

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STANDART YÜKSEKLİKTE OLMAYAN MARSHALL NUMUNELERİNDE
SİKİŞTİRME ENERJİSİNE BAĞLI OLARAK BOŞLUK ORANI VE
GRADASYON DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mustafa TANIŞ**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Program : ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2002

**STANDART YÜKSEKLİKTE OLMAYAN MARSHALL NUMUNELERİNDE
SİKŞİTİRME ENERJİSİNE BAĞLI OLARAK BOŞLUK ORANI VE
GRADASYON DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mustafa TANIŞ
(501991440)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah Hilmi LAV
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Emine AĞAR
Prof. Dr. Mustafa İLİCALI (Y.T.Ü)**

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Tez çalışması nın ortaya çıkmasında ilgi ve desteğini esirge meyen hoca m Sn. Doç. Dr. Abdullah Hİ Mİ LAV a,

Deneylerin yapılabil mesi için merkez laboratuvar i nkanlarını hiz neti mize sunan İstanbul Asfalt Fabrikaları San. ve Tic. A Ş Genel Müdürü Sn. Hasan ARPACI' ya ve Genel Müdür Yardı mcısı Sn. Dr. Süreyya TAYFUR a,

Şirket Kalite Kontrol ve AR- GE Müdürlüğü çalışanlarından Sn. Bekir Kadri EREN e, Sn. Seyit Ali YILDIRI Ma, Sn. Aydın TOPÇU ya, Sn. Er ol TUNÇ a, Sn. Hüsa mettin SARI KAYA ya, Sn. Servet HANA, Sn. Muhittin ERGÜN e ve Sn. Levent GÜL e,

Laboratuvarlarını hiz neti mize sunarak çalışma süresi nin kısa tut ul masında müsbet katkı sağ layan Kı nıya-Metalurji Fakültesi'nden Sn. Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL e ve Sn. Şenel KARANCI' ya içten şükranları m sunarım

Tez çalışması nı yaptığm on beş aylık süre boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığ m Sn. Gül ağa KARADAĞ a ayrıca teşekkür et meyi, öden mesi i nkansız bir vefa borcunun naçi zane ifadesi olarak kabul ediyorum Kendisi yle yaptığ m fi kir alışverişleri d nasa çalışma asla bu niteli ğe ulaşamazdı.

Tahsil hayatı mın her basamağında destek ve teşvi ki ni gördüğüm sevgili baba m anne m ve kardeşleri ne dai na yanı mda ol dukları için çok teşekkür ederim

Çalış ma m müddetince sevgi, hoşgör ü ve deste ği ni gördüğüm her kесе teşekkürler...

Mayıs, 2002

Mıstafa TAN Ş

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STANDART YÜKSEKLİKTE OLMAYAN MARSHALL NUMUNELERİNDE
SİKİŞTİRME ENERJİSİNE BAĞLI OLARAK BOŞLUK ORANI VE
GRADASYON DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mustafa TANIŞ**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Program : ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2002

**STANDART YÜKSEKLİKTE OLMAYAN MARSHALL NUMUNELERİNDE
SİKŞİTİRME ENERJİSİNE BAĞLI OLARAK BOŞLUK ORANI VE
GRADASYON DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mustafa TANIŞ
(501991440)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah Hilmi LAV
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Emine AĞAR
Prof. Dr. Mustafa İLİCALI (Y.T.Ü)**

MAYIS 2002

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Konusu	1
1.2 Çalışmanın Amacı	2
2. YOL ÜSTYAPISI	3
2.1 Temel Tanımlar	3
2.2 Esnek Üstyapılar	4
2.2.1 Esnek üst yapının tanımlanması	4
2.2.1.1 Geleneksel esnek üst yapılar	4
2.2.1.2 Tamam asfalt betonu üst yapılar	5
2.2.2 Esnek üst yapıların projelendirilmesi	6
2.2.2.1 Ampirik yöntemler	6
2.2.2.2 Analitik yöntemler	8
2.2.2.3 Analitik-ampirik yöntemler	8
2.3 Rjit Üstyapılar	9
2.3.1 Rjit üstyapılarının tanımlanması	9
2.3.2 Rjit üstyapıların projelendirilmesi	9
3. BİTÜMLÜ KAPLAMALAR	11
3.1 Bitümlü Kaplamaların Sınıflandırılması	11
3.1.1 Bitümlü karışımlar	11
3.1.1.1 Bitümlü sıcak karışımlar	11
3.1.1.2 Bitümlü soğuk karışımlar	12
3.1.2 Yüzeysel kaplamalar	12
3.2 Bitümlü Kaplamalardan Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler	12
3.3 Bitümlü Sıcak Karışımların Sıkıştırılmasına Etkiyen Faktörler	13
3.3.1 Agregalar arası sürtünme	14
3.3.1.1 Agreganın şekli	14
3.3.1.2 Agreganın yüzey dokusu	14

3.3.2	Agreganın absorpsiyon özelliği	14
3.3.3	Sağlamlık	15
3.3.4	Köşelilik	15
3.3.5	Agrega gradasyonu	15
3.3.5.1	İri agrega miktarı	15
3.3.5.2	Küçük miktarı	15
3.3.5.3	Filler miktarı	15
3.3.6	Bütün	16
3.3.6.1	Bütünün viskozitesi	16
3.3.6.2	Bütünün bağlayıcı oranı	16
3.3.7	Tabaka kalınlığı	16
3.3.8	Karışımın sıcaklığı	17
3.3.9	Hava koşulları	17
3.4	Bütünün Karışımlarda Boşluk Hacmi Yüzdesi Kavramı	17
3.4.1	Boşluk oranını etkileyen faktörler	18
3.4.2	Boşluk oranının performans etkisi	18
3.4.3	Boşluk oranının bitümlü karışımların özellikleri ile ilişkisi	19
3.5	Bütünün Sıcak Karışım Tasarım Yöntemleri	19
3.5.1	Hubbard-Field yöntemi	20
3.5.2	Hvee yöntemi	21
3.5.3	Marshall yöntemi	22
3.5.4	Smith üç eksenli deney yöntemi	23
3.5.5	Gyratory test aletinin kullanımı	23
4.	ASFALT BETONU KAPLAMALAR VE MARSHALL YÖNTEMİ İLE TASARIM	25
4.1	Asfalt Betonlu Kaplamalar	25
4.1.1	Tanım	25
4.1.2	Asfalt çimentoosu	25
4.1.2.1	Tanım ve özellikleri	25
4.1.2.2	Sınıflandırılması	26
4.1.2.3	Kalite kontrol deneyleri	26
4.1.3	Agrega	32
4.1.3.1	Tanım ve özellikleri	32
4.1.3.2	Sınıflandırılması	32
4.1.3.3	Kalite kontrol deneyleri	33
4.1.4	Karışım	36
4.2	Marshall Yöntemi İle Asfalt Betonlu Kaplama Karışımlarının Hazırlanması	38
4.2.1	Yöntemin gelişimi	38

4.2.2 TS 3720 ye göre Marshall yöntemi	39
4.2.2.1 Kapsam ve uygulama alanı	39
4.2.2.2 Numunelerin hazırlanması	40
4.2.2.3 Numunelerin karıştırılması	40
4.2.2.4 Numunelerin sıkıştırılması	41
4.2.2.5 Numunelerin kırılması	41
4.2.2.6 Hesaplama ve sonuçların gösterilmesi	42
4.2.3 Marshall yönteminin deneysel çalışmada kullanılan hali	42
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	44
5.1 Çalışmanın Tanımlanması	44
5.2 Malzemenin Tanımı	45
5.2.1 Agregası	45
5.2.1.1 Çebeci kireçtaşı bölgesi	46
5.2.1.2 Agregaya uygulanan işlemler	46
5.2.2 Bütün	49
5.3 Numunelerin Hazırlanması	50
5.3.1 Yüksek kalıpların imalatı	50
5.3.2 Numunelerin tartılması	50
5.3.2.1 Çalışmada kullanılacak agregası miktarı ve gradasyonu	50
5.3.2.2 Bütünün miktarı	52
5.3.3 Numunelerin karıştırılması	52
5.3.4 Numunelerin sıkıştırılması	53
5.3.4.1 Sıkıştırma yöntemi	53
5.3.4.2 Sıkıştırma enerjisi miktarı	54
5.3.4.3 Sıkıştırma sıcaklığı	54
5.3.5 Numunelerin kalıptan çıkarılması	55
5.3.6 Numunelere ait ölçümler	56
5.4 Boşluk Oranındaki Değişimlerin İncelenmesi	60
5.4.1 Numunelerin boşluk oranlarının hesaplanması	60
5.4.2 Hesaplamaların akış sırası	64
5.5 Agregası Gradasyonu Değişimlerinin İncelenmesi	77
5.5.1 Griş	77
5.5.2 Numunelerin ekstraksiyonu	77
5.5.3 El ek analizleri	78
5.5.4 Sonuçların karşılaştırılması	85
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	86
KAYNAKLAR	88

EKLER	91
ÖZGEÇMİŞ	94

KISALTMALAR

CBR	: California Bearing Ratio
AASHO	: American Association of State Highway Officials
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
HMA	: Hot-Mix Asphalt
CMA	: Cold-Mix Asphalt
GTM	: Gyrotory Testing Machine
TS	: Türk Standartları
AC	: Asphalt Cement
ASTM	: American Society for Testing and Materials
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
BS	: British Standards
EAL	: Equivalent Axial Load
İSFALT	: İstanbul Asfalt Fabrikaları Ticaret ve Sanayi Anonim Şirketi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1 : Aşınma tabakası için KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde verilen agrega gradasyon sınırları.....	44
Tablo 5.2 : Binder tabakası için KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde verilen agrega gradasyon sınırları.....	45
Tablo 5.3 : Agregaların özgül ağırlık ve su absorpsiyonu deney sonuçları.....	47
Tablo 5.4 : Çalışmada kullanılan asfalt çimento osunun özellikleri.....	50
Tablo 5.5 : Çalışmada kullanılan gradasyonlar ve optimum bitüm oranları.....	52
Tablo 5.6 : Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları.....	53
Tablo 5.7 : Çalışmada Tip 2 gradasyonu kullanılarak hazırlanan numunelere ait ölçümler.....	57
Tablo 5.8 : Çalışmada Tip 3 gradasyonu kullanılarak hazırlanan numunelere ait ölçümler.....	58
Tablo 5.9 : Çalışmada Tip 4 gradasyonu kullanılarak hazırlanan numunelere ait ölçümler.....	59
Tablo 5.10 : Agrega gradasyonları için agrega karışımının özgül ağırlıklarının ve bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının hesaplanması.....	65
Tablo 5.11 : Tip 2 gradasyonu numune boşluk oranları.....	66
Tablo 5.12 : Tip 3 gradasyonu numune boşluk oranları.....	67
Tablo 5.13 : Tip 4 gradasyonu numune boşluk oranları.....	68
Tablo 5.14 : Ekstraksiyona uğratılan numuneler.....	77
Tablo A1 : Tip 2 gradasyonu numunelerine ait Marshall hesaplamaları..	91
Tablo A2 : Tip 3 gradasyonu numunelerine ait Marshall hesaplamaları..	92
Tablo A3 : Tip 4 gradasyonu numunelerine ait Marshall hesaplamaları..	93

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 5.1 : Çalışmada kullanılan agreganın yıkanıp kurutulduktan sonraki görünümü.....	49
Şekil 5.2 : Çalışmada kullanılan kalıp ve TS 3720 de belirtilen standart kalıp.....	51
Şekil 5.3 : Çalışmada kullanılan kalıp, standart kalıp ve yakaları.....	51
Şekil 5.4 : Çalışmada üretilen yüksek numune, ikiye kesilmiş hali ve standart yükseklikteki numune.....	55
Şekil 5.5 : Numunelerin kesildiğten sonraki yüzey doku örnekleri.....	56
Şekil 5.6 : Bınder tabakası Tip 3 gradasyonu numunelerinin sıkıştırmadaki darbe sayısı-boşluk oranı verilerinin değişimi.....	71
Şekil 5.7 : Aşınma tabakası Tip 2 gradasyonu numunelerinin sıkıştırmadaki darbe sayısı-boşluk oranı verilerinin değişimi.....	72
Şekil 5.8 : Aşınma tabakası Tip 4 gradasyonu numunelerinin sıkıştırmadaki darbe sayısı-boşluk oranı verilerinin değişimi.....	73
Şekil 5.9 : Bınder tabakası Tip 3 gradasyonu numunelerinin sıkıştırma enerjisi-boşluk oranı verilerinin değişimi.....	74
Şekil 5.10 : Aşınma tabakası Tip 2 gradasyonu numunelerinin sıkıştırma enerjisi-boşluk oranı verilerinin değişimi.....	75
Şekil 5.11 : Aşınma tabakası Tip 4 gradasyonu numunelerinin sıkıştırma enerjisi-boşluk oranı verilerinin değişimi.....	76
Şekil 5.12 : Tip 2 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyon sonrası elek üzerinde kalan malzeme miktarlarının değişimi.....	79
Şekil 5.13 : Tip 3 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyon sonrası elek üzerinde kalan malzeme miktarlarının değişimi.....	80
Şekil 5.14 : Tip 4 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyon sonrası elek üzerinde kalan malzeme miktarlarının değişimi.....	81
Şekil 5.15 : Tip 3 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyonundan sonraki yeni gradasyonlar.....	82

Şekil 5 16	: Ti p 2 gradasyonu numunel eri ni n ekstraksi yonundan sonraki yeni gradasyonl ar.....	83
Şekil 5 17	: Ti p 4 gradasyonu numunel eri ni n ekstraksi yonundan sonraki yeni gradasyonl ar.....	84

SEMBOL LİSTESİ

cSt	: Centistoke (viskozite birimi)
P	: Poise (viskozite birimi)
cP	: Centipoise (viskozite birimi)
$Pa.s$	: Paskal second (viskozite birimi)
D_T	: Maksimum teorik özgül ağırlık
D_p	: Pratik özgül ağırlık
V	: Boşluk oranı
G_{sb}	: Bulk specific gravity (agrega karışımının hacim özgül ağırlığı)
G_{sa}	: Apparent specific gravity (agrega karışımının görünür özgül ağırlığı)
G_{se}	: Effective specific gravity of aggregate (agrega karışımının efektif özgül ağırlığı)
G_b	: Specific gravity of bitumen (asfalt çimentosunun özgül ağırlığı)

STANDART YÜKSEKLİKTE OLMAYAN MARSHALL NUMUNELERİNDE SIKIŞTIRMA ENERJİSİNE BAĞLI OLARAK BOŞLUK ORANI VE GRADASYON DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Marshall tasarımı yöntemi bitümlü karışımların optimum bağlayıcı içeriğini tespit edilmesi için kullanılan yaygın deneysel test metodlarından birisidir. Bitümlü karışım tasarımı da ülkemizde kullanılan yegane yöntemdir.

Marshall tasarımı yöntemi ne göre numuneler, bir kalıp içerisinde ve iki yüzüne 50 veya 75 darbe uygulanarak elle veya otomatik Marshall sıkıştırıcısı yardımıyla hazırlanırlar. Sıkıştırma sonrasında numune yüksekliğini yöntemde verilen standart yükseklik olan 63,5 mm olması isterir.

Bu çalışmada, yüksekliği 80 mm olan, yani standart yükseklikte olmayan numuneler hazırlanmıştır. Üç farklı agrega gradasyonu ve tek bir penetrasyon sınıfı bitüm kullanılmıştır. Sıkıştırma enerjisinin boşluk oranı üzerindeki etkisini araştırmak için numunelerin her iki yüzüne, 50 darbeden başlayarak 110 darbeye kadar beşer darbelik aralıklar ile artırılan darbe sayıları uygulanmıştır. Her gruptan tek bir numunenin bitümü ekstraksiyon yöntemiyle ayrılmış ve kalan agreganın gradasyonu elenerek tekrar belirlenmiştir. Böylelikle yüksek sıkıştırma enerjisinin agrega oranlarını, özellikle iri agrega oranlarını, agregaları kırmak suretiyle değiştirip değiştirmedeği incelenmiştir.

Sonuç olarak sıkıştırma enerjisi arttığında karışımın boşluk oranı değişimini büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Örneğin, iri agrega oranı fazla olan karışımlarda belirli enerji seviyelerinde agregaların bir kısmı kırılarak boşluk oranında artışa sebebiyet vermiştir. Öe yandan, ince agrega oranı fazla olan karışımlarda enerji arttırıldığında düzensiz bir boşluk oranı azalması görülmüştür. Sıkıştırma sonrasında değişen agrega gradasyonları şartname sınırları arasında kalmıştır.

AN INVESTIGATION INTO THE VARIATION OF AIR VOIDS AND GRADATION WITH RESPECT TO THE COMPACTION ENERGY ON THE NON-STANDARD MARSHALL SAMPLES

SUMMARY

Marshall design method is one of the well known empirical procedure to determine the optimum binder content of bituminous mixtures. At present, it is the only method acceptable by the governmental organizations in Turkey for bituminous mixture design.

According to the Marshall procedure, samples are prepared in a purpose built Marshall compactor (manual or automatic) applying 50 or 75 blow to each sides. After compaction it is expected that the height of samples will be 63,5 mm (standard height).

In this study, however, non-standard samples which had a height of between 80 to 85 mm were prepared. Three different gradations and a single penetration grade bitumen were used. In order to investigate the effect of compaction energy (number of blow) on void content, up to 110 blows were applied to the each side of group of samples (starting with 50 blows for the first group with 5 blows increments). The bitumen from one sample of each group was extracted and its gradations was re-examined whether high compaction energy crushed portion of aggregates, particularly coarse aggregate.

In conclusion, it was found that grading of mixture significantly influence void content change as the compaction energy increased. For example, in mixes with high percentage of coarse aggregates, some of the coarse aggregates were crushed at certain energy levels resulting a void content increase. On the other hand, mixes having high percentage of fine aggregates showed an irregular void content decrease as the compaction energy increased.

1. GİRİŞ

Ulaşım olarak adlandırılan, insan ve malların yer değiştirme ihtiyacı ile bu ihtiyacın sağlanması olarak nitelendirilen Ulaştırma ve ulaştırma alt yapılarının inşası, insanlığın varoluşundan beri kurduğu medeni yetlerin önemli bir parçası olmuştur. Ulaştırma alt yapılarının en önemli ilk ulaştırma tesislerinden olan yollardır. Yol yapımları teknikleri kurulan medeni yetlerin katkıları ile zaman içerisinde gelişmiş ve günümüze ulaşmıştır.

Karayolları da diğer bütün mühendislik yapıları gibi çeşitli ölçütler göz önüne alınarak planlanırlar. Bir karayolu için bu ölçütler; güvenlik, konfor, erişim hızı, ekonomiklik vb. unsurları içerir. Bu ölçütlerin sağlanmasında tabii olarak yol üst yapısı ve onun bir parçası olarakta üst yapı kaplama tabakaları önemli bir rol üstlenir.

1.1 Çalışmanın Konusu

Çeşitli tabakalardan oluşan karayolu üst yapılarının tekerlekle temas eden en üst tabakasına kaplama tabakası adı verilir. Üst yapının kaplama tabakasında agregatanelerini birbirine bağlayan malzemenin bitümlendiği hallerde ki bu durumda esnek üst yapı adını alır, tasarımın bir parçası olarak butabakanın da mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla kullanılan tasarım metodlarından biri de Marshall Yöntemi'dir.

Bu çalışmada Marshall Yöntemi kullanılarak standart yükseklikte olmaayan bitümlü sıcak karışım numuneleri üretilmiştir. Üretimde üç farklı gradasyona sahip agrega, her biri için tespit edilen optimum bitümlü ile karıştırılmış ve farklı darbe sayıları uygulanarak Marshall Kompaktörü ile sıkıştırılmıştır. Farklı darbelerle hazırlanan numunelerde sıkıştırma enerjisinin numunelerin Boşluk Yüzdeleri üzerindeki etkileri incelenmiş, ayrıca numuneler ekstraksiyona tabi tutularak agrega gradasyonundaki değişimler gözlenmiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Standart yükseklikte olmayan Marshall numunelerinde sıkıştırma enerjisine bağlı olarak boşluk oranı değişimi ve gradasyon farklılaşmasını incelediği bu çalışmanın amacı aşağıda özetlenmiştir:

Laboratuvarda bitümlü karışımların hazırlanması oldukça zor ve zahmetli bir uğraştır.

Bu çalışmanın ana amacı, laboratuvarda standartlardan yüksek numuneler hazırlayarak ve daha sonra bu numuneleri hassas bir şekilde iki parçaya ayırmak yoluyla numune sayısını arttırmaktır. Böylelikle bir taraftan anlamlı bir sonuç için standartların belirlediği sayıda numune üretilirken, diğer taraftan bunları hazırlamak için gereken emek ve zamandan tasarruf edilmiş olacaktır.

Bununla birlikte uygulamada sıkça karşılaşılan maksimum (agrega boyutuna bağlı olarak) 7-8 cm kalınlığında serilebilen kaplama tabakalarına eşdeğer yükseklikteki bir Marshall numunesinin sıkıştırılabilirliğini incelemesi de amaçlar arasındadır.

Marshall Yöntemi'nde numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan ve yolun hizmet etmesi istenen taşıt trafiği için uygun olduğu düşünülen darbe sayıları (50 ve 75 darbe) dışındaki darbe sayılarında numunelerin sıkıştırılmasının boşluk oranı ve agrega gradasyonu üzerinde ne gibi etkileri olduğunun tespiti de ayrıca hedeflenmiştir.

2. YOL ÜSTYAPISI

2.1 Temel Tanımlar

Bir karayolu, temelde altyapı ve üst yapı olmak üzere iki elemandan oluşur. Altyapı, karayolunun toprak işlerini bitirilmesi sonucunda daha önceden belirlenmiş kot ve enkesit şekline getirilmesiyle oluşturulan, sanat yapılarını da içeren tesviye yüzeyi altında kalan, yolun taşıyıcı kısmıdır [1]. Üst yapı ise tesviye yüzeyinin üzerine inşa edilen ve trafikten gelen yükleri altyapıya ileten tabakalı yol yapısıdır [2,3].

Üst yapılar, kaplama tabakalarında kullanılan bağlayıcının türüne veya yükleri altyapıya dağıtma şekillerine göre Esnek Üst yapı ve Rijit Üst yapı olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Esnek üst yapı, bağlayıcı malzemesi bitüm olan, yolun her noktasında taban yüzeyi ile (tesviye yüzeyi, yol altyapı zemininin üst yüzeyi) sıkı temas halinde bulunan ve yükleri taban yüzeyine dağıtan üst yapı tipi dir [2,3].

Rijit üst yapı, bağlayıcısı portland çimentosu olan, yükleri taban zeminine yüksek eğilme direncine sahip tek tabakalı plak vasıtası ile dağıtan üst yapı tipi dir [2,3].

Bu iki üst yapı tipi arasında karar verici, aşağıdaki ölçütleri göz önünde bulundurarak seçimi yapar [3].

Teknik ölçütler

- Yüklerin taban zeminine iletilmesi
- Trafik
- Malzeme
- İklim
- Trafiğin engellenmesi
- Ülkede mevcut yolların üst yapı durumu

- Konfor ve güvenlik

Ekono m i k ölçütler

- Topla mekonon i k maliyet
 - İlk inşaat maliyeti (taşı ma maliyetleri, işçilik gi derleri, ma ki ne gi derleri, sabit masraflar,...)
 - Bakı m maliyetleri
- Yol u kullananları n harcamaları
- Fi nans man kaynakları ve iskonto oranı
- Enerji tüketi mi

Bu ölçütler gözetilerek yapılan seçi msonunda yol üst yapısı nı n uygun bir yönt emle projelendiril mesi gerekecektir.

2.2 Esnek Üstyapılar

2.2.1 Esnek Üstyapı nı n Tanı nı lması

Esnek üst yapı , bağ layıcı mal ze mesi bit ü m olan, yol un her noktası nda taban yüzeyi ile sık ı te mas halinde bulunan ve yükleri taban yüzeyi ne dağı tan üst yapı ti pi olarak tanı mlanır[2,3].

Bir esnek üst yapı genelde, tesviye yüzeyi üzerine tabakalı olarak inşa edilir. Bu tabakalar; alt te mel, te mel ve kapla ma tabakaları olarak ifade edilirler. Bu tabakalarda kullanılan mal ze me; çeşitli boyutlarda, taneli (granüler) veya bit ü mle karıştırıl mış hal de olabilir. Esnek üst yapılar genel de iki tip olarak inşa edilebil mektedir.

2.2.1.1 Geleneksel Esnek Üstyapılar (Conventional Flexible Pavements)

Bu tip üst yapılar, tekerlek yükünden meydana gelen geril menin en fazla oldu ğu üst tabakalarda daha iyi nitelikte mal ze menin kullanıldı ğı, geril menin görel i olarak azald ı ğı alt tabakalarda ise yine görel i olarak, düşük kalitedeki mal ze menin kullanıldı ğı tabakalı sistemlerdir [5]. Ü ke mizde de en çok kullanılan üst yapı ti pidir.

Farklı tabakalar için çeşitli niteliklerdeki mal ze melerin kullanılabil iyor ol ması sebebi yle bu ti pesnek üst yapılar daha ekono miktirler. En genel hali ile bu tür üst yapı

tesviye edilmiş zemin (tabii zemin veya sıkıştırılmış tabii zemin) üzerine sırasıyla; alttemel tabakası (subbase course), temel tabakası (base course), binder tabakası (binder course) ve aşınma tabakasının (surface course veya wearing course) inşa edilmesi ile oluşturulur. Bu tabakalardan bir kısmı, ekonomi sağlamak amacıyla gerekli görülmemesi halinde yapılabilir [5].

Genelde bu şekilde ifade edilen bu tür esnek üstyapılara çeşitli sebeplerle bazı ek tabakalar da yapılabilir. Aşınma tabakasının trafik ve hava şartları sebebiyle cilalanması durumunda üzerine Örtme Tabakası (seal coat) yapılabilir. Üst yapının eski bir yol veya çimento betonu kaplama üzerine inşası durumunda genelde su bazlı emülsiyonlardan çok ince olarak uygulanan bir Yapıştırma Tabakası (tack coat) üzerine yeni kaplamanın serildiği durumlar da söz konusu olabilir. Bazı durumlarda ise granüler temel tabakası üzerine asfalt betonu kaplama tabakalarının inşası gerekebilir. Bu durumlarda taneli olan ve bitüm emmesi muhtemel temel tabakası üzerine inşa edilecek bir Astar Tabakası (prime coat) uygulanması yapılır. Bu tabaka genelde sıvı petrol asfaltından olup taneli temel tabakası üzerindeki boşlukları dolurucu, yüzeyi bitümlü malzemeye hazırlayıcı etki eder [5].

2.2.1.2 Tamam Asfalt Betonu Üstyapılar (Full-depth Asphalt Pavements)

İyileştirilmiş zemin veya tabii zemin üzerine bitümlü sıcak karışımdan inşa edilen esnek üst yapı tipidir. Bu tip üst yapılar, yolun inşa edileceği yerde uygun malzemenin bulunmadığı veya temininin ekonomik olmadığı durumlar ile ağır taşıt trafiğine maruz yerlerde, işletme ve makine maliyetlerini azaltıcı etkisi sebebiyle uygulanabilir. Genel hali ile bu tür üst yapı, hazırlanmış zemin üzerine binder tabakası niteliğinde, bir veya birden fazla tabaka şeklinde uygulanabilen Asfalt Temel Tabakası (asphalt base course) ve bunun üzerine de Aşınma Tabakasının (asphalt surface course) inşa edildiği bir üst yapı türüdür [5].

Bu tür üst yapıların üst ünlükleri; sürtütananeli (granüler) tabakaları içermesi, inşa süresini kısa tutarak olası trafik engellemelerinin önüne geçilebilmesi, üst yapıda üniformluğu sağlanması, nem ve don etkilerinden daha az etkilenmesi olarak sıralanmaktadır [5].

2.2.2 Esnek Üstyapıların Projelendirilmesi

Esnek üst yapılar çeşitli yöntemlerle projelendirilebilirler. Projelendirme yöntemlerini üç grupta toplamak mümkündür [4].

- Ampirik yöntemler
- Analitik (Mekanistik) yöntemler
- Analitik – Ampirik yöntemler

Analitik- Ampirik yöntemler gerçeğe daha yakın, daha başarılı yöntemlerdir [4].

2.2.2.1 Ampirik Yöntemler

Yollarda yapılan ölçme ve değerlendirmelere dayanan ve teorik bilgilerle desteklenen projelendirme yöntemleridir [4].

Ampirik yöntemler, zemin taşıma gücü testi (soil strength test) ile desteklenen ve desteklenmeyen olarak iki farklı durumda yol üst yapısı projelendirilmesinde tarihi gelişim göstermiştir.

Grup İndeksi Yöntemi

Hogentogler ve Terzaghi, 1929 yılında zeminleri, zeminlerin üniform olup olmalarını da göz önünde tutarak çeşitli sınıflara (A-1~A-8; B-1~B-3) ayırmıştır. Yaptıkları sınıflandırmaya Highway Research Board (HRB), Grup İndeksi tanımlarını da ekleyerek bir düzenleme getirmiştir. 1945 yılında zeminlerin bu sınıflandırmasını kullanan Steele, alttenel ve toplam kaplama kalınlığının tahmin edilebileceği bir uygulamayı yol üst yapısı projelendirme yöntemi olarak sunmuştur [5]. Yöntem literatürde Grup İndeksi Yöntemi olarak anılmaktadır. Basitliği nedeniyle vaktiyle birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de kullanılan yöntem bugün terk edilmiş durumdadır [2].

Kaliforniya Taşıma Oranı Yöntemi (CBR)

Zemin taşıma gücünün dikkate alındığı ilk ampirik üst yapı tasarımı yöntemi ise California Highway Department tarafından 1929'da kullanılmıştır [5]. O.J. Porter, U.S. Army Corps of Engineers ile eş zamanlı olarak CBR Eğrileri olarak bilinen bir takım eğriler geliştirmiştir [6]. Eğriler, ilk olarak 1942 yılında duyurulmuş ve 2.

Dünya Savaşında Amerikan Ordusunca önce havaalanı pistlerinde, savaş sonrasında ise bazı değişikliklerle yol üst yapılarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [2,5,6]. Yöntemde, yolun her tabakasının kalınlığı bir alttaki tabakanın CBR (California Bearing Ratio, Kaliforniya Taşıma Oranı) değerine ve tekerlek yüküne bağlı olarak bulunabilmektedir. Çizilen nem yoğunluk eğrilerinden numunelerin en büyük kuru yoğunluk değerini veren numune seçilip tanımlanmış bir süre boyunca suda bekletilip standart bir piston, numuneye batırılır. Numuneye 0,1 inç'lik batmaya karşı gelen yük değeri, standart kırma taşıma temele aynı oranda batmaya karşı gelen yüke oranlanarak ilgili malzemenin CBR si belirlenir. Yöntemin kullanımı ülkenizde terkedilmiştir [2]. Bir esnek üst yapı projelendirme yöntemi olarak kullanılsa da CBR deneyi zemin taşıma gücünün bir göstergesi olarak yol üst yapı projelendirme yöntemlerinde bir tasarım değişkeni olarak kullanılmaktadır.

AAS HO Yöntemi

Bir diğer ampirik yöntemse AASHO (sonradan AASHTO olmuştur) yöntemidir. Yöntem inşa edilen deneme yolundan elde edilen kaplama performansı sonuçlarından, regresyon denklemlerinin kullanılması ile geliştirilmiştir [5].

Yöntemin geçmişi 1922 yılında Springfield (Illinois, ABD) yakınlığında inşa edilen Bates Deneme Yolunda, kaplama performansı na etkiyen faktörlerin tespit edilmesi ile başlamış ve ilk saptama performansın kamyon tekerlek yükü ile ilişkili olduğu şeklindedir. İkinci Dünya Savaşı sonrasında kadar başka gelişmeler sebebiyle AASHO nun bölgesel teşkilatlarında deneme yolları yapılması kararı alınmıştır. İlk test yolu, 1950 de La Plata da (Maryland, ABD) çimento betonu kaplamalı olmak üzere inşa edilmiştir. İkinci yol ise WASHO Test Yolu adı ile 1952 de Malad da (Idaho, ABD) asfalt betonu kaplamalı olarak inşa edilmiştir. Bu yolların test edilmesinde kullanılan taşıt konfigürasyonu ve yol kesimindeki çeşitliliğin sınırlılığı sebebiyle uygun bir tasarım yönteminin geliştirilmesi üzerine farklı yüklerin uygulanabildiği, çok sayıda çimento betonu ve asfalt betonu kaplamalı kesimleri olan bir deneme yolu Otawa (Illinois, ABD) yakınlığında inşa edilmiştir [7]. Bu deneme yolundan elde edilen ilk bilgiler yayınlanmaksızın 1961 ve 1962 yıllarında Amerikan eyaletlerine gönderilmiştir. Elde edilen bilgilerin yayınlanması ise ilk defa 1972 yılında "Üst yapı Tasarımı için Geçici Rehber" adıyla olmuştur. Bu

geçici rehberin bazı bölümlerinin 1981 yılında gözden geçirilmesi ile 1986'da AASHTO "Üst yapı Tasarım Rehberi"ni yayınlamıştır. Bu basısında Güvenilirlik (reliability) kavramı da tasarımı bir kriter olarak eklenmiştir. Tasarım prosedürü ile açıklayıcı bilgilerin iki farklı ciltte verildiği yöntemin ikinci basımı 1993 yılında yapılmıştır.

