

T.C
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

**ASFALT MASTİKLERİN VİSKOZİTESİNİN SOFT
HESAPLAMA YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ**

Cansın MALLI

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR

Yozgat 2019

	<p>YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ</p> <p>TEZ ONAY FORMU</p>
---	--

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110716002 numaralı öğrencisi Cansın MALLI' nın hazırladığı “Asfalt Mastiklerin Viskozitesinin Soft Hesaplama Yöntemleri İle Belirlenmesi” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 20/06/2019 Perşembe günü saat 10:00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.


Başkan : Doç. Dr. Bekir AKTAŞ



Jüri Üyesi (Danışman) : Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR



Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Murat AY



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 27.../06.../19 tarih ve 30. sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

27.06.2019


Prof. Dr. Mustafa SAÇMACI
Müdür

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
TABLolar LİSTESİ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR	4
2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler.....	4
2.1.1. Agregalar.....	4
2.1.2. Filler	5
2.1.2.1. Kalker (Kireç Taşı).....	10
2.1.2.2. Bazalt	10
2.1.2.3. Portland Çimentosu	11
2.1.2.4. Sönmüş Kireç	11
2.1.3. Bitümlü Bağlayıcılar	12
2.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretilmesi	13
2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Bulunması Gereken Ana Özellikler	13
2.3.1. Stabilite	14
2.3.2. Durabilite	14
2.3.3. Esneklik (Fleksibilite).....	14
2.3.4. Kayma Mukavemeti.....	15
2.3.5. İşlenebilirlik	15
2.3.6. Geçirimsizlik.....	15
3. BULANIK MANTIK (FUZZY LOGIC)	16
3.1. Bulanık Çıkarım Sistemi (BÇS)	17
3.1.1. Bilgi Tabanı	17
3.1.2. Çıkarım Motoru	17

3.1.3. Kullanıcı Etkileşimi	17
3.2. Bulanık Çıkarım Sistemi (BÇS) Adımları	17
3.3. Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları	20
3.3.1. Üçgen Gösterimli Üyelik Fonksiyonu	23
3.3.2. Yamuk Gösterimli Üyelik Fonksiyonu	23
3.4. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi	24
3.4.1. Bulanıklaştırma	25
3.4.2. Çıkarım	25
3.4.3. Birleştirme.....	25
3.4.4. Durulaştırma	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	29
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	29
4.1.1. Bitümlü Bağlayıcı	29
4.1.2. Filler	29
4.2. Yapılan Çalışmalar	29
4.2.1. Bitümlü Bağlayıcının Hazırlanması.....	29
4.2.2. Filler-Bitümlü Bağlayıcı Karışımlarının Hazırlanması.....	30
4.2.3. Viskozite Deneyi.....	31
5. DENEY SONUÇLARI.....	33
5.1. ASTM-D2493'e Göre Viskozite Tahmini ve Bulanık Sistem Kurulması.....	36
5.1.1. Hata Kriterleri, Bulanık Model ve ASTM-D2493 Sonuçlarının İrdelenmesi.....	38
SONUÇLAR	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ.....	49

ASFALT MASTİKLERİN VİSKOZİTESİNİN SOFT HESAPLAMA YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

Cansın MALLI

Yozgat Bozok Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

2019; Sayfa: 50

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR

ÖZET

Bitümlü bağlayıcıların, agregalar ile karıştırılma ve sıkıştırılmaları sırasında doğru sıcaklığa sahip olmaları kaplamaların ömrü açısından büyük öneme sahiptir. Bağlayıcı sıcaklıklarının düşük olması boşluk oranlarının fazla olmasına, yüksek olması ise bağlayıcının aşırı yaşlanmasına ve sıkışmanın fazla olmasına neden olmaktadır. Çalışmada saf bitümlü bağlayıcı ile dört adet filler (Kalker, Bazalt, Portland Çimentosu, Sönmüş Kireç) farklı filler/bitümlü bağlayıcı oranlarında karıştırılarak; AASHTO-TP48 standardına göre belirlenen dönel viskozimetre deneyi ile 135 °C, 165 °C ve 195 °C sıcaklıklarda viskozite ölçülmüştür. Viskozite değerleriyle orantılı olarak karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Farklı filler/bitümlü bağlayıcı oranları ve farklı sıcaklıklarda elde edilen viskozite sonuçlarıyla “Bulanık Mantık” modeli kurulmuş ve model sonuçları ile ASTM-D2493 Standardında geliştirilen denklem ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

DETERMINATION OF THE VISCOSITY OF ASPHALT MASTICS WITH SOFT COMPUTING METHODS

Cansın MALLI

Yozgat Bozok University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

2019; Page: 50

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR

ABSTRACT

The accurate temperature of bituminous binders and aggregate has a great importance during the mixing and compacting process. The low temperature induces the increment of the gap while the high temperature causes over compaction and excessive ageing of binder. In the study, pure bituminous binder is mixed with four mineral filler (pulverized limestone, portland cement basalt, hydrate lime) with different dust-to-binder ratio; the viscosity measurement is made with 135 °C, 165 °C and 195 °C temperatures according to the viscometer experiment which is determined by the standard of AASHTO-TP48. Corresponding to viscosity values, the increment in temperatures of mixing and compaction is observed. By obtaining viscosity results of different dust-to-binder ratios and different temperatures, “Fuzzy Logic” model is established and results are compared with the results of model.

TEŐEKKÖR

Bu araŐtırmanın planlanmasında ve yürütülmesinde destek ve ilgisini esirgemeyen, bilgi, deneyim ve önerilerinden yararlandığım değerli hocam sayın Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR' e, Bulanık Mantık modeli kurulmasında yardımlarını esirgemeyen hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat AY' a, yine laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Öğr. Gör. Mehmet BAYAZIT' a ve laboratuvar görevlisi sayın Hayrullah GÜLER' e teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2019

Cansın MALLI

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1: BÇS Adımları	19
Şekil 3.2: Bulanık Mantık Sisteminin Yapısı	20
Şekil 3.3: Bitişik Dikdörtgen Gösterim	21
Şekil 3.4: Bitişik Üçgen Gösterim	22
Şekil 3.5: Örtüşmeli Üçgen Gösterimi	22
Şekil 3.6: Üçgen Üyelik Fonksiyonu	23
Şekil 3.7: Yamuk Üyelik Fonksiyonu	24
Şekil 3.8: Genel Mamdani BÇS Yapısı	26
Şekil 3.9: E.K. Mamdani BÇS Yapısı ve Sayısal Veriler	26
Şekil 3.10: E.K. ile Yapılan Sayısal Mamdani BÇS Örneği	27
Şekil 3.11: Çarpım İşlemlili Bulanık Girdili Mamdani BÇS	28
Şekil 3.12: Çarpım İşlemlili Bulanık Girdili Mamdani BÇS Örneği	28
Şekil 4.1: 100' er Gram Ayrılmış Bitümler	30
Şekil 4.2: Fillerin Hazırlanması	30
Şekil 4.3: Karıştırma İşlemi	30
Şekil 4.4: Brokfield Dönel Viskozimetresi ve Isı Sistemi	31
Şekil 4.5: Brokfield Dönel Viskozimetresi ve Spindle (Mil)	32
Şekil 4.6: Metal Tüpler	32
Şekil 5.1: Kalker Filleri/Bitümlü Bağlayıcı Viskozite Eğrisi	34
Şekil 5.2: Kurulan Bulanık Sistemin Genel Hali	37
Şekil 5.3: Sıcaklık Giriş Verilerinin Bulanıklaştırılması	37
Şekil 5.4: Oran Giriş Verilerinin Bulanıklaştırılması	37
Şekil 5.5: Kalker-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Regresyon Grafiği	40
Şekil 5.6: Bazalt-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Regresyon Grafiği	42
Şekil 5.7: Portland Çimentosu-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Regresyon Grafiği	44

