

**MARSHALL DİZAYN METODU İLE OPTİMUM BİTÜM
MUHTEVASININ BELİRLENMESİNDE DENEY
PARAMETRELERİNİN SONUCA ETKİSİ**

Kürşat YILDIZ

133 365

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
(YAPI EĞİTİMİ)**

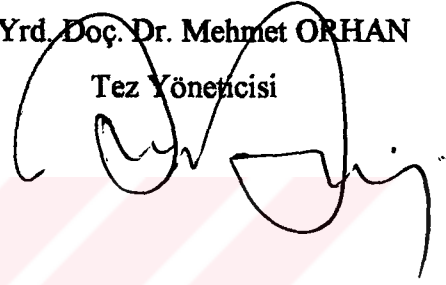
**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ekim 2003
ANKARA**

Kürşat YILDIZ tarafından hazırlanan MARSHALL DİZAYN METODU İLE OPTİMUM BİTÜM MUHTEVASININ BELİRLENMESİNDE DENEY PARAMETRELERİNİN SONUCA ETKİSİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ORHAN

Tez Yöneticisi



Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. M. Haluk GELİK 

Üye

Y. Doç. Dr. Mehmet ORHAN



Üye

Yrd. Doç. Dr. Salih BEKTAŞ 

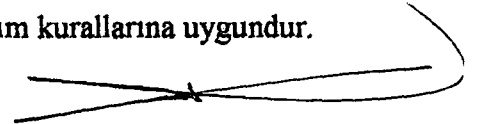
Üye

.....

Üye

.....

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	vii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1.Karayolu Üst Yapısı.....	4
2.1.1. Temel ve alt temel tabakası.....	4
2.1.2. Kaplama tabakası.....	5
2.1.3. Rijit kaplamalı yollar.....	5
2.1.4. Esnek kaplamalar.....	6
2.1.5. Yüzeysel sathi kaplamalar.....	6
2.1.6. Asfalt betonu kaplamalar.....	6
2.2 Asfalt Betonu Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar.....	8
2.2.1. Şekilce bozulma türleri.....	9
2.2.2. Çatlamlar.....	15
2.2.3. Ayrışmalar.....	20
2.3. Bitümlü Sıcak Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler.....	25
2.3.1. Agrega.....	26

	Sayfa
2.3.2. Bitümlü bağlayıcılar.....	26
2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranılan Özellikler.....	34
2.4.1. Stabilite.....	34
2.4.2. Rijitlik.....	37
2.4.3. Dayanıklılık (Durabilite).....	38
2.4.4. Fleksibilite (Esneklik).....	39
2.4.5. Geçirimsizlik.....	40
2.4.6. Kayma direnci.....	41
2.4.7. İşlenebilirlik.....	42
2.4.8. Yorulma mukavemeti.....	43
2.5. Marshall Test Yöntemi.....	46
3. MATERYAL VE METOT.....	53
3.1. Materyal.....	53
3.2. Metot.....	54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
4.1. Daha Önce Yapılmış Çalışmaların İstatistiki Analizi.....	57
4.1.1. Örnek 1.....	57
4.1.2. Örnek 2.....	60
4.1.3. Örnek 3.....	63
4.1.4. Örnek 4.....	69
4.1.5. Örnek 5.....	72
4.1.6. Örnek 6.....	76

	Sayfa
4.1.7. Örnek 7.....	81
4.2. Yapmış Olduğuz Örnek Çalışmaların İstatistiki Analizi.....	86
4.2.1. Örnek 1.....	86
4.2.2. Örnek 2.....	90
4.2.3. Örnek 3.....	94
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	98
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	104

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet ORHAN'a, desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı Prof. Dr. M. Haluk ÇELİK'e, araştırma bölümünde büyük yardımlarını gördüğüm mesai arkadaşlarıma, ayrıca manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (KGM yollar fenni şartnamesi).....	7
Çizelge 2.2. Binder tabakası için gradasyon limitleri (KGM yollar fenni şartnamesi).....	8
Çizelge 2.3. Sıvı petrol asfaltı tipleri.....	30
Çizelge 2.4. Asfalt emülsiyonlarının viskozitelerine göre türleri.....	32
Çizelge 2.5. Bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler.....	45
Çizelge 2.6. Dizayn kriterleri.....	48
Çizelge 2.7 Optimum bitüm oranını belirlemede kullanılan Marshall sonuçları.....	49
Çizelge 4.1. Optimum bitümün belirlenme kriterleri.....	56
Çizelge 4.2. Marshall deney sonuçları.....	57
Çizelge 4.3. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	59
Çizelge 4.4 Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırılması.....	59
Çizelge 4.5. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	60
Çizelge 4.6. Marshall deney sonuçları.....	60
Çizelge 4.7. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	62
Çizelge 4.8. Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırılması.....	62
Çizelge 4.9. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	62
Çizelge 4.10. Marshall deney sonuçları.....	63
Çizelge 4.11. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	67
Çizelge 4.12. Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırılması.....	67
Çizelge 4.13. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	68

Çizelge 4.14. Marshall deney sonuçları.....	69
Çizelge 4.15. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	71
Çizelge 4.16. Karışımından beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	71
Çizelge 4.17. Marshall deney sonuçları.....	72
Çizelge 4.18. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	74
Çizelge 4.19. Karışımından beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	74
Çizelge 4.20. Marshall deney sonuçları.....	76
Çizelge 4.21. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	78
Çizelge 4.22. Karışımından beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	78
Çizelge 4.23. Marshall deney sonuçları.....	81
Çizelge 4.24. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	83
Çizelge 4.25. Karışımından beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	83
Çizelge 4.26. Marshall deney sonuçları.....	86
Çizelge 4.27. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	88
Çizelge 4.28. Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırılması.....	88
Çizelge 4.29. Karışımından beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	89
Çizelge 4.30. Marshall deney sonuçları.....	90
Çizelge 4.31. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	92
Çizelge 4.32. Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırılması.....	92
Çizelge 4.33. Karışımından beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	93
Çizelge 4.34. Marshall deney sonuçları.....	94
Çizelge 4.35. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri.....	96
Çizelge 4.36. Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırılması.....	96

Çizelge 4.37. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması.....	97
---	----



Şekil	Sayfa
Şekil 4.17. % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri.....	91
Şekil 4.18. % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri.....	95



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bitümlü karışım kompozisyonu.....	25
Şekil 2.2. Bitüm yüzdesi stabilite ilişkisi.....	48
Şekil 2.3. Bitüm yüzdesi – Marshall stabilite ilişkisi.....	51
Şekil 2.4. Bitüm yüzdesi – akma ilişkisi.....	51
Şekil 3.1. Kutu grafiğinin yapısı ve özellikleri.....	55
Şekil 4.1. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	58
Şekil 4.2. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	61
Şekil 4.3. Tip A, % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	64
Şekil 4.4. Tip B, % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	65
Şekil 4.5. Tip C, % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	66
Şekil 4.6. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	70
Şekil 4.7. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	73
Şekil 4.8. Stabilite verilerine ilişkin kutu grafiği.....	75
Şekil 4.9. Akma verilerine ilişkin kutu grafiği.....	75
Şekil 4.10. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	77
Şekil 4.11. Stabilite verilerine ilişkin kutu grafiği.....	79
Şekil 4.12. Akma verilerine ilişkin kutu grafiği.....	80
Şekil 4.13. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	82
Şekil 4.14. Stabilite verilerine ilişkin kutu grafiği.....	84
Şekil 4.15. Akma verilerine ilişkin kutu grafiği.....	85
Şekil 4.16. % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri.....	87

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tekerlek izi.....	12
Resim 2.2. Yığılma.....	13
Resim 2.3. Kabarmalar, Ondülasyon.....	14
Resim 2.4. Timsah sırtı çatlak.....	16
Resim 2.5. Yorulma çatlağı.....	17
Resim 2.6. Kenar çatlakları.....	18
Resim 2.7. Çanak şeklinde çukurlar.....	21
Resim 2.8. Sökülme.....	22
Resim 2.9. Soyulma.....	23
Resim 2.10. Cilalanma.....	24
Resim 2.11. Kusma	24

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
VMA	Sıkıştırılmış kaplamadaki agregalar arası boşluk (%)
RC	Çabuk kür olan sıvı petrol asfaltı
MC	Orta hızda kür olan sıvı petrol asfaltı
SC	Yavaş kür olan sıvı petrol asfaltı
RS	Çabuk kesilen asfalt emülsiyonu
MS	Orta hızda kesilen asfalt emülsiyonu
SS	Yavaş kesilen asfalt emülsiyonu
RT	Yol katranı
c	Agrega ile asfalt arasındaki bağ kuvveti
ϕ	İçsel sürtünme açısı
T	Isı
t	Yükleme hızı veya süresi
α	Anlamlılık düzeyi

Kısaltmalar	Açıklama
SPSS	İstatistik paket programı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
TS	Türk Standartları
AÇ	Asfalt çimentosu
EDTY	Eşdeğer tekil dingil yükü

**MARSHALL DİZAYN METODU İLE OPTİMUM BİTÜM MUHTEVASININ
BELİRLENMESİNDE DENEY PARAMETRELERİNİN SONUCA ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Kürşat YILDIZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÖZET

Ülkemiz karayollarında trafik hacmi ile beraber yüklerin artması ve iklim koşullarının da olumsuz etkileri esnek üst yapı kaplamalarında tekerlek izi oluşumu, yığılma ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyon oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada; asfalt betonu karışımını optimize etmek amacıyla yapılan Marshall dizayn metodunu inceleyerek, bu metotla daha önce yapılmış çalışmaların verileri ve laboratuarda yapmış olduğumuz Marshall deneyi verileri kullanılarak istatistiki analizler yapılmıştır. Optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi için model denklemleri oluşturulmuş ve elde edilen model denklemleri üzerinden optimum bitüm muhtevası belirlenmeye çalışılmıştır. Model denklemleri üzerinden elde edilen sonuçlar Marshall deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda optimum bitüm yüzdelерinde değişik oranlarda artmalar ve azalmalar görülmüştür. Bu artma ve azalmalar her ne kadar küçük değerlerde olsa asfalt betonu kaplamaların fiziksel özelliklerini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir.

Bilim Kodu :2251101
Anahtar Kelimeler :Asfalt Betonu, Agrega, Bitüm, Marshall Stabіlitesі
Sayfa Adeti :104
Tez Yöneticisi :Yrd. Doç. Dr. Mehmet ORHAN

**THE EFFECT OF EXPERIMENT PARAMETERS IN DETERMINING THE
CONTENT OF MARSHALL DESIGN METHOD AND OPTIMUM
BITUMEN
(M. Sc. Thesis)**

Kürsat YILDIZ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

ABSTRACT

In our country's highways, with the traffic capacity, the increase of loads and the negative effects of weather conditions, cause permanent deformation like wheel rut, heaping and corrugation. In this study; to optimize asphalt concrete mixture Marshall design method, is examined. Statistical analysis were made by using the parameters of the studies. To determine the optimum bitumen content, model equations have been formed and from these model equations optimum bitumen content has been tried to be determined. The results taken from model equations have been compared with the results of Marshall experiment. At the end of comparisons, increases and decreases by different ratios have been seen in the percentages of the optimum bitumen. Although these increases and decreases are small values, it has been determined that, they affect the physical properties of asphalt concrete coverings considerably.

Science Code	:2251101
Key Words	:Asphalt Concrete, Aggregate, Bitumen, Marshall Stability
Page Number	:104
Adviser	:Yrd. Doç.Dr. Mehmet ORHAN

1. GİRİŞ

Günümüzde yaşam standartlarının yükselmesi ve ekonomik kalkınma toplumların konfor, emniyet ve sürüş kalitesi talebi, yüksek maliyet nedeniyle yol üst yapılarının daha uzun ömürlü ve deformasyona karşı daha dirençli, öngörülen sürede aynı konfor seviyesinde hizmet verecek şekilde projelendirilmesi çok daha önemli hale gelmektedir. Bunun içinde karışımda kullanılacak agrega ve bitümün şartnamede istenilen özelliklerde olması asfalt betonu karışımının iyi inşa edilmesi gerekmektedir. Karayollarında farklı kaplama türleri kullanılmakla birlikte konfor açısından en iyi kaplama olarak kabul edilen asfalt betonu, bitümlü sıcak karışımlı yol kaplamasıdır. İri ve ince agrega, filler ve bitümün plantlerde 140-160 C° sıcaklıkta karıştırılıp düzgün bir tabaka halinde serilip sıkıştırılarak elde edilen bir yol üst yapısıdır. Asfalt betonu kaplamaların ağırlıkça yaklaşık %95'ini agrega, ve bu orana bağlı olarak bitüm oluşturmaktadır. Bu nedenle agrega granülometrisi ve bitüm oranı asfalt betonu kaplamaların fiziksel özelliklerine etki eden unsurlardır. Granülometriye bağlı olarak optimum bitüm oranının doğru tahmin edilmesi hem asfalt betonunun fiziksel özellikleri açısından, hem de optimum bitüm oranının doğru tahmin edilmesi ile maliyetin düşürülmesi açısından önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında daha önce yapılan tez, makale ve bazı kurum ve kuruluşların yapmış olduğu laboratuvar çalışmalarının Marshall deney verileri kullanılarak, asfalt betonu fiziksel özellikleri için regrasyon model denklemleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model denklemleri üzerinden optimum bitüm muhtevası belirlenmeye çalışılmıştır. TS 3720 ve K.G.M. yollar fenni şartnamesi göz önünde bulundurularak yapılmış bu çalışmalardan elde edilen optimum bitüm muhtevası ve asfalt betonu fiziksel özellikleri, model denklemleri üzerinden elde edilen optimum bitüm muhtevası ve asfalt betonu fiziksel özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Daha önce yapılan çalışmaların bazılarında çeşitli hatalar tespit edilmiş ve bu hataların kaynaklandığı sebepler göz önünde bulundurularak, hatalı örnekleri temsil edecek üç adet asfalt betonu dizaynı yapılmıştır. Yapılan örnek çalışmalarında model denklemleri oluşturulmuş ve hatalı örneklerle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER

Bir çok mühendis ve yapım kuruluşlarının bitümlü sıcak karışım metotlarının kullanımında, projeci ve yapımcı personelin güvenilir mühendislik verilerine ihtiyaç duyduklarını ifade etmiştir. Bu mühendislik verileri için gerekli olan karışım dizaynları ile ilgili hesaplamalar ve ilgili bazı örnekler verilmiş, Marshall ve Hveem metotları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu metotlar açıklanırken asfalt kaplama karışımlarının dizaynında deney yöntemlerinin detaylarına çok dikkat edilmesi gerektiği belirtilmiş ve karışım dizayn deneyleri ile şartname talepleri arasındaki ilişkilere dikkat edilmesi gerektiği öne sürülmüştür (1).

Asfalt betonunda bozulma kavramı, bir üst yapının tasarım süresi sonunda, trafik yüklemeleri ve çevresel etkileşim sonucunda düşmesi beklenen hizmet yeteneğinin derecesi olarak ifade edilmiş ve bu durum hizmet yeteneği kavramının izah edilmesi ve konunun daha detaylı incelenmesinin bir zorunluluk olduğunu belirtilmiştir (2).

Asfalt betonu kaplamalardaki bozulmalar üç ana grupta şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma olmak üzere toplamış ve bu bozulmaların genel nedenlerini ise temel, alt temel ve taban zemininin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin bozucu etkileri, iklim koşulları ve asfalt betonunun özellikleri olarak sıralanmıştır. Ayrıca asfalt betonunda meydana gelen bozulmaların nedenleri ve çözüm önerileri ortaya konulmuştur (3).

Asfalt betonu karışımına giren kaba agregâ, ince agregâ ve mineral filler ile bitümlü malzemede aranan özellikler, gradasyon limitleri, işyeri karışım esasları, inşa metodu, arazi ve laboratuvar kontrolleri ve diğer şartlar şartnamelerde verilen esaslara uygun olması gerekmektedir (4).

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın, kökeni (magmatik, tortul, metamorfik) ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerektiği belirtilmiş ve ancak aranan bütün koşulları sağlayan bir agreganın karayolu üstyapısında kullanılabileceği belirtilmiştir. Agregâ tanelerinin şekli önemlidir, yassı düz ve uzun tanelerin yüzdesinin artması fillerin özelliğini düşüreceği belirtilmiş ve filler

malzemesinin bitümlü malzemeye reaksiyona girmeyecek özellikte olmasına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (5).

Karayollarında farklı kaplamalar kullanılmakla birlikte konfor açısından en iyi kaplama olarak kabul edilen asfalt betonu, bitümlü sıcak karışım yol kaplaması olarak belirtilmiştir. İri agregalar ve bitümün plantlerde 140 – 160 °C sıcaklıkta karıştırılıp düzgün bir tabaka halinde serilip sıkıştırılarak elde edilen bir yol üst yapısıdır. asfalt betonu kaplamalarda ağırlıkça % 93 – 94 arasında agregalar mevcut olduğu belirtilmiş ve bu nedenle agregaların granülometrisi asfalt betonu kaplamalarında önemli bir faktör olduğu vurgulanmıştır. Agregaların granülometrisi asfalt betonunun fiziksel özelliklerine etki etmekle birlikte optimum bitüm oranı üzerinde etkisi olduğu belirtilmiş ve optimum bitüm oranında yapılabilecek %1 kadar bir tasarrufun asfalt betonu kaplamasının maliyetinde önemli derecede fayda sağlayacağı belirtilmiştir (6).

Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya projenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin de bir kombinasyonu olup çok defa bunların gaz, sıvı, yarı-katı veya katı olabilen, metal-dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanmış ve bitümlü bağlayıcılar esas olarak asfaltlar ve katranlar olarak iki kısma ayrılmıştır. Bitümlü bağlayıcılar kendi aralarında kökenlerine ve hazırlama yöntemlerine göre de önemli farklılıklar gösterdiği belirtilmiştir (7).

Kaplama kalınlığını tabakalara ayırarak (aşınma, binder, bitümlü temel gibi) deformasyonlar hesaplanmalı ve toplamı deformasyon miktarı göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak, sıcak bitümlü karışımların stabilitesi son derece karmaşık olup belirli bir değerle belirleyebilmek mümkün olamamaktır. Ancak birtakım testler (Örneğin; Marshall, Hveem, vb.) ile relatif bir stabilite değeri tayin edilmektedir (7,8,9).

Bitümlü sıcak karışımların hesabında iyi bir bitümlü kaplama inşaatı yapmak için dikkat edilmesi gereken konulara değinilmiş, stabilizeyi sökülme mukavemeti yada yük altında bükülme olarak tarif etmiştir. Agreganın granülometrisinin, şekil ve yapısının, bitümlü karışımı ile birlikte bitümlü karışımın kıvamı ve sıkıştırma derecesinin stabilizeye tesir eden

faktörler olduğunu belirterek, istenilen karışımı elde etmek için hesaplamalarda yapılacak ilk işin partiküllerinde gerekli miktarda sivri köşeli bulunan bir agreganın seçilmesi gerektiği ortaya konulmuştur. Sağlamlık ise hava, su ve trafiğin zararlı tesirlerine karşı mukavemeti olarak tarif edilmiş su ve havanın asfalt betonuna zararlı olduğunu, agreganın bitümlü malzemeye sudan daha çok alaka göstermesi gerektiğini, aksi taktirde bitümün su ve hava ile kimyasal tepkimeye gireceği ve agregaya yüzeyinde ki bitüm filminin özelliğini kaybedeceği belirtilmiş ve bunun bozulmalara sebebiyet vereceği ifade edilmiştir. Ayrıca agreganın sert, kırılmaz dayanıklı ve az boşluklu olması ve buna bağlı olarak optimum bitümün oranında agregaya yüzeyindeki film tabakasının mümkün olduğu kadar ince olması gerektiği ortaya konulmuştur (7).

2.1. Karayolu Üst Yapısı

Karayolu üst yapısı, alt yapı ile araç tekerleklerinin temas ettiği yüzey arasında kalan kısımdır. Diğer bir tarifile düzgün bir yüzey oluşturmak amacıyla alt yapı üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısı üst yapı olarak isimlendirilir (6).

2.1.1. Alt temel ve temel tabakası

Doğal zeminden meydana getirilen altyapı üzerine serilen ve genelde kırmataş, kum, çakıl, kil gibi malzemelerden oluşturulan tabakaya alt temel tabakası adı verilir. Sıkışabilme özelliği olan malzemelerden oluşmasına dikkat edilir. En büyük tane ebadı ise 2-3 inç arasında olmalıdır. Kalınlığı, 20-50 cm. olmakla birlikte yolun tipine ve önemine göre değişir. Fazla kalın olması halinde tabakalı olarak sıkıştırılır.

Kaplama ile temel altı tabakası arasına yerleştirilen ve trafiğin doğrudan temas etmediği, doğal kum, çakıl, kil veya bitüm karışımları gibi malzemelerden oluşan tabaka ise temel tabakası olarak adlandırılmıştır. En büyük boyutu 1 inç, ortalama kalınlığı ise 10-20 cm arasında olmalıdır. Sıkıştırılmadan önce optimum nem oranında ısıtılırsa sıkışma işlemi daha iyi yapılabileceği belirtilmiştir (6).

2.1.2. Kaplama tabakası

Temel tabakası üzerine yapılan ve trafiğin doğrudan temas ettiği tabakadır. Kaplama tabakası, bitümlü karışımlar, beton veya parke taş gibi kaplamalardan yapılabilir. Amaç düzgün ve pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi oluşturmaktır. İki tabakadan oluşmaktadır. En üstteki aşınma ve onun altındaki binder tabakasıdır. Ancak tek tabaka halinde de yapılabilir. Finişerle serim yapılması daha uygundur. Bu tür serimde karışımın homojen olarak yüzeye serilmesi sağlanmış olur (6,10). Yollar genellikle daha geniş anlamıyla rijit ve esnek kaplamalar diye ikiye ayrılabilir.

2.1.3. Rijit kaplamalar

Beton kaplamalar kum ince agreg, iri agreg ve portland çimentosu karışımının tek tabaka halinde dökülmesiyle elde edilir. Uygun biçimde projelendirilip inşa edilirse uzun ömürlü olur ve diğer tip kaplamalara göre daha az bakım gerektirir. Bir beton kaplama plağının yüklere ve çevre etkilerine dayanma gücü betonun, alt yapının ve temel tabakasının özelliklerine bağlıdır (6,11).

Isı ve iklim değişikliklerinden dolayı gün boyunca veya iklimler süresince kaplama boylarında değişimler olur. Bu boy değişimlerinin etkilerini azaltmak için enine ve boyuna derzler bırakılır. Bu derzler arasında bağlantı ve yük transferi amacıyla çelik çubuklar bırakılır. Rijit kaplamalar, ülkemizde yapım zorluğu, maliyeti ve iklim değişkenlerinden fazlaca etkilenecek zarar görmesi gibi nedenlerle fazla tercih edilmemektedir. 20 yıl proje ömrü içinde 8.2 ton standart dingil yükü sayının 60 ile 75 milyondan fazla olan veya yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari vasıtaların sayısı 5000'den fazla olan yollarda ve büyük yolcu uçaklarının yıllık 5000'den fazla kalkış yapan havaalanlarında kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu nedenle ülkemizde beton kaplamaların kullanımının gündeme gelmesi ve yaygınlaşması beklenmektedir (8).

2.1.4. Esnek kaplamalar

Esnek kaplamalarda bağlayıcı olarak bitüm kullanılmaktadır. Hava şartlarına değişik etkiler göstermesine rağmen kullanımda herhangi bir zorluk göstermemektedir. Stabilitesi ise adezyon, tane sürtünmesi kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcıların özelliklerine bağlıdır (6).

2.1.5. Yüzeysel (sathi) kaplamalar

Yüzeysel kaplamalar, Hazırlanan temel tabakası üzerine bitümlü bağlayıcı (astar + esas bağlayıcı bitüm) sermek ve bunun üzerine de belirli ebattaki agregayı örtmek suretiyle yapılır. Önceden hazırlanan temel tabakasının yüzeyi temizlendikten sonra ince kıvamlı bir astar tabakası serilir ve yüzeyin bu astarı iyice emmesi için belirli bir süre beklenir. Bunun üzerine bir kat bitüm püskürtülür ve hemen ardından agrega serilir. Gerek duyulursa ikinci bir kat kaplama içinde astar atılması hariç aynı işlemler tekrarlanır. Asfaltın agregayı iyice kavraması için hafif demir bandajlı ya da daha uygun olarak lastik bandajlı silindirlerle sıkıştırma yapılır ve yol trafiğe açılır. Ülkemizde en çok kullanılan kaplama türü olan sathi kaplamalar, uygun malzemenin kullanılması ve alt yapının da sağlam olması halinde özellikle ağır dingil yüklerinde bile konumunu ve sağlığını muhafaza edebilmektedir (6,8,11).

2.1.6. Asfalt betonu kaplamalar

Asfalt betonu kaplaması binder ve onun üzerine yapılan aşınma tabakasından oluşur. Bu tip kaplama kırılmış ve elenmiş kaba agrega ve filler malzemesinin belirli granülometri limitleri arasında, işyeri karışım formülleri esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte sıcak olarak karıştırılması ile elde edilir. Asfalt betonu agrega malzemesi kırmataş veya çakıl, kum ve mineral fillerden meydana gelir. Bitümlü malzeme olarak asfalt çimentosu kullanılır (12).

2.1.6.1. Aşınma tabakası

Aşınma tabakası, yolun araç tekerlekleriyle temas eden üst kısmıdır. Asfalt betonu kaplamalarda, ince ve filler malzeme oranları binder tabakasına göre fazladır (Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2).

Eğer kaplama yapılacak tabakanın fazla kalın yapılmaması gerekiyorsa (2-6 cm.), yapılan kaplama genelde aşınma tabakası olacak şekilde dizayn edilir ve tek tabaka olarak serilip sıkıştırılır. Binder tabakasına göre bağlayıcısı daha fazla olan aşınma tabakası, seyir konforu açısından pürüzsüz bir şekilde inşa edilir.

Çizelge 2.1. Aşınma tabakası için gradasyon limitleri (K.G.M. Yollar Fenni Şartnamesi 2000)

ELEK BOYU	TİP 1 % GEÇEN	TİP 2 % GEÇEN	TİP 3 % GEÇEN	TİP4 % GEÇEN
19 mm	100	100	-	-
12,5 mm	84-100	77-100	100	100
9,5 mm	75-91	66-84	87-100	80-100
4,75 mm	57-75	46-66	66-82	55-72
2,00 mm	42-59	30-50	47-64	36-53
0,425 mm	22-35	12-28	24-36	16-28
0,180 mm	12-22	7-18	13-22	8-16
0,075 mm	4-10	4-10	4-10	4-10

2.1.6.2 Binder tabakası

Kaplama tabakası içerisinde, aşınma tabakası altında bulunan katmandır. Aşınma tabakasına göre iri agregaları daha çoğunluktadır. (Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2).

Yol Yüzeyine yapılacak kaplama 5-6 cm'den büyük yapılacak ise bu kaplamanın 2 tabaka halinde dökülmesi daha uygun olacaktır. Bu tabakalardan altta bulunan binder tabakası daha az bağlayıcı bitüme sahiptir ve aşınma tabakasına bir temel oluşturma niteliğindedir. Kaplamanın iki tabaka halinde inşa edilmesi, hem bitüm sarfiyatını azaltacak, hem de iki kat

halinde sıkıştırılan kaplamanın daha dayanıklı olmasını sağlayacaktır. Ancak işçilik ve zaman açısından iki kat kaplama yapılması zor olduğundan, sıcak bitümlü kaplamalar trafiği az olan yollarda özellikle şehir içi yollarda tek tabaka halinde yapılmaktadır (6,10).

