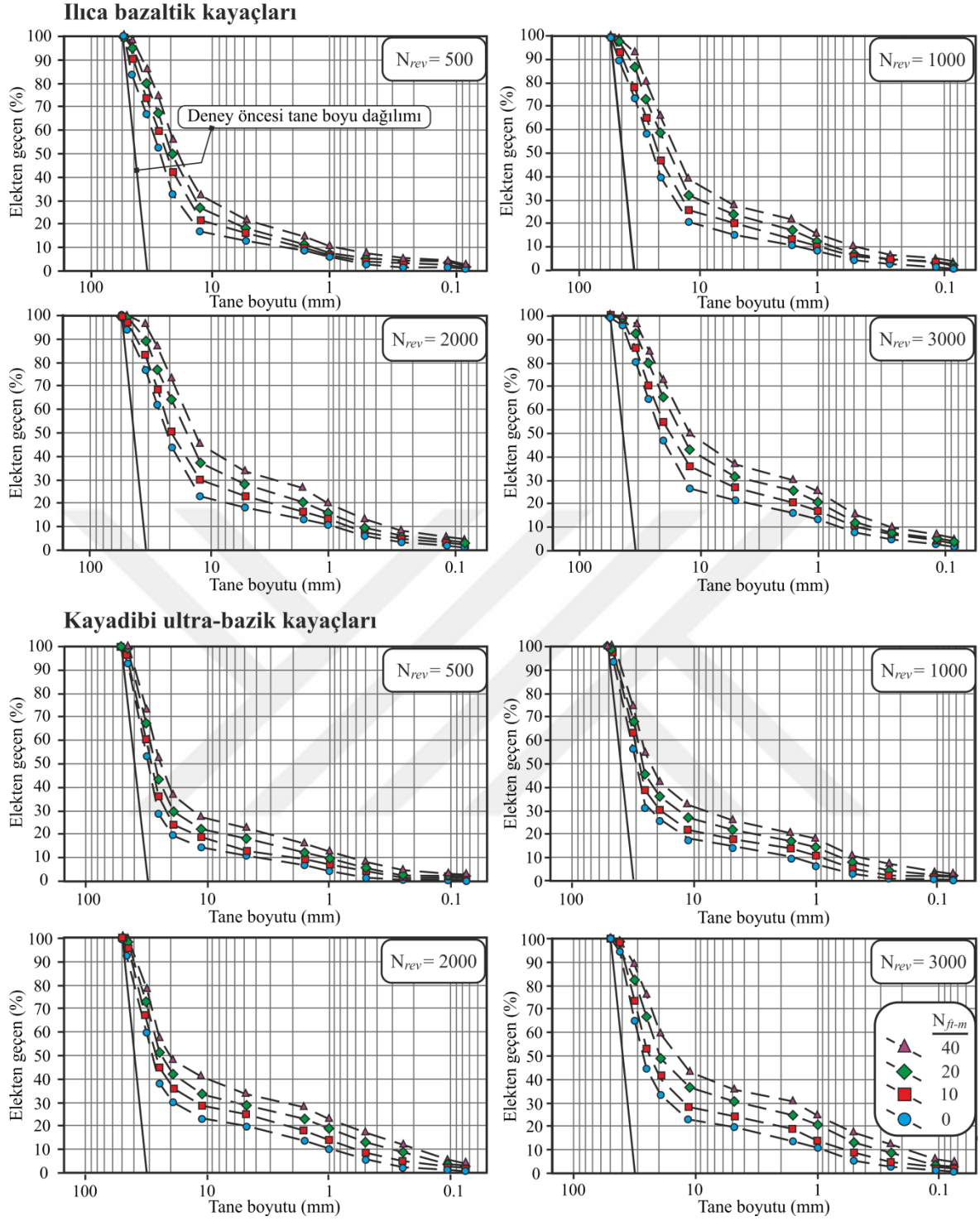
LAA deneylerinden sonra meydana gelen parçalanmış agregalar üzerinde ayrıntılı tane boyutu analizleri gerçekleştirilmiş, farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarının balast agregasındaki parçalanma derecesi üzerine olan etkileri tane boyutu dağılım eğrileri kullanılarak araştırılmıştır. Şekil 6.9'a göre artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında tane boyutu dağılım eğrilerindeki bu değişim, tıpkı tek tane deneylerinde olduğu gibi balast agregalarındaki derecelenme katsayısının artması şeklindedir. LAA deneyleri sonrasında gerçekleştirilen elek analizler sonucunda elde edilen derecelenme katsayısı ( $C_{uLAA}$ ) değerleri Çizelge 6.13'te verilmiştir.

**Çizelge 6.13** Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri sonrası elde edilen  $C_{uLAA}$  değerleri.

Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$	$C_{uLAA}$	İlca bazaltik kayalar				Kayadibi ultra-bazik kayalar				
		Devir sayısı, $N_{rev}$				Devir sayısı, $N_{rev}$				
		500	1000	2000	3000	500	1000	2000	3000	
0	$\bar{x}$	8.65	14.54	17.25	29.43	$\bar{x}$	8.07	15.66	24.24	33.10
	s.s	2.29	3.23	4.84	7.02	s.s	0.96	2.79	3.71	2.37
	n	5	5	5	5	n	5	5	5	5
10	$\bar{x}$	11.09	19.04	29.56	37.10	$\bar{x}$	13.32	25.31	40.69	47.01
	s.s	2.90	3.56	4.42	6.18	s.s	2.72	5.01	3.73	5.42
	n	5	5	5	5	n	5	5	5	4
20	$\bar{x}$	18.12	26.18	34.17	42.63	$\bar{x}$	29.21	45.08	76.71	83.54
	s.s	2.54	4.29	1.96	2.54	s.s	6.72	4.12	10.20	8.61
	n	5	4	4	4	n	5	4	4	4
40	$\bar{x}$	29.88	36.26	41.43	60.40	$\bar{x}$	50.18	73.86	116.00	124.52
	s.s	3.84	4.19	3.92	0.88	s.s	8.77	11.36	10.92	14.28
	n	5	4	3	3	n	5	3	3	3

Açıklamalar:  $\bar{x}$ : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $C_{uLAA}$ : LAA deneyleri sonrası elde edilen derecelenme katsayısı.

Derecelenme katsayısındaki artış balast tabakasındaki kirletici bir unsur olarak düşünüldüğünde, farklı iklimsel ve trafik yüklerine maruz kalacak balast agregasının seçiminde  $C_{uLAA}$  değeri bir kriter olarak değerlendirilebilir.



**Şekil 6.9** LAA deneyleri sonucu bazı balast agregalarının tane boyutu dağılım eğrilerindeki değişimi (Köken vd. 2018).

Ancak  $C_{uLAA}$  değerinin değişimine etki eden bu iki değiştirgenin ( $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$ ) hangisinin daha baskın olduğunu belirlemek adına tıpkı tek tane deneylerinde olduğu gibi bir istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen istatistiksel analizlerde Çizelge 6.13'te özet olarak verilen değerler kullanılmış olup,  $C_{uLAA}$ 'nın değişimi  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$ 'in bir fonksiyonu olarak Ilıca bazaltik kayaçları için Eşitlik 6.7, Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise Eşitlik 6.8 ile ifade edilmiştir.

$$C_{uLAA} = 2.28 + 0.61N_{ft-m} + 0.0095N_{rev}, R^2 = 0.88 \quad (6.7)$$

$$C_{uLAA} = -10.94 + 1.75N_{ft-m} + 0.0183N_{rev}, R^2 = 0.86 \quad (6.8)$$

Eşitlik 6.7 ve Eşitlik 6.8'e ait istatistiksel analiz sonuçları Çizelge 6.14'te verilmiştir. Çizelge 6.14'deki  $\beta$  katsayıları incelendiğinde, Ilıca bazaltik kayaçları için  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  bağımsız değiştirgeleri  $C_{uLAA}$  üzerine yakın etkiler göstermekle birlikte,  $N_{rev}$   $C_{uLAA}$  üzerinde biraz daha etkilidir. Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise  $N_{ft-m}$   $C_{uLAA}$  üzerinde daha etkilidir.

Genel itibari ile Ilıca bazaltik kayaçlarına kıyasla Kayadibi ultra-bazik kayaçları  $N_{ft-m}$  koşullarından daha fazla etkilenmekte olup, bu bulgu daha önce ifade edilen sonuçlar ile (Bkz. Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.7) uyum içerisindedir.

**Çizelge 6.14** Eşitlik 6.7 ve Eşitlik 6.8'e ait istatistiksel analiz sonuçları.

Eşitlik No	Bağımsız değişken	Değer	Standart hata	t değeri	$\beta$ katsayısı	F değeri	$R^2$
6.7	Sabit	2.28	1.16	1.96	–	283.8	0.88
	$N_{ft-m}$	0.61	0.035	17.42	0.67		
	$N_{rev}$	0.0095	0.0005	19.00	0.72		
6.8	Sabit	-10.94	3.12	3.50	–	227.7	0.86
	$N_{ft-m}$	1.75	0.098	17.85	0.78		
	$N_{rev}$	0.0183	0.0014	13.07	0.55		

Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri sonucunda kirlenme indeksi değerlerinin ( $FI_{LAA}$ ) değişimi de araştırılmış olup elde edilen  $FI_{LAA}$  değerleri Çizelge 6.15'te verilmiştir.  $N_{ft-m} = 0$  ve  $N_{rev} = 1000$  koşullarında elde edilen  $FI_{LAA}$  değerleri baz alındığında, Ilıca bazaltik kayaçlarında  $N_{ft-m} = 40$  ve  $N_{rev} = 3000$  koşullarında  $FI_{LAA}$  ortalama %81 artarken, aynı koşullarda Kayadibi ultra-bazik kayaçlarında  $FI_{LAA}$  ortalama %68 artmıştır. Artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında Ilıca bazaltik kayaçlarında  $FI_{LAA}$  değerinin daha fazla bir artış göstermesindeki sebebin tane boyutu ve mineralleri bağlayıcı özellikteki hamur fazının fazlalığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Balast tabakasındaki sıkılama ve diğer işlemlerin eşit koşullarda gerçekleştiği düşünüldüğünde balast tabakasındaki oturmaların balast kalitesi, farklı çevresel ve mekanik koşullar altında ile ters orantılı şekilde gelişeceği söylenebilir. Bu anlamda  $C_{uLAA}$  ve  $FI_{LAA}$  değerleri laboratuvar ortamında balast kirlenme derecesini net olarak yansıtmaktadır.

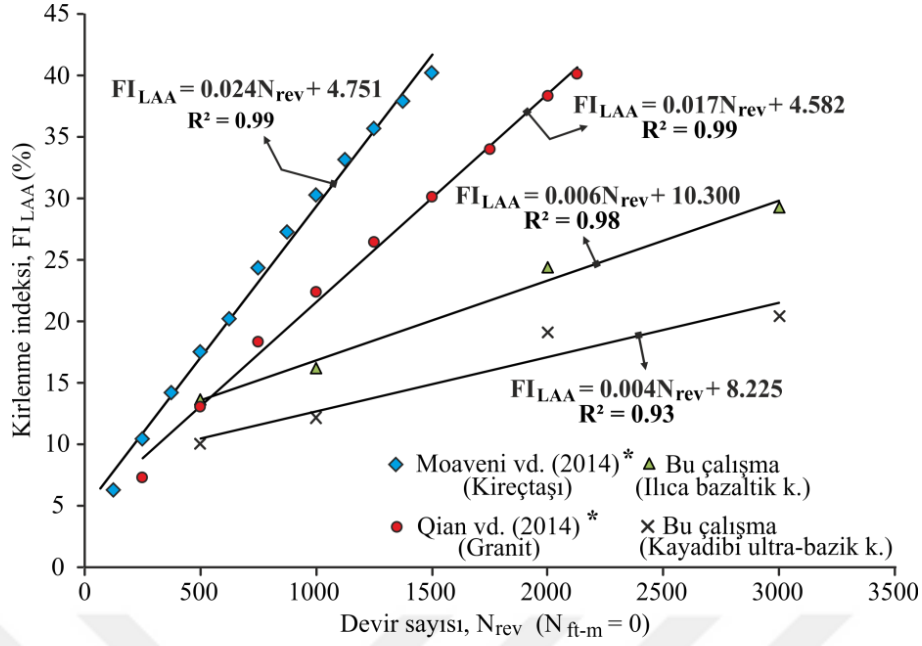
Diğer taraftan  $C_{uLAA}$  ve  $FI_{LAA}$  değerlerindeki artış balast tabakasındaki hidrolik iletkenliği azaltıcı bir unsur olarak ta değerlendirilebilir. FI değerlerinin LAA ve tek tane deneylerindeki değişimi balast agregası seçimi ve kalitesi konusunda da bilgiler verebilir. Şekil 6.10'da farklı balast agrega malzemelerinin  $FI_{LAA}$  değerlerindeki değişimleri yer almaktadır.