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: Klasik Mantık-Bulanık Mantık Arasındaki Temel Farklılıklar	20
Tablo 4.1: Deneysel Çalışmada Kullanılan Bitümlü Bağlayıcının Özellikleri	29
Tablo 4.2: Spindle Numune Hacimleri Tablosu.....	32
Tablo 5.1: Ölçülen Viskozite Değerleri	33
Tablo 5.2: Karıştırma-Sıkıştırma Sıcaklıkları	35
Tablo 5.3: Kalker Fillerine Eşdeğer Oranlar	35
Tablo 5.4: Kalker-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deney, ASTM-D2493 ve Model Sonuçları.....	39
Tablo 5.5: Kalker-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Hataları	40
Tablo 5.6: Bazalt-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deney, ASTM-D2493 ve Model Sonuçları.....	40
Tablo 5.7: Bazalt-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Hataları	41
Tablo 5.8: Portland Çimentosu-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deney, ASTM-D2493 ve Model Sonuçları	42
Tablo 5.9: Portland Çimentosu-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Hataları	42

SİMGELER ve KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışımlar
K/A	: Kükürt/Asfalt Ağırlıkça Oranı
PÇ	: Portland Çimentosu
KÇ	: Katkılı Çimento
TÇ	: Traslı Çimento
BÇS	: Bulanık Çıkarım Sistemi
ü(x)	: Üyelik Fonksiyonu
E.K.	: Enküçükleme
Pa.s	: Pascal x Saniye (Viskozite Birimi)
RMSE	: Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Squared Error)
MAE	: Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
R²	: Determinasyon Katsayısı
V	: Deneysel Viskozite
T	: Sıcaklık
A	: “y” Lineer Fonksiyonunun Eğimi
B	: “y” Lineer Fonksiyonunun Sabit Sayısı
A_j	: Deneysel Sonuçlar
P_j	: Model Sonuçları
n	: Data Seti Sayısı
A_{jort}	: Deneysel Sonuçların Aritmetik Ortalaması
e_j	: Deneysel Sonuçlar ile Model Sonuçlar Arasındaki Fark
RPM	: Rounds Per Minute / Dakikadaki Devir Sayısı

1. GİRİŞ

Karayolu üst yapıları rijit ve esnek olmak üzere iki tipte yapılabilmektedir. Bitümlü malzemelerin bağlayıcı madde olarak kullanıldığı esnek üst yapılar; konforun istenen kalitede olması, yapımının rijit üst yapılara göre kolay olması gibi nedenlerden dolayı daha fazla tercih edilmektedir. Son yıllarda karayollarına olan talep dünyanın her yerinde hızlıca artış göstermiş, trafik ağırlaşmış, dingil yükleri ve lastik basınçları yükselmiş, saf bitüm ve yoğun gradasyonlu asfalt betonunun ihtiyaca cevap veremediği ve gerekli performansı gösteremediği belirlenmiştir. Bu yetersizlik tekerlek izi oluşumunun, yorulma ve temel çatlaklarının oluşumunun hızlıca artmasıyla kaplamaların servis ömrünün de azalmasına sebep olmuştur [1].

Ülkemiz karayollarında arzu edilen hizmet seviyesine ulaşmak ve güvenliğin sağlanması çeşitli nedenlerle çok mümkün olmamaktadır. Bu sebeplerin en başında, yol yapılarının ekonomik olarak yüklü olması gelmektedir. Bu açıdan düşünüldüğünde, yollarımız için uygulanacak en uygun çözümlerden birinin, düşük maliyetli ve ihtiyacı karşılayabilen yolların inşa edilmesi olacaktır. Yol maliyetinin azaltılmasında daha ekonomik kaplama malzemelerinin kullanılması önemli etkenlerden biridir. İyi bir temel tasarımı, düzenli bir yapım aşaması ve zamanında gerçekleştirilen bakımlar, esnek üstyapıların sadece artan talepleri karşılamasını değil aynı zamanda konfor ve güvenlik konusunda yüksek standartlar sağlanmasını mümkün kılmaktadır [1].

Kaplama tabakası, yolun kullanım konforunu ve ömrünü etkileyen en önemli etkidir. Kaplamanın yüzey yapısı ve şeklinin yanında içeriğindeki malzemeler de dayanım ve performans açısından önemli rol oynamaktadır. İklim şartları ve trafik hacmi gibi birçok unsur yol kaplamasının ömründe belirleyici etmenlerdir. Bitümlü sıcak karışımlar, yol kaplamasının teşkilinde en çok kullanılan kaplama türüdür. Karışım bitüm, agrega ve fillerin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilir. Bu tür karışımlarda filler olarak sönmüş kireç, portland çimentosu, kalker ve granit tozu; agrega olarak kum, çakıl ve farklı kırma taşlar kullanılarak karışımların dayanımını arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır ve bu karışımlarda fillerin etkisi büyüktür [1].

1980' lerin sonlarında ve 1990' ların başlarında Stratejik Otoyol Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program, SHRP) sırasında, hacimsel karışım tasarım yönteminde filler – bağlayıcı oranı 0.6 ila 1.2 arasında bir değerlendirme yapılmasına rağmen, mineral filler çalışmasına çok az önem verilmiştir. Bazı saha deneyimleri, filler – bağlayıcı oranının bazı durumlarda çok kısıtlayıcı olabileceğini, fakat fillerin doğru bir şekilde teşkil edildiği sürece yol kaplamasının performansını artırabileceğini göstermektedir [2].

Asfalt mastiği, asılı filler parçacıkları içeren bağlayıcıyı belirtmek için kullanılan bir terimdir. Fillerin asfalt kaplama yapımında ve performansındaki en önemli rolü, asfalt mastiğinin özelliklerini değiştirmede yatmaktadır. Mineral filler mastik içinde asılı olduğundan, asfalt mastiği karışımın asıl bağlayıcı maddesidir. Daha önce yapılan bazı çalışmalar asfalt karışımının mekanik özellikleri ile bitümlü bağlayıcı arasındaki ilişkiyi gözlemlemiş, diğerleri asfalt karışımının mekanik özellikleri ile asfalt mastiği arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır [2].

Bir bitümlü sıcak karışım için fillerin niteliği ve miktarı önemlidir. Filler, karışımın davranışına ve kaplama performansına önemli katkı sağlar. Farklı bağlayıcılar için, fillerin türü ve içeriğinin asfaltın davranış ve performansı üzerindeki etkileri oldukça farklı olabilir [2].

