



**BOR KAYNAKLI ÇEVRESEL ATIKLARIN
BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN
PERFORMANSINA ETKİSİ VE MODELLENMESİ**

Mustafa KESKİN

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2019

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mustafa KESKİN' in "Bor Kaynaklı Çevresel Atıkların Bitümlü Sıcak Karışımların Performansına Etkisi ve Modellenmesi" başlıklı tezi 03 / 05 /2019 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği' nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	:Doç. Dr. Murat KARACASU
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi Şafak BİLGİÇ
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi Ali ULU
Üye	:Prof. Dr. Ahmet TUNCAN
Üye	:Dr. Öğr. Üyesi Polat YALINIZ

.....
Enstitü Müdürü

ÖZET

BOR KAYNAKLI ÇEVRESEL ATIKLARIN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ VE MODELLENMESİ

Mustafa KESKİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2019

Danışman: Doç. Dr. Murat KARACASU

Küresel ısınmadan dolayı geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik kavramları son zamanlarda diğer alanlarda olduğu gibi kaplama mühendisliğinde de ön plana çıkmıştır. Kaplama mühendisleri, geri dönüşümlü malzemelerle asfalt betonu üretimi konusunda detaylı çalışmalar yürütmekte ve hatta çalışmalarını sahada da uygulamaktadırlar.

Bu çalışma, dünyadaki bor rezervlerinin yaklaşık% 70' ini bünyesinde bulunduran Eskişehir ve çevre illerde oluşan bor atıklarının yol yapım endüstrisi hizmetinde kullanmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, bu araştırma, agrega ve bitüm modifikasyon teknikleri ile hazırlanan asfalt beton numunelerinin performans özelliklerini ve kullanılabilirliğini incelemektedir. Numuneler, Öğütülmüş Atık Bor (ÖAB), Susuz Boraks (SB) ve Boraks Pentahidrat (BP) gibi atık bor katkı maddeleri ile oluşturulmuştur. Asfalt betonu numunelerine Marshall Dizayn Testleri ve Sünme Testleri uygulanmıştır, test sonuçları bu üç malzeme ile de şartnamelere uygun asfalt üretimi gerçekleştirilebileceğini kanıtlamıştır. Bununla beraber, ÖAB kullanımının dayanım, uzun ömürlülük, ekonomi, çevresel etki ve sürdürülebilirlik açısından daha uygun olduğu söylenmiştir.

Ayrıca, elde edilen verilerin değerlendirilmesinde bir yapay sinir ağı (YSA) modeli oluşturulmuştur. Modelin incelenmesi ve istatistiksel analizlerin neticesinde, ÖAB ilavesi yapılan ve yapılmayan asfalt betonu örneklerinin mekanik performansları önceden tahmin edilebilir duruma getirilmiştir. Regresyon analizi sonuçlarına göre; Stabilitate bulguları için r^2 değerleri eğitim ve test seti için sırasıyla 0.95 ve 0.91 akma bulguları için ise r^2 değerleri eğitim ve test seti için 0.91 ve 0.87 olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, atık bor katkı maddeleri ile oluşturulacak yol üretimleri, atık depolarının neden olduğu çevre kirliliğini ortadan kaldıracak ve sürdürülebilir yaşam için önemli faydalar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Asfalt Betonu, Atık Bor, Marshall Deneyi, Sünme Deneyi, Yapay Sinir Ağları, Geri Dönüşüm, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

THE EFFECT AND MODELING OF ENVIRONMENTAL BORON WASTES ON THE PERFORMANCE OF HOT MIX ASPHALTS

Mustafa KESKİN

Department of Civil Engineering

Eskişehir Technical University, Graduate School of Sciences, May 2019

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat KARACASU

Recycling and sustainability concepts have recently come into prominence in pavement engineering as in other fields due to global warming. Pavement engineers conduct detailed studies on the production of asphalt concrete with recycled materials and apply their studies in work-site environment.

This study aims to use boron wastes which formed in Eskişehir and surrounding provinces that hold nearly 70% of the world's boron reserves to the service of road construction industry. Furthermore, this research examines the performance characteristics and usability of asphalt concrete specimens prepared by aggregate and bitumen modification techniques. Specimens are composed by boron waste additive materials such as Crushed Boron Waste (CBW), Borax pentahydrate (BP) and Borax Anhydrous (BA). Asphalt concrete specimens are applied Marshall Design tests and creep tests. Test results prove that these three materials comply with the specifications. However, usage of CBW is considered to be more suitable in terms of strength, long service life, financial, environmental and sustainability aspects.

Besides, an artificial neural network (ANN) model was created for the evaluation of obtained data. Furthermore, examination of modelling and statistical analysis, mechanical performance of asphalt concrete samples with and without CBW addition has been predicted in noticeable manner. As a result of regression analysis, training and test sets r^2 values are reached 0.95-0.91 for stability and 0.91-0.87 for flow values.

Finally, boron waste additives which used in road constructions by this technique will remove the environmental pollution caused by waste storages and provide significant profit in regard to sustainable life.

Keywords: Asphalt Concrete, Boron Waste, Marshall Test, Creep Test, Artificial Neural Networks, Recycling, Sustainability.

TEŞEKKÜR

Bu tezin her aşamasında benden hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilgileriyle çalışmalarına ışık tutan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Murat KARACASU' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesi üyeleri Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali ULU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şafak BİLGİÇ' e komite toplantılarında çalışmama yaptıkları eklemeler ve değerli fikirleri için teşekkür ederim.

Ayrıca jüri üyeleri Prof. Dr. Ahmet TUNCAN ve Dr. Öğr. Üyesi Polat YALINIZ' a da çalışmalarına yapmış oldukları değerlendirmeleri ve yorumları için teşekkür ederim.

Uzun yıllar süren eğitim-öğretim hayatımda bana maddi manevi her türlü desteği sunan anne babama, özellikle konuşmalarıyla beni sürekli motive eden ablam Dr. Selda Keskin GÜLER ve hayatıma sonsuz neşe kaynağı olan, özellikle son dönem çalışmalarında yardımlarını benden esirgemeyen kardeşim Mak. Müh. Seyfettin Can KESKİN' e teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarında her türlü yardımı sonsuz bir istekle gerçekleştiren Sayın İnş. Yük. Müh. Zeynel Baran YILDIRIM' a ve isimlerini tek tek sayamayacağım ama her birinin ufakta olsa katkısı olduğunu bildiğim, 2016 güz dönemi ile 2018 bahar dönemi arası Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Ulaştırma Bilim Dalı' nda lisans bitirme tezlerini hazırlamış öğrencilere tek tek teşekkür ederim.

Ayrıca bu tezin oluşmasında sonsuz destek sunan Turna Yapı Denetim Ltd. Şti., Ulurmak Yapı Denetim Ltd. Şti. ve UT Plan Proje İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti. ailelerine ve doktora çalışmalarına başlamam konusunda beni yüreklendiren Sayın İnş. Müh. Özcan BADIN ile Sayın İnş. Müh. Fesih BİNGÖL' e şükranlarımı sunarım.

Son olarak Yüksek Lisans tez danışmanım, Ulaştırma Ana Bilim dalında teorik bilgileriyle beni donatan ayrıca manevi yardımlarıyla her zaman yanımda olan Sayın Prof. Dr. Serkan TAPKIN' a yardımlarından ötürü sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Mustafa KESKİN

Mayıs-2019

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

.....

Mustafa KESKİN

24/06/2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
GÖRSELLER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. BOR	3
2.1. Bor Mineralleri ve Bileşimleri	3
2.2. Borun Tarihçesi.....	6
2.3. Bor Atıkları	8
2.3.1. Kırka bor işletmesi ve atıkları.....	10
2.4. Bor Atıklarının İnşaat Sektöründe Kullanımı	12
2.4.1. Seramik üretimi	12
2.4.2. Duvar karosu üretimi	14
2.4.3. Yer karosu üretimi	15
2.4.4. Tuğla üretimi	16
2.4.5. Çimento üretimi	18
2.4.6. Asfalt betonu üretimi	22
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK)	25
3.1. Agrega.....	26
3.1.1. Agregaların mineralojik sınıflandırması	27
3.1.2. Agregaların boyut sınıflandırması	27
3.1.3. Agregaların biçim sınıflandırması.....	27
3.1.4. Agregaların boşluk ve yüzey alanı sınıflandırması	28

3.1.5.	Agregaların özgül ağırlık sınıflandırması	29
3.1.6.	Agregaların porozite sınıflandırması	29
3.1.7.	Agregaların yüzey yapısı sınıflandırması.....	30
3.2.	Bitüm	31
3.2.1.	Bitümün yüksek sıcaklık davranışı.....	32
3.2.2.	Bitümün düşük sıcaklık davranışı	33
3.2.3.	Bitümün normal sıcaklık davranışı	33
3.2.4.	Bitümün yaşlanma davranışı.....	33
3.3.	Bitüm Modifikasyonu	34
3.4.	Bitümlü Malzemelerin Deformasyon Davranışı ve Reolojik Özellikleri	36
3.4.1.	Kaplama performansı	37
3.4.2.	Esnek kaplamalarda oluşan gerilme ve deformasyonlar...	39
3.4.3.	Bitümlü malzemelerin reolojik özellikleri ve sünme davranışı	44
4.	YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA).....	49
4.1.	Yapay Sinir Ağları Hakkında Genel Bilgiler	49
4.2.	Matematiksel Nöron Modeli	53
4.2.1.	Nöron dinamiği.....	53
4.2.2.	Aktivasyon fonksiyonları	54
4.2.3.	Sınıflandırma problemi.....	56
4.2.4.	En küçük kareler yöntemi	57
4.3.	Yapay Sinir Ağlarının Kullanım Alanları	59
4.3.1.	Endüstriyel uygulamalar	60
4.3.2.	Finansal uygulamalar	61
4.3.3.	Askeri uygulamalar.....	61
4.3.4.	Sağlık uygulamaları	62
4.3.5.	Diğer alanlar.....	62
4.4.	Yapay Sinir Ağı Yapıları	63
4.4.1.	İleri beslemeli yapay sinir ağları	63
4.4.2.	Geri beslemeli yapay sinir ağları	64
4.4.3.	Radyal tabanlı fonksiyon ağları.....	64

4.4.4.	Hopfield yapay sinir ağırları	65
4.4.5.	Kohonen yapay sinir ağırları	66
4.5.	Yapay Sinir Ağlarının Kısa Tarihi	68
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	69
5.1.	Agrega Deneyleri.....	69
5.1.1.	Kaba agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlığının tayini..	70
5.1.2.	İnce agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlığının tayini....	71
5.1.3.	Mineral filler zahiri özgül ağırlığının tayini.....	73
5.1.4.	Agrega birim hacim ağırlık deneyi.....	74
5.2.	Bitüm Deneyleri	75
5.2.1.	Penetrasyon deneyi.....	76
5.2.2.	Yumuşama noktası deneyi	77
5.2.3.	Parlama noktası deneyi.....	79
5.2.4.	İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi.....	80
5.2.5.	Düktilite deneyi	81
5.2.6.	Özgül ağırlık deneyi	82
5.2.7.	Dönel viskozite deneyi.....	84
5.3.	Bor İçeren Katkı Malzemelerin Karakterizasyonu	90
5.4.	Agrega Modifiyesi	96
5.5.	Bitüm Modifiyesi.....	99
5.6.	Marshall Tasarımı.....	106
5.6.1.	Asfalt betonu numunelerinin hazırlanması.....	107
5.6.2.	Marshall stabilite ve akma deneyi	108
5.6.3.	Optimum bitüm oranı (OBO) hesaplanması.....	109
5.6.4.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol ve agrega modifiyeli numunelerin marshall tasarımı sonuçları	112
5.6.5.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol ve agrega modifiyeli numunelerin marshall tasarımı sonuçları	136
5.6.6.	50/70 Penetrasyonlu bitümün modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin marshall tasarımı sonuçları	147

5.7.	Sünme Deneyi.....	157
5.7.1.	Agrega modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin sünme deneyi sonuçları.....	162
5.7.2.	Bitüm modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin sünme deneyi sonuçları.....	167
5.8.	Ekonomik Analiz, Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik.....	172
5.9.	Agrega Modifiyesi ve Bitüm Modifiyesinin Karşılaştırılması	178
5.10.	Yapay Sinir Ağı Çalışmaları.....	179
5.10.1.	Yapay sinir ağı modeli seçimi ve yapay sinir ağı mimarisi	181
5.10.2.	Yapay sinir ağı çıktıları	184
5.10.3.	Yapay sinir ağı ile oluşturulan simülasyon	188
6.	SONUÇLAR.....	191
	KAYNAKÇA	198
	ÖZGEÇMİŞ.....	215

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Ticari önemi olan bor mineralleri.....	4
Tablo 2.2. Rafine bor bileşikleri	4
Tablo 2.3. Bazı bor minerallerin mineralojik özellikleri.....	5
Tablo 2.4. Devletçe işletilmesi öncesi ve sonrası bor	8
Tablo 5.1. Aşınma tabakası Tip-1 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri.....	69
Tablo 5.2. Kaba agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi	71
Tablo 5.3. İnce agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi	73
Tablo 5.4. Mineral fillerin zahiri özgül ağırlık değeri.....	74
Tablo 5.5. Agrega özgül ağırlıkları.....	74
Tablo 5.6. Birim hacim ağırlıkları.....	75
Tablo 5.7. Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümün özellikleri	76
Tablo 5.8. Penetrasyon deneyi sonuçları.....	76
Tablo 5.9. Yumuşama noktası deneyi sonuçları	79
Tablo 5.10. Bitüm özgül ağırlık deneyi sonuçları.....	83
Tablo 5.11. 135°C’ de 50/70 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	88
Tablo 5.12. 165°C’ de 50/70 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	89
Tablo 5.13. 135°C’ de 70/100 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	89
Tablo 5.14. 165°C’ de 70/100 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	90
Tablo 5.15. Bor içeren katkı malzemelerin fiziksel özellikleri.....	93
Tablo 5.16. Bor içeren katkı malzemelerin kimyasal içerikleri.....	95
Tablo 5.17. ÖAB modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri.....	101
Tablo 5.18. ÖAB modifiyeli bitümün yumuşama noktası değerleri.....	101
Tablo 5.19. ÖAB modifiyeli bitümün özgül ağırlık değerleri.....	102

Tablo 5.20.	135°C' de %5ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	102
Tablo 5.21.	165°C' de %5ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	103
Tablo 5.22.	135°C' de %10ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	103
Tablo 5.23.	165°C' de %10ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	104
Tablo 5.24.	135°C' de %15ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	104
Tablo 5.25.	165°C' de %15ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri	105
Tablo 5.26.	Asfalt betonu dizayn kriterleri.....	111
Tablo 5.27.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin marshall deney föyü.....	112
Tablo 5.28.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	114
Tablo 5.29.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	116
Tablo 5.30.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	118
Tablo 5.31.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 SB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	120
Tablo 5.32.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 SB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	122
Tablo 5.33.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 BP agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	124
Tablo 5.34.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 BP agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	126
Tablo 5.35.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış kontrol numunelerin OBO hesabı	128

Tablo 5.36.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	128
Tablo 5.37.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 ÖAB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	128
Tablo 5.38.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %15 ÖAB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	128
Tablo 5.39.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 SB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	129
Tablo 5.40.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 SB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	129
Tablo 5.41.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 BP agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	129
Tablo 5.42.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 BP agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	129
Tablo 5.43.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış agr. modifiyeli numunelerin OBO değerleri.....	135
Tablo 5.44.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin marshall deney f6yü	136
Tablo 5.45.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney f6yü	138
Tablo 5.46.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney f6yü	140
Tablo 5.47.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney f6yü	142
Tablo 5.48.	70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış kontrol numunelerin OBO hesabı	144
Tablo 5.49.	70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 ÖAB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	144
Tablo 5.50.	70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 ÖAB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	144
Tablo 5.51.	70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %15 ÖAB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	144

Tablo 5.52.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış agr. modifiyeli numunelerin OBO değerleri.....	146
Tablo 5.53.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin marshall deney föyü.....	147
Tablo 5.54.	%5 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin marshall deney föyü	149
Tablo 5.55.	%10 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin marshall deney föyü.....	151
Tablo 5.56.	%15 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin marshall deney föyü.....	153
Tablo 5.57.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin OBO hesabı	155
Tablo 5.58.	%5 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	155
Tablo 5.59.	%10 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	155
Tablo 5.60.	%15 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin OBO hesabı.....	155
Tablo 5.61.	Bitüm modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin OBO değerleri..	157
Tablo 5.62.	%5 Agregada modifiyesi ile oluşturulmuş 1km' lik yolun maliyet analizi.....	173
Tablo 5.63.	%10 Agregada modifiyesi ile oluşturulmuş 1km' lik yolun maliyet analizi.....	173
Tablo 5.64.	Farklı oranlarda bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş 1km' lik yolun maliyet analizi.....	173
Tablo 5.65.	Numunelerin ortalama fiziksel ve mekanik özellikleri.....	181
Tablo 5.66.	YSA eğitiminde kullanılan geri yayılım algoritmaları.....	182
Tablo 5.67.	Tanımlayıcı istatistik verileri	184
Tablo 5.68.	Doğruluk ölçüsü	184

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Bor atıklarının sektörde kullanım alanları.....	10
Şekil 2.2. Bor asidi katkısı ile oluşturulmuş karışımın genel reaksiyon formülü	23
Şekil 3.1. Agregaların iki boyutlu dane biçim sınıflandırması	28
Şekil 3.2. Agregaların üç boyutlu dane biçim sınıflandırması.....	28
Şekil 3.3. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri.....	29
Şekil 3.4. Poroz sınıflandırması	30
Şekil 3.5. Agregaların pürüzlülük sınıflandırması	30
Şekil 3.6. Bitümün sıcaklığa göre yük altındaki davranışı	31
Şekil 3.7. Bitümün zaman ve sıcaklığa göre davranışı.....	32
Şekil 3.8. Bitümün sıvı akış özelliklerinin mikroskopik görünüşü	33
Şekil 3.9. Zaman-hizmet seviyesi ilişkisi	40
Şekil 3.10. Teker yükünün kaplama ve zeminde yarattığı gerilmeler ve deformasyon	41
Şekil 3.11. Çok tabakalı sistemde gerilmeler.....	42
Şekil 3.12. Tipik sünme eğrisi.....	46
Şekil 3.13. Yıkım anına kadar olan tekrarlı sünme eğrisi.....	47
Şekil 3.14. Gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamanla değişimi.....	48
Şekil 3.15. Tekrarlı yük altında oluşan deformasyon zaman grafiği.....	48
Şekil 4.1. Bir sinir hücresi.....	50
Şekil 4.2. Gerçek bir sinir hücresi ile yapay sinir hücresinin benzer kısımları.....	51
Şekil 4.3. Yapay bir nöronun yapısı	53
Şekil 4.4. (a):Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu (b):Hiperbolik tanjant tipi aktivasyon fonksiyonu (c):Sert geçişli aktivasyon fonksiyonu	55
Şekil 4.5. Değişik λ değerleri için Formül 4.8. ile tanımlanan fonksiyonun görünümü.....	56
Şekil 4.6. İki sınıflı bilginin lineer bir ayıraç ile ayrıştırılması.....	57

Şekil 4.7.	Kuadratik maliyet fonksiyonu	58
Şekil 4.8.	İleri beslemeli YSA yapısı.....	63
Şekil 4.9.	Geri beslemeli YSA yapısı	64
Şekil 4.10.	Radyal tabanlı fonksiyon ağ yapısı	65
Şekil 4.11.	Hopfield ağ yapısı	66
Şekil 4.12.	Kohonen ağ yapısı.....	67
Şekil 5.1.	Gradasyon Eğrisi.....	70
Şekil 5.2.	Brookfield termosel viskozimetresi ve parçaları	84
Şekil 5.3.	Spindle' in alete takılması	85
Şekil 5.4.	Viskozimetrenin şematik görünüşü.....	85
Şekil 5.5.	SC4-27 numaralı spindle boyutları	86
Şekil 5.6.	%15 atık bor katkısı ile modifiye edilmiş agregaların ölçekli balon diyagramı	96
Şekil 5.7.	Birinci senaryo için gradasyon eğrisi.....	98
Şekil 5.8.	İkinci senaryo için gradasyon eğrisi.....	98
Şekil 5.9.	Kontrol numuneleri ile ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi karşılaştırmaları	106
Şekil 5.10.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	113
Şekil 5.11.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	115
Şekil 5.12.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	117
Şekil 5.13.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	119
Şekil 5.14.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 SB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	121

Şekil 5.15.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 SB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	123
Şekil 5.16.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 BP agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	125
Şekil 5.17.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 BP agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	127
Şekil 5.18.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış farklı oranlardaki ÖAB ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	131
Şekil 5.19.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış farklı oranlardaki SB ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	132
Şekil 5.20.	50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış farklı oranlardaki BP ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	133
Şekil 5.21.	50/70 Penetrasyonlu bitümle %10 oranında bor atıkları kullanılarak agrega modifiyesiyle oluşturulmuş numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	134
Şekil 5.22.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	137
Şekil 5.23.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	139
Şekil 5.24.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	141

Şekil 5.25.	70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	143
Şekil 5.26.	70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış farklı oranlardaki ÖAB ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	145
Şekil 5.27.	50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri	148
Şekil 5.28.	%5 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri.....	150
Şekil 5.29.	%10 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri.....	152
Şekil 5.30.	%15 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri.....	154
Şekil 5.31.	Farklı oranlardaki ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	156
Şekil 5.32.	Sünme deneyi programı.....	160
Şekil 5.33.	Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – zaman grafiği (statik)	162
Şekil 5.34.	Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – zaman grafiği (statik)	163
Şekil 5.35.	Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)	164
Şekil 5.36.	Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)	165
Şekil 5.37.	Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – zaman grafiği (statik)	168
Şekil 5.38.	Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – zaman grafiği (statik)	169
Şekil 5.39.	Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)	170

Şekil 5.40.	Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)	171
Şekil 5.41.	Maliyet analizi	176
Şekil 5.42.	Stabilite – ÖAB oranı – Bitüm oranı grafiği	180
Şekil 5.43.	Hava boşluğu – ÖAB oranı – Bitüm oranı grafiği.....	180
Şekil 5.44.	YSA mimarisi	183
Şekil 5.45.	Stabilite değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve eğitim seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi.....	186
Şekil 5.46.	Akma değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve eğitim seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi.....	187
Şekil 5.47.	Stabilite değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve test seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi.....	187
Şekil 5.48.	Akma değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve test seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi.....	188
Şekil 5.49.	Simülasyonun oluşturulması.....	189
Şekil 5.50.	Simülasyon sonuçlarının alınması	189
Şekil 5.51.	Simülasyon sonucu oluşturulmuş 3 boyutlu Stabilite, Bitüm oranı ve ÖAB oranı grafiği.....	190
Şekil 5.52.	Simülasyon sonucu oluşturulmuş 3 boyutlu Marshall Oranı, Bitüm oranı ve ÖAB oranı grafiği	190

GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel 2.1. a:28 günlük %5 bor atığı katkılı çimento harcı SEM görüntüleri b:%10 pirinç kabuğu külü katkılı çimento harcı SEM görüntüleri.....	21
Görsel 2.2. Bor asidi katkısı ile oluşturulmuş karışımın görüntüsü.....	23
Görsel 2.3. Bor atıklarının çevreye etkisi.....	24
Görsel 5.1. Penetrasyon deneyi aleti.....	77
Görsel 5.2. Yumuşama noktası deneyi.....	78
Görsel 5.3. Numunenin parladığı an	80
Görsel 5.4. İnce film halinde ısıtma kaybı deney aleti.....	80
Görsel 5.5. Düktilite deneyi.....	82
Görsel 5.6. Bitümün piknometrelere doldurulması.....	83
Görsel 5.7. Rheocalc T 1.1.13 programı	87
Görsel 5.8. Brookfield viskozitemetresi deney seti	87
Görsel 5.9. Boraks Pentahidrat (BP)	91
Görsel 5.10. Susuz Boraks (SB)	91
Görsel 5.11. Atık bor sahası	92
Görsel 5.12. Öğütülmüş Atık Bor (ÖAB)	92
Görsel 5.13. ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi (X500)	93
Görsel 5.14. ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi (X1100)	94
Görsel 5.15. ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi (X1500)	94
Görsel 5.16. Öğütülmüş atık bor modifiyesi işlemi.....	100
Görsel 5.17. Asfalt betonu numunesi hazırlanması	107
Görsel 5.18. Marshall Stabilite ve akma deneyi.....	109
Görsel 5.19. Sünme deney seti aletleri.....	158
Görsel 5.20. Yükleme çerçevesine yerleştirilmiş numune ve sünme deneyi yazılımı.....	159
Görsel 5.21. Bitümün ÖAB ile modifiyesi sonucu oluşturulmuş numunelerin sünme deneyi sonrası görüntüleri.....	167

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ε_l	= Boyuna (eksenel) deformasyon
ε_r	= Yanal deformasyon
l	= Yükseklik
Δl	= Çekmede uzama veya basınçta kısalma miktarı
σ	= Gerilme
μ	= Poisson oranı
E	= Elastisite modülü
$H_{(t)}$	= Heaviside fonksiyonu
$\delta_{(t)}$	= Dirac delta fonksiyonu
$\varphi(t)$	= Sünme fonksiyonu
$\sigma_{(z)}$	= z anındaki basınç gerilmesi
$\varepsilon_{(t)}$	= t anındaki birim deformasyon
t ve z	= zaman, saniye
W_{ij}	= İki bitişik katman arasındaki j inci ve i inci nöronlar arası ağırlık
θ_j	= j inci nöron eşiği
O_i	= i inci nöronun çıktısı
O_j	= j inci nöronun çıktısı
$f(\cdot)$	= Sigmoid fonksiyonu
$\Psi(S)$	= Nöron aktivasyon fonksiyonu
C	= Gözlenen parlama noktası
K	= Ortamın barometrik basıncı
G_{ag}	= Agreganın Özgül Ağırlığı
D_t	= Maksimum Teorik Özgül Ağırlık
%KA	= Kaba Agregaya Yüzdesi
%İA	= İnce Agregaya Yüzdesi
%F	= Filler Yüzdesi
%B	= Bitüm Yüzdesi
G_{KA}	= Kaba Agregaya Özgül Ağırlığı
$G_{İA}$	= İnce Agregaya Özgül Ağırlığı
G_F	= Filler Özgül Ağırlığı
G_B	= Bitüm Özgül Ağırlığı

h	= numune ortalama yüksekliği
h_1	= ilk yüklemedeki h değeri
h_n	= n inci yüklemedeki h değeri
H	= numune yüksekliği
ε_n	= n inci yükleme sonunda oluşan birim deformasyon
E_n	= n inci yükleme sonunda oluşan sünme rijitliği
BSK	= Bitümlü Sıcak Karışım
YSA	= Yapay Sinir Ağı
agr.	= Agrega
BHA _s	= Sıkı Birim Ağırlık
BHA _g	= Gevşek Birim Ağırlık
BP	= Boraks Pentahidrat
SB	= Susuz Boraks
AB	= ğtlmş Atık Bor
D _p	= Birim Ağırlık
V _h	= Hava Boşluğu
V _f	= Bitümle Dolu Boşluk
VMA	= Mineral Agregadaki Boşluk
MS	= Marshall Stabilitesi
MO	= Marshall Oranı
OBO	= Optimum Bitüm Oranı
SEM	= Taramalı Elektron Mikroskobu
XRF	= Dalgaboyu Dağılımlı X-ışını Floresans Spektrometresi
ICP-MS	= İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi
LVDT	= Linear Variable Displacement Transducers
MAE	= Ortalama Mutlak Hata
MSE	= Ortalama Kare Hata
RMSE	= Kök Ortalama Kare Hata

1. GİRİŞ

İnşaat Mühendisliği bilimi sırasıyla dört kurala göre hareket eder; emniyet, ekonomi estetik ve çevreyi en az kirletme. Verilen sıralama doğrultusunda mühendisler geçmişten beri çalışmalarını sürdürmüş ve günümüz yaşam koşullarında insanların her türlü bayındırlık hizmetlerine çözümler üreten bir meslek dalı haline gelmiştir. Son yıllarda küresel ısınmanın da etkileriyle geri dönüşüm kavramı her alanda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da çok önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Emniyeti bir kenara bırakmadan ekonomik anlamda faydalar sağlayan geri dönüşüm hizmetleri inşaat sektöründe sık sık kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle ulaştırma mühendisleri için geri dönüştürülebilir asfalt betonu üretiminde son derece değerli çalışmalar yapılmakta ve hatta uygulanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, çevre kirliliğine yol açan atık depolarının geri dönüştürülebilir bir halde asfalt üretiminde kullanılmasının yollarını aramaktır. Dünya bor minerali rezervinin yaklaşık %70' lik bir dilimini bünyesinde barındıran Eskişehir ve çevre illerde oluşan atık borun bir şekilde sektörün hizmetine sokulması amaçlanmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde bor mineralleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve borun tarihçesi araştırılmıştır. Daha sonra bor atıklarının oluşumu hakkında detaylı bilgiler verilmiş ve bu atıkların inşaat sektöründe kullanımı hakkında literatür çalışması yapılmıştır. Ülkemiz bu atıkları inşaat sektörüne sokma çabasına diğer ülkelere göre çok daha fazla uğraş göstermektedir. Bu atıkların yol inşaatlarında kullanımı ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Üçüncü bölüm de Bitümlü Sıcak Karışımları (BSK) hakkında bilgi verilmiştir. Yolu oluşturan agrega ve bitüm hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Bitüm modifikasyonu ve BSK' ların gerilme ile oluşan deformasyon özellikleri ve reolojik özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde Yapay Sinir Ağlarının (YSA) çalışma mekanizması ve nöronların matematiksel işleyişi verilmiştir. Ayrıca yapay sinir ağlarının uygulamaları ve kaplama mühendisliğindeki son dönem kullanımları hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölüm deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Kullanılan malzemelerin genel bilgileri, deneysel sonuçları ayrıca bor içeren katkı malzemelerinin SEM görüntüleri ve

kimyasal içerikleri ile oluşturulan numunelerin deneysel sonuçları yorumlarıyla birlikte bu bölümde verilmiştir.

Oluşturulan numuneler ile ilgili deneysel çalışmaların birinci aşamasında agrega modifikasyonu yapılmıştır. 1.18mm' lik elek altında kalan ince ve filler malzemenin yerine, değişik oranlarda (%5, %10 ve %15) Öğütülmüş Atık Bor (ÖAB), Etibor-48 (Boraks Pentahidrat [BP]) ve Etibor-68 (Susuz Boraks [SB]) malzemeler kullanarak elde ettiğimiz asfalt betonu numunelerinin performansları araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarına göre, 50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan numuneler için; üç malzemenin de kullanımının gerekli şartnamelere uygun olduğu ispatlanmıştır. Özellikle sünme deneyi sonuçları %10 oranında ÖAB katkısının normal numunelere göre asfalt betonu numunelerinin servis ömrünü uzattığını göstermiştir. Ancak 70/100 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan numuneler gerekli şartname değerlerini sağlayamamıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise ÖAB ile modifiye edilen bitümün numuneler üzerine etkileri incelenmiş özellikle sünme sonuçları ile numunelerin davranışları anlaşılmasına çalışılmıştır. Bu aşamada sünme deneyi sonuçları özellikle belirleyici olmuş, bitümün viskoz yapısında gözlemlenen iyileşmeler karışım numunelerinde görülebilmiştir. Özellikle ÖAB oranının artması, numunelerde bozulmalara ve deformasyonların artmasına sebep olmaktadır.

Çalışmalar ekonomik analizlerle devam etmiş, bu yöntem ile oluşturulacak yolların sürdürülebilir bir çevre anlamındaki etkileri incelenmiştir.

Deneysel çalışmaların son aşamasında ise YSA ile bir model oluşturulmuştur. Daha önceden hazırlanan numuneler ile oluşturulan bu model ile ağın daha önceden hiç görmediği numunelerin test sonuçları son derece başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Ayrıca bu modellemede simülasyon oluşturulmuş ve simülasyon sonuçlarına göre agregaların ÖAB modifiyesi ile performansları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Sonuçlar ve öneriler kısmında ise tüm çalışma boyunca elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve ileride yapılacak olan çalışmalar için çeşitli önerilerde bulunulmuştur. Sonuç olarak bor atığı kullanımı ile çevresel kirlilik önlenilecek ve sürdürülebilir yaşam sağlanabilecektir.

2. BOR

Periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer alan ve atom numarası 5 olan bor elementi, kütle numaraları 10 ve 11 olmak üzere iki kararlı izotopa sahiptir. Atom ağırlığı 10.81 g/mol, erime noktası 2200°C, kaynama noktası 2500°C ve yoğunluğu 2.33 g/cm³ tür. Kristal yapılı elementel bor fiziksel görünüm ve optik özellikleri bakımından elmasa benzer ve hemen hemen elmas kadar serttir [1].

Bor, kayalarda, toprakta ve suda kısaca her yerde bulunabilen bir elementtir. Yeryüzü topraklarının çoğu içeriğinde en fazla 10ppm olacak şekilde bor bulundurmaktadır; Özellikle Birleşik Devletlerin batısında bazı bölgelerde ve Akdeniz’ den Kazakistan’ a kadar uzanan diğer bölgelerde yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar. Ortalama toprak bor konsantrasyonu 10 ila 20 ppm miktarındadır. Deniz suyu ise 0.5 ila 9.6 ppm aralığında ortalama 4.6 ppm bor içerir [2,3].

Yüksek konsantrasyonlu, ekonomik boyutta bor mineral yataklarındaki borlar her zaman oksijenle bağlı bileşikler şeklinde volkanizma veya hidrotermal aktivite geçmişi olan kurak bölgelerde bulunur. Bu tür bor katmanları Türkiye’ de, ABD’ de ve diğer bazı ülkelerden elde edilmektedir [4].

2.1. Bor Mineralleri ve Bileşimleri

Doğadaki yaklaşık 150 mineralin bor elementi içerdiği bilinmesine rağmen, ticari açıdan değerlendirilen bor mineralleri kolemanit, üleksit, boraks, pandemit, hidroborasit, kernit, szaybelit ve probertit olarak sınırlı sayıdadır. Bu bor mineralleri içerdikleri B₂O₃ (bor trioksit) yüzdelerine göre endüstride pazarlanırlar. Bor minerallerine bazı özel isimler verilmemiş, bunun yerine birleştikleri yani kimyasal olarak içerdikleri katyon veya katyonların adlarıyla adlandırılmıştır (sodyum borat, kalsiyum borat, kalsiyum-magnezyum borat vb). Tablo 2.1’ de ticari önemi olan bor mineralleri, Tablo 2.2’ de işlenmiş rafine bor bileşikleri, Tablo 2.3’ de de bazı bor minerallerinin mineralojik özellikleri verilmiştir [1].

Yer kabuğundan çeşitli yöntemler ile (delme, patlatma, gevşetme gibi) çıkartılan bor cevherlerine bazı zenginleştirme işlemleri (yıkama, eleme, flotasyon gibi) uygulanmaktadır. Elde edilen zenginleştirilmiş mineraller daha ileri bir işlem uygulanmaksızın tüketilebildiği gibi, ileri kimyasal işlemler uygulanarak rafine ve uç ürünlere de dönüştürülmektedir [1].

Tablo 2.1. Ticari önemi olan bor mineralleri [1]

Mineralin Adı	Basit Formülü	B ₂ O ₃ (%)	Bulunduğu Yer
Boraks (Tinkal)	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5	Kırka, Emet, Bigadiç, A.B.D
Kernit (Razolit)	Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O	51,0	Kırka, A.B.D, Arjantin
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43,0	Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8	Bigadiç, Emet, Küçükler, A.B.D
Probertit	NaCaB ₅ O ₉ .5H ₂ O	49,6	Kestelek, Emet, A.B.D
Pandermit	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ . H ₂ O	49,8	Bigadiç, Sultançayır
Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Almanya
Szaybelit	MgBO ₂ (OH)	41,4	Çin, Kazakistan
Hidroborasit	CaMgBO ₁₁ .6H ₂ O	50,5	Emet

Borat-mineral konsantreleri ve rafine ürünler dünya çapında üretilip satılmaktadırlar. Çok çeşitli şekillerde kullanımları mevcuttur. Cam ve ilgili vitre uygulamalarında, çamaşır ağartıcılarında, yangın geciktiricilerde, gübrelerde mikro besinler olarak ve diğer birçok amaç için kullanılırlar [5]. Özellikleri nedeni ile borun kullanım alanı araştırmaları halen devam etmektedir. Son yıllarda borun enerji sektörü, tarım, insan ve hayvan sağlığı alanlarında kullanımına yönelik araştırmalar daha da yoğunlaşmıştır [6].

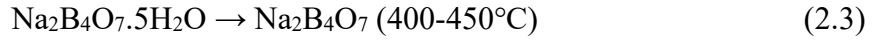
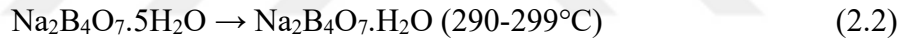
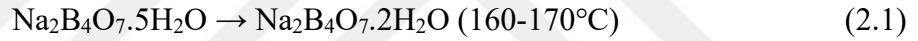
Tablo 2.2. Rafine bor bileşikleri [1]

Bileşik	Kimyasal Formülü	%B ₂ O ₃ (%)	% H ₂ O (%)
Susuz Borik Asit	B ₂ O ₃	100,0	0,0
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,2	0,0
Borik Asit	H ₃ BO ₃	56,4	43,6
Boraks Pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47,8	30,9
Boraks Dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5	47,2
Sodyum Perborat Tetrahidrat	NaBO ₃ .4H ₂ O	22,7	46,8
Sodyum Perborat Monohidrat	NaBO ₃ .H ₂ O	34,8	18,0

Tablo 2.3. Bazı bor minerallerin mineralojik özellikleri [1]

Mineralin Adı	Renği	Yoğunluk	Sertlik	Kristal Şekli	Diğer Özellikleri	Bulunduğu Yer
Arobertite	Şeffaf	2,14	3,6	Monoklinik	Radyal prizma	A.B.D
Akzinit	Gri,Bal Rengi	3,27	7	Triklinik	Yassı kristaller, Cam Parlaklığı	A.B.D, İtalya, Fransa, Japonya
Boraks	Beyaz Mavimsi	1,7	2,5	Monoklinik Prizmatik	Cam gibi,suda erir	Kaliforniya Türkiye
Borasit	Beyaz	2,9	7	Ortorombik	Şeffaf	A.B.D
Dereameievit	Açık sarı	3,28	6,5	Ortorombik Hegzagonal	Hegza ptizmalar Camsı parl	Baykan dağları
Havlit	Beyaz	2,58	3,5	Monoklinik	Yarı camsı parl	Türkiye,A.B.D
Hidroborasit	Beyaz	2	2	Monoklinik	İpek parlaklığı	Saksonya Kaliforniya
İnyoit	Beyaz	1,87	2	Monoklinik	Alevde çıtırdar	Türkiye A.B.D
Kolemanit	Beyaz	2,42	4	Monoklinik Prizmatik	Ateşte çıtırdar	Türkiye Arjantin
Kernit	Beyaz	1,95	3	Monoklinik	İnci gibi parlar	Kaliforniya
Kapelenit	Yeşil Kahve	4,4	6	Hegazagonal	Prizmatik İtriyum içerir	Norveç
Komolit	Siyah	3,38	5	Monoklinik	Kolay alev alır	Norveç
Manandonit	Beyaz	2,89	2,5	Ortorombik Monoklinik	İnci gibi ipek parl	Madagaskar
Mayehoffarit	Beyaz	2,12	2	Triklinik	Kristalleri camsı	Türkiye A.B.D
Pinakiolit	Siyah	3,88	6	Ortorombik Monoklinik	Metalik parlaklığı	İsveç
Pandermit	Beyaz	2,4	3,5	Triklinik	Mikroskobik rombik levhalar	Türkiye Arjantin
Sassolit (Borikasit)	Beyaz	1,48	1	Triklinik	İnce renkli sedef parlaklığı	İtalya volkan krateri
Üleksit	Beyaz	1,97	2,5	Monoklinik Prizmatik	İpliğimsi kristaller	A.B.D, Şili Türkiye, Arjantin

Bor cevherlerinden boraks, genel olarak kristallendirme yöntemi ile elde edilmektedir. Boraks, genellikle doğada Tinkal ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve Tinkalkonit ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) şeklinde bulunmaktadır. Türkiye’ de boraks üretimi tinkal’ den yapılmaktadır. Yaklaşık 10 mm boyutundaki konsantre tinkal, su ile birlikte reaktöre beslenir ve yaklaşık 100°C ’ de çözünme sağlanır. Tinkalde bulunan kil kolloidal halde olduğundan, uygun bir çöktürücü ile çöktürülerek çözeltiden ayrılır. Bu çökelek şlam olarak adlandırılmaktadır. Boraks çözeltisi ise bir filtrepresten geçirilerek, kristalizatöre verilir. 40°C ’ de kristallendirilen boraks, bir santrifüje verilerek %5 nem ihtiva edecek şekilde alınır. Daha sonra 60°C ’ de kurutulurak depolanır. Boraksların ticari açıdan en önemlileri, sodyum tetraborat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), boraks pentahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ve susuz boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)’ tır. Doğada tinkal minerali olarak bulunan boraks dekahidrat 50°C ’ da ısıtıldığında boraks pentahidrat vermektedir. Boraks pentahidrat $160-170^\circ\text{C}$ ’ da boraks dihidrata (Formül 2.1), $290-299^\circ\text{C}$ ’ da boraks mono hidrata (Formül 2.2) ve $400-450^\circ\text{C}$ ’ de de susuz boraksa (Formül 2.3) dönüşür [7,8].



2.2. Borun Tarihçesi

Babillilerin 4000 yıl önce altın işlemek için uzak doğudan boraks ithal ettikleri söylenmektedir. Ayrıca eski Mısırlılarda borun mumyalama, tıbbi ve metalurjik uygulamalarda kullanıldığı düşünülmektedir. Bu söylemler henüz doğrulanmamış olmasına rağmen, tinkalın (bir çeşit bor minerali) sekizinci yüzyılda Arap doktorlar tarafından kullanıldığına dair sağlam kanıtlar bulunmaktadır. Avrupalı kuyumcular tarafından boraks kullanımı ise yaklaşık 12. yüzyıla kadar uzanmaktadır [9].

En eski boraks kaynağının Tibet gölleri olduğuna inanılmaktadır. Boraks, Himalayalar üzerinden Hindistan’ a koyunlara bağlı torbalarda taşınmıştır. Borik asidin buharla uçuculuğunun jeologlar tarafından borat yataklarının oluşumu için temel mekanizma olduğuna inanılmaktadır. Bunun başlıca örneği, 1820’ den 1950’ lere kadar Avrupa’ da önemli bir borik asit kaynağı olan Toskana’ daki gayzerlerdir. Boraks ayrıca

İngiltere, Fransa ve Almanya' da İtalyan borik asitten yapılmıştır. Türkiye' de borat endüstrisi 1865 yılında kalsiyum borat pandemit madenciliği ile başlamıştır. Aynı zamanda Kaliforniya ve Nevada' da Ölüm Vadisi' nde uleksit ve kolemanit de dahil olmak üzere çeşitli borat yatakları bulunmuştur. Bu mineraller reaksiyonla boraksa dönüştürülebilir [5].

Şu anda Mojave Çölü' ndeki boron, Kaliforniya kramer yatağı, ilk önce bir kolemanit cevheri kaynağı olarak 1913' te keşfedilmiştir. 1925' te tinkal cevheri bulunmuş ve 1926' da yeni mineral kernitle karşılaşmıştır. Bu Türkiye dışındaki en büyük borat deposu olup, 70 yıldan fazla bir süredir dünya borat talebinin büyük bir kısmını karşılamıştır. [9].

Türkiye, yıllardır Avrupa' daki borik asit üreticilerine kolemanit sağlamaktadır. Sodyum boratları ülkemizde 1960 yılında Kırka' da keşfedilmiş ve o zamandan sonra Anadolu' da bulunan diğer bor mineralleri bulunmuş ve geliştirilmiştir. Sonuç olarak, bugün Türkiye dünyanın en büyük borat ürünleri üreticisidir. Türkiye, tinkal, kolemanit ve uleksitin mineral konsantrelerini, rafine boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks ve borik asidi yurt dışına ihraç etmektedir [5].

1970' li yılların son dönemlerine kadar ülkemizde bor cevheri üretim ve ihracatı Etibank dışında Şayakçı, Yırcalı, Yakal' lar Madencilik Şirketlerinin yanı sıra büyük oranda İngiliz kökenli Borax Consolidated Limited (Rio Tinto Grubuna ait US Borax' m İngiltere' de yerleşik kolu) şirketinin elinde ve kontrolünde kalmıştır. Ancak ülkemiz bor cevherlerinin dünya piyasa değerine ulaşabilmesi amacıyla 1978 yılında bor cevherleri ile ilgili verilen ruhsat hakları, 2172 sayılı kanunla geri alınmış ve bunun sonucu yüksek katma değer yaratan ürünlerin üretilmesi görevi Etibank' a devredilmiştir. Günümüzde Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü (Etibank) bu konuda yasal olarak tek yetkili kuruluştur [10].

Bor madenlerimiz 1978 yılına kadar sadece ham olarak ve değerinin altında fiyatlarla ihraç edilmekte idi. 1978 yılına kadar geçen süre içerisinde yerli ve yabancı sermayenin hiç birisi katma değerinin yanı sıra piyasa getirisi çok daha yüksek borlu kompozit malzemelerle yatırım yapamamıştır. Borlu metalürjik alaşımlar, fiberglas-cam türü bor yatırımları da dahil rafine bor ve kimyasal bor ürünleri yatırımlarını bile yapmamış veya yaptırmamıştır. 1978 den sonra kamuya verilen tekel hakkı ile rafine bor yatırımları artırılmış ve halende devam ettirilmektedir [10]. Aşağıda 1978 öncesi ve 1978-2002 yılları arası bor rezervlerimizin durumları ve satış durumları verilmiştir (Tablo 2.4.)

Tablo 2.4. Devletçe işletilmesi öncesi ve sonrası bor [10]

	1978 ÖNCESİ	1978-2002
Toplam Bor Rezervi	660 milyon Ton	> 2,5 milyar Ton
Rezerv de Dünya Payı	%16	%63 (%90' ı bulması mümkün)
Üretim de Dünya Payı	%11	%31
Satışta Dünya Payı	bilinmiyor	%17-18
Ham Bor Ton fiyatı	40-50 USD/ton	150-300 USD/ton
Rafine ürün Fiyatı	Üretilmiyordu	230-600 USD/ton
Toplam İhracat Geliri	83 milyon USD/yıl	250 milyon USD/yıl

1978 yılında çıkarılan 2172 Sayılı Yasadan sonra Etibank (Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü) tarafından 20 yılda (1978-1998) yaklaşık 350 milyon USD ' lik yatırım yapılarak yaklaşık 3.5 milyar USD ' lik Bor satış geliri elde edilmiştir.

2.3. Bor Atıkları

Birçok endüstri dalında yaygın bir kullanım alanı bulan bor mineralleri ve türevleri, 21. Yüzyılın petrolü olarak adlandırılmakta ve yaşam standartlarının kalitelendirilmesindeki önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bir bor ürünü bazı durumlarda başka bir ürünün yerini tutabilmesine rağmen, günümüz koşullarında bor ürünlerinin yerini aynı kalite ve ucuzlukta tutabilecek başka bir mineralin bulunmayışı ve stratejik anlamda da değerli olması bor minerallerine özel bir konum kazandırmaktadır [11].

Türkiye' deki borat madenciliği açık ocak madenciliği şeklinde olup, kazanılan bor cevherleri, kompleks bir proses gerektirmeyen zenginleştirme işlemleri (yıkama, dağıtma ve boyuta göre sınıflandırma) sonucunda bir çok endüstri dalında kullanıma sunulmaktadır [11].

Dünya piyasalarında %31' lik üretim payına sahip olan ülkemizde, bor konsantresi üretimi Eti Holding Etibor A.Ş.' ye ait Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek işletmelerinde gerçekleştirilmektedir. Çeşitli araştırmacılar, bu tesislerde açığa çıkan atık miktarının 600.000 ton/yıl olduğunu bildirmişlerdir [12–15].

Dünya bor pazarında önemli bir yere sahip olan Etibor Kırka Boraks İşletmesi' nde ocaklar, konsantratör ve bor türevleri tesislerinden toplam 400.000 ton/yıl atık açığa çıkmaktadır. Bunların 250.000 ton/yıl' ı konsantratör, 150.000 ton/yıl' ı da bor türevleri ünitelerinden gelmektedir [16].

Konsantratör tesisinde, yıkama bölümüne giren cevher önce 6 mm' lik bir ön elemeye tabi tutulmaktadır. +6 mm elek üstü, merdaneli kırıcıdan geçirildikten sonra

uygun olmayan tane boyutundaki kil pestilleri atılmaktadır. Konsantre atık tüvanan cevherin % 2' sini oluşturmakta ve yaklaşık % 12-15 B₂O₃ içermektedir. Bor türevlerinin eldesi esnasında ortaya çıkan türev atığında ise bor oksit miktarı daha düşük seviyededir (~ % 7-8) [17].

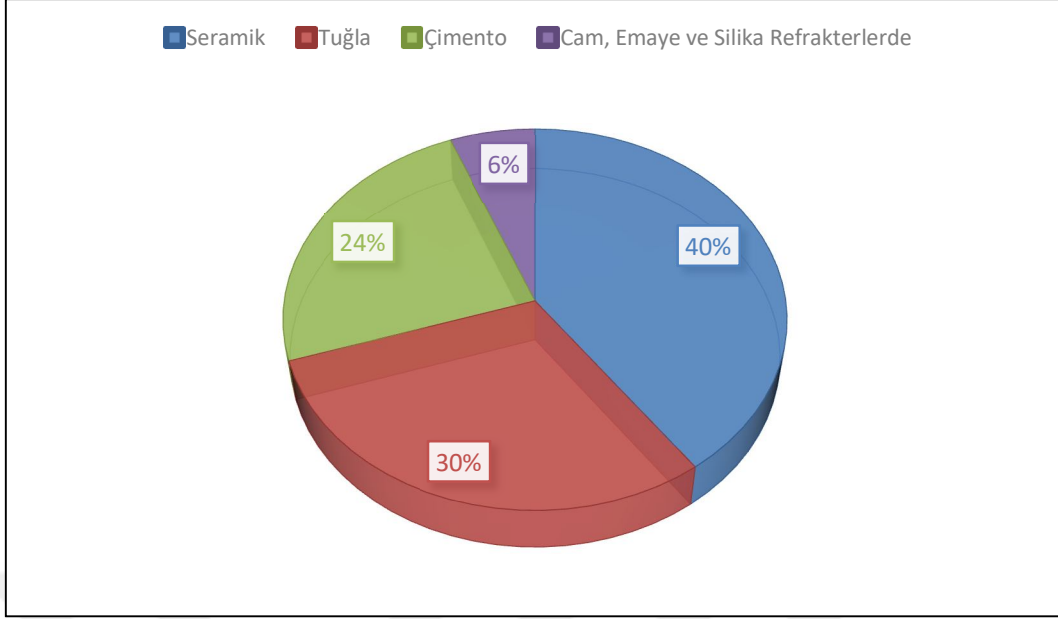
Bor endüstrisi atıkları, göllere ve denizlere boşaltılmaları durumunda suda yaşayan canlılara, zirai sulamada kullanılmaları hâlinde de bitkilere büyük zarar vermektedirler [18].

Son zamanlarda artan çevre bilinci madencilik sektöründe de kendisini hissettirmiş, madencilik faaliyetleri sonucu oluşan atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi hususunda çeşitli yönetmelikler ve standartlar getirilmiştir. Bor atıklarının uygun yöntemlerle çeşitli sektörlerde değerlendirilmesi sonucunda;

- Atıkların stoklanmasından doğan sorunlar ve stoklama maliyeti azalacak,
- Çevreyi kirleten unsurlar en az düzeye indirilecek,
- Bor atıklarının değerlendirilmesi sonucu üretilen yeni ürünler ülke ekonomisine ek kazanç sağlayacaktır [11].

Türkiye' de ticari öneme sahip bor minerallerinden Kırka tinkal minerali, birbirine yakın miktarlarda montmorillonit ve dolomit içeren gri killer ile dolomitçe zengin beyaz killerden ve kalsitten oluşmaktadır [19]. Bursa-Kestelek bor işletmelerindeki kolemanit atıkları ile Kütahya-Emet-Hisarçık işletmesindeki kolemanit atıkları montmorillonit, kalsit, klorit ve biyotit gibi paramanyetik mineraller içerirken, Balıkesir- Bigadiç atıkları, montmorillonit, jips ve kalsit ihtiva etmektedir [20,21].

Oruç' un 2004 yılındaki Türkiye' de bor atıklarını sektörel bazda değerlendirdiği çalışmada; “bor atıklarının kil içeriği bakımından zengin oluşu, söz konusu atıkların değerlendirilmesine yönelik bilimsel çalışmaları; seramik basta olmak üzere, tuğla ve çimento sektörüne yönlendirmiştir (Şekil 2.1). Bu çalışmalarda, bor atıklarından yeni bir ürün eldesinin yanında, bu ürünlerin fiziksel ve fizikomekanik özellikleri üzerindeki etkisine yer verilmesi dikkat çekilmesi gereken bir diğer husustur.” denilmiştir [11]. Ayrıca bu çalışmadan görüldüğü üzere o yıllarda yol malzemelerinde bor atıklarının kullanımı kayda alınmayacak kadar azdı. Ancak yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü yol sektörün de atık borların kullanılabileceği farklı çalışmalar ile ispatlatılmıştır, bu çalışmada yine bu amaca yönelik bir araştırmadır.



Şekil 2.1. Bor atıklarının sektörde kullanım alanları [11]

2.3.1. Kırka bor işletmesi ve atıkları

Eskişehir Kırka Bor İşletmesi genel olarak çözme, kristallendirme, kurutma ve ergitme olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

Çözme bölümünde, tinkal konsantresi, buharla ısıtılan ve içinde karıştırıcı bulunan 98°C sıcaklıktaki çözme tankına beslenip; sirkülasyon sağlanır ve çözelti su ile karıştırılarak çözülür. Tinkal konsantresinde çözünmeyen safsızlıkların flokülasyon çözeltisi dairevi yoğunlaştırıcıya beslendikten sonra boraks çözeltisi tikner taşkanı olarak alınır, filtre edilir, kristalizatöre beslemek üzere depolanır. Tikner alt çıkışı ise, ikinci bir flokülasyon işlemine tabi tutulduktan sonra atık göletine aktarılmaktadır.

Kristallendirme bölümünde, besleme tankından alınan çözelti 66°C sıcaklıkta, vakumla çalışan, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kristallerinin elde edileceği penta kristalizatörüne gönderilmektedir. Kristaller bir tanka alındıktan sonra burada hidrosiklon ve santrifüjde, kristaller ve çözeltinin ayrılması sağlanmaktadır. Çıkan çözelti $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ kristallerinin elde edilmesi için 46 °C sıcaklıkta çalıştırılan deka kristalizatörüne aktarılır; bu kristalizatörden elde edilen kristaller de yine bir tanka alınarak hidrosiklon ve santrifüjde çözeltiden ayrılır. Ana çözelti, beslenen tinkal konsantresini çözmek için tekrar çözme tankına gönderilirken, pentahidrat ve dekahidrat kristalleri ise kurutma ve ergitme bölümüne gönderilmektedir.

Kurutma ve ergitme bölümünde, boraks dekahidrat kristallerinden bir kısmı önce döner kurutucuda kurutulup, elekten geçirilerek istenen tane büyüklüğündeki kristaller

mamul rafine boraks dekahidrat olarak depolamaya gönderilmektedir. Elek üstü, elek altı ve geri kalan ile bir direkt döner kurutucuda kurutulan dekahidrat kristalleri, ikinci döner kavurucuda kalsine edilerek 2.5 mol su ihtiva eden boraks elde edilir. Kalsine edilmiş bu boraks, ham boraks pentahidratın elek üstü ve elek altı ile birlikte, ham susuz boraks elde etmek için suyu uçurulmak üzere, ham boraks fırınına gönderilir [8].

Ham boraks pentahidrat üretiminde kullanılmak üzere, pentahidrat kristalizatöründe elde edilen boraks pentahidrat kristalleri, döner kurutucuda kurutulur, istenen tane büyüklüğüne göre ayrılmak için elekten geçirilir. Elek altı ve elek üstü parçacıklar 2.5 mol su ihtiva eden boraks ile beraber, ham susuz boraks elde etmek üzere ham boraks fırınına gönderilir. Fırından ergimiş halde çıkan boraks, içten soğutmalı merdanelerde soğutularak levha haline getirilir, daha sonra levha kırıcı ve çekiç kullanılarak kırıcıda kırılır. Son aşamada ise kırılmış haldeki boraks, elekten geçirilerek istenen tane büyüklüğündeki ürün depolamaya gönderilir [22].

Türkiye’ de bor mineralleri üretimi sonucunda her yıl 600.000 ton atık oluşmakta ve bu atıkların %67’ lik kısmı Eti Maden Kırka Bor İşletmesi’ ndeki ocaklar, konsantratör ve bor türevleri tesisinde meydana gelmektedir [23].

Kırka Bor İşletmesi’ nde 6 adet atık barajı mevcut olup, 892.440 ton/yıl olan boraks pentahidrat üretimi kapasitesi sonucunda oluşan 1.000.000 m³ miktarındaki atıktan dolayı 2013 yılında yeni bir atık barajına ihtiyaç duyulmuştur. Mevcut 6 atık göletinin toplam 16.980.000 m³ atık hacmi bulunmaktadır. Mevcut göletlerin yükseltme çalışmaları devam etmekte olup, yükseltmeyle beraber, 1 no’ lu gölette 1.236.000 m³, 2 no’ lu gölette 1.157.100 m³, 3 no’ lu gölette 1.331.525 m³ ve 6 no’ lu gölette 1.235.850 m³ olmak üzere toplamda 4.960.475 m³ ek hacim sağlanacaktır [8].

Etibor Kırka Boraks İşletmesi’ nde birincisi konsantratör şlam, ikincisi ise konsantratör kil pestili atığı olmak üzere iki tip konsantratör atığı oluşmaktadır. Konsantrasyon bor üretimi, yıkama işlemi sonunda dağıtma ve sınıflandırma sonucunda killi malzemenin uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Bu nedenle konsantratör tesisi katı atığının çoğunluğu kil boyutundaki minerallerden oluşturmakta, ortalama %13-15 B₂O₃ içermektedir [24].

Cevher zenginleştirme tesislerinden çıkan atıklar genellikle ince boyutlu katı veya pulp halindedir. Bu atıklar önceleri maden alanlarının yakınındaki sahalara, artık barajlarına, denizlere, göllere veya nehirlere boşaltılmakta iken günümüzde

zenginleştirme tesis atıklarından yararlanma veya eğer bu mümkün değilse, en uygun biçimde bertaraf etme yoluna gidilmektedir [25].

Kil pestilinin herhangi bir şekilde değerlendirilmemesi durumunda çevre sorunlarına yol açtığı da bilinmektedir. Her iki atık türünün bileşiminde yüksek sayılabilecek oranda B_2O_3 bulunurken, MgO , CaO ve SiO_2 ile birlikte eser miktarda da SrO , Fe_2O_3 ve Al_2O_3 mevcuttur. Kırka Boraks maden işletmelerinde oluşan kil içerikli atıkların büyük boyutlara ulaşması (yaklaşık 400.000 ton/yıl) halen önemli bir sorun olarak gündemdedir [26].

2.4. Bor Atıklarının İnşaat Sektöründe Kullanımı

Geri dönüşüm, atık malzemelerin yeni ürünlerde kullanılabilmesi için kurtarılması ve yeniden işlenilmesine denir. Ulaştırma mühendisleri uzun yıllardır doğadaki atık malzemeleri geri dönüşüm vasıtasıyla sektöre kazandırmaya çalışmaktadırlar. Son yıllarda bor mineraline sahip ülkelerde önemli derece bor atığı yığınları oluşmaktadır. Dünya bor rezervinin %72 si Türkiye’ de bulunmaktadır [27], bu sebeple Türkiye’ de dünyanın en büyük bor atıklarının oluşması kaçınılmaz olmuş ve oluşan atık depoları ülkede bir hayli yer işgal etmeye başlamıştır. Sadece Eskişehir, Kırka’ da yıllık 400.000 ton bor atığı oluşmaktadır [16]. Bu atıklar atık göletlerine ve denizlere boşaltıldığında, zirai sulamaya, yer altı sularına, su canlılarına ve bitkiler üzerinde çeşitli zararlara neden olabilmekte, işletmelerin yakınlarında atık yığınları ve depolama problemleri meydana gelmektedir. Halbuki bu atıklar işletmelere yakın çevredeki yol inşaatlarında değerlendirilerek kısa süre içerisinde bertaraf edilebilir [28].

Bor atıkları zamanla inşaat sektöründe farklı çalışmalar ile kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar seramik ve cam seramik üretimi, duvar karosu ve yer karosu imalatları, tuğla imalatları, membran malzemeleri [27], çimento malzemesi üretimleri ve asfalt betonu üretimleridir.

2.4.1. Seramik üretimi

Bor minerallerinin yan kayacının çoğunlukla kil mineralleri içermesi, esas hammaddesi kil olan seramik sektöründe bor türevleri atıklarının değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Bor atıklarının seramik endüstrisinde kullanıldığı alanlar;

- firit ve sır hazırlanması,
- çini yapımı,
- döküm çamuru üretimi,
- yer karosu ve duvar karosu yapımı.

şeklinde sıralanabilir [11].

Bor atıkları yüksek miktarda boroksit (B_2O_3) içerdiğinden seramik sanayinde sır bünyelerde kullanılma imkanı bulmaktadır. Boroksit, sır yapımında bünyelere yüzeysel camsı parlaklık kazandırdığı için tercih edilmektedir [29].

Lyday (1996), seramik sektöründe sır bünyelere boroksit ilavesinin; viskoziteyi ve erime noktasını düşürdüğünü ve bünye yüzeylerine parlaklık verdiğini ispatlamıştır [30].

Genç ve arkadaşları (1998), yaptıkları deneysel çalışmada bor atıklarının genleşme katsayılarının yüksek olmasından dolayı fayans sırında direkt olarak kullanılamayacağını, fakat genleşme katsayısını düşürecek şekilde reçete düzenlenmesi durumunda bor atıklarının fayans ürünlerinde sır maddesi olarak kullanılabilceğini göstermişlerdir [31].

Diğer bir çalışmada, bor atık katkılı killerin seramik sektöründe frit, sır ve masse hazırlanmasında kullanılabilirliği kanıtlanmıştır [32].

Çini, başlıca hammaddeleri kil, kaolin, kalsit veya dolomit olan çift pişirim yöntemiyle üretilen seramik bir malzemedir. Dolayısıyla çini yapımında bor içerikli kil atıklarının kullanımı mümkündür. Bu amaçla Bentli ve Çakı, tinkal konsantresi ve boraks pentahidrat üretimi yapılırken önemli miktarda açığa çıkan killi malzemenin; plastik özellik taşıyan kil olması ve pişme renginin beyaza yakınlığı nedenlerinden ötürü çini hamurunda değerlendirilebileceğini göstermişlerdir. Deneysel çalışmalarda kullanılan DSM (Dijital spektrum modülasyonu) elek üstü atık kilinin çini hamuruna ilavesiyle;

- Kuru-pişme ve toplam küçülme değerlerinin azaldığı,
- Atık bünyesindeki B_2O_3 ve Na_2O nedenleriyle sinterleşmenin arttığı ve böylece sağlam bir yapının oluştuğu,
- Hammadde maliyetinin önemli oranda düştüğü gözlenmiştir [33].

Sır bünyelere bor atıkları ilavesi; viskoziteyi düşürerek döküm çamurunun iyi kurumasını sağlamakta, erime noktasını düşürmekte ve seramik bünyelere parlaklık kazandırmaktadır [34].

Seramik ürünlerle ilgili yapılan bir diğer çalışmada genel bir bakış olarak düşük yüzdelerdeki atık bor kullanımını yüksek killi seramik ürünlerde fizibildir (ağırlıkça %5) denmiştir [35].

Çiçek ve diğerlerinin hazırlamış olduğu üç çeşit atık malzeme kullanılan çalışmada ise [atık bor (BW), et kemiği ve yemek külü (MBM) ve geri dönüşümlü soda kireç silika cam (SLG)] özellikle BW kullanılan cam seramik ürünlerin daha cazip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yeni nesil seramik ürünlerde ve gaz betonu yapımında da BW katkısının değerlendirilebileceği belirtilmiştir [36].

Ercenk ve arkadaşlarının hazırladığı çalışmada, bor atıklarının eklenmesi yoluyla kristalleşme koşullarının sertlik üzerinde olumlu bir etkisi olduğu söylenmiştir. Aynı zamanda, bor atığının kristalleşme üzerindeki etkisi SEM görüntülerinde gösterilmiştir. Yüksek bor atığı içeren numunelerdeki tane ve tanecik sınırları, düşük bor atığı içeren numunelerden daha spesifik olduğu gözlemlenmiştir [37].

2015 yılında yapılan bir başka çalışmada ise seramik malzemeleri için 1100°-1120°C aralığında ve ağırlıkça %4 oranlarında atık bor kullanılması halinde TS EN 14411 standardında seramik üretilbileceği belirlenmiştir [38].

2.4.2. Duvar karosu üretimi

80' li yıllardan itibaren seramik endüstrisinde tek pişirim yöntemi uygulamasına geçilmesiyle, seramik bünye ve sır beraber pişerek yoğun bir yapı elde edilmektedir [39]. Ancak, bu yöntemde şekillendirme sonrası ürünlerin düşük mukavemet nedeni ile üretim hatlarında kayıplar oluşmaktadır. Ediz ve arkadaşları, duvar karosu üretiminde yaş ve kuru mukavemeti arttırmak amacıyla, DSM elek üstü bor atık malzemesini reçete bünyelerine ilave ederek; aşağıda verilen sonuçlara ulaşmışlardır:

- Kalsit hammaddesi yerine bor atık malzemesi kullanımı sonucu kalsit tüketim giderlerinden ek kazanç,

- Atık bünyesindeki alkali oksitlerin, sinterleşme sırasında camsı faz oluşturması sonucu pişme mukavemetinde artış,
- Düşük porozite,
- Düşük su emme değerleri elde etmişlerdir [40].

Yine aynı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, DSM (Dijital spektrum modülasyonu) elek üstü atığının, duvar karosu bünyelerinde silis kumu yerine %20 oranında dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini belirlemişlerdir [41].

Karasu ve arkadaşları tarafından yapılan benzer araştırmalarda, Eti Bor Kırka Konsantratör ve Türev atığının, duvar karosu bünyelerinde pegmatit yerine alternatif akışkanlaştırıcı olarak da kullanılabileceğini tespit edilmiş, yine bu atığın duvar karosu sırlarında potasyum feldispatın yerine yaklaşık %89 oranında alternatif ergitici olarak kullanılabileceğine dair olumlu sonuçlar alınmıştır [16,42].

Diğer çalışmada ise kil pestili atığı firitleştirilerek çini karo bünyesinde albitin (Na-feldispat) yerine kullanılmıştır. Elde edilen ürünlerin reolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri incelendiğinde bu yeni malzemenin çini karo bünyesinde alternatif bir ergitici hammadde olarak kullanılabileceği ispatlanmıştır [43].

2.4.3. Yer karosu üretimi

Karasu ve Gerede (2002), Kırka Boraks atığının yer karosu sırlarında kullanılabilirliğini incelemek amacıyla yer karosu firit reçetesine belli oranlarda (%13.5' a kadar) bor atığı ilave etmişler ve elde ettikleri ürünlere mekanik ve fiziksel testler uygulamışlardır. Kırka boraks atığının, düşük sıcaklıklarda camlaşma yeteneğine sahip oluşu firitli yer karosu sırlarında Na-feldispat, borik asit ve dolomit yerine kullanılabileceğini göstermiş ve elde edilen ürünlerin iyi bir performans sergilediği belirlenmiştir [44].

Kırka Boraks atığının yer karosu bünye özelliklerine etkisinin araştırıldığı başka bir çalışmada;

- Düşük poroziteli,
- Dayanım değerleri yüksek ,
- Su emme miktarı düşük,

ürünler elde edildiği belirtilmiştir [45].

2.4.4. Tuğla üretimi

Yapılan deneysel çalışmalar, tuğla üretiminde kullanılan kilin bor içerikli kil atıklarından karşılanabileceğini göstermiş ve hatta bazı özellikleri nedeniyle, belirli oranlarda normal tuğla toprağına karıştırılan bor atığı ilavesiyle elde edilen tuğla örneklerinde standart tuğlalara kıyasla daha iyi neticelerin alındığı tespit edilmiştir [11].

Ediz ve Özdağ, yaptıkları araştırmalar neticesinde Kırka atık malzemesinden elde ettikleri tuğlaların pişme sıcaklıklarının, normal tuğla topraklarının pişme sıcaklıklarına göre daha düşük olduğu tespit etmişler ve tuğla bünyelerine kazandırılan bu özelliğın tuğla üretiminde enerji maliyetini azaltacağı sonucuna varmışlardır [46].

Kavas ve Emrullahoğlu, tuğla üretimi için yaptıkları çalışmada bor atıklarını ve Seydişehir kırmızı çamur atığını kullanmışlar ve neticede yüksek mukavemetli, düşük su emme özelliğine sahip kaliteli yapı malzemesi üretmeyi başarmışlardır [47].

Aşkın ve arkadaşları, tinkal ve borakspentahidrat atıklarının tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin mümkün olduğunu, ancak kolemanit atığının basınç dayanımı üzerine negatif etkisi sebebiyle tuğla bünyelerde kullanılamayacağını belirlemişlerdir [48].

Başka bir çalışmada Tuğla üretiminde, bor atığı ve mermer atığı olmak üzere iki farklı atık kombinasyonundan oluşan numuneler elde edilmiş ve bu sayede aynı anda iki farklı atık malzeme değerlendirilme imkanı bularak basma dayanım değeri ve porozite miktarı yüksek tuğla üretimi gerçekleştirilmiştir [49].

Demir ve Orhan' ın çalışmasında “bor içerikli atıklar çeşitli yapı hammaddeleri (pomza) ile birlikte kullanıldığında, ısı yalıtımı kuvvetli, birim hacim ağırlık değeri düşük tuğla üretimi mümkündür” denilmiştir [23].

Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantratör atıklarının yapı tuğlası üretiminde (pres tuğla) ergitici (flaks) eleman olarak kullanılabilirliği araştırılan bir diğer çalışmada ise iki farklı bor atığı değişik oranlarda (% 5, % 10, % 15 ve % 20) Afyon bölgesinde üretilen tuğla harmanına ilave edilerek pres tuğla yapımı gerçekleştirilmiştir. Sonuçta bor

atıklarının preslenmiş tuğla numunelerinin pişme sıcaklığını önemli oranda aşağıya çektiği, su emme ve pamuklaşma miktarlarını azalttığı görülmüştür [50].

Yamık ve arkadaşları tarafından Etibank Emet Kolemanit İşletmesi Bor atığı, Seyitömer termik santrali külü ve tuğla kili karışımından elde edilen tuğla örnekleri üzerinde yapılan testlere göre;

Bünyede bor atığının artması ile aşağıdaki durumların oluştuğu saptanmıştır,

- Plastiklik suyu oranını arttırdığı,
- Doğrusal kuruma küçülmesini azalttığı,
- Toplam doğrusal küçülmeyi azalttığı,
- Su emme oranını arttırdığı / poroziteyi arttırdığı,
- Basınç dayanımını arttırdığı [51].

Elbeyli ve arkadaşları inşaat tuğlası üretiminde katkı olarak boraks atığının kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Bu amaçla öncelikle atıktaki B₂O₃ miktarı liç prosesi ile soda çözeltisi kullanılarak uzaklaştırılmış ve toksik etkisi düşürülmüştür. Liç prosesi sonrasında tuğla kompozisyonuna kuru örnek üzerinden %10, 20, 30 oranlarında atık katılıp 10 bar basınçla preslenmiş ve 970, 1000 ve 1030°C' lerde pişirilmiştir. Pişme sıcaklığının ve katkı yüzdesinin inşaat tuğlasının soğukta basma mukavemeti, porozite, su absorpsiyonu, hacim yoğunluğu ve kızdırma kayıpları üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Test sonuçları atık oranının ve pişme sıcaklığının tuğla kalitesi üzerinde etkili faktörler olduğunu göstermiştir. Tuğlanın soğukta basma mukavemeti, atığın katkı yüzdesi ve pişme sıcaklığının artmasıyla düşmektedir. İyi kaliteli tuğla üretiminde şartlar %18 nem içerikli %10 boraks atığının tuğlaya katılması ve 1000°C' de pişirilmesi şeklinde belirlenmiştir [52].

Yine Elbeyli ve arkadaşlarının diğer çalışmasının amacı ise uçucu kül, silis dumanı ve boraks atıklarının inşaat tuğlası üretiminde kullanılabilirliğinin araştırmaktır. Tuğla kompozisyonları; %20 boraks atığı, %20 boraks atığı + %20 uçucu kül ve %20 boraks atığı + %10 silis dumanı olarak seçilmiştir. Seçilen kompozisyonlardan oluşan karışımlar 10 bar basınçla preslenip 970,1000 ve 1030 °C ler de pişirilmiştir. Pişirme sıcaklığının ve atık katkı oranının tuğlanın soğukta basınç mukavemeti, porozite, su absorpsiyonu, hacim yoğunluğu, kızdırma kaybı gibi özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmiş ve bu özelliklerin Türk Standartlarına (TS705) uygunluğu araştırılmıştır. Test

sonuçları incelendiğinde tuğla kalitesi üzerinde atık katkı oranının ve pişme sıcaklığının etkili faktörler olduğu görülmüştür. Düşük B₂O₃ içeriğine sahip boraks atığı katkılı tuğlaların 1000°C de pişirilmesiyle tuğla kalitesi üzerinde zararlı etki gözlenmemiştir. Boraks atığının standartlara uygun tuğla üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir. Ancak boraks atığı ve kil karışımına silis dumanı veya uçucu kül katkılarının katılmasıyla elde edilen tuğlaların yüksek porozite ve su absorpsiyonu değerlerinin yanı sıra düşük soğukta basınç mukavemeti değerine sahip olduğu bulunmuştur. Yapılan kalite testleri sonucunda 1000 °C de pişirilen tuğla örneklerinden en iyi değerler elde edilmiştir [53].

Uslu ve Arol ise kırmızı tuğla üretiminde %30 oranına kadar atık bor kullanımı tuğlaların basınç dayanımını, su emmesini ve birim ağırlıklarını iyileştirdiğini belirlemiştir [54].

2006 yılında yapılan bir diğer çalışmada da konsantratör atıklarının (kil [CW] ve ince malzeme [FW] olarak) kırmızı tuğla üretiminde ergitici (flaks) elemanı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Mineralojik ve mekanik test sonuçlarına göre kırmızı tuğla üretiminde atıkların ergitici elemanı olarak kullanılabileceği gösterilmiş, en iyi mekanik sonuçların ise ağırlıkça %15 oranında alındığı belirlenmiştir [55].

2.4.5. Çimento üretimi

2004 yılına kadar çimento endüstrisinde atıkların değerlendirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmış, uygun miktarda atık malzeme kullanımıyla hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlanabileceği görülmüştür. Birçok araştırmacı, çimentoda katkı maddesi olarak uçucu kül, taban külü, kolemanit konsantratör atığı, tıncal konsantratör atığı ile bunların ikili veya üçlü karışımlarını kullanmak suretiyle aynı anda farklı türde atık malzemelerin çimento üretiminde değerlendirilebilirliğini incelemiştir [56–59].

Targan ve arkadaşları, kolemanit atığını, Kula curufu ve bentonit karışımına ayrı ayrı ilave etmişler ve farklı oranlarda kolemanit atığının çimento üretiminde değerlendirilebileceğini ve klinker üretiminde enerji tasarrufu sağlanacağını belirtmişlerdir [59]. Bu konuda yapılan diğer araştırmalarda, çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak bor atıklarının kullanılması olumlu neticeler vermiştir [60–62].

Tinkalden boraks üretimi esnasında meydana gelen ve tromel elek atığı (TEA) olarak nitelendirilen borlu atık malzeme, Boncukçuoğlu ve arkadaşları tarafından çimento üretiminde kullanılmış ve su sonuçlar elde edilmiştir:

- Bor atık katkılı (TEA) çimentolardan elde edilen betonlar, geleneksel çimentolardan elde edilen betonlara nazaran daha iyi mekanik özellik sergilemekte,
- Çimento bünyesine bor ilavesi klinker birim maliyetinde azalma sağlamakta,
- Çimento priz süresi kısalmaktadır[60].

Kalsiyumlu bor bileşiği olan kolemanitten borik asit üretimi sırasında atık bir madde oluşmakta ve oluşan bu atığa borojips adı verilmektedir. Yüksek bor içerikli bu atık malzemenin çimento ve beton üretiminde değerlendirilmesine yönelik çalışmalar olumlu neticeler vermiş ve borojipsin çimento bünyelerinde diğer alçıtaşlarının (fosfojips, fluorjips.) yerine alternatif bir madde olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir [61].

Özdemir ve Öztürk' ün araştırmasında, iki farklı bor içeren kil atığı ile yapılan bir çalışma karışımların Türk standartlarına göre çimento imalatında kullanılabileceğini göstermiştir [62].

Uğurlu, Özdemir ve Topçu' nun çalışmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kil pestili atığı olarak adlandırılan ve tinkal üretimi sürecinde ortaya çıkan atıkların çimento, harç ve dolayısıyla beton içerisinde değerlendirilebilirliğinin olası olduğu görülmüştür. Sonuçlar özetlenirse:

- Boraks içerikli kil pestili atığı çimento, harç ya da beton içerisinde yapısındaki jips nedeniyle geciktirici olarak işlev görmektedir. Özellikle sıcak bölgelerdeki harç ya da beton uygulamalarında teknik ve ekonomik yönden daha kullanılabilir bir yapı malzemesi için kil pestili katkılı malzemeler üretilebilir.
- Harç içerisine düşük yüzdelerde (%1.5) kil pestili atığı katılması sonucu basınç ve çekme dayanımında az da olsa artışlar meydana geldiği görülmüştür. Borik oksit yüzdesi düşük katkıların (2. kil pestili) kullanımı ile harca katılan katı miktarı da (% 2.5' lara kadar) arttırılabilir. Bu durum ekonomik ve teknik yönden daha doğru bir seçim olacaktır.

- Kil pestili atıklarının harçta kullanımı beton iç yapısında, herhangi olumsuz bir sorun gözlenmemiş aksine düşük yüzdelerdeki kullanımı ile ultrases geçiş sürelerinden de görüleceği üzere daha yoğun bir iç yapı elde edilmiştir. Bu durum teorik olarak üretilen malzemenin geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyecek ve onu durabilite yönünden güçlendirecektir [63].

Erdoğan ve arkadaşlarının çimento ve betonun özelliklerine, sodyum karbonat, kolemanit konsantratör atığı ve Karabük cürufunun etkisini tayin etmek için bir çalışma hazırlamışlardır. Kolemanit konsantratör atığı ve Karabük cürufunun birlikte belirli oranlarda Portland çimentosuna ilave edilmesi durumunda kolemanit konsantratör atığının ilave miktarı arttıkça priz başlama sürelerinde standartlara uymayan değerler ortaya çıkardığını göstermiş, %10 ilavesinde ise çok fazla düşüş yaşanmıştır. Priz sona erme sürelerine bakıldığında katkı miktarının artışıyla süreler standartların çok üstüne çıktığı görülmüştür. Kolemanit konsantratör atıklarının çimentoya ilavesinin priz başlama ve sona erme sürelerini olumsuz olarak etkilediği gözlenmiştir. “Sodyum karbonatın çimentoya katkı maddesi olarak ilavesinin uygun olmadığı, Kolemanit konsantratör atıklarının ve Karabük cürufunun çimento katkı maddesi olarak belli oranlar aşmamak kaydı ile değerlendirilebileceği çimento üretiminde enerjiyi ve maliyeti düşürebileceği söylenebilir”, sonucuna varılmıştır [64].