Çizelge 2.2. Binder tabakası için gradasyon limitleri (K.G.M. Yollar Fenni Şartnamesi, 2000)

ELEK BOYU	TIP 1 % GEÇEN	TIP 2 % GEÇEN	TIP 3 % GEÇEN
25 mm	100	100	100
19 mm	82-100	80-100	77-100
12,5 mm	68-87	63-81	59-77
9,5 mm	60-79	54-72	49-66
4,75 mm	46-65	40-58	34-52
2,00 mm	34-51	28-45	23-39
0,425 mm	17-29	14-25	12-22
0,180 mm	9-18	8-16	7-14
0,075 mm	2-7	2-7	2-7

2.2. Asfalt Betonlu Kaplamalarda Meydana Gelen Bozulmalar

Asfalt betonunda bozulma, bir üst yapının tasarım süresi sonunda, trafik yüklemeleri ve çevresel etkileşim sonucunda düşmesi beklenen hizmet yeteneğinin derecesi olarak belirtilmiştir. Bu durumda hizmet yeteneği kavramının izah edilmesi ve konunun daha detaylı incelenmesinin gereği bir zorunluluk olduğu belirtilmiştir (2).

Asfalt betonlu kaplamalardaki bozulmaları üç ana grupta şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma olmak üzere toplamak mümkündür. Bu bozulmaların genel nedenlerini ise temel, alt temel ve taban zemininin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin bozucu etkileri, iklim koşulları ve asfalt betonunun özellikleri olarak sıralayabiliriz (3). Asfalt betonunda oluşan bozulmaları ise aşağıdaki nedenlere bağlamak mümkündür.

a-) Uygun olmayan malzeme kullanılması

- İyi seçilmemiş ve iyi kontrol edilmemiş granülometri
- Karışımda yüksek oranda yuvarlak malzeme kullanılması
- Çürük agrega kullanılması
- Kirli agrega kullanılması
- Çabuk cıalanan agrega kullanılması

b-) Asfalt betonu karışımın hatalı hazırlanması

- Asfalt yüzdesinin hatalı olması
- Filler yüzdesinin hatalı olması
- Granülometrinin bozuk olması
- Yetersiz karıştırma
- Yetersiz sıcaklık kontrolü

c-) Asfalt betonu kaplama yapımının hatalı olması

- Yetersiz sıkıştırma
- Aşırı sıkıştırma
- Serme-sıkıştırma sıcaklığının düşük olması
- Yapım sırasında meydana gelen segregasyon
- Astar veya yapıştırma tabakasının gerekli özenle yapılmaması

2.2.1. Şekilce bozulma türleri

Karayollarımız da en sık görülen bozulmalardan biri olan şekil değiştirme, genel anlamda, kaplama yüzeyinin orjinal kotuna göre değişikliğe uğramasıdır. Şekil değiştirme, alt tabakaların (temel, alt temel ve taban) hareketlerine bağlı olabildiği gibi, asfalt beton kaplamasının stabilitesinin yetersizliğinden de oluşabilmektedir. Yük altında meydana gelen deformasyonlar, geçici (elastik) deformasyonlar ve kalıcı (plastik)

deformasyonlar olmak üzere ikiye ayrılır. Stabilité yüksek olduğu sürece toplam deformasyon az olduğu gibi bu deformasyonun geçici kısmı fazla, kalıcı kısmı çok azdır. Stabilitenin düşük olması durumunda ise durum tersine döner. Sadece kalıcı deformasyonların oluşması halinde ise stabiliteden söz edilemez. Yüksek sıcaklıklar asfaltın termoplastik özelliklerinden dolayı stabilitéyi düşürür. Yük tekrar kalıcı deformasyonların artmasına neden olur. Yani, kalıcı deformasyonların sıcaklık etkisi ve yük tekrarı şekil değiştirmeye sebep olur (3,5).

Şekil değiştirmeyi oturmalar, yerel çökmeler, tekerlek izi oluşması, ondülasyonlar, kabarmalar, yığılmalar ve lastik deseni oluşması olarak yedi bölüme ayırmak mümkündür.

2.2.1.1 Oturmalar

Kaplama altındaki malzemenin oturması sonucu oluşur. Nedenleri ise, 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 zeminden gelen kille karışmasıdır.

Oturmalar, yol orta çizgisi boyunca ya da kenar şeritlerde uzunlamasına ya da enlemesine oluşur. Oturma eğrisi çok büyük olduğundan kaplama tabakası aynı şekli almaya çalışacak ve çatlamayacaktır. Ancak kaplamanın, asfalt betonu olduğu durumlarda çok katı asfalt betonu kaplamalarının, alttaki tabakaların oturmalarla uyum göstermeyeceğinden çatlamaların oluşması mümkün olabilecektir (3,13).

Bu tip bozulmalar ancak alt tabakaların yeterli olarak projelendirilmesi ve şartnamelere uygun şekilde yapılması ile önlenabilir. Doğal zeminin zayıf olduğu durumlarda, bu kısmın sıkıştırılması yada stabilizasyonu ile giderilebilir.

2.2.1.2. Çökmeler

Çökmeler, çatlakları içeren ya da içermeyen ve asıl kaplama sathına göre alçakta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5 cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerinde su birikmektedir. Çökmeler zamanla genişleyerek, yolun elden çıkmasına da neden olurlar.

Nedenleri:

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

Bu tip bozulmalar drenaj ve kil yükselmesi önlemlerinin yanısıra yapım sırasında yeterli kontrol ve özenli işçilik ile önlenabilir (3,13,14).

2.2.1.3. Tekerlek izi ve oluklanmalar

Asfalt betonu kaplamalarında en sık görülen, gerek teknik ve gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bozulma tipidir. Tekerlek izi oluşması özellikle ülkemiz gibi problemli araziye sahip, trafiği ağır ve sıcak ülkelerde problem olmaktadır. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında yada sadece bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonların birikiminden doğar. Tekerlek izi oluşmasını meydana getiren nedenleri, asfalt tabakasıyla ilgili nedenler, alt tabakalarla ilgili nedenler ve çevresel nedenler olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür (3,5,14).

Asfalt tabakasıyla ilgili nedenler :

- Yüksek bitüm yüzdesi,
- Filler malzemesinin fazlalığı,

- Yuvarlak malzemelerin karışımında kullanımı
- Karışımın yetersiz sıkıştırılması
- Ağır trafik ve tek çizgide akan trafik nedenleriyle kaplama tabakasının fazla sıkışmasıdır.

Asfalt tabakalara ilgili nedenler :

- Alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olması,
- Alt tabakanın veya tabanın konsolidasyona (oturmaya) maruz kalması,
- Doğal zeminin ve üst tabakaların yanıl hareketleridir.

Çevresel nedenler:

- Ağır ve yüksek sayıda tekrar eden yük
- Bölgenin fazla sıcak oluşudur.

Ağır taşıt trafiği, iz ve olukların oluşumundaki en önemli etkindir. Yüksek dingil yükü, yüksek lastik basıncı, yükün hızlı tekrarı ve yavaş hızdaki araçlar olumsuz etkilerdir. Genellikle ağır trafikli ve çok dalgalı arazide sorun olmaktadır (Resim 2.1).



Resim 2.1. Tekerlek izi

İz ve oluklar, aşağıdaki olumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olurlar:

- Suların toplanmasıyla, kayma tehlikesinin artması ve soğuk havalarda ince buz tabakalarının oluşması,
- Seyir konforunun düşmesiyle birlikte, şerit değiştirmek isteyen hızlı
- Araçlar için tehlike oluşması,

2.2.1.4. Ondülasyon ve yığılmalar

Yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve aralıkları yaklaşık olarak eşit olan belirli biçimde dalgaya benzeyen yatay deformasyonları olarak tanımlanırlar. Ondülasyon ve toplanmalar, plastik bir hareket sonucu oluşur. Genellikle kaplama tabakası ile ilgili stabilite eksikliğinin bu oluşumda etkisi olup, asfalt karışımın stabilite eksikliği de önemlidir.



Resim 2.2. Yığılma

Resim 2.2’de verilen yığılma türü bozulmalar ise, plastik bir hareket sonucu asfalt kaplama sahında oluşan bölgesel tümsek ve şişkinliklerdir. Bunlar özellikle trafiğin durup kalktığı yerlerde, inişlerde, araçların fren yaptığı kısımlarda, keskin kurplarda ya da araçların bir engele çarpıp sıçrama yaptıkları yerlerde oluşurlar.

Nedenleri;

Ondülasyonlar ve yığılmalar, çoğunlukla yeterli bir stabilitesi olmayan asfalt kaplamalarda oluşurlar. Kaplamayı oluşturan karışımın stabilitesinin yetersiz olmasının nedenleri ise, karışımın çok fazla asfaltlı malzeme içermesi, karışımındaki ince agrega miktarının çok fazla olması, agregadaki ince ve iri donelerin köşeli olmaması ve satırlarının düzgün ve cilalı olması ya da karışımlarda çok yumuşak bir asfalt çimentosu kullanılmış olmasıdır (3,5,14).

2.2.1.5. Kabarmalar

Satıh tabakasının lokal olarak yukarıya doğru deplasmandır. Genellikle doğal zeminin ve üst tabakaların şişmesinden oluşur. Ana nedeni don etkisidir. Ancak şişme potansiyeli yüksek killi topraklar da kaplamada kabarmaya yol açabilirler. (Resim2.3)



Resim 2.3. Kabarmalar, Ondülasyon

Doğal zeminin şişmesi aşağıdaki durumlarda söz konusudur;

- Doğal zemindeki suyun donması ve çözülmesinden, vb. Doğal zeminin, şişme karakterine sahip olmasından,
- Temel ve granüler temel tabakalarındaki şişme ise yalnızca kendilerini oluşturan malzemelerin donmaya karşı duyarlı oldukları durumda şişmeye neden olur.

Bu tür problemlerin önlenmesi için üstyapı projelendirilmesinde don tesirinin olmayacağı bir biçimde yol güzergahının geçirilmesi, şişme potansiyeli olan tabanlarda üstyapı inşaa edilecek ise eğer drenaj, stabilizasyon gibi önlemler düşünülmelidir (5,14,15).

2.2.1.6. Lastik deseni oluşumu

Taşıtların lastik desenlerinin kaplama yüzeyine çıkmasıdır. Desen oluşmasını tam anlamıyla bir bozulma olarak nitelendirmek güçtür. Fakat meydana geldiği bölgede bir anormallik olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Ağır taşıtların uzun süreli park etmelerinden oluşursa, stabilite yetersizliğine sağlanabilir. Hareketli taşıtlar oluşturuyorsa, o kesimde kuma olduğunu ifade eder. Lastik deseni oluşmasının önlenmesi için yüksek stabiliteli karışımlar kullanmak kumayı önleyici önlemler almak gerekmektedir (3,13,14).

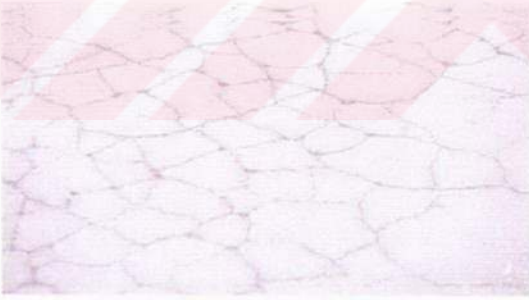
2.2.2. Çatlamalar

Asfalt kaplamalardaki çatlaklar, başlıca tekil çatlaklar ve timsah sırtı veya kümes teli olarak adlandırılan çatlaklar olmak üzere çeşitli türde ve şekilde oluşurlar. Esnek üstyapılardaki çatlaklar, trafikle ilgili olarak veya trafikle ilgili olmaksızın ortaya çıkabilirler. Trafikle ilgili çatlama, tek veya birçok dingil yükü geçişi yada dingil yüklerinin aşırı tekrar sonucu ortaya çıkar. Buna ilaveten, araçların ani hızlanma veya yavaşlamaların yol açtığı yatay kuvvetler de çatlamaya neden olabilirler. Trafikten başka, sıcaklıktaki değişimler, emici agregaların kullanımı, asfalttaki uçucu madde buharlaşması, ayrıca nem miktarındaki değişimler, çimento veya kireç ile stabilize edilmiş tabakalarda kür esnasındaki hacim değişimleri (büzülme = rötre) gibi bazı dış etkenler de çatlamaya yol açabilirler. Bu etkenler tek başlarına veya trafik etkileri ile birleşerek üstyapının çatlamasına neden olabilirler.

Ağır dingil yüklerinden hariç, taşıtların ani hızlanma ve yavaşlamaları da çatlamalara yol açabilmektedir. Çatlamalar trafik yüklerine bağlı olmaksızın sıcaklık ve nemin değişimi ile olabilirler. Bu etkiler tek başlarına veya dingil yükleri ile birleşerek kaplamayı çatlatabilir ve değişik çatlama tipleri görülebilir (3,13,14).

2.2.2.1. Timsah sırtı çatlaklar

Timsah sırtı veya kümes teline benzeyen, birçok küçük bloklar oluşturacak şekilde birbiriyle ilişkili çatlaklardır. (Resim 2.4). Genellikle stabil olmayan taban zemini ve temel tabakalarının üzerine inşa edilmiş kaplamalardaki aşırı deformasyon sonucu oluşurlar. Yeraltı suyu ve yüzey sularının doygun hale gelmesi bu oluşumda önemli bir rol oynar. Bu tür çatlaklar, genelde büyük bir alanı kapsamazlar fakat, kaplamanın taşıma kapasitesinden daha ağır trafik yükleri sonucu bazen daha geniş bir alana yayılmış olabilir. Timsah sırtı çatlaklar, yüzey yaması veya koruyucu tabakalar (seal coat) uygulanarak onarımı yapılabilir. Ağır taşıt trafiği yüzünden meydana gelen çatlaklarda ise, bu kesimlerin üzeri takviye tabakası serilerek sıkıştırılır. Düşük sıcaklıklarda, karışımın gevrekliği ve kırılmalık böyle çatlakların oluşumunu kolaylaştırır. Timsah sırtı çatlakların genel nedeni, yukarıda sayılan etkenlere bağlı olarak ortaya çıkan aşırı defleksiyonlardır. Katılığın (rijitliğin) artması nedeniyle asfalt oksidasyonu çatlamayı kolaylaştırır. Bunu önlemek için, bağlayıcı içeriği yüksek tutulmalı, ayrıca suya ve havaya karşı geçirimsizlik sağlanmalıdır (3,5,14).



Resim 2.4. Timsah sırtı çatlak

2.2.2.2. Yorulma çatlakları

Yorulma çatlakları, dingil yüklerinin aşırı tekrarına bağlı yorulma ve temel zeminin yetersiz taşıma gücüne sahip olması nedenleriyle oluşurlar. (Resim 2.5). Bu çatlaklar daha çok taşıtların tekerlek geçişleri dahilinde ortaya çıkan ve üstyapı eksenine paralel olup, uzunlukları birkaç dm. ile onlarca metre arasında değişen ince çatlaklar biçiminde

başlayarak, zamanla tekrarlanmak suretiyle küçük bloklar serisi şeklinde, birbirine bağlı timsah sırtı çatlaklara dönüşen çatlaklardır. Bu tür çatlaklar bazen bütün üstyapı yüzeyini kaplarlar.

Asfalt oksidasyonunun, bitümlü karışımın yorulma özellikleri üzerinde belirli bir etkisi vardır. Oksidasyon, karışımın katılığını (rijitliğini) artıran kohezyonu artırır. Bu durum tekerlek izi oluşumunu minimuma indirmekle beraber, özellikle ince bitümlü üstyapılı yüzeylerde yorulma çatlaklarının oluşumunu kolaylaştırır. Karışımın yorulma özelliklerini iyileştirmek için, onun iyi sıkıştırılması, (düşük boşluk yüzdesi), sert bağlayıcı kullanılması ve bağlayıcı içeriğinin optimumdan biraz daha yüksek (%1 civarında) tutulması gereklidir. Yoğun granüloметриli karışımlar da yorulma bakımından daha iyidirler (14,15).



Resim 2.5. Yorulma çatlağı

2.2.2.3. Büzülme (rötre) çatlakları

Üstyapının tüm genişliği veya bir kısmında, bazı durumlarda da tekerlek geçişlerinde, 5,0 - 2,0 m. değişken aralıklı ve periyodik olarak tekrarlanan enine yönde ince çatlaklar şeklinde başlayıp, daha sonra zamanla gelişerek ağ (mozaik - timsah sırtı) şekline dönüşen çatlaklardır. Bunların timsah sırtı yorulma çatlaklarından farkı, birbirine bağlı blokların genellikle keskin köşeli veya dik açılı ve geniş olmasıdır (14,15).

Timsah sırtı çatlamlar şeklinde ortaya çıkan çatlamlardandır. Timsah sırtı ve yorulma çatlaklarından farkı, blokların büyük olması ve çatlakların çıkış noktalarında daha önce oluşmuş çatlaklarla dik açı oluşturmalarıdır. Çatlakların genişliği oluşma zamanı hakkında fikir verir, dolayısıyla en geniş çatlaklar ilk oluşan çatlaklardır. Büzülme çatlakları asfalt betonunun kendi içinde yada temel veya tabandaki hacim değişimleri sonucunda oluştuğu belirtilmiştir (3,13,14).

2.2.2.4. Kenar çatlakları

Genellikle banketlerin sağladığı yanal destek yetersizliği nedeniyle kaplama kenarından yaklaşık 30 cm kadar içeride oluşan boyuna çatlaklar ile banket arasındaki enine çatlaklardan meydana gelir. Bir diğer neden de, çatlayan kısmın altında bulunan malzemede oluşan oturma ve çökmedir. (Resim 2.6) Malzemedeki oturma ve çökme ise yetersiz drenaj, don kabarmaları veya civardaki zeminin büzülmesi gibi nedenlerle meydana gelir. 3 mm'den daha dar kenar çatlakları iyice kapatılmaz. Daha geniş çatlaklar ise asfalt emülsiyonlu akıcı harç ile veya ince-kum sıvı asfalt karışımı ile doldurulabilirler (5,13).



Resim 2.6. Kenar çatlakları

2.2.2.5. Yansıma çatlakları

Bunlar, alttaki üstyapısında bulunan çatlak şeklini yansıtan, asfalt takviye tabakalarındaki çatlaklardır. Bu tür çatlaklar genellikle, portland çimentosu betonu ve çimento veya kireçle stabilize edilmiş temeller gibi rijit ve yarı rijit tabakalar üzerine yapılan asfalt betonu üstyapılarda oluşurlar. Yansıma çatlakları, yüzey dağılmasının kaynağı olabilirler. Takviye tabakası altında yer alan üstyapıda ki yatay ve düşey hareket nedeniyle oluşurlar. Bu harekete, trafik, sıcaklık değişimleri nedeniyle genleşme ve büzülme, yüksek kil içerikli altyapılardaki nem kaybı veya sıralanan bu etkenlerin bileşimi yol açar. Yansıma çatlakları, kalın bir yüzey tabakası (min 10cm.) yaparak veya üstyapı altı ve yüzey tabakası arasında bir çatlak tahliye tabakası (açık granülometreli bir karışım) oluşturarak önlenebilirler (13,15).

2.2.2.6. Kayma çatlakları

Kayma, yanıl hareket veya bir üstyapı tabakasının diğerine göre göreceli yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Genellikle asfalt üstyapı agrega temel tabakası üzerinde veya asfalt yüzey tabakası asfalt binder tabakası üzerinde kayar. Kaplama yüzeyi üzerinde çoğunlukla motorlu taşıt tekerleklerinin itme tesiri yönünü belirten ay şeklindeki çatlaklardır. Bu çatlaklar, bazen de iniş eğimli bir yolda fren uygulandığı zaman tekerleklerin itme gücü tersi yönünde belirir. Kayma çatlakları genel olarak, tekerleklerin yüzey üzerindeki itkisi yönündeki noktada, parabolik şekillidirler. Bazen, özellikle iniş kesimlerinde itki tersine döner ve çatlaklar çıkış eğimli noktada meydana gelirler. Kayma çatlaklarına, yüzey tabakası ve alttaki tabaka arasındaki bağlantı eksikliği neden olur. Düşük gerilme direncine sahip asfalt betonu karışımlarda kayma çatlakları daha kolay oluşurlar. Kayma çatlakları, yol kaplaması ile bunun altındaki tabakalar arasında toz, yağ, su ve benzeri gibi yapışmayı önleyen malzemenin bulunmasından kaynaklanır. Bozulan kesimlerin sökölüp yeniden yapılması büyük masraf gerektirmektedir (3,5,14).

2.2.3. Ayrışmalar

Agrega tanelerinin iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıdır. Ayrışma, asfalt betonu kaplamalı karayollarımız da çok sık görülen bir bozulmadır. Ayrışmaya yol açan nedenler:

- 1-) Bağlayıcının (asfaltın) mekanik etkiyle kopması,
- 2-) Karışım kalitesinin düşük olması,
 - Düşük asfalt yüzdesi
 - Çok az veya çok fazla filler yüzdesi
 - Kirlili ve zayıf agrega kullanılması.
- 3-) Yüzey tabakasının ince olması,
- 4-) Granüler alttemel ve temele tabandan kil yükselmesi,
- 5-) Drenaj yetersizliği,
- 6-) Yetersiz sıkıştırma,
- 7-) Nemli ve soğuk havada yapım,
- 8-) Plentte (karışımın hazırlandığı santral) asfaltın aşırı ısıtılması,
- 9-) Yapım sırasında segregasyon oluşması,
- 10-) Ayrışmayı kolaylaştıracak derecede kuma oluşması,
- 11-) Kimyasal maddelerin (özellikle tuz ve yağların) etkisi,
- 12-) Yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmaması,
- 13-) Su ve kil etkisi ile soyulma.

Bu nedenlerin hiçbirisi tek başına ayrışmayı başlatmaz. Ayrışma bunlardan bir kaçının bir arada bulunması halinde trafiğin mekanik etkisiyle başlar. Ayrışma olayı zamanla artar. Kaplamanın ömrünün kısaltır ve yolun seyir konforuyla seyir güvenliğini azaltır. Başlıca ayrışma tipleri aşağıda verilmiştir (3,14).

2.2.3.1. Çanak şekilli (folluk) çukurlar

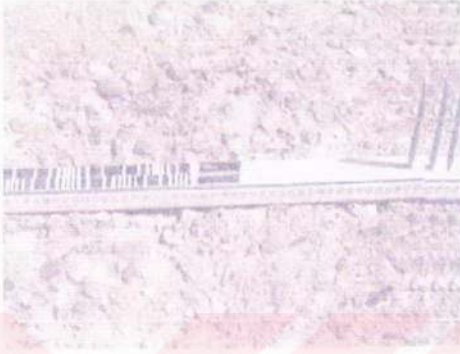
Resim 2.7’de görüldüğü gibi takriben 25-75 cm çapında dairesel, folluğu andıran oyuklardır. Yukarıda sayılan nedenlerden ilk altısı bu tip bozulmaların oluşumunda önemli rol oynar. Folluk tipi oyuklar kaliteli bağlayıcı ve karışım kullanılması, trafiğin gerektirdiği üst yapının inşası, drenaj, özenli yapım özellikle yeterli sıkıştırma ile önlenebilir (3,5,13).



Resim 2.7. Çanak şeklinde çukurlar

2.2.3.2. Sökülmeler

Mıcır tanelerinin yerlerinden ayrılmasıyla, satıhtan aşağıya yada kenardan içe doğru gelişen bozulmalardır (Resim 3.8). Yapım sırasındaki sıkıştırma eksikliği, yağışlı ve soğuk havada yapım, kirlı veya dağılan agrega kullanımı karışımındaki asfalt içeriğinin düşük olması ve asfalt karışımının aşırı ısıtılması sökölme tipi bozulmaların olası nedenleridir. Asfaltın, oksidasyon, polimerizasyon gibi nedenlerle yaşlanması, sökölmenin oluşumunda önemli rol oynar. Sökölme direnci asfaltta bir dayanıklılık ölçüsüdür.



Resim 2.8. Sökülme

Tabaka halinde sökûlmeler, yüzey tabakasının ince olması, alt tabaka ile yüzey tabakası arasında yapıştırma tabakası kullanılmaması ve yapıştırmanın yetersiz olması nedeni ile oluşan bozulmalardır. Daha ziyade derz çatlakları civarında oluşur (14,15).

2.2.3.3. Soyulma

Agrega danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisi ile agregadan ayrılması ve dolayısıyla agregada tanelerinin çıplak kalması durumudur. Soyulma, sürekli gronülometreli, pratik anlamda geçirimsiz kaplamalarda çok az görüldüğünden, asfalt betonu kaplamalı karayollarımızda bugün için büyük bir sorun değildir (Resim 2.9).

Bu tür bozulma, temiz ve kuru agregalar, iyi yapışıcı özelliklere sahip ve yüksek vizkoziteli (sert) asfaltların kullanımı ve asfalt içeriğinin yüksek tutulması ile en aza indirilir. Yapılan araştırmalar portland çimentosu, kireç ve bazı kimyasal maddeler gibi bir takım katkı maddeleri soyulma direncini artırdığını ifade etmektedir (3,13,14).



Resim 2.9. Soyulma

Kayganlık, kaplamanın taşıtların aşındırma etkisi ya da kasma nedeni ile kayma direncinin azalması, başka bir deyişle, sürtünme katsayısının düşmesidir. Özellikle kaplamanın ıslak olması halinde ve yüksek hızlarda seyir güvenliğini büyük ölçüde azaltması nedeni ile önemli bir bozulma tipidir. Kayganlık daha ziyade yüzeydeki agregaların cilalanması ile oluşur. Ancak kasma gösteren kesimlerde kaygan olabilir

2.2.3.4. Cilalanma

Agregaların aşınarak pürüzlülüklerini kaybetmesidir. Özellikle kalkerden elde edilenler 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 60-80 km/h'dan yüksek hızlarda kaymalara neden olabilir. Yüzey tabakalarında kullanılacak agregaların cilalanma özellikleri bakımından dikkatle seçilmesi gerekir (Resim 2.10)



Resim 2.10. Cilalanma

2.2.3.5. Kuma

Karışım içindeki asfaltın sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması ve yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşturması durumudur. Kuma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen asfalt filmi ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir (Resim 2.11)



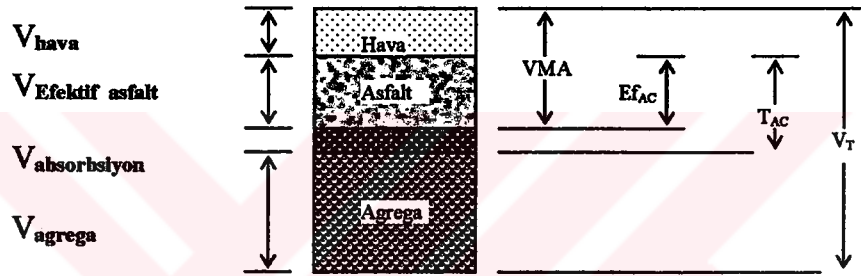
Resim 2.11. Kuma

Kuma daha ziyade asfalt yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yüklen altında da asfalt yüzeye çıkabilir. Asfalt yüzdesi optimum olmakla beraber, karışımda boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genişleyen ve boşluk bulamayan asfalt yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar veya yapıştırma tabakaları da kumaya sebep olabilir. Karayollarımızın bakım görmüş

kesimlerde sık görülen kuma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri konusunda dikkatli olmak sureti ile önlenebilir (5,13,14).

2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

Bilindiği üzere bitümlü sıcak karışımlar, hava bitüm ve agregadan oluşmaktadır. Şekil 2.1'deki gibi bir kombinasyonda gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.1. Bitümlü sıcak karışım kompozisyonu

Asfalt betonu dizaynı, kırılmış ve elenmiş kaba agregat, ince agregat ve mineral fillerin belli gradasyon limitleri arasında işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak yeterli temeller veya diğer bitümlü kaplamalar ile beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak ve projesindeki plan, profil ve enkesitlere uygun olarak asfalt betonu kaplama yapılmasından ibarettir.

Asfalt betonu karışımına giren kaba agregat, ince agregat ve mineral filler ile bitümlü malzemede aranan özellikler, gradasyon limitleri, işyeri karışım esasları, inşaat metodu, arazi ve laboratuvar kontrolleri ve diğer şartlar şartnamelerde verilen esaslara uygun olmalıdır (4).

2.3.1. Agregalar

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın, kökeni (magmatik, tortul, metamorfik) ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekir. Ancak aranan bütün koşulları sağlayan bir agregalar karayolu üstyapısında kullanılabilir. Agregalar boyutlarına göre üç grupta incelenir.