AASHTO yönteminin 1972 yılı Geçici Rehberi ampirik yöntemler arasında anılırken 1986 yılı Rehberi analitik – ampirik yöntemler arasında anılmaktadır [4].

Ampirik yöntemlerin olumsuz yönü, yöntemlerin verilen malzeme, çevre ve yüklem durumları için geçerli olmasıdır; bu öğelerdeki olası bir değişiklik yöntemi geçersiz hale getirmekte, yöntemin düzeltilmesini gerektirmektedir [5].

2.2.2.2 Analitik (Mekanistik) Yöntemler

Bu yöntemlerde yol üst yapısı diğer inşaat problemleri gibi ele alınır. Üst yapıda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, beklenen trafik yükü ve çevre koşulları dikkate alınarak, bilgisayar programları ve abaklar yardımıyla tabaka kalınlıkları belirlenir [4].

Tabakalı Burmister Teorisine dayanan birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu programlardan bazıları (CHEV) lineer elastik malzemelere uygulanırken bazı düzenlemelerle lineer olmayan, elastik, taneli malzemelere de (DAMA, Asphalt Institute) uygulanabilmektedir [5]. Yatay veya düşey yükler altında çalışan veya çoklu tekerlek yüküne maruz tabakalı elastik sistemlere uygun programlar da zaman içerisinde geliştirilmiştir. Tabakalı sistem teorisine dayanan bu tür programlardaki homojenlik varsayımının, kompozit malzemelerden oluşan temel ve alt temel tabakalarındaki durumu yansıtmadaki yetersizliklerin üstesinden Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanan birçok programın geliştirilmesi ile gelinmiş; ILLI-PAVE, MICH-PAVE gibi bazı programlar lineer olmayan, taneli ve tabakalı sistem oluşturan kompozit malzemelere daha etkin olarak uygulanabilmektedir.

2.2.2.3 Analitik – Ampirik Yöntemler

Analitik-Ampirik yöntemler, tekerlek yükü gibi girdi değerlerinin kaplama performansına veya gerilme ve deformasyon gibi çıktılar arasındaki ilişkiyi

şekillendiren malzeme mekaniğine dayanan tasarım yöntemleridir [5]. Araştırmacılar, analitik yöntemle modellenemeyen bazı faktörlerin üstyapı performansında etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu sebeple analitik modellerin performans gözlemleri ve ampirik bağıntılarla kalibrasyonu gereklidir [4]. Bu tür yöntemlere AASHTO 1986 yöntemi örnek verilebilir. Yöntem temelde ampirik olmasına rağmen, Geçici Rehber'deki, çeşitli yöntemlerle hesaplanabilen (örneğin CBR) taban zemininin üstyapıya vereceği desteğin yerine zeminin rezilyant modülünün konmuş olması ve ampirik tabaka katsayılarının yerine de her bir tabakanın rezilyant modülünün konmuş olması sebebiyle AASHTO yönteminin genişletiminin analitik yöntemle doğru olduğu ifade edilmektedir [5].

2.3 Rijit Üstyapılar

2.3.1 Rijit Üstyapıların Tanımlanması

Rijit üstyapı, bağlayıcısı portland çimentosu olan, yükleri taban zeminine yüksek eğilme direncine sahip tek tabakalı plak vasıtası ile dağıtan üstyapı tipidir [2, 3].

Esnek üstyapıların aksine rijit üstyapılar, hem hazırlanmış zemin üzerine doğrudan inşa edilebilirler hemde stabilize edilmiş veya granüler halde malzemeden oluşmuş tek tabakalı temel yada alttemel üzerine inşa edilebilirler [5].

Rijit üstyapılar; plakaların birbirine enine veya boyuna bağlantı durumuna, öngerme durumuna, plakaların donatılı olma durumuna göre bazı türlerde üretilirler [5].

2.3.2 Rijit Üstyapıların Projelendirilmesi

Çimento betonundan üretilen rijit üstyapıların projelendirilmesi esasları, tabaka teorisine değil plak teorisine dayanır. Orta değerde bir kalınlığa sahip plak için plağın eğilmeden sonra yine düzlemlenmesi varsayımı plak teorisini, tabakalı sistem teorisinin daha basit şekli haline getirmiştir [5]. Rijit üstyapıların projelendirilmesinde, esnek üstyapılarda olduğu gibi, trafik ve iklim koşulları, taban zemininin taşıma gücü, yolun ekonomik hizmet ömrü, yoldan beklenen hizmetin niteliği, beton plağın mekanik özellikleri gibi faktörler dikkate alınır [2].

Rijit üstyapıları projelendirme yöntemleri arasında, AASHO Deneysel Yolundan (Ottawa, Illinois, ABD) elde edilen bilgilerden yararlanılan AASHO Yöntemi ile bu yöntemden büyük ölçüde yararlanan 1970 yılında Road Research Laboratory tarafından yayınlanan Yol Notu (Road Note 29) sayılabilir [2].

Bu ampirik yöntemler dışında, Westergaard tarafından geliştirilen ve zemin ile plağın temas halinde, plak ile zemin arasındaki basınç etkileşiminin deforasyonun bir oranı olduğu varsayımlarını içeren, yol zemininin yoğun bir sıvı temel olarak düşünüldüğü Winkler Temeli çözümü ile Pickett tarafından geliştirilen yol zemininin elastik katı bir temel olarak düşünüldüğü birçok analitik çözümler vardır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal çözümlerin sunulduğu yöntemler veya AASHTO 1986 yönteminde olduğu gibi olasılık teorisinden de (ihtimaller teorisi) yararlanan çeşitli projelendirme yöntemleri geliştirilmiştir [5].

3. BİTÜMLÜ KAPLAMALAR

3.1 Bitümlü Kaplamaların Sınıflandırılması

Esnek üstyapıların tekerlekle temas halinde bulunan, en üst tabakasına kaplama tabakası adı verilir. Bu tabakada kullanılan, agrega tanelerini birbirine bağlayan, kaplamada oluşabilecek çekme gerilmelerini karşılayan ve stabiliteyi sağlayan bağlayıcı malzemeye bitüm adı verilir. Bundan dolayı esnek üstyapıların son tabakasına bitümlü kaplama tabakası adı verilir. Bitümlü kaplamalar, yolun kullanım amacı, trafik yükü ve üretim yöntemlerine bağlı olarak çok değişik tipte olabilirler[8].

Genel olarak bitümlü karışımlar (karışım tipi kaplamalar) ve yüzeysel (sathi) kaplamalar olarak ikiye ayrılırlar.

3.1.1 Bitümlü Karışımlar

Agrega ile bitümlü bağlayıcı malzemeden oluşurlar. Karışımında kullanılacak agreganın ısıtılıp ısıtılmamasına göre ikiye türdür. Bunlar ; bitümlü sıcak karışımlar (Hot-Mix Asphalt, HMA) ve bitümlü soğuk karışımlar (Cold-Mix Asphalt, CMA) olarak isimlendirilirler.

3.1.1.1 Bitümlü Sıcak Karışımlar

Yaygın olarak asfalt betonu (beton asfalt) olarak bilinirler. Bu tür karışımlarda agrega tamamlanmış derecelere kadar ısıtılır. Bitümlü bağlayıcı malzeme penetrasyon veya viskozite özelliği dikkate alınarak sınıflandırılmış asfalt çimento osudur. Bitüm ve agreganın ısıtılacağı sıcaklıklar, karışım hazırlama yönteminde tamamlanmış olup bitümün agregayı tamamen saracağı kıvama erişmesini sağlayan sıcaklıklar olarak belirtilir. Sıcak karışım sıcak seri bitümlü karışımlar olarak da bilinirler. İngilizce

yayımlanmış kaynaklarda HMA (hot-mix asphalt) olarak adlandırılır. Detaylı bilgi dördüncü bölümde verilecektir.

3.1.1.2 Bitümlü Soğuk Karışımlar

Karışımındaki agreganın ısıtılmadığı ve bağlayıcı olarak da sıvı petrol asfaltlarının yada emülsiyonların kullanıldığı karışımlardır[10]. Plantte karışım(plant-mix) veya yolda karışım (road-mix, mixed-in-place) olmak üzere iki tiptir. Farklı hava şartlarında ve farklı temel tabakası nem durumlarında kullanılabilindiğinden, özellikle soğuk havalarda ya da malzemesi olarak sıkça kullanılır. Bu tip karışımlarda agreganın ısıtılmayışı, ısıtılmadan ortaya çıkacak olan duman ve gazların çevreye olan zararlarının en az düzeyde tutulabilme özelliğini temin etmektedir. Ayrıca aynı araç ve makine yatırımı ile daha fazla karışım üretilerilebildiğinden ekonomiktir[10].

3.1.2 Yüzeysel Kaplamalar

Genelde hafif trafikli yollarda, temel tabakası üzerine ince filim halinde sıvı petrol asfaltı veya asfalt emülsiyonunun serilip üzerine agreganın serilip sıkıştırılmasıyla inşa edilen kaplamalardır. Karışım tipi kaplamalardan olmayıp agreganın ısıtılması gerekmez. Trafik durumuna göre birkaç kat olarak uygulanabilir. Birden fazla kat olarak uygulanması durumu orta trafikli yollarda uygulanmakta ise de bu durumda karışım tipi kaplamalardan beton asfalt uygulama önerilmektedir.

3.2 Bitümlü Karışımlardan Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Bu özellikler; stabilite, esneklik(fleksibilite), dayanıklılık(durabilite), kaymaya karşı direnç, işlenebilirlik ve geçirimsizlik olarak verilmektedir[2].

Stabilite

Stabilite, taşıtlardan gelen sürekli dinamik yükler, uzun süreli statik yükler ile hızlanan veya yavaşlayan tekerlek etkileri altında oluşan basınç, çekme, kesme kuvveti ve sökülmeye karşı bitümlü kaplamanın gösterdiği direnç olarak tanımlanır.

Esneklik

Yolun alt tabakasındaki çökmelerden, bitümlü kaplama tabakasına geçecek genel deformasyona, bitümlü kaplamaların çatlamadan karşı koyabilme yeteneğidir.

Dayanıklılık

Trafik, su, hava ve sıcaklık değişimlerinin etkilerine karşı bitümlü kaplamanın gösterdiği dirençtir.

Kaymaya Karşı Direnç

Bitümlü kaplama yüzeyinin, sürtünme ile araçların güvenli bir şekilde durabilmesini sağlama yöneltik pürüzlülük özelliğidir.

İşlenebilirlik

Malzemeyi istenilen kıvamda, istenilen üniformlukta sıkıştırma ile kolayca yerleştirebilme özelliğ olarak tanımlanır.

Geçirimsizlik

Bitümlü karışım kaplama tabakasının, alt tabakalara su geçişine engel olabileme özelliğidir.

Boşluk oranı, tanımlanan bu özellikleri çeşitli şekillerde etkileyerek performansın düşmesine neden olur.

3.3 Bitümlü Sıcak Karışımların Sıkıştırılmasına Etkiyen Faktörler

Bitümlü sıcak karışımlar, agrega ile asfalt çimentosunun ısıtılarak karıştırıldığı ve sıcak olarak serilip sıkıştırıldığı yol kaplama malzemeleridir. Sıkıştırmanın sebebi, yolu kullanacak trafiğ etkilili bir şekilde uzun süre taşıyabilmeleri içindir[11].

Bitümlü sıcak karışımlara stabilite sağlayan, karışım oluşturan mineral agreganın taneleri arasındaki sürtünmedir[11]. Bitüm ise karışımındaki agregaların birlikteliğini sağlar, stabiliteyi bozmaya yönelik oluşan çekme gerilmelerini karşılar.

Agregalar arası sürtünme aynı zamanda karışımın sıkıştırılması için gerekli enerjinin miktarını etkiler. Bitümü sıcak karışımların sıkıştırılması için gerekli enerji bazı faktörlerden etkilenir. Bunlar; agregalar arası sürtünme (agrega şekli ve yüzey dokusu), agrega absorpsiyon özelliği, sağlamlık, köşelilik gradasyon, bitümün viskozitesi, bitümoran, tabaka kalınlığı, karışımın sıcaklığı ve hava koşullarıdır.

3.3.1 Agregalar Arası Sürtünme

Karışımın stabilite sağlayan agregalar arası sürtünme aynı zamanda serilen karışımın sıkıştırılabilirliğini zorlaştırır. Karışımın sıkıştırılması, agregaların birbirleri ile yakın temas halinde bulunmalarını sağlar. Bu durumda kalınları ise bitüm tarafından gerçekleştirilir. Sıkıştırılan kaplama malzemesi böylece stabilite, kohezyon ve geçirimsizlik özellikleri kazanacaktır. Agregalar arası sürtünmeyi etkileyen faktörler ise agrega şekli ve agrega yüzey dokusudur[11].

3.3.1.1 Agreganın Şekli

Agregalar; yuvarlak, yassı, kübik, vb. şekillere sahiptirler. Agreganın kökenini oluşturan kayacın özelliği veya agreganın temin edildiği yer de agrega şeklinin oluşmasında etkindir. Örneğin bazalt, kireç taşı kökenli agregalara göre daha köşelidir. Bir dere yatağından temin edilen agreganın da yuvarlak olacağı açıktır. Yuvarlak agregalar, köşelilere göre daha kolay sıkıştırılırlar.

3.3.1.2 Agreganın Yüzey Dokusu

Agrega yüzeyinin düzgün veya pürüzlü oluşu, agregalar arası sürtünmeyi etkiler. Agreganın yüzey özelliği yine agreganın köken kayacına bağlıdır. Düzgün yüzey dokulu agregaların kolay sıkıştırılabilirliği bilinmektedir.

3.3.2 Agreganın Absorpsiyon Özelliği

Absorpsiyon özelliği fazla olan agregalar, bünyelerinde bulunan boşluklara karışımındaki bitümü alarak, karışımın kurulmasını ve karışımın işlenebilirliğini azaltır. Bu durum belli bir sıkışma derecesine ulaşması gereken karışımın sıkıştırılması için daha fazla enerji uygulanmasını gerektirir.

3.3.3 Sağ l a n l k

Sağ l a m ol mayan, yumuşak agregalar kırılarak yeterli sıkıştır n a m n t a m a n l a n m ş ol m a s ı i ç i n gerekli yoğunluğun elde edil m e s i n e engel olurlar. Bu da sıkıştır n a enerjisi n i n arttırıl m a s ı n ı gerektirir.

3.3.4 K ö ş e l i l i k

Özellikle 3/8 inç'ten küçük agregaların kırıl m ş yüzeylerindeki fazlalık yüzey dokusunu pürüzl ü hale getirerek karış ı m n sıkıştırılabilirli ğ i n i zorlaştırır.

3.3.5 Agrega Gradasyonu

Agrega gradasyonu da sıkıştırılabilirli ğ i etkiler. İyi derecelenmiş bir gradasyona sahip karış ı m l a r b ü t ü n a m a ç l a r ı n (en büyük birim ağırlık yeterli stabilite, geçirir m e s i z l i k , v b .) elde edilebilece ğ i uygun karış ı m l a r d ı r .

3.3.5.1 İ ri Agrega M i k t a r ı

Agrega karış ı m n d a k i i r i agrega m i k t a r ı n ı n fazla ol m a s ı işlenebilirli ğ i düşürür. Bu i s e karış ı m n sıkıştırıl m a s ı i ç i n daha fazla enerjiyi gerektirecek, bazı hallerde sıkıştır n a y ı o l d u k ç a zorlaştıracaktır.

3.3.5.2 K u m M i k t a r ı

B i t ü n l ü s ı c a k karış ı m d a k u m u n (yaklaş ı k 600 μm boyutunda m a l z e m e) kullanıl m a s ı durumunda, kumun aşırı kullan ı m ve yuvarlak ol m a s ı işlenebilirli ğ i arttırırken sıkıştır n a y a engel ol ur.

3.3.5.3 Filler M i k t a r ı

Karış ı m d a fillerin (yaklaş ı k 75 μm boyutunda m a l z e m e) varlı ğ ı , asfaltın yeterli kohezyona sahip ol m a s ı i ç i n gereklidir. Ancak fazlalı ğ ı , karış ı m pekleştirerek sıkıştırıl n a y a engel ol ur.

3.3.6 Btüm

Bağlayıcı, karışımda kohezyonu sağlamak ve karışımı çekme mukavemeti sağlamak görevlerini üstlenir. Bağlayıcı filler ile birlikte sıkıştırma sonrasında agregaları sıkışmış konumda tutar. Karışımın soğuması ile bitümün viskozitesi artar bu da kohezyon özelliğini artırır.

3.3.6.1 Btümün Viskozitesi

Bağlayıcının viskozitesi, sıkıştırmaı büyük ölçüde etkiler. Düşük bir viskozite, sıkıştırma sırasında agregaların birbirleri üzerinde kolayca hareket etmelerini sağlayacaktır, ancak sıkıştırma tamamlandığında agregaları bulundukları konumda tutacak yeterli kohezyon olmayacaktır. Yüksek viskozite sıkıştırmadan sonra agregaların kabarmaya hareketine engel olur. Viskozitesi yüksek bitümlerden yapılan karışımlar zor sıkıştırılırlar.

3.3.6.2 Btümün Bağlayıcı Oranı

Bitüm agregalar arası sürtünmeyi, yağlama özelliği ile azaltır. Bitümün karışım içerisindeki oranının az olması karışımı kuru hale getireceğinden sıkıştırılmasını engeller, fazlalığı ise kaplamanın stabilitesini sağlayan agregalar arası sürtünmeyi, agregaları birbirinden ayrı tutmak yolu ile engelleyip karışımı plastik bir kıvam verir ki bu da sıkıştırmaı engelleyecektir. Bitüm miktarının yetersizliği, karışım içerisindeki hava boşluğu miktarının fazla olmasına sebep olduğundan, kaplama performansının kötü yönde etkilenmesi sonucunu doğurur.

3.3.7 Tabaka Kalınlığı

Genel olarak, sıkıştırılacak sıcak karışım tabaka kalınlığının fazla olması, sıkıştırma etkisinin tabakanın derinliklerine doğru etkinliğini düşürecektir. Ancak tabakanın sıcak olarak serilmiş olması, kalınlığı fazla olan tabakaların daha uzun sürede soğuması sonucunu doğuracak, bu sonuç ise bağlayıcının sıcaklığa bağlı olan viskozitesinin daha yavaş artmasını sağlayarak sıkıştırma için yeterli zamanın kazanılmasını temin edecektir.

3.3.8 Karışımın Sıcaklığı

Bitümlü karışımın sıkıştırılması, sadece bağlayıcının yağlama etkisi gösterebilecek derecede akışkan olduğu zaman gerçekleşebilir. Bağlayıcının akışkanlığı sıcaklığın bir fonksiyonu olduğuna göre sıkıştırma için en uygun sıcaklık bitümün viskozitesine bağlı olacaktır. Sıkıştırmanın bir fonksiyonu olan karışım yoğunluğu, farklı karışım için farklı sıcaklıklarda yeterli derecede elde edilebilmesine rağmen, yoğunluğun sıkıştırma enerjisinin artırılması ile artırılabilirdiği sıcaklık alt sınırı, yaklaşık olarak 85°C 'tır[11]. Bunun altındaki sıcaklıklarda enerjinin sıkışma üzerinde etkinliği kalmamaktadır.

3.3.9 Hava Koşulları

Karışımın sıcaklığını düşürebilecek olan düşük hava sıcaklığı, rüzgarın varlığı gibi hava koşulları ve karışımın üzerine serileceği tabakanın yüzey sıcaklığı, karışımın soğumasına neden olur. Soğuyan karışım içerisindeki bitümün viskozitesi artar, sıkıştırma zorlaşır[11].

3.4 Bitümlü Karışımarda Boşluk Hacmi Yüzdesi Kavramı

Bitümlü sıcak karışımın sıkıştırıldığı zaman agrega, bitüm ve hava boşluğu (agregalar arası boşluğun bitümle doldurulamayan kısmı) olmak üzere üç fazlı bir sistem oluşur. Burada agrega katı fazı, bitümsüvü fazı ve hava boşluğu da gaz fazını oluşturur[4]. Gaz fazını oluşturan hava boşluğu, tartılamayacağından bitümlü karışım analizleri hacimolarak yapılır.

Sıkıştırılmış karışımın hacmi, şeklin düzgün olması durumunda hesaplanabilirken düzgün olmayan durumlarda suda yer değiştirme yöntemi ile ölçülebilir. Karışımındaki boşluk bu iki şekilde belirlenebilen karışım hacminin yüzdelik bir kısmı olarak ifade edilebilir. Çeşitli performans özelliklerini sağlaması için üretilen özel gradasyonlu geçirimi (boşluklu) kaplamalar gibi bazı sıcak karışımarda, boşluk oranının gerçek değeri ile elde edilebilmesi için numunenin pratik özgül ağırlığının, numune parafinle kaplanarak bulunması tavsiye edilmektedir[23].

Bu sebeple hava boşluğuna, boşluk hacmi yüzdesi veya boşluğun sadece hacmini nın saptanabilir olduğundan dolayı kısaca boşluk yüzdesi (oranı) adı verilir. Bundan sonra boşluk hacmi yüzdesi, boşluk yüzdesi veya boşluk oranı ifadeleriyle karışım içerisindeki hava boşluğunun hacim olarak yüzde miktarı kastedilecektir.

Boşluk oranı, bağlayıcı ile sarılmış agrega tanelerinin arasında kalan boşluk hacmi yüzdesidir[2]. Sıkıştırılmış bitümü karışım içerisindeki bu boşluk, karışımın boşluksuz olarak düşünülmesi ile tayin edilen maksimum teorik birim ağırlık ile boşluklu yapıyı temsil eden ölçülen birim ağırlık yardımıyla bulunur. Daha sonraki bölümlerde hesap detayları verilecektir.

Bitümü karışımlar, birim ağırlık ve boşluk oranı esas alınarak tasarlanırlar[2]. Karışım içerisinde kalan bu boşluk, kaplama performansına etki eder. Bundan dolayı boşluğun belli değerler arasında kalması tavsiye edilir.

3.4.1 Boşluk Oranını Etkileyen Faktörler

Bitümü sıcak karışım kaplamalarındaki boşluk oranı esasen sıkıştırma enerjisinden etkilenir. Sıkıştırma enerjisinin ise nelerden etkilendiği Bölüm 3.3'te verilmişti. Bunlar kısaca; agrega şekli, yüzey dokusu, absorpsiyon özelliği, sağlamlığı, köşelilik durumu ve gradasyonu; gradasyondaki kum filler ve iri agrega miktarı; bitümün viskozitesi ve karışımındaki miktarı; tabaka kalınlığı (laboratuvar ortamında numune yüksekliği); karışımın sıcaklığı ve bu sıcaklığa etkiyen rüzgar, hava sıcaklığı, nem durumu (üzerine asfalt betonu serilecek tabakamın) gibi hava koşulları, vb. olarak sıralanabilir.

Bu tez kapsamında; aynı malzeme, miktar, gradasyon, kalınlık ve koşullar kullanılarak bu değişkenleri, boşluk oranını etkileyen birer parametre olmaktan çıkıp sıkıştırma enerjisini keyfi olarak artırmak suretiyle boşluk oranının nasıl değiştiği gözlenmiştir.

3.4.2 Boşluk Oranının Performansa Etkisi

Yol üst yapısı esasen, trafik yükleri ile çevre koşullarından doğan gerilmelerin etkisi altındadır. Bu gerilmeler, yolun performansının ilk yapıldıkları andan itibaren giderek düşmesine sebep olur. Yoldan beklenen performans, etkiyen trafik yükleri ve

çevresel faktörler altında bozulma olmadan uzun süre hizmet vermesidir. Yolun bir parçası olan kaplama tabakası da beklenen bu performansa katkı sağlar.

Kaplama tabakası malzemesi olarak kullanılan bitümlü karışımlar gereken performansı sağlanmaları için bir takım fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmalıdırlar. Bu özelliklerdeki yetersizlikler bozulmalara sebep olarak kaplamanın dolayısıyla yolun performansının düşmesine neden olacaktır.

3.4.3 Boşluk Oranının Bitümlü Karışım Özellikleri ile İlişkisi

Karışımın yetersiz sıkışması, boşluk oranının yüksek çıkması sonucunu doğuracağından trafik altında tekerlek izi oluşumuna sebep olacaktır[19]. Yüksek boşluk oranı sebebiyle stabilite düşecektir.

Yüksek boşluk oranının, karışımındaki bitümün oksidasyonunu hızlandırarak bitümün sertleşmesine ve bunun sonucu olarak kaplamanın çatlamasına ve ayrışmalara neden olduğu bilinmektedir. Ancak kaplamadaki boşluk oranının oksidasyon üzerindeki etkinliği, boşluk oranının miktarından çok boşlukların hava geçirirliliği ile ilgilidir[20].

Boşluk oranının fazlalığı, karışımın yorulma çatlaklarına ve oksidasyona olan direncini azaltır[19]. Boşluklara giren su don etkisi ile kaplamanın dayanıklılığına zarar verecektir. Ayrıca kaplamadan beklenen geçirimsizlik özelliğini kaybetmesine ve kaplama altı tabakaların su etkisi ile deformasyonuna sebep olabilecektir.

Boşluk miktarının az oluşu eğer iyi sıkışmanın bir göstergesi olarak düşünülürse stabiliteyi artırarak kaplamada oluşan gerilmelere dayanım sağlar. Ancak düşük boşluk, ısınma sonucunda karışımı içerisindeki bitümün genleşmesine sebep olarak bitümün yol yüzeyine çıkmasına neden olur. Bu duruma kusma veya yağlanma adı verilir ve yolu kullanan taşıtların güvenli duruş mesafesini belirleyen kayma-sürtünme katsayısının düşmesine sebep olur.

3.5 Bitümlü Sıcak Karışım Tasarım Yöntemleri

Agrega ve asfalt çimentosunun ısıtılarak karıştırılması, serilip sıkıştırılması yolu ile karayolu üst yapısı kaplama tabakası malzemesi olarak kullanılan bitümlü sıcak

karışımlar, çeşitli yöntemlerle tasarlanırlar. Karışım belli bir stabiliteye ve durabiliteye sahip olmalıdır. Çeşitli yöntemlerle laboratuvar ortamında hazırlanan numunelerden elde edilen stabilite, yola serilen karışımın trafik yükü altında alınan performansla bazı tasarım ölçütleri çerçevesinde ilişkili olmalıdır. Karışımın stabilitesini ölçmede kullanılan deney, aynı zamanda bitümlü sıcak karışımın tasarım yolunu da göstermektedir[2].

3.5.1 Hubbard-Field Yöntemi

En eski bitümlü karışım tasarımı yöntemlerinden biri olup 1920 li yılların ortasında, Asfalt Enstitüsünden Prevost Hubbard ve F. C. Field tarafından şit (sheet) asfalt karışımlar için geliştirilmiştir[6,12]. Şit asfalt; sabit tesislerde özel asfalt makinelerinde ayrı ayrı ısıtılan kum filler ve uygun bitümlü malzemenin belirli oranlarda karıştırıldıktan sonra sıcak olarak belirli kalınlıkta yola serilip çabucak sıkıştırılması ile elde edilen kaplama tabakasıdır. Bu tip asfaltlarda, agreganın ağırlıkça en az % 65'i No.10 eleğinden ve tamamı ise No.4 eleğinden geçmektedir[12,13].

Deney önceleri iri agregası olmaayan karışımlara uygulanmaktayken trafik şartlarının ve talebin değişmesi ile en büyük tane boyutu $\frac{3}{4}$ inç olan agregalı karışımları için de ikinci bir tanımlama yapılmıştır.

Esasen, bitümlü karışım numunesinin standart bir çapa sahip delikten, tanımlanmış hızda, itilerek geçirilmesiyle uygulanan en büyük yükün karışımın stabilitesini verdiği bir makaslama deneyidir. Deney 60°C 'ta ve 1 mm/sn yükleme hızında uygulanmaktadır. Numuneler orijinal (normal) yöntem (agregaların tamamının No.4 eleğinden geçtiği durum) için 2 inç, modifiye yöntem (en büyük agregalı tane boyutunun $\frac{3}{4}$ inç olduğu durum) için 6 inç çapındadır[2,12,13].

Deney sonuçlarından, asfalt miktarının, birim ağırlığa, stabiliteye, karışımın boşluk yüzdesine ve agregalı karışımındaki boşluk yüzdesine karşı çizilen grafiklerinden tasarım ölçütlerine uygun asfalt miktarı belirlenir. Bu ölçütler, stabilite ve karışımındaki boşluk yüzdesidir. Eğer boşluk ölçütlerinin orta değerine karşı gelen asfalt miktarı, stabilite şartını da sağlıyorsa tasarımın asfalt miktarı olarak seçilir.

3.5.2 Hvee m Yöntemi

Yöntem yüzey alan kavramını bitümlü karışımların tasarımıda bir faktör olarak getirmiştir. California Division of Highways'den Francis N Hvee m yönetimiindeki bir grup mühendisin ortak çalışmaları ve yol uygulamaları sonucunda son şeklini almıştır. Kaliforniya Yöntemi olarakta bilinmektedir. En büyük tane boyutu 1 inç veya daha az olan, penetrasyon sınıfı asfalt çimentosu veya sıvı petrol asfaltının bağlayıcı olarak kullanıldığı, yoğun gradasyonlu karışımlar içintasarlanmıştır.

Yöntemin uygulanması için hazırlanan 2,5 inç yüksekliğinde ve 4 inç çapında numuneler, trafiğin uyguladığı sıkıştırma etkisini eniyi düzeyde yansıttığı düşünülen Kaliforniya Yoğurmalı Sıkıştırıcısı (California kneading compactor) ile sıkıştırılırlar. Stabilitite deneyi, 60°C'ta özel bir üç eksenli basınç deney hücresi yardımıyla 1 mm/dk lık hızda uygulanır.

Yöntem bir grup deneyden oluşmaktadır. Bunlar; karışımda kullanılacak asfalt miktarının tahmin edilmesini sağlayan Santrifüj Kerosen Eşdeğeri (Centrifuge Kerosene Equivalent, CKE) Deneyi; hazırlanmış numuneler üzerinde uygulanan, karışımın düşey yüklem altında yatay deformasyonlara olan direncini test edildiği, 60°C'ta Stabilitite Deneyi; nadiren uygulanan, 60°C'ta eğilmede çekme gerilmesi uygulanan Koheziometre Deneyi; karışımın suyun etkilerine karşı direncinin ölçüldüğü, oda sıcaklığında uygulanan Şişme Deneyleri ve Yoğunluk- Boşluk analizi dir.

Stabilitite deneyi, düşey yüklenen numunelerin şekil değiştirmesi ile hücre sıvı basıncındaki değişimlerden elde edilen göreceli (izafi) stabilitite denilen ve numunenin sıvı olma durumu sıfır, rijit katı olma durumu 100 değerini olan bir stabilitite değerinin hesaplanması ile tahriatsız olarak yapılır. Stabilitite deneyi sonrası aynı numune koheziometre deneyine alınır.

Tasarım ölçütleri, her bir deney için yoldan geçecek trafik grubuna göre verilmiş değerlere uygunluğun sağlanması şeklindedir.

3.5.3 Marshall Yöntemi

İkinci Dünya Savaşı sırasında, havaalanlarında kullanılacak kaplamaların tasarımı ve kontrolü ihtiyacı na cevap vermek amacıyla U S Army Corps of Engineers tarafından geliştirilmiş ve kullanımı Amerikan eyaletlerine hızla yayılmış bir yöntemdir. Yöntemle sıkıştırıcı olarak, basitlik ve taşınabilirlik özellikleri sebebiyle Mississippi Highway Departmanı'tan Bruce Marshall tarafından tasarlanan, elle hareket verilen düşen bir ağırlığa sahip tokmak seçilmiştir.

Yarı dairesel kırma kafası ile 2,5 inç yüksekliğinde 4 inç çapında silindirik numunelerin uygulanan basınç kuvveti ile kırıldığı, yükleme hızı 2 inç/dk olan, 60 °C'ta yapılan tahribatlı bir deney yöntemidir. Numuneyi tahrip eden en büyük yük ve kırılma sırasında okunan deformasyon (akma) kaydedilir.