Asfalt karışımı, genellikle bitümlü sıcak karışım olarak, bilinen yüksek sıcaklıklarda üretilir. Bitümlü bağlayıcının agrega taneciklerini düzgün bir şekilde sarması için gerekli yüksek sıcaklıkta karıştırılması gerekmektedir. Bu sıcaklıklar ayrıca üretim tesisindeki ve uygulama alanındaki sıcaklığın ayarlanması için bir temel görev görmektedir. Asfalt Enstitüsü (Asphalt Institute , AI) 1962' de eşit karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları önermeye başlamıştır. 1974' te daha temel bir “santistok” birimine geçmiş ve karıştırma – sıkıştırma için sırasıyla 170 ± 20 cSt ve 280 ± 30 cSt viskozite aralıkları belirlemiştir. Daha sonra viskozite aralıkları temelde aynı büyüklüklerde kalarak SI birimleri ile yani Pascal – Saniye (Pa.s) birimiyle kullanılmaya başlandı. Böylelikle viskozite karıştırma için 0.17 ± 0.02 Pa.s ve sıkıştırma için 0.28 ± 0.03 Pa.s aralığında belirlenmiş oldu [2].

Her ne kadar çok çalışma yapılırsa da Asfalt Enstitüsü'nde karıştırma – sıkıştırma sıcaklıklarını belirleme konusunda araştırmalar yapılmamıştır. Özellikle karıştırma – sıkıştırma sıcaklıklarının, bitümlü bağlayıcının viskozitesi ile ilgili olduğu düşünölmüş ve asfalt karışımının üretiminde fillerin varlığı göz ardı edilmiştir. Bitümlü sıcak karışımın karıştırma – sıkıştırma sıcaklıkları hakkında en doğru veriyi bitümlü bağlayıcının viskozitesinden ziyade asfalt mastiğinin viskozitesinden elde etmek olmalıdır [2].

Yeterli kalitede kaplama, kolay serme ve iyi sıkıştırma parametreleri ancak optimum viskozite ile sağlanabilir. Birçok çalışmada çeşitli partikül – sıvı süspansiyon oranlarının viskozitesinin hesabı için modeller geliştirilmiştir. Fakat bunların çoğı asfalt mastikler için uygun değildir. Çünkü asfalt mastikler daha geniş bir mineral dolgu mertebesine sahiptir [3].

Bu çalışmada hedeflenen amaç; bitümlü bağlayıcı ve mineral filler ile hazırlanan asfalt mastiklerin sıcaklık ve viskoziteleri arasındaki ilişkiyi incelemek ve elde edilen deneysel veriler kullanılarak “Bulanık Mantık Çıkarım Aracı (Fuzzy Logic)” kullanılarak, farklı oranlardaki karışımların viskozitelerinin tahmini için bir yapay zekâ modeli oluşturmaktır.

2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK); agregas, filler ve bitümlü bağlayıcının yüksek ve uygun sıcaklıkta karıştırılması ile elde edilirler. Agregas karışımın çoğunluğunu oluşturan malzemedir. Agreganın özellikleri bitümlü karışımların dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Karışımın mukavemeti agreganın şekli, granülometrisi ve yüzey pürüzlülüğü ile bağlantılıdır [4]. Bitümlü sıcak karışımlar kullanılan agregas granülometrisine göre aralıklı derecelenmiş, sürekli derecelenmiş, tek boyutlu ve kesikli derecelenmiş karışımlar olarak da adlandırılır. İri agregadan fillere kadar her agregas boyutundan yeterli malzeme bulunduracak şekilde granülometriye sahip agregaya sürekli derecelenmiş agregas ve hazırlanan sıcak karışıma da asfalt betonu adı verilir. Asfalt betonu adı verilen karışımlar gelişmiş kaplama türü olup, ağır trafikli yollarda, otoyollarda, hava alanı pistlerinde uygulanır ve maliyetleri oldukça yüksektir.

Trafik yükleri altında, şekil değiştirme yüzeyde oluşur. Kullanılan malzeme, yapım tekniği ve yük bileşenleri kaplama tabakasının performansını etkileyen ana etkenlerdir. Kaplamanın performansını etkileyen; bağlayıcı cinsi ve miktarı, ince ve iri agregas cinsi ve miktarı en önemli etkenlerdir. Bunlara ilave olarak karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma sırasındaki özen, karışımın performansını etkilemektedir. Bu etkenlerden herhangi biri ihmal edilirse ürün kalitesinin düşük olması kaçınılmazdır ve bu durum da kaplamanın servis ömrünün, beklenenin altında olmasına sebep olur [4].

2.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Agregas

Bitümlü sıcak karışımların ana malzemelerindendir. No.4 (4.75 mm) elek üzerinde kalan kısmına kaba agregas, No.4 – No.200 (4.75 – 0.075 mm) elekler arasında kalan kısmına ince agregas, No.200' den geçen kısmına filler denir. Bu çalışmada filler kullanıldığı için detaylı olarak anlatılacaktır.

Kullanılacak agreganın, kökeni ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri ve granülometrik bileşimi sağlaması gerekir. Kaplamanın ağırlıkça ve hacimce önemli bir kısmını oluşturan agrega, yola etkiyen yüklerin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasında önemli rol oynamaktadır. Bundan dolayı agregaların özellikleri yol mühendisleri için çok önemli olup, değişik agrega tiplerinin karakteristik özelliklerinin bilinmesi yolların projelendirilmesi için gereklidir. Agregası; kum, çakıl, kırmataş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerden ibaret olup bağlayıcı bir ortamda, bitümlü bir karışım, portland çimentosu betonu, harç, mastik ve benzeri uygulamalar için bir araya getirilmiş veya bağlayıcısız bir ortamda kullanılmak üzere bir araya getirilmiş malzeme olarak tanımlanır [5]. Bitümlü sıcak karışımlardaki mineral agrega miktarı genellikle ağırlıkça %90 ile %95, hacimce %75 ile %85 arasındadır. Mineral agrega esas olarak kaplamanın yük taşıma kapasitesinden sorumlu olup, buna bağlı olarak asfalt kaplamasının performansına doğrudan etki eder [6]. Agreganın tipi, gradasyonu, yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri bitümlü sıcak karışımların yorulma ve tekerlek izi açısından performansları üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Kaplama tabakası, etkiyen yükler altında farklı deformasyonlara maruz kalır. Tabakanın yapımında kullanılan malzemeler, uygulanan yapım metotları ve yapım sonrası maruz kalınan dış yükler; kaplamanın performansını etkileyen başlıca etkenlerdir. Bir kaplamanın direnci ve yoğunluğu üzerine etki eden en önemli faktör agregadır. Bu bakımdan agregaların sert ve dayanıklı olması, bünyelerinde zararlı maddeler bulunmaması ve yüzey şekillerinin bir kenetlenme yaparak direnci artıracak şekilde olması beklenir [1].

