

**T.C.**  
**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ASFALT KARIŞIMLARDA MARSHALL YAKLAŞIMI İLE  
TEKERLEK İZİ DEĞERLENDİRMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KARSLI**

**HAZİRAN 2011**  
**GÜMÜŞHANE**

**T.C.**  
**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ASFALT KARIŞIMLARDA MARSHALL YAKLAŞIMI İLE  
TEKERLEK İZİ DEĞERLENDİRMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KARSLI**

**Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**“Yüksek Mühendis”**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih:10.05.2011**

**Tezin Sözlü Savunma Tarihi:08.06.2011**

**HAZİRAN 2011**

**GÜMÜŞHANE**

Doç. Dr. Atakan AKSOY danışmanlığında Mustafa KARSLI tarafından hazırlanan "ASFALT KARIŞIMLARDA MARSHALL YAKLAŞIMI İLE TEKERLEK İZİ DEĞERLENDİRMESİ" bu çalışma jürimiz tarafından Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Başkan



: Doç. Dr. Atakan AKSOY

Üye (Danışman)



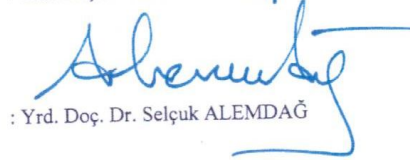
: Doç. Dr. Atakan AKSOY

Üye



: Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER

Üye



: Yrd. Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ

ONAY

Bu tez...../.../2011 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Temel BAYRAK  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**ÖZET**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ASFALT KARIŞIMLARDA MARSHALL YAKLAŞIMI İLE TEKERLEK İZİ  
DEĞERLENDİRMESİ**

Mustafa KARSLI

Gümüşhane Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsünce

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Atakan AKSOY

2011, 113 sayfa

Jüri: Doç. Dr. Atakan AKSOY

Jüri: Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER

Jüri: Yrd. Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ

Asfalt kaplamaların, bozucu gerilmelerinden başlıcası kalıcı deformasyon olup, “tekerlek izi” problemi olarak anılmaktadır. Tekerek izi; sünme, arazi tekerlek izi testleri gibi yöntemlerle araştırılmaktadır. Bununla birlikte; Marshall yöntemiyle, (ASTM D 1559) stabilite ve akma oranları, tekerlek izi probleminin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Bu çalışmanın amacı; Marshall oranı yaklaşımının sıkıştırma enerjisinin değişimine bağlı olarak incelenmesidir.

Marshall yöntemiyle 75 darbe kullanılarak optimum bitüm belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriğinde, farklı sıkıştırma enerjileri (her iki yüze 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 darbe) ile karışımlar hazırlanarak Marshall oranları hesaplanmıştır.

Stabilite değerleri yaygın olarak kullanılan vuruş sayılarına bağlı olarak, 45 vuruştan 65 vuruşa kadar artmakta, 65 vuruştan sonra 75 vuruşa kadar kademeli olarak azalmaktadır. 50-60 vuruş düzeylerinde sıkıştırma enerjisi mantıklı bulunmaktadır. Daha yüksek vuruş sayılarında, stabilitenin artmış olması, kireç taşı agregalarının karışımda kırılmasına bağlı olarak açıklanabilmektedir. Karışımların akma değerleri 65 vuruşa kadar artarken, 65-75 arası vuruşlarda azalmaktadır. Sıkıştırma enerjisinin 75 vuruşa göre yani ağır trafik koşulları için düşünüldüğünde stabilite/akma oranının azalmış olması; tekerlek izi direncinin tanımlanmasında bu yaklaşımın başarılı olmadığını göstermektedir. Belki de, bu konunun nedeni, bu sıkıştırma enerjisi düzeyinde, karışımdaki kaba agregaların kırılabilmiş olmasıdır.

**Anahtar kelimeler:** Asfalt Betonu, Marshall oranı, Tekerlek izi, Sıkıştırma enerjisi.

**ABSTRACT**  
**MS THESIS**

**RUTTING EVALUATION OF ASPHALT MIXTURE WITH THE MARSHALL  
APPROACH**

Mustafa KARSLI

Gümüşhane University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Atakan AKSOY

2011, 113 pages

Jury: Doç. Dr. Atakan AKSOY

Jury: Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER

Jury: Yrd. Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ

Rutting is the mainly distress problem in asphalt parameters. Rutting problem or plastic deformation can be evaluated with creep and wheel tracking test. Also Marshall Test (ASTM D 1559) can be used as an indicator of the rutting problem in context with the Marshall Stability and flow ratios. The purpose of this study is to investigate effect of compacting energies blows on the Marshall parameters. In this search optimum binder content was found with Marshall Method for 75 blows. At the optimum binder content 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 blows were used as compaction efforts. Marshall quotients were calculated. Stability values increased from 45 blows to 65 blows. Unlike

this stability decreased for 65-75 blows. In wheel of stability values, 50- 55- 60 pulses were evaluated with logically. It is thought that especially coarse aggregate can be crushed for higher blows. Flow values increased from 45 blows to 65. For heavy traffic condition 75 blows have been using for design process. From this point, Marshall stability/flow ratio can be thought as controversial for rutting design.

**Key words:** Asphalt concrete, Marshall Quotient, Rutting, Compacting energies.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında desteğini gördüğüm, katkı sağlayan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Atakan AKSOY'a, bilgilerinden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Erol İSKENDER'e öncelikle teşekkürlerimi sunarım.

"Asfalt Karışımlarda Marshall Yaklaşımı İle Tekerlek İzi Değerlendirmesi" adlı bu tezin ilgili alanda yararlı olmasını dilerim.

Polat Yol-Yapı Araklı Şantiyesi laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda desteğini esirgemeyen Laboratuvar sorumlusu Sayın Ali Kemal ÇAĞLAR'a ve laboratuvar çalışanı Dursun BIYIKLI'ya, tecrübeleriyle bu çalışmaya katkıda bulunan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Orhan KARSLI ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Raif KANDEMİR'e, yine yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Sayın Arş. Gör. Mehmet Ali GÜCER, Arş. Gör. Ahmet Dünder ŞEN ve Arş. Gör. Ayberk KAYA'ya teşekkür ediyorum.

Bu çalışmamı, bütün zorluklara rağmen öğrenim hayatım boyunca desteğini esirgemeyen aileme ithaf ediyorum.

Mustafa KARSLI

Gümüşhane, 2011



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
KABUL VE ONAY .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
TABLolar LİSTESİ .....	xvi
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	2
2.1. Konunun Özgeçmişi .....	2
2.2. Başlıca Laboratuar Sıkıştırma Teknikleri .....	14
2.2.1. Surperpave Yoğurmalı Pres Tekniği .....	15
2.2.2. Hveem Sıkıştırma yöntemi.....	16
2.2.3. Marshall Sıkıştırma yöntemi .....	16
2.3. Tekerlek İzi Probleminin Gelişimi .....	17
2.3.1. Asfalt Betonunda Tekerlek İzi .....	19
2.4. Asfalt Kaplama Problemleri.....	19
2.4.1. Bozulma Ölçütleri.....	20
2.4.1.1. Tekerlek İzi Derinliği.....	20
2.4.1.2 Çatlak Oluşumu .....	20
2.4.1.3.Defleksiyon .....	21
2.4.2. Yol Üstyapısında Oluşan Bozulma Türleri.....	21
2.4.2.1. Oturma ve Çökme.....	21
2.4.2.2. Tekerlek İzi Oluşumu .....	22
2.4.2.3. Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar).....	24
2.4.2.4. Kabarmalar .....	25
2.4.2.5. Çatlaklar .....	25
2.4.2.6 Ayrılma, Ayrışma ve Parçalanmalar .....	26
2.4.2.7. Cilalanma ve Kusmalar (Kayma Direnci Kaybı) .....	27

2.4.2.7.1. Cilalanma.....	27
2.4.2.7.2. Kusma .....	28
2.5. Tekerlek İzi Oluşumunun Sakıncaları .....	28
2.6. Kalıcı Deformasyonlara Dirençli Karışımlar .....	29
2.6.1. Fransa’da Yapılan Çalışmalar .....	29
2.6.2. İngiltere ve İtalya Uygulamaları.....	30
2.6.3. Belçika Uygulamaları .....	31
2.6.4. ABD’de Kullanılan Büyük Kırmataşlı Karışım Uygulamaları.....	32
2.6.5. SMA Tipi Karışımlar; Almanya ve Diğer Avrupa Ülkeleri Uygulamaları .....	33
2.7. Tekerlek İzi Tahmininde Kullanılan Modeller ve Deneyleer.....	33
2.7.1. Tekerlek İzi Tahmininde Kullanılan Modeller.....	33
2.7.1.1. Shell Modeli .....	33
2.7.1.2. Belçika Yol Araştırma Merkezi (BRRC) Modeli.....	34
2.7.1.3. Bratislava Üniversitesi Modeli.....	35
2.7.1.4. Ezzo Modeli.....	36
2.7.1.5. Von Quintus Modeli .....	36
2.7.1.6. Zahw vd.’lerinin Geliştirdiği Model.....	37
2.7.1.7. Fernando, vd. Modeli.....	37
2.7.2. Tekerlek İzi Tahmininde Kullanılan Deneyleer.....	38
2.7.2.1. Statik Sünme Deneyi.....	38
2.7.2.1.1. Deneyin Yapılışı ve Hesaplamalar .....	40
2.7.2.2. Tekrarlı Sünme Deneyi .....	42
2.7.2.3. Tekerlek İzi Deneyi .....	43
2.7.2.4. Dolaylı Çekme Testi.....	44
2.7.2.5. Marshall Testi Deneyi.....	45
2.7.2.5.1. Briketlerin Yüksekliklerinin Belirlenmesi .....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	47
3.1. Materyal .....	47
3.1.1. Materyal Tanımlamada Kullanılan Deneyleer [24].....	47
3.1.2. Agrega Örneklerine Uygulanan Deneyleer.....	49
3.1.3. Karışım Tasarımı .....	54
3.1.4 Materyal Özellikleri.....	60
3.1.4.1. Agrega Özellikleri .....	60

3.1.4.2. Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri .....	62
3.1.4.3. Karışım Özellikleri .....	63
3.2. Yöntem.....	66
4. İRDELEME ve BULGULAR.....	72
4.1. Farklı Oranlarda Sıkıştırılan Briketlerin Stabilite , Akma ve Marshall Oranı Değerleri .....	75
5. SONUÇLAR .....	92
KAYNAKLAR .....	94
ÖZGEÇMİŞ .....	98

## SİMGELER LİSTESİ

- C : Dinamik etki için düzeltme faktörü.
- h : Bitümlü tabakanın kalınlığı.
- $\sigma_{av}$  : Standart dingil yükü altında oluşan ve sıcaklığa göre değişen gerilme.
- $S_m$  : Karışımın rijitlik modülü.
- D : Toplam kalıcı deformasyon.
- $\Delta h_i$  : Her tabaka için oluşan deformasyon.
- $\epsilon_p$  : Kalıcı deformasyon.
- N : Tekrarlı yük adedini.
- $A_{,m}$  : Regresyon sabitleri.
- $m_c$  : Statik sünme eğrisinin doğru olduğu kesimdeki eğimi.
- A : Sünme – zaman eğrisinin 1. saniyesindeki sünme deformasyonu miktarı.
- $t_1$  : Yükleme süresi (sn).
- $\epsilon_{rt}$  : Tekrarlı sünme deneylerinde oluşan toplam geriye dönen deformasyon.
- x : Geri dönme yeteneği.
- $A_b$  : Kaba agreganın su absorpsiyonu.
- Visc : Karışımında kullanılan asfalt çimentosunun kinematik viskozitesi (santistok),
- Comp : Sıkıştırma enerjisi, darbe sayısı.
- St : Uygulanan gerilme (Mpa).
- Ts : Dolaylı çekme mukavemetini (Mpa).
- Ecq(t) : t anındaki sünme modülü (psi).
- $\sigma_c$  : Briketlere uygulanan basınç gerilmesi (psi).
- $\epsilon_c(t)$  : t anında tek ekseninde oluşan deformasyon (inç/inç).
- L : Briket yüksekliği (inç)
- $\Delta v(t)$  : t anında düşey yönde oluşan yer değiştirme (inç).
- $\sigma_t$  : Brikete uygulanan dolaylı çekme gerilmesi değeri.
- P : Brikete uygulanan yük.
- $\epsilon(t)$  : Sünme deformasyonu (inç/inç).
- $\Delta h(t)$  : t anındaki yatay yer değiştirme (inç).
- V : Poisson oranı
- X : Briketin geriye dönüş kabiliyeti.
- V : Briketin hacmi.

- B : Briketin havadaki ağırlığı.  
C : Briketin sudaki ağırlığı.  
D<sub>p</sub> : Briketin hacim özgül ağırlığı.  
A : Briketin havadaki ağırlığı.  
D<sub>t</sub> : Briketin maksimum teorik özgül ağırlığı.  
W<sub>a</sub> : Agreganın ağırlığına göre bitüm yüzdesi.  
G<sub>ef</sub> : Agreganın efektif özgül ağırlığı.  
G<sub>b</sub> : Bitümün özgül ağırlığı.  
P<sub>ba</sub> : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm.  
G<sub>ef</sub> : Agreganın efektif özgül ağırlığı.  
G<sub>sb</sub> : Agreganın hacim özgül ağırlığı.  
G<sub>b</sub> : Bitümün özgül ağırlığı  
P<sub>be</sub> : Agreganın yüzdesi olarak efektif bitüm miktarı  
W<sub>a</sub> : Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm.  
VMA : Agregalar arası boşluk yüzdesi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Stabilite- HDPE grafiği[4].....	2
Şekil 2.2. Akma- HDPE grafiği[4]. ....	2
Şekil 2.3. Marshall oranı- HDPE grafiği[4]. ....	3
Şekil 2.4. Stabilite- Polimer içeriği grafiği[6]. ....	4
Şekil 2.5. Akma- Polimer içeriği grafiği[6]. ....	4
Şekil 2.6. Marshall oranı- Polimer içeriği grafiği[6]. ....	4
Şekil 2.7. Marshall Stabilitesi- bağlayıcı oranı ilişkisi[14]. ....	9
Şekil 2.8. Marshall oranı- bağlayıcı oranı ilişkisi[14]. ....	9
Şekil 2.9. Karışımların stabilite değerleri[16]. ....	12
Şekil 2.10. Karışımların Marshall oranı değerleri[16]. ....	13
Şekil 2.11. Yoğurmalı pres[39]. ....	15
Şekil 2.12. Marshall sıkıştırma düzeneği. ....	17
Şekil 2.13. Tekerlek izinde oturma örneği.....	23
Şekil 2.14. Sünme modülü nomografi.....	39
Şekil 2.15. Şematik bir sünme deney düzeneği [35]. ....	39
Şekil 2.16. Statik sünme deneyinin yapıldığı NAT cihazı.....	40
Şekil 2.17. Tekrarlı sünme deneyi test düzeneği[36]. ....	42
Şekil 2.18. Tekerlek izi deneyinin şematik gösterimi[21]. ....	43
Şekil 3.1. Marshall stabilite aleti. ....	58
Şekil 3.2. Asfalt numunesi karıştırma mikseri. ....	59
Şekil 3.3. Seçilen gradasyon.....	62
Şekil 3.4. a) Pratik özgül ağırlık-bitüm yüzdesi grafiği, b) Stabilite-bitüm yüzdesi grafiği, c) Akma-bitüm yüzdesi grafiği, d) Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm yüzdesi grafiği, e) Boşluk yüzdesi-bitüm yüzdesi grafiği, f) VMA yüzdesi-bitüm yüzdesi grafiği. ....	65
Şekil 3.5. Farklı sıkıştırmalar sonucu oluşturulan briketler.....	68

Şekil 4.1. Kırk beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri .....	76
Şekil 4.2. Elli darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.....	76
Şekil 4.3. Ellibeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.....	77
Şekil 4.4. Altmış darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.....	77
Şekil 4.5. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.....	78
Şekil 4.6. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri .....	78
Şekil 4.7. Yetmişbeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.....	79
Şekil 4.8. Farklı darbelerle sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri ortalamaları.....	79
Şekil 4.9. Kırkbeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	80
Şekil 4.10. Elli darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	80
Şekil 4.11. Ellibeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	81
Şekil 4.12. Altmış darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	81
Şekil 4.13. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	82
Şekil 4.14. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	82
Şekil 4.15. Yetmiş beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.....	83
Şekil 4.16. Farklı darbelerle sıkıştırılan briketlerin akma değerleri ortalamaları.....	83
Şekil 4.17. Kırk beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	84
Şekil 4.18. Elli darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	84
Şekil 4.19. Elli beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	85
Şekil 4.20. Altmış darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	85
Şekil 4.21. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	86
Şekil 4.22. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	86
Şekil 4.23. Yetmiş beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.....	87
Şekil 4.24. Farklı darbelerle sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma ortalama değerleri.....	87
Şekil 4.25. Marshall oranı ile sıkıştırma enerjisi ilişkisi.....	90

## TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Karışım indisleri ve bitüm içerikleri. ....	11
Tablo 2.2. Marshall stabilite ve akma deneylerinden elde edilen sonuçlar. ....	12
Tablo 2.3. Belçika’da tekerlek izine karşı kullanılan karışımlar.....	31
Tablo 2.4. Ağır taşıt trafik hacmine göre tahmin edilen tekerlek izi değerleri (mm)....	35
Tablo 2.5. Tabakaların ortalama mekanik özellikleri (Belçika Modeli).....	35
Tablo 3.1 Aşınma deneyi örnek sınıflaması. ....	51
Tablo 3.2. Aşınma deneyinde kullanılan küre sayılan.....	51
Tablo 3.3. Sağlıklik deneyinde uygulanan miktar .....	52
Tablo 3.4. Donma kaybı için kullanılan elek .....	53
Tablo 3.5. Yassılık deneyi elekleri .....	54
Tablo 3.6. Kaba ve ince agrega özellikleri.....	60
Tablo 3.7. Dane boyutu dağılımı .....	60
Tablo 3.8. Seçilen agrega gradasyonu ve bu gradasyona göre önerilen sınır değerleri.	61
Tablo 3.9. Kaba ve ince agrega özgül ağırlıkları.....	62
Tablo 3.10. Bitümlü bağlayıcı (AC 65) üzerinde yapılan deneyler ve sonuçları.....	63
Tablo 3.11. Aşınma dizaynı Marshall deneyi sonuçları .....	64
Tablo 3.12. Optimum bitüm miktarı ve karşılık gelen parametreler .....	66
Tablo 3.13. Çalışmada izlenen yöntem.....	67
Tablo 3.14. Kırkbeş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri.....	68
Tablo 3.15. Elli darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri .....	69
Tablo 3.16. Elli beş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri .....	69
Tablo 3.17. Altmış darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri .....	70
Tablo 3.18. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri .....	70
Tablo 3.19. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri.....	71
Tablo 3.20. Yetmiş beş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri.....	71



Tablo 4.1. Kırk beş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri.....	72
Tablo 4.2. Elli darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri .....	72
Tablo 4.3. Ellibeş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri .....	73
Tablo 4.4. Altmış darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri.....	73
Tablo 4.5. Altmış beş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri .....	74
Tablo 4.6. Yetmiş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri.....	74
Tablo 4.7. Yetmişbeş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri.....	75
Tablo 4.8. Özdeş briketler arasındaki maksimum fark.....	88
Tablo 4.9. Karışımların ortalama akma ve stabilite değerlerindeki artış oranı.....	89

## 1. GİRİŞ

Sıcak karışım asfalt kaplamanın stabilitesi aşınma tabakasının tasarımında bitümlü karışımın en önemli özelliğidir. Trafik altında, tekerlek izine ve yorulmalara karşı direnç yeteneğini göstermektedir. Bununla birlikte stabilite trafiği koruyacak yeterli yüksekliğe sahip olmalı fakat gereken trafik koşullarından daha yüksek olmamalıdır. Asfalt karışımında stabilite eksikliği sökülme ve yol yüzeyinin akmasına neden olmaktadır. Akma sıcak karışım asfalt kaplamalarda gradyal oturmalara kendini ayarlamasını saptamakta ve çatlama olmaksızın alt yapının hareketli uyumunu sağlamaktadır. Akma stabilitenin zıttı olarak kabul edilebilir. Asfalt betonunun plastik ve elastik özelliklerinin etkisini ve trafik altında aşınma tabakalarının geri dönmeyen durumunu temsil etmektedir [1].

Tekerlek izi veya kalıcı deformasyon başlıca asfalt kaplama bozulmalarındandır. Bu bozulma mekanizması kaplamaların bozulmasına, bakım maliyetlerinin artmasına ve güvenlik problemlerine neden olmaktadır. Tekerlek izi yada kalıcı deformasyon birincil olarak agrega ve karışım özellikleriyle birlikte bağlayıcı tanımlamasından etkilenmektedir. Kalıcı deformasyon problemi statik veya tekrarlı sünme testleri, Bazı tekerlek izi deneyleri ve Marshall oranı yaklaşımı gibi çeşitli mühendislik yaklaşımları ile tahmin edilebilmektedir[2].

Marshall stabilitesinin Marshall akmasına oranı Marshall Oranı (MQ) olarak adlandırılmaktadır. Bu oran asfalt betonunun deformasyona karşı direncinin ve rijitliğinin bir göstergesidir. Marshall Oranı değeri modifiye karışım örneklerin deformasyon direncinin değerlendirilmesi için kullanılır. Daha yüksek MQ değeri daha rijit karışımı belirtmekte ve muhtemelen daha dirençli karışımı göstermektedir. MQ Draft BSEN 12697-34 tanıtılmaktadır[2].

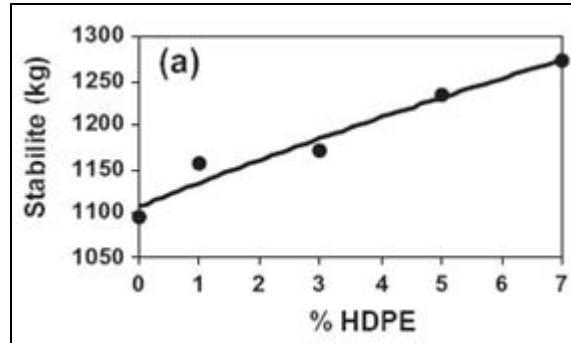
Marshall tasarımında örnekler hazırlanırken trafik yoğunluğu da göz önüne alınarak numunelerin kaç darbeyle sıkıştırılacağına karar verilmektedir. Örneklerin her iki yüzüne eşit olmak üzere, orta yoğunluklu trafik için 50, yüksek yoğunluklu trafik için 75 darbe vurulmaktadır[3].

Bu araştırmanın amacı değişik sıkıştırma enerjilerinde (45, 50, 55, 60, 65, 70, 75) Marshall oranının değişimlerini araştırmak ve Marshall oranı eğrisel gelişim biçimine bağlı olarak tekerlek izi bağlamında en etkili sıkıştırma enerjisini belirlemektir.

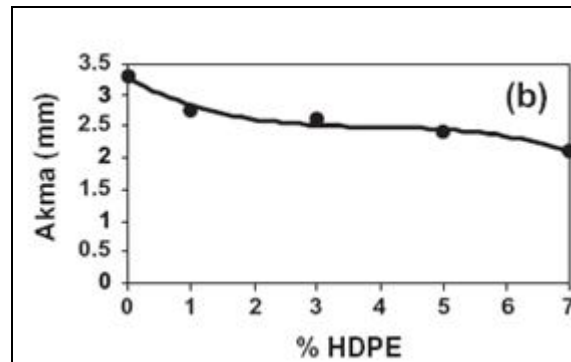
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Konunun Özgeçmişi

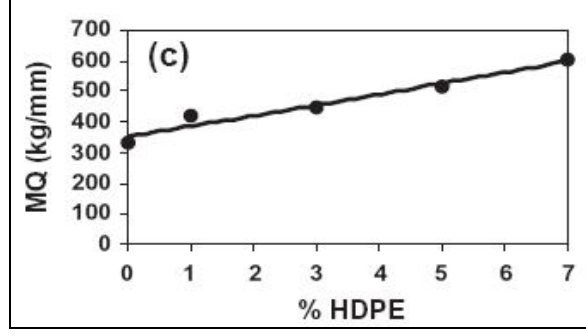
Yüksek yoğunluklu polietilenin sıcak karışımlarda modifiyer olarak kullanıldığı çalışmada 80/100 penetrasyon derceli asfalt kullanılmış ve pelet şeklindeki yüksek yoğunluklu polietilen 170°C de, bitüm ağırlığının %1, %3, %5'i kadar kullanılmıştır. Karışım deneysel olarak reolojik deneylerin yanında durabilite deneyi, üniformate deneyi ve Marshall oranına göre değerlendirilmiştir. Karışımdaki HDPE oranının artmasıyla MQ değerinin arttığı, karışıma %5 oranında HDPE karıştırılmasıyla MQ değerinin %55 arttığı belirtilmiştir. Bu karışımların yüksek stabilite ve yüksek Marshall oranlarından dolayı kalıcı deformasyona karşı daha dirençli oldukları belirtilmiş olup karışımların daha düşük asfalt enerjisinden dolayı askeri havaalanlarında kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak HDPE içeriği- stabilite, HDPE içeriği-akma ve HDPE içeriği- MQ ilişkisinin Şekil 2.1., Şekil 2.2., Şekil 2.3.'teki gibi olduğu belirtilmiştir[4].



Şekil 2.1. Stabilite- HDPE grafiği[4].



Şekil 2.2. Akma- HDPE grafiği[4].

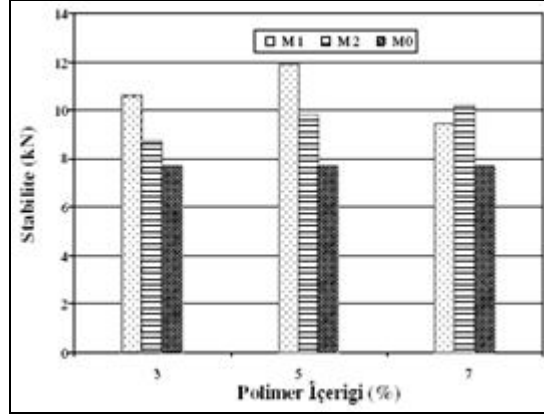


Şekil 2.3. Marshall oranı- HDPE grafiği[4].

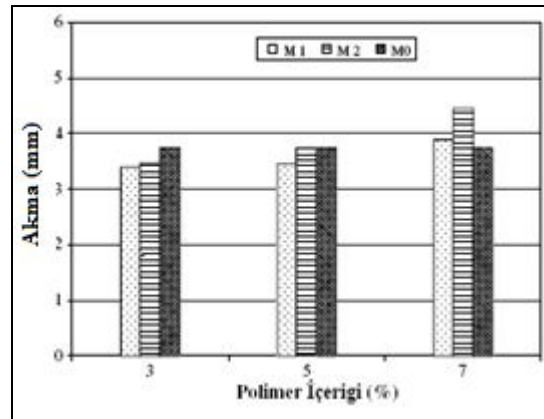
Marshall test sonuçlarının tahmini için yapay sinir ağlarının kullanıldığı çalışmada asfalt karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerini güçlendirmede polipropilenler kullanılmıştır. Bu çalışma için üç karışım tipi tasarlanmıştır. Bunların M03(3 mm boyunda katkı), M09(9 mm boyunda katkı) ve atık halde boyutsuz katılardan oluşan karışımlar olduğu belirtilmiştir. M03 karışım tipi için agrega ağırlığının binde üçünü, binde dört buçüğünü ve binde altısını kullanıp bitümle karıştırılmak suretiyle Marshall briketleri oluşturulmuştur. M09 ve atık karışım tipi için yalnızca binde üç katkılı örnekler oluşturulmuşlar. Marshall briketleri laboratuarda ASTM D1559-76 ya uygun her bir yüzüne elli darbe ile sıkıştırılarak 165-170°C de elde edilmişler. Laboratuar deneyleri 50-70 penetrasyonlu bitüm ve polipropilen ile modifiye edilen örnekler üzerinde yapılmıştır. Marshall stabilite ve akma testleri modifiye edilen asfalt örnekleri üzerinde yapılmış ve bu testler polipropilen katkısının asfalt karışımlara olumlu etkisi olduğunu göstermiştir. Marshall test sonuçlarına göre binde üç katkılı M03 tipi karışımlar en uygun karışım tipi olarak bulunmuştur. Sonuç olarak polipropilenlerin asfalt karışımlara eklenmesi ile Marshall stabilitesi ve Marshall oranının arttığı ve bu buluşların yüksek performanslı asfalt karışımların dizaynı için çok önemli pratik bulgular olduğu belirtilmiştir[5].

EVA ile modifiye edilmiş bitümlü karışımların performanslarına üretim aşamasında etkilerinin araştırıldığı çalışmada, 80/100 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır. Geleneksel ve EVA modifiyeli bitümle 150 °C de her bir yüzeyin elli darbe ile sıkıştırılmasıyla oluşturulan örneklere Marshall stabilitesi, Marshall akma deneyi, sıkıştırma deneyi ve sünme deneyleri uygulanmıştır. Çalışmada üç çeşit karışım tasarlanmış ki bunlar M0: modifiye edilmemiş bitüm ile agrega karışımı (Kontrol karışım), M1: polimer modifiye bitüm ile agrega karışımı (EVA %3, %5 ve %7

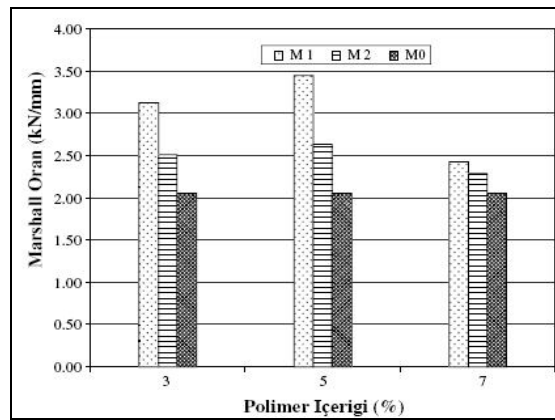
oranında katılmış) ve M2: modifiye edilmemiş bitüm ile EVA ve agrega aynı anda karıştırıldığı karışımlar olarak tanımlanmıştır[6].



Şekil 2.4. Stabilite- Polimer içeriği grafiği[6].



Şekil 2.5. Akma- Polimer içeriği grafiği[6].



Şekil 2.6. Marshall oranı- Polimer içeriği grafiği[6].

Şekillerden görüldüğü üzere M1 ve M2 karışımlarının M0'a göre daha yüksek Marshall stabilitesi değerini gösterdiği belirtilmiştir. En düşük Marshall akma değerini ise M1 karışımlarının verdiği belirtilmiştir. Marshall oranlarına bakıldığında EVA ilave etmenin M1 ve M2 karışımlarının sertliğini artırdığı, EVA içeriğinin artmasıyla MQ'nun da arttığı ve maksimum değerine %5 EVA içeriğinde ulaştığı, sonra tekrar azalmaya başladığını belirtilmiştir. Sonuç olarak en yüksek MQ değerinin M1 karışımlarda %5 EVA içeriğinde elde edildiği ve geleneksel karışımlara göre 1.7 kat fazla olduğu, M2 karışımlarının MQ değerinin M1 karışımlarından daha düşük olduğu, bunun durumun ise EVA partikülleri ile AC 80/100 arasındaki kötü karışılabilirlikten kaynaklandığı belirtilmiştir. HMA aşamasından sonra EVA partikülleri çözünmeden kalmış ve M2 karışımlarının mekanik performanslarını etkilemiştir. Buna rağmen kontrol karışımlarla karşılaştırıldığında performansının daha yüksek olduğu belirtilmiştir[6].

Asfalt karışımlara nişasta katılmasına yönelik yapılan çalışmada agrega ile ağırlıkça %2.5, %5 ve %7.5 oranında nişasta ve 70/100 penetrasyonlu bitümü karıştırılmıştır. Modifiye olmuş ve olmamış numuneler fiziksel, kimyasal, alkali asit ve yanma dayanımı testlerine tabi tutmuştur. Yapılan çalışmada nişasta tanelerinin boyları 1-100 mikron arasında değişirken ince agregaların çapı ise yüz nolu elekten %5 en fazla %10 'u geçmeyecek kadar büyük olduğunu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu karışım işlemlerinde nişastanın modifiyer olmakla birlikte dolgu görevi gördüğü belirtilmiştir. Bu özellikleri asfalt karışımların stabilitesini ve dayanımını artırmıştır. Yapılan deney örnekleri göstermiş ki 135- 142 °C de en iyi sonucu veren örnekler üretilmiş, 25°C'de nişasta içeriği artırıldığı zaman genel olarak penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının arttığı ve buna bağlı olarak deformasyona karşı direncin arttığı belirtilmiştir. Nişastalı asfalt biriketlerinin yanmaya ve birçok kimyasala karşı dirençli olduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak nişasta oranı %5-%7 arasında tutulduğunda asfalt özellikleri için yüksek performans değerleri elde edilmiş ve nişastalı asfalt briketlerinin ucuz maliyete sahip oldukları için geniş kullanıma sahip olacağı kanısına varılmıştır. Nişastanın SMA karışımlara su girişini engelleyici etki yaptığı ve nişastalı karışımların kontrol karışımlara göre %11 daha yüksek stabilite değerleri verdiği belirtilmiştir. Asfalt beton karışımlardaki nişasta kullanımının 25°C'deki elastisite modüllerinde artışa neden olduğu ve nişastalı karışımların tekerlek izi ve esneme gerilmesi sonuçlarının kontrol karışımlarinkinden çok daha iyi olduğu belirtilmiştir[7].