- a) Kaba agregalar: No4 (4,76 mm) elek üzerinde kalan
- b) İnce agregalar: No4 (4,76 mm) - No200 (0,074 mm) arası
- c) Mineral filler: No200 (0,074 mm) den geçen

Bu üç grup malzemenin her biri, bitümlü karışımın ayrı ayrı özelliklerini kontrol eder. Bitümlü karışımındaki iri agregalar yüzdesi % 40-50'ye çıkarılırsa, iki agregalar karışımının mekanik direncini artıran bir iskelet oluşturur, böylece karışımın direncinde önemli bir artış hissedilir, ince agregaysa iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. Bu arada ince agreganın satır dokusu da önemlidir. Örneğin; pürüzsüz bir çakıl kumu daha düşük bir deformasyon direnci sağlar, mineral filler toplam agreganın çok küçük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde rol oynar. Mineral filler, 0,074 mm'lik elekten geçen agregalar malzemesidir. Ancak 0,074 mm'den daha ince olan bütün malzemeler filler görevini görmezler. Mineral filler düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalıdır. Tanelerin şeklide önemlidir, yassı düz ve uzun tanelerin yüzdesinin artması fillerin özelliğini düşürür. Filler bitümlü malzemeyle reaksiyona girmemelidir. Mineral filler taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu sönmüş kireç ya da benzeri maddelerde oluşacak kil, toprak, organik ve zararlı madde kapsamayacaktır (5).

2.3.2. Bitümlü bağlayıcılar

Bitüm (Bitümen) deyiminin orijini ise Sanskritçe'dir. Sanskritçe'de zift (Pitch) anlamındaki Jatu, "Mamul Zift" anlamındaki "Jatu-Krit" den gelmektedir, Latince'de bunun karşılığı "Zifte Ait" anlamındaki "Guitu-men" sözcüğü orjin olup, diğer bir deyimle "kaynamış zift"

anlamındaki Pixumen sözcüğü giderek Bitümen şeklinde İngilizce ve Fransızca dilinde benimsenmiş ve kullanıla gelmiştir (16).

Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya projenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin de bir kombinasyonu olup çok defa bunların gaz, sıvı, yan-katı veya katı olabilen, metal-dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbon disülfürde tamamen çözünen madde olarak tanımlanır.

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak iki kısma ayrılırlar; asfaltlar ve katranlar. Çeşitli tip bitümlü bağlayıcılar arasında kökenlerine ve hazırlama yöntemlerine göre önemli farklar vardır (7).

2.3.2.1. Bitüm

Bitüm, genel olarak doğal kaynaklıdır. Koyu kahve renkten siyaha kadar değişen, kuvvetli bağlayıcı özelliği olan, kıvamlılık bakımından katı, yarı katı veya sıvı olabilen, doğal halde bulunan veya ham petrolün arttırılmasından elde edilen ve başlıca hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir. Dünyada en zengin bitüm kaynağı hiç kuşkusuz ham petroldür. Bunun yanında jeolojik kuvvetlerin etkisiyle, bazı doğal olaylarla petrolden meydana geldiği kabul edilen ve çoğunlukla mineral agrega ile karışmış halde bulunan tabii asfaltlar da gözden uzak tutmamak gerekir. Bundan başka diğer bir zengin kaynak da, katranların temin edildiği kömür ve linyitlerdir. Kömür ve linyitin oluşumu hakkında tartışma söz konusu olmamakla beraber, petrolün oluşumu için çeşitli teoriler ortaya atılmıştır. Kesin olan husus, petrol oluşumunun anorganik teoriye dayanmasıdır. Kimyasal yapısı organik olan petrolün son zamanlarda kabul edilen oluşumu hayvansal teoriye dayanmaktadır. Bu teoriye göre milyonlarca yıl süren bakteri faaliyeti ile özellikle deniz hayvanlarının yüksek ısı ve basınç altında, bitki birikimlerinin örtülmüş olduğu çok ince mineral taneciklerin katalitik etkisi ile petrole dönüşmüş olmasıdır. Pratikte, petroller kimyasal yapıları ve fiziksel görünümlerinin farklılığı nedeniyle, parafinik ve asfaltik bazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar:

- Asfaltik bazlı petrollerde bitüm nispeti çok yüksek olup, büyük molekül ağırlıklı aromatik ve naftenik yapıdaki hidro-karbonatlardan teşekkül etmiştir (Kafkas ve Asya petroleri gibi).
- Parafinik bazlı petroler ise, basit parafinik bileşikler ile molekül ağırlığı büyük alifatik parafinleri ihtiva ederler (Amerika petroleri gibi).

Asfaltlar kökenlerine göre doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar diye iki gruba ayrılabilir. Ancak doğal asfaltları da çok defa kullanılabilir hale getirmek için bir takım işlemlerden geçirmek gerekir. Doğal asfaltlar doğada genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar. Trinidad adasında bir asfalt gölü vardır. Bu göl yaklaşık 100 metre derinlikte olup geniş bir alanı kaplamaktadır. Buradan elde edilen asfaltın içinde %35 kadar mineral malzeme bulunur. Bunun gibi Amerika'da Los Angeles yakınlarında La Brea'da da buna benzer doğal asfalt vardır. Çok rastlanan bir doğal asfalt şekli de kaya asfaltları daha çok kum taşı, kalker, kil vb. mineral maddeler ile % 2-3 civarında asfaltın karışımından oluşmuşlardır. Yapay dediğimiz asfaltlar ise ham petrolün artılmasından elde edilirler. Petrol kuyularından çıkarılan ham petrol rafineriye gelir. Buradan pompalarla tanklara boşaltılır. Oradan ısıtma kulelerine gönderilerek sıcaklığı yükseltilecek ham petrol daha sonra damıtma kulelerine gelir. Kolay uçucu olan kısımlar bu kulelerin üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaşarak ayrılır. Bunlar hafif ürünleri oluştururlar. Daha az uçucu olanlar aynı şekilde orta ürünleri, en ağır uçanlar ise ağır ürünleri meydana getirirler.

Başlıca asfaltı içeren kalıntı ise kulenin dibinde birikir. Bu şekilde ham petrol başlıca beş kısma ayrılmış olur.

- Benzin (gazolin)
- Gaz Yağı (Kerosen)
- Dizel Yağları (Mazot)
- Yağlama Yağları
- Ağır kalıntı maddeleri

Bunların hepsine gerektiğinde tekrar damıtma işlemi uygulanarak daha değişik petrol ürünleri elde edilebilir. Kalıntı maddelerinin daha ileri damıtılmasından SC sınıfı yol yağları elde edilir. Geride asfalt çimentosu kalır. Şartların değiştirilmesi ile istenilen penetrasyonda

asfalt çimentosu elde edilebilir. Fuel Oil dediğimiz maddeler de kalıntı maddelerden elde edilir. Ham petrolden damıtma yolu ile elde edilen benzinin miktarı azdır. Bu sebeple petrol endüstrisinde benzinin hem kalitesini yükseltecek hem de miktarını arttıracak bir takım yöntemleri geliştirilmiştir. Kraking yöntemi böyle bir yöntemdir. Kraking, kaynama noktası yüksek ürünler ile damıtma kalıntılarından benzin gibi düşük kaynama noktalı ürünlerin elde edilmesi işlemi olarak tanımlanabilir (7).

2.3.2.2. Bitümlerin sınıflandırılması

2.3.2.2.1. Asfalt çimentoları

Yol üst yapılarında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. Akıcı hale gelebilmesi için ısıtılması gereken asfalt çimentosu AÇ sembolü ile gösterilir. Asfalt çimentoları penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılır. Asfalt çimentosunun kıvamliliğini belirleyen penetrasyonu 10-300 arasında değişir. Asfalt çimentosu sıvı petrol asfaltları ve asfalt emülsiyonlarının ana maddesidir.

Asfalt çimentoları penetrasyon derecelerine göre şu sınıflara ayrılırlar:

10-20	Penetrasyonlu AÇ
20-30	Penetrasyonlu AÇ
30-40	Penetrasyonlu AÇ
40-50	Penetrasyonlu AÇ
60-70	Penetrasyonlu AÇ
75-100	Penetrasyonlu AÇ
120-150	Penetrasyonlu AÇ
150-200	Penetrasyonlu AÇ
200-300	Penetrasyonlu AÇ

Bu çeşitli penetrosyondan derecelerinin elde edilmesi petrolün arıtılması sırasında belirli koşulların yerine getirilmesi ile mümkün olur (7,9).

2.3.2.2.2. Okside asfalt (Blown asfalt)

Arıtma işlemi sonunda ele geçen kalıntı içerisinde hava geçirerek yarı,katı asfaltlara yeni özellikler kazandırabilir. Bu iş için normal damıtma, kalıntı henüz sıvı iken kesilir. Bu sıvı kalıntı ayrı bir tanka alınır ve yüksek sıcaklıkta tutularak içerisinde hava geçirilir. Böylece çok sert olan blown asfaltlar elde edilir.

Okside asfaltlar genellikle kaplamalarda kullanılmaz. Daha özel amaçlar için yalıtım işlerinde, elektrik, otomobil veya boya sanayiinde kullanılır (7).

2.3.2.2.3. Sıvı petrol asfaltları

Bunlar çabuk kür olan RC sınıfı, orta hızda kür olan MC sınıfı veya yavaş kür olan SC sınıfı sıvı petrol asfaltları olmak üzere üçe ayrılırlar. Ayrıca her sınıf da kendi arasında kinematik viskozite değerlerine göre tiplere ayrılır. RC, MC ve SC harflerinden sonra konulan sayılar o tipin kinematik viskozitesinin alt sınırını gösterir. Bu sayılar asfaltın kıvamlığının artması yani viskozitesinin yükselmesi ile büyür. Örneğin bir MC-30 sıvı petrol asfaltı, MC-3000'e göre çok daha ince ve akıcıdır. (Çizelge 2.3)

Çizelge 2.3. Sıvı petrol asfaltı tipleri

Yavaş Kür Olanlar	Orta Hızda Kür Olanlar	Çabuk Kür Olanlar
	MC-30	
SC-70	MC - 250	RC-70
SC - 250	MC - 250	RC - 250
SC - 800	MC - 800	RC - 800
SC-3000	MC - 3000	RC - 3000

Ayrıca sıvı petrol asfaltları asfalt malzemesi ve çimentolu temel tabakalarının yüzeyinde kür malzemesi olarak kullanılırlar (7,17).

2.3.2.2.4. Çabuk kür olan (RC) sıvı petrol asfaltları

Asfalt çimentosu ile kaynama noktası düşük olan, yani kolay uçan bir çözücü (örneğin, benzin veya nafta) karıştırılır. Bu sınıftaki sıvı petrol asfaltlarının kıvamlılık derecesi, asfalt çimentosuna katılan çözücünün miktarına bağlıdır. Örneğin RC-70 yapmak için yaklaşık %55 asfalt çimentosuna, %45 oranında çözücü katmak gerekirken, RC-3000 için %85 asfalt çimentosuna %15 çözücünün karıştırılması gerekecektir. Viskozite, katılan çözücünün miktarı ile değişeceğinden, RC sınıfındaki sıvı petrol asfaltlarından en düşük viskozitede olanı, yani en akıcı olan RC-70, en yüksek viskoziteli olanı yani en kıvamlısı RC-3000'dir. RC sınıfı asfaltlar yolda kullanıldıkları zaman çözücülerini süratle uçarak geride asfalt çimentosu bırakırlar (7,11,17).

2.3.2.2.5. Orta hızda kür olan (MC) sıvı petrol asfaltları

Asfalt çimentosu ile orta derecede uçucu bir çözücünün (örneğin gazyağı) karıştırılması ile elde edilir. Bu sınıftan bir asfalt yola püskürtüldüğü veya agrega ile karıştırıldığı zaman (RC) sınıfında olduğu kadar çabuk kür olmaz. Bunların viskoziteleri MC-30 dan MC-3000'e kadar değişir. Bunlar ya asfalt çimentosunun kaynama noktası yüksek bir yağ ile karıştırılmasından veya doğrudan doğruya ham petrolün damıtılmasından elde edilirler (7,11,17).

2.3.2.2.6. Asfalt emülsiyonları

Geniş anlamda emülsiyon, birbiri içerisinde çözilemeyen iki sıvıdan birinin diğeri içerisinde küçük küre tanecikleri halinde homojen olarak dağıtılmasıdır. Asfalt emülsiyonları da asfalt çimentosu küreciklerinin su içinde dağılmasından oluşur. Bitümün su içerisinde dağıtılması sadece mekanik bir işlemle (karıştırma) sağlanabilir. Ancak bu şekilde meydana gelen emülsiyon uzun ömürlü olmaz ve kısa bir süre sonra asfalt kürecikleri birbirlerine yapışarak sudan ayrılırlar. Bu durumu önlemek amacı ile bazı katkı maddeleri kullanılır. Bu katkı maddelerine emülgatör (emülsiyon verici madde) denir. Emülgatör, asfalt küreciklerin çevresini bir film halinde sararak onların kendi aralarında birleşik çözümlerine engel olurlar.

Yol üst yapılarında kullanılan asfalt emülsiyonları emülgatörün cinsine bağlı olarak şu sınıflara ayrılırlar:

- Anyonik Asfalt Emülsiyonları
- Katyonik Asfalt Emülsiyonları

Bir asfalt emülsiyonu agrega ile karıştırıldığı veya bir yolun yüzeyine püskürtüldüğünde emülsiyon kesilir, yani asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agregaların üzerine yapışırlar. Bu arada serbest kalan su da buharlaşır. Yol üst yapılarında kullanılan asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre;

- Çabuk kesilen (RS)
- Orta hızda kesilen (MS)
- Yavaş kesilen (SS) olmak üzere üçe ayrılırlar. Asfalt emülsiyonlarının viskozitelerine göre türleri Çizelge 2.4’de verilmiştir (7,9,11,17).

Çizelge 2.4. Asfalt emülsiyonlarının viskozitelerine göre türleri

Çabuk kesilenler (RS)	Orta hızda kesilenler (MS)	Yavaş kesilenler (SS)
RS-1	MS-1	SS-1
RS-2	MS-2	SS-1h
CRS-1	CMS-2	CSS-1
CRS-2	CMS-2h	CSS-1h

2.3.2.2.7. Katran

Katran başlıca kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Genellikle katran bu şekli ile değil, arıtıldıktan sonra kullanılır. Kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir. Katran, ya metalurjik amaçlar için kok elde edilmesi veya havagazı üretimi için kömürün kuru olarak damıtılması sırasında bir yan ürün olarak elde

edilir. Damıtma için kömür, özel imbiklerde birkaç saat 1000°C'da ısıtılır. Bu işlem sırasında bir takım gazlar çıkar ve kömür, kok haline gelir. Çıkan gazlar bu buharlar soğutulursa ham katran yoğunlaşarak ayrılır. Bu şekilde elde edilen ham katranın içinde benzol gibi kıymetli çözücüler, bir takım boya ve plastik ana maddeleri ile kimyasal maddeler bulunur. Bu nedenle bunlar ayrılmadan ham katran kaplamalarda kullanılmaz. Ham katran içinde çok miktarda su bulunduğundan suyun uzaklaştırılması gerekir.

Bu ikinci damıtma işleminde, ham katran önce ısıtılarak suyu giderilir. Bu arada bir miktar benzol de elde edilir. Daha ileri ısıtma ile, kaynama noktaları farklı bir takım yağlar elde edilir. Damıtma işlemine göre 360°C ye kadar devam edilirse geride sadece zift kalır. Bu oldukça sert bir maddedir ve kaplamada kullanılamaz. Bu nedenle damıtma daha erken kesilir ve zifte oranla yumuşak bir katran elde edilir, ya da damıtma zift elde edilene kadar sürdürülür. Bu zifte yine damıtmadan elde edilen hafif veya ağır yağlardan (naftalin yağı, yıkama yağı, antrasen yağı) uygun oranlarda katılarak istenilen kıvamda yol katranı elde edilir.

RT Sembolü ile gösterilen yol katranları kıvamlıklarına göre;

RT-1, RT - 2, RT- 3, RT - 4, RT- 5, RT - 6, RT- 7, RT - 8, RT- 9, RT - 10, RT- 11, RT - 12, RTCB- 5 ve RTCB - 6 olmak üzere 14 sınıfa ayrılırlar. Burada da sıvı petrol asfaltlarının sınıflandırılmasında olduğu gibi numara büyüdükçe kıvamlılık artar. Bu sınıflardan RT - 1, RT - 2, RT - 3 ve RT - 4 sınıfına giren katranlar özellikle astar uygulamalarında ve sathi kaplamalarda; RT - 5 ve RT - 6 sınıfına giren katranlar genellikle sathi kaplamalar, yolda yapılan karışım tipi (rodmiiks) kaplamalarda; RT - 7, RT - 8 ve RT -9 sınıfına giren katranlar genellikle sathi kaplamalar, yolda yapılan karışım tipi kaplamalar, tesislerde hazırlanan karışımlar ve koruyucu tabakalarda; RT - 10, RT - 11 ve RT - 12 sınıfına giren katranlar genellikle yüzeysel kaplamalar, tesislerde hazırlanan karışımlar, penetrasyon tipindeki uygulamalar, çatlak doldurma işlemleri ve koruyucu tabakalarda; RTCB - 5 ve RTCB - 6 sınıfına giren katranlar da genellikle yama işlemleri ve sathi kaplamalar ile uygulamanın düşük sıcaklıklarda ve çabuk sertleşmenin istendiği hallerde kullanılır.

Asfalt emülsiyonunda olduğu gibi katranlarda su ile karıştırılarak katran emülsiyonları yapılabilir (7,9,16,17).

2.4. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Aranılan Özellikler

Değişik iklim şartları ve trafiğin etkisi nedeniyle asfalt betonu karışımların ömürleri diğer mühendislik yapılarına göre daha azdır. Bu nedenle, asfalt betonu karışımların dış tesirler altında bozulmadan hizmet verebilmesi için değişik özelliklere sahip olması gerekir. Bunlar ;

2.4.1. Stabilite

Stabilite terimi mukavemet ile yakından ilgili olup bitümlü sıcak karışımlardan imal edilen yol kaplamalarının trafik yükü altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılır. Yani bitümlü sıcak karışımın stabilitesi ne kadar düşük olursa trafik yükleri altında oluşabilecek deformasyonda o kadar fazla olacaktır. Ancak çok düşük stabilite ne kadar istenmez ise çok yüksek stabilite de o kadar zararlıdır. Çünkü çok yüksek stabiliteli (yani çok sert veya rijit veya gevrek) bitümlü karışımlar gerilmelere maruz kaldığında fleksibil davranış gösteremeyip kaplamada çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların stabilitesine etki eden hususlar kayma mukavemeti, ısı ve eylemsizlik direnci olarak göz önüne alınır (4,6,8,11).

2.4.1.1. Karışımın kayma mukavemeti

Bitümlü sıcak karışımların kayma mukavemeti, Formül 2.1'deki gibi tanımlanabilir. Burada ϕ , agrega taneleri arasındaki sürtünmeden ve kilitlenmeden kaynaklanan içsel sürtünme açısıdır, c ise kohezyon olup agrega ile asfalt arasındaki adezyon yani bağ kuvvetini ifade etmektedir. Dolayısıyla içsel sürtünmeden agrega ve kohezyondan ise asfalt sorumlu olmaktadır. Asfalt karışımların stabilitesi başlıca;

- Statik veya çok yavaş hızlarda, agreganın sürtünme direnci
- Yüksek hızlarda asfaltın kohezyonu ve kütleli viskozite

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad [2.1]$$

tarafından belirlenir. İçsel sürtünme direnci (veya agrega taneleri arasındaki sürtünme) ne kadar yüksek olursa deformasyona karşı direnç de o kadar fazla olacaktır. Özellikle yüksek ısılarda ve yavaş trafik hızlarında (veya uzun yükleme süresinde) stabilitenin sağlanmasından tek sorumlu olan agreganın içsel sürtünme direncidir. Ancak düşük ısılarda ve hızlı yüklemelerde (veya çok kısa etki süresinde) kohezyonun etkisi oldukça büyüktür. Agreganın içsel sürtünme direnci;

- Tanelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kırılmışlığı arttıkça
- Karışımın boşluğu azaldıkça önemli bir artış göstermektedir.

Kohezyon, agregayla asfalt arasındaki adezyon kuvvetini ve asfaltın deformasyona karşı gösterdiği direnci ifade eder. Kohezyon genel olarak;

- Agreganın absorpsiyonu ve porozluğu arttıkça
- Asfalt miktarı arttıkça (optimum asfalt yüzdesine kadar)
- Asfaltın viskosluğu arttıkça veya penetrasyonu düştükçe
- Asfaltın ısısı azaldıkça
- Yükleme hızı arttıkça
- Karışım ve serme-sıkıştırma ısısı arttıkça
- Filler/asfalt oranı azaldıkça

önemli bir artış göstermektedir (4,6,8,11).

2.4.1.2. Isının etkisi

Isının stabilite üzerindeki etkisi aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Karışımın ısısı arttıkça agreganın asfalt absorpsiyonu artacağından agrega/asfalt adezyonu artarak karışımın stabilitesi artmaktadır. Zira karışım ısısı arttıkça asfaltın viskosluğu azalmakta ve dolayısıyla agrega daha kolay asfaltı absorbe ederek daha güçlü adezyon ile daha yüksek stabilite elde edilmektedir.

- Karışım ısısı arttıkça asfaltın viskozluğu düşerek karışımın sıkışmaya karşı direnci azalmakta ve dolayısıyla daha kolay ve daha iyi sıkışma ile karışımın yoğunluğu artacağından dolayı daha yüksek stabilite elde edilmektedir. Bu iki nedenden ötürü karışım ve sıkıştırma ısıları şartnamede belirtilen minimum değerlerden az olmamalı, soğuk ve özellikle rüzgarlı havalarda asfalt kaplama inşaatı kesinlikle yapılmamalıdır. Ayrıca;
- Asfalt termoplastik malzeme oluşu nedeniyle ısı arttıkça viskozluğu azalmaktadır. Özellikle yaz aylarında asfalt ısıyı absorbe ederek deformasyon direnci büyük ölçüde azalmaktadır. Gerçekten de kaplamada teker izi, lastik paterni, ondülasyonlar, ötelenme vb. kalıcı deformasyonların oluşumunda yüksek hava ısısı en önemli sebeplerden biridir.
- Düşük ısılarda asfaltın viskozluğu artarak sertleşir. Sertleşme aşırı artarsa trafik yükleri altında oluşan çatlaklar kaplamanın kütsel ayrışmasına ve dolayısıyla stabilitesinin düşmesine neden olur. Esnek kaplamalarda çok sık karşılaşılan düşük ısı çatlakları asfaltın sertleşmesinden kaynaklanmaktadır.
- Isı arttıkça karışımın kohezyonu azalarak stabiliteside azalmaktadır (7,8,11).

2.4.1.3. Eylemsizlik direnci

Eylemsizlik direnci, bitümlü karışım kütsesinin trafik yükleri altında yer değiştirmeye (ötelenmeye) karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Genel olarak;

- Yüknün miktarı azaldıkça
- Yükleme hızı arttıkça
- Kaplamanın kalınlığı arttıkça eylemsizlik direnci artmaktadır.

Sonuç olarak;

- Agreganın pürüzlülüğü ve köşeliliği arttıkça
- Agreganın yoğunluğu (kompasitesi) arttıkça
- Asfalt miktarı optimumda veya optimumun bir miktar altında iken karışımın yoğunluğu (sıkıştırma) arttıkça
- Karışımın boşluk oranı azaldıkça
- Agreganın penetrasyonu azaldıkça yani katılaştıkça
- Isı azaldıkça ve yükleme hızı arttıkça
- Kaplama kalınlığı arttıkça

bitümlü sıcak karışımların stabilitesi de artmaktadır.

Stabilite, bitümlü karışımların kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olduğundan kalıcı deformasyonların tespit edilmesi gerekir. Bunun için de karışımın düşük rijitliği yani yüksek ısılarda veya uzun süreli (veya yavaş hızlardaki) gerilmeleri göz önüne alınır. Bitümün rijitliği 5×10^6 (N/m²)'den daha az ise karışımın davranışı elastik davranışından daha karmaşıktır. Zira karışımın yüksek rijitlik modülü, bitüm rijitliğinin ve agregada içindeki boşluk miktarının bir fonksiyonu iken düşük rijitlik modülü ise bitüm rijitliğinin, agregada içindeki boşluk miktarının, agreganın (biçim, gradasyon, yüzey yapısının kilitleme, vb.), kompaksiyonun (boşluk miktarı, kompaksiyon metodu, vb.) ve yanal deplasmanın fonksiyonudur. Görüldüğü gibi, kalıcı deformasyonu yaratan düşük rijitlik, yüksek ısı ve uzun süreli yükleme şartlarına ilaveten daha karmaşık şartlara bağlı olarak değişmektedir.

- Kaplama kalınlığını tabakalara ayırarak (aşınma, binder, bitümlü temel gibi) deformasyonlar hesaplanmalı ve toplamı deformasyon miktarı göz önüne alınmalıdır. Sonuç olarak, sıcak bitümlü karışımların stabilitesi son derece karmaşık olup belirli bir değerle belirleyebilmek mümkün olamamaktır. Ancak birtakım testler (Örneğin; Marshall, Hveem, vb.) ile relatif bir stabilite değeri tayin edilmektedir (7,8,9).

2.4.2. Rijitlik

Bitümlü sıcak karışımlar viskoelastik malzemeler olup mekanik özelliklerini belirlemek için "Rijitlik Modülü" kullanılmaktadır. Rijitlik modülü, elastik malzemelerin elastikiyet

modülüne benzemekle beraber ısı ve yükleme hızına bağlı olarak Formül 2.2 ile saptanır. Dolayısıyla rijitliğe etki eden faktörler;

$$S(t,T) = \sigma / \varepsilon \quad [2.2]$$

- Isı (T)
- Yükleme süresi (t) veya hızı

olup karışıma giren malzemelerin temel özellikleri ikinci derecede rol oynamaktadır. Rijitlik, bitümlü sıcak karışımların yükleme süresi (veya hızı) ve ısı etkisi altında gerilme ve deformasyon arasındaki ilişkinin ifadesidir. Yani rijitlik genel olarak;

- Yükleme süresi azaldıkça (veya yükleme hızı arttıkça)
- Isı azaldıkça
- Karışım yoğunluğu arttıkça
- Asfaltın penetrasyonu azaldıkça artacaktır.

Rijitlik modülü son yıllarda geliştirilen testler ve bunların önerdiği test cihazları ile tayin edilebilmektedir. Ancak standart Marshall testi ile de karışımın rijitlik modülü hakkında bilgi edinilebilir (4,7,8).

2.4.3. Dayanıklılık (Durabilite)

Bitümlü sıcak karışımların durabilitesi, trafik ve çevre şartlarının aşındırma etkisine karşı koyması (direnc göstermesi) olarak tarif edilir. Yani asfaltın özelliklerinin değişmesi (yaşlanma-sertleşme), agrega tanelerinin kırılması, ufalanması, ve asfaltın soyulması gibi etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Dayanıklılık genel olarak;

- Yüksek asfalt oranı
- Sert asfalt (düşük penetrasyonlu) ve kalın film tabakası
- Yüksek soyulma direnci

- İyi sıkışma (düşük boşluk oranı ve permabilite)
- Yoğun gradasyon

ile artış gösterir. Yukarıdaki şartlar sağlanırsa geçirimsizlik artarak karışımın içine daha az hava ve su gireceğinden durabilite de artacaktır. Zira hava ve su asfaltın oksidasyonunu hızlandırarak asfaltın sertleşmesine (yaşlanmasına) neden olur. Asfalt film tabakası ne kadar kalın olursa zaman içindeki sertleşmesi o kadar az olacaktır. Asfalt miktarının optimuma kadar artması ile karışım içerisindeki boşluklar azalarak stabilite artarken su ve hava az gireceğinden dolayı asfaltın yaşlanması geciktirilerek durabilite artırılmış olur. Bitümlü sıcak karışımların aşınması asfaltın sertleşmesi ile hızlanır. Çünkü, asfaltın sertleşmesi ile soyulma ve çatlaklar artar. Asfalt miktarı azaldıkça agregalar arasındaki bağ kuvveti azalacağından trafik etkisi ile agregalar karışımdan koparak kaplama yüzeyinde bozulmalara neden olur. Ancak asfalt miktarı fazla olursa sıcak havalarda kuma-terleme ile kaplamanın kayma direnci azalmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların aşınması ağır taşıt trafiğinin hacmi ile artar. Bu nedenle, ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda yüksek durabiliteli bitümlü sıcak karışımlar imal edilmesi gerekir. Ayrıca yüksek standartlı yollarda, ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda, tırmanma şeritlerinde, durma ve kalkmaların yoğun olduğu kavşak, otobüs durağı gibi yerlerde stabilitesi ve durabilitesi yüksek bitümlü sıcak karışımlar kullanılmalıdır (4,7,8,9).