2.1.2. Filler

Filler, bitümlü sıcak karışımların plastik davranışını, yorulma süresini doğrudan etkiler. Bitümlü sıcak karışımlar ile birlikte farklı filler kullanımları denenmektedir. Portland Çimentosu, sönmüş kireç, öğütülmüş yakıt külü, mermer tozu bunlara örnektir [1]. Mineral filler toplam agreganın çok küçük yüzdesini oluşturmasına karşın, karışım özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Mineral filler, 0.075 mm' lik elekten geçen agrega malzemesidir. Ancak 0.075 mm' den daha ince olan tüm malzemeler filler görevi görmezler. Filler, bitümlü karışımlarda ince agrega oranını artırmak, boşluk miktarını azaltmak ve yüksek sıcaklıklarda asfalt betonunun

deformasyona karşı dayanımını artırmak için kullanılmaktadır. Boşluk doldurucu bir özelliğe sahip olduğundan stabiliteyi etkilemektedir. Mineral filler köşeli olmalı, asfalt betonu içerisindeki boşlukları doldurabilmesi için uygun gradasyona sahip olmalı ve aynı zamanda 0.001 mm' den ince boyutlu daneler de içermelidir. Dane şekli mineral fillerin etkisi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Köşeli şekiller, ince, düz ve uzun parçacıklardan daha çok istenir. Mineral filler içindeki istenmeyen şekilli parçacıkların oranı artarsa mineral fillerin kalitesi düşer. Toprak, kil, organik ve zararlı maddeler ihtiva etmemeli ve kolayca akacak kadar da kuru olmalıdır. Taş tozu, mermer tozu, kalker tozu, portland çimentosu ve sönmüş kireç çok sık kullanılan mineral filler malzemeleridir [1].

Fillerin, karışım içerisindeki oranı iyi ayarlanmalıdır. Genellikle bitümlü karışım içinde %3 ile %9 oranları arasında kullanılır. Belli bir orana kadar filler, boşlukları doldurduğu için, ince agrega gradasyonunu değiştirir ve böylece agrega danecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlayarak daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, bitüm ile birlikte ince agregaya karşı kayganlaştırma ve bağlayıcı etkisi göstererek harç elde etmeyi sağlar. Filler kimyasal bakımdan atıl olmalı, yani bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir [1]. Ayrıca, bitümlü karışımın yapıldığı sıcaklıkta bir değişikliğe uğramamalı, bağlayıcıya karşı iyi bir yüzey adezyonu göstermelidir [7]. Mineral fillerin asfalt yol karışımlar üzerine etkisini özetlemek gerekirse; farklı mineral filler, asfalt çimentosuna eklendiğinde farklı rijitlik etkileri gösterir, zaman – sıcaklık değişim fonksiyonu, asfalt – filler oranı %1' den az olan asfalt veya mineral filler tarafından etkilenmez, karışımlara eklenen mineral filler, Marshall stabilite ve hava boşluğunu etkilemez, esneklik modülü değeri mineral fillerin katılma etkisini yansıtmaz [8].

Dukat ve Anderson (1970), farklı kaynaklardan temin edilen bitümlü bağlayıcılara farklı sekiz adet filler katarak iki farklı filler/bitümlü bağlayıcı karışım hazırlayarak; bu karışımlar ile dört farklı sıcaklıkta plaka viskozimetresi deneyi yapmışlardır. Farklı filler ile farklı rijitlik etkileri gözlemlemişler ve bu filler malzemelerinin hava boşluğu ile Marshall stabilitesini etkilemediğini tespit etmişlerdir [1].

Ishai ve ark. (1980), bitümlü karışımların optimal davranışlarını belirlemek için mastiğin temel özelliklerini incelemişlerdir. Filler olarak cam parçacıklarının,

dolomitin, kum taşının, bazaltın, kalkerin ve sönmüş kirecin kullanıldığı bu çalışmanın sonucunda; karışımların davranışlarına göre fillerin sınıflandırılması için temel nicel kriterler önerilmiştir [1].

Puzinauskas (1983), filler-bitümü bağlayıcı karışımının özellikleri üzerine fillerin etkisini araştırmıştır. Dört farklı fillerin ve üç farklı agreganın kullanıldığı çalışmada bitümlü bağlayıcı miktarı sabit tutulmuştur. Filler etkisinin belirlenmesinde Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Bu testler için her bir numunenin hazırlanmasında Marshall tokmağı ile 50 düşüş kullanılarak numuneler sıkıştırılmıştır. Araştırmacı bu çalışmasında, aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır.

- Çoğu zaman, yolun yoğunluk ve dayanım gibi özelliklerini iyileştirmek için fillere ihtiyaç duyulur.
- Filler, bitümlü bağlayıcı ile karışımlarında iki rol oynar. Birincisi, mineral agregaların bir parçasıdır. İkincisi ise, büyük agregalar arasında temas sağlar ve boşlukları doldurur.
- Bitümlü bağlayıcıya normale göre daha az filler malzemesi karıştırıldığında, asfaltın duktilite, penetrasyon ve viskozite özellikleri kayda değer düzeyde değişiklik gösterir.
- Gerçek asfalt karışımlarda genellikle kullanılan filler oranı, çevre sıcaklıklarında filler asfalt karışımlarının duktilitesi sıfır değerine yaklaşır.
- Viskozite ölçümleri, kaplama inşası ve kullanımında fillerin güvenilebilirliğinin belirlenmesini sağlar. Fillerin türü ve miktarına bağlı olarak, yüksek sıcaklık derecelerinde filler asfalt karışımlarının viskozite değerleri, çok geniş bir alanda değişebilir.
- Deneyler, yoğun asfalt karışımları yapabilmek için ihtiyaç duyulan sıkıştırma enerjisi ve binderin viskozitesi arasında önemli bir korelasyonun varlığını göstermiştir. Yine bu deneyler, yüksek viskoziteli filler asfalt karışımı içeren binder tabakasının sıkıştırılabilmesi için aynı zamanda yüksek sıcaklığa ihtiyaç hasıl olduğunu göstermiştir [1].

Akili ve Courval (1987), üç farklı filler (çimento, sönmüş kireç ve kalker) kullanmışlardır. Yükleme süresi, sıcaklık ve kükürt/asfaltın (K/A) ağırlık oranı

değişkenler olarak seçilmiştir. K/A binder tabakaları ile sönmüş kirecin, kalker veya çimento ile hazırlanan binder tabakalarından daha yüksek dayanım ve viskozite özelliği gösterdiğini bulmuşlardır [1].

Anderson ve ark. (1992), çalışmalarında No.200 eleği altı fillerin bir kısmını asfalt betonunda ve mastik asfaltta kullanmışlardır. Yedi adet kaynaktan filler numunesi almışlardır. Filler karışımı içeren farklı oranlarda filler asfalt karışımı hazırlamışlardır. Genellikle asfalt karışımların davranışının yorulma deneyi ile değerlendirildiğini belirtmişlerdir. Bu deneyin eğilme yorulması nedeniyle kırılma meydana gelmesine neden olduğundan başarısız olduğunu ispatlamışlardır [1].

Suhaşbani ve ark. (1992), asfaltta oluşan tekerlek izi derinliğinde filler türü ve içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Tekerlek İzi Deneyi (Whell Tracking Test) iz derinliğinde bu karışımların etkilerinin araştırılmasında kullanılmıştır. Karışımların mekanik özelliklerinin incelenmesi için, esneklik modülü, indirekt çekme dayanımı, Hyeem stabilite ve Marshall stabilite deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, iz derinliği üzerinde, deneyde kullanılan karışımların protland çimentosu, sönmüş kireç ve kalkerin etkisi olduğunu göstermiştir [1].