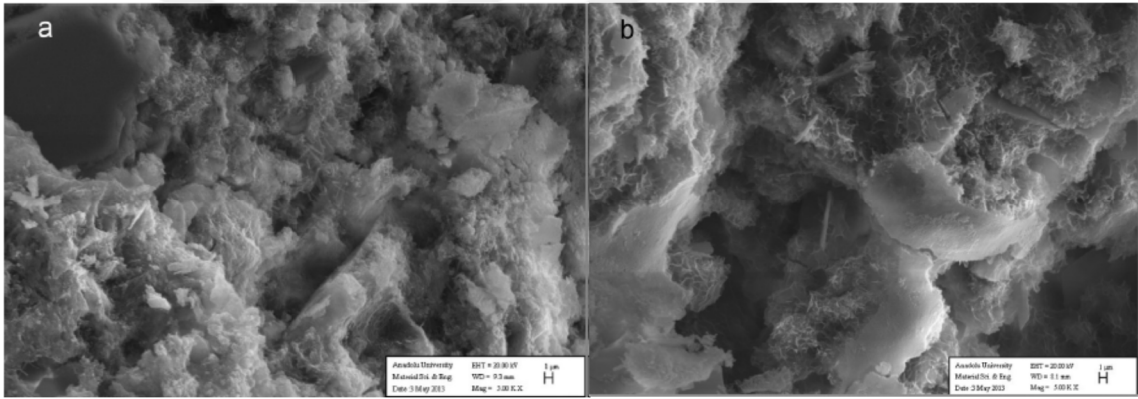
Bir diğer çalışma ise potasyum sülfat tuzlarının kolemanit konsantratör atıkları ile harmanlanmış portland çimentosuna etkilerini araştırmış, alkali sülfat tuzlarının betonun erken dönemindeki (2-7 günlük) basınç dayanımlarını artırdığı bu etki ile kolemanit konsantratör atıkları ile harmanlanmış portland çimentosunun da yine erken dönemdeki basınç dayanım değerlerinin artacağına mümkün olacağını belirlemiştir [65].

%1’ lik alunit minerali katkısı sabit tutularak farklı miktarlarda kolemanit ve tinkal atıklarının uçucu kül ve taban külü ile belirli oranlarda harmanlanarak portland çimentosuna katılması sonucu oluşan beton basınç dayanım sonuçlarının incelendiği bir çalışma yapılmıştır. Betonun erken ve gününde prizini alma (2-7-28 günlük sonuçlar) sonuçları incelendiğinde çimentonun kolemanit atıkları ile en fazla %5 (%1-3) olarak yer değiştirilmesi gerektiği, tinkal atıkları için ise bu değerin %1’ i geçmemesi gerektiği belirlenmiştir [66].

Portland çimentosu yerine boraks pentahidrat ilave edilerek bir çalışma yapılmış ve sonuçlar %10 oranına kadar bu malzemeden kullanılabileceğini göstermiştir [67].

Çimento üzerine yapılan araştırmalar için 2004 yılından sonrasına bakılır ise, bor atıklarıyla yapılan çalışmanın sonuçlarına göre atık bor katkısının; hacim özgül ağırlığı ve slump değerlerini düşürdüğü, kür süresini artırdığı, bor atığı oranı artmasıyla basınç dayanımını, çekme dayanımını ve elastik modülü değerlerini düşürdüğünü, 10, 20, 25, 35 ve 40%, oranlarında atık bor ilavesi ile C25 ve C30 beton üretilebileceğini belirtmişlerdir [68].

Mutuk ve Mesci bor atığı (BW) ve pirinç kabuğu külü (RHA) ile yaptığı çalışmada her iki malzemenin de basınç dayanımlarının Türk Standartlarına uygun olduğu belirtilmiştir [69], ayrıca bu çalışmada elde edilen elektron mikroskobu görüntüleri de aşağıda verilmiştir (Görsel 2.1).



Görsel 2.1. a:28 günlük %5 bor atığı katkılı çimento harcı SEM görüntüleri **b:**%10 pirinç kabuğu külü katkılı çimento harcı SEM görüntüleri [69]

Över Kaman ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, ısıtılmış bor türevi atıkları içeren çimento harçlarının (WICM) üretimi için çevre dostu ve ekonomik yeni bir yöntem sunulmuştur. Isıtılmış bor türevi atıkları ile hazırlanmış çimento harcının mineralojik, mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Atıklarla harmanlanmış çimento harçları arasında referans harcı ile en yakın dayanım değeri 1 saat boyunca 600°C’ de ısıtılmış ve ağırlıkça %5 atık oranıyla elde edilmiştir. %15 ve %20 oranında atıklarla yer değiştirilen numunelerde ise dayanım oranı değerleri daha geç sürelerde olmuştur. 90.günün sonunda bütün WICM numunelerin

gerekli dayanıma ulaştığı görülmüştür. Sonuç olarak bu çalışmada WICM kullanımı ile %25 katkı oranına kadar çimento harcı üretmek mümkün olmaktadır denilmektedir [70].

2.4.6. Asfalt betonu üretimi

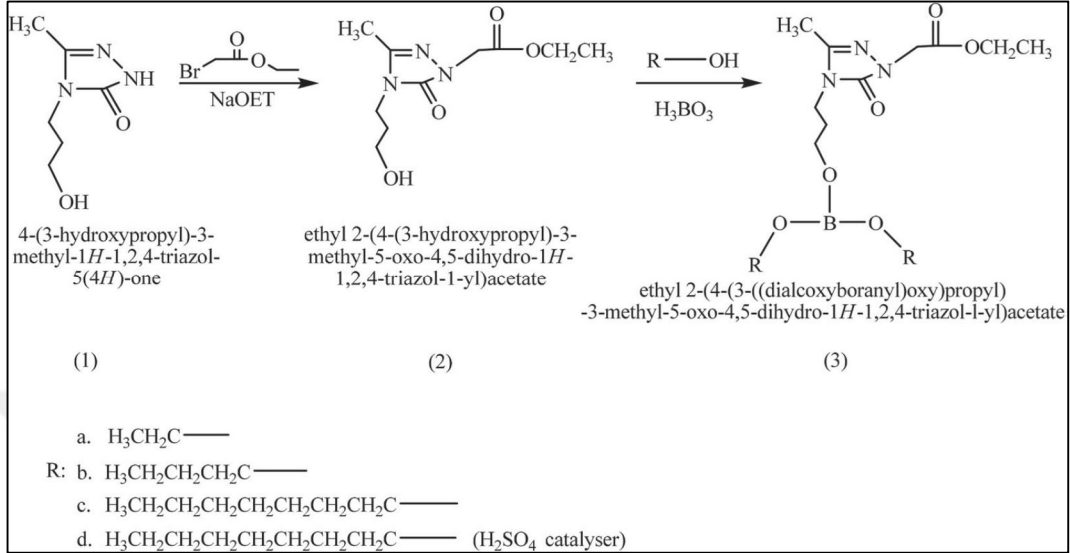
Bor atıklarının asfalt betonu malzemesi üzerinde kullanılmaya başlanması ise 2000li yılların başlarında olmuştur. 2004 yılından önce bor atıklarının asfalt betonu malzemesi üzerine herhangi bir kullanımı bulunamamış, bundan sonraki yıllarda da yine aynı şekilde çok seyrek çalışmalarla devam edilmiştir.

Karacasu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada boraks, sepiyolit, zeolit, atık lületaşı ve sediman yakma taban külü (SIBA) kullanarak bu malzemelerin asfalt betonu numunelerinde kullanılabilme olasılığı araştırılmıştır. Bu malzemelerin dolaylı çekme dayanımını ve birim ağırlık değerlerini azalttığı akma değerlerini ise artırdığı tespit edilmiştir. Farklı miktarlarda ve farklı oranlarda hazırlanan numunelerde Marshall stabilite değerinin sepiyolitte artış gösterdiği, boraks, zeolit, lületaşı ve SIBA ile hazırlanan numunelerde ise azaldığı belirtilmiştir [71].

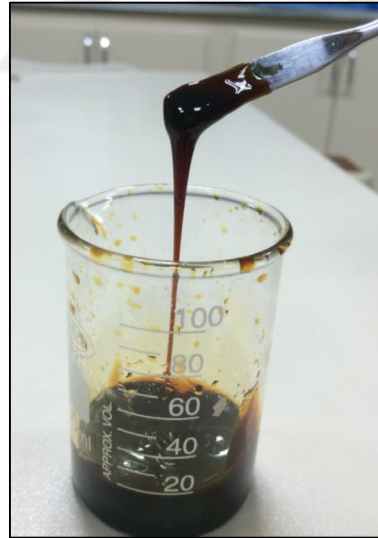
2013 yılında yapılan bir çalışmada ise asfalt betonlarında filler malzemesi olarak bor atıklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Atıkları değerlendirmek amacıyla yapılan bu çalışmada bor atıklarının asfalt kaplamalarda alternatif filler olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [72].

Bor asidi ile bitüm modifiyesinin gerçekleştirildiği bir çalışmada bitüm sonuçlarının reolojik özellikleri değerlendirilmiş, bor eklentilerinin bitüm ile elektrostatik kimyasal bağ oluşturduğu gözlenmiştir. Katalizör olarak sülfirik asit (H_2SO_4) kullanılan karışım da Borik Asit (H_3BO_3) ve alkol karışımı 4-6 saat boyunca $140-160^{\circ}C$ ' de geri soğutma yöntemi ile hazırlanmıştır. Soğutulan karışım soğuk etanol içinde çözülmüş ve içeriğindeki alkol buharlaştırma yöntemi ile karışımdan çıkarılmıştır. Şekil 2.2 ile kimyasal tepkime formülü aşağıda verilmiştir. Ayrıca oluşturulmuş modifiye bitümün görüntüsü ise Görsel 2.2 ile verilmiştir. Modifiye sonuçları penetrasyon değerlerini düşürmüş, yumuşama noktası ve parlama noktası değerlerini artırmış yani rijitlik değerlerini iyileştirmiştir. Dinamik kayma reometresi (dynamic shear rheometer) deneyleri sonuçlarına göre ise kompleks kayma modülü (G^*) değerleri artmış, faz açısı ($\sin\delta$) değerleri azalmış yani oluklanma direnci (rutting resistance) artmıştır. Dönel

Viskozite deneyleri sonuçlarına göre ise bütün modifiye bitümlerin viskozite değerleri artmıştır [73,74].



Şekil 2.2. Bor asidi katkısı ile oluşturulmuş karışımın genel reaksiyon formülü [73]



Görsel 2.2. Bor asidi katkısı ile oluşturulmuş karışımın görüntüsü [74]

2016 yılında belirli oranlarda filler malzeme ile yer değiştirilen bor atıklarının asfalt betonuna etkileri incelenmiştir. Atıklar ile hazırlanan asfalt betonlarının yol üst yapısında şartnameler dahilinde kullanılabileceği ispatlanmıştır [75].

Çin’ de oluşan bor atıklarının değerlendirilmesi amaçlı yapılan çalışmada bor atıklarının yol altyapısında kullanılabilirliği araştırılmış ve bu atıkların alt yapıda direkt olarak kullanılabilceği bulunmuştur [76].



Görsel 2.3. Bor atıklarının çevreye etkisi [76]

Son olarak ise bu tez çalışması kapsamında yayınlanan bir makalede; 1.18mm’ lik elek altında kalan ince ve filler malzemenin yerine, değişik oranlarda (%5, %10 ve %15) Öğütülmüş Atık Bor (ÖAB), Etibor-48 (Boraks Pentahidrat) (BP) ve Etibor-68 (Susuz Boraks) (SB) malzemeler kullanarak elde edilen asfalt betonu numunelerinin performansları araştırılmıştır. Deney sonuçlara göre aşağıdaki bulgular verilmiştir; üç farklı bor atığının asfalt betonu numunelerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre optimum bitüm oranları bor katkı oranı arttıkça, yükselmektedir. Susuz Boraks ve Boraks Pentahidrat katkı ilavesi asfalt beton numunelerin özgül ağırlık ve boşluk oranlarını azaltmakta, dayanımı ve rijitliğini düşürmektedir. Öğütülmüş Atık Bor (ÖAB) içeren numuneler ile kontrol numunelerin deney sonuçları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. ÖAB katkısının ilavesi ile optimum bitüm oranındaki artış oldukça düşüktür. ÖAB atığının asfalt betonunda kullanımı ile her 1 km yol için 86 ton atık değerlendirilmiş olacaktır. Elde edilen bu yakın sonuçlar ekonomiklik ve çevre kirliliğinin önlenmesi açısından oldukça değerlidir. Bu sonuçlar ÖAB’ un asfalt betonunda kullanılabilceğinin bir göstergesidir [77].

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR (BSK)

BSK' lar, agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşmaktadır. BSK' ın yapısını oluşturan agregalar; kırılmış ve elenmiş olarak kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin belirli gradasyon limitlerinde uygun olarak karıştırılmasıyla elde edilmekte ve bitüm ile harmanlanıp, homojen bir şekilde karıştırılmakta ve serilerek sıkıştırılmasıyla, yol üst yapısını oluşturan tabakalardan kaplama tabakası elde edilmektedir [78–80].

Yüksek standartlı karayolları, otoyollar ve havaalanlarında yapılacak esnek kaplamalar için bitümlü sıcak karışımlar kullanılmaktadır. Bitümlü sıcak karışım tabakalarının kaliteleri sahip oldukları özelliklere bağlı olduğundan bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir. Bunlar;

- Stabilite
- Rijitlik
- Dayanıklılık (Durabilite)
- Yorulma Mukavemeti
- Fleksibilite (Esneklik)
- Geçirimsizlik
- Kayma Direnci
- İşlenebilirlik

Bu fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü ideal olarak sağlayabilecek bitümlü sıcak karışım elde etmek bugün için hemen hemen mümkün değildir. Ancak optimum karışım tasarımlarının yapılabilmesi ve uygulamada ideal bitümlü kaplamaların elde edilebilmesi için bu özelliklerin çok iyi bilinmesi gereklidir [81].

Yol üst yapısı genellikle sırası ile alttemel, temel, binder ve aşınma tabakalarından oluşurlar. Aşınma ve binder tabakaları bitümlü karışımlardan oluşmaktadır. Ancak, yoldaki ağır taşıt trafiğine ve trafik hacmine bağlı olarak temel tabakası da bitümlü karışımlardan oluşabilir. Ülkemizde granüler malzeme kaynağı oldukça fazla olduğu için, temel ve alttemel tabakalarında granüler malzeme rahatlıkla ve doğal olmayan malzeme arayışlarına gidilmeden (moloz, cüruf vb.) kullanılmaktadır. Dingil yüklerinin etkisine daha fazla şekilde maruz kalan üst tabakalar, doğal olarak daha büyük gerilmelerle karşılaştıkları için, imalatlarında daha kaliteli malzemelerin kullanılması gerekir. Bu nedenle, üst tabakalar elastisite modülü yüksek bitümlü karışımlardan imal edilirler.

Bitümlü sıcak karışımlar, agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşur. Karışımda agrega oranı, ağırlıkça % 95, bitüm oranı ise % 5 civarındadır [82].

3.1. Agrega

BSK kaplamaların performansı üzerinde önemli bir role sahip olan agregalar, karışımların en önemli malzemelerinden biridir. Karışımın ağırlıkça %90 ile %95' ini, hacimce %75 ile %85' ini oluşturan mineral agregalar, kaplamanın yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde karşılayarak asfalt kaplamanın performansı üzerinde önemli rol oynarlar [83].

Agregalar genel olarak dere malzemesi, kırmataş ve yapay taşlar olarak elde edilir. Yol kaplamalarında kullanılacak en ideal agregalar, püskürük, tortul ve metamorfik olarak sınıflandırılan doğal kayaların kırılması ile elde edilen kırmataş mineral agregalarıdır [81,84]. Kaplamalarda kullanılacak agregaların, trafiğin tekrarlı statik ve dinamik yüklerine karşı koyabilmesi, bitümlü iyi bir aderans sağlaması ve farklı hava şartlarına karşı koyabilme özelliğine sahip olması gerekir [85]. Agrega malzemesi, kaba, ince ve mineral filler içeren en az üç ayrı dane gurubunun belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilmektedir [86]. BSK' larda %40-50 oranında kullanılan iri agrega, karışımın mekanik direncini arttıran bir iskelet oluşturur ve karışımın akma direncinde önemli bir artış gösterir. Karışımdaki ince agrega, iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar [78,87]. Filler, asfalt karışımlarda ince agrega oranını arttırmak, boşluk miktarını azaltmak ve asfalt betonunun dayanımını arttırmak için karışımların ana bileşenlerinden biri olarak dikkate alınır. Mineral filler malzemesinin özellikleri, onun asfalt betonunun performansını geliştirmedeki potansiyelini tespit etmek, özellikle de sıcak karışımın stabilitesini ve durabilitesini artırarak tekerlek izi oluşumu ile ilgili sorunları azaltmak için araştırılmıştır. Fillerin önemini tanımlayan ve farkına ilk varan Clifford Richardson, filler ve toz terimlerini kullanmış ve "gerçek toz" un önemini vurgulamıştır [88].

Esnek üstyapılarda kullanılacak agregaların, bitümlü iyi bir aderans sağlayarak trafiğin tekrarlı statik ve dinamik yüklerine, farklı hava koşulları gibi çevre ve dış etkenlere karşı dirençli olma özelliğine sahip olması gerekir [85,89].

Agregalar fiziksel özellikleri bakımından; mineralojik, boyut, gradasyon, biçim, yüzey yapısı, porozite, yüzey alanı ve boşluk oranı, özgül ağırlık olarak sınıflandırılmaktadırlar.

3.1.1. Agregaların mineralojik sınıflandırması

Agregalar mineralojik özellikleri bakımından dere malzemesi, kırma taş ve yapay taşlar olarak elde edilmektedir. Dere malzemeleri yüksek işlenebilirliği ve suya ihtiyacının az olmasından dolayı alt temel hariç yol kaplamalarında pek kullanılmaz iken betonarme yapılarda su, çimento ile karıştırılarak yapı betonları olarak uygulanarak, daha çok tercih edilmektedirler. Dere malzemeleri yollarda daha çok konkasörlerde kırılarak kırma taş çakıl ve kum olarak kullanılmaktadır. Yapay taşlar daha çok yüksek fırın cürufurundan elde edilmektedir. Yapısı itibariyle poroz ve gevrek bir yapıya sahip olup, yüksek ısıya sahip fırınlarda demirin eritilmesi işleminde bir yan ürün olarak sağlanmaktadır [89].

Ülkemizde genellikle betonun hammaddelerinden olan ve bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun yapısında kullanılmakta yollarda pek yaygın olarak uygulama sahası bulunmamaktadır. Yol kaplamalarında daha çok tercih edilen ve yaygın kullanım sahası olan agregalar ise kayaların kırılması sonucu elde edilen mineral agregalardır [81].

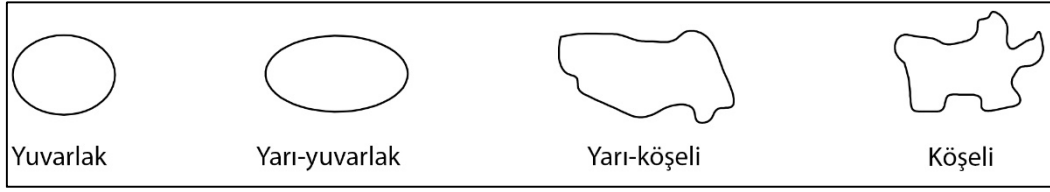
3.1.2. Agregaların boyut sınıflandırması

Agregalar dane çapı büyüklüklerine göre sınıflandırılmaktadır. Boyut sınıflandırmasına göre agregalar kaba, ince ve filler olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Agregalar belirli elek seti seçilerek dane boyu dağılım grafiği elde edilerek gruplara ayrılmaktadır.

- Kaba agregalar: Dane boyutu bakımından #4 nolu (4.76 mm) eleğin üzerinde kalan agregalardır.
- İnce agrega: #4 nolu elekten geçen ve #200 nolu elek (0.075 mm) üzerinde kalan agregalardır.
- Filler: #200 nolu elekten geçen agregalardır [81].

3.1.3. Agregaların biçim sınıflandırması

Agrega daneleri iki boyutlu ve üç boyutlu olarak şekillerine göre sınıflandırılmaktadır. Yol kaplamalarını oluşturan karışımlarda kullanılan agregalar karışımların birçok özelliklerine etki etmektedir. Agregada daneleri iki boyutlu olarak yuvarlak, yarı-yuvarlak, yarı açısız (yarı köşeli), açısız (köşeli) olarak sınıflandırılmaktadır. Agregaların iki boyutlu dane biçim sınıflandırması Şekil 3.1' de karşılaştırılmıştır [81].

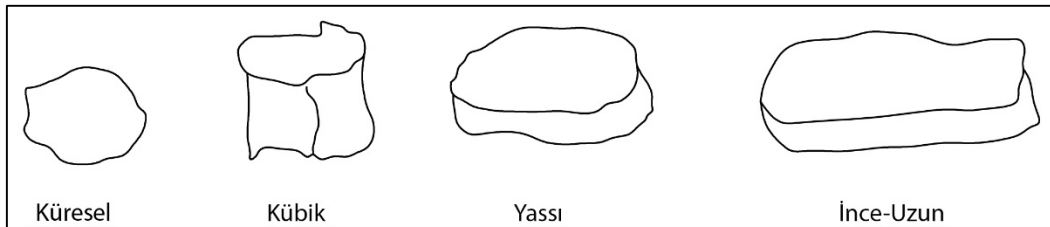


Şekil 3.1. Agregaların iki boyutlu dane biçim sınıflandırması [81]

İşlenebilirlik özelliği olarak yuvarlak biçimli agregalar köşeli agregalara göre daha yüksek olup, deformasyonlara gösterilen direnç bakımından köşeli olanlar yuvarlak biçimli agregalara göre daha dayanımlıdır. Bu özellik bakımından yuvarlak biçimli olanlar kolay sıkışabilmesi ve işlenebilirliğinin yüksek olması nedeniyle beton yapımında, köşeli olanlar ise sıkıştırdıktan sonra yüksek stabilite özelliği gösterdiğinden dolayı yol yapım malzemesi olarak tercih edilmektedir [81].

Üç boyutlu biçim sınıflandırması bakımından agregalar küresel, kübik, yassı, ince-uzun olarak sınıflandırılmaktadır. Yassı ve ince uzun özellikli agregalar işlenebilirlik ve stabilite özelliğini azalttığından beton ve yol yapım malzemesi olarak kullanılmamaktadır [81].

Şekil 3.2' de agregaların üç boyutlu dane biçim sınıflandırması yapılmıştır.



Şekil 3.2. Agregaların üç boyutlu dane biçim sınıflandırması [81]

3.1.4. Agregaların boşluk ve yüzey alanı sınıflandırması

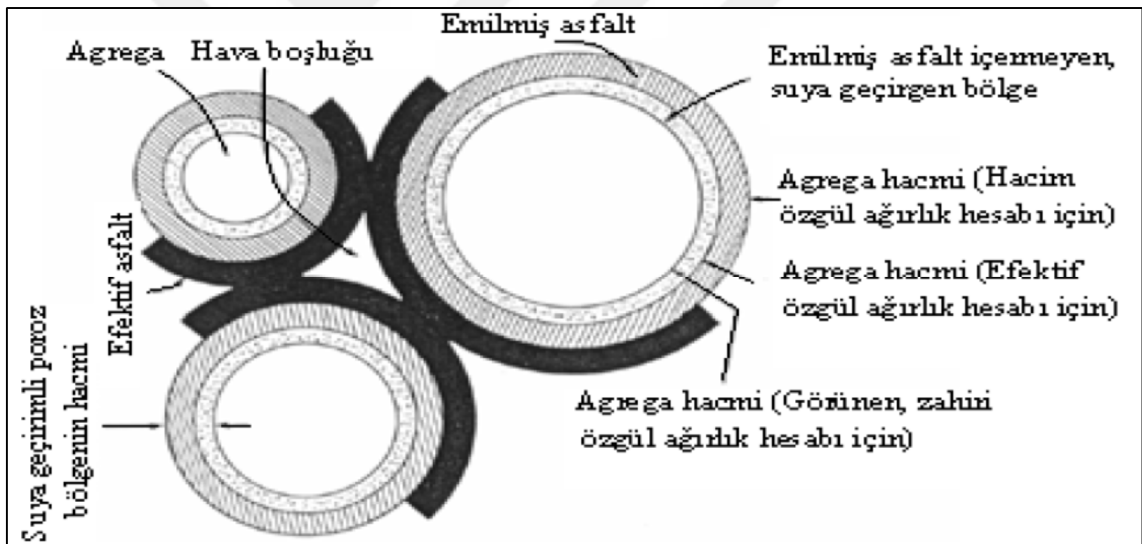
Agregalar yüzey alanı ve karışımı oluşturan agregada daneleri arasındaki boşluk oranı bakımından önem arz etmektedir. Agregada ile hazırlanan beton, asfalt betonu, alt temel ve temel tabakası gibi tüm karışımların stabilitesinin, işlenebilirliğinin yüksek, boşluk oranının düşük ve kullanılan bağlayıcı miktarının en optimum düzeyde olması istenmektedir. Bu bakımdan agregaların yüzey alanları ve karışımdaki agregalar arasındaki boşluk oranları toplamı karışımların özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Agregaların maksimum dane çapı artarsa işlenebilirlik azalmakta, karışım yoğunluğu artmakta bu yüzden bağlayıcı miktarı

azalarak karışımın stabilite, kohezyon ve dayanımı azalmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı esnek kaplamayı oluşturan tabakalar bakımından üst tabakalarda ince alt tabakalarda ise daha kaba gradasyonlu agregalar kullanılarak şartnamelerin öngördüğü karışım özellikleri sağlanmaktadır [81].

3.1.5. Agregaların özgül ağırlık sınıflandırması

Agregalar özgül ağırlık olarak zahiri özgül ağırlık, hacim özgül ağırlık ve yüzey kuru suya doygun özgül ağırlık olmak üzere üç farklı özgül ağırlığa sahiptir. Karışımı oluşturan agregaların özgül ağırlığı laboratuvar deneylerinden tespit edilerek karışım hesaplamaları yapılırken bu parametrelerden faydalanılmaktadır [89].

Şekil 3.3' de özgül ağırlık hesaplamalarındaki agrega hacim bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Agreganın özgül ağırlık hesaplamalarında dikkate alınan hacimleri [90]

3.1.6. Agregaların porozite sınıflandırması

Porozite, agrega danelerinin sahip olduğu toplam boşlukların hacminin, agrega danesi hacmine oranı olup, su emme oranına etki etmektedir. Agreg a danelerinin su emmeye sahip boşlukların miktarının asfalt betonlarında %0.5-1.5 arasında olması istenmekte diğer tabakalarda ise dona karşı duyarlılığın sağlanması için porozitenin fazla olmaması istenmektedir. Yeterli derecede poroziteye sahip agrega daneleri bitüm emilmesini sağlayacağından agrega ile bitüm arasında adezyonun ve suyun etkisiyle oluşacak soyulmaya karşı direncin artmasına yol açmaktadır. Aşırı poroz yapıya sahip

agregalarda ise özgül ağırlıklarının az olması ve boşlukların fazla olması nedeniyle daha fazla bitüm kullanılması gerekmekte bu durum sıcak havalarda terleme ve kusma problemlerini meydana getirmektedir. Ayrıca poroz agregalarda yoğunluk ve kütleli stabilite değerleri düşük olduğundan dolayı asfalt betonlarında hem aşırı poroz agregaların hem de poroz olmayan agregaların kullanılmaması gerekmektedir [81,91]. Agregaların porozluklarına göre sınıflandırması Şekil 3.4’ deki biçimdedir.



Şekil 3.4. Poroz sınıflandırması [91]

3.1.7. Agregaların yüzey yapısı sınıflandırması

Agrega daneleri pürüzlülük ve cilalık yüzey yapılarına göre sınıflandırılmaktadır. Agregaların dere malzemesi gibi cilalı olanları işlenebilirliği arttırdığından beton yapımında kullanılmakta, kırma taş agregalarının kullanıldığı pürüzlü yüzeylere sahip olanlar ise asfalt betonu kaplamalarında stabiliteyi arttırdığından dolayı tercih edilmektedir. Agregada danelerinin fazla pürüzlülüğü içsel sürtünme açısı, stabilite, kayma mukavemeti, asfalt filmi ile adezyon özelliğini artırıp, işlenebilirliği azaltmakta ancak agregaların boşluk hacmi sıkışmaya karşı direnç, lastik aşınması artışı ve degradasyon gibi olumsuz özelliklere yol açmaktadır. Bu bakımdan agregalardan beklenen özellikleri sağlanması için yüzey pürüzlülüğü önem arz etmektedir [81,91]. Şekil 3.5’ de agregaların pürüzlülüklerine göre sınıflandırması yapılmıştır.



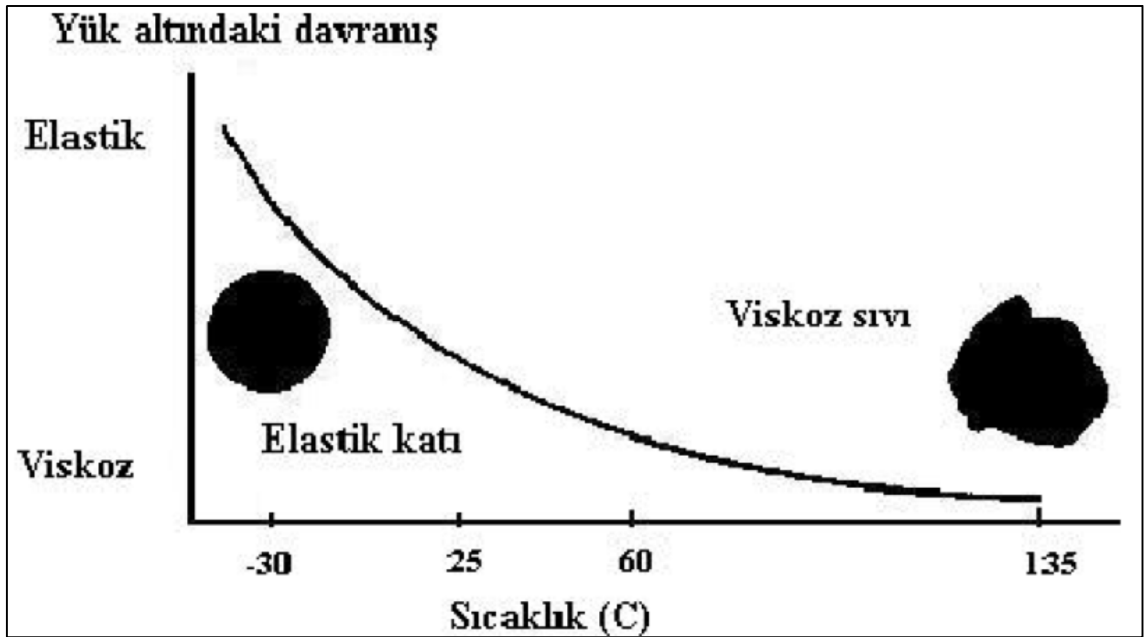
Şekil 3.5. Agregaların pürüzlülük sınıflandırması [81]

3.2. Bitüm

Bitümlü sıcak karışımlar, şartnamelerde belirtilen standart agrega miktarının ve gerekli bitümün karıştırılmasıyla imal edilirler. Bitümlü sıcak karışımların kohezyonu bitüm tarafından sağlanırken agrega ise karışımın içsel sürtünme direncinden ve stabilitesinden sorumludur. Ayrıca bitüm agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmalarını önlemekte, yarattıkları düzgün yüzeyler ile sürüş konforu sağlamakta, kohezyonları ile karışımın stabilitesini artırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadırlar. Bitümlü sıcak karışımlar ağırlıkça en fazla %5-7 ve hacimce en fazla %13-15 oranlarında bitümden oluşmaktadırlar [81].

Türkiye’ de iklim koşulları açısından BSK esnek yol kaplamalarında en yaygın kullanılan bitüm tipleri B 40/50, B 50/70 ve B 70/100 penetrasyonlu bitümlerdir. Ancak sıcak iklimli bölgelerde ve ağır trafik hacminin yoğun olduğu yollar için B 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılması daha uygundur [81,86].

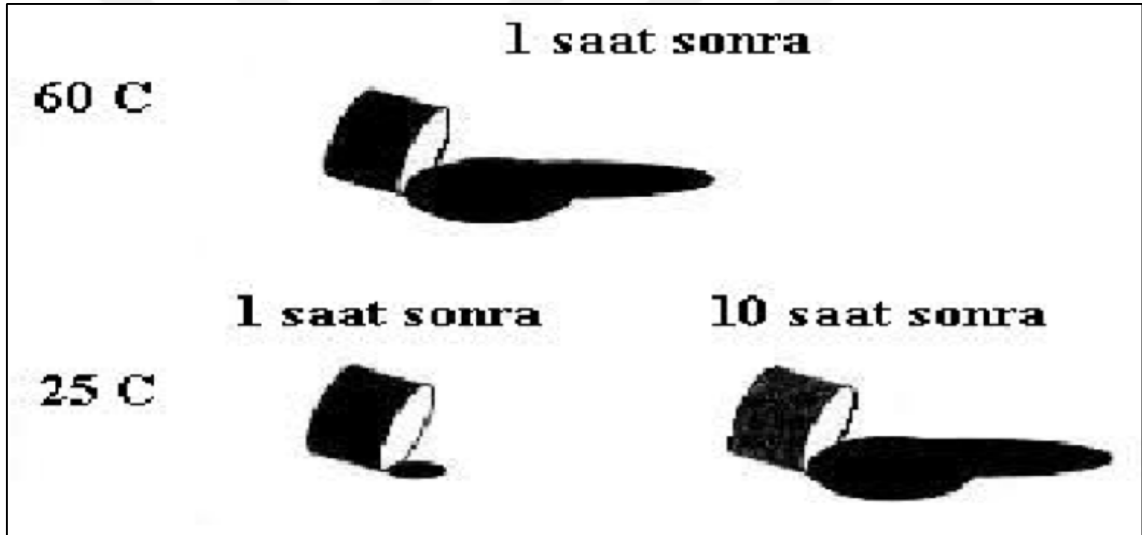
Asfalt betonu performansında bitümün karakteristikleri önemlidir. Bunlar sıcaklığa karşı hassaslık, visko-elastik yapı ve yaşlanmadır. Ayrıca bitümün davranışı yüklenme zamanına bağlıdır. Bitüm daha kısa bir yüklenme zamanı altında katılaşır, sertleşmektedir [85]. Şekil 3.6’ da bitümün sıcaklık değişimi ve yük altındaki davranışı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Bitümün sıcaklığa göre yük altındaki davranışı [92]

Bitüm, viskoelastik bir malzeme olup, davranışı hem yüklemeye, hem de sıcaklık koşullarına bağlıdır. Bitüm, sıcak iklim koşullarında ve sürekli yüklemeye durumunda viskoz bir sıvı gibi davranırken, soğuk iklim veya hızlı yüklemeye koşullarında elastik bir katı gibi davranış göstermektedir. Bitüm, agrega ile karıştırıldığında bu özellikleri aynen sıcak karışıma da geçtiğinden asfalt betonunu da viskoelastik bir malzeme gibi davranmaktadır [93].

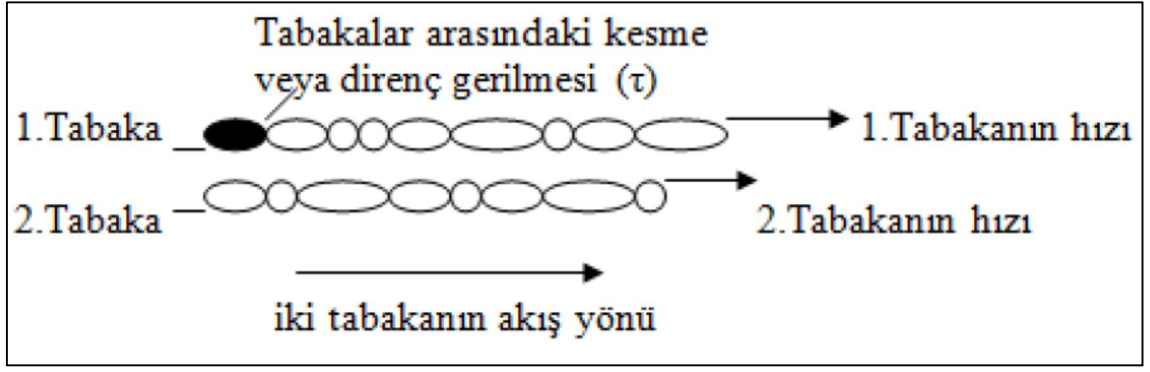
Yüksek sıcaklıklarda özellikle 100°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda bitüm hemen hemen viskoz akıcı davranır. 0°C' nin altındaki düşük sıcaklıklarda bitüm çoğu zaman yüklendiği veya yüklenmediği zaman şekil değiştirmesi elastik katı gibi davranır [85]. Şekil 3.7' de viskoelastik bir malzeme olan bitümün sıcaklık ve yüklemeye zamanı ilişkisi davranışı görülmektedir.



Şekil 3.7. Bitümün zaman ve sıcaklığa göre davranışı [94]

3.2.1. Bitümün yüksek sıcaklık davranışı

Sıcak havada ya da yavaş araç trafiğinde (park alanları) bitüm viskoz davranır. Viskozite, fiziksel bir özelliktir ve sıvının akmaya karşı dayanımını ifade eder. Sıcak bitüm viskoz sıvılar bazen plastik diye isimlendirilir. Çünkü akmaya başlar ve sonra ilk durumlarına dönmezler. Bu durum sıcak havalarda bitümlü sıcak karışımların daha az stabil olmasını sağlar ve tekrarlanan yükler altında teker altında oturmalar oluşturur [95]. Bitümün sıvı akış özelliklerinin mikroskobik görünüşü Şekil 3.8' deki gibidir.



Şekil 3.8. Bitümün sıvı akış özelliklerinin mikroskopik görünüşü [89,95]

3.2.2. Bitümün düşük sıcaklık davranışı

Soğuk havalarda ya da hızlı araç trafiğinde bitüm elastik malzeme gibi davranır. Elastik malzeme lastik yükü ile yüklendiğinde deforme olur. Yük kalkınca eski şekline döner. Eğer yük malzemenin dayanımından fazla gerilme oluşturursa elastik malzeme kırılabilir. Bitüm, düşük sıcaklıklarda rijit davrandığından çok kırılgan olur ve aşırı yüklerde çatlaklar oluşur. Bu nedenle soğuk havalarda asfalt kaplamada düşük sıcaklık çatlakları oluşur [95].

3.2.3. Bitümün normal sıcaklık davranışı

Çevre koşulları çoğu aşırı sıcaklar ile aşırı soğuklar arasındadır. Bu tür iklime sahip bölgelerde bitüm, hem kıvamlı sıvı hem de elastik katı özellikler sergiler. Bitüm ısıtıldığında, düzgün ve boşluğu az bir yüzey elde edilebilecek şekilde karıştırmaya, agrega yüzeyinin bitümle kaplanmasına ve sıkıştırmaya imkan tanıyan bir kayganlaştırıcı gibi davranır. Soğuduğunda ise agregayı bir arada tutan bir yapıştırıcı gibidir. Bu nedenle bitümün davranışı visko-elastik olarak değerlendirilir. Yani sıcaklık ve yük/yükleme hızına bağlı olarak hem elastik hem de viskoz özellik taşır [92,94,96].

3.2.4. Bitümün yaşlanma davranışı

Kaplama sistemlerinin çoğu orta sıcaklıklarda bulunur. Bitüm hem akıcı hem de elastik katı bir karakteristiğe sahiptir. Bitüm organik bir malzeme olduğu için çevreden oksijen ile reaksiyona girer. Oksidasyon asfalt moleküllerinin yapı ve karmaşık özelliğini değiştirir. Oksidasyon bitümde oksitlenme, yaşlanma veya sertleşmeye yol açarak daha fazla kırılmaların oluşmasına neden olur. Oksidasyon daha yüksek sıcaklıklarda daha hızlı bir şekilde meydana gelir. Bitüm ısıtılıp, daha kolay karıştırılıp, sıkıştırıldığı zaman miktar olarak önemli ölçüde kırılmalar meydana gelir [89].

Sıcaklık değişimleri ve yükleme oranları altında bitümün karakteristikleri ve yaşlanma aşamaları kaplama sistemleri içinde bir bağlayıcı olarak performans özellikleri tespit edilir [85].

Kaplama bünyesindeki bitümün; servis ömrü boyunca ısının, havanın ve çevresel koşulların etkisinde sertleşmeye uğradığı, zamanla bitümün viskozitesinde artış oluşturan ve oksidasyon sonucu değişmenin yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırıldığı, yaşlanma sertleşmesine uğrayan bitümün daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite gösterdiği, yaşlanma sertleşmesinin gevrek kırılma ile daha düşük adezyon ortaya koyduğu ifade edilmektedir [97].

3.3. Bitüm Modifikasyonu

Bitümler özelliklerinin geliştirilebilmesi adına uzun yıllardır modifiye edilmektedirler. Bitümlerin doğal ve sentetik polimerlerle modifikasyonu için geliştirilen metotlara dair patent çalışmaları 1843 yılına kadar dayanmaktadır [98]. Bitüm modifiyesi ile ilgili çok detaylı bir literatür taraması Keskin' in çalışmasında verilmiştir [99].

Ayrıca mineral malzemelerle yapılan bitüm modifikasyonları ile ilgili son dönem çalışmalara kısaca göz atılacak olursa, Çubuk vd. nin hazırlamış olduğu çalışmada organik esaslı magnezyum bileşiği ile bitümün modifiye edilmesi ve katkı maddesinin bitümün reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Organik esaslı magnezyum bileşiği bitümün penetrasyonunu arttırmış, yumuşama noktası değerini azaltmıştır. Aynı zamanda yüzey gerilimini de azaltarak bitümün agregayı kaplama yeteneğini arttırmıştır. Performansa ilişkin Nicholson soyulma ve Marshall testleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre sentezlenen katkı maddesinin bitüm-agrega ara yüzeyindeki adezyon özelliğini iyileştirerek bitümün soyulma direncini arttırdığı belirlenmiştir [100].

Arslan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise trietilen glikol bazlı sentetik poliboron (TEGPB) ile modifiye edilmiş bitüm ve bitümlü karışımların performansı artırılmaya çalışılmıştır. TEGPB, laboratuvar koşullarında kimyasal olarak sentezlenen yeni bir katkı maddesidir. Eğilme kirişi reometresi ve Nicholson soyulma testi sonuçları, sünme özelliklerini ve soyulma direncinin modifiye bitümlerde olumsuz olarak etkilenmediğini göstermiştir. Ayrıca bitümün yumuşama noktası ve oluklanma direnci ile asfalt betonlarının Marshall stabilitesi TEGPB modifiyesi ile arttırılmıştır [101].

Arslan vd. nin diğ er ç alışmasında organik bazlı sentetik kalsiyum ile borik asit modifiyesi ile oluşturulan bitümlerin performansı incelenmiştir. İki katkı maddesi de laboratuvar ortamında kimyasal olarak sentezlenmiştir. Dönel viskozite deneyi sonuçlarına göre her iki katkı maddesi de ağırlıkça %3 oranında eklenmelidir denmiştir. Modifiye işlemi viskozite ve yumuşama noktası değerlerini düşürmüş düktilite değerlerini de artırmıştır. Dinamik kayma reometresi deneyi ile yüksek sıcaklık performansına bakılan modifiye bitümlerin ise normal bitümler ile aynı değerlerde olduğu söylenmiştir. Eğilme kirişi reometresi ise düşük sıcaklıkta kırılma direnci performansının normal bitümlerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Son olarak ise katkılı bitümlerin Marshall Stabilite, soyulma direnci ve rijitlik modülü değerlerini iyileştirdiği söylenmiştir [102].

Atık yemek yağlarının bitüm ile karışımı sonucu yapılan bir modifikasyon ç alışmasında yağların direk olarak bitüm ile karışımı bitümün reolojik özelliklerini bozduğu ancak kimyasal iyileştirmeler sonucu bu durumun düzeltilebileceği keşfedilmiştir. Reolojik özelliklerin bozulması atık yağların yüksek asit oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır, alkali katalizörler ile transesterifikasyon sonucu iyileştirilen yağların bitüm ile karıştırılması sonucunda ise modifiye bitümlerin özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Asit değerleri 1.65 mL/g' dan 0,54 mL/g' a düşmüş, bunun sonucu olarak penetrasyon değerleri düşmüş yumuşama noktası ve viskozite değerleri yükselmiştir. Bu durum bitümün reolojik özelliklerini iyileştirmiş, oluklanma direncini artırmış, ısıya karşı hassasiyetini düşürmüştür [103].

şeker pancarı melası ve melas esaslı bor oksit bileşiğinin 50/70 penetrasyonlu bitüme farklı oranlarda karıştırıldığı ç alışmada da; Marshall Stabilite ve Nicholson soyulma testi sonuçlarına göre, bitümlü karışım performansının melas esaslı bor oksidi bileşiği tarafından geliştirildiği tespit edilmiştir, ancak şeker pancarı melasıyla aynı seviyede kaldığı belirlenmiştir [104].

Bir başka ç alışmada ise bitüme katılması gereken optimum pirinç kabuğu külü (RHA) miktarı bulunmaya ç alışılmış ve bu karışımın bio-oil (BO) ile modifikasyonu incelenmiştir. Ç alışmaya göre RHA ilavesi ile oluşturulan asfalt karışımların sıcak hava performansları son derece iyi iken soğuk hava performanslarının yetersiz olduğu söylenmiş bu durumun BO ilavesi ile düzeltilebileceği ispatlanmış soğuk hava performansları arttırılan numunelerin aynı zamanda yorulmaya karşı dirençlerinin de iyileştiği gözlemlenmiştir [105].

Enieb ve Diab' ın hazırlamış olduğu çalışmada nanosilika (NS) ile modifiye edilmiş bitüm ve sıcak asfalt karışımların performansını incelemiştir. %2, %4 ve %6 oranlarında nanosilika ile karıştırılan bitümlerin penetrasyon değerleri düşmüş, yumuşama noktası ve viskozite değerleri artmıştır. Ayrıca Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile malzemelerin karakterizasyonuna bakılmış ve saf bitüm ile modifiye bitümün birbirine yakın kimyasal fonksiyonlara ve molekül yapısına sahip olduğu görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında da karışımların özellikleri incelenmiştir. Sonuçlara göre; NS ilavesi esneklik modülü, bölünme mukavemeti, kırılma enerjisi ve yorulma ömrü değerleri artmış, neme karşı duyarlılık değerleri azalmıştır. Yani daha dayanıklı kaplamalar üretilmiştir. Son olarak ise NS modifiyesinin daha düşük fiyatlara mal olacağı belirtilmiş olup asfalt betonunun hizmet ömrünü uzatıp, maliyetlerinin düşürülebileceği belirlenmiştir [106].

3.4. Bitümlü Malzemelerin Deformasyon Davranışı ve Reolojik Özellikleri

Bitümlü sıcak karışımlar, karışımı meydana getiren unsurların özelliklerini taşır. Bu parametrelerin tekil etkilerinin yanında, birbirleri arasındaki etkileşimleri de karışımın özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların mekanik davranışını belirleyen bu konu üzerinde sayısız araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, karışım özelliklerini belirleyen faktörler arasında en önemlileri;

- Bitüm içeriği ve sınıfı,
- Hava boşluğu miktarı,
- Agrega gradasyonu ve tipi (malzeme cinsi, yüzeyi, sekli),
- Karışım sıcaklığı olarak gösterilmektedir [107].

Çoğu araştırmacı, kaplama mühendisliği ile ilgili çalışmalardaki öneminden dolayı, çalışmalarını esnek kaplamalarda meydana gelen kalıcı deformasyonlar (oluklanma ya da tekerlek izi) üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Kalıcı deformasyonlar, kaplamanın servis yeteneğinde azalmaya neden olmaktadır. Tekerlek izlerinin zamanla çatlamaya uğraması ve su girişi ile birlikte kaplamada meydana gelen bozulma, bu duruma yardımcı olmaktadır. Bitümlü malzemelerde oluşan deformasyonlar daha çok ilkbahar sonlarında, yaz aylarında ve sonbahar başlarında oluşmaktadır. Bunun nedeni olarak, yılın bu dönemlerinde sıcaklıkların yükselmesi, don çözümlerinin meydana gelmesi, yağmurlar, terleme ve kuma olaylarına eşlik eden oluklanmaların oluşması ve sonbaharda yinelenen yağışlar gösterilebilir. Kış aylarında ise zemin donarak asfalt

betonuna destek olmaya başlamakta ve böylelikle kalıcı deformasyonların miktarında azalma görülmektedir [108].

3.4.1. Kaplama performansı

Bir kaplamanın performansı kaplamanın yüzeyi tabakasının;

- Sürüş emniyeti
- Sürüş konforu

ile artar. Yüzeyi tabakasının temel karakteristikleri;

- Yüzey düzgünlüğü
- Yüzey pürüzlülüğü (yani yüzeysel dokusu)
- Işık yansıtma

olarak ele alınmaktadır Fakat bunların her biri ayrı ayrı önemli olsa da farklı karakteristiklere sahip olmasından ötürü önem sıralaması veya derecelendirilebilmesi mümkün olmamaktadır. Her ne kadar yüzey düzgünlüğü ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki yüzey pürüzlülüğü ile ışık yansıtma arasındaki ilişki den daha fazla olsa da birbirleri arasındaki ilişkinin değeri ile her birinin ayrı ayrı önem derecesi ortaya konabilmiş değildir [109].

Kaplamanın yukarıdaki temel karakteristiklerine ilaveten;

- Geometrik karakteristikler
- Kaplamada kullanılan malzemenin özellikleri

gibi iki husus da dikkate alınmalıdır. Ancak yüzey tabakasının karakteristik özellikleri;

- İklim (yağış ısı vb.)
- Gece/gündüz (ışık ve görüş şartları)
- Araç (lastik, süspansiyon, hız, ışık şiddeti vb.)

gibi şartlardan etkilendiği göz önünde tutulmalıdır.

Dolayısıyla kaplama yüzey karakteristikleri temel karakteristikler den ortaya çıkan;

- Sürüş dinamik etkisi
- Yüzeysel drenaj kalitesi
- Kayma direnci
- Yansıma özellikleri
- Teker gürültüsü

- Yuvarlanma direnci
- Termodinamik kalite
- Aşınma

gibi karakteristik özelliklere sahiptir. Kaplama yüzey karakteristiğini belirleyen etmenler;

- Tasarım (yol geometrik ve kaplama tasarımı)
- Yapım (yapım ve malzeme kalitesi, bakım/onarım vb.)
- Trafik (hacim, kompozisyon, ağırlık, hız, vb.)
- Çevre (iklim, günün zamanı, yağ/kuru/buzlu/karlı, kirli vb.)

olarak ele alınmaktadır. Bu etmenlerin bazıları kontrol altında tutulabilirken (örneğin; tasarım ve yapım) bazıları kontrol dışı olması (örneğin; trafik ve çevre şartları) nedeniyle kontrol altına alınamamaktadır [109].

Kaplama yüzey karakteristiklerinin yarattığı sonuçların önem sırasına göre;

- Sürüş emniyeti
- Sürüş konforu
- Enerji tasarrufu
- Kaplamanın korunması
- Araçların korunması şeklinde olacaktır.

Ayrıca kaplama yüzey karakteristiklerinin optimizasyonu üç farklı seviyede veya kapsamda ele alınabilmektedir Zira her bir yolun önem seviyesi birbirinden farklı olabildiği gibi her bir kaplamanın önemi birbirinden farklı olacaktır. Dolayısıyla kaplamanın yüzey karakteristikleri de üç farklı önem seviyesinde ele alınarak değerlendirilmelidir. Bunlar;

- Dar kapsamlı optimizasyon
- Orta kapsamlı optimizasyon
- Geniş kapsamlı optimizasyondur.

Aşağıdaki nedenlerden dolayı kaplamanın kayma direnci azaldığından sürüş emniyetini olumsuz etkilemektedir.

- Asfalt betonunun sıcak havalarda genişleyerek kaplama yüzeyine çıkıp agrega danelerini sarması (asfaltın terlemesi ve kusması) sonucunda kaplama yüzeyinin kayma direnci önemli ölçüde azalmaktadır.

- Trafiğin aşındırma etkisine maruz kalan agrega yüzeylerinin cilalanması ile pürüzsüz yüzeyler oluşmakta ve agrega/teker arasındaki sürtünme kuvveti azalmaktadır.
- Makro pürüzlülük azaldıkça tekerin altındaki sular diren olamayıp sürtünme kuvveti azalmakta ve hidroplan etkisi artmaktadır.
- Ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu esnek kaplamalarda teker izi olukları oluşmakta ve yağışlardan sonra bu oluklarda biriken sular hidroplan etkisi yaratmaktadır.
- Kaplamada yetersiz yanal eğimden dolayı yüzeysel suların dren olabilmesinin gecikmesi ile sürtünme kuvvetinin azalması ve su film kalınlığının artması sonucu hidroplan etkisi doğmaktadır.

Kaplama emniyeti veya kaplamadan beklenen sürüş emniyeti;

- Kayma direnci
- Teker izi (oluklara su dolarak hidroplan ve buzlanma tehlikesi yaratması)
- Kaplama yüzeyinin ışığı az veya çok yansıtması
- Kaplama üzerindeki agrega kopması veya yabancı maddeler
- Yüzey drenajı

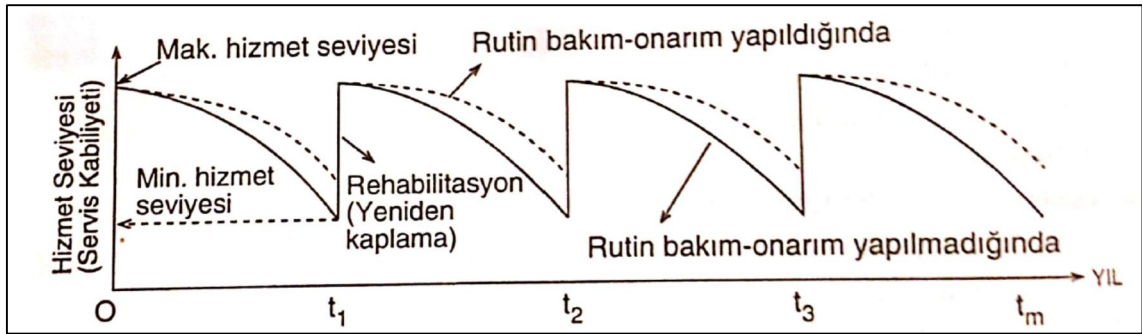
olarak ele alınmaktadır. Ancak bunlardan en önemlisi kayma direnci olmaktadır. Fakat kaplamanın pürüzlülüğü arttıkça sürücünün yorgunluğunu arttırmakta ve bu da emniyeti tehlikeye sokmaktadır. Yeterli enine eğime sahip olmayan kaplamalardaki yağmur sularının çabuk dren olmaması hidroplan etkisini ve su sıçratmasını arttırarak sürüş emniyetini tehlikeye sokmaktadır [109].

3.4.2. Esnek kaplamalarda oluşan gerilme ve deformasyonlar

Esnek kaplamaların tasarımı için ampirik ve analitik çözümler olmak üzere iki ayrı yaklaşım mevcuttur. Analitik çözümler bir takım kabullere dayalıdır. Zira trafik ve çevre etkilerinden dolayı kaplamada oluşan gerilmelerin analizi son derece komplekstir. Trafik ve çevre etkilerinin etkisiyle kaplamanın zaman içindeki davranışındaki değişimi veya hizmet kabiliyetindeki azalma miktarı yol testlerinden elde edilen sonuçlara dayandırılarak ampirik yöntemler geliştirilmiştir. Tekerrür eden trafik yüklerinden ötürü zamanla kaplamada bozulmalar oluşarak konforlu ve emniyetli sürüş şartları önemli

ölçüde azalmaktadır. Şekil 3.9’ da kaplamanın tekerrür yüklerine bağlı olarak servis kabiliyetindeki değişimi ve hizmet ömrü görülmektedir [109].

Esnek kaplamalar teknik kurallara uygun olarak yapıldığı takdirde konfor ve sürüş emniyeti açısından taşıtlara maksimum hizmet seviyesi verebilecektir. Kaplama kullanılmaya başlandıktan sonra trafik ve çevre etkisiyle oluşan bozulmalar nedeniyle hizmet seviyesinde azalma başlar ve hatta zamanla kaplama kullanılamaz hale gelir. Kabul edilebilir minimum hizmet seviyesinde bozulmuş kaplamada rehabilitasyon (yeniden aşınma tabakası yapılması veya geri kazanım ile kaplama takviyesi) yapılarak tekrar maksimum hizmet seviyesine çıkartılır [109].



Şekil 3.9. Zaman-hizmet seviyesi ilişkisi [109]

Ağır taşıt yüklerinden dolayı kaplamada ve kaplamanın her bir tabakasında meydana gelen gerilme ve deformasyon miktarının tayini için elastik teori kısmen yardımcı olabilecektir. Bir malzemeye tek eksenli bir yük tatbik edildiğinde malzemenin elastisite modülü (E) ve poisson oranı (μ) gibi iki farklı parametreye bağlı olarak gerilme ve deformasyon oluşmaktadır. Buradan deformasyon, elastisite modülü ve poisson oranı aşağıdaki gibi saptanır [109].

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_l} \quad (3.2)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_l} \quad (3.3)$$

Burada;

ε_l : Boyuna (eksenel) deformasyon

ε_r : Yanal deformasyon

l : Yükseklik

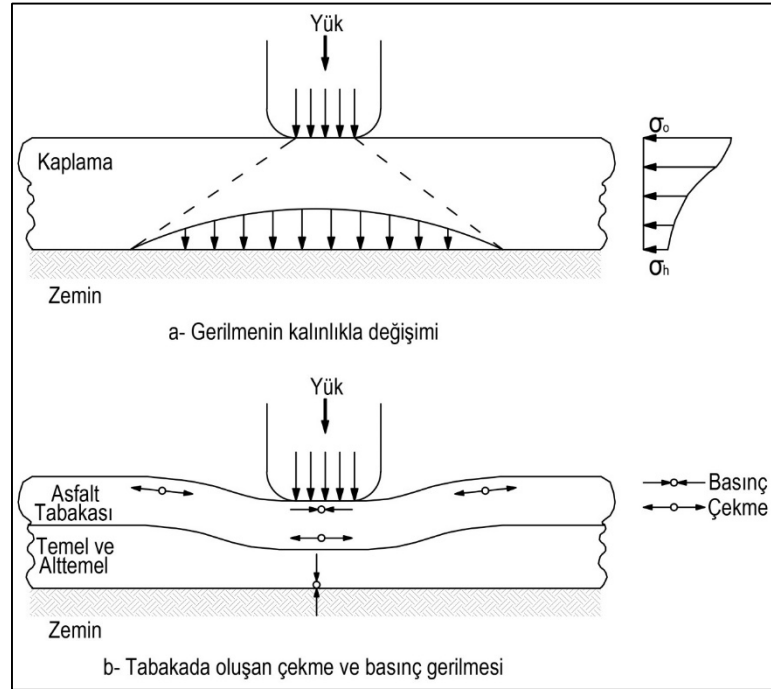
Δl : Çekmede uzama veya basınçta kısalma miktarı

σ : Gerilme

μ : Poisson oranı

E : Elastisite modülü

Hook kanununa göre σ/ε oranı sabit olsa da gerçekte kaplama malzemesinin bir takım nedenlerden (örneğin; ısı, rutubet yüzdesi, gerilme şartları vb.) dolayı elastisite modülü ve poisson oranı sabit değildir. Bu nedenle elastik teoremin esnek kaplamalara uygulanması mümkün olmasa da esnek kaplamada oluşan gerilmelerin anlaşılması için gereklidir. Şekil 3.10' da esnek bir kaplamaya bir teker yükü etkidiğinde yükün zemine aktarılması ile her bir tabakada meydana gelen çekme ve basınç gerilmeleri görülmektedir [109].



Şekil 3.10. Teker yükünün kaplama ve zeminde yarattığı gerilmeler ve deformasyon [109]

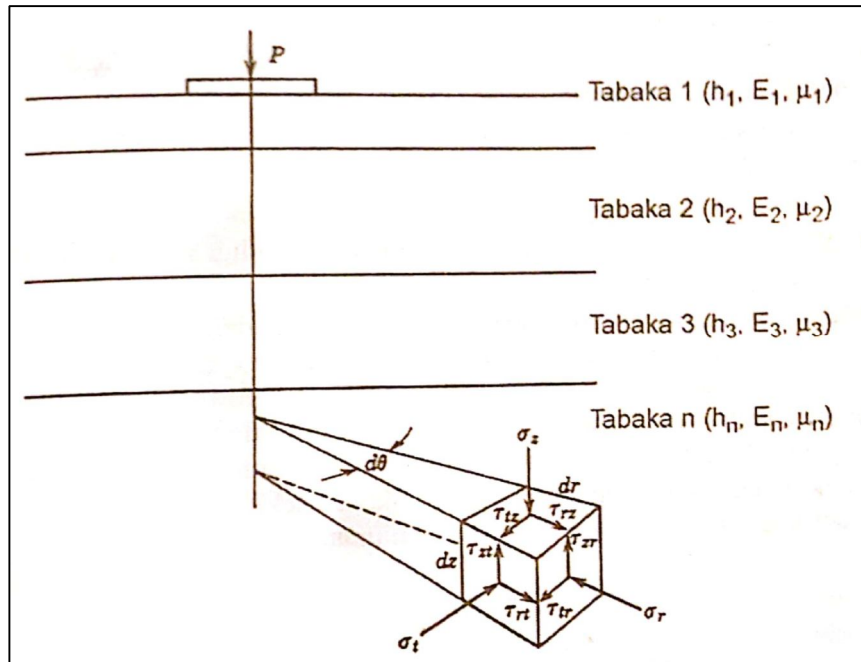
Teker yükü tarafından oluşturulan gerilmeler ne zeminin taşıma gücünden, nede kaplamanın dayanımından daha fazla olmalıdır. Şekil 3.10a' da görüldüğü gibi teker yükü kaplamanın üstünde σ_0 gibi gerilme yaratırken kaplamanın h yüksekliğinde yükün dağılması nedeniyle zeminin üzerinde σ_h gibi daha küçük bir gerilme yaratmaktadır. Şekil 3.10b' de ise teker yükünün kaplamaya etkidiği yerde tabakanın üst kısmında basınç ve alt kısmında çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Tekerrür eden trafik yükleri ile kaplamanın alt kısmında yorulma çatlakları ve üst kısmında kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir [109].

Esnek kaplamalar çok tabakalı bir yapı olduğundan dolayı teorik gerilme ve deformasyon analizlerinde;

- Her bir tabaka homojen (her yerde aynı)
- Her bir tabaka isotropik (her yönde aynı)
- Her bir tabaka elastik
- Her bir tabaka arasında tam bir sürtünme

olduğu gibi bir takım kabuller yapılmaktadır. Bu kabullere göre kaplamada herhangi bir elemana etki eden;

- Düşey (σ_z), radyal (σ_r) ve teğetsel (σ_t) olarak üç adet gerilme,
- $\tau_{rt} = \tau_{tr}$, $\tau_{rz} = \tau_{zr}$ ve $\tau_{tz} = \tau_{zt}$ olarak altı adet kayma gerilmesi mevcuttur. Bu gerilmeler şekil 3.11' de verilmiştir [109].



Şekil 3.11. Çok tabakalı sistemde gerilmeler [110]

Şekil 3.11' de görülen herhangi bir elemanın üç eksenli gerilme şartlarındaki deformasyonları aşağıdaki gibi bulunur [110].

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] = \frac{1}{E} (\sigma_z - 2\mu\sigma_r) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_z + \sigma_t)] \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (3.6)$$

$\sigma_t = \sigma_r$ olduğundan dolayı formül 3.7' deki eşitlik elde edilir.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r = -\mu \frac{\sigma_z}{E} \quad (3.7)$$

Burada;

ε_z : Boyuna deformasyon

ε_t : Yanal deformasyon

σ : Gerilme

μ : Poisson oranı

E : Elastisite modülü

Görüldüğü gibi deformasyonların analizi için her bir tabakanın elastisite modülü ve poisson oranı gereklidir. Dolayısıyla kaplamanın teorik analizleri oldukça karmaşıktır.

Çünkü;

- Bitümlü sıcak karışımlar termoplastik ve viskoelastik malzemelerdir. Yani ısı ve yükleme hızına bağlı olarak elastisite modülleri ve poisson oranları değişken olup sabit bir değeri yoktur.
- Zeminin su içeriğine ve donma durumuna göre elastisite modülü değişken olup sabit bir değeri yoktur.
- Bağlayıcısız granüler malzeme su içeriğine bağlı olarak içsel sürtünme açısı değiştiğinden dolayı sabit bir elastisite modülü yoktur.

- Esnek kaplamaları oluşturan bitümün Hook cismi gibi gerilme-deformasyon ilişkileri lineer değildir.
- Trafik yükleri ve çevre şartları sürekli değişkendir.
- Esnek kaplamalar tam elastik malzemeler olmadığı gibi tam homojen oldukları da söylenemez [109].

3.4.3. Bitümlü malzemelerin reolojik özellikleri ve sünme davranışı

Bitüm viskoelastik bir malzemedir. Sıcaklığa bağlı olarak; gevrek elastik, viskoelastik, viskoplastik, termoplastik, elastoplastik ve tam viskoz olmak üzere değişik reolojik durumlarda bulunur [111].

Bitümde, gerilme-deformasyon ilişkisi hem yükün miktarına hem de yükleme süresine bağlı olduğu için reolojik malzeme olarak kabul edilir. 1936 yılında, Pfeiffer ve Van Doornal' in bitüm ve bitümlü karışımların reolojik davranışı üzerine yaptıkları araştırmayla başlayan dönem, sayısız araştırmacının bu konudaki benzer çalışmalarıyla devam etmiştir [112]. Van der Poel, yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olarak bitümün reolojik davranışını incelediği çalışmasında, bitümün viskoelastik özelliğini tanımlamaya çalışmıştır [113]. 1953 yılında yapılan bu çalışmadan bir yıl sonra, Mack bitümlü kaplamaların yük taşıma mukavemeti ve deformasyon mekanizması üzerine olan araştırmasının sonuçlarını yayınlamıştır [114]. 1960 yılında Pister ve Monismith' in viskoelastik esnek kaplamaların analizini, 1961 yılındaki Secor ve Monismith' in bitüm üzerindeki üç eksenli çalışması izlemiştir [115,116]. Hofstra ve Klomp, 1972 yılında, gerçek trafik şartlarının simule edilip uygulandığı esnek kaplamada oluşan kalıcı deformasyonları incelemiş ve sonuçlarını açıklamışlardır [117]. Hills, BSK' ların sünme özelliğini incelemiştir [118]. 1985 yılında Uzan, Sides ve Perl, BSK' ların performansını viskoelastoplastik modelle açıklamaya çalışmışlardır [119]. Parmar ve Bhatt ise 1986 yılında mastik asfaltın sünme altındaki reolojik davranışını incelemiştir [120]. Bir yıl sonra Kandhal ve Koehler, reolojik özelliklerin kaplamalarda meydana gelen çatlaklar üzerindeki etkisini araştırmışlardır [121]. 1992 yılındaki bir başka araştırmada ise Kadar ve Remtulla modifiye bitüm karışımların mühendislik ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir [122]. Negulescu ve Daly, polimer modifiye asfaltın reolojisini araştırmışlardır [123]. 1996 yılındaki bu çalışmadan sonra 2000' li yıllarda da çeşitli araştırma ve çalışmalar yürütülmüştür. 2005 yılındaki iki çalışmadan biri Marastenanu, Clyne, McGraw, Li ve Velasquez tarafından yapılmıştır. Bitümün yüksek sıcaklıktaki

reolojik özelliklerini konu alan bu çalışmayı Syzdo ve Mackiewicz' in "reolojik parametrelerdeki değişimin deformasyona etkisi" konulu çalışmaları izlemiştir [124,125].

Bitümlerin viskoelastik davranışlarını matematiksel olarak tanımlamak için Maxwell, Kelvin, Van der Poel ve Burgers modelleri gibi bazı tanımlamalar malzemelerin karmaşıklıklarını anlatabilmek için bilinen modellerdir. Bu modellerde sıcaklıktan bahsedilmemesine rağmen, bitümün davranışları sıcaklığa bağlı olması nedeniyle sıcaklık BSK' lar için kritik öneme sahiptir. Bitümün viskozitesi sıcaklığın bir fonksiyonudur; bu nedenle, sıcaklık ve sünme arasında doğrudan bir ilişki vardır. Örneğin, düşük sıcaklıklarda bitümün elastik özellikleri baskındır; tersine, yüksek sıcaklıklarda ise bitüm Newtonian viskoz akışkanlık özelliklerine sahip bir sıvı gibi davranır. Normal sıcaklıklarda ise bitüm viskoelastik özelliklere sahiptir [126].

Araştırmacıların üzerinde hemfikir olduğu ve karışımların reolojik özelliklerini kontrol ettiğini kabul ettikleri bazı faktörler vardır. Bunlar;

- Malzeme karakteristikleri,
- Malzeme kompozisyonu,
- Yükleme zamanı ve frekansı,
- Sıcaklıktır [127].

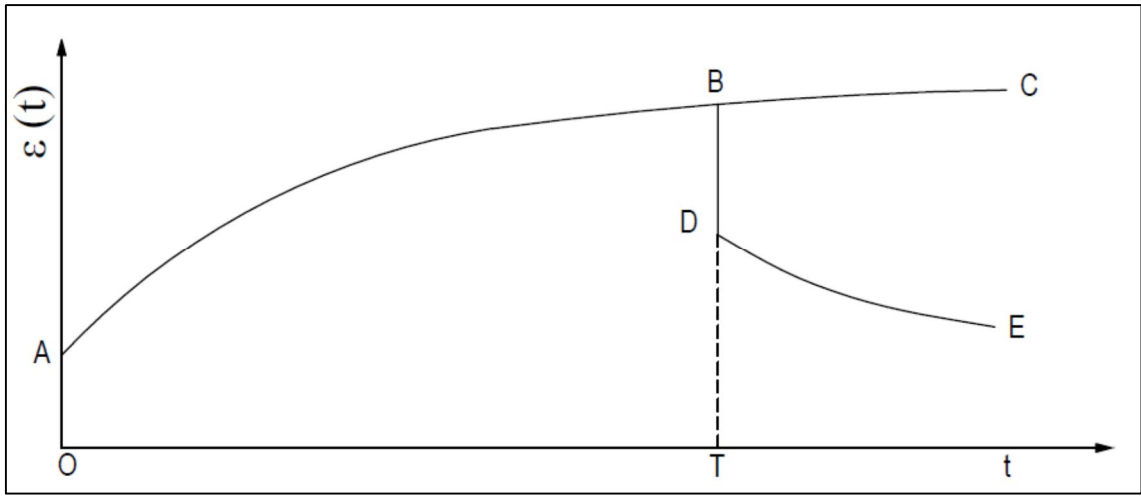
Jastrzebski tarafından yapılan tanıma göre; "sünme, sabit gerilmeye maruz kalan malzemede yavaş yavaş artarak meydana gelen deformasyondur" [128]. Oluşan deformasyon malzemenin elastik özelliğine göre değişmektedir [129]. Kaplama mühendisliği ile ilgili çalışmalarda kullanılan malzemelerin sünme özellikleri, sabit gerilme ve sıcaklık altında, zamana bağlı deformasyonları dikkate alınarak incelenir [127]. Bir numuneye zamana bağlı $\sigma(t)$ gibi bir gerilme uygulandığında yine zamana bağlı olan $\varepsilon(t)$ gibi bir birim deformasyon ölçülür. Gerilmenin $t = 0$ anında sıfır olduğu, $t > 0$ için de sabit bir değer (σ_0) aldığı varsayıldığında eğer malzeme elastik ise deformasyon da gerilmeye benzer bir davranış gösterir. $t = 0$ anında gerilme olmadığı için deformasyon oluşmaz. Gerilmenin uygulanması ile birlikte, malzemenin rijitliğine bağlı olarak sabit bir deformasyon meydana gelir [129].

Aynı gerilmeye viskoelastik bir malzeme maruz kaldığında oluşan deformasyon eğrisi, Şekil 3.12' de gösterilen ABC eğrisine benzer şekildedir.

$t = 0$ anında viskoelastik malzemede deformasyon oluşmaz. Gerilmenin uygulanması ile birlikte malzemede ani bir deformasyon oluşur (OA). Gerilme sabit bir

değere ulaşmasına rağmen, elastik malzemenin aksine, deformasyon sürekli artar. Bazı malzemelerde ABC eğrisinin eğimi sıfıra ulaşırken bazı malzemeler için de sıfırdan farklı sabit bir değere sahip olur.

$t = T$ anında gerilmenin kalkması ile birlikte elastik malzeme aniden eski haline (deformasyonsuz) dönerken, viskoelastik malzeme BDE ile gösterilen eğriye benzer bir davranış gösterir. Elastik bileşenden dolayı meydana gelen BD eğrisini, aşamalı olarak iyileşmeyi (deformasyonun geri kazanımı) gösteren DE eğrisi takip etmektedir.



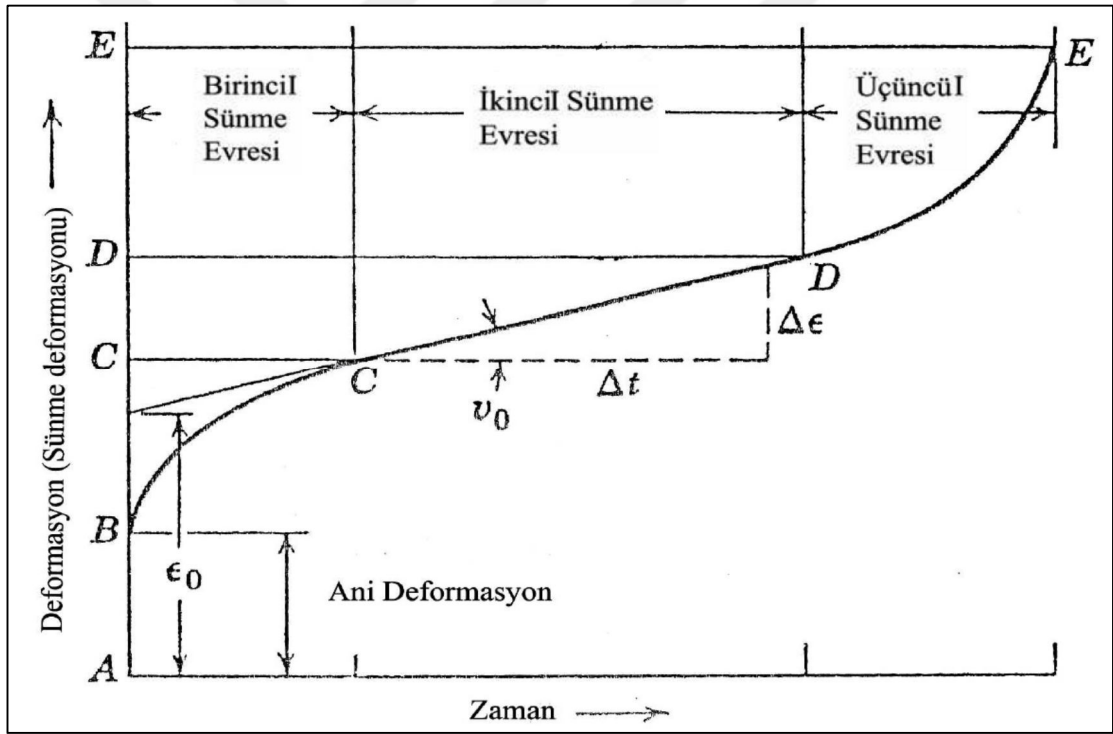
Şekil 3.12. Tipik sünme eğrisi [129]

Sünme testi çeşitli şekillerde (statik, tekrarlı, artırımlı statik, sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış) uygulanmasına rağmen genel prosedür hemen hemen aynıdır. Örneğin statik sünme testinde sabit aksenal gerilme altında zamana bağlı deformasyonlar ölçülür. Silindirik veya prizmatik bir asfalt betonu numunesinin üst yüzüne uygulanan sabit yük ile (σ) zamana bağlı deformasyonlar (ϵ) oluşur [130].

Gerilmenin uygulandığı $t = 0$ anından numunenin yıkıldığı ana kadar olan tekrarlı sünme eğrisi ise Şekil 3.13' de görüldüğü gibidir. Bu grafiğe göre;

- **Ani Deformasyon (AB arası):** Gerilmenin uygulanması ile birlikte malzemede, zamandan bağımsız olarak ani bir deformasyon oluşur. Yükün kalkmasıyla beraber bu deformasyonun bir miktarı da, ani olarak, ortadan kalkar.

- **Birincil Sünme Evresi (BC arası):** Gerilme devam ettiği müddetçe deformasyon artmaya devam eder. Kelvin Model' le açıklanan bu deformasyon, azalan bir oranla artmaktadır. Bu aşamada yük kaldırılırsa, deformasyonun bir kısmı ortadan kalkar.
- **İkincil Sünme Evresi (CD arası):** Deformasyon eğiminin doğrusal hale geldiği bu bölüm, Maxwell Model' deki piston ile ifade edilmektedir. Artık deformasyonda geri dönüş olmaz.
- **Üçüncül Sünme Evresi (DE arası) :** Bu bölümde, malzeme tamamen plastik olarak davranmakta ve deformasyon eğimi hızla artmaktadır. Bu evrede deformasyonlar çok yüksek değerlere çıkmaya başlar ve numunenin kırılması ile sünme son bulur [107,131].

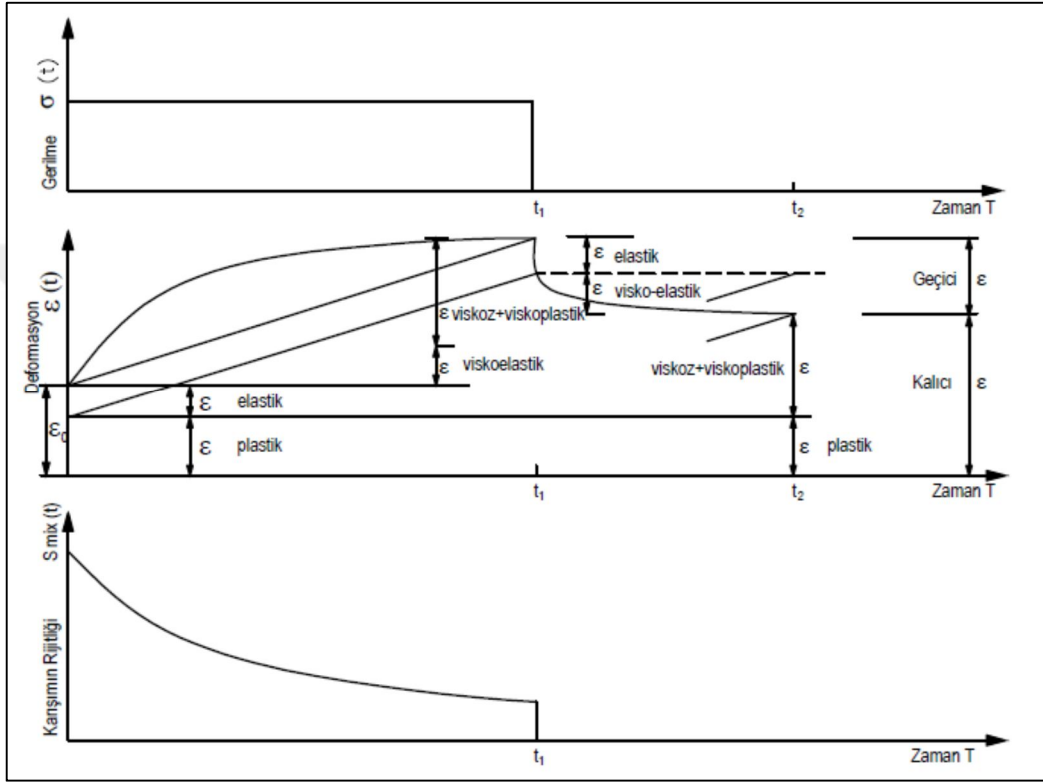


Şekil 3.13. Yıkım anına kadar olan tekrarlı sünme eğrisi [107,131]

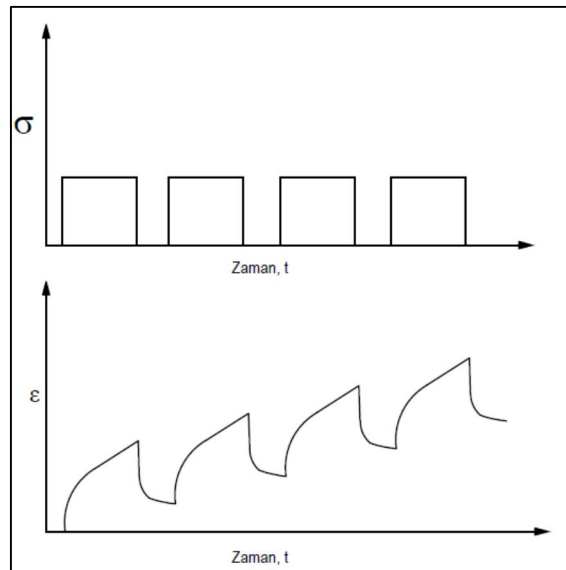
Şekil 3.13' de görülen eğri tipik bir tekrarlı sünme eğrisidir ve her durumda malzemelerin bu davranışı yapması beklenemez.