Şekil 6.10'a göre LAA deneylerinde artan  $N_{rev}$  ile  $FI_{LAA}$  arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Bu doğrusal ilişkinin eğimi de balast agrega kalitesi hakkında önemli bir ipucu verebilir. Diğer bir ifade ile, bu doğrusal ilişkinin eğimi ne kadar düşüğe balast malzemesinin mekanik etkiler altındaki direncinin o derece fazla olacağı söylenebilir. Balast agregasının uzun dönem performansı LAA deneylerinde farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarındaki parçalanma derecesi açısından dikkate alındığında, Şekil 6.10'da yapılan değerlendirme  $C_{uLAA}$  değerleri için de düşünülebilir.

**Çizelge 6.15** Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri sonrası elde edilen  $FI_{LAA}$  değerleri.

Temsili donma – çözünme döngü sayısı, $N_{ft-m}$	$FI_{LAA}$ (%)	Ilıca bazaltik kayalar				Kayadibi ultra-bazik kayalar				
		Devir sayısı, $N_{rev}$				Devir sayısı, $N_{rev}$				
		500	1000	2000	3000	500	1000	2000	3000	
0	$\bar{x}$	13.62	16.17	24.38	29.26	$\bar{x}$	10.04	12.17	19.14	20.45
	s.s	2.10	2.76	3.55	2.15	s.s	2.44	1.28	1.76	2.39
	n	5	5	5	5	n	5	5	5	5
10	$\bar{x}$	17.66	19.35	26.40	32.73	$\bar{x}$	12.88	20.04	28.04	29.85
	s.s	1.74	3.44	4.11	2.66	s.s	3.07	2.55	1.46	3.47
	n	5	5	5	5	n	5	5	5	4
20	$\bar{x}$	20.63	26.46	29.22	35.15	$\bar{x}$	14.59	23.38	38.16	44.10
	s.s	3.05	1.95	1.53	2.90	s.s	2.18	5.62	4.46	3.09
	n	5	4	4	4	n	5	4	4	4
40	$\bar{x}$	24.62	29.78	37.94	40.39	$\bar{x}$	21.43	35.72	41.26	49.52
	s.s	4.16	2.42	3.67	5.18	s.s	1.57	3.77	2.39	3.30
	n	5	4	3	3	n	5	3	3	3

Açıklamalar:  $\bar{x}$  : Ortalama, s.s: Standart sapma, n: Örnek sayısı,  $FI_{LAA}$ : LAA deneyleri sonrası elde edilen kirlenme indeksi.



\* Veriler ilgili makalelerden alınarak doğrusal ilişkiler oluşturulmuştur.

**Şekil 6.10** Farklı balast agregaları için  $N_{fit-m} = 0$  ve artan  $N_{rev}$  koşullarında  $FI_{LAA}$  değerindeki değişim (Köken vd. 2018)

Araştırma konusu olan bazaltik kayalardan üretilen agregaların hali hazırda ülkemizdeki çeşitli hatlarda konvansiyonel ve hızlı demir yolu hatlarında balast malzemesi olarak kullanıldığı düşünüldüğünde, bu agregaların çevre hatlarda da kullanılması söz konusu olabilir.

Bu açıdan bu balast agregalarına ait LAA ve  $FI_{LAA}$  değerlerinin kestirimini amaçlayan bir dizi istatistiksel analiz gerçekleştirilmiş ve söz konusu bu iki değişirge  $N_{fit-m}$  ve  $N_{rev}$  değişirgelerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

İstatistiksel analizlerde Çizelge 6.12 ve Çizelge 6.15'te özet olarak verilen değerler kullanılmış olup, LAA ve  $FI_{LAA}$  Ilıca bazaltik kayaları için sırasıyla Eşitlik 6.9 ve Eşitlik 6.10, Kayadibi ultra-bazik kayaları için ise sırasıyla Eşitlik 6.11 ve Eşitlik 6.12 kullanılarak belirlenebilir.

Ilıca bazaltik kayaları için;

$$LAA = 6.38 + 0.28N_{fit-m} + 0.0047N_{rev}, R^2 = 0.93 \quad (6.9)$$



$$FI_{LAA} = 11.16 + 0.31N_{ft-m} + 0.0061N_{rev}, R^2 = 0.97 \quad (6.10)$$

Kayadibi ultra-bazik kayaçları için;

$$LAA = 2.98 + 0.39N_{ft} + 0.0063N_{rev}, R^2 = 0.96 \quad (6.11)$$

$$FI_{LAA} = 3.46 + 0.53N_{ft} + 0.0083N_{rev}, R^2 = 0.86 \quad (6.12)$$

Eşitlik 6.9 – 6.12'ye ait istatistiksel analiz sonuçları Çizelge 6.16'da verilmiş olup, bu eşitliklerdeki  $\beta$  katsayıları incelendiğinde, Ilıca bazaltik kayaçları için hem LAA hem de  $FI_{LAA}$   $N_{rev}$  koşullarından daha fazla etkilenmektedir. Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise LAA  $N_{rev}$  koşullarından daha fazla etkilenirken,  $FI_{LAA}$  değerinin ise  $N_{rev}$  ve  $N_{ft-m}$ 'den neredeyse eşit şekilde etkilendiği söylenebilir.

**Çizelge 6.16** Eşitlik 6.9 – 6.12'ye ait istatistiksel analiz sonuçları.

Eşitlik No	Bağımsız değişken	Değer	Standart hata	t değeri	$\beta$ katsayısı	F değeri	$R^2$
6.9	Sabit	6.38	0.97	6.58	–	103.8	0.93
	$N_{ft-m}$	0.28	0.029	9.65	0.65		
	$N_{rev}$	0.0048	0.00044	10.68	0.72		
6.10	Sabit	11.16	0.78	14.3	–	283.3	0.97
	$N_{ft-m}$	0.31	0.023	13.47	0.61		
	$N_{rev}$	0.0061	0.00036	16.95	0.78		
6.11	Sabit	2.98	0.94	3.17	–	207.1	0.96
	$N_{ft-m}$	0.39	0.027	14.45	0.67		
	$N_{rev}$	0.0063	0.00042	15.00	0.72		
6.12	Sabit	3.46	2.59	1.34	–	49.45	0.86
	$N_{ft-m}$	0.53	0.076	6.97	0.66		
	$N_{rev}$	0.0083	0.0011	7.55	0.67		

#### 6.4. GENEL DEĞERLENDİRME

Ülkemizdeki hızlı tren hatlarının nispeten yeni oluşu ve buna bağlı olarak trafik yüklerinin düşük seviyelerde seyretmesi sebebiyle, bu bölümde gerçekleştirilen duraylılık analizleri ağırlıklı olarak çevresel koşulların temsil edilmesi hususu ile gerçekleştirilmiştir.

Farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda,  $N_{ft-m} = 10$  koşulunda TS 7043 EN 13450 şartnamesi uyarınca  $W_0$  tip Kayadibi ultra-bazik kayaçlarından üretilen balast agregaları  $W_0$  tip Ilica bazaltik kayaçlarından üretilen balast agregalarından daha duraylı olduğu sonucuna varılabilir. Ancak ilerleyen  $N_{ft-m}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayaçları fiziksel ve mekanik özellikler açısından Ilica bazaltik kayaçlarından daha fazla etkilenmektedir. Bölüm 6.1’de ifade edildiği gibi bu farklılığın kayaçların mineralojik bileşim ve tane boyutundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu sebepten donma – çözünme döngüsünün yoğun olarak yaşandığı bölgelerdeki balast agregası seçiminde TS 7043 EN 13450 şartnamesindeki teknik özellikler yanı sıra mineralojik bileşim ve tane boyutu kriterlerinin de göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

Trafik yükleri ise tek tane ve farklı devir sayılarında gerçekleştirilen LAA deneyleri ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Tek tane deneylerinde farklı şekilsel özellikteki balast agregalarının parçalanma mekanizmaları araştırılmış ve balast agregalarındaki küresellik katsayısındaki azalma ile agrega parçalanması arasında ters orantılı bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir.

Ancak balast tabakası farklı küresellik katsayılarındaki balast agregalarından oluştuğundan, balast tabakasındaki optimum kenetlenme için gerekli olan balast agregalarına ait şekilsel özelliklerin değişiminin araştırılması önerilmektedir.

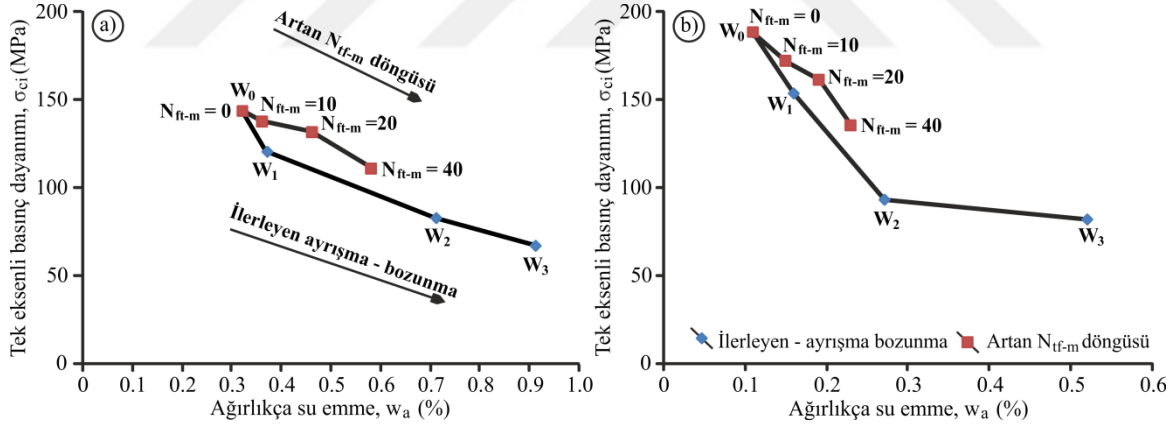
Gerçekleştirilen LAA deneyleri sonucunda artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  ile balast agregasındaki aşınma ve parçalanma önemli ölçüde artmaktadır. Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  döngülerine tabi tutulan balast agregalarındaki duraylılık analizleri ise  $Cu_{LAA}$  ve  $FI_{LAA}$  açısından değerlendirilmiş ve Ilica bazaltik kayaçları için ortalama  $Cu_{LAA}$  değerinin  $N_{rev}$  koşullarından, Kayadibi ultra-bazik kayaçları ise  $N_{ft-m}$  koşullarından daha fazla etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır (Bkz. Çizelge 6.14).

$FI_{LAA}$  açısından yapılan değerlendirmeler ışığında, Ilica bazaltik kayaçlarından üretilen balast agregaları  $N_{rev}$  koşullarından nispeten daha etkilenirken, Kayadibi ultra-bazik kayaçlarından üretilen balast agregalarında  $FI_{LAA}$   $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarından neredeyse eşit şekilde etkilenmektedir (Bkz. Çizelge 6.16).

Burada ifade edilen  $Cu_{LAA}$  ve  $FI_{LAA}$  değerlerindeki değişim, balast tabakası kirlenmesi ve hidrolik iletkenliği üzerine olan araştırmalara dahil edilerek anlamlı sonuçlar elde edilebilir.