Beklenen en uygun bitüm oranının iki alt iki de üst tarafında, agreg ağırlığının %0,5'lik bitüm miktarı artışları ile hazırlanan numunelerden biri hacim ağırlığı, stabilite, akma, karışındaki hava boşluğu, agreg ağırlığındaki asfaltla dolu boşluk değerlerinin asfalt içeriğine karşı gelen grafikler çizilir. En büyük stabilite ve birim ağırlık ile boşluk tasarım ölçütlerinin arasına düşen boşluk değerlerine karşı gelen asfalt içeriklerinin ortalaması alınarak en uygun bitüm miktarı belirlenir.

Corps of Engineers kurumunun tasarımı ndan sonra birçok eyalet ve ülkede yapılan uygulamalar yöntemde bazı değişiklikleri gerektirmiştir.

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, sabit değerler olmaktan çıkıp asfaltın viskozitesine bağlanmış; yoldan geçecek olan trafik hafif, orta ve ağır olarak sınıflandırılıp her bir sınıf için uygun sıkıştırma değerleri getirilmiş; üst ve alt tabakalar için farklı trafik sınıflarına göre farklı tasarım ölçütleri getirilmiştir. Ancak en önemli değişiklik, agreg ağırlığındaki asfaltla dolu boşluk ölçütü yerine yine agreg ağırlığındaki boşluk ölçütünün getirilmiş olmasıdır. Bu değişikliğin sebebi, agregadaki minimum boşluğun asfaltla dolu boşluktan daha etkin olmasıdır. Yoğun agreg ağırlığındaki boşluk ölçütünde asfalt için gerekli olan boşluğun kalmasına müsaade etmemektedir [12].

3.5.4 Smith Üç Eksenli Deney Yöntemi

Hubbard-Feld, Hveem ve Marshall yöntemleri, laboratuvarda elde edilen sonuçlar ile karışımın yola uygulanması ile elde edilen sonuçların ilişkilendirilmesinden geliştirilen deneysel (ampirik) yöntemlerdir. Smith yöntemi ise üç eksenli basınç deneyi ilkelerini uyguladığı daha akılcı bir yöntemdir.

Yüksekliği çapının en az iki katı olacak şekilde yoğurucu sıkıştırıcı (kneading compactor) ile sıkıştırılarak hazırlanan numuneler, aralıklı olarak statik artışlar altında düşey yönde yüklenecek yatay deformasyonların yarattığı hücre basınç artışları kaydedilir. Deney, sıcaklık ve yükleme etkilerini birer faktör olmakta çıkarılmak için oda sıcaklığında yapılır.

Düşey yüke karşı hücre basıncındaki artışları gösteren grafiklerden içsel sürtünme açısı, ϕ ve kohezyon, c değerleri hesaplanır. Yoldaki perforansı bilinen karışımların laboratuvarda test edilmesi ile içsel sürtünme açısına karşı kohezyon verilerinden uygun ve uygun olmayan karışım bölgelerinin tarif edildiği mukayese şekilleri verilmiştir. Burada uygulanan düşey yükün oluşturduğu gerilmeler de birer değişkendir. Trafik yüklerini temsil eden gerilmeler düştükçe uygun bölgenin sınırları tabii olarak genişlemektedir.

Laboratuvar şartlarında gerilme durumunun biliniyor olması sayesinde akılcı bir şekilde parametreler belirlenebiliyorken yoldaki yüklenme ve gerilme durumu aynı açıklıkta değildir.

Yöntemde kullanılan üç eksenli deney hücresine Federal Highway Administration (FHWA) tarafından basitleştirme getirilmişse de bu gayret, yöntemin laboratuvar uygulamaları dışına çıkarak tasarıma yönelik kullanılması sağlanmıştır[12].

3.5.5 Gyrotory Test Aletinin Kullanımı

Yol üst yapısında artan yük ve lastik basınçlarını karşılayabilecek karışım yoğunluğunun laboratuvar ortamında darbe esasına dayalı sıkıştırıcılarla elde edilebilmesi üzerine Amerikan U.S. Army Corps of Engineers kurumu gyrotory sıkıştırıcısının (GTM gyrotory testing machine) temelini oluşturacak olan Texas Gyrotory aletini geliştirilmiştir.

Yöntemle, sıkıştırma özelliklerinden karışımın birim hacmi, sadece agreganın birim hacmi ve gyrator sıkıştırılabilirlik endeksi gibi değerlerle; kayma (makaslama) özelliklerinden gyrator stabilite endeksi, gyrator kayma değeri, gyrator kayma faktörü gibi parametreler hesaplanabilmektedir.

Farklı bitüm miktarlarında numuneler test edilmekte ve bitüm miktarına karşı sıkıştırma ve kayma özelliklerinden grafikler oluşturulmaktadır. Bu grafiklerden en uygun bitüm oranı saptanmaktadır.

Kurum yöntemi; ağır uçak trafiğine hizmet veren hava alanlarının tasarısında kullanılmıştır. Yöntem Asphalt Enstitüsünde yol kaplama tasarımları için de düzenlenmişse de farklı trafik şartları için yeterli performansı verecek ölçütler belirlenip standartlaştırılmıştır[12].

4. ASFALT BETONU KAPLAMALAR VE MARSHALL YÖNTEMİ İLE TASARIM

4.1 Asfalt Betonu Kaplamalar

4.1.1 Tanım

Asfalt betonu, bitüm ve agreganın tanımlanmış sıcaklık derecelerine kadar ısıtılıp sabit tesislerde karıştırıldığı, uygulanacağı yerde, tanımlanmış sıcaklık derecelerinde serilip sıkıştırıldığı karışım tipi bitümü kaplamadır. Agregası ve bitümden oluşur. Kullanılan bitüm asfalt çimentosudur. Çeşitli yöntemlerle tasarım yapılabilir. Bu yöntemlerden Marshall ve Hubbard-Field yöntemleri Türk Standartları Enstitüsü kurumunca TS 3720-1983 numaralı standartta tanımlanmıştır.

Sıkıştırılmış asfalt betonu üç fazlı bir sistem oluşturur. Karışımındaki agrega, katı fazı; asfalt çimentosu, sıvı fazı ve asfalt çimentosu ile sarılmış agrega taneleri arasındaki hava ile dolu boşluklar da gaz fazını oluşturur.

4.1.2 Asfalt Çimentosu

4.1.2.1 Tanım ve Özellikleri

İngiliz standartlarında verilen bitümün tanımlanarak [16] asfalt çimentosu, petrolün rafinerilerde damıtılması sonucu geriye kalan hidrokarbon ve türevlerinden oluşmuş, katı veya yarı-katı halde bulunabilen, ısıtılınca yumuşayan, triklor etilende eriyebilen, siyah veya kahve renkte, su geçirmezlik ve bağlayıcılık özelliği olan kalıntı maddesi olarak tanımlanabilir. Literatürde AC ile temsil edilir.

4.1.2.2 Sınıflandırılması

Çeşitli yöntemlerle sınıflandırılabilir. Asfalt çimentoları, 60°C sıcaklıkta sahip oldukları mutlak viskozite değerlerine göre Viskozite Sınıfı Asfalt Çimentoları (ASTM D 3381), 25°C sıcaklıktaki penetrasyon değerlerine göre Penetrasyon Sınıfı Asfalt Çimentoları (TS 1081; ASTM D 946) ve geçmiş yıllarda kaplanmanın yapılacağı bölgede gözlenen en yüksek 7 günün sıcaklık ortalamalarının maksimum kaplama tasarımı sıcaklığı olarak ve en düşük 1 günün sıcaklığının minimum kaplama tasarımı sıcaklığı olarak alındığı ve asfalt çimentosunun bu iki değer çerçevesinde sınıflandırıldığı Perforans Sınıfı Asfalt Çimentoları olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

Ülkemizde asfalt çimentolarının sınıflandırılması, penetrasyon deneyi sonuçları kullanılarak yapılmaktadır. Bu deneye göre asfalt çimentoları [7,24];

AC 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 60-70, 75-100, 120-150, 150-200, 200-300

olarak sınıflandırılmıştır. Deneyin ayrıntıları sonraki kısımlarda verilecektir. Buradaki rakamlar, deney sonucu ölçülen batmanın desimilimetre (dmm) olarak değerinin alt ve üst sınırlarını göstermektedir.

4.1.2.3 Kalite Kontrol Deneyleri

Asfalt çimentoları için yapılması gereken kalite kontrol deneyleri verilmiştir [24]. Bunlar; penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, triklor etilende çözünürlük, ısıtma kaybı, ısıtma kaybı sonrası penetrasyon ve duktilite, parlama noktası ve ihtiyari (isteğe bağlı) olarak yapılan leke deneyidir.

Deneylerin uygulanabilmesi için niteliği belirlenecek olan asfalt çimentosu kaynağından yeterli miktarda numune alınması gerekir. Asfalt çimentoları için de ayrıntıların verildiği "Bitümlü Malzemelerden Numune Alma Yöntemleri", TS 115-1980'de verilmiştir. Alınan numunelere uygulanabilecek deneyler başlık ve kısa tanımları ile maddeler halinde aşağıda verilmektedir.

Özgöl Ağırlık Deneyi (TS 1087-72; ASTM D 70-97)

Karışım da kullanılacak bitümün gerekli miktarının, bitümü karışım tasarımı yöntemleri kullanılarak deney yolu ile hesaplanmasında bu değere ihtiyaç vardır. Özgöl ağırlık bir maddenin belirli hacminin ağırlığının aynı hacimdeki suyun 25 °C 'taki ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Özgöl ağırlık bağlayıcının viskozite değerinin yüksekliğine göre, düşükten yükseğe doğru sırasıyla; hidrometre, piknometre ve suda tartma yöntemleri ile hesaplanır. Ancak katı olan asfalt çimentoları için genel de piknometre yöntemi uygulanmaktadır.

Yöntem piknometrenin, boş, su dolu, bağlayıcı ile kısmen dolu, bağlayıcı ve su ile tamamen dolu ağırlıklarının tartılıp bitüm hacminin bulunması esasına dayanır. Bitüm ağırlığının bu hacme oranı boyutsuz olan bağlayıcı özgöl ağırlığını verir.

Penetrasyon Deneyi (TS 118-76; ASTM D 5-97)

Asfalt çimentosunun kıvamını gösteren deneylerdendir. Penetrasyon değeri yüksek olan asfalt çimentoları daha yumuşaktır.

Standart bir iğnenin, 100 g ağırlığının etkisi altında 5 sn süre ile 25 °C sıcaklıktaki su banyosu içerisinde önceden tanımlanmış özellikteki asfalt çimentosu numunesine batma miktarıdır. Birimi desimilimetredir (dmm). Bu değere göre ülkemizde asfalt çimentoları sınıflandırılmaktadır. Penetrasyon deneyi, penetrasyonu 500 dmm den büyük bağlayıcılar için daha düşük sıcaklıklarda yapılabilir. Bu sebeple deney sonuçları süre, yük ve sıcaklık ile birlikte verilir.

Duktilite Deneyi (TS 119-64; ASTM D 113-92)

Yavaş etkiyen yükler altında asfalt çimentosunun esneme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Uzunma esasına dayanır. Deney sonucunun yüksek olması bağlayıcı malzeme olarak asfalt çimentosunun kullanıldığı kaplama tabakalarına daha esnek özellik sağlanmaktadır.

Tanımlanmış şekilde hazırlanan deney numuneleri, dakikada 50 mm(2 inç) hızla 25 °C 'taki su banyosu içerisinde çekilir. Kopmanın meydana geldiği uzunluk, asfalt çimentosunun duktilite değerini verir. Birimi cm cinsinden verilir. Deney aleti

açıklığı boyunca kopmayan numunelerin duktilitesi, "+100 cm" olarak belirtilir. Düşük sıcaklık ve çekme hızında yapılabilirdi de yaygın olan yukarıda tanımlandığı şekli uygulanmaktadır.

Yumuşama Noktası Deneyi (TS 120-72; ASTM D36-95)

Çok katı asfalt çimentolarının penetrasyonunun belirlendiği durumlarda başvurulan kıvam deneyidir. Yumuşama noktasının yüksek oluşu asfalt çimentosunun sert olduğunu gösterir.

İçerisinde ısı ileten bir sıvının olduğu cam beher içerisinde tanımlanmış ölçü ve ağırlıkta bir bilyenin içine asfalt çimentosu doldurulmuş halde üzerinden, sistemin ısıtılması ile bağlayıcının yumuşaması neticesinde beherin dibine düştüğü andaki sıcaklıktır. Yöntem Halka-Bilye Yöntemi olarak bilinir. Birimi $^{\circ}\text{C}$ 'tır. Yumuşama noktasının 80°C 'tan küçük veya büyük olmasına göre farklı işlemler tanımlanmıştır. Kullanılan aletler, numunenin sıvı içerisindeki konumu, farklı kıvamda asfalt çimentoları için kullanılabilecek sıvılar(su, gliserin), deneyin başlangıç sıcaklığı (5°C , 32°C), sıcaklığın artma hızı ($5^{\circ}\text{C}/\text{dk}$) yumuşama noktasının bu değeri ne göre standartlaştırılmıştır.

Asfalt çimentolarının yumuşama noktaları $27-73^{\circ}\text{C}$ 'lar arasında olduklarından [24] yöntem 5°C su banyo sıcaklığında başlatılıp sıcaklık 3 dk sabit tutulduktan sonra dakikada 5°C arttırılarak uygulanır.

Isıtma Kaybı Deneyi (TS 121-80; ASTM D 6)

Isıtma kaybı deneyi, bağlayıcının hava ve ısı etkileri karşısında kıvam ve uzayabilme yeteneğinin değişiminin göstergesidir. Deney öncesi ve sonrası numune ağırlıkları farkının başlangıç numune ağırlığına oranı olarak hesaplanır. Birimi yoktur, %ile gösterilir.

Deneyde hazırlanan iki adet 50 g ağırlığında numune, dakikada 5-6 devir yapabilen bir raf üzerinde 5 saat süre ile 163°C 'ta tutulur. Belirtilmiş gibi hesaplanan ısıtma kaybından sonra geriye kalan numunelerden penetrasyon ve duktilite için örnekler hazırlanıp ilgili deneylere tabi tutulur. Ölçülen değerlerin başlangıçtaki penetrasyon

ve duktiliteye oranları, bağlayıcı miktarı ve hava etkilerinden sonra kaybettiği kıvam ve esnekliğin bir ölçüsü olarak değerlendirilirler.

Isıtmanın bitümü maddelere olan etkisi bu yöntemde yapılan bazı değişiklikler ile önce İnce Film Halinde Isıtma Yöntemi (TS 1086-72 ; ASTM D 1754-97), sonra Dönen İnce Film Halinde Isıtma Yöntemi (ASTM D 2872-97) adı altında standartlaştırılmıştır.

Çözünürlük Deneyleri (TS 1090-72, TS 3815-83; ASTM D 2042-97)

Bu deney, bağlayıcı miktarındaki yabancı maddelerin taşı ve asfaltın gerçek aktif bağlayıcı kısmını taşıdığına kullanılır. Çözücü olarak tıkanmaz zehirli olan, karbon disülfür (karbon sülfür), CS_2 ; karbon tetraklorür, CCL_4 ; benzen ve triklor etilen, C_2HCL_3 çözücülerinden biri kullanılır. Triklor etilen dışındaki çözücüler, özellikle karbon disülfür kolayca yanıcı özelliktedir. Çözünürlüğün birini yoktur, hem çözünen hem de çözünmeyen kısmı için sonuç %değer olarak verilir.

Çözünürlük deneyi, genel olarak TS 1090, bazı değişiklikler ile asfaltlar için TS 3815 de standartlaştırılmıştır. Esasen iki aşamadan oluşur. İlk yeterli özelliklere sahip asbest filtreli krozenin oluşturulması ikincisi ise çözücünden tanımlanmış miktarda alınarak bir erleniçerisinde, çözül en asfaltın krozeden vakumda kullanarak süzme erleni içersisine süzülmesidir. Süzme işlemi krozeden akan çözünmüş asfalt-etilen karışımının renginin saydam olması anında bitirilir. Krozenin deney öncesi ve sonrası kuru ağırlıklarından tuttuğu yabancı maddelerin miktarı tartı yolu ile bulunur. Bu miktarın toplam asfalt miktarına oran çözünmeyen kısım verir.

Leke Deneyi (Kraking Tespiti) (TS 1089)

Genelde organik bileşiklerin, özelde ağır petrol ürünlerinin özel koşullar altında ısıtılması ile daha düşük molekül ağırlıklı petrol ürünlerine dönüştürülme işlemine Kraking adı verilir. Leke deneyi ile asfaltik ürünlerin krakinge uğrayıp uğramadıkları tespit edilip uğramışlarsa bunun derecesini Ksilen Eşdeğerlerinin Tayini ile bulmaya yönelik bir deneydir. İlgili ısıtma işlemi asfalt çimentosunun uğramış olması şartnamelerde istenir. Bu durum leke deneyi sonucunun olumsuz (negatif) olması ile temsil edilir.

Deney, kısaca belli koşullar altında 2 g asfaltik maddenin 10 ml ağır naftada çözündürülmesiinden oluşan karışımından alınıp bir filtre kağıdı üzerine damlatılan bir damla maddenin kağıt üzerine, 5 dk sonra, yayılma şekliinden ibarettir. Kağıt üzerindeki leke uniform ise deney sonucu olumsuzdur. Bu istenen sonuçtur. Oumu (pozitif) olması halinde çözeltiye ksilen katılarak çeşitli oranlarda (%5'lik artışlarla) ksilen içeren çözeltiler oluşturulur. Leke deneyi tekrarlanarak pozitiften negatife geçişteki ksilen oran aralığı krakingin değeri olur.

Parlama (Alevlenme) ve Yanma Noktası Deneyi (TS 123; ASTM D 92-97)

Parlama ve yanma noktasını bulmaya yönelik birçok yöntem vardır[16]. Bunlardan en sık kullanılan Cleveland Açık Kap (Cleveland Open Cup) yöntemidir. Türk Standartları nca da tanımlanmıştır.

Parlama noktası (flash point), ısıtılan bitümün yüzeyinde bir veya iki defaya mahsus olarak görülen navi kısa süreli bir alevin görüldüğü andaki sıcaklık derecesidir.

Yanma noktası (fire point), parlama noktasının tespiti edilmesinde kullanılan bitümün ısıtılması n devam ettirilmesi ile yüzeyinde en az 5 sn süre ile devam eden bir alevlenmenin görüldüğü sıcaklık derecesidir[16].

Deneyler bağlayıcı ile güvenle çalışılabilecek sıcaklığın tespitiinde kullanılır.

Isıtıldığında genişleyeceği hesaba katılarak tanımlanmış seviyeye kadar, gerekiyorsa ısıtılarak, doldurulan bitümün sıcaklık artışı başlangıçta dakikada 15 °C artacak şekilde; sonradan 5-6 °C arttırılarak istenen nokta belirlenir. Isıtılmaya devam edilmesi halinde yanma noktası da belirlenir. Okunan sıcaklık dereceleriinde, deneyi yapıldığı yerdeki hava basıncının 1 at mosferden farklı olduğu hallerde düzeltme yapılır.

Viskozite Deneyleri

Isıtılınca sıvılaşan viskoz maddeler ile akışkanlar için kullanılan viskozite terimini kısaca, akmaya gösterilen direnç olarak tanımlanır. Çok çeşitli deney yöntemleri ile hesaplanabilen farklı viskozite değerleri söz konusudur. Bunların ortak özellikleri, belli bir hacmin, belli sıcaklıkta yerçeki ni veya vakum etkisi ile akmasında geçen

sürenin ölçüm esasına dayanmalarıdır. Bunlardan kinematik viskozite, mutlak viskozite ve Saybolt viskozitesi aşağıda tanımlanmıştır.

Kinematik Viskozite (TS 1093; ASTM D 2170-95)

Asfalt çimentolarına 135 °C 'ta uygulanan viskozite deneyidir. Türk Standartları'na tanımlanmıştır. Deneyin uygulandığı sıcaklık, beton asfaltların yaklaşık karıştırma sıcaklığı olarak düşünülmektedir. Tasarım yöntemlerinin gelişmesi ile bu deney sonuçlarından yararlanılarak belli viskoziteyi veren sıcaklık dereceleri, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kinematik viskozitenin birimi santistok (centistoke) olup cSt ile gösterilir. 1 santistok 1 mm² / sn'ye eşittir.

Dinamik (mutlak) viskozite ile kinematik viskozite arasında, dinamik viskozite değerinin bağlayıcı yoğunluğuna bölünmesiyle kinematik viskozitenin bulunuyor olması şeklinde bir elde ediliş ilişkisi vardır. Çeşitli yöntemlerle deneysel yolla da bulunabilir. Yöntemlerin tamamı, bağlayıcının belirli hacminin yerçeki etkisi ile ancak başlangıç vakumu uygulananak tanımlanmış cam bir boru içerisinde belirli bir uzunluk boyunca yer değiştirme süresinin ölçülmesi temeline dayanır.

Dinamik (Mutlak) Viskozite Deneyi (ASTM D 2171-94)

Mutlak viskozite, bitüm numunesine tanımlanmış bir deney setinde (sliding plate viskosimeter) uygulanan paskal birimindeki kayma gerilmesinin, bu gerilmedeki değişim hızını gösteren kayma değerine bölünmesinden elde edilir. Birimi paskal saniye'dir, Pa.s ile gösterilir. Ayrıca puaz (poise, P) olarakta verilir. 1 Pa.s, 10 puaz'a eşittir. Puaz'ın yüzde birlik birimi, santipuaz olarak tanımlanıp cP ile gösterilir.

Bütün bitümlü bağlayıcılara olduğu gibi asfalt çimentolarına da 60 °C 'ta uygulanır. Bu sıcaklık derecesi, yol yüzeyinin görebileceği en yüksek sıcaklık olarak düşünülmüştür. Viskozite sınıfı bağlayıcıların tanımlanmasında kullanılan deneydir. Önceki deneyde olduğu gibi belli hacimde bağlayıcının vakum etkisi ile belli uzunluk boyunca yer değiştirme süresinin ölçülmesi temeline dayanır.

Saybolt Viskozitesi (TS 117; ASTM D 88; ASTM E 102-97)

Bitümün akışkanlığının bir ölçüsüdür. Pekitibar edilmez, fikir vericidir. 60 °C'ta sıvı asfaltlara uygulanır. Bazı değişikliklerle 120-240 °C arasındaki asfalt çimentolarına da uygulanabilecek yöntem ASTM E 102 standardında tanımlanmıştır.

Her iki halde de, bir sıvı (yağ) banyosu içerisinde istenilen sıcaklığa getirilen bağlayıcının 60 ml'lik kısmının tanımlanmış bir delikten akma süresi olarak ifade edilir. Viskozite aleti; sol haznesi Furöl, sağ haznesi Universal viskozite değerinin hesaplanabildiği iki hücreden oluşur. Furöl değeri, diğerinin 0,1 katıdır; sebebi akıtma deliğinin bu değeri verecek ölçüde geniş tasarlanmış olmasıdır.

4.1.3 Agregalar

4.1.3.1 Tanım ve Özellikleri

Agregalar, bitümlü karışımda, karışımın esas elemanını oluşturur. Oluşturdukları boşluklu iskelet yapı, kaplamaya stabilite sağlayan ana unsurdur. Bitüm bu yapının birlikteliğini sağlama şeklinde görev yapmaktadır. Trafikten gelen yüklerin alt tabakalara iletilmesi agrega iskeletinin görevidir.

Yol üstyapı malzemesi olarak kullanılan agregalar boyutlarına göre üç kısma ayrılır. Kare açıklığı 4,75 mm olan No.4 eleği agreganın iri ve ince olarak ayrılmasında belirleyicidir. İnce agreganın daha küçük boyutlu olan kısmı ise 0,075 mm kare açıklıklı No.200 eleği ile ince agregadan ayrılır.

4.1.3.2 Sınıflandırılması

Üstyapı malzemesi olarak kullanılacak olan agregalar, temelde iki kaynaktan elde edilir. Çeşitli niteliklerde olabilen doğal agregalar ile yapay agregalar şeklinde bu ayrım yapmak mümkündür.

Doğal agregalar; tortul, magmatik ve metamorfik halde tabiatta bulunurlar. Her üç gruptan da yol üstyapı malzemesi olarak yararlanılır. Kayacın uygunluğu, kökeninden değil kalite kontrol deneylerinin sonuçlarından alınacak bilgilerden tayin edilir.

Yapay agregalar genelde metalurji sanayiinin atık ürünüdür. Demir cevheri eritilen yüksek fırınların cürüfları, yine aynı fırınların attığı olan küllerin eriyip topaklaşarak oluşturdukları agregalar ve granülometrik düzgünlüğü sebebiyle sıklıkla filler malzemesi olarak kullanılan çimentonun bilinen yapay agrega türleridir.

4.1.3.3 Kalite Kontrol Deneyleri

Üst yapı malzemesi olarak uygunluğunu kontrol edebilmek için agregadan numune almak gerekir. Numune alma yöntemi; numunenin, bütünü doğru şekilde temsil edebilmesi; tasarımda imalatla oluşabilecek muhtemel hataların önüne geçilebilmesi için standartlaştırılmıştır. Görülebilecek en muhtemel hata ayrışmaya uğratarak (segregasyon) stoktan veya taşıyıcı araçlardan numune alınmasıdır. Türk Standartları, numune alma yöntemini tanımlamış ve TS 707-80'de vermiştir. Ancak bu tanım beton agregaları için yapılmış olup yol üst yapısını ihtiyacı karşılamaktadır. Bu sebeple numune alma yöntemi kullanılacak en büyük tane boyutuna göre ASTM D 75-97 standardı çerçevesinde uygulanır.

Çeşitli sebeplerden dolayı agreganın gevşek ve sıkışık birim ağırlığının bilinmesi gerekir. Bu duruma genelde hakediş hesaplarında ihtiyaç duyulur. Bu amaç için tanımlanmış standartlar, TS 3529 ve ASTM C 29-97'dir. Burada da Türk Standardının beton işleri için kullanılacak agregalara göre düzenlenmiş olduğu bilinmelidir.

Agregalara uygulanan deneylerin bir kısmı, Fenni Şartname tarafından asfalt betonu üretiminde kullanılacak agregalardan istenen deneylerdir. Şartname, malzemenin iri ve ince agregalarla mineral filler olarak en az üçe ayrılmasını, iri agregaya ait; aşınma dayanımı, hava tesirlerine karşı dayanıklılık kırılma şok, yassılık indeksi, cilalanma durumu, su absorpsiyonu, soyulma mukavemeti değerlerinin bulunmasını; ince agregaya ise plastisite indeksi ve organik madde miktarı deneylerinin uygulanmasını istemektedir.

Elek Analizi (ASTM C 136-96a)

Elek analizi, asfalt betonu kaplamalarda kullanılacak olan agrega karışımının boyutlarının ve her boyutlardaki malzeme miktarlarının tesbitine yönelik bir deneydir. Agreganın tane boyutu dağılımı olarakta bilinir. Elek analizi, kaplamanın istenilen performans verebilmesi için çeşitli boyutlarda malzemelerden belirli

oranlarda barındırarak karışım da yeterli boşluk oranının temin edilebilmesi için ihtiyaç duyulur.

Uygun bir Türk Standardı'nın tanımlanmış olması sebebiyle Fenni Şartname, kullanılacak iri ve ince agregaya birlikte uygulanacak tane boyutu dağılımı tespit deneyini, ASTM C 136-96a olarak vermektedir. TS 130 ve TS 3530 da verilen tane boyutu dağılım deneyleri beton agregaları için tanımlanmış elekler ile gerçekleştirilebilmektedir. Analizde kullanılabilecek deney elekleri için TS 1225 veya ASTM E 11-95'te tanımlanan KGM'nin şartnamede belirttiği elekler kullanılır. Bunlar, Marshall yöntemi ile asfalt betonu üretiminde kullanılabilecek olan 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 9,75 mm, No. 4; No. 10; No. 40; No. 80 ve No. 200 elekleri olarak belirtilmektedir.

Mineral agregaya ise ASTM D 546-94'te ayrıntıları verilen ıslak boyut analizi yönteminin uygulanması gerekir.

Aşınma Deneyi (TS 3694; ASTM C 131-96; ASTM C 535-96)

Deney Bilyalı Tambur Yöntemi veya Los Angeles Deneyi olarakta bilinir. En büyük agrega tane boyutuna göre tanımlanmış miktarda alınan agrega numunesi, içerisinde çelik bilyeler bulunan kapalı bir tamburda belirli sayıda devir yaptırdıktan sonra numunenin No. 12 eleğinden geçen kısmının toplam numune ağırlığına oranı olarak tayin edilir. KGM bu deney sonucunun ulaşabileceği en yüksek değerleri trafik sınıfına ve asfalt betonunun kaplama tabakasında bulunduğu yere göre belirlemiştir. Örneğin, orta ve ağır trafik sınıfına hizmet verecek aşınma tabakası için bu deney sonucunun maksimum değeri %30 olarak belirlenmiştir. Deney, Türk Standartları ve ASTM tarafından düzenlenmiştir. TS 3694, beton agregaları için düzenlenmişse de alınan malzeme miktarları farklı değildir. ASTM C 131-96 ile en büyük agrega tane boyutu 37,5 mm olan agregalar için, C 535-96 ile de 19 mm'den büyük agregalar için aynı deney yöntemi tanımlanmıştır.

Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (TS 3655; ASTM C 88-90)

Donma deneyi olarakta bilinir. Çeşitli şekillerde uygulanır. En çok bilineni, kısa sürede sonuç olmayı sağlayan, kimyasal donma deneyidir. Sodyum sülfat veya magnezyum sülfat ile hazırlanan bir çözeltiye numunenin 18 saat süre ile 5 defa

dal dırılıp ıkarıl nas ıyla mal ze m ede ol uşabi lecek ayr ı ş m al ar ın l l m esi ol arak kısaca tanı m lanabilir. Al ınan örnek m ıktarı tanı m lan m ıştır. Mal ze m eni n en küçük boyut unun alt ındaki elek ten el en m esi sonucunda elek üzeri nde kalan mal ze m eni n başlan   a r l  ğ ndan fark ı m ın başlan   a r l  ğ na oran ı dır.

Bet on agregaları için TS 3655 standard ında, genel uygulama lar için ise ASTM C 88-90 standard ında ayrı ntıları veril miştir. şart na m e bu de eri n trafik sınıf ı ve kap la m a tabakası tipi için %10-12 arasında ol mas ı nı ner m ektedir.

Cilalanma Deneyi (BS 812)

İngiliz standartlarında yer alan bir deneydir. Kullanılacak agreganın bir reçine yard ı m ıyla kal ıplara tek tekt utturul up tanı m lan m ıř bir alette cilalandırıldıktan sonra ol uşan durumun tanı m lan m ıř bir gereçle l l m esi ile deney sonucu elde edilir. Tekerlek te m as halinde olan tabakalarda aranan bir nitelik tir. şart na m e, bu deney sonucunun ař ın m a tabakaları için en az 0,50 ol mas ı nı ist en m ektedir.

Özgül A r l ık ve Su Em me Deneyleri (TS 3526; ASTM C 127-88; ASTM C 128-97; ASTM C 188-95)

Yönt emi n ayrı ntıları TS 3526 da verilir. Bet on agregaları için tanı m lan m ışsa da işleyiş olarak styap ı mal ze m elerine de uygulanır. ASTM kurumu ise agregası nıflar ına göre farklı s randardlar tanı m lan m ıştır. ASTM C 127-88, iri agregası için ; ASTM C 128-97, ince agregalar için ve ASTM C 188-95, i m ento fillerleri için uygulan m aktadır.

Deneye alınacak iri agregası numuneleri ile ince agregası numuneleri, herhangi iki elek arasında kalan mal ze m elerden gradasyona kat ılım oranları çerçevesinde toplam iri agregası için 1 kg ince agregası için 0,5 kg tartılır. 24 saat suda bekletilen numunelerden iri agregalar tel sepet içerisinde önce suda ardından havlu ile kur ut ul arak havada tartılır. İnce agregası numuneleri ni n havası m ın al ın m as ı gereklidir. Bu numuneleri n suyunun yet erince al ınd ı ğ ı n gst ergesi, kesik koni ile tayin edilir. Hesap la m al ar a dair örnek, beşinci bl m de verilmi ştir.

Su Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyleri (BS 812)

Soyulma deneyi olarakta bilinir, Türk Standartları'nda ve ASTM Standartları'nda deneyle ilgili bir tanımlanmaya rastlanmamıştır. Şartname tarafından da aranan bir nitelik olup gözle tespit edilen bir değerdir, en az %50 olması istenir. Bitümle karıştırılan belirli miktardaki agreganın yüzeyindeki bitümle kaplı alanların bitümden arınmış alanlara oranı olarak verilir.

Yöntemde alınacak agrega numunesi, bu agregaya katılacak bitüm miktarı ve tipi, karıştırılma sıcaklıkları, vb. şartlar çeşitli kaynaklarda verilmiştir(Bk Kaynaklar: 2, 14, 28).