Shahrour ve Saloukeh (1992), karışımlarda farklı fillerin etkisini değerlendirmişlerdir. Filler olarak çimento, sönmüş kireç ve sodyum silikat kullanılmış olup karışımlara eklenmiş ve çalışmada dikkate alınmıştır. Fillerin gradasyonu, partikül şekli, yüzey özellikleri, sıkıştırılmış numunede boşluk oranı, su emme ve özgül ağırlıkları tayin edilmiştir. Filler malzemeleri bitüme, ağırlıkça 0,5 ve 1,5 oranlarında eklenmiştir. Filler oranı arttığında, yumuşama noktasının ve penetrasyon indeksinin arttığını, penetrasyon değerinin düştüğünü göstermişlerdir. Marshall karışım dizaynı çalışması, bitümlü karışımlarda filler türü ve miktarının performansını değerlendirmede kullanılmıştır. Değişik fillerden farklı sonuçlara varmışlardır [1].

Tyson (1993), kömür tozunun bitümlü bağlayıcı ile kullanılabilceğini göstermiştir [1].

Sayed ve ark. (1995), Bahreyn' de, kullanılan bitümlü yol kaplamalarında filler olarak pıssu atığı külünün kullanılmasını araştırmışlardır. Atıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmış, atığın da içeriğinde bulunan asfalt karışımlar hazırlanmıştır. Marshall deney metodu asfaltta filler olarak atığın uygunluğunun değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Değerlendirme parametreleri, sıkışmış karışım yoğunluğu, karışımda hava katkılarının yüzdesi ve agregaların boşluk yüzdesi, bitüm ile dolu boşluk yüzdesi, Marshall Stabilitesi ve akmasıdır. Optimal bitüm oranı ile hazırlanan numuneler, Bahreyn' de daha hakim görülen yüksek sıcaklıklarda karışımın çevre sıcaklığından etkilenmesinin belirlenmesinde kullanılmış 70 °C ve 80 °C' de akma ve stabilite değerleri belirlenmiştir. Atık madde içerikli numunelerin Bahreyn standart şartnamesinin minimum stabilite değerini sağladığı görülmüştür [1].

Mogawer ve Stuart (1996), çalışmalarında üç Avrupa ülkesinden temin edilen ve performansları bilinen sekiz çeşit filler kullanmışlardır. Karışımlar için, mastiklerin akması akma deneyi ile, tekerlek izi deneyleri Fransız yol tekerlek izi deneyi ile, düşük sıcaklık çatlağı indirekt çekme deneyi ile, uygulanabilirlik ASTM-D4867 metodu kullanılarak denenmiştir. Deneyler sonucunda kaliteli veya kalitesiz mineral fillerin stone asfalt karışımların performansına etki etmediği anlaşılmıştır [1].

Güngör (1996), Afşin Elbistan uçucu külünün, yol kaplamalarında filler olarak kullanılmasını araştırmıştır. Taş tozu, portland çimentosu ve uçucu kül filler ile yapılan karışımlara Marshall deneyi yapılmış, optimum bitüm yüzdesi, bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi, boşluk yüzdesi, akma stabilite değerleri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde uçucu külün yol kaplamalarında filler olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [1].

Chen ve ark. (1998), mastik asfalt karışımlar üzerine deneyler yapmışlardır. Direkt çekme testi deney verilerine göre, karışımın filler içeriği arttığında, çekme mukavemetinin de arttığını göstermiştir. Buna bağlı olarak, asfalt ile filler arasında iyi bir adezyon oluştuğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, mastik karışımlarının çekme mukavemeti, filler partiküllerinin boyutunun artması ile azaldığını göstermişlerdir [1].

Mineral fillerin en önemli özelliği, granülometrisidir. İnce kum oranında gereğinden fazla artış olduğunda boşluk yüzdesi artmakta, birim ağırlık düşmektedir.

Türkiye’ de genellikle yol kaplamalarında filler olarak Kalker kullanılmaktadır. Bunun sebebi Türkiye’ de birçok bölgede yaygın olarak bulunmasıdır. Bu çalışmada, filler olarak Kalker, Bazalt, Portland Çimentosu ve Sönmüş kireç kullanılmış olup kısaca açıklanmıştır.

2.1.2.1. Kalker (Kireçtaşı)

Yapısında en az %90 kalsiyum karbonat (Kireç Taşı - CaCO₃) içeren tortul bir kayadır. Kalker kirecin çökmesiyle oluşmaktadır. Okyanus ve deniz havzalarında eriyik durumda olan kireçtaşı çökerek kireçtaşına oluşturmaktadır. Köprülerin ve yolların temellerinde kullanılmakla beraber; asfalt yol yapımında ve çimento yapımında da kullanılır. Bu tür kayaların bulunduğu araziler ise karstik arazilerdir. Türkiye’ nin yaklaşık beşte birini kaplayan bu karstik araziler su bakımından fakir araziler olduğundan tarım olanakları ve yerleşim çok azdır. Kalker, Türkiye’ de en çok Akdeniz Bölgesi’ nde bulunmaktadır. Dünyada ise Avustralya’ da bulunan yaklaşık 200 bin kilometrekarelik bir alanı kaplayan Nullarbor Ovası, kalker rezervinin büyük bir çoğunluğunu oluşturur [9].

2.1.2.2. Bazalt

Bazalt, volkanik kaya türlerinden bir tanesidir. Çok sert bir kayadır ve siyah renklidir. Dayanıklılığından ve sert olmasından dolayı uzun süreden beri köprü malzemesi, kaldırım taşı, yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise yeni kullanım alanları olarak asfalt agregası, demiryolu balast malzemesi gibi alt yapıda da kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra içeriğinde silis bulunmadığı için granül ve toz olarak, geçmişte silis ve kuvars kumu kullanılan diğer iş kollarında sağlıklı bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı yüksek bir dayanıma sahiptir. Doğada yaygınca bulunur. Mukavemeti yüksek olduğundan günümüzde yapı taşı olarak kullanılır. Bunlara ek olarak asitlere karşı da dayanıklı olduğundan yapılarda çokça kullanılmıştır. Kıрма bazalt taşları değişik miktarlarda agrega olarak beton bileşimlerine de katılabilmektedir. Kullanım

alanlarının geniş olması sebebiyle çeşitli boyutlarda ve şekillerde üretilmektedir. Ülkemizde en çok Ankara, İzmir, Gaziantep, Kayseri ve Diyarbakır' da üretilmektedir [10].

2.1.2.3. Portland Çimentosu

Türkiye' deki yıllık 30 milyon ton üzerinde olan çimento üretiminde çok büyük bir bölümünü Katkılı Çimento KÇ 32.5 oluşturmakla beraber, Portland Çimentosu PÇ 32.5 ve Traslı Çimento TÇ 32.5 da toplam miktarın içerisinde oldukça önemli bir yere sahiptir [11].

Kalker ve kil Portland Çimentosu klinkerinin temel hammaddeleridir. Bu hammadde karışımının 1450°C' ta dönel fırınlarda pişirilmesiyle elde edilen ve klinker adlı ürünün, soğumasının ardından az miktarda (%3 - %6) alçıtaşıyla birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilmektedir. Su ile birleştiğinde her bileşen hidrasyon yapmakta ve ayrı ayrı hidrasyon ürünleri oluşturmaktadır. Özellikle sulu betonlarda su ile temasından sonra boşlukları dolduran, beton hamurunu oluşturan, mukavemetli bir iskelet yapıya dönüşen bağlayıcı madde haline gelir [11].