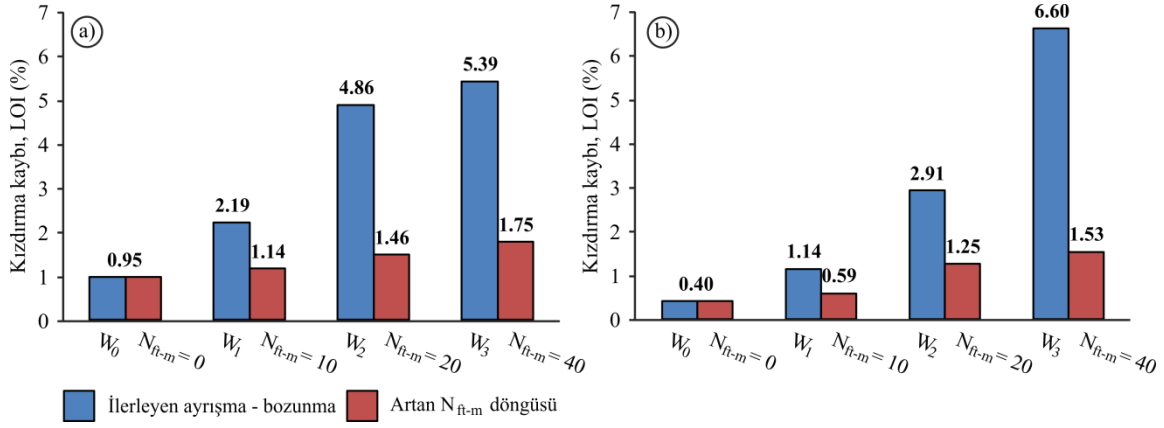
Kaya türü artırılarak gerçekleştirilecek çalışmalar ile sözü edilen bu iki değişirge balast tabakası oturmaları ve drenaj konularında göz önünde bulundurulabilir ve büyük ölçekli plaka yükleme testleri ile agrega kalitesi, balast kirlenmesi ve oturması arasındaki ilişkiler ortaya konabilir.

Bölüm 4’te balast agregalarının üretildiği kaya kütlelerine ilişkin ayrıntılı arazi çalışmalarına yer verilmiş ve ilgili kaya kütleleri ayrışma – bozunma açısından sınıflandırılmıştır. Bu farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinden alınan kaya malzemesi numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar farklı  $N_{ft-m}$  koşullarına maruz bırakılmış deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, doğada gerçekleşen ayrışma – bozunma olayının laboratuvar ortamında gerçekleştirilen magnezyum sülfat don kaybı deneylerinden daha olumsuz etkileri olduğu belirlenmiştir. Örneğin, ilerleyen ayrışma – bozunma sonucunda elde edilen  $\sigma_{ci} - w_a$  veri çiftleri ile artan  $N_{ft-m}$  döngüleri sonucu elde edilen aynı veri çiftleri karşılaştırıldığında, ayrışma – bozunmanın  $N_{ft-m}$  koşullarından daha olumsuz etkilere sahip olduğu daha net bir şekilde ifade edilebilir (Şekil 6.11).



**Şekil 6.11** İlerleyen Ayrışma – bozunma ve  $N_{ft-m}$  koşulları sonucu  $\sigma_{ci} - w_a$  veri çiftindeki değişim a) Ilica bazaltik kayaları b) Kayadibi ultra-bazik kayaları.

Benzer şekilde Bölüm 4’te ifade edilen LOI değerleri (Bkz. Çizelge 4.12) farklı  $N_{ft-m}$  koşulları sonucu elde edilen LOI değerleri ile karşılaştırıldığında (Bkz. Çizelge 6.4), ilerleyen ayrışma – bozunmanın  $N_{ft-m}$  koşullarından daha belirgin bir şekilde LOI değerini artırdığı görülmektedir (Şekil 6.12).



**Şekil 6.12** LOI değerlerinin karşılaştırılması a) Ilica bazaltik kayaları b) Kayadibi ultra-bazik kayaları.

Bu sebepten agrega kalitesini artırmada başvurulacak ilk yol, üretimden önceki saha çalışmalarında farklı ayrışma – bozunma içeren birimlerin yanal ve düşey sınırlarının sağlıklı bir şekilde belirlenmesi ve haritalanmasıdır. Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki bu yapısal bölgelerden üretilecek kaya ve agrega malzemelerinin özellikleri belirlenerek agregaların kullanım alanları doğru bir şekilde belirlenmelidir.

Böylece üretilecek agregalar kullanım alanlarına uygun olacak şekilde servis edilecek ve agregalardan üst düzeyde performans sağlamak mümkün olacaktır.

Arazi çalışmalarında farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri, hat etütlerinde belirlenen kaya kütle ve malzemesi özellikleri tanımlanarak (Bkz. Çizelge 4.4 – 4.8) ortaya konmuş, farklı ayrışma – bozunma içeren birimlere ait temel fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Ancak kaya kütleleri her zaman farklı yapısal bölgeler teşekkül edecek şekilde bulunmayabilir. Bu durumlarda farklı yapısal bölgeler birbirine yanal ve düşey geçişler gösterebilir.

Balast agregası üretimi açısından W<sub>0</sub> ve W<sub>1</sub> tip kaya kütlelerinin beraber değerlendirildiği durumlar düşünüldüğünde, bu bölgelerden üretilecek agregalara ait değerler W<sub>0</sub> ve W<sub>1</sub> tipteki elde edilecek değerlerin arasında kalacaktır. Arazi ve laboratuvar çalışmalarının değerlendirildiği Bölüm 5’te her iki kaya türü için 31.5 – 50.0 mm boyut grubundaki W<sub>0</sub> tip agregaların balast agregası olarak kullanılabilir nitelikte olduğu, W<sub>1</sub> tipteki üretilen 31.5 – 50.0 mm boyut grubundaki agregaların ise TS 7043 EN 13450 şartnamesinde ifade edilen değerlere çok yakın değerler sunduğu belirlenmiştir.

Bu anlamda  $W_0$  ve  $W_1$  tipindeki kaya kütlelerinin beraber değerlendirildiği arazi çalışmalarında üretilecek agrega özelliklerinin TS 7043 EN 13450 şartnamesindeki limit değerler dahilinde kalacağı sonucuna ulaşılabilir. Ancak  $W_1$  ile  $W_2$  tip kaya kütleleri arasındaki yanal ve düşey ayırım dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Aksi durumlarda agrega özelliklerinde ciddi değişimler beklenmelidir.

Diğer dikkat edilmesi gereken husus, balast agregalarının üretileceği kırıcı türünün seçimidir. Bu anlamda istenen şekilsel özellikteki ( $\psi \geq 0.90$ ) balast agregalarının hangi kırıcı ve hangi koşullar altında optimum miktarda üretileceğinin araştırılması yerinde olacaktır. Endüstride balast agregaları çoğunlukla dik milli kırıcılar kullanılarak üretilmektedir ancak bu konular hakkında neredeyse yayımlanmış hiçbir çalışma bulunmamaktadır.

Farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında gerçekleştirilen deneylerde artan  $N_{ft-m}$  koşulları ile  $w_a$  ve  $M_{wl}$  değerlerinde dikkate değişimler olduğu görülmüştür. Buradan kaya malzemesinin  $w_a$  değerinin donma – çözünme olayında önemli bir değişirge olduğu söylenebilir. Diğer bir ifade ile kaya malzemesinde bağlantılı boşlukların artması ile donma – çözünme etkisi altındaki parçalanması da o oranda artacaktır.

Çizelge 6.17'de sodyum sülfat ( $N_{wl}$ , %) ve magnezyum sülfat don kaybı değerlerinin kestirimi için önerilen bazı görgül bağıntılar görülmektedir. Bu görgül bağıntılardan  $M_{wl}$  değerinin  $w_a$  ile ilişkili olduğu sonucuna varılmaktadır.

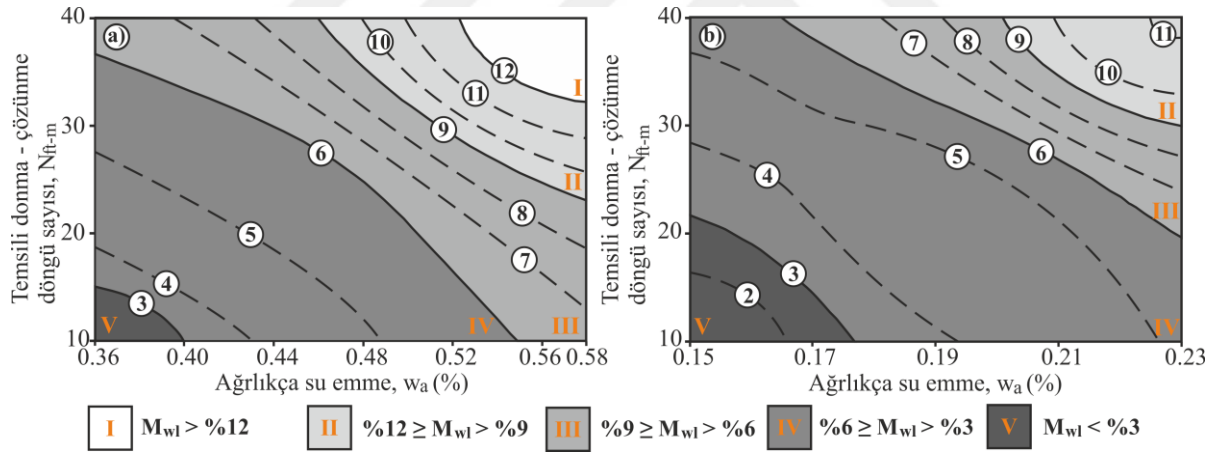
Araştırma konusu olan balast agregalarında artan  $N_{ft-m}$  koşullarında  $w_a$  ve  $M_{wl}$  değeri arasındaki ilişkiyi belirlemek mümkündür. Bu amaçla Çizelge 6.1, 6.2 ve 6.5'te özet olarak verilen değerler kullanılarak  $M_{wl}$  değerinin kestirimi amaçlayan yüzey modelleri geliştirilmiştir. Bu yüzey modellerinde  $N_{ft-m}$  ve  $w_a$  değerleri bağımsız değişirgeler olarak tanımlanmış olup, farklı  $N_{ft-m}$  koşulunda değişen  $w_a$  ve  $M_{wl}$  değerleri beraber değerlendirilmiş ve yüzey modelleri Minitab programı (Versiyon 17.3.1) kullanılarak geliştirilmiştir.

Şekil 6.13'te görülen yüzey modellerinde  $M_{wl}$  değerleri farklı  $N_{ft-m}$  ve  $w_a$  değerlerine göre beş farklı grup altında değerlendirilmiştir. Şekil 6.13'teki yüzey modelleri kullanılarak farklı balast agregalarının değişen  $N_{ft-m}$  koşullarındaki  $M_{wl}$  değerleri tahmin edilebilir.

**Çizelge 6.17** Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat don kaybının kestirimi için önerilen görgül bağıntılar.

Değiştirge	Standart	Kaya türü	Görgül bağıntı	R <sup>2</sup>	Araştırmacı
w <sub>a</sub>	ASTM C88	Kireçtaşı	$N_{wl} = 4.20(w_a) + 1.48$	0.65	Harvey vd. (1974)
		Dolomit	$N_{wl} = 4.42(w_a) - 2.51$	0.77	
w <sub>a</sub>	ASTM C88	Granit, Granodiyorit, Diyorit	$N_{wl} = 15.84(w_a) - 6.16$	0.94	Goswami (1984)
w <sub>a</sub>	ASTM C88	Kireçtaşı	$M_{wl} = 5.78w_a + 0.86$	0.65	Jayawickrama (1992)
MD	ASTM C88	Granit, Kumtaşı, Kireçtaşı	$M_{wl} = 1.95(MD) - 14.4$	0.66	Phillips (2000)
MD	ASTM C88	Kireçtaşı, Dolomit, Kumtaşı, Granit, Bazalt, Gnays, Kuvarsit	$M_{wl} = 0.02(MD)^2 + 0.18(MD) + 0.92$	0.56	Fowler vd. (2006)
w <sub>a</sub>	AASHTO T104	Kireçtaşı	$M_{wl} = 12.18(w_a) - 2.89$	0.72	Jayawickrama vd. (2007)
MD			$M_{wl} = 0.91(MD) - 1.71$	0.70	

Açıklamalar: w<sub>a</sub>: Ağırlıkça su emme (%), MD: Mikro-deval kaybı (%), M<sub>wl</sub>: Magnezyum sülfat don kaybı (%)  
N<sub>wl</sub>: Sodyum sülfat kaybı (%)



**Şekil 6.13** M<sub>wl</sub> değerlerinin kestirimi için geliştirilen yüzey modelleri a) Ilıca bazaltik kayalar b) Kayadibi ultra-bazik kayalar.

Trafik yükleri hariç tutulmak hususu ise, tren hattının yanında kurulacak bir gözleme ve ölçme istasyonunda gerçekleştirilecek deneyler aracılığıyla doğada gerçekleşen donma – çözünmeden kaynaklı parçalanma mekanizması belirlenebilir. Böylece doğada meydana gelen donma – çözünmeden kaynaklı parçalanma mekanizması ile balast agregalarına ait w<sub>a</sub> değeri arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılabilir.