Yassılık İndeksi Deneyi (BS 812)

Deney İngiliz standartlarında yer almaktadır, Şartname tarafından da istenir. Yollar Fenni Şartnamesi bu değer in en fazla %30-35 arasında olması nı önermektedir.

Agreganın yassılığı, küçük boyutunun arasında bulunduğu iki elek göz açıklığı ortalamasının 0,6 katı olması şeklinde tanımlanır[28]. Belirli boyuttaki agregalara deney uygulanmaz. Deney sonucu tanımlanmış aletten geçen agrega ağırlığının toplam ağırlığa oranı şeklinde verilip yüzde olarak ifade edilir.

Agrega şeklinin belirlenmesinde bir yöntem de ASTM D 4791-95te verilmiştir. Ancak bu yöntem Şartnamece istenmemektedir.

4.1.4 Karışım

Bitümlü karışımlara da bir takım deneyler uygulanmaktadır. Bu deneyler, karışımın kalitesinin kontrol edilmesinden ziyade bazı özelliklerinin tespitine yöneliktir. Bunlar; yoğunluk-boşluk analizlerinin değerlendirilmesi, maksimum teorik özgül ağırlığının bulunması, pratik özgül ağırlığının bulunması, bitümi içeriğinin bulunması ve bitümün geri kazanılması amaçlarına yönelik deneylerdir.

Bunlardan yoğunluk-boşluk analizleri, maksimum teorik özgül ağırlığının bulunması, pratik özgül ağırlığının bulunması yöntemleri Türk Standartları'nda ve ASTM tarafından tanımlanmıştır. Bunlar için sırasıyla; TS 3720-83, ASTM D 1559-89;

ASTM D 2041-95; ASTM D 1188-96, ASTM D 2726-96a standartlarına bakılabilir. Yöntemlerin bazıları dördüncü bölümde konu içerisinde verilmiştir.

Karışım da kullanılan bitümün saf olarak geri kazanılmasına yönelik bir deney yöntemi de TS 131-85'te Abson Yöntemi olarak verilmiştir. Yöntem kısaca, karışım numunesinin triklor etilende çözülmesi, santrifüjle agregadan ayrılması, damıtılarak tekrar elde edilmesi şeklinde işlemektedir. Ayrıntılar söz konusu standartta ve ASTM D 1856-95a'da verilmiştir. Yöntemin amacı, karışım da kullanılan bitümlü bağlayıcıyı özelliklerini kaybetmeden orijinal özelliklerini tayin edebilmesi için geri kazanmaktır.

Bitüm Muhtevanın (İçeriğini) Bulma Yöntemleri

Bitümlü karışımların içerdikleri bitüm miktarının, kaplanmanın inşasından sonra çeşitli sebeplerle tespiti gerekir. Gerekçeler genelde; kullanılan bitüm oranının tespiti, kullanılan agrega gradasyonunun tespiti şeklinde olmaktadır. Bunun için karışım ekstraksiyon yöntemleri uygulanır. Bitümi içeriğinin bulunmasına yönelik çeşitli ekstraksiyon (çıkarma, ayırma) yöntemleri ASTM tarafından tanımlanmıştır.

Bu yöntemlerden biri, ASTM D 4125-94'te tanımlanan Nükleer Yöntemdir. Yöntem sıkıştırılmış veya laboratuvar da sıkıştırılmış bitümlü karışım numunelerine uygulanan tahribatsız bir deney şeklidir. Karışım da bitüm miktarı, radyasyon yayılma suretiyle önceden alete girilen verilerden faydalanarak karşılaştırmalı bir usul ile tespit edilmiştir. Hızlı bir yöntemdir, ancak karışım da kullanılan agregaya elek analizi yapılması düşünülüyorsa uygun değildir. Çünkü agrega bitümden ayrılma makt a, karışım milk halini korumaktadır.

Kullanılan agrega karışımının elek analizi yoluyla tane dağılımı saptanacaksa ASTM D 2171-95'te verilen beş yöntemden biri kullanılmalıdır. Burada bu yöntemlerden birisi olan "Santrifüj Yolu İle Ekstraksiyon", tezin deneysel çalışma kısmında da kullanıldığından ayrıntılı verilecektir.

Santrifüj Yolu İle Ekstraksiyon Yöntemi

Yöntem en hızlı sonuç alınan bitüm içeriğini tespit yöntemidir. Tahribatlıdır, sıkıştırılmış numunelerin tanelenmesine ve agreganın bitümden saf olarak

ayrılmasına sebep olur. Bu özelliği ile agrega elek analizi için de hazır duruma gelmektedir. Aşağıda belirtilecek ayrıntılar, deneysel çalışmada uygulanan duruma ait özellikleri yansıtmaktadır.

Sıkıştırılmış deney numunesi, numunenin hazırlandığı sıcaklık olan 160°C sıcaklığa sahip etüvde bir saat kadar bekletilerek yumuşatılır, bir cam çubuk ile taneleri birbirinden ayrılır. Etüvden alınan numune santrifüj çanağına yerleştirilir, sıcak olarak kap, numune ve filtre kağıdı beraber tartılır. Santrifüj aletinin kapağı kapatılıp kapak üzerinden numuneye uygun bir çözücü ilave edilir. Çözücü miktarı, numune yüzeyini kapatacak miktarda genelde 500-600 ml kadardır. Çözünmenin sağlanması için 10 dk bekletilir. Süre sonunda santrifüj uygulanır, bitümün kapağı içerisinden dışarı çözücü ile birlikte çıkışı sağlar. İlk çözünmenin ardından akan sıvı karışımın rengi açılana kadar (bu genelde açık kehri bar sarısı olarak tanımlanır) işlemtekrarlanır, tekrar sayısı, sıklıkla 4-5 defa olmaktadır. Tekrarlar sonunda santrifüj çanağı, numune ve filtre kağıdı ile birlikte çözücünün uçması için $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde bir gün süre ile bekletilir. Süre sonunda numune, bulunduğu çanak ve filtre kağıdı ile beraber sıcak olarak tartılır. Deney öncesi ve sonrası tartımların farkı, kullanılan bitüm miktarını verir. Bu miktarın agrega ağırlığına oranı, karışımda kullanılan bitüm yüzdesini verir. Bu şekilde agrega da bitümünden ayrılmıştır, gerekiyorsa elek analizi için hazırdır.

4.2 Marshall Yöntemi İle Asfalt Betonu Kaplama Karışımlarının Hazırlanması

4.2.1 Yöntemin Gelişimi

Yöntem 1940larda Mississippi State Highway Departmant'tan Bruce G Marshall tarafından formüle edilmiştir[25]. İkinci Dünya Savaşı sırasında, hava alanlarında kullanılacak kaplamaların tasarımı ve kontrolü ihtiyacına cevap vermek amacıyla U.S. Army Corps of Engineers kurumu tarafından geliştirilmiş ve kullanımı Amerikan eyaletlerine hızla yayılmış bir yöntemdir. Kurum yönteminde sıkıştırıcı olarak basitlik ve taşınabilirlik özellikleri sebebiyle Mississippi Highway Departmant'tan Bruce Marshall tarafından tasarlanan, elle hareket verilen düşen bir ağırlığa sahip tokmağı seçmiştir[12].

Yöntem İkinci Dünya Savaşı sırasında pistlerin artan uçak tekerlek dinamik yükü ve tekerlek basınçlarına uygun olarak inşa edilebilmesi için U.S. Corps of Engineer kuruluşunun bir seri araştırmalarından sonra elde edilen veriler yardımıyla şekillendirilip ASTM(American Society for Testing and Materials) tarafından D 1559 standardı ile Birleşik Devletlerde uygulanmaya başlanmıştır. 1985 yılı itibarıyla Amerikan Eyaletleri Ulaştırma Birliğince % 76 oranında uygulama alanına ulaşmıştır[12].

Yöntem maksimum tane boyutu 25 mm ve daha küçük agrega içeren ve penetrasyon veya viskozite ile sınıflandırılmış asfalt çimentosu kullanılan bitümlü sıcak karışımların laboratuvar tasarımı için önerilmiştir[21]. Bu boyuttan daha büyük tane boyutuna sahip agrega karışımları için Modifiye Marshall Yöntemi kullanılır[21,26]. Corps of Engineers kurumunun tasarımı sonrasında birçok eyalet ve ülkede yapılan uygulamalar Marshall Yönteminde bazı değişiklikleri gerektirmiştir.

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, sabit değerler olmaktan çıkıp asfaltın viskozitesine bağlanmıştır.

Yoldan geçecek olan trafik, hafif, orta ve ağır olarak sınıflandırılıp her bir sınıf için sıkıştırma da kullanılacak uygun darbe sayıları getirilmiş; üst ve alt tabakalar için farklı trafik sınıflarına göre farklı tasarım ölçütleri getirilmiştir.

Ancak en önemli değişiklik, agrega karışımındaki asfaltla dolu boşluk ölçütü (VFA) yerine yine agrega karışımındaki boşluk ölçütünün (VMA) getirilmiş olmasıdır. Bu değişikliğin sebebi, agregadaki minimum boşluğun asfaltla dolu boşluktan kaplanmadan beklenen performans üzerinde daha etkin olmasıdır. Yoğun agrega gradasyonları, asfalt için gerekli olan boşluğun oluşmasına izin vermediklerinden kaplanmadaki boşluk miktarı tasarım ölçütleri arasına sokulmuştur[12].

Yöntem Türk Standartları Enstitüsü tarafından TS 3720-83'de tanımlanmıştır.

4.2.2 TS 3720'ye Göre Marshall Yöntemi

4.2.2.1 Kapsam ve Uygulama Alanı

Bu standart, karayolu ve hava alanları üst yapısında kullanılan bitümlü kaplamaların karışım hesap esaslarını kapsar. En büyük agrega tane büyüklüğü 25 mm'ye kadar

olan iri agrega içeren kaplama karışımlarının akma direncinin bulunmasıyla karışım hesabının yapılmasında, ayrıca kaplamanın inşası sırasında ve sonrasında kontrolü için gerekli bilgilerin elde edilmesi için kullanılır[17].

Yöntemana hatları itibarıyla, uygun şekilde hazırlanan numunelerin kırılarak kırma yükü ve deformasyonunun kaydedilmesi ve yoğunluk-boşluk analizlerinin yapılması gereken tasarımölçütlerinin sağlandığını tespit edilmesi esasına dayanır.

Tasarım beş bölümden oluşur. Bunlar; numunelerin hazırlanması, karıştırılması, sıkıştırılması, kırılması ile hesaplama ve sonuçların gösterilmesi dir.

4.2.2.2 Numunelerin Hazırlanması

Her tane büyüklüğü dağılım (gradasyon) ve bitüm oranı için gerekli numune sayısı üçtür. Karışımın türüne bağlı olarak (kaplama aşınma tabakası, kaplama binder tabakası, bitümü temel tabakası) belirlenen bitüm yüzdesinden başlayarak her seferinde bu miktarı % 0,5 artırarak bulunacak altı bağlayıcı miktarı kullanılarak toplam 18 numune hazırlanır. Numunelerdeki agrega miktarı yaklaşık 1200 g dir.

Numuneler için kullanılacak agrega nitelik olarak gradasyon ise aralık olarak şartnamelere uygun olmalıdır[14].

4.2.2.3 Numunelerin Karıştırılması

Karıştırma sıcaklığı, numunenin hazırlanmasında kullanılacak bağlayıcının türüne ve viskozitesine bağlıdır. Asfalt çimentosu için viskozitesinin 170 ± 20 cSt (santistok) olduğu sıcaklıktır.

Bağlayıcı ve agrega bu sıcaklığa kadar ısıtılır. KGM ısıtılma sıcaklığının kaplama türüne ve bağlayıcı tipine göre belirli bir aralıkta olması önerilmektedir.

Isıtılan agrega karışımı önce kuru olarak karıştırılır, bitümün katılması ile birlikte agreganın bağlayıcı ile tamamen sarılmasına kadar mekanik bir karıştırıcı veya el ile karıştırılır. Bu süreçte karışım sıcaklığının düşmesi sağlanmalıdır.

4.2.2.4 Numunelerin Sıkıştırılması

Sıkıştırma işlemi, iç çapı 101,6 mm (4 inç) olan kalıplarda Marshall tokmağı ile yapılır. Tokmak; sıkıştırma yüzeyi düz, silindirik bir başlığı olan 4536 g'lık bir kütle, 457 mm yükseklikten serbestçe düşmesine imkan veren elle hareket verilen veya mekanik olabilen bir düzeneştir. Sıkıştırma; tokmağın, numunenin her iki yüzüne 50 darbesi etkisi ile sağlanır. Farklı uygulanan darbe sayısı belirtilmelidir.

KGM uygulanan darbe sayısını kaplama tabakaları için trafiğin sınıfına ve yolun önemine göre hafif ve orta trafik için 50 darbe, ağır trafik için 75 darbe olarak önerilmektedir. Trafik sınıflandırılması Eşdeğer Dengil Yüğü (EAL) Tekerrür Sayısı'na göre yapılır. Asfalt Enstitüsü bu sınıflandırmayı, EAL tekerrür sayısının on binden küçük olduğu durumları hafif trafik, on bin ile bir milyon arasında olduğu durumları orta trafik, bir milyondan büyük olduğu durumları ağır trafik olarak nitelendirerek yapmıştır. Bu trafik grupları için darbe sayısı sırasıyla; 35, 50 ve 75 olarak önermiştir.

Sıkıştırma sıcaklığı, yine kullanılan bağlayıcı nın tipi ve viskozitesine bağlıdır. Asfalt çimentosu için viskozitesinin 280 ± 30 cSt olduğu sıcaklık derecesi dir.

Sıkıştırılan numuneler, hava banyosunda soğutulur. Gerekirse hızlı soğuma için vantilatör kullanılabilir. Soğuma numunenin yeterli stabilite kazanması ve şeklinin bozulmaması içindir. Soğuyan numuneler, tanımlanmış bir çıkartıcı ile kalıptan ayrılır; bir gece laboratuvar da bekletilip ortalama yükseklikleri ile su ve havadaki ağırlıkları ölçülür. Deneyde, standart numune yüksekliği 63,5 mm (2,5 inç) olarak verilmektedir.

4.2.2.5 Numunelerin Kırılması

Numunelerin kırılma sıcaklıkları ve bu sıcaklığa ulaşmaları için su veya hava banyosunda tutulma süreleri bağlayıcının tipine bağlıdır. Asfalt çimentosu için numuneler 30-40 dk, 60°C'lık su banyosunda veya aynı sıcaklıkta 2 saat hava banyosunda tutularak ilgili deney sıcaklığına gelmeleri sağlanır.

Numuneler, deney sıcaklığına eriştiğinde yüklenme ünitesinde kırılırlar. Bu ünite tanımlanmıştır, yüklenme hızı 51 mm/dk (2 inç/dk)'dır. Numunelerin kırıldığı en

büyük yük ve bu yük okunduğu anda okunacak olan akma (deformasyon) kaydedilir. Önceden ölçülen yüksekliklerin standart numune yüksekliğinden olan farklarına bağlı olarak yönteme verilen düzeltme katsayıları ile bu yük okunmaları düzeltilir.

4.2.2.6 Hesaplama ve Sonuçların Gösterilmesi

Yöntemle amaç, kaplama karışımının malatında kullanılacak en iyi bitümyüzdesini (optimum bitümoranını) bulmak ve şartnamelerde verilen diğer ölçütlere uygunluğu sağlamaktır. Bu nedenle beş grafik çizilir. Bunlar; pratik özgül ağırlığın bağlayıcıya karşı, stabilitenin bağlayıcıya karşı, asfaltla dolu boşluğun bağlayıcıya karşı, boşluğun bağlayıcıya karşı ve akmanın bağlayıcıya karşı çizilen grafikleridir. Son yıllarda agregalar arası boşluğun bağlayıcıya karşı çizilen grafiğinin asfaltla dolu boşluğun bağlayıcıya karşı çizilen grafiği yerine kullanımı dünyada yaygınlaşmışsa da KGM bu değerlendirme henüz şartnamelerinde tasarım ölçütü olarak almamaktadır.

Çizilen grafiklerden en büyük pratik birim ağırlığa, en büyük stabiliteye, uygun aralığın ortasına düşen boşluğa, uygun aralığın ortasına düşen asfaltla dolu boşluğa ve uygun aralığa düşen akma değerlerinin ortalaması optimum bitümyüzdesi olarak belirlenir. Ancak bazı kaynaklarda [2] bu işlemin yerine, ilk dört grafikten tanımlanan özelliklerle belirlenen bitüm oranlarının ortalaması alınarak bulunan bitüm oranı, şartnamede belirtilen akma sınırları arasında bir akmaya karşılık geliyorsa optimum bitümoranı olarak tayin edilmelidir şeklinde bir uygulama önerilmektedir.

4.2.3 Marshall Yöntemini DeneySEL Çalışmada Kullanılan Hali

DeneySEL çalışmada kullanılan Marshall Yöntemi, TS 3720 den bazı farklar içermektedir. Bu farklar aşağıdaki paragraflarda sıralanmıştır.

DeneySEL çalışmanın amacı bir gradasyon için uygun olan optimum bitüm oranının tespit edilmesi olduğundan, çalışmada TS 3720 de takip edilmesi istenen sıralanmıştır. Çalışma, bilinen gradasyon ve optimum bitüm oranı için sıkıştırma enerjisinin boşluk oranı ve gradasyonu etkileme derecesini konu almaktadır.

Çalışmada hazırlanacak numunelerin yüksekliği standartta ifade edilen yükseklikten (63,5 mm) farklı olup 80-85 mm arasında değişmektedir. Bu farkın bir sonucu olarak

numune miktarı da 1200 g yerine 1510 g olmuştur. Numune sıkıştırma kalıplarının iç çapı yine aynı (101,6mm), fakat yüksekliği standartta belirtilenden (87 mm) farklı olup 107 mm'dir. Bu farktan doğan bazı diğer kalıp düzeltmeleri de yapılmıştır.

Bir başka farkta, sıkıştırmada kullanılan enerji üzerindedir. Çalışmada standarttan (50 darbe) farklı olarak 50 ile 110 arasında beşer aralıklı on üç farklı darbe sayısı uygulanmıştır.

Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları da farklıdır. Standartta verildiği gibi asfalt çimentosunun belirlenmiş kinematik viskozite değerlerinden değil eldeki i nkanlar çerçevesinde 128 °C'taki Saybolt-Furol viskozitesi (294sn) ve çevirne katsayılarından faydalanılarak Yollar Fenni Şartnamesi'nde belirtilen değerlerinde dikkate alınması ile belirlenmiştir. Bk. Kaynaklar: 14, 16, 27.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Çalışmanın Tanımlanması

Bu çalışmada, esnek yol üst yapılarında kaplama tabakası olarak kullanılan bitümlü sıcak karışım tipi asfalt betonu numuneleri, Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

Üretilen bu numunelerde, agrega gradasyonu olarak KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde Tip 2 ve Tip 4 olarak tanımlanan aşınma tabakası gradasyonları ile Tip 3 olarak tanımlanan binder tabakası gradasyonuna uygun 3 farklı gradasyon kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan bitümlü sepet penetrasyon sınıfı 60/70 (AC 60-70) bitümdür. Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde verilen aşınma tabakasının Tip 2 ve Tip 4, binder tabakasının Tip 3 gradasyonu sırasıyla verilmiştir.

Tablo 5.1 Aşınma tabakası için KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde verilen agrega gradasyon sınırları

El ek Boyut u	Geçen, %			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
19 mm (3/4 inç)	100	100	-	-
12,5 mm (1/2 inç)	84 - 100	77 - 100	100	100
9,5 mm (3/8 inç)	75 - 91	66 - 84	87 - 100	80 - 100
4,75 mm (No. 4)	57 - 75	46 - 66	66 - 82	55 - 72
2,00 mm (No. 10)	42 - 59	30 - 50	47 - 64	36 - 53
0,425 mm (No. 40)	22 - 35	12-28	24 - 36	16 - 28
0,180 mm (No. 80)	12-22	7-18	13 - 22	8-16
0,075 mm (No. 200)	4 - 10	4 - 10	4 - 10	4 - 10

Çalışma, üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde yapılan çalışma; asfalt betonu numunelerinin, laboratuvar ortamında Marshall yöntemi göre ancak yöntemde öngörülen standart yükseklikten (63,5 mm) daha yüksek ve değişen miktarlarda

sıkıştırma enerjisi uygulanarak hazırlanmasıdır. İkinci bölüm hazırlanan numunelerdeki boşluk oranlarının hesaplanması ve boşluk oranı değişimlerinin incelenmesinden oluşmaktadır. Son bölüm ise sıkıştırma da uygulanan enerjinin numune gradasyonu üzerine etkilerinin incelenmesinden oluşmaktadır.

Tablo 5.2 Binder tabakası için KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde verilen agrega gradasyon sınırları

Eleğ Boyutu	Geçen, %		
	Tip 1	Tip 2	Tip 3
25 mm(1 inç)	100	100	100
19 mm(3/4 inç)	82-100	80-100	77-100
12,5 mm(1/2 inç)	68-87	63-81	59-77
9,5 mm(3/8 inç)	60-79	54-72	49-66
4,75 mm(No. 4)	46-65	40-58	34-52
2,00 mm(No. 10)	34-51	28-45	23-39
0,425 mm(No. 40)	17-29	14-25	12-22
0,180 mm(No. 80)	9-18	8-16	7-14
0,075 mm(No. 200)	2-7	2-7	2-7

5.2 Malzemenin Temini

Marshall numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agreganın iri ve ince kısmı Kireçtaşı kökenliyen mineral filler olarak Traslı Çimento (TÇ 32,5) kullanılmıştır. Agreganın deneylerin yapıldığı İstanbul Asfalt Fabrikaları (İSFALT) A.Ş.'nin Mahmutbey ve Hacılar Asfalt Betonu Üretim Tesisleri'ne de malzeme sağlayan Cebeci Taş Ocakları Bölgesi'nden alınmıştır. Filler olarak özelliklerinin daha iyi olması sebebiyle traslı çimento tercih edilmiştir.

Kullanılan bitümlüsfalt A.Ş tarafından Tüpraş A.Ş.'ne ait İzmit Rafinerisi'nden temin edilen ve laboratuvara girişi sırasında rutin olarak kalite kontrol deneyleri yapılan 60/70 penetrasyonlu asfalt çimentosudur(AC 60-70).

5.2.1 Agreganın

Kullanılan iri ve ince agreganın Cebeci Kireçtaşı Bölgesi'ndeki taş ocaklarından elde edilmiştir. İlgili bölge, İstanbul'a yol üst yapısı agregası malzemesi sağlayan taş ocağı alanlarından biridir.

5.2.1.1 Cebeci Kireçtaşı Bölgesi

Alibeyköy barajının batı bitişiğinde bulunan Cebeci Bölgesi, karbonifer yaşlı birimleri içinde bulunur. Karbonifer yaşlı birimler bir çok yerde; kumtaşı, konglomera, killi şist fasiyesleri gösterir. Bu litolojiler karasal verilere işaret etmektedir. Cebeci bölgesinde bulunan karbonifer yaşlı kireçtaşları koyu renkli olup yer yer grafitli seviyeler içerir. Özellikle grafitli seviyelerde kireçtaşının rengi oldukça fazla koyulaşır, hatta siyahlaşır. Cebeci kireçtaşlarında yoğun tektonik hareketler gelişmiştir. Bu hareketlere bağlı olarak bazı taş ocağı yollarında koyu renkli kireçtaşları ile açık renkli kireçtaşları bir araya gelmiş ve yine kireçtaşları çeşitli faylarla şist, grafit şist, fillit, kumtaşı gibi birimlerde yan yana gelmiştir. Bu bölgedeki kireçtaşlarının çatlak sistemleri ikincil kalsitler ile dolmuştur[15 s. 107].

Cebeci bölgesi taş ocağına ait aşınma, soyulma ve donma kaybı değerleri:

- Aşınma mukavemeti, % : 21
- Soyulma mukavemeti, % : 75-85
- Donma mukavemeti, % : 0.08

olarak verilmiştir[15].

5.2.1.2 Agregaya Uygulanan İşlemler

Bahsedilen taş ocağından elde edilen malzemeye; eleme, yıkama ve kurutma işlemleri ile Los Angeles aşınma deneyi (%27 aşınma kaybı olduğu görülmüştür) ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Özgül ağırlık deney sonuçlarına ait değerler Tablo 5.3te verilmiştir.

Tablo 5.3 Agregaların özgül ağırlık ve su absorpsiyonu deney sonuçları

KABA (İ Rİ) AGREGA										
Gradasyonlar		T i p 2			T i p 3			T i p 4		
Se mbol	Açı kl a n a	Deney 1	Deney 2	Ort a l a n a	Deney 1	Deney 2	Ort a l a n a	Deney 1	Deney 2	Ort a l a n a
A	Kur ut ul m u ş n a l z e n e a ğ r l ı ğ ı , g	988, 1	981, 9		995, 4	993, 3		987, 8	996, 4	
B	Doygun, kuru yüzeyli n a l z e n e a ğ r l ı ğ ı , g	991, 1	985, 0		999, 0	996, 9		991, 0	999, 7	
C	Suya doygun n a l z e n e n i n s u d a k i a ğ r l ı ğ ı , g	622, 7	619, 5		628, 7	626, 8		623, 4	628, 0	
A/ (B- C)	Haci m ö z g ü l a ğ r l ı ğ ı (kuru)	2, 682	2, 686	2, 684	2, 688	2, 684	2, 686	2, 687	2, 681	2, 684
B/ (B- C)	Haci m ö z g ü l a ğ r l ı ğ ı (doygun, kuru yüzeyli)	2, 690	2, 695	2, 693	2, 698	2, 694	2, 696	2, 696	2, 690	2, 693
A/ (A- C)	Gör ün ü r (z a h i r i) ö z g ü l a ğ r l ı k	2, 704	2, 709	2, 707	2, 714	2, 710	2, 712	2, 711	2, 705	2, 708
(B- A)/ A*100	Su a b s o r b s i y o n u (%)	0, 30	0, 32	0, 31	0, 36	0, 36	0, 36	0, 32	0, 33	0, 33
İ N C E A G R E G A										
A	Kur ut ul m u ş n a l z e n e a ğ r l ı ğ ı , g	493, 50	493, 90		491, 40	492, 20		490, 80	491, 50	
B	Doygun, kuru yüzeyli n a l z e n e a ğ r l ı ğ ı , g	500, 00	500, 00		500, 00	500, 00		500, 00	500, 00	
C	Vol u m e t r i k k a p , s u v e i n c e a g r e g a a ğ r l ı ğ ı , g	999, 43	956, 00		1002, 58	1006, 86		1004, 82	940, 62	
D	Vol u m e t r i k k a b ı n s u d o l u a ğ r l ı ğ ı , g	685, 95	641, 90		690, 25	693, 35		692, 84	625, 36	
E	Vol u m e t r i k k a b ı n b o ş a ğ r l ı ğ ı , g	188, 00	143, 75		192, 25	195, 55		194, 90	130, 32	
A/ (B+D- C)	Haci m ö z g ü l a ğ r l ı ğ ı (kuru)	2, 646	2, 657	2, 651	2, 618	2, 639	2, 629	2, 610	2, 660	2, 635
B/ (B+D- C)	Haci m ö z g ü l a ğ r l ı ğ ı (doygun, kuru yüzeyli)	2, 681	2, 690	2, 685	2, 664	2, 681	2, 673	2, 659	2, 707	2, 683
A/ (A+D- C)	Gör ün ü r (z a h i r i) ö z g ü l a ğ r l ı k	2, 741	2, 747	2, 744	2, 744	2, 754	2, 749	2, 745	2, 789	2, 767
(B- A)/ A*100	Su a b s o r b s i y o n u (%)	1, 32	1, 24	1, 28	1, 75	1, 58	1, 67	1, 87	1, 73	1, 80
F İ L L E R (T R A S L I Ç İ M E N T O)										
A	Nu m u n e a ğ r l ı ğ ı , g	20, 00	20, 00							
B	Kap a ğ r l ı ğ ı , g	167, 01	165, 03							
C	Kab ı n s u d o l u a ğ r l ı ğ ı , g	474, 40	472, 20							
D	Kap , s u v e n u m u n e a ğ r l ı ğ ı , g	487, 86	485, 90							
A/ (A+G- D)	Ö z g ü l a ğ r l ı k	3, 058	3, 175	3, 116						

Not: Kaba ve ince agrega ile filler n a l z e n e s i n i n ö z g ü l a ğ r l ı k d e n e y l e r i s ı r a s ı y l a ; A S T M C 127, A S T M C 128 v e A S T M C 188 s t a n d a r t l a r ı n a g ö r e y a p ı l m ı ş t ı r .

- **Eleme**

Taş ocaklarından çıkarılan agrega kırıldıktan sonra piyasada bilinen şekli ile Taş Tozu (0-5 mm), No. 1 (5-14 mm), No. 2 (14-19 mm), No. 3 (19-25 mm), vb. şeklinde sınıflara ayrılmaktadır. Konkasör makinelerinin, beton üreten santrallere vermek üzere belirtilen sınıflarda kırılmış olduğu agregadan gereken miktarda alınıp elenmiştir. Eleme işlemi İTÜ İnşaat Fakültesi Ulaştırma Laboratuvarı ile İTÜ Kimya- Metalurji Fakültesi Temel İşlemler Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

- **Yıkama**

Elenen agrega, tanelere yapışan fillerin ayrılması için yıkanmıştır. Bu işlem karışımında kullanılan fillerin (trash çimento) oranında hassasiyetin sağlanması için yapılmıştır. Plantlerde asfalt betonu üretilirken, gerek maliyet artışları gerekse yeterli miktarda yıkanmış malzemenin üretimiyle paralel olarak hazırlanması nedeniyle genelde yıkama işleminden kaçınılmaktadır.

Yıkama işlemi, her bir elek üzerinde kalan malzemenin eleklerle birlikte akan su altında suyun durulmasına kadar yıkanması suretiyle yapılmıştır. Bu esnada yıkama suyu üzerinde yüzen, grafit olarak adlandırılan siyah, kaygan bir maddenin biriktiği gözlenmiştir.

Özellikle, No. 200 eleği üzerinde kalan agreganın yıkanması sırasında alınan örneklerden, yıkandıktan sonra bu malzemenin barındırdığı fillerin su ile uzaklaştırılması nedeniyle yaklaşık %73 civarında ağırlık kaybına uğradığını tespit edilmiş olması, yıkama işleminin gerekliliği konusunda fikir vermiştir.

- **Kurutma**

Eleni payırı kaplarda yıkanan malzeme çeşitli deneyler için kullanılabilmesi amacıyla $105 \pm 5^\circ C (221 \pm 5^\circ F)$ sıcaklığına sahip etüvde, 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Malzeme soğuduktan sonra aşınma ve özgül ağırlık deneyleri için numuneler alınmıştır. Yıkama kurutulmuş malzeme için fotograflar Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekilde, agregalar boyutlarına göre sıralanmıştır.



Şekil 5.1 Çalışmada kullanılan agregaların yıkayıp kurutulduktan sonraki görünümü

5.2.2 Bitüm

Çalışmada kullanılan bitüm İsfalt A.Ş.'nin yol uygulamalarında kullanılmak üzere Tüpraş A.Ş. İzmit Rafinerisi'nden aldığı malzemedir. Satın alınan bitüme, şirket merkez laboratuvarında kalite kontrol deneyleri uygulanmaktadır. Çalışmada kullanılan asfalt çimentosu da aynı işlemlerden geçmiş 60/70 penetrasyonlu bitümdür. Bitüm laboratuvara girdiği anda uygulanan kalite kontrol deneyleri dışında bir deney uygulanmamış, şirketçe yapılan deney sonuçlarına itimat edilmiştir. Çalışmada kullanılan bitüm uygulanan deney sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4'te verilen Saybol-Furöl viskozite deneyi, bağlayıcının viskozitesi hakkında fikir sahibi olunmayı sağlayan, uygulamada pek itibar edilmeyen bir deneydir. Emülsiyon ve sıvı petrol asfaltlarına 60°C'de uygulanmaktadır. Ancak eldeki imkanlar çerçevesinde, bitümün viskozitesine dair bilgi alabilmek için 128°C'de 62 penetrasyonlu asfalt çimentosuna bu deney uygulanarak 294 s'lik bir viskozite ölçülmüştür. Ölçülen bu değer kinematik viskozite ile ilişkisinden [16] numunelerin Marshall yöntemine uygun olarak hazırlanması için karıştırma sıcaklığının 155-165°C, sıkıştırma sıcaklığının ise 145-155°C arasında değişmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 5.4 Çalışmada kullanılan asfalt çimento osunun özellikleri

Deneyin Adı	Ölçülen Değer
Penetrasyon (25°C , 100 g, 5 sn)	62
Yumuşama Noktası (<i>hal ka-bilya yöntemi</i>), $^{\circ}\text{C}$	51
Duktilite (25°C , 5 cm dk), cm	+100
Parlama Noktası (<i>Cleveland açık kap yöntemi</i>), $^{\circ}\text{C}$	260
Trikloretilede Çözünürlük, %	99,5
Leke Deneyi	negatif
İnce Fil m Hali nde Isıtma Kaybı (3,2 mm, 163°C , 5 saat), %	0,1
Saybolt-Fur d Viskozitesi (128°C), sn	294

5.3 Numunelerin Hazırlanması

5.3.1 Yüksek (Özel) Kalıpların İmalatı

Çalışmada yüksekliği 80-85 mm arasında değişen numuneler üretilmiştir. Bunun için gerekli olan kalıplar, İkitelli Sanayi Bölgesi ndeki bir atölyede imal edilmiştir. İmal edilen kalıplara ait fotoğraflar Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 de verilmiştir.