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) içeren çeşitli plastik atıkların asfalt betonunda polimer katkı olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmada, çeşitli karıştırma zamanı, karıştırma sıcaklığı ve HDPE içeriklerinde hazırlanan HDPE modifiye karışımların Marshall stabilitesi, Marshall akması ve Marshall oranı üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. HMA da kullanılan bitüm optimum bitüm içeriğinin ağırlık olarak %4, %6 ve %8'i karıştırılarak, 145,150 ve 165 °C sıcaklıkta AC 20 kullanılarak ve %5,15 bitüm ile otuz dakika karıştırılmak suretiyle hazırlanmıştır. HDPE modifiye asfalt betonunda Marshall stabilitesi değeri ve MQ değerinde (deformasyona karşı direnç) dikkate değer bir artış olduğu gözlemlenmiştir. %4 HDPE, 165 °C karıştırma sıcaklığı ve otuz dakika karıştırma süresinde Marshall stabilitesi, Marshall akması ve Marshall oranı optimum koşullar olarak belirlenmiş ve MQ değerinin kontrol karışımlarla karşılaştırıldığında %50 oranında arttığı gözlemlenmiştir. HDPE modifiye bitümlü karışımların yüksek stabilite ve yüksek Marshall oranlarından dolayı kalıcı deformasyona karşı daha iyi bir direnç sağladıkları ve çevrenin korunmasına olduğu kadar plastik atıkların tekrar kullanımına da katkıda bulunulacağı vurgulanmıştır[8].

Geri dönüştürülmüş plastiklerin sürekli gradasyon içeren asfalt betonu karışımların laboratuvar tasarımlarının araştırıldığı çalışmada ağırlık olarak LDPE den oluşan pellet formundaki geri dönüştürülmüş atık plastikler yoğun gradasyonlu bitümlü karışımlarda eşit boyutlarda mineral agregalar yerine (hacim olarak) kullanılmıştır. Aynı hava boşluğu içeriğinde sıkıştırılmış pilastiphalt karışımlar geleneksel kontrol karışımlardan daha düşük birim hacim ağırlığı vermişler. LDPE ile hacim olarak %30 agrega değişikliği birim hacim ağırlığında %16 azalmaya neden olmuştur. Yoğunluktaki bu azalmanın taşıma maliyetleri açısından önemli olduğunu, LDPE karışimli örneklerde Marshall satabilite ve Marshall oranı değerlerinin %25 artış göstermiş olduğu ve 60°C sıcaklıkta bir saat yüklemenden sonra plastiphalt karışımların sünme rijitliği değerinin kontrol karışımlarinkinden çok az düşük bulunduğu belirtilmiştir. Buna rağmen bir saat yüksüz süreden sonra %14 geri dönüşüm oluşmuştur. Katkılı karışımların dolaylı çekme rijitlik modülü kontrol karışımlardan daha düşük, statik dolaylı çekme mukavemeti değerini ise daha yüksek bulunmuştur[9].

Asfalt beton karışımlarda agrega ile yer değiştirme özelliğine sahip plastik kullanımına yönelik yapılan çalışmada İranda ki çevresel problemlerden birinin evsel atıklardan ve çöp alanlarında depolanan polietilenlerden oluşan çok sayıda pet şişe olduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı bir milyom m<sup>3</sup>'den fazla atık sahaya ihtiyaç

duyulacağı belirtilmiş. Bu çalışma ile bu şişelerin çevresel etkilerini azaltıp bunların asfalt karışımlarda kullanımı değerlendirmiştir. Bu amaçla pilastiphalt karışımların mekanik özellikleri ile kontrol karışımların mekanik özelliklerini karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yoğunluk, Marshall oranı, Marshall stabilitesi, Marshall akması üzerinde olmuş. Bu atık polietilenler yer değiştirme işlemi için 3 mm boyutlarına kadar parçalanmış ve % 6,6 bitüm içerikli karışımlarda kullanılmışlar. Çalışmada beş farklı karışım tipi kullanılmış sonuç olarak % 20'lik polietilen karışımı agreganın karışım yoğunluğunu %2.8 oranında düşürdüğü görülmüştür. Bu plastiphalt karışımların akma değeri kontrollü karışımlarinkinden daha düşük çıktığı ve Marshall stabilitesi ile Marshall oranı sonuçlarının hemen hemen aynı sonuçları verdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak bu geri dönüşümlü şişelerin asfalt karışımlarda kullanımıyla çevresel problemlerin azaltılacağı ve enerji tasarrufu elde edileceği sonucuna varılmış olup bu asfalt karışımların pratik kullanımlar için uygun olduğu belirtilmiştir [10].

Polimer modifiyeler içeren asfalt karışımların tekerlek izi performansının araştırılmasına yönelik yapılan çalışmada kontrol ve asfalt karışımların mekaniksel özelliklerini değerlendirilmiştir. Bunun için klasik ve beş modifiye edilmiş asfalt karışım tasarlanmıştır. Amorf polyalphalefin, seluloz fiber, polyolefin, bitümlü seluloz fiber, strin butadien sitrin modifiyer olarak kullanılmıştır. Çalışmada indirek gerilme kuvveti, indirek gerilme, statik ve tekrarlı sünme ile LCPC tekerlek izi testleri farklı yükleme şartları ve sıcaklıklarda yapılmıştır. Ayrıca araştırmada diğer mekanik testler ve LCPC tekerlek izi testi arasındaki etkileşim karşılaştırılmış ve sonuçta görülmüş ki LCPC tekerlek izi testleri ve tekrar eden sünme testleri sonuçlarına göre SBS karışımlar tekerlek izi performansında en performanslı karışımlardır. Statik sünme testleri sonuçlarında çelişkili durum ortaya çıkmış fakat klasik karışımların daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlarında modifiyer ile bitüm arasındaki değişimden ve yolun statik davranışından kaynaklanabileceği belirtilmiştir[11].

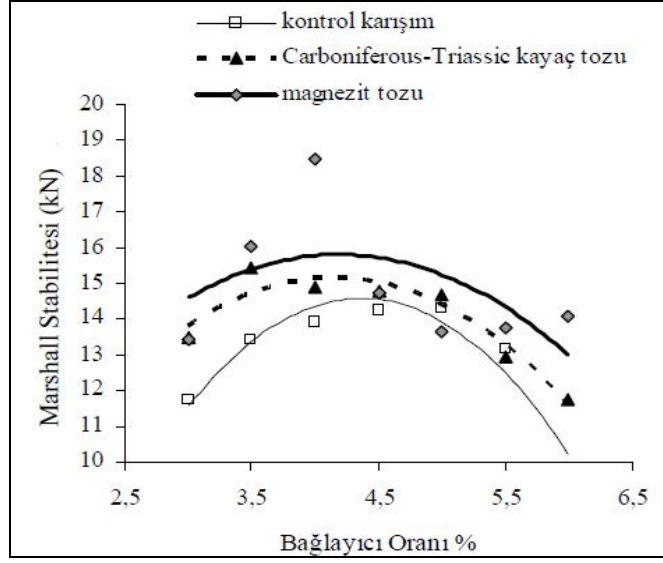
Hibrit sayısal metot kullanarak asfalt karışımların akma değerlerinin formülasyonuna yönelik yapılan çalışmada yoğun asfalt karışımların akma değerlerini öngörebilmek için GP/SA adı verilen kökensel programlama ve simile edilmiş soğutma gibi değişik hibrit metotlar bir araya getiren yüksek hassasiyetli bir model türetilmiştir. Geliştirilen bu model Marshall örneklerinin stabilite ve akma değerleri ile filler yüzdesini ve mineral agrega boşluklarını korale etmiştir. Genelleştirilmiş yapay sinir ağlarının ve çoklu gerilme analizlerinin bu GP/SA modeli için bir kriter niteliğinde



olduğu belirtilmiştir. Değişkenlerin akma değerine etkisi hasasiyet analizleriyle ölçülmüş ve deneysel çalışma sonuçları ile daha sonraki parametrik çalışmaların sonuçları doğrulanmıştır. Sonuçta GP/SA değerinin akma değerinin belirlenmesinde kullanılabilir bir yöntem olduğu belirtilmiştir[12].

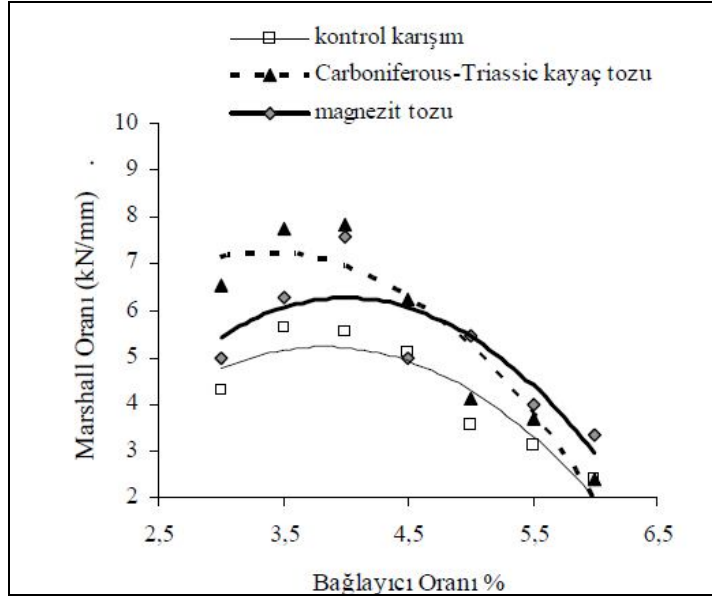
Asfalt karışımlarda POFA kullanımının değerlendirilmesi adı altında yapılan çalışmada Malezya'nın dünyanın en büyük hurma yağı sağlayıcılarından olduğu ve bu yağın üretimi aşamasında büyük miktarda atık madde açığa çıktığı belirtilmiştir. Bu atık maddeler hurma ağacı lifleri, kabuklar ve boş meyve birikintileriymiş. Bu atıkların yakılmasıyla %5 oranında POFA küllerinin olduğunu tespit edilmiş. Asfalt betonu karışımlarına değişik yüzdelerde (%1-%3-%5-%7) POFA katılarak farklı oranlarda POFA'lı karışımlar üretilmiştir. Bu numuneler üretilirken 0.075 mm den geçen katkı maddeleri kullanılmıştır. Modifiye olmuş asfalt karışımların mekanik özelliklerini incelenmiş ve klasik karışımlarla karşılaştırılmıştır. Bu örnekler Marshall stabilitesi, elastiklik modülü, statik ve dinamik kayma testleri ile yarıma testlerine maruz tutulmuştur. Sonuçta POFA içeren örneklerin farklı performans değerleri gösterdiği ve klasik karışımlara oranla kalıcı deformasyona karşı çok daha yüksek direnç gösterdikleri belirtilmiştir[13].

Bitümlü sıcak karışımların performansına filler etkisi adı altında yapılan çalışmada değişik filler cinslerinin BSK 'nın Marshall Stabilitesi ve Dolaylı Çekme Modülüne etkisini incelenmiştir. Bunun için 50-70 penetrasyonlu bitümlü sıcak karışımlara filler olarak Carboniferous-Triassic kayaç tozları ve Magnezit kayaç tozları katılarak kalker (kireçtaşı) tozu ile yapılan karışımlarla karşılaştırılmış ve bu karışımlara standart testler uygulanmıştır. Carboniferous-Triassic kaya tozu ve Magnezit tozu karışım içerisinde filler olarak kullanılmış ve elde edilen karışımın özellikleri kalker tozu kullanılarak hazırlanan karışımların özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Bitümlü bağlayıcı oranı karışım hazırlanırken karışımın durumu değerlendirilip % 3 ile % 6 arasında değiştirilmifir. Karıştırma sıcaklığının karışım özellikleri üzerinde etkisi önemli olduğu için karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının viskozitesinin 0,2 Pas olması düşüncesine dayalı olarak karıştırma sıcaklığı Bitümlü Bağlayıcı Deney Grafiğini kullanarak belirlenmiştir. Bağlayıcı viskozitesi 10 Pas olacak sıcaklığda sıkıştırma sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Karışımlar  $160 \pm 5$  °C de hazırlanmış ve  $145 \pm 5$  °C de sıkıştırılmıştır[14].



Şekil 2.7. Marshall Stabilitesi- bağlayıcı oranı ilişkisi[14].

Marshall Stabilitesi değerlerinin bağlayıcı oranına bağlı olarak değişimi ikinci derece polinom ile gösterilmiştir. Bu yaklaşımla, Magnezit tozu ile yapılan karışımların Marshall Stabilite değerlerini diğer iki karışımdan biraz daha yüksek bulunmuştur. En büyük stabilite değerinin de hem Carboniferous-Triassic kayaç tozu hem de Magnezit tozu ile yapılan karışımlar için kireç taşı tozu ile yapılan karışımlarla kıyaslandığında daha düşük bağlayıcı oranında elde edildiği belirtilmiştir.



Şekil 2.8. Marshall oranı- bağlayıcı oranı ilişkisi[14].

Marshall Oranı, Marshall Stabilitesinin Marshall akmasına oranıdır. Marshall oranı, karışımların deplasman yaparken kırılma dayanımlarını gösterir. Marshall oranı

yüksek karışımların kırılma anında daha az deplasman yaptıkları söylenmiş. Şekil 1.8'den görüldüğü gibi Carboniferous-Triassic kayaç tozu ile yapılan karışımların Marshall Oranı (Quotient) değerlerinin düşük bağlayıcı oranlarında yüksek olduğu, yüksek bağlayıcı oranlarında ise Magnezit tozu ile yapılan karışımların Marshall Oranı değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak Magnezit tozu ve Carboniferous-Triassic kayaç tozu ile yapılan karışımlarda Marshall Stabilite, Marshall Oranı ve Dolaylı Çekme Modülü değerlerinin kontrol karışım ile karşılaştırıldığında çok değişmediğini gözlemlenmiş ve hatta biraz daha yüksek değerler elde edildiğini belirtilmiştir.

Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımına yönelik yapılan çalışmada aynı agrega gradasyonuna sahip kalker ve siyah karbon filleri içeren asfalt betonu karışımları hazırlanmıştır. İlk agrega karışımında kaba ve ince agrega ile filler olarak kalker kullanılmıştır. İkinci agrega karışımında ise kaba ve ince agreganın cinsi ile miktarı değişmezken filler olarak, kalker malzemesinin yerine siyah karbon kullanılmıştır. Marshall karışım dizaynı hacimsel bir metot olduğundan, siyah karbonun filler olarak agrega karışımındaki miktarı, kalker malzemesine hacimce eşit olacak şekilde alınmıştır. Kalker ve siyah karbon fillerli iki farklı agrega karışımı ve bitümü (AC 75-100) etüvde 165 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. İlk olarak, ısıtılmış olan AC 75-100 bitümü farklı agrega karışımlarına ayrı ayrı ilave edilmiştir. Daha sonra bitüm-agrega karışımları 30-45 saniye kadar karıştırıcı makine ile karıştırmış ve Marshall kontrol (AC 75-100/K) numuneleri ile siyah karbon (AC 75-100/SK) numunelerini hazırlanmıştır. Asfalt betonu karışım numuneleri her bir agrega karışım formülasyonu için 3 adet olarak hazırlanmıştır. Siyah karbon ve kontrol karışımların mekanik özelliklerini Marshall stabilitesi, indirek çekme rijitlik modülü, sünme sertliği ve indirek çekme direnci testleri yapılarak değerlendirilmiştir[15].

Bulunan Marshall test sonuçlarına göre AC 75-100/K karışımlarının Marshall stabilitesi 17.46, Marshall akması 2.97, Marshall oranı ise 5.88 bulunmuştur. AC 75-100/SK karışımlarının ise Marshall stabilitesi 18.30, Marshall oranı 7.44 ve Marshall akmasının 2.46 olarak bulunduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak siyah karbon karışımlarının Marshall testleri için önemli bir ölçü olan Marshall stabilite ve akma değerleri kontrol karışım değerlerinden daha iyi olduğunu belirtilmiştir. Çünkü AC 75-100/SK karışımları yüksek stabilite ve düşük akma değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Siyah karbon filleri içeren asfalt betonu karışımların MQ değerleri kontrol

karışımlarından daha yüksek elde edilmiştir. MQ'nun kesme gerilmeleri, kalıcı deformasyon ve bu nedenle tekerlek izi oluşumuna karşı malzeme direncinin bir ölçüsü olduğu kanıtlanmıştır. Marshall test sonuçlarına göre AC 75-100/SK asfalt betonu karışımların AC 75-100/K karışımlarına göre tekerlek izi direncinin daha yüksek olacağı belirtilmiştir[15].

Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğine yönelik yapılan çalışmada demir cürufu, doğal granülometrisine bağlı olarak 200 numaralı elek üzerinde kalan malzemenin filler yerine kullanıldığı belirtilmiştir. Bitümlü sıcak karışımların karışım dizaynlarını Marshall yöntemine göre yapılmış olup bağlayıcı olarak saf B 50/70 ve B 160/220 bağlayıcılarının yanı sıra PMB<sub>3</sub> modifiye bitümü kullanılmıştır. Cürufu karışımlar B 50/70 ve PMB<sub>3</sub> bağlayıcıları ile hazırlanmıştır. B 160/220 saf bağlayıcısı ve kalker türü agrega ile hazırlanan karışımlar, polimer modifiyeli bağlayıcı ve kalker içeren karışımlar ile karşılaştırılması amacıyla hazırlandığı belirtilmiştir. Numunelerin her bir yüzüne 75 darbe uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Saf bitüm kullanılan karışımlar için optimum bitüm içerikleri belirlendiği, PMB<sub>3</sub> ile hazırlanan karışımlar için optimum bitüm içeriğinin aranmadığı ve B 50/70 saf bitümünün optimum bitüm içeriğine göre hazırlandığı belirtilmiştir. Karışım indisleri ve kullanılan bitüm içerikleri aşağıdaki Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Karışım indisleri ve bitüm içerikleri.

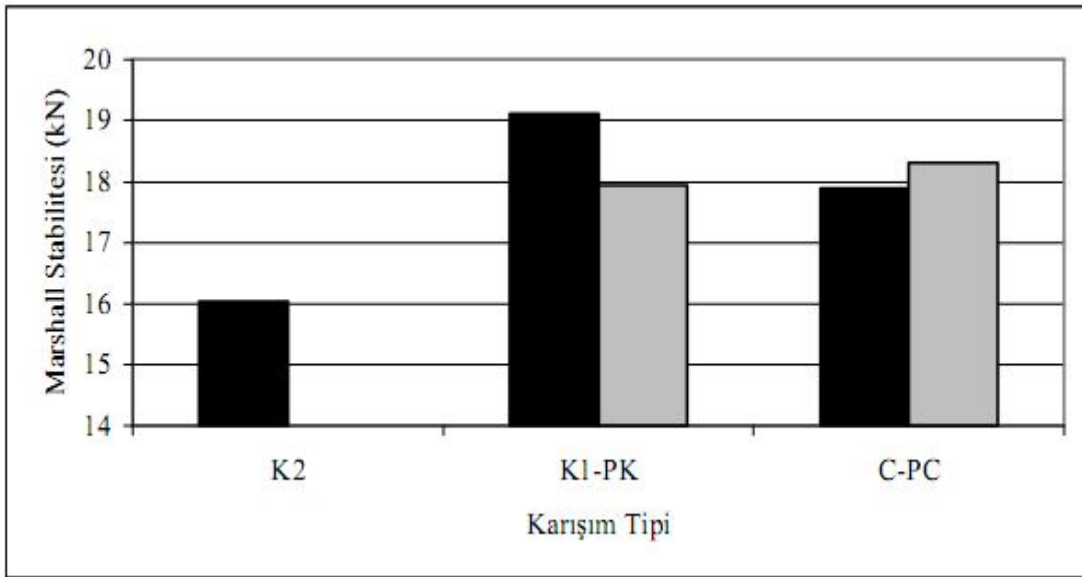
Agrega Türü	Kısaltma	Bağlayıcı Türü	Bağlayıcı İçeriği
Kalker	K1	B 50/70	4,905
Kalker	K2	B 160/220	4,885
Kalker	PK	PMB <sub>3</sub>	4,905
Kalker + Cüruf	C	B 50/70	5,224
Kalker + Cüruf	PC	PMB <sub>3</sub>	5,224

Belirlenen bitüm içeriklerine göre her bir numune tipi için üçer numune hazırlanarak oluşturulan karışım numuneleri, ASTM D 1559 standardına uygun olarak 30–40 dakika 60°C sıcaklıktaki suda bekletilmiş ve Marshall aletinde deneye tabi tutularak stabilite ve akma değerlerini belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen değerlerden

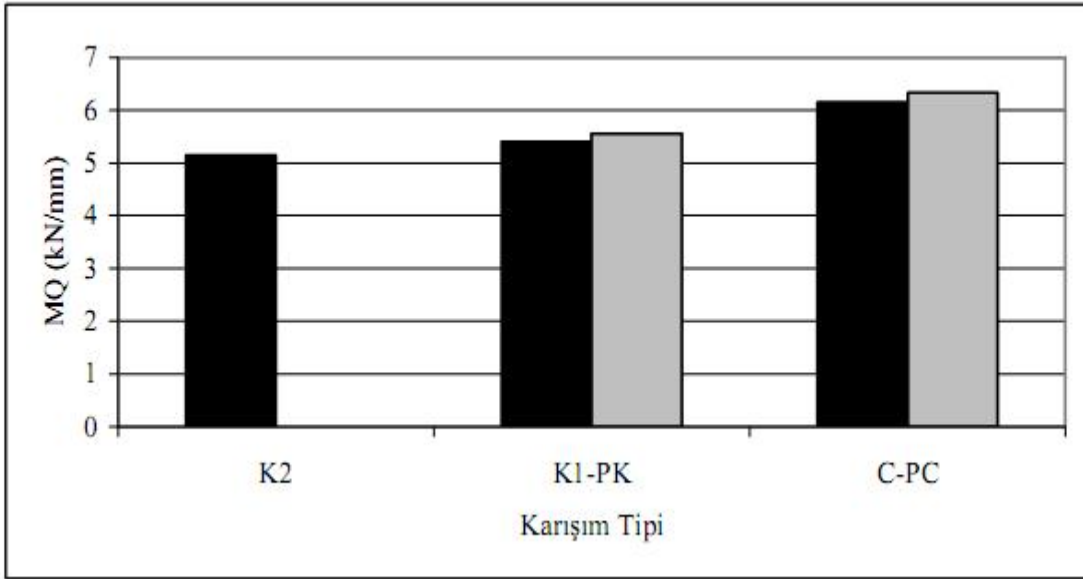
sertliğin bir göstergesi olan Marshall oranı (MQ) değerlerini tespit edilmiştir. Tablo 2.2.'de üçer numuneden elde edilen ortalama deney sonuçları, Şekil 2.9.'da ise numune tipleri-Marshall stabilite ilişkisi verilmiştir. Şekil 2.10.'da ise karışım tipleri-Marshall oranı ilişkisi belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Marshall stabilite ve akma deneylerinden elde edilen sonuçlar.

Karışım Tipi	Marshall Stabilite, kN	Akma, mm	Stabilite/Akma Oranı
K <sub>1</sub>	19,11	3,54	5,40
K <sub>2</sub>	16,04	3,12	5,14
PK	17,94	3,23	5,55
C	17,89	2,91	6,15
PC	18,31	2,89	6,33



Şekil 2.9. Karışımların stabilite değerleri[16].



Şekil 2.10. Karışımların Marshall oranı değerleri[16].

Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda en yüksek stabilite değerine K1 numunelerinin sahip olduğu, en düşük stabilite değerine ise K2 numunelerinin sahip olduğunu belirtilmiştir. Cüruf içeren karışımların (C ve PC) Marshall stabilite değerleri K1 numunelerine göre düşük, K2 numunelerine göre ise yüksek çıktığı belirtilmiştir. Karayolları Fenni Şartnamesinde ağır trafikli yollarda kullanılacak bitümlü sıcak karışımlar için minimum stabilite değerinin 9 kN, akma değerlerinin ise 2–4 mm arasında olması istenmektedir. Hem B 50/70 hem de PMB3 bağlayıcıları içeren cürufli karışımların stabilite değerlerinin şartname kriterinin yaklaşık iki katı olduğunu ve akma değerlerinin şartname limitleri arasında bulunduğunu belirtilmiştir. Marshall oranı (MQ) değerlerinden PC türü karışımların en yüksek değere, C türü karışımların ise en yüksek ikinci değere sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu sonucun cüruf içeren karışımların akma değerlerinin düşük çıkmasına bağlı olduğu vurgulanmıştır[16].

Yapılan araştırmada mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu gibi endüstriyel atıkların asfalt beton kaplama karışımlarında %0- %7 arasında değişen değerlerde filler malzeme olarak kullanılabilirliğini incelenmiştir. Bulunan optimum bitüm yüzdesi için % taş tozu - % endüstriyel atık filler değişen oranlarda kullanılarak hazırlanan numunelere Marshall stabilite deneyi uygulanmıştır. Mermer tozu, uçucu kül, fosfoalçı ve cam tozu filler katkılı karışımların stabilite değerleri şartname alt sınır değeri olan 900 kg 'ın üzerinde değer aldığını tespit edilmiş. Mermer tozu, fosfoalçı ve cam tozu filler katkılı karışımların akma değerleri şartname limitleri olan 2 mm – 4 mm arasında olduğu belirtilmiş. Filleri uçucu kül olan karışımların akma değerlerinin

şartname limitlerinin altında kaldığını belirtmişler. Bu değerlerle uçucu külün artan filler oranlarında gevrek bir malzeme gibi davrandığı vurgulanmıştır. Genel olarak atık filler oranı arttıkça uçucu kül atığı dışında bütün endüstriyel atıklarda boşluk oranı ve stabilite değerleri artmakta, akma değerleri ise azalmakta olduğu tespit edilmiştir[17].

Asfalt betonu kaplamaların farklı sıcaklıklarda dayanımına yönelik yapılan çalışmada asfalt çimentosu olarak AC 75 – 100, agrega olarak ise bazalt kullanarak Marshall numuneleri hazırlanmış ve optimum bitüm oranını tespit edilmiştir. Deney numuneleri yaklaşık 1200g agrega, filler malzemesi ve miktarı önceden belirlenmiş bitüm ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Karışımdaki asfalt çimentosu 150 °C de ısıtılmış olup 160 °C de etüvde ısıtılmış agrega ve filler karışımına ilave edilerek karıştırılmıştır. Karışım 101,6 mm (4 inç.) çapında ve 63,5 mm (2,5 inç.) yüksekliğinde numune kalıbına yerleştirilmiş olup 457,2 mm (18 inç.) den düşen 4536g (10 lb.) ağırlığındaki özel bir tokmakla numunenin her iki yüzüne 75 tokmak vurularak sıkıştırılmıştır. Marshall numuneleri deneyden bir gün önce (-10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C) deki sıcaklıklarda bekletilmiş sonra boyları ölçülerek havada, suda ve doymuş yüzey kuru ağırlıkları tartılıp ve numuneler 30 – 40 dakika su banyosunda 60 °C sıcaklıkta beklettikten sonra Marshall stabilite deneyine tabi tutulmuşlar. Bu deneyler sonucunda gerilme ve deformasyon ilişkisini incelenmiştir. Sonuç olarak sıcaklığın artmasıyla deformasyon miktarının arttığı ve buna karşılık numunenin kırılmadan önceki dayanım yüküne bağlı gerilme miktarının azaldığı tespit edilmiştir. 40 °C sıcaklıktaki beton asfaltın 0 °C sıcaklıktaki dayanım gerilmesinin %47 si olduğu, deformasyonun ise %25 daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Asfalt betonunun kalınlığının tayininde sıcak mevsimdeki gerilme ve deformasyon miktarları dikkate alınarak projelendirme yapılması kanaatine varılmıştır.[18].

## **2.2. Başlıca Laboratuvar Sıkıştırma Teknikleri**

Asfalt karışımlar laboratuvarında farklı yöntemlerle sıkıştırılabilirler. Superpave yağurmalı pres tekniği, Hveem sıkıştırma tekniği ve Marshall sıkıştırma tekniği en sık kullanılan yöntemlerdir.

### 2.2.1. Surperpave Yoğurmalı Pres Tekniği

Bu metotta imal edilen presin belli başlı birkaç özelliği mevcuttur. Bunlar; standardın öngördüğü basınç, dönme işleminin ve açılı tatbikinden ibarettir. Yoğurmalı preste; 150 mm iç çapında, 200 mm yüksekliğinde kalıplar, dakikada 30 devir yapmayı sağlayan motor düzeneği, sıkıştırma esnasında sabit kalacak şekilde 600 kPa ( $6 \text{ kg/cm}^2$ ) basınç uygulayan hidrolik sistem ve yatayda 1,25 derecelik açılı uygulayacak düzenek mevcuttur. Bunları yerine getirmek için 150 ve 220 kWatt'lık iki motor monte edilmiştir. Sıkıştırma esnasında basıncı gösteren 40 bar göstergeli bir manometre de prese takılmıştır. Superpave karışım tasarım metodunun amaçlarından birisi yoğurma esnasında karışımın yoğunluk bilgilerini elde etmektir. Bunun için her devirde sıkışma miktarını yani numune boyunu ölçebilecek bir düzeneğe ihtiyaç vardır. Bunu yerine getirmek için pres üzerinde bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir[39].



Şekil 2.11. Yoğurmalı pres[39].



### 2.2.2. Hveem Sıkıştırma yöntemi

Hveem metodu amerikan karayolları teşkilatı tarafından kullanılmakta olan şekli ile ancak maksimum dane büyüklüğü 1 inç(2,54cm) olan agrega sıvı asfalt veya penetrasyon asfaltı kullanılarak hazırlanacak kaplama karışımları için kullanılır. Bu metod sıcak karışım asfalt kaplamaların arazi kontrolünde ve laboratuvar dizaynı içinde kullanılabilir. Hveem metodunda 2,5 inç(6,35cm) yüksekliğinde ve 4 inç(10,16cm) çapında deney numuneleri kullanılır. Bu numuneleri yapmak için asfalt agrega karışımı özel şekilde ısıtılır, karıştırılır ve tokmaklanır. Hveem metoduyla karışım dizayn için istenen temel özellikler şu deneylerle bulunur. Agregaya karışacak asfalt miktarını takribi bulmak için bitüm deneyi yapılır. Sonra bunu sıkıştırılmış kaplama karışımları ile hazırlanmış numuneler üzerinde stabilometre, şişme kohezyometre ve yoğunluk boşluk analizi deneyleri takip eder. Stabilometre deneyinde, sıkışmış karışımın dikey yük tatbiki altında yatay olarak yerinden oynatılmaya karşı gösterdiği direnci ölçmek için özel bir üç eksenli deney düzeneği kullanılır. Kohezyometre deneyiyle sıkıştırılmış karışımın kopma direnci ölçülür[40].

### 2.2.3. Marshall Sıkıştırma yöntemi

Agrega, mineral filler ve bitümlü bağlayıcının sıcaklıkları, karıştırma sıcaklığına gelinceye kadar ısıtılır. Bitümlü bağlayıcı ve agregalar bir mala veya mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılır ve bu işlem mümkün olduğu kadar çabuk tamamlanır. Karıştırmanın sonucunda, karışımın sıcaklığı grafikte bulunacak sıkıştırma sıcaklığı alt limit değerinin altına düşmemelidir. Şayet sıcaklık, bu değerin altına düşmüşse karışım atılmalı ve işlem tekrarlanmalıdır. Karıştırma sırasında ve karıştırmadan sonra malzemenin yeniden ısıtılmasına müsaade edilmemelidir. Ayrıca karışım hazırlanma süreci devam ederken diğer taraftan sıkıştırma tokmağı ve sıkıştırma kalıbının iç yüzü temizlenmeli ve bir etüvde 93–147°C ye kadar ısıtılmalıdır. Isıtılmış kalıp taban levhası üzerine yerleştirilerek içine 10.16 cm çapında filtre kâğıdı konulmalıdır. Karışım, sıkıştırma kalıbı içine yerleştirilerek ısıtılmış bir demir çubuk ile 25 defa şişlenir, kalıp içindeki numune üzerine 10,16cm çapında filtre kâğıdı konular ve sıkıştırmaya geçilir. Sonra 45,72cm (18 inch) yükseklikten serbest düşüş yapan sıkıştırma tokmağı ile numunenin ön ve arka yüzüne trafik değeri 100 psi lastik basıncı olması için 50 darbe,

trafik değeri 200 psi lastik basıncı olması için 75 darbe vurulur. Numuneler sıkıştırıldıktan kısa bir müddet sonra kalıptan çıkarılarak, düz bir yüz üzerine dikkatlice konur ve oda sıcaklığında bir gece soğumaya bırakılır. Sıkıştırılmış numunelerin yüksekliği  $6,35 \pm 0,8$ cm olmalıdır[41].



Şekil 2.12. Marshall sıkıştırma düzeneği[51].

### 2.3. Tekerlek İzi Probleminin Gelişimi

Yol kaplama malzemeleri olarak kullanılan bitümlü karışımlara ait niteliklerin çok büyük bir kısmı sıcaklık derecesi ve yükleme zamanına karşı hassastır. Basit bir ısıtma işlemi ile karıştırılabilme veya geri kazanılabilme yeteneği yanında, bu hassaslık onlara uzun süreli yükleme altında uzama veya gevşeme hareketi için büyük bir potansiyel kazandırmaktadır. Bu durum bitümlü kaplamanın alt tabakanın küçük çaplı hareketlerini takip edebilme yeteneklerini ortaya koymaktadır. Ancak, burada bitümlü malzemelerin yüksek sıcaklıklara ve uzun yükleme zamanlarına maruz bırakıldığı alanlarda kalıcı tekerlek izi deformasyonu oluşma riski ortaya çıkmaktadır[19].