Diğer taraftan Şekil 6.13'teki yüzey modelleri kullanılarak doğada hangi sürede ve meteorolojik koşulda gerçekleşen parçalanmanın hangi  $N_{ft-m}$  koşuluna denk geldiği belirlenebilir.

Bu kapsamda yapılması mümkün olabilen çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- a) Balast agregasının kullanıldığı tren hattının yanında meteorolojik özelliklerin düzenli olarak kayıt altına alındığı bir ölçme ve izleme istasyonu kurulabilir.
- b) Magnezyum sülfat don kaybı deneylerinde kullanıldığı gibi 31.5 – 50.0 mm boyut grubundaki balast agregalarından  $10 \pm 0.02$  kg numune (aynı anda birden fazla numune yerleştirilebilir) ölçme ve izleme istasyonuna yerleştirilerek, doğada gerçekleşen donma – çözünme olayından kaynaklanan parçalanma uzun dönemde araştırılabilir.
- c) Belirli aralıklarla (altı ayda bir veya yılda bir olacak şekilde) ölçme istasyonundaki numunedeki parçalanma (22.4 mm'lik elekten geçen numune miktarının ilk numune miktarına olan oranı şeklinde) belirlenebilir.
- d) Söz konusu parçalanmanın ne kadar sürede ve hangi meteorolojik koşullarda gerçekleştiği kaydedilir. Aynı zamanda söz konusu numunelerin  $w_a$  değerleri eş zamanlı olarak belirlenir. Daha sonra belirlenen  $w_a$  değeri ve doğal koşullarda gerçekleşen parçalanma derecesi değerlerinin Şekil 6.13'teki yüzey modellerine düşürülmesiyle hangi sürede ve koşullar altında balast agregasındaki parçalanmanın hangi  $N_{ft-m}$  koşullarına denk geldiği belirlenebilir.

Yukarıda ifade edilen programın uygulanması durumunda doğada gerçekleşen donma – çözünme döngüsü ile laboratuvar koşullarında benzetimi yapılan temsili donma – çözünme döngüleri arasında bir ilişki kurmak mümkün olur. Ancak bu işlem özel ekipman ihtiyacı ve uzun dönem gözlemlere dayanabilir.

Ayrıca gözlem ve izleme istasyonundan belirli aralıklarla numune alarak bu numuneler üzerinde Bölüm 4'te ifade edilen yöntemler doğrultusunda nokta yükü deneyleri gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda bu numuneler üzerinde tek tane deneyleri de gerçekleştirilerek meteorolojik koşullar altında balast agregasındaki parçalanma mekanizması araştırılabilir.

Böylece meteorolojik koşulların balast agregası dayanımına olan etkileri araştırılabilir. Artan  $N_{ft-m}$  koşullarındaki dayanım azalması ile meteorolojik koşullar altındaki dayanım azalması arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılabilir. Nokta yükü deneylerinde kolaylık sağlaması adına düzensiz şekilli balast agregası örnekleri için dikdörtgen alan yaklaşımı benimsenebilir. Balast agregalarındaki yüzey düzeltme işlemi için ise pratik aletler (taşınabilir el frezesi gibi) kullanılabilir.

Önceki çalışmalarda magnezyum sülfat don kaybı ile Los Angeles aşınma kaybı deneylerinin beraber değerlendirildiği bir başka çalışma bulunmamakta olup, bu çalışma balast agregası duraylılığı açısından  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarının beraber incelendiği örnek bir çalışma olarak nitelendirilebilir. Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilmiş LAA deneylerinden elde edilecek verilerin balast agregası seçiminde donma – çözünme olaylarının yüksek derecelerde seyredeceği bölgeler için bir kriter olarak değerlendirilmesi düşünülebilir.

Ancak yukarıda ifade edildiği gibi hangi  $N_{ft-m}$  koşulunun doğada hangi seviyedeki donma – çözünme olayını temsil edeceği sorusunun açıklanması gerekmektedir. Benzer şekilde LAA deneylerinde hangi  $N_{rev}$  koşulunun hangi derecedeki trafik yüklerini temsil edebileceği de araştırılabilir.

Bu kapsamda geri analiz (Back analysis) yöntemi ile farklı  $N_{rev}$  ve  $N_{ft-m}$  koşullarında elde edilen  $Cu_{LAA}$  ve  $FI_{LAA}$  değerlerinin arazide bir karşılığı olup olmadığı araştırılabilir. Burada sözü edilen geri analiz yöntemi aşağıdaki gibi uygulanabilir.

- a) Balast agregasının ilk üretildiği andaki önemli agregası özellikleri ve farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında balast agregalarındaki LAA,  $Cu_{LAA}$  ve  $FI_{LAA}$  değerleri belirlenebilir.
- b) Balast agregalarının serili olduğu özel bir bölge seçilerek bu bölgeden belirli aralıklarla numuneler almak hususu ile ilgili numunelerin  $C_u$  ve FI değerleri belirlenebilir.
- c) Tren hattından alınan numunelerdeki  $C_u$  ve FI değerlerindeki değişimin hangi süre, meteorolojik koşul ve trafik yükleri altında gerçekleştiği kayıt altına alınarak, bu sonuçlar yukarıda ifade edilen  $Cu_{LAA}$  ve  $FI_{LAA}$  sonuçları ile karşılaştırılabilir.



Burada trafik yükleri Bölüm 3'te ifade edilen yaklaşım ile belirlenebilir ve bir nevi balast agregalarının aşınma ve parçalanma derecelerinin karşılaştırılması şeklindeki bir tündengelim yöntemi benimsenebilir.

Tren hattı üzerinde yer radarı yöntemi gibi (Ground Penetrating Radar, GPR) araştırmalar ile balast agregasındaki parçalanma mekanizması araştırılabilir. Meteorolojik veriler ve trafik yüklerinin beraber değerlendirildiği çalışmalar ile balast agregasındaki parçalanma mekanizması araştırılabilir. GPR yönteminin tren hatlarında kullanıldığı önemli çalışmalar mevcuttur (Loizos vd. 2007, Al-Qadi vd. 2008, Forde vd. 2010).

GPR yöntemlerinden elde edilecek verilerin balast agregası parçalanma mekanizması açısından sağlıklı bir şekilde yorumlanabilmesi için aşağıdaki verilerin sistematik olarak tutulması önem arz etmektedir.

- a) Balast agregasının ilk üretildiği andaki agrega özellikleri ( $w_a$ , LOI, LAA,  $I_{s50}$  ve  $M_{wl}$  gibi)
- b) Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilmiş LAA deney sonuçları
- c) Balast tabakasının sıkılama ve ilk sıkılandığı andaki kirlenme derecesi
- d) Tren hattına ait günlük ortalama trafik yükü
- e) Tren hattının bulunduğu bölgeye ait meteorolojik özellikler (en yüksek, ortalama, en düşük sıcaklık, ortalama yağış, donlu gün sayısı vb.)

Yukarıda ifade edilen bu verilerin sistematik olarak tutulması ile, balast agregasının tren hattındaki gerçek parçalanma mekanizması sağlıklı bir şekilde ortaya konabilir.



## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ülkemizde farklı demiryolu hatlarında kullanılan iki farklı balast agregası malzemesinin farklı çevresel ve mekanik koşullardaki özelliklerinin değişimi araştırılmıştır. Öncelikle genel hatları ile kayaçların ve agregalarının duraylılığına etki eden faktörler özetlenmiştir.

Demiryolu balast agregasının sahip olması gereken temel özellikler TS 7043 EN 13450 şartnamesinde ifade edilen ölçütler doğrultusunda verilmiştir. Daha sonra balast agregası ve tabakası üzerine gerçekleştirilen önemli çalışmalar verilmiş ve balast tabakasında gözlenen önemli sorunlara değinilmiştir.

Arazi çalışmaları kapsamında balast malzemelerinin üretildiği kaya kütlelerinde ayrıntılı hat etütleri gerçekleştirilmiş ve sahada farklı ayrışma – bozunma içeren birimler ayırtlanmıştır. Her bir ayrışma – bozunma derecesinde gözlenen kaya kütlelerine ait tanımlayıcı kriterler ifade edilmiş ve kaya malzemelerine ait temel fiziksel, mekanik ve agregası özellikleri belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçlarına göre iki farklı bazaltik kayaktan üretilecek agregaların potansiyel kullanım alanları ifade edilmiştir. Ayrıca demiryolu hattındaki balast malzemesinin demiryolu hattında yerindeki dayanımının kestirimini amaçlayan bir deney yöntemi tanıtılmıştır.

Balast agregası duraylılık araştırmaları sonucunda laboratuvar ortamındaki balast agregası parçalanma mekanizması, farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deneyleri ve farklı şekilsel özellikteki balast agregaları kullanılarak gerçekleştirilen tek tane deneyleri ile ortaya konmuştur. Tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar ve ileride yapılması faydalı olabilecek çalışmalar ise aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- a) Arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda farklı ayrışma – bozunma içeren kaya kütleleri hem gözlemsel hem de deneysel veriler ışığında sınıflandırılmıştır. Saha çalışmalarında kolaylık sağlaması adına her bir ayrışma – bozunma içeren birimlere ait ayırt edici kriterler belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.8).
- b) Bölüm 4'te ifade edilen çalışmalar kaya malzemesi ve agrega kalitesinin ayrışma – bozunmadan önemli ölçüde etkilendiğine işaret etmektedir. Farklı ayrışma – bozunma derecelerine ait belirlenen tanımlayıcı kriterler kullanılarak ayrışma – bozunma içeren kaya kütlelerinin yanal ve düşey sınırları belirlenebilir ve böylece agrega üretimi yapacak kaya kütleleri agrega kalitesi göz önünde bulundurularak sınıflandırılabilir.
- c) Gerçekleştirilen Schmidt çekici deneylerine göre, farklı ayrışma – bozunma içeren birimlere ait  $\sigma_{ci}$  değerinin kestirimi geliştirilen görgül bağıntılar kullanılarak yapılabilir (Bkz. Şekil 5.1). Ayrıca farklı ayrışma – bozunma içeren kayalarda  $n_e$  değeri kullanılarak ilgili kayaçların  $\sigma_{ci}$  değerleri tahmin edilebilir (Bkz. Şekil 5.2).
- d) Mıçır boyutundaki (10 – 14 mm) agregalardan elde edilen deney sonuçları göz önünde bulundurulduğunda,  $W_0$  tip kaya kütlelerinden üretilen agregalar "*Gabion*", "*Asfalt agregası*", "*Beton agregası*", "*Pere*", "*Alt temel malzemesi*", "*Parke taşı*" ve "*Tahkimat taşı*" olarak kullanılabilir.
- e) Laboratuvar deney sonuçlarına göre  $w_0$  tip kayaçlardan üretilen 31.50 – 50.00 mm boyut grubundaki agregaların alt ve üst balast malzemesi olarak kullanılabilir olduğu belirlenmiştir.  $W_1$  tipindeki kaya kütlelerinden üretilen balast boyutundaki agregalardan elde edilen değerlerin TS 7043 EN 13450 şartnamesi sınır değerlerine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu anlamda  $W_0$  ve  $W_1$  tip kaya kütlelerinin beraber değerlendirildiği durumlarda bu kaya kütlelerinden üretilen 31.50 – 50.00 mm boyut grubundaki agregaların balast malzemesi olarak kullanılabilir olduğu söylenebilir.
- f) Araştırılan balast agregalarının tren hattına serildikten sonraki dayanımının belirlenmesi için bir deney yöntemi geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen nokta yükü deneylerinde silindirik örneklerden elde edilen  $I_{s50}$  değerlerine en yakın değerler  $\psi \geq 0.90$  şekilsel özelliğine sahip düzensiz şekilli balast agregalarında "*Dikdörtgen alan yaklaşımı*" kullanılarak belirlenmiştir. Geometrik özelliği  $\psi \geq 0.90$  olan düzensiz örneklerde gerçek alan yaklaşımından elde edilen  $I_{s50}$  değerleri ise silindirik örneklerden elde edilen  $I_{s50}$  değerlerinden ortalama %12 daha düşük olarak belirlenmiştir.