Şekil 3.14' de, t_l süresi boyunca uygulanan yükün, $t = t_l$ anında kaldırılması ile birlikte viskoelastik malzemelerde oluşan deformasyon değişimi gösterilmektedir. Gerilme uygulandığı anda elastik ve plastik özellik taşıyan ani bir deformasyon

oluşmaktadır. Gerilmenin ortadan kalktığı $t = t_1$ anına kadar deformasyon artmaktadır. Gerilmenin kalkması ile birlikte deformasyonda elastik ve viskoelastik özelliğe bağlı bir miktar azalma olmaktadır. Viskoz, viskoplastik ve plastik özellik taşıyan kısım ise kalıcı deformasyon olarak adlandırılmaktadır [129]. Şekil 3.15’ de ise tekrarlı yük altında oluşan deformasyon - zaman grafiği gösterilmiştir [130].



Şekil 3.14. Gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamanla değişimi [129]



Şekil 3.15. Tekrarlı yük altında oluşan deformasyon zaman grafiği [130]

4. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)

4.1. Yapay Sinir Ağları Hakkında Genel Bilgiler

Yapay sinir ağları (YSA) insan beyninin özelliklerinden öğrenme yoluyla yeni bilgiler üretebilme yeteneklerini geliştiren bilgisayar sistemleridir. İnsanların biyolojik yapısındaki öğrenme işi biyolojik sinir hücreleriyle gerçekleşirken bilgisayar sistemleri de bu işlemi yapay sinir hücreleri ile gerçekleştirmektedir. Biyolojik sinir hücrelerinde dendritler ile başlayan kimyasal tepkimeler aksonlar yolu ile sinapslara iletilmekte ve sinapslarda yorumlanmaktadır. Yapay sinir hücrelerinde ise dendrit görevini gören bir veri girdi katmanı, aksonların görevini gören ara katmanlar (gizli katman) (kara kutu) ile son olarak değerlerin alındığı bir çıktı katmanı bulunmaktadır.

Girdi katmanı, yapay sinir ağının üzerinde çalışacağı probleme ait başlangıç verilerinin (girdilerin) ağa girildiği katmandır. Bu katmandaki sinir hücreleri sayısı problemin girdi parametrelerinin sayısına eşittir ve her sinir hücresi ilgili girdi ile ilgili bir veri içerir [132]. Bu veriler girdi katmanına nümerik olarak girilmelidir. Gizli katman, yapay sinir ağının asıl işleme katmanıdır. Bu katmanın gizli olarak ifade edilmesi kullanıcı tarafından görülüyor olmasından gelmektedir. Girdi katmanından ağa alınan verilerin ilgili probleme uygun bir fonksiyonla işlendiği ve sonucun elde edilmesi amacıyla çıktı katmanına iletiildiği katmandır. Ağ içerisinde gizli katman bulunup bulunmayacağı ya da ağın kaç katmandan oluşacağı konuları ağ tasarımcısının kontrolündedir ve uğraşılacak probleme göre belirlenmektedir. Çıktı katmanı, girdi katmanından ağa girilen ve gizli katmanda işlenen verilerin ağın yapısına uygun bir fonksiyonla işlendiği ve sonucun sistemin çıktısı olarak sunulduğu katmandır. Girdi katmanındaki ilişkiye benzer şekilde, çıkış katmanındaki sinir hücresi sayısı ağdan beklenen çıktı sayısına eşittir [133].

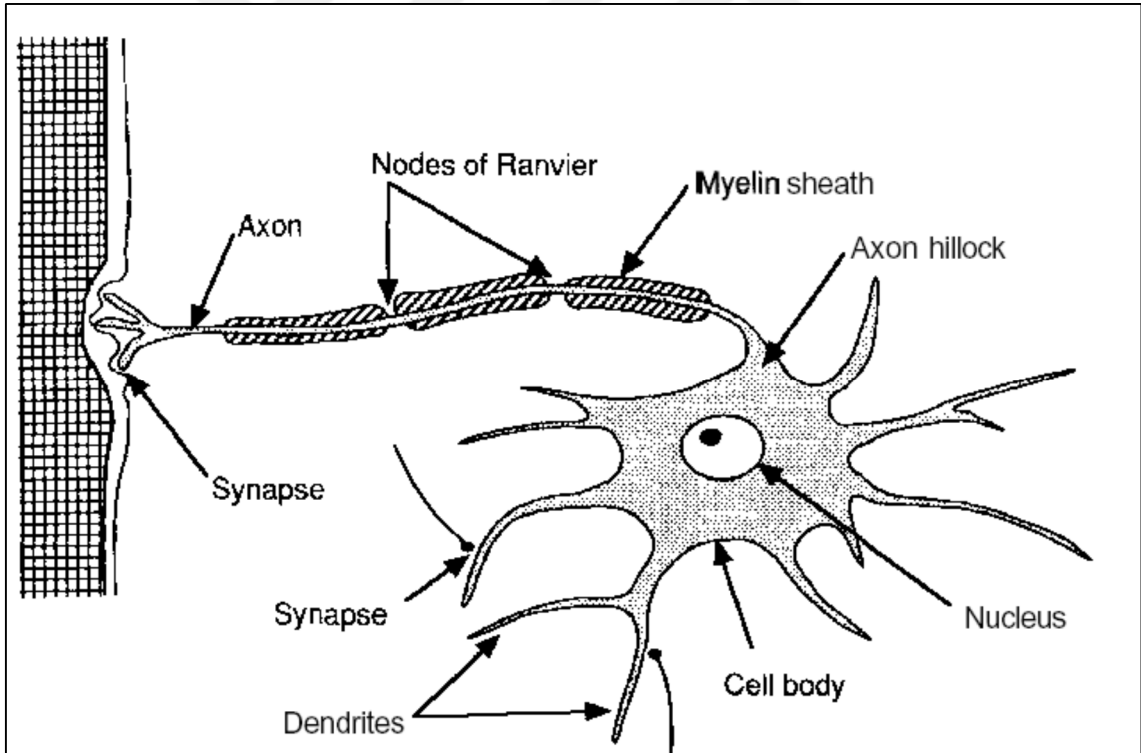
Yapay sinir ağları için en uygun tanımlama, paralel işleme temeli üzerine inşa edilmiş, uyum sağlama ve öğrenme, genelleme yapma veya veri sınıflandırma ya da organize etme yetileri olan hesaplama modeli şeklinde yapılabilir [134]. Yapay sinir ağları, geleneksel hesaplama modellerinin aksine, beynin yapısını ve işleyişini andıran matematiksel modeller üzerine oturtulmuş hesaplama paradigmalarıdır.

Yapay sinir ağları dünya üzerinde var olan en yetkin bilgi işlemci olan beynin, yapısından ve çalışma prensiplerinden ileri gelen üstünlüklerinin insan yapımı makinelere kazandırılması hayali doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmalar ile insanlığın bilim

dağarcığına kazandırılmış bir konudur. Bu nedenle yapay sinir ağlarına olan ilginin iki ana kaynağı olduğu söylenebilir:

- İnsan beyninin çalışma prensiplerini anlama arzusu,
- Karmaşık işlemleri başarıyla sonuçlandırma yetisine sahip makineler inşa etme isteği [135].

Her ne kadar günümüzde yapay sinir ağları ile ilgili olarak yapılan çalışmalar daha çok ikinci istek üzerinde yoğunlaşmış olsa da konunun asıl çıkış noktası insan beyninin işleyişinin anlaşılması ile ilgili olarak yapılan araştırmalardır. Yapay sinir ağları beynin doğası ile ilgili yapılan araştırmalardan elde edilen kavramlar üzerine geliştirilmiş algoritmalardır [135]. Beynin çalışma prensipleri ile ilgili bilgi elde edildikçe, insan zekasına özgü bazı faaliyetlerin sayısal olarak ifade edilebileceği düşüncesi ortaya çıkmış ve bu, işlem birimlerinin ve oluşturdukları yapının modellenmesi fikrini de beraberinde getirmiştir [136].



Şekil 4.1. Bir sinir hücresi [137]

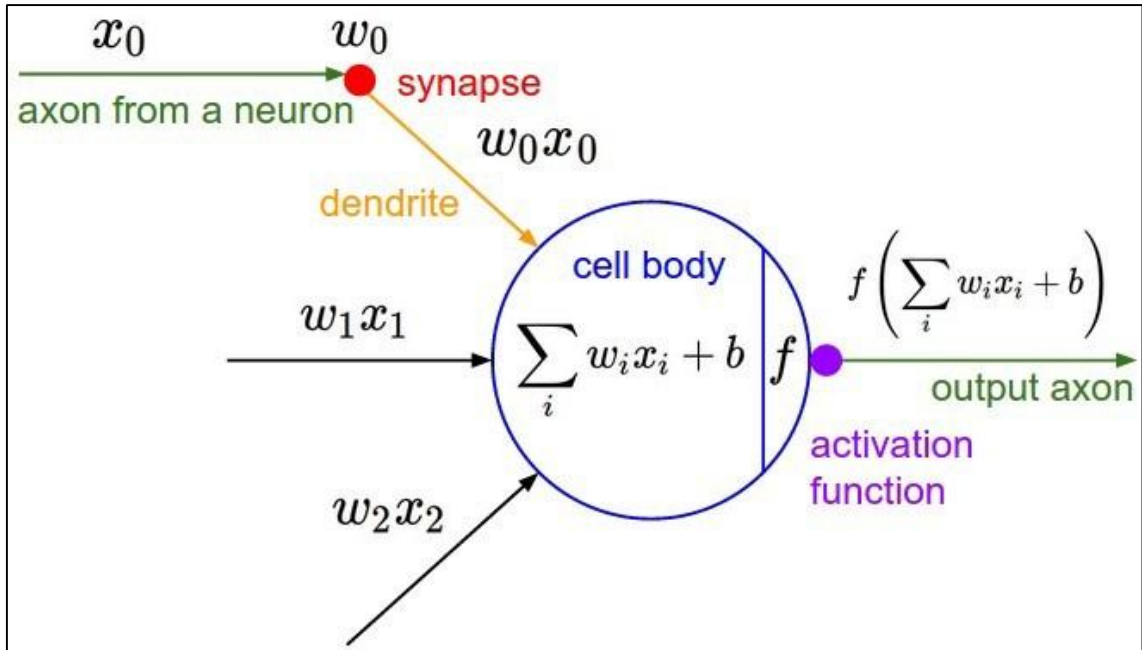
Kabaca ifade etmek gerekirse beyin, yaklaşık olarak 2,5 milyar sinir hücresinin oluşturduğu karmaşık bir ağ yapısıdır. Biyolojik bir sinir hücresi, kaba bir hesaplama becerisine sahip tek bir hücreden oluşur [138]. Her sinir hücresinde, hücrelerin diğer sinir

hücreleriyle bağlantı kurmalarını sağlayan akson adında ve diğer hücrelerin kendileriyle bağlantı kurmalarını sağlayan dendrit adında uzantılar bulunmaktadır. İki hücre arasında bağlantı bir hücrenin aksonu ile diğer hücrenin dendritinin oluşturduğu snaps adı verilen bağlantı noktalarında kurulur. Beyin, sinir hücrelerinin dendritleri vasıtasıyla diğer sinir hücrelerinden aldıkları uyarılara hücre çekirdeğinde sakladıkları bilgi uyarınca bir çıktı oluşturması ve bu çıktıyı aksonlar vasıtasıyla ilgili yerlere ulaştırması yoluyla çalışan bir yapıdır. Oluşan çıktı, her bir girdinin kuvvetine ve girdilerin söz konusu hücre ile olan bağlantılarının yapısına bağlıdır [138]. Şekil 4.1' de gerçek bir sinir hücresi gösterilmektedir.

Yapay sinir ağları, beyindeki sinir hücrelerini ve bu hücrelerin birbirleriyle oluşturdukları bağlar sonucunda çıktı üretme yapısını modelleyen bir sistemdir. Yapay sistem, elektrik devrelerle ya da bilgisayarlarda yazılım olarak gerçekleştirilebilir [139]. Şekil 4.2' de gerçek bir sinir hücresi ile yapay sinir hücresinin benzer kısımları verilmiştir.

Bu bilgiler ışığında yapay sinir ağlarının, şu bileşenlerden oluşan çok işlemcili bir bilgisayar sistemi modeli olduğu söylenebilir:

- Basit işlem elemanları
- Yüksek derecede iç bağlantılar
- Basit skaler mesajlar ve
- Elemanlar arasında uyum geliştiren etkileşim



Şekil 4.2. Gerçek bir sinir hücresi ile yapay sinir hücresinin benzer kısımları

Günümüzde, sinir hücrelerinden daha hızlı işlem yapmak başarılabilirdiyse de geliştirilen sistemler beynin kusursuz ağ yapısının sağladığı yüksek hızın oldukça gerisinde kalmaktadır. Ancak, karmaşık eşleştirilmelerin gerçekleştirilmesindeki başarısı ve yapısal bağışıklığı sebebiyle gün geçtikçe daha çok uygulama alanı bulmaktadır. Bilgisayar bilimi ve mühendislik başta olmak üzere ekonomi ve psikoloji gibi alanlarda kullanılmaktadır [140].

YSA metodunda, sinir ağının ağırlık vektörü bağlantılar arası kuvveti belirler [141]. Her bir nöron aşağıda gösterildiği gibi iki fonksiyon gerçekleştirir. Birincisi, denklemde verilen ağırlık faktörlerine dayanılarak alt katmanlardan gelen tüm girdilerin toplamıdır. İkincisi, bu toplamı denklemde gösterildiği gibi doğrusal olmayan bir sigmoid fonksiyonu ile işlemektir. Girdi ve çıktı nöronları doğrusal olmayan fonksiyonları içermeyebilir. Her nöronun dinamiklerini açıklayan temel denklemler (4.1) ve (4.2) aşağıda verilmiştir [142].

$$net_j = \sum_i W_{ij} O_i \quad (4.1)$$

$$O_j = f(net_j + \theta_j) \quad (4.2)$$

Burada;

W_{ij} : iki bitişik katman arasındaki j inci ve i inci nöronlar arası ağırlık

θ_j : j inci nöron eşiği

O_i : i inci nöronun çıktısı

O_j : j inci nöronun çıktısı

$f(\cdot)$: sigmoid fonksiyonu

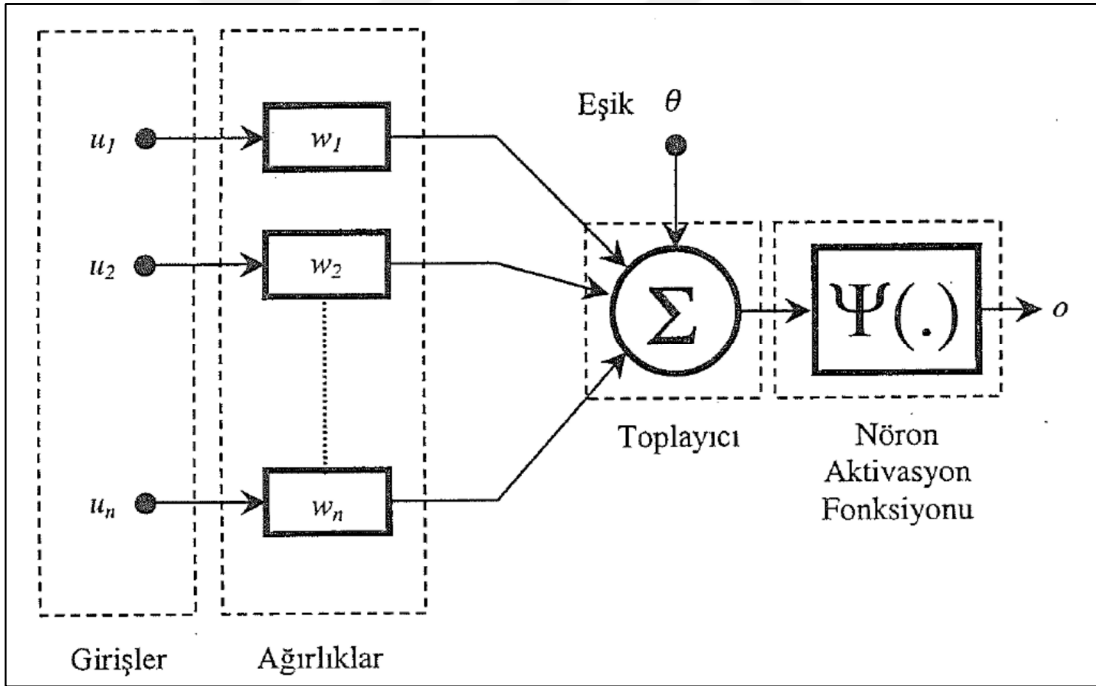
Yapay sinir ağının performansı asıl olarak ağın mimarisine ve girdilerin seçimine bağlıdır. Özellikle ara katman sayısı, katmanda kaç nöron olacağı, hangi aktivasyon fonksiyonlarının kullanılacağı, hangi transfer fonksiyonunun kullanılması gerektiği farklı denemeler ve uzun uğraşlar sonucunda belirlenmelidir. Bütün bu seçimler yapıldıktan sonra sinir ağı insan beyni gibi bir eğitim süreci geçirir ve eğitim sonrasında daha önce

ağın hiç görmediği örnekler ile test edilir. Bulunan değerlerin gerçek değerlere yakınlığı ağın performansını belirler.

4.2. Matematiksel Nöron Modeli

4.2.1. Nöron dinamiği

Nöronlar sinir ağlarını oluşturan, tek başına ele alındıklarında çok basit işleve sahip işlemcilerdir. Bir nöron yapısı içerisinde üç ana bölüm bulunur. Bunlar sarısıyla snapsler, toplayıcı ve aktivasyon fonksiyonudur [143]. Şekil 4.3' de yapay bir nöronun modeli gösterilmektedir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, nöron girdileri sinaptik bağlantılar üzerindeki ağırlıklar ile çarpılarak bir toplayıcıya uygulanmakta ve elde edilen toplam, nöronun aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek çıkışlar hesaplanmaktadır. Formül 4.3.' de ağırlıklı toplamın oluşturulması, 4.4' de ise nöron çıkışının hesaplanması verilmektedir [144].



Şekil 4.3. Yapay bir nöronun yapısı [144]

$$S = w_1u_1 + w_2u_2 + \dots + w_nu_n - \theta = \sum_{i=1}^n w_iu_i - \theta \quad (4.3)$$

$$o = \Psi(S) \quad (4.4)$$

Burada;

u :girdiler

w :ağırlıklar

θ :eşik değeri

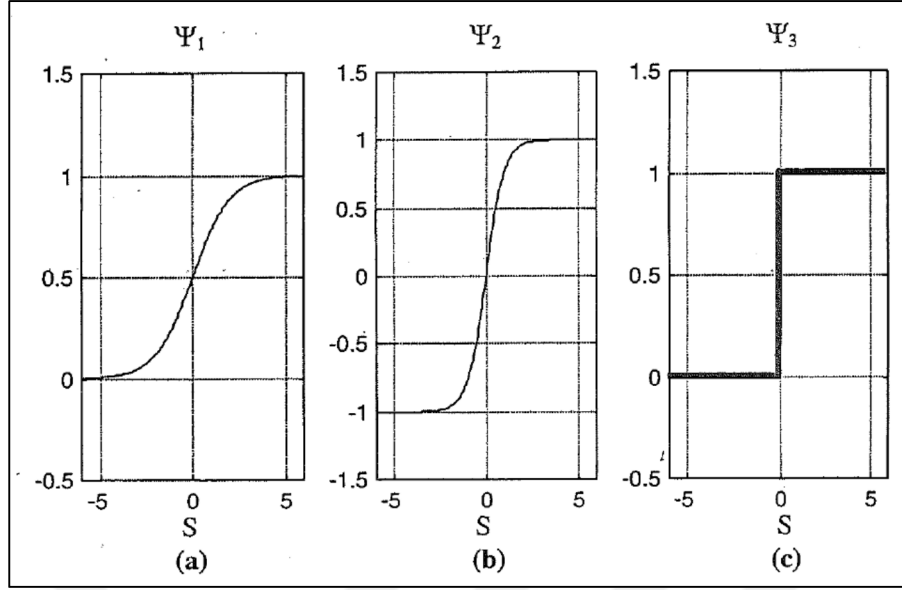
$\Psi(S)$:nöron aktivasyon fonksiyonu

o :çıktı

Her bir girdideki değişim, nöron çıkışında belirli bir değişime neden olmakta ve bu değişimin genliği, girdinin etki derecesini belirleyen bağlantı kazançlarına, toplayıcının eşik değerine ve nöron aktivasyon fonksiyonunun tipine bağlı olmaktadır. Burada w_i ile gösterilen kazançlar ağırlık olarak, θ değeri eşik olarak, Ψ fonksiyonu da nöron aktivasyon fonksiyonu olarak isimlendirilmektedir. Yukarıdaki denklemlerden de görülebileceği üzere eşik değerinin girdilerden bağımsız olmasından dolayı bütün girdilerin sıfır olduğu durumlarda nöron çıkışında $\Psi(0)$ yerine $\Psi(\theta)$ değeri gözlenir ki bu da, belirtilen şartlar altında nöron çıkışının sıfır olması zorunluluğunu ortadan kaldırır. Eşik değerinin kullanımı, pratikte +1 ya da -1 değerine sahip bir girdinin θ ağırlığına sahip bir bağlantı ile toplayıcıya girdiği şeklinde ele alınır [144].

4.2.2. Aktivasyon fonksiyonları

Nöron davranışını belirleyen önemli etmenlerden biri nöronun aktivasyon fonksiyonudur. Biyolojik nöronlarda S ile gösterilen toplam belli bir değeri aştığında nöronun kısa süreli bir darbe gönderdiği bilinmektedir. Bu davranışa benzer bir davranış yapay nöronlarla da elde etmek için kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından üçü Şekil 4.4.' de gösterilmiş, matematiksel ifadeleri ise Formül 4.5., 4.6. ve 4.7. denklemleri ile verilmiştir [144]. Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu Formül 4.5, Hiperbolik tanjant tipi aktivasyon fonksiyonu Formül 4.6 ve sert geçişli aktivasyon fonksiyonu Formül 4.7 ile verilmiştir.



Şekil 4.4. (a):Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu (b):Hiperbolik tanjant tipi aktivasyon fonksiyonu (c):Sert geçişli aktivasyon fonksiyonu

$$\Psi_1(S) = \frac{1}{1 + e^{-S}} \quad (4.5)$$

$$\Psi_2(S) = \frac{e^S - e^{-S}}{e^S + e^{-S}} = \tanh(S) \quad (4.6)$$

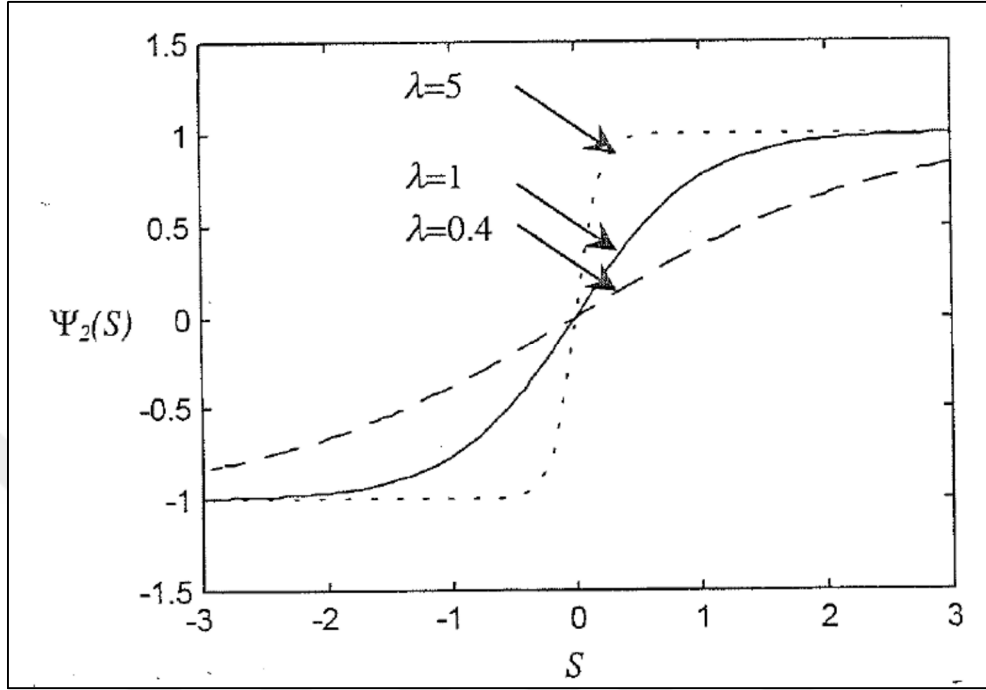
$$\Psi_3(S) = \begin{cases} 0 & S \leq 0 \\ 1 & S > 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Uygulamalarda nöron cevabının, girdilerin sürekli bir fonksiyonu olmasını gerektiren durumlarda Formül 4.5 ya da 4.6 denklemlerinde verilen aktivasyon fonksiyonları kullanılırken, ikili karar mekanizması gerektiren durumlarda Formül 4.7 ile tanımlanan sert geçişli aktivasyon fonksiyonları tercih edilmektedir. Aktivasyon fonksiyonunun parametrik olması, sinaptik ağırlıkların kazandırdığı esnekliğin ötesinde, değişik eleştirmelerin yapılabilmesini mümkün kılan bir başka esneklik sağlar. Bu amaçla, Formül 4.6 denklemi ile verilen hiperbolik tanjant tipindeki aktivasyon fonksiyonu, Formül 4.8 denkleminde olduğu gibi yeniden düzenlenebilir [144].

$$\Psi_2(S) = \frac{e^{\lambda S} - e^{-\lambda S}}{e^{\lambda S} + e^{-\lambda S}} = \tanh(\lambda S) \quad (4.8)$$

Görüldüğü üzere Formül 4.8 ile verilen denklemde $\lambda=1$ yazılırsa Formül 4.6 elde edilir. Bu parametrenin değiştirilmesi ile aktivasyon fonksiyonunun şekli değiştirilebilir

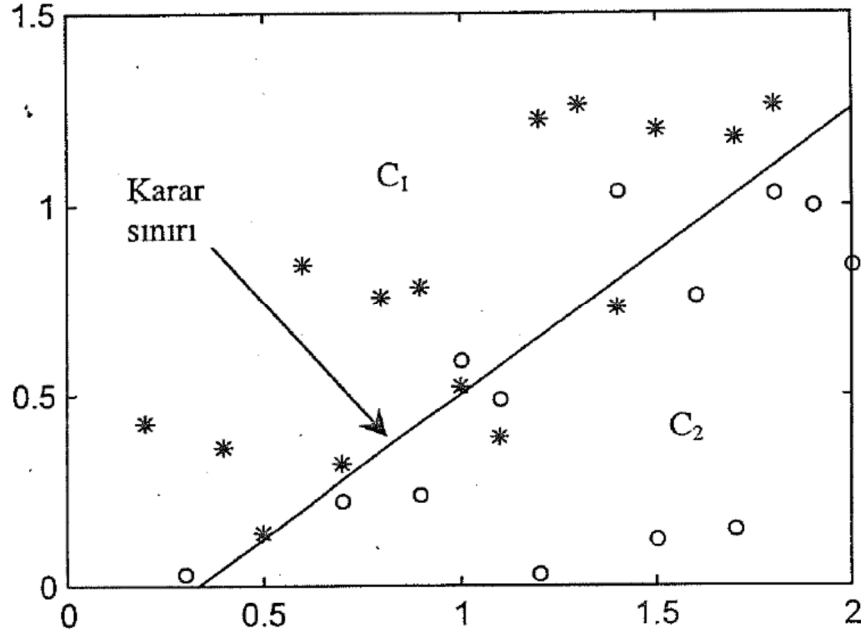
(Şekil 4.5.) ki bu, özellikle öğrenme denilen zaman içerisinde parametrelerin güncellenmesi işleminde önemli bir husustur [144].



Şekil 4.5. Değişik λ değerleri için Formül 4.8. ile tanımlanan fonksiyonun görünümü [144]

4.2.3. Sınıflandırma problemi

Bu bölümde ele alınan nöron modelinin, iki tipte bilgiyi ayrıştırmak üzere kullanılacağı varsayalım. Şekil 4.6' da ayrıştırılacak küme elemanları "*" ve "o" sembelleri ile gösterilmektedir. Buna göre "*" semgesi ile gösterilen elemanların C_1 sınıfında, "o" semgesi ile gösterilen elemanların C_2 sınıfında olduğu varsayalım. Bu iki sınıfı ayıran en basit karar sınırı Şekil 4.6' da gösterildiği üzere bir doğru ile verilebilir. Burada göz önüne alınması gereken önemli noktalardan biri, sınıflandırma probleminin daha çok sayıda sınıf içerebileceği gibi işleme girecek çok fazla sayıda eleman da içerebileceğidir. Bu durumlarda bir bakışta karar sınırını kestirmek çok güç olduğundan probleme uygun optimizasyon tekniklerine başvurulur [145]. Bu teknikler içerisinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan en küçük kareler yöntemi, yapay sinir ağlarının parametrelerinin güncellenmesinde de oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [144].



Şekil 4.6. İki sınıflı bilginin lineer bir ayıraç ile ayrıştırılması

4.2.4. En küçük kareler yöntemi

Bir önceki alt bölümde ele alınan sınıflandırma örneği için verilen karar sınırı bilinmeksizin sadece gözlem noktaları ve bunların ait olmaları gereken sınıf bilgisi verilseydi ne yapılması gerekirdi? Diğer bir deyişle, tanımlanan sınıfları birbirinden en iyi ayıran doğrunun bulunması istenseydi hangi yöntem kullanılmalıydı? Bu kısımda yukarıdaki sorulara cevap üretebilecek bir yöntem üzerinde durulacaktır. Yöntemin temel prensibi, her bir nokta için nöron cevabındaki hatanın anlık olarak minimizasyonuna dayanmaktadır [144].

Bu amaçla literatürde eğim düşümü [146,147] olarak bilinen yöntemden bahsedilmekte ve yapay sinir ağlarının parametrelerinin uyarlanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Belirli bir giriş değeri için istenen nöron cevabı d , bu girdi için nöronun üretmiş olduğu cevap y ile gösterilsin ve hata ölçütü de $e = d - y$ olarak tanımlansın. Eğim düşüm yönteminin temeli, Formül 4.9 denklemi ile verilen J_r sembolü ile gösterilen maliyet fonksiyonunun kurulmasına ve bu fonksiyonun, nöron parametrelerinin uyarlanması ile minimize edilmesine dayanır [144].

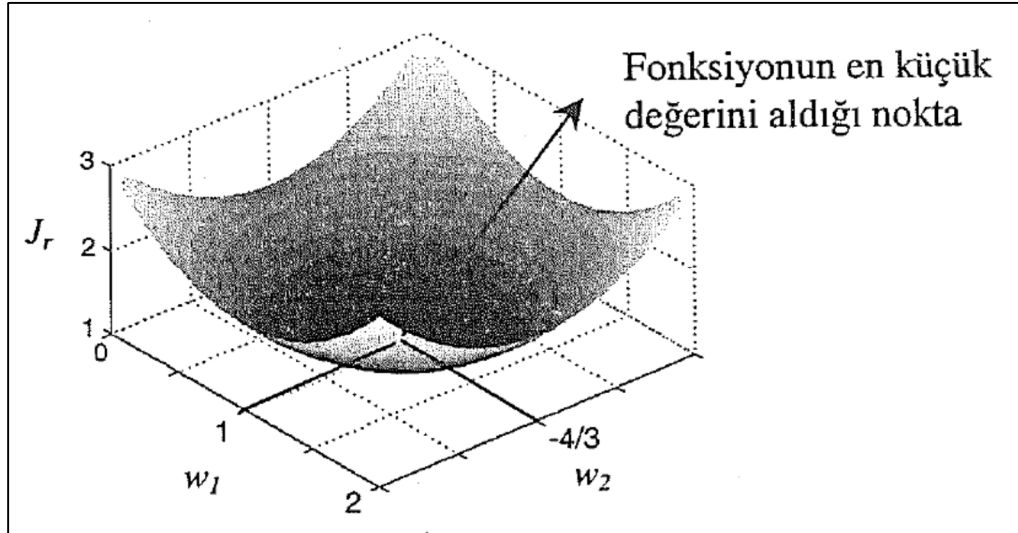
$$J_r = \frac{1}{2}(d - y)^2 = \frac{1}{2}e^2 \quad (4.9)$$

Yukarıdaki kuadratik denklem, sınıflandırma problemi için ele alınan iki girişli nöron için açık biçimde yazılırsa Formül 4.10 ya da 4.11 ile verilen kuadratik denklem elde edilir.

$$J_r = \frac{1}{2}(d - (w_1u_1 + w_2u_2 - \theta))^2 \quad (4.10)$$

$$J_r = \frac{1}{2}(d^2 - 2d(w_1u_1 + w_2u_2) + (w_1u_1 + w_2u_2)^2) \quad (4.11)$$

Formül 4.11 denkleminden de açıkça görülebileceği üzere J_r fonksiyonu w_1 ve w_2 parametrelerine göre üç boyutta çizdirildiğinde bir tek minimumu olan bir fonksiyondur ve olası parametre vektörlerinin sadece biri için en küçük değerini alır. Şekil 4.7' de bu durum gösterilmektedir [144].



Şekil 4.7. Kuadratik maliyet fonksiyonu [144]

En küçük karesel hataya ulaşmak için maliyet fonksiyonunun, uyarlanacak parametreye göre kısmi türevinin gösterdiği yönün tersi, zaman içerisinde bu fonksiyonu

en iyi minimize eden değerlere doğru yaklaşır ve bu, eğim düşümü yöntemi olarak bilinir. İki ağırlığı olan bir nöronun parametre güncelleme denklemleri bu kurala göre aşağıdaki şekilde elde edilir [144].

$$\Delta w_1 = -\eta \frac{\partial J_r}{\partial w_1} = \eta e \frac{\partial y}{\partial w_1} = \eta e \frac{\partial y}{\partial S_1} \frac{\partial S_1}{\partial w_1} = \eta e \frac{d\Psi}{dS_1} u_1 \quad (4.12)$$

$$\Delta w_2 = -\eta \frac{\partial J_r}{\partial w_2} = \eta e \frac{\partial y}{\partial w_2} = \eta e \frac{\partial y}{\partial S_2} \frac{\partial S_2}{\partial w_2} = \eta e \frac{d\Psi}{dS_2} u_2 \quad (4.13)$$

$$\Delta \theta = -\eta \frac{\partial J_r}{\partial \theta} = \eta e \frac{\partial y}{\partial \theta} = \eta e \frac{\partial y}{\partial S_1} \frac{\partial S_1}{\partial \theta} = \eta e \frac{d\Psi}{dS_1} (\mp 1) \quad (4.14)$$

Burada η değişkeni (0,+1) aralığından seçilen reel bir sayıdır ve adım büyüklüğünü belirler. Literatürde bu parametre öğrenme katsayısı olarak da bilinmektedir. Yukarıdaki üç denklemden de anlaşılacağı üzere eğim düşümü yönteminin kullanılabilmesi için, kullanılan aktivasyon fonksiyonunun sürekli ve birinci dereceden türevlenebilir olması gereklidir. Bu nedenle sınıflandırma probleminde hiperbolik tanjant fonksiyonu kullanılmış ve λ parametresinde büyük bir değer verilerek kabul edilebilir ölçüde sert bir geçiş elde edilmiştir. Formül 4.11 de son çarpan, eşik değerinin toplayıcıya ne şekilde girdiği ile ilişkili olarak +1 ya da -1 değerlerini alabilmektedir. Pratikte genellikle -1 değeri kullanılmakta ve öğrenme algoritması buna göre türetilmektedir [144].

4.3. Yapay Sinir Ağlarının Kullanım Alanları

1980'li yıllarda kaydedilen gelişmeler ve yapay sinir ağlarının o zamana kadar çözüm üretilmeyen sorunlarının aşılması ve doğrusal olmayan veri kümelerine uygulanabilirliğinin gösterilmesinin ardından yapay sinir ağlarına olan ilginin canlanmasıyla birlikte ağlar, ekonomi, mühendislik ve tıp alanları başta olmak üzere birçok alanda uygulama olanağı bulmuş ve oldukça etkileyici sonuçlar üretmiştir [135].

Yapay sinir ağlarının çeşitli alanlardaki uygulamaları ağın yerine getirdiği işlev bakımından kabaca şu şekilde gruplandırılabilir [133];

- Bir araya getirme

- Graplama
- Sınıflandırma
- Şablon tanıma
- Regresyon ve genelleme
- Optimizasyon

Yapay sinir ağları kullanımı ile ilgili genel düşünce yapay sinir ağlarının bugün herhangi bir yöntemle çalıştırılan herhangi bir fonksiyonu çalıştırabileceği ve geleneksel modelleme yöntemlerine göre daha etkin çözümler üretebileceği yönündedir [138]. Bu konuda yapılan bir araştırmada ele alınan 42 çalışmanın 30'unda (%71) yapay sinir ağlarının geleneksel istatistik tekniklerine oranla daha iyi çıktılar ürettiği görülmüştür [138].

Yapay sinir ağları ile ilgili çalışmalar eskiden laboratuvarlarda yürütülmekte ve veriler benzetim yolu ile elde edilmekte iken artık yapay sinir ağları günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Ağların eğitilmesinde gerçek örnekler kullanılmaktadır. Evimizdeki aletlerden elimizdeki cep telefonlarına kadar birçok alanda yapay sinir ağları uygulamalarını görmek mümkündür. Bu nedenle her türlü uygulama hakkında örnek vermek imkansızdır, ancak uygulamaları aşağıdaki şekliyle bir sınıflandırma yapılabilir [148].

- Endüstriyel Uygulamalar
- Finansal Uygulamalar
- Askeri ve Savunma Uygulamaları
- Sağlık Uygulamaları
- Diğer Alanlardaki Uygulamalar

4.3.1. Endüstriyel uygulamalar

Yapay Sinir ağlarının sayısız endüstriyel uygulaması vardır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir.

- Yapay sinir ağları bir endüstriyel proseste fırınların ürettiği gaz miktarının tahmini
- İmalatta, ürün tasarımı, proses ve makine bakımı hataların teşhisi görsel kalite kontrolü
- Kimyasal proseslerin dinamik modellenmesi

- Otomobillerde otomatik rehber sisteminin geliştirilmesi
- Robotlarda görme sistemleri
- Cep telefonlarında ses ile çalışabilme
- Araba pistonlarının üretim şartlarının belirlenmesi
- Elektronik yonga hata analizleri
- Optimizasyon çalışmaları
- Müşteri tatmini ve Pazar verilerinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi
- İşlerin makinelere atanması ve çizelgeleme
- Gezgin satıcı problemi [148].

4.3.2. Finansal uygulamalar

Yapay Sinir ağları finans dünyasında da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına örnekler şu şekilde sıralanabilir.

- Makro ekonomik tahminler
- Borsa benzetim çalışmaları endekslerin tahmin edilmesi
- Kredi kartı hilelerinin tespiti
- Kredi kartı kurumlarında iflas tahminleri
- Banka kredilerinin değerlendirilmesi
- Emlak kredilerinin yönetilmesi
- Döviz kuru tahminleri
- Risk analizleri [148].

4.3.3. Askeri uygulamalar

Yapay sinir ağlarının sivil hayattaki uygulamaları kadar askeri alandaki uygulamaları da dikkatleri çekmektedir. Bunlar arasında aşağıdakiler örnek olarak sayılabilir.

- Hedef tanıma ve takip sistemleri
- Yeni sensörlerin performans analizleri
- Radar ve görüntü sinyalleri eşleme
- Sensör fizyonu
- Askeri uçakların uçuş yörüngelerinin belirlenmesi (optimizasyonu)
- Mayın detektörleri [148].

4.3.4. Sağlık uygulamaları

Yapay sinir ağlarının insan beyni çalışmaları ile yakın ilişki içinde olması tıp ve sağlık alanında da uygulamaların gelişmesine neden olmuştur. Bunlardan bazı örnekler ise şöyle sıralanabilir.

- Solunum hastalıklarının teşhisi
- EEG ve ESG analizleri
- Transplant zamanlarının optimizasyonu
- Hastalıkların teşhisi ve resimlerden tanınması
- Karidovascular sistemlerin modellenmesi ve teşhisi
- Tıbbi resim işleme
- CTG izleme
- Hamile kadınların karınlarındaki çocukların kalp atışlarının izlenmesi
- Yumurtalık kanserinin immunoterapik izlenmesi
- Üroloji uygulamaları (prostat analizleri sperm analizleri) [148].

4.3.5. Diğer alanlar

Yukarıda verilenlere ek olarak daha birçok alanda yapay sinir ağı uygulamalarını görmek mümkündür. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

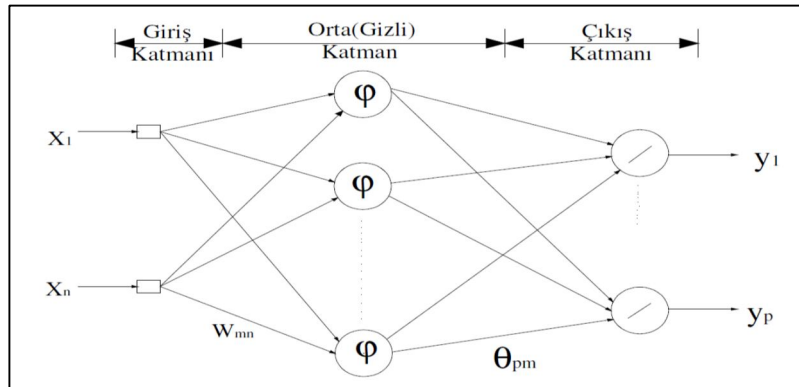
- Sigorta poliçelerinin değerlendirilmesi
- Uçak parçalarının hata kontrolü
- Petrol ve gaz aramaları
- Hava alanlarında bomba detektörleri ve uyuşturucu koklayıcıları
- Rotalama sistemleri (kamyon rotalarının optimizasyonu)
- Resim işleme, segmentasyon, restorasyon
- Karakter, el yazısı ve imza tanıma sistemleri
- Veri madenciliği
- İnsani davranışlar sergileyen çocuk oyuncaklarının geliştirilmesi
- Kömür ve yemeklerdeki nem oranının tahmini
- Büyük inşaat projelerinde maliyetlerin tahmin edilmesi [148].

4.4. Yapay Sinir Ağı Yapıları

Yapay sinir ağlarını sınıflandırmak için birçok yaklaşım vardır. Yapay sinir ağları öğrenme yöntemlerine veya eğitime yöntemlerine göre; eğitimde kullanılan tekrarlanan veya tekrarlanmayan temel fonksiyonun aktivasyon fonksiyonu ile değişimine göre sınıflandırılabilir [149]. Yapay sinir ağları, hücrelerin birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmalarından oluşmaktadır. Hücre çıkışları, ağırlıklar üzerinden diğer hücelere ya da kendisine giriş olarak bağlanabilmekte ve bağlantılarda gecikme birimi de kullanılabilir. Hücrelerin bağlantı şekillerine, öğrenme kurallarına ve aktivasyon fonksiyonlarına göre çeşitli YSA yapıları geliştirilmiştir. Çeşitli problemlerin çözümünde kullanılan ve kabul görmüş bazı YSA yapıları genel özellikleri ile şunlardır [150].

4.4.1. İleri beslemeli yapay sinir ağları

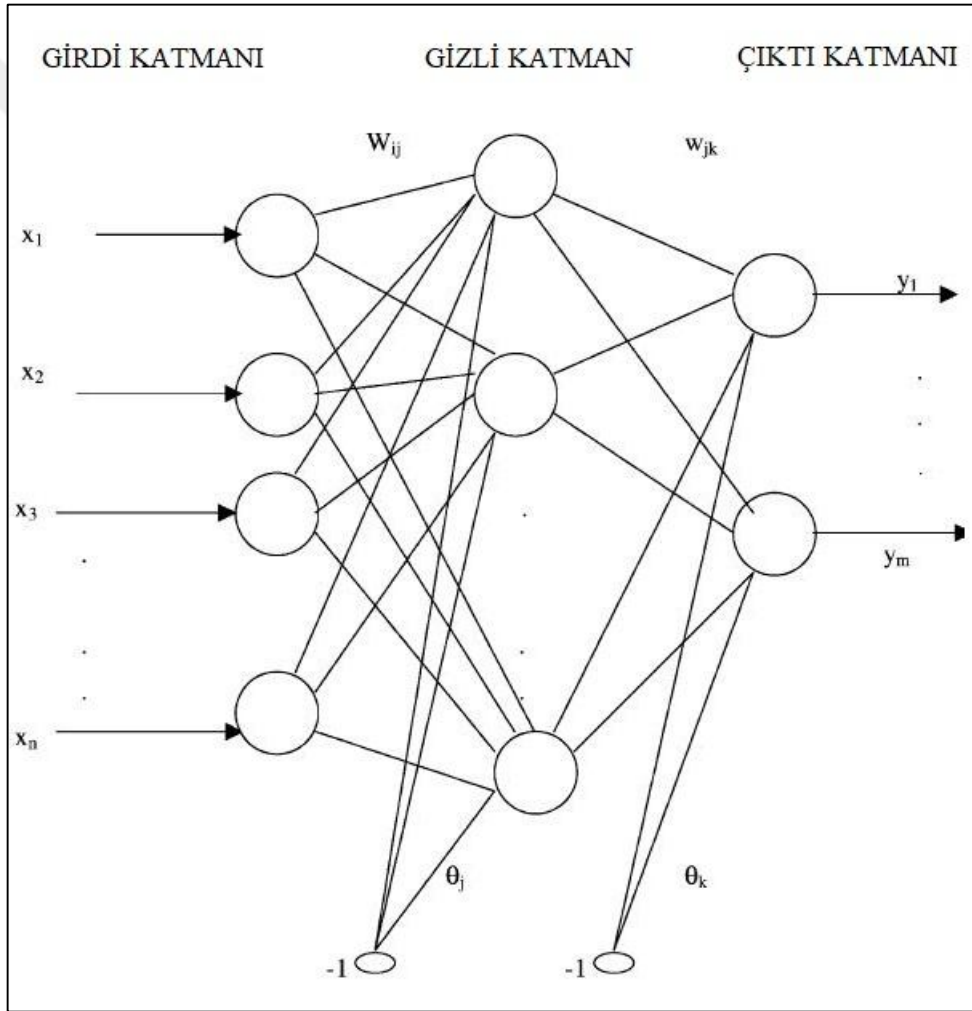
İleri beslemeli YSA' da, hücreler katmanlar şeklinde düzenlenir ve bir katmandaki hücrelerin çıkışları bir sonraki katmana ağırlıklar üzerinden giriş olarak verilmektedir. Giriş katmanı, dış ortamlardan aldığı bilgileri hiçbir değişikliğe uğratmadan orta (gizli) katmandaki hücelere iletmektedir. Bilgi, orta ve çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışı belirlenmektedir. Bu yapısı ile ileri beslemeli ağlar doğrusal olmayan statik bir işlevi gerçekleştirir. İleri beslemeli 3 katmanlı YSA' nın, orta katmanında yeterli sayıda hücre olmak kaydıyla, herhangi bir sürekli fonksiyonu istenilen doğrulukta yaklaştırabileceği gösterilmiştir. En çok bilinen geriye yayılım öğrenme algoritması, bu tip YSA ların eğitiminde etkin olarak kullanılmakta ve bazen bu ağlara geriye yayılım ağları da denmektedir. Şekil 4.8' de giriş, orta ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı verilmektedir [150].



Şekil 4.8. İleri beslemeli YSA yapısı [150]

4.4.2. Geri beslemeli yapay sinir ağı

Geri beslemeli YSA' da, en az bir hücrenin çıkışı kendisine ya da diğer hücelere giriş olarak verilmekte ve genellikle geri besleme bir geciktirme elemanı üzerinden yapılmaktadır. Geri besleme, bir katmandaki hücreler arasında olduğu gibi katmanlar arasındaki hücreler arasında da olabilir. Bu yapısı ile geri beslemeli YSA, doğrusal olmayan dinamik bir davranış göstermektedir. Dolayısıyla, geri beslemenin yapılış şekline göre farklı yapıda ve davranışta geri beslemeli YSA yapıları elde edilebilmektedir. Şekil 4.9' da giriş katmanına geri beslemeli bir YSA yapısı görülmektedir [150].



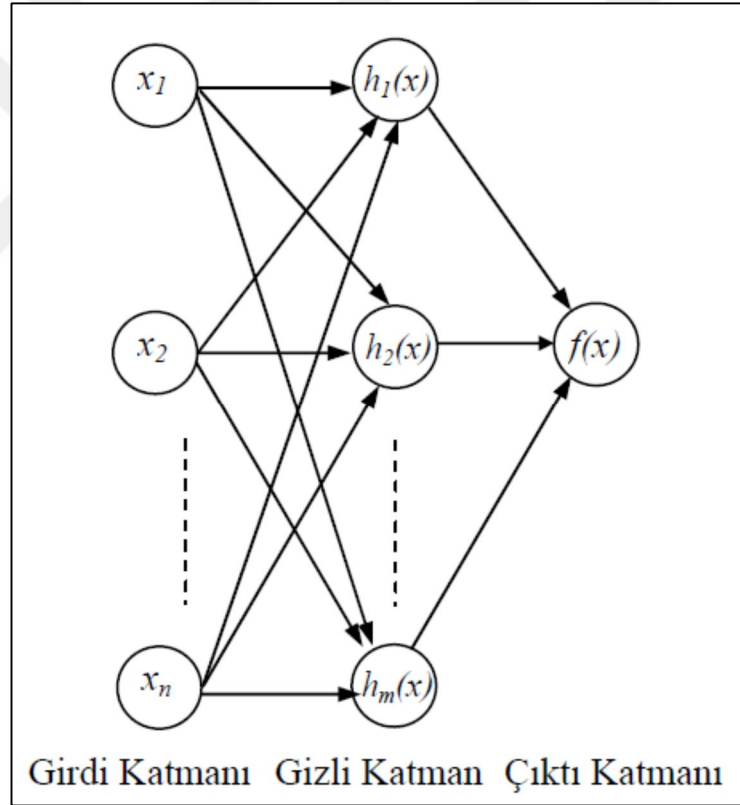
Şekil 4.9. Geri beslemeli YSA yapısı [151]

4.4.3. Radyal tabanlı fonksiyon ağı

Radyal tabanlı fonksiyon (RTF) ağlarının amacı, bir grup radyal taban fonksiyonu, istenen f fonksiyonuna yaklaşacak şekilde ağırlıklandırarak toplamaktan

ibarettir [152]. Radyal tabanlı fonksiyon ağı üç katmanlı bir yapıdır (Şekil 4.10). Giriş katmanı giriş vektör uzayı ile çıkış katmanı da örüntü sınıfları ile ilişkilidir. Böylelikle tüm yapı, gizli katmanın yapısı ve gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıkların belirlenmesine indirgenmektedir [153].

RTF ağlarının eğitilmesi geleneksel çok katmanlı ileri beslemeli YSA'ndan farklıdır. Temel RTF ağında, radyal tabanlı fonksiyonun merkezleri ve genişlikleri sabittir. Bunlar öğrenme işlemi sırasında değişmezler, öğrenme işlemi sırasında sadece ağırlıklar ayarlanabilir parametrelerdir. Bununla birlikte genelde RTF ağlarının doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyon parametreleri (radyal tabanlı fonksiyonun merkezleri ve genişlikleri) ve doğrusal çıkış ağırlıkları olmak üzere üç parametresi bilinmemektedir. Tüm bu parametrelerin öğrenilmesi gerekmektedir [154].



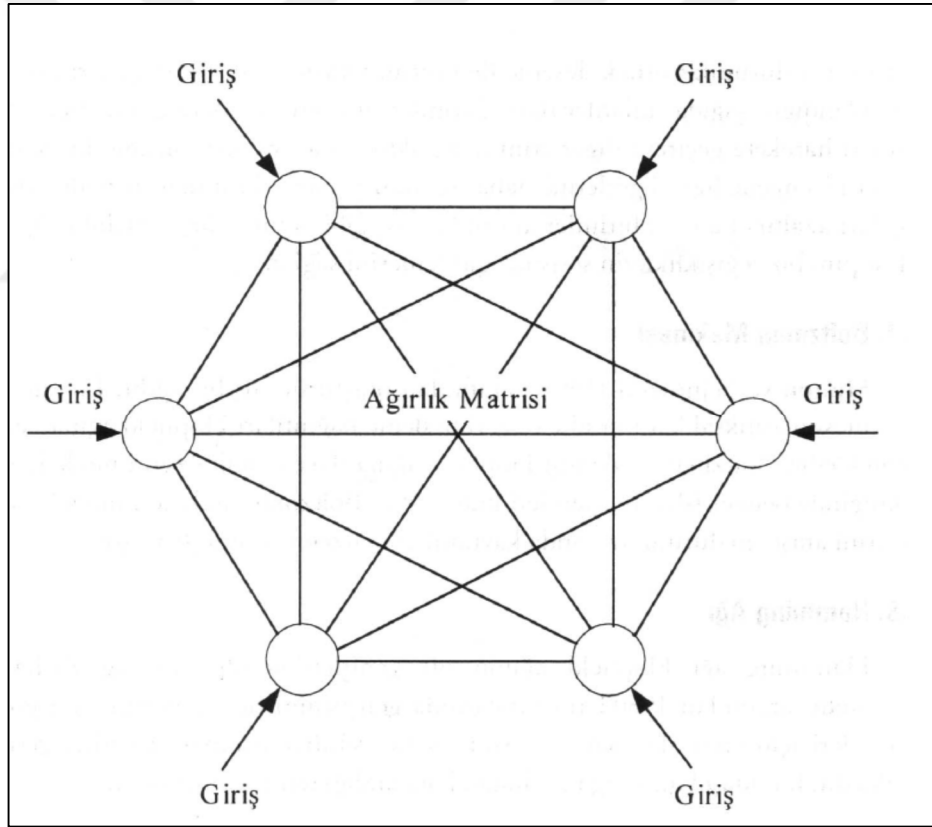
Şekil 4.10. Radyal tabanlı fonksiyon ağ yapısı [155]

4.4.4. Hopfield yapay sinir ağları

1982' de John J. Hopfield tarafından California Institute of Technology ve AT&T Bell Laboratories' de çalışırken eş zamanlı olmayan doğal bir biyolojik nörona uyarlayarak tasarladığı bir modeldir. Genel olarak Hopfield ağı, düğümlerin tek bir katmanda bulunduğu, birbirleriyle ilişkili ve tam bağlantılı bir ağıdır [156]. Hopfield ağı,

hem birbiriyle ilişkili olaylarda hem de optimizasyon görevlerinde oldukça faydalıdır [157]. Hopfield ağ topolojisi diğer ağlardan farklıdır. Bir giriş süzme katmanı, bir Hopfield katmanı ve bir çıkış katmanı olmak üzere üç katman kullanılmasına rağmen farklı katmanlar bulunmamaktadır. Bu ağda her düğüm diğer düğümlere bağlıdır. Bilgi her iki yönde de gezer ve simetriktir. Şekil 4.11’ de Hopfield ağının yapısı görülmektedir [158].

Hopfield ağı, bir geri yayımlı ağı eğitildiği gibi eğitilmemektedir. Örnek desen grupları seçilmekte, ağı ağırlıklarının başlangıç değerlerini saptamak için kullanılmaktadır. Bu işlem bir kere yapıldıktan sonra herhangi bir desen ağı sunulmakta ve bu da giriş desenine en çok benzeyen örnek desenlerden biriyle sonuçlandırılmaktadır. Çıkış deseni, birimlerin durumlarına bakılarak ağdan okunabilmektedir [158].



Şekil 4.11. Hopfield ağ yapısı [150]

4.4.5. Kohonen yapay sinir ağları

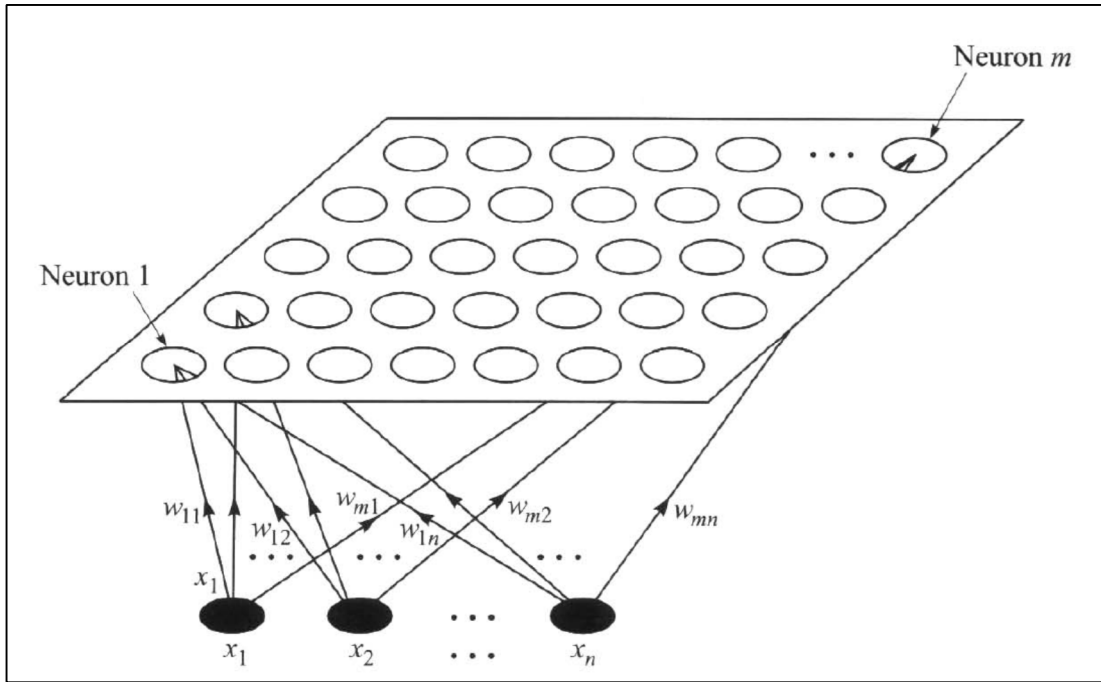
Kohonen ağı, bir giriş katmanı ve bir de çıkış katmanı olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Çıkış katmanındaki nöronlar genellikle düzenli iki boyutlu aralıklar olarak

düzenlenir. Çıkıştaki her nöron bütün giriş düğümlerine bağlıdır. Bağlantıların ağırlıkları verilen çıkış elemanı ile ilgili olan referans vektörünün elemanlarını oluşturur.

Kohonen ağının öğrenme adımları aşağıdaki gibidir:

- Çıkış nöronlarının bütün referans vektörlerinin küçük rasgele değerlere çekilmesi.
- Bir giriş örüntüsünün alınması.
- Giriş örüntüsüne en yakın referans vektörüne sahip nöronun belirlenmesi.
- Belirlenen nöronun ve onun komsularının, referans vektörlerinin güncelleştirilmesi. Bu referans vektörleri giriş vektörüne yaklaştırılmaktadır. Bu yaklaştırma (ayarlar), belirlenen nöron için en fazla ve bu nörondan uzaklaştıkça daha azdır. Öğrenme ilerledikçe komsuların sayısı azalmakta ve öğrenme sonunda belirlenen nöronun referans vektörü ayarlanmaktadır.

Öğrenmeden sonra bir etiketleme işlemine başlanmaktadır. Bilinen sınıfların giriş örüntüleri ağına giriş olarak verilmekte ve bu giriş örüntüleri tarafından aktif hale gelen çıkış nöronlarına, bu sınıf etiketleri verilmektedir [154]. Şekil 4.12’ de Kohonen ağı yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Kohonen ağı yapısı [149]

4.5. Yapay Sinir Ağlarının Kısa Tarihçesi

YSA' nın tarihçesi incelendiğinde; 1980 öncesi ve sonrası olarak iki ana bölüme bölünmelidir. 1980 öncesi çalışmalar ilk olarak 1890 yılında ortaya atılmış ve özellikle bilgisayar teknolojileri gelişinceye kadar ağır ağır ilerlemiştir. 1980 sonrası süratle günlük hayatta kullanılabilir hale gelebilmiştir. Kaplama mühendisliği ile ilgili 2010 yılına kadar yapılmış olan bilgisayar sistemleri uygulamaları Tapkın' ın çalışmasında tarihsel olarak detaylı bir şekilde verilmiştir [159]. 2010 yılından sonraki çalışmalara bakıldığında ise; 2011 yılında Ozgan' ın yaptığı bir çalışmada asfalt betonlarının Stabilitate değerlerini [142], Zofka ve Yut ise 2012 yılında asfalt binderinin sünme uyumu değerlerini YSA ile modellemiştir [160]. Yine 2014 yılında Öztürk ve Kutay Superpave asfalt karışım dizaynı için yeni bir YSA modeli oluşturmuştur [161]. 2015 yılında ise Shafabakhsh ve diğerleri Nano modifiyeli asfalt betonlarının oluklanma performansını modellemişlerdir [162]. 2017 yılında Mirabdolazimi ve Shafabakhsh forta fiber ile modifiye edilmiş asfalt betonu numunelerin sinir ağları ve genetik programlama teknikleriyle oluklanma derinliklerini tahminlemişlerdir [163]. Ahmed vd. YSA ile yorulma performansını modellemiş [164], Kara ve Karacasu ise bulanık mantık uygulaması ile atık seramik katkılı asfalt betonların performanslarını incelemişlerdir [165]. Son olarak 2018 yılında yapılan 3 farklı çalışmanın birincisi asfalt karışım dizaynını YSA ve genetik algoritma kullanılarak optimize etmeye çalışmış [166], ikincisi Hızlı Fourier Dönüşümü ve YSA kullanarak öngörülen frekanslara dayalı esnek kaplamaların yarı-statik analizini modellemiş [167] ve son olarak asfalt karışımların, x-ray tarama görüntülerinin konvolüsyonel sinir ağı ile karakterizasyon tanımlamaları yapılmıştır [168].

Görüldüğü gibi henüz bor atıkları ile oluşturulmuş asfalt numuneleri üzerine herhangi bir bilgisayar modellemesi sistemi bulunmamaktadır. Bu çalışmada farklı oranlarda öğütülmüş atık bor (ÖAB) katkısı ile hazırlanmış asfalt betonu numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş bu numunelerin fiziksel özellikleri ile oluşturulan YSA modeliyle numunelerin mekanik özelliklerinden stabilite ve akma değerleri tahminlenmiştir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin şartname limitleri, yapılan deneyler ve bu deneyler sonucu elde edilen veriler sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

5.1. Agrega Deneyleri

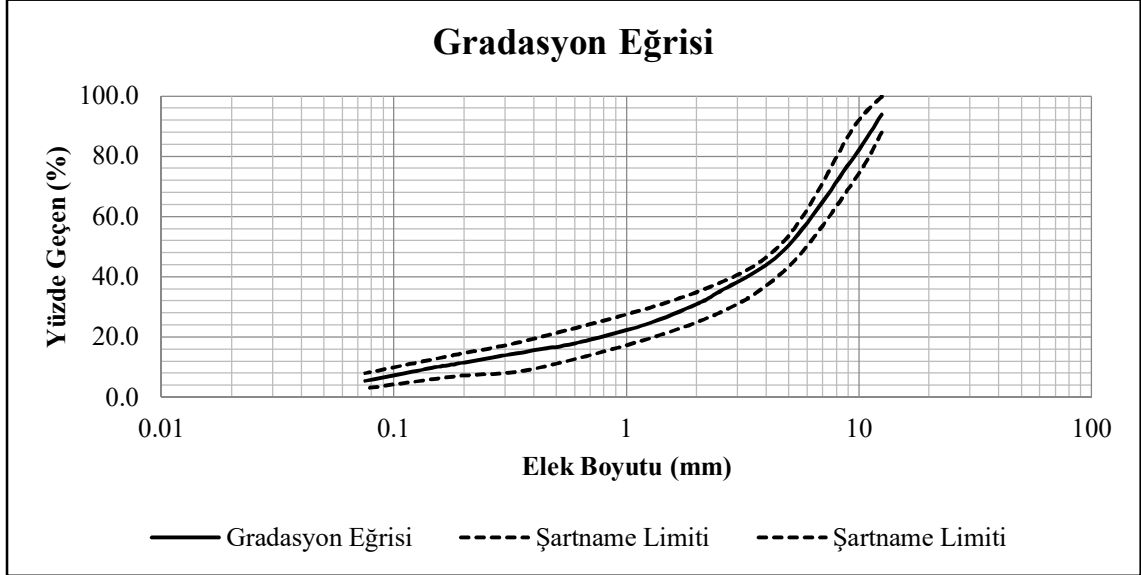
Bu çalışmada agrega olarak kireçtaşı kullanılmıştır. Deneyler için hazırlanan karışımlarda, Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilen karışım tiplerinden “Aşınma Tabakası Tip-1” gradasyonu kullanılmıştır (Tablo 5.1) [86]. Tip-1 agrega gradasyonuna ait granülometre eğrisi Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Aşınma tabakası Tip-1 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri [86]

Elek Boyutu (mm)	Şartname Limitleri	% Geçen	% Kalan	Ağırlık (gr)
12,5	88-100	94	6	69
9,5	72-90	80	14	161
4,75	42-52	49	31	356,5
2,36		34	15	172,5
2	25-35	31	3	34,5
1,18		24	7	80,5
0,6		18	6	69
0,425	10-20	16	2	23
0,3		14	2	23
0,18	7-14	11	3	34,5
0,15		10	1	11,5
0,075	3-8	5,5	4,5	51,75
Filler		0	5,5	63,25
Toplam				1150

Yukarıdaki tablodan da görülebileceği üzere standart bir asfalt betonu numunesi hazırlamak için 1150 gr agrega kullanılmıştır. Marshall ve sünme deneyleri sonuçlarını yorumlamada yardımcı olması için agrega karışımlarının birim ağırlığı bulunmuştur. “Bir agreganın özgül ağırlığı, o agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 20-

25°C’ deki suyun ağırlığına oranıdır” [79]. Agrega karışımının özgül ağırlığını elde etmek için kaba agrega, ince agrega ve fillere ait özgül ağırlık değerlerini bilmek gerekir.



Şekil 5.1. Gradasyon Eğrisi

5.1.1. Kaba agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlığının tayini

Bu deney 4.75 mm (no.4) elek üzerinde kalan tane boyutundaki agregalara uygulanır. Kaba agregadan 2 kg ağırlığında numune alınır. Numune, agrega gradasyonunu temsil etmek zorundadır. Deney numunesi, yıkanarak bir tepsi içine konur ve 24 saat boyunca kurutulur. Emici özelliği olan bir bez üzerinde doymuş yüzey kuru hale gelinceye kadar kurutulan numune tartılır. Numune, tel sepet içinde, 25±1°C sıcaklık ve 977±2 kg/m³ yoğunluğa sahip suya daldırılır ve tartılır. Tartım sonrası tel sepetten çıkarılıp bir tepsiye konulan agrega, 110±5°C sıcaklıkta etüvde kurutulur. Sabit kütleye ulaşan agrega 1-3 saat kadar soğutulur. Kuru numune tartılır ve tartım kaydedilir [79]. Kaba agregaya ait özgül ağırlık sonuçları Tablo 5.2’ de verilmiştir.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{A}{B - C} \quad (5.1)$$

$$\text{Yüzey Kuru Suyu Doymuş Özgül Ağırlık} = \frac{B}{B - C} \quad (5.2)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{A - C} \quad (5.3)$$

$$\text{Efektif Özgül Ağırlık} = \frac{\text{Hacim Ö. A.} + \text{Zahiri Ö. A.}}{2} \quad (5.4)$$

$$\text{Absorpsiyon\%'si} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (5.5)$$

Burada;

A = Agreganın kuru ağırlığı, gr

B = Agreganın suya doygun yüzey kuru ağırlığı, gr

C = Agreganın sudaki ağırlığı, gr

Tablo 5.2. Kaba agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
A	Agrega kuru ağırlığı, gr	1989	1986	
B	Agreganın suya doygun yüzey kuru ağırlığı, gr	2007	1999	
C	Agreganın sudaki ağırlığı, gr	1264	1263	
	Hacim özgül ağırlık, kg/m ³	2676	2700	2688
	Yüzey Kuru Suya Doymun Özgül Ağırlık, kg/m ³	2701	2717	2709
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m ³	2744	2747	2745
	Efektif özgül ağırlık, kg/m ³	2710	2724	2717
	Absorpsiyon yüzdesi, %	0,92	0,63	0,77
	Standart	ASTM C 127-04		

5.1.2. İnce agrega su absorpsiyonu ve özgül ağırlığının tayini

4,75 mm ile 0,075 mm arasındaki elekler arasında kalan malzemeden, agrega gradasyonunu temsil edecek şekilde 1000 gr numune alınır. 200 no' lu elekte yıkanan malzeme 24 saat boyunca tepsi içinde bekletilir. 24 saat sonunda numune, malzeme kaybına neden olmadan süzülür. Tepsi içindeki numune, sıcak hava akımına tutulur.

Numunenin doygun-yüzey kuru hale geldiği, koni metodu ile tespit edilir. Bu metot, bir koni ve bir sıkıştırma çubuğu ile uygulanır. Numune üç aşamada koninin içine yerleştirilir. Her seferde 25 vuruş yapılır. Vuruşlar, malzemenin 5mm üzerinden yapılır. Sıkıştırma işlemi sonunda koni kaldırılır. Eğer numune doygun-yüzey kuru hale gelmişse, serbest şekilde dökülür. Çökme yoksa kurutma işlemine devam edilir.

Doygun-yüzey kuru hale gelinceye kadar kurutulan numunenin 500gr'lık kısmı piknometre içine konur ve piknometre ile tartılır. Numune yüksekliğini geçinceye kadar içine su doldurulan piknometre, iki yönde döndürülerek çalkalanır. Hava kabarcıkları çıkmayana kadar isleme devam edilir. İşlem sonunda işaret çizgisine kadar piknometreye su ilave edilir. $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlı su banyosuna yerleştirilir. Su ve malzemenin 25°C 'ye ulaşmasının ardından piknometre, banyodan çıkarılır. Suyun işaret çizgisinde olup olmadığı kontrol edilir ve hemen tartılır. Piknometredeki numune tepsiye konulup $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulur. Etüvden çıkarılıp oda sıcaklığında soğutulan numunenin kuru numune ağırlığı tartılır [79].

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlık} = \frac{E}{B + C - A - D} \quad (5.6)$$

$$\text{Yüzey Kuru Suyu Doygun Özgöl Ağırlık} = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (5.7)$$

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlık} = \frac{E}{B + E - D} \quad (5.8)$$

$$\text{Efektif Özgöl Ağırlık} = \frac{\text{Hacim Ö. A.} + \text{Zahiri Ö. A.}}{2} \quad (5.9)$$

$$\text{Absorpsiyon\%'si} = \frac{C - A - E}{E} \times 100 \quad (5.10)$$

Burada;

A = Piknometre ağırlığı, gr

B = Piknometre + su ağırlığı, gr

C = Piknometre + yüzey kuru-suya doygun numune ağırlığı, gr

D = Piknometre + su + yüzey kuru-suya doygun numune ağırlığı, gr

$E =$ Kuru numune ağırlığı, gr

Tablo 5.3. İnce agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı, gr	234,8	234,8	
B	Piknometre + su ağırlığı, gr	1262,2	1262,2	
C	Piknometre + yüzey kuru-suya doymuş numune ağırlığı, gr	715,6	742,2	
D	Piknometre + su + yüzey kuru-suya doymuş numune ağırlığı, gr	1559,0	1582,0	
E	Kuru numune ağırlığı, gr	468,1	505,1	
	Hacim özgül ağırlık, kg/m ³	2544	2592	2618
	Yüzey Kuru Suyu Doymuş Özgül Ağırlık, kg/m ³	2613	2705	2659
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m ³	2733	2726	2729
	Efektif özgül ağırlık, kg/m ³	2638	2709	2674
	Absorpsiyon yüzdesi, %	2,71	0,46	1,58
	Standart	ASTM C 128-04		

5.1.3. Mineral filler zahiri özgül ağırlığının tayini

110±5°C' de en az 4 saat kurutulmuş numune, soğutulduktan sonra özgül ağırlık şişesine, şişenin üçte biri dolacak şekilde boşaltılır. Şişe, kuru ve temiz kapakla kapatılır ve tartılır. Daha sonra şişenin yarısına kadar su doldurulur. Ağız kapatılmış şişe birkaç kez tezgaha vurularak, en az 5 dakika bir vakum desikatörle içerisinde bulunan hava çıkartılır. Hava kabarcıkları tamamen bitince ağıza kadar su ile doldurulan şişe 25±1°C' lik su banyosunda en az 60 dakika bekletilir. İşlem sonunda banyodan çıkarılan şişe kurutulup tartılır [79]. Deney sonuçları Tablo 5.4' de verilmiştir.

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{A + B - C} \quad (5.11)$$

Burada;

A = Kuru numune ağırlığı, gr

B = Piknometre + su ağırlığı, gr

C = Piknometre + su + numune ağırlığı, gr

Tablo 5.4. Mineral fillerin zahiri özgül ağırlık değeri

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
A	Kuru numune ağırlığı, gr	50,17	50,23	
B	Piknometre + su ağırlığı, gr	666,00	664,29	
C	Piknometre + su + numune ağırlığı, gr	697,47	695,87	
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m ³	2683	2693	2688
	Standart	ASTM D 854-83		

Çalışmalarımızda kullanılacak olan agregaya özgül ağırlıkları aşağıda Tablo 5.5 ile verilmiştir.

Tablo 5.5. Agregaya özgül ağırlıkları

	Özgül Ağırlık (kg/m ³)
Kaba Agregaya Özgül Ağırlığı	2717
İnce Agregaya Özgül Ağırlığı	2674
Mineral Filler Özgül Ağırlığı	2688

5.1.4. Agregaya birim hacim ağırlık deneyi

Agregaların sıkı ve gevşek durumlardaki birim ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. En büyük dane çapına göre kullanılacak numune miktarı belirlendikten sonra sıkı ve gevşek durumdaki birim hacim ağırlıklarının bulunması için iki ayrı aşamada deneyler gerçekleştirilir.

Sıkı birim hacim ağırlığın belirlenmesi için; hacmi (V) belli olan metal kap alınarak ağırlığı (W_i) tartılır. Kapın üçte biri seviyesine kadar agregaya numuneleri ile doldurulduktan sonra şişleme çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılır. Bu şekilde üç tabaka halinde şişlenerek sıkıştırılan numuneler en son taşma seviyesine kadar doldurulur

ve üstü sıyrılarak düzeltilir. Daha sonra metal kap agregası ile birlikte tartılır (W_s). Sıkı birim hacim ağırlık aşağıda formüle göre hesaplanır.

$$\text{Sıkı Birim Ağırlık} = BHA_s = \frac{W_s - W_i}{V} \quad (5.12)$$

Gevşek birim hacim ağırlık için ise hacmi (V) belli olan metal ölçü kabı alınarak tartılır (W_i). Metal kabın üst yüzeyinden 5 cm' den fazla yükseklikte olmayacak şekilde agregalar serbest bir şekilde kaba doldurulur ve üst yüzeyi sıyrılarak düzeltilir. Ölçü kabı agregası numuneleri ile birlikte tartılır (W_s). Gevşek birim hacim ağırlık aşağıdaki formülle göre hesaplanır [169].

$$\text{Gevşek Birim Ağırlık} = BHA_g = \frac{W_s - W_i}{V} \quad (5.13)$$

Tez kapsamında yapılan sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlık deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.6. Birim hacim ağırlıkları

	W_i (gr)	W_s (gr)	BHA (gr/cm ³)	STANDART
BHA _s	4257,5	9948,5	1,897	ASTM C 29
BHA _g	4257,5	9324,5	1,689	

5.2. Bitüm Deneyleri

Bu bölümde, ilk olarak bitüme uygulanan deneyler hakkında genel bilgi verilmiştir. Kullanılan bitüm; İzmit TÜPRAŞ rafinerisinden getirilmiş 50-70 ve 70-100 penetrasyonlu bitümdür. Bitüme ait şartname limitleri Tablo 5.7' de verilmiştir.

Tablo 5.7. Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümün özellikleri [86]

DENEY ADI	Standart	Birim	Değer
Penetrasyon, 25°C	ASTM D 5-97	1/10 mm	50-70 / 70-100
Yumuşama Noktası	ASTM D 36-95	°C	46-54
Düktilite, 25°C	ASTM D 113-99	cm	+100
Parlama Noktası	ASTM D 92-02	°C	min 230
Yanma Noktası	ASTM D 92-02	°C	min 270
İnce Film Halinde Isıtma Kaybı	ASTM D 1754-97	%	Maks. 0.5
Özgül Ağırlık	ASTM D 70-76	kg/m ³	1,0-1,1

5.2.1. Penetrasyon deneyi

Penetrasyon ölçmek için kullanılan alete penetrometre denir. Deneyde kullanılacak numuneler 30 dakika boyunca 25°C’ da bekletilir. Deney sırasında, penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. Su banyosunda bekletilen numuneler, deney sırasında sıcaklığın korunması için 25°C’ daki su içinde cihaza yerleştirilir. 100 gr ağırlığındaki iğne, numune yüzeyine degecek şekilde ayarlanır. İğne, 5 saniye süresince serbest bırakılır. 5 saniyelik zaman bitiminde penetrasyon değeri okunur. Kabın kenarından ve birbirinden 1’ er cm’ lik uzaklıkta en az 3 okuma yapılır. 0.1 mm cinsinden okunan bu okumalar, en kısa zamanda yapılmalıdır. İğne, her seferinde uygun bir çözücü yardımı ile (karbon tetra klorür, tri klor etilen, benzin) ısıtılmış bezle silinir. Sonra kuru bezle temizlenir [170] (Görsel 5.1).

Bitümlü bağlayıcının penetrasyon değeri yükseldikçe viskozite değeri düşecektir. Yani bağlayıcının akmaya karşı direnci azalacaktır. Buna bağlı olarak penetrasyon değeri kıvamlilikla ters orantılı olacaktır. Aşağıdaki Tablo 5.8 ile penetrasyon deneyi sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.8. Penetrasyon deneyi sonuçları

		1.Okuma	2.Okuma	3.Okuma	Ortalama
50/70 penetrasyonlu bitüm	1.Numune	6.39	6.25	6.18	6.27
	2.Numune	7.12	6.98	7.21	7.1
					66.85dmm
70/100 penetrasyonlu bitüm	1.Numune	8.04	8.47	7.91	8.14
	2.Numune	7.93	7.72	8.24	7.96
					80.52dmm



Görsel 5.1. Penetrasyon deneyi aleti

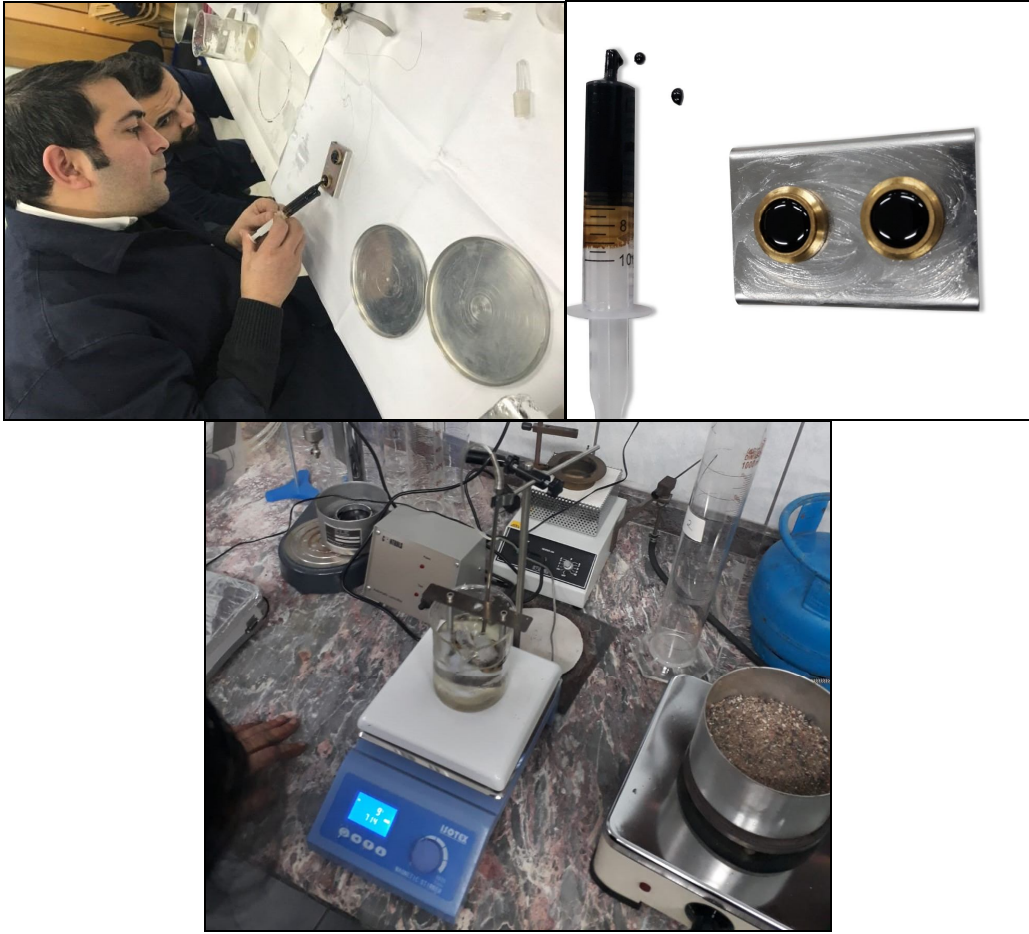
5.2.2. Yumuşama noktası deneyi

Bitümün sıcaklık karşısındaki davranışlarını, kıvamlılığını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bitümlerin yumuşama noktası ile viskozite değerleri doğru orantılıdır [169].