Asfalt betonu kaplamalarda yaygın olarak görülen bozulma çeşidi olan tekerlek izi, ASTM E 867 standardı ile tanımlanan yük kaynaklı tekerlek izinde oturma; boyuna profilde veya enine yönde geçiş çatlakları şeklinde kendini gösteren problem olarak tanımlanmıştır. Literatürde de tekerlek izinin, asfalt beton kaplamaların tekerleklerin geçtiği kısımlarında oluşan uzunlamasına oturmalar olduğu, kaplamaya uygulanan

tekrarlı yüklerin sonucu olarak küçük miktardaki geri dönmeyen deformasyonların birikmesi sonucu oluştuğu, trafik yüküne bağlı olarak oluşan plastik deformasyon, düşey yönde tekerlek izi oluşumu ya da yatay yönde itilme, birikme olarak kendini gösterdiği, kaplamanın altındaki bir ya da birden fazla tabakada, trafik etkisinin neden olduğu dansifikasyon ya da yanal hareketlerle oluşan yer değiştirmeler olduğu, diğer bir ifade ile oluklanmaların, trafiğin izler boyunca meydana getirdiği kalıcı deformasyonların birikimi olduğu belirtilmektedir.

Karayollarına olan talebin sürekli artması, taşıt teknolojisindeki gelişmeler, karayolunun ağır trafik yüklerine maruz kalması, olumsuz çevre koşulları gibi nedenler yapılan yolların tahmin edilen süreden çok daha önce bozulmalarına neden olmaktadır.

Son 30 yılda, ülkemizde trafik hacmi ile beraber dingil yüklerin ve lastik basınçlarının da artması esnek üstyapı kaplamalarında, tekerlek izi oluşumu, yığılma ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyonların oluşmasına, çatlaklar, yüzeyde malzeme kaybı ve cilalanma gibi düzensizliklere neden olmakta bu da esnek üstyapıların hizmet ömürlerinin öngörülenden kısa olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle esnek üstyapı tasarımı sırasında bitümlü karışımların sünme davranışının göz önüne alınması büyük önem taşımaktadır. Tekerlek izi derinliğinin tahmini için, bitümlü karışımların sünme davranışını etkileyen faktörlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin daha iyi anlaşılması gerekmektedir.

Bitümlü tabakalarda sürekli tekerlek izi oluşumu problemi birkaç yıldır mevcut olan bir sorun olmakla birlikte farklı ülkeleri aynı şekilde etkilememiştir O zamandan bu yana durum değişmiştir. Tekerlek izi oluşumunu 1975 yılında önemli bir problem olarak değerlendirmeyen Kanada, Amerika Birleşik Devletleri ve İsviçre gibi ülkeler günümüzde bu konuya çok daha fazla dikkat verme durumuna gelmiştir.

Bu tür sorunların çözümünde, esnek üstyapının performansını artırmak en uygun yöntem olarak görülmektedir. Tekerlek izi oluşumunun ve çatlakların önlenmesi ya da geciktirilmesi için bağlayıcı olarak modifiye bitüm ya da katkı kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesiyle, asfalt betonu karışımlarının rijitliğini artırmak, yüksek sıcaklıklardaki ve ağır trafik yükü altındaki kalıcı deformasyonları azaltmak ve yol üstyapısının yorulma ömrünü uzatma yolunda çalışmalar devam etmektedir.

### 2.3.1. Asfalt Betonunda Tekerlek İzi

Tekerlek izi, kabaca; asfalt beton kaplamaların tekerleklerinin geçtiği kısımlarında oluşan uzunlamasına oturmalar olarak tanımlanabilir. Çoğu üstyapı tasarım yöntemi için yapısal performansın değerlendirilmesinde temel kıstastır. Diğer tip kalıcı deformasyonlar üstesinden çok daha kolay gelinir olup, büyük ölçüde malzeme özelliklerine ya da malzemelerin üstyapı bünyesinde birbirlerinin tesirlerine bağlıdır.

Tekerlek izi derinliğinin, belirli bir düzeyi aşması durumunda, o yol bozulmuş kabul edilmektedir. Tekerlek izi derinliğinin büyüklüğüne göre, bakım ya da onarım kararı verilmektedir. Tekerlek izinin belirli bir değeri (2,5cm) geçtiği durumlarda hemen bakım yapılması gerektiği açıktır.

Herhangi bir malzemeye statik ve dinamik olmak üzere iki şekilde yük etkiyebilmektedir. Malzeme içerisinde, etkiyen bu yüklerden dolayı gerilme ve deformasyonlar oluşmaktadır. Yapı malzemesi statik yük etkisi dışında oluşan dinamik yük etkisinden dolayı farklı şiddet ve tipte (basınç ve çekme) gerilmelere maruz kalmaktadır.

Trafığe maruz her üstyapıda, her bir taşıtın geçmesiyle oluşan deformasyonların çoğunun elastik olmasına rağmen çok küçük de olsa plastik deformasyon oluşmaktadır. Şerit ortası tekerlek izindeki kadar yükleme sayısına maruz kalmadığı için meydana gelen farklı deformasyonlar sonucu tekerlek izi oluşur.

Analitik esnek üstyapı tasarımında plastik deformasyonu belirlemede iki kıstas kullanılır;

1. Taban zemin yüzeyi üzerindeki basınç şekil değiştirmesini sınırlamak (plastik deformasyonu kontrol etmek için).
2. Belirli bir değerdeki plastik deformasyona neden olacak trafik yükü tekrar sayısını tahmin etmek.

### 2.4. Asfalt Kaplama Problemleri

Yol üstyapısında, meydana gelen gerilmeler, iki gruba ayrılabilir:

1. Trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmeler,
2. Sıcaklık ve nemin (iklim koşullarının) değişiminden doğan gerilmeler.

Bu gerilmelerin etkisiyle, yolların performansı ilk yapıldıkları yıllara nazaran giderek düşer ve bir müddet sonra yollar kullanılamaz hale gelebilir.

Yolların, bu bozulma sürecinde, yüksek hız ve hacimde trafiğe hizmet edebilme yetenekleri ile sahip oldukları sürüş konforu değerlendirilerek, bir servis yeteneği indeksi kavramı geliştirilmiştir. AASHTO tarafından geliştirilen bu dereceleme, yol üzerinde yapılan bir dizi fiziksel ölçümler (tekerlek izi oluşumu, çatlak uzunluğu, yama miktarı vb.) yapılarak saptanır[20].

#### **2.4.1. Bozulma Ölçütleri**

Bir asfalt kaplamanın bozulmasına, üç ayrı temel bozulma şekline bakılarak karar verilir. Temel bozulmaların haricinde, soyulma gibi yüzey bozuklukları, yapısal bir bozulma tipi olmadığı için bir sonraki aşamada değerlendirilir. Aşağıda temel bozulma ölçütleri açıklanmaktadır.

##### **2.4.1.1. Tekerlek İzi Derinliği**

Tekerlek izi derinliğinin, belirli bir düzeyi aşması durumunda, o yol bozulmuş kabul edilmektedir. Tekerlek izi derinliğinin büyüklüğüne göre, bakım ya da onarım kararı verilmektedir. Tekerlek izi oluşumu 2,5cm'yi aşan yollarda, hemen bakım yapılması gerektiği açıktır.

##### **2.4.1.2 Çatlak Oluşumu**

Yoldaki çatlak oluşumunun birim alana düşen miktarı, çatlama derecesini vermekte olup, bu değer belli bir sınırı aşması ile gerekli bakım yapılması gereği ortaya çıkmaktadır. Genel olarak 6mm'den büyük genişlikteki çatlakların artması ve trafik altında çatlak kenarlarının kopması, kırılması çatlak açısından yolun bakım gerektirdiğinin bir işareti olarak görülmelidir.

### **2.4.1.3. Defleksiyon**

Defleksiyon; tekerlek izi gibi genel olarak tüm üstyapıyı ve tüm yol gövdesini ilgilendiren bir bozulma şeklidir. Defleksiyonun belirlenmesi için tüm dünya da birbirinden farklı ölçüm cihazları kullanılmaktadır.

Bunlardan bazıları;

- Dynaflect
- Road Rater
- Dynatest Falling Weight Deflectometer
- KVAB Falling Weight Deflectometer
- Phoenix Falling Weight Deflectometer olarak sıralanabilir.

Defleksiyon ölçümleri sonucunda bulunan değerlerle birlikte, üst yapı malzemesi ve diğer parametreler kullanılarak, yolun bakıma gereksinimi olup olmadığına karar verilmektedir.

### **2.4.2. Yol Üstyapısında Oluşan Bozulma Türleri**

Yol üstyapısında meydana gelen bozulma türleri genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

#### **2.4.2.1. Oturma ve Çökme**

Bu tip bozulmalar, yol sathında plan ve boy keskindeki konumuna göre meydana gelen değişiklikler olup çökme, ondülasyon, tekerlek izi, oluk ya da çöküntü, kabarma şeklinde tanımlanırlar.

Bu bozulmalar dengeli bir yapıya sahip olmayan malzemenin kullanıldığı kaplama altındaki tabakaların oturması, çökmesi, büzülmesi ve kabarması gibi nedenlerle meydana gelir

##### **a) Oturmalar**

Kaplama altındaki malzemenin oturması sonucu oluşur. Nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

- Alt tabakaların yetersiz kalınlığı,
- Altyapıda oturmalar,

- Yan desteklerin olmayışı (banketlerin yetersizliği),
- Yer altı su seviyesinin yüksekliği,
- Yetersiz drenaj,
- Temel ve temel altı malzemelerinin taban zemininden gelen kille karışmasıdır.

Oturmalar, yol eksenine paralel kenar şeritlerde uzunlamasına ya da enlemesine oluşur.

Oturma geniş bir yüzeyi kapsadığından, kaplama tabakası aynı şekli almaya çalışacak ve çatlamayacaktır. Ancak düşük sıcaklıklarda rijitlik modülü çok yüksek kaplamalar, alttaki tabakalarda meydana gelen oturmalara uyum gösteremeyeceğinden çatlamalar oluşabilecektir.

### **b) Çökmeler**

Çökmeler, çatlakları içeren ya da içermeyen ve orijinal kaplama yüzeyine göre düşük kotta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerine su dolmaktadır. Çapları değişkendir. Çökmeler zamanla genişleyerek, yolun elden çıkmasına da neden olabilirler.

Nedenleri :

1. Temel ve alt temelin yetersiz olarak sıkıştırılması,
2. Kaplamanın yapım sırasında yetersiz olarak belirli bir bölgede sıkıştırılması,
3. Yetersiz drenaj nedeniyle suyun temel altında birikimi,
4. Temel ve alttemel malzemelerinin kille karışması,
5. Kaplamanın taşıyabileceğinden daha ağır trafik yükü ile karşılaşması

### **2.4.2.2. Tekerlek İzi Oluşumu**

Tekerlek izi, kabaca; asfalt beton kaplamaların tekerleklerinin geçtiği kısımlarında oluşan uzunlamasına oturmalar olarak tanımlanabilir. Çoğu üstyapı tasarım metodu için yapısal performansın değerlendirilmesinde temel kriterdir. Diğer tip kalıcı deformasyonlar üstesinden çok daha kolay gelinir olup, büyük ölçüde malzeme özelliklerine ya da malzemelerin üstyapı bünyesinde birbirlerine tesirlerine bağlıdır.

Tekerlek izi oluşumu, bitümlü sıcak karışımlar ya da road-mix karışım tipi kaplamalarda, tekerlek etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 2.13. Tekerlek izinde oturma örneği[19].

Oluklanmalar (tekerlek izleri), kaplamanın altındaki bir ya da birden fazla tabakada, trafik etkisinin neden olduğu dansifikasyon ya da yanal hareketlerle oluşan yer değiştirmelerdir. Başka bir ifadeyle oluklanmalar, trafiğin izler boyunca meydana getirdiği kalıcı deformasyonların birikimidir.

Nedenleri Üç ana Başlık Altında Sıralanmıştır.

1. Asfalt Tabakasıyla İlgili Nedenler:

- a. Yüksek bitüm içeriği,
- b. Filler malzemesinin fazlalığı,
- c. Yuvarlak malzemelerin karışımda kullanımı,
- d. Karışımın yetersiz sıkışması,
- e. Uygun olmayan gradasyon
- f. Ağır trafik ve tek şeritte hareket eden trafik nedeniyle kaplama tabakasının fazla sıkışması,
- g. Serim kalınlığının fazla olması,
- h. Kaplamanın taşıt trafiğine erken açılması

2. Alt Tabakalarla İlgili Nedenler :

- a. Alt tabakaların yetersiz kalınlığı,
- b. Doğal zeminin konsolide oluşu,
- c. Doğal zeminin ve üst tabakaların yanal hareketleri.



### 3. Diğer Nedenler:

a. Ağır ve yüksek sayıda tekerrür eden yük,

b. Sıcak iklim koşulları.

Ağır taşıt trafiği, iz ve olukların oluşumundaki en önemli etkidir. Yüksek dingil yükü, yüksek lastik basıncı, yükün sık tekrarı ve yavaş seyreden hızdaki ağır araçlar olumsuz etkilerdir.

İz ve oluklar, aşağıdaki olumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olurlar.

a. Suların toplanmasıyla, su yastığı oluşumu, kayma tehlikesinin artması ve soğuk havalarda ince buz tabakalarının oluşması,

Tekerlek izi oluşumu, yolu kullananlar için de ciddi bir güvenlik meselesidir. Su tekerlek izlerinde biriktiğinde, su yastığı olayı için potansiyel oluşturur. Su yastığı olayı, kaplama ile lastik arasında ince bir su tabakası oluşması ve bunun neticesinde lastiğin yüzeyle temasını kaybetmesidir. Bu olay direksiyon hâkimiyetinin kaybedilmesiyle sonuçlanabilir. Aynı şekilde şerit değiştirme durumunda da aynı sorun yaşanabilmektedir.

b. Seyir konforunun düşmesiyle birlikte, şerit değiştirmek isteyen hızlı araçlar için tehlike oluşması.

#### 2.4.2.3. Ondülasyonlar (Dalgalanmalar veya Yığılmalar)

Yaya geçişleri, kavşaklar, otobüs durakları, aşırı eğimli, vb. kesimlerde ondülasyon (veya dalgalanma) şeklinde görülür ve genel olarak aşağıdaki nedenlerden kaynaklanmaktadır.

- Düşük stabiliteli karışımlar,
- Yetersiz aşınma tabakası kalınlığı,
- Yüksek penetrasyonlu asfalt (veya çok düşük viskozite),
- Aşırı asfalt oranı,
- Zayıf yapıştırma tabakası,
- Binder tabakası eksikliği,
- Çok dik kesimlerde ağır taşıtların durma ve kalkma hareketi,
- Kavşaklarda, otobüs duraklarında, vb. kesimlerde frenleme ve kalkma hareketleri,

Bu tip deformasyonlar bölgesel olduklarından dolayı kusurlu kesimler kazılıp atıldıktan sonra yerine uygun bir karışım konulup sıkıştırılarak tamir edilmeleri mümkündür [46].

#### **2.4.2.4. Kabarmalar**

Bu tip deformasyonlar genellikle zeminin kabarması sonucu oluşur.

Zeminlerin kabarması;

- İllit, montmorillenit, vb. killerin suyla temaslarında aşırı şişmeleri,
  - Dona duyarlı zeminlerde don derinliğinin kaplama kalınlığından fazla veya eşit olduğu kesimlerde don kabarmasının olması,
- gibi nedenlere bağlıdır.

Bu tip zeminler için kaplama altına uygun kalınlıkta dona duyarsız seçme malzeme tabakası konulması, zemin stabilizasyonu, drenaj vb. tekniklerle don kabarması ve şişme gibi olumsuz etkiler giderilebilir [46].

#### **2.4.2.5. Çatlaklar**

Çatlaklar; aşırı dingil yüklerinden ve bunların fazla tekrarından oluşurlar. Çatlaklar, dingil yükünün kaplama tabakası altında meydana getirdiği çekme gerilmeleri, kaplama malzemesinin çekme direncini aştığı zaman oluşur. Ayrıca araçların ani hızlanma ya da yavaşlamalarıyla ortaya çıkan yatay kuvvetler de çatlaklara neden olabilir.

Bu etkilerin dışında bir takım dış etkenler, kendi başlarına ya da trafik etkisiyle de çatlaklar oluşabilir. Şöyle ki;

- Sıcaklık değişimleri, su absorpsiyonu yüksek agrega kullanımı, asfalttaki uçucu maddelerin buharlaşması,
- Nem ve sıcaklık değişimleri, alt tabakalarda kireç stabilizasyonu yapılırken ya da çimento ile kür olurken doğan hacim değişikliklerinin üst tabakalara yansması.

Çatlamada, asfaltın çekme mukavemeti en önemli rolü oynar. Hızlı yüklemelerde ve soğuk havalarda çekme mukavemeti artış gösterirken yavaş yüklemelerde ve sıcak havalarda düşmektedir. Trafik etkeni ve hacim değişiklikleri dışında, çatlamaya neden olan hususlar şunlardır:

- a. Fazla miktarda yük tekrarı (yorulma),
- b. Kaplama (sath) tabakasının yetersiz kalınlığı,
- c. Kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı,
- d. Kaplama altındaki tabakaların yüksek deformasyonları nedeniyle, malzemelerin dağılımı, ayrışımı
- e. Yetersiz drenaj,
- f. Don tesirine duyarlı olan temel ve alttemel malzemeleri,
- g. Sath ve banketlerdeki nem farklılıkları,
- h. Yanal desteklerin (banketlerin) yetersizliği,
- i. Araçların ani hızlanma ya da yavaşlamalarından oluşan yatay kuvvetler,
- j. Karışım tipi kaplamalarda, yapım sırasında finişerin sık sık durması,
- k. Yol kaplama yapımında (ek yerlerinin) derzlerin dikkatsiz yapılması.

#### **2.4.2.6 Ayrılma, Ayrışma ve Parçalanmalar**

Asfalt tabakasında, agregalara hava etkisi ya da trafiğin aşındırma etkisi sonucunda meydana gelir. Bu tip ayrışma, parçalanma ve kopmalar farklı şekillerde oluşabilmekte ve buna bağlı olarak da farklı isimler almaktadırlar. Sökülme, çanak şekilli çukurlar, bağ eksikliği (adezyon yetersizliği) ve soyulma başlıca bozulma tipleridir.

Bitümlü bağlayıcı filmi ile agrega arasındaki adezif bağın zayıflaması sonucu oluşan soyulma her iklimde karşılaşılabilen problemlerden biri olarak ortaya çıkmakta ve çeşitli durumlarda çok önem kazanmaktadır. Soyulma birçok nedene bağlı olarak ortaya çıkabilir.

Soyulma probleminin boyutlarını azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri; çeşitli soyulma önleyici katkıların karışıma veya bitüme karıştırılmasıdır. Ancak henüz agrega ile bitüm arasındaki adezif bağın su etkisiyle bozulmasını açıklayan ve buna yönelik olarak kullanılan katkı maddelerinin etkinliğini tam olarak ortaya koyan ve irdleyen bir yöntem henüz geliştirilmiş değildir.

Bu tip bozulmaların genel nedenleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- a. Mıçır tanelerinin, trafiğin mekanik etkisiyle bitüm filminden ayrılması,
- b. Karışım kalitesinin düşüklüğü ya da sathi kaplamalarda, bitüm ve mıçırın uygun bir aşınma tabakası oluşturamaları,

- c. Bitüm yüzdesinin düşüklüğü,
- d. Karışım tipi kaplamalarda, filler yüzdesinin çok düşük ya da çok yüksek oluşu,
- e. Kirli ve kalitesiz mıcır kullanılması,
- f. Kaplamanın asfalt betonu olması durumunda, bu tabakanın ince olması,
- g. Kil malzemesinin tabandan, alttemel ve temel malzemeleri içerisine doğru yükselmesi,
- h. Yetersiz drenaj,
- i. Sathi kaplama ve öteki bitüm tabakalarının soğuk ve yağışlı havalarda yapılarak adezyonun azalması,
- j. Sıcak karışım tipi satih tabakalarının yapımında, karışımın plentte fazla ısıtılması,
- k. Asfalt betonunun kullanılması, karışımın serilmesi ya da nakliyesi sırasında ayrışım olması,
- l. Satih tabakasıyla öteki tabakalar arasında bağ eksikliği,
- m. Su ve kil etkisiyle soyulma.

Soyulma sebeplerinin en önemlilerinden biri ani emülsiyonlaşmadır. Bu durumu kısaca açıklayacak olursak; Bu durum bitüm içinde suyun emülsifiye olma durumudur. Bitüm damlacıklar halinde dispersiyon enerjisi ve emülsif maddelerle su içerisinde çözünür. Arazide karışım bünyesine su ile temas ettiğinde su küçük damlacıklar halinde emilir. Bu damlacıklar soyulma sürecini başlatır. Bu durum yumuşak bağlayıcı kullanıldığında ve su devamlı karışıma etkidiği durumlarda gerçekleşir. Soyulan kısımlar kurutulduğunda birleşme tekrar kısmi olarak sağlanır.

#### **2.4.2.7. Cilalanma ve Kusmalar (Kayma Direnci Kaybı)**

##### **2.4.2.7.1. Cilalanma**

Agregaların aşınarak pürüzlülüklerini kaybetmesidir. Özellikle kalkerden elde edilen agregalar, başlangıçta köşeli ve pürüzlü olsalar da taşıtların aşındırma etkisiyle pürüzlülüklerini kaybederek cilalı bir hal alırlar. Kaplama ile taşıtların lastikleri arasındaki sürtünme katsayısı, özellikle kaplamanın ıslak olması halinde düşer ve 60-80km/Sa'ten yüksek hızlarda kaymalara neden olabilir [45].

#### **2.4.2.7.2. Kusma**

Karışım içindeki asfaltın sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşturması durumudur. Kusma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen asfalt filmi ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir.

Kusma daha ziyade asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genleşen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar veya yapıştırma tabakaları da kismaya sebep olabilir. Karayollarında bakım görmüş kesimlerde sık görülen kusma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri konusunda dikkatli olunarak önlenabilir [44].

#### **2.5. Tekerlek İzi Oluşumunun Sakıncaları**

Tekerlek izi oluşumu, yolu kullananlar için de ciddi bir güvenlik meselesidir. Su tekerlek izlerinde biriktiğinde, su yastığı olayı için potansiyel oluşturur. Su yastığı olayı, kaplama ile lastik arasında ince bir su tabakası oluşması ve bunun neticesinde lastiğin yüzeye temasını kaybetmesidir. Bu olay direksiyon hakimiyetinin kaybedilmesiyle sonuçlanabilir. Aynı şekilde şerit değiştirme durumunda da aynı sorun yaşanabilmektedir[37].

Yüzey özellikleri söz konusu olduğunda, bu özelliklerin sağlanması gerekliliği yanında unutulmaması gereken diğer bir husus da lastiğin kaplamayı iyi bir şekilde kavramasından ayrı olarak, enine düzgünlüğün çok önemli bir faktör olduğudur. Tekerlek izleri bulunan bir yolun gerçekte, yalnızca konfor değil aynı zamanda güvenlik açısından da çeşitli sakıncaları vardır[3].

1. Şerit değiştirme esnasında araç kontrolü zorlaşır.
2. Tekerleğin izlediği hat üzerinde, kayma ve buz oluşumuna neden olan su birikintileri oluşur.
3. Kötü havalarda daha uzun fren mesafeleri olur.

Bitüm kaplamalı yolları etkileyebilecek asıl problem mekanizmaları; bir taraftan boyuna profil düzensizlikleri ve özellikle tekerleğin geçtiği güzergahlarda (tekerlek

izleri) enine profil deformasyonu ile kendini gösteren kalıcı deformasyon mekanizmaları ile diğer taraftan da bir kaplamanın sızdırmazlığı ile birlikte taşıma kapasitesini de azaltan çatlama mekanizmasıdır.

Sonuçtaki kusurların yolu kullananların konfor ve güvenliği üzerinde ortaya çıkardığı ters etkiler, yol yapılarının ve tabakaların, yüzey özelliklerinin kaplamanın tahmin edilen hizmet ömrü boyunca belirli bir eşik değerin altına düşmesinin önleneceği şekilde tasarımı gerekli kılmaktadır.

## **2.6. Kalıcı Deformasyonlara Dirençli Karışımlar**

Bitümlü karışımlar, bir yandan kalıcı deformasyonlara karşı dirençli olacak bir şekilde tasarlanırken, diğer taraftan da çatlama, yaşlanmaya mukavim ve yeterli sürtünme yüzeyine sahip olacak şekilde hazırlanmalıdır.

Örnek olarak, bitüm açısından çok zengin ve boşluk oranı açısından yetersiz olan bir karışım, yorulma çatlaklarına yüksek direnç gösterirken, tekerlek izi oluşumuna karşı düşük bir dirence sahip olacaktır. Benzer olarak, genel anlamda agrega ve boşluk oranı açısından zengin; fakat bağlayıcı madde içeriği düşük olan bitümlü karışımlar, tekerlek izine karşı yüksek direnç gösterirken, düşük yorulma mukavemetine sahip olacaktır. Diğer bir ifade ile bir karışımın yorulmaya karşı durabil, tekerlek izi oluşumuna karşı ise stabil olması gerekir. Ağır ve yoğun trafik yükünün mevcut olduğu yollarda, doğal olarak tekerlek izine karşı stabil bir karışım tasarımı yanında, aynı zamanda yorulmaya karşı dayanıklı tasarım yapılmalıdır[20]. Tekerlek izi oluşumunun sıklığına, büyüklüğüne ve uygunluğuna bağlı olarak bazı ülkeler, iklim ve trafik koşullarını da göz önüne alarak, kalıcı deformasyonlara dirençli karışım tipleri geliştirmişlerdir. Aşağıda bu çalışmalar özetlenmiştir.

### **2.6.1. Fransa'da Yapılan Çalışmalar**

Tekerlek izi oluşmaması için Fransa'da 1969 yılından beri araştırmalar sürmektedir. Fransızlar, 1969'dan, 1983'e kadar yaptıkları araştırmalar sonunda; özellikle yüksek yoğunluklu yollar için yüksek rijitlik modülüne sahip karışımlar geliştirmişlerdir. Bu yüksek modüllü karışımlar, ince veya çok ince bir aşınma tabakasının altında kullanılmaktadır.

Fransa'da, stabilite ve durabiliteyi yükseltmek için genel olarak maksimum dane boyutu fazla olmayan, ancak kaba agregaya oranı yüksek karışımlar kullanılmaktadır. Bu karışımlar, hem aşınma hem de alttaki tabakalarda uygulanmaktadır. Bu yüksek rijitliğe sahip karışımlarda, %4-8 oranında boşluk bulunmakta ve karışım aşağıdaki agregagruplarından oluşmaktadır;

- %65-72 oranında kırılmış ocak taşı,
- %28-35 arasında ince agregaya,
- Bu karışımlarda bitümlü bağlayıcı oranı ise;  $D_{max}$  14mm için ortalama %5,4 ve  $D_{max}$  10 için %5,6 ve %5,8 olarak uygulanmakta olup, bitümlü bağlayıcı olarak, güney bölgelerinde 40/50, kuzeyde ise 60/70 kullanılmaktadır.

Bu tip kaplamaların, eski kaplamaların üzerine ilave bir tabaka kullanımı için uygun olmadığı görüldüğünden, bakım için ince (15-25 mm tabaka kalınlığında) kaplamalar geliştirilmiştir. Özellikle yoğun ağır taşıt trafiğinin ve tekerlek izi oluşumunun fazla olduğu yerler için yukarıda sözü edilen karışımlar yerine, aynı agregakompozisyonuna sahip ancak bitümlü bağlayıcı olarak 10-20 penetrasyonlu özel bitümler kullanılmaya başlanmıştır. Burada bitüm yüzdesi %5,6 ile %4,5 arasında kullanılmaktadır. 10-20 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcılar ile yapılan karışımlar 6 ile 12cm kalınlığında serilebilmekte ve %3-4 oranında hava boşluğu olacak şekilde tasarımları yapılmaktadır

Yüksek rijitlik modülüne sahip bu tip karışımlar, SBS ile modifiye edilmiş bağlayıcılar ile yapılan ve yukarıda sözü edilen kaba agregalı karışımlara nazaran, daha iyi performans göstermektedirler. Bu tip sert bitümlerin, düşük sıcaklıklarda büzülme çatlakları oluşumu, 40/50 penetrasyonlu bitümlerin davranışı ile aynı olduğu görülmüştür.

Fransa'da ayrıca, kaba agregalı karışımlara, kullanılmış elektrik kablolarından elde edilen polietilen gibi atık plastik malzemeleri katılarak üretilen karışımlar da; özellikle tekerlek izi oluşma olasılığının yüksek olduğu yerlerde kullanılmaktadır.

### **2.6.2. İngiltere ve İtalya Uygulamaları**

İngiltere'de genel olarak sıcak sıkıştırılan asfalt, (hot-rolled asfalt, HRA) olarak adlandırılan karışımlar kullanılmaktadır. Yüksek yoğunluklu yollarda, aşınma tabakası

olarak %30-35'i kırmataş, %55'i ince agrega ve %10'u filler olan bir karışım kullanılmaktadır

Bu tabakanın altında %60'ı kaba kırmataş, %30'u ince agrega ve %10'u fillerden oluşan bir karışım ve en altta ise yoğun tane boyutu dağılımlı makadam asfalt olarak tanımlanan ve ince malzemesi fazla olan karışımlar kullanılmaktadır.

Bu karışımlarda 50 penetrasyonlu bitüm kullanılmakta ve bitüm yüzdesi, aşınma tabakasında %8,0 alttaki tabakada %5,5 – %6,0 ve en alt tabakada ise %3,5 oranında kullanılmaktadır.

Ancak İngiltere'de HRA karışımlara alternatif karışım çalışmaları devam etmektedir. İtalya'da tekerlek izi oluşumunu engellemek için modifiye bitüm kullanımı (kauçuk, polietilen) oldukça yaygın olup, bağlayıcı yüzdesi %4,5 – 5,0 arasında çıkmaktadır. Agrega olarak bazalt tercih edilmektedir.

### 2.6.3. Belçika Uygulamaları

Belçika'da bu konuda yapılan araştırmalar sonunda; aşağıdaki karışım tasarım ölçütleri ortaya çıkmıştır.

Belçika'da kullanılan eski şartnameler, durabilite yönünden iyi, ancak stabilite açısından kötü performans göstermişlerdir. Bu yüzden bu şartnameler aşağıdaki gibi yenilenmiştir.

Tablo 2.3. Belçika'da tekerlek izine karşı kullanılan karışımlar.

Karışım Tipi	Tip I	Tip II	Tip III
Kaba agrega/ince agrega oranı	56/36	35/53	58/35
Bitüm penetrasyonu	50/60	40/50	50/60
Bitüm oranı (%)	5,7–7,0	8–9	4,5–5,5
Hava boşluğu (%)	2–5	2–5	2–7
Maksimum agrega boyutu (mm)	14–20	10–17	10–14

1. Tasarımlar, kütle yerine hacimsel olarak yapılmıştır.
2. Filler oranı azaltılarak, kaba agrega artırılmıştır.
3. Kullanılacak ince malzemenin, mutlaka kırılmış olması koşulu getirilmiştir.
4. 80/100 penetrasyonlu bitüm kullanımı terkedilmiştir.



5. Özel bazı kesimlerde modifiye asfalt kullanılmasına izin verilmiştir.

6. Belçika’da; ayrıca kaba ve ince agrega için temizlik, şekil, kırılmışlık, cilalanma gibi koşullar getirilirken, filler için yoğunluk, boşluk yüzdesi ve neme hassasiyet ile kabarma için sınırlamalar getirilmiştir.

#### **2.6.4. ABD’de Kullanılan Büyük Kırmataşlı Karışım Uygulamaları**

Amerika’da tekerlek izine karşı büyük kırmataşlı karışımlar (Large Stone Mixtures, LSM) geliştirilmiştir. 1984 yılında WASHTO Amerikan karayollarında en önemli problemlerin başında tekerlek izi olduğunu rapor etmiştir. Daha sonra bu problemi çözmek için geliştirilen LSM karışımların iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Büyük kırmataşlı karışımlarda (BKK) kalıcı deformasyonların nispeten az oluşması dane çapları büyük olan taşların kesme gerilmelerine daha fazla direnç göstermesinden kaynaklandığı kabul edilmektedir.

Büyük kırmataşlı karışımlar (BKK), yoğun veya açık tane boyutu dağılımlı olarak kullanılabilir. Bu karışımlarda en büyük agrega boyutu 25 mm ile 63 mm (1” ve 2½”) arasında değişmektedir. BKK genel olarak binder veya bitümlü temel tabakası olarak kullanıldığı gibi aynı zamanda aşınma tabakası olarak da uygulanmaktadır. En büyük agrega boyutu çok büyük olduğu için, asfalt serme kalınlığının agrega boyutunun en az iki katı olması koşulu, bu karışımlarda sağlanamamakta ve bu yüzden daha az kalınlıkta serime izin verilmektedir.

Bitüm oranları, geleneksel yoğun karışımlara göre %30 daha az çıkmakta, boşluk oranı ise büyük taşlardan dolayı daha yüksek değere ulaşmaktadır.