- g) Şekilsel özelliklerin balast dayanımına etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda (Bkz. Çizelge 4.14),  $\psi$  değerindeki artış ile  $I_{s50}$  değerinin doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmalardan balast dayanımında şekilsel özelliğin önemli bir kriter olduğu sonucuna varılmıştır.
- h) Düzensiz balast agregası örneklerinde eş değer karot çapı ( $D_e$ ) kavramının sayısal analiz yöntemleri ile araştırılması, Bölüm 4'te ifade edilen deney yönteminin geliştirilmesi adına önerilmektedir. Şekilsel özellik – dayanım ilişkisi yanı sıra, agregalara ait şekilsel özelliğin balast tabakasındaki optimum kenetlenmesi üzerine ilave çalışmalar yapılması yerinde olacaktır.
- i) Agregada duraylılığı konusunda gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, artan  $N_{ft-m}$  koşullarında kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinde ( $w_a$ , LOI,  $I_{s50}$ ,  $\sigma_{ci}$  ve  $E_{ti}$ ) ciddi azalmalar belirlenmiştir.  $N_{ft-m} = 10$  koşulunda Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının Ilıca bazaltik kayaçlarından daha duraylı olduğu görülmektedir. Ancak artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının parçalanma derecesinin Ilıca bazaltik kayaçlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Fiziksel ve dayanım özellikleri bakımından daha iyi ilksel özelliklere sahip olan Kayadibi ultra-bazik kayaçlarının artan  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarından daha fazla etkilenmesinin ana sebebinin mineralojik bileşim ve tane boyutu olduğu düşünülmektedir.
- j) Gerçekleştirilen tek tane deneylerinde  $\psi$  değerindeki artış ile balast agregası parçalanma derecesi arasında ters orantılı bir ilişki belirlenmiştir. Bu bulgu Bölüm 4'te ifade edilen dayanım – şekilsel özellik ilişkisi ile paralellik arz etmektedir. Ayrıca, artan  $N_{ft-m}$  koşullarında balast agregalarındaki parçalanma derecesi önemli ölçüde artmaktadır. Gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda tek tane deneylerindeki parçalanma mekanizmasında  $N_{ft-m}$  bağımsız değişirgesi  $\psi$  değişirgesinden daha baskın olduğu belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 6.11).
- k) Farklı  $N_{ft-m}$  ve  $N_{rev}$  koşullarında gerçekleştirilen LAA deney sonuçlarına göre, Ilıca bazaltik kayaçları için  $C_{uLAA}$  değeri  $N_{rev}$  koşullarından, Kayadibi ultra-bazik kayaçları için ise  $N_{ft-m}$  koşullarından daha fazla etkilendiği belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 6.14).
- l) Araştırma konusu olan bazaltik kayaçlardan üretilen balast agregaların hali hazırda ülkemizdeki muhtelif hatlarda konvansiyonel ve hızlı demir yolu hatlarında balast malzemesi olarak kullanıldığı düşünüldüğünde, bu agregaların çevre tren hatlarında da değerlendirilmesi düşünülebilir. Bu sebepten LAA ve  $FI_{LAA}$  değerlerinin kestirimini amaçlayan bir dizi istatistiksel çalışma yürütülmüştür. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda LAA ve  $FI_{LAA}$  değerleri Eşitlik 6.9 – 6.12 kullanılarak belirlenebilir.

- m) Donma – çözünme döngülerinin yoğun olarak yaşandığı bölgelerde balast agregası seçimi, farklı döngü sayılarındaki magnezyum sülfat don kaybı deneyler sonuçları gözetilerek yapılabilir. Laboratuvar ortamında balast agregasının göreceli olarak uzun dönem parçalanma mekanizmasının ortaya konabilmesi için farklı döngü sayılarına tabi tutulmuş balast agregalarının farklı devir sayılarındaki LAA ve  $FI_{LAA}$  değerlerinin değişiminin incelenmesi önerilmektedir. Benzer yaklaşımlar donma – çözünme döngüsü hariç tutulmak suretiyle sadece trafik yüklerinden kaynaklanan parçalanma mekanizmalarının araştırılması için de düşünülebilir.
- n) Farklı ayrışma – bozunma derecelerindeki kaya kütlelerinden elde edilen değerler farklı  $N_{ft-m}$  koşullarında gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırıldığında (Bkz. Şekil 6.11 – 6.12), ilerleyen ayrışma – bozunmanın kaya ve agrega özellikleri üzerinde  $N_{ft-m}$  koşullarından daha olumsuz etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebepten agrega kalitesini artırmak amacı ile üretimden önceki saha çalışmalarında farklı ayrışma – bozunma içeren birimlerin yanal ve düşey sınırlarının sağlıklı bir şekilde belirlenmesi önerilmektedir. Böylece bu bölgelerden üretilecek agregalar kullanım alanlarına uygun olacak şekilde servis edilecek ve agregalardan üst düzeyde performans sağlamak mümkün olacaktır.
- o) Balast agregasının tren hattındaki gerçek parçalanma mekanizmasının araştırılması için GRP yöntemleri kolaylık sağlayabilir. Ancak GPR yöntemlerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilebilmesi için kayıt altına alınması gereken önemli veriler Bölüm 6.4'te verilmiştir. Bu verilerin sistematik olarak tutulması ile balast agregasındaki gerçek parçalanma mekanizması çevresel ve mekanik koşullar açısından net olarak açıklığa kavuşturulabilir.

Ülkemizde hızlı tren hatlarının yeni oluşu ve buna bağlı olarak trafik yüklerinin düşük seviyeler seyretmesi sebebiyle gerçekleştirilen duraylılık analizleri ağırlıklı olarak çevresel koşulların magnezyum sülfat don kaybı deneyleri temsil edilmesi hususu ile gerçekleştirilmiştir. Trafik yüklerinden kaynaklanan parçalanma da tek tane ve farklı  $N_{rev}$  koşullarındaki LAA deneyleri ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu anlamda ileriki çalışmalarda balast agregasındaki trafik yüklerinden kaynaklan parçalanma ile tek tane ve LAA deney sonuçlarından elde edilen parçalanma derecelerinin  $Cu_{TT}$ ,  $CU_{LAA}$  değerleri baz alınarak karşılaştırılması düşünülebilir.