Yumuşama noktası, 5°C'lık bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde bir bilye bulunan, standart bir kalıp içerisindeki bitümlü maddenin dakikada 5°C ısıtılmasıyla, yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometrede okunan sıcaklıktır. Deneye başlamadan önce, halka bir pirinç levha üzerine oturtulur. Daha önceden vazelinle yağlanmış olan levha üzerindeki halkanın üstünden asacak şekilde, eritilmiş bitüm ile

doldurulur. Bir saat süre ile soğutulur, taşan kısım ısıtılmış bir ıspatula ile kesilip alınır. Yumuşama noktası 80°C’ den daha düşük olan bitümlere deneyin uygulanması su şeklindedir: beher 5°C’ ye kadar soğutulmuş saf su ile tabandan yaklaşık 9 cm yüksekliğe kadar doldurulur. Numuneyi taşıyan halkanın alt yüzü banyonun tabanından 2.5 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirilir. Bu arada bilye suya konur. Aletin kendi otomatik ısı okuyucusu halkanın alt yüzü ile aynı düzeyde ve halkadan 0.5 cm uzaklıkta bulunacak şekilde banyoya sarkıtılır. Su banyosunun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C’ de sabit tutulur. Sonra bilye uygun bir maşa yardımı ile halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir. Banyonun suyu ilk 3 dakikadan sonra dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin, banyonun tabanına değdiği anda termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir [170].

Aşağıdaki Görsel 5.2 deneyin yapılışını Tablo 5.9 ise deney sonuçlarını göstermektedir.



Görsel 5.2. Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası 80°C' den yüksek olan bitümlü maddelerle deney yapılırken de yine yukarıda anlatılan şekilde yapılır ancak saf su yerine gliserin kullanılmalıdır. Bu çalışmalarda başlangıç noktası 32°C olmalıdır. Yumuşama noktasının tayini iki numune üzerinde yapılmalı ve sonuç bu iki değerin ortalaması olarak verilmelidir [79].

Tablo 5.9. *Yumuşama noktası deneyi sonuçları*

	50/70 PEN. (°C)	70/100 PEN. (°C)
1.Numune	49.5	42.9
2.Numune	49.7	43.1
ORTALAMA	49.6	43.0

5.2.3. Parlama noktası deneyi

Isıtılarak akıcı hale getirilen bitüm, standart boyutlara sahip olan deney kabına dökülür. Numune, sıcaklık dakikada 14-17°C artacak şekilde ısıtılır. Tahmin edilen parlama noktası sıcaklığı ile bitümün sıcaklığı arasında 28°C' lik bir fark kaldığı zaman sıcaklık artışı dakikada 5.5°C olacak şekilde ayarlanır. Parlama noktası sıcaklığını tespit etmek için bitümün üzerinde, her 2°C' lik artış sonrası alev gezdirilir. Bitümün alev ile teması sonucu ilk parladığı andaki sıcaklık parlama noktasıdır. Numunenin 5 saniye boyunca yandığı sıcaklık ise yanma noktası sıcaklığıdır [170].

Bu deneyin amacı, şantiyede bitümün yanmadan hangi ısıya kadar emniyetle ısıtılacağına tespit edilmesidir [81].

Deney sonunda sonuçlar barometrik basınca göre aşağıdaki formül ile düzeltilmelidir [169].

$$\text{Doğrulanmış parlama noktası} = C + 0.25 \times (101.3 - K) \quad (5.14)$$

Burada;

C = Gözlenen parlama noktası (°C)

K = Ortamın barometrik basıncı (kPa)



Görsel 5.3. Numunenin parladığı an

5.2.4. İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi



Görsel 5.4. İnce film halinde ısıtma kaybı deney aleti

Bitümün bünyesinde bulunan uçucu maddelerin oranı ve yaslanmaya karşı direncini tespit edebilmek için yapılan deney sırasında, standart deney kabına akıcı haldeki bitüm yerleştirilir. Deney kabına doldurulan numunenin 3.2 mm' lik yüksekliği, 50.72 gr' lık bitüme denk gelmektedir. Bu miktara yakın şekilde kaba konulan numune, oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra tartılır. Daha sonra sıcaklığı 163°C' ye ayarlı deney aleti içinde 5 saat 15 dakika boyunca 5 devir/dakika hızla döndürülür. Bu süre sonunda numune oda sıcaklığında soğumaya bırakılır ve tekrar tartılır. İki tartım arasındaki farkın, numunenin ilk ağırlığına oranı alınır [170] (Görsel 5.4).

5.2.5. Düktilite deneyi

Bu deney normal bitüm ve bu bitüme katılan herhangi bir katkı maddesinin bitüme kazandırdığı elastikiyet miktarını ölçmek amacıyla yapılan bir deneydir (Görsel 5.5). [169].

Bitüm numuneleri, yumuşama noktasını 90°C geçmeyecek şekilde etüvde ısıtılır ve düktilite kalıplarına dökülür. Üç numune hazırlanarak oda sıcaklığında 30 dakika soğumaya bırakılır. Daha sonra 25°C' de ki su banyosunda 30 dakika bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numunelerin kalıplardan taşan kısımları ısıtılmış bir ıspatula yardımıyla sıyrılır. Numuneler tekrar 25°C suda 90 dakika bekletilerek sabit sıcaklığa gelmesi sağlanır. Sonra, kalıplar delikli uçlarından düktilite cihazına yerleştirilerek uçlarından çekilmeye hazır hale getirilir. Düktilite cihazına yerleştirilen 3 numune 5cm/dakika hızla kopuncaya kadar çekilir. Uzayan bitüm ipliğinin cihazın tabanına değmemesi gerekmektedir. Bunun için suyun yoğunluğu farklı türde tuzlar kullanılarak artırılabilir. Cihazın kenarında yer alan cetvelden uzama miktarları okunabilmektedir. Bitüm numuneleri çekme işlemi boyunca dikkatle gözlenir ve koptuğu andaki uzama miktarı kaydedilir. Yapılan üç deney sonucunun ortalaması alınarak bitümün düktilitesi bulunur [169,171].



Görsel 5.5. Düktilite deneyi

5.2.6. Özgül ağırlık deneyi

Karışımın özgül ağırlığını hesaplamak için, agrega özgül ağırlıklarının yanı sıra, bitümün özgül ağırlığı da bilinmelidir. Bu deney piknometre yardımı ile yapılır. Önce piknometrenin kuru ve temiz haldeki ağırlığı belirlenir. İkinci olarak piknometre saf su ile doldurulur ve bir kapakla kapatılır. Saf su ve piknometre, sıcaklıkları $25 \pm 1^\circ\text{C}$ olana kadar su banyosunda bekletilir. İstenen sıcaklık değerine ulaşıldığında piknometre sudan çıkarılır. Hemen kurutulan piknometrenin su ile dolu ağırlığı tartılır. Piknometrenin içinden saf su alınıp, yarısına kadar bitüm ile doldurulur (Görsel 5.6). Piknometre + bitüm ağırlığı bulunur. Son olarak piknometrenin içindeki boşluk saf su ile doldurulur ve piknometre yeniden su banyosuna yerleştirilir. Yaklaşık 1 saat sonunda banyodan çıkarılan piknometre tartılır ve piknometre + bitüm + su ağırlığı bulunmuş olur. Bu tartımlardan bitümün özgül ağırlığını bulmak için aşağıdaki denklemi kullanılır [170];

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (5.15)$$

Burada;

A = Boş piknometre ağırlığı, gr

B = Saf su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

C = Yarısına kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı, gr

D = Bitüm, saf su ve piknometre ağırlığı, gr

Tablo 5.10. Bitüm özgül ağırlık deneyi sonuçları

	NO	A (gr)	B (gr)	C (gr)	D (gr)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)
50/70 PEN. BİTÜM	1	28.44	78.78	47.34	79.49	1039
	2	30.07	122.43	59.67	123.47	1036
	ORTALAMA					1038
70/100 PEN. BİTÜM	1	16.04	42.10	24.28	42.28	1022
	2	20.35	45.85	27.64	46.11	1037
	ORTALAMA					1030



Görsel 5.6. Bitümün piknometrelere doldurulması

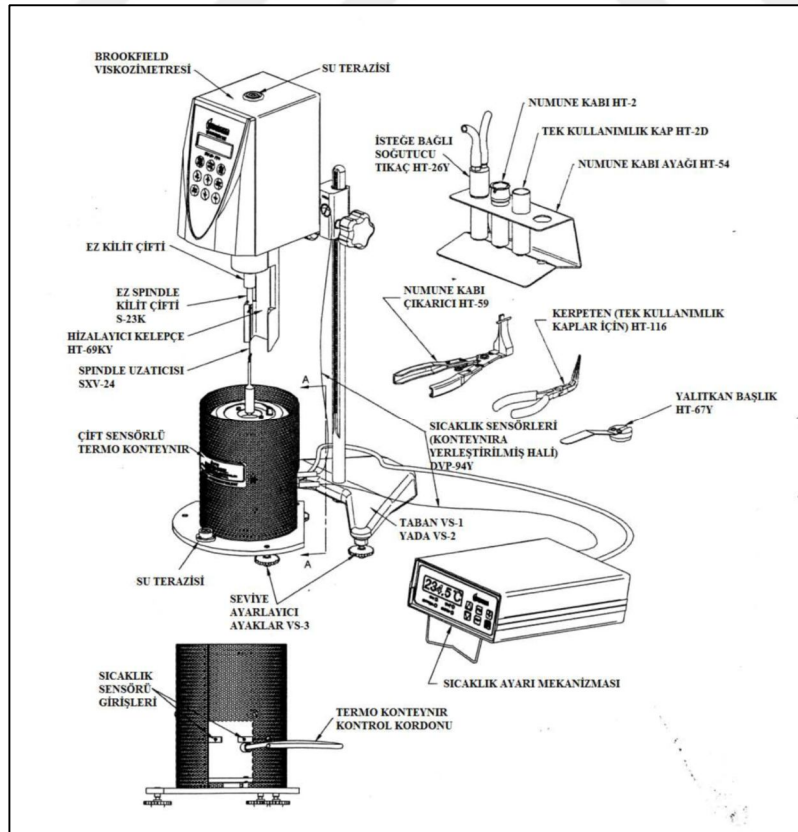
5.2.7. Dönel viskozite deneyi

ASTM D 4402-84 standardına göre bu deney 38 - 260°C sıcaklık arasındaki bitüm numunelerinin viskozitelerini ölçebilmek için uygulanır [99].

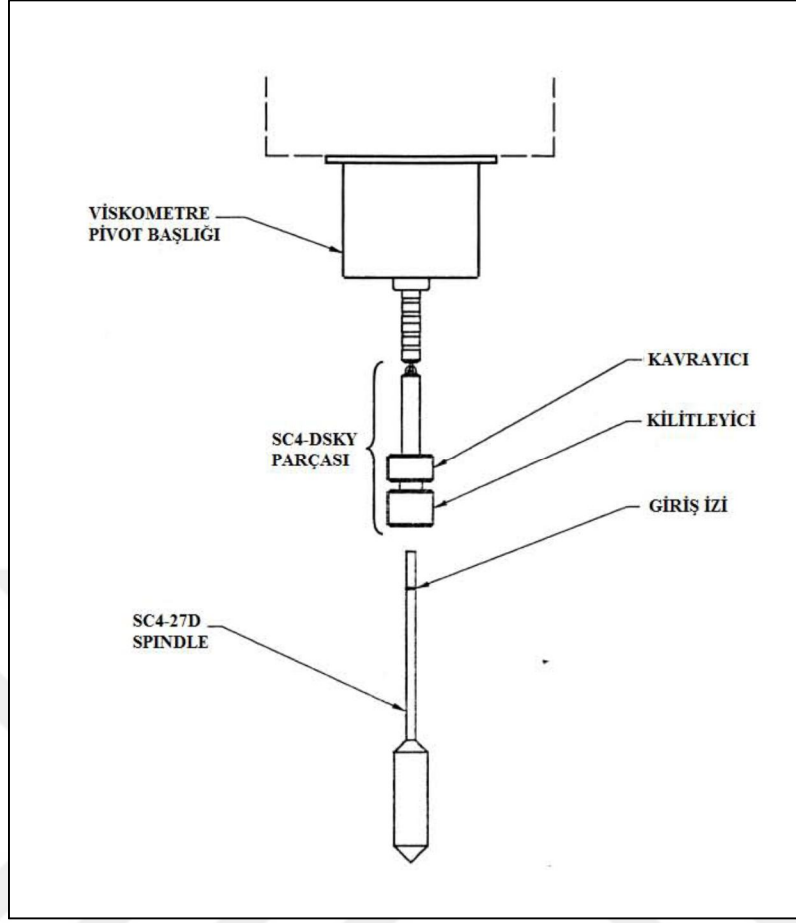
Bu standarda göre viskozite değeri, newtonien ya da non-newtonien akışkanlar için, kayma gerilmesinin kayma hızına olan oranıdır. Bitüm sınıflamasında pascal-saniye birimi kullanılır. Dönüştürme için $1000 \text{ cP} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ eşitliği kullanılır. Brookfield Termosel Viskozimetresi bu prosedür için viskozluğu ölçebilecek bir alettir. Viskozite dışardan sıcaklık kontrollü termosel sayesinde ısıtılabilen bir kap içerisinde, belirli bir tork ile döndürülen spindle (mil) ile örnek numuneye karşı ölçülen bağıl dirençtir [172].

Deney Brookfield Termosel Viskozimetresi (LV, RV, HA ya da HB serilerinden herhangi biri), farklı ölçülerdeki spindeller, ısı kontrol ünitesi, SCR kontrollü sensör ve grafik çizebilen bir yazılım ile yapılır [172].

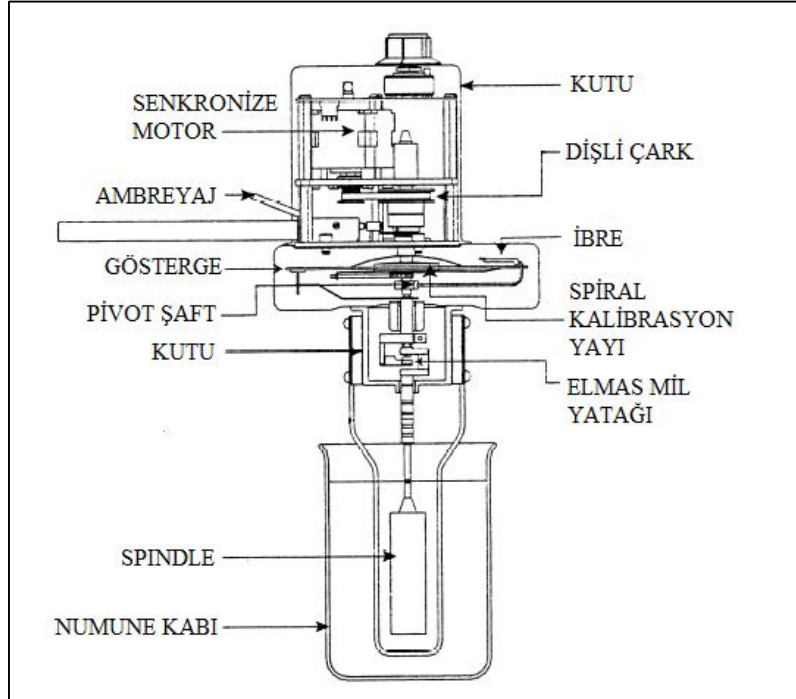
Sistemin teknik özelliklerini gösterir fotoğraflar Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.2. Brookfield termosel viskozimetresi ve parçaları [174]



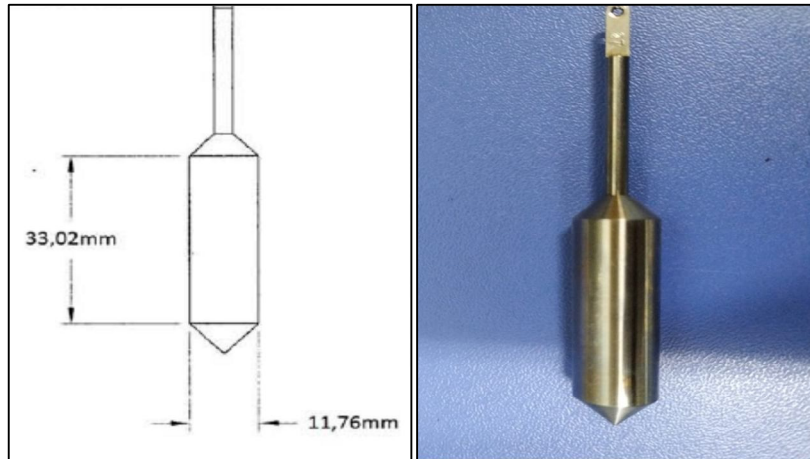
Şekil 5.3. Spindle' in alete takılması [174]



Şekil 5.4. Viskozimetrenin şematik görünüşü [174]

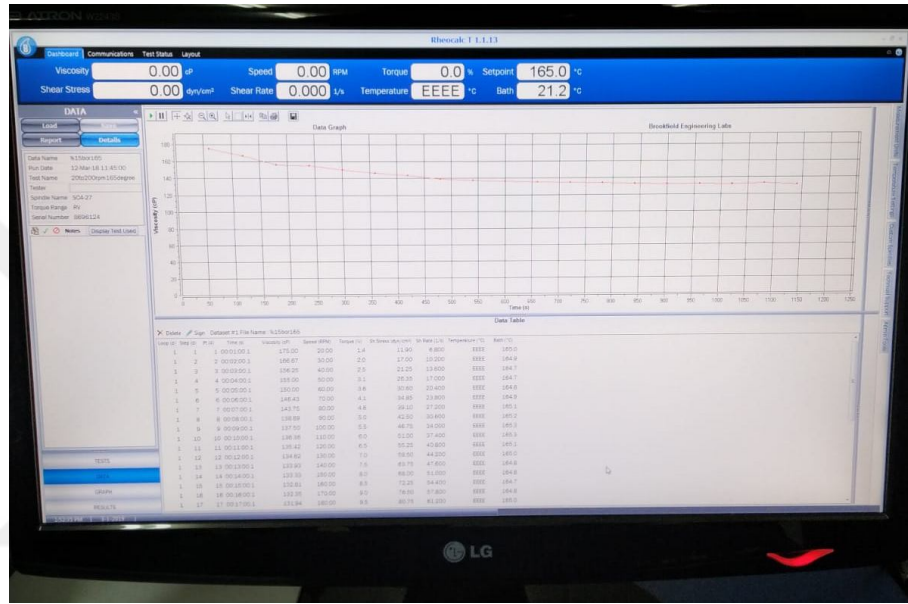
Deney kabına doldurulacak numunenin yaklaşık olarak 8-10 ml olması gerekmektedir. Konulacak numunenin ağırlığı özgül ağırlığı sayesinde hesaplanabilir. Numunenin kaba dökülmesinden sonra seçilen spindle da kabın içine konur ve kap Brookfield haznesine yerleştirilir. Yerleştirme esnasında akışkan malzemenin seviyesi spindle' ın üst konik kısmından yaklaşık 3,2 mm yukarıda olmalıdır. Numune alete yerleştirildikten sonra yaklaşık 15 dakika bitümün daha önceden belirlenen sıcaklığa gelmesi beklenir. Daha sonra RV, HA ve HB modeller için deney 20 rpm de LV modeller için 12 rpm de döndürülmeye başlanır. Her sıcaklık için 60 s de bir üç okuma alınmalıdır. Eğer en düşük okuma sıcaklığında değerler 98 birimden fazla ise dönüş hızı değiştirilmeli ve deneye devam edilmeli, eğer diğer sıcaklık derecelerinde de değerler 98 birimden fazla ise bir küçük spindle seçilerek deney yeniden yapılmalıdır. Son olarak deney sonuçlarına her zaman test sıcaklığı spindle numarası ve dönüş hızı yazılmalıdır [172]. Bitüm 135°C' de maksimum 3 Pa·s viskozluğa sahip olmalıdır [173].

Airey 2003 yılında yayınladığı bir makalede, polimer modifiyeli bitümün reolojik özelliklerini araştırmış, dinamik kayma reometresi (Dynamic Shear Rhometer [DSR]) ile yaptığı araştırmalarda kontrol numunesi bitümlere farklı oranlarda stiren-bütadiyen-stiren (SBS) elastomeri ekleyerek malzemelerin viskozluklarını incelemiştir. Çalışmalar göstermiştir ki, bitüm içerisindeki polimer miktarı arttıkça malzemenin elastik bağları kuvvetlenmiş, viskoziteleri, kompleks modülleri artmış ve elastik davranışları daha da iyileşmiştir. Ancak yaşlandırılmış modifiyeli bitümlerde SBS polimer moleküllerinde azalma olduğu görülmüş bu yüzden de numunelerin elastik özelliklerinin azaldığı anlaşılmıştır [175].



Şekil 5.5. SC4-27 numaralı spindle boyutları [174]

Yapılan çalışmalar RV tip Brookfield Termosel Viskozimetresi ile yapılmıştır. Deneyler SC4-27 numaralı spindile ile değişik sıcaklıklarda ve değişik dönüş hızlarında tekrarlanmıştır. SC4-27 numaralı spindle' ın boyutları Şekil 5.5' de verilmiştir. Numune kabında standartta belirtildiği üzere 10.5 ml bitüm yani kontrol numuneleri için 10.8 gr bitüm konularak hazırlanmıştır. Modifiyeli bitümlerde ise yine 10.5ml' ye karşılık gelen ağırlıklar ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Görsel 5.7. Rheocalc T 1.1.13 programı



Görsel 5.8. Brookfield viskozimetresi deney seti

Sistem aynı zamanda bir bilgisayara bağlıdır. “Rheocalc T 1.1.13” isimli bir yazılım tarafından değerler anlık olarak okunabilmektedir. Görsel 5.7’ de yazılımın ana sayfası görülmektedir. Bu ekranda anlık olarak sıcaklığı görebildiğimiz gibi, girilen dönme hızına göre viskozite değerini de anlık olarak cP cinsinden okunabilmektedir. Aynı zamanda bu programa nasıl bir test istediğiniz daha önceden girilebilmekte ve yazılım deneyi kendi kendine otomatik olarak yapabilmektedir. Örneğin sistemin sıcaklığı ne kadar hızla ne kadar süre dönmesi gerektiği ne kadar beklemesi gerektiği belirtilerek deney devam edebilmektedir [172].

Çalışmada SC4-27 numaralı spindle kullanılmıştır. İki farklı sıcaklıktaki kontrol numuneleri ile %5-10 ve 15 ÖAB katkılı numuneler 135°C ve 165°C’ de test edilmiştir. Numuneler kaba konduktan sonra yaklaşık 20dk kadar bekletilmiş ve sonra teste başlanmıştır. Test 20rpm dönüş hızından başlamak üzere 10rpm lik artış ile 200rpm dönüş hızına kadar her devirde birer dakika boyunca döndürülerek sürdürülmüştür. Aşağıdaki tablolarda dönel viskozite aletinden alınan okumalar verilmiştir. Tabloların altında her bir dönme hızı için bulunan viskozite değerlerinin ortalaması verilmiş ve bu değer bitümün viskozite değeri olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.11. 135°C’ de 50/70 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	412.50	20	3.3	28.1	6.8	134.3	00:00:30.1
2	441.67	30	5.3	45.1	10.2	134.7	00:01:00.1
3	431.25	40	6.9	58.7	13.6	134.4	00:01:30.1
4	390.00	50	7.8	66.3	17.0	134.9	00:02:00.1
5	370.83	60	8.9	75.7	20.4	134.7	00:02:30.1
6	360.71	70	10.1	85.9	23.8	134.8	00:03:00.1
7	362.50	80	11.6	98.6	27.2	134.8	00:03:30.1
8	361.11	90	13.0	110.5	30.6	134.8	00:04:00.1
9	362.5	100	14.5	123.3	34.0	135.0	00:04:30.1
10	361.36	110	15.9	135.1	37.4	134.7	00:05:00.1
11	362.50	120	17.4	147.9	40.8	135.1	00:05:30.1
12	357.69	130	18.6	158.1	44.2	134.7	00:06:00.1
13	353.57	140	19.8	168.3	47.6	135.1	00:06:30.1
14	351.67	150	21.1	179.4	51.0	134.9	00:07:00.1
15	350.00	160	22.4	190.4	54.4	135.0	00:07:30.1
16	351.47	170	23.9	203.1	57.8	135.1	00:08:00.1
17	352.78	180	25.4	215.9	61.2	134.9	00:08:30.1

18	353.95	190	26.9	228.6	64.6	135.2	00:09:00.1
19	350.00	200	28.0	238.0	68.0	134.9	00:09:30.1
Ortalama Viskozite = 370.42cP							

Tablo 5.12. 165°C' de 50/70 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	125.00	20	1.0	8.5	6.8	165.3	01:00.1
2	125.00	30	1.5	12.8	10.2	165.3	02:00.1
3	125.00	40	2.0	17.0	13.6	165.1	03:00.1
4	125.00	50	2.5	21.3	17.0	165.0	04:00.1
5	125.00	60	3.0	25.5	20.4	164.8	05:00.1
6	121.43	70	3.4	28.9	23.8	164.8	06:00.1
7	121.88	80	3.9	33.2	27.2	164.8	07:00.1
8	119.44	90	4.3	36.6	30.6	164.9	08:00.1
9	120.00	100	4.8	40.8	34.0	165.1	09:00.1
10	120.45	110	5.3	45.1	37.4	165.1	10:00.1
11	120.83	120	5.8	49.3	40.8	165.2	11:00.1
12	119.23	130	6.2	52.7	44.2	165.2	12:00.1
13	119.64	140	6.7	57.0	47.6	165.1	13:00.1
14	118.33	150	7.1	60.4	51.0	165.0	14:00.1
15	118.75	160	7.6	64.6	54.4	164.8	15:00.1
16	119.12	170	8.1	68.9	57.8	164.8	16:00.1
17	118.06	180	8.5	72.3	61.2	164.8	17:00.1
18	118.42	190	9.0	76.5	64.6	164.9	18:00.1
19	117.50	200	9.4	79.9	68.0	165.1	19:00.1
Ortalama Viskozite = 120.95 cP							

Tablo 5.13. 135°C' de 70/100 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	412.50	20	3.3	28.1	6.8	134.3	00:00:30.1
2	441.67	30	5.3	45.1	10.2	134.7	00:01:00.1
3	431.25	40	6.9	58.7	13.6	134.4	00:01:30.1
4	390.00	50	7.8	66.3	17.0	134.9	00:02:00.1
5	370.83	60	8.9	75.7	20.4	134.7	00:02:30.1
6	360.71	70	10.1	85.9	23.8	134.8	00:03:00.1
7	362.50	80	11.6	98.6	27.2	134.8	00:03:30.1
8	361.11	90	13.0	110.5	30.6	134.8	00:04:00.1
9	362.50	100	14.5	123.3	34.0	135.0	00:04:30.1
10	361.36	110	15.9	135.1	37.4	134.7	00:05:00.1
11	362.50	120	17.4	147.9	40.8	135.1	00:05:30.1

12	357.69	130	18.6	158.1	44.2	134.7	00:06:00.1
13	353.57	140	19.8	168.3	47.6	135.1	00:06:30.1
14	351.67	150	21.1	179.4	51.0	134.9	00:07:00.1
15	350.00	160	22.4	190.4	54.4	135.0	00:07:30.1
16	351.47	170	23.9	203.1	57.8	135.1	00:08:00.1
17	352.78	180	25.4	215.9	61.2	134.9	00:08:30.1
18	353.95	190	26.9	228.6	64.6	135.2	00:09:00.1
19	350.00	200	28.0	238.0	68.0	134.9	00:09:30.1
Ortalama Viskozite = 370.42cP							

Tablo 5.14. 165°C' de 70/100 penetrasyonlu kontrol numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	200.00	20	1.6	13.6	6.8	164.7	00:00:30.1
2	166.67	30	2.0	17.0	10.2	165.2	00:01:00.1
3	125.00	40	2.0	17.0	13.6	164.9	00:01:30.1
4	115.00	50	2.3	19.6	17.0	165.1	00:02:00.1
5	116.67	60	2.8	23.8	20.4	165.0	00:02:30.1
6	121.43	70	3.4	28.9	23.8	165.0	00:03:00.1
7	121.88	80	3.9	33.2	27.2	165.2	00:03:30.1
8	125.00	90	4.5	38.3	30.6	164.8	00:04:00.1
9	120.00	100	4.8	40.8	34.0	165.2	00:04:30.1
10	111.36	110	4.9	41.7	37.4	164.7	00:05:00.1
11	108.33	120	5.2	44.2	40.8	165.3	00:05:30.1
12	105.77	130	5.5	46.8	44.2	164.8	00:06:00.1
13	107.14	140	6.0	51.0	47.6	165.2	00:06:30.1
14	110.00	150	6.6	56.1	51.0	165.0	00:07:00.1
15	110.94	160	7.1	60.4	54.4	165.0	00:07:30.1
16	110.29	170	7.5	63.8	57.8	165.1	00:08:00.1
17	105.56	180	7.6	64.6	61.2	164.8	00:08:30.1
18	103.95	190	7.9	67.2	64.6	165.2	00:09:00.1
19	103.75	200	8.3	70.6	68.0	164.8	00:09:30.1
Ortalama Viskozite = 120.46 cP							

5.3. Bor İçeren Katkı Malzemelerin Karakterizasyonu

Çalışmada üç farklı bor içeren katkı malzemesi kullanılmıştır. Bunlar Boraks Pentahidrat (BP) (Görsel 5.9), Susuz Boraks (SB) (Görsel 5.10) ve Öğütülmüş Atık Bor' dur (ÖAB). BP ve SB malzemeleri Kırka Eti Bor fabrikasından paketlenmiş halde laboratuvara getirilmiş, ÖAB numuneleri ise maden çevresinde bulunan atık yığınlarından rastgele alınmış ve laboratuvar ortamında öğütülmüştür.

Boraks pentahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) madenden toz veya kristal formunda çıkarılan tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) cevherinden elde edilir. Susuz boraks ise ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) boraks hidratlar olarak adlandırılan boraks dekahidrattan ve boraks pentahidrattan üretilebilir.



Görsel 5.9. Boraks Pentahidrat (BP)



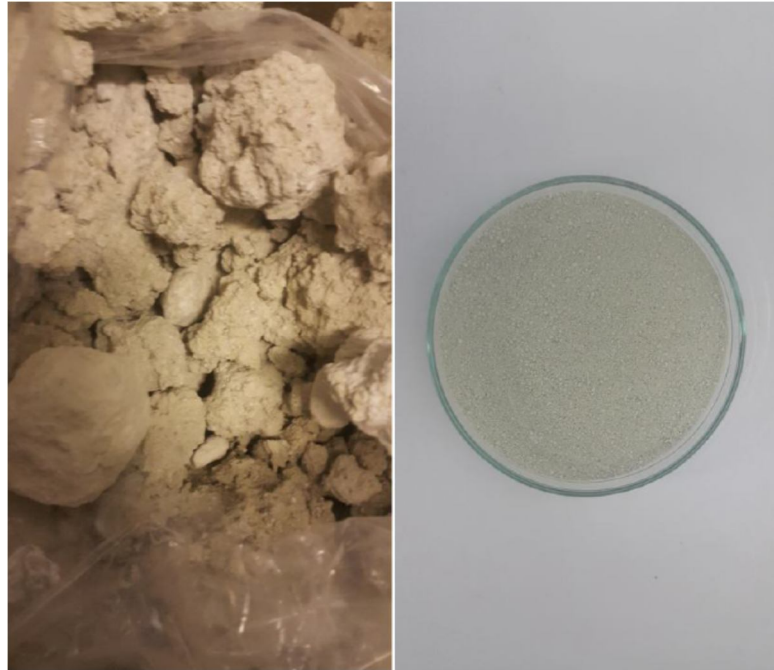
Görsel 5.10. Susuz Boraks (SB)

Bu çalışmada doğada yığınlar halinde bulunan ve bu haliyle çevre kirliliğine en sebebiyet veren atık borlar (Görsel 5.11) sektörün hizmetine sunulmaya çalışılmıştır. Bu atıklar laboratuvar ortamında Los Angeles deney aleti ile yaklaşık 30 dakikalık bir

çevirme işlemiyle öğütülerek oluşturulmuştur. Numunelerin öğütülmeden önce ve öğütülüp elendikten sonraki halleri Görsel 5.12 ile verilmiştir.



Görsel 5.11. *Atık bor sahası*



Görsel 5.12. *Öğütülmüş Atık Bor (ÖAB)*

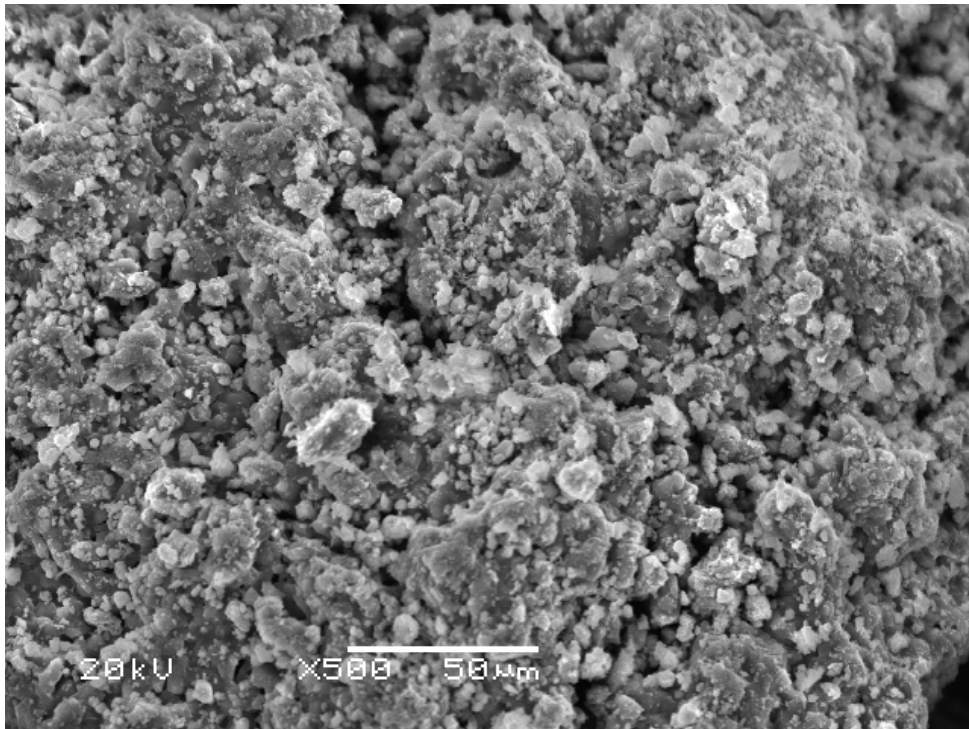
Bütün bor içeren katkı malzemelerinin fiziksel özellikleri için yapılan birim hacim ağırlık deneyi sonuçları ve fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 5.15 ile verilmiştir.

Tablo 5.15. Bor içeren katkı malzemelerin fiziksel özellikleri

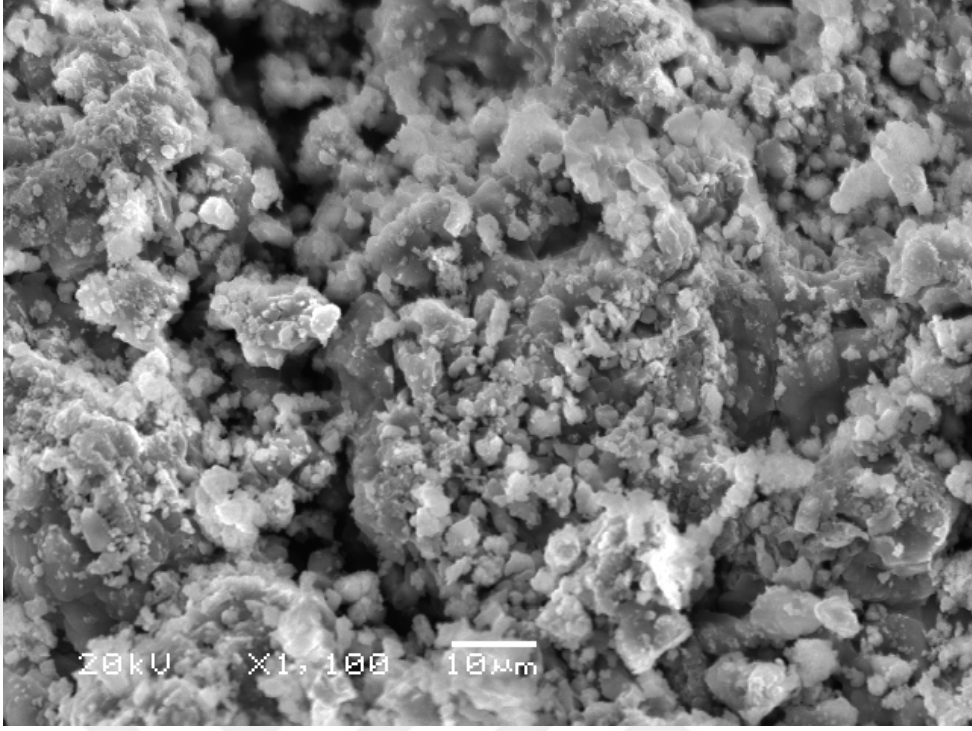
	ÖAB	BP	SB
Gevşek BHA, gr/cm ³	1,086	0,982	1,099
Sıkı BHA, gr/cm ³	1,263	1,088	1,268
Renk	Krem	Beyaz	Beyaz
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	1,161	1,150	1,123

ÖAB malzemesinin karakterizasyonunu belirlemek için, kimyasal analiz ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. BP ve BA malzemeleri için ise sadece kimyasal analizler yapılmıştır.

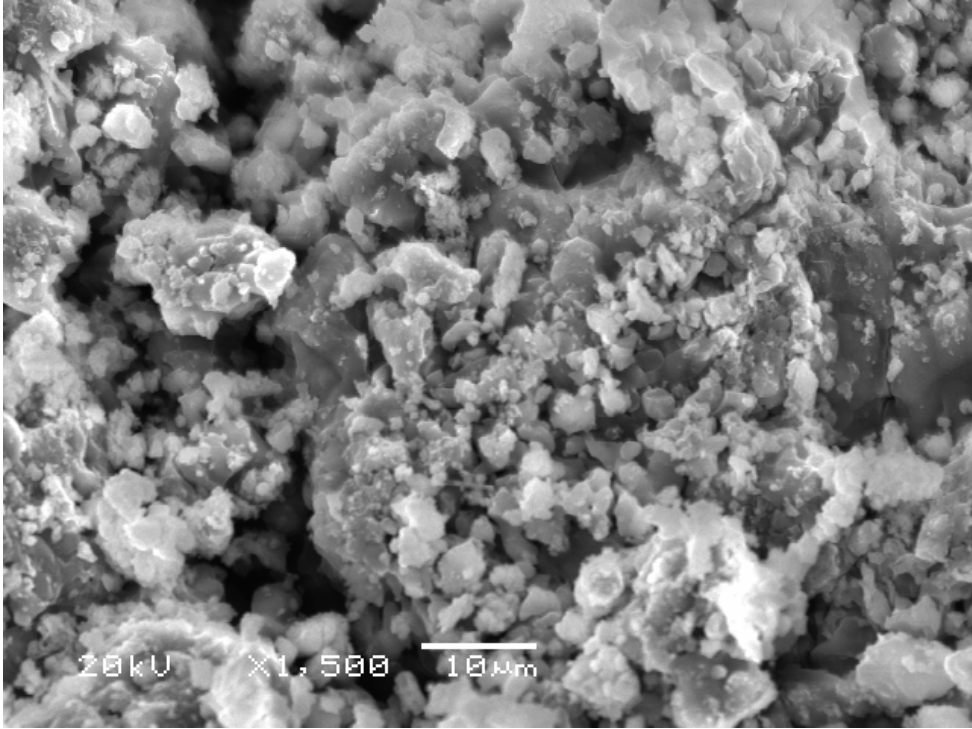
SEM analizi için Hitachi Regulus 8230 model SEM cihazı kullanılmıştır. ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15 ile aşağıda verilmiştir. Malzemenin dane çapı dağılımı ve porozite durumunun bitüm absorpsiyonunda etkili olduğu düşünülmektedir.



Görsel 5.13. ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi (X500)



Görsel 5.14. *ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi (X1100)*



Görsel 5.15. *ÖAB malzemesinin yüzey morfolojisi (X1500)*

BP ve SB malzemelerinin kimyasal içerikleri üretici firmanın analiz raporlarından alınmıştır. ÖAB numunesinin elementel analizi, dalga boyu dağılımlı X-ışını floresans

spektrometresinde, (X-ray fluorescence spectrometer, XRF) (Panalytical Zetium, 4kW) yapılmıştır. XRF analizi öncesi belirli miktar numune 40 mm çapında pellet haline getirildikten sonra analizler alınmıştır. Bor (B) elementinin analizi ise indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresinde (inductively coupled plasma-mass spectrometer, ICP-MS) (Thermo Scientific iCup RQ) alınmıştır. ICP-MS analizi öncesinde numune nitrik asit içerisinde mikrodalga yakma programı ile sulu çözelti haline getirilmiştir.

Bor içeren katkı malzemelerinin kimyasal bileşimi Tablo 5.16' da verilmiştir. BP ve SB malzemelerinin bor oksit ve sodyum oksitten oluştuğu, BP malzemesinin % 47.90, SB malzemesinin ise % 69.30 oranında bor oksit içerdiği tespit edilmiştir. ÖAB malzemesi ise birçok bileşik ve elementten bir araya gelmesine karşın ağırlıklı olarak silisyum, magnezyum, kalsiyum, sodyum ve bor oksitten oluşmakta olup genel olarak kil pestili olarak tanımlanabilir. İçeriğinde yaklaşık olarak %11.84 bor oksit barındırmaktadır.

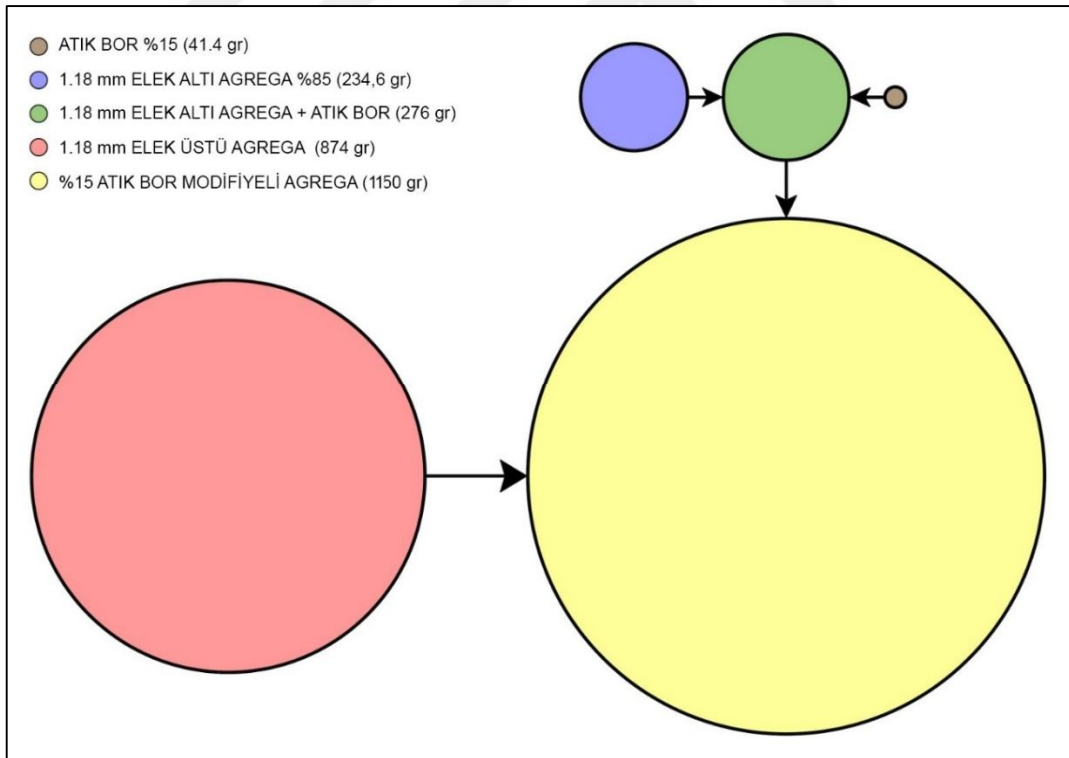
Tablo 5.16. Bor içeren katkı malzemelerin kimyasal içerikleri

Bileşik	ÖAB	BP	SB
Ateşleme Kaybı (%)	32.89	-	-
B ₂ O ₃ (%)	11.84	47.90	69.30
Na ₂ O (%)	10.42	21.30	30.70
H ₂ O (%)	-	30.80	-
CaO (%)	11.73	-	-
SiO ₂ (%)	13.89	-	-
Al ₂ O ₃ (%)	1.86	-	-
Fe ₂ O ₃ (%)	0.38	-	-
MgO (%)	13.89	-	-
K ₂ O (%)	0.60	-	-
SrO (%)	0.81	-	-
TiO ₂ (%)	0.04	-	-
Cs ₂ O (%)	0.05	-	-
SO ₃ (%)	0.58	-	-
Cl (%)	0.08	-	-
F (%)	0.85	-	-
Diğer Bileşikler (%)	0.09	-	-
SO ₄ (ppm)	-	135	300
Cl (ppm)	-	70	105
Fe (ppm)	-	3	50

5.4. Agrega Modifiyesi

Bu bölümde asfalt betonu numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agregaların atık borlar ile modifiye edilmesi işlemleri anlatılmıştır. Çalışmada kontrol numuneleri, ince agrega ve filler malzemesine bor içeren katkı maddeleri ilave edilerek üretilen (agrega modifikasyonu) numunelerle karşılaştırılmıştır.

İlk etapta BP ve SB malzemelerinin gradasyonu incelenmiş ve malzemenin yaklaşık %99'unun 1.18mm' lik elekten geçtiği görülmüştür. Mümkün olduğunca atık malzemenin geri dönüştürülebilmesi adına 1.18mm' lik elekten geçen bütün atık malzeme deneylerde kullanılmak üzere ayrılmıştır. ÖAB numunelerinin öğütme işleminden sonraki gradasyonları incelendiğinde de sonuç değişmemiş yine büyük bir kısmının 1.18mm' lik eleğin altına geçtiği gözlemlenmiştir. Bu numunenin de yine bu elek altında kalan kısımları deneylerde kullanılmak üzere saklanmıştır. Böylelikle bu üç numunede gradasyon açısından eşit şartlar altında incelenmiş olacaktır.



Şekil 5.6. %15 atık bor katkısı ile modifiye edilmiş agregaların ölçekli balon diyagramı

Yukarıda bahsedildiği gibi asfalt betonu numuneleri için 1150gr agrega kullanılmıştır. Agrega modifikasyonu 1,18mm' lik elek altında kalan agregaların

ağırlıkça %5 %10 ve %15 oranlarında yer değiştirilmesi neticesinde oluşturulmuştur. Örneğin %15 atık bor katkılı bir numunede 1,18mm' lik elek altında toplam 276gr agregaya yerine 41,4gr atık bor ve 234,6gr agregaya kullanılmıştır. Yukarıda Şekil 5.6 ile detaylı bir ölçekli balon diyagramı verilmiştir.

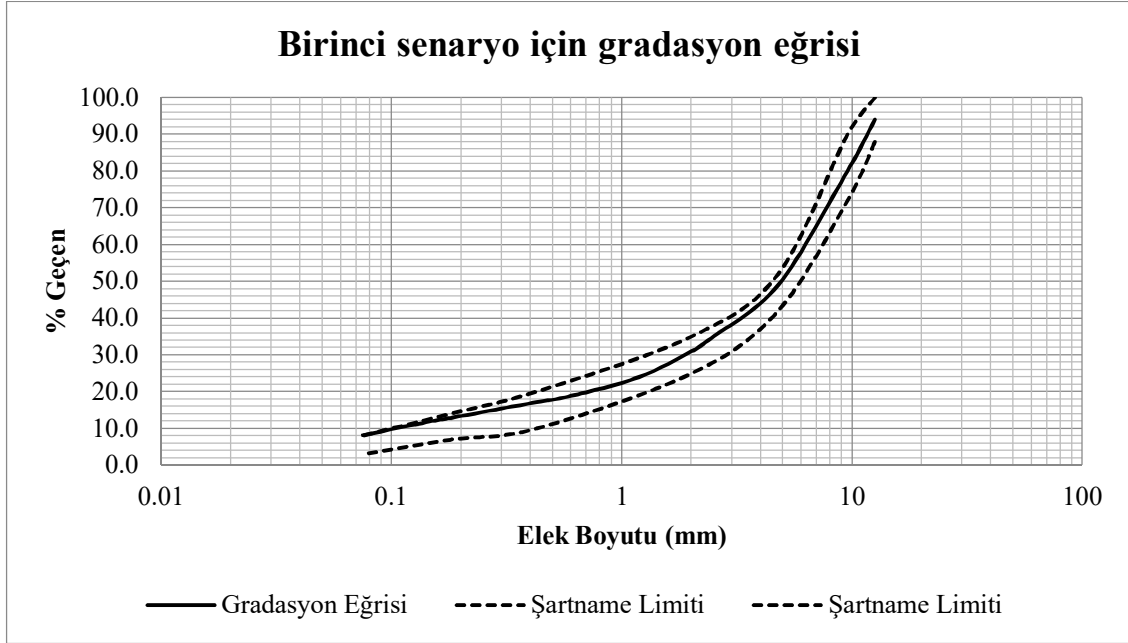
Agrega modifiyesi işleminde kullanılan atık borların gradasyonlarına ayrıca bakılmamış, elek altında kalan kısımlar olduğu gibi karışımlarda kullanılmıştır. Bunun sebebi zamandan tasarruf edebilmek ve geri dönüşüm prosedürünü mümkün olduğunca basitleştirebilmektir. Ancak yine de modifiye edilmiş numunelerinin gradasyonu çalışmaların başlangıcında detaylıca tartışılmalıdır. Aşağıdaki paragraflarda bu tartışma konuları detaylıca verilmiştir.

Öncelikli olarak atık borların bu hali ile asfalt betonu numunelerinde kullanımı ince agregaya ve filler özgül ağırlığı değerlerini değiştirecek ve bu nedenle de toplam agreganın özgül ağırlık değeri de değişecektir. Buna bağlı olarak optimum bitüm oranı hesaplanırken kullanılan Marshall tasarımındaki maksimum teorik özgül ağırlık, mineral agregadaki boşluk oranı ve bitümlü dolu boşluk oranı değerleri de değişecektir. Ancak bu değişim o kadar az olacaktır ki sonuçlara etki etmeyecektir. Aşağıda en kötü durumda yani %15 katkı oranında oluşabilecek senaryolar tartışılmıştır.

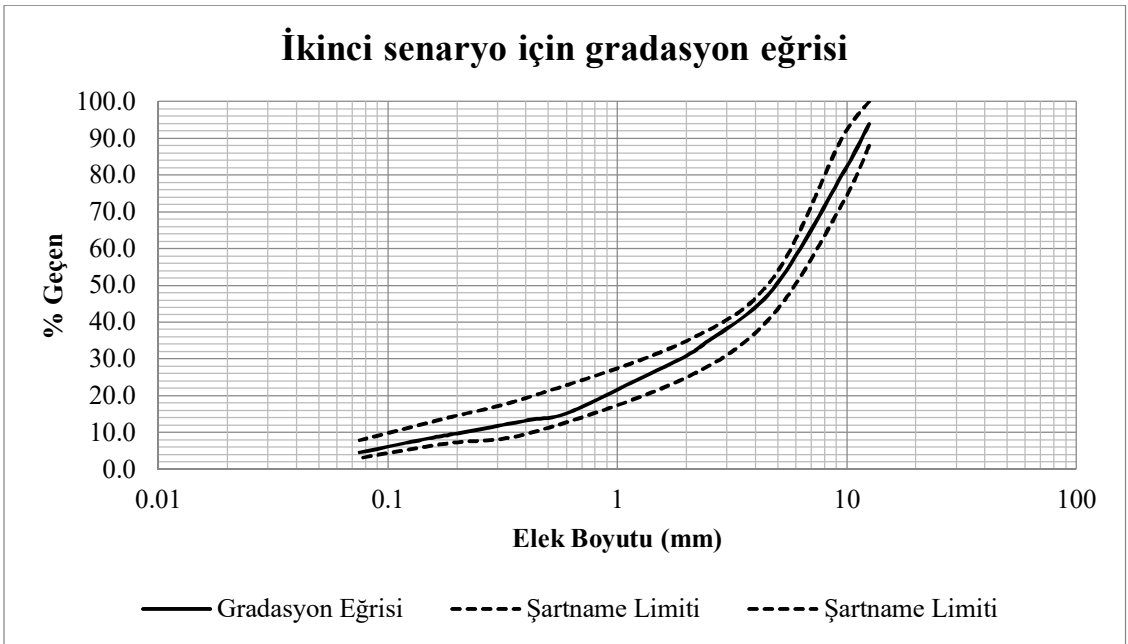
Karışımlarda kullanılan toplam agreganın özgül ağırlık değeri hesaplanırken kaba agreganın, ince agreganın ve fillerin özgül ağırlıkları toplam agregadaki kullanım oranlarına göre hesaplanır. Çalışmalarımızda kullanılan filler oranı %5,5 oranındadır, 1,18mm' lik elek altında kalan atık borların tamamı filler bile olsa en kötü durumda toplam agreganın özgül ağırlık değeri %5,5' inin %15' i kadar yani %8,25' i kadarlık bir değişime uğrayacaktır.

Çalışmalarımızda 1,18mm' lik elek altında kalan ince malzeme miktarı 212,75 gr yani %18,5 oranında kullanılmıştır. Yine en kötü senaryo düşünülür ve atık borlarımızın tamamının ince malzeme olduğu varsayılırsa toplam agreganın özgül ağırlığı değeri %18,5' inin %15' i kadar değişir. Bu en kötü senaryoda bile değişim %2,8 değerinde olacaktır ki bu durumda bile bulunacak maksimum teorik özgül ağırlık, mineral agregadaki boşluk ve bitümlü dolu boşluk değerleri hesapları etkilemeyecek kadar az olacaktır. Optimum bitüm oranı hesaplamaları yapılırken ise sonucu hiç etkilemeyeceği aşikardır.

Ayrıca bu değişimler ile agregaların gradasyon eğrisinin nasıl etkileneceği gradasyonun şartname limitleri içerisinde kalıp kalmayacağı da yine bu bölümde tartışılmıştır. Araştırmada kullanılan atık borların çalışmada en çok kullanım oranı olan %15' lik katkı oranı ile iki farklı senaryo oluşturulmuştur.



Şekil 5.7. Birinci senaryo için gradasyon eğrisi



Şekil 5.8. İkinci senaryo için gradasyon eğrisi

Bu senaryolardan birincisine göre 1,18mm' lik elek altında kalan bütün atık borların filler olduğu düşünölmüştür. İkinci senaryoda ise bütün malzemenin 0,6mm boyutunda olduğu (1,18mm' lik eleğin altında kalan en büyük elek boyutu) varsayılmıştır. Her iki senaryoda da gradasyon eğrilerinde değişiklik olmuş ancak bu en kötü iki durumda bile yine şartnamede belirtilen gradasyon limitleri aralığında kalınmıştır. Çalışmalarda kullanılan gradasyon eğrisi yukarıda Şekil 5.1 ile verilmişti, aşağıdaki Şekil 5.7 birinci senaryo, Şekil 5.8 ise ikinci senaryo sonucu oluşacak gradasyon eğrilerini göstermektedir. Görüldüğü gibi her iki durumda da şartname limitleri aşılmamıştır.

5.5. Bitüm Modifiyesi

Agrega modifiyesi ile hazırlanan asfalt betonu numunelerinin neticesinde önemli sonuçlar alınmıştır. Özellikle öğütölmüş atık bor ile elde edilen numuneler ön plana çıkmaktadır. Bu durumda araştırmanın hedefi olan bol miktarda atığın geri dönüştürülebilmesi adına ÖAB numunelerinin ayrıca bitümün içerisinde kullanması ile oluşacak asfalt betonlarının performansı incelenmek istenmiştir. Bitüm modifiyesiyle oluşturulacak numuneler sayesinde çok büyük ekonomik kazançlar elde edilebilecektir ve dolayısı ile sektörde daha çok kullanılmasına sebep olacaktır. Bu sebeplerden dolayı bitümün ÖAB numuneleri ile modifiye işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bitüm modifikasyonunda sıcaklığı kontrol edilebilen yüksek devirli karıştırıcı kullanılmıştır. Modifikasyon işlemine başlamadan önce 50/70 penetrasyonlu saf bitüm 160°C sıcaklıktaki etüvde en az iki saat bekletilmiştir. Eş zamanlı olarak bitüm modifikasyon aletinin yağ haznesi sıcaklığı 160°C ye ayarlanarak ısıtma işlemi başlatılır. Etüvden çıkarılan sıvı haldeki bitüm terazi yardımıyla metal haznenin içerisine 2000 gram olacak şekilde boşaltılır. Sıcaklık kaybı olmaması için bitümün konulduğu metal hazne ve karıştırıcının mikser başlığı da en az iki saat etüvde beklemesi gerekmektedir. Isıl iletkenliği yüksek yağ konulan kazanının içerisine metal hazne yerleştirilir. Sabitleme aparatları sıkıca kapatıldıktan sonra yarım saat boyunca 160 °C de sabit sıcaklığa gelene kadar beklenir. Yüksek devirli karıştırıcının mikser başlığı etüvden çıkarılarak haznesine yerleştirilir ve içerisinde bitüm olan metal haznenin içine daldırılır [171].



Görsel 5.16. Öğütülmüş atık bor modifiyesi işlemi

Bitümün modifiyesi işlemi orta devirli bir karıştırıcı ile 160°C sıcaklıkta yaklaşık bir buçuk saat sürelik bir işlem ile gerçekleştirilmiştir (Görsel 5.16). Bu sürenin ilk yarım

saati numunenin eklenilmesi evresidir. ÖAB numuneleri bitüme eklenirken karışım üzerinde büyük miktarlarda köpürmeler ve bu köpürmelerin altında büyük hava boşluklar oluşmuştur. Bu köpürmenin atık borun mineral yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Numuneyi taşırmamak adına çok ağır bir şekilde eklenen ÖAB numunelerinin tamamının eklenilmesi orta devirde yaklaşık olarak yarım saatte tamamlanmıştır. Sonra ise uniform bir dağılım elde etmek ve özellikle köpürmelerden kaynaklanan boşlukların giderilmesi için numune eklenilmesinin ardından bir saat boyunca yine orta devirde karışıma devam edilmiştir. Son aşamada metal hazneden çıkarılan modifiye bitüm kapalı kaplara aktarılarak Marshall dökümünde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

Çalışmada bitüm ağırlığının %5' i %10' u ve %15' i kadar ÖAB eklenilmiştir. Modifiye edilmiş bitüme uygulanan testlerin özeti aşağıda tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 5.17. ÖAB modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri

		1.Okuma	2.Okuma	3.Okuma	Ortalama
%5 ÖAB Modifiyeli Bitüm	1.Numune	6,59	6,62	6,34	6,52
	2.Numune	6,22	6,25	6,44	6,30
					64,10dmm
%10 ÖAB Modifiyeli Bitüm	1.Numune	6,77	6,01	6,58	6,45
	2.Numune	6,30	6,04	6,12	6,15
					63,00dmm
%15 ÖAB Modifiyeli Bitüm	1.Numune	5,40	5,98	5,78	5,72
	2.Numune	5,45	5,90	5,71	5,69
					57,05dmm

Tablo 5.18. ÖAB modifiyeli bitümün yumuşama noktası değerleri

	%5 ÖAB Modifiyeli (°C)	%10 ÖAB Modifiyeli (°C)	%15 ÖAB Modifiyeli (°C)
1.NUMUNE	49,6	49,5	49,5
2.NUMUNE	49,8	49,5	50,0
ORTALAMA	49,7	49,5	49,8

Tablo 5.19. *ÖAB modifiyeli bitümün özgül ağırlık değerleri*

	NO	A (gr)	B (gr)	C (gr)	D (gr)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)
%5 ÖAB Modifiyeli	1	27,03	126,62	58,16	127,88	1042
	2	28,16	126,86	58,99	128,07	1041
	3	28,61	78,40	67,69	79,97	1042
	4	25,07	51,59	38,81	52,12	1040
ORTALAMA						1041
%10 ÖAB Modifiyeli	1	28,96	82,52	45,98	83,21	1042
	2	29,57	81,45	47,82	82,20	1043
ORTALAMA						1043
%15 ÖAB Modifiyeli	1	16,07	42,09	25,59	42,47	1042
	2	20,39	45,85	30,34	46,33	1051
ORTALAMA						1046

Tablo 5.20. *135°C' de %5ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri*

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	462,50	20	3,7	31,5	6,8	134,9	00:01:00,1
2	466,67	30	5,6	47,6	10,2	135,0	00:02:00,1
3	462,50	40	7,4	62,9	13,6	135,0	00:03:00,1
4	465,00	50	9,3	79,1	17,0	135,1	00:04:00,1
5	462,50	60	11,1	94,4	20,4	135,2	00:05:00,1
6	460,71	70	12,9	109,7	23,8	135,2	00:06:00,1
7	462,50	80	14,8	125,8	27,2	135,2	00:07:00,1
8	461,11	90	16,6	141,1	30,6	135,0	00:08:00,1
9	462,50	100	18,5	157,3	34,0	134,8	00:09:00,1
10	463,64	110	20,4	173,4	37,4	134,8	00:10:00,1
11	464,58	120	22,3	189,6	40,8	134,8	00:11:00,1
12	465,38	130	24,2	205,7	44,2	134,8	00:12:00,1
13	464,29	140	26,0	221,0	47,6	134,9	00:13:00,1
14	465,00	150	27,9	237,1	51,0	135,0	00:14:00,1
15	464,06	160	29,7	252,5	54,4	135,0	00:15:00,1
16	464,71	170	31,6	268,6	57,8	135,2	00:16:00,1
17	465,28	180	33,5	284,8	61,2	135,2	00:17:00,1
18	464,47	190	35,3	300,0	64,6	135,1	00:18:00,1
19	465,00	200	37,2	316,2	68,0	135,1	00:19:00,1
Ortalama Viskozite = 463,81 cP							

Tablo 5.21. 165°C' de %5ÖAB modifiyeli numunelerinin dönел viskozite deneyi değeri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	162,50	20	1,3	11,1	6,8	165,0	00:01:00,1
2	150,00	30	1,8	15,3	10,2	165,2	00:02:00,1
3	150,00	40	2,4	20,4	13,6	165,3	00:03:00,1
4	140,00	50	2,8	23,8	17,0	165,3	00:04:00,1
5	141,67	60	3,4	28,9	20,4	165,2	00:05:00,1
6	139,29	70	3,9	33,2	23,8	165,1	00:06:00,1
7	137,50	80	4,4	37,4	27,2	164,8	00:07:00,1
8	136,11	90	4,9	41,7	30,6	164,8	00:08:00,1
9	132,50	100	5,3	45,1	34,0	164,7	00:09:00,1
10	131,82	110	5,8	49,3	37,4	164,7	00:10:00,1
11	131,25	120	6,3	53,6	40,8	164,9	00:11:00,1
12	130,77	130	6,8	57,8	44,2	165,0	00:12:00,1
13	130,36	140	7,3	62,1	47,6	165,1	00:13:00,1
14	130,00	150	7,8	66,3	51,0	165,2	00:14:00,1
15	129,69	160	8,3	70,6	54,4	165,2	00:15:00,1
16	129,41	170	8,8	74,8	57,8	165,2	00:16:00,1
17	127,78	180	9,2	78,2	61,2	165,1	00:17:00,1
18	127,63	190	9,7	82,5	64,6	164,9	00:18:00,1
19	127,50	200	10,2	86,7	68,0	164,8	00:19:00,1
Ortalama Viskozite = 136,09 cP							

Tablo 5.22. 135°C' de %10ÖAB modifiyeli numunelerinin dönел viskozite deneyi değeri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	500,00	20	4,0	34,0	6,8	134,7	00:01:00,1
2	491,67	30	5,9	50,2	10,2	134,7	00:02:00,1
3	487,50	40	7,8	66,3	13,6	134,7	00:03:00,1
4	480,00	50	9,6	81,6	17,0	134,7	00:04:00,1
5	479,17	60	11,5	97,8	20,4	134,7	00:05:00,1
6	475,00	70	13,3	113,1	23,8	134,7	00:06:00,1
7	471,88	80	15,1	128,4	27,2	134,8	00:07:00,1
8	472,22	90	17,0	144,5	30,6	134,9	00:08:00,1
9	470,00	100	18,8	159,8	34,0	135,1	00:09:00,1
10	468,18	110	20,6	175,1	37,4	135,3	00:10:00,1
11	468,75	120	22,5	191,3	40,8	135,3	00:11:00,1
12	467,31	130	24,3	206,6	44,2	135,2	00:12:00,1
13	467,86	140	26,2	222,7	47,6	135,1	00:13:00,1
14	466,67	150	28,0	238,0	51,0	135,1	00:14:00,1
15	467,19	160	29,9	254,1	54,4	135,0	00:15:00,1

16	467,65	170	31,8	270,3	57,8	134,8	00:16:00,1
17	469,44	180	33,8	287,3	61,2	134,8	00:17:00,1
18	469,74	190	35,7	303,5	64,6	134,8	00:18:00,1
19	468,75	200	37,5	318,8	68,0	134,8	00:19:00,1
Ortalama Viskozite = 474,16 cP							

Tablo 5.23. 165°C' de %10ÖAB modifiyeli numunelerinin dönел viskozite deneyi değeri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	137,50	20	1,1	9,4	6,8	165,0	00:01:00,1
2	133,33	30	1,6	13,6	10,2	165,1	00:02:00,1
3	131,25	40	2,1	17,9	13,6	165,3	00:03:00,1
4	130,00	50	2,6	22,1	17,0	165,3	00:04:00,1
5	129,17	60	3,1	26,4	20,4	165,2	00:05:00,1
6	128,57	70	3,6	30,6	23,8	165,0	00:06:00,1
7	128,13	80	4,1	34,9	27,2	164,9	00:07:00,1
8	127,78	90	4,6	39,1	30,6	164,8	00:08:00,1
9	127,50	100	5,1	43,4	34,0	164,7	00:09:00,1
10	127,27	110	5,6	47,6	37,4	164,9	00:10:00,1
11	127,08	120	6,1	51,9	40,8	165,0	00:11:00,1
12	126,92	130	6,6	56,1	44,2	165,1	00:12:00,1
13	125,00	140	7,0	59,5	47,6	165,3	00:13:00,1
14	125,00	150	7,5	63,8	51,0	165,3	00:14:00,1
15	125,00	160	8,0	68,0	54,4	165,2	00:15:00,1
16	123,53	170	8,4	71,4	57,8	165,0	00:16:00,1
17	123,61	180	8,9	75,7	61,2	164,9	00:17:00,1
18	123,68	190	9,4	79,9	64,6	164,7	00:18:00,1
19	123,75	200	9,9	84,2	68,0	164,8	00:19:00,1
Ortalama Viskozite = 127,58 cP							

Tablo 5.24. 135°C' de %15ÖAB modifiyeli numunelerinin dönел viskozite deneyi değeri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	512,50	20	4,1	34,9	6,8	135,1	00:01:00,1
2	508,33	30	6,1	51,9	10,2	135,1	00:02:00,1
3	506,25	40	8,1	68,9	13,6	135,2	00:03:00,1
4	505,00	50	10,1	85,9	17,0	135,1	00:04:00,1
5	504,17	60	12,1	102,9	20,4	135,0	00:05:00,1
6	500,00	70	14,0	119,0	23,8	134,9	00:06:00,1
7	500,00	80	16,0	136,0	27,2	134,9	00:07:00,1
8	497,22	90	17,9	152,1	30,6	134,8	00:08:00,1

9	497,50	100	19,9	169,1	34,0	134,8	00:09:00,1
10	497,73	110	21,9	186,1	37,4	134,8	00:10:00,1
11	497,92	120	23,9	203,1	40,8	135,0	00:11:00,1
12	496,15	130	25,8	219,3	44,2	135,1	00:12:00,1
13	496,43	140	27,8	236,3	47,6	135,2	00:13:00,1
14	495,00	150	29,7	252,5	51,0	135,1	00:14:00,1
15	495,31	160	31,7	269,5	54,4	135,1	00:15:00,1
16	494,12	170	33,6	285,6	57,8	135,0	00:16:00,1
17	494,44	180	35,6	302,6	61,2	134,9	00:17:00,1
18	494,74	190	37,6	319,6	64,6	134,9	00:18:00,1
19	493,75	200	39,5	335,8	68,0	134,9	00:19:00,1

Ortalama Viskozite = 499,29 cP

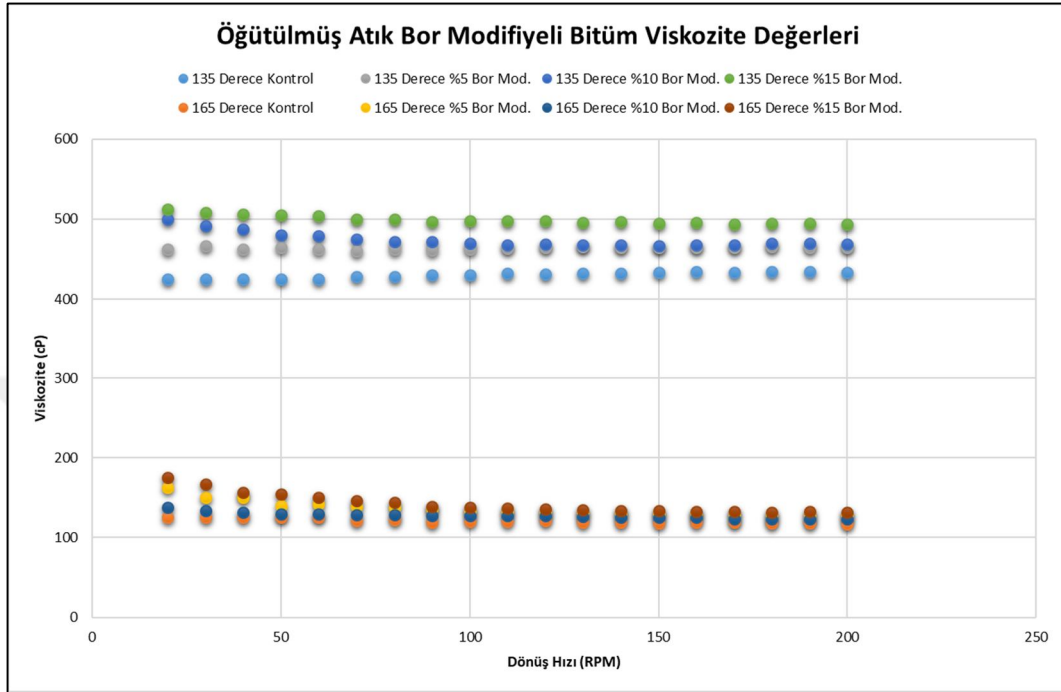
Tablo 5.25. 165°C' de %15ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi değerleri

	Viskozite (cP)	Dönme Hızı (rpm)	Tork (%)	Kayma Gerilmesi (dyn/cm ²)	Kayma Oranı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saniye)
1	175,00	20	1,4	11,9	6,8	165,0	00:01:00,1
2	166,67	30	2,0	17,0	10,2	164,9	00:02:00,1
3	156,25	40	2,5	21,3	13,6	164,7	00:03:00,1
4	155,00	50	3,1	26,4	17,0	164,7	00:04:00,1
5	150,00	60	3,6	30,6	20,4	164,8	00:05:00,1
6	146,43	70	4,1	34,9	23,8	164,9	00:06:00,1
7	143,75	80	4,6	39,1	27,2	165,1	00:07:00,1
8	138,89	90	5,0	42,5	30,6	165,2	00:08:00,1
9	137,50	100	5,5	46,8	34,0	165,3	00:09:00,1
10	136,36	110	6,0	51,0	37,4	165,3	00:10:00,1
11	135,42	120	6,5	55,3	40,8	165,1	00:11:00,1
12	134,62	130	7,0	59,5	44,2	165,0	00:12:00,1
13	133,93	140	7,5	63,8	47,6	164,8	00:13:00,1
14	133,33	150	8,0	68,0	51,0	164,8	00:14:00,1
15	132,81	160	8,5	72,3	54,4	164,7	00:15:00,1
16	132,35	170	9,0	76,5	57,8	164,8	00:16:00,1
17	131,94	180	9,5	80,8	61,2	165,0	00:17:00,1
18	132,89	190	10,1	85,9	64,6	165,1	00:18:00,1
19	131,25	200	10,5	89,3	68,0	165,2	00:19:00,1

Ortalama Viskozite = 142,33 cP

Görüldüğü üzere modifiyeli bitümdeki atık bor oranı arttıkça penetrasyon değerleri de düşmüştür. Yumuşama noktası değerleri değişmemiş özgül ağırlık değerleri artmıştır. Viskozite değerleri ise beklenildiği gibi artmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.9 ile 50/70

penetrasyonlu kontrol numunesinin ve atık bor katkıli bitümlerin viskozite karşılaştırılmaları verilmiştir.



Şekil 5.9. Kontrol numuneleri ile ÖAB modifiyeli numunelerinin dönel viskozite deneyi karşılaştırmaları

5.6. Marshall Tasarımı

Asfalt betonu malzemelerinin fiziksel ve mekanik davranışlarını belirlemek için Marshall Tasarım yöntemi uygulanır. Ayrıca test sonunda Optimum Bitüm Oranı (OBO) hesaplanır. Marshall Testi konsepti ilk olarak Bruce Marshall tarafından bulunmuştur. 1948 yılında “The U.S. Corps of Engineers” test prosedürünü iyileştirmiş, bazı spesifik özellikler eklemiş ve karışım dizaynı kriterini geliştirmiştir [176]. Bu deney; dane boyutu filler (0.075mm) ve 25 mm arasında değişen, belli bir granülometriye sahip agregalardan oluşan bitümlü sıcak karışımların dayanım, akma ve numune özellikleri hakkında sonuçlarının elde edilmesini sağlar. Asfalt betonu numuneleri, belirli bir karışım sıcaklığında bir araya getirilen bitüm ve agregal karışımların her iki yüzüne, 4.536kg ağırlığındaki çekicinin 45.7cm yükseklikten serbest düşüş ile sıkıştırılarak hazırlanırlar [169].

5.6.1. Asfalt betonu numunelerinin hazırlanması

Eskişehir ve çevre illerde oluşan atık borların yol üretimi malzemelerinde değerlendirilmesi amacı ile hazırlanan bu çalışmada yaklaşık olarak 400 adet (yarım ton) asfalt betonu numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin tamamı aynı standartta ve aynı laboratuvar koşullarında oluşturulmuş olup bu bölümde numunelerin hazırlanış detayları verilecektir.

Gradasyonu daha önceden belirlenen agrega numuneleri ile bitüm, her deney setinde bir gün önceden hazırlanmış ve 160°C' ye ayarlı fırınlara konulmuştur. Bitüm ve agreganın yanı sıra numune oluşturmak için kullanılan kaplar, mikserin ağzı, kürek, şişleme çubuğu bitümün içine konacak olan kap vb. bütün araç gereçte yine aynı fırınlarda bekletilmiş ve bütün numunelerin aynı karışım sıcaklığında hazırlanılmasına özen gösterilmiştir. Karışım sıcaklığı olarak 135°C seçilmiştir.

Her bir deney seti için agrega ağırlığının %3.5' ile %6.5' i arasında %0.5' lik artış gösteren bitüm yüzdesi kullanılmıştır (%3.5-%4-%4.5-%5-%5.5-%6-%6.5). Her numunenin tartımı yapıldıktan sonra (1150gr agrega ve belirtilen yüzdedeki bitüm) mikser içerisinde 1.5 dakika karıştırılıp Marshall tokmağında her iki yüze 75 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler soğuduktan sonra kaplarından çıkartılıp ertesi gün Marshall Stabilite ve akma deneyine tabii tutulmuştur (Görsel 5.17).



Görsel 5.17. Asfalt betonu numunesi hazırlanması

5.6.2. Marshall stabilite ve akma deneyi

Bu deney metodu, Marshall stabilite ve akma deney aleti yardımıyla bitümlü karışımlarından hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar. Ülkemiz karayollarında bitümlü karışımlara uygulanan stabilite deneyi Marshall deneyidir. Bu deney esas olarak bir serbest basınç deneyi olup numune yüklendiği sırada tamamen sınırlanmaz [99,108].

Bir gün boyunca bekletilen asfalt betonu numunelerinin ilk olarak pürüzlü yüzeyleri eğe yardımı ile düzeltilmiş, daha sonra her bir numunenin üç noktasından (120°lik açılarla) yükseklikleri ölçülmüştür. Son olarak ise numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları ölçülmüştür.

Numuneler, istenilen sıcaklığa getirilmeleri maksadı ile 30-40 dakika su banyosunda bekletilir. Banyo sıcaklığı asfalt betonu numuneleri için 60°C' dir. Numune çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Yük ve akma göstergeleri sıfırlanır. Maksimum yüke erişinceye kadar, dakikada 50.8 mm' lik (2 inç) bir hızla yükleme yapılır. Maksimum yük ve akma değeri kaydedilir. Deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 saniyeden fazla olmamalıdır. Eğer numune yüksekliği 63.5 mm' den (2.5 inç) farklıysa Marshall stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak stabilite değerlerine düzeltme faktörü uygulanır [99,108].

Deneyde; üst segman sabittir. Alt segman yükleme hızı 50.8 mm/dakikadır. Basınç arttıkça stabilometrede okunan değer artarak maksimuma ulaşır, daha sonra düşmeye baslar. Bu anda numune kırılır. Stabilometrede okunan maksimum değer yardımıyla bitümlü karışımın stabilitesi saptanır. "Marshall stabilitesi" adı verilen bu değer örneğin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Kırılma sırasında numunenin çökme ya da hareket miktarı da ölçülür. Buna "akma" denir [99,108].

Yüksekliği, havadaki ve sudaki ağırlıkları ölçülen numuneler Marshall Stabilite aletinde de kırıldıktan sonra okunan tüm değerler Marshall deney föyüne girilir. Buradaki değerler deney föylerinde gösterilen şekliyle bazı matematiksel formüller ile numunelere ait fiziksel ve mekanik özelliklerin hesaplanmasında kullanılır. Numuneye ait birim ağırlık (D_p), hava boşluğu (V_h), bitümle dolu boşluk (V_f) ve mineral agregadaki boşluk (VMA) değerleri numunenin fiziksel özellikleridir. Stabilite ve akma değerleri ise numunenin mekanik özellikleridir.

Stabilite değerinin akma değerine oranı Marshall oranı (MO) değerini verir. Marshall oranı değeri arttıkça karışımın rijitliği de artar, yani bu değerin artması karışımın kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğunun bir göstergesidir [177,178].