Bu tip karışımlarda, karşılaşılan zorluklar aşağıda sıralanmıştır:

1. Serim ve taşıma anında ortaya çıkan segregasyon (ayrışma),
2. İri agregaların bitümlü tam sarılmaması,
3. Karıştırma süresinin artması,
4. Tamburda ve sürekli tip plentlerde aşırı gürültü oluşması,
5. Karıştırıcı içindeki kanatların açıklığının yetersiz kalması,
6. Sıkıştırma zorluğu,
7. Üretim ve sıkıştırma donanımlarının çabuk yıpranması,
8. Suya karşı hassasiyetidir.

ABD’de birçok eyalette yukarıda sayılan olumsuzluklara rağmen, kalıcı deformasyonlara karşı yüksek mukavemetlerinden dolayı, bu tip karışımlar hâlâ kullanılmaktadır.

### **2.6.5. SMA Tipi Karışımlar; Almanya ve Diğer Avrupa Ülkeleri Uygulamaları**

Almanya ve Kuzey Avrupa ülkelerinde tekerlek izi oluşumuna karşı Taş Mastik Asfalt (Stone Mastic Asphalt, SMA) kaplamalar geliştirilmiştir. Bu tip karışımlar, Almanya’da yaklaşık 20 yıldan beri kullanılmaktadır. 1984’den beri tekerlek izi oluşumuna karşı bir karışım olarak geliştirilmiştir.

Almanya’da “ Splitmastix Asphalt” olarak adlandırılan bu karışımlar, temel olarak kaba agregalı bir iskelete sahip bağlayıcı açısından zengin bir harç ile doldurulmuştur.

Son yıllarda sadece Almanya değil, diğer Avrupa ülkeleri ile Amerika’da da kullanılmaya başlanmıştır.

## **2.7. Tekerlek İzi Tahmininde Kullanılan Modeller ve Deneyler**

### **2.7.1. Tekerlek İzi Tahmininde Kullanılan Modeller**

Aşağıda yalnızca ana hatlarıyla verilen modeller bitümlü bir kaplamanın hizmet ömrü süresince tekerlek izi oluşumunun nasıl gelişeceğini tahmin etmekte kullanılabilir. Bu modellerdeki temel düşünce kaplamanın ekonomik ömrü sonunda tekerlek izi oluşumunun güvenlik ve konfor amacıyla müsaade edilen değerden daha fazla olup olmadığının araştırılmasıdır.

#### **2.7.1.1. Shell Modeli**

Shell yönteminde kaplamanın hizmet ömrü süresince beklenen trafik 80 kN.'lik standart dingil yüklerinden oluşan eş değer bir trafiğe dönüştürülmektedir. Eşitleme yasası bitümlü karışımın özelliklerine bağlı olup, bir yanda sünme deneyinde karışımın rijitlik modülü ile diğer yanda bitüm rijitlik modülü arasındaki ilişkiyi temsil eden eğrinin eğiminin bir fonksiyonu durumundadır.

Bitümlü tabaka içersinde standart yük tarafından oluşturulan ortalama gerilme, sıcaklıktaki değişmelere tolerans verilmek suretiyle elastik çoklu tabaka teorisi kullanılarak hesaplanmaktadır.

Tekerlek izi derinliği bitümlü tabakanın kalınlığı, ortalama gerilme ve karışımın sertlik modülü ile hesaplanmaktadır. Bir ile iki arasında değişen değerdeki bir çarpan (karışım türüne göre değişen) yüklerin dinamik etkimesine ilişkin sonuçların düzeltilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Kullanılan karışımın sertlik modülü bu modülün viskoz bileşenine eşit olan bir bitüm modülü değerine ilişkin bir statik sıyrılma deneyinde bulunan değerdir.

Hesaplanan tekerlek izi derinliği kabul edilebilir sınırlar içerisinde ise prosedür tamamlanmıştır. Aksi durum söz konusu ise prosedür bu kez farklı bir kalınlık dizaynı veya farklı bir karışım türü ile tekrar başlatılır [29].

Burada tekerlek izi derinliği aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\Delta h = C * h \frac{\sigma_{av}}{S_m}$$

C : Dinamik etki için düzeltme faktörü.

h : Bitümlü tabakanın kalınlığı.

$\sigma_{av}$  : Standart dingil yükü altında oluşan ve sıcaklığa göre değişen gerilme.

$S_m$  : Karışımın rijitlik modülü.

### 2.7.1.2. Belçika Yol Araştırma Merkezi (BRRC) Modeli

Belçika Yol Araştırmaları Merkezine ait modelde, kaplamanın hizmet ömrü boyunca beklenen trafik, tekerlek izi oluşumu biriminde hasar verici etki içeren bir trafiğe dönüştürülmektedir.

Mevsimsel koşulların etkisinde olduğu gibi (sıcaklıklar), hesaplamaların pratik uygulamalar için olabildiğince basitleştirilmesi amacıyla yalnızca yılın en sıcak dönemi dikkate alınmaktadır.

Tekerlek izi oluşumu ile hizmet ömrü veya diğer bir ifade ile geçecek taşıt sayısı arasındaki ilişki aynı zamanda temel tabakalarının kalınlığına da bağlıdır. Tablo 2.4.'de tahmin edilen tekerlek izi derinliği ile bu tekerlek izi oluşumu için geçecek ağır taşıt sayıları görülmektedir [30].

Tablo 2.4. Ağır taşıt trafik hacmine göre tahmin edilen tekerlek izi değerleri (mm).

	Temel Kalınlığı (cm)	Ağır Taşıt Cinsinden Hizmet Ömrü			
		$N_c = 5 \times 10^4$	$N_c = 5 \times 10^5$	$N_c = 5 \times 10^6$	$N_c = 5 \times 10^7$
Esnek Üstyapı	10	8	10,3	10,8	13,6
	20	5,5	7,7	9	12,2
	40	3,8	5,5	6,4	8,8
Yarı Esnek Üstyapı	10	3,7	4,4	6,7	12,6
	20	2,8	3,7	5,6	8,7
	40	1,6	3,4	3,6	6,5

Tüm yol kesiti için kalıcı deformasyon aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$D = \sum \Delta h_i f_i(N)$$

Burada;

D; toplam kalıcı deformasyon,

$\Delta h_i$ ; her tabaka için oluşan deformasyon olup, Odemark yaklaşım yöntemi veya elastik çoklu tabaka yöntemi ile hesap edilmektedir. Bu model için kullanılan ve malzemelerin ortalama mekanik özelliklerini gösteren değerler Tablo2.5.'de görülmektedir.

Tablo 2.5. Tabakaların ortalama mekanik özellikleri (Belçika Modeli)

Malzeme	$f(N)$	Modül (Mpa)
Bitümlü bağlayıcı tabakalar	$4,49 N^{0,25}$	5000
Kırmataş temel	$h < 12 \text{ cm ise } 2N^{0,3}$ $h > 12 \text{ cm ise } 2N^{0,2}$	500
Granüler alttemel	$2N^{0,3}$	200
Yol tabanı	$1 + 0,7 \log N$	Parametre olarak 5,10,20,40

### 2.7.1.3. Bratislava Üniversitesi Modeli

Bratislava Üniversitesi tarafından bitümlü kaplamalardaki tekerlek izi derinliğinin hesaplanması amacıyla kullanılan model elastik çoklu tabaka teorisine

dayanmakta ve yukarıda vurgulanmakta olan BRRC yöntemi ile aynı ilkeleri takip etmektedir[19].

#### 2.7.1.4. Esso Modeli

Esso modeli bir kaplama üzerinde trafik tarafından oluşturulan gerilme ve uzamaların hesaplanması temeline dayanmaktadır. Bu amaçla elastik çoklu tabaka teorisi kullanılmakta olup, trafik, 10 kN'luk standart dingillerden oluşan eşdeğer trafiğe dönüştürülmektedir.

Bitümlü karışımların sertlik modülü, bir dinamik modül deneyi ile ölçülmektedir. Sıcaklıkla değişme göstermekte olan modül değerlendirilerek viskoelastisiteye izin verilmektedir.

Deney briketinin aksenal kalıcı deformasyonu kaydedilmekte ve yükleme döngüsü sayısı karşısında grafiğe çizilmektedir. Sonuçta ortaya çıkan eğri başlangıçta hızlı bir artış, ardından düzgün bir lineer artış şeklindedir. Hızlı gelişmeye ait üçüncü aşama, briketin çöktüğünü temsil etmektedir. En tipik dinamik sıyrılma performansı olarak seçilen parametre eğrinin lineer kısmının eğimi olmaktadır[19].

#### 2.7.1.5. Von Quintus Modeli

Bu modelde kalıcı deformasyon aşağıdaki gibi formülize edilmiştir.

$$\text{Log } \varepsilon_p = \text{log } A + m * \text{log } N$$

Burada;

$\varepsilon_p$  = Kalıcı deformasyonu,

N = Tekrarlı yük adedini,

A, m = Regresyon sabitlerini göstermektedir.

A ve m sabitleri statik sünme deneyinden bulunmuş ve aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir.

$$A = a * (t_1)^{m_c} - \varepsilon_{r1}$$

$$m = \frac{\log_a + 3,5563 * m_c + \log(1 - x) - \log[a * (0,1)^{m_c} - \varepsilon_{r1}]}{4,5563}$$

$m_c$  = Statik sünme eğrisinin doğru olduğu kesimdeki eğimini,

a = Sünme – zaman eğrisinin 1. saniyesindeki sünme deformasyonu miktarını,

$t_1$  = Yükleme süresini (sn),

$\epsilon_{rt}$  = Tekrarlı sünme deneylerinde oluşan toplam geriye dönen deformasyonu,  
x = Geri dönme yeteneğini göstermektedir[31].

#### 2.7.1.6. Zahw vd.'lerinin Geliştirdiği Model

Kaplamanın çekme ve kesme mukavemetlerine bağlı olarak geliştirilen bu yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Tekerlek İzi=61,525-50,695 Ab-0,0226 Visc - 0,315 Comp + 23,562 St -11,688 Ts

Burada;

Ab : Kaba agreganın su absorpsiyonu,

Visc : Karışımda kullanılan asfalt çimentosunun kinematik viskozitesi (santistok),

Comp : Sıkıştırma enerjisi, darbe sayısı,

St : Uygulanan gerilme (Mpa),

Ts : Dolaylı çekme mukavemetini (Mpa) ifade etmektedir[32].

#### 2.7.1.7. Fernando, vd. Modeli

Bu modelde tekerlek izi derinliği; 279 x (kümülatif kesme deformasyonu) olarak verilmiştir. Burada deformasyon ölçümleri sabit yükseklikte tekrarlı basit kayma deneyinden (repetitive simple shear at constant height RSS-CH) bulunmuştur[33].

Yük tekrarına bağlı olarak yukarıda verilen tekerlek izi derinliği için bulunacak eşdeğer dingil yükü ise;

$$\log_{10} (\text{RSS-HT deney yük tekrarı}) = -4,36 + 1,24 \log_{10} (\text{ESAL})$$

olarak verilmektedir. Burada;

ESAL, 8,2 ton eşdeğer dingil yükünü göstermektedir.

Sonuç olarak, tekerlek izi derinliğinin gelişiminin tahmin edilmesi yalnızca, yüzey kaplamaları, üste serilen tabakalar ve rijit temeller üzerindeki bitümlü tabakalarda (örnek, çimento-bağlı derecelendirilmiş agrega) geçerlidir. Gerçekçi olmak amacıyla, bu tahmin ayrıca çeşitli girdi parametreleri hakkında olabildiğince tam bir bilgi gerektirmektedir. Bu parametrelere örnek olarak, günün farklı zamanlarında yapıdaki sıcaklık dağılımları, trafik histogramları, vs. sayılabilir [34].

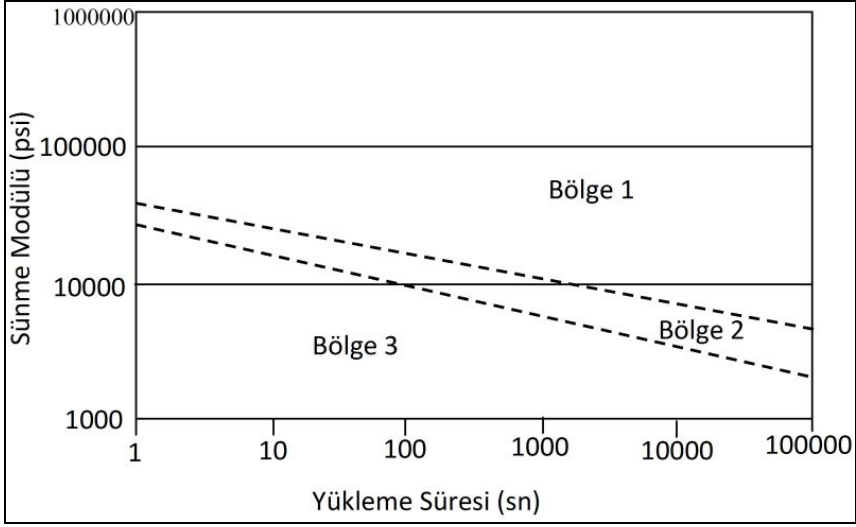
## 2.7.2. Tekerlek İzi Tahmininde Kullanılan Deneyler

Asfalt kaplama yüzeyine yük uygulandığında deformasyon oluşmaktadır. Fakat asfaltın visko-elastik bir malzeme olması, yükün kalkmasıyla deformasyonun geriye dönmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, küçük bir miktar geri dönmeyen deformasyon oluşmaktadır. Asfaltik yapılarda biriken küçük deformasyonlar, çok küçük şekil değiştirmeler olarak kalmaktadır. Aks yüklerinden kaynaklanan nedenle milyonlarca bu küçük şekil değiştirmelerin birikmesi, yüksek trafikli yollarda yüzeysel tekerlek izinde oturma problemini doğurmaktadır.

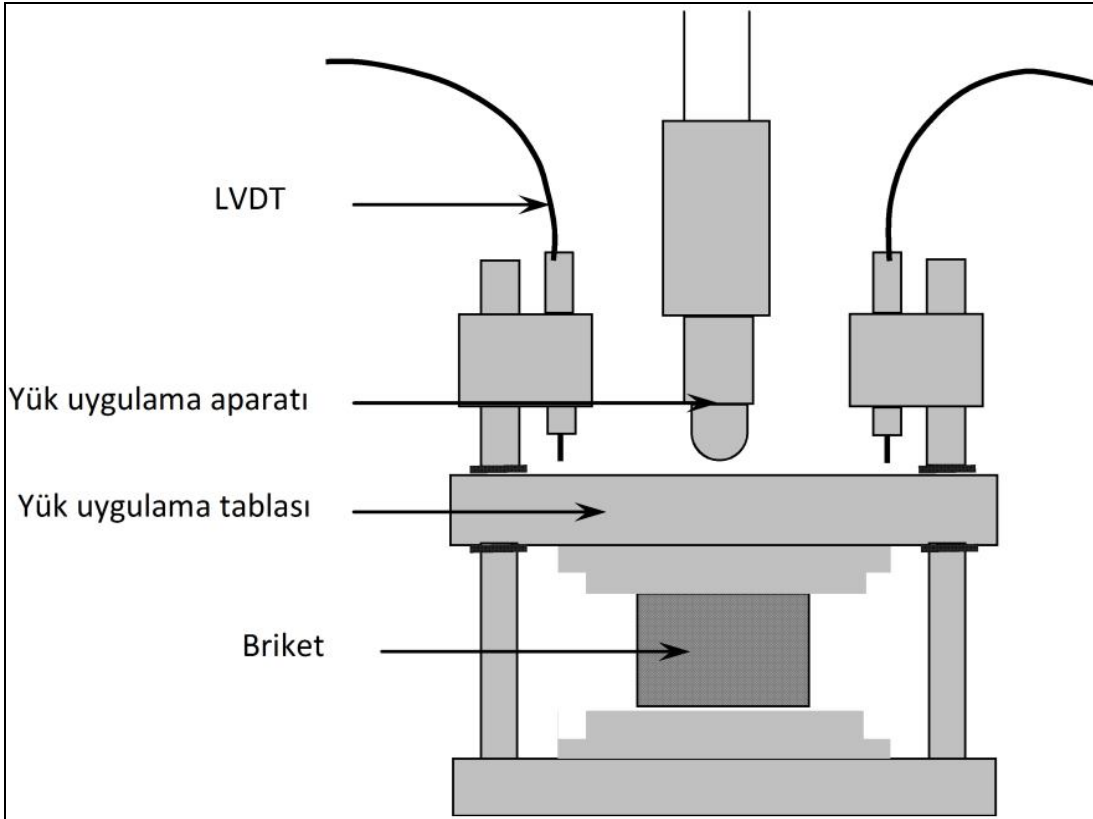
Bitümlü kaplamalarda performans yönlü araştırmalarda kullanılan ve kabul gören çeşitli modeller ve bunların altında yatan genel ilkeler, bunlara ait uygulamalar için kullanılan mekanik laboratuvar testleri ile birlikte aşağıda vurgulanmaktadır. Servis ömrü boyunca yol malzemelerinin yapısı ile bunların performansını belirleyen dış parametrelere ait değerleri net şekilde saptayabilmenin imkansız olmasından dolayı, çeşitli problem türlerini tahmin etmede kullanılan metodlar istatistiksel olarak kalmaktadır. Bu sebepten dolayıdır ki bu modellere getirilen çözümlerin tümü belli oranda risk de içermektedir.

### 2.7.2.1. Statik Sünme Deneyi

Statik sünme deneyi, bitümlü karışımların kalıcı deformasyonlara karşı performansını ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Statik sünme deneyinde briket yatay olarak sabit bir yük altında basınca tabi tutulur ve düşey deformasyon belli aralıklarla sürekli ölçülür. LVDT'ler yardımıyla yapılan ölçümler bilgisayarda kaydedilir. Bu verilerden yararlanılarak deformasyon-zaman grafikleri çizilir. Yine bu deney verilerinden faydalanılarak sünme modülü değerleri hesaplanarak Şekil 2.14'de verilen sünme modülü nomoğrafından faydalanılarak değerlendirilebilir. Statik sünme deneyinde 1 saatlik (3600 sn) bir ölçüm malzeme karakteristiğini belirlemek için yeterli görülmektedir. Statik sünme deneyinin yapıldığı NAT cihazı Şekil 2.15'de görülmektedir[19].

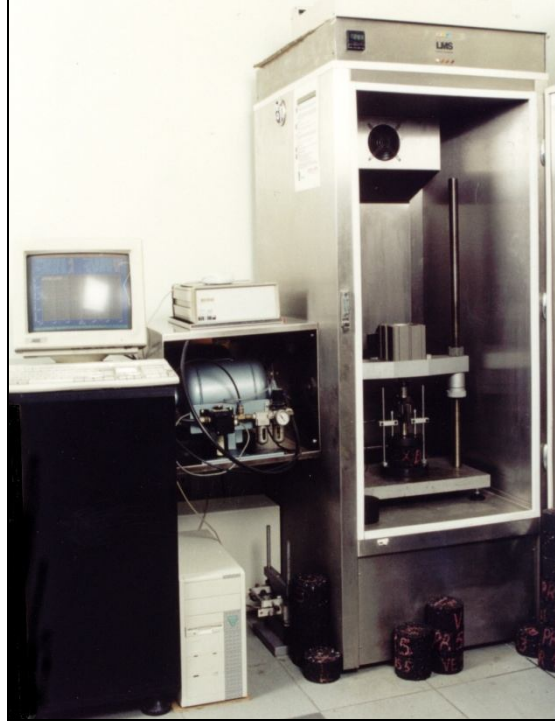


Şekil 2.14. Sünme modülü nomografi



Şekil 2.15. Şematik bir sünme deney düzeneği [19].





Şekil 2.16. Statik sünme deneyinin yapıldığı NAT cihazı[19].

#### 2.7.2.1.1. Deneyin Yapılışı ve Hesaplamalar

Deneyin yapılışı ve hesaplamalar aşağıdaki gibidir [20].

-Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilen briketlerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilir.

-Briketler istenen sıcaklıkta  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklenir. Eğer briketlerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise briketler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulur.

-Sabitlenmiş olan briketin bozulmasına neden olan yükün %5 ile %25 arasındaki basınç yükü uygulanır.

-Yarı sinüzoidal ön hazırlık gerilmesi 1sn'lik periyotta 0,1 rise time, 0,9 rest time olacak şekilde uygulanır.

-Ön hazırlık sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçülür ve buradan da elastisite modülü hesaplanır.

-Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile,  $\pm 2\%$ 'lik hata ile sabitlenmiş yük uygulanır.

-Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedilir. Yük 60 dakika  $\pm 15$  sn boyunca uygulanır.

-Sabitlemiş yükün 60 dakika boyunca uygulanmasının ardından, geri dönen deformasyonun ölçülmesi için ilave bir 60 dakika yük uygulanmaksızın düşey yer değiştirmeler ölçülür.

-Her bir briketin 1, 10, 100, 1000 ve 3600 sn'deki sünme modülü değerleri hesaplanır. İlave olarak karışımların değerlendirilmesi için deformasyon-süre eğrisi de çizilebilir.

Tek eksenli basınç briketlerine ait hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$E_{cq}(t) = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c(t)}$$

$E_{cq}(t)$  = t anındaki sünme modülü (psi)

$\sigma_c$  = Briketlere uygulanan basınç gerilmesi (psi)

$\varepsilon_c(t)$  = t anında tek ekseninde oluşan deformasyon (inç/inç)

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\Delta v(t)}{l}$$

$l$  = Briket yüksekliği (inç)

$\Delta v(t)$  = t anında düşey yönde oluşan yer değiştirme (inç)

- Dolaylı çekme gerilmesine ait hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$E_{ct}(t) = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_1(t)}$$

$$E_{ct}(t) = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_1(t)}$$

$\sigma_t$  = Briketeye uygulanan dolaylı çekme gerilmesi değeri

$$\sigma_t = \frac{P}{h} \times 0,156$$

$P$  = Briketeye uygulanan yük

$\varepsilon_1(t)$  = Sünme deformasyonu (inç/inç)

$$\varepsilon_1(t) = \Delta h(t) \times \frac{(0,0673 + \gamma \times 0,2494)}{(0,03896 + \gamma \times 0,1185)}$$

$\Delta h(t)$  = t anındaki yatay yer değiştirme (inç)

$\nu$  = Poisson oranı

$X$  = Briketin geriye dönüş kabiliyeti

$$X = \frac{\Delta r(3600)}{\Delta v h(3600)}$$

$\Delta r(3600)$  = Deney sonunda tek eksenli basınç deneyinde geriye dönen düşey deformasyon veya dolaylı çekme deneyi için geriye dönen yatay deformasyon (yükün uygulandığı 2. 3600 sn'deki)

$\Delta v h(3600)$  = Tek eksenli deneydeki düşey veya dolaylı çekme deneyindeki yatay deformasyon. Yüklü sürenin yani 1. 3600 saniyenin sonundaki deformasyonlar.

### 2.7.2.2. Tekrarlı Sünme Deneyi

Tekrarlı sünme deneyi bitümlü karışımlara uygulanan en önemli deneylerden biridir. Tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Tekrarlı sünme deneylerinin en önemli sonuçlarından birisi de üçüncül akma noktasının tespit edilebilmesidir [36].

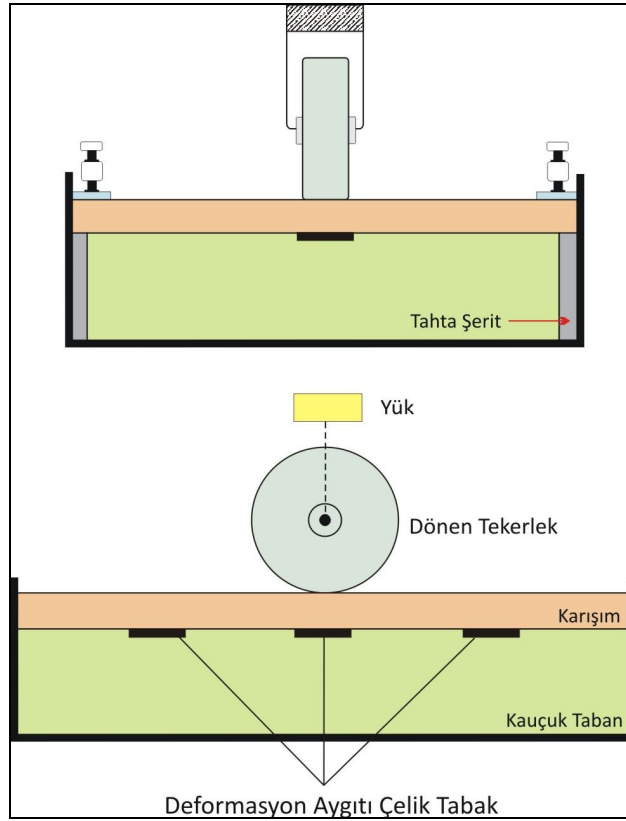
Deney düzeneği ve deformasyon ölçüm şekli statik sünme deneyinde olduğu gibidir. Ancak burada hareketli trafik yükünü temsil etmek için tekrarlı olarak yük uygulaması yapılmaktadır. Tekrarlı sünme deneyi özellikle katkı cinsleri arasındaki performans farkını göstermesi açısından çok önemli bir deneydir. Bu deney 10 veya 15cm yarıçaplı silindirik briketlere uygulanmaktadır.



Şekil 2.17. Tekrarlı sünme deneyi test düzeneği[36].

### 2.7.2.3. Tekerlek İzi Deneyi

Üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerleğin etkisini daha iyi belirlemek, çatlak başlangıcı ve ilerlemesini daha iyi anlatmak amacı ve asfalt plakların yorulma karakteristiklerini araştırmak için Tekerlek-İzi deneyi geliştirilmiştir [21] (Şekil2.18 ). Bu deney aletinde hava basınçlı ve yüklü bir tekerlek bir asfalt betonu plak üzerinde ileri ve geri yuvarlanır. 0,25m yarıçapındaki tekerlek 0,60m uzunlukta ve 0,05 - 0,07m aralıklı bir genişlikteki yol üzerinde yuvarlanır. Plak bir lastik yatak üzerine desteklenmiştir. Tekerlek değme alanı yük veya tekerleğin şişkinliğinin değişimine bağlı olarak farklılaşmaktadır. Uygun ekipmanlar ile ana karakteristikler olan plağın tabanındaki deformasyonlar ve çatlağın başlangıcı ve ilerlemesi tespit edilir.



Şekil 2.18. Tekerlek izi deneyinin şematik gösterimi[21].

Sonuçlar üç aşamalı yorulma gelişimi olan kılcal çatlaklar (N1), gerçek çatlaklar (N2) ve plağın bozulması (N3) ile tanımlanır.

Bu deneyde asfalt betonu 40mm kalınlıktadır. Tekerleğin değme alanı yaklaşık 25 cm 'dir bulunan bilgiler Van Dijk tarafından sunulmuştur. Van Dijk kontrollü-

gerilme ve kontrollü-deformasyon şartları altında ölçülen yorulma ömürleri arasındaki farklılığı, kılcal çatlaklar ile gerçek çatlaklar arasındaki farklılıkları ile açıklamaktadır. İlgili prosedürün karmaşıklığı doğal bir malzeme özelliğinin saptanmasını engellemektedir. Test, oluşturulan koşullar altında izlenecek olan tekrarlı yüklemeli deformasyonun gelişimini mümkün kılmaktadır [21].

#### **2.7.2.4. Dolaylı Çekme Testi**

Daha çok, tekrarlı veya tekil yükleme uygulanmak suretiyle modül saptanmasında kullanılan bir test olmakla birlikte tekil yüklemeli ampirik testler arasında sınıflandırılmaktadır.

Laboratuvar testlerinin yanında, ivmelendirilmiş tam-ölçekli testlerden de söz edilmelidir. Dünya da yirmiden fazla tam-ölçekli test tesisleri bulunmakta olup, bunlara örnek olarak Nantes'daki LCPC [42]. Madrid'deki CEDEX, [43] ve Zürich'teki IFT [23] dairesel test pistleri ile birlikte Washington D.C.'deki RHWA tarafından kullanılan Avustralya ALF tesisi sayılabilir. Bu tesisler, gerçek yollar gibi inşa edilmiş ve yüklenmiş tam ölçekli yol yapılarının test edilmesini mümkün kılmaktadır. Buradaki amaç genellikle farklı türlerdeki malzemelerin performanslarının kıyaslanması veya çeşitli inşaat tekniklerinin ya da yükleme modellerinin etkilerinin analiz edilmesidir.

Tekerlek izi derinliğinin hesaplanmasına ilişkin iki grup teorik model arasında bir ayırım yapılabilir [22].

1. Vizkoelastik ve elastovizkoplastik karışım performansı yasasından yararlanan modeller; Bu tür bir yasayı uygulama yeteneğine sahip bir kaplama modeli yapısı kullanılarak, bir yükleme döngüsünün uygulamasından kaynaklanan deformasyon döngüsü hesaplanmakta ve böylece bir yükleme döngüsünden oluşan kalıcı deformasyon saptanmaktadır. Hesaplamalar her bir döngü için ardışık şekilde yapılmaktadır. Bundan ötürü, yük tekrarlama etkisi teorik bir yöntemle belirlenmektedir. Bu metodun çok basitleştirilmiş bir örneğinde ise, hareketli yüklerin tekrarlı uygulamasından kaynaklanan tekerlek izi, statik bir yük altındaki yerleşme ile eşitlenmektedir.

2. Yalnızca yük tekrarının etkisinin deneysel olarak saptanmasına dayalı modeller; Çeşitli gerilme koşullarına ilişkin deneyler yoluyla kalıcı deformasyon yasası karşısında yükleme sayıları ortaya konulmakta ve bu yasalar, bir kaplama modeli

kullanılarak hesaplanmış olan gerilme koşulunun bulunduğu kaplama yapısındaki çeşitli noktalara tahsis edilmektedir. Dolayısıyla, yapıdaki hesaplanmış gerilme alanından kalıcı deformasyona doğrudan geçiş söz konusu olmaktadır[38].

#### **2.7.2.5. Marshall Testi Deneyi**

Marshall deneyi, TCK şartnamelerinde tanımlanan ve kullanılan stabilite deneyidir. ASTM D1559 standardına göre uygulanan deneyin yapılması sırasında her bir bitüm yüzdesinde üç adet standart briket hazırlanır. Marshall cihazı yardımıyla, bitümlü karışımın plastik akmaya karşı stabilitesi elde edildikten sonra hesaplama yapılır, asfalt çimentosu yüzdesine bağımlı olarak pratik birim ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk yüzdesi ve akma ilişkileri belirlenir. Bulunan değerler şartname değerleri ile kontrol edilerek optimum asfalt yüzdesi bulunur [25].

Ülkemizde ve diğer birçok ülkede bitümlü kaplama karışımlarının dizaynında kullanılan Marshall metodu, maksimum dane boyutu 2,54cm (1 inch) veya daha küçük agrega ihtiva eden ve bağlayıcı olarak asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan sıcak karışımlara uygulanır.

Marshall metodu ile hazırlanan sıcak karışım dizaynı aşağıdaki işlem sırasına göre yapılır.

- Agrega gradasyonunun belirlenmesi
- Agrega ve bitümün özgül ağırlıklarının belirlenmesi
- Agrega ve bitüm miktarlarının hesabı
- Briketlerin hazırlanması ve ilgili hesaplamalar
- Stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarının belirlenmesi

Briketlerin hazırlanması ve ilgili hesaplamalar aşağıda belirtilmiştir [36].

1. Her bir bitüm yüzdesi için en az 3 briket hazırlanacaktır. O nedenle her brikette kullanılacak agrega miktarı toplam briket sayısına göre ayrı ayrı kaplara doldurularak 24 saat bekletilmek üzere 165°C'lik etüve konulur.

2. Kullanılacak asfalt çimentosu etüve konularak 165°C'ye kadar ısıtılır.

3. Deneyde kullanılması gerekli olan mikser kabı, Marshall tokmağı, briket kalıbı, pala, kürek vb aletler de 165°C'lik etüvede ısıtılır.

4. 165°C'lik etüvde ısıtılmış olan agregaya yine 165°C'lik etüvde ısıtılmış olan karıştırma kabına boşaltılır ve kuru olarak karıştırılır. Bu şekilde hazırlanan agregaya içerisine bir çukur açılır ve agregaya ağırlığına göre karışımın içerisine konulması gereken asfalt miktarı açılan çukura ilave edilir.

5. Asfalt çimentosunun agregaya içerisinde üniform bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla karıştırma işleminin mekanik bir karıştırıcı ile veya kürek kullanarak elle mümkün olduğu kadar çabuk ve iyi bir şekilde yapılması gerekir.

6. Karışım, kalıba boşaltılır ve ısıtılmış bir spatula ile iç kısımlarından 10 kez, çevresinden 15 kez çabukça darbelenerek sıkıca yerleştirilir. Sonra 45,7cm (18 inch) yükseklikten serbest düşüş yapan sıkıştırma tokmağı ile numunenin ön ve arka yüzüne dizayn trafik sınırlandırmasına göre belirlenen 35,50 veya 75 darbe uygulanarak sıkıştırma yapılır.

7. Sıkıştırılan numuneler numaralandırılır ve kalıpla birlikte soğumaya bırakılır. Daha çabuk bir soğutma istendiğinde masa vantilatörü kullanılabilir.

8. Numune kalıptan kriko ile çıkarılır ve düzgün bir yüzey üzerine konular, numuneler, normal olarak bir gece soğumaya bırakılır.