## KAYNAKLAR

- AASHTO T104 T-104-99** (2011) Standard test methods for soundness of aggregates by use of sodium sulfate and magnesium sulfate. *American Association of State Highways and Transportation officials*, Washington
- Akyol, Z, Arpat E, Erdoğan B, Göger E, Güner Y, Şaroğlu F, Şentürk İ, Tütüncü K, ve Uysal Ş** (1974) 1/50.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası Serisi, Zonguldak E29-a, E29-b, E29-c, E29-d, Kastamonu E30-a, E30-d. *MTA Yayınları*, Ankara.
- Al-Qadi I L, Xie W and Roberts R** (2008) Time-frequency Approach for Ground Penetrating Radar Data Analysis to Assess Railroad Ballast Condition. *Research in Nondestructive Evaluation*, 19 (4): 219 – 237.
- Arikan F, Ulusay R and Aydın N** (2007) Characterization of Weathered Acidic Volcanic Rocks and a Weathering Classification Based on A Rating System. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66: 415 – 430.
- Asamoah M A, Tuffour Y A, Afrifa R O and Kankam C K** (2014) Strength Characteristics of Hand-quarried Partially-weathered Quartzite Aggregates in Concrete, *American Journal Civil Engineering*, 2 (5): 134 – 142.
- ASTM C88** (2013) Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, *ASTM International*, 6 pp.
- ASTM D7348-13** (2013) Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues, *ASTM International*, West Conshohocken, 7 pp.
- Atalar C, Das B M, Shin E C and Kim D H** (2001) Settlement of Geogrid-reinforced Railroad Led to Failure due to Cyclic Load, *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, İstanbul, 3: 2045 – 2048.
- Aydın E.** (2018) Kişisel görüşme, Görüşme tarihi 11.07.2018.
- Bach H** (2013) Evaluation of Attrition Tests for Railway Ballast, *PhD Thesis*, Institute for Railway Engineering and Transport Economy, Graz University of Technology, Graz, 111pp.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Barton N and Choubey V** (1977) The Shear Strength of Rock and Rock Joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Abstracts*, 13 (9): 255–279.
- Beavis F C** (1985) *Engineering Geology*, Blackwell Scientific, Melbourne, 231 pp.
- Bernhart M, Tellesbo H, Justnes H and Wiik K.** (2014) The Effect of Heat Treatment and Cooling Rate on the Properties of Lightweight Aggregates, *Journal of European Ceramic Society*, 34 (5): 1353–1363.
- Bieniawski Z T** (1975) Point Load Test in Geotechnical Practise, *Engineering Geology*, 9 (1): 1 – 11.
- Binal A** (2009) A New Laboratory Rock Test Based on Freeze-thaw Using a Steel Chamber, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42 (2):179–198.
- Bragg D** (1989) Reconnaissance Assesment of Potential Bedrock Aggregate, *Geological Society of Newfoundland Report*, Report No: 89-1, 221 – 227.
- BS 812-112** (1990) The British Standard: Testing aggregates, Method for Determination of Aggregate Impact Value (AIV), 14 pp.
- Boler H, Wnek M and Tutumluer E** (2012) Establishing Linkages between Ballast Degradation and Imaging Based Aggregate Particle Shape, Texture and Angularity Indices, *2nd International Conference on Transportation Geotechnics*, Hokkaido, Japonya, 186 – 191.
- Bürkan K A, Şahintürk, Ö ve Yazman M** (1982) Ereğli-Kozlu-Yığılca bölgesinin jeolojisi, *TPAO Raporu*, No: 1537, Ankara
- Caricato A, Woods L and Mohan C** (2010) Weathering of Rock as Armourstone: A Case Study on Bahrain Limestone, *32nd Coastal Engineering Proceedings*, Shanghai, Çin.
- Castro N, Fernandes I and Silva A S** (2009) Alkali Reactivity of Granitic Rocks in Portugal: A Case Study, *12th Euroseminar on Microscopy applied to building materials*, Dortmund, Almanya, 62 – 72.
- Chen T C, Yeung M R and Mori N** (2004). Effect of Water Saturation on Deterioration of Welded Tuff due to Freeze–thaw Action, *Cold Regions Science and Technology*, 38 (2–3): 127 – 136.
- Chen F. and Qiao P.** (2015) Probabilistic Damage Modeling and Service-life Prediction of Concrete under Freeze–thaw Action, *Materials and Structures*, 48 (8): 2697 – 2711.
- Chrismer S M** (1985) Considerations of Factors Affecting Ballast Performance, *Association of American Railroads*, Report No: WP-110, 48p, Chicago, USA.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Chrismer S M, Selig E T, Laine K. and Dello-Russo V** (1991) Ballast Durability Test at Sibley, Missouri, *Association of American Railroads*, Report No: R-801, Chicago, USA.
- Cope G H** (1993) British Railway Track-Design, Construction and Maintenance, 6th Edition, *The Permanent Way Institution*, Barnsley, İngiltere, 628 pp.
- Dahl F, Bruland A, Jakobsen P D, Nilsen B, and Grøv E** (2012) Classifications of Properties Influencing the Drillability of Rocks, based on the NTNU/SINTEF Test Method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28: 150–158.
- Demirbilek M** (2005) Ilıca-Sobran (Kütahya) arasının jeolojisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 67s.
- Duong T V, Trinh V N, Cui Y N, Tang A M and Calon N** (2013) Development of A Large-scale Infiltration Column for Studying the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Fouled Ballast. *Geotechnical Testing Journal*, 36 (1): 54 – 63.
- Eberhart E, Stimpson B and Stead D** (1999) Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fracture, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(2): 81 – 99.
- Erendil M, Aksoy A. ve Kuşçu İ** (1991) Bolu Masifi ve Çevresinin Jeolojisi, *M.T.A. Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi*, Rapor No:379.
- Ergüler Z A, Zengin E and Ergüler G K** (2016) Time-dependent Physicomechanical Behavior of Ballasts Ssed for Railway between Sabuncupinar and Kutahya in Western Turkey, *Environmental Earth Science*, 75: 918.
- Esveld C** (2001) Modern Railway Track, 2nd Edition, *Delft University of Technology*, ISBN 90-800324-3-3, 740 pp.
- Fatt N G T, Raj J K and Ghani A A** (2013) Potential Alkali-Reactivity of Granite Aggregates in the Bukit Lagong Area, Selangor, Peninsular Malaysia, *Sains Malaysiana*, 42 (6): 773 – 781.
- Feldman F and Nissen D** (2002) Alternative Testing Method for the Measurement of Ballast Fouling: Percentage Voids Contamination, *Proceedings of the Conference on Railway Engineering*, Wollongong, Avustralya, 101–110.
- Fener M and İnce İ** (2015) Effects of the Freeze–thaw (F–T) Cycle on the Andesitic Rocks (Sille-Konya/Turkey) Used in Construction Building, *Journal of African Earth Science*, 109: 96 – 106.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Forde M C, De Bold R, O'Connor G and Morrissey J** (2010) New Analysis of Ground Penetrating Radar Testing of A Mixed Railway Trackbed, Transportation Research Board 89th Annual Meeting, 18 pp.
- Fowler D W, Allen J J, Lange A and Range P.** (2006) The Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Aggregate Tests, University of Texas, *Research Report*, Report No: ICAR 507-1F, 616 pp.
- Geving S and Thue J V** (2002) Fukt i bygninger (Moisture in buildings, in Norwegian). *SINTEF Byggforsk handbook*, Norwegian Building Research Institute, 465 pp.
- Goswami S C** (1984) Influence of Geological Factors on Soundness and Abrasion Resistance of Road Surface Aggregates: A case study, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 30 (1): 59 – 61,
- Guo Y, Markine V, Song J and Jing G** (2018) Ballast Degradation: Effect of Particle Size and Shape Using Los Angeles Abrasion Test and Image Analysis, *Construction and Building Materials*, 169: 414 - 424
- Han X and Selig E T** (1997) Effects of Fouling on Ballast Settlement, *Proceedings of the 6th International Heavy Haul Railway Conference*, Cape Town, South Africa, 257 – 268.
- Harvey R D, Fraser G S and Baxter J W** (1974) Properties of Carbonate Rocks Affecting Soundness of Aggregates, *Illinois Minerals Notes*, University of Illinois, 21 pp.
- Heidari M, Torabi-Kaveh M and Mohseni H** (2017) Assessment of the Effects of Freeze–Thaw and Salt Crystallization Ageing Tests on Anahita Temple Stone, Kangavar, West of Iran, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35 (1): 121 – 136.
- Helgeson H C, Delany J M, Nesbitt H W and Bird D K** (1978) Summary and Critique of the Thermodynamic Properties of Rock Forming Minerals, *American Journal of Science*, Report No: V278-A, 234pp.
- Huang H Tutumluer E and Dombrow W** (2009) Laboratory Characterization of Fouled Railroad Ballast Behavior, *Transportation Research Record*, 2117: 93–101.
- Hudec P P** (1980) Effect of Deicing Salts on Deterioration and Dimensional Changes of Carbonate Rocks, *ASTM Special Technical publishing* , STP 691, 12 pp.
- Indraratna B, Ionescu D and Christie H D** (1998) Shear Behaviour of Railway Ballast Based on Large-scale Triaxial Tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (5): 439 – 449.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Irfan T Y and Dearman W R** (1978) Characterisation of Weathering Grades in Granite Using Standard Tests on Aggregates, *Annales de la Societe Geologique de Belgique*, 101: 67 – 69.
- ISRM** (1981) ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, ed. E. T. Brown, Pergamon Press, London, 211 pp.
- Janoo V C** (1998) Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Base Course Materials, *US Army Corps of Eng. Special Report*, 29 pp.
- Jayawickrama P W** (1992) Limitations on the Use of Aggregate Sulfate Soundness for the Prediction of Field Performance of Hmac and Seal Coat Pavement Surfaces, Texas Technical University, *Texas Department of Transportation*, Report No: 118D91-1929, 88 pp
- Jayawickrama P W, Hossain S, Hoare A R** (2007) Long-term Research on Bituminous Coarse Aggregate: Use of Micro-deval Test for Project Level Aggregate Quality Control, Texas Technical University, *Research Report*, Report No: FHWA/TX-06/0-1707-9, 89 pp.
- Jing G** (2016) High Speed Rail Ballast Flight and Measures, *Railroad Engineering Seminar Notes*, University of Illinois, Illinois, USA.
- Jobli A F, Hampden A Z and Tawie R** (2017) The Role of Ultrasonic Velocity and Schmidt Hammer Hardness – The Simple and Economical Non-destructive Test for Evaluation of Mechanical Properties of Weathered Granite, *International Conference on Applied Physics and Engineering*, Penang, 9 pp.
- Karahan M, Ersoy H, Sünnetçi M O, Karahan H ve Kolaylı H** (2018) Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Volkanik Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Sıcaklık Derecesi ve Süresine Bağlı Değişimi, *12. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Trabzon, 283 – 289.
- Kashani H F, Hyslip J P and Ho C L** (2017) Laboratory Evaluation of Railroad Ballast Behavior under Heavy Axle Load and High Traffic Conditions, *Transportation Geotechnics*, 11: 69 – 81.
- Karpuz C and Paşamehmetoğlu A G** (1997) Field Characterisation of Weathered Ankara Andesites, *Engineering Geology*, 46 (1): 1 – 17.
- KGM** (2013) Karayolu Teknik Şartnamesi, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, Ankara, 431s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Klassen M J, Clifton A W and Watters B R** (1987) Track Evaluation and Ballast Performance Specifications, *Transportation Research Records*, 1131: 35 – 44.
- Koca Y and Kincal C** (2015) The Relationships between the Rock Material Properties and Weathering Grades of Andesitic Rocks around Izmir, Turkey, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (2): 709 – 734.
- Koca T K and Koca Y** (2018) Classification of weathered andesitic rock materials from the Izmir subway line on the basis of strength and deformation, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 18 pp.
- Koohmishi M ve Palassi M** (2016) Evaluation of the Strength of Railway Ballast Using Point Load Test for Various Size Fractions and Particle Shapes, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49: 2655 – 2664.
- Koohmishi M and Palassi M** (2017) Effect of Particle Size Distribution and Subgrade Condition on Degradation of Railway Ballast under Impact Loads, *Granular Matter*, 19: 63
- Köken E ve Özarıslan A** (2015) Balast Malzemesi Uygunluk Ölçütlerinin Farklı Standart ve Şartnamelere Göre İncelenmesi, *7. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, 303 – 314.
- Köken E ve Özarıslan A** (2016) Balast Agrega Malzemesi Dayanımı Kestiriminde Nokta Yüğü Dayanım İndeksine İlişkin Kullanım Önerilerinin Geliştirilmesi, *8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu*, Kütahya, 73 – 83.
- Köken E, Özarıslan A and Bacak G** (2016) Weathering Effects on Physical Properties and Material Behaviour of Granodiorite Rocks, *Rock Mech Rock Eng: From past to the future – Ulusay et al (eds), EUROCK 2016, Cappadocia*, 331 – 336.
- Köken E, Aydın H ve Özarıslan A** (2017) S<sub>20</sub> Kırılğanlık İndeksinin Kayaçların Parçalanabilirliği Açısından İncelenmesi, *6. Uluslararası Maden Makinaları ve Teknolojisi Sempozyumu*, İzmir, 105 – 113.
- Köken E ve Özarıslan A** (2018) Sarnıç Köy (Havran/Balıkesir) Çevresindeki Andezitlerin Ayrışma Bozunma Açısından İncelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (2): 296 – 316.
- Köken E, Özarıslan A ve Bacak G** (2018) An Experimental Investigation on the Durability of Railway Ballast Material by Magnesium Sulfate Soundness, *Granular Matters*, 20 – 29.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kwon C C J** (2006) Geogrid Reinforcement of Railway Ballast, *PhD Thesis*, University of Nottingham, 212 pp.
- Kwon H B and Park C S** (2006). An Experimental Study on the Relationship Between Ballast-flying Phenomenon and Strong Wind under High-speed-train, *7th World Congress on Railway Research*, Montreal, 1 – 10.
- Laughlin G R** (1965) Freeze-Thaw Characteristics of Aggregates, *Kentucky Transportation Center Research Report*, Kentucky, 39 pp.
- Lakusic S, Ahac M and Haladin I** (2010) Experimental Investigation of Railway Track with under Sleeper Pad. *10th Slovenian Road and Transportation Congress*, Portoroz, Slovenija, 386 – 393.
- Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, Bas M J L, Bonin B , Bateman P, Bellieni G, Dudek A, Efremova S, Keller J, Lameyre J, Sabine P A, Schmid R, Sorensen H and Woolley A R** (2002) Igneous rocks: A Classification and Glossary of Terms, Cambridge University Press, ISBN 978-0-511-06864-5, 254 pp
- Li Dingqing, Hyslip J, Sussmann T and Chrismer S** (2016) Railway Geotechnics, 1st Edition, CRC Press, ISBN 9780415695015, 574 pp.
- Lim W L** (2004) Mechanics of Railway Ballast Behaviour, *PhD Thesis*, University of Nottingham, Nottingham, 217 pp
- Liso K R, Kvande T, Hygen H O and Thue J V** (2007) A Frost Decay Exposure Index for Porous Mineral Building Materials, *Building and Environment*, 42 (10): 3547 – 3555.
- Lista D M F, Fort R and Muriel M J V** (2015) Freeze-thaw Fracturing in Building Granites, *Cold Regions Science and Technology*, 113: 40 – 51.
- Liu X, Zhao P and Dai F** (2011) Advances in Design Theories of High-speed Railway Ballastless Tracks, *Journal of Modern Transportation*, 19 (3): 154 – 162.
- Loizos A, Silvast M, and Dimitrellou S** (2007) Railway Trackbed Assessment Using the GPR Technique, *Proceedings of the International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, 2: 1817 – 1826
- Loubser M J** (2013) Weathering of Basalt and Sandstone by Wetting and Drying: A Process Isolation Study, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95 (4): 295 – 304.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Matula M, Hyankova A and Ondrasik R** (1980) Influence of Petrogenetic Features on the Physical Properties of the West Carpathian Andesites, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 22: 245 – 252.
- MAV** (2010) Railway Substructure and Ballast Quality Acceptance Regulations Instruction, *Modification 4 in MAV 102345/1995*, Budapeşte, 14 pp.
- McDowell G R, Lim, W L and Collop A C** (2003) Measuring the Strength of Railway Ballast, *Ground Engineering*, 36 (1): 25 – 28.
- Mitchell C J, Mitchell P, Pascoe R D** (2008) Quarry Fines Minimisation: Can We Really Have 10 mm Aggregate with No Fines?, *Proceedings of the 14th Extractive Industry Geology Conference*. Scott, P.W., Walton, G. (Eds.), 37 – 44.
- Moaveni M, Qian Y, Boler H, Mishra D and Tutumluer E** (2014) Investigation of Ballast Degradation and Fouling Trends Using Image Analysis, *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, J. Pombo, (Editor), Civil-Comp Press, Stirlingshire, 15 pp, İskoçya.
- Momeni A, Abdilor Y, Khanlari G R, Heidari M and Sepahi A A** (2016) The Effect of Freeze-thaw Cycles on Physical and Mechanical Properties of Granitoid Hard Rocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (4): 1649 – 1656.
- Momoya Y and Sekine E** (2007) Performance-based Design Method for Railway Asphalt Roadbed, *Doboku Gakkai Ronbunshuu E*, 63 (4): 608 – 619.
- Muethel R W** (1989) Freeze-thaw Evaluation of Selected Rock Types from A Composite Sample of Michigan Gravel, *Michigan Transportation Comission Research Report*, Report No: R-1301, 16 pp.
- Murlidhar B R, Mohamad E T and Armaghani D J** (2016) Potential Alkali Silica Reactivity of Various Rock Types in An Aggregate Granite Quarry, *Measurement*, 81: 221 – 231.
- Nalsund R** (2014) Railway Ballast Characterictics, Selection Criterion and Performance, *PhD Thesis*, Norwegian University of Science and Teechnology, Trondheim, 188 pp.
- Nimbalkar S and Indraratna B** (2016) Field Assesment of Ballasted Railroads Using Geosynthetics and Shock Mats, *3th International Conference on Transportation Geotechnics*, 1485 – 1494.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Niry R, Beaucour A L, Hebert R, Noumowe A, Ledesert B and Bodet R** (2013) Thermal Stability of Different Siliceous and Calcareous Aggregates Subjected to High Temperature, *MATEC Web of Conferences*, 9 pp.
- Nurmikolu A** (2005) Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track, *PhD Thesis* (Publication No: 567), Tampere University of Technology, 325 pp.
- Okonta F N** (2014) Relationships between Abrasion Index and Shape Properties of Progressively Abraded Dolerite Railway Ballasts, *Rock Mechanics Rock Engineering*, 47: 1335 – 1344.
- Ondrasik M and Kopecky M** (2014) Rock pore Structure as Main Reason of Rock Deterioration, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 36: 79 – 88.
- Ondrasik M, Kopecky M and Breck M** (2014) Influence of Frozen and Unfrozen Water in Rock Pores on Rock Expansion and Deterioration, *14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM)*, Book 1, 2: 527 – 534.
- Ondrasina J, Kirchner D and Siegesmund S** (2002) Freeze-thaw Cycles and Their Influence on Marble Deterioration: A Long-term Experiment, *Geological Society of London, Special Publication*, 205: 9 – 18.
- Ouacha H, Ben-Moussa A and Simao J** (2013) The Salt Crystallization Weathering of Building Rocks of the Archaeological Sites Calcarenes of North-western Morocco (Lixus, Banasa and Thamusida), *European Scientific Journal*, 9 (18): 282 – 290.
- Paşamehmetoğlu A G, Karpuz C and İrfan T Y** (1981) The Weathering Characteristics of Ankara Andesites from the Rock Mechanics Point of View, *ISRM International Symposium on Weak Rocks*, Rotterdam, 185 – 190
- Paiva C, Ferreira M and Ferreira A** (2015) Ballast Drainage in Brazilian Railway Infrastructures, *Construction and Building Materials*, 92: 58 – 63.
- Parsons R L, Rahman A J, Han J and Glavinich T E** (2014) Track Ballast Fouling and Permeability Characterization by Using Resistivity, *Transportation Research Record*, 2448: 133 – 141.
- Phillips W F** (2000) Comparative Analysis Between the Magnesium Sulfate Soundness and Micro-deval Tests in the Evaluation of Bituminous Aggregates, *Master Thesis*, Texas Technical University, 161 pp