Görsel 5.18. Marshall Stabilite ve akma deneyi

5.6.3. Optimum bitüm oranı (OBO) hesaplanması

Marshall stabilite ve akma deneyinden sonra hazırlanan seriye ait optimum bitüm oranını bulabilmek için gerekli tüm veriler elde edilmiş olur. Bu veriler Marshall deney föylerine işlenir ve her bir numunenin ayrı ayrı fiziksel ve mekanik özellikleri deney föylerinde gösterilen hesaplamalar ile bulunur. Toplam agreganın özgül ağırlığı (G_{ag}) ve Maksimum teorik özgül ağırlık (D_t) değerlerinin formülleri çok uzun olduğu için deney föylerinde gösterilememiş onun yerine aşığıdaki formül 5.16 ve 5.17 ile verilmiştir.

$$G_{ag} = \frac{1}{\frac{\%KA}{G_{KA}} + \frac{\%IA}{G_{IA}} + \frac{\%F}{G_F}} \quad (5.16)$$

$$D_t = \frac{100 + \%B}{\frac{\%KA}{G_{KA}} + \frac{\%IA}{G_{IA}} + \frac{\%F}{G_F} + \frac{\%B}{G_B}} \quad (5.17)$$

Burada;

G_{ag} :Agreganın Özgül Ağırlığı (kg/m³)

D_t :Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (kg/m³)

$\%KA$:Kaba Agregaya Yüzdesi

$\%IA$:İnce Agregaya Yüzdesi

$\%F$:Filler Yüzdesi

$\%B$:Bitüm Yüzdesi

G_{KA} :Kaba Agregaya Özgül Ağırlığı (kg/m³)

G_{IA} :İnce Agregaya Özgül Ağırlığı (kg/m³)

G_F :Filler Özgül Ağırlığı (kg/m³)

G_B :Bitüm Özgül Ağırlığı (kg/m³)

Bulunan değerler ile her bir bitüm yüzdesine karşılık gelen değerlerin ayrı ayrı grafikleri çizilir. Her bir değere karşılık gelen bitüm yüzdesi değerleri ile oluşturulan grafiklerin eğilim çizgileri 2.dereceden polinom fonksiyonunun grafiğidir. Çizilen grafiklerden aşağıda belirtilen özelliklere karşılık gelen bitüm yüzdeleri değerleri bulunur;

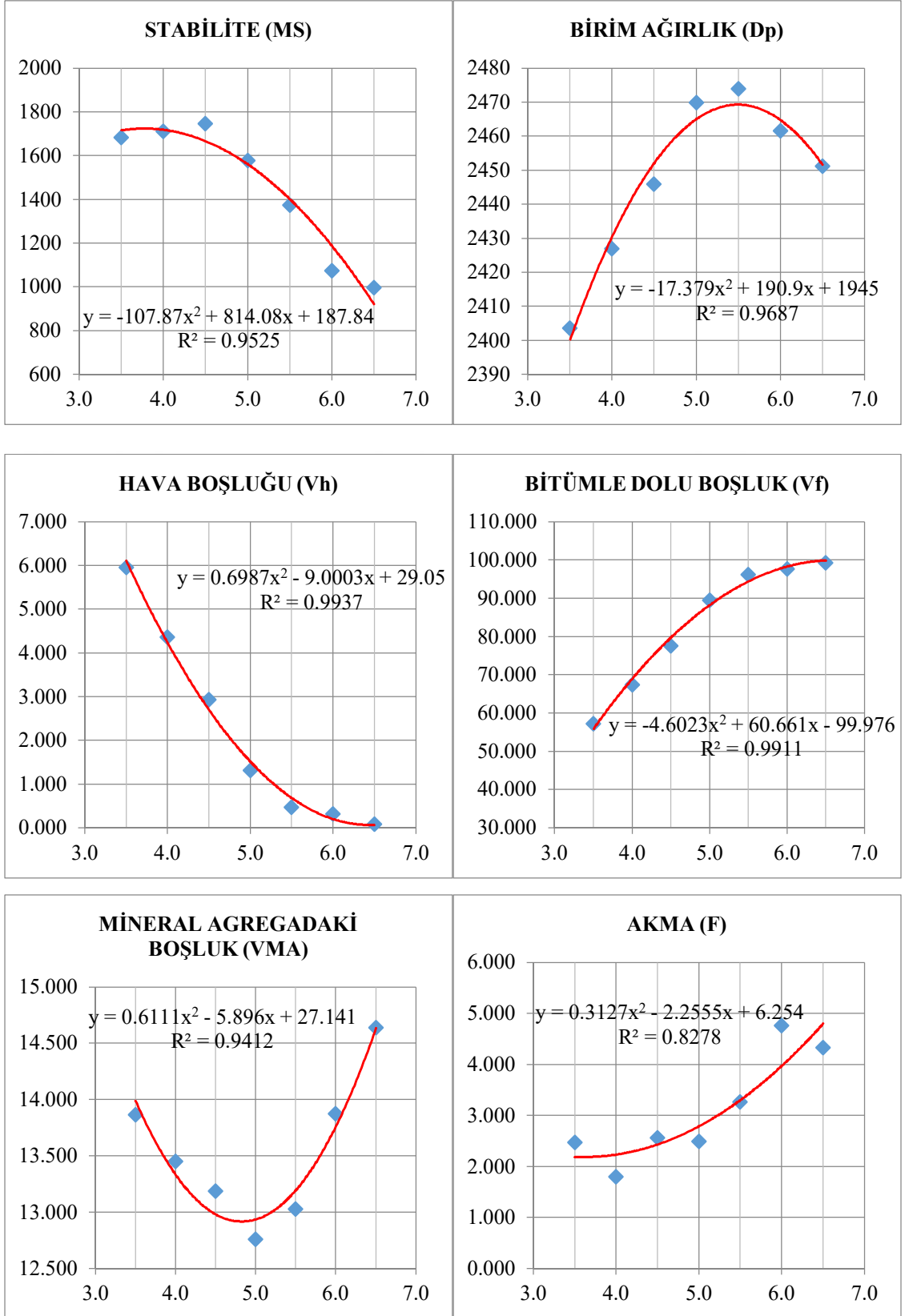
- Maksimum Stabilite (MS)
- Maksimum birim ağırlık (Dp)
- Şartnamede belirtilen hava boşluğu (Vh)
- Şartnamede belirtilen bitümle dolu boşluk (Vf)

Bulunan dört ayrı bitüm yüzdesi değerinin ortalaması optimum bitüm oranı değeridir. OBO hesaplandıktan sonra bu değere karşılık gelen akma ve VMA değerleri de ayrıca çizilen grafiklerden şartname değerlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir. Şartname değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5.26. Asfalt betonu dizayn kriterleri [86]

ÖZELLİKLER	BİNDER		AŞINMA TİP-1, TİP-2		DENEY STANDARDI
	MİN.	MAKS.	MİN.	MAKS.	
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı		75		75	TS EN 12697-30
Marshall Stabilitesi, kg	750	-	900	-	TS EN 12697-34
Boşluk, %	4	6	3	5	TS EN 12697-8
Agregalar Arası Boşluk, (VMA) %	13	15	14	16	TS EN 12697-8
Bitümle Dolu Boşluk, %	60	75	65	75	TS EN 12697-8
Akma, mm, (10 ⁻² in)	2(8)	4(16)	2(8)	4(16)	TS EN 12697-34
Filler/Bitüm Oranı	-	1.4	-	1.5	
Bitüm (ağırlıkça, %)	3.5	6.5	4	7	TS EN 12697-1

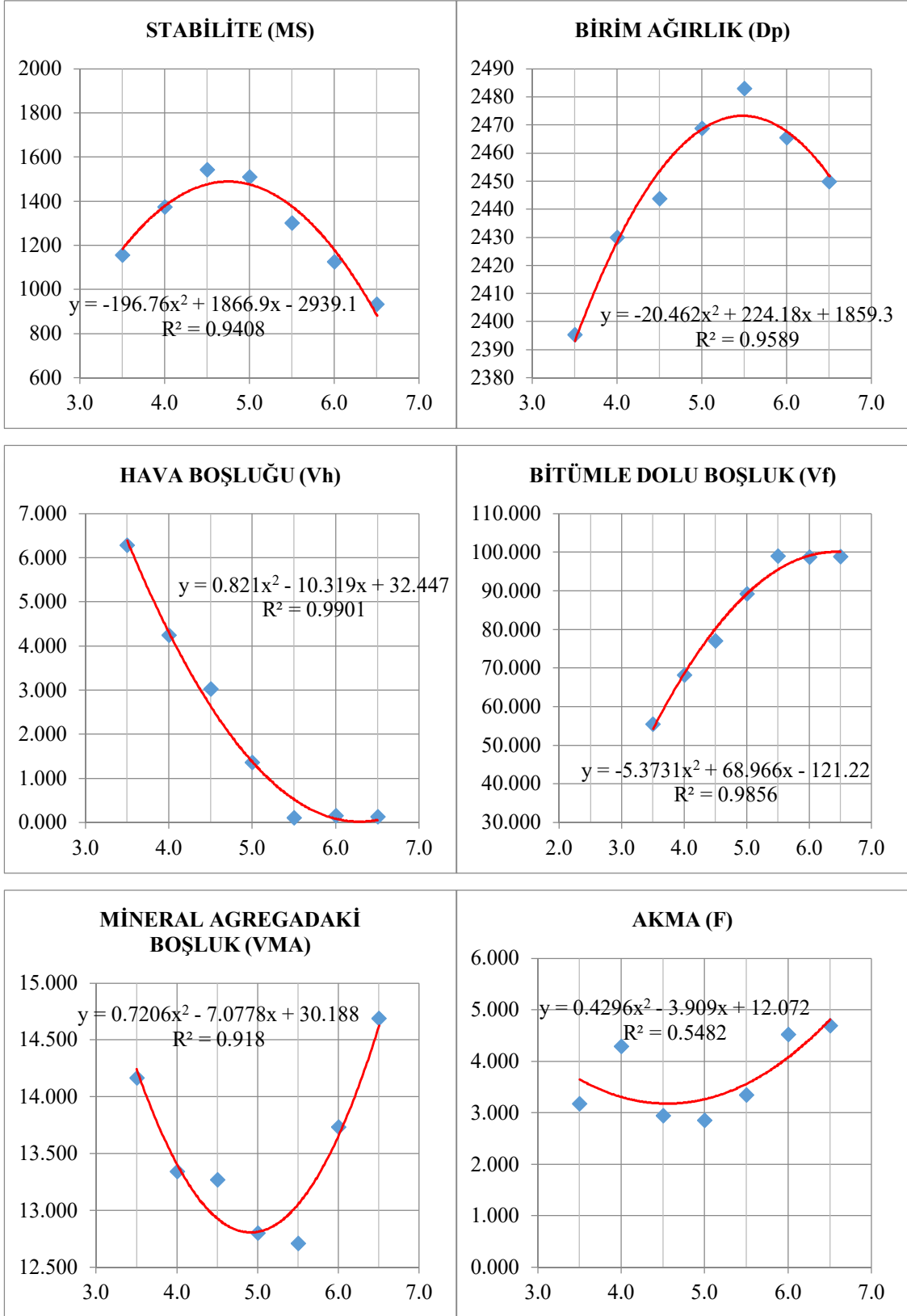
Çalışmaların tamamında OBO hesaplanırken hava boşluğu değeri %4, bitümle dolu boşluk oranı değeri ise %70 seçilmiştir. Bunların yanı sıra maksimum Stabilitate ve maksimum birim ağırlık değerlerine karşılık gelen bitüm yüzdesi değerleri Microsoft Excell programı ile hesaplatılmıştır. Her bir grafiğin ikinci dereceden fonksiyonu yazıldıktan sonra Excell programının içinde bulunan veri sekmesindeki çözücü kutucuğu ile fonksiyonun karşılığı olan en büyük değer veya aranan değer tam olarak bulunmuştur. Çözücü sekmesi ile grafiklerdeki görsel sonuç yerine, tam sonuçlar elde edilebilir [169].



Şekil 5.10. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.28. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

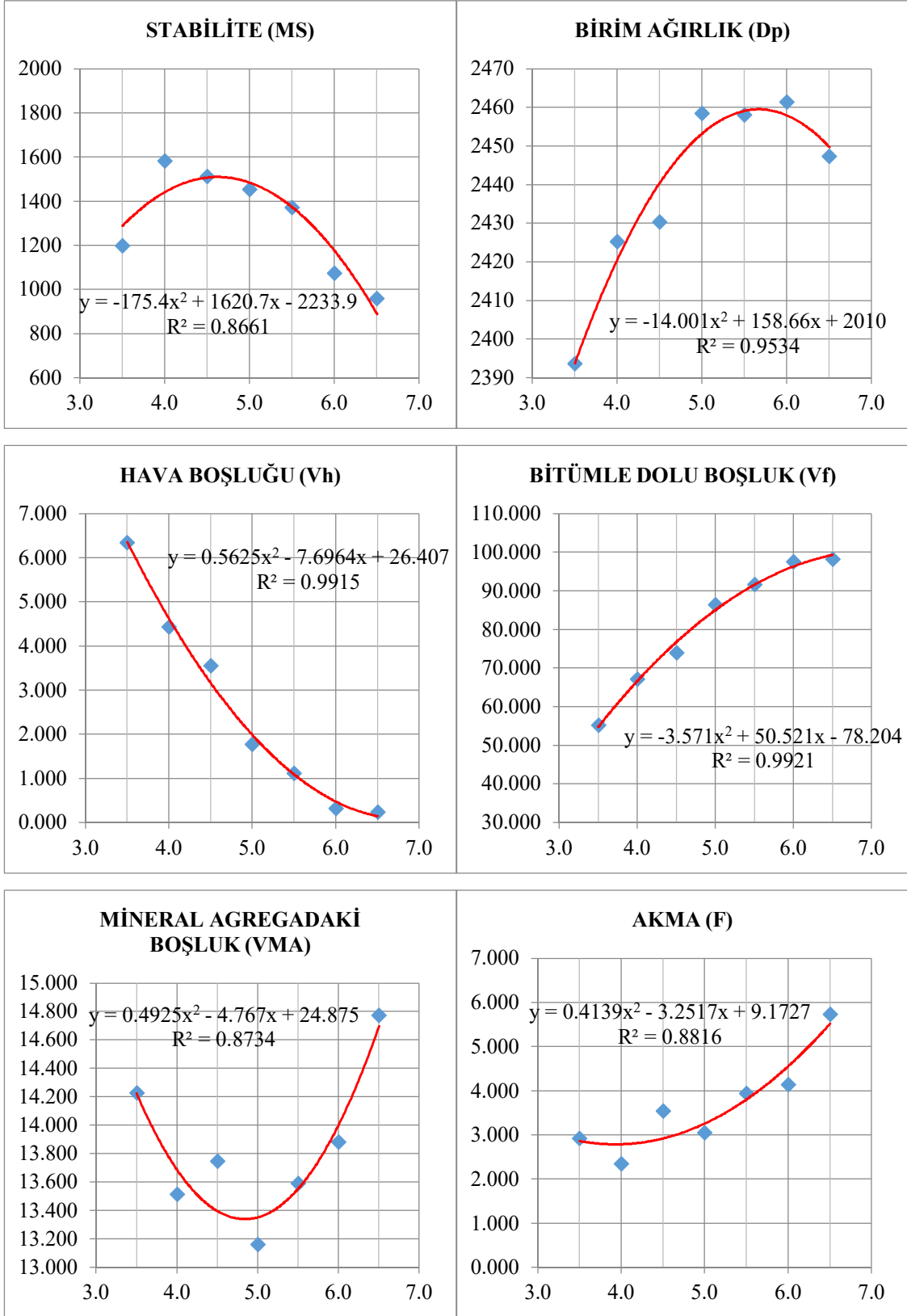
NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		YÜKSEKLİK (mm)	BİTÜM %	Wb/(100+Wa)	Kg/m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Odb):				BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ob):				1028.0	2697	NOT:		TARİH: 29/10/16						
	BİTÜM %	Wb	A	B	SUDA AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)					HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	5.10%	4.35%	5.5%	HACİM % (Toplama Göre)		D	E			Hava Boşluğu	VMA	100-D	BOSLUK ORANI (%)		DENEYSEL		Düzeltilmiş Sbt	M.O.
															A	B								MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Di	C	Agrega		
1	3.5	3.382	61.97	1161.8	674.5	487.3	2384	2556	7.843	85.426	6.732	14.574	53.812	2384	2384	951.9	1.03825	988.310	3.032	325.960									
2	3.5	3.382	61.79	1173.3	685.7	487.6	2406	2556	7.916	86.218	5.866	13.782	57.434	2406	2406	1249.6	1.04344	1303.883	3.451	377.827									
3	3.5	3.382	62.24	1170.6	682.0	488.6	2396	2556	7.881	85.844	6.275	14.156	55.672	2396	2396	1144.8	1.03150	1180.861	3.057	388.281									
4	4.0	3.846	61.85	1176.4	688.2	488.2	2410	2538	9.016	85.925	5.060	14.075	64.052	2410	2410	828.4	1.04156	862.828	16.364	135.980									
5	4.0	3.846	60.95	1172.3	693.0	479.3	2446	2538	9.151	87.215	3.634	12.785	71.576	2446	2446	1501.9	1.06969	1606.567	4.432	362.493									
6	4.0	3.846	62.25	1182.6	692.8	489.8	2414	2538	9.033	86.095	4.871	13.905	64.967	2414	2414	1111.9	1.03125	1146.647	4.159	275.703									
7	4.5	4.306	60.24	1175.5	694.7	480.8	2445	2520	10.241	86.763	2.995	13.237	77.371	2445	2445	1374.6	1.09188	1500.898	2.833	529.791									
8	4.5	4.306	60.57	1182.5	698.8	483.7	2445	2520	10.241	86.737	3.003	13.243	77.326	2445	2445	1589.5	1.08156	1719.140	3.200	537.231									
9	4.5	4.306	61.59	1195.1	705.7	489.4	2442	2520	10.229	86.680	3.111	13.340	76.680	2442	2442	1349.5	1.04969	1416.557	2.840	498.788									
10	5.0	4.762	59.81	1173.6	698.0	475.6	2468	2503	11.431	87.153	1.416	12.847	88.974	2468	2468	1353.6	1.10531	1496.148	3.530	423.838									
11	5.0	4.762	59.77	1181.9	704.3	477.6	2475	2503	11.463	87.402	1.135	12.598	90.991	2475	2475	1453.9	1.10556	1608.828	2.329	690.780									
12	5.0	4.762	60.57	1190.0	707.1	482.9	2464	2503	11.415	87.035	1.550	12.965	88.045	2464	2464	1320.5	1.08156	1428.200	2.733	522.576									
13	5.5	5.213	60.31	1180.6	708.1	472.5	2499	2486	12.671	87.830	-0.501	12.170	104.117	2499	2499	1117.0	1.08989	1217.784	3.305	368.286									
14	5.5	5.213	60.51	1191.9	710.6	481.3	2476	2486	12.559	87.049	0.392	12.951	96.972	2476	2476	1169.3	1.08544	1266.866	3.435	368.811									
15	5.5	5.213	60.48	1191.1	709.7	481.4	2474	2486	12.548	86.973	0.480	13.027	96.318	2474	2474	1317.4	1.08438	1428.562	3.316	430.809									
16	6.0	5.660	61.25	1198.9	712.8	486.1	0.0	#SAY/0	13.580	86.287	0.133	13.713	99.032	2486	2486	1023.3	1.06031	1065.015	4.875	222.567									
17	6.0	5.660	60.93	1195.4	710.6	484.8	2466	2470	13.577	86.266	0.157	13.734	98.855	2466	2466	1068.8	1.07042	1140.954	4.291	265.871									
18	6.0	5.660	61.00	1204.4	715.8	488.6	2465	2470	13.573	86.239	0.188	13.761	98.634	2465	2465	1080.9	1.06823	1154.650	4.410	261.825									
19	6.5	6.103	61.06	1190.3	703.2	487.1	2444	2453	14.508	85.091	0.401	14.909	97.309	2444	2444	846.2	1.06615	902.176	4.917	183.481									
20	6.5	6.103	61.99	1195.3	707.3	488.0	2449	2453	14.542	85.291	0.167	14.709	98.863	2449	2449	861.4	1.03775	893.918	4.557	196.164									
21	6.5	6.103	61.72	1206.7	715.5	491.2	2457	2453	14.585	85.543	-0.128	14.457	100.887	2457	2457	963.9	1.04552	1007.777	4.630	217.662									
												14.692	99.020				2.450												



Şekil 5.11. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.29. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

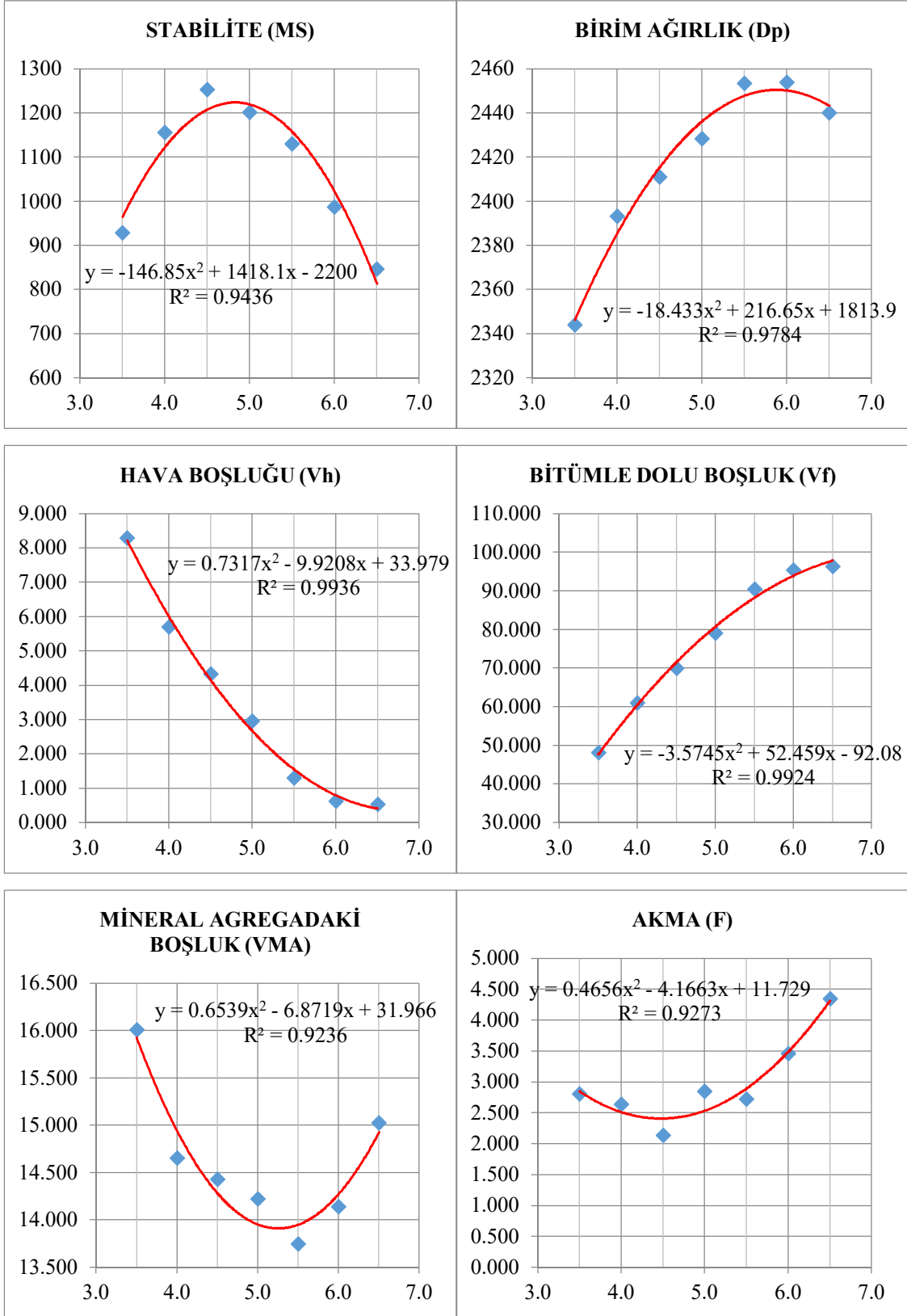
NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		İNCE AGREGA YÜZDESI		51,0% 43,5% 5,5%		HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)		HACİM % (Toplama Göre)		AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)		1028,0 2697		kg/m³ kg/m³		NOT: %10 eğitimlimiş bor katkılı		TARİH: 24/03/17		
	W _a	W _b	YÜKSEKLİK (mm)	BITÜM %	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b	W _a	W _b
Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	Agrega Ağırlığına Göre	
1	3,5	3,382	61,56	1165,5	680,3	485,2	(B-A)	2423	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
2	3,5	3,382	61,68	1167,4	677,7	489,7	(B-A)	2435	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
3	3,5	3,382	61,25	1160,5	676,0	484,5	(B-A)	2433	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
4	4,0	3,846	60,85	1175,8	684,2	481,6	(B-A)	2441	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
5	4,0	3,846	61,74	1175,6	686,7	488,9	(B-A)	2405	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
6	4,0	3,846	60,52	1168,3	687,5	480,8	(B-A)	2430	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
7	4,5	4,306	64,09	1230,2	722,5	507,7	(B-A)	2423	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
8	4,5	4,306	61,25	1181,3	686,2	485,1	(B-A)	2435	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
9	4,5	4,306	60,84	1169,1	688,6	480,5	(B-A)	2433	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
10	5,0	4,782	60,41	1180,5	699,7	480,8	(B-A)	2455	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
11	5,0	4,782	60,63	1186,4	702,5	483,9	(B-A)	2452	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
12	5,0	4,782	60,23	1187,0	706,2	480,8	(B-A)	2469	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
13	5,5	5,213	60,88	1182,6	701,0	481,6	(B-A)	2456	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
14	5,5	5,213	60,94	1189,9	705,8	484,1	(B-A)	2458	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
15	5,5	5,213	60,18	1180,2	700,6	479,6	(B-A)	2461	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
16	6,0	5,680	61,41	1192,5	709,5	483,0	(B-A)	2469	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
17	6,0	5,680	61,57	1198,8	711,5	487,3	(B-A)	2460	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
18	6,0	5,680	60,71	1189,4	705,0	484,4	(B-A)	2455	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
19	6,5	6,103	61,54	1196,7	707,2	489,5	(B-A)	2445	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
20	6,5	6,103	61,39	1192,1	705,5	486,6	(B-A)	2450	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503
21	6,5	6,103	61,18	1191,1	704,5	486,6	(B-A)	2448	2455	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503	2503



Şekil 5.12. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.30. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

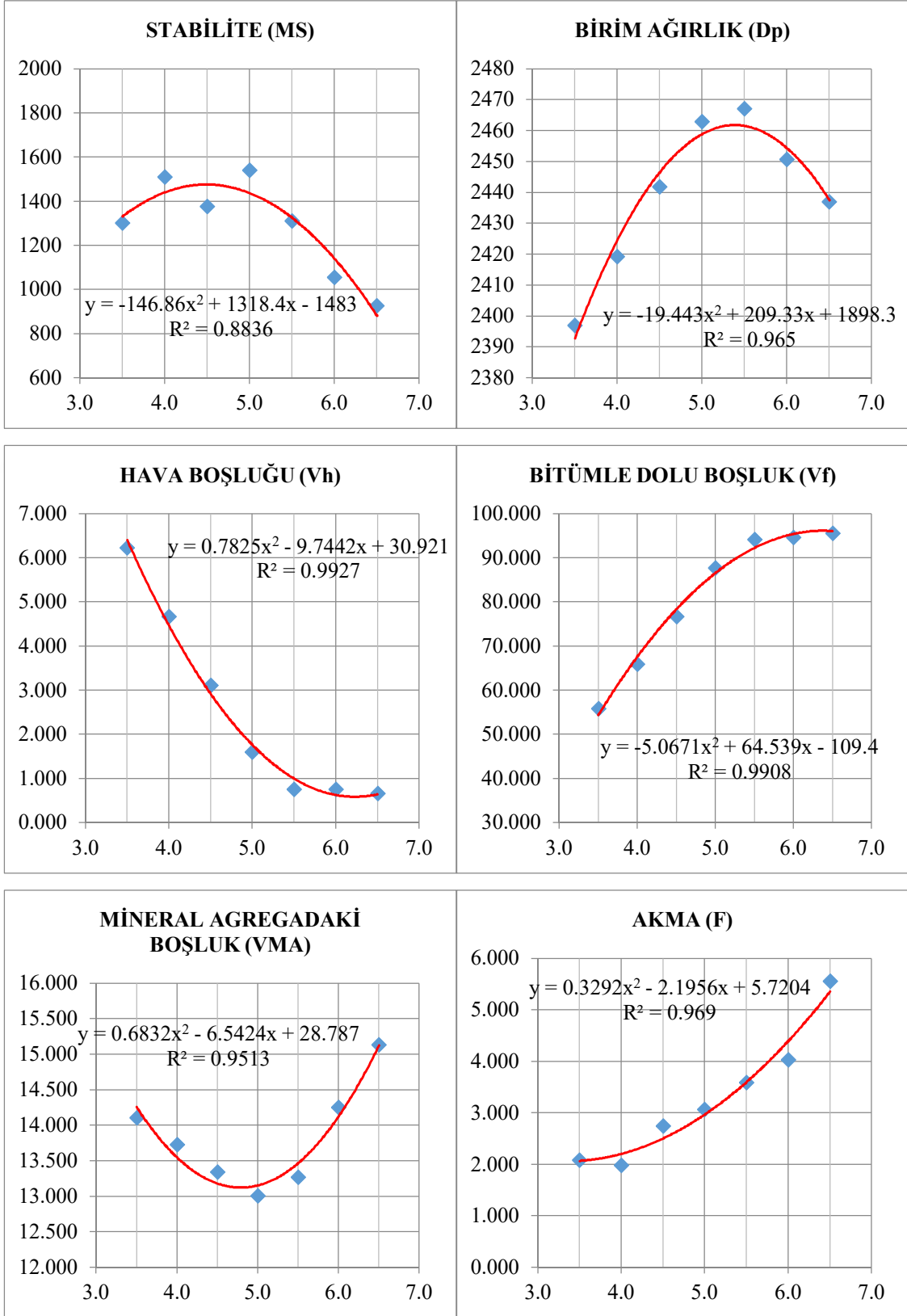
NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		YÜKSEKLİK (mm)	BİTÜM %	Wb	W _a /(100+W _a)	Agrega Ağırlığına Göre	W _a	BİTÜM %	W _b	HAVA AĞIRLIK (gr)	SUDA AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	51,0% 43,5% 5,5%	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)	AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)	1028,0 2697	kg/m ³ kg/m ³	BOŞLUK ORANI (%)	Toplam Karışım Vh	Deneysel Faktör	Düzeltilmiş S _t	Düzeltilmiş Faktör	S ² Düzeltilme F.	AKWA mm	MARSHALL ORANI	TARH: 3008Y7																										
	HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ																												HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ		HACİM YÜZDESİ	
	MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)																											HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)
1	3.5	3.382	62.19	1144.7	656.3	488.4	2344	2556	7.710	83.979	8.311	16.021	48.123	48.123	8.311	2344	1048.3	1.03275	1082.632	1.687	641.750																																					
2	3.5	3.382	64.59	1158.4	680.3	498.1	2326	2556	7.650	83.329	9.021	16.671	45.889	45.889	9.021	2326	1025.2	1.01800	1043.854	1.528	683.019																																					
3	3.5	3.382	62.78	1165.3	672.1	493.2	2363	2556	7.772	84.688	7.570	15.342	50.680	50.680	7.570	2363	1025.2	1.01800	1043.854	1.528	683.019																																					
4	4.0	3.846	61.54	1148.3	688.2	480.1	2392	2538	8.949	85.287	5.764	14.724	60.769	60.769	5.764	2392	1000.7	1.05125	1051.986	1.943	541.424																																					
5	4.0	3.846	61.53	1157.0	673.2	483.8	2391	2538	8.947	85.276	5.776	14.724	60.769	60.769	5.776	2391	1138.2	1.05156	1196.886	3.228	370.782																																					
6	4.0	3.846	61.73	1158.3	675.0	483.3	2397	2538	8.967	85.460	5.573	14.540	61.671	61.671	5.573	2397	1167.3	1.04531	1220.190	2.775	439.708																																					
7	4.5	4.306	61.80	1177.5	687.5	490.0	2403	2520	10.066	85.279	4.655	14.721	68.380	68.380	4.655	2403	1198.8	1.04313	1250.504	2.234	559.760																																					
8	4.5	4.306	61.19	1167.3	683.8	483.5	2414	2520	10.113	85.677	4.210	14.323	70.607	70.607	4.210	2414	1221.6	1.06219	1297.571	1.675	774.689																																					
9	4.5	4.306	61.78	1175.4	688.9	488.5	2416	2520	10.121	85.739	4.140	14.261	70.969	70.969	4.140	2416	1163.5	1.04375	1214.403	2.530	480.001																																					
10	5.0	4.762	61.49	1177.2	691.5	485.7	2424	2503	11.227	85.602	3.170	14.398	77.980	77.980	3.170	2424	1147.7	1.05281	1208.310	2.295	526.497																																					
11	5.0	4.762	62.34	1180.7	692.2	488.5	2417	2503	11.196	85.365	3.439	14.635	76.501	76.501	3.439	2417	1035.8	1.02900	1065.838	4.250	250.785																																					
12	5.0	4.762	61.11	1184.4	700.0	484.4	2445	2503	11.326	86.357	2.317	13.643	83.019	83.019	2.317	2445	1252.8	1.06469	1333.844	2.024	659.014																																					
13	5.5	5.213	61.09	1184.3	699.7	484.6	2444	2486	12.384	85.905	1.701	14.225	79.167	79.167	2.975	2429	1074.6	1.06531	1202.864	2.866	478.765																																					
14	5.5	5.213	60.31	1170.2	692.6	477.6	2450	2486	12.425	86.127	1.448	13.873	89.563	89.563	1.448	2450	965.8	1.08969	1052.423	1.949	539.981																																					
15	5.5	5.213	60.70	1182.6	703.2	479.4	2467	2486	12.510	86.712	0.778	13.288	94.147	94.147	0.778	2467	1109.4	1.07750	1195.379	3.944	303.088																																					
16	6.0	5.680	60.93	1182.4	700.8	481.6	2455	2470	13.519	85.895	0.587	14.105	95.839	95.839	1.309	2454	956.4	1.07031	1023.644	3.784	270.519																																					
17	6.0	5.680	61.48	1180.5	699.4	481.1	2454	2470	13.511	85.846	0.643	14.154	95.464	95.464	0.643	2454	902.1	1.05313	950.029	3.641	260.925																																					
18	6.0	5.680	60.77	1182.6	700.5	482.1	2453	2470	13.507	85.820	0.673	14.180	95.253	95.253	0.673	2453	921.1	1.07531	990.468	2.972	333.267																																					
19	6.5	6.103	61.31	1188.5	702.0	486.5	2443	2453	14.504	85.067	0.429	14.933	97.126	97.126	0.429	2443	763.4	1.05844	808.013	5.117	157.908																																					
20	6.5	6.103	61.53	1194.5	705.1	489.4	2441	2453	14.491	84.990	0.520	15.010	96.539	96.539	0.520	2441	823.7	1.05156	866.170	3.799	227.999																																					
21	6.5	6.103	61.64	1191.0	702.3	488.7	2437	2453	14.489	84.862	0.669	15.138	95.581	95.581	0.669	2437	828.1	1.04813	867.956	4.150	209.146																																					
											0.539	15.027	96.415	96.415	0.539	2440	847.380				4.355	198.351																																				



Şekil 5.13. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.31. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 SB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

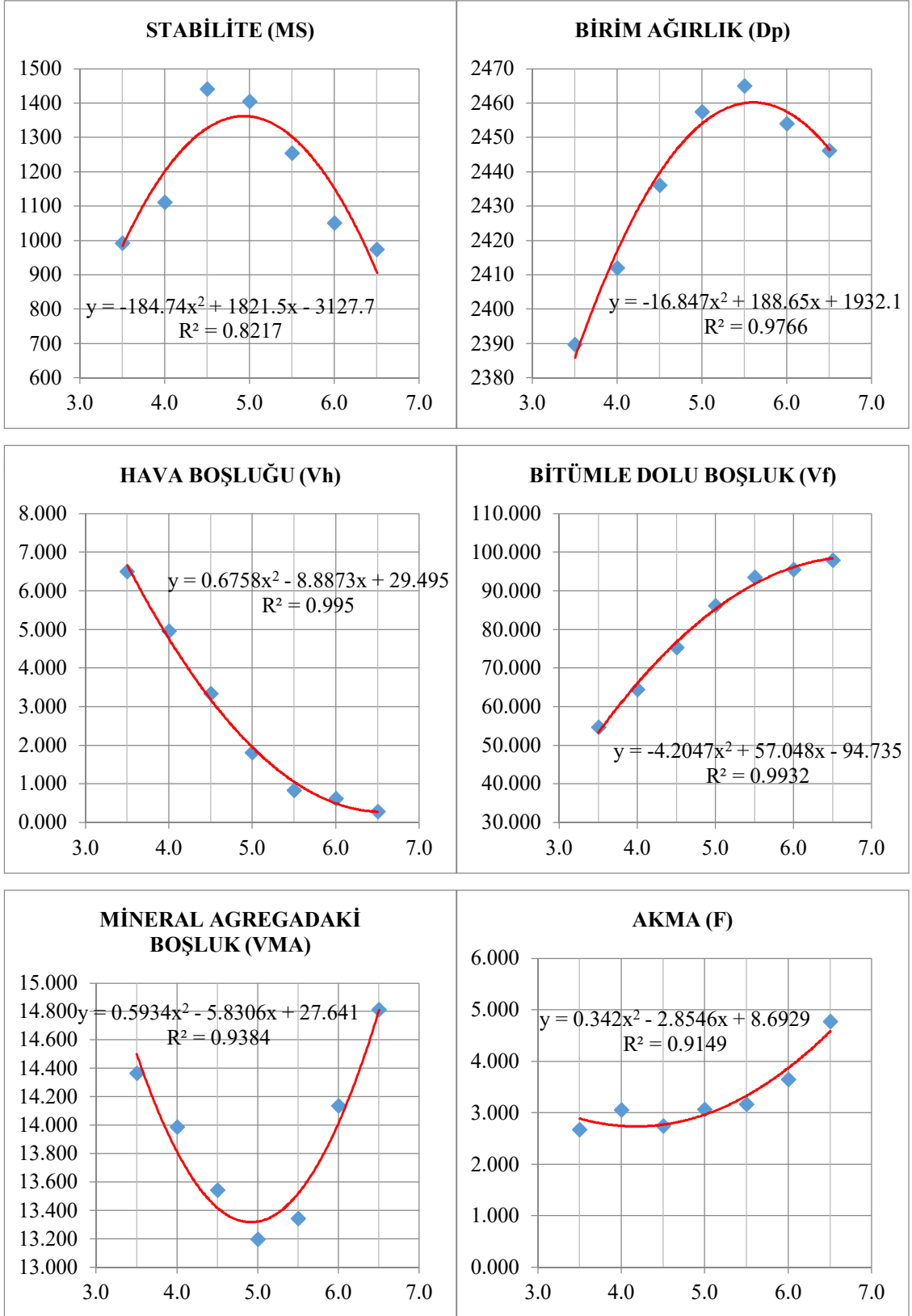
KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2717.0	kg/m³	KABA AGREGA YÜZDESİ		51,0%	BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gb):			1028.0	kg/m³	NOT:			TARİH: 07/12/16										
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2674.0	kg/m³	İNCE AGREGA YÜZDESİ		43,5%	AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)			2697	kg/m³	4 ve 8 nolu numuneler oralamadan çıkarılmıtır													
FILLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2688.0	kg/m³	FILLER YÜZDESİ		5,5%	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)																		
BİTÜM %	Wb	YÜKSEKLİK (mm)	HAVARA AĞIRLIK (gr)	HAVARA AĞIRLIK (gr)	SUDA AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm³)	V	Dp	A/B-A	Dt	Adfalt C	D	E	100-CD	VMA	Agrega	HAVA BOŞLUĞU (100-Wb)/Dp/Gb	BOŞLUK ORANI (%)	Toplam Karışım	BİRİM AĞIRLIK (kg/m³)	Deneyel Faktör	Düzeltilmiş Sbt	Düzeltilmiş Sbt	M.O. MARSHALL ORANI	
W _a	(100+W _a)		A	B	B	cm³	V	Dp	(B-A)	DT	Wb/Dp(Gb)	D	E	100-CD	VMA	Agrega	HAVA BOŞLUĞU (100-Wb)/Dp/Gb	Vf	Vh	DP	S	S	S	S	Sbt/F
1	3.5	3.382	61.93	1171.4	681.9	489.5	489.5	2393	7.872	85.744	6.384	6.384	6.384	6.384	6.384	2393	1274.4	55.221	6.384	2393	1274.4	1.039333	1324.522	2.036	631.326
2	3.5	3.382	61.97	1171.8	683.9	487.9	487.9	2402	7.901	86.055	6.044	6.044	6.044	6.044	6.044	13.945	56.655	6.044	2402	1311.6	1.03825	1361.769	2.306	590.533	
3	3.5	3.382	61.75	1161.0	676.5	484.5	484.5	2386	7.883	85.860	6.257	6.257	6.257	6.257	6.257	14.113	55.874	6.257	2386	1173.5	1.04469	1225.944	1.878	652.792	
4	4.0	3.846	62.06	1179.6	650.3	528.3	528.3	2229	8.338	79.468	5.118	5.118	5.118	5.118	5.118	20.532	40.610	5.118	2229	1565.1	1.03600	1621.444	2.106	769.918	
5	4.0	3.846	61.55	1182.7	696.1	486.6	486.6	2431	9.094	86.669	4.238	4.238	4.238	4.238	4.238	13.331	68.213	4.238	2431	1592.3	1.05094	1673.412	2.267	738.161	
6	4.0	3.846	61.81	1174.0	686.5	487.5	487.5	2408	9.010	85.872	5.118	5.118	5.118	5.118	5.118	14.128	63.776	5.118	2408	1294.9	1.04281	1350.335	1.709	790.131	
7	4.5	4.306	61.14	1182.7	700.0	482.7	482.7	2450	10.264	86.951	2.785	2.785	2.785	2.785	2.785	13.049	78.664	2.785	2450	1331.9	1.06375	1416.809	2.966	477.683	
8	4.5	4.306	60.72	1181.9	687.3	524.6	524.6	2253	9.437	79.982	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444	20.048	47.075	3.444	2253	1427.0	1.07888	1536.708	2.178	706.208	
9	4.5	4.306	60.98	1183.2	697.0	486.2	486.2	2434	10.194	86.362	3.444	3.444	3.444	3.444	3.444	13.638	74.745	3.444	2434	1252.7	1.06875	1338.823	2.543	526.474	
10	5.0	4.762	60.68	1185.9	702.5	483.4	483.4	2453	11.364	86.645	1.991	1.991	1.991	1.991	1.991	15.578	66.825	1.991	2379	1430.780	1.07813	1511.970	3.273	461.952	
11	5.0	4.762	60.18	1188.9	708.1	480.8	480.8	2473	11.454	87.334	1.211	1.211	1.211	1.211	1.211	12.666	90.436	1.211	2473	1417.2	1.09375	1550.063	2.943	526.695	
12	5.0	4.762	60.66	1188.9	706.2	482.7	482.7	2463	11.409	86.991	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	13.009	87.700	1.600	2463	1451.0	1.07875	1565.266	3.000	521.765	
13	5.5	5.213	61.53	1183.4	702.7	480.7	480.7	2462	12.485	86.536	0.979	0.979	0.979	0.979	0.979	13.010	87.743	0.979	2463	1235.1	1.05156	1542.433	3.072	503.467	
14	5.5	5.213	60.56	1190.0	707.6	482.4	482.4	2467	12.510	86.712	0.778	0.778	0.778	0.778	0.778	13.268	94.147	0.778	2467	1172.5	1.08188	1268.504	3.588	356.522	
15	5.5	5.213	60.52	1190.2	708.9	481.3	481.3	2473	12.541	86.925	0.534	0.534	0.534	0.534	0.534	13.075	95.914	0.534	2473	1267.7	1.08313	1373.084	3.412	402.428	
16	6.0	5.660	60.98	1191.8	704.4	487.4	487.4	2445	13.464	85.547	0.989	0.989	0.989	0.989	0.989	13.275	94.263	0.764	2467	1033.4	1.06875	1104.446	4.506	245.106	
17	6.0	5.660	60.92	1187.0	703.8	483.2	483.2	2457	13.526	85.943	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531	14.057	96.225	0.531	2457	883.1	1.07063	945.473	3.702	255.395	
18	6.0	5.660	61.02	1188.4	703.5	484.9	484.9	2451	13.495	85.743	0.762	0.762	0.762	0.762	0.762	14.257	94.652	0.762	2451	1049.7	1.06760	1120.660	3.916	286.175	
19	6.5	6.103	61.84	1195.9	704.0	491.9	491.9	2431	14.434	84.657	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909	14.256	94.678	0.761	2451	822.5	1.04198	857.029	5.431	157.803	
20	6.5	6.103	61.71	1194.5	704.4	490.1	490.1	2437	14.470	84.868	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	15.132	95.628	0.662	2437	892.0	1.04604	933.068	4.449	209.725	
21	6.5	6.103	61.76	1192.2	704.2	488.0	488.0	2443	14.504	85.069	0.426	0.426	0.426	0.426	0.426	14.931	97.145	0.426	2443	951.1	1.04438	993.310	6.798	146.118	
											0.666					15.135	95.616		2437			927.802	5.559	171.215	



Şekil 5.14. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 SB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.32. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 SB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

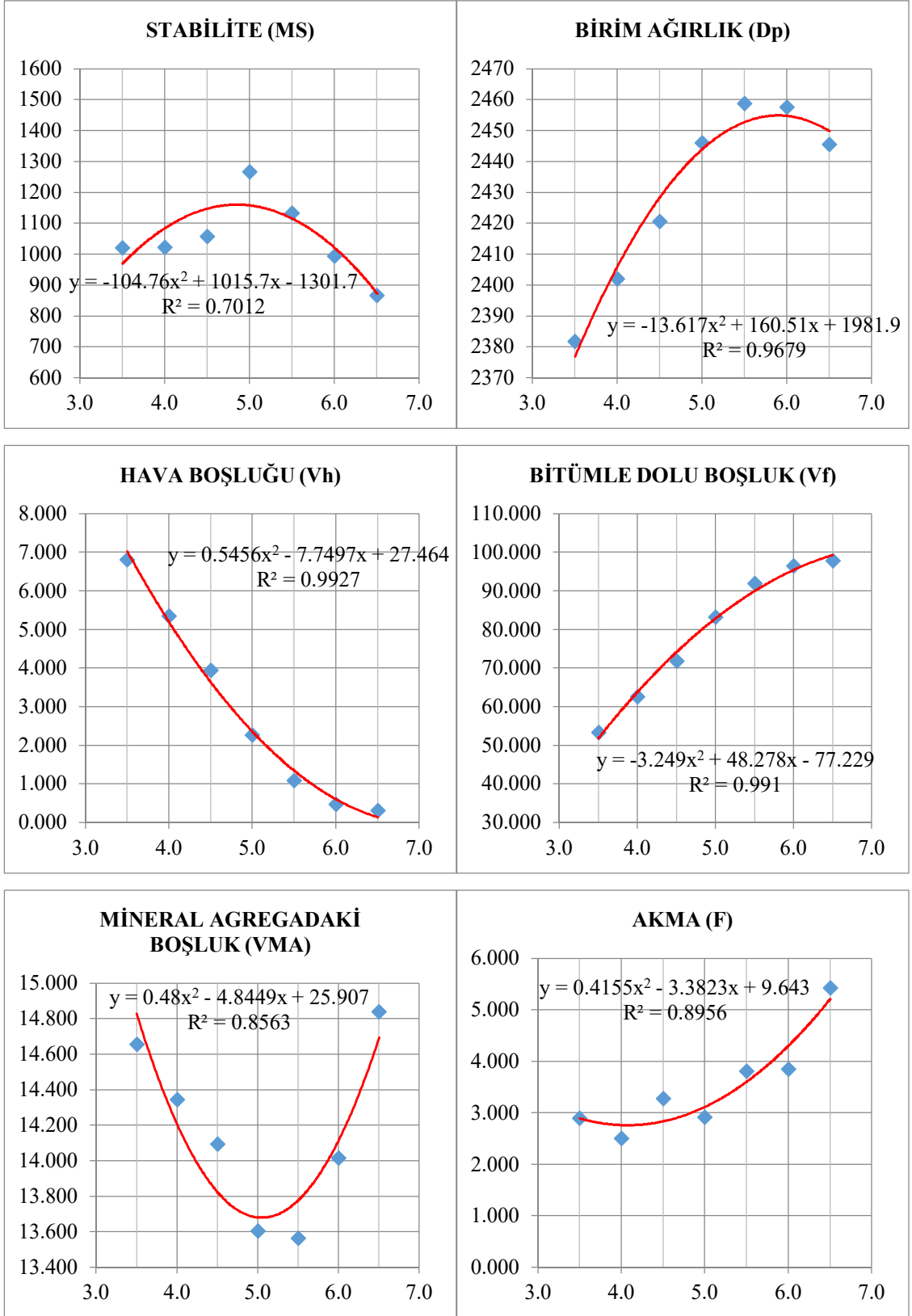
KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2717.0		kg/m ³		1028.0		kg/m ³		NOT: %10 süzülür bor tabiihi		TARİH: 3/10/31/7					
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2674.0		kg/m ³		2697		kg/m ³									
FILLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2688.0		kg/m ³													
NO	BİTÜM %	Wb	YÜKSEKLİK (mm)	BİTÜM %	Wb	W _e (100+W _b)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)		HACİM % (Toplama Göre)		BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)		M.O.				
							AGREGA	BİTÜM	A	B	C	D		E	F	G	H
1	3.5	3.382	62.66	3.382	1175.7	684.1	491.6	2392	7.867	85.692	6.441	2392	843.4	1.02100	861.111	2.780	309.752
2	3.5	3.382	62.35	3.382	1167.2	675.0	492.2	2371	7.801	84.968	7.231	2371	959.2	1.02875	986.777	3.015	327.288
3	3.5	3.382	62.74	3.382	1177.3	688.1	482.2	2407	7.917	86.229	5.854	2407	1110.4	1.01900	1131.498	2.241	504.907
4	4.0	3.846	61.75	3.846	1172.8	688.5	484.3	2422	9.060	86.351	4.588	2422	1092.6	1.04469	1141.428	3.364	338.307
5	4.0	3.846	62.58	3.846	1179.8	687.8	492.0	2398	8.972	85.507	5.521	2398	963.6	1.02300	965.763	2.402	410.393
6	4.0	3.846	61.15	3.846	1168.2	684.8	483.4	2417	9.042	86.173	4.786	2417	1136.9	1.06344	1209.025	3.412	354.345
7	4.5	4.306	61.03	4.306	1179.2	696.0	483.2	2440	10.223	86.604	3.173	2440	1415.2	1.06719	1510.287	3.040	498.805
8	4.5	4.306	61.96	4.306	1187.5	697.9	489.6	2425	10.160	86.074	3.766	2425	1132.4	1.03850	1175.997	3.122	376.681
9	4.5	4.306	60.35	4.306	1176.1	694.6	481.5	2443	10.232	86.681	3.087	2443	1507.5	1.08844	1640.823	2.109	778.010
10	5.0	4.762	61.17	4.762	1190.5	705.7	484.8	2456	11.375	86.730	1.895	2456	1224.5	1.06281	1301.411	2.761	471.355
11	5.0	4.762	60.92	4.762	1183.9	700.1	483.8	2447	11.335	86.428	2.237	2447	1249.7	1.07063	1337.966	4.209	317.882
12	5.0	4.762	60.45	4.762	1185.4	705.5	479.9	2470	11.442	87.241	1.317	2470	1455.7	1.08831	1579.886	2.262	698.446
13	5.5	5.213	60.80	5.213	1188.7	706.9	481.8	2467	12.512	86.725	0.763	2467	2458	1.07438	1406.421	3.077	495.895
14	5.5	5.213	60.73	5.213	1194.0	709.7	484.3	2465	12.503	86.662	0.835	2465	2458	1.07656	1282.629	2.941	436.188
15	5.5	5.213	61.32	5.213	1196.0	710.4	485.6	2463	12.490	86.575	0.835	2463	2465	1.05813	1249.757	3.403	367.252
16	6.0	5.660	61.30	5.660	1199.2	710.1	489.1	2452	13.500	85.779	0.720	2452	2458	1.05875	1255.289	3.174	397.210
17	6.0	5.660	61.00	5.660	1194.3	707.9	486.4	2455	13.520	85.903	0.577	2455	2455	1.06813	1068.023	3.231	330.555
18	6.0	5.660	61.13	5.660	1196.4	709.1	487.3	2455	13.519	85.895	0.586	2455	2455	1.06406	1038.948	3.280	316.752
19	6.5	6.103	62.18	6.103	1200.6	709.2	491.4	2443	14.506	85.076	0.418	2443	2454	1.04375	1051.923	3.660	293.997
20	6.5	6.103	62.12	6.103	1194.3	705.9	488.4	2445	14.518	85.149	0.333	2445	2445	1.03450	1016.293	4.301	236.292
21	6.5	6.103	61.74	6.103	1197.2	708.6	488.6	2450	14.547	85.321	0.131	2450	2450	1.04500	945.666	3.581	264.358
						14.818	98.021	0.294	2446	974.681	4.778	2.16.536					



Şekil 5.15. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 SB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.33. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 BP agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

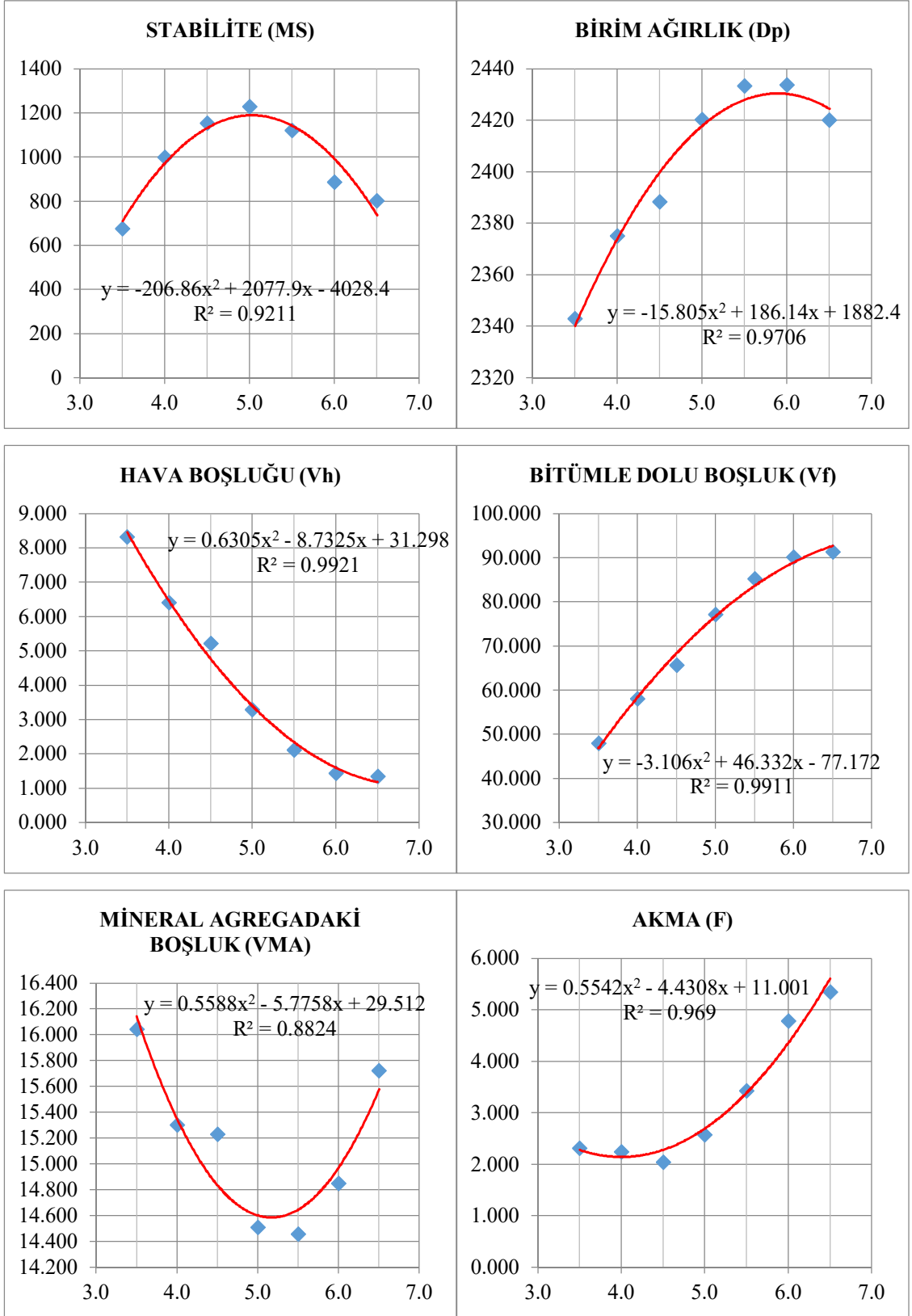
NO	BİTÜM %		YÜKSEKLİK (mm)	KABA AGREGA YÜZDESI		HACİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (kg/m³)		HACİM % (Toplama Göre)		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gib)		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)		1028.0		kg/m³	kg/m³	NOT: %5 boraks pentahidrat katkılı. 2. 5 ve 12 nolu numuneler ortalamadan çıkarılmıştır	TARİH: 14/12/16
	Wa	Wb		İNCE AGREGA YÜZDESI	FİLLER YÜZDESI	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)	MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)	Adifit	D	E	Agrega	Hava Boşluğu	VMA	Agrega	BİRİM AĞIRLIK (kg/m³)				
Agrega Ağırlığına Göre	Wb/(100+Wa)			(BA)	(B-A)	DI	Wb*Di/(Gb)	(100*Wb)/Dp/Gb	100-CD	100-D	C/VMA*100	Toplam Karışım	VH	DP	S	S	Düzeltilmiş Faktör	mm	M.O.
Wa	Wb	A	B	V	Dp	Dt	C	D	E	VMA	Vf	Vh	Dp	S	S	S	F	F	Stb/F
1	3.5	3.382	61.89	676.9	491.9	2376	7.816	85.137	7.047	14.863	52.587	7.047	2376	923.000	1.04031	960.206	3.147	305.118	
2	3.5	3.382	62.03	686.0	484.8	2415	7.944	86.531	5.524	13.469	58.983	5.524	2415	922.000	1.03675	955.884	6.250	152.941	
3	3.5	3.382	61.73	670.5	483.2	2388	7.854	85.580	6.596	14.450	54.354	6.596	2388	1038.200	1.04531	1085.241	2.668	406.762	
4	4.0	3.846	60.22	674.9	484.2	2394	8.956	85.360	5.683	14.640	61.179	5.683	2394	891.000	1.09250	973.418	2.188	451.074	
5	4.0	3.846	61.89	689.2	505.1	2305	8.624	82.195	9.180	17.805	48.438	9.180	2305	746.000	1.04031	776.071	3.818	203.266	
6	4.0	3.846	62.01	683.3	484.5	2410	9.018	85.948	5.034	14.052	64.175	5.034	2410	1036.600	1.03725	1075.213	2.868	374.900	
7	4.5	4.306	60.14	681.4	481.7	2415	10.114	85.688	4.198	14.312	70.669	4.198	2415	932.800	1.09500	1021.416	3.928	260.035	
8	4.5	4.306	61.72	687.5	482.6	2425	10.156	86.042	3.801	13.853	72.766	3.801	2425	925.800	1.04563	963.044	2.881	334.836	
9	4.5	4.306	61.91	699.4	484.5	2423	10.149	85.983	3.867	14.017	72.410	3.867	2423	1142.000	1.03975	1187.395	3.026	392.397	
10	5.0	4.762	60.38	690.2	478.8	2442	11.310	86.231	2.459	13.769	82.140	2.459	2442	1188.600	1.08750	1292.603	2.665	485.029	
11	5.0	4.762	60.14	688.5	478.8	2451	11.352	86.556	2.092	13.444	84.440	2.092	2451	1136.200	1.09500	1244.139	3.180	391.239	
12	5.0	4.762	61.16	693.0	483.5	2433	11.272	85.941	2.788	14.059	80.172	2.788	2433	1299.000	1.06313	1381.006	6.159	224.226	
13	5.5	5.213	61.92	705.3	484.7	2455	12.451	86.301	1.249	13.757	82.251	2.446	2442	1083.200	1.03950	1305.916	4.001	366.831	
14	5.5	5.213	60.12	693.9	476.5	2456	12.456	86.340	1.204	13.660	91.189	1.204	2456	1069.800	1.09560	1172.105	3.570	333.933	
15	5.5	5.213	60.00	693.9	473.5	2465	12.503	86.664	0.833	13.336	93.757	0.833	2465	1005.400	1.09938	1105.317	4.047	273.120	
16	6.0	5.660	61.81	704.6	485.5	2451	13.497	85.759	0.743	14.241	94.781	0.743	2451	893.200	1.04281	931.436	4.125	225.803	
17	6.0	5.660	61.89	705.9	487.5	2448	13.479	85.644	0.876	14.356	93.895	0.876	2448	984.300	1.04031	1023.977	4.087	249.933	
18	6.0	5.660	60.34	698.5	474.0	2474	13.620	86.541	-0.161	13.459	101.199	-0.161	2474	947.000	1.08875	1031.046	3.358	307.042	
19	6.5	6.103	61.77	700.5	486.4	2440	14.487	84.970	0.543	14.018	96.625	0.486	2458	755.500	1.04406	788.787	5.588	141.157	
20	6.5	6.103	61.97	706.7	488.8	2446	14.535	85.165	0.314	15.030	96.389	0.543	2446	854.400	1.03825	887.081	5.509	161.024	
21	6.5	6.103	61.87	703.4	484.8	2451	14.581	85.344	0.105	14.656	99.282	0.105	2451	891.700	1.04094	928.206	5.211	178.124	
										14.840	97.851	0.321	2446			868.023	5.436	160.102	



Şekil 5.16. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 BP agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.34. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 BP agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		YÜKSEKLİK (mm)	KİLE AGREGA YÜZDESI		HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM % (Toplama Göre)		AGREGA VMA	BOŞLUK ORANI (%)	NOT:	%10 boyutları per maldhidrat katkıları		TARİH: 3/10/3177					
	BİTÜM %	Wb		İNCE AGREGA YÜZDESI	FİLLER YÜZDESI		MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Adfalt				Agrega	D		E	F	G	H	I
1	3.5	3.382	62.85	1163.6	667.7	495.9	(B-A)	2346	15.926	48.467	8.207	2346	679.8	1.01625	690.847	1.622	425.923		
2	3.5	3.382	62.89	1170.6	670.8	499.8	(B-A)	2342	16.080	47.914	8.375	2342	766.9	1.01525	780.626	2.097	372.258		
3	3.5	3.382	62.63	1165.5	667.6	497.9	(B-A)	2341	16.127	47.748	8.427	2341	547.7	1.02175	559.612	3.251	172.135		
4	4.0	3.846	61.96	1167.0	678.7	488.3	(B-A)	2380	15.304	58.146	6.417	2380	1034.1	1.03850	1073.913	2.375	452.174		
5	4.0	3.846	62.56	1175.2	681.5	493.7	(B-A)	2380	15.119	58.905	6.213	2380	981.6	1.02350	1004.668	2.648	379.406		
6	4.0	3.846	63.01	1177.9	677.8	500.1	(B-A)	2355	16.013	55.031	7.201	2355	909.1	1.01225	920.236	1.740	528.872		
7	4.5	4.306	61.78	1178.9	686.0	492.9	(B-A)	2392	15.122	66.264	5.103	2392	1119.8	1.04375	1168.791	1.977	591.194		
8	4.5	4.306	62.48	1179.9	683.6	496.3	(B-A)	2377	15.632	63.708	5.673	2377	1020.0	1.02550	1046.010	2.047	510.997		
9	4.5	4.306	62.00	1184.9	690.5	494.4	(B-A)	2397	14.949	67.158	4.909	2397	1207.0	1.03750	1252.263	2.123	589.855		
10	5.0	4.762	61.52	1184.4	695.1	489.3	(B-A)	2421	15.234	65.707	5.229	2399	1163.1	1.05188	1223.442	2.196	557.123		
11	5.0	4.762	60.99	1165.5	683.4	482.1	(B-A)	2418	14.615	76.622	3.417	2418	1089.8	1.06844	1164.386	2.084	558.726		
12	5.0	4.762	61.24	1178.5	692.2	486.3	(B-A)	2423	14.409	77.909	3.183	2423	1226.6	1.06063	1300.969	3.457	376.329		
13	5.5	5.213	61.10	1185.1	698.0	487.1	(B-A)	2433	14.511	77.273	3.298	2421	1144.5	1.06500	1229.589	2.579	497.393		
14	5.5	5.213	61.63	1185.4	698.9	486.5	(B-A)	2437	14.351	86.104	1.994	2437	1066.3	1.04844	1117.952	3.765	296.933		
15	5.5	5.213	61.61	1189.0	699.9	489.1	(B-A)	2431	14.547	84.745	2.219	2431	983.2	1.04906	1031.436	3.874	266.246		
16	6.0	5.660	61.15	1186.5	698.7	487.8	(B-A)	2432	14.459	85.357	2.118	2434	1122.760	1.06344	1122.760	3.434	340.240		
17	6.0	5.660	61.43	1190.7	702.0	488.7	(B-A)	2436	14.903	89.867	1.510	2432	860.3	1.06344	914.877	6.530	140.104		
18	6.0	5.660	62.00	1196.4	704.6	491.8	(B-A)	2433	14.759	90.897	1.343	2436	789.1	1.05469	832.256	4.002	207.960		
19	6.5	6.103	62.24	1197.2	701.7	495.5	(B-A)	2416	14.851	90.239	1.490	2434	889.339	1.03750	920.885	3.827	240.628		
20	6.5	6.103	62.00	1198.5	704.0	494.5	(B-A)	2424	15.065	92.409	1.216	2424	756.6	1.03750	787.048	6.627	118.764		
21	6.5	6.103	62.48	1198.0	703.1	494.9	(B-A)	2421	15.709	91.490	1.337	2421	791.6	1.02550	811.786	3.384	239.889		
									15.727	91.369	1.338	2420	804.917	5.357	804.917	5.357	164.424		



Şekil 5.17. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 BP agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.35. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış kontrol numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	3.77	1723.78	1688.71
Birim Ağırlık	maks	5.49	2469.24	2446.31
Hava Boşluğu	4	4.07	4.00	3.14
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.04	70.00	76.68
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.36
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.06
OBO		4.34		

Tablo 5.36. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.74	1489.28	1484.57
Birim Ağırlık	maks	5.48	2473.32	2457.16
Hava Boşluğu	4	4.08	4.00	2.38
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.05	70.00	82.12
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	3.18
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	12.88
OBO		4.59		

Tablo 5.37. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 ÖAB agr. modifyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.62	1509.93	1509.65
Birim Ağırlık	maks	5.67	2459.49	2445.31
Hava Boşluğu	4	4.20	4.00	2.76
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.15	70.00	79.68
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	3.01
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.36
OBO		4.66		

Tablo 5.38. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %15 ÖAB agr. modifyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.83	1223.57	1222.39
Birim Ağırlık	maks	5.88	2450.49	2433.56
Hava Boşluğu	4	4.55	4.00	2.89
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.42	70.00	79.46
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.50
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.99
OBO		4.92		

Tablo 5.39. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 SB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.49	1475.90	1475.69
Birim Ağırlık	maks	5.38	2461.73	2447.48
Hava Boşluğu	4	4.14	4.00	2.85
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.10	70.00	78.92
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.53
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.17
OBO		4.53		

Tablo 5.40. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 SB agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.93	1362.21	1354.92
Birim Ağırlık	maks	5.60	2460.22	2447.54
Hava Boşluğu	4	4.23	4.00	2.57
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.17	70.00	81.05
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.84
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.34
OBO		4.73		

Tablo 5.41. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 BP agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı

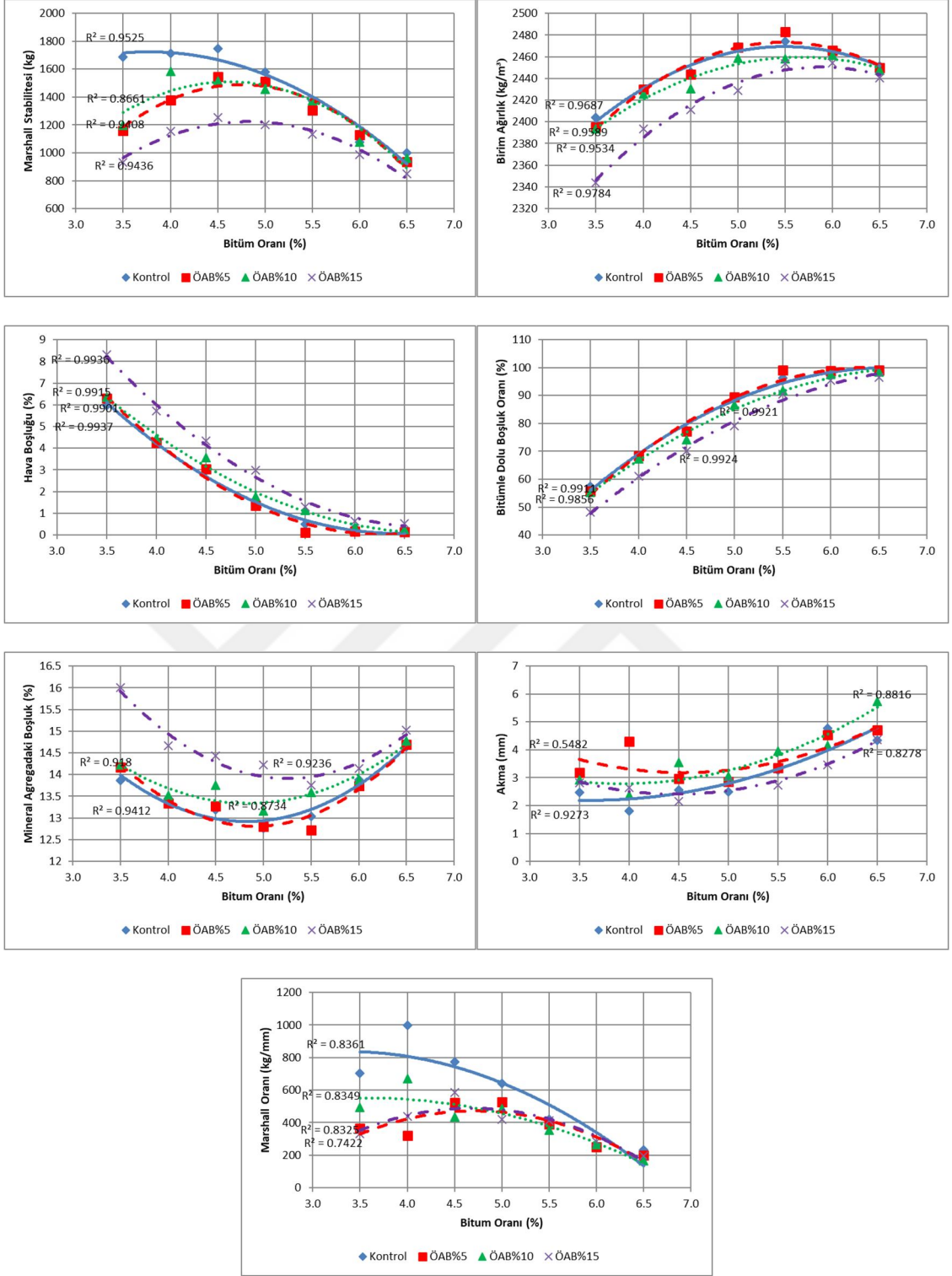
Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.85	1160.23	1160.23
Birim Ağırlık	maks	5.89	2454.90	2440.09
Hava Boşluğu	4	4.38	4.00	2.71
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.29	70.00	80.51
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	3.01
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.70
OBO		4.85		

Tablo 5.42. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 BP agr. modifiyeli numunelerin OBO hesabı

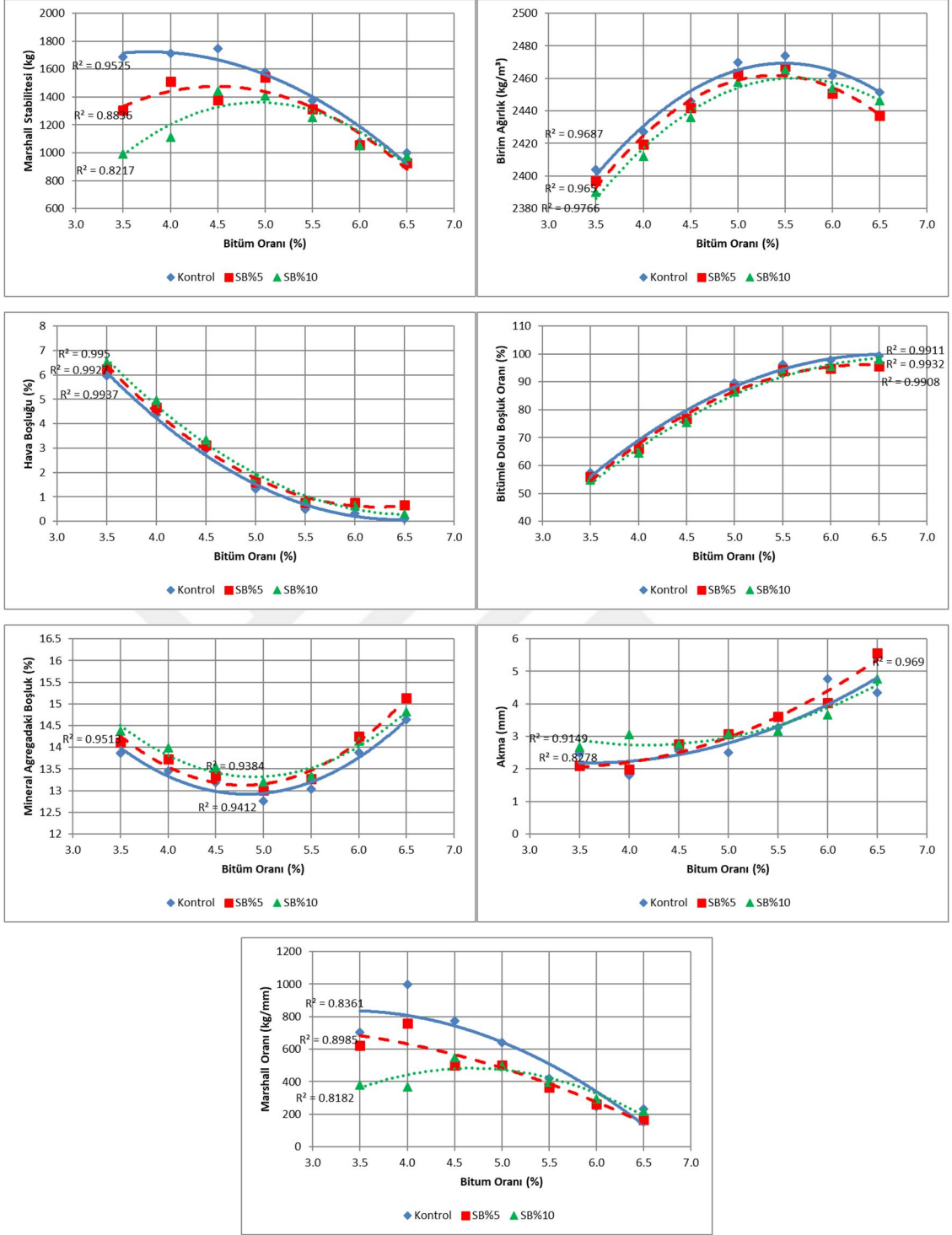
Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	5.02	1189.70	1189.31
Birim Ağırlık	maks	5.89	2430.46	2419.76
Hava Boşluğu	4	4.77	4.00	3.24
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.59	70.00	77.83
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.78
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	14.59
OBO		5.07		

Görüldüğü üzere ÖAB modifiyesi %5, %10 ve %15 katkı oranında, SB ve BP modifiyesi ise %10 katkı oranlarında yapılmıştır. Bu oranlar seçilirken özellikle Stabilite değerleri göz önüne alınmıştır. SB ve BP katkılı numunelerde katkı oranı %5' den %10' a çıkarıldığında Stabilite değerleri düştüğünden katkı oranı artırılmamıştır. ÖAB katkılı numunelerde ise Stabilite değerlerinde artış gözlenmiş dolayısı ile birde %15 katkı oranında ÖAB modifiyeli numuneler hazırlanmıştır. Ancak bu oranda da Stabilite değerleri düşüşe geçtiğinden ÖAB katkılı numunelerde de katkı oranı daha fazla artırılmamıştır. Aşağıdaki şekillerde agrega modifiyeli numunelerin katkı oranının artması ile oluşan grafikler verilmiştir.

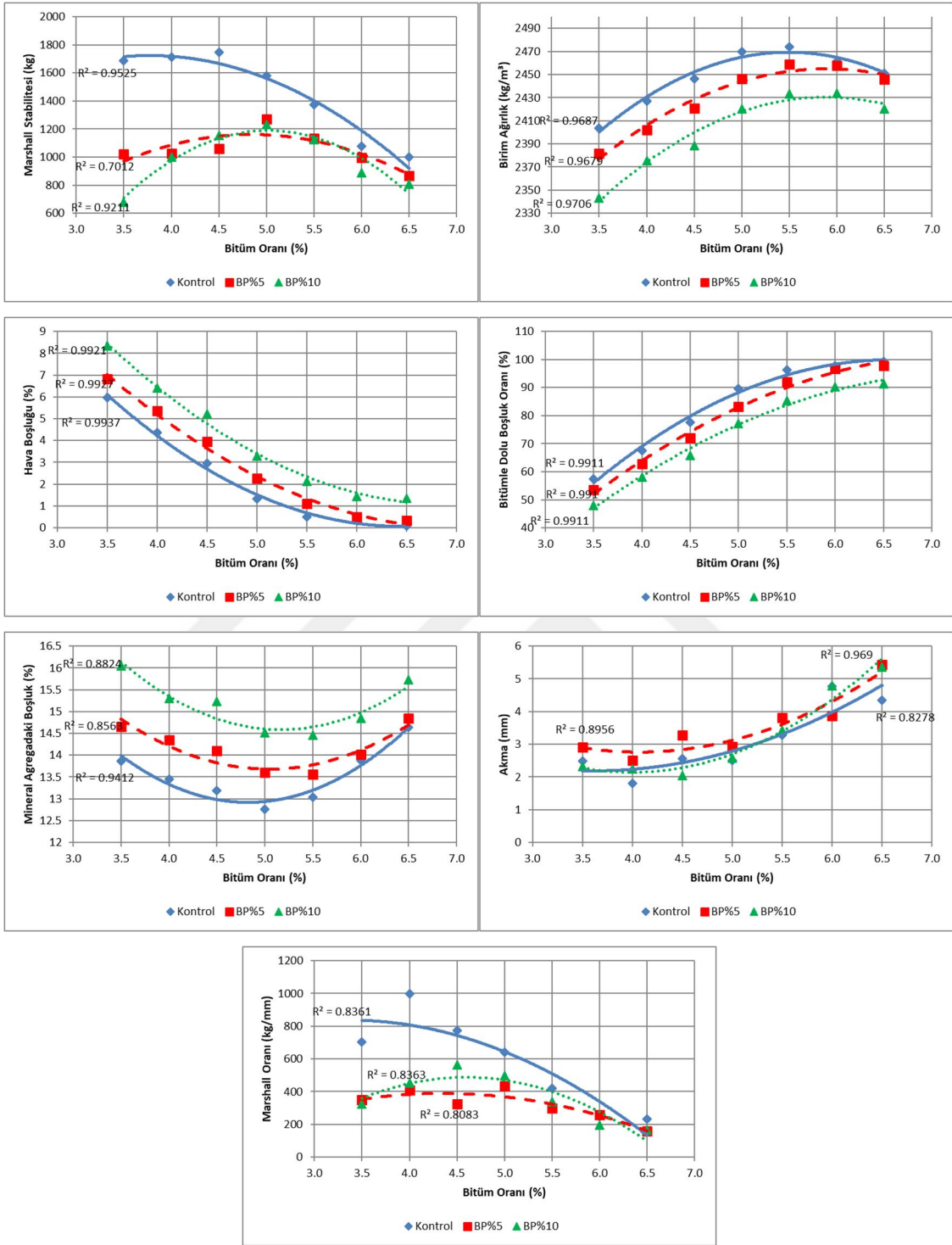
Farklı oranlarda ÖAB ile modifiye edilmiş asfalt beton numuneleri için Marshall tasarım test sonuçları Şekil 5.18' de verilmiştir. Tüm numuneler için Marshall Stabilite değerleri, şartnamede alt limit olan 900kg dan yüksektir. Ayrıca, akma değerleri de şartname sınırları dahilindedir (2-4 mm). Bununla birlikte, ÖAB eklenmesi akma değerlerini arttırmış ve örneklerin stabilitesini azaltmıştır. Bu sonuçlar ÖAB içeren örneklerin daha az rijitliğe sahip olduğunu göstermektedir. SB katkı maddesi ile modifiye edilmiş asfalt beton örneklerinin Marshall tasarım test sonuçları ise Şekil 5.19' da verilmiştir. Numuneler Marshall Stabilite şartname koşulunu karşılamaktadır. Karışımındaki SB oranı arttıkça, birim ağırlık değerleri azalmış hava boşlukları ise artmıştır. Akma değerleri şartname sınırları dahilinde ve kontrol numunelerinkine yakın değerler vermiştir. SB' u düşük bitüm oranına eklemek, stabiliteyi azaltmaktadır, yüksek bitüm oranlarında ise tüm numuneler benzer stabilite değerlerine sahip olmaktadır. Numunelerin MO değerleri içinde aynı gözlem sonuçları elde edilmiştir. BP katkı maddesi ile modifiye edilmiş asfalt beton numuneleri için Marshall tasarım testinin sonuçları da Şekil 5.20' de verilmiştir. BP katılmış numuneler genellikle SB içeren numunelerle benzer özellikler göstermiştir. Üç farklı bor içeren katkı malzemelerinin kendi aralarında değerlendirilmesi için, %10 katkı oranına sahip numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösterir grafikler çizilmiştir (Şekil 5.21). Grafiklerde görüldüğü gibi, ÖAB katkılı örnekler kontrol numunelerine düşük bitüm oranlarında; MS, Dp, Vh, Vf ve MO değerleri açısından en yakın sonuçlara sahiptir. SB ve BP modifiyeli numuneler (özellikle BP modifikasyonu) MS, Dp, Vf ve MO değerlerini belirgin şekilde azaltırken Vh ve VMA değerleri önemli ölçüde artmıştır. Ek olarak, bu örneklerin MO değerleri de düşüktür.