Kalıplar, yüksekliği 107,30 mm iç çapı 101,60 mm (4 inç) olan sıkıştırma kalıbı (compaction mold) ile 45,05 mm yüksekliğinde, 104,25 mm iç çapında yakadan (collar) oluşan iki parçalı bir sistemdir. Sıkıştırma kalıbından kısa sürede çok sayıda numune üretebilmek için 10 adet imal edilmiştir.

5.3.2 Numunelerin Tartılması

5.3.2.1 Çalışmalarda Kullanılacak Agreganın Miktarı ve Gradasyonu

Yapılan hesaplamalar ve deneyler sonucu yüksek numunelerin üretilmesi için yöntemde standart numune üretimi için önerilen 1200 g'lık agrega karışım yerine, 1510 g'lık agrega karışımının hazırlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Agreganın gradasyonu, İsfalt AŞ tarafından plantlerde asfalt betonu üretmek için hazırlanan tasarımlarında belirtilen oranlara uygun olarak alınmış, her bir numune için ayrı ayrı tartımlar yapılmıştır.



Şekil 5.2 Çalışmada kullanılan kalıp (sağda) ve TS 3720 de belirtilen standart kalıp



Şekil 5.3 Çalışmada kullanılan kalıp (solda), standart kalıp ve yakaları

İsfalt A Ş' ye ait gradasyonların kullanılmasının sebebi; bu tasarımlar için belirlenen optimum bitüm oranının kullanılabilmesi, yeniden bir tasarımı yapılması içindir. Bunun yanı sıra İstanbul İli'nde halihazırda uygulanan bir karışımın kullanılmasının çok daha uygun olacağı düşünülmüştür. Tablo 5.5'te, İsfalt A Ş tasarımı raporlarından alınarak çalışmada kullanılmış gradasyonlar verilmiştir. Çalışmada 3 farklı gradasyon kullanılarak, 13 farklı sıkıştırma enerjisi seviyesinde (darbe sayısında), her bir seviyeden üçer numune olmak üzere 117 numune üretilmiştir. Bunlardan 39 tanesi daha sonra sıkıştırma enerjisinin gradasyon değişimleri üzerindeki etkisinin gözlemlenebilmesi için ekstraksiyona deneyi ne tabi tutulmuştur.

Tablo 5.5 Çalışmada kullanılan gradasyonlar ve optimum bitüm oranları

Elek Boyutu	Geçen, %		
	Tip 2	Tip 4	Tip 3
25 mm	-	-	100,0
19 mm	100,0	-	86,2
12,5 mm	89,3	100,0	70,2
9,5 mm	73,9	89,4	60,2
No. 4	48,9	67,8	46,9
No. 10	27,4	39,0	27,3
No. 40	12,3	17,5	12,2
No. 80	8,3	11,8	8,3
No. 200	5,8	8,2	5,8
Optimum Bitüm Oranı, %	5,03	5,06	4,66

5.3.2.2 Bitümün Miktarı

Tartılan agrega karışımlarına, agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak ifade edilen bitüm önceden tespit edilmiş olan optimum oranlarda katılmıştır. Kullanılan bitüm oranları; aşınma tabakası Tip 2 gradasyonu için % 5,03; Tip 4 gradasyonu için % 5,06 ve binder tabakası Tip 3 gradasyonu için %4,66'dır.

5.3.3 Numunelerin Karıştırılması

Hesaplanan miktarda, gradasyonuna uygun olarak tartılan agrega ile belirtilen yüzdelerde tartılan asfalt çimentosu mekanik bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır.

Önceden belirlenen, sabit bir karıştırma süresi uygulanmış, bitümün agrega tanelerini tamamen sarıldığı gözlemlenmesi ile karıştırma son verilmiştir. Burada gözlenen, iri agrega miktarı fazla olan karışımlarda karıştırma süresinin daha kısa olduğudur. Karıştırma süresi yaklaşık 1-1,5 dk arasında gerçekleşmiştir.

Marshall yöntemi ile numune hazırlanırken, karıştırma sıcaklığı olarak sabit bir değer verilmediğinde, karıştırma sıcaklığı kullanılacak bağlayıcının tipine ve viskozitesine bağlanmaktadır. Karıştırma sıcaklığı asfalt çimentosu için viskozitenin $170 \pm 20^{\circ}\text{C}$ (santistok) olduğu sıcaklık olarak önerilmektedir.

Tablo 5.6 Malzemelerin karıştırma sıcaklıkları

Asfalt Çimentosu Tipi	Asfalt Çimentosu		Agrega	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
AC 40/50 ve AC 60/70	145 °C	160 °C	150 °C	165 °C
AC 75/100	140 °C	155 °C	145 °C	160 °C

Eldeki imkanlar çerçevesinde, tavsiye edilenlerle beraber, asfalt çimentosuna, Saybolt-Furd Viskozite Deneyi yapılmış ve viskozite 294 sn (128 °C'ta) olarak ölçülmüştür. Bu değer geliştirilmiş grafik ve çevrim katsayılarından 641 cSt'lik kinematik viskoziteye karşılık geldiği görülmüştür. Hesaplanan kinematik viskozite ve viskozitenin ölçüldüğü sıcaklık (128 °C) yardımıyla kullanılan bitüm (60/70) için geliştirilen grafikten bu malzeme ile çalışılırken karıştırma sıcaklığının 155-165 °C aralığına düşmesi gerektiği görülmüştür [16].

KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde [14], 60/70 penetrasyonlu bitüm ile yapılacak asfalt betonu karışımlarında, karıştırma öncesinde malzemelerin ısıtılacağı sıcaklık aralıkları agrega için 150-165 °C, bitümü için 145-160 °C olarak verilmiştir. Tablo 5.6 da söz konusu şartnameye göre asfalt çimentosu ve agreganın karıştırma sıcaklıkları verilmiştir.

Bu bilgiler çerçevesinde hem agrega hem de asfalt çimentosu 160 °C'a kadar ısıtılarak karıştırılmışlardır.

5.3.4 Numunelerin Sıkıştırılması

5.3.4.1 Sıkıştırma Yöntemi

Marshall yöntemiyle asfalt betonu hazırlanırken sıkıştırma işleminde Marshall Tokmağı (otomatik veya manuel) kullanılır. Tokmak, 4536 g (10 libre) ağırlığında, 457 mm (18 inç) yükseklikten serbest olarak düşebilen elle veya mekanik olarak hareket verilen, darbe esaslı bir cihazdır.

5.3.4.2 Sıkıştırma Enerjisi Miktarı

Çalışmanın temelini, sıkıştırma enerjisine göre numune boşluk oranı ve agreg gradasyonu değişimlerinin incelenmesi oluşturduğundan, numuneleri sıkıştırma da kullanılan enerji (darbe sayısı) değiştirilmiştir. Enerji değişimi, numunenin sıkıştırılmasında kullanılan Marshall tokmağı darbe sayısının değiştirilmesi ile sağlanmıştır.

Marshall prosedürüne göre asfalt betonunun uygulanacağı yoldan geçecek taşıt trafiği miktarına göre (hizmet ömrü süresince geçmesi beklenen toplam eşdeğer di ngil sayısı), hafif ve orta taşıt trafiğine sahip yollar için numunelerin 50 darbe ile, ağır taşıt trafiğine sahip yollar için 75 darbe ile sıkıştırılması önerilmektedir [14, 17, 18].

Numuneler, mekanik Marshall tokmağıyla 50 ile 110 arasında beşer darbelerle artışlarla değişen darbe sayıları uygulanarak 13 farklı enerji seviyesinde sıkıştırılmıştır. Numune yüksekliğinin standart numunelerden olan farkının (16,5-21,5 mm) getirdiği düşme yüksekliği azalmasına karşı gelen enerji farkı için herhangi bir düzenleme yapılmamıştır. Ancak boşluk oranının darbe sayısına karşı çizilen grafikleri yanında aynı boşluk değerleri darbe sayılarının enerji eşdeğerlerine görede düzenlenmiştir. Bu yeni düzenlemede yükseklik farklarının yarattığı enerji farklılıkları hesaba katılmıştır.

5.3.4.3 Sıkıştırma Sıcaklığı

Numunelerin sıkıştırılma sıcaklığı, bağlayıcının kinematik viskozitesinin $280 \pm 30^{\circ}\text{C}$ olduğu sıcaklık derecesi olarak tanımlanmaktadır [17, 18]. 60/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu için yapılan Saybolt-Furol viskozitesi deneyi sonuçlarının, kaynaklardan [16] elde edilen bilgilerle kinematik viskoziteye çevrilmesi ile bu viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralığının $145-155^{\circ}\text{C}$ olduğu tespit edilmiştir.

Karıştırma sıcaklığının başlangıçta 160°C olduğu numune üretiminde, karışım işleminin sonunda sıcaklığın $120-125^{\circ}\text{C}$ mertebesinde sıcaklıklara düştüğü ölçümlerden gözlenmiştir. Ancak karşılaştırmada kullanılacak İsfalt AŞ tarafından yapılan standart numunelerin üretiminde de kullanılan sıcaklığın düşüşü ile bitümün

kazandı ğı viskozitenin kaybedilmesi için (bit ünün akışkanlaşması için), standartlarda belirtilmesi ne rağmen, karıştırma sıcaklığındaki etüvde (160 °C) numuneler bir saat bekletilmişlerdir. Süre sonunda sıkıştırılmış numune karışımlarının 135-145 °C yüzey sıcaklığına sahip oldukları uzaktan algılamak yapabilmelerle ölçülmüştür. Yeterli sıcaklığın elde edilmesi ile sıkıştırma yapılmıştır.

5.3.5 Numunelerin Kalıplardan Çıkarılması

Aynı sıkıştırma enerjisine sahip üçer numune yukarıda açıklanan şartlarda sıkıştırıldıktan sonra bir gün süre ile soğumaya bırakılmıştır. Çalışmanın istenilen hızda ilerleyebilmesi ve hazırlanan numunelerin oda sıcaklığında soğutulabilmesi için yüksek numune üretimine uygun kalıplardan 10 adet imal edilmiş ve çalışmalarda kullanılmıştır.

Soğuyan numuneler hidrolik numune çıkarıcıları yardımıyla kalıplarından ayrılmış ve üzerinde gradasyon tipi, darbe sayısı ve sıra numaralarının yer aldığı bir etiketleme sistemi ile adlandırılmıştır. Örnek etiket aşağıda verilmiştir.

T2 = Gradasyon tipi

Örnek etiketleme $\Rightarrow$ T2 50 1

50 = Darbe sayısı

1 = Numune sırası

Bu çalışmada kullanılan üç çeşit (standart numune, yüksek numune ve kesilmiş hali) numune Şekil 5.4te verilmiştir.



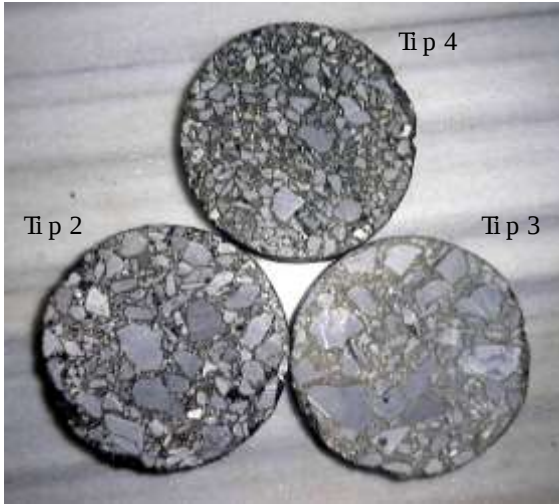
Şekil 5.4 Çalışmada üretilen yüksek numune (ortada), ikiye kesilmiş hali (solda) ve standart yükseklikteki numune

5.3.6 Numunelere Ait Ölçümler

Numunelerdeki boşluk oranlarının hesaplanabilmesi için numunelerin pratik özgül ağırlıklarının bilinmesi gerekir. Bu değerın saptanması ise numunenin hacminin bulunması ndan geçer.

Sıkıştırılmış karışımın hacmi, şeklin düzgün olması durumunda, silindirin hacim bağıntısı yardımıyla hesaplanabilirken düzgün olmayan durumlarda suda yer değiştirme yöntemi ile ölçülebilir.

Çalışmada numune hacimleri, suda yer değiştirme yöntemi kullanılarak bulunmuştur. Bunun için üretilen numunelerin suda ve havada ağırlıklarına ihtiyaç vardır. Tablo 5.7, 5.8 ve 5.9 da üretilen numunelere ait yükseklik ve ağırlık ölçümleri verilmiştir.



Şekil 5.5 Numunelerin kesildikten sonraki yüzey doku örnekleri

Tablo 5.7 Çalışmada Tip 2 gradasyonu kullanılarak hazırlanan numunelere ait ölçümler

Numune Adı	Numune Yüksekliği, mm				Ağırlıklar, g	
	1	2	3	Ortalama	Havada, W_h	Suda, W_w
T2 50 1	85,70	85,65	85,60	85,65	1573,8	907,8
T2 50 2	85,00	85,20	84,80	85,00	1577,9	910,5
T2 50 3	85,05	85,35	85,65	85,35	1576,8	910,9
T2 55 4	85,25	85,00	85,50	85,25	1575,6	908,8
T2 55 5	84,85	84,80	84,90	84,85	1571,9	908,0
T2 55 6	84,80	84,90	84,45	84,72	1576,0	913,4
T2 60 7	85,00	84,95	85,65	85,20	1576,4	910,2
T2 60 8	84,60	84,65	84,80	84,68	1574,5	907,9
T2 60 9	84,15	83,65	84,00	83,93	1570,0	911,5
T2 65 10	83,65	84,20	83,80	83,88	1578,1	916,2
T2 65 11	83,40	83,50	83,85	83,58	1569,1	908,6
T2 65 12	83,55	84,20	83,95	83,90	1575,8	911,4
T2 70 13	82,45	82,00	82,60	82,35	1577,6	923,8
T2 70 14	83,70	82,50	82,60	82,93	1578,2	921,6
T2 70 15	83,15	82,95	82,90	83,00	1576,6	918,8
T2 75 16	83,15	82,85	83,00	83,00	1574,8	914,2
T2 75 17	83,00	83,00	82,80	82,93	1578,7	889,6
T2 75 18	84,00	83,80	83,65	83,82	1578,1	913,8
T2 80 19	81,45	81,75	82,15	81,78	1572,5	921,1
T2 80 20	81,00	81,00	81,35	81,12	1573,8	924,4
T2 80 21	81,55	81,20	81,85	81,53	1572,4	921,1
T2 85 22	80,80	80,55	80,75	80,70	1570,2	924,5
T2 85 23	81,30	80,75	81,15	81,07	1564,7	917,8
T2 85 24	81,25	80,65	80,70	80,87	1569,1	920,9
T2 90 25	81,05	80,75	80,55	80,78	1568,8	922,9
T2 90 26	80,45	80,75	80,85	80,68	1573,4	926,7
T2 90 27	81,00	81,65	81,30	81,32	1574,7	922,9
T2 95 28	82,35	81,85	82,35	82,18	1574,1	923,0
T2 95 29	82,10	82,20	82,45	82,25	1578,7	927,1
T2 95 30	82,20	81,95	82,25	82,13	1574,0	921,2
T2 100 31	81,20	82,15	81,35	81,57	1573,5	924,8
T2 100 32	80,85	82,00	81,55	81,47	1568,0	919,4
T2 100 33	81,25	81,95	81,45	81,55	1570,0	921,0
T2 105 34	80,65	80,25	81,00	80,63	1568,3	926,2
T2 105 35	82,15	82,05	81,45	81,88	1578,4	929,0
T2 105 36	81,45	81,35	82,15	81,65	1572,2	925,7
T2 110 37	81,65	81,00	81,80	81,48	1573,4	929,4
T2 110 38	80,85	80,95	81,00	80,93	1564,9	921,8
T2 110 39	80,65	81,35	81,00	81,00	1573,3	928,6

Tablo 5.8 Çalışmada Tip 3 gradasyonu kullanılarak hazırlanan numunelere ait ölçümler

Numune Adı	Numune Yüksekliği, mm				Ağırlıklar, g	
	1	2	3	Ortalama	Havada, W_h	Suda, W_w
T3 50 40	82,30	82,60	82,25	82,38	1573,8	921,0
T3 50 41	83,05	83,05	82,95	83,02	1572,0	920,4
T3 50 42	83,00	83,45	83,55	83,33	1570,8	918,9
T3 55 43	82,70	82,75	82,95	82,80	1571,4	924,9
T3 55 44	82,85	83,00	82,80	82,88	1570,7	921,0
T3 55 45	83,05	82,80	83,10	82,98	1569,9	920,4
T3 60 46	80,60	81,10	80,55	80,75	1570,2	927,5
T3 60 47	81,20	82,00	81,60	81,60	1570,3	929,4
T3 60 48	82,00	81,35	81,55	81,63	1570,1	925,9
T3 65 49	81,85	81,35	81,05	81,42	1571,1	930,5
T3 65 50	81,65	82,50	82,45	82,20	1572,9	930,8
T3 65 51	81,00	80,90	80,80	80,90	1565,6	928,5
T3 70 52	80,00	80,05	80,35	80,13	1569,3	933,0
T3 70 53	81,15	80,95	81,35	81,15	1568,3	931,8
T3 70 54	80,35	80,75	80,00	80,37	1572,0	933,1
T3 75 55	81,25	81,45	81,60	81,43	1570,0	928,3
T3 75 56	81,35	81,00	81,50	81,28	1572,7	929,6
T3 75 57	81,60	82,20	81,70	81,83	1571,1	930,2
T3 80 58	82,75	82,70	82,50	82,65	1561,3	914,4
T3 80 59	82,00	81,40	81,75	81,72	1573,1	926,6
T3 80 60	82,20	81,50	82,15	81,95	1569,4	927,5
T3 85 61	82,35	82,10	82,00	82,15	1570,4	926,2
T3 85 62	82,30	82,05	82,35	82,23	1573,8	926,7
T3 85 63	82,40	82,60	82,85	82,62	1569,5	920,3
T3 90 64	84,00	84,65	84,05	84,23	1566,3	913,1
T3 90 65	83,75	84,35	84,00	84,03	1566,8	914,6
T3 90 66	83,20	82,80	82,95	82,98	1573,6	923,5
T3 95 67	80,80	81,20	81,00	81,00	1572,4	931,2
T3 95 68	81,05	81,20	81,50	81,25	1574,0	931,0
T3 95 69	82,45	82,25	83,35	82,68	1571,4	928,5
T3 100 70	79,75	79,35	80,45	79,85	1563,0	931,4
T3 100 71	80,05	79,55	80,20	79,93	1566,8	933,1
T3 100 72	80,90	80,60	80,85	80,78	1568,1	933,7
T3 105 73	79,15	79,65	79,75	79,52	1569,4	937,1
T3 105 74	79,15	79,10	79,00	79,08	1566,2	936,6
T3 105 75	80,05	79,55	80,50	80,03	1570,3	935,5
T3 110 76	80,55	80,10	80,55	80,40	1563,7	932,4
T3 110 77	80,05	80,00	79,40	79,82	1568,4	935,6
T3 110 78	79,70	80,35	79,45	79,83	1569,6	937,6

Tablo 5.9 Çalışmada Tip 4 gradasyonu kullanılarak hazırlanan numunelere ait ölçümler

Numune Adı	Numune Yüksekliği, mm				Ağırlıklar, g	
	1	2	3	Ortalama	Havada, W_h	Suda, W_s
T4 50 79	83,20	83,00	83,60	83,27	1577,2	917,5
T4 50 80	84,15	83,80	84,25	84,07	1577,2	911,9
T4 50 81	83,75	84,15	83,65	83,85	1577,9	912,4
T4 55 82	82,80	83,25	82,70	82,92	1579,8	920,1
T4 55 83	84,25	83,65	84,35	84,08	1580,1	917,7
T4 55 84	83,00	83,05	83,25	83,10	1579,9	921,9
T4 60 85	81,90	82,00	82,10	82,00	1572,6	918,3
T4 60 86	81,75	81,65	82,20	81,87	1577,1	925,5
T4 60 87	82,30	82,45	82,00	82,25	1579,3	925,3
T4 65 88	82,60	82,35	82,00	82,32	1576,1	924,1
T4 65 89	82,35	81,90	81,60	81,95	1580,0	928,3
T4 65 90	81,35	82,90	81,70	81,98	1574,3	925,0
T4 70 91	82,00	81,55	82,15	81,90	1578,2	926,6
T4 70 92	81,75	82,35	82,50	82,20	1580,9	928,1
T4 70 93	81,75	82,80	81,95	82,17	1575,9	925,4
T4 75 94	81,35	80,90	81,35	81,20	1575,7	928,2
T4 75 95	80,75	81,60	80,85	81,07	1575,4	927,4
T4 75 96	81,20	81,95	81,15	81,43	1578,5	928,9
T4 80 97	81,35	81,05	81,40	81,27	1579,6	934,9
T4 80 98	81,15	81,45	81,10	81,23	1574,9	929,2
T4 80 99	81,75	81,60	82,00	81,78	1574,6	928,1
T4 85 100	81,20	82,05	81,75	81,67	1577,8	929,2
T4 85 101	80,55	81,00	80,70	80,75	1575,7	928,7
T4 85 102	81,00	80,25	81,00	80,75	1576,0	930,4
T4 90 103	81,10	80,65	81,35	81,03	1576,7	928,2
T4 90 104	81,00	81,20	81,90	81,37	1577,1	929,8
T4 90 105	82,20	80,45	81,25	81,30	1574,7	930,1
T4 95 106	81,60	81,15	81,10	81,28	1575,6	926,6
T4 95 107	81,00	80,85	81,55	81,13	1575,1	928,7
T4 95 108	80,55	81,00	80,85	80,80	1578,1	931,3
T4 100 109	80,00	80,35	79,85	80,07	1565,5	923,3
T4 100 110	81,00	80,85	80,90	80,92	1577,7	930,3
T4 100 111	80,60	80,55	80,60	80,58	1574,9	929,7
T4 105 112	80,15	80,85	80,20	80,40	1571,9	927,2
T4 105 113	81,75	83,00	81,15	81,97	1590,8	936,6
T4 105 114	80,65	80,35	81,20	80,73	1573,8	926,3
T4 110 115	81,15	81,80	80,75	81,23	1573,5	926,5
T4 110 116	80,65	80,40	80,15	80,40	1569,6	927,4
T4 110 117	79,45	79,75	80,25	79,82	1558,1	920,8

5.4 Boşluk Oranındaki Değişimlerin İncelenmesi

Bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanırken, sıkıştırılmış numunedeki boşluk oranı sıkıştırma enerjisi miktarından etkilenir. Sıkıştırma işleminde etken olan diğer faktörler ise agrega şekli, yüzey dokusu, absorpsiyon özelliği, sağlanılığı, köşelilik durumu ve gradasyonu; gradasyondaki kum filler ve iri agrega miktarı; bitümün viskozitesi ve karışımındaki miktarı; tabaka kalınlığı (laboratuvar ortamında numune yüksekliği); karışımın sıcaklığı ve bu sıcaklığa etkiyen rüzgar, hava sıcaklığı, nem durumu (üzerine asfalt betonu serilecek tabakamın) gibi hava koşulları, vb. olarak sıralanabilir. Ayrıntılı şekilde üçüncü bölümde verilmişti.

Bu çalışmanın tamamında aynı malzeme, miktar, gradasyon, kalınlık ve koşullar kullanıldığından yukarıda sözü edilen değişkenler, boşluk oranını etkileyen birer parametre olmaktan çıkarılmıştır. Böylelikle; sıkıştırma enerjisi miktarı, boşluk oranını etkileyen tek değişken olarak alınmıştır.

5.4.1 Numunelerin Boşluk Oranlarının Hesaplanması

Numunelerinin boşluk hacminin hesaplanabilmesi için maksimum teorik birim ağırlık ve pratik birim ağırlığın bilinmesi gerekir.

Bu iki değer farklı kaynaklarda farklı sembollerle gösterilmektedir. Bk. Kaynaklar: 2, 17, 21. Ancak temelde, bitümlü karışımın, boşluksuz halde sahip olduğu birim ağırlıktan boşluklu halde sahip olduğu birim ağırlığın farkının, boşluksuz birim ağırlığa oranıdır; yüzde olarak ifade edilir, V ile gösterilir. Denklem 5.1, boşluk oranının hesaplanabilmesi için verilmiştir.

$$V = 100 \cdot \left(\frac{D_T - D_P}{D_T} \right) \dots\dots\dots (5.1)$$

Denklem 5.1’de,

D_T = Karışımın maksimum teorik, boşluksuz, birim ağırlığı⁽¹⁾ veya G_{mm} ile de gösterilir),

D_p = Sıkıştırılmış karışımın pratik boşluklu, birim ağırlığı (d veya G_{mb} ile de gösterilir),

V = Sıkıştırılmış karışımındaki boşluk oranı (boşluk hacmi yüzdesi) (V_h veya V_a ile de gösterilir)

göstermektedir.

Denklem 5.1'deki D_p değeri sıkıştırılmış karışımın havadaki ağırlığının, suda yer değiştirme yolu ile bulunan hacmine oranıdır. Pratik özgül ağırlığın bulunmasında; numunenin hava ve suda ağırlığı tartılır, farkları numune hacmini verir. Havadaki ağırlığın bu hacme bölünmesi ile pratik birim ağırlık bulunur. Denklem 5.2, pratik birim ağırlığın bulunmasına yöneliktir.

$$D_p = \frac{W_a}{W_a - W_w} \dots\dots\dots(5.2)$$

Denklem 5.2 de;

D_p = Sıkıştırılmış karışımın pratik birim ağırlığı,

W_a = Numunenin havadaki ağırlığı, g

W_w = Numunenin sudaki ağırlığı, g

göstermektedir.

Ancak D_T değerinin saptanma yöntemi, farklı kaynaklarda farklı verilmektedir. Bk. Kaynaklar: 2, 17, 21, 22

Asfalt Enstitüsü ve ASTM'e göre maksimum teorik özgül ağırlık (birim ağırlık) değeri deney yolu ile bulunur [21, 22]. Hesabı mineral fillere uygulanan özgül ağırlık deneyi gibidir. Kısaca; hazırlanan karışımın, en büyük agregatane boyutuna göre tanımlanmış ağırlıkta alınan numune, yumuşatılıp tanelenerek soğutulur. Tanımlanmış uygun bir kap içerisine konup üzerine saf su ilave edilir, vakum uygulanarak havası alınır. Kabin kıyaslama seviyesine kadar su doldurulur. Kabin su ile dolu ve boş ağırlıkları bilinmektedir. Bu ölçümlerden hesaplanan numunenin boşluksuz hacminin, numunenin ağırlığına oranlanmasından teorik birim ağırlık bulunmuş olur.

TS 3720 de ise maksimum teorik özgül ağırlık karışımındaki agrega sınıflarının ve bitümün özgül ağırlıkları ile karışımı içerisindeki ağırlıkça katılım yüzdelerinden hesaplanmaktadır.

$$D_T = \frac{100 + W_a}{\frac{Kaba\%}{G_k} + \frac{İnce\%}{G_i} + \frac{Filler\%}{G_f} + \frac{W_a}{G_b}} \dots\dots\dots(5.3)$$

Denkle m 5.3 te;

D_T = Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı,

W_a = Bitüm yüzdesi ni (kuru agregaya göre, ağırlıkça),

G_b = Bitümün özgül ağırlığı,

$Kaba\%$ = Agreg a karışımındaki kaba agrega oranını (agrega karışımının toplam 100 birimi kabul ediliyor),

$İnce\%$ = Agreg a karışımındaki ince agrega oranını,

$Filler\%$ = Agreg a karışımındaki filler oranını,

G_k = Kaba agreganın özgül ağırlığı,

G_i = İnce agreganın özgül ağırlığı,

G_f = Fillerin özgül ağırlığı,

göstermektedir.

Bu tez çalışmasında agrega karışımını oluşturan iri agrega, ince agrega ve filler malzemelerinin hacim özgül ağırlıkları ile görünür (zahiri) özgül ağırlıkları deney yolu ile bulunmuştur (Bk. Tablo 5.3). Bu iki özgül ağırlıktan agregaların karışım katılım oranlarını da kullanarak karışımın hacim özgül ağırlığı ve görünür özgül ağırlığı bulunmuştur. Agreg a kısımlarının her birinin hacim ve görünür özgül ağırlıklarından agrega karışımının hacim ve görünür özgül ağırlıklarının bulunmasında kullanılan bağıntılar Denkle m 5.4 ve 5.5 olarak verilmiştir.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_{1b}} + \frac{P_2}{G_{2b}} + \frac{P_3}{G_{3b}}} \dots\dots\dots(5.4)$$

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_{1a}} + \frac{P_2}{G_{2a}} + \frac{P_3}{G_{3a}}} \dots\dots\dots(5.5)$$

Denklemlerde;

P_1, P_2, P_3 = Agregat karışımındaki agregat kısımlarının ağırlıkça yüzdeleri ni,

$G_{sb}, G_b, G_{sb}, G_{sb}$ = Agregat karışımının ve kısımlarının hacim özgül ağırlıkları ni,

$G_{sa}, G_a, G_{sa}, G_{sa}$ = Agregat karışımının ve kısımlarının görünür özgül ağırlıkları ni,

göstermektedir.

Karışımın hacim ve görünür özgül ağırlıklarının aritmetik ortalaması efektif özgül ağırlık olarak alınmıştır.

$$G_{se} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \dots\dots\dots(5.6)$$

Denklemlerde;

G_e = Agregat karışımının efektif özgül ağırlığı ni,

G_b = Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı ni,

G_a = Agregat karışımının görünür özgül ağırlığı ni,

göstermektedir.

Bu hesaplamaların sonuçları Tablo 5.10 da verilmiştir. Bu yöntem gradasyonları ve optimum bitüm oranı kullanılan İsfalt AŞ tarafından numunelerin üretiminde kullanılan yöntemle aynıdır.

Denklemler 5.7, maksimum teorik birim ağırlık değerinin hesaplandığı denklemi göstermektedir.

$$D_T = \frac{100 + \frac{P_b}{G_{se}}}{\frac{100}{G_b} + \frac{P_b}{G_b}} \dots\dots\dots(5.7)$$

Denkle m 5. 7 de;

D_T = Bitümlü karışımın maksimum teorik birim ağırlığı,

P_b = Karışımındaki bitümün ağırlıkça yüzdesini (agrega miktarının ağırlıkça yüzdesi olarak),

G_b = Bitümün özgül ağırlığı,

G_{se} = Agregakarışımının efektif özgül ağırlığı,

tensil etmektedir.

5. 4 2 Hesaplamaların Akış Sırası

Hazırlanan numunelerin pratik birim ağırlıkları, Denklem 5. 2 kullanılarak, Tablo 5. 7, 5. 8 ve 5. 9 da verilen havada ve suda ölçülen ağırlıklar yardımıyla hesaplanmıştır.

Numunelere ait her bir gradasyon için Tablo 5.3'te verilen agrega kısımlarına ait hacim özgül ağırlığı (kuru) ve görünür özgül ağırlıklar ile Tablo 5. 10'da verilen agrega kısımlarının karışımı içerisindeki oranları kullanılarak önce agregakarışımının hacim özgül ağırlığı ve görünür özgül ağırlığı Denklem 5. 4 ve 5. 5 kullanılarak hesaplanmış, ardından bu değerlerden Denklem 5. 6 kullanılarak efektif özgül ağırlık bulunmuştur.

Her bir gradasyona katılan optimum bitüm oranı Tablo 5.5'ten, bitümün özgül ağırlığı da Tablo 5. 4'ten alınarak önceki aşamada hesaplanan efektif özgül ağırlığın da kullanılmasıyla Denklem 5. 7 yardımıyla bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı bulunmuştur. Sonuç olarak; hesaplanan pratik birim ağırlık ve maksimum teorik birim ağırlık yardımıyla Denklem 5. 1 kullanılarak numunelere ait boşluk oranları bulunmuştur. Her bir gradasyon için bulunan bu değerler Tablo 5. 11, 5. 12 ve 5. 13'te verilmiştir.