Dünya genelinde üretilen çimentoların yaklaşık olarak %90' ını normal Portland Çimentosu oluşturmaktadır. Her çeşit beton ve harç yapımı için uygun çimento Portland Çimentosudur. Türk çimento standartlarına göre bulunan çimento türleri 28 günlük mukavemet değerleri göz önüne alınarak sınıflandırılır ve 5 tiptedir. Bunların içinde bulunan çeşitli yabancı maddeler çimento içinde de bulunurlar [12].

Çalışmada EN 197-1 CEM I 42,5R Portland Çimentosu filler olarak kullanılmıştır.

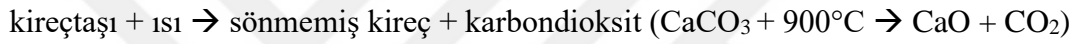
2.1.2.4. Sönmüş Kireç

Kireç taşlarının 900 – 1000 °C' de kalsinasyonu ile kireç elde edilmektedir (CaO). Sönmemiş kireç adıyla da bilinir. Bu sönmemiş kirecin su ile reaksiyona sokarak neticesinde oluşan madde sönmüş kireç adını taşımaktadır. Aynı zamanda kalsiyum hidroksit (Ca(OH₂)) de denir. Magnezyum içeren türleri de vardır ve bunlara da dolomitik kireç ve söndürülmüş dolomitik kireç denmektedir.

Kireç eski çağlardan beri bilinmekte ve çok yönlü kullanımı olan bir maddedir. 20. Yüzyılın başlarında demir çelik ve kimya endüstrisinin hızla gelişimi ile önemli miktarda kullanılmaya başlanmıştır.

Kireçtaşı kireç üretiminde hammadde rolü oynar. Yüksek kalsiyumlu ve dolomitik olmak üzere kireçtaşları kaba olarak iki sınıfa ayrılır. Yüksek kalsiyum içeren kireçtaşları %97 - %99 CaCO₃ içerirler. Dolomitik kireçtaşları MgCO₃ içerir ki oranı %43' lere kadar ulaşabilir. Kullanım alanlarına göre 40 kadar cinsi vardır. Bitümlü kireçtaşı, tebeşir, kimyasal kireçtaşı, demirli kireçtaşı, fosilli kireçtaşı cam taşı, mermer vb. bu çeşitlere örnek gösterilebilir.

Kireç taşının kalsinasyonu ile kirece dönüşmesi aşağıdaki tepkime ile gerçekleşir;



Sönmüş kirecin elde edilmesi; $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2(\text{suda}) + \text{ısı}$. Kalsiyum oksit su ile tepkimeye girdiğinde etkili bir şekilde ısı açığa çıkar. Tepkime sonunda suyu uzaklaştırma işleminden sonra Ca(OH)₂ katısı oluşur ve buna söndürülmüş veya sönmüş kireç denir. Beton asfalt yapımında soyulmayı önleyici katkı maddesi olarak da kullanılır.

2.1.3. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitümlü bağlayıcılar, termal direnci, reolojik ve doğal yapışkanlık özelliği ile çatı kaplama, zemin döşeme, mastikleme, boru kaplama işlemlerinde, boyalar, yol inşaatı gibi uygulamalarda kullanılır. Yol esnek üst yapısının niteliğini belirleyen en önemli malzemedir [13]. Bitümlü bağlayıcılar, asfalt betonu içerisinde agregaları birbirine bağlayan, asfalt betonuna esneklik kazandıran, bu esneklik sayesinde birçok avantaj kazandıran, metal dışı türevleri ile bir arada bulunan, karbon disülfürde tamamen çözünebilen hidrokarbonlu yapıya sahip bir malzemedir. Katı, yarı katı veya sıvı hallerde bulunabilir. Katı halde bulunan hidrokarbonlara bitümlü bağlayıcı, sıvı halde bulunan hidrokarbonlara ham petrol, gaz halde bulunan hidrokarbonlara ise doğal gaz adı verilmektedir. Kayalardan veya göllerden doğal halde elde edileceği gibi, ham petrolün damıtılmasında da elde edilebilir. Ham petrolün genel olarak bitkisel madde ve deniz canlıları kalıntılarının okyanus tabanında kaya ve çamur parçalarıyla

karışmasından dolayı oluştuğu bilinmektedir. Yüzyıllar boyunca bu maddeler ve çamur, metrelerce kalınlıkta katmanlar halinde birikmiş ve üzerindeki katmanların ağırlığıyla bu altta kalan katmanlar tortul kayalar haline dönüşmüştür. Bitümlü bağlayıcıların sertleşmeye gösterdiği direnç dayanıklılığını gösterir. Bitümlü bağlayıcılar, kaplamanın servis ömrü boyunca çeşitli etkenlere maruz kalırlar. Bu etkenlerden dolayı sertleşir ve bu olay bitümlü bağlayıcının yaşlanması olarak da adlandırılmaktadır.

2.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretilmesi

Bitümlü sıcak karışımlar, kırılmış ve elenmiş kaba agregaya, ince agregaya ve mineral fillerin belirli gradasyon limitleri arasında karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir tesiste karıştırılarak elde edilirler. Tesiste üretilen bitümlü sıcak karışım, temeller veya diğer bitümlü kaplamalar ile beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak serilip sıkıştırılması ile kaplama tabakası teşkil edilir. Kaplama tabakası; aşınma tabakasını, binder tabakasını veya bunların her ikisini birden kapsar. Bitümlü sıcak karışımın üretimi için ilk önce uygun özellikte agregaların üretilmesi gerekir.

Bitümlü sıcak karışımın aşınma ve binder tabakalarının yapımı için agregaya karışımına penetrasyon dereceleri 40 – 150 arasında olan bitümlü bağlayıcı ilave edilmektedir. Hangi bitümlü bağlayıcının hangi bölge ve yörede ve hangi tabakada kullanılacağı iklim koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Bitümlü sıcak karışımın üretiminde, kullanılacak bitümlü bağlayıcının, agregaya ve karışıma ait gerekli deneyler yapıldıktan sonra karışım formülü hazırlanır ve tesiste üretime geçilir.

2.3. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Bulunması Gereken Ana Özellikler

Bitümlü sıcak karışımların sahip olması özellikler;

- Yüksek stabilite,
- Durabilite,
- Kırılgan olmama,
- Yeterli yüzey pürüzlülüğüne sahip olma,
- Geçirimsiz olma,

- Ekonomik olma,
durumlarıdır.

2.3.1. Stabilite

Kaplama üzerinde oluşan statik ve dinamik yüklerin meydana getirdiği kesme kuvvetine ve deformasyonlara kaplamanın gösterdiği dirençtir. Bitümlü sıcak karışımı meydana getiren agrega ve bitümlü bağlayıcının gradasyonu küçüldükçe sertleşir. Bu da stabilite değerine tesir eder. Bitümlü sıcak karışımın uygulandığı yerin iklimi, trafiği, tipi ve hacmi itibariyle yüksek stabilite istendiğinde düşük penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmalıdır. Soğuk kışın hüküm sürdüğü yerlerde, kaplamanın çatlamaya dayanıklılığını göz önüne alarak yüksek penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmalıdır. Yüksek stabilite elde etmeye çalışılmalıdır [14]. Kaplamanın stabilitesi için yolda görülebilecek en büyük sıcaklık derecesi dikkate alınmalıdır. Bu da ülkemiz için 60°C olarak belirlenmiştir [1].