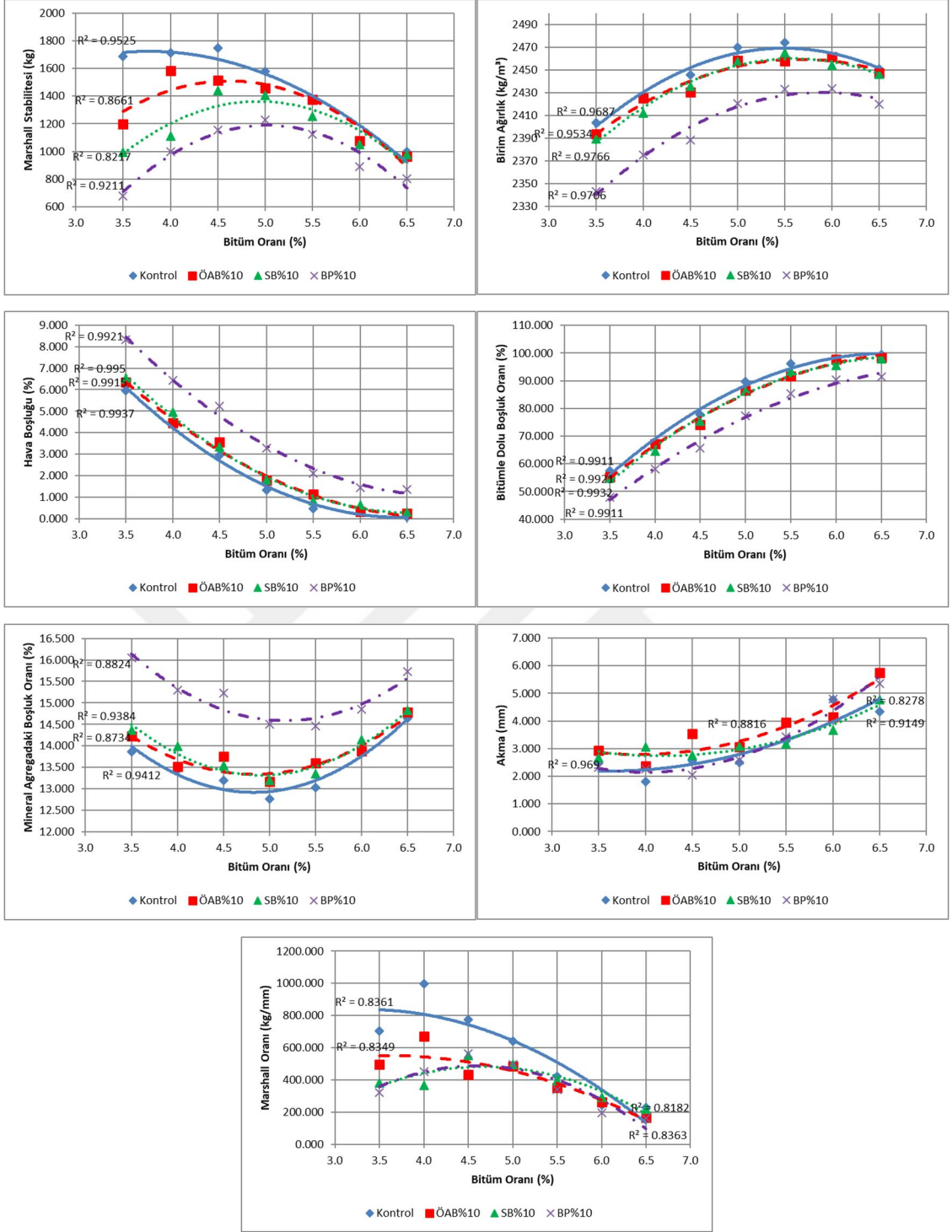
Şekil 5.18. 50/70 Penetrasyonlu bitümlle hazırlanmış farklı oranlardaki ÖAB ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.19. 50/70 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış farklı oranlardaki SB ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.20. 50/70 Penetrasyonlu bitümlle hazırlanmış farklı oranlardaki BP ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.21. 50/70 Penetrasyonlu bitümlle %10 oranında bor atıkları kullanılarak agrega modifiyesiyle oluşturulmuş numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

BP ve SB katkılı numunelerin Stabilitate değerleri atık bor oranı %5' den %10' a artırıldığında düşmektedir. Bununla beraber %10 ÖAB katkı oranında numunelerin Stabilitate değerleri de artmıştır. Bu sebeple hazırlanan %15 ÖAB katkılı numunelerde de

yine Stabilité değerleri azaldığından bu katkı oranı ÖAB' lar için üst limit olarak belirlenmiştir. Bor atıkları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise en yüksek Stabilité değerleri ÖAB katkılı numunelerde gözlenmiştir.

Gözlemler ve ölçümler kontrol ve modifiye edilmiş numunelerin fiziksel özellikleri üzerinden devam ettirilmiştir. Atık bor katkısının numunelerin Dp ve Vf değerlerini azalttığını Vh ve VMA değerlerini arttırdığı görülmektedir. Detaylı gözlemler ise ÖAB ve SB katkısı ile hazırlanan numunelerin fiziksel özelliklerinin kontrol numunelerinkilerine yakın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte BP modifiyesi ise Dp, Vh, Vf ve VMA değerlerini büyük ölçüde değiştirdiği gözlenmiştir. Bunun sebebinin Boraks Pentahidratın yapısında bulunan hidrat etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Akma sonuçlarına göre; ÖAB modifikasyonu numunelerin akma değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca düşük bitüm oranlarında (%3.5-%5) SB katkısı katkısı numunelerin akma değerlerini yükseltirken BP katkılı numunelerin akma değerleri kontrol numunelerine çok yakın değerler vermiştir. Yüksek bitüm oranlarında (%5-%6.5) ise bu durum değişmiş SB katkılı numunelerin değerleri kontrol numunelerinin değerlerine yaklaşırken BP katkılı numuneler ise akma değerlerini yükseltmeye başlamışlardır.

Bütün numunelerin OBO değerleri aşağıdaki tablo 5.43 ile verilmiştir. Görüldüğü üzere atık bor ilavesi numunelerin OBO oranı değerlerini arttırmaktadır ancak bu artışta bile standartlara uygun numuneler üretilebilmiştir. Numunelerin deformasyonları hakkında daha detaylı bilgi edinebilmek için OBO değerleri ile yeni numuneler hazırlanmış ve sünme deneyine tabi tutulmuştur.

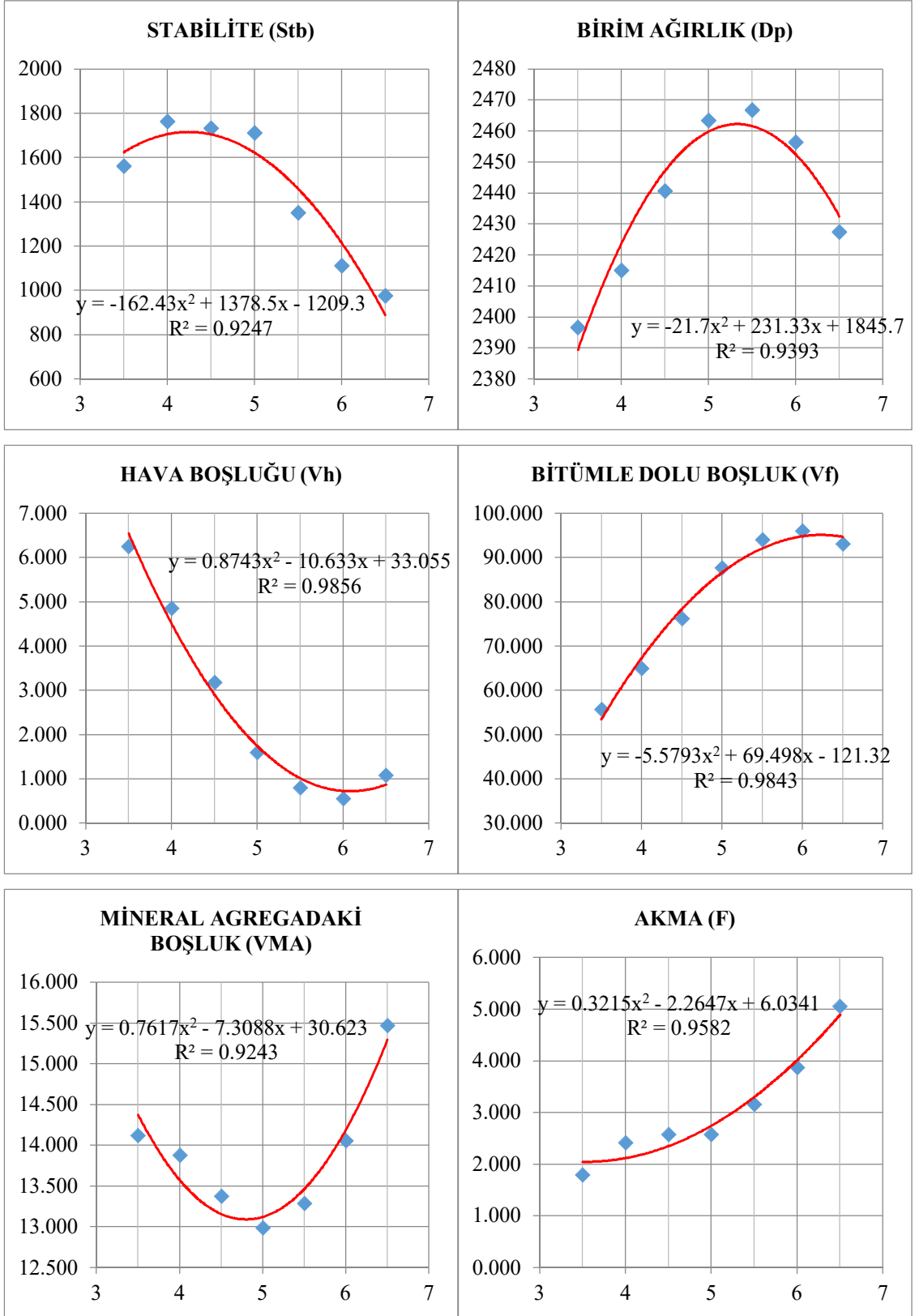
Tablo 5.43. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış agr. modifiyeli numunelerin OBO değerleri

Malzeme	Katkı Oranı (%)	OBO (%)
Kontrol	0	4.34
ÖAB	5	4.59
ÖAB	10	4.66
ÖAB	15	4.92
SB	5	4.53
SB	10	4.73
BP	5	4.85
BP	10	5.07

5.6.5. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol ve agrega modifiyeli numunelerin marshall tasarımı sonuçları

Tablo 5.44. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin marshall deney föyü

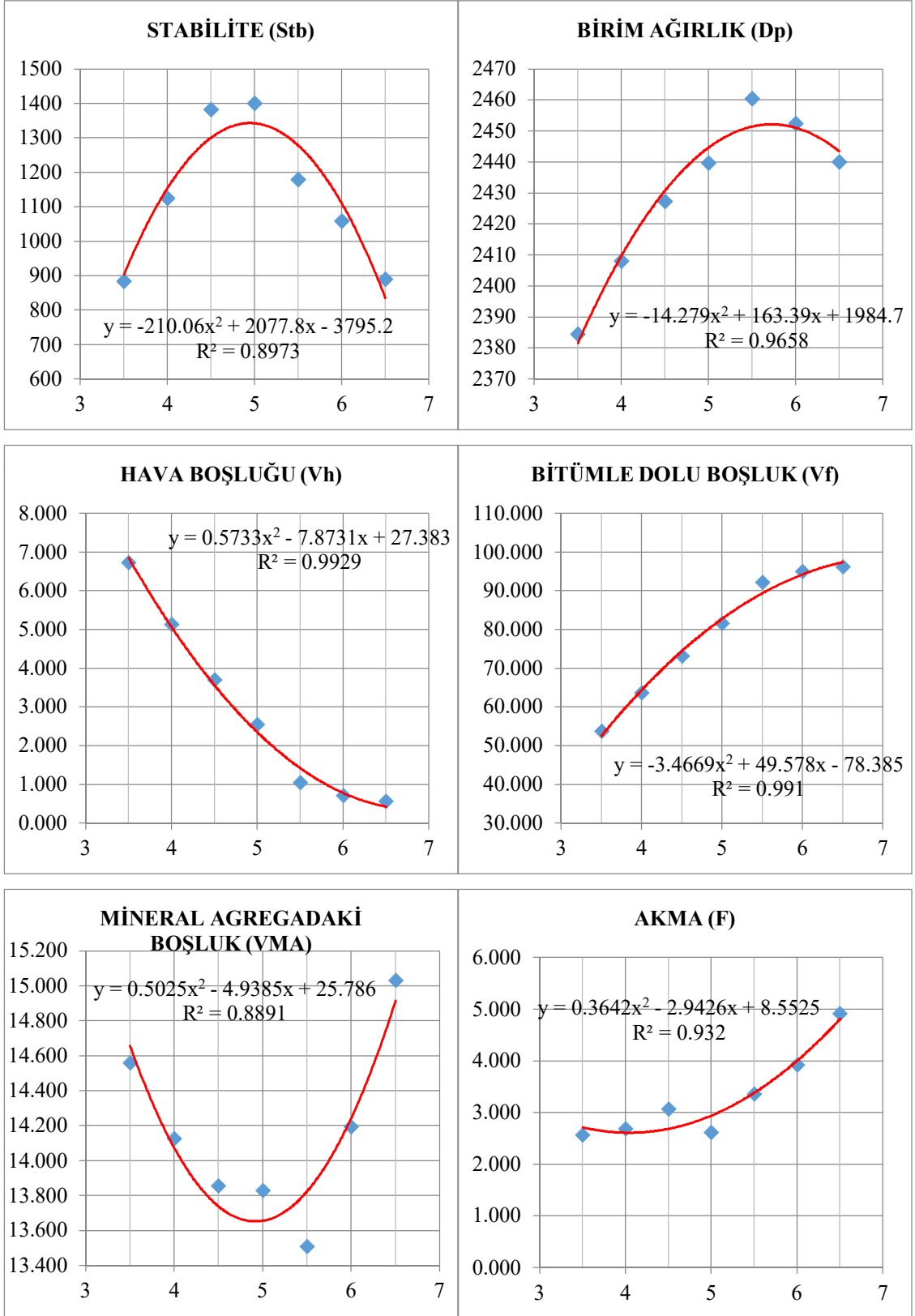
NO	BİTÜM		BİTÜM	YÜKSEKLİK (mm)	HAVA AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	5,1% 43,5% 5,5%	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gh)	AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)	1030.0 2697	kg/m ³ kg/m ³ kg/m ³	NOT:	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)	Deneyel	STABİLİTE (kg)		Düzeltilmiş Sıb	AKMA mm	M. O. MARSHALL ORANI
	Wa	Wb														Düzeltilmiş Faktörü	Sıb			
Agrega Ağırlığı		W _a /(100+W _a)		SUDA AĞIRLIK (gr)		HACİM (BA)		HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)		HAVA BOĞULUĞU (100-C-D)		AGREGA VMA		BOŞLUK ORANI (%)		Düzeltilme F.		TARİH: 28/11/18		
Wa		Wb		A		V		C		D		E		F		S			S	F
1	3.5	3.382	61.99	1170.5	683.4	487.1	2403	2557	7.889	86.101	6.010	13.899	6.010	2403	1547.6	1.03775	1606.046	1.911		
2	3.5	3.382	62.72	1180.1	685.9	494.2	2388	2557	7.840	85.560	6.600	14.440	6.600	2388	1516.4	1.01950	1545.990	1.714	901.978	
3	3.5	3.382	61.72	1167.4	680.9	486.5	2400	2557	7.878	85.979	6.143	14.021	6.143	2400	1470.4	1.04563	1537.527	1.762	872.603	
4	4.0	3.846	61.69	1184.5	694.4	490.1	2417	2539	9.025	86.181	4.794	14.120	55.746	2397	1815.9	1.04656	1563.188	1.796	871.668	
5	4.0	3.846	61.75	1174.9	688.3	486.6	2415	2539	9.016	86.097	4.887	13.903	64.851	2415	1571.5	1.04469	1641.714	1.761	695.884	
6	4.0	3.846	61.46	1175.9	688.8	487.1	2414	2539	9.015	86.082	4.903	13.918	64.769	2414	1665.5	1.05375	1755.023	2.778	631.758	
7	4.5	4.306	61.21	1185.4	699.7	485.7	2441	2521	10.204	86.611	3.185	13.880	64.975	2415	1609.1	1.06156	1765.732	2.423	753.301	
8	4.5	4.306	61.24	1183.1	698.4	484.7	2441	2521	10.205	86.622	3.174	13.376	76.278	2441	1623.7	1.06063	1722.139	3.288	523.765	
9	4.5	4.306	61.59	1174.6	693.4	481.2	2441	2521	10.205	86.625	3.170	13.375	76.239	2441	1688.3	1.04969	1772.238	2.468	712.887	
10	5.0	4.762	60.65	1185.6	704.6	481.0	2465	2504	11.396	87.056	1.549	12.944	88.036	2465	1648.6	1.07906	1778.912	2.595	685.515	
11	5.0	4.762	60.86	1190.5	707.5	483.0	2465	2504	11.395	87.054	1.551	12.946	88.019	2465	1545.5	1.07250	1657.529	2.369	699.970	
12	5.0	4.762	60.56	1182.0	701.7	480.3	2461	2504	11.378	86.918	1.705	13.082	86.970	2461	1573.8	1.08188	1702.695	2.786	611.161	
13	5.5	5.213	61.27	1195.7	711.4	484.3	2469	2487	12.496	86.786	0.718	12.981	87.675	2464	1281.2	1.05969	1713.045	2.593	665.549	
14	5.5	5.213	60.71	1192.0	708.5	483.5	2465	2487	12.478	86.660	0.861	13.340	93.543	2465	1293.5	1.07719	1393.356	3.265	426.755	
15	5.5	5.213	61.38	1198.6	713.2	486.4	2466	2487	12.483	86.693	0.824	13.307	93.972	2467	1239.6	1.05625	1309.293	3.331	393.063	
16	6.0	5.660	61.24	1198.5	710.2	488.3	2454	2470	13.468	85.870	0.642	14.130	95.456	2454	960.5	1.06063	1016.704	3.985	255.635	
17	6.0	5.660	61.04	1196.7	709.9	486.8	2458	2470	13.510	86.005	0.486	13.995	96.530	2458	1033.3	1.06888	1155.801	3.120	370.449	
18	6.0	5.660	61.16	1189.3	705.2	484.1	2457	2470	13.501	85.950	0.549	14.050	96.090	2457	1098.4	1.06313	1167.763	4.532	257.675	
19	6.5	6.103	61.56	1198.7	705.5	483.2	2430	2454	14.402	84.631	0.967	15.369	93.708	2430	955.3	1.05063	1114.096	3.879	294.596	
20	6.5	6.103	61.69	1197.4	701.1	498.3	2407	2454	14.263	83.814	1.923	16.186	88.118	2407	830.1	1.04656	973.388	4.931	197.402	
21	6.5	6.103	61.66	1197.8	707.9	489.9	2445	2454	14.468	85.137	0.375	15.472	93.102	2445	912.4	1.04750	965.783	4.102	233.004	
														2427			977.602	5.063	197.804	



Şekil 5.22. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.45. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

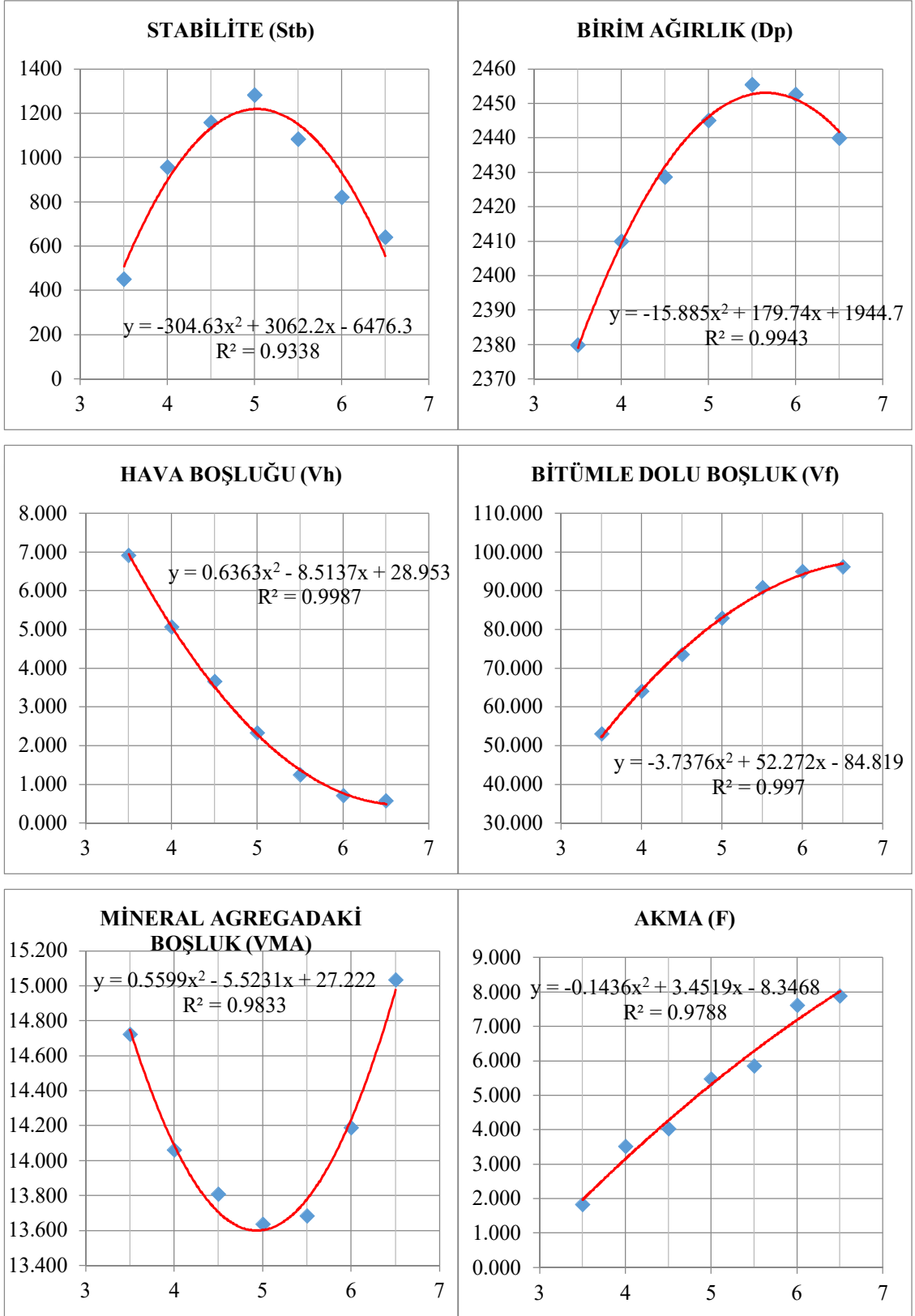
NO	BİTÜM %	BİTÜM %	YÜKSEKLİK (mm)	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2717.0	KABA AGREGA YÜZDİSİ	51.0%	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)		1030.0	kg/m ³	kg/m ³	NOT:	5% ÖAB	TARİH: 09/12/18			
							İNCE AGREGA YÜZDİSİ	AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)						2697	5% ÖAB	AKWA	M.O.
BİTÜM %	Wb	W _a	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Adfalt	D	E	VMA	Agrega	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)	Düzeltilmiş Sbt	AKWA	M.O.	
																	W _a /(100+W _b)
Wa	Wb	W _a	A	B	V	Dp	C	D	E	VMA	Agrega	VI	DP	S	Düzeltilmiş Sbt	Stb	Stb/F
1	3.5	3.382	1171.3	681.4	489.9	2391	7.850	85.667	6.483	14.333	54.767	54.767	2391	861.9	882.764	2.574	342.964
2	3.5	3.382	1172.3	680.2	492.1	2382	7.821	85.357	6.822	14.643	53.412	53.412	2382	693.7	1.02050	2.441	290.018
3	3.5	3.382	1166.2	676.3	489.9	2380	7.815	85.284	6.880	14.706	53.145	53.145	2380	1029.9	1.03475	2.706	393.830
4	4.0	3.846	1177.6	688.8	488.8	2409	8.986	85.907	5.037	14.093	63.833	63.833	2409	1108.3	1.03125	2.246	342.267
5	4.0	3.846	1177.8	689.2	488.6	2411	9.001	85.956	5.042	14.044	64.096	64.096	2411	1158.4	1.03575	2.246	342.267
6	4.0	3.846	1168.6	682.7	485.9	2405	8.981	85.759	5.260	14.241	63.062	63.062	2405	997.9	1.03575	2.236	462.240
7	4.5	4.306	1176.7	692.6	484.1	2431	10.162	86.260	3.578	13.740	73.959	73.959	2431	1466.7	1.05281	2.965	515.563
8	4.5	4.306	1173.7	689.2	484.5	2422	10.128	85.989	3.903	14.031	72.182	72.182	2422	1253.3	1.05563	2.484	530.496
9	4.5	4.306	1182.2	695.5	486.7	2429	10.155	86.200	3.645	13.900	73.588	73.588	2429	1015.0	1.04156	3.741	282.801
10	5.0	4.762	1179.0	696.8	482.2	2445	11.304	86.356	2.340	13.644	82.847	82.847	2445	1352.3	1.07656	3.157	442.887
11	5.0	4.762	1176.4	693.5	482.9	2436	11.263	86.040	2.697	13.960	80.680	80.680	2436	1247.2	1.07844	2.354	571.388
12	5.0	4.762	1180.6	696.4	484.2	2438	11.273	86.116	2.612	13.884	81.189	81.189	2438	1313.1	1.06813	2.358	594.805
13	5.5	5.213	1188.7	705.8	482.9	2462	12.459	86.528	1.013	13.829	81.572	81.572	2440	1174.0	1.08125	2.623	542.451
14	5.5	5.213	1190.1	706.1	484.0	2459	12.445	86.433	1.122	13.567	81.733	81.733	2459	1041.6	1.07031	3.746	297.618
15	5.5	5.213	1186.0	704.1	481.9	2487	12.457	86.511	1.033	13.489	82.343	82.343	2461	1080.0	1.06969	2.878	401.406
16	6.0	5.680	1196.9	708.3	488.6	2450	13.462	85.702	0.836	13.510	82.186	82.186	2461	915.3	1.05281	3.363	355.158
17	6.0	5.680	1191.9	705.8	488.1	2452	13.475	85.783	0.742	14.217	84.780	84.780	2452	1034.4	1.06781	3.727	296.362
18	6.0	5.680	1189.0	704.9	484.1	2456	13.488	85.928	0.574	14.072	85.917	85.917	2456	1042.6	1.06406	3.922	270.489
19	6.5	6.103	1193.8	705.0	488.8	2442	14.472	85.004	0.484	14.196	84.951	84.951	2453	918.6	1.04969	5.288	182.338
20	6.5	6.103	1191.9	703.1	488.8	2438	14.449	84.903	0.642	15.091	85.744	85.744	2442	838.2	1.05000	4.689	187.698
21	6.5	6.103	1187.8	700.9	486.9	2440	14.455	84.947	0.598	15.053	86.029	86.029	2440	783.8	1.05938	4.777	173.811
									0.575	15.033	96.179	96.179	2440	891.538	4.918	181.282	



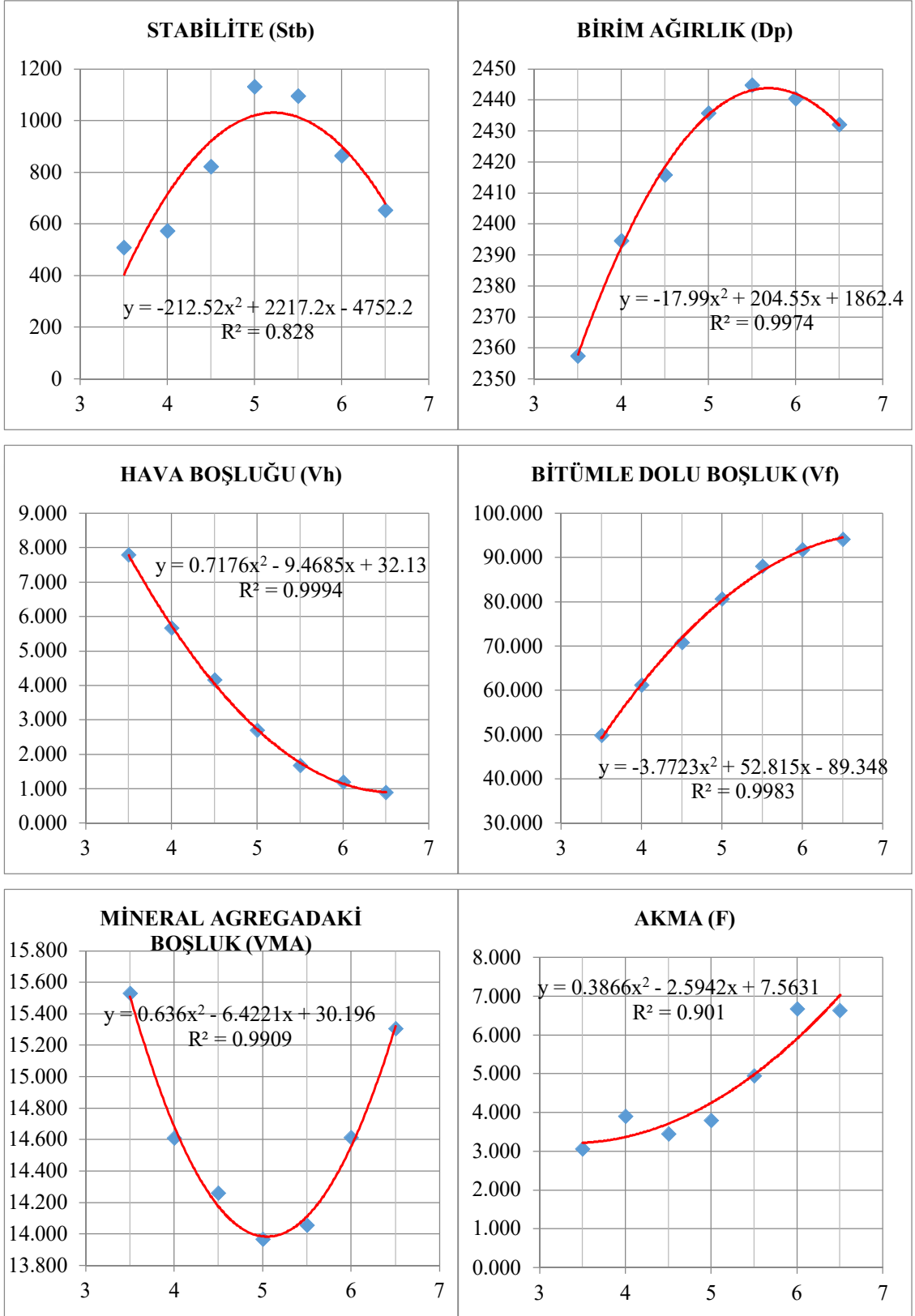
Şekil 5.23. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %5 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.46. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

NO	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		KABA AGREGA YÜZDİSİ		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp):		HACİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp):		10% ÖAB		TARİH: 12/12/18					
	Wa	Wb	İnce	Yükseklik	2674.0	2685.0	2674.0	2685.0	NOT:	3 NOLU NUMUNE AKMA DEĞERİNDEN DOLAYI ORTALAMADAN ÇIKARILMIŞTIR.	AKMA	M.O.				
Agrega Ağırlığına Göre	Yükseklik (mm)	BİTÜM %	HACİM %	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (kg/m³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (kg/m³)	MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)	Ağırlık	D	E	VMA	Düzeltilmiş S	Düzeltilmiş S	Düzeltilmiş S			
														Wb/(100+Wa)	Wb	Wb
Wa	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb	Wb			
1	3.5	3.382	62.16	1167.6	676.5	491.1	2378	7.006	52.698	7.006	2378	347.5	1.03350	359.161	1.520	236.290
2	3.5	3.382	62.16	1167.6	676.5	491.1	2378	7.006	52.698	7.006	2378	347.5	1.03350	359.161	1.520	236.290
3	3.5	3.382	62.16	1167.6	676.5	491.1	2378	7.006	52.698	7.006	2378	347.5	1.03350	359.161	1.520	236.290
4	4.0	3.846	62.16	1167.6	676.5	491.1	2378	7.006	52.698	7.006	2378	347.5	1.03350	359.161	1.520	236.290
5	4.0	3.846	62.16	1167.6	676.5	491.1	2378	7.006	52.698	7.006	2378	347.5	1.03350	359.161	1.520	236.290
6	4.0	3.846	62.16	1167.6	676.5	491.1	2378	7.006	52.698	7.006	2378	347.5	1.03350	359.161	1.520	236.290
7	4.5	4.306	61.52	1179.7	691.9	487.8	2418	7.122	53.510	7.122	2418	406.5	1.02450	417.537	1.600	255.022
8	4.5	4.306	61.52	1179.7	691.9	487.8	2418	7.122	53.510	7.122	2418	406.5	1.02450	417.537	1.600	255.022
9	4.5	4.306	61.52	1179.7	691.9	487.8	2418	7.122	53.510	7.122	2418	406.5	1.02450	417.537	1.600	255.022
10	5.0	4.762	61.02	1185.7	701.3	484.4	2448	7.250	54.261	7.250	2448	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
11	5.0	4.762	61.02	1185.7	701.3	484.4	2448	7.250	54.261	7.250	2448	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
12	5.0	4.762	61.02	1185.7	701.3	484.4	2448	7.250	54.261	7.250	2448	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
13	5.5	5.213	60.88	1189.3	705.3	484.0	2457	7.250	54.261	7.250	2457	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
14	5.5	5.213	60.88	1189.3	705.3	484.0	2457	7.250	54.261	7.250	2457	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
15	5.5	5.213	61.10	1192.6	706.3	486.3	2452	7.250	54.261	7.250	2452	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
16	6.0	5.660	60.46	1184.5	701.0	483.5	2450	7.250	54.261	7.250	2450	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
17	6.0	5.660	60.93	1189.4	704.5	484.9	2453	7.250	54.261	7.250	2453	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
18	6.0	5.660	61.44	1187.0	703.6	483.4	2456	7.250	54.261	7.250	2456	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
19	6.5	6.103	61.81	1197.5	706.0	491.5	2436	7.250	54.261	7.250	2436	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
20	6.5	6.103	61.67	1191.6	702.9	488.7	2438	7.250	54.261	7.250	2438	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900
21	6.5	6.103	61.20	1190.2	703.5	486.7	2445	7.250	54.261	7.250	2445	420.3	1.02450	439.073	1.733	286.900



Şekil 5.24. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %10 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri



Şekil 5.25. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış %15 ÖAB agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.48. 70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış kontrol numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.24	1715.44	1708.06
Birim Ağırlık	maks	5.33	2462.22	2445.65
Hava Boşluğu	4	4.15	4.00	3.03
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.11	70.00	77.59
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.33
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.53
OBO		4.46		

Tablo 5.49. 70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %5 ÖAB agr. modifyeli numunelerin OBO hesabı

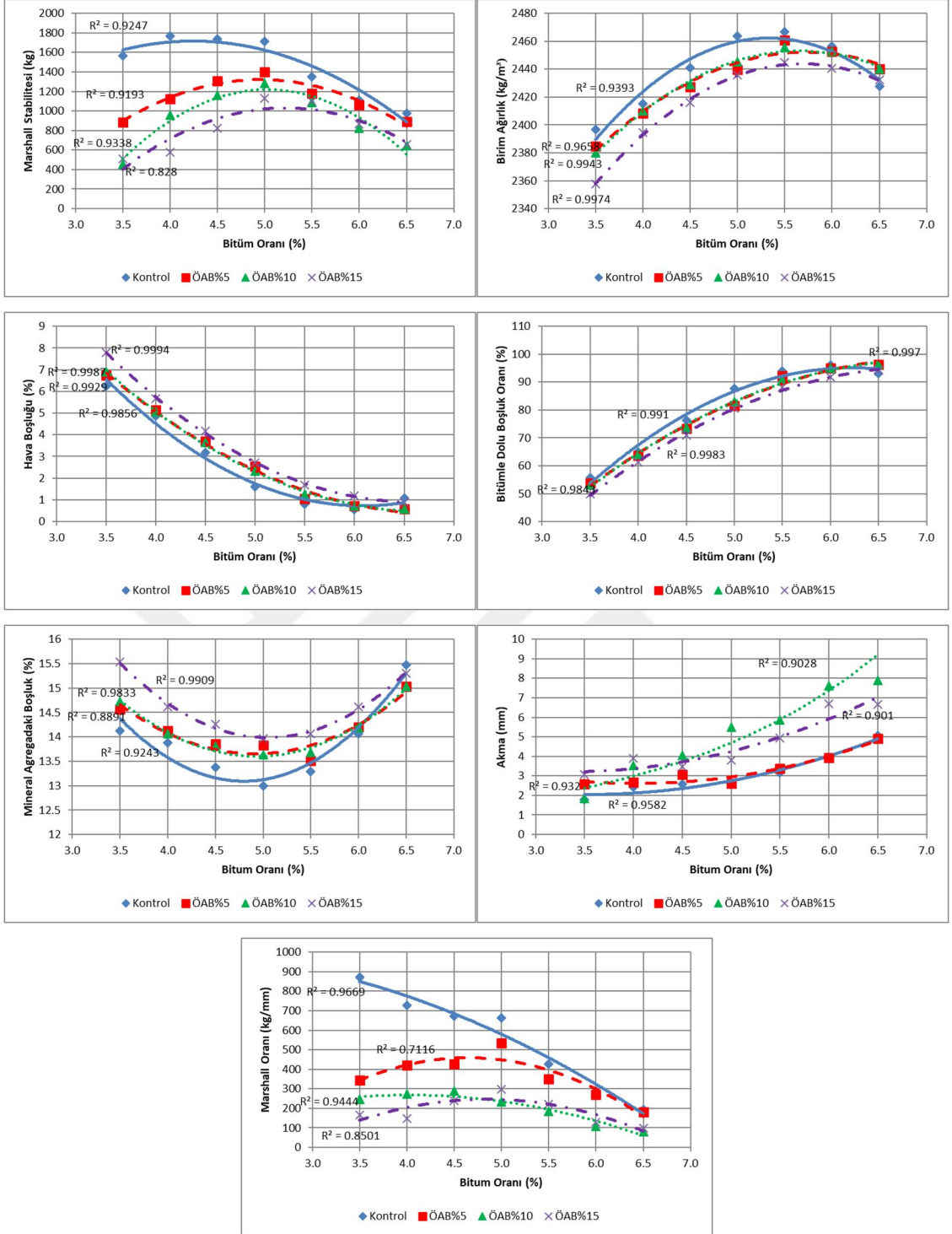
Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	4.96	1321.13	1317.50
Birim Ağırlık	maks	5.72	2452.10	2440.55
Hava Boşluğu	4	4.34	4.00	2.75
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.26	70.00	80.07
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.83
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.66
OBO		4.82		

Tablo 5.50. 70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %10 ÖAB agr. modifyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	5.03	1219.16	1206.16
Birim Ağırlık	maks	5.66	2453.14	2441.99
Hava Boşluğu	4	4.34	4.00	2.70
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.26	70.00	80.29
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	4.95
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.61
OBO		4.82		

Tablo 5.51. 70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış %15 ÖAB agr. modifyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oranı	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	5.22	1030.76	1016.20
Birim Ağırlık	maks	5.69	2443.84	2434.25
Hava Boşluğu	4	4.52	4.00	2.83
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.40	70.00	79.73
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	4.20
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.99
OBO		4.95		



Şekil 5.26. 70/100 Penetrasyonlu bitümle hazırlanmış farklı oranlardaki ÖAB ile agrega modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan numunelerde elde edilen ümit veren sonuçların ardından 70/100 penetrasyonlu bitüm ile çalışmalar devam ettirilmiştir. Çalışmalar öncelikle daha yüksek performans gösteren ÖAB katkıli numunelerle başlatılmıştır. Ancak sonuçlar 70/100 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan numunelerin son derece yetersiz olduğunu göstermiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile yapılan çalışmalarda özellikle dayanım anlamında ÖAB katkıli numuneler diğer atık bor ilaveli numunelerden daha yüksek sonuçlar verdiğiinden BP ve SB katkısı ile yeni numuneler hazırlanılmasına gerek görülmemiştir.

Bu serideki numuneler özellikle yüksek katkı oranlarında son derece yetersizdir. Özellikle %10 ve %15 katkı oranlarında stabilite değerleri bir hayli düşmüş akma değerleri ise şartname limitlerinin çok üzerine çıkmıştır. Bu durum 70/100 penetrasyonlu bitümün düşük yumuşama noktası değerinden kaynaklanmaktadır. 60°C de yarım saat bekletilen numunelerin içindeki bitümün 43°C olan yumuşama noktası değeri numunelerin erkenden bozulmasına sebep olmuştur. Dolayısı ile bu atıkların düşük hava performansı ayrıca araştırılmalıdır ancak Marshall stabilite ve akma deneyinde yeterli performans gösteremeyecekleri aşikardır.

70/100 penetrasyonlu bitümün agrega modifiyesi ile oluşturulan numunelerde önceki katkılar gibi OBO değerlerini kontrol numunelerine göre artırmıştır.

Numunelerin kendi aralarındaki incelemeleri ise katkının Stabilite, Dp, Vf ve MO değerlerini düşürdüğünü, Vh, VMA ve akma değerlerini artırdığını göstermiştir (Şekil 5.26).

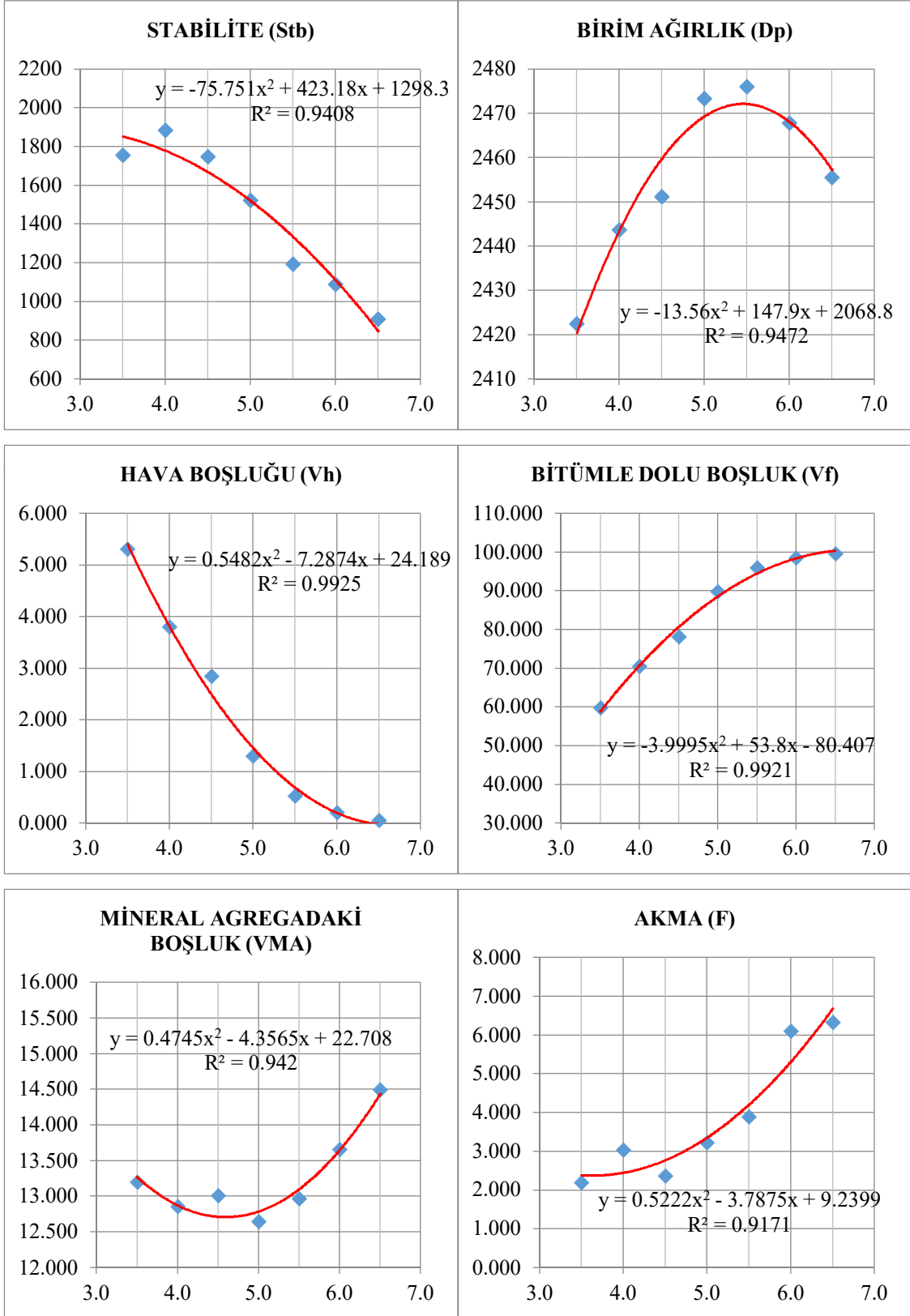
Tablo 5.52. 70/100 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış agr. modifiyeli numunelerin OBO değerleri

Malzeme	Katkı Oranı (%)	OBO (%)
Kontrol	0	4.46
ÖAB	5	4.82
ÖAB	10	4.82
ÖAB	15	4.95

5.6.6. 50/70 Penetrasyonlu bitümün modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin marshall tasarımı sonuçları

Tablo 5.53. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin marshall deney föyü

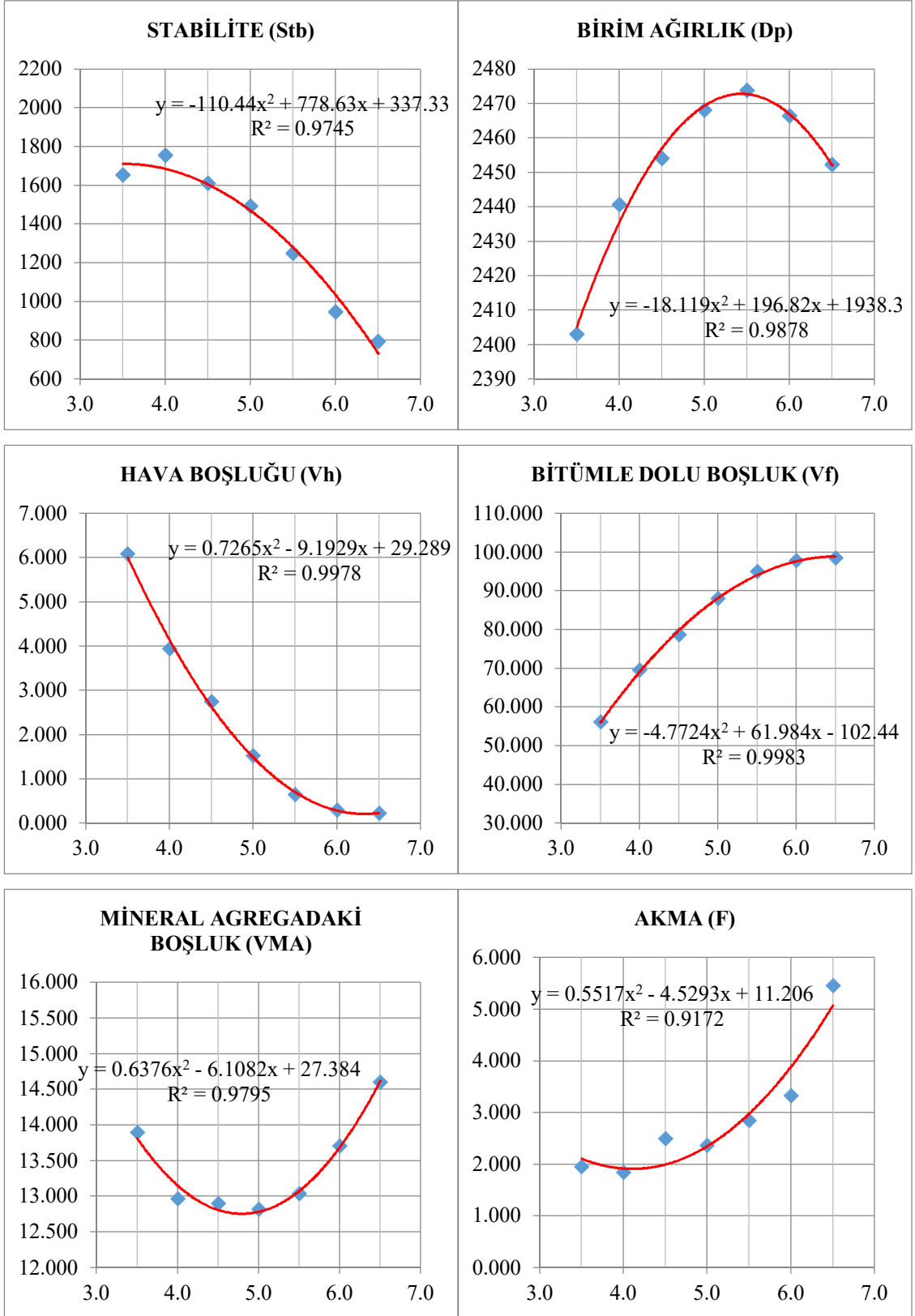
NO	BITÜM %		YÜKSEKLİK (mm)	KG/M ³	KAMA AGREGA YÜZDESI	İNCE AGREGA YÜZDESI	51.0% 43.5% 5.5%	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)	AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)	1036.0 2687	KG/M ³ KG/M ³	NOT:	TARİH: 28/12/17	M.A.O.						
	Wa	Wb												AKMA	MARSHALL ORANI					
BİRİM AĞIRLIK			BİRİM AĞIRLIK		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (Kp)		AKMA									
Wa	Wb	Wc	A	B	SUDA AĞIRLIK (gr)	HACİM	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)	AGREGA	HAVA BOĞULUĞU	100-C-D	VT	Toplam Kanım	Vh	Dp	Deneyel	Düzeltilmiş Faktörü	Düzeltilmiş Sıb	Sıb	9'Düzeltilme F.
Agrega Adığına Göre	Wa	Wb	A	B	SUDA AĞIRLIK (gr)	HACİM	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)	AGREGA	HAVA BOĞULUĞU	100-C-D	VT	Toplam Kanım	Vh	Dp	S	Düzeltilmiş Faktörü	Düzeltilmiş Sıb	Sıb	9'Düzeltilme F.
1	3.5	3.382	61.86	1169.3	689.0	480.3	2435	7.931	87.230	4.839	100-D	62.109	4.839	2435	1743.9	1.04125	1815.855	2.651	684.970	
2	3.5	3.382	61.47	1167.3	683.6	483.7	2413	7.862	86.469	5.669	100-C-D	58.103	5.669	2413	1617.0	1.05344	1703.375	1.907	893.222	
3	3.5	3.382	62.07	1177.0	690.6	486.4	2420	7.883	86.703	5.413	100-C-D	59.289	5.413	2420	1688.7	1.03575	1749.019	2.019	866.280	
4	4.0	3.846	61.09	1171.0	693.2	477.8	2451	9.081	87.392	3.527	100-C-D	70.440	3.527	2451	2423	1.06631	1756.083	2.192	814.824	
5	4.0	3.846	61.79	1181.9	696.4	485.5	2434	9.020	86.806	4.173	100-C-D	70.925	4.173	2434	2446	1.06344	1812.768	2.329	866.682	
6	4.0	3.846	60.82	1164.8	688.6	476.2	2446	9.063	87.221	3.715	100-C-D	70.925	3.715	2446	1659.1	1.07375	1781.435	4.215	422.642	
7	4.5	4.306	61.45	1184.6	702.0	482.6	2455	10.183	87.109	2.708	100-C-D	78.983	2.708	2455	2444	1.05406	1886.425	3.041	670.648	
8	4.5	4.306	61.03	1181.5	689.9	481.6	2459	10.178	87.061	2.781	100-C-D	78.660	2.781	2453	1676.3	1.06719	1788.943	2.540	704.308	
9	4.5	4.306	60.89	1173.5	683.7	479.8	2446	10.147	86.796	3.057	100-C-D	78.846	3.057	2446	1581.6	1.07781	1704.643	2.217	768.836	
10	5.0	4.762	60.12	1176.9	701.4	475.5	2475	11.355	87.416	1.229	100-C-D	89.746	1.229	2475	2475	1.09563	1478.528	3.318	444.704	
11	5.0	4.762	60.47	1192.6	710.1	482.5	2472	11.339	87.297	1.363	100-C-D	89.234	1.363	2472	1404.8	1.08469	1523.730	2.719	560.401	
12	5.0	4.762	60.26	1178.8	702.2	476.6	2473	11.347	87.356	1.298	100-C-D	89.736	1.298	2473	1441.3	1.09125	1572.782	3.632	433.035	
13	5.5	5.213	60.48	1190.6	709.5	481.1	2475	12.429	86.990	0.580	100-C-D	95.539	0.580	2475	1102.2	1.08438	1195.216	3.736	319.919	
14	5.5	5.213	60.28	1185.9	707.1	478.8	2477	12.440	87.063	0.497	100-C-D	96.157	0.497	2477	1111.3	1.09053	1212.003	4.227	286.729	
15	5.5	5.213	60.87	1205.1	718.5	486.6	2477	12.438	87.055	0.507	100-C-D	95.927	0.507	2476	1087.1	1.07219	1176.313	3.703	317.665	
16	6.0	5.660	60.67	1195.2	711.1	484.1	2469	13.463	86.376	0.181	100-C-D	98.821	0.181	2469	1077.0	1.07844	1161.506	7.153	462.380	
17	6.0	5.660	60.84	1194.8	710.4	484.4	2467	13.451	86.294	0.266	100-C-D	98.153	0.266	2467	942.0	1.07313	1010.903	4.568	221.301	
18	6.0	5.660	61.21	1200.5	714.1	486.4	2468	13.459	86.349	0.192	100-C-D	98.593	0.192	2468	1035.5	1.06156	1099.269	6.612	166.294	
19	6.5	6.103	61.36	1195.4	708.5	486.9	2455	14.436	85.490	0.074	100-C-D	98.516	0.074	2455	802.4	1.05688	1090.359	6.111	183.312	
20	6.5	6.103	61.26	1195.7	709.0	486.7	2457	14.445	85.547	0.008	100-C-D	99.947	0.008	2457	911.7	1.06000	966.432	7.191	134.395	
21	6.5	6.103	61.18	1194.3	707.8	486.5	2455	14.434	85.482	0.084	100-C-D	99.424	0.084	2455	865.8	1.06250	919.956	5.834	157.689	
												14.494	99.621	0.055	2456			911.481	6.333	144.688



Şekil 5.27. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.54. %5 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

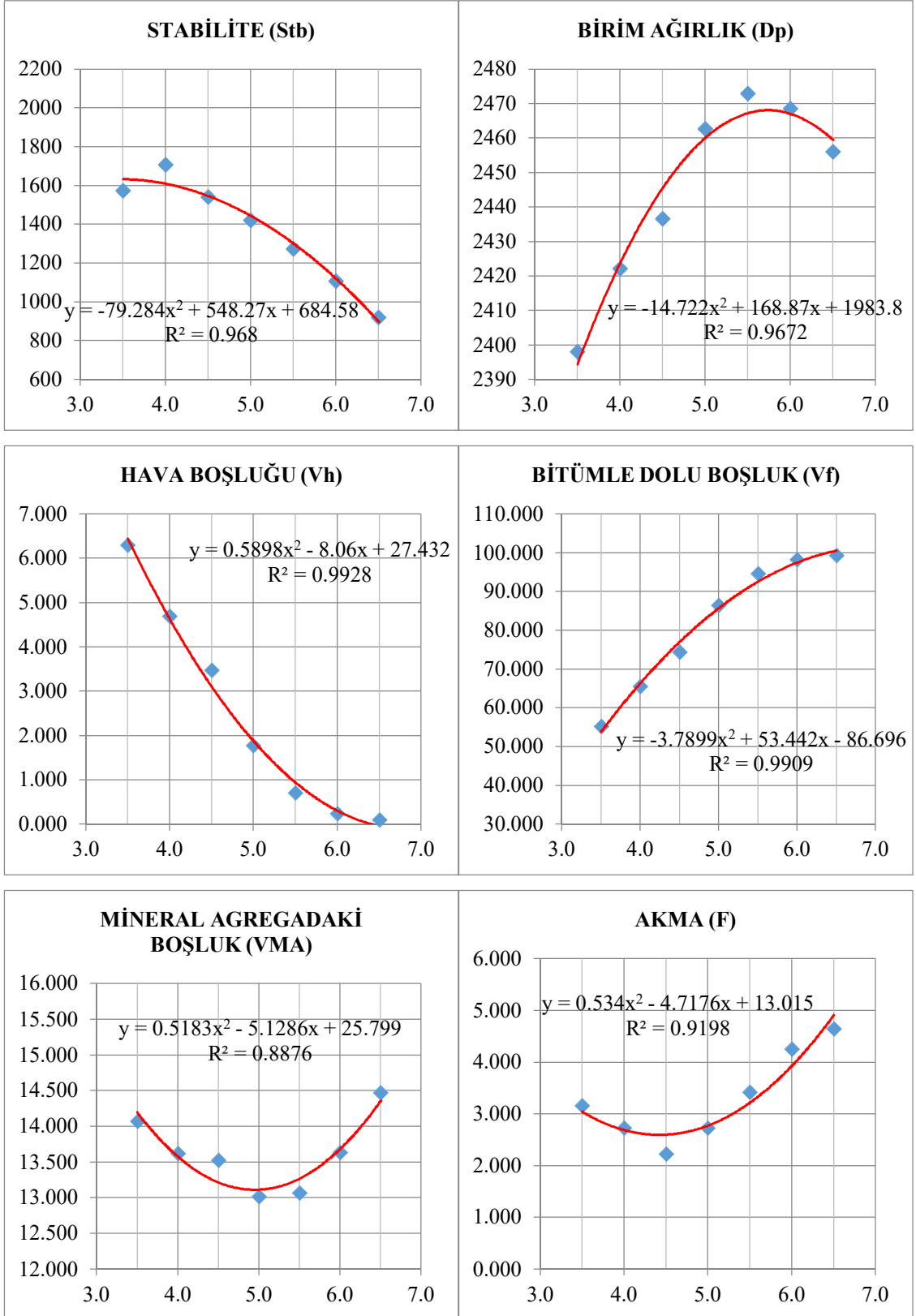
KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2717.0		kg/m³		1041.0		kg/m³		NOTI: %5 ÖAB MODİFİYELİ		TARİHİ: 15/12/17														
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2674.0		kg/m³		2697		kg/m³																		
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2688.0		kg/m³																						
NO	BİTÜM %	YÜKSEKLİK (mm)	Wb	Wc	SUDA AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm³)	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)	HACİM % (Toplama Göbe)			BİRİM AĞIRLIK (kg/m³)	STABİLİTE (%)		M.O. MARSHALL ORANI												
								Adfilit C	Agrega D	Hava Boşluğu E		Dozaj S	Düzeltilmiş Sbt		AKMA mm F											
KABA AGREGA YÜZDİSİ		İNCE AGREGA YÜZDİSİ		FİLLER YÜZDİSİ		HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)		BOŞLUK ORANI (%)			Toplam Karanım Vh	Dp			Sbt											
51,0%		43,5%		5,5%		MAKS. TEORİK ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m³)		Adifilit Dolu Vt					100-100/g/h	S												
								CVMA*100			100-100/g/h	S					Sbt									
								Wb*100/Gb					100-C-D	S				Sbt								
1	3.5	3.382	62.00	1170.2	681.8	488.4	2396	7.783	85.849	6.367	14.151	55.003			1594.1	1.03750	1653.902		2.568	644.043						
2	3.5	3.382	62.01	1171.1	685.2	485.9	2410	7.829	86.358	5.813	13.642	57.389	1728.6	1.03725	1793.014	1.063	1655.599									
3	3.5	3.382	62.25	1175.8	686.5	488.3	2403	7.806	86.102	6.092	13.898	56.166	1470.3	1.03125	1516.277	2.225	681.473									
4	4.0	3.846	60.89	1169.9	690.9	479.0	2442	9.024	87.081	3.885	13.697	56.186	2403	1.07156	1654.398	1.959	893.705									
5	4.0	3.846	60.87	1172.5	692.4	480.1	2442	9.023	87.085	3.892	12.909	69.903	2442	1.07219	1764.253	2.112	835.347									
6	4.0	3.846	61.33	1169.0	689.5	479.5	2438	9.007	86.933	4.059	13.067	68.934	2438	1.05781	1674.953	1.889	886.687									
7	4.5	4.306	61.09	1183.8	700.8	483.0	2451	10.139	86.978	2.884	12.964	69.587	2441	1.06531	1757.755	1.861	968.179									
8	4.5	4.306	60.62	1174.3	696.4	477.9	2457	10.165	87.201	2.635	13.022	77.856	2451	1.08000	1628.493	2.208	737.542									
9	4.5	4.306	60.99	1182.6	700.8	481.8	2455	10.154	87.106	2.740	12.799	79.414	2457	1.08944	1629.584	2.989	543.194									
10	5.0	4.762	60.63	1184.6	702.9	481.7	2459	11.249	86.856	1.895	12.905	78.672	2454	1.07969	1613.819	2.501	656.457									
11	5.0	4.762	60.50	1192.6	710.4	482.2	2473	11.314	87.352	1.335	13.144	85.584	2459	1.08375	1444.813	2.856	505.887									
12	5.0	4.762	60.35	1185.7	706.1	479.6	2472	11.309	87.317	1.374	12.648	89.448	2472	1.08844	1442.510	1.862	762.426									
13	5.5	5.213	60.51	1191.6	709.9	481.7	2474	12.388	86.955	0.857	12.823	88.087	2472	1.08844	1494.268	2.365	643.273									
14	5.5	5.213	60.14	1189.6	709.1	480.5	2476	12.398	87.026	0.576	13.045	94.967	2474	1.08344	1197.605	2.606	459.557									
15	5.5	5.213	60.61	1196.3	712.4	483.9	2472	12.381	86.901	0.718	12.974	95.563	2476	1.08500	1266.101	2.867	441.612									
16	6.0	5.660	60.83	1196.9	711.7	485.2	2467	13.413	86.303	0.284	13.099	94.517	2472	1.08031	1285.138	3.073	418.203									
17	6.0	5.660	60.86	1196.3	711.5	484.8	2468	13.418	86.331	0.252	13.039	95.016	2474	1.07344	1249.614	2.849	439.790									
18	6.0	5.660	60.81	1195.1	710.9	485.2	2465	13.404	86.245	0.351	13.697	97.926	2467	1.07900	953.181	3.228	295.285									
19	6.5	6.103	61.37	1198.0	710.2	487.8	2456	14.399	85.518	0.083	13.669	98.158	2468	1.07250	973.782	3.224	301.108									
20	6.5	6.103	61.77	1202.1	710.8	491.3	2447	14.345	85.200	0.455	13.755	97.450	2465	1.07406	917.808	3.542	259.121									
21	6.5	6.103	61.57	1198.4	710.1	488.3	2454	14.389	85.459	0.152	13.707	97.845	2467	1.05656	948.257	3.335	285.171									
																		791.7	1.05656	836.487	6.376	131.193				
																			688.0	1.04406	718.316	4.904	146.476			
																			791.1	1.05031	830.886	5.101	162.889			
																								795.233	5.460	146.832



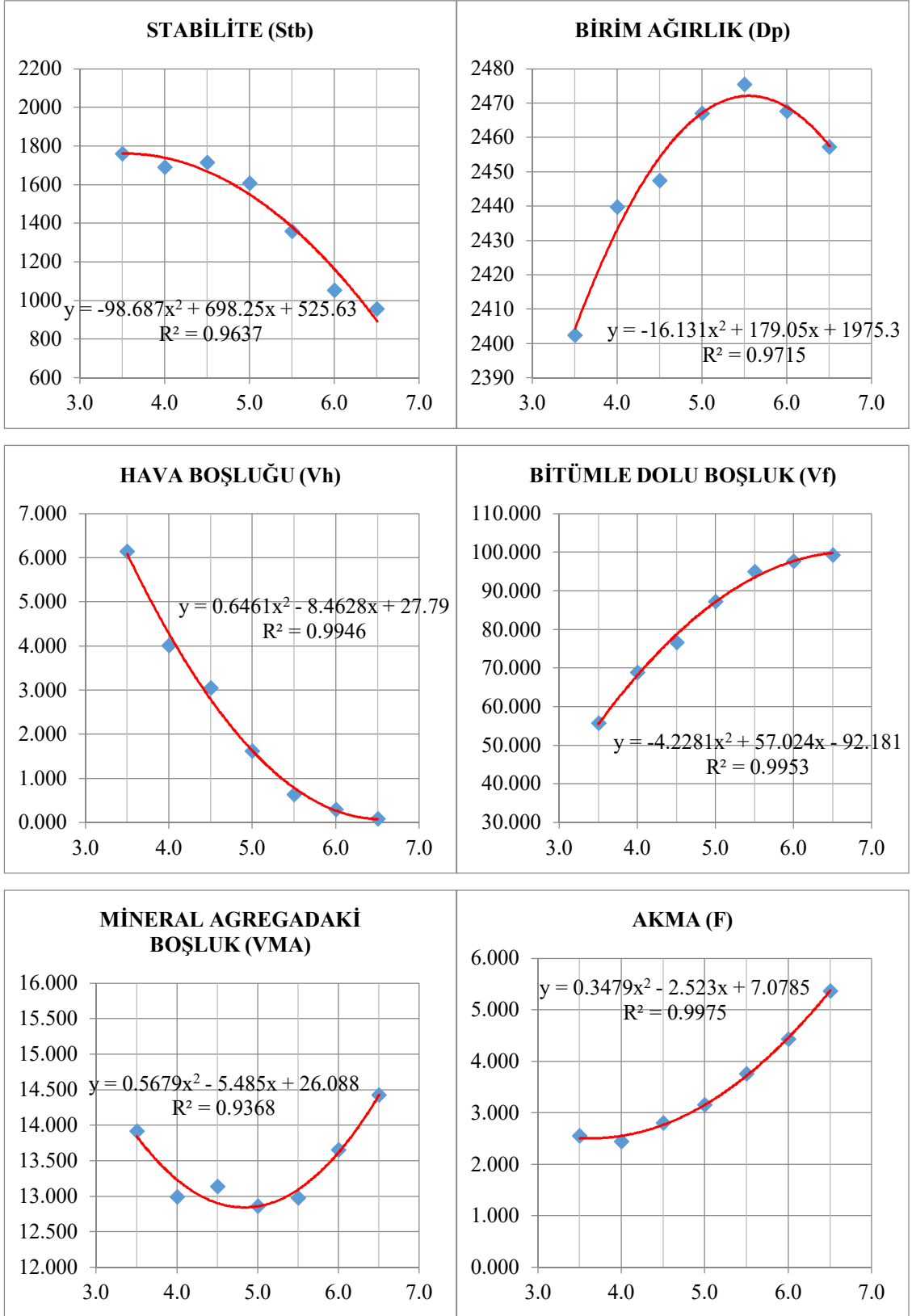
Şekil 5.28. %5 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.55. %10 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin marshall deney föyü

NO	BITÜM %	Wb	BITÜM %	YÜKSEKLİK (mm)	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI	2717.0	kg/m ³	2674.0	kg/m ³	2688.0	kg/m ³	BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Gp)		1043.0	kg/m ³	NOTI:	%10 ÖAB MODİFYELİ	TARİH: 20/02/18	M.O.	
													AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI (Ga)	2697							kg/m ³
KABA AGREGA YÜZDÜSÜ	İNCE AGREGA YÜZDÜSÜ	FİLLER YÜZDÜSÜ	HACİM	HACİM ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	SUDA AĞIRLIK (gr)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	3.5	3.382	61.77	1188.3	682.2	486.1	2403	7.92	86.116	6.092	13.884	56.124	6.092	1730.7	1.04406	1806.915	2.397	753.824			
2	3.5	3.382	62.28	1171.1	684.5	486.6	2407	7.803	86.233	5.964	13.767	56.681	5.964	1281.1	1.03050	1320.142	3.674	359.320			
3	3.5	3.382	62.02	1166.4	677.2	488.2	2384	7.730	85.431	6.839	14.569	53.080	6.839	1538.6	1.03700	1595.580	3.423	468.135			
4	4.0	3.846	61.50	1178.4	694.1	484.3	2433	8.973	86.764	4.264	13.236	67.789	4.264	1854.6	1.05250	1951.922	2.448	797.354			
5	4.0	3.846	61.55	1173.4	688.4	485.0	2419	8.922	86.271	4.807	13.729	64.984	4.807	1539.9	1.05094	1618.315	2.688	602.052			
6	4.0	3.846	62.91	1174.1	687.8	486.3	2414	8.903	86.092	5.005	13.908	64.013	5.005	1530.9	1.01475	1553.481	3.042	510.677			
7	4.5	4.306	61.04	1177.0	693.9	483.1	2436	10.059	86.460	3.481	13.540	74.292	3.481	1270.5	1.06688	1355.433	2.047	662.166			
8	4.5	4.306	61.45	1184.6	699.8	484.8	2443	10.088	86.713	3.198	13.287	75.929	3.198	1564.7	1.05406	1649.238	2.462	683.877			
9	4.5	4.306	61.83	1179.6	694.2	485.4	2430	10.033	86.241	3.726	13.759	72.921	3.726	1450.0	1.042719	1621.951	2.174	746.068			
10	5.0	4.762	60.51	1184.6	704.8	479.8	2469	11.272	87.200	1.528	12.800	86.063	1.528	1155.0	1.08344	1251.408	1.867	670.278			
11	5.0	4.762	60.88	1188.7	705.6	483.1	2461	11.234	86.904	1.862	13.096	85.781	1.862	1351.0	1.07188	1448.133	2.935	493.402			
12	5.0	4.762	60.82	1185.0	703.1	481.9	2459	11.227	86.849	1.924	13.151	85.370	1.924	1459.0	1.07375	1566.612	3.363	463.084			
13	5.5	5.213	60.42	1189.2	708.0	481.2	2471	12.353	86.870	0.777	13.130	94.079	0.777	2453	1.08825	1422.051	2.728	342.284			
14	5.5	5.213	60.24	1190.5	709.7	480.8	2476	12.376	87.037	0.586	12.963	95.477	0.586	1152.9	1.09186	1302.464	3.973	327.829			
15	5.5	5.213	60.55	1188.7	707.8	480.9	2472	12.355	86.888	0.757	13.112	94.225	0.757	2472	1.08219	1271.704	3.613	351.980			
16	6.0	5.660	60.74	1195.2	710.8	484.4	2467	13.391	86.323	0.287	13.677	97.902	0.287	1039.4	1.07625	1118.651	4.542	246.280			
17	6.0	5.660	60.82	1191.5	708.2	483.3	2465	13.379	86.251	0.369	13.749	97.313	0.369	2455	1.07375	1092.730	3.793	283.081			
18	6.0	5.660	60.51	1196.0	712.4	483.6	2473	13.422	86.523	0.055	13.477	99.591	0.055	1029.8	1.08344	1115.739	4.424	252.201			
19	6.5	6.103	61.33	1194.0	707.2	486.8	2453	14.353	85.408	0.239	14.592	98.359	0.239	864.0	1.05781	913.954	4.480	204.008			
20	6.5	6.103	61.62	1198.5	710.8	487.7	2457	14.380	85.572	0.048	14.428	99.665	0.048	891.5	1.04675	935.000	4.977	187.864			
21	6.5	6.103	61.36	1194.7	709.1	486.0	2458	14.385	85.599	0.017	14.401	99.894	0.017	865.0	1.05688	914.228	4.501	203.117			
														0.101		921.061	4.653	198.329			



Şekil 5.29. %10 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri



Şekil 5.30. %15 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri - bitüm oranı grafikleri

Tablo 5.57. 50/70 Penetrasyonlu bitüm ile hazırlanmış kontrol numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oran	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	3.50	1851.48	1736.59
Birim Ağırlık	maks	5.45	2472.09	2451.23
Hava Boşluğu	4	3.94	4.00	3.22
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	3.96	70.00	75.27
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.55
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.53
OBO		4.21		

Tablo 5.58. %5 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin OBO hesabı

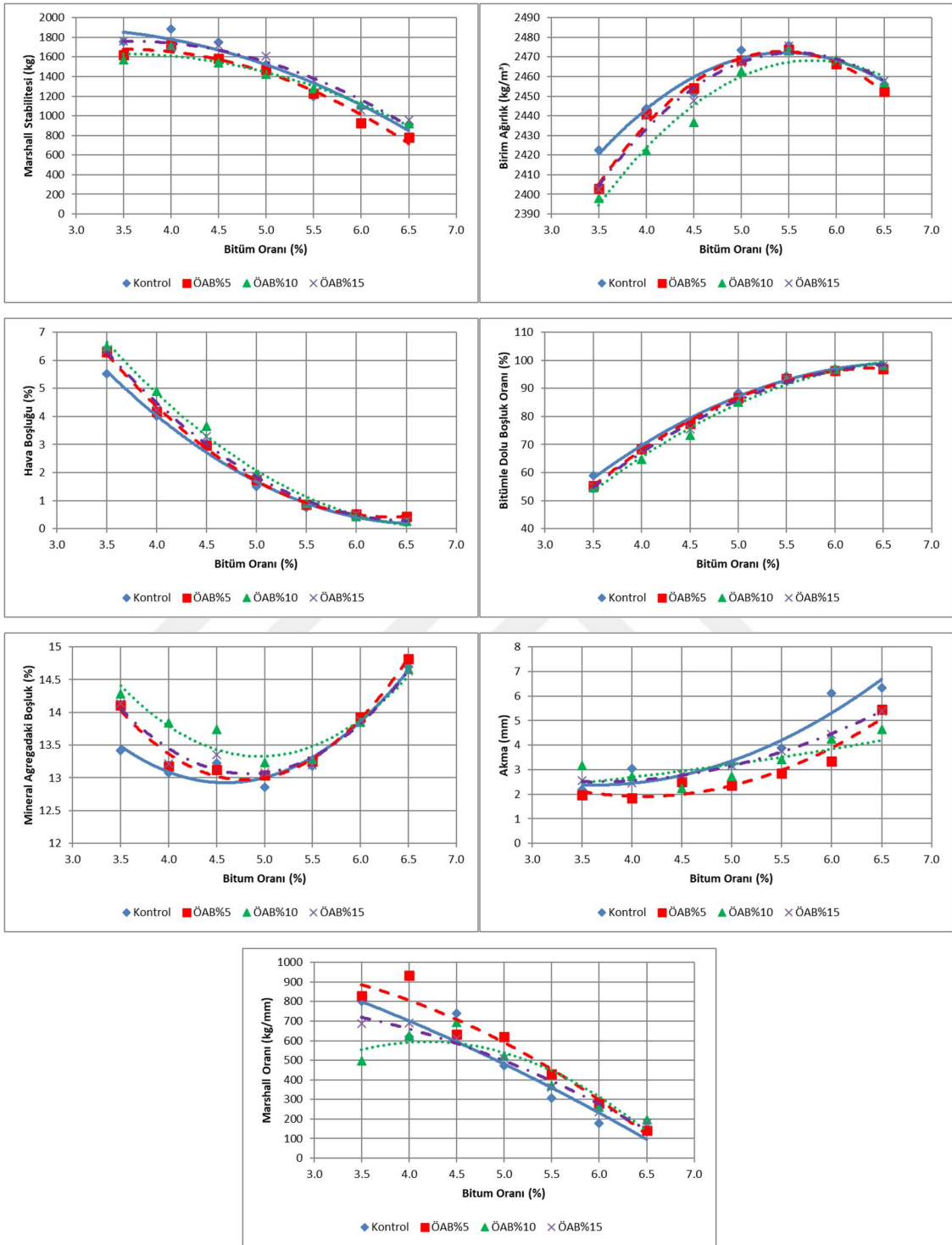
Değişken	Standart	Bitüm Oran	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	3.53	1709.71	1650.27
Birim Ağırlık	maks	5.43	2472.80	2447.89
Hava Boşluğu	4	4.04	4.00	3.32
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.04	70.00	74.98
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	1.92
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	12.93
OBO		4.26		

Tablo 5.59. %10 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oran	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	3.50	1632.30	1562.46
Birim Ağırlık	maks	5.74	2468.06	2441.70
Hava Boşluğu	4	4.19	4.00	3.39
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.16	70.00	75.02
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.60
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.27
OBO		4.40		

Tablo 5.60. %15 ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin OBO hesabı

Değişken	Standart	Bitüm Oran	Bitüm Oranının Denklem Değeri	Optimum Bitüm Oranı Değeri
Stabilite	maks	3.54	1760.73	1701.53
Birim Ağırlık	maks	5.55	2472.15	2447.44
Hava Boşluğu	4	4.09	4.00	3.31
Bitümle Dolu Boşluk Oranı	70	4.08	70.00	75.10
Akma (Kontrol)	2-4	-	-	2.67
VMA (Kontrol)	14-16	-	-	13.00
OBO		4.31		



Şekil 5.31. Farklı oranlardaki ÖAB ile bitüm modifiyeli numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

Bor atıklarının yol sektöründe kullanılmasını hedefleyen çalışmamızın bu kısmında daha önceden agregaların arasında kullanılmasının şartname değerlerini sağladığı görülmüştü, bu bölümde ise dayanım açısından en iyi değerlerin alındığı ÖAB malzemesinin bitümün içinde değerlendirilebilirliği test edilmiştir. Bu durum özellikle ekonomiklik anlamında çok büyük faydalar sağlayacaktır.

Şekil 5.31 bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini göstermektedir. Görüldüğü üzere modifiye bitümle oluşturulmuş numuneler kontrol numunelerine yakın özellikler göstermiştir. Stabilitate değerleri yine şartname değerlerini sağlamış, %15 katkı oranı kontrol numunelerine yakın değerler vermiş %5 ve %10 katkı oranlarında ise hafif düşüşler yaşanmıştır. Düşük bitüm oranlarında Dp ve Vf değerlerinde bir miktar düşüş yaşanmış Vh ve VMA değerlerinde ise artışlar gözlenmiştir. Yüksek bitüm oranlarında ise kontrol numuneleriyle hemen hemen aynı sonuçlar alınmıştır. Akma sonuçları ise beklenildiği gibi artmamış %5 katkı oranında düşmüştür. %10 ve %15 katkı oranlarında ise düşük bitüm oranlarında kontrol numuneleri ile yakın değerler vermiş yüksek bitüm oranlarında ise yine düşmüştür. Akmalardaki bu düşüş MO değerlerini de etkilemiş, yüksek bitüm oranlarında MO değerleri de kontrol numunelerine göre artış göstermiş daha rijit numuneler üretilmiştir.

Atık bor katkısı bu serilerde de yine OBO değerlerini artırmıştır. Numunelerin tam olarak performanslarının anlaşılabilmesi için OBO değerlerinde yeni numuneler üretilmiş bu numunelerde sünme deneyine tabii tutulmuştur.