Tablo 5.10 Agregada gradasyonları için agregada karışımının özgül ağırlıklarının ve bitümlü karışımın maksimum teorik özgül ağırlığının hesaplanması

Gradasyon	Agregada	Oran, %	Agregada Hacı m Özgül Ağırlıkları			Agregada Görünür Özgül Ağırlıkları			Agregada Karışımının Özgül Ağırlıkları			Karışım
			Kaba	İnce	Filler	Kaba	İnce	Filler	G_{sb}	G_{sa}	G_{sf}	
TİP 2	Kaba	51,1	2,682	2,646	3,058	2,704	2,741	3,058	2,691	2,744	2,718	2,518
	İnce	43,1	2,686	2,657	3,175	2,709	2,747	3,175				
	Filler	5,8	2,684	2,652	3,117	2,707	2,744	3,117				
TİP 3	Kaba	53,1	2,688	2,618	3,058	2,714	2,744	3,058	2,683	2,748	2,716	2,531
	İnce	41,1	2,684	2,639	3,175	2,710	2,754	3,175				
	Filler	5,8	2,686	2,629	3,117	2,712	2,749	3,117				
TİP 4	Kaba	32,2	2,687	2,610	3,058	2,711	2,745	3,058	2,685	2,773	2,729	2,525
	İnce	59,6	2,681	2,660	3,175	2,705	2,789	3,175				
	Filler	8,2	2,684	2,635	3,117	2,708	2,767	3,117				

G_{sb} = Hacı m özgül ağırlığı (bulk specific gravity)

G_{sa} = Görünür (zahiri) özgül ağırlık (apparent specific gravity)

G_{se} = Efektif özgül ağırlık (effective specific gravity)

D_r = Karışımın maksimum teorik özgül ağırlığı (theoretical maximum specific gravity)

Tablo 5.11 Tip 2 gradasyonu numune boşluk oranları

Numune Adı	Yükseklik, mm	Havada Ağırlık (W) g	Suda Ağırlık (W) g	Numune Hacmi cm ³	D _s	D _t	V _i %
T2 50 1	85,65	1573,8	907,8	666,0	2,363	2,518	6,15
T2 50 2	85,00	1577,9	910,5	667,4	2,364	2,518	6,11
T2 50 3	85,35	1576,8	910,9	665,9	2,368	2,518	5,96
T2 55 4	85,25	1575,6	908,8	666,8	2,363	2,518	6,16
T2 55 5	84,85	1571,9	908,0	663,9	2,368	2,518	5,97
T2 55 6	84,72	1576,0	913,4	662,6	2,379	2,518	5,54
T2 60 7	85,20	1576,4	910,2	666,2	2,366	2,518	6,03
T2 60 8	84,68	1574,5	907,9	666,6	2,362	2,518	6,20
T2 60 9	83,93	1570,0	911,5	658,5	2,384	2,518	5,31
T2 65 10	83,88	1578,1	916,2	661,9	2,384	2,518	5,31
T2 65 11	83,58	1569,1	908,6	660,5	2,376	2,518	5,65
T2 65 12	83,90	1575,8	911,4	664,4	2,372	2,518	5,81
T2 70 13	82,35	1577,6	923,8	653,8	2,413	2,518	4,17
T2 70 14	82,93	1578,2	921,6	656,6	2,404	2,518	4,54
T2 70 15	83,00	1576,6	918,8	657,8	2,397	2,518	4,81
T2 75 16	83,00	1574,8	918,2	656,6	2,398	2,518	4,75
T2 75 17	82,93	1578,7	921,5	657,2	2,402	2,518	4,60
T2 75 18	83,82	1578,1	922,8	655,3	2,408	2,518	4,36
T2 80 19	81,78	1572,5	921,1	651,4	2,414	2,518	4,13
T2 80 20	81,12	1573,8	924,4	649,4	2,423	2,518	3,75
T2 80 21	81,53	1572,4	921,1	651,3	2,414	2,518	4,12
T2 85 22	80,70	1570,2	924,5	645,7	2,432	2,518	3,42
T2 85 23	81,07	1564,7	917,8	646,9	2,419	2,518	3,94
T2 85 24	80,87	1569,1	920,9	648,2	2,421	2,518	3,86
T2 90 25	80,78	1568,8	922,9	645,9	2,429	2,518	3,54
T2 90 26	80,68	1573,4	926,7	646,7	2,433	2,518	3,38
T2 90 27	81,32	1574,7	922,9	651,8	2,416	2,518	4,05
T2 95 28	82,18	1574,1	923,0	651,1	2,418	2,518	3,99
T2 95 29	82,25	1578,7	927,1	651,6	2,423	2,518	3,78
T2 95 30	82,13	1574,0	921,2	652,8	2,411	2,518	4,24
T2 100 31	81,57	1573,5	924,8	648,7	2,426	2,518	3,67
T2 100 32	81,47	1568,0	919,4	648,6	2,418	2,518	3,99
T2 100 33	81,55	1570,0	921,0	649,0	2,419	2,518	3,93
T2 105 34	80,63	1568,3	926,2	642,1	2,442	2,518	3,00
T2 105 35	81,88	1578,4	929,0	649,4	2,431	2,518	3,47
T2 105 36	81,65	1572,2	925,7	646,5	2,432	2,518	3,42
T2 110 37	81,48	1573,4	929,4	644,0	2,443	2,518	2,97
T2 110 38	80,93	1564,9	921,8	643,1	2,433	2,518	3,36
T2 110 39	81,00	1573,3	928,6	644,7	2,440	2,518	3,08

Tablo 5.12 Tip 3 gradasyonu numune boşluk oranları

Numune Adı	Yükseklik mm	Havada Ağırlık (W _h) g	Suda Ağırlık (W _w) g	Numune Hacmi, cm ³	D _p	D _r	V _i %
T3 50 40	82,38	1573,8	921,0	652,8	2,411	2,531	4,75
T3 50 41	83,02	1572,0	920,4	651,6	2,413	2,531	4,68
T3 50 42	83,33	1570,8	918,9	651,9	2,410	2,531	4,80
T3 55 43	82,80	1571,4	924,9	646,5	2,431	2,531	3,97
T3 55 44	82,88	1570,7	921,0	649,7	2,418	2,531	4,48
T3 55 45	82,98	1569,9	920,4	649,5	2,417	2,531	4,50
T3 60 46	80,75	1570,2	927,5	642,7	2,443	2,531	3,47
T3 60 47	81,60	1570,3	929,4	640,9	2,450	2,531	3,19
T3 60 48	81,63	1570,1	925,9	644,2	2,437	2,531	3,70
T3 65 49	81,42	1571,1	930,5	640,6	2,453	2,531	3,10
T3 65 50	82,20	1572,9	930,8	642,1	2,450	2,531	3,22
T3 65 51	80,90	1565,6	928,5	637,1	2,457	2,531	2,91
T3 70 52	80,13	1569,3	933,0	636,3	2,466	2,531	2,56
T3 70 53	81,15	1568,3	931,8	636,5	2,464	2,531	2,65
T3 70 54	80,37	1572,0	933,1	638,9	2,460	2,531	2,79
T3 75 55	81,43	1570,0	928,3	641,7	2,447	2,531	3,33
T3 75 56	81,28	1572,7	929,6	643,1	2,445	2,531	3,38
T3 75 57	81,83	1571,1	930,2	640,9	2,451	2,531	3,15
T3 80 58	82,65	1561,3	914,4	646,9	2,414	2,531	4,64
T3 80 59	81,72	1573,1	926,6	646,5	2,433	2,531	3,86
T3 80 60	81,95	1569,4	927,5	641,9	2,445	2,531	3,40
T3 85 61	82,15	1570,4	926,2	644,2	2,438	2,531	3,68
T3 85 62	82,23	1573,8	926,7	647,1	2,432	2,531	3,91
T3 85 63	82,62	1569,5	920,3	649,2	2,418	2,531	4,48
T3 90 64	84,23	1566,3	913,1	653,2	2,398	2,531	5,26
T3 90 65	84,03	1566,8	914,6	652,2	2,402	2,531	5,08
T3 90 66	82,98	1573,6	923,5	650,1	2,421	2,531	4,36
T3 95 67	81,00	1572,4	931,2	641,2	2,452	2,531	3,11
T3 95 68	81,25	1574,0	931,0	643,0	2,448	2,531	3,28
T3 95 69	82,68	1571,4	928,5	642,9	2,444	2,531	3,43
T3 100 70	79,85	1563,0	931,4	631,6	2,475	2,531	2,23
T3 100 71	79,93	1566,8	933,1	633,7	2,472	2,531	2,31
T3 100 72	80,78	1568,1	933,7	634,4	2,472	2,531	2,34
T3 105 73	79,52	1569,4	937,1	632,3	2,482	2,531	1,93
T3 105 74	79,08	1566,2	936,6	629,6	2,488	2,531	1,71
T3 105 75	80,03	1570,3	935,5	634,8	2,474	2,531	2,26
T3 110 76	80,40	1563,7	932,4	631,3	2,477	2,531	2,14
T3 110 77	79,82	1568,4	935,6	632,8	2,479	2,531	2,07
T3 110 78	79,83	1569,6	937,6	632,0	2,484	2,531	1,87

Tablo 5.13 Tip 4 gradasyonu numune boşluk oranları

Nu mune Adı	Yükseklik mm	Havada Ağırlık (W _h) g	Suda Ağırlık (W _s) g	Nu mune Hacmi, cm ³	D _p	D _t	V %
T4 50 79	83,27	1577,2	917,5	659,7	2,391	2,525	5,32
T4 50 80	84,07	1577,2	911,9	665,3	2,371	2,525	6,11
T4 50 81	83,85	1577,9	912,4	665,5	2,371	2,525	6,10
T4 55 82	82,92	1579,8	920,1	659,7	2,395	2,525	5,16
T4 55 83	84,08	1580,1	917,7	662,4	2,385	2,525	5,53
T4 55 84	83,10	1579,9	921,9	658,0	2,401	2,525	4,91
T4 60 85	82,00	1572,6	918,3	654,3	2,403	2,525	4,81
T4 60 86	81,87	1577,1	925,5	651,6	2,420	2,525	4,14
T4 60 87	82,25	1579,3	925,3	654,0	2,415	2,525	4,36
T4 65 88	82,32	1576,1	924,1	652,0	2,417	2,525	4,26
T4 65 89	81,95	1580,0	928,3	651,7	2,424	2,525	3,98
T4 65 90	81,98	1574,3	925,0	649,3	2,425	2,525	3,98
T4 70 91	81,90	1578,2	926,6	651,6	2,422	2,525	4,08
T4 70 92	82,20	1580,9	928,1	652,8	2,422	2,525	4,09
T4 70 93	82,17	1575,9	925,4	650,5	2,423	2,525	4,06
T4 75 94	81,20	1575,7	928,2	647,5	2,434	2,525	3,62
T4 75 95	81,07	1575,4	927,4	648,0	2,431	2,525	3,72
T4 75 96	81,43	1578,5	928,9	649,6	2,430	2,525	3,76
T4 80 97	81,27	1579,6	934,9	644,7	2,450	2,525	2,97
T4 80 98	81,23	1574,9	929,2	645,7	2,439	2,525	3,40
T4 80 99	81,78	1574,6	928,1	646,5	2,436	2,525	3,54
T4 85 100	81,67	1577,8	929,2	648,6	2,433	2,525	3,66
T4 85 101	80,75	1575,7	928,7	647,0	2,435	2,525	3,55
T4 85 102	80,75	1576,0	930,4	645,6	2,441	2,525	3,32
T4 90 103	81,03	1576,7	928,2	648,5	2,431	2,525	3,71
T4 90 104	81,37	1577,1	929,8	647,3	2,436	2,525	3,51
T4 90 105	81,30	1574,7	930,1	644,6	2,443	2,525	3,25
T4 95 106	81,28	1575,6	926,6	649,0	2,428	2,525	3,85
T4 95 107	81,13	1575,1	928,7	646,4	2,437	2,525	3,50
T4 95 108	80,80	1578,1	931,3	646,8	2,440	2,525	3,37
T4 100 109	80,07	1565,5	923,3	642,2	2,438	2,525	3,46
T4 100 110	80,92	1577,7	930,3	647,4	2,437	2,525	3,49
T4 100 111	80,58	1574,9	929,7	645,2	2,441	2,525	3,33
T4 105 112	80,40	1571,9	927,2	644,7	2,438	2,525	3,44
T4 105 113	81,97	1590,8	936,6	654,2	2,432	2,525	3,70
T4 105 114	80,73	1573,8	926,3	647,5	2,431	2,525	3,74
T4 110 115	81,23	1573,5	926,5	647,0	2,432	2,525	3,68
T4 110 116	80,40	1569,6	927,4	642,2	2,444	2,525	3,20
T4 110 117	79,82	1558,1	920,8	637,3	2,445	2,525	3,17

Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8 de sıkıştırılmış numunelere ait hesaplanan boşluk hacimleri'nin numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan Marshall tokmağı darbe sayılarına karşı grafikleri verilmiştir. Bu şekillerde tokmağın düşme yüksekliği'nin (457 mm) standart olmayan yüksek numune üretiminden kaynaklanan azalma hesabına katılmamıştır.

Şekil 5.9, 5.10, 5.11'de ise darbe sayıları, sıkıştırılmış numune yüksekliği fazlalığından kaynaklanan düşme yüksekliği kayıpları da dikkate alınarak potansiyel enerjiye çevrilmiştir. Her bir darbe sayısı, SI Birim Sistemi'nde, sıkıştırma da aktif rol oynayacak joule [$E = G h = m g h$ (kg m/s².m = N m = joule)] cinsinden enerjiye çevrilmiştir.

Şekillerde, düşey ekseninde boşluk oranları; yatay ekseninde sıkıştırma da kullanılan darbe sayıları (sıkıştırma enerjisi) olmak üzere veriler noktalanmış, verilerin gidişatına uygun regresyon eğrileri geçirilmiş, eğriye ait denklem ve veriler arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları verilmiştir. Şekillerdeki kesikli, yatay çizgiler KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde ilgili kaplama tabakası için istenen boşluk oranı alan sınırlarını ifade etmektedir. Ayrıca, optimum bitüm oranları ve gradasyonları kullanılan standart yükseklikteki numunelerin sıkıştırıldıkları darbe sayısındaki (75) boşluk oranları ile çalışılan yükseklikteki numunelere ait aynı darbe sayısındaki boşluk oranları da şekillerde belirtilmiştir.

Numunelerin boşluk analizlerine ait daha ayrıntılı bilgi içeren tablolar ise Ekler Bölümünde verilmiştir.

Şekil 5.6'te Bİnder Tabakası Tip 3 Gradasyonu'na uygun olarak hazırlanmış numunelerin boşluk oranlarının darbe sayılarına karşı değişimleri görülmektedir.

Bİnder Tip 3 gradasyonu, en büyük agregatane boyutu 25 mm ve agregat karışımındaki iri agregat miktarı %33,1 olan bir karışımdır.

Genel olarak beklenen davranış enerjinin artırılması sonucunda düzgün olarak boşluk oranında bir azalma görülmesidir. Ancak şekilde; boşluk oranının, darbe sayısının artırılması karşısında eğilimi; önce "azalma", sonra "artma", en son kısım da ise yeniden ancak önceki ne göre daha fazla olan "azalma" şeklinde olmaktadır. Bu davranış numunelerdeki agregatın, enerji etkisi ile sıkıştığını, tanelerin kırılması ile agregatlar arası boşluğun arttığını ve son kısım da ise daha da artırılan enerji, kırılan

agregaların ufalanması ile karışımın en az boşluklu durum aldığı şeklinde yorumlanmıştır.

Şekil 5.7 de Aşınma Tabakası Tip 2 Gradasyonu'na uygun olarak hazırlanmış numunelerin boşluk oranlarının darbe sayılarına karşı değişimleri görülmektedir.

Kullanılan agrega gradasyonu, en büyük agrega tane boyutu 19 mm ve agrega karışımındaki iri agrega miktarı %51,1 olan bir karışımdır.

Şekilde boşluk oranının darbe sayısının artırılması ile düzgün olmasa bile bir azalış gösterdiği ve Şekil 5.6 daki sıkışma, gevşeme ve tekrar sıkışma davranışını daha yumuşak bir eğilimde yansıttığı görülmektedir.

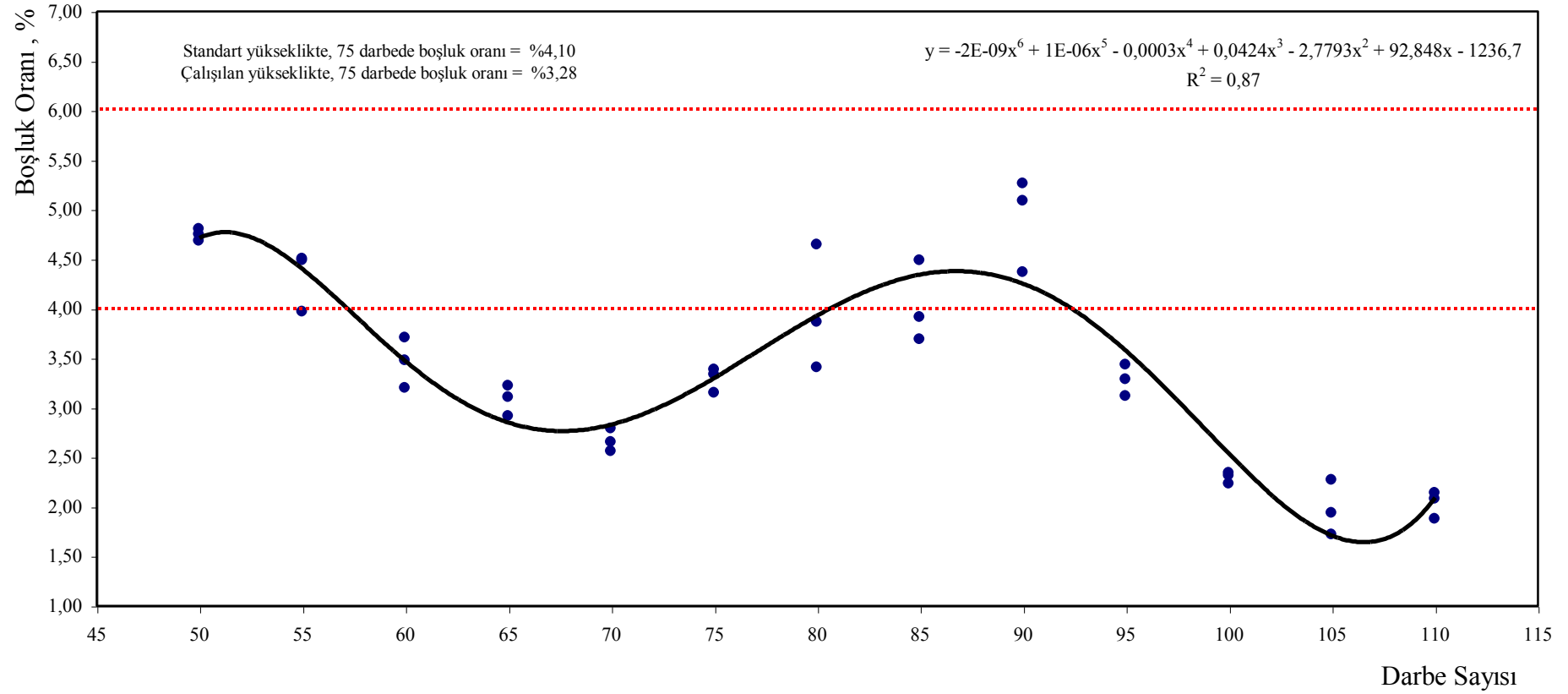
Şekil 5.8 de Aşınma Tabakası Tip 4 Gradasyonu'na uygun olarak hazırlanmış numunelerin boşluk oranlarının darbe sayılarına karşı değişimleri görülmektedir.

Kullanılan agrega gradasyonu, en büyük tane boyutu 12,5 mm olan ve agrega karışımındaki iri agrega miktarı %22,2 olan bir karışımdır.

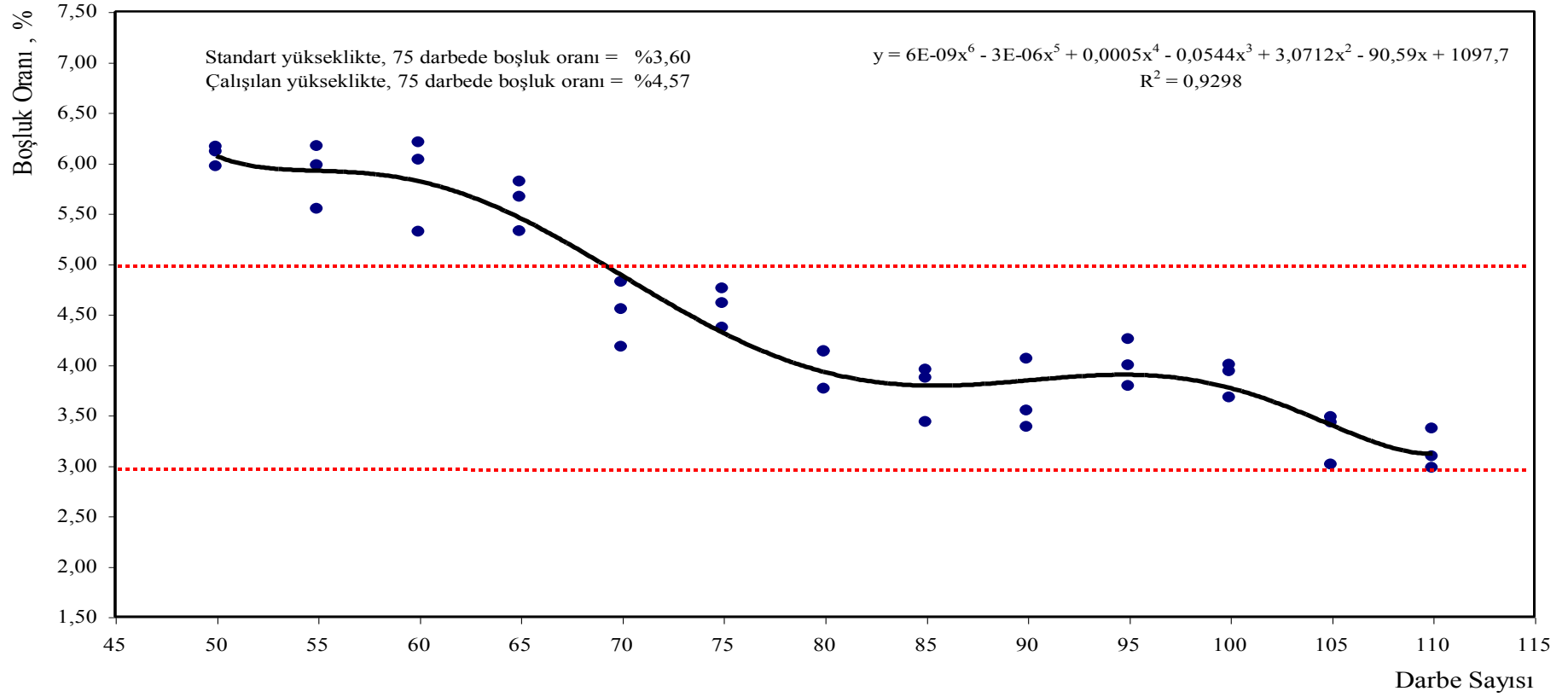
Şekilde boşluk oranının, darbe sayısının arttırılması ile düzgün ve eğrisel olarak azaldığı, Tip 4'e göre daha iri gradasyonlarda (Tip 2 ve Tip 3) görülen sıkışma-gevşeme-sıkışma dalgalanmasını hemen hiç göstermediği, ayrıca belirli bir değerden sonra darbe sayısının arttırılmasının sıkıştırma etkisi yapmadığı görülmektedir.

Öte yandan, düşme yüksekliği kayıplarının hesaba katıldığı Şekil 5.6, 5.7, 5.8 ile kayıpların dikkate alındığı Şekil 5.9, 5.10, 5.11 karşılaştırıldığında; dikkate değer bir farkın olmadığı ilişkisinin yine aynı regresyon denklemi ve korelasyon katsayısı ile gösterilebildiği sonucuna varılmıştır.

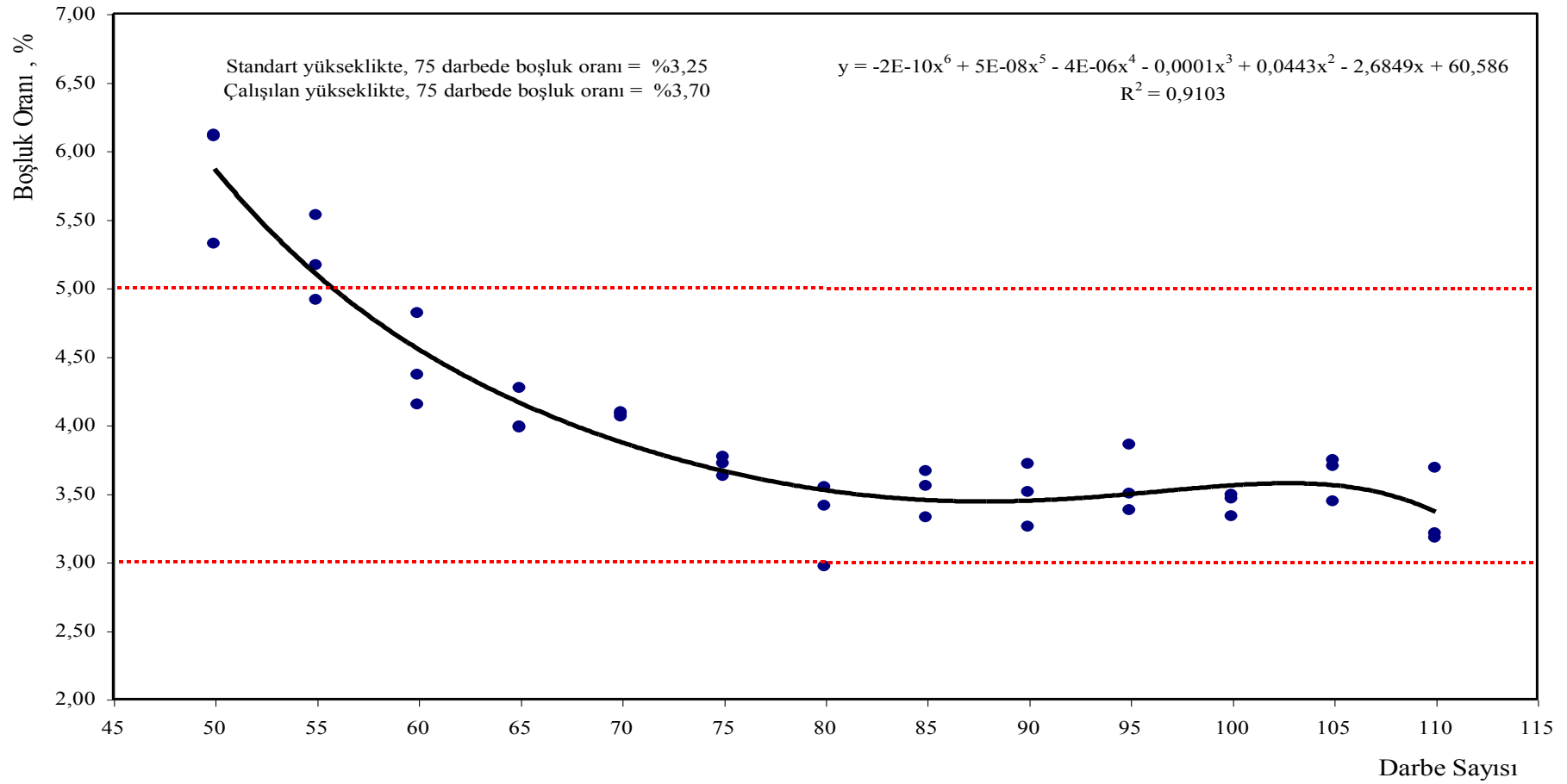
Elde edilen sonuçların ışığında; sıkıştırma enerjisi artışının genel olarak boşluk oranını azaltıcı etki yaptığı, ancak bu azalma eğiliminin agrega gradasyonuna bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Boşluk oranı üzerinde agrega gradasyonunun etkinliği kesin olmakla beraber bunun, agrega karışımındaki iri agrega oranından mı yoksa en büyük agrega tane boyutundan mı daha fazla etkilendiği açık değildir, araştırılmalıdır.