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Pichler D and Fenske J** (2013) Ballastless Track Systems Experiences Gained in Austria and Germany, *12th Proceedings of American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA)*, 81 – 100.
- Profillidis V A** (2014) Railway Management and Engineering, Ashgate Publishing, Fourth Edition, 552 pp.
- Qian Y, Boler H, Moaveni M, Tutumluer E, Youssef M A and Ghaboussi J** (2014) Characterizing Ballast Degradation Through Los Angeles Abrasion Test and Image Analysis, *Transportation Research Record*, 2448: 142 – 151.
- Rajesh H M, Belyanin G A, Safonov O G, Kovaleva E I, Golunova M A and Van Reenen D D** (2009) Fluid-induced Dehydration of the Paleoproterozoic Sand River Biotite–Hornblende Gneiss, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa, *Journal of Petrology*, 51(1): 41 – 74.
- Rajesh H M, Belyanin G A, Safonov O G, Kovaleva E I, Golunova M A and Van Reenen D D** (2013) Fluid-induced Dehydration of the Paleoproterozoic Sand River Biotite–Hornblende Gneiss, Central Zone, Limpopo Complex, South Africa, *Journal of Petrology*, 54 (1): 41 – 74.
- Raisanen M** (2004) Relationships between Texture and Mechanical Properties of Hybrid Rocks from the Jaala–Iitti Complex, Southeastern Finland, *Engineering Geology*, 74 (3-4): 197 – 211.
- Raymond G P** (1985) Research on Railroad Ballast Specification and Evaluation, *Transportation Research Record*, 1006: 1 – 8.
- Raymond G P and Bathurst R J** (1987) Performance of Large- scale Model Single Tie-ballast Systems, *Transportation Research Record*, 1131: 7 – 14.
- Reed M A, Lovell C W, Altschaeffl A G and Wood L E** (1979) Frost-heaving Rate Predicted from Pore-size Distribution, *Canadian Geotechnical Journal*, 16: 463 – 472.
- Rigopoulos I, Tsikouras B, Pomonis P and Hatzipanagiotou K** (2015) Assessment of the Engineering Behaviour of Ultramafic and Mafic Rocks Using Chemical Indices, *Engineering Geology*, 196: 222 – 237.
- Rose J G, Teixeira P F and Veit P** (2011) International Design Practices, Applications, and Performances of Asphalt/Bituminous Railway Trackbeds, *GeoRail Press*, Paris, 23 pp.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ruedrich J and Siegesmund S** (2006) Fabric Dependence of Length Change Behaviour Induced by Ice Crystallisation in the Pore Space of Natural Building Stones, *Conference on Heritage, Weathering and Conservation*, R, Alvarez de Buergo M, Gomez-Heras M, Vazquez-Calvo C (eds), 497 – 505.
- Sachlova S** (2013) Microstructure Parameters Affecting Alkali–silica Reactivity of Aggregates, *Construction Building Materials*, 49: 604 – 610.
- Sadeghi J, Najar M E M, Zakeri J A, Yousefi B and Mollazadeh M** (2018) Improvement of Railway Ballast Maintenance Approach, Incorporating Ballast Geometry and Fouling Conditions, *Journal of Applied Geophysics*, 151: 263 – 273.
- Saiang C** (2011) Influence of Heat on the Physical and Mechanical Properties of Selected Rock Types, Licentiate thesis, Lulea University of Technology, Lulea, İsveç.
- Salim M W** (2004) Deformation and Degradation Aspects of Ballast and Constitutive Modelling under Cyclic Loading, *PhD Thesis*, University of Wollongong, 297 pp.
- Selig E T and Waters J M** (1994) Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford, London, 446 pp.
- Shenton M J** (1985) Ballast Deformation and Track Deterioration, *Proceedings on Track Geotechnology*, 253 – 265.
- Smith M R and Collis L** (2001) Aggregates: Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes, 3rd Edition, Geological Society of London, 369 pp.
- Stalheim J** (2014) Comparative Study of Established Test Methods for Aggregate, Strength and Durability of Archean Rocks from Botswana, *Uppsala Universitet Report*, Report No: UPTEC W13044, 44 pp.
- Stoecker T** (2002) Zum Modellierung von Granularen Materialien bei Nichtruhenden Lasteinwirkungen, *Dissertation* (Heft : 13), Universitat Kassel (in German), 188pp.
- Su Z, Huang H and Jing G** (2015) Experimental Analysis Permeability Characteristics of Fouling Railway Ballast, *Metallurgical and Mining Industry*, 9: 992 – 997.
- Sundvall R, Skogby H and Stalder R** (2009) Dehydration-hydration Mechanisms in Synthetic Fe-poor Diopside, *European Journal of Mineralogy*, 21 (1): 17 – 26.
- Sünnetçi M O, Karahan M ve Ersoy H** (2018) Effect of Increasing Temperature on the Unconfined Compressive Strength and P-wave Velocity of Different Carbonate Rocks, *12. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Trabzon, 279 – 282.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Şahin O** (2011) Demiryollarında Hat Rijitliğinin ve Etkilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 85 s.
- TCDD** (2017) Balast Teknik Şartnamesi, T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Demiryolu Yapım Dairesi Başkanlığı, Ankara, 12s.
- Tennakoon N, Indraratna B, Rujikiatkamjorn C and Nimbalkar S** (2012) Assessment of Ballast Fouling and Its Implications on Track Drainage, *11th Australia – New Zealand Conference on Geomechanics: Ground Engineering in a Changing World*, 421 – 426.
- Teixeria P F, Lopez P A, Ferreira P A** (2010) New Possibilities to Reduce Track Costs on Highspeed Lines Using A bituminous Sub-ballast Layer, *International Journal of Pavement Engineering*, 11 (4): 727 – 730.
- Thuro K** (2010) Empfehlung Nr. 5 "Punktlastversuche an Gesteinsproben" des Arbeitskreises 3.3 Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, *Bautechnik*, 87: 322 – 330.
- Todd C S and Evans B W** (1994) Properties of CO<sub>2</sub>-induced Dehydration of Amphibolite , *Journal of Petrology*, 35 (5): 1213 – 1239.
- Tovar R D and Colmenares J E** (2011) Effect of Drying and Wetting Cycles on the Shear Strength of Argillaceous Rocks, *Unsaturated soils*, Alonso & Gens (eds), 1471 – 1476.
- Tribaudino M, Bruno M, Nestola F, Pasqual D and Angel R J** (2011) Thermoelastic and thermodynamic properties of plagioclase feldspars from thermal expansion measurements. *American Mineralogist*, 96 (7): 992 – 1002.
- TS EN 933-1** (2012) Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler – Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 18s.
- TS EN 933-3** (2012) Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler – Bölüm 3: Tane Şekli Tayini Yassılık Endeksi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 12s.
- TS EN 1097-2** (2010) Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler – Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini için Yöntemler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 36s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- TS EN 1097-6** (2013) Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyle – Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 51s.
- TS EN 1367-2** (2010) Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri için Deneyle – Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 17s.
- TS 7043 EN 13450** (2004) Demiryolu Balastları için Agregalar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 33s.
- TS 10088 EN 932-3** (1997) Agregaların Genel Özellikleri için Deneyle – Bölüm 3: Basitleştirilmiş Petrografik Tanımlama için İşlem ve Terminoloji, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 12s.
- Tuna H (2000)** TCDD'de Yol Üst Yapı Bakım Onarım Çalışmalarının Etkin ve Ekonomik Hale Getirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 73 s.
- UIC Code 714R** (1989) Classification of Lines for the Purpose of Track Maintenance, Paris, 9 pp.
- Ünal A** (2009) Batı Karadeniz Akçakoca Kuzeyi (Deniz) Yeraltı Jeolojisi Ve Petrol İmkanlarının Kuyu Ve Sismik Kesitlerle İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 71s.
- Ünal M and Gündoğdu N** (2011) The Effect of Salt Crystallization on Tuff Used as Building Material, *Engineering sciences*, 6(1): 41 – 49.
- Ündül Ö and Tuğrul A** (2016) On the Variations of Geo-engineering Properties of Dunites and Diorites Related to Weathering, *Environmental Earth Science*, 75:1326.
- Walder J S and Hallet B** (1985) A Theoretical Model of the Fracture of Rock during Freezing, *Geological Society of America Bulletin*, 96 (3): 336 – 346.
- Wang P, Xu J, Liu S, Wang H and Liu S** (2016) Static and Dynamic Mechanical Properties of Sedimentary Rock after Freeze-thaw or Thermal Shock Weathering, *Engineering Geology*, 210: 148 – 157.
- Wang Y, Cui Y J, Tang A M, Benahmed N and Duc M** (2017) Effect of Aggregate Size on the Compressibility and Air Permeability of Lime-treated Fined-grained Soil, *Engineering Geology* 228: 167 – 172.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Weis F A, Stalder R and Skogby H** (2016) Experimental Hydration of Natural Volcanic Clinopyroxene Phenocrysts under Hydrothermal Pressures (0.5 – 3 kbar), *American Mineralogist*, 101: 2233 – 2247.
- Woo I, Um J G and Park H J** (2009) Variation of Geomechanical Characteristics of Granite and Orthogneiss in Wonju Area due to Accelerated Chemical Weathering Tests, *Journal of Korean Society of Rock Mechanics*, 19 (3): 213 – 225.
- Wu Y, Parker F, and Kandhal K** (1998) Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements, NCAT Report No: 98-4, *National Center for Asphalt Technology*, Auburn University, Alabama, 26 pp.
- Wu J, Jing X and Wang Z** (2017) Uniaxial Compressive Stress-strain Relation of Recycled Coarse Aggregate Concrete after Freezing and Thawing Cycles, *Construction and Building Materials*, 134: 210 – 219.
- Xing Z, Beaucour A L, Hebert R, Noumowe A and Ledesert B** (2011) Influence of the Nature of Aggregates on the Behaviour of Concrete Subjected to Elevated Temperature, *Cement and Concrete Research*, 41 (4): 392 – 402.
- Xu J, Tang Y and Zhou J** (2017) Effect of Drying – Wetting Cycles on Aggregate Breakdown for Yellow-Brown Earths in Karst Areas, *Geoenvironmental Disasters*, 4 (20): 14pp.
- Yalçın N S ve Erel A** (2007) Yüksek Hızlı Demiryollarında Alt Yapının Önemi ve Tasarım İlkeleri, 7. *Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, 323 – 344.
- Zakeri J A and Rezvani F H** (2012) Failures of Railway Concrete Sleepers During Service Life, *International Journal of Construction Engineering and Management*, 1(1): 1 – 5.
- Zhu Y** (2012) Design and Innovation of Ballastless Track System on Chengdu-Dujiangyan Express Railway, *Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways*, Yi-Qing Ni and Xiao-Wei Ye (Eds.), Shenzhen and Hong Kong, 279 –287.
- Zhou Z, Cai X, Chen L, Cao W, Zhao Y and Xiong C** (2017) Influence of Cyclic Wetting and Drying on Physical and Dynamic Compressive Properties of Sandstone, *Engineering Geology*, 220: 1 – 12.