2.4.4. Fleksibilite (Esneklik)

Bitümlü sıcak karışımların fleksibilitesi, zeminin ve temel tabakasının uzun dönemli oturma durumunda bu çökmelere uyum sağlayabilme kabiliyetidir. Eğer kaplama sıkışabilen bir kil üzerine inşa edilirse farklı oturmalar kaplamaya yansıtacağından çatlaklar oluşacaktır. Ayrıca yol eksenine yarma ve dolgulardan geçtiğinden yarmalarda prekonsolidasyondan ötürü az oturma fakat dolgularda ise drenaj, yetersiz sıkışma, vb. nedenlerden ötürü fazla oturma oluşabilmektedir. Eğer kaplama uzun dönemde oluşan bu farklı oturmalarla uyum sağlayacak şekilde esneklik gösterebilirse oturma çatlakları da büyük ölçüde azalacaktır. Fleksibilite genel olarak:

- Asfalt içeriği arttıkça
- Relatif açık gradasyonlu karışıma sahip olundukça

Artış gösterir. Ancak kaplamanın fleksibilitesi artarsa stabilitesi azalmaktadır. Düşük fleksibiliteli karışımlarda oluşan aşırı çatlamlar kütlenin parçalanmasına dolayısıyla da kaplamanın stabilitesinin düşmesine neden olur. Ayrıca zeminde don kabarması olursa alttan yukarı doğru kaplamada gerilmeler oluşacaktır. Eğer kaplamanın fleksibilitesi yeterli olursa kaplamada çatlama olmadan sadece geçici deformasyon oluşur. Daha önce de bahsedildiği gibi, aşırı deformasyona uğrayabilen bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti de düşüktür. Dolayısıyla fleksibilitesi yüksek bitümlü sıcak karışımlarda yorulma çatlakları oluşabilecektir. Zaten bitümlü karışımların rijitliği arttıkça yorulma mukavemetide artmaktadır. Çeşitli deney metotlarıyla elde edilen esneklik modülü değerleri, üst yapı dizaynı veya üst yapı değerlendirmesi ve analizi için bilgi vermesinin yanı sıra, malzemelerin birbirine göre değerlendirilmesini sağlar (4,6,8,11).

2.4.5. Geçirimsizlik

Bitümlü sıcak karışımlarda geçirimsizlik, kaplamanın içine hava ve suyun nüfus etmesinin bir ölçüsüdür. Kaplamadaki boşluk miktarı ile boşlukların irtibatı, kaplamanın üstünden altına kadar su, hava ve su buharının geçmesi için gerekli koridorları oluşturur. Geçirimsizlik arttıkça hava, suyun etkisi ile asfaltın yaşlanması hızlanır ve soyulma mukavemeti azalır ve donma-çözülme tekerrürü ile agreganın parçalanmasına neden olur. Geçirimsizlik genel olarak;

- Asfalt miktarı arttıkça
- Agregada gradasyonunun ve karışımın yoğunluğu arttıkça
- Sıkıştırma (özellikle yoğurma etkili pnömomatik tip sıkıştırıcılarla) arttıkça

artış gösterir. Kaplamanın geçirimsizliği bitümlü karışımlardaki boşluk oranının minimum veya hiç olmaması ile sağlanır. Ancak bitümlü karışımlarda;

- Agregataneleri arasında asfalt için minimum %12-14 boşluk bırakılması,
- Agregataneleri arasındaki boşluğun bitümlü temelde ortalama %55'i binder tabakasında ortalama %70'i ve aşınma tabakasında ise ortalama %80'i asfaltla doldurulması, stabilite için gereklidir. Bitümlü sıcak karışımların minimum boşluk oranı;
- Asfaltın sıcak havalarda genişmeden ötürü terleme ve kuma ile kaplama yüzeyine çıkmasını önlemek
- Trafik yükleri altında sıkışmaya müsaade ederek segradasyona engel olmak için gereklidir. Bitümlü sıcak karışımların maksimum boşluk oranı;
- İçsel sürtünme açısının azalmasını önlemek
- Geçirgenliği azaltarak asfaltın sertleşmesini azaltmak için gereklidir. Bitümlü temel tabakalarında boşluk oranı %5-9, binder tabakasında %4-6 ve aşınma tabakasında ise %3-5 arasında olmasının şart koşulmasının nedeni geçirimsizliği sağlamak ve yoğunluğun artması içindir (4,7,8,11).

2.4.6. Kayma direnci

Kayma direnci, araçların frenleme sırasında emniyetle durabilmesi ve kurlarda merkezkaç kuvvetinden ötürü savrulmaması için teker ile kaplama arasında gerekli sürtünme kuvvetini ifade eder. Kayma direnci genel olarak;

- Düşük asfalt miktarı
- Cilalanma direnci yüksek agrega
- Kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega
- Açık ve kaba gradasyonlu karışım

ile artmaktadır. Fakat kaplamanın yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş konforu artmakta fakat kayma direnci önemli ölçüde azaltmaktadır. Agregat boyutunun kayma direnci üzerinde çok önemli rol oynamadığı yol testlerinde görülmüştür. Optimum asfalt miktarından daha fazla konulacak asfalt hem stabiliteyi düşürür hem de terleme-kuma ile kaplama yüzeyine çıkan asfaltın oluşturduğu film tabakası ile kayma direncini azaltır. Özellikle cilalanmış agrega ve kuma-terleme ile yol yüzeyinde oluşan film tabakası yağışlı havalarda ve hızlı yollarda önemli tehlike arz etmektedir. Bu nedenle, aşınma tabakalarında kullanılacak agregaların

cilalanma direncinin yüksek olması ve asfalt miktarının da optimum veya optimumdan bir miktar az olması gerekir. Makadam ve sathi kaplamalı yolların her ne kadar sürüş konforu az ve teker gürültüsü fazla olsa da kayma dirençleri çok yüksektir. Bitümlü sıcak karışımlardan yapılan esnek kaplamaların pürüzsüz ve çok düzgün yüzeylerinden ötürü özellikle yağışlı havalarda keskin kurplarda ve dik eğimli kesimlerde sürüş emniyeti azalmaktadır. Böyle kesimler için aşınma tabakası üzerine aşınma direnci yüksek, tek boyutlu ve silisli kırmataş agrega serilip silindirler ile kaplamaya gömülmesi (Chipping) veya aşınma tabakası üzerine sathi kaplama uygulaması ile kayma direncinin artırılması sağlanmaktadır (4,8,9).

2.4.7. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serim ve sıkıştırma esnasında gösterdiği kolaylığın ölçüsü olarak tanımlanır. İşlenebilirlik genel olarak;

- Kaba agrega miktarı arttıkça
- Maksimum tane boyutu arttıkça
- Kırmataş agrega kullanıldıkça
- Agrega yüzeyinin pürüzlülüğü ve kırılmışlık arttıkça
- Karışım ıstısı düştükçe
- Asfalt penetrasyonu düştükçe (katılaştıkça)
- Asfaltın viskosluğu arttıkça
- Filler miktarı aşırı arttıkça
- Ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır.

İşlenebilirliği düşük olan karışımların serme ve özellikle sıkıştırma esnasında birtakım güçlükler oluşmaktadır. Hatta bu sebepten ötürü yeterli sıkışma sağlanamadığından karışımın stabilitesi azalmaktadır. Düşük işlenebilirliğe sahip olan karışımlar ile genellikle homojen olmayan kaplamalar elde edilmektedir. Bunun yanı sıra İşlenebilirliği çok yüksek olan karışımlar, genellikle içsel sürtünmesi az olan dere malzemesi agregalar ve yüksek penetrasyonlu asfaltlar ile üretildiklerinden stabiliteleri de düşük olmaktadır. İşlenebilirliği düşük olan karışımların sıkıştırılmaları sırasında silindir bandajları altında çok az çökme gösterdiklerinden yeterli sıkıştırma elde edilemediği gibi kaba agreganın karışım içine

gömülmesi az olduğundan yüzey pürüzlülüğü de fazla olmaktadır. Ayrıca İşlenebilirliği düşük olan karışımlarda tabaka kalınlığınca homojen bir sıkıştırma elde edilememekte ve özellikle yüzeyde daha az sıkışma olmaktadır. Dolayısıyla trafik etkisi ile yüzeyde çok çabuk kopmalar oluşarak kaplamanın bozulmasına neden olmaktadır. Karışımındaki ince agreganın kırılmış olması işlenebilirliği düşürmekte fakat deformasyon direncini artırmaktadır. Esasen işlenebilirlik, karışımındaki agrega tanelerinin yer değiştirmeye (iç hareketlilik) karşı gösterdiği dirençtir. Bu nedenle agreganın biçimi, kırılmışlığı, yüzey alanı, yüzey yapısı, vb. hususlar ile asfaltın viskosluğu işlenebilirlik üzerinde önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla;

- Asfaltın kohezyonu (filler miktarından kaynaklanan)
- Agreganın içsel sürtünme açısı
- Karışımın viskosluğu (filler miktarından ve asfaltın viskosluğundan kaynaklanan) agrega tanelerinin yer değiştirme direncine etki etmektedir (4,7,8,9).

2.4.8. Yorulma mukavemeti

Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti, kaplamada çatlamlar oluşmadan tekerrür eden yükler etkisinde eğilmeye (yani kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına) müsaade etme yeteneğidir. Bir başka deyişle, kaplamanın sahip olduğu çekme mukavemetinin altında etkiyen trafik yüklerinin maksimum tekerrür sayısına tekabül eden mukavemet değeridir. Yani kaplamanın çekme mukavemeti altındaki gerilmelere karşı çatlamadan ne kadar direnç gösterebileceğinin belirlenmesi gerekir. Yorulma mukavemeti;

- Rijitlik arttıkça
- Gradasyon ve yoğunluk arttıkça
- Asfalt penetrasyonu arttıkça (yumuşadıkça)
- Asfalt miktarı arttıkça
- Kaplama kalınlığı arttıkça
- Eğilme gerilmesi azaldıkça

artış göstermektedir. Bitümlü sıcak karışımların diğer mekanik özelliklerinde olduğu gibi, kaplamaların yeterli sıkışması yorulma mukavemetini de artıran önemli bir özelliktir.

“Yorulma bozulması” terimi, taşıt yüklerinin tekrar sebebiyle asfalt betonunda oluşan bozulmalar için kullanılır. Heukelom ve Klomp; çevresel etkiler sonucunda sürekli değişimlerin yığılmalı olarak toplanıp, uygulanan gerilmenin gerilme dayanımına eşit olmasını sağlayan durumlar olarak tanımlamışlardır (18).

Deocan ise yorulma ifadesini; asfaltlı malzemelerde şartlara bağlı olarak gittikçe ilerleyen, lokal ve sürekli olan değişiklikler olarak ifade etmiştir. Bu değişikliklerin belirli nokta veya noktalarda değişken gerilmeler ve deformasyonlar oluşturacağını bunun yeterli yüklemelerden sonra çatlak veya komple bir kırığa sebep olacağını belirtmiştir (19). Çizelge 2.5’de bitümlü sıcak karışımların temel özelliklerine etki eden parametreler toplu halde verilmiştir.



2.5. Marshall Test Yöntemi

Kaplama karışımlarının dizaynında Marshall metodu kavramı «Mississippi State Highway Department» in eski Bitüm Mühendisi Bruce Marshall tarafından formüle edilmiştir. “U.S. Corps of Engineers” A.B.D istihkam sınıfı kuruluşu geniş araştırma ve korelasyon çalışmalarıyla test yöntemine belirli biçimler ekleyip karışım dizayn kriterlerini geliştirmiştir. Marshall Test Metodu “American Society for Testing and Materials” Amerikan deney ve materyal topluluğu tarafından standartlaştırılmıştır. Marshall test metodu ASTM D1559’da Marshall aleti kullanılarak bitümlü karışımın plastik akmaya karşı direnci olarak tarif edilmiştir. Marshall test metodu TS 3720’de mevcut olup, ASTM de belirtilen test metoduyla esas olarak aynıdır. Marshall yöntemi, yalnızca maksimum boyu 25 mm (1 in.) veya daha küçük agrega ihtiva eden ve penetrasyon veya viskozite ile sınıflandırılmış asfalt çimentosu kullanılan sıcak karışım asfalt kaplama karışımlarına uygulanır. Metot sıcak karışım asfalt kaplamaların laboratuvar dizaynı için tasarlanmıştır (20,21,27).

Şartnamede belirtilen fiziksel özelliklere sahip agreganın yine şartnamede belirtilen gradasyon limitleri dahilinde agrega gruplarının hangi oranlarda karıştırılacağı belirlendikten sonra karışımın asfalt miktarının tayin edilmesi gerekir. Bu amaçla gerek ülkemizde gerekse dünyada halen kullanılmakta olan “Marshall metodu” ele alınacaktır. Diğer mühendislik malzemelerinin tasarımında olduğu gibi, asfalt kaplama karışım tasarımında amaç, inşaat bitiminden sonra istenilen özellikleri sağlayacak malzemelerin seçimi ve karışım oranlarının belirlenmesidir. Asfalt kaplama karışım dizaynının amacı:

- 1-) Sağlam (Durabil) bir üstyapı elde etmek için gerekli asfalt miktarını,
- 2-) Trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek yeterlilikte karışım stabilitesini,
- 3-) Sıkıştırılmış nihai karışımında trafik tarafından oluşturulacak çok az miktardaki sıkışmaya kasma, akma ve stabilite düşüklüğü olmaksızın imkan verecek, ancak karışım içinde rutubet ve fazla hava barındırmayacak ölçüdeki boşluğu,
- 4-) Segregasyona uğramaksızın uygun serimi sağlayacak bir işlenebilirliği, verecek ekonomik bir karışımın ve agrega gradasyonunun belirlenmesi olarak tanımlanmıştır (1).

Asfalt kaplama karışımlarının dizaynında deney yöntemlerinin detaylarına çok dikkat edilmesi ve yazılı talimatlara aynen uyulması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca bitümlü sıcak karışım dizayn deneyleri ile şartname talepleri arasındaki ilişkinin de iyi bilinmesi gerektiği belirtilmiş ve şartnamede belirtilen değerlere uygunluk göstermesi gerektiği ifade edilmiştir. Karışım tasarımı metodu olarak Marshall ülkemizde büyük ölçüde uygulanmış ve tatmin edici sonuçlar alınmıştır (4).

Bitümlü sıcak karışımlarda daha önce bahsettiğimiz problemleri gidermek için, değişiklik yapılabilecek birkaç olasılık şöyle sıralanmıştır;

- Kaplama dizaynının geliştirilmesi
- Üst yapı malzemelerinin ve üst yapıların şartname özelliklerinin gözden geçirilmesi
- İnşaat süresindeki kalite kontrolün iyileştirilmesi
- Bağlayıcının geliştirilmesi

Bütün bu olasılıkların tümünün bir arada gerçekleşmesi doğal olarak performansı olumlu yönde etkileyecektir. Fakat değişik durumlar karşısında karışım özelliklerinin değiştirilmesi için karışım dizaynı geliştirmek veya bitüm miktarı ile oynamak yeterli olur gibi görünmekteyse de günümüzde yapılan çalışmaların çoğu bitümlü bağlayıcılarda katkı kullanımı yeni olasılıklar ve seçenekler ortaya koymuştur.

Son yıllarda kullanımı oldukça artan modifiye bitümler modifiye konusundaki çalışmalar ve yayınlarda farklı tip katkı maddelerinin mukayesesinden katkı maddesi olarak bitümün kimyasına uygun düşen polimerlere ilginin arttığı, hatta bitüm katkı maddeleri sınıflandırılırken polimer esas alınarak polimer katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde sınıflandırıldığı görülmüştür. Türkiye karayolları ağındaki bazı yollarda özellikle aşırı yüklenmiş ağır trafik ve sıcak iklim koşulları sonucu oluşan ve özellikle yağışlı havalarda seyahat güvenliğini önemli ölçüde düşüren plastik deformasyonlar, soğuk iklim koşullarında oluşan termal çatlaklar gibi bozulmalar ile yüzey pürüzlülüğünün sağlanması gibi sorunlar nedeniyle sürüş konforu ve trafik güvenliği azalmıştır. Yüksek bakım ve onarım maliyetini düşürmek için karayolları genel müdürlüğü tarafından yayınlanan bir

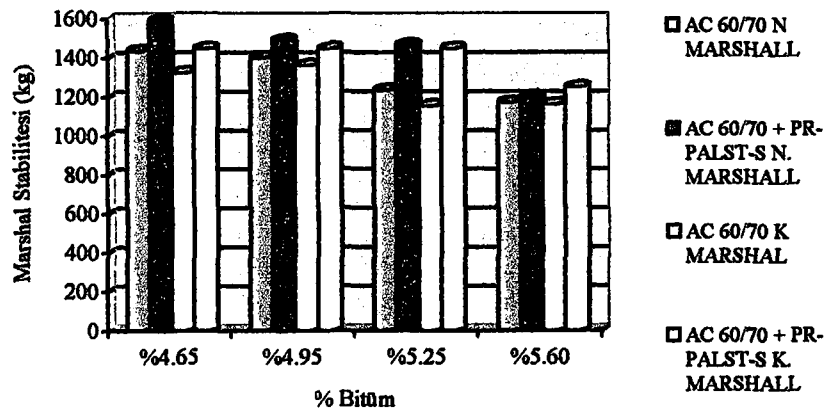
genelge ile bazı yollarda yol üst yapısının aşınma tabakalarında modifiye bitüm kullanılmasına karar verilmiş ve modifiye bitüm şartnamesi hazırlanmıştır.

1997 yılında KGM tarafında yapılan bir çalışmada gradasyon limitlerine uygun bir gradasyon seçilmiş olup bu gradasyonda karışımın optimum bitümde, optimum bitümün üstünde ve optimum bitümün altında değişik bitüm yüzdelerinde hazırlanan numunelerin normal ve koşullandırılmış Marshall stabiliteleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada bitümlü bağlayıcı olarak AC 60/70 kullanılmış ve modifiye edici madde olarak da karışıma plent – mikserde ilave edilebilen karışımın % 0.6 sı oranında PR-PLAST-S isimli polimer kullanılmıştır. Bu şekilde hazırlanan karışımların performans değerleri incelenmiştir (24). Karışım dizayn değerlerini ve deney sonuçlarını içeren Çizelge 2.6'da verilmiş ve deney sonuçlarına göre çizilen grafik Şekil 2.2'de verildiği gibidir.

Çizelge 2.6 Dizayn kriterleri

Bitüm %'si	4.95
Hac. Özgül. Ağ.	2.445
Maks. Teo. Öz. Ağ.	2.530
Boşluk (%)	3.35
VMA (%)	13.5
Asf. Dolu. Boşluk (%)	75.2



Şekil 2.2 Bitüm yüzdesi stabilite ilişkisi

Grafikte görüldüğü üzere yapılan çalışmadan şu sonuçlar çıkarılması mümkündür. Katkı kullanımı stabilite değerlerinde artış sağlamıştır. Ayrıca koşullandırma sonucunda (60 C° suda 72 saat bekletme) stabilite değerlerinde önemli derecede düşüş görülmemektedir. Normal numunelerde bitüm artışı ile, stabilite değerlerinin şartnamede istenilen kriterlerin “min 900 kg” altına düşmemiştir.

Karışım dizaynı ile belirlenen optimum bitüm miktarından daha fazla normal bitüm kullanılması durumunda karışımların plastik deformasyonlara karşı hassasiyetinin hızla arttığı ancak bu hassasiyetin Marshall stabilitesi ile tespit edilemediği görülmektedir. Karışıma polimer ilave edilmesi durumunda karışımın plastik deformasyona karşı direnci büyük ölçüde artmasına rağmen fazla bitüm kullanımı durumunda dahi tekerlek izi oluşumu açısından karışım performansında büyük bir kayba yol açmadığı belirtilmiştir (24).

Bir başka çalışmada ise esnek kaplamalarda aşınma tabakası olarak kullanılan standart karışım özelliklerini taşıyan laboratuvar Marshall numuneleri karışımındaki filler yerine çeşitli oranlarda portland çimentosu kullanılarak hazırlanmış numuneler test edilmiş stabilite ve akma özellikleri bakımından değerlendirmiştir (25).

Optimum bitüm oranının belirlemede kullanılan Marshall sonuçları Çizelge 2.7’de verilmiştir. Optimum bitüm muhtevasında çeşitli oranlarda portland çimentosu ve filler kullanılarak hazırlanan numunelere Çizelge 2.8’de belirtilen yüzdelerde portland çimentosu ve doğal filler ile katılarak numunelerin ASTM D1559’a göre stabilite ve akma değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.7. Optimum bitüm oranının belirlemede kullanılan Marshall sonuçları

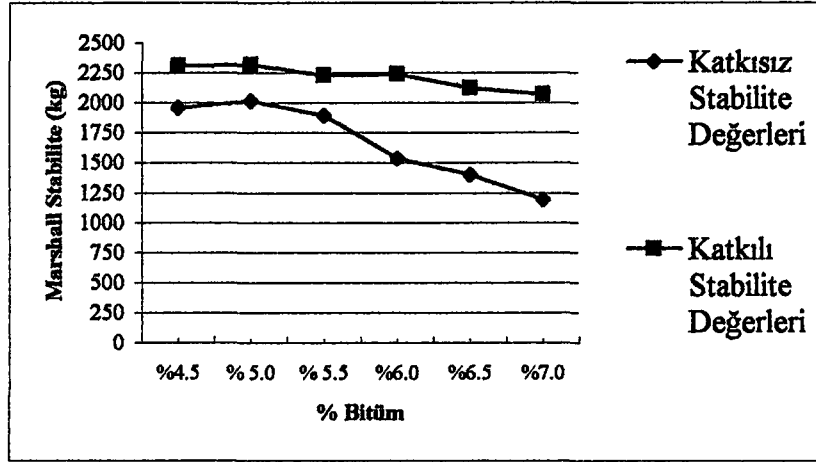
Bitüm Muhtevası	V.M.A. (%)	Boşluk (%)	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
%4.5	15.929	6.034	2.376	1960	3.05
% 5.0	15.872	4.881	2.389	2017	3.64
% 5.5	15.149	2.951	2.421	1896	3.64
%6.0	15.561	2.299	2.420	1541	5.59
%6.5	15.564	1.205	2.435	1403	5.93
%7.0	16.558	1.267	2.415	1194	6.10

Çizelge 2.8 Optimum bitüm muhtevasında çeşitli oranlarda portland çimentosu ve filler kullanılarak hazırlanan numunelerin Marshall deneyi sonuçları

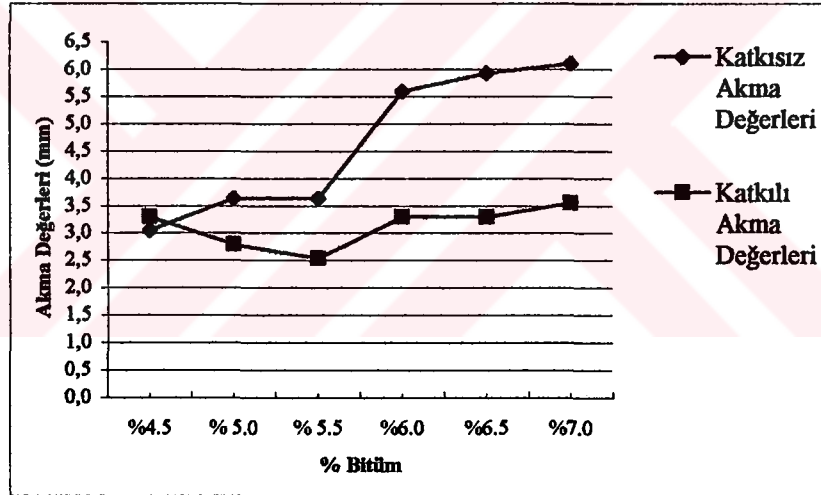
Çimento-Filler Yüzdesi	V.M.A. (%)	Boşluk (%)	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
% 7 - % 0	17.609	6.377	2.436	2309	3.302
% 5 - % 2	17.513	6.400	2.412	2319	2.794
% 4 - % 3	17.454	6.396	2.399	2230	2.540
%3-%4	16.935	5.878	2.401	2239	3.302
% 2 - % 5	16.554	5.514	2.398	2125	3.302
%0-%7	15.708	4.696	2.394	2070	3.556

Doğal filler yerine aynı ağırlıkta Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan numunelerde bazı fiziksel değişiklikler kaydedilmiş ve bu değişiklikler numunelerde agreganın boşluk oranının (V.M.A.) artması şeklinde gözlenmiştir. Dolayısıyla karışımdaki hava boşluğunda da artış olmuştur. Çok belirgin olmamakla birlikte çimento miktarı arttıkça numunelerin hacim özgül ağırlığının da arttığı gözlenmiştir. Bu farklılıkların agreganın gradasyonunun ağırlık bazında hazırlanmasından ve çimento ile filler arasındaki belirgin özgül ağırlık farklılığından kaynaklandığı söylenebilir (25).

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de görüldüğü üzere çimentolu ve çimentosuz numuneler arasında gözlenen asıl önemli fark aynı bitüm muhtevası ve aynı gradasyonda hazırlanmış olmalarına rağmen, numunelerdeki Portland çimentosu yüzdesi arttıkça, stabilite değerlerinde artış kaydedilmiştir. Çok belirgin bir eğilim göstermemekle birlikte, Çizelge 2.8’deki değerlere göre %12’ye varan bir artış söz konusudur. Akma değerlerinde ise belirgin bir artış ya da azalış gözlenmemiştir (25).



Şekil 2.3 Bitüm yüzdesi- Marshall stabilite ilişkisi



Şekil 2.4 Bitüm yüzdesi - akma ilişkisi

Lastik atıklarının asfalt betonu kaplamaların mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada çeşitli elek boyutları arasında kalan lastik parçaları karışıma bitüm miktarının %5'i, %10'u ve %20'si olarak ilave edilmiş ve lastik miktarının artışı ile stabilite ve akma özellikleri incelenmiştir.

Sonuç olarak Lastik miktarı arttıkça Marshall stabilitesinin azalmakta, akma ise artmakta olduğu tespit edilmiştir. 4-20 elek boyutundaki lastik parçalarının %20 ilavesi haricinde tüm

stabilite değerleri limit stabilite değeri olan 900 kg üzerinde kaldığı görülmüş ve %10' geçen numunelerde stabilite önemli ölçüde azalmakta olduğu tespit edilmiştir. 20-200 ve 4-200 boyutlarında lastik parçaları içeren karışımların akma değerleri şartname sınırları içerisinde kaldığı, fakat 4-20 boyutunda lastik ilaveli karışımlar sınırların üzerinde olup olumsuz sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (26).



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada asfalt betonu dizaynı amacıyla daha önce yapılmış tez, makale ve bazı kurum ve kuruluşların yapmış olduğu laboratuvar çalışmalarının, Marshall deney sonuçları kullanılmıştır.