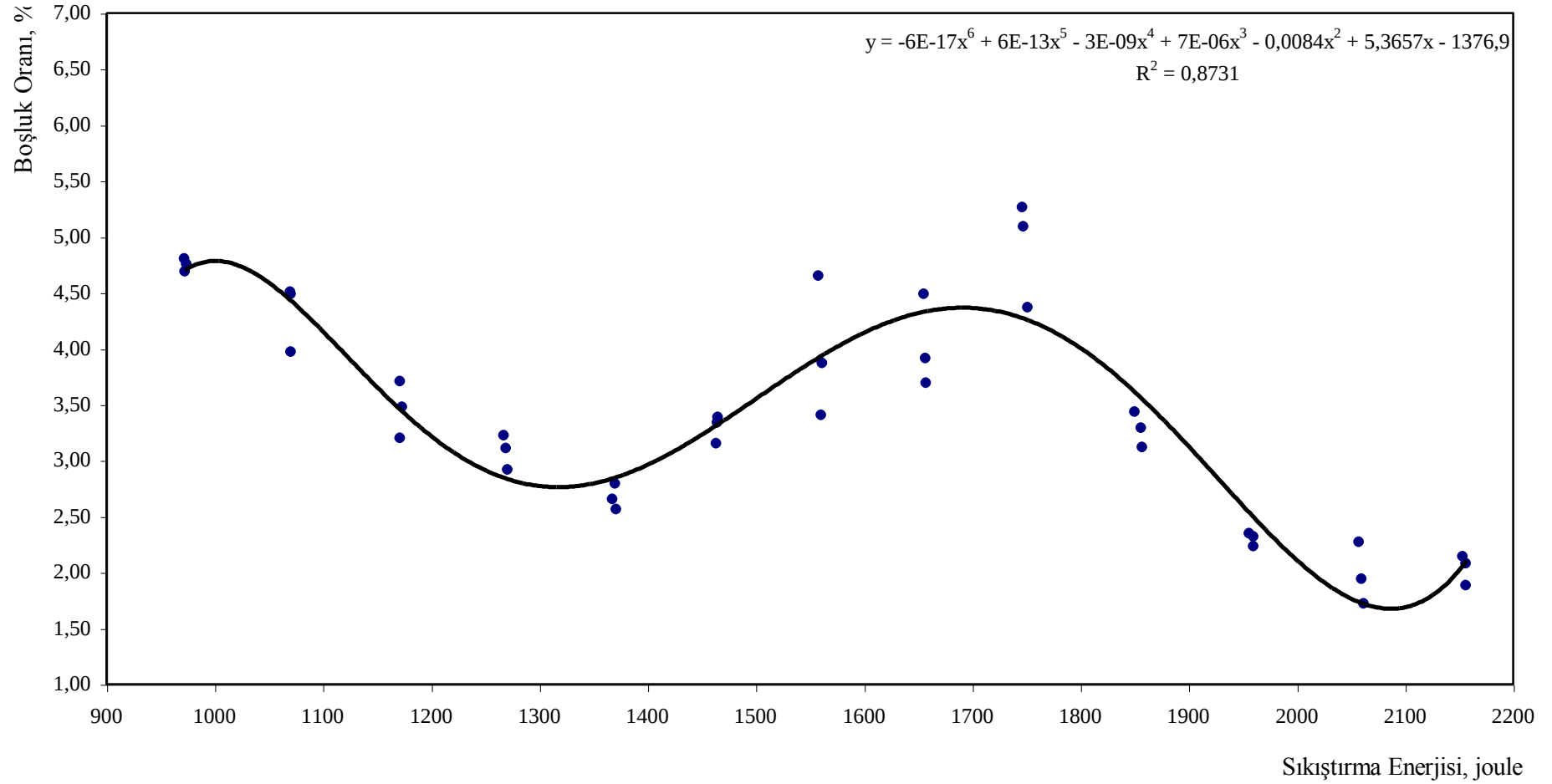
Şekil 5.6 Binder tabakası Tip 3 gradasyonu numunelerinin sıkıştırmadaki darbe sayısı-boşluk oranı verilerinin değişimi



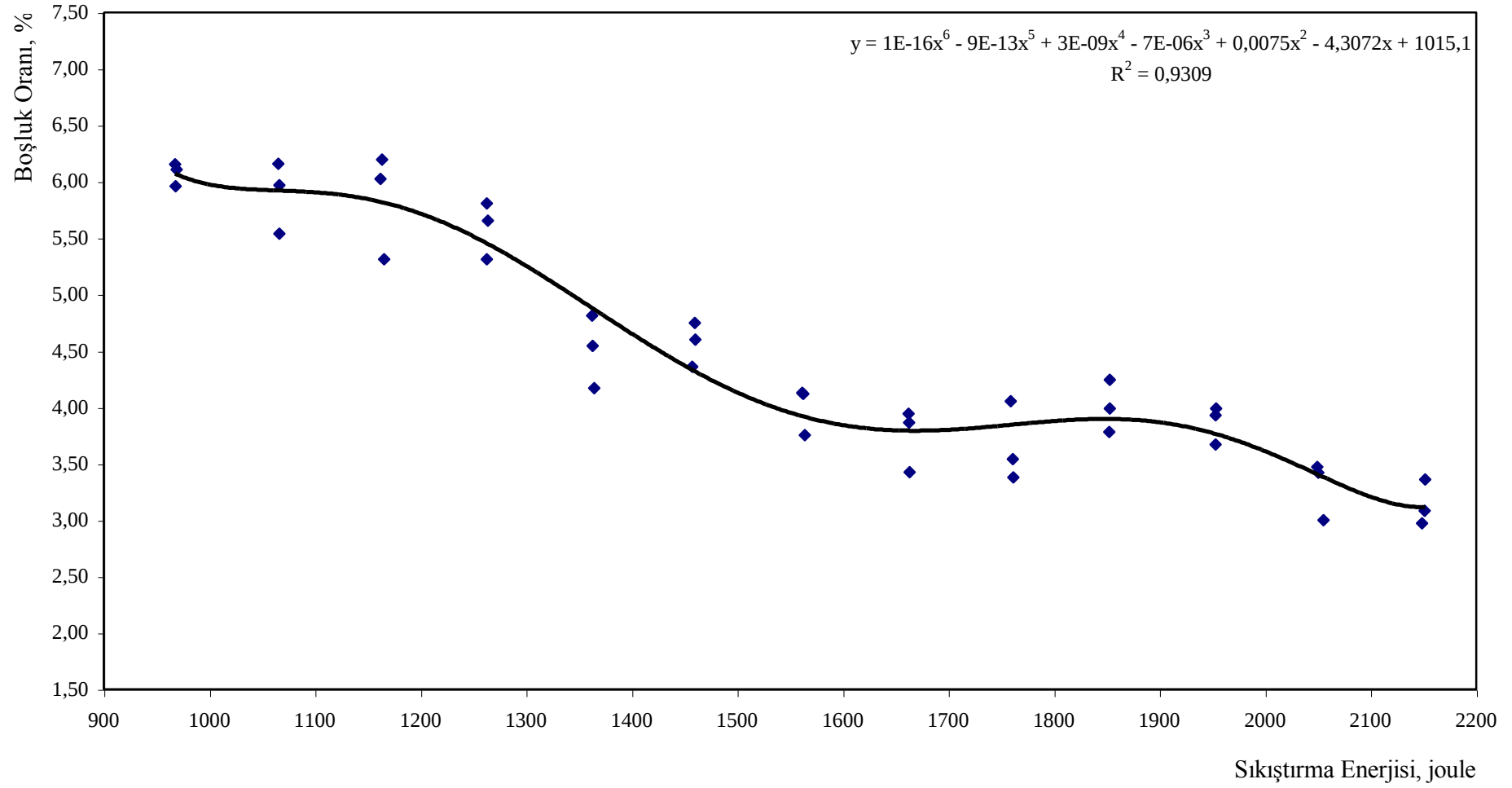
Şekil 5.7 Aşınma tabakası Tip 2 gradasyonu numunelerinin sıkıştırmadaki darbe sayısı-boşluk oranı verilerinin değişimi



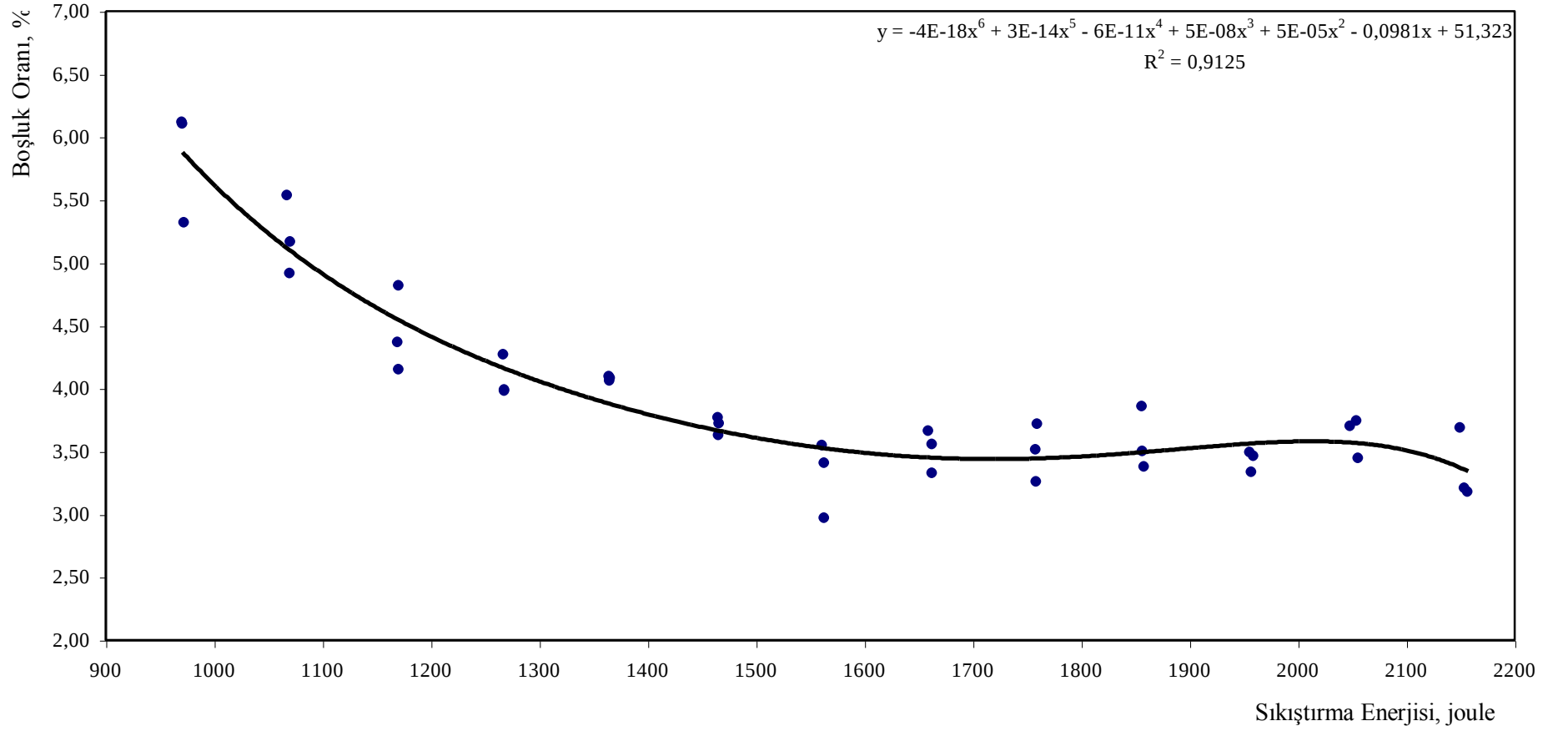
Şekil 5.8 Aşınma tabakası Tip 4 gradasyonu numunelerinin sıkıştırmadaki darbe sayısı-boşluk oranı verilerinin değişimi



Şekil 5.9 Binder tabakası Tip 3 gradasyonu numunelerinin sıkıştırma enerjisi-boşluk oranı verilerinin değişimi



Şekil 5.10 Aşınma tabakası Tip 2 gradasyonu numunelerinin sıkıştırma enerjisi-boşluk oranı verilerinin değişimi



Şekil 5.11 Aşınma tabakası Tip 4 gradasyonu numunelerinin sıkıştırma enerjisi-boşluk oranı verilerinin değişimi

5.5 Agreg a Gradasyon Deęiř i m l e r i n i n İ n c e l e n m e s i

5.5.1 G r i ř

Bu tez alış m a s ı n ı n alt konular ı n d a n b i r i s i d e s ı k ı ř t ı r ı l m a s ı n d a n u m u n e a g r e g a gradasyonundaki değiş i m l e r i n i n c e l e n m e s i d i r . B u k o n u  e r  e v e s i n d e , s ı k ı ř t ı r ı l a n numuneler i k i i ř l e m d e n g e  i r i l m i ř t i r .

İ l k i ř l e m f a r k l ı d a r b e s a y ı l a r ı u y g u l a n a r a k s ı k ı ř t ı r ı l a n n u m u n e g r u p l a r ı n d a n b i r e r  r n e k a l ı n a r a k e k s t r a k s i y o n a t a b i t u t u l m a s ı , i k i n c i i ř l e m i s e e k s t r a k s i y o n y o l u i l e b i t u m u n d e n a y ı r ı l a n a g r e g a k a r ı ř ı m n a e l e k a n a l i z i u y g u l a n a r a k s ı k ı ř t ı r ı l m a s ı n a s ı o l u ř a n y e n i g r a d a s y o n u n  n c e k i y l e k a r ř ı l a ř t ı r ı l m a s ı d ı r .

5.5.2 N u m u n e l e r i n E k s t r a k s i y o n u

Ekstraksiyon ynt e m i o l a r a k A S T M D 2172-95't e a y ı r ı t ı l a r ı v e r i l e n S a n t r i f u j Y  n t e m i k u l l a n ı l m ı ř t ı r . Y  n t e m    n c  b  l  m d e d e v e r i l m i ř t i r . Y  n t e m k ı s a  a , u y g u n b i r   z  c  i i l e b i t  m  n ı s ı t ı l a n b i t  m  k  k a r ı ř ı m d a n a y ı r ı l m a s ı n ı s a ğ l a n a k t a d ı r .  a l ı ř m a d a   z  c  i o l a r a k t r i k l  r e t i l e n k u l l a n ı l m ı ř t ı r .  a l ı ř m a d a h e r b i r g r a d a s y o n d a n v e h e r b i r d a r b e s a y ı s ı n d a n b i r e r  r n e k s e  i l m i ř t i r . H a z ı r l a n a n t o p l a m 117 n u m u n e d e n 39 t a n e s i n i n b u y  n t e m l e y e n i a g r e g a g r a d a s y o n u b e l i r l e n m i ř t i r . T a b l o 5.14, e k s t r a k s i y o n a u ğ r a t ı l a n n u m u n e l e r i g  s t e r n e k t e d i r .

T a b l o 5.14 E k s t r a k s i y o n a u ğ r a t ı l a n n u m u n e l e r

Tİ P 2	Tİ P 3	Tİ P 4
T2 50 3	T3 50 42	T4 50 81
T2 55 6	T3 55 45	T4 55 84
T2 60 9	T3 60 48	T4 60 87
T2 65 12	T3 65 51	T4 65 90
T2 70 15	T3 70 54	T4 70 93
T2 75 18	T3 75 57	T4 75 96
T2 80 21	T3 80 60	T4 80 99
T2 85 24	T3 85 63	T4 85 102
T2 90 27	T3 90 66	T4 90 105
T2 95 30	T3 95 69	T4 95 108
T2 100 33	T3 100 72	T4 100 111
T2 105 36	T3 105 75	T4 105 114
T2 110 39	T3 110 78	T4 110 117

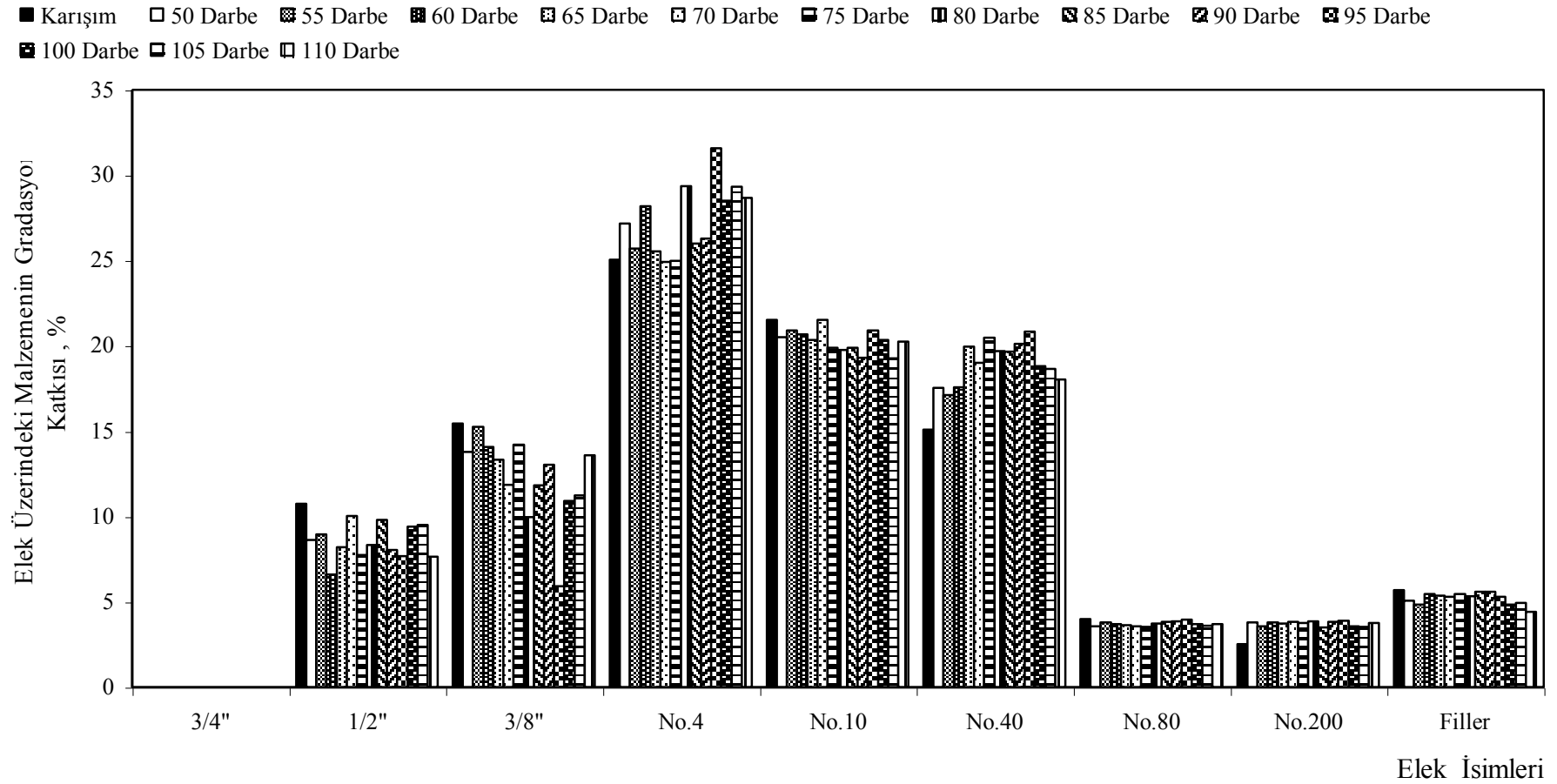
5.5.3 Elek Analizleri

Ekstraksiyonla bitümünden ayrılan agregalara, Tablo 5.2 de belirtilen elek serisi ile elek analizi yapılmıştır. Elek analizi sonucunda her bir elek üzerinde kalan malzemenin toplam numune ağırlığına bölünerek ilgili elek için agreganın karışım katılma oranı tespit edilmiştir. Başlangıçta hazırlanan numunelerdeki oranlar ile bu değerler karşılaştırılarak grafiklere dökülmüştür.

Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14 de elek analizi yapılan numunelerin başlangıçtaki tartımlara göre her bir elek üzerinde kalan malzemelerin durumu gösterilmiştir.

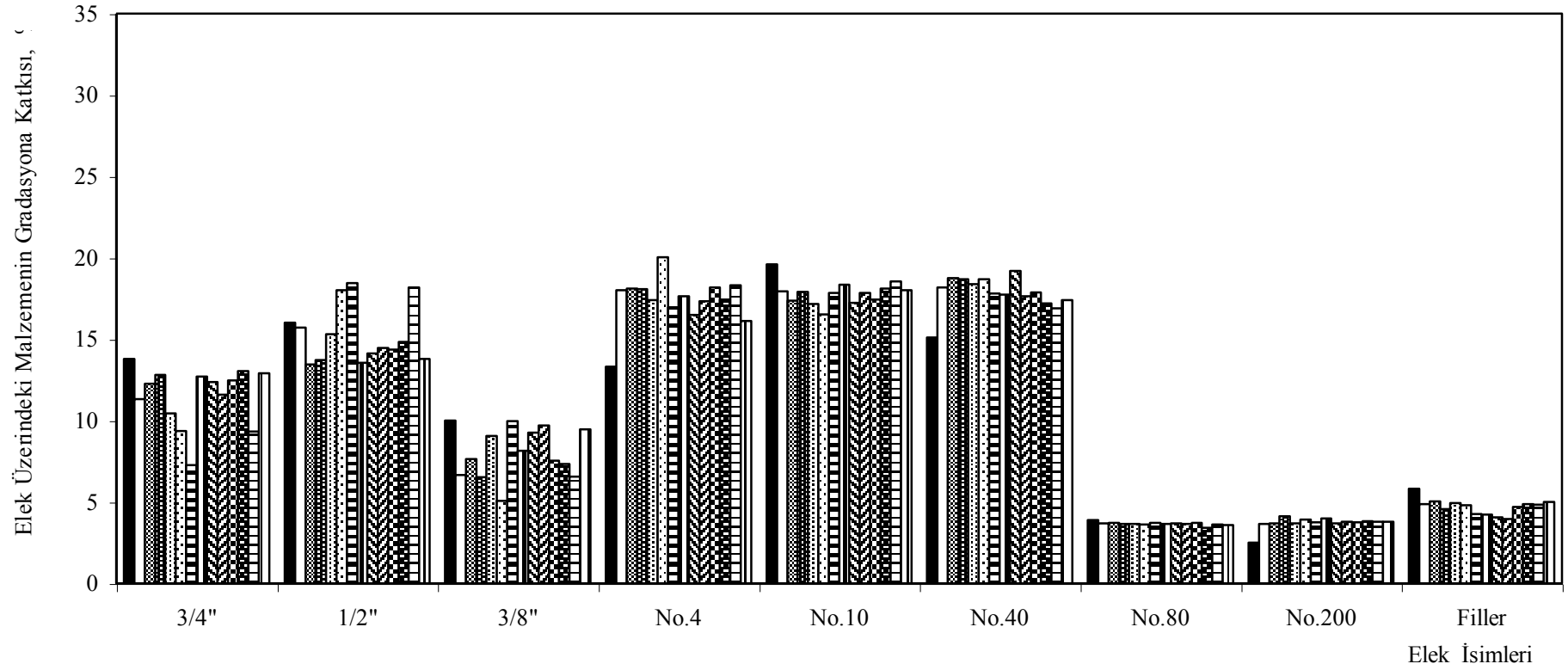
Şekillerde, her bir elek için 13 numuneye ait, ilgili eleğin üzerinde kalan malzemenin miktarının toplam malzeme miktarına oranı verilmiştir. Her bir eleğin üzerinde bulunan çubuklardan ilki, karışımın sıkıştırılmadan önceki gradasyonunu, diğerleri ise sırasıyla 50 darbeden başlayarak 110 darbe sayısı ile sıkıştırılmış olan numunelerin söz konusu oranlarını temsil etmektedir.

Ayrıca Şekil 15, 16 ve 17 de sıkıştırılmadan sonrasında ekstraksiyon ile bitümünden ayrılan agrega numunelerinde oluşan yeni gradasyonlar, logaritmik eksenle grafik olarak verilmiştir. Şekillerde sıkıştırılmadan kaynaklanan kırılmanın ilgili gradasyon için KGM Yollar Fenni Şartnamesi'nde verilen gradasyon sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir. İri agrega oranı fazla olan gradasyonlarda kırılmanın bir göstergesi olan orijinal gradasyondan sapmanın daha fazla olduğu görülmektedir.

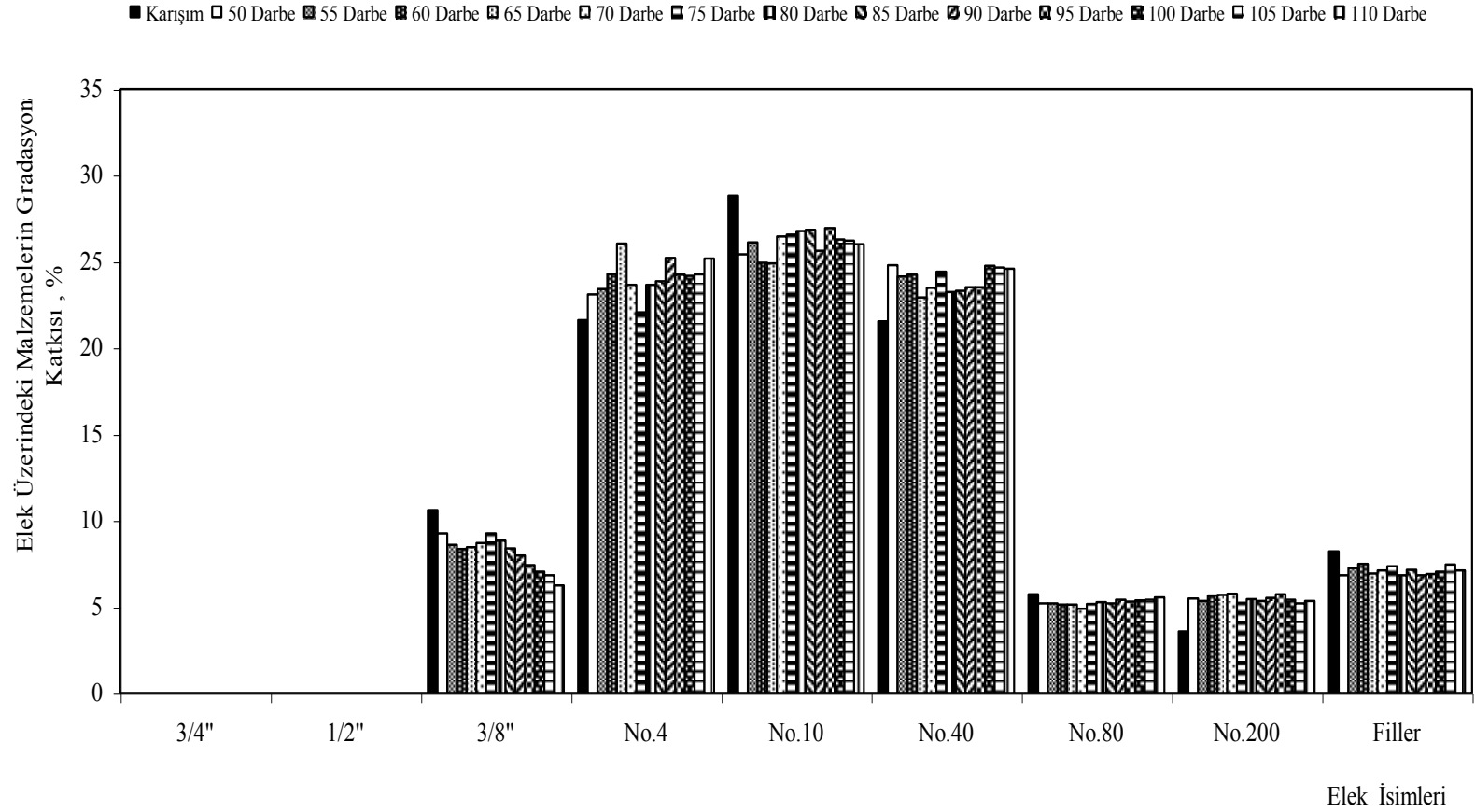


Şekil 5.12 Tip 2 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyon sonrası elek üzerinde kalan malzeme miktarlarının değişimi

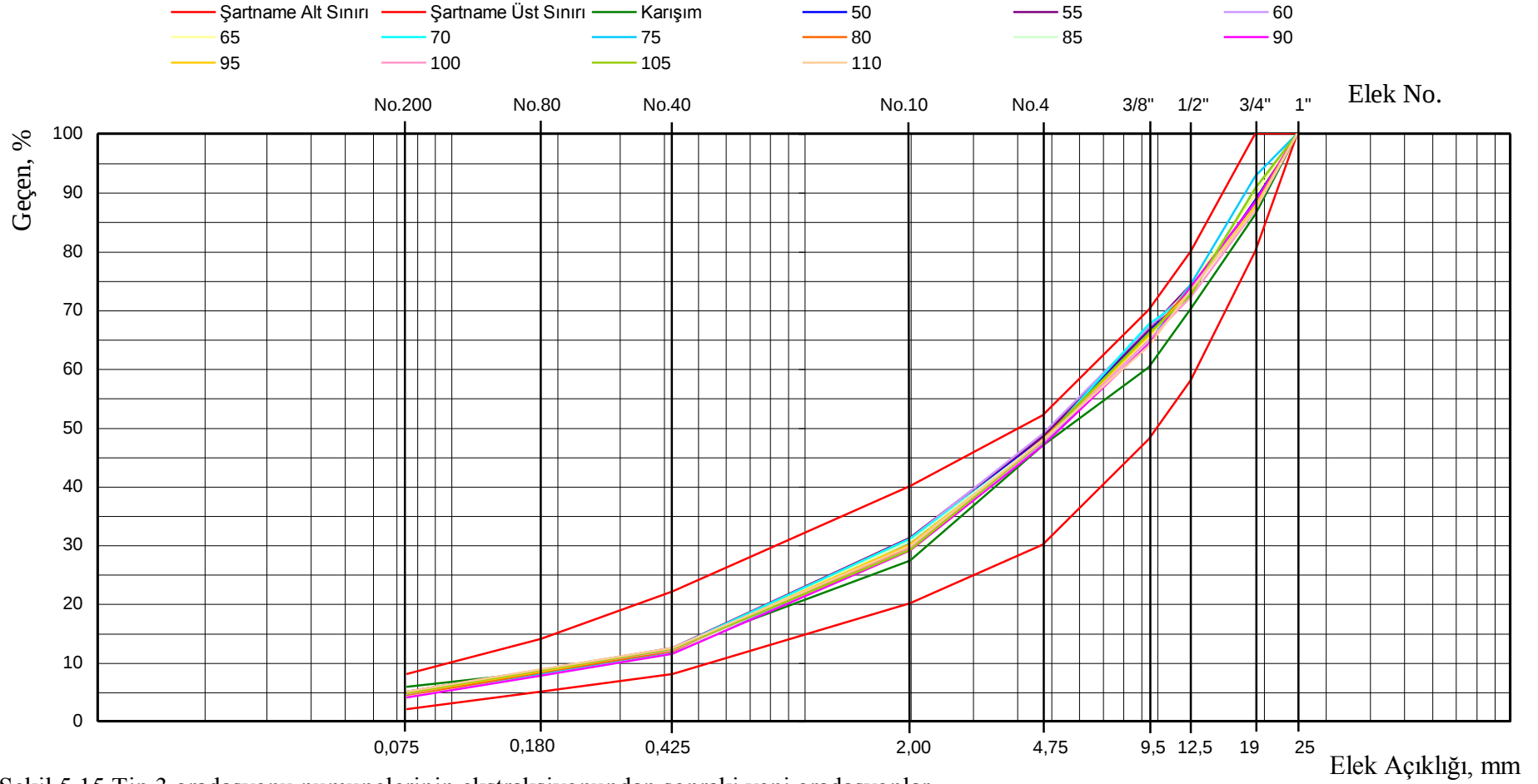
■ Karışım □ 50 Darbe ▨ 55 Darbe ▩ 60 Darbe ▪ 65 Darbe ▫ 70 Darbe ▬ 75 Darbe ▮ 80 Darbe ▯ 85 Darbe ▰ 90 Darbe
 ▱ 95 Darbe ▲ 100 Darbe △ 105 Darbe ▴ 110 Darbe



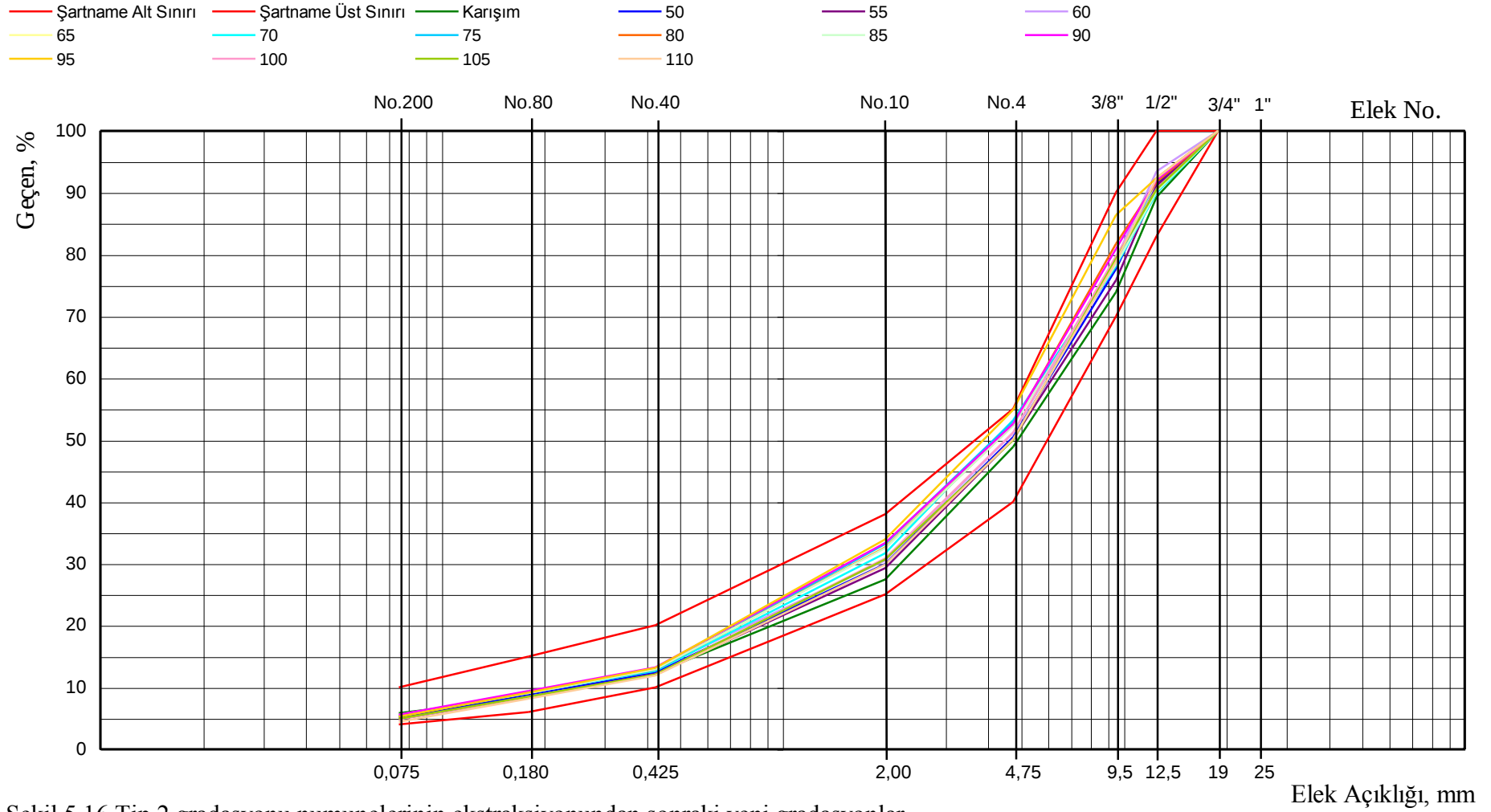
Şekil 5.13 Tip 3 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyon sonrası elek üzerinde kalan malzeme miktarlarının değişimi



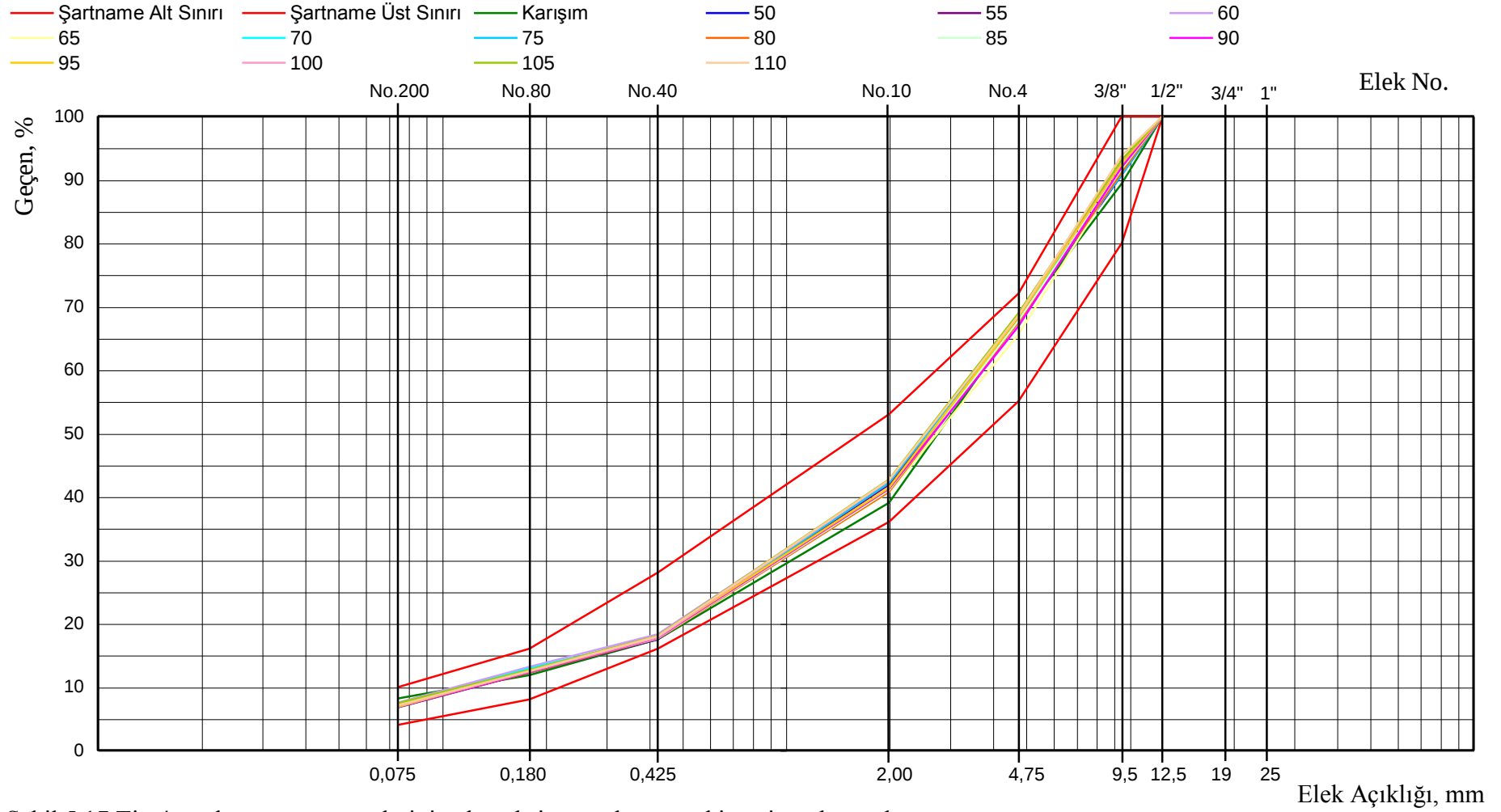
Şekil 5.14 Tip 4 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyon sonrası elek üzerinde kalan malzeme miktarlarının değişimi



Şekil 5.15 Tip 3 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyonundan sonraki yeni gradasyonlar



Şekil 5.16 Tip 2 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyonundan sonraki yeni gradasyonlar



Şekil 5.17 Tip 4 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyonundan sonraki yeni gradasyonlar

5.5.4 Sonuç lar ın K arşı laş tır ıl m as ı

Tip 3 gradasyonu numunelerinin ekstraksiyonundan her bir elek üzerinde kalan mal ze ne mi k t a r ı n ı n de ğ i ş t i ğ i , enerji artışıyla çok da ğ ı n k bir kırıl m a seyri ol u ş t u ğ u g ö r ü l m e k t e d i r . Ö z e l l i k l e No. 4 el e ğ i nden büyük olan geniş aç ı k l ı k l ı e l e k l e r ü z e r i n d e k i mal ze ne de ğ i ş i m i n d e , enerji arttıkça, elek üzerindeki mal ze ne n i n bazı darbe sayıları iç i n o r i j i n a l g r a d a s y o n d a k i mal ze ne mi k t a r ı n ı n alt ı n d a , bazıları iç i n i s e ü z e r i n d e ol a n mi k t a r d a ol d u ğ u g ö r ü l m ü ş t ü r , düzensizdir. No. 4 el e ğ i n i n alt ı n d a kal a n i n c e a g r e g a iç i n , en az ı n d a n , darbe sayısının artışı na p a r a l e l , elek üzerinde kalan mal ze ne mi k t a r ı n d a art m a v e y a az a l m a ş e k l i n d e g e n e l b i r d a v r a m ı ş g ö r ü l m e k t e d i r .