2.3.2. Durabilite

Bitümlü bağlayıcının trafik, su ve hava etkilerine karşı mukavemetidir. Durabilite diğer bir ifade ile kaplamanın aşınmaya, kabarmaya, soyulmaya ve oksidasyona dayanmasıdır. Bu dayanma da ancak, yoğun granülometrilili ve soyulmaya karşı direnci yüksek agrega ile yüksek bitüm yüzdesi kullanılarak karışımın yüksek geçirimsizlik verecek şekilde dizayn edilip sıkıştırılması ile mümkün olur. Bitümlü karışım kararlı yapıya sahip olduğu kadar dayanıklı da olmalıdır [15].

2.3.3. Esneklik (Fleksibilite)

Bir kaplamanın kendisini temel in çökmelerine çatlamadan intibak ettirmesi kabiliyetidir. Kaplamanın fleksibilitesine; bitümlü sıcak karışımın penetrasyonu bitümlü bağlayıcının ısı altında genişleme derecesi, bitümlü sıcak karışımındaki bitümlü bağlayıcı miktarı ve filler tesir eder [15]. Bitüm yüzdesi yüksek, açık granülometrilili karışımlar, bitüm yüzdesi düşük yoğun granülometrilili karışımlara göre daha esnektir. Fakat esnekliği yüksek karışımların stabilitesi düşük olabilir [1]. Çok az fleksibil bir kaplama çok az stabil bir kaplama kadar sakıncalıdır.

2.3.4. Kayma Mukavemeti

Taşıtların kaplama üzerinde emniyetle hareket etmesini ve durmasını sağlayan kaplama yüzeyinin sürtünme mukavemetidir [15]. Kısaca kaplamanın kaymaya karşı direncidir. Kayma mukavemeti karışımdaki agreganın aşınmaya olan dayanıklılığı, asfalt miktarı ve boşluk yüzdesine bağlıdır. Yumuşak agregalar fazla aşındıklarından kaygan yüzey oluştururlar. Karışımda fazla bitümlü bağlayıcının ve az boşluğun bulunması trafiğin aşırı kompaksiyonu tesiriyle sıcak havalarda bitümlü bağlayıcının genişmesi sonunda bitümlü sıcak kaplama yüzeyine çıkarak kaygan bir yüzeyin meydana gelmesine sebep olur [14]. Bu olaya kaplamanın “terlemesi” denir. Bu olayın ortaya çıkmaması için karışım homojen olmalı, üretim ve kullanım sırasında segregasyona uğramamalıdır. Ayrıca yollarda meydana gelen cilalanma da kayma direnci bakımından büyük sorunlar ortaya çıkarır.

2.3.5. İşlenebilirlik

Bitümlü sıcak karışımın karıştırma – serilme – sıkıştırma bakımından işlenebilir özellikte olması gerekir. Karışımın bu özelliği agreganın gradasyonu, asfalt yüzdesi, agreganın maksimum dane büyüklüğü, şekli ve yüzeysel yapısı ile ilgilidir. Köşeli kum taneleri stabiliteyi artırır. Yuvarlak kum taneleri işlenebilirliği artırır. Karışımda bitüm miktarının azlığında, karışımda iyi agregalar kullanıldığı ve yeteri derecede silindirme yapıldığı halde kaplamalarda istenilen pratik yoğunluk temin edilemez [16]. Karışımda çok fazla agregalar olması işlenebilirliği azaltır. Filler yüzdesinin düşük olması geçirgenliğe yol açtığı gibi yüksek olması da karışımın durabilitesinin düşük olmasına ve işlenmesinin zor hale gelmesine neden olur [1].

2.3.6. Geçirimsizlik

Karışımdaki hava boşluğu yüzdesi ile belirlenir. Karışımdaki boşlukların birbiri ile bağlantılı olması ve boşlukların yüzeye irtibatlı olması geçirimsizliği etkileyen başlıca faktörlerdir. Karışım dizaynında boşluk yüzdesinin yüksek olması, su ve havanın kolaylıkla karışım içerisine girerek, oksidasyona ve agregaların ayrışmasına sebep olur.

3. BULANIK MANTIK (FUZZY LOGIC)

İnsanlar sözel ifadelerle iletişim içinde bulunduğunda bu ifadeleri inceleyerek sorun ile ilgili olanları yargılama ve ilişkilendirme sonucu birtakım kurallar çıkarır. Bu makul ve mantıksal olan kuralları günümüz için matematikte bilinen yöntemler ile ifade etmek mümkün değildir. Çünkü, bu yöntemlerle hesaplama yapmak için belirginlik şarttır. Yaklaşık hesaplamalarda gerekli çözümlere ulaşabilmek için basit bulanık küme hesaplamaları ile bulanık alt kümeler arasında geçerli ilişkiyi sağlayacak bulanık küme kural yapılarının iyice bilinmesi gereklidir. Doğal diller ne kadar karmaşık ve bulanık olurlarsa olsunlar, insan iletişiminin temelini teşkil etmeleri bakımından çok önemlidir. Bundan dolayı bulanık söz ve ifadeleri kümelerle işleyebilecek kural ve işlemlere gerek vardır.

Bulanık sistemler, model yapısı itibari ile sayısal öngörme işlemleridir. Bunlar gerçek hayatta karşılaşılan sınıflandırmaların yapıları görüşlerle başlar ve uzman görüş olarak “EĞER... İSE...” kuralları ile ifade edilir. Bulanık sistemler bulanık kümeleri bulanık kurallarla birbirine bağlayarak oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan davranışları modelleyebilirler. Bilimde alışlagelmiş olan çözümler o kadar kesinlik kazanmıştır ki “neden bulanıklığa ihtiyaç vardır?” diye bir soru yöneltilebilir. Birçok durumda matematik öngörü yöntemleri fayda sağlayamayabilir veya kullanımları pahalı olabilir. Bu sebeple bulanık yaklaşımın kullanılması daha etkin ve ucuz olabilir. Yeni bilgilerin gelmesi ile bulanık sistemler daha da iyileştirilebilirler. Birçok durumda bulanık sistemler yeni bilgilerin gelmesi ile klasik olan çözümlerinin uzman görüşleri de işin içine katarak daha da iyileştirilmesine geçit verir. Bu yaklaşımlar uzman görüşlerle sınama ve yanılma ilkesinin de kullanılması ile gittikçe daha doğru sonuçlar verir.

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) nitelikleri belirsiz kesin olmayan bilgilerin, modellemesi zor, karmaşık ve doğrusal olmayan verilerin prosesleri kontrolünde başarılı bir metot olarak bilinmektedir.

Klasik bir mantıkta bir eleman bir kümenin elemanı veya değildir. Kısmi üyelik olması mümkün değildir. Yani kesin sınıflandırmalar mevcuttur. Bulanık mantık ise belirsiz, yaklaşık durumlarda işlem yapabilme yetisine sahiptir. En önemli

kavramlardan bir tanesi de bu işlemleri insan mantığını taklit ederek yapmasıdır. Bir nesne bir grubun kısmi olarak üyesi olabilir [17].