Ayrıca Alacaatlı mevki Koçyiğit taşocağından ve Adapazarı Taşkısk taş ocağından K.G.M. laboratuvarlarına gelen agrega ile aşınma ve binder tabakalarına örnek teşkil edecek üç adet asfalt betonu dizaynı yapılmıştır. Çalışmada kullanılan asfalt betonu dizayn örnekleri Çizelge 3.1’de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 3.1. Asfalt betonu dizayn örnekleri

Dizaynı yapılan örnekler	Çalışmayı Yapan	Çalışmanın Türü
Binder Tip3	İsfalt	Laboratuvar çalışması
Aşınma Tip2	Emrullah Dağdelen	Master Tez çalışması
Binder Tip2	Bekir Yıldırım, Ali Şiş	Makale Çalışması
Binder Tip2	Bekir Yıldırım, Ali Şiş	Makale Çalışması
Binder Tip2	Bekir Yıldırım, Ali Şiş	Makale Çalışması
Aşınma Tip2	Hakan Polat	Master Tez çalışması
Aşınma Tip2	Hakan Polat	Master Tez çalışması
Aşınma Tip2	K.G.M.	Laboratuvar çalışması
Aşınma Tip2	Örnek çalışma	Laboratuvar deneme çalışması
Binder Tip3	Örnek çalışma	Laboratuvar deneme çalışması
Binder Tip2	Örnek çalışma	Laboratuvar deneme çalışması

Tarafımızdan yapılan örnek çalışmalar K.G.M. laboratuvarında yapılmış olup, deney otomatik Marshall kompaktörü ve Marshall test aleti ile yapılmıştır. Yukarıda belirtilen agrega türleri kullanılarak Aşınma Tip2, Binder Tip 3 ve Binder Tip 2 gradasyonlarına uygun değişik bitüm yüzdesi aralıklarında AÇ 57, AÇ 60 ve AÇ 71 penetrasyon değerlerine sahip bitüm kullanılmıştır.

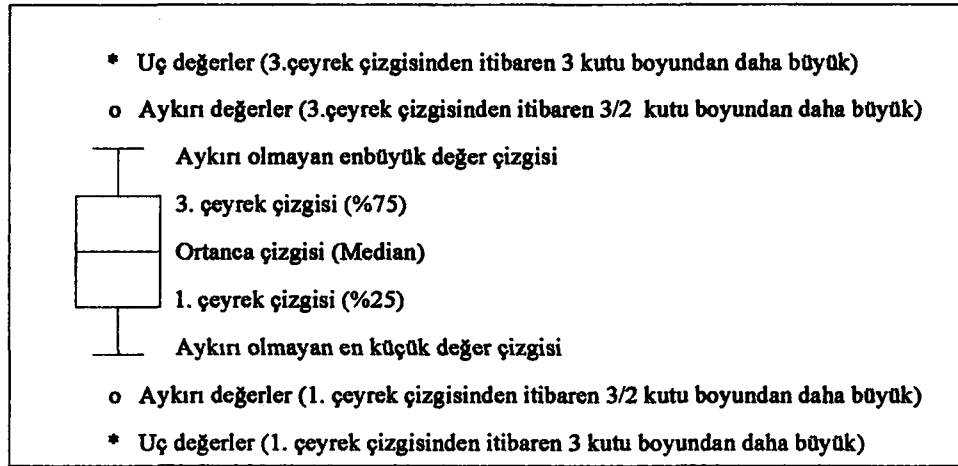
3.2. Metot

Bu çalışmada TS 3720 ve ASTM D1559'da belirtilen Marshall test metodu esas alınarak yapılan tez, makale ve bazı kurum ve kuruluşların yapmış olduğu Marshall deneyi verilerine SPSS 11.0 paket programı kullanılarak verilere ilişkin serpmne grafikleri çizilmiştir. Bu serpmne grafiklerine bağlı olarak regrasyon analizi yapılmış ve matematiksel model denklemleri oluşturulmuştur.

Model denklemleri üzerinden K.G.M. yollar fenni şartnamesinde belirtilen limitler dahilinde kalmak şartıyla her parametre için yüzdesi hesaplanmış ve aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm yüzdesi belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler grafik üzerinden belirlenen optimum bitüm yüzdeleriyle karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemle de elde edilen optimum bitüm yüzdelere bağlı olarak karışımdan beklenen özellikler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Ayrıca TS 3720 ve K.G.M. yollar fenni şartnamesinde belirtilen kriterler çerçevesinde tarafımızdan yapılan örnek çalışmada Aşınma Tip2, Binder Tip 3 ve Binder Tip 2 olmak üzere üç adet asfalt betonu dizayn denemesi yapılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlara aynı istatistiki değerlendirmeler yapılmış ve daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalarda sonuçlarının hatalı olduğu düşünülen deneyler her ne kadar regrasyon analizi ile ortaya konulsa da analizi desteklemek amacıyla verilere homojenlik testi uygulanmış ve kutu grafikleri çizilmiştir. Kutu grafiklerinin yapısı ve özellikleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kutu grafiğinin yapısı ve özellikleri

Bir kutu grafiğinde;

- Ortanca çizgisi ile merkezi eğilimler ortanca çizgisi kutunun ekseninde ise dağılım normal, ortanca çizgisi 1. çeyrek çizgisine daha yakın ise pozitif yönde çarpık olduğu, ortanca çizgisi 3. çeyrek çizgisine daha yakın ise dağılım negatif yönde çarpık olduğu,
- Kutunun boyu ile verilen yayılma veya değişkenliği gözlemlerin %50'sinin değerleri kutu içerisinde yer almakta, bu durumda kutu boyunun uzun olması yayılma veya değişkenliğin fazla olduğunu, ifade etmektedir (30,31,32,33,34).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm yüzdesini belirlenmesinde izlenen yöntem deney sonuçlarına bağlı olarak çizilen grafik yöntemidir. Optimum bitümün belirlenmesi için farklı bitüm yüzdeslerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışımın Çizelge 4.1’de verilen özelliklerine bağlı olarak KGM şartname limitlerine karşılık gelen bitüm yüzdeslerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm yüzdesi belirlenmeye çalışılmaktadır.

Çizelge 4.1. Optimum bitümün belirlenme kriterleri

Karışımın özelliği	KGM şartname limitleri
Pratik Özgül Ağırlık	Max Prt.Özg. Agr. Karşılık gelen % bitüm
Stabilite	Max stabilite’ye karşılık gelen % bitüm
Asfaltla Dolu Boşluk	Şartname limitlerinin ortalamasına karşılık gelen %bitüm
Boşluk	Şartname limitlerinin ortalamasına karşılık gelen %bitüm

Ancak bu değerler grafik üzerinden bulunduğundan dolayı her bir parametre için belirlenen bitüm yüzdesi tam olarak belirlenememektedir. Bu nedenle dört farklı parametre için bitüm yüzdesine bağlı olarak regresyon analizi yapılmış ve regresyon eğrileri çizilerek bu eğrilere en uygun model denklemi ortaya konulmuştur.

Yukarıda verilen kriterler dahilinde daha önceden yapılmış çalışmalar için serpm diyagramı oluşturulduğunda noktalar bir parabolik doğru etrafında toplandığından veya bu duruma yakınlık gösterdiğinden regresyon modeli Formül 4.1’deki gibi seçilmiştir.

$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad [4.1]$$

Bu model denklemleri üzerinden şartnamede belirtilen limitler içerisinde kalmak şartıyla her bir parametre için bitüm yüzdesi matematiksel olarak hesaplanmış ve aritmetik ortalaması

alınarak optimum bitüm yüzdesi belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler grafik yöntemiyle belirlenen optimum bitüm yüzdeleri ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Daha Önce Yapılmış Çalışmaların İstatistikî Analizi

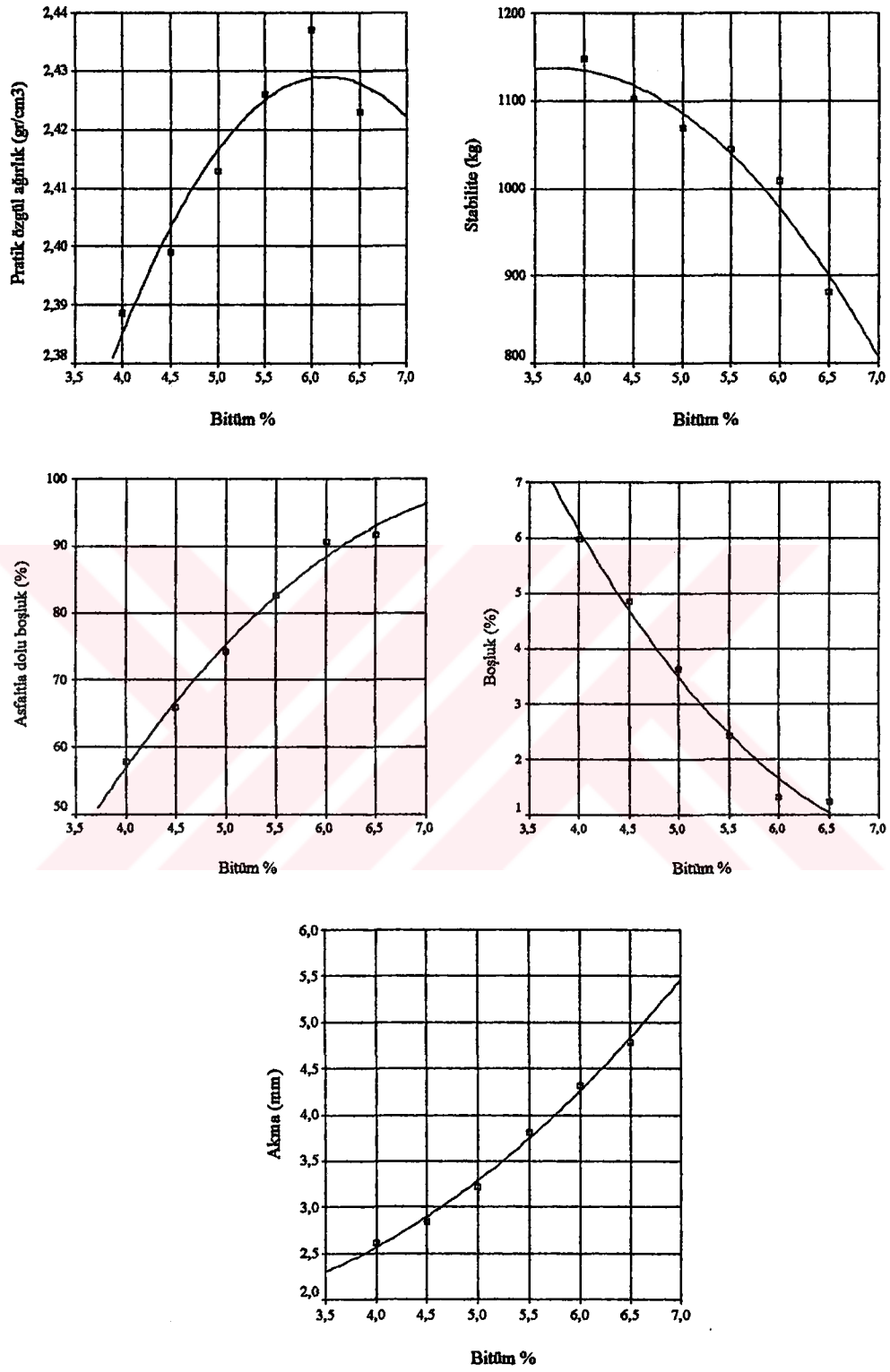
4.1.1. Örnek 1

İsfalt tarafından yapılmış binder Tip 3 tasarımı Marshall deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir (5).

Çizelge 4.2. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D _p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V _f)	% Boşluk (V _h)	Akma (mm)
4	2,387	1148	57,88	5,98	2,62
4,5	2,399	1103	65,82	4,85	2,84
5	2,413	1069	72,24	3,63	3,22
5,5	2,426	1045	82,69	2,43	3,81
6	2,437	1009	90,62	1,32	4,32
6,5	2,423	881	91,69	1,24	4.78

Çizelge 4.2’de verilerin her biri için serpmeye diyagramı yapılmış ve uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.1’de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk ve boşluk serpmeye diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1. % Bitüme göre – serpmе diyagramı grafikleri

Şekil 4.1'örüldüğü gibi serpm diyagramı oluşturulduğunda noktalar bir parabolik doğru etrafında toplandığından regrasyon denklemi ikinci dereceden bir denklemdir. Regrasyon denklemi katsayıları SPSS 11.0 paket programı ile çözümlenmiş ve Çizelge 4.3'deki denklemler elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 2,069 + 0,1172x - 0,0095x^2$	0,917
Stabilite	$Y = 724,05 + 223,479x - 30,214x^2$	0,951
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -68,008 + 41,6268x - 2,5936x^2$	0,990
Boşluk	$Y = -68,008 + 41,6268x - 2,5936x^2$	0,988
Akma	$Y = 2,1460 - 0,3854x + 0,1229x^2$	0,994

olarak belirlenmiş ve $\alpha = 0.01$ anlamlılık düzeyinde R^2 değerleri veriler arasında güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Regrasyon denklemleri çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdeleri ile grafik metoduyla bulunan bitüm yüzdeleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Optimum bitüm yüzdelерinin karşılaştırması

Karışımın özelliği	Şartname Limitleri	Grafik % bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	Max	6	6,17
Stabilite	Max	4,0	3,69
Asfaltla Dolu Boşluk	%70	4,65	4,68
Boşluk	%5	4,4	4,38
Ort. Opt. % Bitüm		% 4.76	% 4,73

Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelерinde stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 4.76 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan %4.73 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2,409	2,41
Stabilite	1070	1105
Asf. Dolu Boşluk	%72	% 70
Boşluk	% 4,25	% 4,10
Akma	%3	%3,075

Bu örnek için yapılan istatistiki değerlendirme sonucunda grafik metoduyla bulunan optimum bitüm yüzdesinin regresyon analizi ile bulunan bitüm yüzdesine çok yakın bir değer elde edildiği görülmüştür. Bunun sonucu olarak ta bitümlü sıcak karışımdan beklenen özelliklerin doğru tahmin edildiği ve deneyin güvenilirliğin yüksek olduğunu ortaya koyduğu düşünülmektedir.

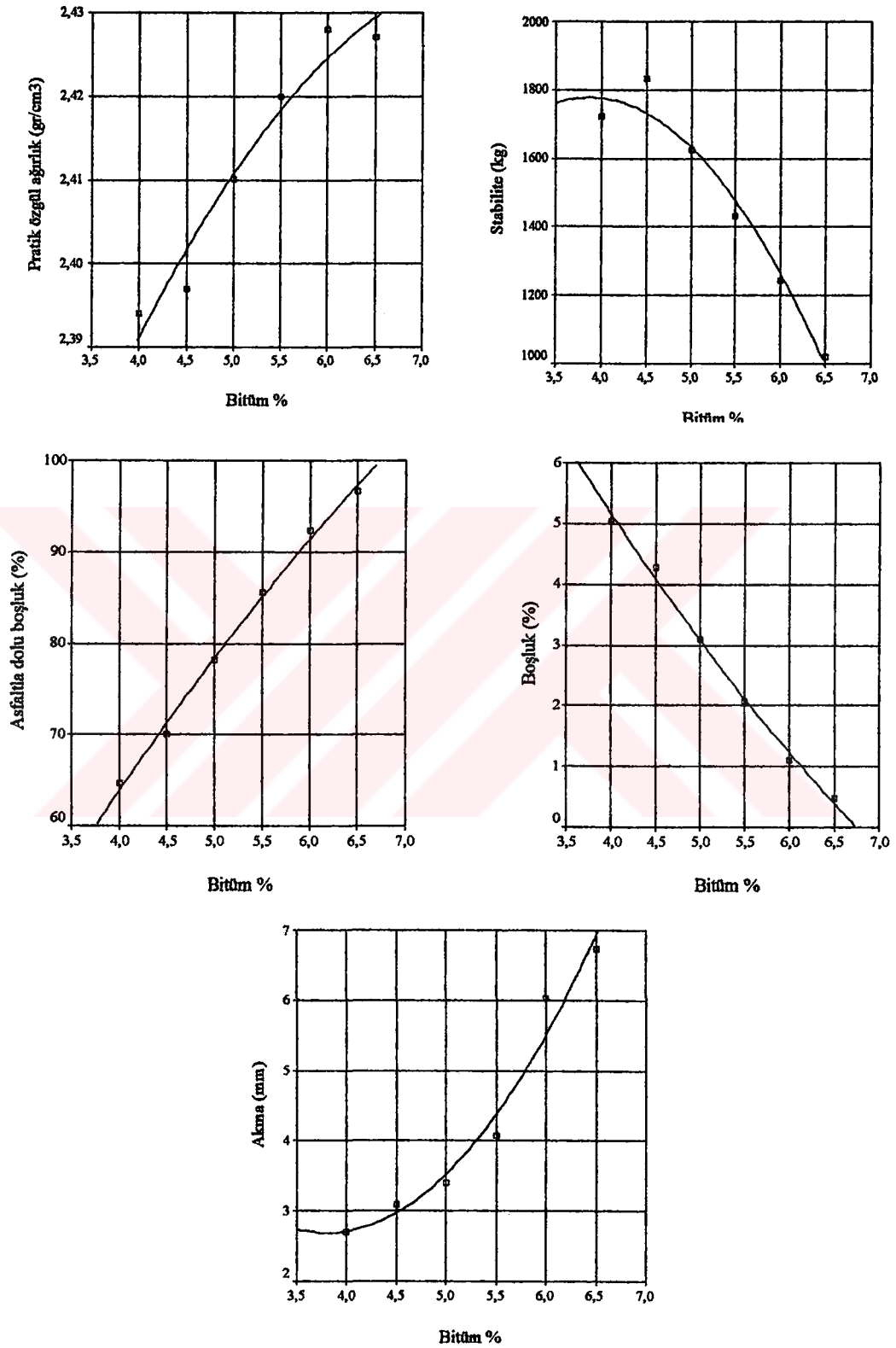
4.1.2. Örnek 2

Asfalt betonu dizaynı amacıyla Elazığ belediyesi Hanpınarı şantiyesinden alınan agrega üzerinde aşınma tabakası için Tip 2 gradasyon limitleri ortalaması alınarak yapılan Marshall deney sonuçları Çizelge 4.6’de verilmiştir (4).

Çizelge 4.6. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D_p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V_f)	% Boşluk (V_h)	Akma (mm)
4	2,394	1723	64,66	5,04	2,71
4,5	2,397	1833	70,10	4,27	3,09
5	2,410	1625	78,14	3,10	3,40
5,5	2,420	1432	85,53	2,06	4,08
6	2,428	1243	92,35	1,10	6,03
6,5	2,427	1020	96,69	0,49	6,73

Çizelge 4.5’deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpm diyagramı yapılmış ve uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.2’de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpm diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.7’deki regresyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri

Çizelge 4.7. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgöl Ağırlık	$Y = 2,255 + 0,0453x - 0,0029x^2$	0,954
Stabilite	$Y = 77,15 + 878,721x - 113,5x^2$	0,966
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -8,937 + 21,173x - 0,7414x^2$	0,995
Boşluk	$Y = 15,81 - 3,1329x + 0,1171x^2$	0,995
Akma	$Y = 11,1 - 4,4286x + 0,5829x^2$	0,969

Çizelge 4.7’de verilen denklemler çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdeleri ile grafik metoduyla bulunan bitüm yüzdeleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Optimum bitüm yüzdelерinin karşılaştırması

Karışımın özelliği	Şartname Limitleri	Grafik % bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgöl Ağırlık	Max	6	7,8 *Şartname gereği %6 alınmıştır.
Stabilite	Max	4,5	3,87
Asfaltla Dolu Boşluk	%80	5,2	5,11
Boşluk	%4	4,6	4,54
Ort. Opt. % Bitüm		% 5,10	% 4,88

Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelерinde stabilite, pratik özgöl ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Karışımдан beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 5.10 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 5.33 Bitüm
Pratik Özgöl Ağırlık	2,413	2,414
Stabilite	1600	1662
Asfaltla Dolu Boşluk	79	86,7
Boşluk	3,00	3,31
Akma	3,55	3,36

Yapılan bu çalışmada regrasyon denkleminin tepe noktası bulunarak tespit edilen pratik özgül ağırlık % 7,8 olarak bulunmuştur. Fakat yeterli bitüm yüzdesinde deney yapılmadığından bu durum serpm grafiğinde açıkça görülmemektedir. Bu durumun aşılması içinde farklı bitüm yüzdeslerinde yapılan deneylerin parabolik eğriyi tam olarak ifade edene kadar devam ettirilmesinin uygun düşeceği düşünülmektedir. Deneyde bu tür bir yaklaşım olmadığından şartname gereği, bu deney için maksimum pratik özgül ağırlığa karşılık gelen bitüm yüzdesi %6 olarak alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır.

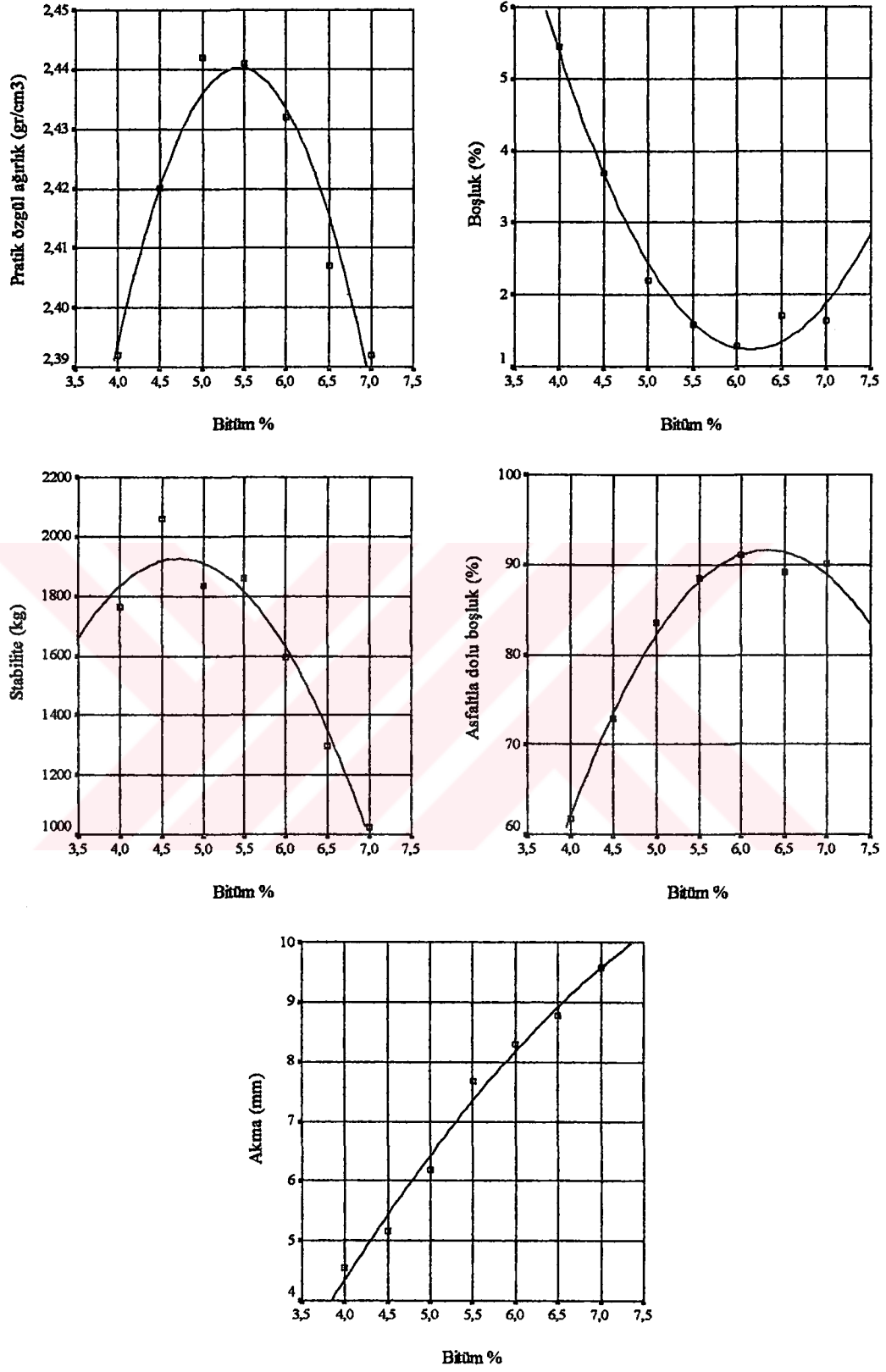
4.1.3. Örnek 3

Asfalt betonu dizaynı amacıyla Elazığ belediyesi Hanpınarı şantiyesinden temin edilen agrega, binder tabakası Tip 2'ye göre üç değişik tipte Tip A, Tip B ve Tip C gradasyonunda hazırlanmış karışımlara ait Marshall deney sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir (6,28).