Tip 2 gradasyonunun, Tip 3 gradasyonuna göre, iri agrega mi k t a r ı az , m a k s i m u m t a n e b o y u t u d a d ü ş ü k t ü r . Bu gradasyonda darbe sayısı artışı n ı n , elek üzerindeki mal ze ne de ğ i ş i m i n e da ğ ı n k b i r s e y i r i z l e t t i ğ i s ö y l e n e m e z , daha belirgindir. Yani ; mal ze ne , darbe sayısının artışıyla düzenli ol m a s a d a g e n e l b i r art m a v e y a az a l m a ş e k l i n d e kırıl m a g ö s t e r m e k t e d i r .

En az iri mal ze ne iç e r e n Tip 4 gradasyonu iç i n g r a d a s y o n de ğ i ş i m i da ğ ı n k ş e k i l d e n k u r t u l m u ş , darbe sayısının artışıyla bazı eleklerde art a n bazı eleklerde i s e az a l a n ş e k l i n d e , di ğ e r g r a d a s y o n l a r a g ö r e d a h a d ü z g ü n de ğ i ş i m s e y r i g ö s t e r m e k t e d i r .

Her üç gradasyon bir arada düşünül dü ğ ü n d e ; enerji arttırıld ı kça kırıl m a art a r ş e k l i n d e b i r s o n u c a u l a ş ı l a m a z . E n i y i n e r s o n u ç , iri agrega mi k t a r ı n ı n g r a d a s y o n iç e r i s i n d e k i pay ı n ı n az a l m a s ı n ı n , agrega kırıl m a s ı n a b i r d ü z e n l i l i k g e t i r d i ğ i , ancak bu düzenlili ğ i n d e y i n e art m a v e y a az a l m a ş e k l i n d e k e s i n b i r y a r ğ ı iç e r e n d a v r a m ı ş iç e r i s i n d e ol m a d ı ğ ı d ır .

Marshall yöntemi ile yüksek numune hazırlamada, yeterli boşluk oran ı n ı el d e e d e b i l m e k iç i n arttırılan darbe sayısı, gradasyonun başlangıç t a k i h a l e g ö r e de ğ i ş m e s i n e s e b e p ol m a k t a d ır . De ğ i ş i m i r i a g r e g a mi k t a r ı f a z l a ol a n g r a d a s y o n l a r d a d a h a f a z l a v e d ü z e n s i z k e n i r i a g r e g a mi k t a r ı az ol a n g r a d a s y o n l a r d a d a h a az v e g ö r e l i ol a r a k d a h a d ü z e n l i d i r . Ancak b ü t ü n g r a d a s y o n l a r iç i n ş a r t n a m e s ı n ı r l a r ı a ş ı l m a k t a d ır .

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada standart yükseklikte olmaayan Marshall numunelerini farklı darbe sayıları uygulanarak sıkıştırılabilirliği incelenmiş, sıkışmanın bir ölçüsü olarak numune boşluk oranlarının değişimi gözlenmiş ve sıkıştırmanın agrega gradasyonunu ne ölçüde değiştirdiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçları çeşitli başlıklar altında toplamak mümkündür.

- **Sıkıştırılabilirlik ve Boşluk Oranı**

Sıkışmanın bir ölçüsü olan boşluk oranının şartname sınırları arasında kalmasından dolayı Tip 2 ve Tip 4 gradasyonları için yüksek numunelerin üretilip ikiye kesilmesi yoluyla numune sayısının artırılması yeterli labordaki boşluk oranının elde edilebilmesi açısından mümkündür.

Darbe sayısının artırılması numune boşluk oranını düzenli olarak azaltacağı iddianın doğru değildir. Boşluk oranındaki azalma agrega gradasyonunun bir fonksiyonudur: İri agrega miktarı fazla olan gradasyonlarda darbe sayısı artışı, agreganın kırılmasına sebep olmakta bu ise boşluk oranını artırmaktadır.

- **Agregaların Kırılması ve Gradasyon Değişimleri**

Marshall tokmağı ile sıkıştırma, kullanılan bütün gradasyonlarda (Aşınma Tip 2 ve Tip 4 ile Bider Tip 3) kullanılan bütün darbe sayılarında kırılmalara sebep olmaktadır. Ancak darbe sayısı artışının bütün elemlerin geçen malzeme miktarını artırdığı söylenebilir, kırılma rasgeledir.

Sıkıştırma enerjisi artışı, kırılmalar sebebiyle agrega gradasyonunu değiştirmektedir. Tip 2 ve Tip 3 gibi iri agrega oranı Tip 4'e göre daha fazla olan gradasyonlarda bu değişim fazladır. Ancak kullanılan bütün gradasyonlar için kırılmalardan kaynaklanan gradasyon değişimi, KGM Yollar Fenni Şartnamesi sınırları arasında kalmaktadır.

- **İkiye Kesmek Yoluyla Numune Sayısının Artırılabilirliği**

İri agrega oranı Tip 3'e göre düşük olan Tip 2 ve Tip 4 gibi gradasyonlarda sıkıştırma sonrasında boşluk oranı ve agrega gradasyonu şartname sınırları arasında kaldığından dolayı bu ölçütler açısından, yüksek numunelerin ikiye kesilmesiyle numune sayısının artırılması yoluna gidilebilir. Ancak Tip 3 gibi iri agrega miktarı fazla olan bir gradasyon için artırılan darbe sayısının numunelerin fazlaca sıkışmasına sebep olması, şartname sınırları arasında boşluk oranı elde edilememesi sebebiyle yüksek numunelerin ikiye kesilmesiyle numune sayısının artırılması uygun değildir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yayla, N**, 2002. Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] **Unar, E ve Ağar, E**, 1985. Yol Üstyapısı, İ. T. Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [3] **Ağar, E, Süttaş, İ. Ve Öztaş G**, 1998. Beton Yollar, İ. T. Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [4] **Ağar, E**, Basılmamış. Esnek üstyapı tasarımı yöntemleri ders notları.
- [5] **Huang, H, Y**, 1993. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, New Jersey.
- [6] **Martin, R, J ve Wallace, A, H**, 1958. Design and Construction of Asphalt Pavements, McGRAW HILL, New York
- [7] **Brockenbrough, R, L ve Boedecker, K, J**, 1996. Highway Engineering Handbook, McGRAW HILL, USA
- [8] **Önal, M, A ve Kahramangil, M**, 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, KGM-Teknik Araştırma Daire Başkanlığı, Ankara
- [9] -----, Construction of Hot Mix Asphalt Pavements, Asphalt Institute, Manual Series No. 22 (MS-22), Second Edition
- [10] -----, Asphalt Cold Mix, Asphalt Institute, Manual Series No. 14 (MS-14), Third Edition
- [11] -----, Factors Affecting Compaction, Asphalt Institute, Educational Series No. 9 (ES-9).
- [12] **Gartner, W**, Asphalt Concrete Mix Design, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication (STP) 1041.
- [13] **Yasa S, Büyükmişci, C ve Cündübeyoğlu, M**, 1954. Bitümlü Kaplamalar El Kitabı, İstiklal Matbaacılık ve Gazetecilik Koll. Ort., Ankara

- [14]-----, 2000. Yollar Fenni Şartnamesi, KGM, Ankara.
- [15] **Öncel, M.S ve Eren, K,** 1996. İstanbul çevresindeki taş ocaklarının sınıflandırması ve asfalt betonu agregası olarak kullanımı, *1. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, İstanbul, 19-20 Aralık s.103-113.
- [16] -----, 1995. The Shell Bitumen Industrial Handbook, Shell Bitumen, Surrey.
- [17] **TS-3720**, 1983. Bitümü kaplama karışımlarının hesap esasları- Marshall ve Hubbard-Field metotları ile, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [18] **ASTM D 1559**, 1989. Standart test method for resistance to plastik flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus, *American Society for Testing and Materials*, PA, A B D
- [19] **Tayfur, S,** 2001. Taş mastik asfalt kaplamalar için uygun karışımın araştırılması ve bir hizmet ömrü modeli geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, Y. T. Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **Çelik, O, S,** 2001. Bitümü karışımlarda hava geçirirliğinin ölçülmesi ve hava geçirirliği-boşluk oranı arasındaki ilişki, *5. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, 30-31 Mayıs-1 Haziran, s.315-324.
- [21] -----, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types, Asphalt Institute, Manual Series No.2 (MS-2), Sixth Edition
- [22] **ASTM D 2041**, 1995. Standart test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures, *American Society for Testing and Materials*, PA, A B D
- [23] **ASTM D 1188**, 1996. Standart test method for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using paraffin-coated specimens, *American Society for Testing and Materials*, PA, A B D
- [24] **TS-1081**, 1972. Yol üst yapılarında kullanılan asfalt çimentoları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [25] **Kandhal, P.S ve Koehler, W, S,** 1985. Marshall mix design method: current practices, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, 54, 284-302.

- [26] **Kandhal, P, S,** 1990. Large stone asphalt mixes: design and construction, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **59**, 526-544.
- [27] **Mrza, S, İ.,** 1993. Compaction of asphalt concrete at Gerede- Ankara motor way project- A case history, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **62**, 668-692.
- [28] -----, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT, İstanbul.
- [29] **ERGİN M,** 1995. Türk Dili, Bayrak BasımYayı m Dağıtım İstanbul.
- [30] -----, 1996. İnşaat Kılavuzu, Türk Dil Kurumu Yayınları: 525, Ankara.

Tablo A1 Tip 2 gradasyonu numunelerine ait Marshall hesaplamaları

Numune Kodu	Numune Yüksekliği, mm	Havada Ağırlık g	Suda Ağırlık g	Hacim cm^3	Birim Ağırlık $D_b (G_{mb})$	Teorik Birim Ağırlık $D_t (G_{mt})$	Boşluk Hacmi, %	Bütün Hacmi, %	Agrega Hacmi, %	Agregat Arası Boşluk, %	Boşluk ile Doluluk, %	Skatır madde Dene Sayısı	Skatırma Enerjisi, joule
T2 50 1	85,65	1573,8	907,8	666,0	2,363	2,518	6,15	11,63	82,54	17,46	66,63	50	967,50
T2 50 2	85,00	1577,9	910,5	667,4	2,364	2,518	6,11	11,64	82,58	17,42	66,82	50	968,95
T2 50 3	85,35	1576,8	910,9	665,9	2,368	2,518	5,96	11,66	82,71	17,29	67,42	50	968,17
T2 55 4	85,25	1575,6	908,8	666,8	2,363	2,518	6,16	11,63	82,54	17,46	66,60	55	1065,23
T2 55 5	84,85	1571,9	908,0	663,9	2,368	2,518	5,97	11,65	82,70	17,30	67,38	55	1066,21
T2 55 6	84,72	1576,0	913,4	662,6	2,379	2,518	5,54	11,71	83,08	16,92	69,20	55	1066,54
T2 60 7	85,20	1576,4	910,2	666,2	2,366	2,518	6,03	11,65	82,65	17,35	67,14	60	1162,20
T2 60 8	84,68	1574,5	907,9	666,6	2,362	2,518	6,20	11,63	82,50	17,50	66,45	60	1163,58
T2 60 9	83,93	1570,0	911,5	658,5	2,384	2,518	5,31	11,74	83,28	16,72	70,19	60	1165,58
T2 65 10	83,88	1578,1	916,2	661,9	2,384	2,518	5,31	11,74	83,28	16,72	70,19	65	1262,86
T2 65 11	83,58	1569,1	908,6	660,5	2,376	2,518	5,65	11,69	82,98	17,02	68,71	65	1263,73
T2 65 12	83,90	1575,8	911,4	664,4	2,372	2,518	5,81	11,67	82,85	17,15	68,06	65	1262,81
T2 70 13	82,35	1577,6	923,8	653,8	2,413	2,518	4,17	11,88	84,29	15,71	75,58	70	1364,78
T2 70 14	82,93	1578,2	921,6	656,6	2,404	2,518	4,54	11,83	83,96	16,04	73,75	70	1362,96
T2 70 15	83,00	1576,6	918,8	657,8	2,397	2,518	4,81	11,80	83,72	16,28	72,46	70	1362,76
T2 75 16	83,00	1574,8	918,2	656,6	2,398	2,518	4,75	11,81	83,78	16,22	72,77	75	1460,10
T2 75 17	82,93	1578,7	921,5	657,2	2,402	2,518	4,60	11,82	83,91	16,09	73,48	75	1460,32
T2 75 18	83,82	1578,1	922,8	655,3	2,408	2,518	4,36	11,85	84,12	15,88	74,64	75	1457,37
T2 80 19	81,78	1572,5	921,1	651,4	2,414	2,518	4,13	11,88	84,32	15,68	75,79	80	1561,77
T2 80 20	81,12	1573,8	924,4	649,4	2,423	2,518	3,75	11,93	84,65	15,35	77,72	80	1564,14
T2 80 21	81,53	1572,4	921,1	651,3	2,414	2,518	4,12	11,88	84,33	15,67	75,83	80	1562,66
T2 85 22	80,70	1570,2	924,5	645,7	2,432	2,518	3,42	11,97	84,94	15,06	79,49	85	1663,47
T2 85 23	81,07	1564,7	917,8	646,9	2,419	2,518	3,94	11,91	84,49	15,51	76,75	85	1662,09
T2 85 24	80,87	1569,1	920,9	648,2	2,421	2,518	3,86	11,92	84,56	15,44	77,15	85	1662,84
T2 90 25	80,78	1568,8	922,9	645,9	2,429	2,518	3,54	11,96	84,84	15,16	78,86	90	1760,99
T2 90 26	80,68	1573,4	926,7	646,7	2,433	2,518	3,38	11,98	84,98	15,02	79,75	90	1761,39
T2 90 27	81,32	1574,7	922,9	651,8	2,416	2,518	4,05	11,89	84,39	15,61	76,17	90	1758,86
T2 95 28	82,18	1574,1	923,0	651,1	2,418	2,518	3,99	11,90	84,45	15,55	76,51	95	1852,91
T2 95 29	82,25	1578,7	927,1	651,6	2,423	2,518	3,78	11,93	84,63	15,37	77,58	95	1852,63
T2 95 30	82,13	1574,0	921,2	652,8	2,411	2,518	4,24	11,87	84,22	15,78	75,22	95	1853,12
T2 100 31	81,57	1573,5	924,8	648,7	2,426	2,518	3,67	11,94	84,73	15,27	78,17	100	1953,17
T2 100 32	81,47	1568,0	919,4	648,6	2,418	2,518	3,99	11,90	84,44	15,56	76,49	100	1953,62
T2 100 33	81,55	1570,0	921,0	649,0	2,419	2,518	3,93	11,91	84,50	15,50	76,82	100	1953,25
T2 105 34	80,63	1568,3	926,2	642,1	2,442	2,518	3,00	12,02	85,32	14,68	81,87	105	2055,19
T2 105 35	81,88	1578,4	929,0	649,4	2,431	2,518	3,47	11,96	84,90	15,10	79,23	105	2049,35
T2 105 36	81,65	1572,2	925,7	646,5	2,432	2,518	3,42	11,97	84,95	15,05	79,51	105	2050,44
T2 110 37	81,48	1573,4	929,4	644,0	2,443	2,518	2,97	12,03	85,34	14,66	82,03	110	2148,90
T2 110 38	80,93	1564,9	921,8	643,1	2,433	2,518	3,36	11,98	85,00	15,00	79,84	110	2151,59
T2 110 39	81,00	1573,3	928,6	644,7	2,440	2,518	3,08	12,01	85,24	14,76	81,39	110	2151,26

Tablo A2 Tip 3 gradasyonu numunelerine ait Marshall hesaplamaları

Numune Kodu	Numune Yüksekliği, mm	Havada Ağırlık g	Suda Ağırlık g	Hacim cm ³	Birim Ağırlık	Teorik Birim Ağırlık	Boşluk Hacmi, %	Bütüm Hacmi, %	Agrega Hacmi, %	Agregat Arası Boşluk, %	Bağ ayra ile Dolum, %	Skatır maddeki Darbe Sayısı	Skatırma Enerjisi, joule
T3 50 40	82,38	1573,8	921,0	652,8	2,411	2,531	4,75	12,03	84,21	15,79	76,20	50	974,77
T3 50 41	83,02	1572,0	920,4	651,6	2,413	2,531	4,68	12,04	84,27	15,73	76,53	50	973,36
T3 50 42	83,33	1570,8	918,9	651,9	2,410	2,531	4,80	12,02	84,17	15,83	75,94	50	972,66
T3 55 43	82,80	1571,4	924,9	646,5	2,431	2,531	3,97	12,13	84,90	15,10	80,34	55	1071,23
T3 55 44	82,88	1570,7	921,0	649,7	2,418	2,531	4,48	12,06	84,45	15,55	77,56	55	1071,02
T3 55 45	82,98	1569,9	920,4	649,5	2,417	2,531	4,50	12,06	84,43	15,57	77,46	55	1070,78
T3 60 46	80,75	1570,2	927,5	642,7	2,443	2,531	3,47	12,19	85,34	14,66	83,16	60	1174,08
T3 60 47	81,60	1570,3	929,4	640,9	2,450	2,531	3,19	12,23	85,58	14,42	84,81	60	1171,81
T3 60 48	81,63	1570,1	925,9	644,2	2,437	2,531	3,70	12,16	85,13	14,87	81,82	60	1171,73
T3 65 49	81,42	1571,1	930,5	640,6	2,453	2,531	3,10	12,24	85,67	14,33	85,39	65	1270,00
T3 65 50	82,20	1572,9	930,8	642,1	2,450	2,531	3,22	12,22	85,57	14,43	84,69	65	1267,73
T3 65 51	80,90	1565,6	928,5	637,1	2,457	2,531	2,91	12,26	85,84	14,16	86,58	65	1271,49
T3 70 52	80,13	1569,3	933,0	636,3	2,466	2,531	2,56	12,31	86,15	13,85	88,85	70	1371,69
T3 70 53	81,15	1568,3	931,8	636,5	2,464	2,531	2,65	12,30	86,07	13,93	88,24	70	1368,52
T3 70 54	80,37	1572,0	933,1	638,9	2,460	2,531	2,79	12,28	85,94	14,06	87,36	70	1370,96
T3 75 55	81,43	1570,0	928,3	641,7	2,447	2,531	3,33	12,21	85,46	14,54	83,98	75	1465,32
T3 75 56	81,28	1572,7	929,6	643,1	2,445	2,531	3,38	12,20	85,42	14,58	83,71	75	1465,83
T3 75 57	81,83	1571,1	930,2	640,9	2,451	2,531	3,15	12,23	85,63	14,37	85,11	75	1463,99
T3 80 58	82,65	1561,3	914,4	646,9	2,414	2,531	4,64	12,04	84,30	15,70	76,73	80	1558,68
T3 80 59	81,72	1573,1	926,6	646,5	2,433	2,531	3,86	12,14	84,99	15,01	80,92	80	1562,00
T3 80 60	81,95	1569,4	927,5	641,9	2,445	2,531	3,40	12,20	85,40	14,60	83,58	80	1561,17
T3 85 61	82,15	1570,4	926,2	644,2	2,438	2,531	3,68	12,17	85,15	14,85	81,92	85	1657,99
T3 85 62	82,23	1573,8	926,7	647,1	2,432	2,531	3,91	12,14	84,95	15,05	80,66	85	1657,68
T3 85 63	82,62	1569,5	920,3	649,2	2,418	2,531	4,48	12,06	84,45	15,55	77,57	85	1656,23
T3 90 64	84,23	1566,3	913,1	653,2	2,398	2,531	5,26	11,97	83,76	16,24	73,68	90	1747,18
T3 90 65	84,03	1566,8	914,6	652,2	2,402	2,531	5,08	11,99	83,91	16,09	74,52	90	1747,98
T3 90 66	82,98	1573,6	923,5	650,1	2,421	2,531	4,36	12,08	84,55	15,45	78,18	90	1752,18
T3 95 67	81,00	1572,4	931,2	641,2	2,452	2,531	3,11	12,24	85,66	14,34	85,33	95	1857,91
T3 95 68	81,25	1574,0	931,0	643,0	2,448	2,531	3,28	12,22	85,51	14,49	84,28	95	1856,85
T3 95 69	82,68	1571,4	928,5	642,9	2,444	2,531	3,43	12,20	85,38	14,62	83,41	95	1850,79
T3 100 70	79,85	1563,0	931,4	631,6	2,475	2,531	2,23	12,35	86,44	13,56	91,07	100	1960,81
T3 100 71	79,93	1566,8	933,1	633,7	2,472	2,531	2,31	12,34	86,36	13,64	90,48	100	1960,44
T3 100 72	80,78	1568,1	933,7	634,4	2,472	2,531	2,34	12,33	86,34	13,66	90,30	100	1956,66
T3 105 73	79,52	1569,4	937,1	632,3	2,482	2,531	1,93	12,39	86,70	13,30	93,12	105	2060,41
T3 105 74	79,08	1566,2	936,6	629,6	2,488	2,531	1,71	12,41	86,89	13,11	94,71	105	2062,43
T3 105 75	80,03	1570,3	935,5	634,8	2,474	2,531	2,26	12,34	86,41	13,59	90,81	105	2058,00
T3 110 76	80,40	1563,7	932,4	631,3	2,477	2,531	2,14	12,36	86,52	13,48	91,70	110	2154,20
T3 110 77	79,82	1568,4	935,6	632,8	2,479	2,531	2,07	12,37	86,57	13,43	92,13	110	2157,06
T3 110 78	79,83	1569,6	937,6	632,0	2,484	2,531	1,87	12,39	86,75	13,25	93,54	110	2156,97

Tablo A3 Tip 4 gradasyonu numunelerine ait Marshall hesaplamaları

Numune Kodu	Numune yüksekliği, mm	Havada Ağırlık g	Suda Ağırlık g	Hacim cm ³	Birim Ağırlık	Teorik Birim Ağırlık	Boşluk Hacmi, %	Bütüm Hacmi, %	Agrega Hacmi, %	Agregalar Arası Boşluk, %	Bağlayıcı ile Doluluk, %	Skatör madaki Darbe Sayısı	Skatör Enerjisi, joule
T4 50 79	83,27	1577,2	917,5	659,7	2,391	2,525	5,32	11,93	83,11	16,89	70,65	50	972,80
T4 50 80	84,07	1577,2	911,9	665,3	2,371	2,525	6,11	11,83	82,41	17,59	67,27	50	971,02
T4 50 81	83,85	1577,9	912,4	665,5	2,371	2,525	6,10	11,83	82,42	17,58	67,32	50	971,51
T4 55 82	82,92	1579,8	920,1	659,7	2,395	2,525	5,16	11,95	83,25	16,75	71,34	55	1070,94
T4 55 83	84,08	1580,1	917,7	662,4	2,385	2,525	5,53	11,90	82,93	17,07	69,72	55	1068,09
T4 55 84	83,10	1579,9	921,9	658,0	2,401	2,525	4,91	11,98	83,47	16,53	72,49	55	1070,49
T4 60 85	82,00	1572,6	918,3	654,3	2,403	2,525	4,81	11,99	83,55	16,45	72,93	60	1170,75
T4 60 86	81,87	1577,1	925,5	651,6	2,420	2,525	4,14	12,08	84,14	15,86	76,16	60	1171,10
T4 60 87	82,25	1579,3	925,3	654,0	2,415	2,525	4,36	12,05	83,95	16,05	75,07	60	1170,08
T4 65 88	82,32	1576,1	924,1	652,0	2,417	2,525	4,26	12,06	84,04	15,96	75,56	65	1267,39
T4 65 89	81,95	1580,0	928,3	651,7	2,424	2,525	3,98	12,10	84,28	15,72	76,97	65	1268,45
T4 65 90	81,98	1574,3	925,0	649,3	2,425	2,525	3,98	12,10	84,29	15,71	77,01	65	1268,36
T4 70 91	81,90	1578,2	926,6	651,6	2,422	2,525	4,08	12,09	84,20	15,80	76,49	70	1366,18
T4 70 92	82,20	1580,9	928,1	652,8	2,422	2,525	4,09	12,09	84,19	15,81	76,43	70	1365,25
T4 70 93	82,17	1575,9	925,4	650,5	2,423	2,525	4,06	12,09	84,22	15,78	76,60	70	1365,35
T4 75 94	81,20	1575,7	928,2	647,5	2,434	2,525	3,62	12,14	84,60	15,40	78,85	75	1466,10
T4 75 95	81,07	1575,4	927,4	648,0	2,431	2,525	3,72	12,13	84,52	15,48	78,36	75	1466,55
T4 75 96	81,43	1578,5	928,9	649,6	2,430	2,525	3,76	12,13	84,47	15,53	78,10	75	1465,32
T4 80 97	81,27	1579,6	934,9	644,7	2,450	2,525	2,97	12,23	85,18	14,82	82,48	80	1563,61
T4 80 98	81,23	1574,9	929,2	645,7	2,439	2,525	3,40	12,17	84,79	15,21	80,03	80	1563,72
T4 80 99	81,78	1574,6	928,1	646,5	2,436	2,525	3,54	12,15	84,67	15,33	79,28	80	1561,77
T4 85 100	81,67	1577,8	929,2	648,6	2,433	2,525	3,66	12,14	84,57	15,43	78,66	85	1659,82
T4 85 101	80,75	1575,7	928,7	647,0	2,435	2,525	3,55	12,15	84,66	15,34	79,24	85	1663,29
T4 85 102	80,75	1576,0	930,4	645,6	2,441	2,525	3,32	12,18	84,86	15,14	80,48	85	1663,29
T4 90 103	81,03	1576,7	928,2	648,5	2,431	2,525	3,71	12,13	84,52	15,48	78,38	90	1759,99
T4 90 104	81,37	1577,1	929,8	647,3	2,436	2,525	3,51	12,16	84,70	15,30	79,46	90	1758,66
T4 90 105	81,30	1574,7	930,1	644,6	2,443	2,525	3,25	12,19	84,92	15,08	80,86	90	1758,92
T4 95 106	81,28	1575,6	926,6	649,0	2,428	2,525	3,85	12,12	84,40	15,60	77,65	95	1856,71
T4 95 107	81,13	1575,1	928,7	646,4	2,437	2,525	3,50	12,16	84,71	15,29	79,53	95	1857,35
T4 95 108	80,80	1578,1	931,3	646,8	2,440	2,525	3,37	12,18	84,82	15,18	80,20	95	1858,75
T4 100 109	80,07	1565,5	923,3	642,2	2,438	2,525	3,46	12,16	84,74	15,26	79,74	100	1959,85
T4 100 110	80,92	1577,7	930,3	647,4	2,437	2,525	3,49	12,16	84,72	15,28	79,58	100	1956,06
T4 100 111	80,58	1574,9	929,7	645,2	2,441	2,525	3,33	12,18	84,86	15,14	80,44	100	1957,55
T4 105 112	80,40	1571,9	927,2	644,7	2,438	2,525	3,44	12,17	84,76	15,24	79,84	105	2056,28
T4 105 113	81,97	1590,8	936,6	654,2	2,432	2,525	3,70	12,13	84,53	15,47	78,46	105	2048,96
T4 105 114	80,73	1573,8	926,3	647,5	2,431	2,525	3,74	12,13	84,50	15,50	78,23	105	2054,72
T4 110 115	81,23	1573,5	926,5	647,0	2,432	2,525	3,68	12,14	84,54	15,46	78,53	110	2150,12
T4 110 116	80,40	1569,6	927,4	642,2	2,444	2,525	3,20	12,20	84,97	15,03	81,13	110	2154,20
T4 110 117	79,82	1558,1	920,8	637,3	2,445	2,525	3,17	12,20	84,99	15,01	81,29	110	2157,06

ÖZGEÇMİŞ

Temmuz 1974'te Kayseri'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini aynı kentte tamamladı. 1992 yılında, Selçuk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Biyoloji Bölümünde yüksek öğrenime başladı. İki yıl süren öğrenimin ardından 1994'te Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi. 19 Haziran 1998'de mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne kaydoldu.

Mart 1999'da Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma A.B.D.'nde araştırma görevlisi olarak atandı.

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi'nin görevlendirilmesi ile, önce Ortadoğu Teknik Üniversitesi'nde yabancı dil eğitimi aldı; ardından Şubat 2000'de, lisansüstü öğrenimini tamamlamak üzere İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Ulaştırma A.B.D.'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı anabilim dalında araştırma görevlisi olarak öğrenimini sürdürmektedir.