#### **2.7.2.5.1. Briketlerin Yüksekliklerinin Belirlenmesi**

Standart briket yüksekliği 63.5mm olup mukavemet değeri bu standart yüksekliğe göre değerlendirilir. Standart briket yüksekliğine karşılık gelen katsayı 1'dir. Yüksekliğin 63,5mm den büyük olduğu durumda bu katsayı azalır, 63.5mm den küçük olduğu durumda yükselir. Briketin ölçülen stabilitesi ile numunenin yüksekliğine bağlı katsayının çarpımı, 63,5 mm yüksekliğindeki (standart) brikete göre düzeltilmiş stabilite değerini verir. Bunun için bir setteki her briketin değişik yerlerinden üç okuma alınır ve bu okumaların ortalaması briket yüksekliği olarak Marshall deney formuna kaydedilir[38].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde çalışmada kullanılan malzemeler, malzemelerin özelliklerini tayin etmede kullanılan deneyler, malzeme özellikleri ve karışım tasarımına ait bilgiler verilmiştir. Ayrıca hazırlanacak karışımlara uygulanacak deneyler ve bu deneylerde kullanılan deneysel program ve ölçütlerde bu bölümde verilmiştir.

#### 3.1. Materyal

Çalışmada kullanılacak agregaların temini için araştırma yapılmış ve agreganın Trabzon-Gümüşhane Devlet yolunun 29+000 km'sinin 200 m sağında bulunan Çatak taş ocağından temin edilmesi uygun görülmüştür. Buradan kayaç örneği alımı sırasında homojenliği sağlamak amacıyla, aynı kayaç aynasının ayrışmamış kısımları kullanılmıştır.

Araştırmada bitüm olarak, Kırıkkale Rafinerisinden temin edilen 50-70 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır.

Seçilen asfalt çimentosu, agregalar ve karışım tasarımı için uygulanan test yöntemleri ile ilgili standartlar aşağıda özetlenmiştir.

##### 3.1.1. Materyal Tanımlamada Kullanılan Deneyler [24].

Asfalt çimentosuna uygulanan ve aşağıda ifade edilen deneyler Polat Yol Yapı AŞ, DSİ 22. Bölge Müdürlüğü ve Karayolları Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

**Penetrasyon Deneyi:** Penetrasyon deneyi TSE 118 standardı ile yapılır. Asfalt çimentosu, oda sıcaklığında yarı katı durumdadır. Viskozitesini düşürmek için ısıtıldığı zaman bile kıvamlılığını Furol viskozitesi cinsinden tespit etmek pratik değildir. Kıvamlılıkla ilgilenilme nedeni, asfaltın yol sıcaklığındaki bağlama yeteneğini veya bağlayıcılık gücünü saptamaktır. Asfalt çimentosunun kıvamlılığı arttıkça karışım içerisindeki agregaları birbirine daha kuvvetle bağlayacağı doğaldır.

Penetrasyon deneyi ile asfalt çimentolarının sertlik veya kıvamlılıkları tespit edilir. Penetrasyonun kelime anlamı, batma veya içe girme demektir. Standart bir iğnenin belirli bir yük altında ve belirli bir süre içinde, asfalt örneği içerisine dikey



olarak batma mesafesi penetrasyon miktarını belirler. Deney sırasında örneğin sıcaklığı sabit tutulur, koşulların belirtilmediği durumda ağırlık 100 gram, sıcaklık 25 C ve zaman 5 saniye olarak alınır. Penetrasyon birimi 1/10 milimetredir. Aletin göstergesindeki her bir bölüm 0,1 mm. yi gösterir. Deney sonunda okunan değer 100 ise, asfaltın penetrasyonu 100 demektir; yani iğne asfaltın içerisine 1 cm. girmiş demektir. Penetrasyon değeri kıvamlilikla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe asfalt yumuşar.

**b) Yumuşama Noktası Deneyi:** TSE 120 standardı ile yürütülür. Biri blown asfalt diğeri yol üst yapılarında kullanılan asfalt çimentosu olmak üzere iki tane yarı katı asfalt numunesi alındığında bunların 25°C'deki penetrasyonları birbirinin aynı olsun. Eğer bu asfaltlar 45°C'ye kadar ısıtılarak penetrasyon deneyine tabi tutulursa, artık penetrasyonlarının aynı olmadıkları ve asfalt çimentosunun çok daha yumuşak olduğu görülür. Her iki örnek daha da fazla ısıtılırsa kıvamlilikteki fark daha belirgin olur. Örneğin, 120°C'de asfalt çimentosu çok akıcı bir sıvı haline geldiği halde blown asfalt 175°C'de hemen hiçbir akıcılık göstermez. Her iki asfalt da 0°C'ye kadar soğutulursa bu defa asfalt çimentosunun diğere göre çok daha sertleşmiş olduğu görülür. Görülüyor ki asfalt çimentolarının kıvamlilikleri ısı değişimlerinden blown asfalta göre daha fazla etkilenmektedirler. Asfaltların bu özelliklerine "ısıya karşı duyarlık" denir. Değişik ham petrolerden üretilmiş asfaltların ısı değişimlerine karşı olan duyarlılıkları farklıdır. Fakat bu fark blown asfaltları ile normal olarak kaplamalarda kullanılan asfalt çimentoları arasındaki farka göre oldukça küçüktür. Asfaltların sıcaklık değişimlerine karşı olan duyarlılıklarını ölçmek için en kısa ve en basit yöntem yüzük ve bilya yöntemi ile yumuşama noktasının bulunmasıdır. Yumuşama noktası; bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde bir bilya bulunan, standart bir kalıp içerisindeki bitümlü maddenin belli bir hızla ısıtılmasıyla yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometrede okunan sıcaklıktır.

**c) Düktilite Deneyi:** TSE 119 standardı ile tanımlanmıştır. Düktilitenin kelime anlamı "uzama" veya "çekilebilme" demektir. Asfalt çimentolarının önemli özelliklerinden biridir. Düktilite yeteneği fazla olan asfalt çimentoları, düktilite değeri daha düşük olan asfalt çimentolarına göre daha üstün bir bağlama yeteneğine sahiptirler. Diğer yandan, çok yüksek düktilite değerine sahip asfaltlar ise, ısı değişimlerine karşı fazla duyarlık gösterirler. Bu nedenle, çeşitli asfaltların düktilite değerleri sınırlandırılmıştır. Düktilite kısaca; asfalt çimentosundan yapılmış standart bir briketin,

belirli sıcaklık ve hızda kopmadan çekilebildiği uzunluğun cm cinsinden ifadesi olarak tanımlanabilir. Bir asfalt çimentosunun duktilitesini ölçmek için standart bir kalıba o asfalt çimentosundan bir örnek dökülür. Sonra, örnek duktilite cihazındaki yerine konur. Su banyosu 25°C 'ye ayarlanmış olmalıdır. Asfalt briketi bu sıcaklıkta 5+0,25 cm/dakika hızla çekilir. Örnek belli bir uzamadan sonra kopar. Kopma anındaki uzama miktarının cm cinsinden karşılığı duktilite değeridir.

**d) Çözünürlük Deneyi:** TSE 1090 ile tanımlanır. Bu deney, içinde mineral madde bulunmayan veya çok az bulunan, yol katranları ve petrol asfaltları gibi bitümlü yol malzemelerinin organik çözücüler içerisindeki çözünürlüğünün belirlenmesini kapsar. Deneyde; karbon sülfür, karbon tetraklorür, benzen, triklor etilen çözücülerinden biri kullanılır. Bu çözücüler zehirli olduklarından çalışılırken iyi bir havalandırma sağlanmalıdır. Ayrıca, triklor etilen dışındakiler son derece yanıcı olduklarından çıplak alevden uzak çalışılması gerekir. Kullanılacak çözücünün seçiminde; karbon tetraklorür petrol kökenli asfaltlar için, benzen katran esaslı bitümlü maddeler için, triklor etilen petrol kökenli asfaltlar için kullanılır.

**e) Parlama Noktası Deneyi:** TSE 123 standardı ile tanımlanan parlama noktası, bir maddenin buharının alev temasında geçici olarak parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Bir malzemenin parlama noktasının bilinmesinin, malzemenin uygulama aşaması sırasında ısıtılırken meydana gelebilecek herhangi bir tutuşma ve yangın tehlikesinin önlenmesi bakımından çok önemli bir yeri vardır.

**f) Özgül Ağırlık Deneyi:** TSE 1087 özgül ağırlık deneyini ifade eder. Asfalt çimentosunun özgül ağırlığı, 25°C'de hacmi bilinen bir miktarının ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki suyun ağırlığına bölünmesinden elde edilen orandır.

### 3.1.2. Agrega Örneklerine Uygulanan Deneyler

Agregaların yol yapımında kullanılabilmesi amacıyla; aşınmaya ve donmaya karşı dirençlerinin, özgül ağırlık, su absorpsiyonu, soyulma değerlerinin, elek analizleri ve tane şekillerinin, sürtünme etkileri ile meydana gelecek cilalanmaya karşı dirençlerinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak bu özelliklerinin hepsinin her zaman bilinmesine gerek yoktur. Örneğin, temel tabakasında kullanılacak bir agregaya cilalanma deneyinin uygulanması gereksizdir.

Yukarıda adı geçen bütün deneylerin, agregaların değerlendirilmesinde güvenilir olabilmesi için denenecek örneklerin çok özenle alınmış temsili örnekler olması gerekir. Aksi halde o örnek için yanıltıcı değerler bulunabilmektedir..

Bu kısımda ifade edilen deneyler; Polat Yol Yapı AŞ, DSİ 22. Bölge Müdürlüğü ve Karayolları Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

**a) Elek Analizi:** Elek analizi deneyi ASTM E 11-87 ile tanımlanan deney yöntemi olup, nitelikleri verilmiş olan elekleri kullanarak agreganın tane büyüklüğü dağılımının tespit edilmesini kapsar. Elek analizi yapılacak malzemelerin boyutları taş ve kömür gibi çok büyük parçalardan, boya maddeleri ve kil gibi çok ince malzemelere kadar değiştiği, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olduğu için, bütün malzemelere uygulanabilecek tek bir elek deneyi yönteminden söz etmek olanaklı değildir.

**b) Aşınma Deneyi:** ASTM C131 standardına sahiptir. Bu deney, agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığını belirtir. Kaba agreganın aşınması, aşındırıcı bir yük kullanılarak Los Angeles makinesi ile tespit edilir. Los Angeles Aleti; iki ucu kapalı, iç çapı 71 cm ve iç uzunluğu 51 cm olan içi boş çelik bir silindirden oluşur. Silindir, içinden geçmeyen aksla yatay durumda dönmeyi sağlayacak şekilde yapılmıştır. Örneği silindir içine koyabilmek için özel bir kapak vardır. Bu kapak, silindirin iç yüzeyine tamamen uyacak şekilde sıkıca kapatılabilmektedir. İç yüzde silindir eksenine paralel olmak üzere 9 cm genişliğinde ve silindir boyunca uzanan yeter kalınlıkta ve deformasyon yapmayacak şekilde yerleştirilmiş çelik raf bulunur. Bu raf, örnek koyma deliğinden dönme doğrultusunda en az 127 cm uzaklıktadır. Aşınma yükleri yaklaşık olarak 4.68 cm çapında dökme demir veya çelik kürelerdir. Her birinin ağırlığı 390 ile 445 gram kadardır.

Örnek en büyük tane boyutuna ve Tablo 3.1.'de verilen sınıflardan birine uyacak şekilde, 75mm, 63mm, 50mm, 37.5mm, 25mm, 19mm, 12.5mm, 9.5mm, 6.3mm, 4.75mm ve 2.36mm' lik eleklerden kabaca elenir. Her elek üzerinde kalan agrega kil ve tozlardan iyice temizleninceye kadar kaldığı elek üzerinde yıkanır, 110°C'lik etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulur. Kuru örnekler tekrar üzerinde kaldıkları eleklerden hassas olarak elenip, Tablo 3.1.'de verilen sınıflardan birine göre tartılır. Los Angeles Aşınma Deneyinde kullanılacak küre sayıları ve yükleme ağırlıkları Tablo 3.2.'de görülmektedir.

Tablo 3.1 Aşınma deneyi örnek sınıflaması.

Elek Büyüklüğü (mm)		Granülometri Sınıfları, Gerekli Örnek Miktarları (gram)						
Geçtiği	Kaldığı	A	B	C	D	E	F	G
75	63					2500		
63	50					2500		
50	37.5					5000	5000	
37.5	25	1250					5000	5000
25	19	1250						5000
19	12.5	1250	2500					
12.5	9.5	1250	2500					
9.5	6.3			2500				
6.3	4.75			2500				
4.75	2.36				5000			
Toplam		5000	5000	5000	5000	10000	10000	10000

Tablo 3.2. Aşınma deneyinde kullanılan küre sayıları

Sınıfı	Küre Sayısı	Yükleme Ağırlığı (g)
A	12	5000±25
B	12	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15
E	12	5000±25
F	12	5000±25
G	12	5000±25

Hazırlanan deney örneği ve aşındırıcı yükler aşınma makinesine konur ve ağzı sıkıca kapatılır. Makine, dakikada 30-33 devir döndürülerek A,B,C,D sınıfları için 500; E,F,G sınıfları için 1000 devir yaptırılır. Örnek makineden çıkarılarak 1.70 mm eleğinden elenir, bu elek üzerinde kalan kısım yıkanır. 110°C 'lik etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulur ve tartılır. Daha sonra aşınma kaybı ilk ağırlığa göre hesaplanır.

**c) Hava Etkilerine Dayanıklılık Deneyi (Donma Deneyi):** ASTM C88 standardına göre yürütülür. Bu deney yöntemi, agregaların doygun sodyum sülfat veya magnezyum sülfat çözeltileri ile ufalanmaya karşı dayanıklılığının tespit edilmesini kapsar. Agregaların hava etkileri ile donarak ufalanmaya karşı olan dirençleri hakkında, laboratuarda kısa süre içinde bir karar verebilmek amacıyla uygulanan hızlandırılmış bir deneydir.

Bu çözeltinin hazırlanması için saf ve susuz sodyum sülfat tuzu ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) veya kristalize sodyum sülfat tuzu ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) kullanılır. Tuz  $25\text{-}30^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki su içinde iyice karıştırılarak yavaş yavaş çözülür. Her litre su için en az 250 gram sodyum sülfat tuzu veya en az 750 gram kristalize sodyum sülfat tuzu katılır. Bu sırada çözelti devamlı olarak karıştırılır. Buharlaşmayı önlemek amacıyla çözeltinin ağzı kapatılarak 48 saat sabit sıcaklık ve rutubet odasında bekletilir. Kullanılmadan önce topaklaşmayı gidermek için iyice karıştırılıp özgül ağırlığı belirlenir. Özgül ağırlık 1,151'den az, 1,174'den fazla olmamalıdır.

Sağlamlık deneyi, kaba agregaya uygulandı. Kaba agrega 3/4; 3/8 ve No 4 eleklerinden elenir. Her elek arasındaki malzeme yıkanır,  $110^\circ\text{C}$ 'lik etüvde kurutulur. Örneğin her elek üzerinde kalan miktarı esas örneğin %5'inden az olmamak üzere Tablo 3.3.'de verilen miktarlarda tartılır. İki kısımdan ibaret olan boyutlarda örnekler aynı kaba konulur[38].

Tablo 3.3. Sağlamlık deneyinde uygulanan miktar

Dane Boyu (mm)		Ağırlık (gram)	
9.5 - 4.75		300	
19 - 9.5	12.5 - 9.5	330	1000
	19 - 12.5	670	

Belirtilen miktarlarda tartılan örnek 18 saat süreyle oda sıcaklığında çözelti içerisinde bırakılır. Bu süre sonunda örnek çözeltilerden çıkarılarak 15 dakika süzülür,  $100^\circ\text{C}$  'lik etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Etüvden çıkarılınca oda sıcaklığına kadar soğutulur. Bu süreç beş kez tekrarlanır. Son olarak, etüvden çıkan örnek tamamen temizleninceye kadar yıkanır. Malzeme Tablo 3.4.'de verilen eleklerden elenir.

Tablo 3.4. Donma kaybı için kullanılan elek

Agrega Boyutu (mm)	Donma Kaybı Eleği (mm)
19 -9.5	8
9.5 -4.75	4

Deneyden sonra, herbir elek üzerinde kalan malzeme ağırlığı ile deneyden önceki ağırlık arasındaki fark donma kaybını, bu kaybın ilk ağırlığa oranı donma kaybı yüzdesini verir.

**d) Cilalanma Direnci Deneyi:** BS 813 standardı cilalanma deneyini tanımlar. Bu deneyin amacı, çeşitli yol taşlarının trafik altında sürtünme ile aşınarak ne dereceye kadar cilalanacaklarını laboratuarda kısa bir zamanda tespit etmektir. Yolun yüzeyinin cilalanan bir taştan yapılmış olması, yolun kaymaya karşı direncini etkileyen başlıca faktörlerden biridir. Taşın cilalanma değeri ile kaymaya karşı direnç arasındaki ilişki trafik koşulları, kaplamanın tipi ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir. Yoldaki koşullara benzer fakat hızlandırılmış bir cilalanma elde etmek için bir makine geliştirilmiştir.

Deneme iki kısımdan oluşur. Birinci kısımda taş örnekler cilalanma makinesinde hızlandırılmış cilalanma işlemine tabi tutulmakta ikinci kısımda ise cilalanan taş örneklerinin sürtünme cihazı ile cilalanma değerleri tespit edilmektedir.

**e) Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyleri:** Bir agreganın özgül ağırlığı, o agreganın birim hacmindeki ağırlığının aynı hacimde ve 25°C' de suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Danenin hacim tanımlamasına bağlı olarak genellikle kuru hacim özgül ağırlık ve zahiri hacim özgül ağırlık tanımlamaları yapılır. Zahiri özgül ağırlık geçirimsiz boşluklarla beraber katı dane hacmini, kuru hacim özgül ağırlık ise asfalt absorbe eden boşluklar dışındaki tüm hacmi kapsar.

No 4 eleği üzerinde kalan malzeme kaba, No 4 ile No 200 arası ince ve No 200 eleğinden geçen malzeme de mineral filler agregası olarak tanımlanır. Çalışmada ASTM C 127 ile kaba agreganın, ASTM C 128 ile ince agreganın hacim-zahiri özgül ağırlıkları ve su emmeleri elde edilmiştir.

**f) Yassılık Deneyi:** Bir malzemenin yassı kabul edilebilmesi için, deneye alınan herhangi bir agreganın kalınlığının, nominal boyutunun 0.6'sından küçük olması

gerekir. Yassı danelerden oluşan bir yapı, trafik yükü altında stabil değildir. Yassı daneler yük altında kolaylıkla kırılır ve karışımın mukavemeti azalır [25].

BS 812 standart numarası ile literatürde yerini bulmuştur. Yassılık indeksi, yassı danelerin ayrılması ile bulunan ağırlığın deneye alınan toplam örnek ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Deney 6.3mm'den büyük ve 63mm'den küçük malzemeye uygulanır. 1500 gram örnek ile deney yapıldı. Deneyin yapıldığı elekler ve alınan miktarlar Tablo 3.5.'de görülmektedir.

Tablo 3.5. Yassılık deneyi elekleri

Elekler (")	Kalan (%)	1500 g için miktar (g)
3/4-1/2	10	188
1/2-3/8	20	375
3/8-No 4	50	938

Belirlenen miktarlar; 14mm,10mm ve 6.3mm'lik yassılık eleklerinden elenerek yassılık indeksi hesaplandı.

### 3.1.3. Karışım Tasarımı

Bu kısımda optimum bitüm yüzdesini bulmaya yönelik uygulanan tasarım süreci vurgulanmaktadır. Tasarım sürecinde parametrelerin tespitine yönelik olarak Marshall briket hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Deneyler, Polat Yol Yapı A.Ş. Araklı Şantiyesi laboratuvarında gerçekleştirildi.

#### a) Marshall Deneyi

Marshall deneyi, TCK şartnamelerinde tanımlanan ve kullanılan stabilite deneyidir. ASTM D1559 standardına göre uygulanan deneyin yapılması sırasında her bir bitüm yüzdesinde üç adet standart briket hazırlanır. Marshall cihazı yardımıyla, bitümlü karışımın plastik akmaya karşı stabilitesi elde edildikten sonra hesaplamaya geçilir, asfalt çimentosu yüzdesine bağımlı olarak pratik birim ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk yüzdesi ve akma ilişkileri belirlenir. Bulunan değerler şartname değerleri ile kontrol edilerek optimum asfalt yüzdesi bulunur [25].

Ülkemizde ve diğer birçok ülkede bitümlü kaplama karışımlarının dizaynında kullanılan Marshall metodu, maksimum dane boyutu 2,54cm (1 inch) veya daha küçük agrega ihtiva eden ve bağlayıcı olarak asfalt çimentosu kullanılarak hazırlanan sıcak karışımlara uygulanır.

Marshall metodu ile hazırlanan sıcak karışım dizaynı aşağıdaki işlem sırasına göre yapılır.

- Agrega gradasyonunun belirlenmesi
- Agrega ve bitümün özgül ağırlıklarının belirlenmesi
- Agrega ve bitüm miktarlarının hesabı
- Briketlerin hazırlanması ve ilgili hesaplamalar
- Stabilite ve akma değerlerinin bulunması
- Optimum bitüm miktarının belirlenmesi

Briketlerin hazırlanması ve ilgili hesaplamalar aşağıda belirtilmiştir [36].

1. Her bir bitüm yüzdesi için en az 3 briket hazırlanacaktır. O nedenle her brikette kullanılacak agrega miktarı toplam briket sayısına göre ayrı ayrı kaplara doldurularak 24 saat bekletilmek üzere 165 °C'lik etüve konulur.

2. Kullanılacak asfalt çimentosu etüve konularak 165°C'ye kadar ısıtılır.

3. Deneyde kullanılması gerekli olan mikser kabı, Marshall tokmağı, briket kalıbı, pala, kürek vb aletler de 165°C'lik etüvde ısıtılır.

4. 165°C'lik etüvde ısıtılmış olan agrega yine 165°C'lik etüvde ısıtılmış olan karıştırma kabına boşaltılır ve kuru olarak karıştırılır. Bu şekilde hazırlanan agrega içerisine bir çukur açılır ve agrega ağırlığına göre karışımın içerisine konulması gereken asfalt miktarı açılan çukura ilave edilir.

5. Asfalt çimentosunun agrega içerisinde üniform bir şekilde dağılmasını sağlamak maksadıyla karıştırma işleminin mekanik bir karıştırıcı ile veya kürek kullanarak elle mümkün olduğu kadar çabuk ve iyi bir şekilde yapılması gerekir.

6. Karışım, kalıba boşaltılır ve ısıtılmış bir spatula ile iç kısımlarından 10 kez, çevresinden 15 kez çabukça darbelenerek sıkıca yerleştirilir. Sonra 45.7cm (18 inch) yükseklikten serbest düşüş yapan sıkıştırma tokmağı ile numunenin ön ve arka yüzüne dizayn trafik sınırlamasına göre belirlenen sayıda darbe uygulanarak sıkıştırma yapılır.

7. Sıkıştırılan numuneler numaralandırılır ve kalıpla birlikte soğumaya bırakılır. Daha çabuk bir soğutma istendiğinde masa vantilatörü kullanılabilir.



8. Numune kalıptan kriko ile çıkarılır ve düzgün bir yüzey üzerine konulur, numuneler, normal olarak bir gece soğumaya bırakılır.

**Briketlerin yüksekliklerinin belirlenmesi;** Standart briket yüksekliği 63.5mm olup mukavemet değeri bu standart yüksekliğe göre değerlendirilir. Standart briket yüksekliğine karşılık gelen katsayı 1'dir. Yüksekliğin 63,5mm den büyük olduğu durumda bu katsayı azalır, 63.5mm den küçük olduğu durumda yükselir. Briketin ölçülen stabilitesi ile numunenin yüksekliğine bağlı katsayının çarpımı, 63,5 mm yüksekliğindeki (standart) brikete göre düzeltilmiş stabilite değerini verir. Bunun için bir setteki her briketin değişik yerlerinden üç okuma alınır ve bu okumaların ortalaması briket yüksekliği olarak Marshall deney formuna kaydedilir[38].

**Briketlerin hacimlerinin belirlenmesi;** Briketlerin önce havada sonra sudaki ağırlıkları hassas bir şekilde tartılarak belirlenir. Briketin hacmi, briketin havadaki ağırlığından sudaki ağırlığının çıkarılması ile elde edilir.

$$V = B - C$$

$$V = \text{Briketin hacmi}$$

$$B = \text{Briketin havadaki ağırlığı}$$

$$C = \text{Briketin sudaki ağırlığı}$$

**Briketlerin yoğunluk ve boşluk analizleri;** Briketin hacim özgül ağırlığı ( $D_p$ ), briketin havadaki ağırlığının hacmine oranıdır

$$D_p = \frac{A}{V}$$

$$D_p = \text{Briketin hacim özgül ağırlığı}$$

$$A = \text{Briketin havadaki ağırlığı}$$

$$V = \text{Briketin hacmi}$$

Bitüm yüzdeleri aynı olan (aynı setteki) briketlerin hacim özgül ağırlıkları arasındaki fark 0,02 den fazla olmamalıdır.

Briketin maksimum teorik özgül ağırlığı ( $D_t$ ), agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi cinsinden aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_t = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{ef}} + \frac{W_a}{G_b}}$$

$$D_t = \text{Briketin maksimum teorik özgül ağırlığı}$$

$$W_a = \text{Agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi}$$

$G_{ef}$  = Agreganın efektif özgül ağırlığı

$G_b$  = Bitümün özgül ağırlığı

Agrega tarafından absorbe edilen asfalt hacmi absorbe edilen suyun hacminden daha azdır. Bunun sonucu olarak agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Maksimum teorik özgül ağırlık (DT) deneyinin yapılmadığı durumlarda agreganın efektif özgül ağırlığı, hacim özgül ağırlık ve zahiri özgül ağırlık değerlerinin ortalaması olarak alınabilir[38].

#### **Bitüm absorpsiyonu ve efektif bitüm yüzdesi;**

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{ef} \times G_{sb}} \times G_b$$

$P_{be}$  =  $W_a - P_{ba}$

$P_{ba}$  = Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm

$G_{ef}$  = Agreganın efektif özgül ağırlığı

$G_{sb}$  = Agreganın hacim özgül ağırlığı

$G_b$  = Bitümün özgül ağırlığı

$P_{be}$  = Agreganın yüzdesi olarak efektif bitüm miktarı

$W_a$  = Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm

Efektif bitüm yüzdesi, toplam bitüm miktarının agregaların dışını kaplayan kısmıdır ve kaplama karışımının performansına etki edecek bitüm miktarıdır.

**Briketlerin VMA yüzdesi;** VMA, Agregalar arası boşluk yüzdesi, efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agrega daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

Eğer karışım kompozisyonu agrega ağırlığının % si olarak bulunmuşsa,

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \times 100$$

Karışım kompozisyonu normal bitüm yüzdesi olarak bulunmuşsa,

$$VMA = 100 - \frac{D_p \times (100 - W_b)}{G_{sb}}$$

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi

$D_p$  = Briketin hacim özgül ağırlığı

$G_{sb}$  = Agreganın hacim özgül ağırlığı

**Stabilite ve akma değerlerinin tespiti;** Stabilite/akma oranı Marshall oranı olarak tanımlanmakta, karışım rijitliğinin ve asfalt betonunun deformasyon karşısındaki direncinin bir göstergesi olmaktadır. Oran değerleri, briketlerin deformasyon direncinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Daha yüksek bir oran değeri, daha rijit bir karışım ve bundan dolayı daha dirençli bir karışım olabilmektedir. Marshall oranı, taslak olarak (BSEN 12697-34: Sıcak karışım asfaltlar için Marshall deneyi) yeniden düzenlenmiştir [9,27,28].



Şekil 3.1. Marshall stabilite aleti[51].

Aletin kelepçeleri arasına yerleştirilen numuneler basınca maruz bırakıldı. Briketlerin deforme olmasını (akmasını) sağlayan değer tespit edildi ve gerekli dönüşüm yapılarak (2,62 ile çarpılarak) stabilite değerleri "kg" cinsine çevrildi. Buradaki akma miktarı da diğer göstergedeki okundu. Bu göstergedeki her bir birim 0.001 inch'e karşılık geldiğinden gerekli dönüşüm yapılarak (0.0256 ile çarpılarak) akma değerleri "mm" cinsinden tespit edildi.

**Optimum bağlayıcı yüzdesinin belirlenmesi;** Briketlerin, yoğunluk, boşluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra,  $D_p - W_a$ ,  $V_f - W_a$ ,  $V_h - W_a$ , Stabilite-  $W_a$ , Akma-  $W_a$ , VMA-  $W_a$  grafikleri çizilerek ilk dört grafikten elde edilen bitüm yüzdesi değerlerinin ortalaması alınarak karışım dizaynının optimum bitüm yüzdesi bulunur.

$$\text{Optimum Bitüm \% 'si} = \frac{D_p \text{ için } W_a + V_f \text{ için } W_a + V_h \text{ için } W_a + \text{Stabilite için } W_a}{4}$$

formülü ile hesaplanabilir.

Bu araştırmada %4 hava boşluğunu veren bitüm yüzdesi optimum bitüm içeriği olarak belirlenmiştir. Çalışmada, şartnamelere uygun olan granülometri seçilmesinin ardından Marshall deney sıkıştırma enerjisi( Otomatik Marshall tokmağı) kullanılarak briketler üretildi.

Tespit edilen gradasyona göre hazırlanan briketlerin incelenmesinde yer alan parametreler hesaplandı. Karıştırma sıcaklığı, agregalar için 145-150 °C, bitüm için 150 °C olarak uygulandı. Bitüm, kuru agregaya ağırlılığının yüzdesi cinsinden 4-6.5 aralığında 0.5 artımla altı farklı oranda kullanıldı. Karıştırma sıcaklığına gelen asfalt çimentosu ve agreganın mikserde karıştırılması sırasında, sürekli standart ısı sağlayabilen termostatlı ısıtıcıda mikser kabı 150 °C' ye kadar ısıtıldı. Daha sonra, ısıtılmış mikser kabına önceden hazırlanmış ve istenilen sıcaklığa gelmiş agregaya kayıp olmayacak şekilde boşaltıldı. Agregaya karıştırıldı. Karıştırılan agreganın ortasına spatula ile açılan oyuğa istenilen bitüm dökülerek üzeri bir miktar agregaya ile kapatıldı[38].



Şekil 3.2. Asfalt numunesi karıştırma mikseri[51].

Mikserde (Özellikleri; HOBART, Hz:50, Hp:1/6, RPM: 1425, AMP: 1,67, Temp: 4 C AMB) karışım işlemi, karışım homojen oluncaya kadar sürdürüldükten sonra mikser kabının ısısı tekrar kontrol edilerek hazırlanan sıkıştırılmamış karışım istenilen ısıdaki kalıba döküldü. Sıkıştırma sıcaklığı 143 °C olarak uygulandı. Kalıbın iç yüzeyi 15, ortası da 10 defa şişlendi. Kalıbın altına ve üstüne filtre kağıdı konuldu. Standart

aletin sıkıştırma tokmağı 45,7cm yüksekten düşerek ön ve arka yüze 75 darbe uygulandı. Sıkıştırılan briketler bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak kumpasla üç yerinden ölçüldü. Yükseklikler kaydedildi. Havadaki ve sudaki ağırlıkları tespit edildi.

### 3.1.4 Materyal Özellikleri

#### 3.1.4.1. Agregada Özellikleri

Agregalara uygulanan deney sonuçları Tablo3.6.'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, agregaların üst yapı malzemesi olarak oldukça elverişli oldukları görülmektedir.

Tablo 3.6. Kaba ve ince agregada özellikleri

Kaba Agregada		
Özellikler	Deney Yöntemi	Sonuç
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	TS - 3694 (ASTM C - 131)	12.4
Yassılık İndeksi (%)	BS - 812 Kısım - 105	14.3
Su Absorpsiyonu (%)	TS - 3526 (ASTM C - 127)	0.8
Donma Deneyi (%)	(ASTMC-88)	1.1
İnce Agregada		
Özellikler	Deney Yöntemi	Sonuç
Plastisite indeksi	TS - 1900	(N.P.) Plastik Değil

Üç grup agregadan alınan örneklerle yapılan 15 elek analizi sonucunun oluşan dane boyutu dağılımı Tablo 3.7'de sunulmaktadır.

Tablo 3.7. Dane boyutu dağılımı

Elek Açıklığı		3/4- 1/2 % Geçen	1/2- N0:4 % Geçen	No:4- 0 % Geçen
(mm)	İnç			
19.1	3/4	100		
12.7	1/2	34.6	100	
9.52	3/8		91.1	
4.76	No:4		0.1	100
2	No:10		0.9	63.5
0.42	No:40			28.7
0.177	No:80			19.3
0.075	No:200			13.6

Üç grup agreganın dane boyutu dağılımı esas alınarak saptanan aşınma tabakası Tip-1'e uygun gradasyon veren karışım oranları; (3/4''-1/2'') grubu ağırlıkça %20, (1/2''-No:4) grubu ağırlıkça %33, (No:4-0) grubu ağırlıkça %47 şeklindedir. Tablo 3.8.'de verilen TCK Aşınma Tabakası Tip 1 Şartnamesine uygun agrega karışımı kullanılmasına karar verilmiştir. Agrega granülometrisi eğrisi Şekil 3.3.'de verilmektedir.