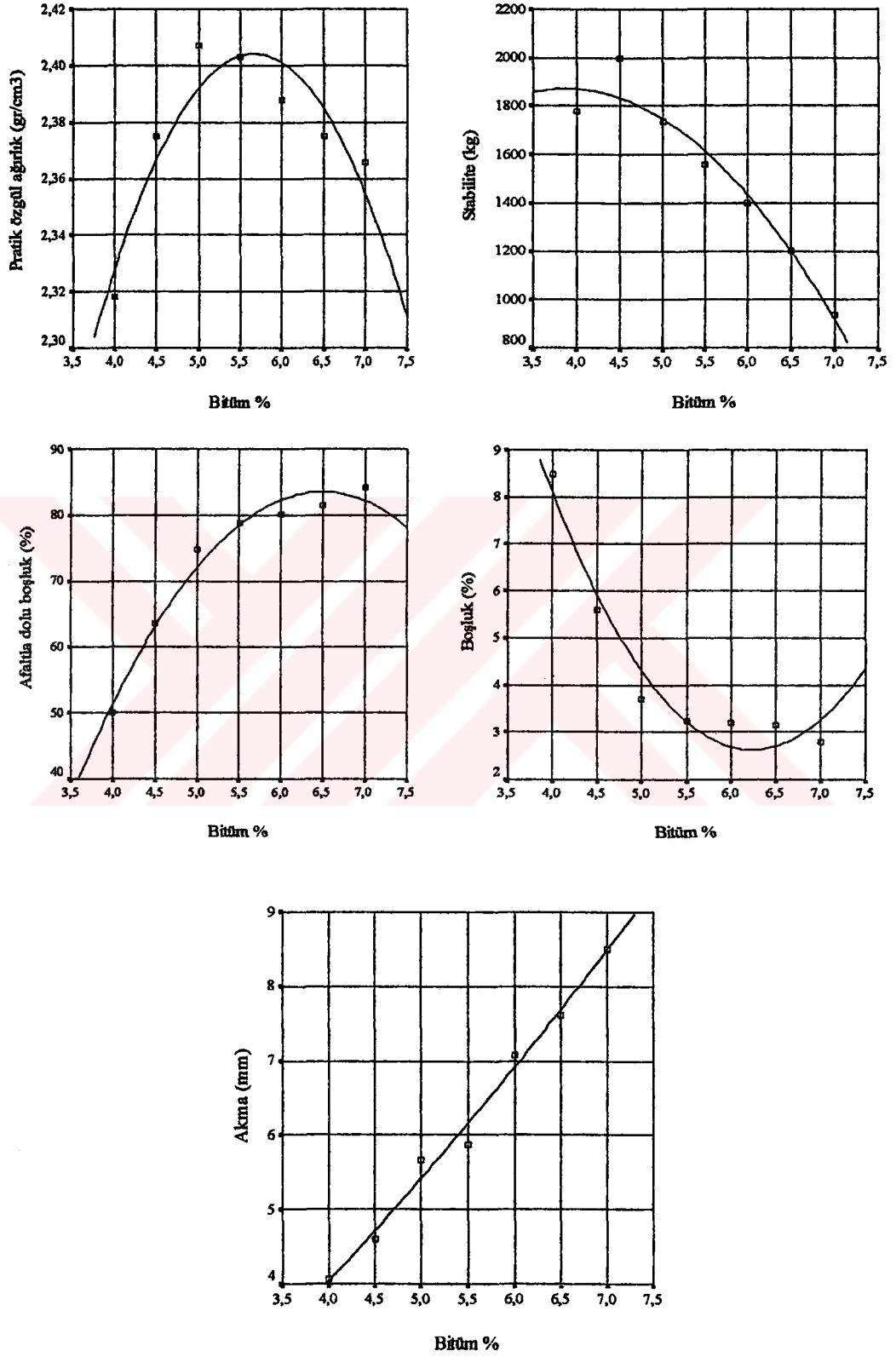
Çizelge 4.10. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağırlık (D_p) gr/cm ³			Stabilite (kg)			% Asf. Dolu Boşluk (V_d)			% Boşluk (V_v)		
	TipA	TipB	TipC	TipA	TipB	TipC	TipA	TipB	TipC	TipA	TipB	Tip C
4	2,392	2,318	2,372	1761	1778	2165	61,8	50,1	57,6	5,45	8,48	6,43
4,5	2,420	2,375	2,391	2061	2000	1926	72,9	63,6	66,0	3,70	5,60	5,04
5	2,442	2,407	2,417	1835	1736	1787	83,5	74,8	76,5	2,20	3,70	3,36
5,5	2,441	2,403	2,410	1755	1557	1674	88,5	78,8	80,0	1,58	3,23	3,00
6	2,432	2,388	2,425	1595	1398	1536	91,1	80,2	88,0	1,29	3,20	1,78
6,5	2,407	2,374	2,425	1297	1201	1489	89,2	81,5	92,5	1,71	3,14	1,15
7,0	2,392	2,366	2,412	1025	937	1400	90,1	84,1	93,8	1,64	2,80	1,00

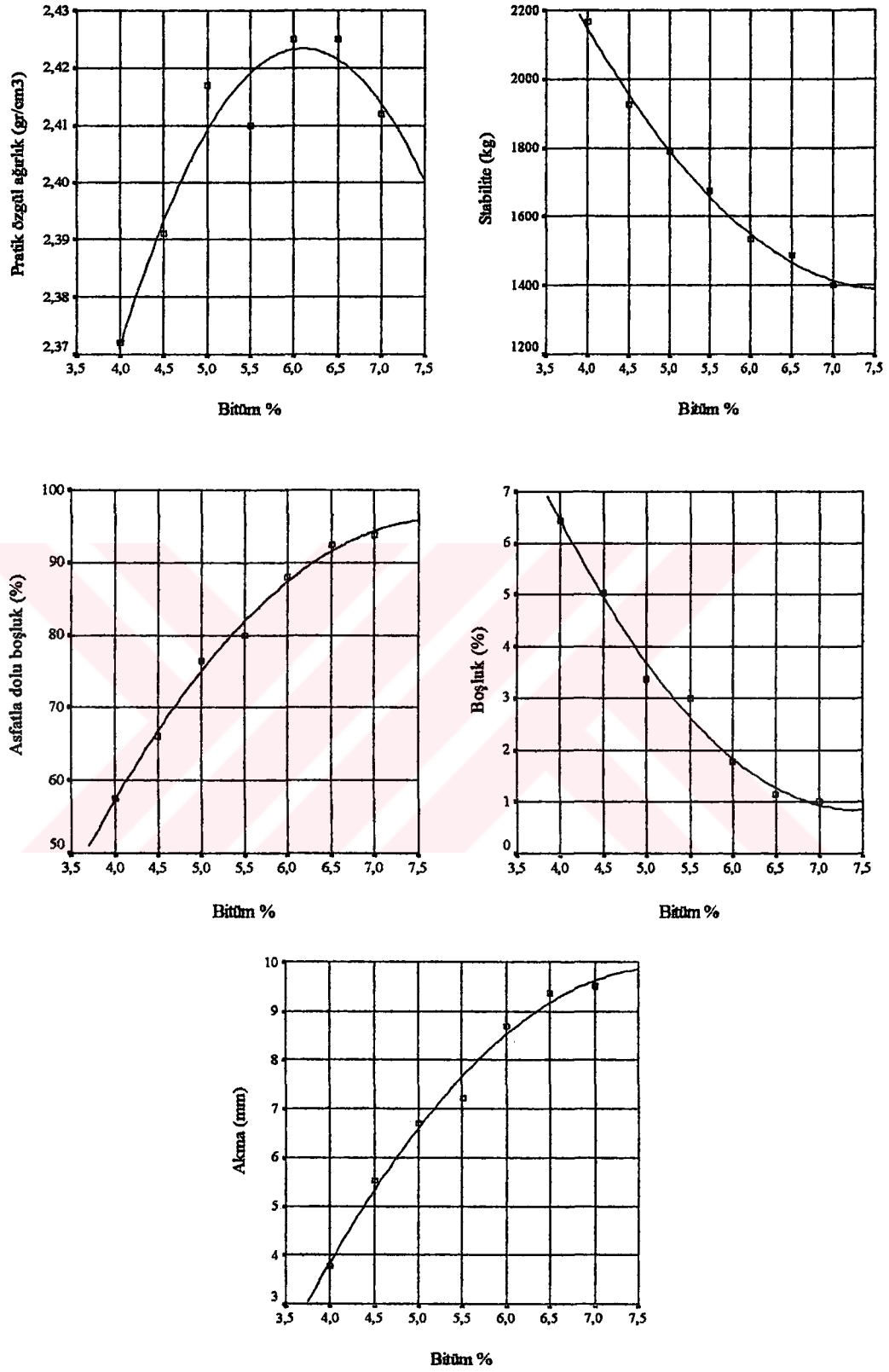
Çizelge 4.10 verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpm diyagramı yapılmış ve uygun regrasyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk ve boşluk serpm diyagramı Tip A, Tip B ve Tip C için verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.11'deki regrasyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.3. Tip A % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri



Şekil 4.4. Tip B % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri



Şekil 4.5. Tip C % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri

Çizelge 4.11. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

Karışımın özelliği	TİP	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	Tip A	$Y = 1,7831 + 0,241x - 0,0222x^2$	0,947
	Tip B	$Y = 1,5232 + 0,3112x - 0,0275x^2$	0,853
	Tip C	$Y = 1,9878 + 0,1429x - 0,0117x^2$	0,925
Stabilite	Tip A	$Y = -2081,1 + 1700,19x - 180,38x^2$	0,949
	Tip B	$Y = 404,714 + 757,929x - 97,857x^2$	0,949
	Tip C	$Y = 4670,29 - 851,90x - 55,2381x^2$	0,995
Asfaltla Dolu Boşluk	Tip A	$Y = -131,48 + 70,924x - 5,6333x^2$	0,988
	Tip B	$Y = -135,06 + 67,4286x - 5,2x^2$	0,975
	Tip C	$Y = -67,750 + 41,9595x - 2,6905x^2$	0,993
Boşluk	Tip A	$Y = 34,9121 - 10,94x + 0,8886x^2$	0,982
	Tip B	$Y = 44,86 - 13,537x + 1,0848x^2$	0,950
	Tip C	$Y = 26,7379 - 6,9288x - 0,4633x^2$	0,990
Akma	Tip A	$Y = -7,4079 + 3,6226x - 0,1710x^2$	0,985
	Tip B	$Y = -0,5600 + 0,9590x + 0,0476x^2$	0,988
	Tip C	$Y = -15,369 + 6,4562x - 0,4124x^2$	0,987

Çizelge 4.11’de verilen denklemler çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdeleriyle grafik metoduyla bulunan bitüm yüzdeleri Çizelge 4.12’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.12 . Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırması

Karışımın özelliği	Şartname Limitleri	TİP	Grafik % bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	Max	Tip A	5,25	5,44
		Tip B	5,10	5,66
		Tip C	6,25	6,10
Stabilite	Max	Tip A	4,5	4,71
		Tip B	4,5	3,87
		Tip C	4,00	4,00
Asfaltla Dolu Boşluk	%70	Tip A	4,30	4,33
		Tip B	4,90	4,87
		Tip C	6,75	4,68
Boşluk	%5	Tip A	4,10	4,09
		Tip B	4,60	4,76
		Tip C	4,9	4,47
Ort. Opt. % Bitüm		Tip A	% 4,53	% 4,65
		Tip B	% 4,77	% 4,79
		Tip C	% 4,90	% 4,81

Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelerinde stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri Çizelge 4.13’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.13. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	TİP	“Grafik yöntemi” % Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	Tip A	2,415	2,43
	Tip B	2,420	2,38
	Tip C	2,410	2,2
Stabilite	Tip A	2060	1925
	Tip B	1950	1790
	Tip C	1820	1857
Asfaltla Dolu Boşluk	Tip A	72,0	76,5
	Tip B	72,0	68,5
	Tip C	76,0	71,5
Boşluk	Tip A	3,60	3,25
	Tip B	4,30	4,09
	Tip C	3,90	4,17
Akma	Tip A	4,6	5,7
	Tip B	4,9	5,1
	Tip C	6,3	6,1

Bu çalışma incelendiğinde R^2 anlamlılık düzeylerinin çok yüksek çıkması, gerekse karışımdan beklenen özelliklerin çok yakın değerlerde seyretmesi deneyin şartname sınırları ve Marshall deney kriterlerine uyulduğunu göstermiştir. Fakat Tip A, Tip B ve Tip C karışımlarının verilerine bağlı olarak çizilen serpmme grafikleri incelendiğinde Tip A ve Tip B’de parabolik eğrilerin net bir şekilde oluştuğu görülmüş ve değerlerin açıkça okunabilmesine olanak sağlamıştır. Tip C’de ise stabilite grafiğinde ise Marshall deney sonuçlarının karakteristiklerine ters düşen bir durum söz konusudur. Çünkü stabilite için çizilen parabolik fonksiyon belirli bir bitüm yüzdesi aralığı için artan, bu aralığı takip eden aralıkta azalan bir fonksiyon sergilemesi gerekirken, tam tersi bir durum söz konusudur. Bu nedenle Tip C karışımı için deney kriterleri tekrar gözden geçirildiğinde stabilite ve diğer fiziksel özelliklerin temelini oluşturan agrega granülometrisinin, şartname sınırları dışına çıktığı tespit edilmiştir.

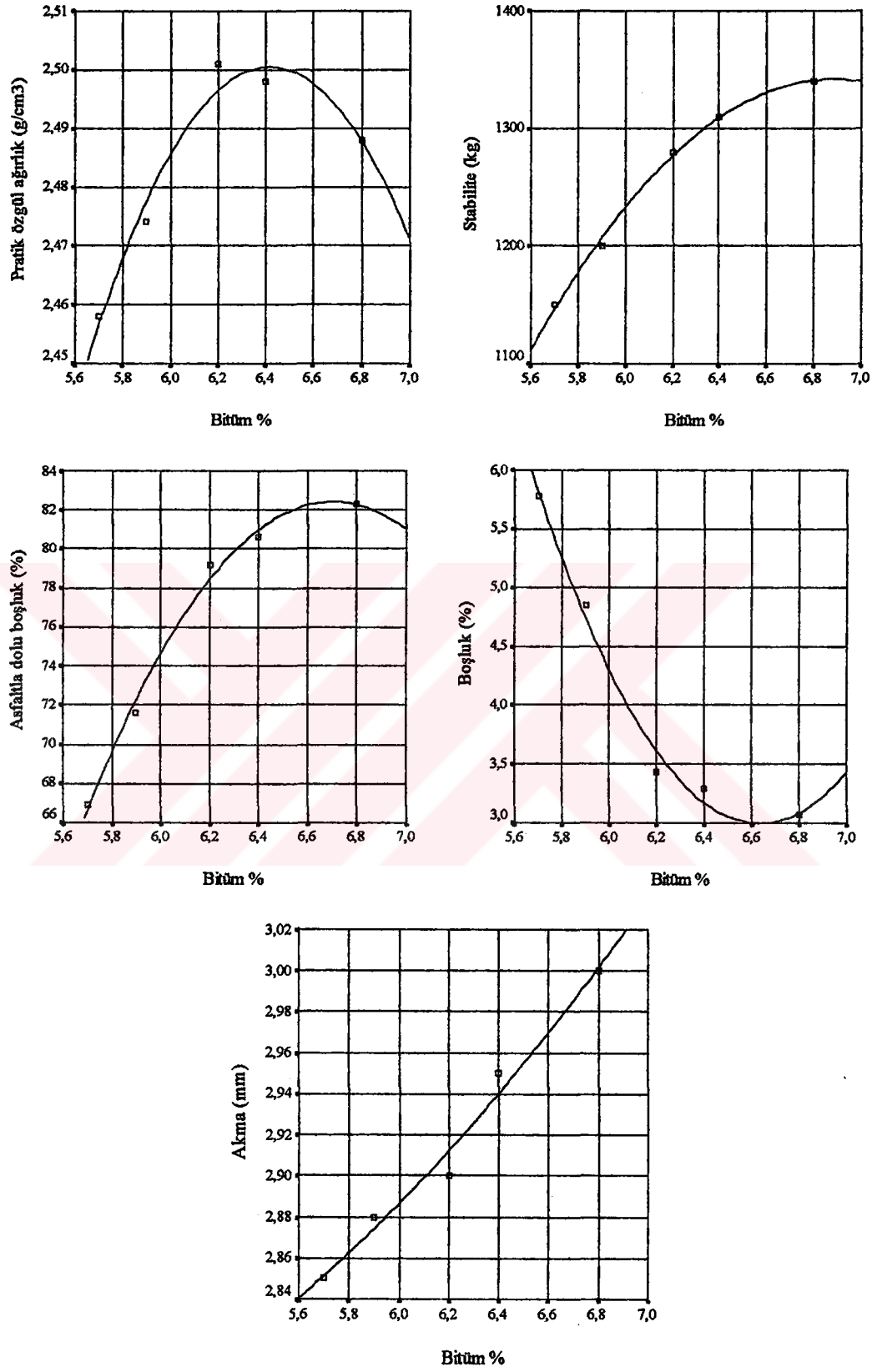
4.1.4. Örnek 4

Asfalt betonu dizaynı amacıyla Yapracık malzemesi aşınma tabakası denemesi Tip 2 gradasyon limitleri ortalaması alınarak yapılan Marshall deney sonuçları Çizelge 4.14’de verilmiştir (23).

Çizelge 4.14. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağır. (D _p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V _f)	% Boşluk (V _h)	Akma (mm)
5,7	2,458	1150	66,88	5,78	2,85
5,9	2,474	1200	71,62	4,85	2,88
6,2	2,501	1280	79,20	3,43	2,90
6,4	2,498	1310	80,62	3,29	2,95
6,8	2,488	1340	82,29	3,07	3,0

Çizelge 4.14’deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpm diyagramı yapılmış ve uygun regrasyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.6’da bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpm diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.15’deki regrasyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.6 % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri

Çizelge 4.15. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = -1,0302 + 1,1006x - 0,0858 x^2$	0,967
Stabilite	$Y = -5263,0 + 1918,95x - 139,38x^2$	0,997
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -625,43 + 211,241x - 15,760 x^2$	0,993
Boşluk	$Y = 145,273 - 42,891x + 3,2325 x^2$	0,989
Akma	$Y = 2,9971 - 0,1615x + 0,0238x^2$	0,980

Çizelge 4.15’de verilen denklemler çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdelerinin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası %5,7 olarak bulunurken grafik metoduyla bulunan optimum bitüm muhtevası %6 olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelerinde stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 6 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 5,7 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2,497	2,455
Stabilite	1475	1147
Asfaltla Dolu Boşluk	75	67,5
Boşluk	4,0	5,8
Akma	2,9	2,84

Verilen bu örnekte grafik metoduyla bulunan optimum bitüm istatistiki metotla bulunan optimum bitüme yakınlık göstermesine rağmen, optimum bitüme göre bulunan karışımdan beklenen özellikler belirlenirken stabilite değerinin “1475” bulunması serpmme grafikleri incelendiğinde imkansız görülmektedir.

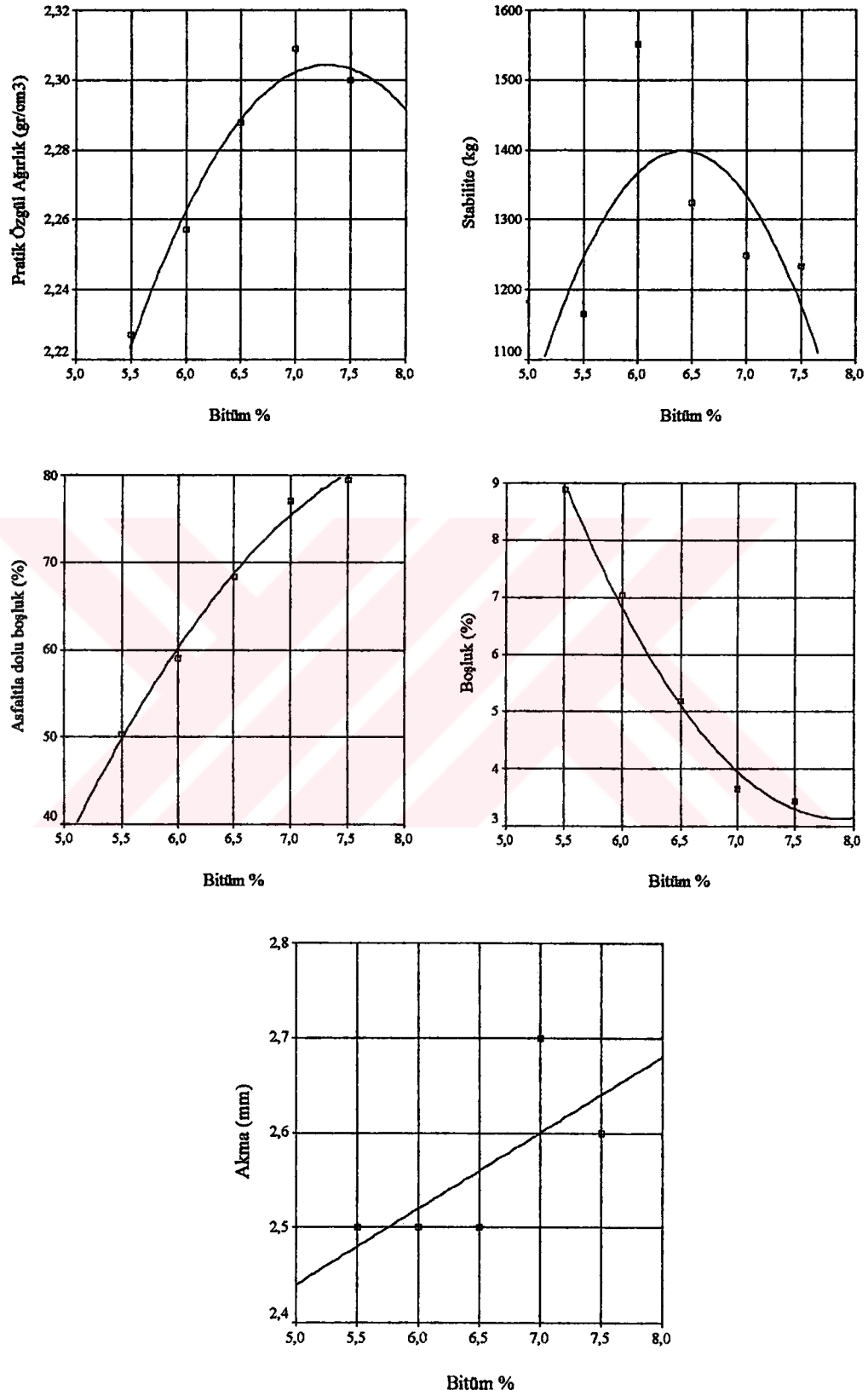
4.1.5. Örnek 5

Asfalt betonu dizaynı amacıyla gerede malzemesi aşınma tabakası denemesi Tip 2 gradasyon limitleri ortalaması alınarak %5,5-6,0-6,5-7,0-7,5 oranlarında bitüm katılmış her bir bitüm yüzdesi için üç adet Marshall biriketi hazırlanmış ve yapılan Marshall deney sonuçları Çizelge 4.17’de verilmiştir (23).

Çizelge 4.17. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D_p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V_f)	% Boşluk (V_h)	Akma (mm)
5,5	2,227	1166	50,3	8,88	2,5
6,0	2,257	1551	59,0	7,04	2,5
6,5	2,288	1324	68,4	5,18	2,5
7,0	2,309	1249	77,1	3,67	2,7
7,5	2,300	1234	79,5	3,44	2,6

Çizelge 4.17’deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpmeye diyagramı yapılmış ve uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.7’de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpmeye diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.18’deki regresyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.7 % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri

Çizelge 4.18. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

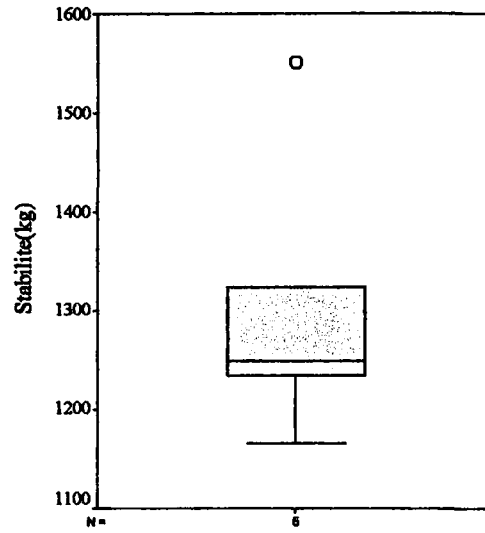
Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 0,9691 + 0,3665x - 0,0251x^2$	0,979
Stabilite	$Y = -6209,1 + 2373,66x - 185,14x^2$	0,371
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -191,24 + 64,7x - 3,8x^2$	0,991
Boşluk	$Y = 66,7520 - 16,11x + 1,02x^2$	0,992
Akma	$Y = 2,0400 + 0,0800x + 4,7 \times 10^{-16}x^2$	0,500

Çizelge 4.18'de verilen denklemler çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdelerinin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası %7,03 olarak bulunurken grafik metoduyla bulunan optimum bitüm muhtevası %6 olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelerinde stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.19).

Çizelge 4.19. Karışımın beklenen özelliklerin karşılaştırılması

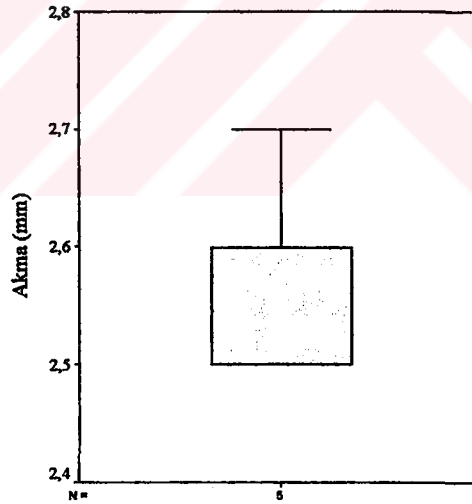
Karışımın özelliği	"Grafik yöntemi" % 6 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 7,03 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2,31	2,30
Stabilite	1360	1327
Asfaltla Dolu Boşluk	68	75,8
Boşluk	4,9	3,9
Akma	2,48	2,60

Yapılan regresyon analizi sonucunda stabilite ve akma deneyine ait R^2 değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür. Veri dağılımlarını kontrol etmek için yapılan veri dağılım (kutu) grafiğinde stabilite deney sonuçlarına ait ekstrem değerlerin olduğu ve dağılımın pozitif yönde çarpık olduğu görülmüştür (Şekil 4.8). Buda deney sonucunda elde edilen veri dağılımlarında deney sınırlarını aşan ekstrem değerlerin var olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8 Stabilite verilerine ilişkin kutu grafiği

Akma verilerine göre yapılan veri dağılım (kutu) grafiğine göre ise ekstrem değerlerin olmadığı ancak dağılım pozitif yönde çarpık olduğu görülmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Akma verilerine ilişkin kutu grafiği

Grafiklerden de anlaşılaçağı üzere Stabilite ve akma deney verilerinin normal dağılım göstermediğı ve deney sonuçlarının şartname sınırlarının dışına çıkmış uç değerlerin varlığından dolayı, bu deney verilerine göre tahmin edilecek olan optimum bitüm yüzdesinin hatalı olacağı görülmektedir. Bu nedenle stabilite ve akma için deneyin yeniden yapılması optimum bitüm yüzdesinin daha doğru tahmin edileceğı düşünölmektedir.

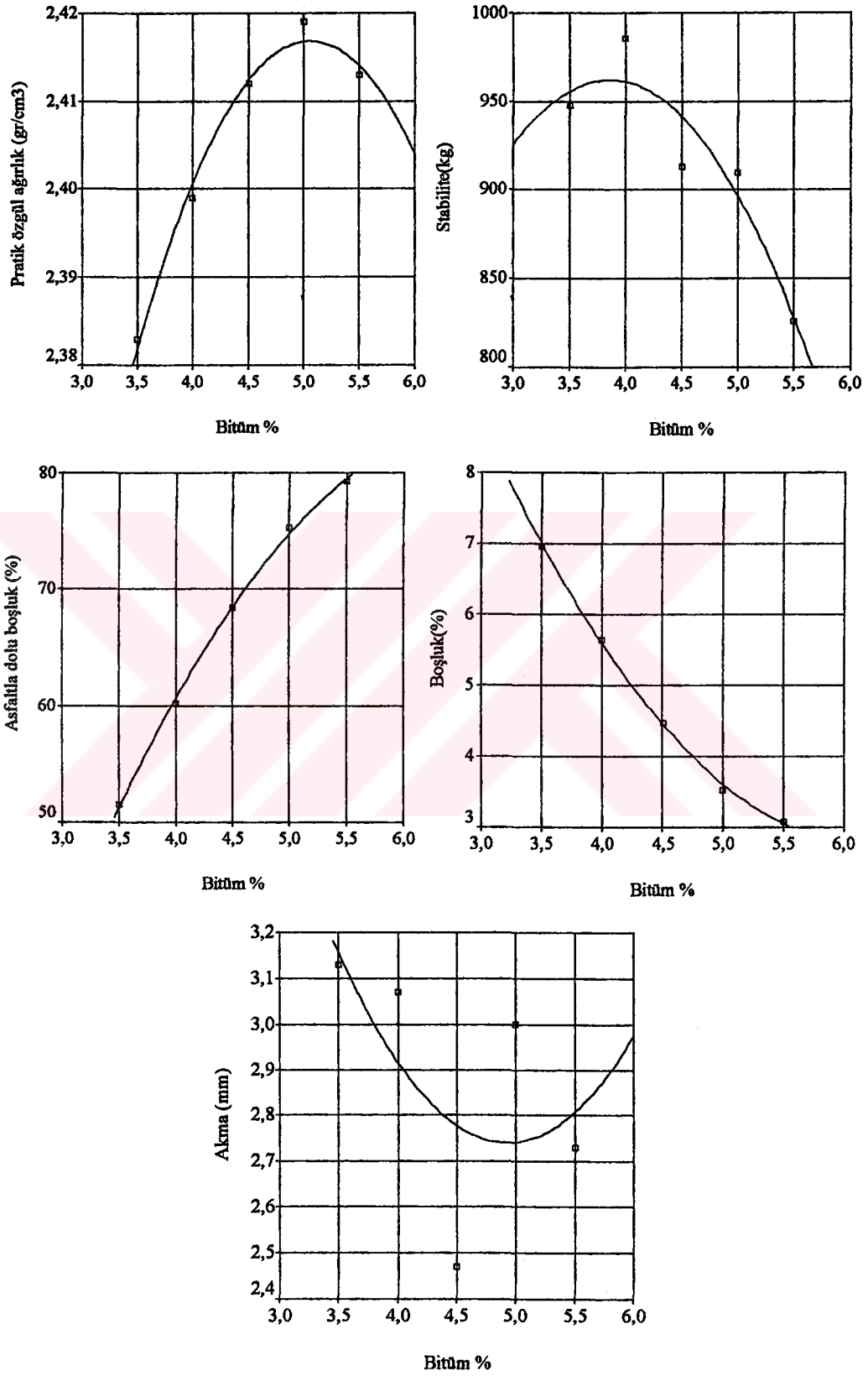
4.1.6. Örnek 6

Asfalt betonu dizaynı amacıyla Anadolu otoyolu Harem-Gebze kesimi için KGM tarafından yapılmış aşınma tabakası denemesi Tip 2 gradasyon limitleri ortalaması alınarak %3,5-4,0-4,5-5,0-5,5 oranlarında bitüm katılmış her bir bitüm yüzdesi için üç adet Marshall biriketi hazırlanmış ve yapılan Marshall deney sonuçları Çizelge 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.20. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D _p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V _f)	% Boşluk (V _h)	Akma (mm)
3,5	2,383	948	51,5	6,96	3,13
4,0	2,399	986	60,2	5,65	3,07
4,5	2,412	913	68,4	4,48	2,47
5,0	2,419	610	75,3	3,53	3,00
5,5	2,413	826	79,3	3,09	2,73

Çizelge 4.20’deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpm diyagramı yapılmış ve uygun regrasyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.10’da bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpm diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.21’deki regrasyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.10 % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri

Çizelge 4.21. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 2,0511 + 0,1446x - 0,0143x^2$	0,988
Stabilite	$Y = 222,743 + 383,42x - 49,712x^2$	0,882
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -57,069 + 41,6543x - 3,0571x^2$	0,999
Boşluk	$Y = 24,6760 - 7,0120x + 0,56x^2$	0,999
Akma	$Y = 7,6694 - 1,9997x + 0,2029x^2$	0,368

Çizelge 4.21’de verilen denklemler çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdelерinin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası % 4,80 olarak bulunurken grafik metoduyla bulunan optimum bitüm muhtevası % 4,58 olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelерinde stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.22).