Tablo 5.61. Bitüm modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin OBO değerleri

Malzeme	Katkı Oranı (%)	OBO (%)
Kontrol	0	4.21
ÖAB	5	4.26
ÖAB	10	4.40
ÖAB	15	4.31

5.7. Sünme Deneyi

Sünme deneyi tekrarlı ve sabit yükler etkisi altında asfalt betonu içinde meydana gelen kalıcı deformasyonların ölçülmesi için yapılan deneydir [179].

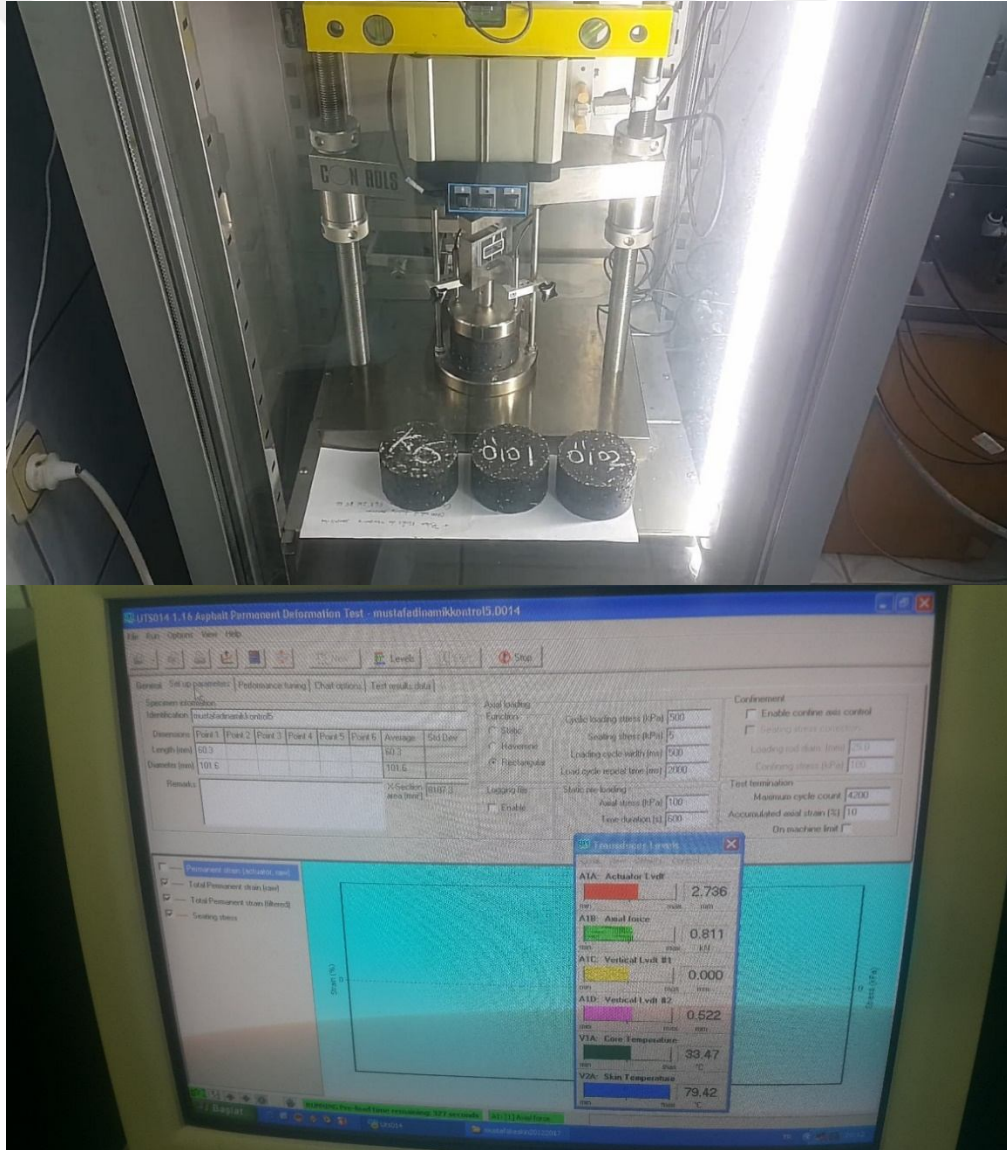
Deneyde kullanılan aletler aşağıda verilmiştir;

- -10°C ile $+70^{\circ}\text{C}$ arasında istenilen sıcaklığı sağlayabilen, deney numunelerinin çeşitli sıcaklıklarda muhafaza edilmesini sağlayan iklimlendirme kabini.
- Deney sırasında hava basıncının sürekliliğini sağlayan küçük ara depolama kompresörü
- Kabin içerisindeki yükleme başlığı ile bilgisayar arasında bağlantı sağlayarak, veri akışını sağlayan veri işlemci adında elektronik bir düzenek
- Tekrarlı veya statik sünme deneyinin gerçekleşmesi için oluşturulmuş yazılımın çalışmasını sağlayacak kapasiteye sahip bir bilgisayar
- Sünme deneyinin gerçekleşmesi için gerekli hava basıncını sağlayacak kapasiteye sahip bir kompresör
- Düşey deformasyonları ölçmek için kullanılan ve en az iki adet olması gereken LVDT' ler (Linear Variable Displacement Transducers)
- En az 14kN yükleme kapasitesine sahip yükleme başlığı [169].



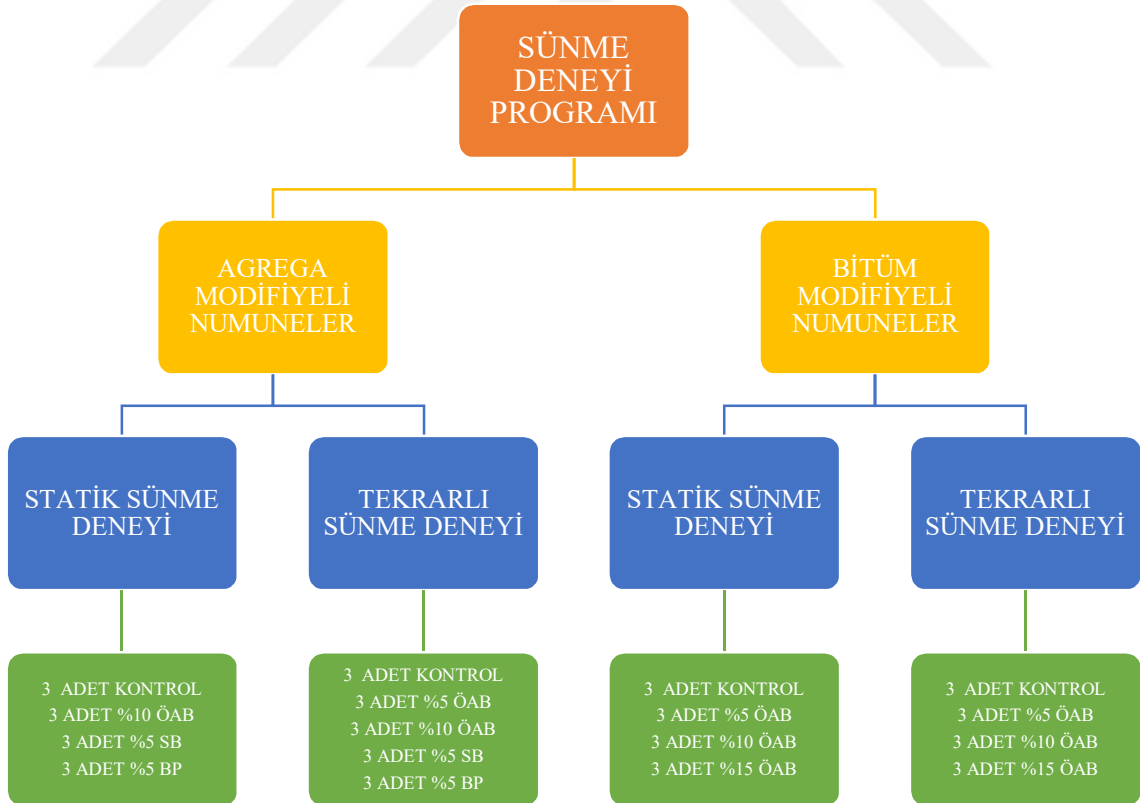
Görsel 5.19. Sünme deney seti aletleri

Sünme deneylerinde numuneler 24 saat öncesinden iklimlendirme kabineye yerleştirilirler. Bu şekilde numunelerin bütün bölgeleri istenilen sıcaklığa getirilmiş olur. Daha sonra ise ana kompresör ve yedek depolama kompresörü çalıştırılır ve 8 atm lik basıncın oluşması sağlanır. Deney esnasında bu basıncın sabit kalması çok önemlidir. Numuneler deneye başlanılmadan önce yükleme çerçevesine yerleştirilir ve LVDT' lerin gerekli konumu alması sağlanır. İklimlendirme kabininin kapağı kapatıldıktan sonra bilgisayarda deney için gerekli yazılım çalıştırılır. Numuneye ait genel bilgiler yazılıma girilir, yazılıma girilen bilgiler numunenin özelliklerini belirleyici kısa ve net olmalıdır. Bilgiler girildikten sonra ise yine yazılım üzerinden LVDT' ler sıfırlanır ve deneyin nasıl yapılacağı (statik veya tekrarlı) seçilerek deney başlatılır [169].



Görsel 5.20. Yükleme çerçevesine yerleştirilmiş numune ve sünme deneyi yazılımı

Sünme deneyi programı her bir katkı malzemesi ile optimum bitüm oranında üçer adet statik ve üçer adet tekrarlı sünme deneyi numuneleri hazırlanarak başlamıştır. Agregata modifiyeli serinin Marshall dizayn testi neticesinde elde edilen stabilite değerlerine göre SB ve BP modifiyeli numuneler en yüksek stabilite değerlerini %5 katkı oranında ÖAB modifiyeli numuneler ise %10 katkı oranında vermiştir. Statik sünme testinde aynı yükleme koşulları altında hangi tip bor atıklarının daha fazla deformasyona sahip olduğunu anlamak için en yüksek stabilite değerlerine sahip örneklerin karşılaştırması yapılmıştır. Tekrarlı sünme deneyinde ise tüm atık borların aynı katkı oranında nasıl deformasyon göstereceğini anlayabilmek adına %5 ÖAB katkı oranında ekstra 3 numune daha hazırlanmıştır. Bitüm modifiyeli örnekler içinde yine her katkı oranında 3er adet statik ve 3er adette tekrarlı sünme deneyi için numuneler hazırlanmıştır. Bütün sünme deneyi programı aşağıdaki şekil 5.32 ile verilmiştir. Bu çalışmada optimum bitüm oranlarıyla hazırlanan asfalt beton karışımlarının sünme performansları incelenmiş, özellikle yoğun trafik yükleri nedeniyle karayollarında sık rastlanan oluklanma direnci anlaşılmasına çalışılmıştır.



Şekil 5.32. Sünme deneyi programı

Statik sünme deneyi metodunda, numuneler belirli bir süre boyunca önyüklemeye maruz bırakılır ve önyükleme sonlandırılmadan numuneye uygulanan yük artırılır. Belirli bir süre boyunca yapılan bu yükleme sonunda numunelerde oluşan deformasyonlar incelenir [180,181]. Bu çalışmada 50°C’ de bir gün boyunca bekletilen numuneler 10dk boyunca 100kPa’ lık bir önyüklemeye maruz bırakılmış daha sonra ise 500kPa’ lık yük ile 1 saat boyunca test edilmiştir.

Yükleme ve bekleme süreleri daha önceden belirlenen ve tekrarlı yük altında oluşan deformasyonların incelendiği metot ise tekrarlı sünme deneyidir. Çalışmamızda yine 50°C’ de bir gün boyu bekletilen numuneler 500kPa’ lık yük ile 500ms yükleme – 1500ms dinlenme yükleme paterni ile test edilmiştir. Her bir döngü 2000ms’ dir. Ayrıca deneyden önce numuneler üzerindeki pürüzlülüğün giderilebilmesi için 5kPa’ lık bir yük 5sn boyunca numunelere uygulanmıştır.

Deney esnasında; statik sünme deneyinde her saniyede, tekrarlı sünme deneyinde ise her bir döngü sonunda LVDT’ lerde düşey deformasyonlar kaydedilir. Kaydedilen veriler program tarafından excel dosyası şeklinde çıktı haline getirilir ve bazı formüller sayesinde numunede oluşan deformasyonlar; birim deformasyon ve sünme rijitliği olarak anlamlı hale getirilir. Aşağıda bu dönüşüm için gerekli olan formülasyonlar verilmiştir.

$$h = \frac{LVDT1 + LVDT2}{2} \quad (5.18)$$

$$\varepsilon_n = \left(\frac{h_n - h_1}{H} \right) \times 100000 \quad (\mu\varepsilon) \quad (5.19)$$

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_n} \times 1000 \quad (MPa) \quad (5.20)$$

Burada;

h : numune ortalama yüksekliği (mm)

h_1 : ilk yüklemdeki h değeri (mm)

h_n : n inci yüklemdeki h değeri (mm)

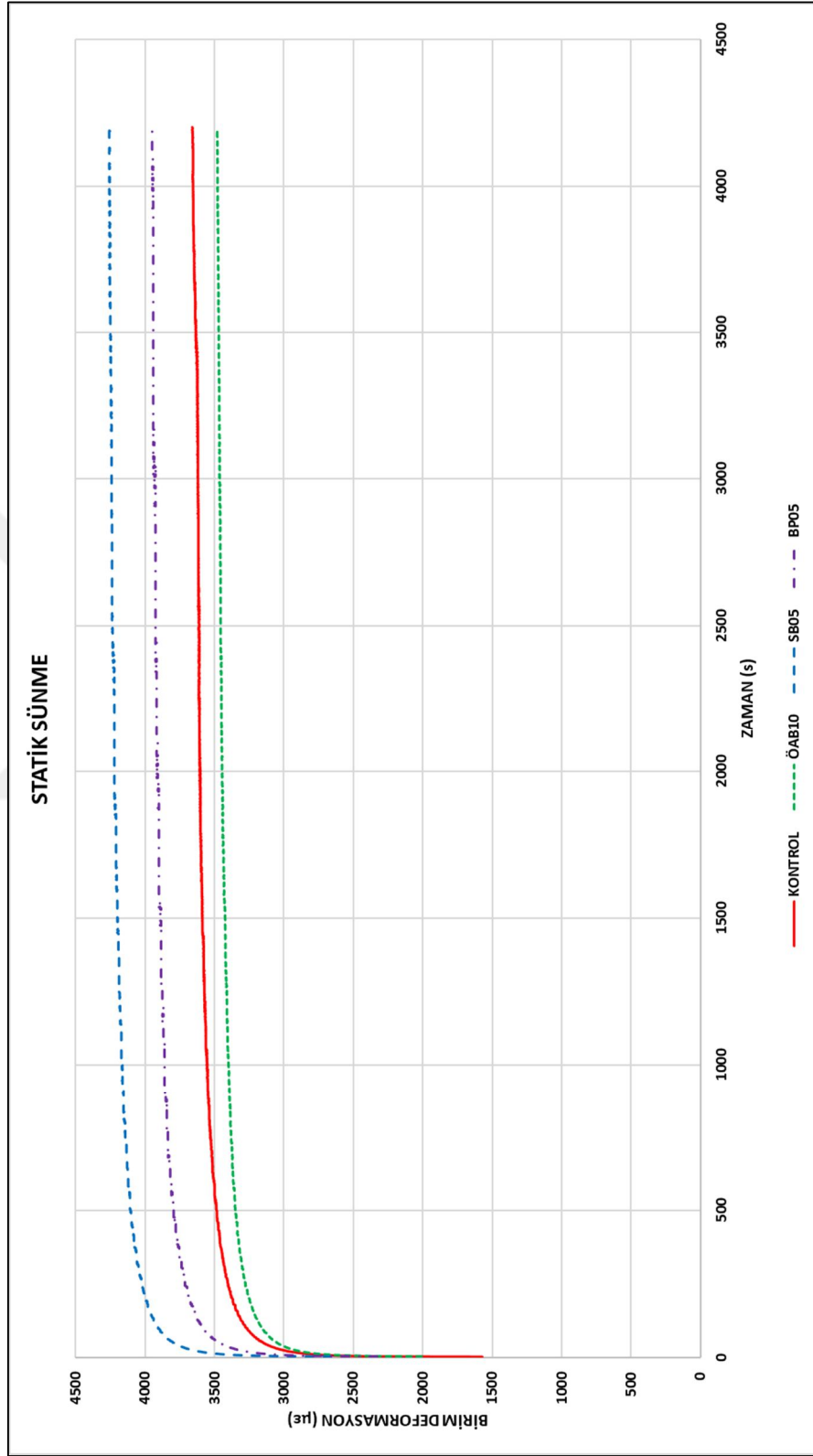
H : numune yüksekliği (mm)

σ : yüklenen gerilme (kPa)

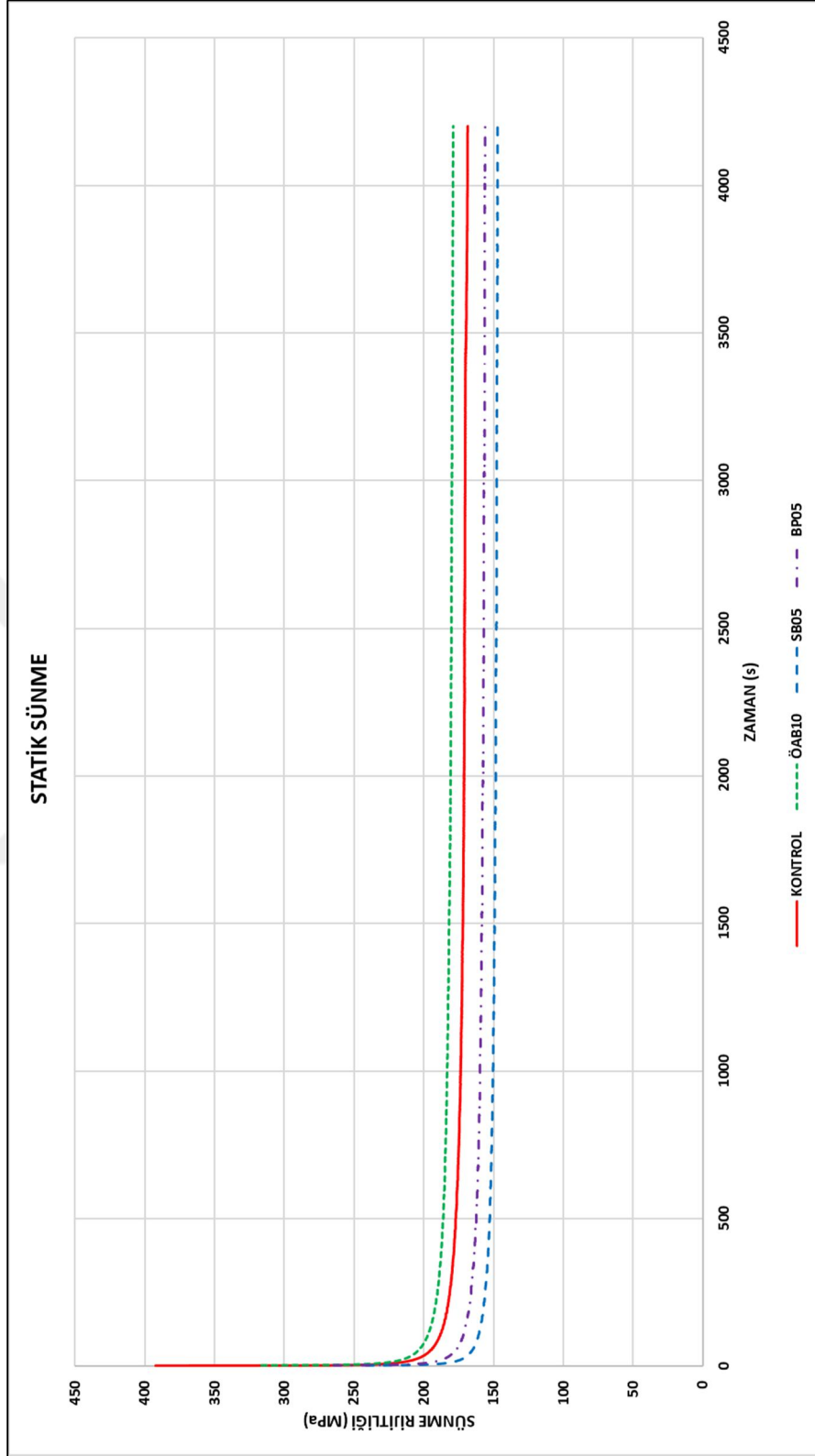
ε_n : n inci yükleme sonunda oluşan birim deformasyon ($\mu\varepsilon$)

E_n : n inci yükleme sonunda oluşan sünme rijitliği (MPa)

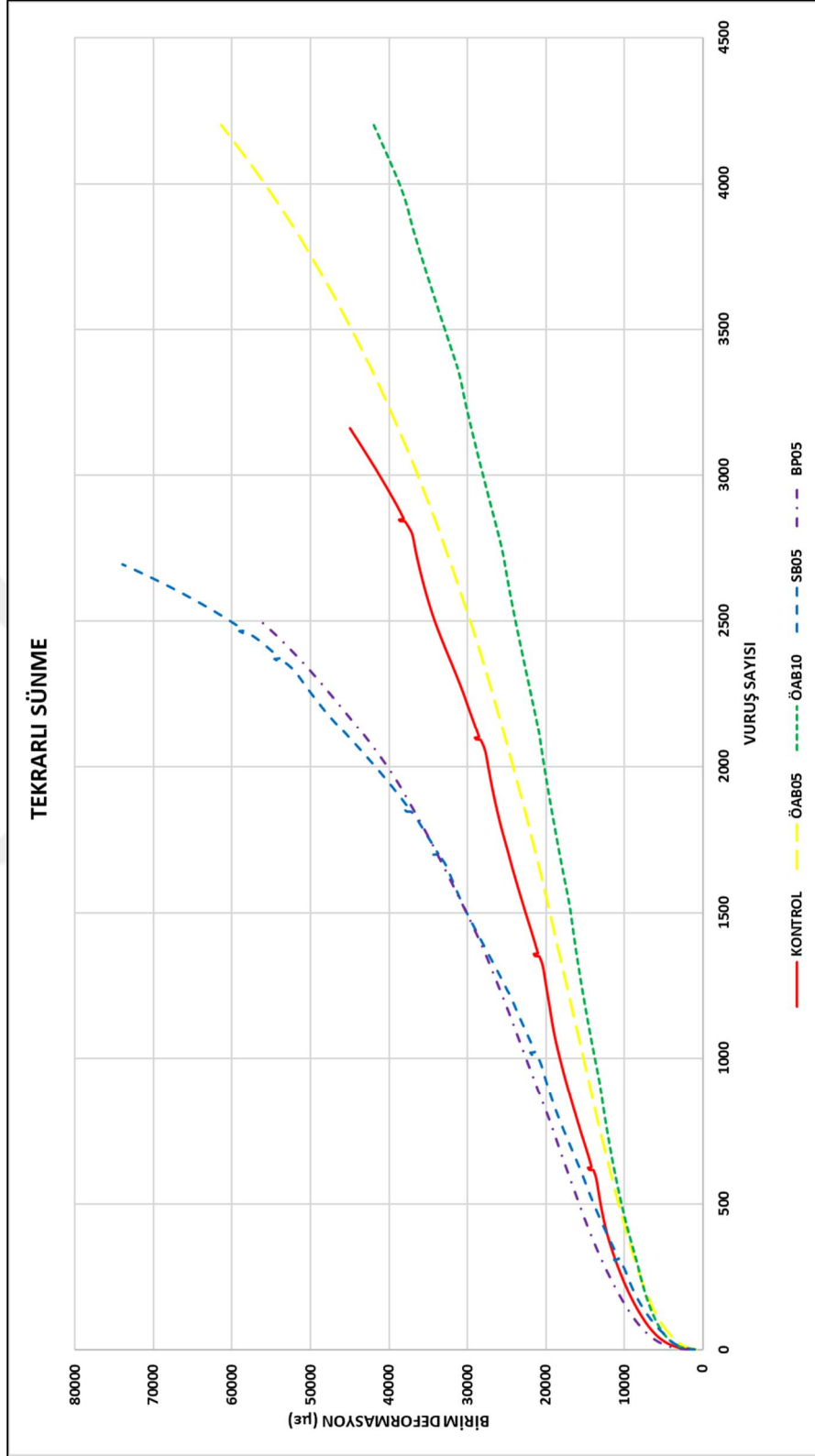
5.7.1. Agrega modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin sünme deneyi sonuçları



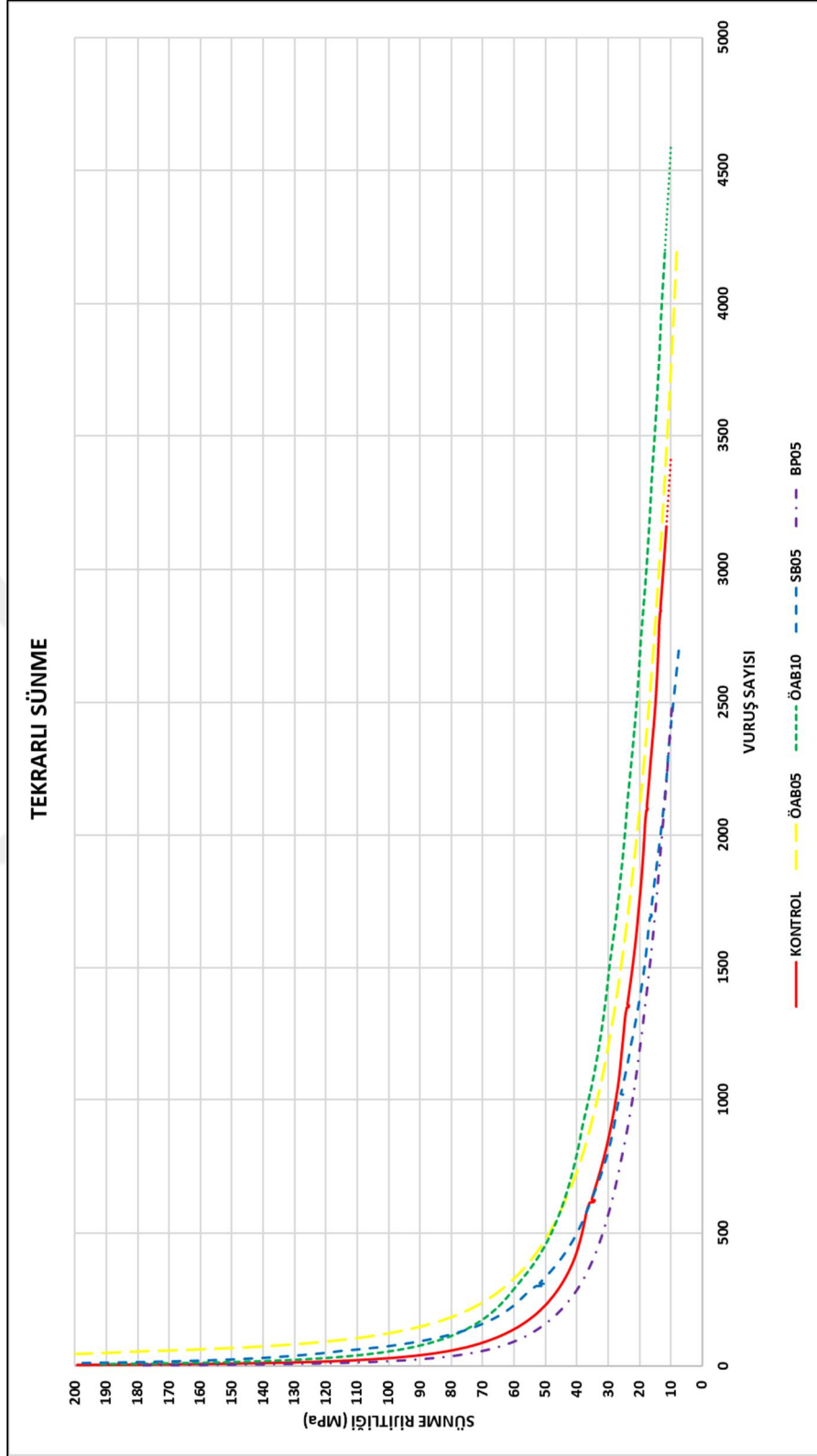
Şekil 5.33. Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – zaman grafiği (statik)



Şekil 5.34. Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – zaman grafiği (statik)



Şekil 5.35. Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)



Şekil 5.36. Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)

Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş ve en yüksek stabilite değerlerine sahip katkı oranlarında hazırlanan numunelerin statik yüklemeye karşısında oluşturdukları ortalama grafikler yukarıdaki Şekil 5.33 ve 5.34 ile verilmiştir. Bu grafikler oluşturulurken kontrol numuneleri veya her katkı malzemesi için bulunan verilerin ayrı ayrı ortalamaları alınarak tek bir eğri şeklinde sunulmuştur. Görüldüğü üzere en yüksek deformasyonlar SB katkılı numunelerde oluşurken bunu sırasıyla BP katkılı numuneler, kontrol numuneleri ve ÖAB katkılı numuneler izlemektedir. 500kPa'lık 1 saat süren statik yüklemeye sonucu en yüksek dayanımı gösteren numuneler ÖAB katkılı numunelerdir.

Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş farklı katkı malzemeleri ile farklı oranlarında hazırlanan numunelerin tekrarlı yüklemeye karşısında oluşturdukları ortalama grafikler yukarıdaki Şekil 5.35 ve 5.36 ile verilmiştir. Bu grafikler oluşturulurken kontrol numuneleri veya her katkı malzemesi için bulunan verilerin ayrı ayrı ortalamaları alınarak tek bir eğri şeklinde sunulmuştur. Şekil 5.35 de görüldüğü üzere en yüksek deformasyonlar yine SB katkılı numunelerde daha sonra ise BP katkılı numunelerde oluşmuştur. Bu numuneleri kontrol numuneleri takip etmiş en az deformasyonlar ise ÖAB katkılı numunelerde gözlenmiştir. ÖAB katkılı numuneler ise kendi aralarında karşılaştırıldığında %10 katkılı numunelerin daha uzun ömürlü olduğu tespit edilmiştir.

Sünme rijitliği grafikleri için ayrıca bir değerlendirme yapılacak olursa; sünme rijitliği eğrisinin 10MPa değerine ulaştığı an, numunenin üçüncül sünme evresine yani yıkıma başladığı an olarak kabul edilebilir. Bu da numunenin ömrünü tamamladığı nokta olarak düşünülebilir [99,131,182]. Bu varsayım ile numuneler yorumlanır ise %10 ÖAB katkılı numuneler SB ve BP katkılı numunelerden 1.9 kat kontrol numunelerinden ise 1.35 kat daha uzun ömürlüdürler denilebilir.

Şekil 5.36' da görüldüğü üzere kontrol numunelerinin ve %10 ÖAB katkılı numunelerin ortalama sünme rijitliği değerleri 10MPa değerinin altına düşmemiştir. İşte bu 10 MPa'lık sünme rijitliğine erişemeyen numuneler, Microsoft Excel 2016 programında düzenlenmiştir. Şöyle ki; Excel programı belirli bir mantıkla tekrar eden, artan ya da azalan sayıları yine aynı mantık silsilesi dahilinde devam ettirebilmektedir [99]. Bu iki eğrinin sayısal verileri program sayesinde kendi azalış mantığıyla devam ettirilmiş ve 10MPa değerine düştüğü vuruş sayıları hesaplanılmıştır bu sonuçlar grafik üzerinde noktalı olarak gösterilmiştir. Bu hesaba göre kontrol numuneleri 3424.vuruşta, %5ÖAB katkılı numuneler 3755.vuruşta, %10ÖAB katkılı numuneler 4597.vuruşta,

%5SB katkılı numuneler 2416.vuruшта ve %5BP katkılı numuneler ise 2438.vuruшта ömürlerini tamamlamışlardır.

Bu sonuçlara göre %10 ÖAB katkılı numuneler ile üretilecek yolların servis süreleri daha uzun olacağı ve oluklanma potansiyeline göre daha dirençli olacakları belirlenmiş olmuştur.

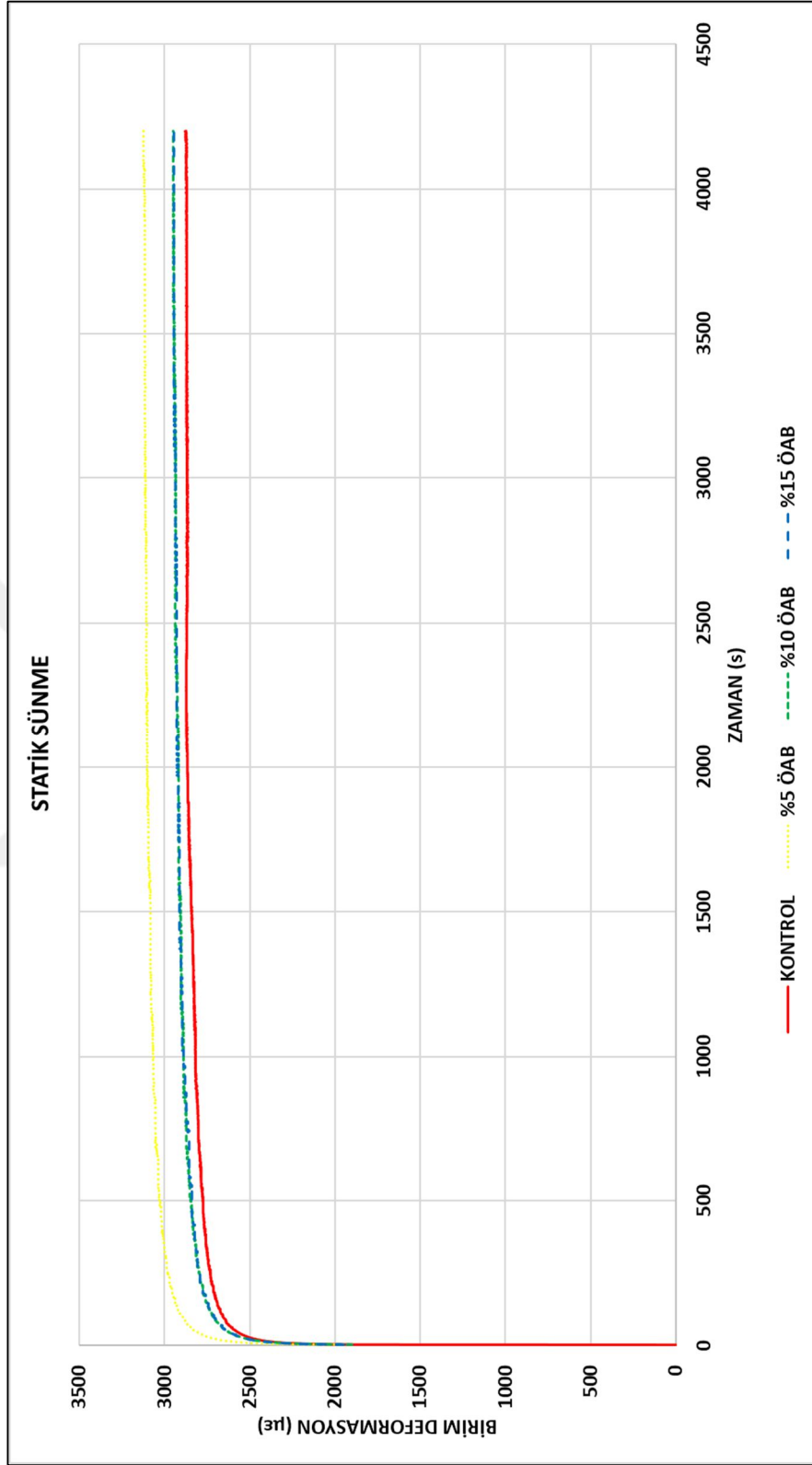
5.7.2. Bitüm modifiyesi ile hazırlanmış numunelerin sünme deneyi sonuçları

Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş ilk serinin statik sünme deneyi sonuçlarına göre modifiyeli numunelerin deformasyonları artırdığı görülmüştür. Daha detaylı incelemeler için tekrarlı sünme deneyi sonuçlarına bakılmıştır.

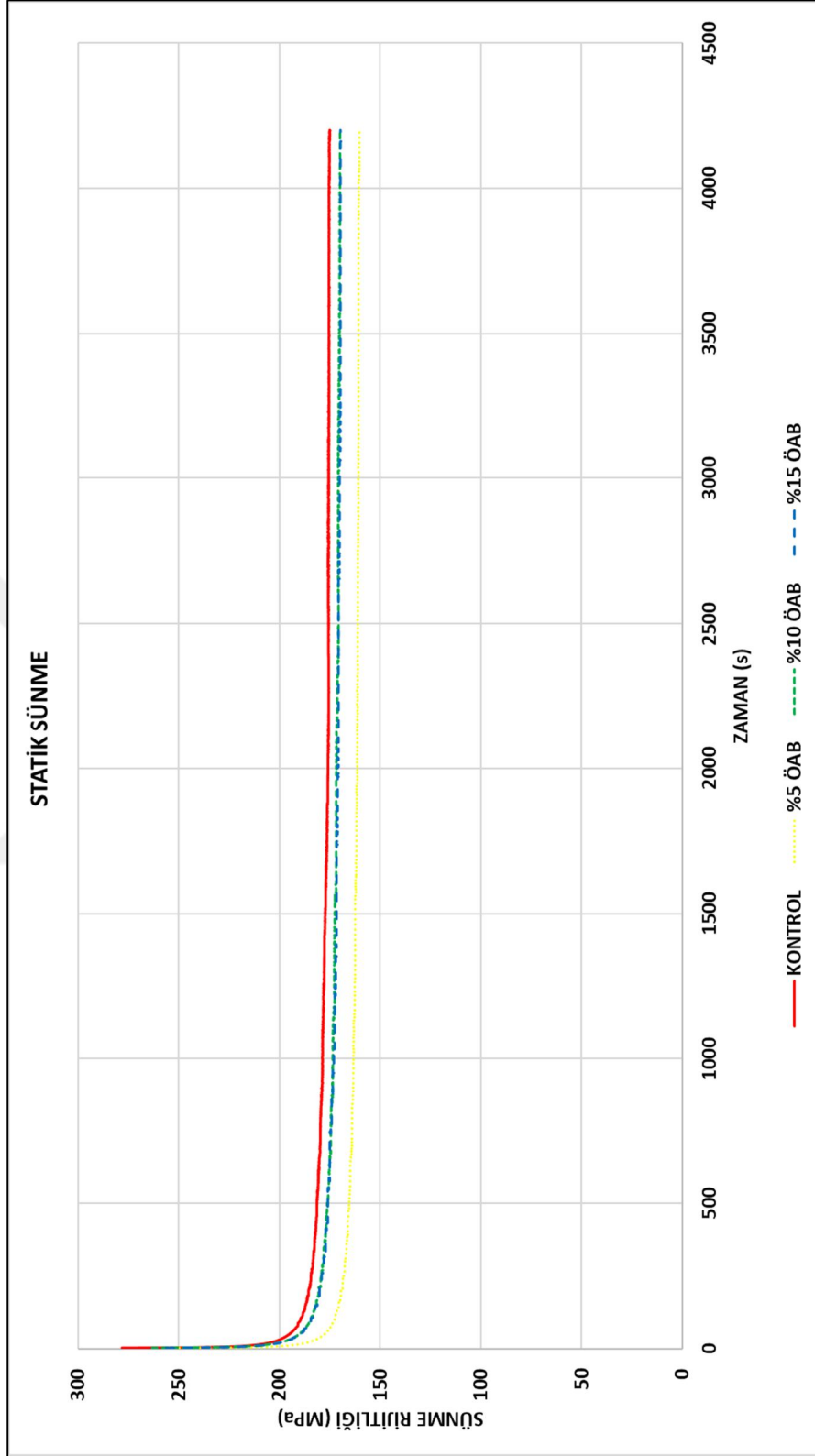
Tekrarlı sünme deneyi sonuçları statik sünme deneyine göre daha belirgin sonuçlar vermiş ve bitüm içerisindeki katkı oranı arttıkça numunelerin deformasyonlarının da arttığı gözlemlenmiştir. ÖAB malzemesi ile oluşturulmuş bitüm ile hazırlanan numuneler ile şartname sınırları dahilinde asfalt betonları üretilebilmiş olsa da OBO' nda hazırlanan numunelerin 500kPa' lık tekrarlı yük altındaki davranışları, örneklerde oluşan deformasyonları arttırmıştır. Statik ve tekrarlı sünme deneyi sonrası numunelerin son halleri aşağıda Görsel 5.21 ile verilmiştir. Ayrıca statik sünme deneyine ait grafikler Şekil 5.37 ve 5.38 ile tekrarlı sünme deneyinin grafikleri ise Şekil 5.39 ve 5.40 ile verilmiştir.



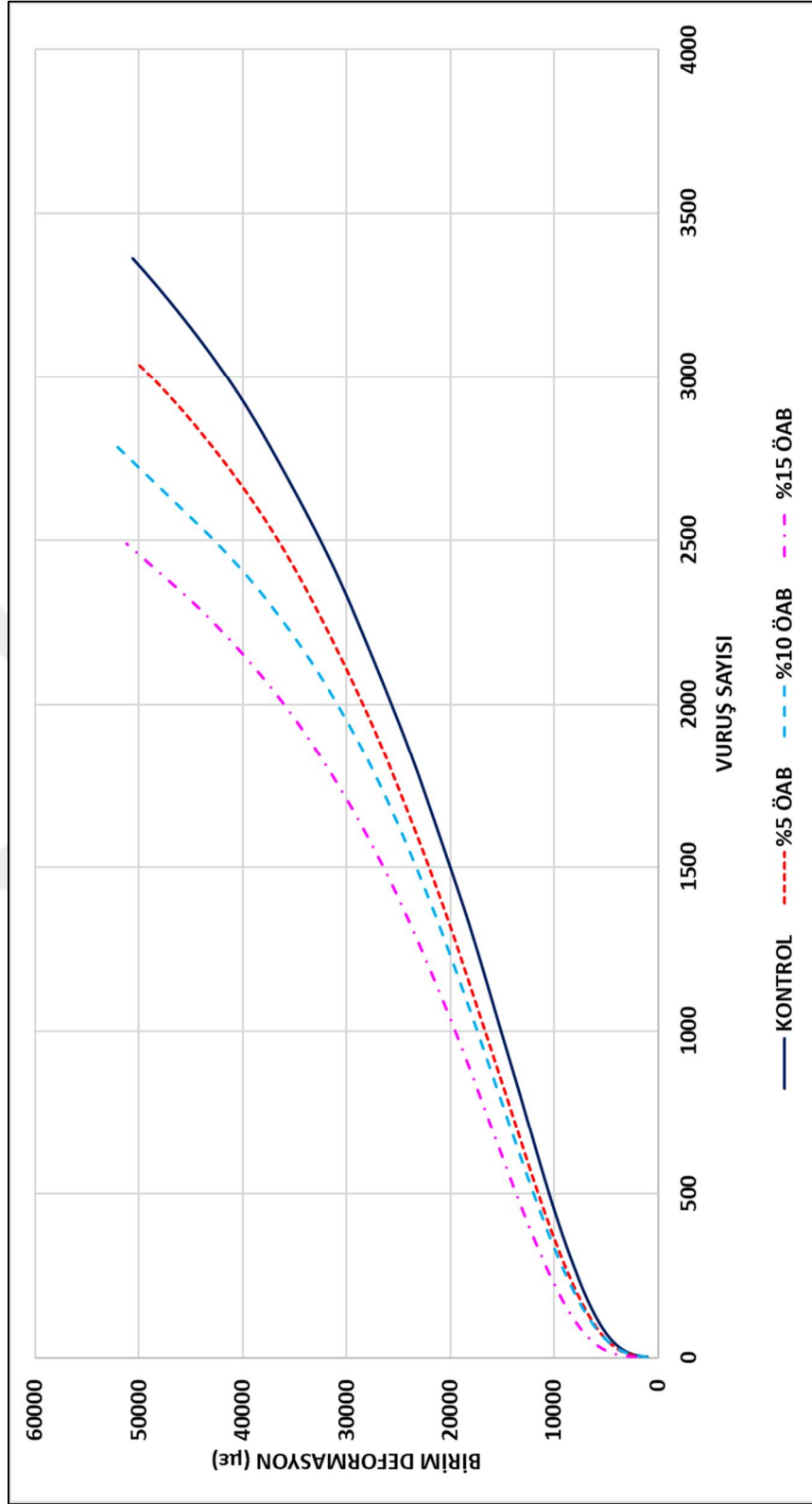
Görsel 5.21. Bitümün ÖAB ile modifiyesi sonucu oluşturulmuş numunelerin sünme deneyi sonrası görüntüleri



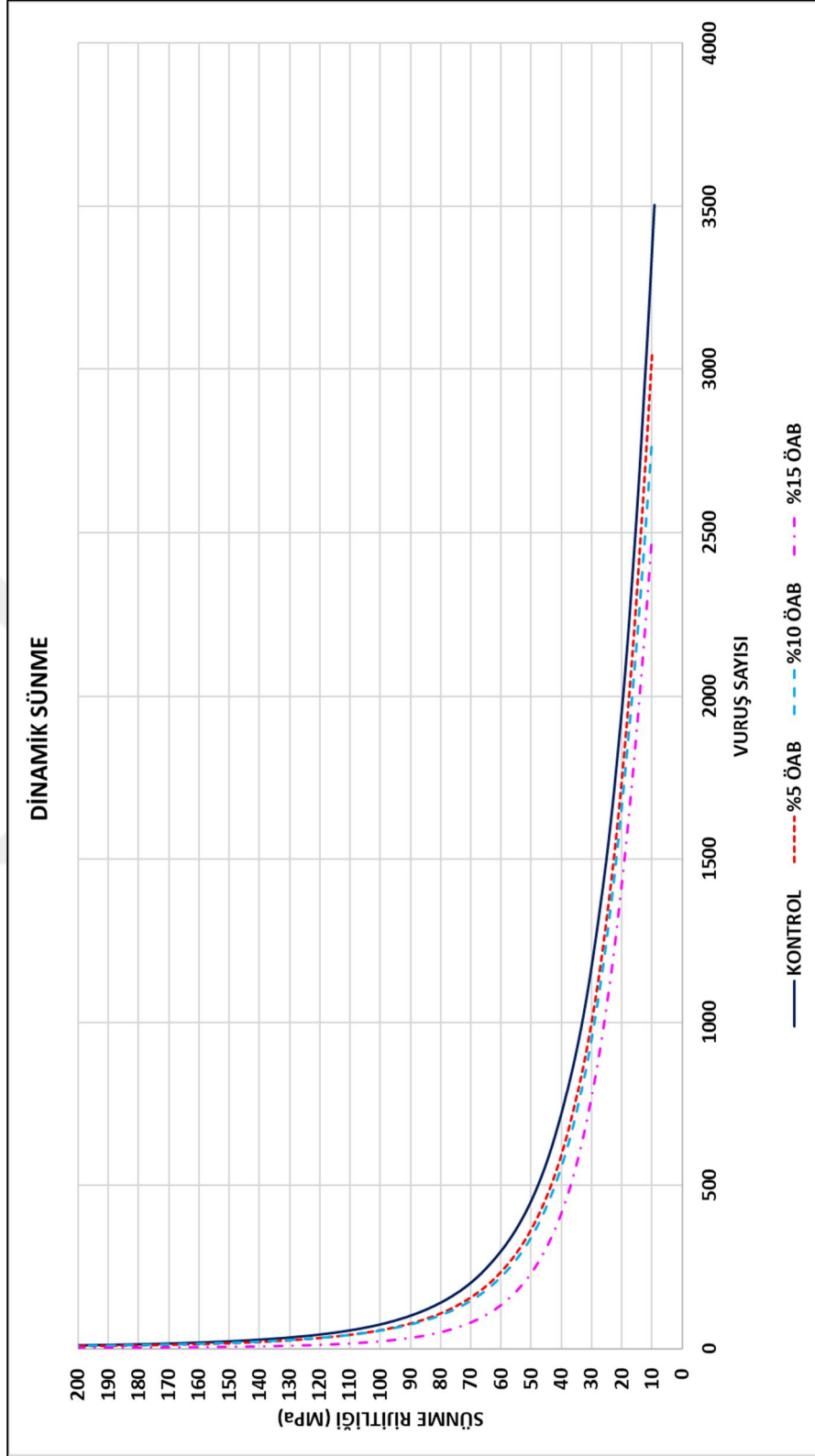
Şekil 5.37. Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – zaman grafiği (statik)



Şekil 5.38. Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – zaman grafiği (statik)



Şekil 5.39. Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama birim deformasyon – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)



Şekil 5.40. Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş numunelerin ortalama sünme rijitliği – vuruş sayısı grafiği (tekrarlı)

5.8. Ekonomik Analiz, Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik

Sürdürülebilirlik fikri ilk olarak 1980' lerin ortalarında ortaya çıkmıştır, bu kavram 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından hazırlanan Brutland Raporu tarafından özel olarak tanımlandı, sürdürülebilirlik basitçe 3E olarak tanımlanır; Çevre (Environment), Ekonomi (Economy) ve Eşitlik (Equity) [183]. Bu tanımdaki her maddenin eşit büyüklükte bir küme olarak kabul edilmesi durumunda, bu üç kümenin kesişimi sürdürülebilirliği tanımlar.

Kamu, sanayi ve hükümetler daha iyi bir çevresel kalite ve sürdürülebilir kalkınmaya yönelik yaklaşımlar olarak yeşil tasarım ve mühendislik terimlerine daha fazla ilgi duymaya başlamışlardır. Asfalt üretimi doğal kaynakların en büyük tüketicilerinden biridir. Asfaltların geri dönüşümü, madencilikten ve bakır malzemelerin kullanımından tasarruf etmek, enerjiden tasarruf etmek, malzemeleri çöp alanlarından uzaklaştırmak ve ekonomik tasarruf etmek için önemli bir fırsattır [184]. Bakır malzemeler yerine geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması, mevcut doğal kaynakların kullanılmasını azaltacaktır, bu durum yol imalatı endüstrisini sürdürülebilir inşaat uygulamalarına doğru yönlendirebilmenin bir yoludur [185].

Çalışmamızın genel bir tanımını yapmak için, öncelikle yol yapımı toplum refahı için yapılan hizmetlerdendir. Eskişehir ve çevre illerdeki bor atıkların yol sektöründe kullanılması ile tüm toplumun refahı gözetilmiş olduğundan toplumsal eşitlik anlamında bir problem yoktur. İkinci olarak çevresel bir değerlendirme yapılır ise atık malzemelerin yol sektöründe kullanılması ile geri dönüşüm hizmetleri sağlamış ve çevresel olarak topluma hizmet sağlamıştır, bu sayede büyük oranda doğal kaynaklar kullanılmadan ileri nesillere aktarılmıştır.

Ekonomiklik anlamında yapılan çalışmalar ise aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

Çalışmada ekonomik değerlendirme için 1km uzunluğunda yol (10m genişliğinde 15cm kalınlığında) için maliyet analizleri yapılmıştır. Agrega modifiyesi için (%5 ve %10 katkı oranında) sonuçlar Tablo 5.62 ve Tablo 5.63 ile bitüm modifiyesi için ise sonuçlar Tablo 5.64 ile verilmiştir. Asfalt betonunun özgül ağırlığı hesaplamalarda 2.5 ton/m³ olarak alınmıştır. Her malzemenin ayrı ayrı nakliye ücretleri, agregası, bitüm, SB ve BP için üreticiden alınmış fiyatlar, ÖAB için ise atık deposundan malzemenin kırma eleme tesisine taşınması buradan tekrar sahaya ulaştırılması, yine ÖAB' un bitüm modifiyesi için gerekli olan ücretler dahil bütün ücretler hesaba katılmıştır.

Tablo 5.62. %5 Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş 1km' lik yolun maliyet analizi

EKONOMİK ANALİZ	KATKISIZ (OBO:%4.34)			%5 ÖAB (OBO:%4.59)			%5 SB (OBO:%4.53)			%5 BP (OBO:%4.85)		
	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)
AGREGA	3,594	19.5	70,083	3,542	19.5	69,069	3,544	19.5	69,108	3,534	19.5	68,913
BİTÜM	156	2,711.8	423,041	165	2,711.8	447,447	163	2,711.8	442,023	173	2,711.8	469,141
KATKI	0	0	0	43	30	1,290	43	2,751	118,293	43	1,536	66,048
TOPLAM	3,750	2,731	493,124	3,750	2,761	517,806	3,750	5,482	629,424	3,750	4,267	604,102
MALİYET ARTIŞI	0			5			28			23		

Tablo 5.63. %10 Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş 1km' lik yolun maliyet analizi

EKONOMİK ANALİZ	KATKISIZ (OBO:%4.34)			%10 ÖAB (OBO:%4.66)			%10 SB (OBO:%4.73)			%10 BP (OBO:%5.07)		
	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (TL/ton)	MALİYET (TL)
AGREGA	3,594	19.5	70,083	3,497	19.5	68,192	3,495	19.5	68,153	3,483	19.5	67,919
BİTÜM	156	2,711.8	423,041	167	2,711.8	452,871	169	2,711.8	458,294	181	2,711.8	490,836
KATKI	0	0	0	86	30	2,580	86	2,751	236,586	86	1,536	132,096
TOPLAM	3,750	2,731	493,124	3,750	2,761	523,642	3,750	5,482	763,033	3,750	4,267	690,850
MALİYET ARTIŞI	0			6			55			40		

Tablo 5.64. Farklı oranlarda bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş 1km' lik yolun maliyet analizi

EKONOMİK ANALİZ	KONTROL (OBO:%4.25)			%5 ÖAB (OBO:%4.29)			%10 ÖAB (OBO:%4.43)			%15 ÖAB (OBO:%4.34)		
	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (ton/TL)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (ton/TL)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (ton/TL)	MALİYET (TL)	AĞIRLIK (ton)	BİRİM FİYAT (ton/TL)	MALİYET (TL)
AGREGA	3,597	19.5	70,142	3,596	19.5	70,122	3,591	19.5	70,025	3,594	19.5	70,083
BİTÜM	153	2,711.8	414,905	146	2,711.8	395,923	143	2,711.8	387,787	133	2,711.8	360,669
KATKI	0	0.0	0	8	196.1	1,569	16	196.1	3,138	23	196.1	4,510
TOPLAM	3,750	2,731.3	485,047	3,750	2,927.4	467,614	3,750	2,927.4	460,950	3,750	2,927.4	435,263
MALİYET ARTIŞI (%)	0			-4			-5			-10		

Sonuçlar aşağıdaki gibi hesaplanmış ve maliyet analizi grafikleri Şekil 5.41 ile verilmiştir.

1km yol için;

Hacim (V) = 1000m x 10m x 0.15m=1500m³.

Asfalt betonunun özgül ağırlığı (γ) = 2.5 ton/m³ kabul edilerek

Toplam ağırlık = 1500 x 2.5 = 3750ton olur.

Katkısız asfalt betonu için;

Numunenin ağırlığı;

Agrega; 1150 gr

Bitüm; %4.34 (49.91 gr)

Toplam asfalt betonu numunesi; 1991.91 gr olur.

3750ton katkısız asfalt yol imalatı için;
Agrega; $1150 \times (3750/1999.91) = 3594$ ton
Bitüm; $49.91 \times (3750/1199.91) = 156$ ton

%10 SB katkılı asfalt betonu (agrega modifiyeli) için;
Numunenin ağırlığı;
Agrega; 1122.4 gr
SB; 27.6gr
Bitüm; %4.73 (54.40 gr)
Toplam asfalt betonu numunesi; 1204.4 gr olur.

3750ton %10 SB katkılı asfalt yol imalatı (agrega modifiyeli) için;
Agrega; $1122.4 \times (3750/1204.4) = 3495$ ton
SB; $27.6 \times (3750/1204.4) = 86$ ton
Bitüm; $54.40 \times (3750/1204.4) = 169$ ton

%15 ÖAB katkılı asfalt betonu (bitüm modifiyeli) için;
Numunenin ağırlığı;
Agrega; 1150 gr
Bitüm + ÖAB; %4.34 (49.91 gr)
Bitüm; $49.91 \times \%85 = 42.42$ gr
ÖAB; $49.91 \times \%15 = 7.49$ gr
Toplam asfalt betonu numunesi; 1199.91 gr olur.

3750ton %15 ÖAB katkılı asfalt yol imalatı (bitüm modifiyeli) için;
Agrega; $1150 \times (3750/1199.91) = 3594$ ton
ÖAB; $7.49 \times (3750/1199.91) = 23$ ton
Bitüm; $42.42 \times (3750/1199.91) = 133$ ton

Çalışmada Mayıs 2019 fiyatları kullanılmıştır.
Agrega fiyatı = 15TL/ton
Agrega nakliye fiyatı = 0.30TL/ton/km

Agrega nakliye fiyatı (Kırma Eleme Tesisi - Eskişehir, 15km) = $0.30 \times 15 = 4.5\text{TL/ton}$

Agrega birim fiyatı = $15 + 4.5 = 19.5\text{TL/ton}$

İzmit rafineri bitüm fiyatı = 2625TL/ton

Bitüm nakliye fiyatı = 0.40TL/ton/km

Bitüm nakliye fiyatı (İzmit – Eskişehir, 217km) = $0.40 \times 217 = 86.8\text{TL/ton}$

Bitüm birim fiyatı = $2625 + 86.8 = 2711.8\text{TL/ton}$

ÖAB fiyatı (Kırka – Kırma Eleme Tesisi – Eskişehir, 100km) = $0.30 \times 100 = 30\text{TL/ton}$

(ÖAB Kırka üzerinden direk kırma eleme tesisine ($70+15=85\text{km}$) getirilip bu tesiste öğütülüp elendikten sonra Eskişehir'e (15km) getirileceği düşünülürse ÖAB için 100km 'lik nakliye ücreti dışında herhangi bir ücret gerekmeyecektir.)

Kırka BP fiyatı = 1515TL/ton

BP nakliye fiyatı = 0.30TL/ton/km

BP nakliye fiyatı (Kırka – Eskişehir, 70km) = $0.30 \times 70 = 21\text{TL/ton}$

BP birim fiyatı = $1515 + 21 = 1536\text{TL/ton}$

Kırka SB fiyatı = 2730TL/ton

SB nakliye fiyatı = 0.30TL/ton/km

SB nakliye fiyatı (Kırka – Eskişehir, 70km) = $0.30 \times 70 = 21\text{TL/ton}$

SB birim fiyatı = $2730 + 21 = 2751\text{TL/ton}$

ÖAB bitüm modifiye birim fiyatı = $166.1 + 30 = 196.1\text{TL/ton}$

(KGM 2019 yılı özel plentte polimer modifiye bitüm (PMB) hazırlanması fiyatı 166.1TL/ton olarak belirtilmiştir. PMB yerine ÖAB kullanılır ise ÖAB bitüm modifiyesi birim fiyatı malzemenin nakliyesi ile modifiye işlemi fiyatının toplamı olarak bulunabilir.)

Katkısız asfalt betonu için maliyet:

$[3594 \times (15+4.5)] + [156 \times (2625+86.8)] = 493.124\text{TL}$ olarak bulunur.

%10 SB katkılı asfalt betonu (agrega modifiyeli) için maliyet:

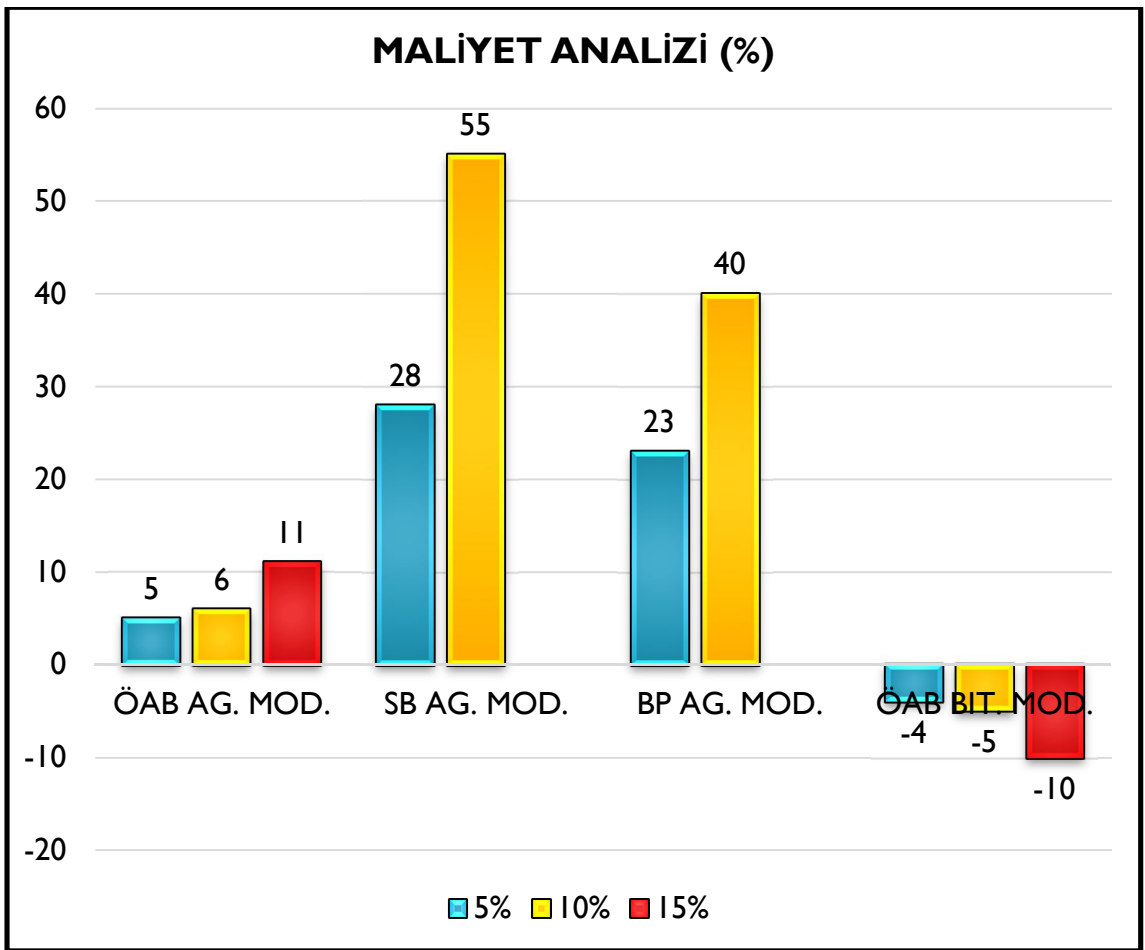
$$[3495 \times (15+4.5)] + [169 \times (2625+86.8)] + [86 \times (2730+21)] = 763.033\text{TL olarak}$$

bulunur.

%15 ÖAB katkılı asfalt betonu (bitüm modifiyeli) için maliyet:

$$[3594 \times (15+4.5)] + [133 \times (2625+86.8)] + [23 \times (166.1+30)] = 435.263\text{TL olarak}$$

bulunur.



Şekil 5.41. Maliyet analizi

Marshall Tasarımı sonuçlarına göre agrega modifiyesi ile oluşturulmuş SB ve BP için %5 katkı oranı ÖAB için ise %10 atık bor oranı ile hazırlanan numunelerin daha uygun olduğu belirlenmişti. Genel olarak agrega modifiyesi yol maliyetlerini artırmaktadır. Bunun sebebi agrega modifiyesinin OBO değerlerini artırmasından kaynaklanmaktadır. Bitümün günümüz koşullarında pahalı olması maliyetlerin artmasına

sebeptir. Katkılı numunelerin kontrol numunelerine göre katkı oranı %5' den %10' a artırıldığında, maliyetleri ÖAB katkılı numuneler için %5' den %6' ya, SB katkılı numuneler için %28' den %55' e ve BP katkılı numuneler için ise %23' den %40' a artırmakta olduğu belirlenmiştir.

SB ve BP katkılı numunelerin ekonomik analizleri incelendiğinde atık bor katkısının %5 oranından %10 oranına çıkarıldığında numunelerin maliyetlerini de arttırdığı görülmüştür (SB için %28' den %55' e, BP için %23' den %40' a). Bu iki malzemenin %5 katkı oranından %10 katkı oranına artırıldığında stabilite değerlerini düşürdüğü de bilinmekte olduğundan, hazırlanacak yol malzemelerinde SB ve BP katkı oranının %5' den fazla olmaması gerektiği açıktır.

Yine Marshall testi ve sünme deneyi sonuçları ile ekonomik analiz değerlendirmesi bir arada yapılır ise; her iki deney metodunda da %10 ÖAB katkılı numunelerin ön plana çıktığı görülmüştü. Marshall testinde fiziksel ve mekanik özellikleri %5ÖAB veya %15 ÖAB katkılı numunelere göre daha iyi özellik gösteren %10ÖAB katkılı numunelerin, sünme deneyinde de oluklanmaya karşı daha dirençli oldukları gösterilmişti. %10 katkı oranında ÖAB ile hazırlanan numuneler maliyet analizlerinde de ön plana çıkmaktadır. %10 katkı oranı ile hazırlanan numunelerin %5 katkı oranı ile hazırlanan numunelere göre maliyeti %1 (%5' den %6' ya) oranında arttırdığı görülmektedir. Ancak bu %1' lik artış mühendislik muhasebesine göre; daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip ve tekrarlı sünme deneyi sonuçlarına göre daha uzun ömürlü olan %10ÖAB katkılı numunelerin kullanılması için göz ardı edilmelidir. Ayrıca daha fazla malzemenin geri dönüştürülebilmesi adına, %5 katkı oranına göre iki katı atık malzemeyi geri dönüştürebilmek için de %10 katkı oranının kullanılması daha uygundur.

Bitüm modifiyesi ise yol üretiminin maliyetlerini düşürmektedir. Bunun sebebi ise karışımın içerisindeki bitüm miktarının azalmasıdır. Bilindiği üzere bitüm sadece ÖAB lar ile modifiye edilmişti. Modifiye oranı %5' e artırıldığında maliyetler %4 düşmüş, %10' a çıkarıldığında %5düşmüş ve %15' e artırıldığında ise %10 kadar düşmüştür. Ancak bu yöntemle üretilen numunelerin stabiliteyi düşürdüğü ve tekrarlı sünme deneyi sonuçlarına göre ise numunelerin ömrünü kısalttığı göz önünde bulundurulursa; bitüm modifiyesi maliyet olarak karışımlara yardımcı olmasının yanı sıra dayanım olarak numunelerin özelliklerini bozmaktadır. Dolayısı ile bu malzemenin bitüm içerisinde kullanılabilirliği son derece tartışmalı olacaktır. Bu teknik üzerine daha ileri

çalışmalar yapıp yeni teknikler üretilmeden yol malzemelerinde kullanılmaları uygun değildir.

Sonuç olarak maliyet analizlerinin ışığında genel bir değerlendirme yapılacak olursa şu sonuçlara ulaşılmıştır;

Agrega modifiyesi ile oluşturulan numunelerden BP malzemesinin %5 oranından fazla kullanılmaması, yine SB malzemesinin de maliyetleri %28' e kadar çıkardığından gerekmedikçe %5 katkı oranından fazla kullanılmaması gerekmektedir.

Kullanılmasının en uygun olacağı düşünülen %10ÖAB modifiyesi ise maliyetleri %6 oranında artırmaktadır. Ancak bu yöntemle üretilen numunelerin daha dayanıklı olması ve daha fazla atık malzemenin (1km yol için yaklaşık 86ton) geri dönüşümünü sağlayabilmesi sebeplerinden ötürü sürdürülebilir bir çevre için kullanılması daha uygun olacaktır.

Bitüm modifiyesinin ise yol malzemelerinde kullanılabilirliği maliyetleri düşürmesine rağmen dayanım açısından istenilen düzeyde olmaması sebebiyle henüz tartışma aşamasında kalması gerekmektedir.

5.9. Agrega Modifiyesi ve Bitüm Modifiyesinin Karşılaştırılması

Bu ana kadar yapılan bütün çalışmalar göz önüne alındığında bu bölümde agrega modifiyesi ile en iyi sonuçları aldığımız %10ÖAB katkı oranında oluşturulmuş numuneler ile yine %10ÖAB katkısı ile modifiye edilmiş bitüm ile oluşturulan numunelerin genel bir karşılaştırılması yapılmış, sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Agrega modifiyesi maliyeti %6 artırırken bitüm modifiyesi %5 azaltmaktadır.
- Agrega modifiyesi ile 1km yol için 86 ton atık geri dönüştürülürken bitüm modifiyesinde 16 ton atık geri dönüştürülüyor.
- Agrega modifiyesi 3.sünme evresine yaklaşık 4200 vuruşta gelirken bitüm modifiyesinde yaklaşık 2700 vuruşta geliyor.
- Dayanım açısından agrega modifiyeli numuneler bitüm modifiyeli numunelere göre 1.8 kat daha uzun ömürlüdür.

5.10. Yapay Sinir Ağı Çalışmaları

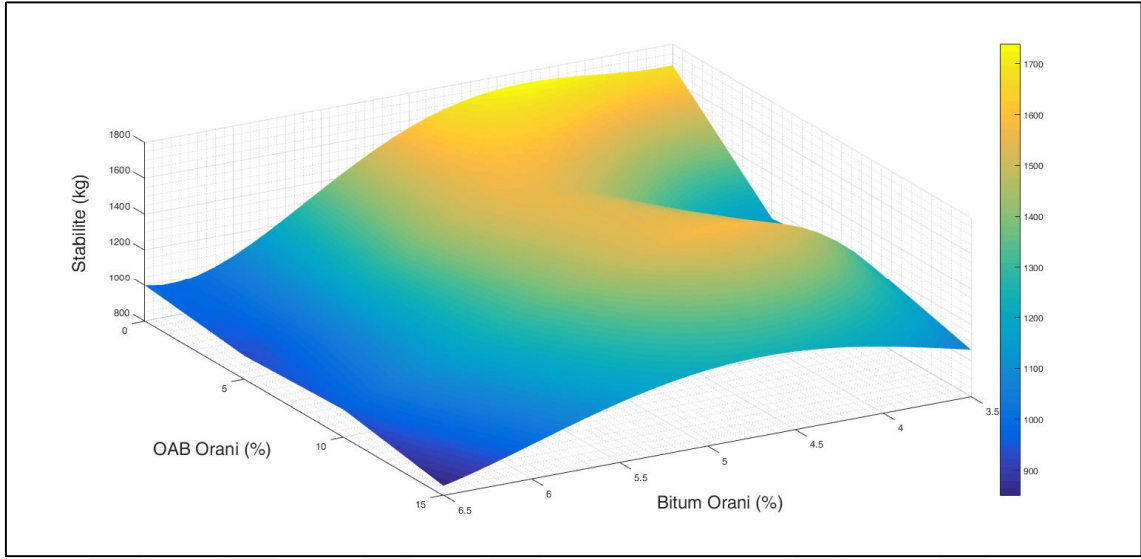
Marshall tasarımı ile optimum bitüm oranı hesaplama işlemi uzun süren ve kaliteli işçilik isteyen bir süreçtir. Deneyin sonunda sadece stabilite ve akma değerleri numunelere zarar verilerek hesaplanılabilmektedir. Karışımın birim ağırlığı, bitümle dolu boşluk oranı, mineral agregadaki boşluk oranı, hava boşluğu değerleri vb. ekstra hesaplamalar ile bulunabilmektedir. Eğer araştırmacılar standart bir karışımın stabilite ve akma değerlerini başka bir yöntemle elde edebilirlerse, hesaplamaların geri kalanı sadece matematiksel hesaplamalar olacaktır. Bu nedenle yapay sinir ağları, Marshall tasarımı sonunda elde edilen stabilite ve akma değerlerini elde etmek için uygun bir araç olabilir [159].

Bu çalışma ilk olarak atık bor malzemesinin BSK üretiminde kullanılarak çevre kirliliğini önlemeye çalışmaktadır. Bu teknik ile üretilen kaplamalar kullanılabilir niteliktedir özellikle çevre kirliliğini iyileştirme özelliğinden dolayı tercih edilmelidir. Yapılan hesaplama göre 1km' lik yol imalatında 86 ton atık borun çevresel etki ve sürdürülebilirlik bağlamında geri dönüşümü sağlanabilecektir. Araştırmanın ikinci amacı ise sinir ağları ile asfalt betonu numunelerine zarar vermeden numunelerin stabilite ve akma değerlerini tahmin emektir. Bu sayede optimum bitüm oranı değerleri numuneler döküldükten sonra sadece ekstra hesaplamalar ile bulunabilecektir. Ayrıca zamandan tasarruf edilecek ve kaplama mühendislerine yardımcı olunabilecektir.

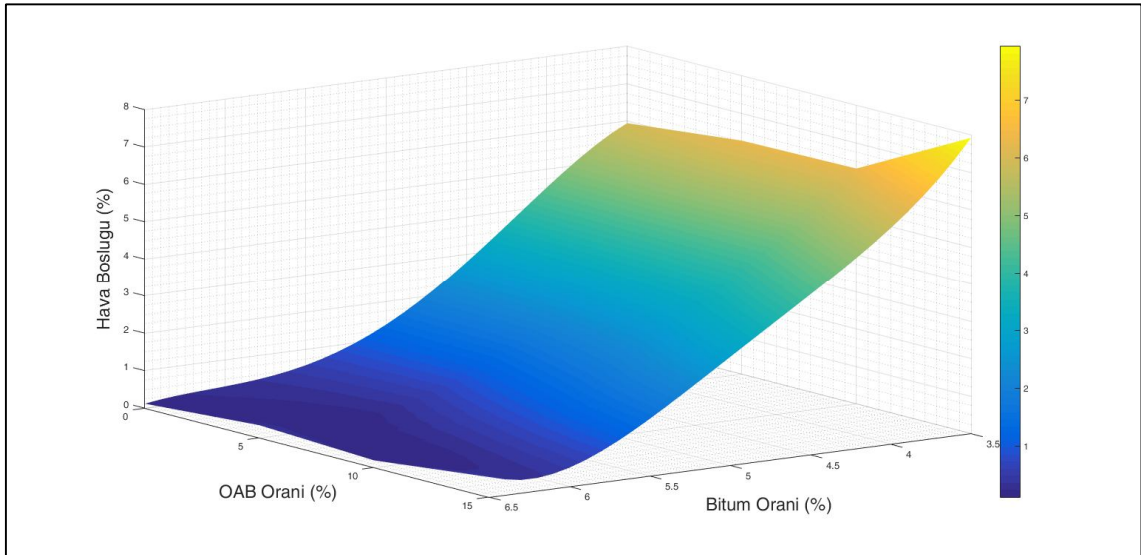
Bu sebeple bu ana kadar yapılan çalışmalarda en çok ön plana çıkan agrega modifiyesi ile oluşturulmuş ÖAB katkılı numunelerin yapay sinir ağları ile modellenmesi işlemine geçilmiştir.

Marshall tasarım deney sonuçları incelendiğinde; numunelerin çok büyük bir kısmının Marshall dayanımı 900 kg dan yüksek çıkmıştır. Akma değerlerinin de yine büyük bir kısmı şartname sınırları (2-4mm) içerisindedir. Optimum bitüm oranı hesaplarına göre dayanım açısından şartname değerleri sağlanmaktadır. Ayrıca ÖAB oranı arttıkça karışımların özgül ağırlıkları azalmakta, boşluk oranları artmaktadır. Matlab R2015a programı [186] ile hazırlanan grafik (Şekil 5.42) Bitüm Oranı - ÖAB Oranı - Stabilite ilişkisini göstermektedir. Görüldüğü üzere ÖAB oranı arttıkça numunelerin Stabilite değerleri düşmekte ancak atık borlar kendi aralarında incelendiğinde de en yüksek değerler %10ÖAB katkı oranında görülmektedir. Özellikle düşük bitüm oranlarında (3.5-4.5) %5 ve %15 katkılı numuneler düşük değerler verirken %10 katkılı numuneler daha yüksek değerler vermektedir. Ayrıca numunelerin fiziksel

özelliklerinden hava boşluğu (Vh) değerleri Şekil 5.43’ de daha detaylı bir şekilde incelendiğinde; ÖAB katkısının hava boşluğu değerlerini artırdığı görülmektedir. %5 ve %10 katkı oranlarında hava boşluğu değerleri kontrol numunelerine göre çok az bir artış göstermekte iken %15 katkı oranında bu değerler bir hayli artmaktadır. Hava boşluğu oranına bağlı olarak boşluklar arttıkça mineral agregadaki boşluk oranı (V.M.A.) ve bitümlü dolu boşluk oranı değerleri (Vf) azalmaktadır.



Şekil 5.42. Stabilitte – ÖAB oranı – Bitüm oranı grafiği



Şekil 5.43. Hava boşluğu – ÖAB oranı – Bitüm oranı grafiği

50/70 penetrasyonlu bitüm ile agrega modifiyesi neticesinde ÖAB katkıli numuneler için toplam 105 adet numune dökülmüştü, bütün bitüm oranlarında ve her ÖAB katkı oranını temsil edebilecek toplam 100 adet numune YSA çalışmalarında kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu numunelerin ortalama fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 5.65 ile verilmiştir.

Tablo 5.65. Numunelerin ortalama fiziksel ve mekanik özellikleri

Bitüm Oranı (%)	Numune Yüksekliği (mm)	V.M.A (%)	Vf (%)	Vh (%)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	ÖAB Oranı (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
3.5	61.42	13.87	57.39	5.96	2,403.78	0	1,685.25	2.48
4	60.81	13.45	67.55	4.37	2,427.10	0	1,712.43	1.81
4.5	60.74	13.19	77.70	2.95	2,446.11	0	1,747.72	2.57
5	60.37	12.77	89.65	1.32	2,469.93	0	1,579.89	2.50
5.5	60.25	13.03	96.27	0.49	2,474.06	0	1,374.90	3.28
6	61.22	13.95	97.17	0.40	2,459.72	0	1,061.26	5.00
6.5	61.38	14.67	99.18	0.12	2,450.53	0	997.68	4.34
3.5	62.00	14.17	55.64	6.29	2,395.42	5	1,157.68	3.18
4	61.68	13.59	66.86	4.52	2,423.33	5	1,205.35	4.99
4.5	60.80	13.27	77.13	3.04	2,443.85	5	1,545.53	2.96
5	60.05	12.80	89.34	1.37	2,468.85	5	1,511.06	2.86
5.5	60.50	12.99	96.64	0.44	2,475.33	5	1,347.71	3.38
6	61.06	13.74	98.84	0.16	2,465.71	5	1,126.84	4.53
6.5	61.53	14.81	98.09	0.28	2,446.52	5	898.05	4.74
3.5	61.50	14.23	55.36	6.36	2,393.75	10	1,199.03	2.93
4	61.04	13.52	67.25	4.44	2,425.31	10	1,583.27	2.36
4.5	61.99	13.75	74.06	3.57	2,430.45	10	1,514.03	3.55
5	60.42	13.17	86.55	1.78	2,458.61	10	1,455.75	3.05
5.5	60.60	13.59	91.70	1.13	2,458.11	10	1,374.36	3.94
6	61.23	13.88	97.64	0.33	2,461.48	10	1,075.64	4.15
6.5	61.37	14.78	98.34	0.25	2,447.47	10	961.95	5.74
3.5	62.49	15.68	49.39	7.94	2,353.25	15	1,063.14	1.61
4	61.60	14.66	61.09	5.70	2,393.31	15	1,156.35	2.65
4.5	61.59	14.43	69.99	4.33	2,411.12	15	1,254.16	2.15
5	61.64	14.23	79.17	2.98	2,428.60	15	1,202.66	2.86
5.5	60.70	13.75	90.55	1.31	2,453.62	15	1,130.86	2.73
6	61.06	14.15	95.52	0.63	2,453.97	15	988.05	3.47
6.5	61.49	15.03	96.42	0.54	2,440.26	15	847.38	4.36

5.10.1. Yapay sinir ağı modeli seçimi ve yapay sinir ağı mimarisi

Yapay sinir ağının performansı asıl olarak ağın mimarisine ve girdilerin seçimine bağlıdır. Özellikle ara katman sayısı, katmanda kaç nöron olacağı, hangi aktivasyon fonksiyonlarının kullanılacağı, hangi transfer fonksiyonunun kullanılması gerektiği farklı

denemeler ve uzun uğraşlar sonucunda belirlenmelidir. Bütün bu seçimler yapıldıktan sonra sinir ağı insan beyni gibi bir eğitim süreci geçirir ve eğitim sonrasında daha önce ağı hiç görmediği örnekler ile test edilir. Bulunan değerlerin gerçek değerlere yakınlığı ağı performansı belirler.