Tablo 3.8. Seçilen agrega gradasyonu ve bu gradasyona göre önerilen sınır değerleri

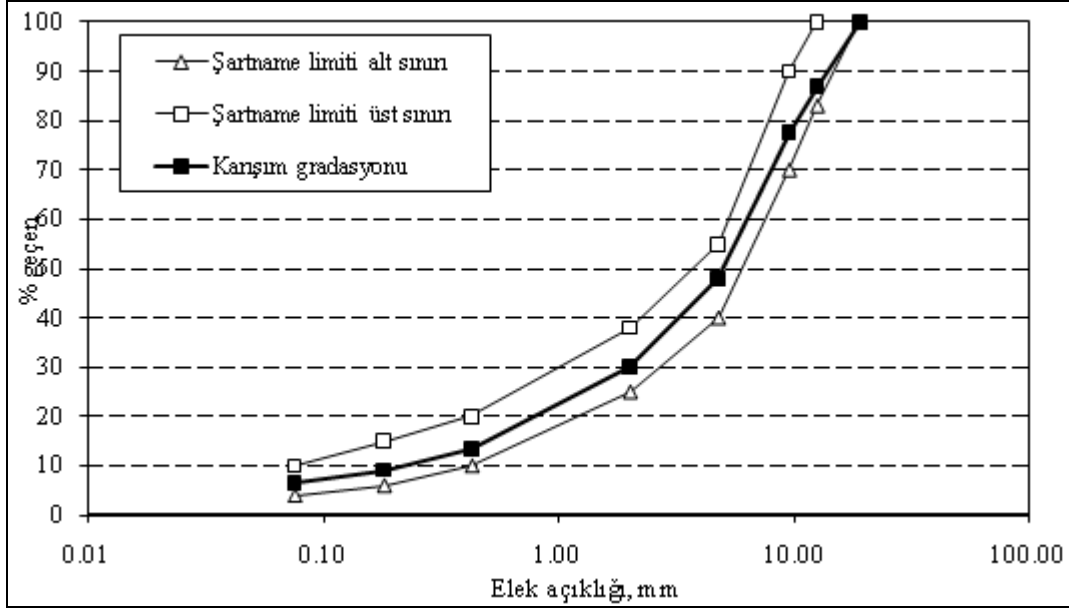
Elek Açıklığı		Karışım % Geçen	Tolerans limitine göre % Geçen	Şartname limiti
(mm)	İnç			
19.1	3/4	100	100- 100	100- 100
12.7	1/2	86.9	82.9- 90.9	83- 100
9.52	3/8	77.7	73.7- 81.7	70- 90
4.76	No:4	48	44.0- 52.0	40- 55
2.00	No:10	30.1	27.1- 33.1	25- 38
0.42	No:40	13.5	10.5- 16.5	10- 20
0.177	No:80	9.1	6.1- 12.1	6- 15
0.075	No:200	6.4	4.4-8.4	4- 10

Yukarıda verilen karışım gradasyonu esas alınarak Marshall Yöntemine göre optimum bitüm saptanmasına yönelik karışımlarda aşağıdaki dağılım kullanılmıştır.

Kaba agrega yüzdesi ( No:4 üzeri)→ 52.0

İnce agrega yüzdesi ( No:4- No:200 arası)→ 41.6

Filler yüzdesi (No:200'den geçen)→ 6.4 alınmıştır.



Şekil 3.3. Seçilen gradasyon

Şekil 3.3.'de belirtilen gradasyona uygun olarak hazırlanan agrega karışımlarının kaba ince ve filler olmak üzere yapılan özgül ağırlık deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.9'de verilmiştir.

Tablo 3.9. Kaba ve ince agrega özgül ağırlıkları

	Kaba	İnce
Hacim Özgül Ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	2.723	2.703
Zahiri Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.782	2.800

Filler Özgül Ağırlığı ise 2.885 gr/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

### 3.1.4.2. Bitümlü Bağlayıcı Özellikleri

Çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcı Kırıkkale Rafinerisi kaynaklı 65 penetrasyonlu asfalt çimentosudur. Asfalt çimentosu Polat İnşaat Araklı Şantiyesinden temin edilmiştir.

Tablo 3.10. Bitümlü bağlayıcı (AC 65) üzerinde yapılan deneyler ve sonuçları

Bitümlü Bağlayıcı Deney ve Sonuçları	
Penetrasyon, 25°C, 100 gr, 5 s (1/10 mm)	65
Birim Hacim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1.027
Parlama Noktası (°C)	210
Düktilite, 25 °C, 5 cm/min	+100
Yumuşama Noktası (°C)	52

### 3.1.4.3. Karışım Özellikleri

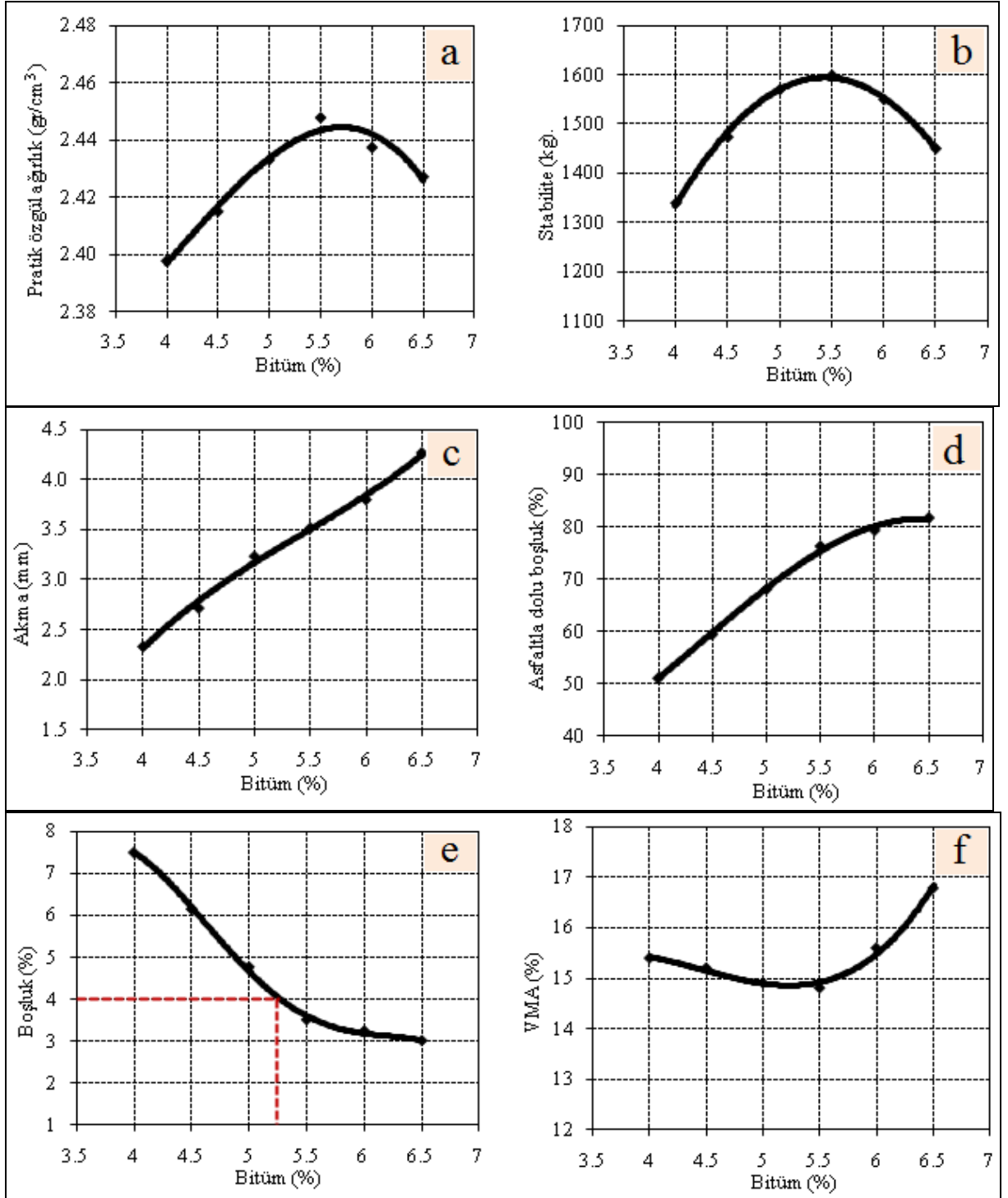
Özellikleri belirlenen asfalt çimentosu ve agregası granülometrisi ile Marshall Karışımı Tasarım Tekniği çerçevesinde briketler hazırlandı. Hazırlanan briketlerde asfalt çimentosu, kuru granül agregası ağırlığının yüzdesi olarak 4.0-4.5-5.0-5.5-6.0-6.5 değerlerinde altı farklı oranda olmak üzere her asfalt çimentosu yüzdesinden 3 adet briket üretildi. Sıkıştırma işlemi briketlerin ön ve arka yüzlerine 75 darbe olarak uygulandı. Karıştırma, 145°C sıcaklıkta yapıldı. Briketlerin alt ve üst kısımlarına filtre kağıdı konuldu. İşlem sonucunda briketler soğumaya bırakıldı. Yeterli soğuma sağlandıktan sonra kalıplarından çıkarıldı ve özellikleri tespit edilerek Tablo 3.11'de sunulmuştur.



Tablo 3.11. Aşınma dizaynı Marshall deneyi sonuçları

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm3)	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %	Briket Yüksekliği (mm)				Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilmiş faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kg)
	Wa	Wb	Wk	A	C	B	B-C	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf	H1	H2	H3	ORT				
1	4.00	3.85	141	1196.0	703.7	1202.0	498.3	2.400	2.592	7.49	15.4	51.2	64.1	64.0	64.1	64.07	2.20	1365	0.985	1345
2	4.00	3.85	140	1196.1	703.3	1202.3	499.0	2.397					64.8	64.9	64.9	64.87	2.40	1380	0.965	1332
3	4.00	3.85	141	1195.9	702.7	1201.8	499.1	2.396					64.3	64.1	64.7	64.37	2.40	1370	0.978	1340
								<b>2.398</b>									<b>2.33</b>			<b>1339</b>
4	4.50	4.31	142	1201.8	709.1	1206.7	497.6	2.415	2.573	6.14	15.2	59.5	64.0	64.1	64.0	64.03	2.80	1490	0.988	1472
5	4.50	4.31	141	1201.7	708.6	1206.8	498.2	2.412					64.3	64.1	64.2	64.20	2.75	1500	0.983	1475
6	4.50	4.31	140	1201.5	709.5	1206.4	496.9	2.418					63.9	64.0	63.9	63.93	2.60	1490	0.990	1475
								<b>2.415</b>									<b>2.72</b>			<b>1474</b>
7	5.00	4.76	140	1207.4	713.9	1209.8	495.9	2.435	2.555	4.76	14.9	68.1	63.7	63.7	63.6	63.67	3.20	1580	0.995	1572
8	5.00	4.76	140	1207.3	713.5	1209.7	496.2	2.433					63.5	63.6	63.6	63.57	3.30	1570	0.998	1567
9	5.00	4.76	141	1207.5	713.0	1209.5	496.5	2.432					63.5	63.4	63.4	63.43	3.20	1570	1.003	1575
								<b>2.433</b>									<b>3.23</b>			<b>1571</b>
10	5.50	5.21	142	1213.1	719.1	1214.2	495.1	2.450	2.537	3.50	14.8	76.3	63.1	63.0	63.1	63.07	3.40	1590	1.010	1606
11	5.50	5.21	140	1213.2	718.2	1214.4	496.2	2.445					63.3	63.2	63.2	63.23	3.60	1585	1.008	1598
12	5.50	5.21	141	1213.3	718.7	1214.1	495.4	2.449					63.3	63.2	63.3	63.27	3.55	1590	1.005	1598
								<b>2.448</b>									<b>3.52</b>			<b>1601</b>
13	6.00	5.66	141	1218.8	719.9	1220.0	500.1	2.437	2.519	3.23	15.6	79.3	63.1	63.2	63.2	63.17	3.90	1540	1.008	1552
14	6.00	5.66	140	1219.0	721.1	1221.1	500.0	2.438					62.9	62.8	62.8	62.83	3.80	1525	1.018	1552
15	6.00	5.66	140	1218.9	720.6	1220.6	500.0	2.438					63.0	62.9	62.9	62.93	3.70	1525	1.015	1548
								<b>2.438</b>									<b>3.80</b>			<b>1551</b>
16	6.50	6.1	140	1224.1	719.9	1225.5	505.6	2.421	2.502	3.0	16.3	81.7	62.4	62.3	62.3	62.33	4.20	1410	1.030	1452
17	6.50	6.1	142	1224.0	721.4	1225.1	503.7	2.430					63.1	63.0	63.0	63.03	4.30	1430	1.013	1449
18	6.50	6.1	140	1223.9	720.8	1224.3	503.5	2.431					62.1	62.1	62.2	62.13	4.30	1400	1.035	1449
								<b>2.427</b>									<b>4.27</b>			<b>1450</b>

Saptanan karışım gradasyonu ve Marshall yöntemi ile briketlerin yoğunluk, boşluk ve stabilite analizleri yapıldıktan sonra, Tablo 3.11.'den yararlanarak hazırlanan Dp- Wa, Vf- Wa, Vh-Wa, Stabilite- Wa, Akma- Wa, VMA- Wa grafikleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. a) Pratik özgül ağırlık-bitüm yüzdesi grafiği, b) Stabilite-bitüm yüzdesi grafiği, c) Akma-bitüm yüzdesi grafiği, d) Asfaltla dolu boşluk yüzdesi-bitüm yüzdesi grafiği, e) Boşluk yüzdesi-bitüm yüzdesi grafiği, f) VMA yüzdesi-bitüm yüzdesi grafiği.

Yapılan dizaynda bitüm yüzdesini bulmak için oluşturulan Boşluk yüzdesi-Bitüm yüzdesi grafiğinde, %4 boşluk miktarını veren bitüm içeriği optimum bitüm yüzdesi olarak alınmış ve 5.25 olarak belirlenmiştir.

Elde edilen optimum bitüm miktarı ve diğer deney sonuçları Tablo 3.12’de özetlenmiştir.

Tablo 3.12. Optimum bitüm miktarı ve karşılık gelen parametreler

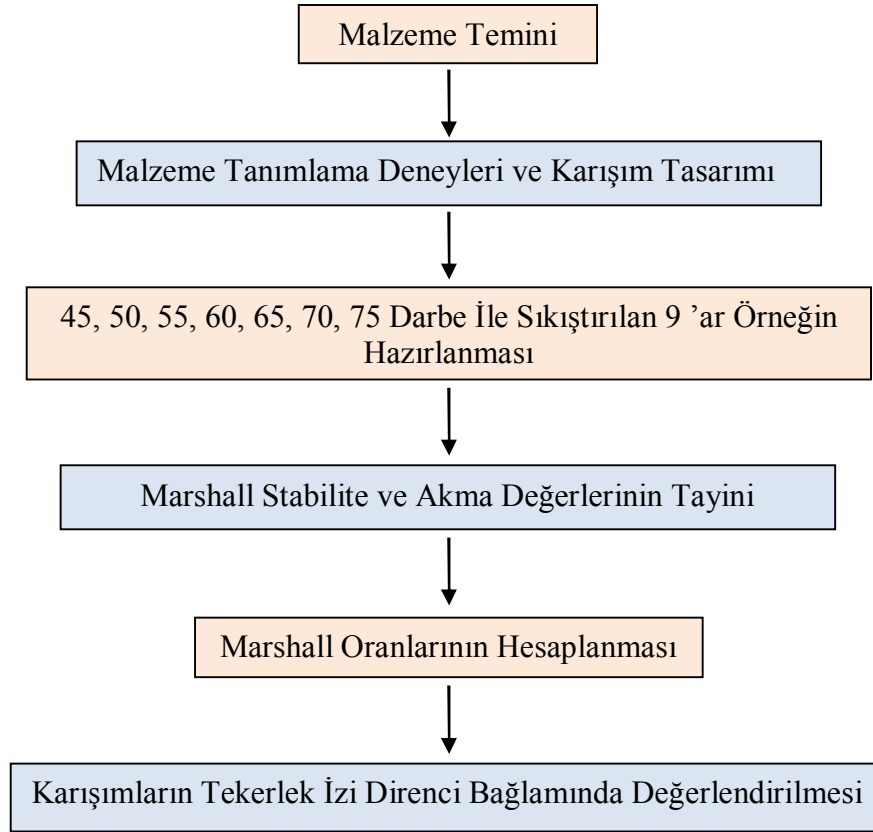
Optimum bitüm miktarı	5.25
Stabilite	1570
Pratik yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2.438
Boşluk yüzdesi (%)	4
Asfalt dolu boşluk yüzdesi (%)	71.5
Akma (mm)	3.3
VMA (mm)	14.8

### 3.2. Yöntem

Bu araştırmanın amacı değişik sıkıştırma enerjilerinde (45, 50, 55, 60, 65, 70, 75) Marshall oranının değişimlerini araştırmak ve Marshall oranı eğrisel gelişim biçimine bağlı olarak tekerlek izi bağlamında en etkili sıkıştırma enerjisini belirlemektir.

Yukarıda verilen amaca ulaşmak için önceki bölümde özellikleri verilen agrega ve bitüm kullanılarak Marshall tokmağı ile değişik sıkıştırma enerjilerinde (45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 darbe) sıkıştırılan yedi farklı karışım hazırlandı. Her karışım türünden dokuzar briket üretildi. Özgül ağırlıkları arasında %20 den büyük fark olan briketler elenerek yerlerine yenileri hazırlandı. Üretilen briketlerin görüntüleri Şekil 3.3’te, briket özellikleride Tablo 3.14- Tablo 3.20’de verilmiştir. Daha sonra hazırlanan örneklerle Marshall stabilite deneyi yapılarak akma ve stabilite değerleri bulunmuştur. Değişik sıkıştırma enerjileri ile hazırlanan örneklerin Marshall oranı değerleride hesaplanarak, yedi karışım bu üç parametre üzerinden değerlendirilmiştir. Araştırmanın deneysel yöntemi Tablo 3.13’de gösterilmiştir.

Tablo 3.13. Çalışmada izlenen yöntem.



Farklı darbe sayılarıyla sıkıştırılmış briketler oluşturulmuş, karakteristik değerlerinin tespitine yönelik yapılan deneyler neticesinde elde edilen veriler aşağıda belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Farklı sıkıştırılmalar sonucu oluşturulan briketler

Tablo 3.14. Kırkbeş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doymun Yüzey Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb	Wk	ORT	A	C	B	B-C	Dp	Dt	Vh	VMA	Vf
1	5.25	4.99	143	63.0	1168.5	676.6	1170.3	493.7	2.367	2.546	7.04	17.4	59.67
2	5.25	4.99	143	62.0	1158.5	670.4	1160.4	490.0	2.364		7.14	17.5	59.30
3	5.25	4.99	143	61.6	1153.2	667.3	1155.5	488.2	2.362		7.22	17.6	59.00
4	5.25	4.99	143	62.8	1165.9	673.6	1167.7	494.1	2.360		7.32	17.7	58.64
5	5.25	4.99	143	62.3	1160.5	673.3	1163.1	489.8	2.369		6.94	17.4	60.03
6	5.25	4.99	143	63.2	1169.3	676.1	1172.3	496.2	2.357		7.44	17.8	58.21
7	5.25	4.99	143	62.0	1157.1	667.6	1159.4	491.8	2.35		7.59	17.9	57.69
8	5.25	4.99	143	62.4	1163.8	674.2	1167.0	492.8	2.36		7.24	17.6	58.92
9	5.25	4.99	143	63.1	1169.4	676.6	1171.1	494.5	2.36		7.12	17.5	59.38

Tablo 3.15. Elli darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket Yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Yüze Yüze Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb											
1	5.25	4.99	143	64.03	1168.6	680.2	1171.8	491.6	2.377	2.546	6.63	17.1	61.19
2	5.25	4.99	143	63.63	1162.6	674.3	1164.2	489.9	2.373		6.79	17.2	60.59
3	5.25	4.99	143	63.90	1164.1	675.9	1166.7	490.8	2.372		6.84	17.3	60.40
4	5.25	4.99	143	63.50	1163.9	676.3	1165.5	489.2	2.379		6.55	17.0	61.50
5	5.25	4.99	143	63.90	1168.7	678.6	1171.3	492.7	2.372		6.83	17.3	60.43
6	5.25	4.99	143	64.10	1176.6	681.9	1178.8	496.9	2.368		7.00	17.4	59.82
7	5.25	4.99	143	63.00	1165.2	675.8	1167.0	491.2	2.372		6.83	17.3	60.44
8	5.25	4.99	143	62.60	1162.2	673.1	1164.3	491.2	2.366		7.07	17.5	59.55
9	5.25	4.99	143	62.00	1160.1	672.2	1161.7	489.5	2.370		6.91	17.3	60.12

Tablo 3.16. Elli beş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket Yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun Yüze Yüze Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb											
1	5.25	4.99	143	63.37	1162.5	676.0	1164.7	488.7	2.379	2.546	6.57	17.0	61.43
2	5.25	4.99	143	63.57	1165.8	677.3	1168.7	491.4	2.372		6.82	17.3	60.48
3	5.25	4.99	143	63.03	1160.0	675.2	1162.2	487.0	2.382		6.44	16.9	61.92
4	5.25	4.99	143	63.97	1166.2	680.9	1169.7	488.8	2.386		6.29	16.8	62.52
5	5.25	4.99	143	62.27	1160.6	677.4	1163.4	486.0	2.388		6.20	16.7	62.87
6	5.25	4.99	143	61.53	1154.9	671.8	1158.0	486.2	2.375		6.70	17.2	60.92
7	5.25	4.99	143	61.77	1162.8	677.8	1165.6	487.8	2.384		6.37	16.9	62.20
8	5.25	4.99	143	62.07	1160.7	675.5	1163.6	488.1	2.378		6.60	17.1	61.32
9	5.25	4.99	143	63.00	1164.5	679.4	1167.3	487.9	2.387		6.25	16.8	62.67

Tablo 3.17. Altmış darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket Yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb											
1	5.25	4.99	143	62.23	1152.7	670.4	1154.3	483.9	2.382	2.546	6.44	16.9	61.94
2	5.25	4.99	143	63.67	1171.8	682.6	1173.5	490.9	2.387		6.24	16.7	62.71
3	5.25	4.99	143	63.37	1168.6	681.4	1170.4	489.0	2.390		6.14	16.6	63.14
4	5.25	4.99	143	62.53	1161.7	676.3	1163.8	487.5	2.383		6.40	16.9	62.08
5	5.25	4.99	143	63.03	1158.5	674.7	1160.2	485.5	2.386		6.28	16.8	62.58
6	5.25	4.99	143	63.57	1169.3	683.5	1171.7	488.2	2.395		5.93	16.5	64.00
7	5.25	4.99	143	63.37	1168.7	680.7	1170.9	490.2	2.384		6.36	16.8	62.26
8	5.25	4.99	143	62.63	1158.7	675.4	1160.6	485.2	2.388		6.20	16.7	62.87
9	5.25	4.99	143	62.47	1157.8	676.2	1159.8	483.6	2.394		5.97	16.5	63.84

Tablo 3.18. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket Yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb											
1	5.25	4.99	143	63.27	1171.2	683.8	1173.4	489.6	2.392	2.546	6.04	16.6	63.52
2	5.25	4.99	143	64.37	1174.3	687.0	1176.5	489.5	2.399		5.77	16.3	64.63
3	5.25	4.99	143	64.67	1177.6	687.9	1178.2	490.3	2.402		5.66	16.2	65.10
4	5.25	4.99	143	62.17	1162.3	677.5	1163.8	486.3	2.390		6.12	16.6	63.19
5	5.25	4.99	143	61.67	1158.7	677.1	1160.3	483.2	2.398		5.81	16.4	64.46
6	5.25	4.99	143	62.60	1165.4	681.9	1166.7	484.8	2.404		5.58	16.2	65.45
7	5.25	4.99	143	61.47	1155.6	676.1	1157.4	481.3	2.401		5.70	16.3	64.96
8	5.25	4.99	143	62.27	1162.2	678.4	1164.1	485.7	2.393		6.02	16.5	63.63
9	5.25	4.99	143	61.93	1159.9	678.0	1162.5	484.5	2.394		5.97	16.5	63.82

Tablo 3. 19. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket Yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb											
1	5.25	4.99	143	63.30	1173.6	686.6	1175.2	488.6	2.402	2.546	5.66	16.2	65.13
2	5.25	4.99	143	63.57	1168.8	685.1	1170.3	485.2	2.409		5.38	16.0	66.30
3	5.25	4.99	143	63.50	1167.2	685.2	1168.9	483.7	2.413		5.22	15.8	67.03
4	5.25	4.99	143	63.03	1162.4	680.7	1161.6	480.9	2.417		5.06	15.7	67.75
5	5.25	4.99	143	63.03	1157.5	677.7	1158.8	481.1	2.406		5.50	16.1	65.80
6	5.25	4.99	143	63.23	1170.2	686.8	1172.4	485.6	2.410		5.35	15.9	66.46
7	5.25	4.99	143	63.07	1163.7	681.4	1165.7	484.3	2.403		5.62	16.2	65.27
8	5.25	4.99	143	62.87	1171.4	687.8	1173.5	485.7	2.412		5.27	15.9	66.80
9	5.25	4.99	143	62.23	1156.6	678.1	1158.2	480.1	2.409		5.38	16.0	66.33

Tablo 3.20. Yetmiş beş darbe ile sıkıştırılan Marshall briket değerleri

Briket No	Bitüm Yüzdesi (gr)		Sıcaklık	Briket Yüksekliği (mm)	Havadaki Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağırlık (gr)	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Pratik Özgül Ağırlık	Max Teorik Özgül Ağırlık	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %
	Wa	Wb											
1	5.25	4.99	143	61.97	1154.8	690.1	1161.3	471.2	2.451	2.546	3.74	14.5	74.24
2	5.25	4.99	143	62.07	1181.9	702.3	1185.5	483.2	2.446		3.93	14.7	73.25
3	5.25	4.99	143	62.97	1163.7	694.0	1170.3	476.3	2.443		4.04	14.8	72.69
4	5.25	4.99	143	62.27	1157.4	689.9	1161.3	471.4	2.455		3.56	14.4	75.18
5	5.25	4.99	143	62.13	1154.9	688.1	1159.7	471.6	2.449		3.81	14.6	73.85
6	5.25	4.99	143	61.93	1153.3	685.3	1154.7	469.4	2.457		3.50	14.3	75.55
7	5.25	4.99	143	61.90	1152.2	685.0	1155.5	470.5	2.449		3.81	14.6	73.85
8	5.25	4.99	143	62.47	1160.8	689.8	1162.8	473.0	2.454		3.61	14.4	74.94
9	5.25	4.99	143	62.70	1161.8	694.0	1166.3	472.3	2.460		3.38	14.2	76.18



#### 4. İRDELEME ve BULGULAR

45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 darbe ile sıkıştırılmış Marshall briketlerinin, Marshall stabilite cihazında akma ve stabilite değerleri hesaplanarak Tablo4.1.-Tablo4.7.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kırk beş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Briket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü TSE-3720	Düzeltilmiş stabilite(kg)
	ORT					
1	63.0	45	1.6	1140	1.013	1155
2	62.0		1.7	1110	1.038	1152
3	61.6		1.7	1100	1.049	1154
4	62.8		1.65	1120	1.018	1140
5	62.3		1.7	1115	1.030	1148
6	63.2		1.65	1125	1.005	1131
7	62.0		1.75	1110	1.038	1152
8	62.4		1.6	1118	1.028	1149
9	63.1		1.8	1130	1.010	1141
Ortalama			1.68	Stabilite/ kma=681,38		1147

Tablo 4.2. Elli darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Briket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kg)
	ORT					
1	64.0	50	2.4	1365	0.985	1345
2	63.6		2.4	1360	0.998	1357
3	63.9		2.45	1375	0.990	1361
4	63.5		2.50	1350	1.000	1350
5	63.9		2.4	1360	0.990	1346
6	64.1		2.40	1370	0.985	1349
7	63.0		2.30	1345	1.013	1362
8	62.6		2.35	1330	1.023	1361
9	62.0		2.4	1305	1.038	1355
Ortalama			2.4	Stabilite/ Akma= 64,19		1354

Tablo 4.3. Ellibeş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Briket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kg)
	ORT					
1	63.37	55	3.2	1498	1.003	1502
2	63.57		3.1	1490	0.998	1487
3	63.03		3.0	1495	1.013	1514
4	63.97		3.1	1510	0.998	1507
5	62.27		3.1	1478	1.030	1522
6	61.53		3.0	1445	1.053	1522
7	61.77		3.2	1455	1.043	1518
8	62.07		3.2	1460	1.035	1511
9	63.00		3.3	1490	1.013	1509
Ortalama			3.	Stabilite/ Akma= 82.01		1510

Tablo 4.4. Altmış darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Briket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite(kg)
	ORT					
1	62.23	60	3.9	1620	1.033	1673
2	63.67		3.8	1675	0.995	1667
3	63.37		3.8	1650	1.003	1655
4	62.53		3.7	1648	1.025	1689
5	63.03		3.9	1652	1.013	1673
6	63.57		3.8	1665	0.998	1662
7	63.37		3.7	1658	1.003	1663
8	62.63		3.7	1644	1.023	1682
9	62.47		3.6	1640	1.025	1681
Ortalama			3.76	Stabilite/ Akma= 443.81		1671

Tablo 4.5. Altmış beş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Briket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite(kg)
	ORT					
1	63.27	65	4.5	1690	1.005	1698
2	64.37		4.4	1740	0.978	1702
3	64.67		4.4	1755	0.970	1702
4	62.17		4.5	1650	1.033	1704
5	61.67		4.6	1625	1.046	1700
6	62.60		4.3	1665	1.023	1703
7	61.47		4.4	1620	1.053	1706
8	62.27		4.5	1640	1.030	1689
9	61.93		4.5	1628	1.040	1693
Ortalama			4.45	Stabilite/ Akma= 381.50		1700

Tablo 4.6. Yetmiş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Briket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kg)
	ORT					
1	63.30	70	3.6	1620	1.005	1628
2	63.57		3.6	1635	0.998	1632
3	63.50		3.5	1630	1.000	1630
4	63.03		3.7	1610	1.013	1631
5	63.03		3.6	1615	1.013	1636
6	63.23		3.7	1620	1.008	1633
7	63.07		3.5	1610	1.010	1626
8	62.87		3.7	1615	1.015	1639
9	62.23		3.6	1585	1.033	1637
Ortalama			3.61	Stabilite/ Akma= 452.07		1632

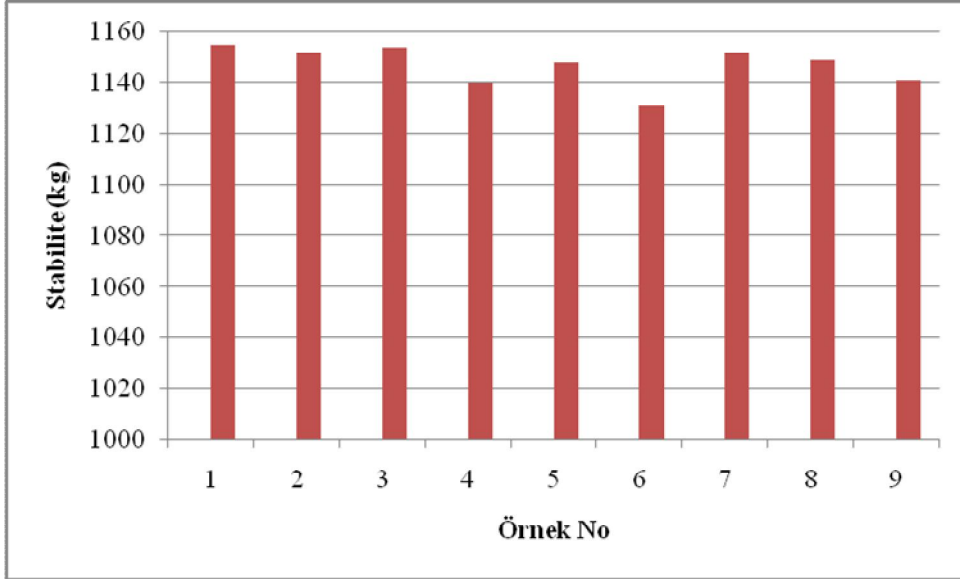
Tablo 4.7. Yetmiş beş darbe ile sıkışan briketlerin stabilite ve akma değerleri

Stabilite ve Akma Değerleri						
Briket No	Biriket Yüksekliği (mm)	Darbe Sayısı	Akma (mm)	Stabilite (kg)	Düzeltilme faktörü	Düzeltilmiş stabilite (kg)
	ORT					
1	61.97	75	3.3	1515	1.038	1573
2	62.07		3.25	1520	1.035	1573
3	62.97		3.3	1538	1.013	1558
4	62.27		3.4	1520	1.030	1566
5	62.13		3.45	1510	1.035	1563
6	61.93		3.2	1512	1.040	1572
7	61.90		3.2	1500	1.040	1560
8	62.47		3.3	1519	1.025	1557
9	62.70		3.3	1516	1.020	1546
Ortalama			3.3	Stabilite/ Akma= 473.66		1563

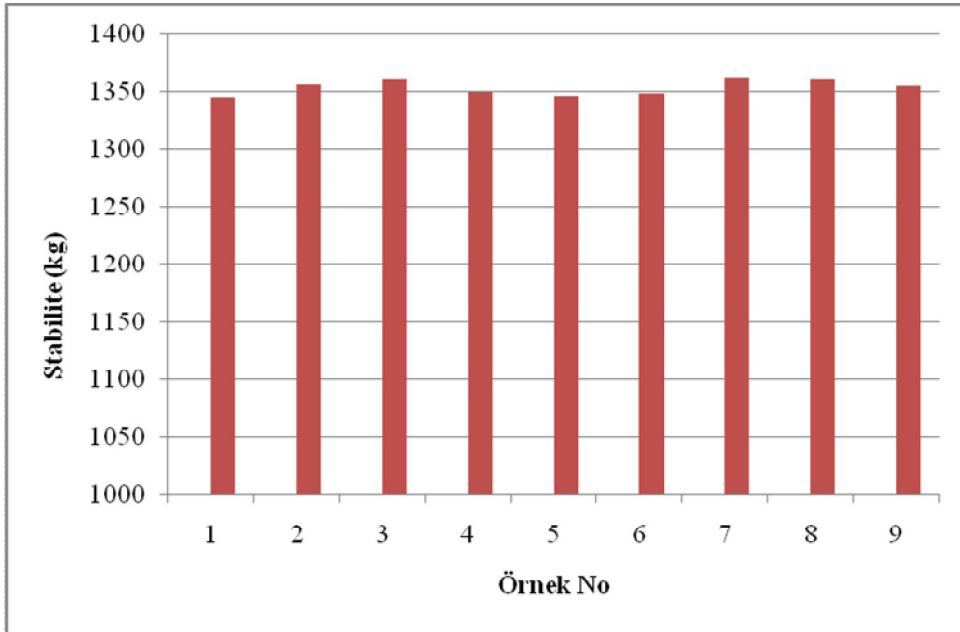
#### 4.1. Farklı Oranlarda Sıkıştırılan Briketlerin Stabilite , Akma ve Marshall Oranı Değerleri

Farklı oranda sıkıştırılmış briketlerin stabilite, akma ve stabilite/akma değerleri ölçülmüş ve Tablo4.1.-4.7.'den yararlanarak Şekil4.1.- Şekil4.24. hazırlanmıştır.