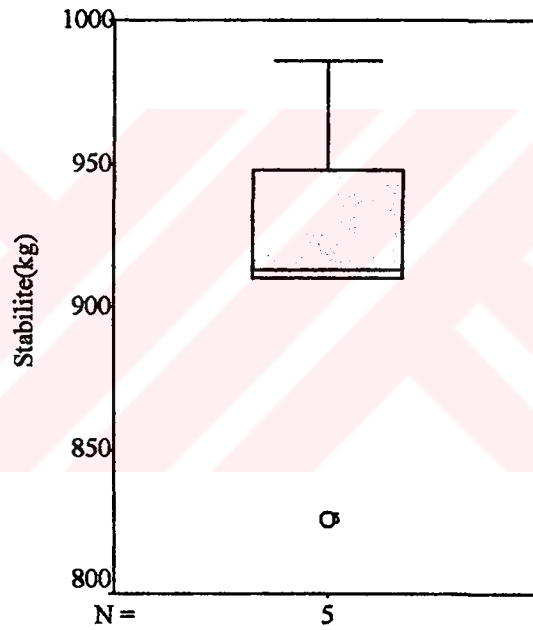
Çizelge 4.22. Karışımдан beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 4,58 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 4,80 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2,413	2,415
Stabilite	940	917
Asfaltla Dolu Boşluk	69,5	72,5
Boşluk	4,3	3,92
Akma	3,10	2,75

Deneysel veriler incelendiğinde optimum bitüm muhtevasının tespitinde kullanılan parametrelerden asfaltla dolu boşluk dizayn kriteri için KGM’nin aşınma tabakası için öngördüğü % 75-85 boşluk yüzdesinin ortalaması olan %80 asfaltla dolu boşluk yüzdesine karşılık gelen bitüm yüzdesi alınması gerekirken binder tabakası kriteri olan % 65-75 boşluk yüzdesinin ortalaması olan %70 asfaltla dolu boşluk yüzdesine karşılık gelen bitüm yüzdesi alınarak optimum bitüm belirlenmeye çalışılmıştır. Buda optimum bitüm muhtevasını

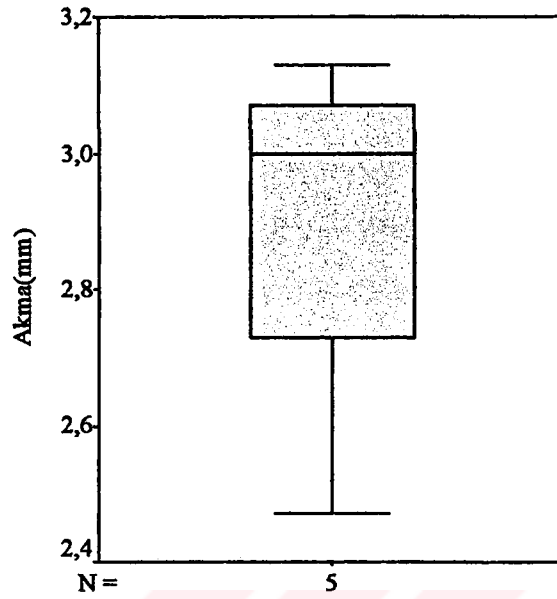
önemli derecede etkilemiş ve dolayısıyla karışımından beklenen özelliklerin güvenilirliğini düşürmüştür.

Yapılan regresyon analizi sonucunda stabilite ve akma deneyine ait R^2 değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür. Veri dağılımlarını kontrol etmek için yapılan veri dağılım (kutu) grafiğinde stabilite deney sonuçlarına ait ekstrem değerlerin olduğu ve dağılımın pozitif yönde çarpık olduğu görülmüştür (Şekil 4.11). Buda deney sonucunda elde edilen veri dağılımlarında deney sınırlarını aşan ekstrem değerlerin var olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.11 Stabilite verilerine ilişkin kutu grafiği

Akma verilerine göre yapılan veri dağılım (kutu) grafiğine göre ise ekstrem değerlerin olmadığı ancak dağılım negatif yönde çarpık olduğu görülmüştür (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Akma verilerine ilişkin kutu grafiği

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere stabilite ve akma deney verilerinin normal dağılım göstermediği ve deney sonuçlarının şartname sınırlarının dışına çıkmış uç değerlerin varlığından dolayı, bu deney verilerine göre tahmin edilecek olan optimum bitüm yüzdesinin hatalı olacağı görülmektedir. Bunun yanı sıra optimum bitüme göre tespit edilen akma değeri gerek grafik üzerinde gerekse istatistiki yaklaşımla bulunan optimum bitüm yüzdesinde 3,10 olarak tespit edilmesi olanaksız görülmektedir. Bu nedenle stabilite ve akma için deneyin yeniden yapılması veya deneyin tekrarlanması optimum bitüm yüzdesinin daha doğru tahmini için uygun düşeceği düşünülmektedir.

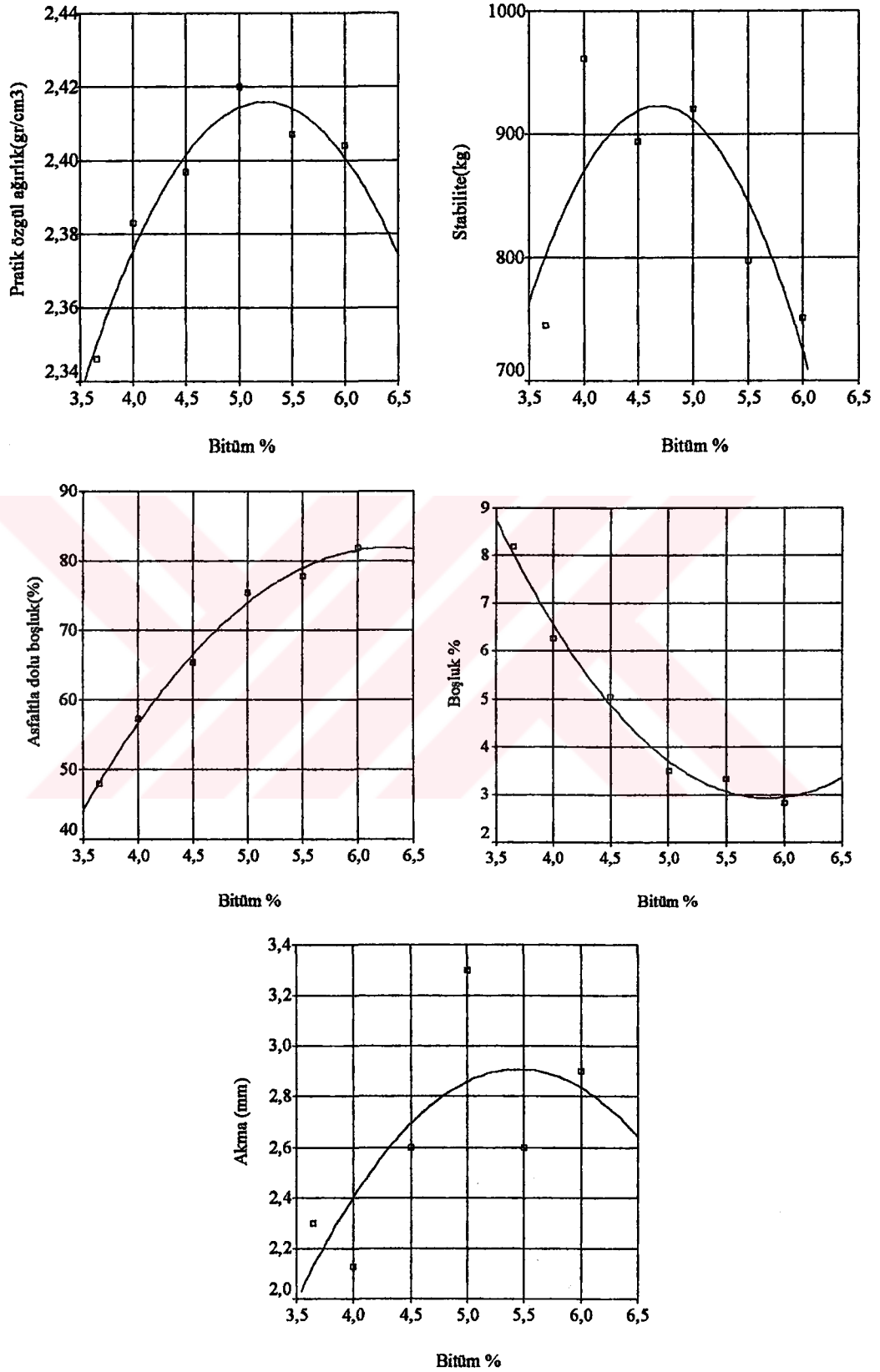
4.1.7. Örnek 7

Asfalt betonu dizaynı amacıyla Onur inşaat tarafından yapılan Santimaş taşocağından elde edilen agraga ile aşınma tabakası denemesi Tip 2 gradasyon limitleri ortalaması alınarak, %3,65-4,0-4,5-5,0-5,5-6,0 oranlarında bitüm katılmış her bir bitüm yüzdesi için üç adet Marshall biriketi hazırlanmış ve yapılan Marshall deney sonuçları Çizelge 4.23'de verilmiştir.

Çizelge 4.23. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D _p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V _f)	% Boşluk (V _h)	Akma (mm)
3,65	2,346	745	48,0	8,20	2,3
4,0	2,383	961	57,3	6,28	2,13
4,5	2,397	894	65,5	5,04	2,60
5,0	2,420	921	75,4	3,50	3,30
5,5	2,407	798	77,8	3,34	2,60
6,0	2,404	751	81,9	2,83	2,90

Çizelge 4.23'deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpmeye diyagramı yapılmış ve uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.13'de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpmeye diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.24'deki regresyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.13 % Bitüme göre – serpme diyagramı grafikleri

Çizelge 4.24. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 1,7005 + 0,2730x - 0,0260x^2$	0,946
Stabilite	$Y = -1602,7 + 1078,94x - 115,22x^2$	0,642
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -110,42 + 61,3125x - 4,8869x^2$	0,994
Boşluk	$Y = 38,8475 - 12,253x + 1,045x^2$	0,988
Akma	$Y = -4,2306 + 2,6201x - 0,2404x^2$	0,541

Çizelge 4.24’de verilen denklemler çözümlenmiş ve elde edilen bitüm yüzdelерinin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası %5,10 olarak bulunurken grafik metoduyla bulunan optimum bitüm muhtevası %4,63 olarak belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen optimum bitüm yüzdelерinde stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.25).

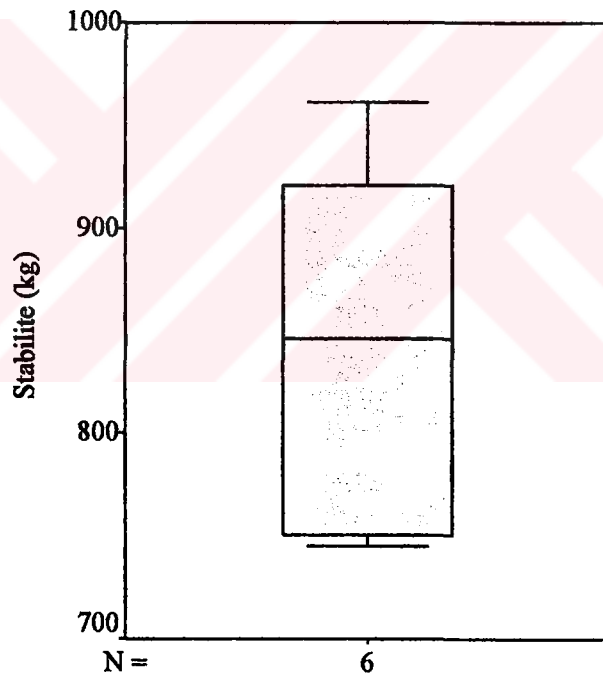
Çizelge 4.25. Karışımın beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 4,63 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 5,10 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2,406	2,417
Stabilite	925	903
Asfaltla Dolu Boşluk	68,3	75,1
Boşluk	4,5	3,53
Akma	2,725	2,87

Deneysel veriler incelendiğinde optimum bitüm muhtevasının tespitinde kullanılan parametrelerden asfaltla dolu boşluk dizayn kriteri için KGM’nin aşınma tabakası için öngördüğü % 75-85 boşluk yüzdesinin ortalaması olan %80 asfaltla dolu boşluk yüzdesine karşılık gelen bitüm yüzdesi alınması gerekirken binder tabakası kriteri olan % 65-75 boşluk yüzdesinin ortalaması olan %70 asfaltla dolu boşluk yüzdesine karşılık gelen bitüm yüzdesi alınarak optimum bitüm belirlenmeye çalışılmıştır. Buda optimum bitüm muhtevasını

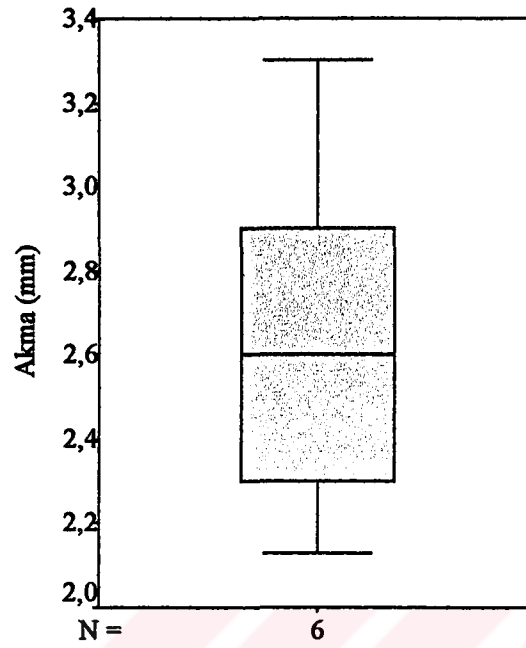
önemli derecede etkilemiş ve dolayısıyla karışımdan beklenen özelliklerin güvenilirliğini düşürmüştür.

Yapılan regresyon analizi sonucunda stabilite ve akma deneyine ait R^2 değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür. Veri dağılımlarını kontrol etmek için yapılan veri dağılım (kutu) grafiğinde stabilite deney sonuçlarına ait ekstrem değerlerin olduğu ve dağılımın pozitif yönde çarpık olduğu görülmüştür (Şekil 4.14). Buda deney sonucunda elde edilen veri dağılımlarında deney sınırlarını aşan ekstrem değerlerin var olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.14 Stabilite verilerine ilişkin kutu grafiği

Akma verilerine göre yapılan veri dağılım (kutu) grafiğine göre ise ekstrem değerlerin olmadığı ancak dağılım negatif yönde çarpık olduğu görülmüştür (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Akma verilerine ilişkin kutu grafiği

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere stabilite ve akma deney verilerinin normal dağılım göstermediği ve deney sonuçlarının şartname sınırlarının dışına çıkmış uç değerlerin varlığından dolayı, bu deney verilerine göre tahmin edilecek olan optimum bitüm yüzdesinin hatalı olacağı görülmektedir. Bunun yanı sıra optimum bitüme göre tespit edilen karışımdan beklenen özelliklerin grafikleri çizilmiş ve optimum bitümün tespiti için KGM şartnamesinin aşınma tabakası için öngördüğü kriterlere uyulmadığı görülmüştür. Dolayısıyla karışımdan beklenen özellikler istatistiki yöntemle bulunan sonuçlarla karşılaştırıldığında deneyin güvenilirliğinin düştüğü açıkça görülmüştür.

4.2. Yapmış Olduğuz Örnek Çalışmaların İstatistiki Analizi

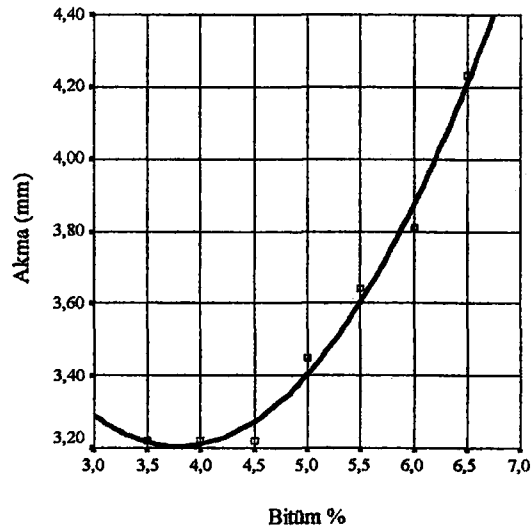
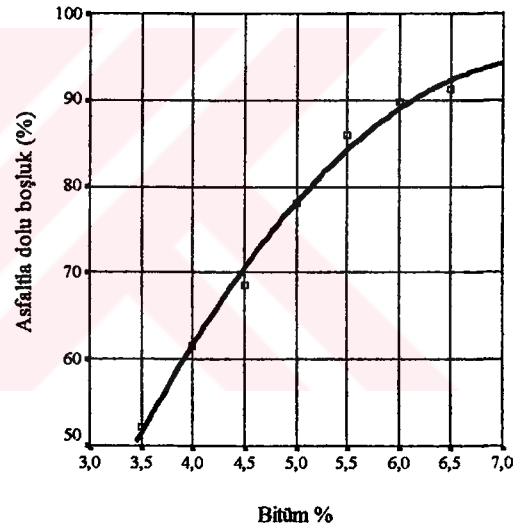
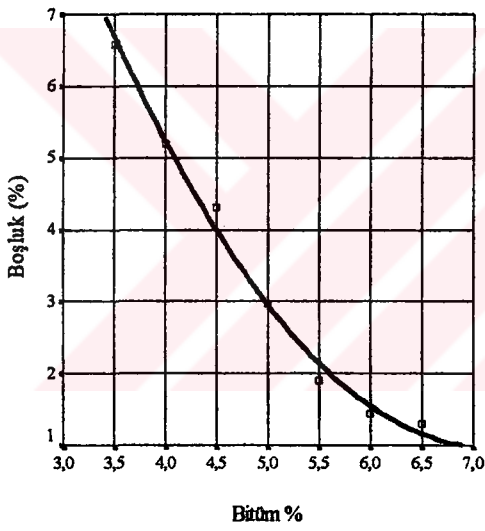
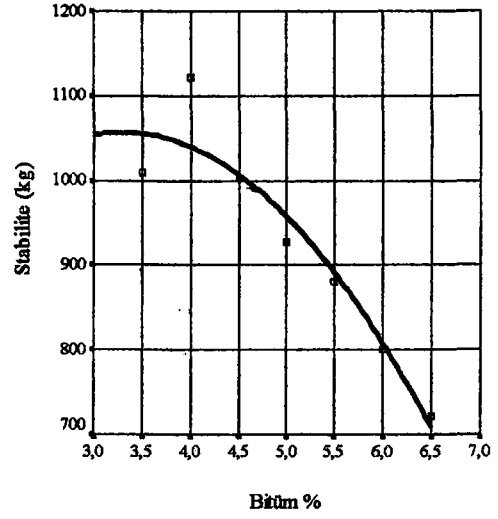
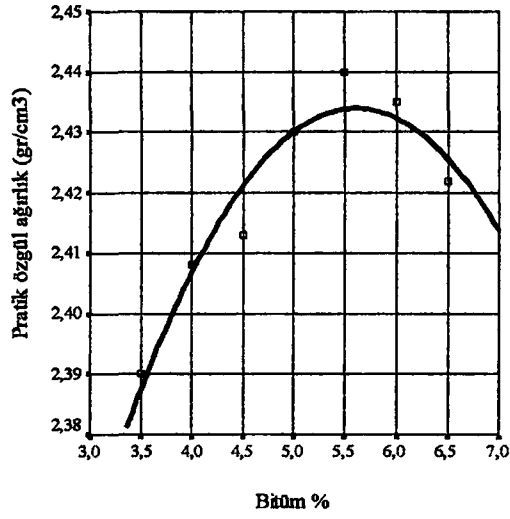
4.2.1. Örnek 1

Asfalt betonu dizaynı amacıyla yapmış olduğumuz bu örnekte Alacaatlı mevki Koçyiğit taş ocağından elde edilen agrega ile aşınma tabakası Tip2 gradasyon limitleri ortalaması alınarak her bir biriket için 1100 gr agrega hazırlanmış, %3,5-4,0-4,5-5,0-5,5-6,0-6,5 oranlarında AÇ 57 penetrasyonlu bitüm katılmıştır. Deneyin hassasiyetini artırmak amacıyla her bir bitüm yüzdesi için üç adet Marshall biriketi yerine beş adet Marshall biriketi hazırlanmıştır. Marshall biriketlerinin hazırlanmasında KGM. Fenni şartnamesinde belirtildiği gibi, dizaynın ağır trafik sınıfı (ETDY tekerrür sayısı $> 10^6$) olduğu kabul edilerek Marshall biriketrinin her iki yüzeyine 75 darbe uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler bir gün süreyle beklemeye bırakılmıştır. TS 3720'ye göre Marshall deneyi yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.26'deki gibi bulunmuştur.

Çizelge 4.26. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D _p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V _f)	% Boşluk (V _h)	Akma (mm)
3,5	2,390	1009	52,2	6,57	3,22
4,0	2,408	1121	61,6	5,19	3,22
4,5	2,413	1003	68,6	4,31	3,22
5,0	2,430	927	78,1	2,97	3,45
5,5	2,440	881	85,9	1,91	3,64
6,0	2,435	801	89,8	1,44	3,81
6,5	2,422	721	91,3	1,31	4,23

Çizelge 4.26'deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpmeye diyagramı yapılmış ve uygun regasyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.16'de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpmeye diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.27'deki regasyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.16 % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri

Çizelge 4.27. Karışım özelliklerinin regresyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 2,1062 + 0,1169x - 0,0104x^2$	0,928
Stabilite	$Y = 692,571 + 221,952x - 33,810x^2$	0,909
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -59,600 + 41,4524x - 2,781x^2$	0,993
Boşluk	$Y = 22,6829 - 6,0533x + 0,4219x^2$	0,992
Akma	$Y = 5,1679 - 1,0360x + 0,1367x^2$	0,982

Olarak belirlenmiş R^2 değerleri incelendiğinde bitüm yüzdeleri ile karışım özellikleri arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Regrasyon denklemleri çözümlenmiş ve model denklemleri üzerinden şartname sınırları göz önünde bulundurularak her bir karışım özelliği için bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda grafikler üzerinden her bir karışım özelliği için bitüm yüzdeleri belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen bitüm yüzdelere göre optimum bitüm hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.28’de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.28. Optimum bitüm yüzdelерinin karşılaştırması

Karışımın özelliği	Şartname Limitleri	Grafik % bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	Max	5,5	5,62
Stabilite	Max	4,0	3,28
Asfaltla Dolu Boşluk	%80	5,1	5,14
Boşluk	%4	4,6	4,49
Ort. Opt. % Bitüm		4,8	4,63

Çizelge 4.28. incelendiğinde pratik özgül ağırlık ve stabilite değerleri KGM. nün şartnamede öngördüğü kriterler göz önünde bulundurulmuş ve max değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri grafik üzerinden okunmuştur. Aynı kriterler asfaltla dolu boşluk ve boşluk içinde söz konusu olup, aşınma tabakası için belirtilen değerlere karşılık gelen bitüm yüzdeleri grafik üzerinden okunmuştur. Asfalt betonu karışım özellikleri için oluşturulan regresyon model denklemleri parabolik eğri ifade ettiğinden, pratik özgül ağırlık ve stabilite değerleri için parabolik eğrinin tepe noktasının apsisi bize pratik özgül ağırlık ve stabilite için bitüm

yüzdesini vermektedir. Asfaltla dolu boşluk ve boşluk için şartnamenin öngördüğü değerler regrasyon model denkleminde ordinat (y) değeri denklemde yerine konup hesaplamalar yapıldığında elde edilen apsis değeri, asfaltla dolu boşluk ve boşluk için bitüm yüzdesini vermektedir. Elde edilen bitüm yüzdelерinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası tespit edilmiştir. Her iki yöntemle de belirlenen optimum bitüm yüzdeleri kullanılarak stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değeri her iki yöntemle hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.29).

Çizelge 4.29. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	"Grafik yöntemi" % 4,80 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 4.63 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2.427	2.42
Stabilite	975	995
Asfaltla Dolu Boşluk	77	72,7
Boşluk	3.3	3.7
Akma	3,34	3,3

Asfalt betonu aşınma tabakası Tip 2 dizaynı için daha önce yapılmış çalışmalarda tespit edilen hatalar ikinci, dördüncü, beşinci ve yedinci örnekler incelendiğinde, serpmе grafikleri üzerinde okunan değerlerde hata yapılması, yeterli bitüm yüzdesinde aralığında deney yapılmaması, Marshall deney prosedürü ve K.G.M. fenni şartnamesinde belirtilen kriterlerin gözden kaçırılması gibi sebeplerden ötürü optimum bitümün belirlenmesinde ve dolayısıyla asfalt betonu fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde hatalı sonuçlar doğurmuştur.

Hataya sebebiyet veren durumlar göz önünde bulundurularak yapılan bu örnek çalışmada gerek grafik metoduyla gerekse model denklemi metoduyla hesap edilen, asfalt betonu karışımından beklenen özellikler arasında birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuç R^2 anlamlılık değeri kontrol edildiğinde açıkça görülmektedir. Bu durum asfalt betonu dizaynı yapılırken KGM. fenni şartnamesi ve Marshall deney prosedüründe belirtilen kriterlere titizlikle uyulması gerekliliğini ortaya koymakla birlikte, model denklemleri üzerinden okunan değerlerin çok daha sağlıklı sonuçlar doğurduğunu bu örnekte bir kere daha ortaya koymuştur.