## **KAYNAKLAR (devam ediyor)**

**URL-1** [https://www.siemens.com/press/pool/de/materials/industry/imo/velaro\\_cn\\_en.pdf](https://www.siemens.com/press/pool/de/materials/industry/imo/velaro_cn_en.pdf)

Erişim tarihi 05.08.2017

**URL-2** [http://www.tuvasas.com.tr/index.php?sayfa=urun\\_detay&urun\\_no=22](http://www.tuvasas.com.tr/index.php?sayfa=urun_detay&urun_no=22)

Erişim tarihi 05.08.2017

**URL-3** [http://panraylojistik.com/?page\\_id=24](http://panraylojistik.com/?page_id=24), Erişim tarihi 05.08.2017





# EK AÇIKLAMALAR

## EK A: İlca bazaltik kayalarına ait kimyasal analiz sonuçları

To: BULENT ECEVIT UNIVERSITESI  
BULENT ECEVIT UNIVERSITESI MADEN MUH.  
BOLU MU  
ZONGULDAK

ALS Laboratory Hizmetleri Ltd. Sti.  
Ege Cad. No:7/8 Sarnic  
Izmir, Casimiri IZMIR 35414  
Phone: +90 232 281 7110 Fax: +90 232 281 7120  
www.alsglobal.com



An INAB accredited testing laboratory Reg. No. 173T. Accredited methods are listed in the Scope of Accreditation available on request.

### CERTIFICATE IZ16062695

Project: EKIN KOKEN  
P.O. No.: T116-1900  
This report is for 12 rock samples submitted to our lab in Izmir, IZMIR, Turkey on 25-APR-2016.  
The following have access to data associated with this certificate:  
EKIN KOKEN

### SAMPLE PREPARATION

ALS CODE DESCRIPTION INSTRUMENT  
WB-21 Received Sample Weight ICP-AES  
CRU-QC Crushing QC Test ICP-AES  
PUL-QC Pulverizing QC Test ICP-AES  
LOG-22 Sample login - Rod w/o Barcode ICP-AES  
SPR-21 Sample splitting - riffle splitter ICP-AES  
PUL-31 Pulverize split to 85% < 75 um ICP-AES

### ANALYTICAL PROCEDURES

ALS CODE DESCRIPTION INSTRUMENT  
ME-ICP06 Whole Rock Package - ICP-AES ICP-AES  
OA-CRA05 Loss on Ignition at 1000C WFT-SEQ  
ME-MS81 Lithium Borate Fusion ICP-MS ICP-MS  
TOT-ICP06 Total Calculation for ICP06 ICP-AES

To: BULENT ECEVIT UNIVERSITESI  
ATTN: EKIN KOKEN  
BULENT ECEVIT UNIVERSITESI MADEN MUH. BOLU MU  
ZONGULDAK

This is the Final Report and supersedes any preliminary report with this certificate number. Results apply to samples as submitted. All pages of this report have been checked and approved for release.  
\*\*\*\*\* See Appendix Page for comments regarding this certificate \*\*\*\*\*

Signature: Andrey Tsarov, Technical Manager, Ireland

ALS Laboratuvar Hizmetleri Ltd. Sti.  
Ege Cad. No:7/8 Sarnic  
Izmir, Casimiri IZMIR 35414  
Phone: +90 232 281 7110 Fax: +90 232 281 7120  
www.alsglobal.com

To: BULENT ECEVIT UNIVERSITESI  
BULENT ECEVIT UNIVERSITESI MADEN MUH.  
BOLU MU  
ZONGULDAK

Page: 2 - C  
Total # Pages: 2 (A - D)  
Plus Appendix Pages  
Finalized Date: 6-MAY-2016  
Account: BULECC

An INAB accredited testing laboratory Reg. No. 173T. Accredited methods are listed in the Scope of Accreditation available on request.

Project: EKIN KOKEN

### CERTIFICATE OF ANALYSIS IZ16062695

Sample Description	Method Analyte Units LOR	ME-MS81 Zr ppm	ME-ICP06 SiO2 %	ME-ICP06 Al2O3 %	ME-ICP06 Fe2O3 %	ME-ICP06 CaO %	ME-ICP06 MgO %	ME-ICP06 Na2O %	ME-ICP06 K2O %	ME-ICP06 TiO2 %	ME-ICP06 MnO %	ME-ICP06 P2O5 %	ME-ICP06 SPO %	ME-ICP06 BaO %	ME-ICP06 LOI %	OA-CRA05 LOI %
2A		170	52.9	16.80	6.44	9.62	1.49	3.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	5.09
2B		183	52.6	16.75	6.38	9.74	1.60	3.08	0.01	0.02	0.95	0.13	0.27	0.10	0.16	5.25
2D		159	51.4	16.55	6.80	10.55	1.59	3.05	0.01	0.01	0.94	0.11	0.27	0.10	0.15	5.64
3C		186	54.3	16.85	7.92	6.60	1.44	2.86	0.01	0.01	0.97	0.06	0.29	0.08	0.14	5.96
3D		183	55.6	16.95	7.52	7.04	0.97	2.92	0.01	0.01	0.98	0.03	0.29	0.09	0.14	5.97
3E		163	56.0	16.65	7.36	6.64	0.91	2.87	0.01	0.01	0.96	0.03	0.28	0.09	0.14	5.63
4B		140	54.5	16.40	7.61	8.12	4.74	2.91	0.01	0.02	0.94	0.12	0.26	0.09	0.13	1.50
4C		151	54.1	16.20	7.42	8.08	4.73	2.88	0.01	0.02	0.93	0.12	0.25	0.09	0.13	1.34
4E		141	54.1	16.05	7.81	8.04	4.75	2.88	0.01	0.01	0.95	0.10	0.27	0.10	0.13	1.74
5A		143	52.3	15.75	7.48	8.64	3.82	2.85	0.01	0.02	0.92	0.13	0.25	0.09	0.15	5.01
5B		135	55.2	16.60	8.09	5.91	1.88	2.82	0.01	0.01	0.97	0.06	0.28	0.08	0.14	5.60
5H		138	55.8	16.50	8.07	5.86	1.51	2.85	0.01	0.01	0.95	0.05	0.28	0.08	0.14	5.35



# EK B: Kayadibi ultra-bazik kayaçlarına ait kimyasal analiz sonuçları

To: BULENT ECEVIT UNIVERSITESI  
BULENT ECEVIT UNIVERSITESI MADEN MUH.  
BOLUMU  
ZONGULDAK

ALS Laboratory Hizmetleri Ltd. Sti.  
Ege Cad. No:7/8 Sarnic  
Izmir, Catrakale Mah. 35414  
Phone: +90 232 281 7110 Fax: +90 232 281 7120  
www.alsglobal.com



Page: 1  
Total # Pages: 2 (A - D)  
Plus Appendix Pages  
Finalized Date: 15- MAR- 2017  
Account: BULECU

ALS CODE	DESCRIPTION
WEI- 21	Received Sample Weight
CPU- 22	Sample Origin - Ref / Bar Code
SRU- 21	Split sample - riffle splitter
PUL- 31	Pulverize split to 85% < 75 um
BAG- 01	Bulk Master for Storage
CRU- QC	Crushing QC Test
PUL- QC	Pulverizing QC Test

**CERTIFICATE IZ17038622**

Project: EKIN KOKEN  
P.O. No.: T117-0981  
This report is for 12 Rock samples submitted to our lab in Izmir, IZMIR, Turkey on 2- MAR- 2017.  
The following have access to data associated with this certificate:  
gkn@bulecu

ALS CODE	DESCRIPTION	INSTRUMENT
ME-ICP06	Whole Rock Package - ICP- AES	ICP- AES
ME-MS81	Loss on Ignition at 1000°C	MS81
ME-MS82	Loss on Ignition at 550°C	MS82
TOT-ICP06	Total Calculation for ICP06	ICP- AES

**ANALYTICAL PROCEDURES**

To: BULENT ECEVIT UNIVERSITESI  
BULENT ECEVIT UNIVERSITESI MADEN MUH. BOLUMU  
ZONGULDAK

This is the Final Report and supersedes any preliminary report with this certificate number. Results apply to samples as submitted. All pages of this report have been checked and approved for release.  
\*\*\* See Appendix Page for comments regarding this certificate \*\*\*\*

Signature: *Andrey Yarov*  
Andrey Yarov, Technical Manager, Ireland

ALS Laboratuvar Hizmetleri Ltd. Sti.  
Ege Cad. No:7/8 Sarnic  
Izmir, Catrakale Mah. 35414  
Phone: +90 232 281 7110 Fax: +90 232 281 7120  
www.alsglobal.com



An INAB accredited testing laboratory Reg. No. 173T. Accredited methods are listed in the Scope of Accreditation available on request.

Project: EKIN KOKEN

To: BULENT ECEVIT UNIVERSITESI  
BULENT ECEVIT UNIVERSITESI MADEN MUH.  
BOLUMU  
ZONGULDAK

Page: 2 - C  
Total # Pages: 2 (A - D)  
Plus Appendix Pages  
Finalized Date: 15- MAR- 2017  
Account: BULECU

Sample Description	Method Analyte Units LOR	CERTIFICATE OF ANALYSIS IZ17038622															
		ME-MS81 Zr ppm	ME-ICP06 SiO2 %	ME-ICP06 Al2O3 %	ME-ICP06 Fe2O3 %	ME-ICP06 CaO %	ME-ICP06 MgO %	ME-ICP06 Na2O %	ME-ICP06 K2O %	ME-ICP06 Cr2O3 %	ME-ICP06 TiO2 %	ME-ICP06 MnO %	ME-ICP06 P2O5 %	ME-ICP06 SFO %	ME-ICP06 BaO %	ME-ICP06 LOI %	DA-GRAD5 %
K3		8	47.0	15.00	7.78	12.15	9.33	0.24	0.20	0.02	0.10	0.14	0.02	-0.01	0.01	0.01	6.64
K5		3	49.4	16.10	6.95	12.00	8.86	0.35	0.24	0.02	0.08	0.13	-0.01	-0.01	0.01	0.01	7.64
K6		5	47.7	15.70	7.11	12.00	8.84	0.32	0.23	0.02	0.09	0.13	-0.01	-0.01	0.01	0.01	7.32
KS1		3	48.5	20.3	7.07	15.60	7.58	0.81	0.07	0.03	0.13	0.14	0.02	0.01	-0.01	0.01	1.06
KS2		3	50.0	16.60	9.57	12.75	10.90	0.57	0.06	0.03	0.13	0.18	0.02	-0.01	-0.01	0.01	0.96
KS4		<2	44.5	13.75	8.22	14.05	15.80	0.52	0.01	0.10	0.07	0.13	-0.01	0.01	-0.01	0.01	3.49
KW0		<2	46.3	17.30	11.50	13.15	9.90	0.58	0.02	0.01	0.24	0.17	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.71
KW2		<2	44.0	12.80	8.74	13.10	16.60	0.55	0.01	0.11	0.07	0.13	0.01	-0.01	-0.01	0.01	4.10
KW5		4	40.3	14.35	22.7	11.85	7.25	0.72	0.03	-0.01	0.78	0.21	0.01	-0.01	-0.01	0.01	1.50
KW8		3	40.9	14.60	23.4	11.95	7.39	0.70	0.03	-0.01	0.80	0.21	0.01	0.02	-0.01	0.01	1.90
KW9		<2	46.3	16.90	11.95	13.25	10.05	0.48	0.02	0.01	0.25	0.17	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.34
KW10		2	45.0	17.80	12.70	12.20	7.76	1.04	0.06	0.02	0.28	0.22	-0.01	0.01	-0.01	0.01	3.22



## ÖZGEÇMİŞ

Ekin KÖKEN 1984 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2006 yılında Selçuk Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve aynı bölümden 2010 yılında mezun oldu. 2011 yılında Abdullah Gül Üniversitesi'ne araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2011 – 2018 yılları arasında Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yaptı. 2013 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını tamamladı. 2014 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı. Halen Abdullah Gül Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

### ADRES BİLGİLERİ

Adres : Abdullah Gül Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü  
Kocasinan / KAYSERİ

Tel : 0554 364 92 40  
E-Posta: ekin.koken@agu.edu.tr  
ekin.koken4@gmail.com