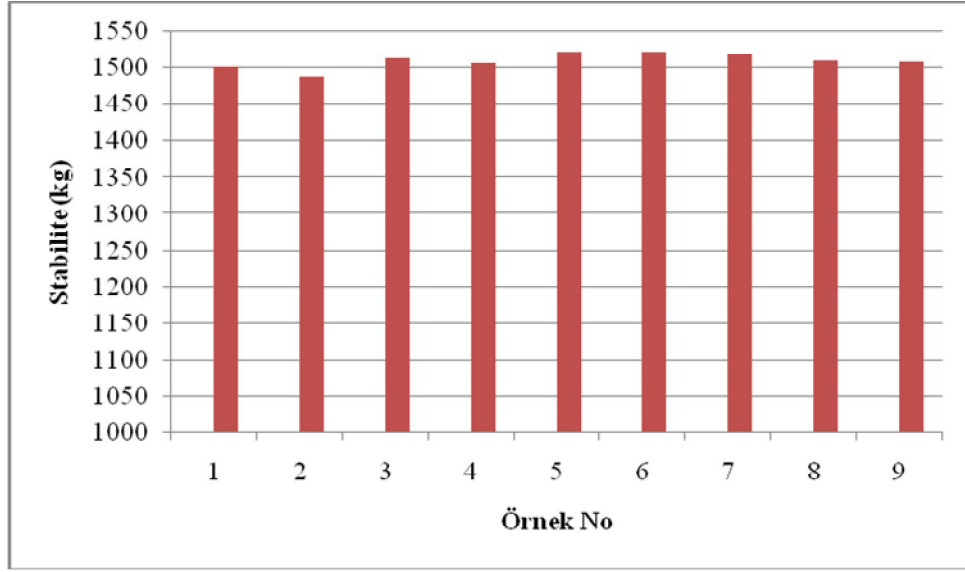
Farklı darbelerle sıkıştırma işlemine tabi tutulmuş olan briketlerin stabilite değerlerine bakıldığında altmışbeş darbe ile sıkıştırma işleminde stabilitenin en yüksek değerleri verdiği görülmektedir. Yine akma değerlerine bakıldığında altmışbeş darbe ile sıkıştırılan briketlerde akma oranının en yüksek olduğu görülmektedir. Stabilite/ Akma oranlarına bakıldığında ise en küçük değerleri altmışbeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin verdiği görülmektedir.



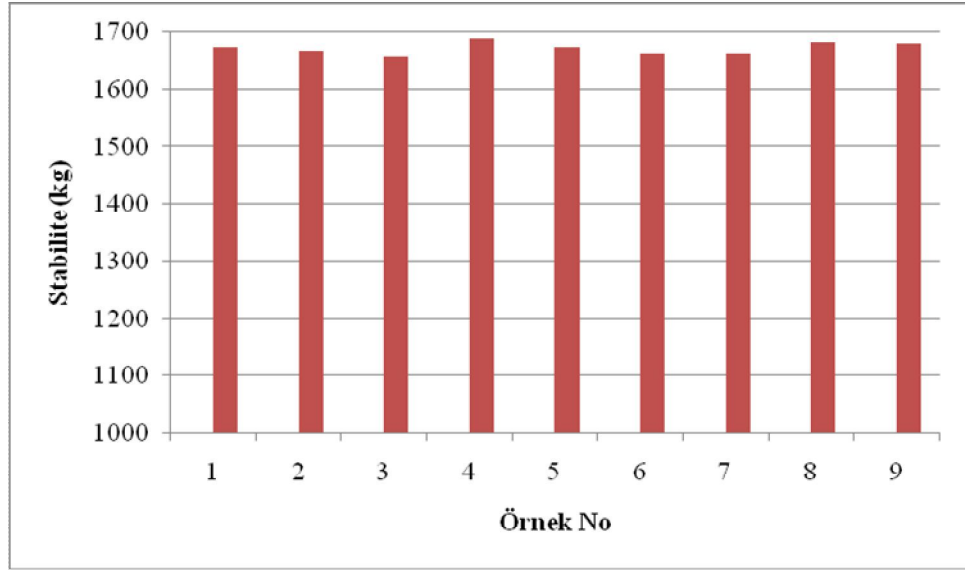
Şekil 4.1. Kırk beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri



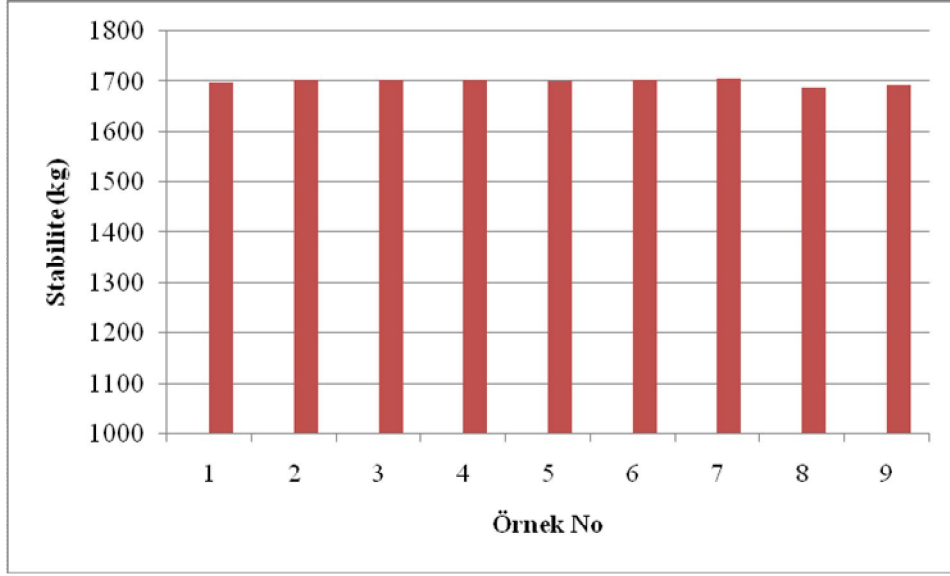
Şekil 4.2. Elli darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri



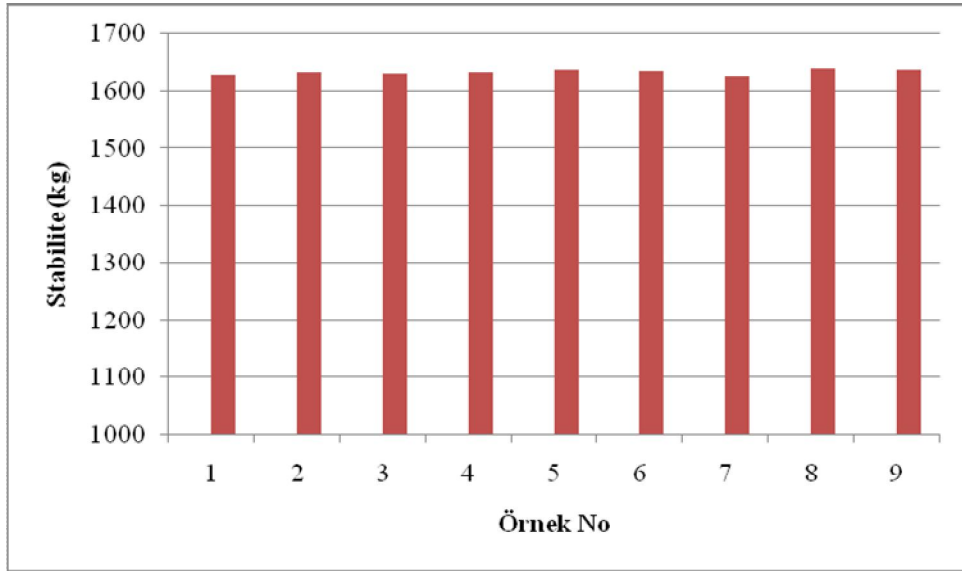
Şekil 4.3. Ellibeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri



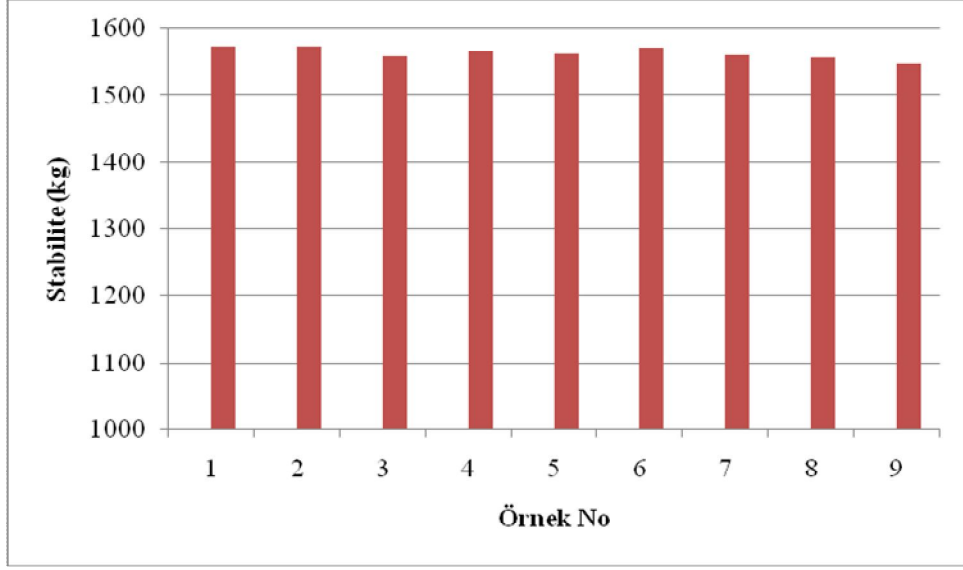
Şekil 4.4. Altmış darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.



Şekil 4.5. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.

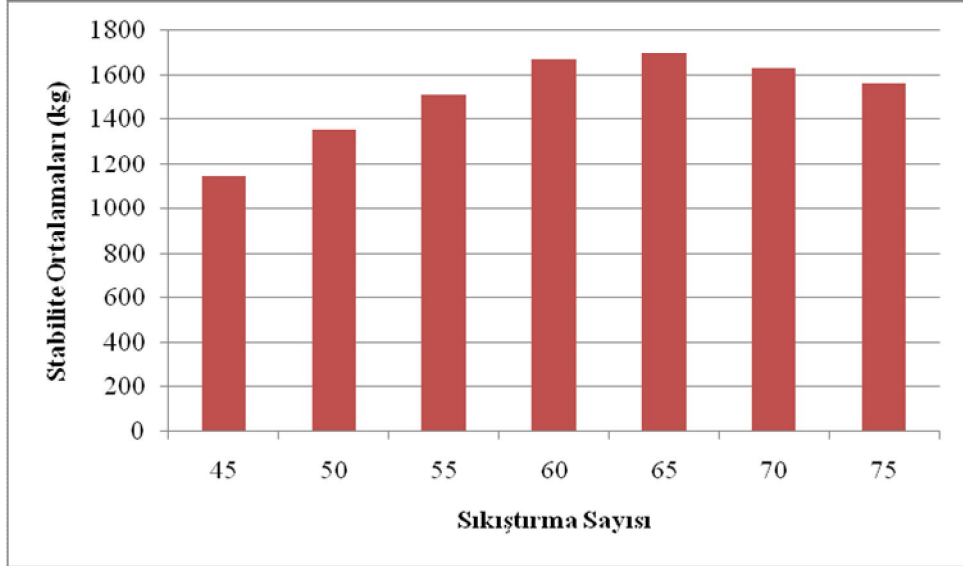


Şekil 4.6. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri



Şekil 4.7. Yetmişbeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri.

Farklı sıkıştırma enerjileriyle sıkıştırılan briketlerin stabilite değerlerinin ortalamaları okunarak Şekil 4.8. de verilmiştir.

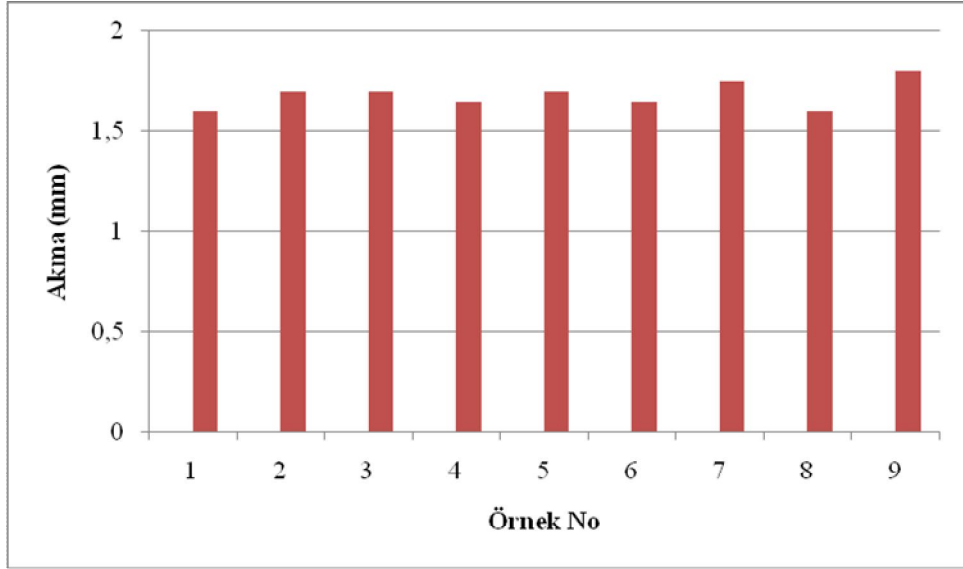


Şekil 4.8. Farklı darbelerle sıkıştırılan briketlerin stabilite değerleri ortalamaları.

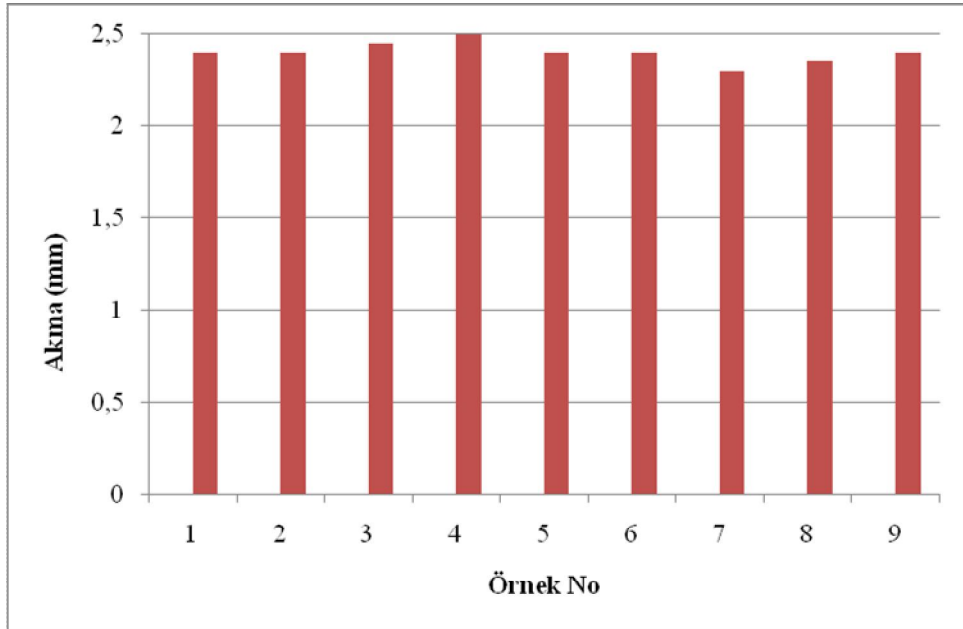
Şekil 4.8 incelendiğinde kırkbeş darbe ile sıkıştırılan karışımların minimum stabilite değerini verdiği, buna karşın altmışbeş darbe ile sıkıştırılan karışımların ise en büyük stabilite değerini verdiği görülmüştür. Bununla birlikte altmış ve yetmiş darbe ile sıkıştırılan karışımların stabilite değerlerinde altmışbeş darbe ile sıkıştırılan



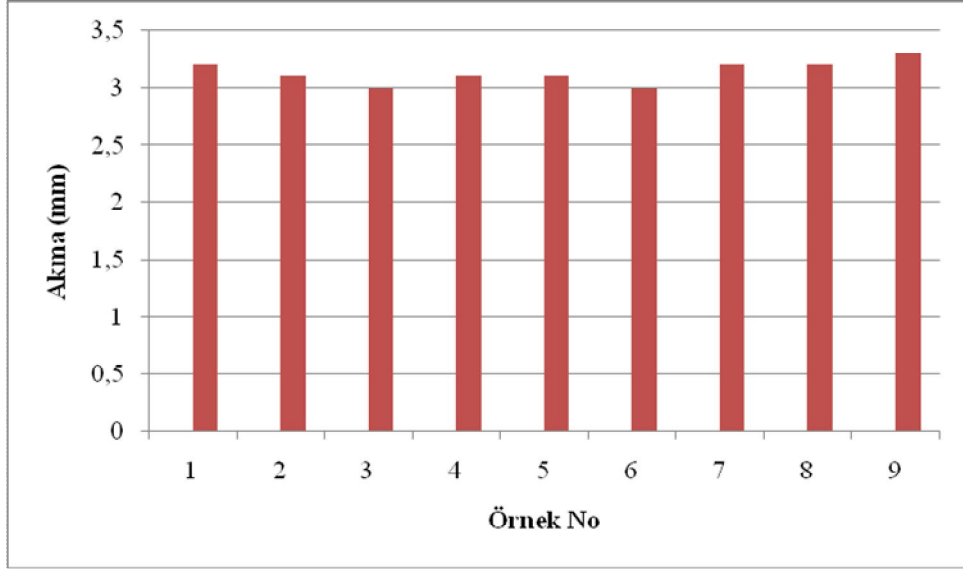
karışımların stabilite değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Stabilite değerleri ortalama olarak küçükten büyüğe doğru sıraladığında ise, 45 darbeli, 50 darbeli, 55 darbeli, 75 darbeli, 70 darbeli, 60 darbeli ve 65 darbeli karışımlar şeklinde bir sıralama ortaya çıkmaktadır.



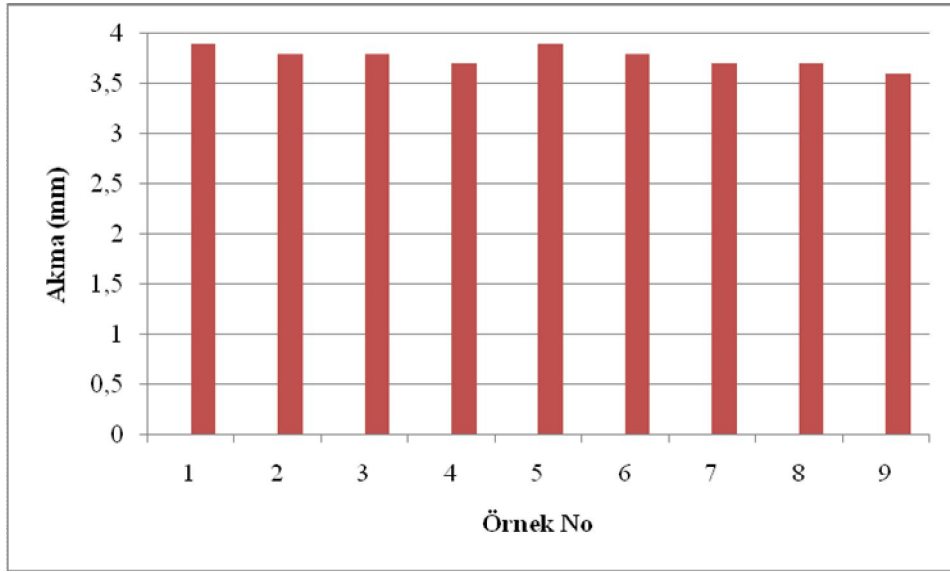
Şekil 4.9. Kırkbeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.



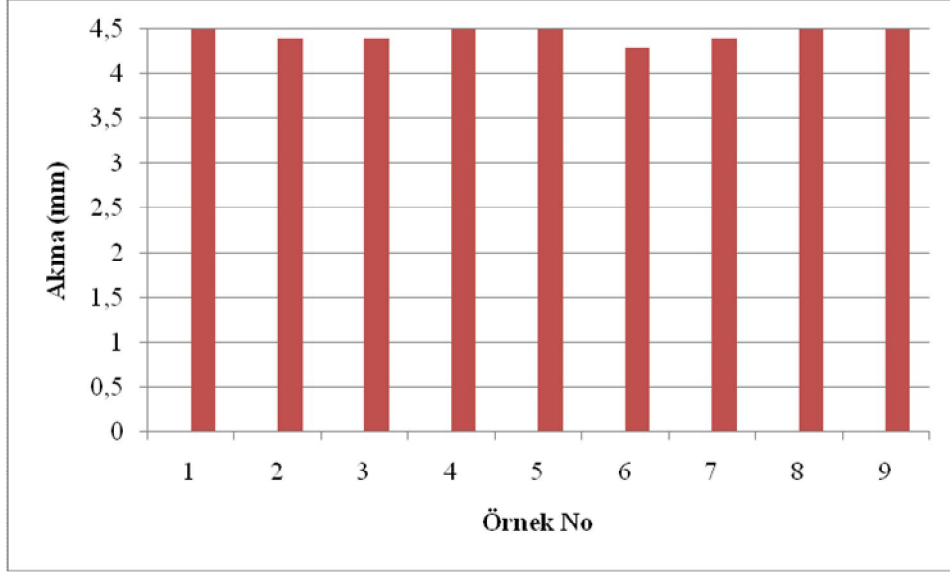
Şekil 4.10. Elli darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri



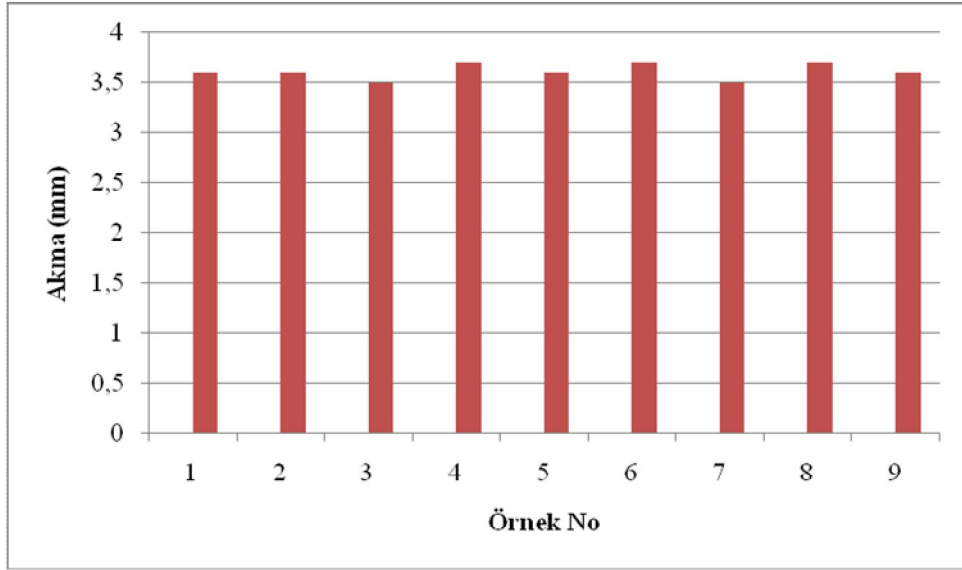
Şekil 4.11. Ellibeş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.



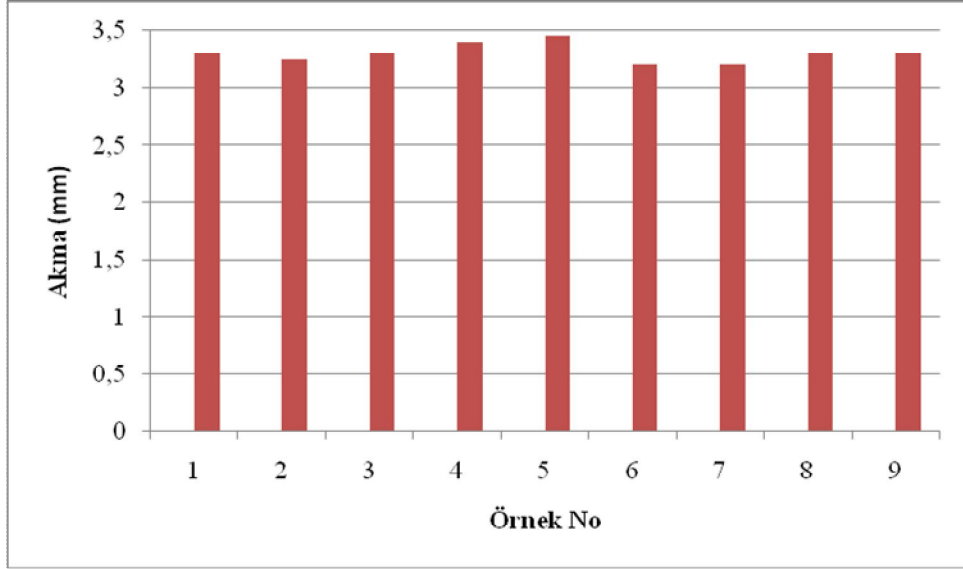
Şekil 4.12. Altmış darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.



Şekil 4.13. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.

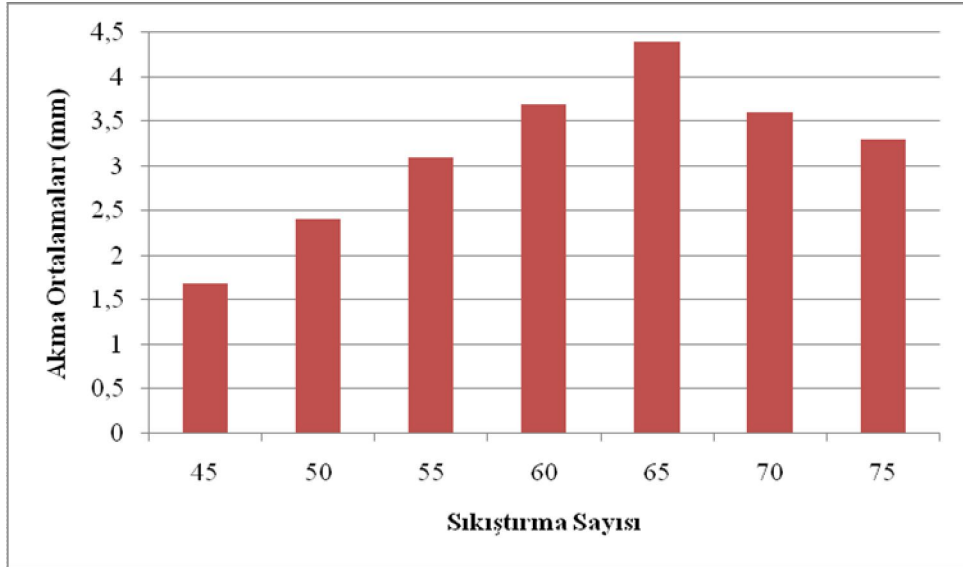


Şekil 4.14. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.



Şekil 4.15. Yetmiş beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin akma değerleri.

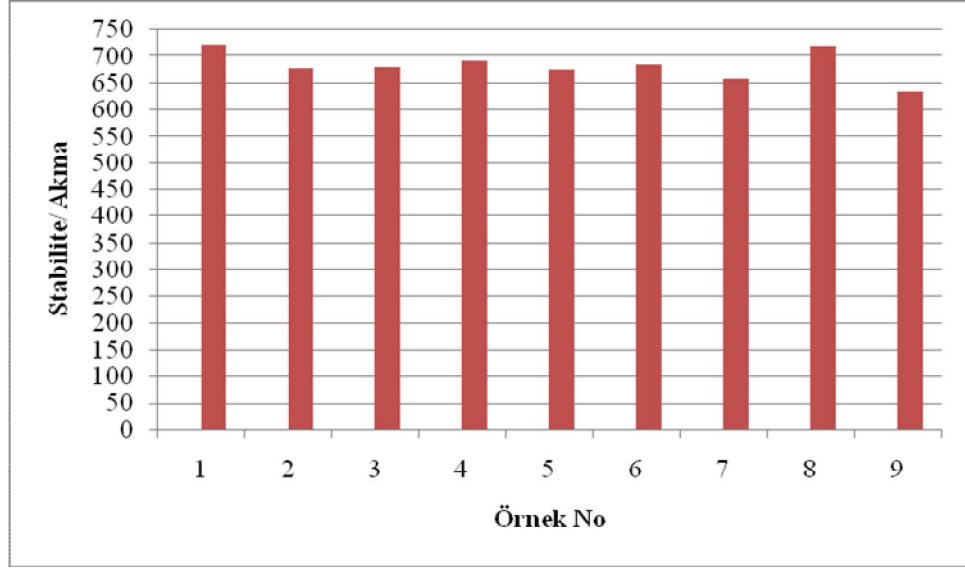
Farklı sıkıştırma enerjileriyle sıkıştırılan briketlerin akmalarının ortalamaları okunarak Şekil 4.16.' de verilmiştir.



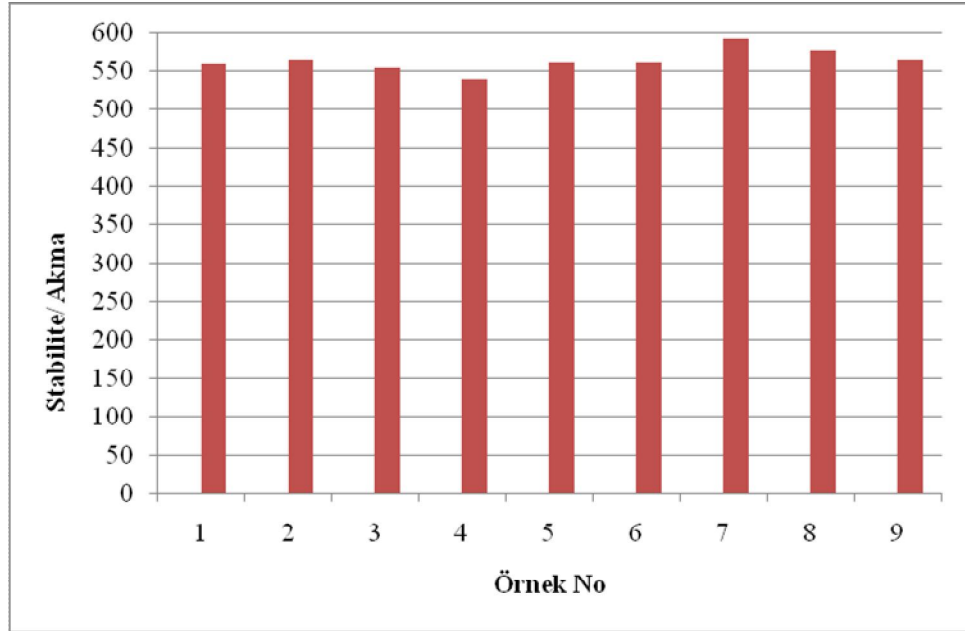
Şekil 4.16. Farklı darbelerle sıkıştırılan briketlerin akma değerleri ortalamaları.