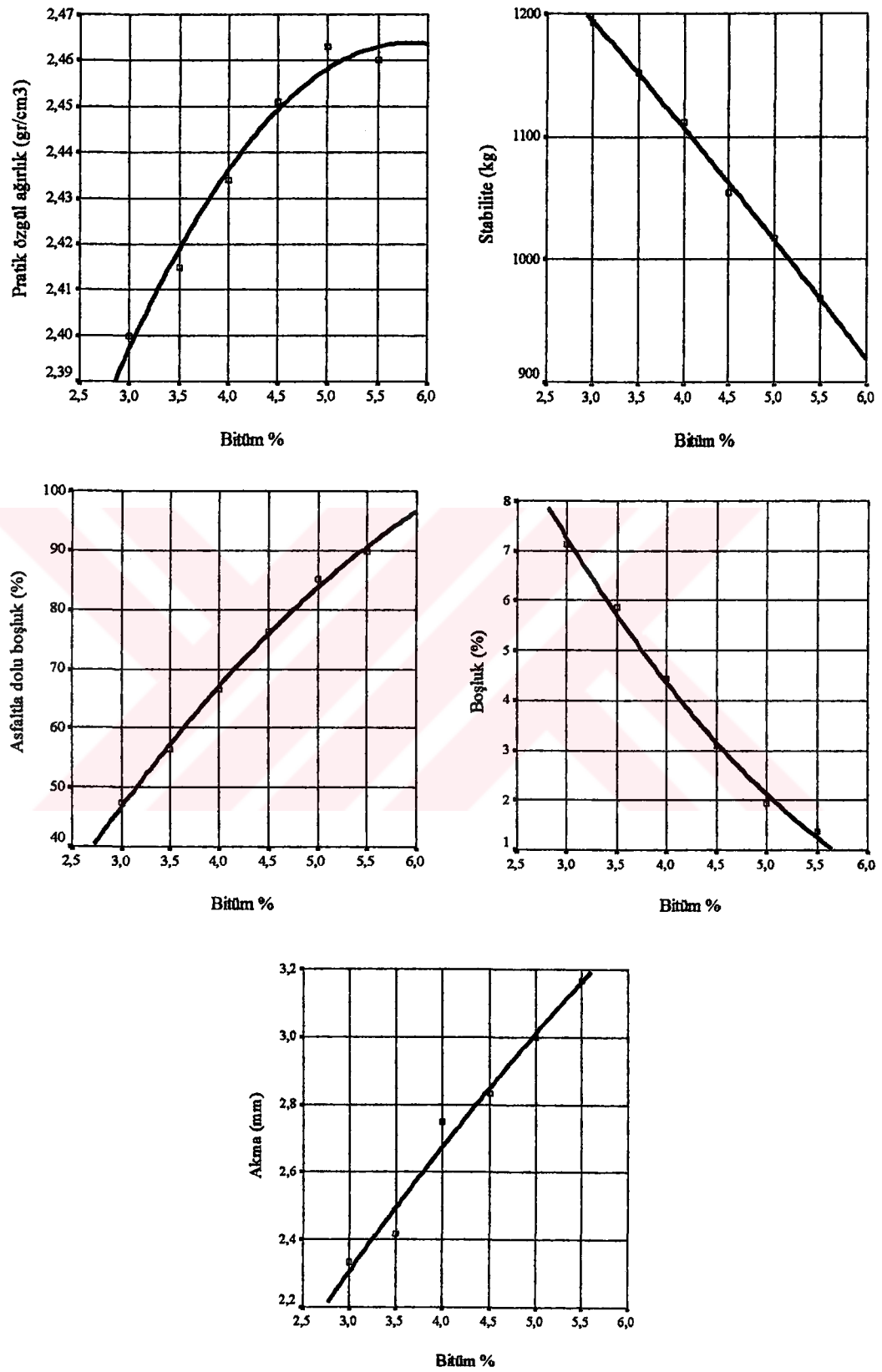
4.2.2. Örnek 2

Asfalt betonu dizaynı amacıyla yapmış olduğumuz bu örnekte Adapazarı Taşkısı taş ocağından KGM. laboratuvarlarına gelen agregaya ile binder tabakası Tip3 gradasyon limitlerine göre her bir numune için 1150 gr agregaya hazırlanmış, %3,0-4,0-4,5-5,0-5,5 oranlarında AÇ 60 penetrasyonlu bitüm katılmıştır. Her bir bitüm yüzdesi için üçer adet Marshall biriketi hazırlanmıştır. Marshall biriketlerinin hazırlanmasında KGM. Fenni şartnamesinde belirtildiği gibi, dizaynın ağır trafik sınıfını (ETDY tekerrür sayısı $> 10^6$) temsil etmesi açısından Marshall biriketinin her iki yüzeyine 75 darbe uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler bir gün süreyle beklemeye bırakılmıştır. TS 3720'ye göre Marshall deneyi yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.30'deki gibi bulunmuştur.

Çizelge 4.30. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağr. (D _p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V _f)	% Boşluk (V _h)	Akma (mm)
3,0	2,400	1193,00	47,40	7,13	2,33
3,5	2,415	1152,00	56,40	5,87	2,42
4,0	2,434	1112,00	66,40	4,44	2,75
4,5	2,451	1055,00	76,30	3,08	2,83
5,0	2,463	1017,00	85,10	1,93	3,00
5,5	2,460	968,00	89,80	1,38	3,17

Çizelge 4.30'deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpmeye diyagramı yapılmış ve uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.17'de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpmeye diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.31'deki regresyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.17 % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri

Çizelge 4.31. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 2,1791 + 0,0980x - 0,0084x^2$	0.981
Stabilite	$Y = 1428,63 - 71,257x - 2,2857x^2$	0.998
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -37,129 + 33,5679x - 1,8786x^2$	0.997
Boşluk	$Y = 19,9366 - 5,2314x + 0,3336x^2$	0.996
Akma	$Y = 0,9852 + 0,4934x - 0,0177x^2$	0.976

Olarak belirlenmiş R^2 değerleri incelendiğinde bitüm yüzdeleri ile karışım özellikleri arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Regrasyon denklemleri çözümlenmiş ve model denklemleri üzerinden şartname sınırları göz önünde bulundurularak her bir karışım özelliği için bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda grafikler üzerinden her bir karışım özelliği için bitüm yüzdeleri belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen bitüm yüzdelere göre optimum bitüm hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.32’de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.32. Optimum bitüm yüzdelерinin karşılaştırması

Karışımın özelliği	Şartname Limitleri	Grafik % bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	Max	5	5.8
Stabilite	Max	3	3
Asfaltla Dolu Boşluk	%70	4.25	4.15
Boşluk	%5	3.75	3.75
Ort. Opt. % Bitüm		4	4.175

Çizelge 4.28. incelendiğinde pratik özgül ağırlık ve stabilite değerleri KGM. nün şartnamede öngördüğü kriterler göz önünde bulundurulmuş ve max değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdeleri grafik üzerinden okunmuştur. Aynı kriterler asfaltla dolu boşluk ve boşluk içinde söz konusu olup, binder tabakası için belirtilen değerlere karşılık gelen bitüm yüzdeleri grafik üzerinden okunmuştur. Asfalt betonu karışım özellikleri için oluşturulan regrasyon model denklemleri parabolik eğri ifade ettiğinden, pratik özgül ağırlık ve stabilite değerleri için parabolik eğrinin tepe noktasının apsisi bize pratik özgül ağırlık ve stabilite için bitüm

yüzdesini vermektedir. Asfaltla dolu boşluk ve boşluk için şartnamenin öngördüğü değerler regrasyon model denkleminde ordinat (y) değeri denkleminde yerine konup hesaplamalar yapıldığında elde edilen apsis değeri, asfaltla dolu boşluk ve boşluk için bitüm yüzdesini vermektedir. Elde edilen bitüm yüzdelerinin aritmetik ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası tespit edilmiştir. Her iki yöntemle de belirlenen optimum bitüm yüzdeleri kullanılarak stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri her iki yöntemle hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.33).

Çizelge 4.33. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 4.0 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 4.175 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2.43	2.44
Stabilite	1110	1091
Asfaltla Dolu Boşluk	66	70.2
Boşluk	4.3	3.9
Akma	2.67	2.73

Asfalt betonu binder tabakası Tip3 dizaynı için daha önce isfalt tarafından yapılan çalışma incelendiğinde, gerek grafik üzerinden yapılan okumalar gerekse matematiksel model denklemleri üzerinden yapılan okumalar sonucunda elde edilen optimum bitüm yüzdelerinde çok yakın değerler elde edilmiş ve optimum bitüm muhtevasındaki bu anlamlı yakınlık doğal olarak karışımdan beklenen fiziksel özelliklere de yansıdığı tespit edilmişti.

Binder tabakası Tip3’e göre dizaynı söz konusu olan bu çalışmada da, optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi için gerekli olan pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk ve boşluk grafikleri incelendiğinde Çizelge 4.32’de okunan değerlerin, model denklemleri üzerinden okunan değerlere çok yakın olduğu görülmüştür. Bu yakınlık R^2 anlamlılık değerleri kontrol edildiğinde açıkça görülmektedir. Bu deneysel çalışmada optimum bitüm muhtevasındaki bu anlamlı yakınlık doğal olarak karışımdan beklenen özelliklere de yansımıştır.

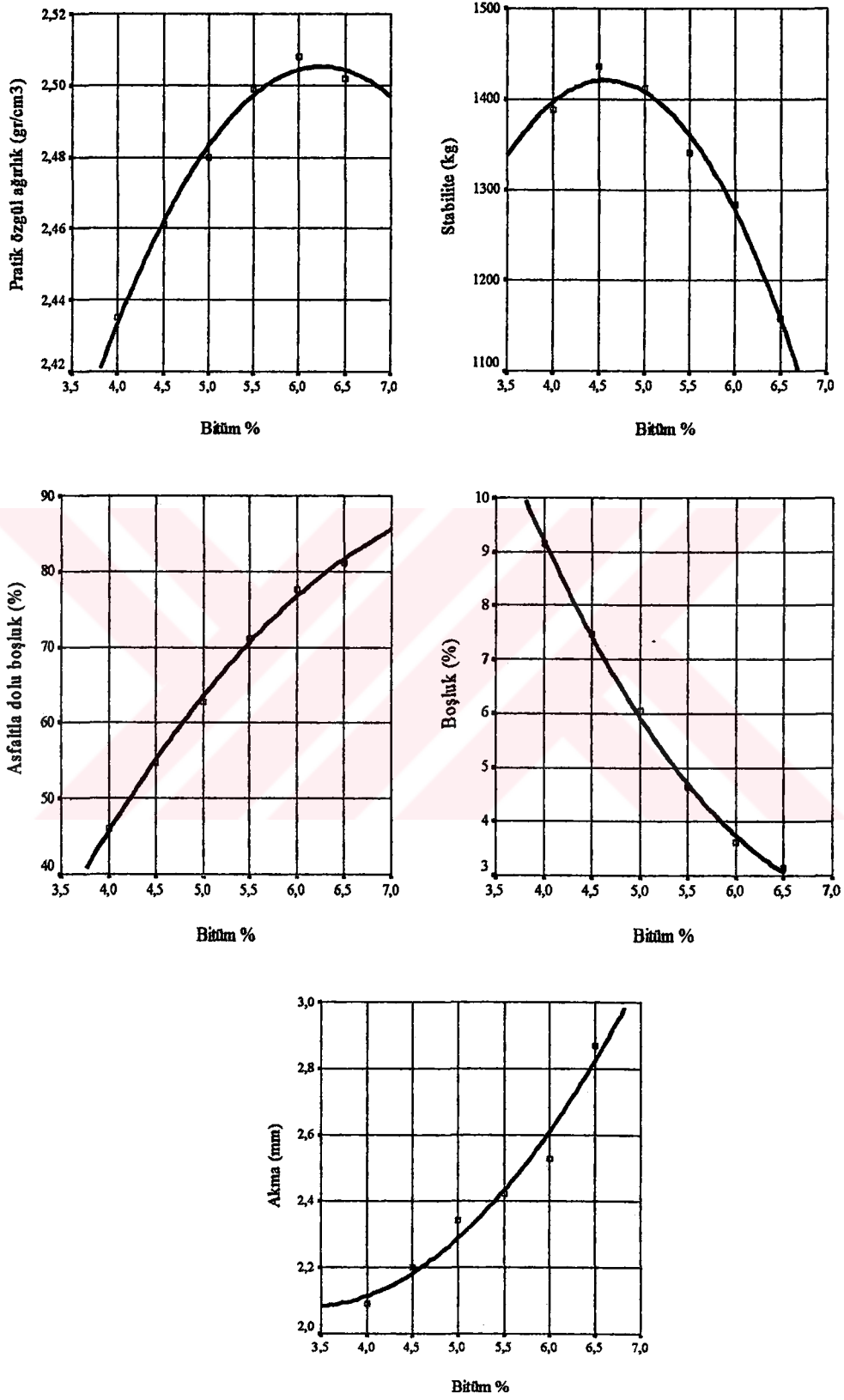
4.2.3. Örnek 3

Asfalt betonu dizaynı amacıyla yapmış olduğumuz bu örnekte Alacaatlı mevki Koçyiğit taş ocağından elde edilen agrega ile binder tabakası Tip2 gradasyon limitlerine göre her bir biriket için 1150 gr agrega hazırlanmış, %4,0-4,5-5,0-5,5-6,0-6,5 oranlarında AÇ 71 penetrasyonlu bitüm katılmıştır. Deneyin hassasiyetini artırmak amacıyla her bir bitüm yüzdesi için üç adet Marshall biriketi yerine beş adet Marshall biriketi hazırlanmıştır. Marshall biriketlerinin hazırlanmasında KGM. Fenni şartnamesinde belirtildiği gibi, dizaynın orta trafik sınıfı ($10^4 < \text{ETDY tekerrür sayısı} < 10^6$) olduğu kabul edilerek Marshall biriketrinin her iki yüzeyine 50 darbe uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler bir gün süreyle beklemeye bırakılmıştır. TS 3720'ye göre Marshall deneyi yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.34'deki gibi bulunmuştur.

Çizelge 4.34. Marshall deney sonuçları

% Bitüm	Prt.Özg. Ağırlık (D_p) gr/cm ³	Stabilite (kg)	% Asf. Dolu Boşluk (V_f)	% Boşluk (V_h)	Akma (mm)
4,00	2,435	1388,00	46,10	9,15	2,09
4,50	2,461	1436,00	54,70	7,46	2,20
5,00	2,480	1412,00	62,80	6,04	2,34
5,50	2,499	1341,00	71,10	4,63	2,42
6,00	2,508	1283,00	77,60	3,61	2,53
6,50	2,502	1158,00	81,20	3,14	2,87

Çizelge 4.34'deki verilerin her bir bitüm yüzdesi için serpmeye diyagramı yapılmış ve uygun regresyon denklemi belirlenmiştir. Şekil 4.18'de bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık, stabilite, asfaltla dolu boşluk, boşluk ve akma serpmeye diyagramı verilmiş ve grafiklere göre Çizelge 4.35'deki regresyon denklemleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.18 % Bitüme göre – serpmeye diyagramı grafikleri

Çizelge 4.35. Karışım özelliklerinin regrasyon denklemleri

Karışımın özelliği	Regrasyon denklemi $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$	R^2 ($\alpha = 0.01$)
Pratik Özgül Ağırlık	$Y = 1,9490 + 0,1783x - 0,0143x^2$	0,991
Stabilite	$Y = -78,250 + 654,750x - 71,500x^2$	0,986
Asfaltla Dolu Boşluk	$Y = -70,350 + 37,9786x - 2,2429x^2$	0,998
Boşluk	$Y = 33,3330 - 8,2327x + 0,5500x^2$	0,998
Akma	$Y = 2,8915 - 0,4885x + 0,0736x^2$	0,968

Olarak belirlenmiş R^2 değerleri incelendiğinde bitüm yüzdeleri ile karışım özellikleri arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Regrasyon denklemleri çözümlenmiş ve model denklemleri üzerinden şartname sınırları göz önünde bulundurularak her bir karışım özelliği için bitüm yüzdeleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda grafikler üzerinden her bir karışım özelliği için bitüm yüzdeleri belirlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen bitüm yüzdelere göre optimum bitüm hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.36'de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.36. Optimum bitüm yüzdelerinin karşılaştırması

Karışımın özelliği	Şartname Limitleri	Grafik % bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	Max	6	6.23
Stabilite	Max	4.5	4.57
Asfaltla Dolu Boşluk	%70	5.4	5.44
Boşluk	%5	5.3	5.36
Ort. Opt. % Bitüm		5.30	5.40

Her iki yöntemle de belirlenen optimum bitüm yüzdeleri kullanılarak stabilite, pratik özgül ağırlık, boşluk, asfaltla dolu boşluk ve akma değerleri her iki yöntemle hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.37).

Çizelge 4.37. Karışımdan beklenen özelliklerin karşılaştırılması

Karışımın özelliği	“Grafik yöntemi” % 5,30 Bitüm	$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$ Hesaplanan % 5,40 Bitüm
Pratik Özgül Ağırlık	2,47	2.49
Stabilite	1390	1372
Asfaltla Dolu Boşluk	69.9	69,3
Boşluk	5,1	4,90
Akma	2,3	2,39

Asfalt betonu binder tabakası Tip2 dizaynı için daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde stabilite için çizilen serpmme grafiğinin Marshall deney sonucu karakteristiğine ters düştüğü tespit edilmiş ve bu durumun agrega gradasyonundan kaynaklandığı görülmüştü. Hataya sebebiyet veren bu durum göz önünde bulundurularak yapılan bu örnek çalışmada Marshall deney sonuçlarının grafik metoduyla elde edilen sonuçların, model denklemleri vasıtasıyla elde ettiğimiz sonuçlara çok yakın değerler verdiği görülmüştür.

Bu durum deney ölçümlerinin hassasiyetle yapılmasının yanı sıra, şartnamede öngörülen kriterler ve TS 3720’de belirtilen Marshall deney prosedürüne uyulmasının bir sonucudur. Sonuç olarak optimum bitüm yüzdelere göre çizilen grafikleri temsil edecek matematiksel model denklemleri oluşturulduğunda çok daha hassas sonuçlar elde edileceği gerek daha önce yapılan çalışmalardan gerekse yapmış olduğumuz çalışmalardan açıkça görülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Karışım tasarımının asıl amacı olan, karışımı optimize etmek ve yapısal tasarım için gerekli verileri elde etmek için, gerek ülkemizde gerekse dünyada halen kullanılmakta olan “Marshall metodu” ele alınmıştır. Bu amaçla şartnamede belirtilen fiziksel özelliklere sahip agreganın yine şartnamede belirtilen fiziksel özelliklere sahip gradasyon limitleri dahilinde agreganın hangi oranlarda karıştırılacağı belirtildikten sonra karışımın asfalt miktarının tayin edilmesi üzerinde titizlikle durulması gerekli görülmüştür.

Bitümlü sıcak karışımların optimum asfalt miktarının tayininde kullanılan parametrelerin değişik bitüm yüzdesinde KGM fenni şartnamesi sınırlarına bağlı olarak çizilen grafikler vasıtasıyla belirlenmeye çalışılmaktadır. Fakat bu yaklaşım bitüm yüzdesinin belirlenmesinde çok net sonuçlar doğurmamaktadır. Bu nedenle daha önce yapılmış deneysel çalışmaların verileri ve laboratuarda yapmış olduğumuz Marshall deney verileri kullanılarak, optimum bitüm yüzdesine etki eden parametrelerin değişik bitüm yüzdesinde serpmе grafikleri çizilmiş ve bu grafiklere uygun eğrilere uygun model denklemleri seçilmiştir. SPSS 11.0 paket programı ile model denklemi katsayıları ve R^2 anlamlılık düzeyleri tespit edilmiş ve optimum bitüm yüzdesini belirlemek için kullanılan parametreler ile bitüm yüzdesi arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Denklemleri oluşturulan parametrelerden elde edilen bitüm yüzdesi ve optimum bitüm muhtevası, her bir parametre için karşılaştırılmıştır.

İsfalt tarafından yapılan örnek için yapılan istatistiki değerlendirme sonucunda grafik metoduyla bulunan optimum bitüm yüzdesinin regresyon analizi ile bulunan bitüm yüzdesine çok yakın bir değer elde edildiği görülmüştür. Bunun sonucu olarak ta bitümlü sıcak karışımdan beklenen özelliklerin doğru tahmin edildiği ve deneyin güvenilirliğin yüksek olduğu düşünülmektedir.

Marshall deney verileri kullanılan ikinci örnekte regresyon denkleminin tepe noktası bulunarak tespit edilen pratik özgül ağırlık % 7,8 olarak bulunmuştur. Fakat yeterli

bitüm yüzdesinde deney yapılmadığından bu durum serpmme grafiğinde açıkça görülmemektedir. Bu durumun aşılması içinde farklı bitüm yüzdelerinde yapılan deneylerin parabolik eğriyi tam olarak ifade edene kadar devam ettirilmesinin uygun düşeceği düşünülmektedir.

Üçüncü ve dördüncü örneklerde ise şartname kriterlerine, bitüm yüzdelerine göre çizilen grafiklere ve grafik üzerinden yapılan okumalara dikkat edilmediği tespit edilmemiştir. Bunun sonucunda optimum bitüm yüzdesini ve dolayısıyla bitümlü sıcak karışımdan beklenen özellikleri olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bu durumun aşılabilmesi ise, ancak deneyi yapan kişinin deney ölçümlerini hassasiyetle yapması ile aşılabileceği düşünülmektedir.

Marshall deney verileri kullanılan beşinci, altıncı ve yedinci örneklerde R^2 anlamlılık düzeylerinin düşük olduğu görülmüştür. Regrasyon analizini desteklemek amacıyla bu örneklerle homojenlik testi yapılmış ve deneylerin Marshall test metoduna uygun yapılmadığı, şartnamede istenilen kriterlere uyulmadığı gibi sebeplerden dolayı sonuçların hatalı olduğu tespit edilmiştir.

Tarafımızdan yapılan çalışmalarda amaç daha önce yapılan çalışmalardan yukarıda belirttiğimiz hatalı sonuçlara sebebiyet veren durumların giderilmesi için gereken hususlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu hususlar Marshall deney prosedürüne ve şartnamede belirtilen kriterlere titizlikle uyulması gerektiğini bir kere daha ortaya koymuştur. Ayrıca hataya sebebiyet veren serpmme grafiklerinden okunan değerlerde de çok titiz davranmak gerektiği yapılan üç değişik dizayn denemesinde de açıkça görülmüştür. Gerek önceki çalışmalarda gerekse tarafımızdan yapılan çalışmalarda hem hatanın kaynaklandığı parametrenin tespitinde hem de karışımın fiziksel özelliklerinin tespitinde model denklemleri üzerinden okunan değerlerin çok daha sağlıklı sonuçlar ortaya koyduğu, tarafımızdan yapılan çalışmalarla bir kere daha ortaya konulmuştur.

Karşılaştırmalar sonucu optimum bitüm yüzdelerinde değişik oranlarda artmalar ve azalmalar görülmektedir. Optimum bitümde meydana gelen bu artma ve azalma her

ne kadar küçük değerlerde de olsa, optimum bitümdeki %1'lik bir artış veya azalış asfalt betonu kaplamalarda maliyeti önemli derecede etkileyecektir. Ayrıca optimum bitüme göre belirlenen, bitümlü sıcak karışımlardan beklenen fiziksel özellikler karşılaştırılmış ve çok daha sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışma sonucunda, ülkemizde bitümlü sıcak kaplamalar orta ve ağır trafikli yollarda yaygın olarak kullanıldıkları ve pahalı olduklarından dolayı uzun süre hizmet verebilmesi için, fiziksel özelliklerine etki eden parametrelerin doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle matematiksel model denklemleri ile elde edilen parametrelerin grafik üzerinden elde edilen parametrelerden çok daha net sonuçlar ortaya koyduğu, gerek daha önce yapılan çalışmalardan gerekse yapmış olduğumuz çalışmalardan açıkça görülmüştür. Marshall deney parametrelerinin istatistiki anlamda değerlendirilmesi incelenen çalışmalarda da görüldüğü gibi gözden kaçan durumların ortaya çıkmasında da etkili bir yöntem olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Önal, A., Karaca, S., "Asfalt Betonu Karışım Dizayn Metotları", *Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara, 20-32 (1990)
2. Çakıroğlu, M., "Doğu Karadeniz Bölgesine Uygun Trafik Tahmin Modelinin Araştırılması", *Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 47-55 (1993).
3. Çetin, A., "Endüstriyel Atıkların Asfalt Beton Kaplama Karışımında Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 35-42 (1997).
4. Dağdelen, E., "Isının Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 45-48 (1995).
5. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, Halit., Sönmez, İ., Eren, K., "Asfalt ve uygulamaları", *Yıldız Teknik Üniversitesi yayını*, İstanbul, 1-3 2001
6. Şiş, A., "Şartname Sınırlarındaki Agregat Granülometrisinin Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine ve Optimum Bitüm Oranına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 35-55 (2000).
7. Varol, Hasan., "Bitümlü Sıcak Kaplamalı Üst Yapıların Yapım Kriterlerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 45-60, 65-78 (2000).
8. Tunç, A., "Yol Malzemeleri ve Uygulamaları", *Atlas Yayınevi*, İstanbul, 120-125, 165- 178, 250-255 (2001).
9. Yagız, F., Işıksalan, C., Akkol, G., Kececiler, A.F., "Bitümlü Malzemeler", *Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı Yayını*, Ankara, 35-46 (1967).
10. Yollar Fenni Şartnamesi., *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü*, Yayın no: 170/2, Ankara, 262-263 (2000).
11. Umar, F., Açar, E., "Yol Üst Yapısı", *İstanbul Teknik Üniversitesi Yayını*, İstanbul. 146-165 (1991).
12. Yıldırım, B., "Yol İnşaatı", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını*, Elazığ, 1-5 (1984).

13. Çubuk, K, M., "Katkı Maddesi Olarak Diatomit'in, Bitümlü Sıcak Karışımların Davranışları Üzerine Etkileri", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-4 (1998)
14. Kırbaş, H., "Asfalt Kaplamalarda Bozulma Sebepleri ve Oluşan Yüzeysel Soyulmalar İle Çatlakların Modern Malzemelerle Onarım Yöntemleri", *Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları* Kütahya, 3-5 (1999)
15. Karayolları Genel Müdürlüğü., Karayolları Esnek Üst Yapı Projelendirme Rehberi, *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, Ankara, 2-4 (1995).
16. Ürünay, N., "Bitüm ve Bitümlü Yalıtım Örtüleri", Ankara, 2-6 (1974).
17. Birliker, Yener, R., "Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar İle Bu Tip Bitümlü Karışımların Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli", Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45-78 (1998).
18. Heukelom, W., Klomp, A.J.G., "The Behavior of Asphalt Pavements under Variable Repeated Loads", *University of Michigan Ann Arbor* August, 4-8 (1967).
19. Deacon, J.A., "Fatigue of Asphalt Concrete, Graduate Report", The Institute of Transportation and Traffic Engineering, *University of California, Berkeley*, 7-12 (1965).
20. Brown, S., "The Sheel Bitümen Handbook", *University of Nottingham*, July 45-60 (1990).
21. TS 3720., "Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları Marshall ve Hubbart – Field Metotları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-15 (1983).
22. Ziauddin, A.K., Asi İ., Rezgallah, R., "Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction", *Construction and building materials*, volume 12, p 373-384 (1998).
23. Polat, Hakan, A., "Ankara Gerede- Ankara Çevre Otoyolu Bitümlü Karışım Üstyapı Tabakalarının Fiziksel Özellikleri Ve Sıkışabilirliğinin Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 45-70 (1994).
24. Önal, A., Aray, Ş., Orhan, F., "Polimer İle Modifiye Edilmiş Sıcak Karışımların Laboratuvar Koşullarındaki Performansına Etkisinin İncelenmesi", 2. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 1-8 (1998).

25. Acar, O., Tapkın, S., "Portland Çimentosu Kullanılarak Hazırlanan Marshall Numuneerinin Özelliklerinin İncelenmesi", **2. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, Ankara, 2-9 (1998).
26. Tuncan, A., Çetin, A., Tuncan, M., "Lastik Atıklarının Asfalt Betonu Kaplamaların Mekanik Özelliklerine Etkileri", **2. Ulusal Asfalt Sempozyumu**, Ankara, (1998).
27. Cooper, KE., "The Fundamental Properties of Bituminous Materials and Their Measurement, From The Construction Materials Group Symposium Fundamental Properties of Bituminous Materials Held Jointly" *The Institute of Asphalt Technology and The Institution of Highways and Transportation in London*", England, 2-8 (1994).
28. Yıldırım, B., Şiş, A., "Şartname Sınırlarındaki Agrega Granülometrisinin Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine ve Optimum Bitüm Oranına Etkisi", *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* Elazığ, 95-100 (2001).
29. Onal, A., Kahramangil, M., "Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı", *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası* Ankara 25-37 (1993).
30. Özdamar, K., "SPSS ile Biyoistatistik", 3. Baskı, *Kaan Kitapevi*, Yayın No:3, Eskişehir, 80-85 (1999).
31. Köksal, A.B., "İstatistik Analiz Metotları", İstanbul sy:184 (1994).
32. Hicks, C., F., Çev; Muluk, Z., Toktamış, Ö., Kurt, S., Karaoğlu, E., "Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler", *Akademik matbaası* Ankara, 60-65 (1985).
33. Mills, C.F., "Statistical Methots", *Colombia Univercity*, Newyork, 15-19 USA.
34. Çelik, M. H., "Yapıda Deney Hazırlama ve Çözümleme Metotları, Ders Notu", Ankara, 63-69 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

18 Mart 1978 yılında Kars'ta doğdu. İlk öğrenimini Malatya Yavuz Sultan Selim ilkokulunda, Orta öğrenimini Malatya Atatürk ortaokulunda tamamladı. Lise öğrenimine Malatya Şehit Kemal Özalper meslek lisesi, Elektronik bölümünde başladı. Daha sonra Aynı lisenin Teknik lise kısmına geçti.1995 yılında Elektronik-Bilgisayar bölümünden mezun oldu.1996 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünü kazandı. 2000 yılında lisans öğrenimini başarıyla tamamlayarak Yapı Öğretmenliği Bölümü Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başladı. 2001 yılında Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde görevine devam etmektedir.