Çalışmada Matlab NN Toolbox [186] programı kullanılmıştır. Program Tablo 5.66 ile verilen geri besleme eğitim algoritmalarını kullanabilmektedir. Uzun denemeler sonucunda ‘trainbr’ algoritması en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. “Trainbr”, ağırlık ve bias değerlerini Levenberg-Marquardt optimizasyonuna göre güncelleyen bir ağı eğitim fonksiyonudur. Ortalama kare hata ve ağırlıklar kombinasyonunu en aza indirir ve daha sonra iyi bir şekilde genelleştiren bir ağı oluşturmak için doğru kombinasyonu belirler. Bu sürece Bayesian düzenlemesi denir [186]. Bayesian düzenlemesi, karesel hataların ve ağırlıkların doğrusal kombinasyonunu en aza indirir. Ayrıca doğrusal kombinasyonunu değiştirir, böylece eğitim sonunda ortaya çıkan ağı en iyi genelleme özelliklerine sahip olur [187,188].

Tablo 5.66. YSA eğitiminde kullanılan geri yayılım algoritmaları

MATLAB fonksiyonu	Algoritma
trainlm	Levenberg-Marquardt
trainbr	Bayesian Regularization
trainbfg	BFGS Quasi-Newton
trainrp	Resilient Backpropagation
trainscg	Scaled Conjugate Gradient
traincgb	Conjugate Gradient with Powell/Beale Restarts
traincgf	Fletcher-Powell Conjugate Gradient
traincgp	Polak-Ribière Conjugate Gradient
trainoss	One Step Secant
traingdx	Variable Learning Rate Gradient Descent
traingdm	Gradient Descent with Momentum
traingd	Gradient Descent
traingda	Gradient descent with adaptive linear back propagation

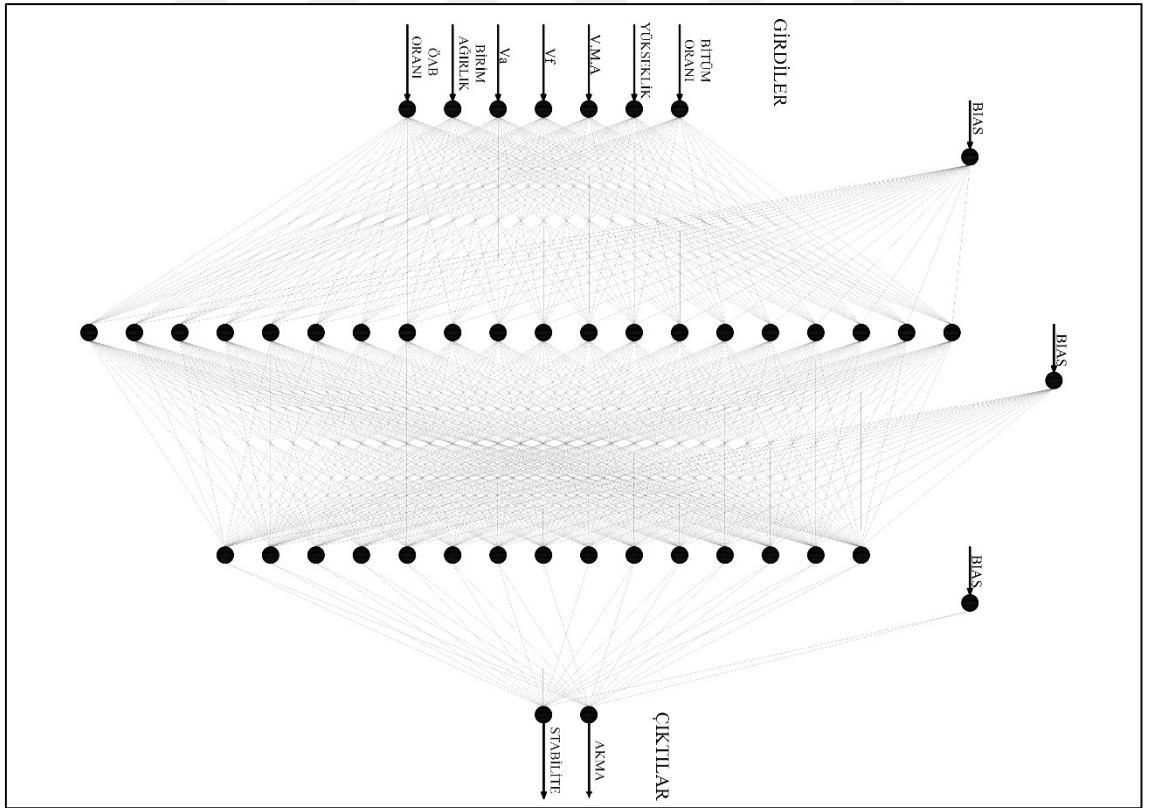
Sinir ağı mimarisi olarak Şekil 5.44 ile gösterilen tasarım kullanılmıştır (7-20-15-2). Görüldüğü üzere girdi katmanında 7 adet nöron bulunmaktadır. Girdilerin (Bitüm oranı, yükseklik, V.M.A, Vf, Vh, Birim Ağırlık ve ÖAB oranı) tamamı 0-1 değerleri arasında aşağıdaki formül 5.21 ile normalize edilmiştir. Dolayısıyla her katmanda transfer fonksiyonu olarak logaritmik sigmoid fonksiyonu (Formül 5.22) kullanılmıştır.

$$F = \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (5.21)$$

Burada; “ F ” normalize olmuş değeri, “ F_i ” i inci ölçülen değeri, “ F_{\max} ” ve “ F_{\min} ” ölçülen en düşük ve en yüksek değerleri temsil etmektedir [142].

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.22)$$

Tablo 5.67 girdilerin tanımlayıcı istatistik değerlerini göstermektedir. Veriler %80 eğitim seti ve %20 test seti olmak üzere karışık olarak bölünmüştür. Öğrenme hızı (learning rate) ve momentum, geri yayılma algoritmasının yakınsama hızını etkileyen parametrelerdir. Öğrenme hızı olarak 0.01 momentum değeri olarak 0.8 değerleri kullanıldı ve eğitim seti için model seçimi tamamlandı.



Şekil 5.44. YSA mimarisi

Tablo 5.67. Tanımlayıcı istatistik verileri

Tanımlayıcı İstatistik	Bitüm Oranı	Yükseklik	V.M.A	Vf	Vh	Birim Ağırlık	ÖAB Oranı	Stabilite	Akma
Ortalama	4.97	61.07	13.82	81.49	2.59	2,439.43	6.06	1,319.90	3.32
Standart Hata	0.11	0.08	0.09	1.79	0.26	3.39	0.65	33.83	0.13
Ortanca	5.00	61.00	13.71	87.89	1.57	2,446.83	5.00	1,300.73	3.23
Standart Sapma	0.99	0.75	0.77	15.97	2.32	30.33	5.77	302.55	1.19
Örnek Varyans	0.98	0.56	0.60	255.15	5.40	919.70	33.35	91,536.05	1.41
Basıklık	-1.24	2.28	0.25	-1.10	-0.60	1.39	-1.37	-1.04	-0.27
Çarpıklık	0.04	0.80	0.63	-0.52	0.72	-1.20	0.33	0.25	0.43
Aralık	3.00	4.65	3.64	52.08	8.41	137.48	15.00	1,151.49	5.16
En Küçük	3.50	59.44	12.50	47.71	0.03	2,340.56	0.00	808.01	1.29
En Büyük	6.50	64.09	16.14	99.79	8.44	2,478.03	15.00	1,959.50	6.45
Say	80	80	80	80	80	80	80	80	80

5.10.2. Yapay sinir ağı çıktıları

Modellenen ağın eğitilmesi süreci işleminden sonra ağın performansı test numuneleri ile ölçülmüştür. Öncelikle bulunan sonuçların hata değerleri hesaplanmıştır. Çıktı değerlerine ait MAE (Mean Absolute Error) (Ortalama Mutlak Hata), MSE (Mean Squared Error) (Ortalama Kare Hata) ve RMSE (Root Mean Squared Error) (Kök Ortalama Kare Hata) analiz sonuçları Tablo 5.68 ile verilmiştir.

Tablo 5.68. Doğruluk ölçüsü

	STABİLİTE			AKMA		
	MAE	MSE	RMSE	MAE	MSE	RMSE
EĞİTİM SETİ	0.04296	0.00338	0.05814	0.05194	0.00462	0.06800
TEST SETİ	0.06474	0.00632	0.07949	0.05816	0.00547	0.07395

Doğruluk ölçüsü değerlerinin tanımları ve kullanılan formülasyonları aşağıda verilmiştir.

Ortalama mutlak hata iki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsüdür. MAE, her gerçek değer ile veriye en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama dikey mesafedir. MAE aynı zamanda her veri noktası ile en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama yatay mesafedir. MAE değeri kolay yorumlanabilir olduğu için regresyon ve zaman serisi problemlerinde sıkça kullanılmaktadır. MAE, yönlerini dikkate almadan bir dizi tahmindeki hataların ortalama büyüklüğünü ölçen, tüm tekil hataların ortalamada eşit olarak ağırlıklandırıldığı doğrusal bir skordur. MAE değeri 0' dan ∞ ' a kadar değişebilir. Negatif yönelimli puanlar yani daha düşük değerlere sahip tahminleyiciler daha iyi performans gösterir.

Basitçe, ortalama kare hata bir regresyon eğrisinin bir dizi noktaya ne kadar yakın olduğunu söyler. MSE, bir makine öğrenmesi modelinin, tahminleyicinin performansını ölçer, her zaman pozitif değerlidir ve MSE değeri sıfıra yakın olan tahminleyicilerin daha iyi bir performans gösterdiği söylenebilir.

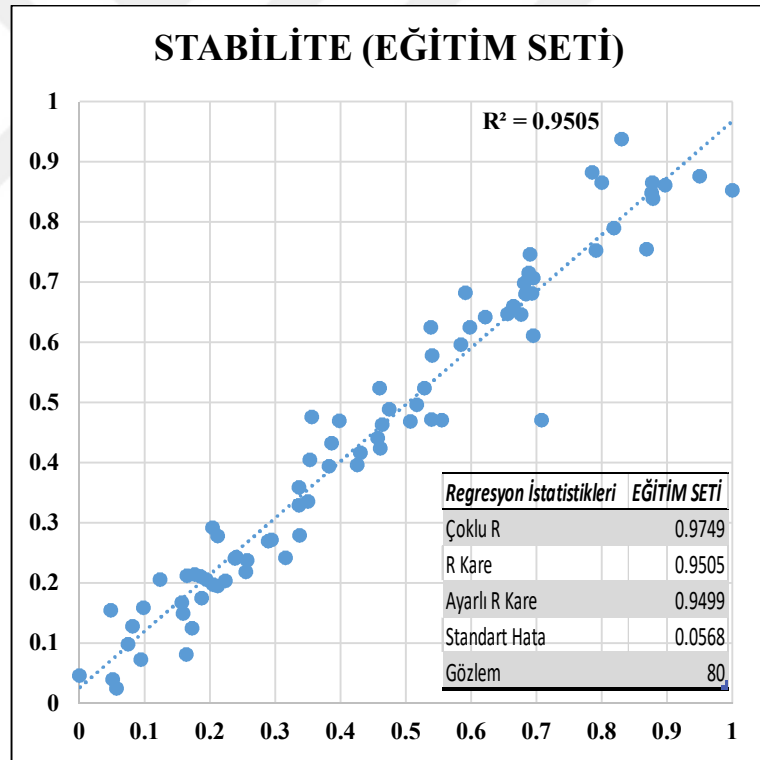
Bir makine öğrenmesi modelinin, tahminleyicinin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerleri arasındaki uzaklığın bulunmasında sıklıkla kullanılan, hatanın büyüklüğünü ölçen kuadratik bir metriktir. RMSE tahmin hatalarının (kalıntıların) standart sapmasıdır. Yani, kalıntılar, regresyon hattının veri noktalarından ne kadar uzakta olduğunu bir ölçüsüdür; RMSE ise bu kalıntıların ne kadar yayıldığıнын bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle, verilere en iyi uyan çizgi etrafında o verilerin ne kadar yoğun olduğunu söyler. RMSE değeri 0' dan ∞ ' a kadar değişebilir. Negatif yönelimli puanlar yani daha düşük değerlere sahip tahminleyiciler daha iyi performans gösterir. RMSE değerinin sıfır olması modelin hiç hata yapmadığı anlamına gelir. RMSE, büyük hataları daha fazla cezalandırmanın avantajına sahiptir, bu yüzden bazı durumlara daha uygun olabilir. RMSE, birçok matematiksel hesaplamada istenmeyen mutlak değerin kullanılmasını engeller.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |e_j| \quad (5.23)$$

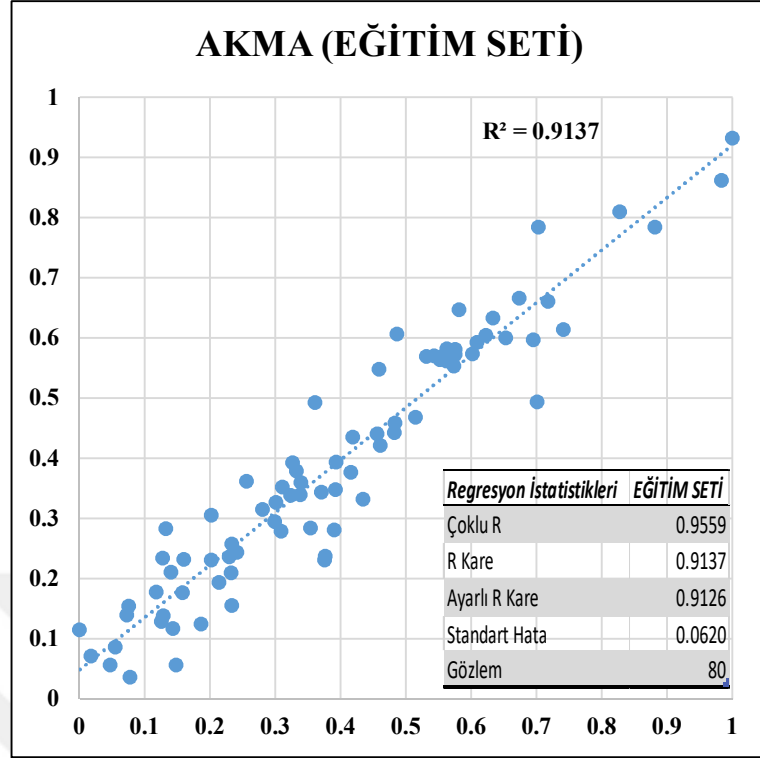
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2 \quad (5.24)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2} = \sqrt{MSE} \quad (5.25)$$

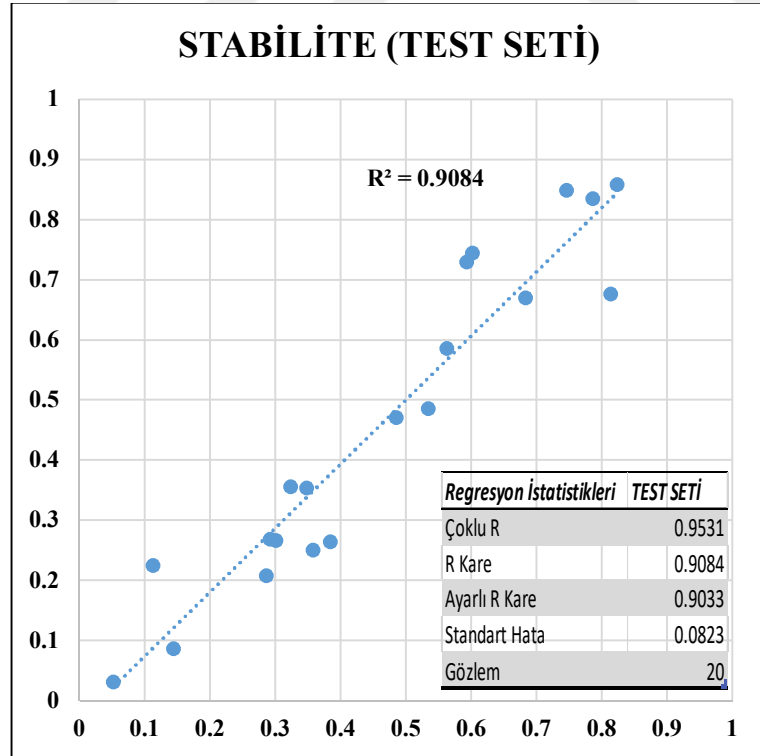
Ayrıca ağ sonucu bulunan değerlerin regresyon analizi grafikleri Şekil 5.45, 5.46, 5.47 ve 5.48 ile gösterilmiştir. İstatistiki verilerin ışığında görüldüğü üzere modelleme son derece başarılı olmuştur. Özellikle regresyon analizleri modelin anlamlılığını kanıtlar niteliktedir. (Stabilite eğitim ve test regresyon analizi sonuçları $r^2=0.95-0.91$), (Akma eğitim ve test regresyon analizi sonuçları $r^2=0.91-0.87$). Buda aynı laboratuvar koşullarında hazırlanan kontrol ve ÖAB katkılı numunelerin Stabilite ve akma değerlerinin numunelere zarar verilmeden de ölçülebileceğinin bir kanıtıdır.



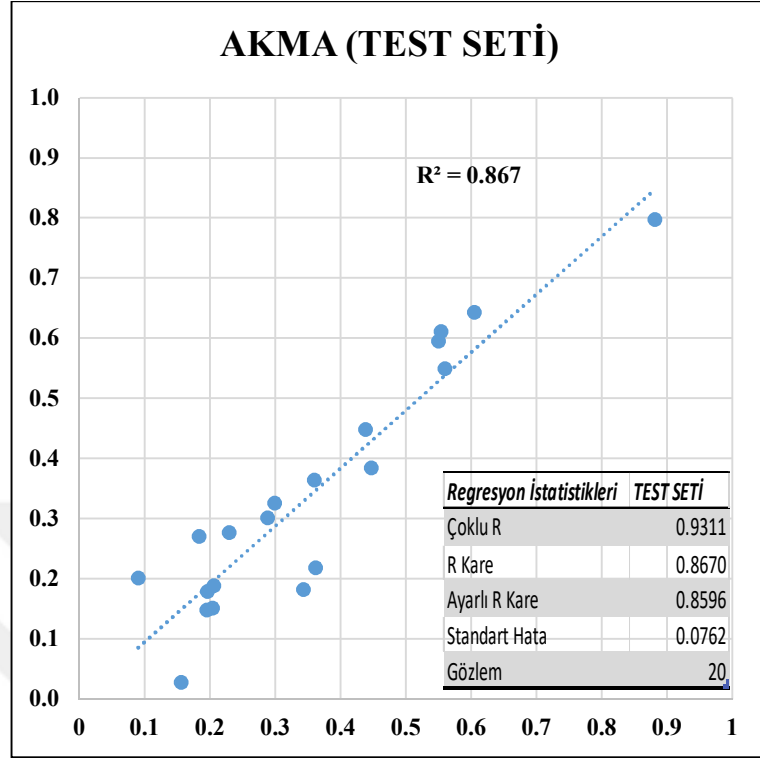
Şekil 5.45. Stabilite değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve eğitim seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi



Şekil 5.46. Akma değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve eğitim seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi



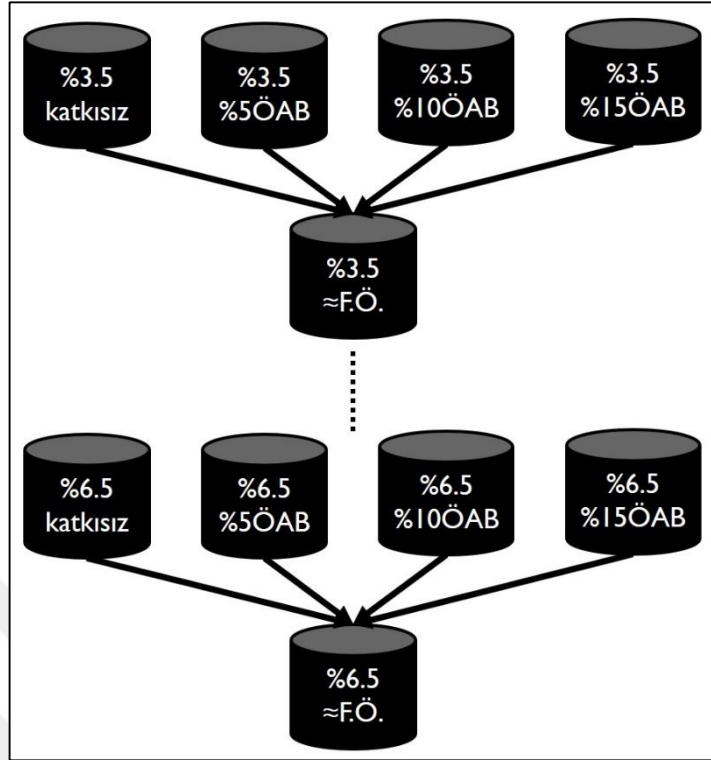
Şekil 5.47. Stabilitate değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve test seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi



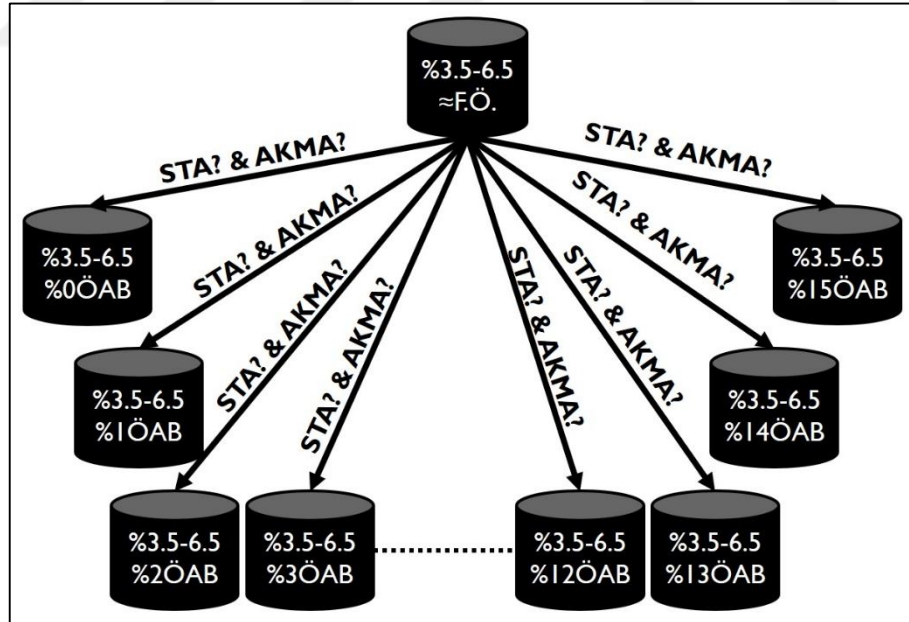
Şekil 5.48. Akma değerleri için oluşturulan deney sonuçları ve test seti çıktıları arasındaki regresyon analizi eğrisi

5.10.3. Yapay sinir ağı ile oluşturulan simülasyon

Son olarak modellenen YSA ile Öğütülmüş Atık Bor katkısının asfalt betonu numunelere etkisini araştıran bir simülasyon düzenlenmiştir. Önerilen senaryoya göre fiziksel özellikleri birbirinin aynı olan (Yükseklik, V.M.A, Vf, Vh, Unit Weight) numunelerin bitüm oranı ve ÖAB oranı değiştirildiğinde oluşacak Stabilitate ve akma değerleri gözlemlenmiştir. Bu simülasyonda her bir bitüm oranı yüzdesine karşılık gelen fiziksel özellikler ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Okuyucu şunu anlamalıdır ki fiziksel özellikler ÖAB oranına göre farklı çıkmalıdır ancak senaryo gereği ÖAB oranının numunelerin mekanik özelliklerine etkisini anlamak açısından fiziksel özelliklerin aynı olduğu varsayılmıştır. Simülasyonun aşamaları aşağıda Şekil 5.49 ve 5.50 ile verilmiştir.



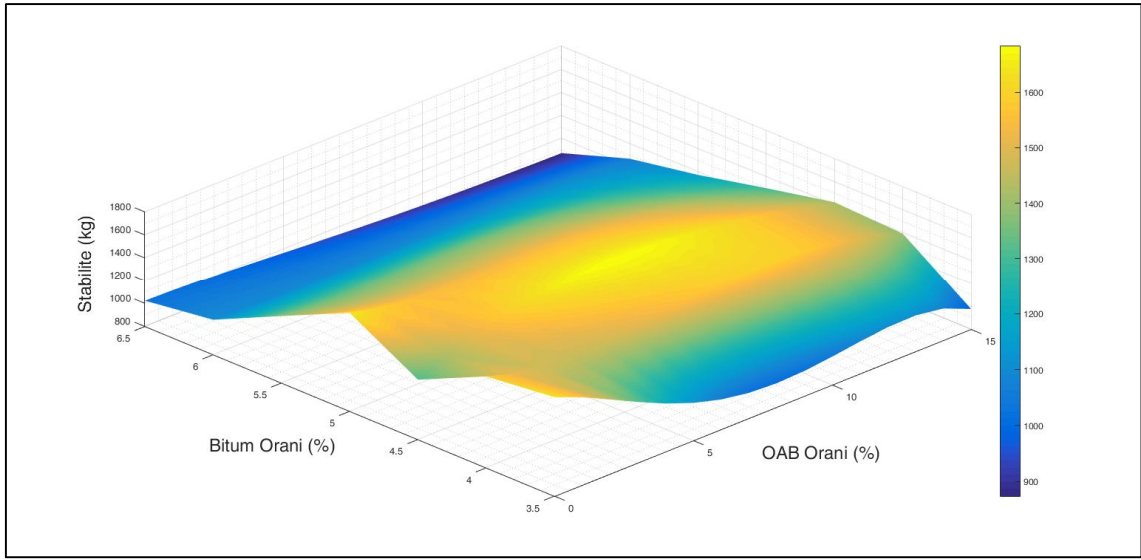
Şekil 5.49. Simülasyonun oluşturulması



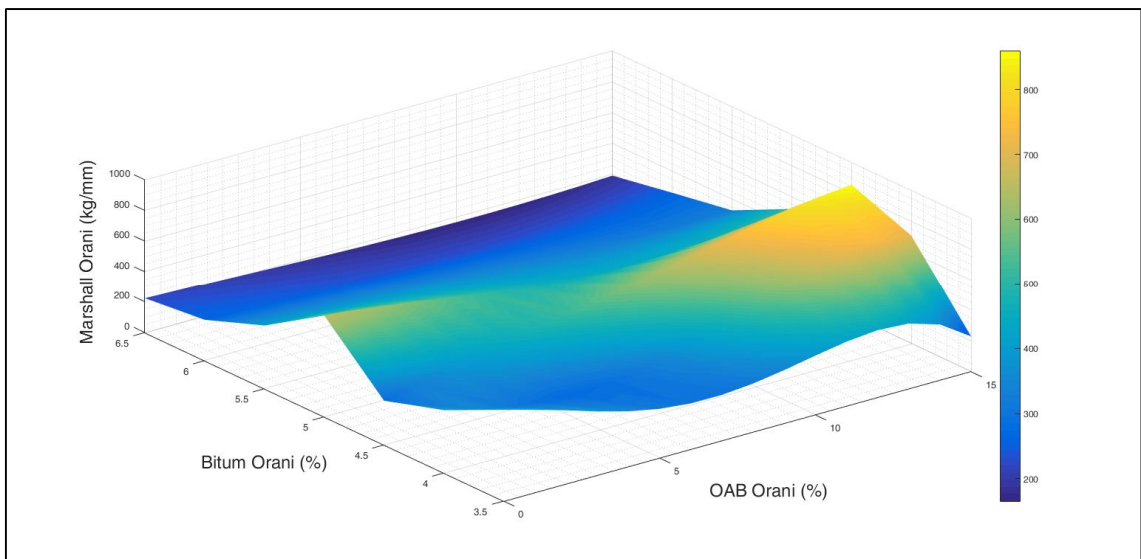
Şekil 5.50. Simülasyon sonuçlarının alınması

YSA çıktıları ile oluşturulan grafikler Şekil 5.51 ve Şekil 5.52 ile aşağıda verilmiştir. Şekil 5.51’ de görüldüğü üzere stabilite değerleri kendi aralarında detaylı bir şekilde incelenir ise %10katkı oranı özellikle göze çarpmaktadır. Önemli bir diğer bulgu ise

hemen hemen bütün bitüm oranı değerlerinde şartname değerlerini sağlanmış olmasıdır (min 900kg). Şekil 5.52’ de ise simülasyon sonucu hesaplanan Marshall Oranı (MO) değerlerinin 3-boyutlu grafiği verilmiştir. MO değeri numunelerin rijitliğini belirleyen ifadedir, Stabilitate değerlerinin akma değerlerine oranı MO değerini verir. Simülasyon grafiği açıkça göstermektedir ki ÖAB katkısı (özellikle %4.0 - %5.0 bitüm oranı aralığında) numunelerin rijitliğini artırmaktadır. İki ayrı grafiğin genel bir değerlendirmesi yapılır ise; simülasyon sonuçları da yine %10 ÖAB katkısının en iyi sonuçları doğuracağını net bir şekilde ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 5.51. Simülasyon sonucu oluşturulmuş 3 boyutlu Stabilitate, Bitüm oranı ve ÖAB oranı grafiği



Şekil 5.52. Simülasyon sonucu oluşturulmuş 3 boyutlu Marshall Oranı, Bitüm oranı ve ÖAB oranı grafiği

6. SONUÇLAR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarında yapılan iki buçuk yıllık çalışmada yaklaşık 400 adet asfalt betonu numunesi (yaklaşık yarım ton) hazırlanmış, bor katkısı ile hem asfalt betonu performansını arttırmak hem de ekonomik kazanımlar hedeflenmiştir. Bu katkı ile geri dönüştürülebilir malzemeler sektörünün kullanımına açılmaya çalışılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan üç farklı bor içeren malzemenin kimyasal yapısının araştırılması neticesinde BP ve SB malzemelerinin bor oksit ve sodyum oksitten oluştuğu BP malzemesinin % 47.90, SB malzemesinin ise % 69.30 oranında bor oksit içerdiği tespit edilmiştir. ÖAB malzemesi ise birçok bileşik ve elementten bir araya gelmesine karşın ağırlıklı olarak silisyum, magnezyum, kalsiyum, sodyum ve bor oksitten oluşmakta olup genel olarak kil pestili olarak tanımlanabilir. İçeriğinde yaklaşık olarak %11.84 bor oksit barındırmaktadır.

Çalışmanın birinci safhasında 50/70 penetrasyonlu bitüm ile 1.18mm' lik elek altında kalan agregaların atık borlar ile modifiyesi neticesinde oluşturulan numunelerin performansları değerlendirilmiştir. Hesaplanan optimum bitüm oranı değerleri sonuçlarına göre, katkı oranının artırılması optimum bitüm değerlerini de artırdığı ancak bu artış ile bile standartlar çerçevesinde kullanılabilir asfalt betonu üretimi gerçekleştirilebileceğinin mümkün olduğu görülmüştür.

Farklı oranlarda ÖAB ile modifiye edilmiş asfalt beton numuneleri için Marshall Stabilite değerleri, şartnamede alt limit olan 900kg dan yüksektir. Ayrıca, akma değerleri de şartname sınırları dahilindedir (2-4 mm). Bununla birlikte, ÖAB' nin eklenmesi akma değerlerini arttırmış ve örneklerin stabilitesini azaltmıştır. Bu sonuçlar ÖAB içeren örneklerin daha az rijitliğe sahip olduğunu göstermektedir.

SB katkı maddesi ile modifiye edilmiş asfalt beton örneklerinin Stabilite değerleri de şartname koşulunu sağlamaktadır. Karışımdaki SB oranı arttıkça, birim ağırlık değerleri azalmış hava boşlukları ise artmıştır. Akma değerleri şartname sınırları dahilinde ve kontrol numunelerinkine yakın değerler vermiştir. SB' u düşük bitüm oranına eklemek, stabilizeyi azaltmakta, yüksek bitüm oranlarında ise tüm numuneler

benzer stabilite değerlerine sahip olmaktadır. Numunelerin MO değerleri içinde aynı gözlem sonuçları elde edilmiştir.

Boraks Pentahidrat katkı maddesi ile modifiye edilmiş asfalt beton numuneleri genellikle SB içeren numunelerle benzer özellikler göstermiştir. Ayrıca BP malzemesinin OBO sonuçlarına göre fazladan bitüm emdiği ve ekonomik anlamda kayıplar oluşturduğu aşikardır. Bu durumun mineralin yapısındaki hidrat etkisinden kaynaklanmakta olduğu düşünülmektedir.

BP ve SB katkılı numunelerin Stabilite değerleri atık bor oranı %5' den %10' a artırıldığında düşmektedir. Bununla beraber %10 ÖAB katkı oranında numunelerin Stabilite değerleri de artmıştır. Bu sebeple hazırlanan %15 ÖAB katkılı numunelerde de yine Stabilite değerleri azaldığından bu katkı oranı ÖAB' lar için üst limit olarak belirlenmiştir. Bor atıkları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise en yüksek Stabilite değerleri ÖAB katkılı numunelerde gözlenmiştir.

Gözlemler ve ölçümler kontrol ve modifiye edilmiş numunelerin fiziksel özellikleri üzerinden devam ettirilmiştir. Atık bor katkısının numunelerin Dp ve Vf değerlerini azalttığını Vh ve VMA değerlerini arttırdığı görülmektedir. Detaylı gözlemler ise ÖAB ve SB katkısı ile hazırlanan numunelerin fiziksel özelliklerinin kontrol numunelerinkilerine yakın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte BP modifiyesinin Dp, Vh, Vf ve VMA değerlerini büyük ölçüde değiştirdiği gözlenmiştir. Bunun sebebinin yine Boraks Pentahidratın yapısında bulunan hidrat etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Akma sonuçlarına göre; ÖAB modifikasyonu numunelerin akma değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca düşük bitüm oranlarında (%3.5-%5) SB katkısı numunelerin akma değerlerini yükseltirken BP katkılı numunelerin akma değerleri kontrol numunelerine çok yakın değerler vermiştir. Yüksek bitüm oranlarında (%5-%6.5) ise bu durum değişmiş SB katkılı numunelerin akma değerleri kontrol numunelerinin değerlerine yaklaşırken BP katkılı numuneler ise akma değerlerini yükseltmeye başlamışlardır.

3 farklı bor atığının kendi aralarında değerlendirilmesi için, %10 katkı oranına sahip numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösterir grafikler çizilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi, ÖAB katkılı örnekler kontrol numunelerine düşük bitüm

oranlarında; MS, Dp, Vh, Vf ve MO değerleri açısından en yakın sonuçlara sahiptir. SB ve BP modifiyeli numuneler (özellikle BP modifikasyonu) MS, Dp, Vf ve MO değerlerini belirgin şekilde azaltırken Vh ve VMA değerleri önemli ölçüde artmıştır. Ek olarak, bu örneklerin MO değerleri de düşüktür.

50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan agrega modifiyeli numunelerden özellikle öğütülmüş atık bor kullanımının olumlu sonuçlar vermesi sevindiricidir. Optimum bitüm oranı değerleri kontrol numunelerine yakın çıkmıştır. %6 lık bu artış ÖAB'un yol malzemesi olarak kullanılmasında bir sakınca olmadığına göstergesidir.

50/70 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan numunelerde elde edilen ümit veren sonuçların ardından 70/100 penetrasyonlu bitüm ile çalışmalar devam ettirilmiştir. Çalışmalar öncelikle daha yüksek performans gösteren ÖAB katkılı numunelerle başlatılmıştır. Ancak sonuçlar 70/100 penetrasyonlu bitüm ile hazırlanan numunelerin son derece yetersiz olduğunu göstermiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüm ile yapılan çalışmalarda özellikle dayanım anlamında ÖAB katkılı numuneler diğer atık bor ilaveli numunelerden daha yüksek sonuçlar verdiği için BP ve SB katkısı ile yeni numuneler hazırlanmasına gerek görülmemiştir.

70/100 penetrasyonlu serideki numuneler özellikle yüksek katkı oranlarında son derece yetersizdir. Özellikle %10 ve %15 katkı oranlarında stabilite değerleri bir hayli düşmüş akma değerleri ise şartname limitlerinin çok üzerine çıkmıştır. Bu durum 70/100 penetrasyonlu bitümün düşük yumuşama noktası değerinden kaynaklanmaktadır. 60°C de yarım saat bekletilen numunelerin içindeki bitümün 43°C olan yumuşama noktası değeri numunelerin erkenden bozulmasına sebep olmuştur. Dolayısı ile bu atıkların düşük hava performansı ayrıca araştırılmalıdır ancak Marshall stabilite ve akma deneyinde yeterli performans gösteremeyecekleri aşikardır.

70/100 penetrasyonlu bitümün agrega modifiyesi ile oluşturulan numunelerde önceki katkılar gibi OBO değerlerini kontrol numunelerine göre artırmıştır. Numunelerin kendi aralarındaki incelemeleri ise katkının Stabilite, Dp, Vf ve MO değerlerini düşürdüğünü, Vh, VMA ve akma değerlerini artırdığını göstermiştir.

Çalışmamızın birinci safhasında 3 farklı bor atığının ince malzeme ve filler malzeme ile yer değiştirilmesi sonucu hazırlanan numunelerin Marshall tasarımı sonuçlarına göre performansları değerlendirilmiş ve her üç malzemenin de bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği gösterilmiştir. Çalışmaların sonraki safhasında ise daha iyi

performanslı asfalt betonu üretimi için bor atıklarının bitüm ile modifikasyonu araştırılmıştır.

Öncelikle %5, %10 ve %15 oranında ÖAB ile modifiye edilen bitümün özelliklerine bakılacak olur ise; bitüm modifiyesinin bitümün özgül ağırlık değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Penetrasyon değerlerinin düştüğü yumuşama noktası değerlerinde bir değişim olmadığı görülmüştür. Dönel viskozite deneyleri sonuçları ise atık bor ilavesinin bitüm viskozitesini arttırdığını ispatlamaktadır. Yüksek viskozite değerleri de sıcak iklimlerde daha kullanılabilir bitüm oluşturulduğunun bir göstergesidir.

Optimum bitüm oranı değerleri incelemelerine göre ÖAB modifiyesi optimum bitüm oranı değerlerini artırmaktadır ancak bitümden %10' lar mertebesinde tasarruf edilmektedir, dolayısıyla ekonomik anlamda çok büyük kazançlar sağlanacaktır.

Modifiye bitümle oluşturulmuş numuneler kontrol numunelerine yakın özellikler göstermiştir. Stabilite değerleri yine şartname değerlerini sağlamış, %15 katkı oranı kontrol numunelerine yakın değerler vermiş %5 ve %10 katkı oranlarında ise hafif düşüşler yaşanmıştır. Düşük bitüm oranlarında Dp ve Vf değerlerinde bir miktar düşüş yaşanmış Vh ve VMA değerlerinde ise artışlar gözlenmiştir. Yüksek bitüm oranlarında ise kontrol numuneleriyle hemen hemen aynı sonuçlar alınmıştır. Akma sonuçları ise beklenildiği gibi artmamış %5 katkı oranında düşmüştür. %10 ve %15 katkı oranlarında ise düşük bitüm oranlarında kontrol numuneleri ile yakın değerler vermiş yüksek bitüm oranlarında ise yine düşmüştür. Akmalardaki bu düşüş MO değerlerini de etkilemiş, yüksek bitüm oranlarında MO değerleri de kontrol numunelerine göre artış göstermiş daha rijit numuneler üretilmiştir.

Çalışmamalarımız Marshall tasarımı sonuçlarına göre oluşturulan (optimum bitüm oranı değerlerinde) asfalt betonu numunelerinin sünme deneyi sonuçlarının irdelenmesi ile devam etmiştir. Bu noktada en yüksek stabilite değerleri sünme deneylerinde referans olarak kullanılmış ve agregada modifiyesi ile bitüm modifiyesi sonucu oluşturulan iki farklı grubun statik ve tekrarlı sünme deneyi sonuçları değerlendirilmiştir.

Agregada modifiyesi ile oluşturulmuş ve en yüksek stabilite değerlerine sahip katkı oranlarında hazırlanan numunelerin statik yükleme karşısında oluşturdukları performanslar baktığımızda; en yüksek deformasyonlar SB katkılı numunelerde

oluşurken bunu sırasıyla BP katkılı numuneler, kontrol numuneleri ve ÖAB katkılı numuneler izlemektedir. 500kPa'lık 1 saat süren statik yükleme sonucu en yüksek dayanımı gösteren numuneler ÖAB katkılı numunelerdir.

Agrega modifiyesi ile oluşturulmuş farklı katkı malzemeleri ile farklı oranlarında hazırlanan numunelerin tekrarlı yükleme karşısında oluşturdukları ortalama grafikler de görüldüğü üzere en yüksek deformasyonlar yine SB katkılı numunelerde daha sonra ise BP katkılı numunelerde oluşmuştur. Bu numuneleri kontrol numuneleri takip etmiş en az deformasyonlar ise ÖAB katkılı numunelerde gözlenmiştir. ÖAB katkılı numuneler ise kendi aralarında karşılaştırıldığında %10 katkılı numunelerin daha uzun ömürlü olduğu tespit edilmiştir.

Sünme rijitliği grafikleri için ayrıca bir değerlendirme yapılacak olursa; sünme rijitliği eğrisinin 10MPa değerine ulaştığı an, numunenin üçüncül sünme evresine yani yıkıma başladığı an yada başka bir deyişle numunenin ömrünü tamamladığı an olarak da kabul edilebileceği söylenmişti. Bu varsayım ile numuneler yorumlanır ise; kontrol numuneleri 3424.vuruşta, %5ÖAB katkılı numuneler 3755.vuruşta, %10ÖAB katkılı numuneler 4597.vuruşta, %5SB katkılı numuneler 2416.vuruşta ve %5BP katkılı numuneler ise 2438.vuruşta ömürlerini tamamlamışlardır. Yine bu hesaba göre %10 ÖAB katkılı numuneler SB ve BP katkılı numunelerden 1.9 kat kontrol numunelerinden ise 1.35 kat daha uzun ömürlü oldukları hesaplanmıştır.

Bu sonuçlara göre %10 ÖAB katkılı numuneler ile üretilecek yolların servis süreleri daha uzun olacağı ve oluklanma potansiyeline göre daha dirençli olacakları belirlenmiştir.

Bitüm modifiyesi ile oluşturulmuş ilk serinin statik sünme deneyi sonuçlarına göre modifiyeli numunelerin deformasyonları artırdığı görülmüştür. Daha detaylı incelemeler için tekrarlı sünme deneyi sonuçlarına bakılmıştır.

Tekrarlı sünme deneyi sonuçları statik sünme deneyine göre daha belirgin sonuçlar vermiş ve bitüm içerisindeki katkı oranı arttıkça numunelerin deformasyonlarının da arttığı gözlemlenmiştir. ÖAB malzemesi ile oluşturulmuş bitüm ile hazırlanan numuneler ile şartname sınırları dahilinde asfalt betonları üretilebilmiş olsa da OBO'nda hazırlanan numunelerin 500kPa'lık tekrarlı yük altındaki davranışları, örneklerde oluşan deformasyonları arttırdığını göstermiştir.

Çalışmalar maliyet analizleri ile devam etmiştir. Agregada modifiyesi ile oluşturulan numunelerden BP ve SB malzemelerinin %5 oranında maliyetleri %23 ve %28'e kadar çıkardığından gerekmedikçe %5' den fazla kullanılmaması önerilmektedir.

Kullanılmasının en uygun olacağı düşünülen %10ÖAB modifiyesi ise maliyetleri %6 oranında artırmaktadır. Ancak bu yöntemle üretilen numunelerin daha dayanıklı olmasından ötürü, ayrıca %10 katkı oranında oluşturulacak yolların hem atık malzemelerin geri dönüşümünü sağladığı (1km yol için yaklaşık 86ton) hem de sürdürülebilir bir çevre açısından tercih edilmesi gerektiğinin göstergeleridir.

Bitüm modifiyesinin ise yol malzemelerinde kullanılabilirliği maliyetleri düşürmesine rağmen dayanım açısından istenilen düzeyde olmaması sebebiyle henüz tartışma aşamasında kalması gerekmektedir.

Agregada modifiyesi ile bitüm modifiyesinin genel bir karşılaştırılması yapıldığında (her ikisi içinde %10 katkı oranında) ise 4 farklı sonuca ulaşılmıştır. Bunların birincisi, agregada modifiyesi maliyeti %6 artırırken bitüm modifiyesi %5 azaltmaktadır. İkincisi, agregada modifiyesi ile 1km yol için 86 ton atık geri dönüştürülürken bitüm modifiyesinde 16 ton atık geri dönüştürülüyor. Üçüncüsü, agregada modifiyesi 3.sünme evresine yaklaşık 4200 vuruşta gelirken bitüm modifiyesinde yaklaşık 2700 vuruşta geliyor. Sonuncusu ise, dayanım açısından agregada modifiyeli numuneler bitüm modifiyeli numunelere göre 1.8 kat daha uzun ömürlüdür denilmiştir.

Çalışmaların son bölümünde Marshall Test prosedürü ile hazırlanan asfalt betonu numunelerinin oluşturulan YSA ile performansları incelenmiştir. 1.18mm lik elek altında kalan malzeme yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında ÖAB ile modifiye edilerek oluşturulan numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre ÖAB katkılı numunelerin asfalt üretiminde kullanılabilirliği ispatlanmış, özellikle %10 katkılı numunelerin en yüksek performansları gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca YSA ile modellenen asfalt numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tahminlenebilmesi için yeni bir metot geliştirilmiş, eğitilen ağ daha önce görmediği örnekler ile test edilmiştir. Regresyon analizleri neticesinde son derece anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. (Stabilite eğitim ve test regresyon analizi sonuçları $r^2=0.95-0.91$), (Akma eğitim ve test regresyon analizi sonuçları $r^2=0.91-0.87$). YSA modeli ile oluşturulan simülasyon sonuçlarına göre ise yüksek ÖAB katkısında akma değerleri azalmakta rijitlik değerleri

artmaktadır. Özellikle stabilite değerleri detaylı incelendiğinde simülasyon sonuçları da yine %10 katkı oranını işaret etmektedir.

Oluşturulan YSA modeli ile aynı laboratuvar koşulları altında numunelerin stabilite ve akma değerleri numunelere zarar verilmeden tahminlenebilecek, daha az numune ile daha çok veri elde edilebilecektir. Yöntem sayesinde zamandan tasarruf edilebilecek, numunelerin performansı hakkında çok daha öncesinden bilgi sahibi olunabilecektir.

Sonuç olarak, 50/70 penetrasyonlu bitüm ile agrega modifiyesi ile oluşturulacak asfalt yollar için SB ve BP katkısı %5 oranlarında ÖAB katkısı ise %10 oranında kullanılmalıdır. 70/100 penetrasyonlu bitüm ile agrega modifiyesi ise önerilmemektedir. Bitüm modifiyesinin ise ekonomik olarak faydalar sağladığı ve bitümün özelliklerini iyileştirdiği görülmesine rağmen sünme deneyi sonuçlarına göre yeterli performansı sağlayamaması sebebiyle henüz teoride kalması ve yeni çalışmalarla geliştirilmesi gerekmektedir. 1.18mm lik elek altında kalan agregaların ağırlıkça %10 oranında ÖAB ile yer değiştirilmesi tekniği, daha uzun ömürlü olması, çevre kirliliğini azaltabiliyor ve sürdürülebilirlik anlamında sektöre katkı sağlayabiliyor olma özelliklerinden dolayı bor üretimi yapılan ülkelerde, ülkemizde ise özellikle Eskişehir ve çevre illerde yol malzemesi olarak tercih edilmelidir.

KAYNAKÇA

- [1] Yılmaz, O. (2006). *Balıkesir-Bigadiç Bor Atıklarının Flotasyon Yöntemiyle Zenginleştirilmesi Çalışmaları*. Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi.
- [2] Morgan, V. (1980). *Boron geochemistry*. Sect. A2, vol 5, Supply to Mellor's Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry (Thompson R, Welch AJE eds). Longman, New York.
- [3] Shorrocks, V.M. (1983). *Boron deficiency - its prevention and cure*. Borax Holdings Ltd., London, UK.
- [4] Matterson, K.J. (1980). *Borate ore discovery, mining and beneficiation*. Sect. A3, vol 5, Supply to Mellor's Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry (Thompson R, Welch AJE eds). Longman, New York.
- [5] Woods, W.G. (1994). An Introduction to Boron: History, Sources, Uses and Chemistry. *Environmental Health Perspectives*. 102, 5–11.
- [6] BOREN (2013). *2013-2017 Stratejik Plan Raporu*.
- [7] Alma, M.H. and Acemioğlu, B. (2001), Türkiye'nin bor kaynakları, kullanım yerleri ve orman ürünleri endüstrisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2, 62–72.
- [8] Ulutaş, D. (2015), *Bor Atıklarının Katı Atık Düzenli Depolama Tesislerinde Geomembran Tabaka Olarak Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [9] Travis, N.J., Cocks, E.J. (1984). *The Tincal Trail - A History of Borax*. Harraps Ltd., London.
- [10] Üncü, Ü.R. and Yerlikayalar, C. (2004). Küreselleşme Sürecinde, Küresel Baronların Göz Diktiği Ulusal Maden Varlığımız "Bor Pazarının Yapısı." 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, s.3–15.
- [11] Oruç, F., Sabah, E., and Erkan, Z.E. (2004). Türkiye'de Bor Atıklarının Sektörel Bazda Değerlendirme Stratejileri. 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, s.385–393.

- [12] Güyagüler, T. (2001). Türkiye Bor Potansiyeli. 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, s.18–27.
- [13] Aytekin, Y. (1995). *Maden Mühendisliğine Giriş*. Dokuz Eylül Üniversitesi Fakültesi Yayınları, No:167, İzmir.
- [14] Erkal, İ.F. and Girgin, İ. (1992). Etibank Emet Kolemanit İşletmesi Kaba Artıklarının Konsantre Üretimi Amacıyla Değerlendirilmesi. 4. *Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu*, Antalya, s.599–608.
- [15] Yaman, C. (1998). Bor Minerali Atıklarından Üretilen Camsı Maddenin Olası Kullanım Alanları. 4. *Seramik Kongresi*, Eskişehir, s.97–102.
- [16] Karasu, B., Kaya, G., and Yurdakul, H. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi Konsantre ve Türev Atıklarının Duvar Karosu Bünye Özelliklerine Etkisi. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.224–228.
- [17] Ediz, N. (1999). *Tinkal cevherinin zenginleştirilmesi ve borlu suların arıtılmasında tek kademeli çözme helezonu tasarımı*. Doktora Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [18] Aşkın, S. (1998). *Bor endüstri atıklarının değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi.
- [19] Sabah, E. and Yeşilkaya, L. (2000). Farklı Tipte Polimerlerle Kırka Boraks İşletmesi Tinkal Konsantratörü Atıklarının Çökeltme Davranışlarının İncelenmesi. *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Derneği Yayını*, 3, 1–12.
- [20] Bozkurt, R. (1989). Mineralojik İncelemelerin Cevher Zenginleştirmedeki Rolüne İki Örnek. *Anadolu Üniversitesi Müh-Mim. Fakültesi Dergisi*, 5 (1), 15–21.
- [21] Çolak, M. (1997). Etibank Kırka Boraks İşletmesi Atıklarının Turgutlu Killeri İle Tuğla-Kiremit Denemesi. 8. *Ulusal Kil Sempozyumu*, Kütahya, s.277–286.
- [22] Kula, İ. (2000). *Bor endüstri atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak değerlendirilmesi*. Doktora Tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- [23] Demir, İ. and Orhan, M. (2002). Bor atıklarının yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.235–239.
- [24] Kurttepelı, Y. (2006). *Bor atıklarının seramik endüstrisinde değerlendirilmesi*

Yüksek Lisans Tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi.

- [25] Bentli, T., Özdemir, O., Çeük, M.S., and Ediz, N. (2002). Bor atıkları ve değerlendirilme stratejileri. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.250–258.
- [26] Çırak, M. (2010). *Flocculation behavior of two different clay samples from Kırka tincal deposit*. M.Sc. Thesis. Ankara: METU.
- [27] Banar, M., Güney, Y., Özkan, A., Günkaya, Z., Bayrakçı, E., and Ulutaş, D. (2017). Utilisation of waste clay from boron production as a landfill liner material. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2016 (200), 1–17.
- [28] Selman, G.Ş. (2015). *Bor Atıklarının Asfalt Kaplamalarda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi. Afyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [29] Yeşilkaya, L. (1989). *Kırka Boraks İşletmesi Tinkal Konsantratörü Atıklarındaki Kilin Flokülasyon ile Ayrıştırılması ve Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [30] Lyday, P.A. (1996). *Boron*. US Department Of The Interior, Bureau Of Mines, Washington D.C.
- [31] Genç, S., Sevinç, U., Özşeker, A., and Çakı, M. (1998). Etibor Kırka-Boraks İşletmesi Konsantratör Atığının Sır Hammaddesi Olarak Değerlendirilmesi. *4. Seramik Kongresi*, Eskişehir, s.119–124.
- [32] Sönmez, E., Özdağ, A., and Sümer, G. (1993). Kırka Boraks İşletmesi Atık Killerinin Seramik Endüstrisinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *13. Madencilik Kongresi*, İstanbul, s.561–566.
- [33] Bentli, İ. and Çakı, M. (2001). Kırka Boraks İşletmesi DSM Atık Kilinin Çini Hamuru Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *10. Ulusal Kil Sempozyumu*, Konya, s.502–503.
- [34] Köseoğlu, K. and Bayça, S.U. (2002). Döküm çamuruna % 10 ve % 20 Kolemanit ve Üleksit Atıkları İlavesinin Viskozite ve Mukavemet Özellikleri Üzerine Etkileri. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.207–212.
- [35] Christogerou, A., Kavas, T., Pontikes, Y., Koyas, S., Tabak, Y., and Angelopoulos,

- G.N. (2009). Use of boron wastes in the production of heavy clay ceramics. *Ceramics International*. 35 (1), 447–452.
- [36] Cicek, B., Tucci, A., Bernardo, E., Will, J., and Boccaccini, A.R. (2014). Development of glass-ceramics from boron containing waste and meat bone ash combinations with addition of waste glass. *Ceramics International*. 40 (4), 6045–6051.
- [37] Ercenk, E., Sen, U., Bayrak, G., and Yilmaz, S. (2014). Glass and glass-ceramics produced from fly ash and boron waste. *Acta Physica Polonica A*. 125 (2), 626–628.
- [38] Celik, H. (2015). Recycling of Boron Waste to Develop Ceramic Wall Tile in Turkey. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 74 (2), 108–116.
- [39] Yurdakul, H. and Topkaya, A. (2001). Eskişehir Kırka Boraks İşletmesi Konsantre ve Türev Atıklarının Duvar Karosu Bünyesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. (Bitirme Projesi), Dumlupınar Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, 2001.
- [40] Ediz, N., Yurdakul, H., and İssi, A. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi DSM Elek Üstü Atığının Duvar Karosu Bünyesinde Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.240–245.
- [41] Ediz, N., Yurdakul, H., and İssi, A. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi DSM Elek Üstü Atığının Duvar Karosu Bünyesinde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.246–249.
- [42] Karasu, B., Kaya, G., and Kozulu, R. (2002). Konsantre boraks atığının duvar karosu sırlarında K-feldispat yerine kullanımı. 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.193–197.
- [43] Ediz, N., Yurdakul, H., and İssi, A. (2004). Firitleştirilmiş Tinkal Atığının Çini Karo Bünye Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, s.413–417.
- [44] Karasu, B. and Gerede, E. (2002). Firitleştirilmiş Boraks Konsantre Atığının Yer

- Karosu Sırlarının Özelliklerine Etkisi. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.198–201.
- [45] Emrulloğlu, Ö.F., Emrulloğlu, C.B., and Özçelik, F. (2002). Etibor Kırka Boraks Atığının Yer Karosu Bünye Özelliklerine Etkisi. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.213–218.
- [46] Ediz, N. and Özdağ, H. (1995). Kırka Boraks İşletmesi Atık Killerinin Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını*. 34 (4), 27–34.
- [47] Kavas, T. and Emrulloğlu, Ö.F. (1999). Seydisehir Kırmızı Çamuru ve Kırka Bor Atıklarının Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanımı. *1.Batı Anadolu Hammadde Kaynakları Sempozyumu*, İzmir, s.216–225.
- [48] Aşkın, S., Olgun, A., and Erdoğan, Y. (2002). Bor Atıklarının Tuğla Üretiminde Kullanım Olanaklarının Araştırılması. *Fen Bilimleri Dergisi 10. Yıl Özel Sayısı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya*. 3, 44–49.
- [49] Emrulloğlu, Ö.F., Emrulloğlu, C.B., and Temel, P. (2002). Etibor Kırka Boraks Atığı ile Afyon Reis Mermer Atığından Beyaz Tuğla Üretimine Araştırılması. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.229–234.
- [50] Kavas, T. and Önce, G. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi Konsantratör Atıklarının Pres Tuğla Üretiminde Ergitici Eleman Olarak Kullanılabilirliği. *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.219–223.
- [51] Yamık, A., Uçar, A., Demir, U., and Şahbaz, O. (2004). Bor Atığının Tuğla Sanayinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *2. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, s.419–423.
- [52] Elbeyli, İ., Kalpaklı, Y.K., Gülen, J., Pişkin, M., and Pişkin, S. (2004). Utilization of Borax Waste as an Additive in Building Brick Production. *in: Proceedings of the 2nd International Boron Symposium*, Eskişehir, pp.431–436.
- [53] Elbeyli, İ., Kalpaklı, Y.K., Gülen, J., Pişkin, M., and Pişkin, S. (2004). Utilization of Borax Waste, Fly Ash and Silica Fume in Manufacturing of Building Brick. *in: Proceedings of the 2nd International Boron Symposium*, Eskişehir, pp. 449–454.
- [54] Uslu, T. and Arol, A.I. (2004). Use of boron waste as an additive in red bricks.

- Waste Management*. 24 (2), 217–220.
- [55] Kavas, T. (2006). Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. *Building and Environment*. 41 (12), 1779–1783.
- [56] Erdogan, Y., Genç, H., and Demirbas, A. (1992). Utilization of borogypsum for cement. *Cement and Concrete Research*. 22 (5), 841–844.
- [57] Erdoğan, Y., Zeybek, M., and Demirbaş, A. (1998). Cement Mixes Containing Colemanite from Concentrator Wastes. *Cement and Concrete Research*. 28 (4), 605–609.
- [58] Kula, İ., Olgun, A., and Erdoğan, Y. (2002). Effects Of Colemanite Waste, Coal Bottom Ash and Fly Ash On The Properties Of Cement and Concrete. *in: Proceedings of the 1st International Boron Symposium*, Kütahya, pp.202–206.
- [59] Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., and Sevinç, V. (2002). Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi 1. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, s.259–266.
- [60] Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M.M., Tosunoğlu, V., and Yılmaz, M.T. (2002). Utilization of trommel sieve waste as an additive in Portland cement production. *Cement and Concrete Research*. 32 (1), 35–39.
- [61] Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, M.T., Kocakerim, M.M., and Tosunoğlu, V. (2002). Utilization of borogypsum as set retarder in Portland cement production. *Cement and Concrete Research*. 32 (3), 471–475.
- [62] Özdemir, M. and Öztürk, N.U. (2003). Utilization of clay wastes containing boron as cement additives. *Cement and Concrete Research*. 33 (10), 1659–1661.
- [63] Uğurlu, A., Özdemir, M., and Topçu, İ. (2004). Bor İçeren Kil Atıkların Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi. 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, s.405–412.
- [64] Erdoğan, E., Yılmaz, B., Erdoğan, Y., and Avcıata, U. (2004). Sodyum Karbonatın Kolemanit Konsantratör Atığı + Karabük Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. 2. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, s.425–430.
- [65] Erdoğan, Y., Olgun, A., Kalfa, O.M., and Atar, N. (2004). An investigation on the

- effect of potassium sulfate salt on the mechanical properties of colaminate concentrator waste blended portland cement. *in: Proceedings of the 2nd International Boron Symposium*, Eskişehir, pp.437–440.
- [66] Erdoğan, Y., Olgun, A., Özmal, F., and Zeybek, B. (2004). Utilization of Boron Industry Wastes, Fly Ash, Bottom Ash and Alunite Mineral in Cement Production as an Additive Material. *in: Proceedings of the 2nd International Boron Symposium*, Eskişehir, pp. 455–461.
- [67] Koyuncu, H., Bakış, R., Taşpolat, L., Yılmaz, G., and Karacasu, M. (2004). An Investigation on the Use of Borax Mineral as Portland Cement Replacement Material. *in: Proceedings of the 2nd International Boron Symposium*, Eskişehir, pp. 463–468.
- [68] Topçu, I.B. and Boğa, A.R. (2010). Effect of boron waste on the properties of mortar and concrete. *Waste Management and Research*. 28 (7), 626–633.
- [69] Mutuk, T. and Mesci, B. (2014). Analysis of mechanical properties of cement containing boron waste and rice husk ash using full factorial design. *Journal of Cleaner Production*. 69, 128–132.
- [70] Över Kaman, D., Köroğlu, L., Ayas, E., and Güney, Y. (2017). The effect of heat-treated boron derivative waste at 600 °C on the mechanical and microstructural properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 154, 743–751.
- [71] Karacasu, M., Bakış, R., Taşpolat, L.T., and Yılmaz, G. (2004) The use of Borax, Sepiolite, Zeolite, Waste Meerscham and Contaminated River Sediment in Asphalt Concrete Mixtures. *in: Proceedings of the 2nd International Boron Symposium*, Eskişehir, ypp. 441–447.
- [72] Kütük-Sert, T. and Kütük, S. (2013). Physical and Marshall Properties of Borogypsum Used as Filler Aggregate in Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 25 (2), 266–273.
- [73] Oruç, Ş., Yılmaz, B., and Sancak, K. (2016). Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*. 17 (4), 810–824.
- [74] Oruç, Ş. and Yılmaz, B. (2016). Improvement in performance properties of asphalt

- using a novel boron-containing additive. *Construction and Building Materials*. 123, 207–213.
- [75] Gürer, C. and Selman, G.Ş. (2016). Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. *Medziagotyra*. 22 (1), 118–125.
- [76] Zhang, Y., Guo, Q., Li, L., Jiang, P., Jiao, Y., and Cheng, Y. (2016). Reuse of boron waste as an additive in road base material. *Materials*. 9 (6), 1–15.
- [77] Keskin, M. and Karacasu, M. (2018). Atık Bor İçeren Asfalt Betonlarının Performanslarının Değerlendirilmesi. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*. 30 (2), 185–192.
- [78] Umar, F. and Açar, E. (1991). *Yol Üstyapısı*. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.
- [79] Önal, M.A. and Kahramangil, M. (1993). *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*. Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.
- [80] Önal, M.A. and Karaca, S. (1990). *Asfalt Beton ve Diğer Sıcak Karışım Tipleri için Karışım Dizayn Metotları*. Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.
- [81] Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Atlas Yayınevi, İstanbul.
- [82] Terzi, S. (2000). *Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [83] Geçkil, T. and Alataş, T. (2018). Superpave Yöntemine Göre Tasarım Agregasyonunu Seçimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 22 (Özel), 195.
- [84] Lavin, P.G. (2003). *Asphalt Pavements*. Spon Pres, London and New York.
- [85] The Asphalt Institute (1996). *Superpave Mix Design*, Superpave Series No.2 (SP-2). U.S.A.
- [86] (2013) *Karayolu Teknik Şartnamesi*. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [87] (2001) *Asfalt ve Uygulamaları*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul.
- [88] Ahmedzade, P., Alataş, T., and Geçkil, T. (2008). Asfalt Betonunda Siyah

- Karbonun Filler Olarak Kullanımı. *İMO Teknik Dergi*. 19 (94), 4493–4507.
- [89] Karakaş, A.S. (2014). *Bitümlü Sıcak Karışımların Trafik Etkisi Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi Elazığ: Fırat Üniversitesi.
- [90] Balta, İ. (2004). *Bitümlü Sıcak Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Duyarlılığı*. Yüksek Lisans Tezi. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [91] Tunç, A. (2004). *Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı*. Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara.
- [92] Öztürk, E.A. and Çubuk, M.K. (2004). Karayolları Esnek Üst Yapı Tasarımında Yeni Bir Yöntem, Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 19 (2), 175–184.
- [93] Sağlık, A. (2009). *Türkiye’de Üretilen Rafineri Bitümlerinin Karayolu Üstyapılarında Kullanımı İçin Performans Sınıflarının Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi.
- [94] (1997). *SUPERPAVE for the Generalist Engineer and Project Staff*. US. Department of Transportation Federal Highway Administration, National Highway Institute, Publication No: FHWA HI 97-031, USA, .
- [95] Orhan, F. (2001). *Asfaltın Geleceği Superpave*. K.G.M., Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı.
- [96] Dinç, E. and Yazıcı, A. (2000). Superpave Bitüm Deneyleri ve Agregada Gradasyonu. *3.Asfalt Sempozyumu*, Ankara, s.161–172.
- [97] Noureldin, A.S. (1995). *Long Term Performance Of Asphalt Cement Binders, A Dual View*. in: J.C. Hardin (Ed.), *Physical Properties Of Asphalt Cement Binders*, ASTM STP 1241, American Society For Testing And Materials, Philadelphia.
- [98] Thompson, D.C. and Hoiberg, A.J. (1979). *Bituminous materials: asphalt tars and pitches*. Robert Krieger Publishing Co.
- [99] Keskin, M. (2011). *Superpave ve Marshall Dizayn Yöntemleri Ile Üretilmiş Asfalt Numunelerin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerindeki Farklılıkların Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [100] Çubuk, M., Gürü, M., Çubuk, M.K., and Arslan, D. (2013). Bitümün Özelliklerinin

Organik Esaslı Magnezyum Katkı Maddesi İle Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 28 (2), 257–264.

- [101] Arslan, D., Gürü, M., Çubuk, M.K., and Çubuk, M. (2011). Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron. *Construction and Building Materials*. 25, 3863–3868.
- [102] Arslan, D., Gürü, M., and Kürs, M. (2012). Performance assessment of organic-based synthetic calcium and boric acid modified bitumens. *Fuel*. 102, 766–772.
- [103] Azahar, W.N.A.W., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Bujang, M., and Ngadi, N. (2016). Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 126, 218–226.
- [104] Gürü, M., Çubuk, M.K., Arslan, D., and Aminbakhsh, S. (2017). Effects of Sugar Beet Molasses and Molasses-Based Boron Oxide Compound on Bitumen Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 29 (4), 04016252.
- [105] Han, Z., Sha, A., Tong, Z., Liu, Z., Gao, J., Zou, X., et al. (2017). Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. *Construction and Building Materials*. 147, 776–789.
- [106] Enieb, M. and Diab, A. (2017). Characteristics of asphalt binder and mixture containing nanosilica. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 10 (2), 148–157.
- [107] Uluğtekin, E. (1999). *Creep properties of asphaltic concrete under repeated loading*. Phd. Thesis. Ankara: METU.
- [108] Özcan, Ş. (2008). *Polipropilen Fiber Katkısının Bitümlü Karışımların Statik Sünme Davranışına Etkisinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [109] Tunç, A. (2004). *Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları*. Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara.
- [110] Yoder, E.J. and Witczak, M.W. (1975). *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [111] Sayın, E. and Yıldırım, B. (2005). Asphalt betonu kaplamaların farklı sıcaklıklarda

- dayanımı. *Fırat Üniversitesi Fen ve Müh. Bilimi Dergisi*. 17 (3), 463–469.
- [112] Pfeiffer, J.P. and van Doornal, P.M. (1936). The Rheological properties of asphaltic bitumens. *Journal of Institute of Petroleum*. 22.
- [113] Van der Poel, C. (1953). Representation of rheological properties of bitumens over a wide range of temperatures and loading times. *in: 2nd International Conference of Rheology*, Oxford, pp.331–337.
- [114] Mack, C. (1954). Deformation mechanism and bearing strength of bituminous pavements. *HRB*. 33.
- [115] Pister, K.S. and Monismith, C.L. (1960). Analysis of viscoelastic flexible pavements. *39th Annual Meeting of the Highway Research Board*.
- [116] Secor, K.E. and Monismith, C.L. (1961). Analysis of triaxial test data on asphaltic concrete using viscoelastic principles. *40th Annual Meeting of the Highway Research Board*.
- [117] Hofstra, A. and Klomp, A.J. (1972). Permanent deformation of flexible pavements under simulated road traffic conditions. *in: Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, London.
- [118] Hills, J.F. (1973). The creep of asphalt mixes. *Journal Institute of Petroleum*. 59.
- [119] Uzan, J., Sides, A., and Perl, M. (1985). Viscoelastoplastic model for predicting performance of asphaltic mixtures. *Transportation Research Record*. (1043), 78–89.
- [120] Parmar, N.B. and Bhatt, R.D. (1986). Study of mastic-asphalt's rheological behaviour under creep and creep-recovery conditions. *Journal of the Institution of Engineers*. 66, 164–169.
- [121] Kandhal, P. and Koehler, W. (1987). Effect of Rheological Properties of Asphalts on Pavement Cracking. *ASTM Special Technical Publication*. pp. 99-117.
- [122] Kadar, P. and Remtulla, A. (1992). Engineering and rheological properties of modified binder mixes. *in: 16th Conference of the Australian Road Research Board*, pp.269–280.
- [123] Negulescu, I.I. and Daly, W.H. (1996). Rheology of polymer reinforced asphalts.

in: First Annual Technical Conference, pp.1175–1181.

- [124] Marasteanu, M., Clyne, T., McGraw, J., Li, X., and Velasquez, R. (2005). High-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1901, 52–59.
- [125] Szydło, A. and Mackiewicz, P. (2005). Asphalt Mixes Deformation Sensitivity to Change in Rheological Parameters. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 17 (1), 1–9.
- [126] Ducatz, E.L. and Anderson, D.A. (1980). The effect of various fillers on the mechanical behavior of asphalt and asphaltic concrete. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. 49, 530–549.
- [127] Al-Dulemi, A.M. (1988). *An experimental behaviour of asphaltic mixtures under creep loading reference to a specific mix composition*. M.Sc. Thesis. Ankara: METU.
- [128] Jastrzebski, Z.D. (1977). *The nature and properties of engineering materials*. John Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- [129] Tapkın, H. (1980). Rheological behaviour of bituminous mixtures under different types of compressive loading. Phd. Thesis. Ankara: METU.
- [130] Gabrielson, J.R. (1992). Evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Static Creep and Repeated Load Tests. Phd. Thesis. USA, Alabama: Auburn University.
- [131] Tapkin, S. and Keskin, M. (2013). Rutting analysis of 100 mm diameter polypropylene modified asphalt specimens using gyratory and Marshall compactors. *Materials Research*. 16 (2), 546–564.
- [132] Veelenturf, L.P.J. (1995). *Analysis and applications of artificial neural networks*. Prentice Hall International (UK) Limited, United Kingdom.
- [133] Akkurt, A. (2005). Yapay Sinir Ağları ve Türkiye Elektrik Tüketimi Tahmin Modeli. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İTÜ.
- [134] Kröse, B. and Smagt, P. van der (1996). *An introduction to neural networks*. The University of Amsterdam, Amsterdam.
- [135] Müller, B., Reinhardt, J., and Strickland, M.T. (1990). *Neural networks an*

introduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, .

- [136] Haykin, S. (1999). *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*. Second Pearson Education Inc.
- [137] Freeman, J.A. and Skapura, D.M. (1991). *Neural networks: Algorithms, applications, and programming techniques*. Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [138] Şahin, Ş.Ö. (2002). *Yapay Sinir Ağları Yardımı ile Dinamik Bir Senaryo Analizi* Doktora Tezi, İstanbul: ITU.
- [139] Dobnikar, A., Steele, N.C., Pearson, D.W., and Albrecht, R.F. (1999). *Artificial neural nets and genetic algorithms*. Siproinger-Verlag Wien.
- [140] Lippmann, R.P. (1987). An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*.
- [141] Rumelhart, D.E. and McClelland, J.L. (1986). *Parallel distributed processing (Vol. 1)*. MIT Press, Cambridge, M.A.
- [142] Ozgan, E. (2011). Artificial neural network based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete. *Expert Systems with Applications*. 38, 6025–6030.
- [143] Haykin, S. (1994). *Part 1. in: Neural Networks*, Macmillan College Printing Co., New Jersey, pp. 1–41.
- [144] Efe, M.Ö. and Kaynak, O. (2000). *Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları*. Boğaziçi University Printhouse, İstanbul.
- [145] Bishop, C.M. (1995). *Chapter 1. in: Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press, Oxford, pp. 1–28.
- [146] Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., and Williams, R.J. (1986). *Learning Internal Representations by Error Propagation*. in: D.E. Rumelhart, J.L. McClelland (Eds.), *Parallel Distributed Processing*, MIT Press, Cambridge, M.A., pp. 318–362.
- [147] Jang, J.-S.R. and Chuen-Tsai Sun (1995). Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE*. 83 (3), 378–406.
- [148] Öztemel, E. (2006). *Yapay Sinir Ağları*. Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul.
- [149] Ham, M.F. and Kostanic, I. (2001). *Principles of Neurocomputing for Science &*

Engineering. McGraw-Hill Inc., New York, USA, .

- [150] Tunay, R.F. (2007). *Farklı Sıcaklıkta Üretilen T/M Yatakların Dinamik Yük Altında Aşınmasının Araştırılması ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi*. Doktora Tezi. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [151] Ohdar, R.. and Pasha, S. (2003). Prediction of the process parameters of metal powder preform forging using artificial neural network (ANN). *Journal of Materials Processing Technology*. 132 (1–3), 227–234.
- [152] Verleysen, M. and Hlavackova, K. (1994). An optimized RBF network for approximation of functions. in: *2nd European Symposium on Artificial Neural Networks*, Brussels, Belgium. pp.175–180.
- [153] Bolat, B. (2005). Kamışlı Enstrüman Seslerinin İstatistiksel Sinir Ağları ile Tanınması. *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. 2, 36–42.
- [154] Batar, H. (2005). *EEG İşaretlerinin Dalgacık Analiz Yöntemleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.
- [155] Hacıoğlu, A. (2006). Hızlı Evrimsel Eniyileme İçin Yapay Sinir Ağı Kullanılması. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*. 2 (3), 1–8.
- [156] Kartalopoulos, S. V. (1996). *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic-Basic Concepts and Applications*. IEEE Pres, New York, USA, .
- [157] Fu, L. (1994). *Neural Networks In Computer Intelligence*. McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- [158] Elmas, Ç. (2003). *Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama)*. Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [159] Tapkin, S., Çevik, A., and Uşar, Ü. (2010.) Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks. *Expert Systems with Applications*. 37, 4660–4670.
- [160] Zofka, A. and Yut, I. (2012). Prediction of asphalt creep compliance using artificial neural networks. *Archives of Civil Engineering*. 58 (2), 153–173.
- [161] Ozturk, H.I. and Emin Kutay, M. (2014). An artificial neural network model for

- virtual Superpave asphalt mixture design. *International Journal of Pavement Engineering*. 15 (2), 151–162.
- [162] Shafabakhsh, G.H., Ani, O.J., and Talebsafa, M. (2015). Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*. 85, 136–143.
- [163] Mirabdolazimi, S.M. and Shafabakhsh, G. (2017). Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique. *Construction and Building Materials*. 148, 666–674.
- [164] Ahmed, T.M., Green, P.L., and Khalid, H.A. (2017). Predicting fatigue performance of hot mix asphalt using artificial neural networks. *Road Materials and Pavement Design*. 18, 141–154.
- [165] Kara, Ç. and Karacasu, M. (2017). Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach. *Construction and Building Materials*. 141, 598–607.
- [166] Sebaaly, H., Varma, S., and Maina, J.W. (2018). Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm. *Construction and Building Materials*. 168, 660–670.
- [167] Ghanizadeh, A.R. and Fakhri, M. (2018). Quasi-static analysis of flexible pavements based on predicted frequencies using Fast Fourier Transform and Artificial Neural Network. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 11 (1), 47–57.
- [168] Jiang, J., Zhang, Z., Dong, Q., and Ni, F. (2018). Characterization and identification of asphalt mixtures based on Convolutional Neural Network methods using X-ray scanning images. *Construction and Building Materials*. 174, 72–80.
- [169] Karacasu, M. (2016). *Yol Üstyapı Deneyleri*. Sözkesen Matbaacılık Ltd. Şti., Ankara.
- [170] Keçeciler, A.F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., and Gökçe, A.F. (1990). *Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı*. KGM Yayınları, Ankara, .

- [171] Yıldırım, Z.B. (2018). *Bitümlü Sıcak Karışımlarda Cam Elyaf ve Atık Lastik Kullanımı ve Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [172] ASTM D 4402-84 (1984). Standard Method for Viscosity determinations of unfilled asphalts using the brookfield thermosel apparatus.
- [173] The Asphalt Institute (2001). *Superpave Mix Design*. 3rd ed. Lexington, Kentucky, USA, .
- [174] (2009). Brookfield Thermosel Accessory with EZ-Lock, Operating Instruction, Manual No:M09-208. Brookfield Engineering Laboratories Inc.
- [175] Airey, G. (2003). Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*. 82 (14), 1709–1719.
- [176] The Asphalt Institute (1988). Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types, Manual series No 2.
- [177] (1991). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. National Center for Asphalt Technology.
- [178] Hınıslıoğlu, S. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials Letters*. 58 (3–4), 267–271.
- [179] (1990). *Method for determination of creep stiffness of bituminous aggregate mixtures subject to unconfined uniaxial loading*. Draft for development DD-185. British Standards Institution.
- [180] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., and Kennedy, T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials Mixture Design and Construction*. 2nd ed. NAPA Education Foundation, .
- [181] Tapkin, S. and Özcan, Ş. (2012). Determination of the Optimal Polypropylene Fiber Addition to the Dense Bituminous Mixtures by the Aid of Mechanical and Optical Means. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 7 (1), 22–29.
- [182] Tapkın, S., Uşar, Ü., Tuncan, A., and Tuncan, M. (2009). Repeated Creep Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Bituminous Mixtures. *Journal of Transportation Engineering*. 135 (4), 240–249.

- [183] Portney, K.E. (2015). *Sustainability*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [184] Horvath, A. (2003). *Life-Cycle Environmental and Economic Assessment of Using Recycled Materials for Asphalt Pavements*. University of California, Berkeley, CA.
- [185] Huang, Y., Bird, R.N., and Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*. 52 (1), 58–73.
- [186] (2015). MATLAB Version R2015a. *The Mathworks Inc*.
- [187] MacKay, D.J.C. (1992). Bayesian Interpolation. *Neural Computation*. 4 (3), 415–447.
- [188] Dan Foresee, F. and Hagan, M.T. (1997). Gauss-Newton approximation to bayesian learning. *in: IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Mustafa KESKİN
Yabancı Dili : İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı : Ankara / 1984
E-Posta : mustafakeski@eskisehir.edu.tr, mu_keskin@hotmail.com

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2002-2008, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Lisans.
- 2008-2011/2012-2013, İnş. Müh., Eskişehir Işık Yapı Denetim Ltd.Şti., İnşaat Kontrol Müdürü.
- 2008-2011, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans.
- 2011-2012, İnş. Yük. Müh., Onur Taahhüt Taşımacılık İnşaat Tic. ve San. A.Ş., Teknik Ofis Şefi.
- 2011, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Doktora.
- 2013, İnş. Yük. Müh., Turna Yapı Denetim Ltd. Şti., Şirket Sahibi.

Yayımları ve Bilimsel Faaliyetleri:

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

- Tapkin, S. and Keskin, M. (2013) Rutting analysis of 100 mm diameter polypropylene modified asphalt specimens using gyratory and marshall compactors. Materials Research. 16 (2), <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000016>
- Tapkin, S. and Keskin, M. (2018) Number of design gyrations for 100 mm compacted asphalt mixtures modified with polypropylene. Journal of Engineering Research. 6 (2), 64–83. WOS:000443316400005

- Tapkın, S. and Keskin, M. (2019) Design gyration number determination of 100 mm-diameter asphalt mixtures. International Journal of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00399-1>
- Keskin, M. and Karacasu, M. (2019) Effect of boron containing additives on asphalt performance and sustainability perspective. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.133>

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

- Keskin, M. ve Karacasu, M. (2018) Atık bor içeren asfalt betonlarının performanslarının değerlendirilmesi. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi. 30 (2), 185–192.

Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluş Üyelikleri:

- 2008, İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye.
- 2013, Eskişehir Ticaret Odası, Eskişehir, Türkiye.
- 2016-2018, Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dış Danışma Kurulu Üyesi, Eskişehir, Türkiye.
- 2017, İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Şubesi, Danışma Kurulu Üyesi, Eskişehir, Türkiye.
- 2018, Eskişehir Ticaret Odası, 34.Meslek Komitesi (Mesleki, Bilimsel ve Teknik Faaliyetler) Başkanı, Eskişehir, Türkiye.
- 2018, Eskişehir Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dış Danışma Kurulu Üyesi, Eskişehir, Türkiye.