Şekil 4.16. incelendiğinde kırkbeş darbe ile sıkıştırılan karışımların minimum akma değerini verdiği, buna karşın altmışbeş darbe ile sıkıştırılan karışımların ise en büyük akma değerini verdiği görülmüştür. Bununla birlikte altmış ve yetmiş darbe ile sıkıştırılan karışımların akma değerlerinde birbirine yakın olduğu görülmüştür. Akma değerleri ortalama olarak küçükten büyüğe doğru sıraladığında ise, 45 darbeli, 50

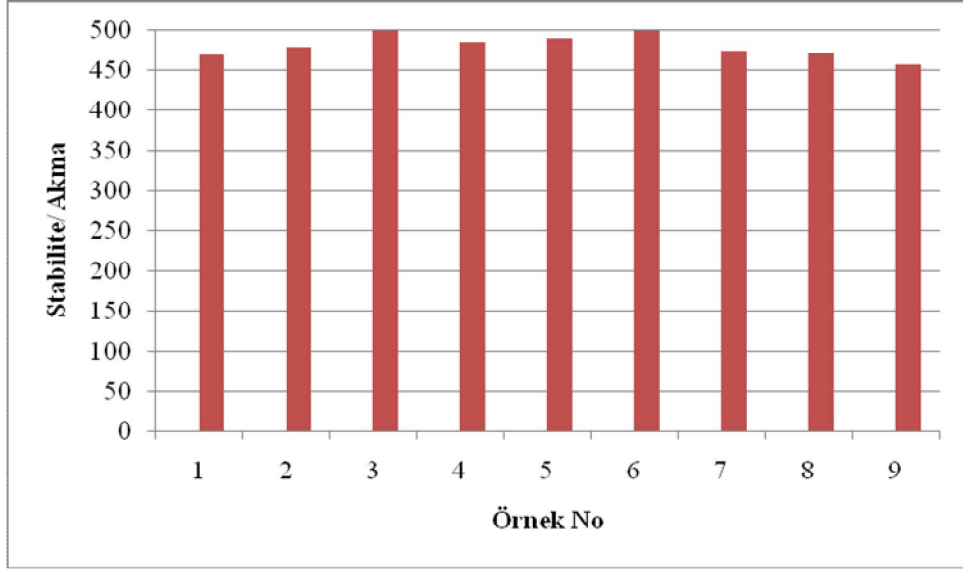
darbeli, 55 darbeli, 75 darbeli, 70 darbeli, 60 darbeli ve 65 darbeli karışımlar şeklinde bir sıralama ortaya çıkmaktadır.



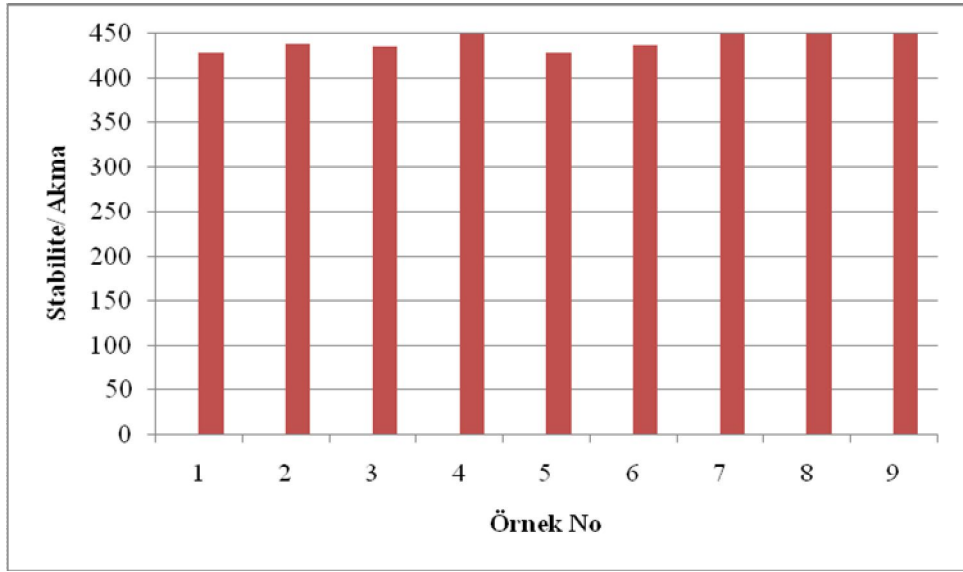
Şekil 4.17. Kırk beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.



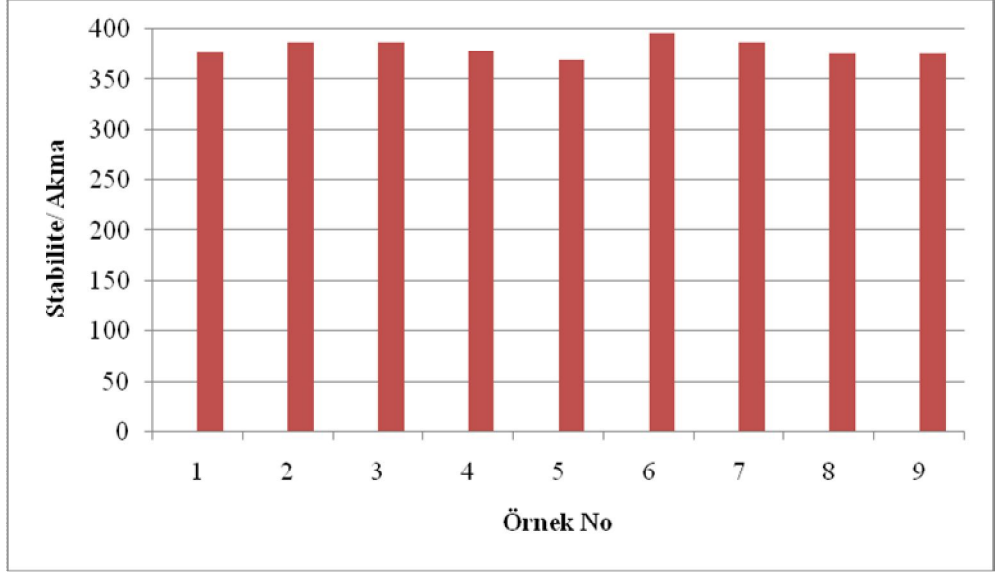
Şekil 4.18. Elli darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.



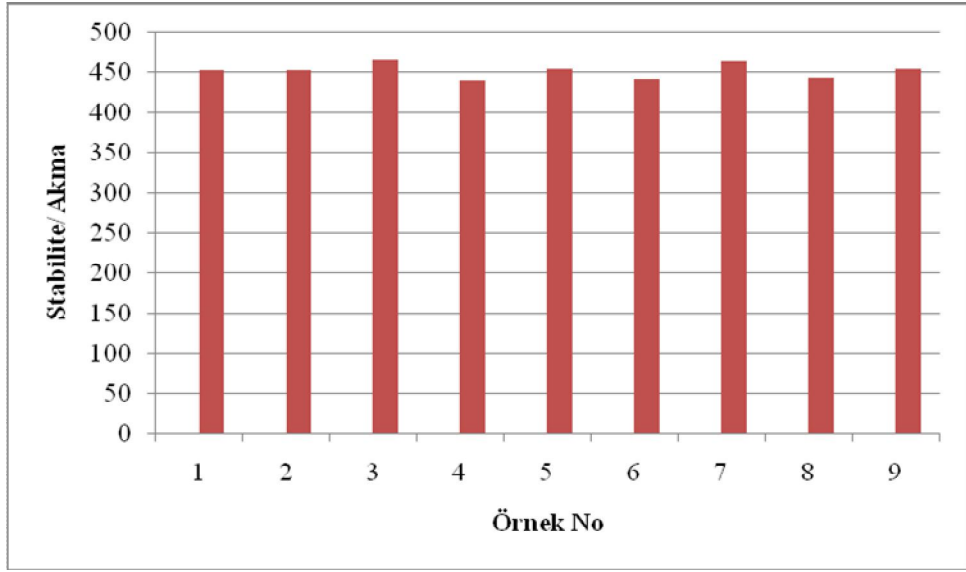
Şekil 4.19. Elli beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.



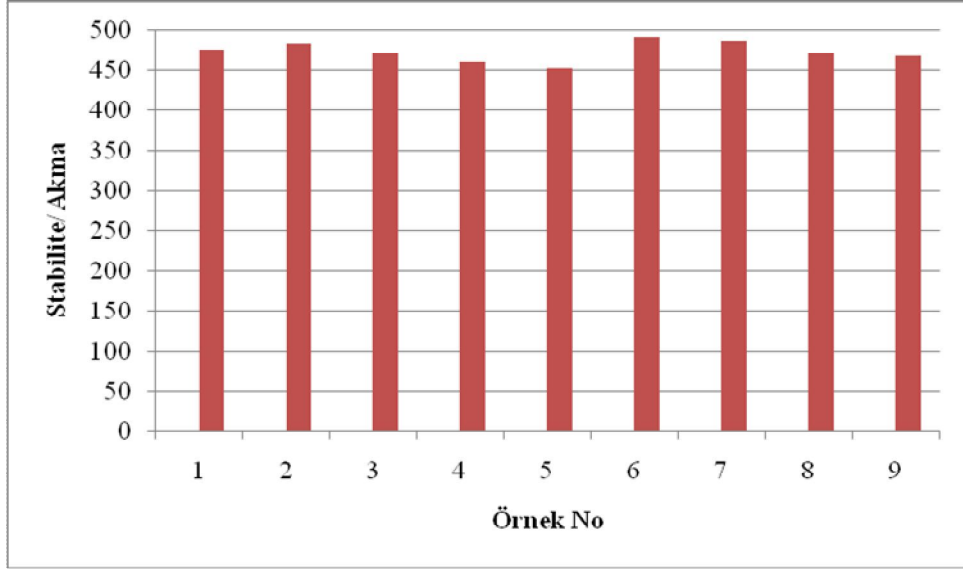
Şekil 4.20. Altmış darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.



Şekil 4.21. Altmış beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.

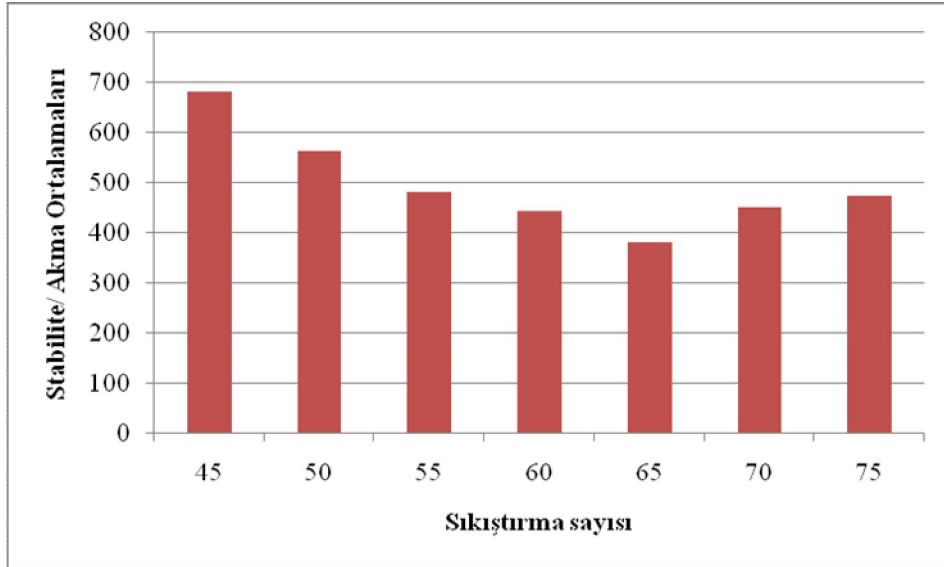


Şekil 4.22. Yetmiş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.



Şekil 4.23. Yetmiş beş darbe ile sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma değerleri.

Farklı sıkıştırma enerjileriyle sıkıştırılan briketlerin stabilite/akma ortalamaları okunarak Şekil 4.24.'de verilmiştir.



Şekil 4.24. Farklı darbelerle sıkıştırılan briketlerin stabilite/ akma ortalama değerleri.

Şekil 4.24. incelendiğinde altmışbeşbeş darbe ile sıkıştırılan karışımların minimum stabilite/akma değerini verdiği, buna karşın kırkbeş darbe ile sıkıştırılan karışımların ise en büyük stabilite/akma değerini verdiği görülmüştür. Bununla birlikte altmış ve yetmiş darbe ile sıkıştırılan karışımların stabilite/akma değerlerinde birbirine yakın olduğu görülmüştür. Aynı durum yetmişbeş ve ellibeş darbe ile sıkıştırılan



karışımlar içinde söylenebilir. Stabilite/ akma değerleri ortalama olarak küçükten büyüğe doğru sıraladığında ise, 65 darbeli, 60 darbeli, 70 darbeli, 75 darbeli, 55 darbeli, 50 darbeli ve 45 darbeli karışımlar şeklinde bir sıralama ortaya çıkmaktadır.

Marshall oranının farklı sıkıştırma enerjilerinde, tekerlek izi potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla kullanıldığında, en büyük marshall oranı değerini veren 45 darbeye sıkıştırılmış karışımlar tekerlek izine karşı en dirençli karışımlar olmuştur. 65 darbeye sıkıştırılan karışımlara kadar sıkıştırmanın artmasıyla marshall oranı da azalmaktadır. Sonra sıkıştırmayla birlikte oran da artmaktadır.

Bütün sıkıştırma enerjilerinde, akma, stabilite ve akma/stabilite değerlerinin değişim aralığı (dokuz örneğin maksimum ve minimum değerlerinin farkı) hesaplanarak Tablo 4.8’de özetlenmiştir.

Tablo 4.8. Özdeş briketler arasındaki maksimum fark.

Sıkıştırma enerjisi	Stabilite	Akma	Stabilite/akma
45	24	0.2	87.71
50	17	0.2	38.16
55	35	0.3	49.81
60	34	0.3	37.85
65	17	0.3	26.6
70	13	0.2	24.92
75	27	0.25	38.4

Tablo 4.8.’den görüldüğü üzere 55 ve 60 darbe ile sıkıştırılan karışımların stabilite değerleri arasında diğer sıkıştırma enerjilerinde sıkıştırılan karışımlara göre daha büyük farklar bulunmaktadır. 70 darbe ile sıkıştırılan 9 özdeş briketten alınan stabilite değerleri arasındaki fark ise (13) en küçük çıkmıştır. Bu anlamda stabilite deneyinde tekrarlanabilirlik baz alındığında 70 darbeye sıkıştırılan karışımlar en kararlı olmaktadır. Bu karışımları sırasıyla 50 ve 65 darbeye sıkıştırılan karışımlar, 45, 75, 60,55 darbeye sıkıştırılan karışımlar takip etmektedir. Sıkıştırma enerjisinin artmasıyla, stabilite değerleri arasındaki farkın değişmesi arasında düzgün bir ilişki kurulamamıştır.

Sıkıştırma enerjisinin değişmesiyle bulunan akma değerleri arasındaki fark ta değişmektedir. 55, 60, 65 darbe ile sıkıştırılan karışımlardaki akma değeri farkı diğerlerinden daha büyük çıktığı Tablo 4.8’den görülmüştür.

Yine Tablo 4.8.'de hesaplanan marshall oranlarındaki değişimler gösterilmiştir. Marshall oranlarındaki en küçük değişimi de yine 70 darbeye sıkıştırılan karışımlar göstermiştir. Değişim aralığı 65, 60 ve 75 darbeye sıkıştırılan karışımlar şeklinde artmaktadır. 45 darbeye sıkıştırılan karışımlarda Marshall oranındaki değişim diğer bütün karışımlara göre çok daha büyük çıkmıştır.

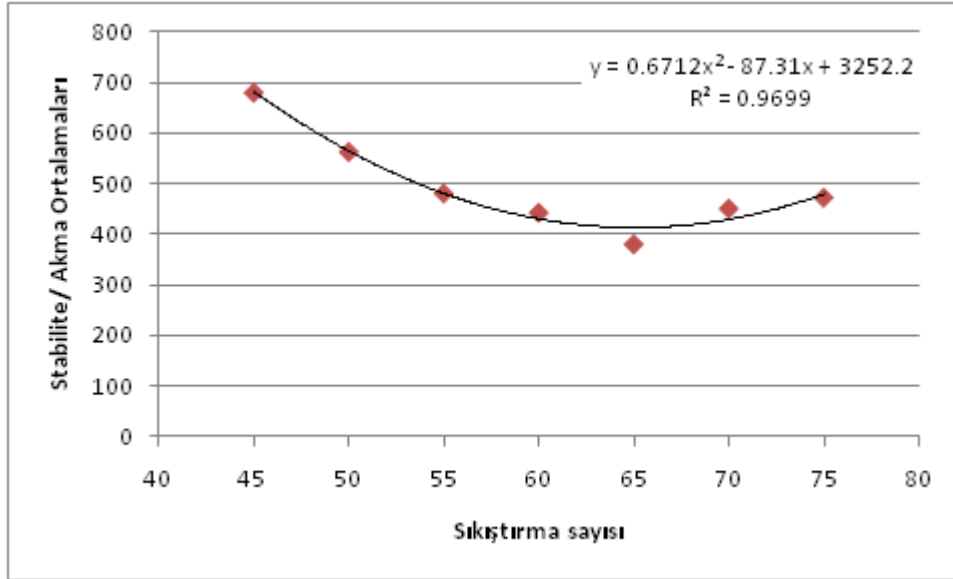
45 darbeye sıkıştırılan karışımlarda marshall oranı değeri en büyük olmakla birlikte değerler arasındaki farkta (standart sapma) en büyük olmaktadır.

Karışımların ortalama akma ve stabilite değerlerindeki artış yüzdeleri hesaplanarak Tablo 4.9' da verilmiştir.

Tablo 4.9. Karışımların ortalama akma ve stabilite değerlerindeki artış oranı

Sıkıştırma sayısı	Akma	Stabilite	Akma yüzde artışı	Stabilite yüzde artışı
45	1.68	1147		
50	2.4	1354	0.428571	0.180471
55	3.1	1510	0.291667	0.115214
60	3.7	1671	0.193548	0.106623
65	4.4	1700	0.189189	0.017355
70	3.6	1632	-0.18182	-0.04
75	3.3	1563	-0.08333	-0.04228

Araştırmada laboratuarda Marshall sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan karışımlar 45 darbeye başlayarak 75 darbeye kadar 5'er darbe artırılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan karışımların kalıcı deformasyon potansiyeli Marshall oranı ile değerlendirilmiştir. 45 darbeden başlayarak 65 darbeye kadar karışımların hem stabilite hem de akma değerleri sürekli artmıştır. Bu değerden sonra ise her ikisi birden azalmaya başlamıştır. Fakat artış oranları irdelendiğinde akmadaki artış oranının stabilitedeki artış oranından daha büyük olduğu görülmüştür. Bundan dolayı Marshall oranı (stabilite/akma) stabilitenin artmasına rağmen 65 darbeye kadar sürekli azalmıştır. 65 darbeden sonra durum tersine dönerek stabilite ve akma azalmış (akma stabiliteye göre daha büyük oranda azalmış) buna bağlı olarak ta marshall oranı da artmaya başlamıştır. Bunun sonucu olarak ta 65 darbeye sıkıştırılan karışımlar en küçük marshall oranı değerini göstermiştir.



Şekil 4.25. Marshall oranı ile sıkıştırma enerjisi ilişkisi

Şekil. 4.25’de sıkıştırma enerjisi marshall oranı ilişkisi verilmektedir. Sıkıştırma enerjisi ile Marshall oranı arasında  $Y = 0.6712x^2 - 87.31x + 3252.2$  şeklinde ikinci derece polinom olan bir bağıntı MS Excel programından hesaplanmıştır. Elde edilen bağıntı ile veriler arasında yüksek derecede korelasyonun (0.9699) olduğu görülmektedir.

Sıkıştırma; malzeme boşluk içeriğini azaltmayı, granüler iskeleti optimize etmeyi ve malzeme yoğunluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Sıkıştırma seviyesinin malzeme davranışı üzerindeki etkisi çok önemlidir. Hava boşluğunun %1 artması, kaplama ömründe %10 azalmaya neden olmaktadır. Fakat, aşırı düşük boşluk içeriği malzemedeki mekanik özelliklerde azalmaya neden olabilmektedir. Uygulamada %3’ün altında boşluk içeriği yapıda prematüre tekerlek izine yol açabilmektedir. Kaplama ömrü açısından bitümlü kaplamaların sıkıştırma seviyesi önemli bir parametredir[52].

Kaplama karışımlarının tasarımında, laboratuarda elde edilen sonuçlar ile uygulamadan alınanlar arasında önemli sayılabilecek düzeyde farklılıkların olduğu bilinmektedir. Laboratuarda, mekanik özellikler bağlamında, uygulamadan daha iyi sonuç elde edildiği, ülkemizde yaygınca kullanılan Marshall sıkıştırma yöntemi ile laboratuarda tasarlanan boşluk düzeyinin üzerinde boşluk düzeylerinin uygulama aşamasında olduğu, yeterli sıkıştırma yapılsa dahi daha yüksek boşluk düzeylerinin varlığı bilinmektedir. Kaplamanın servis ömrü boyunca, özellikle ilk servis sürecinde, daha yüksek boşluk varlığının (-en kötü boşluk kavramı- pessimum void concept) su

hasarı gelişimine ve bununla birlikte plastik deformasyonlara neden olduğu değerlendirilmektedir.

Literatürde de konuyla ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Marshall oranının karışımların tekerlek izi direncini belirlemede kullanılabileceğini belirten çalışmalar bulunmaktadır[8,9,48,49,50]. Ancak bazı araştırmacılar da polimer modifiyer içeren karışımların tekerlek izi performansını araştırdığı çalışmalarında Marshall oranının iyi bir belirleyici olmadığını ifade etmektedir [11]. Bu konuda açık bir uzlaşmanın olmadığı görülmektedir[47]. Yapılan bu çalışmada Marshall oranının farklı sıkıştırma enerjilerinde sıkıştırılan karışımların tekerlek izi direncini belirlemede kullanılamayacağı görülmüştür.

## 5. SONUÇLAR

Farklı sıkıştırma enerjilerinde (45, 50, 55, 60, 65, 70, 75) Marshall oranı değişimlerini araştırmak ve Marshall oranı eğrisel gelişim biçimine bağlı olarak tekerlek izi direnci bağlamında en etkili sıkıştırma enerjisinin belirlenmesinin amaçlandığı araştırmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Bütün sıkıştırma enerjilerinde karışımların akma, stabilite ve akma/stabilite değerleri belirlenmiştir. 45 ile 65 darbe arasında sıkıştırmanın atmasıyla akma değerinin de arttığı görülmüştür. Fakat akmadaki yüzde artış azalmaktadır. Yani azalan oranda artış söz konusudur. 65 darbeden sonra ise akma değeri azalan oranda küçülmektedir.

Stabilite değerleri de akmaya benzer olarak 65 darbeye kadar sürekli azalan oranda artmakta olup bu değerden sonra da artan oranda azalmaktadır. En büyük akma ve stabilite değerleri 65 darbeye sıkıştırılan karışımlarda sırasıyla 4.4mm ve 1700kg olarak elde edilmiştir. En küçük akma ve stabilite değerleri de 45 darbe ile sıkıştırılan karışımlarda 1.68mm ve 1147kg olarak belirlenmiştir.

Marshall oranı (akma/stabilite) 65 darbeye kadar azalan oranda azalmakta ve bu değerden sonra artan oranda artmaktadır. En büyük ve en küçük MQ değerlerini sırasıyla 45 ve 65 darbeye sıkıştırılan karışımlar vermiştir. Sıkıştırma enerjisiyle MQ arasında  $Y = 0.6712x^2 - 87.31x + 3252.2$  şeklinde bir bağıntının olduğu ve bu bağıntı ile gerçek veriler arasında  $R^2=0.9699$  derecesinde korelasyonun olduğu görülmüştür.

En istikrarlı değerler (dokuz örnekten alınan en büyük ve en küçük değerlerin farkının en küçük olduğu sıkıştırma enerjisi) stabilite için 70 darbe ile sıkıştırılan karışımlardan, akma için ise 45, 50 ve 70 darbe ile sıkıştırılan karışımlardan elde edilmiştir. Bu anlamada stabilite açısından tekrarlanabilirliğin en düşük olduğu sıkıştırma enerjisinin de 55 darbe olduğu görülmüştür.

45 darbeden başlayarak 65 darbeye kadar karışımların hem stabilite hem de akma değerleri sürekli artmıştır. Bu değerden sonra ise her ikisi birden azalmaya başlamıştır. Fakat artış oranları irdelendiğinde akmadaki artış oranının stabilitedeki artış oranından daha büyük olduğu görülmüştür. Bundan dolayı Marshall oranı (stabilite/akma) stabilitenin artmasına rağmen 65 darbeye kadar sürekli azalmıştır. 65 darbeden sonra durum tersine dönerek stabilite ve akma azalmış (akma stabiliteye göre daha büyük oranda azalmış) buna bağlı olarak ta marshall oranı da artmaya başlamıştır.

Bunun sonucu olarak ta 65 darbeye sıkıştırılan karışımlar en küçük marshall oranı değerini göstermiştir.

Marshall oranı tekerlek izi direncini belirleme amacıyla kullanıldığında, en büyük marshall oranı değerini veren 45 darbeye sıkıştırılmış karışımlar tekerlek izine karşı en dirençli, 65 darbeyle sıkıştırılan karışımlar ise en dirençsiz karışımlar olmaktadır. Literatürde de Marshall oranıyla ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Marshall oranının karışımların tekerlek izi direncini belirlemede kullanılabileceğini belirten çalışmaların [8, 48, 49, 50, 9] yanı sıra bazı araştırmacılar da iyi bir belirleyici olmadığını ifade etmektedir [11]. Bu konuda açık bir uzlaşmanın olmadığı görülmektedir[47]. Yapılan bu çalışmadan elde edilen verilerden, Marshall oranının, farklı sıkıştırma enerjilerinde sıkıştırılan karışımların tekerlek izi direncini belirlemede kullanılamayacağı kanaatine varılmıştır.

## KAYNAKLAR

1. Kuloglu, N., Effect of Astragalus on Characteristics of Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 4, November 1999, pp. 283-286.
2. Sengul, C.E., Aksoy, A., Iskender, E., Permanent deformation resistance evaluation with Marshall quotient approach, seventh international congress on advances in civil engineering, October 11-13, 2006, yildiz technical university, İstanbul, Turkey.
3. Sayın, E., Yıldırım, B., Asphalt betonu kaplamaların farklı sıcaklıklarda dayanımı, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.*, 17(3), 463-469, 2005.
4. Attaelmanan, M., Feng, C.P., Al, A. H., Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. 20 December 2010.
5. Tapkın, S., Çevik, A., Uşar, Ü., Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural Networks.
6. Haddadi, S., Ghorbel, E., Laradi, N., Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1212–1219.
7. Al, A.H., Giu, T. Y., Hameed, A.T., Starch as a modifier for asphalt paving materials. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 14–20.
8. Hınıslıoğlu, S., Agar, E., Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *J Mater Lett* 2004;58:267–71.
9. Zoorob S. E, Suparma L. B., Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *J Cem Concr Compos* 2000;22:233–242.
10. Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A. A., Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement *Waste Manag Res* August 2005 23: 322-327,
11. Tayfur, S., Ozen, H., Aksoy, A., Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 328–337.
12. Haddadi,A.H., Ameri, M., Gandomi, A.H., Mirzahosseini, M.R., Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1338–1355.

13. Borhan, M.N., Ismail, A., Rahmat, R.A., Evaluation of Palm Oil Fuel Ash (POFA) on Asphalt Mixtures. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(10): 5456-5463, 2010.
14. Çelik, O. N., Yonar, F. Ve Ceylan, S., Bitümlü Sıcak Karışımların Performansına Filler Etkisi. 7. Ulaştırma Kongresi. 19-21 Eylül 2007.
15. Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T., Asfalt Betonunda Siyah Karbonun Filler Olarak Kullanımı. İMO Teknik Dergi, 2008 4493-4507, Yazı 297.
16. Kök, B. V., Yılmaz, M., Yılmaz, M., Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği. C.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (2009)Cilt 30 Sayı 1.
17. Üstümkol, F. N., Turabi, A., Endüstriyel atık filler malzemelerin kullanılabilirliğinin araştırılması. BAÜ FBE Dergisi. Cilt:12, Sayı:1, 3-18 Temmuz 2010.
18. Sayın, E., Yıldırım, B., Asfalt Betonun Kaplamaların Farklı Sıcaklıklarda Dayanımı. Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der. (3), 463-469, 2005.
19. İskender, E., Asfalt betonunda kalıcı deformasyon probleminin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (2004).
20. Tayfur, S., Taş Mastik Asfalt (SMA) Kaplamalar için Uygun Karışımın Araştırılması ve Bir Hizmet Ömrü Modeli Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2001).
21. Van Dijck W., (1975), Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologist 38.
22. Hınıslıoğlu, S., Agar, E., Use of the waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. Materials Letters, 4640 (2003) (article in press).
23. OECD Road Transport Research, Full-scale pavement tests. Report prepared by an OECD Scientific Expert Group, Paris, (1985).
24. Traxler, R.N., Asphalt, Its Composition, properties and Uses, Reinhold Publishing Corporation, (1961), New York.
25. Lee, A.R., Adhesion In Relation To Bituminous Road materials, Journal Of The Society Of Chemical Industry, (1936), 55, 23-9T.
26. Oruç, Ş., (1997). "Torul kalker taşocağı agregalarının asfalt betonu içerisindeki performansının araştırılması", yüksek lisans tezi, Trabzon.



27. Robertus C, Mulder EA, Koole RC. SBS modified bitumen for heavy duty asphalt pavements. Second International Conference on Roads and Airfield Pavement Technology, Singapore, September (1995).
28. Little DN, Petersen JC. Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering* (2005); 207-218.
29. Claessen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P. Ve Uge, P., *Asphalt Pavement Desing- The Sheel Method*, Proceedings of the Fourt International Conference on the Structural Desing of Asphalt Pavements, Ann Arbor, 1997.
30. Verstraeten, J., *The Use of Bitumous Mixes in Road Construction and Measures Against Rutting, Fatigue and Thermal Cracking*, Contribution to the Jh's Program, 1992.
31. NCHRP Report 338, *Asphalt Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS)*, 1991
32. Habib, B. A. Ve Zahw, M. A., *A Study on Evaluation of Permanent Deformation in Hot Asphalt Concrete Mixes*, Rilem 1997.
33. Fernando, E. G., Button, J. W. Ve Crockford, W. W., *Rut Susceptibility of Large Stone Mixtures*, *Journal of Transportation Engineering*, (1997)
34. Verstraeten, J., *Bituminous Materials with A Higs Resistance to Flow Rutting*, PIARC Technical Committee on flexible roads, TC 8, Belgium, 1994, 19-20
35. Brown, S. F., *Practical Test Procedures for Mechanical Properties of Bituminous Materials*, *Proc. Inst. Of Civil Engineers Transport*, Vol.III, (1995)
36. Aren Cleven, M., *Investigation of the Properties of Carbon Fiber Modified Asphalt Mixtures*, *Master of Science in Civil Engineering*, Michigan Technological University, 2000
37. Archilla, A. R., *Development of A Pavement Rutting Model from Experimental Data*, *Journal of Transportation Engineering*, August (2000), 291-293
38. Şengül, C. E., *Asfalt Kaplamalarda Tekerlek İzinde Oturma Ve Su Hasarı Problemlerinin Azaltılması İçin Sönmüş Kireç Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (2006).
39. Kuloğlu, N., Namlı, R., *Asfalt Karışımlarının Dönel Presle Sıkıştırılması*. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.* (3), 487-497, 2005
40. <http://www.insaatmuhendisligi.net/index.php?topic=5330.0>

41. Ceylan, S., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması Ve Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2006).
42. P. Autret, A. de Boissoudy, J.-C. Gramsammer, Le manege de fatigue. Bulletin de liaison des Laboratoires des Fonts et Chaussées, No 155, maijuin (1988).
43. Entro de Estudios y Experimentation de Obras Publicas (CEDEX), Resumen del 1 er ensayo pista de firmes espanola. (1992).
44. Umar, F., Ağar, E., Yol üstyapısı, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul, (1985).
45. Üstünköl, F. N. E., Endüstriyel Atıkların Esnek Yol Üstyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2006).
46. Tunç, A., Yol malzemeleri ve uygulamaları, Atlas Yayın, İstanbul, (2001).
47. Mirzahosseini RM, Aghaeifar A, Alavi AH, Gandomi AH. Permanent deformation analysis of asphalt mixtures using soft computing techniques. Expert Systems with Applications 38 (2011) 6081–6100.
48. Lavin, P. Asphalt pavements: A practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects. London: Spon,(2003).
49. Nicholls, C. Asphalt surfacings: A guide to asphalt surfacings and treatments used for the surface course of road pavements. London, New York: E&FN Spon, (1998).
50. Nijboer, L. W. Some considerations of the 'Marshall test method for investigating bituminous masses. Strasse und Autobahn, 210–214,(1957).
51. <http://www.eylullab.com/universal-test-grubu.aspx>
52. Dubois, V., De La Roche, C., Burban, O., Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples. Construction and Building Materials Volume 24, Issue 6, June 2010, Pages 885-897.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı:** Mustafa

**Soyadı:** KARSLI

**Doğum yeri, yılı:** Yomra/Trabzon, 1984

**Baba adı:** Süleyman

**Ana adı:** Hadice

Mustafa KARSLI, 1984 yılında Trabzon'nun Yomra ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yomra'da tamamlamış olup, 2001 yılında Yomra Lisesinden mezun oldu. 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünü kazanan yazar, aynı bölümden 2006 bahar yarıyılı sonunda "İnşaat Mühendisi" unvanıyla bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2007 yılında Gümüşhane Bayındırlık ve İskan Müdürlüğünde İnşaat Mühendisi olarak göreve başlamış olup, 2007-2011 yılları arasında Gümüşhane İl Özel İdaresinde görev yaptı. 2011 yılı Ocak ayında Gümüşhane Bayındırlık ve İskan Müdürlüğündeki görevine geri döndü.

2009 yılında Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans yapmaya hak kazanan Mustafa KARSLI, İngilizce bilmekte olup, halen Gümüşhane Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü'nde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

### İletişim Bilgileri

Gümüşhane Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü

29000 Merkez/GÜMÜŞHANE

İş tel: 0456 2132978

e-posta adresi: mustafa\_karsli84@hotmail.com