3.1. Bulanık Çıkarım Sistemi (BÇS)

Bu sistemde matematiksel denklemler yerine bulanık kümeler bulanık çıkarım motoru tarafından kullanılır. Bulanık sistemde iki bilgi kaynağı bir arada düşünülmektedir. Bunlardan biri; ölçülmüş, gözlemlenmiş veriler, diğeri; uzman kişinin görüşleridir. Bunun anlamı sözel veri tabanının sayısal veri tabanına ilavesidir. Bilinmeyen belirsizliklerin modellenmesinde uzman görüş devreye girer ve bulanık sisteme ile bir etkileşim halinde olur. Bu sistemde kullanıcı ile etkileşimli olarak üç temel durum vardır. Bunlar “Bilgi Tabanı”, “Çıkarım Motoru” ve “Kullanıcı Etkileşimi” dir [17].

3.1.1. Bilgi Tabanı

Uygulama alanıyla ilgili tüm verileri içerir. Sorunun geçerli olduğu alan ile bu alanda mevcut değişkenler arasındaki ilişkileri kuran kurallar bulunmaktadır. Veriler “EĞER, İSE” önermeleri şeklinde belirlenir ve her bir kural sorunun bir kısmını ancak açıklayabilir [17].

3.1.2. Çıkarım Motoru

Sorunu çözmeye, girilen veriler kullanılarak en etkin sonuçları bulabilmek için yapılan işlemler topluluğudur [17].

3.1.3. Kullanıcı Etkileşimi

Önerilmiş bulanık sistemin daha da iyileştirilmesi için kullanıcı görüşlerinin ve yeni bilgilerin harmanlandığı bölümdür. Kullanıcı ile sistem arasındaki etkileşimi gösterir [17].

3.2. Bulanık Çıkarım Sistemi (BÇS) Adımları

Bir sistemde karmaşıklık arttıkça onun alışlagelmiş matematik ilkeleriyle modellenmesi neredeyse imkansızlaşır. Bundan dolayı aşırı derecede basitleştirici

varsayımlar yapılmalıdır ki sonuca ulaşılsın. Fakat bu basitleştirici varsayımlar esas durumun gerçekliğinden ödün vermek anlamına gelmektedir. Esas durumun gerçekliğinden ödün vermemek için sınırlı sayıda bulanık mantık kuralları kullanılarak sorunun çözümlenmesi yoluna gidilir. BÇS tespit edilmiş kuralların her birini kullanarak yaptığı çıkarımlarla sorunu kısmi olarak çözümlenmesine ışık tutar. Daha sonra bu kurallar BÇS tarafından harmanlanarak tümden bir sistem çıkarımına gidilir. Bu da bir bakıma tüme varım çıkarım yönteminin kullanılmasıdır. Aslında bir bulanık sistemin kural tabanı o sistemin girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki sözel ilişkilerle sorunu çözmeye çalışan kişi veya uzmanın görüşlerini de içine alarak bütünlük bir çözüm bulma yoludur [17].

Bulanık bir sistemin öz olması, girdileri çıktılara mantık kuralları ile bağlanmasına bağlıdır. Bu girdileri ve çıktıları mantık kuralları ile bağlamakla ancak sağlıklı bir kural tabanı oluşturulabilir. Bulanık bir modelin uygulanması sırasında BÇS adımlarının takip edilmesi çok önemlidir [17].

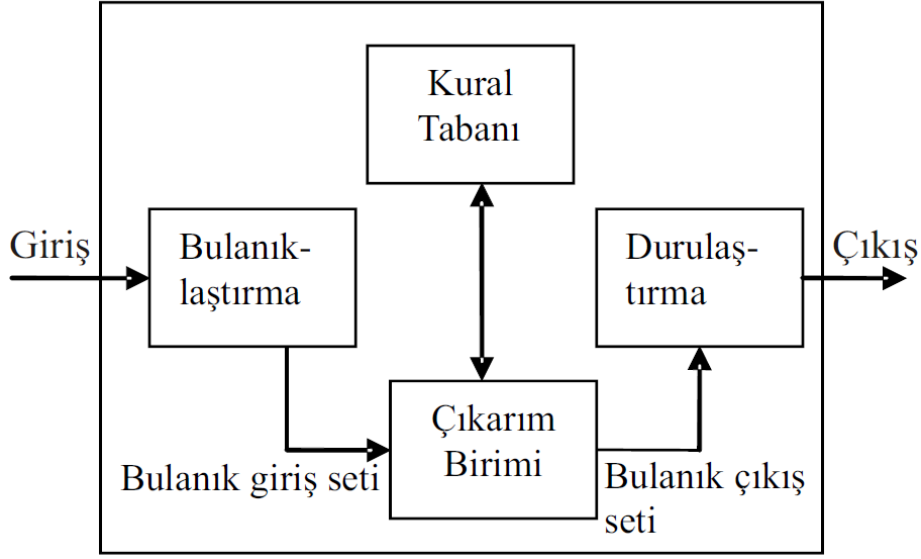
- Sözel ifadelerle (Uzak, yakın, ağır, hafif, yaşlı, genç, sıcak, soğuk vb.) öncelikle modelin girdi ve çıktıları bulanıklaştırılmalıdır.
- Kuralların belirlenmesi; her kural girdilerin ve çıktıların değişim aralıklarından belirli kısımları birbirine ilintiler. Kuralları belirlemede daha önce yapılmış çalışmalardan faydalanılabilir.
- BÇS öncelikle belirlenen kuralların öncül kısmındaki ardıl kısma taşınması için kısmi çıkarımların yapılmasını sağlar. Bu işlemlerden sonra ise tetiklenen kuralların harmanlamasını yaparak verilen girdi değişkenlerinin sayısal değerleri için çıktı değişkeninin öncelikle bulanık çıkarımının ne olacağı bulunur.
- Bulunan sonuç bulanık halde olduğundan bunun durulaştırılarak yönetici veya mühendisler tarafından kullanılacak kesin bir sayıya indirgenmesi gereklidir. Uygulamada değişik durulaştırma yaklaşımları vardır. Bir bulanık çıkarım sistemindeki genel adımlar Şekil 3.1 de gösterilmiştir [17].



Şekil 3.1 BÇS Adımları

Bulanık mantık yaklaşımında kümeler “EĞER, İSE” kuralları ve yaklaşık sorgulama ilkelerinin akılcı biçimde kullanılması gereklidir. Bulanık Çıkarım Sistemi; bulanık model, bulanık kural tabanlı sistem, bulanık uzman sistem, bulanık ilişkilendirme, bulanık kontrol gibi isimlendirilmelerle de bilinir. Temel olarak bir Bulanık Çıkarım Sistemi kural tabanı, veri tabanı ve sorgulama işlevi olmak üzere üç ana kısım içerir.

Bulanık mantık sisteminde temel olarak; bulanıklaştırma birimi, çıkarım birimi kural tabanı ve durulaştırma birimi bulunmaktadır ve Şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Ayrıca klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel farklılıklar Tablo 3.1’ te gösterilmiştir [17].



Şekil 3.2 Bulanık Mantık Sisteminin Yapısı [18].

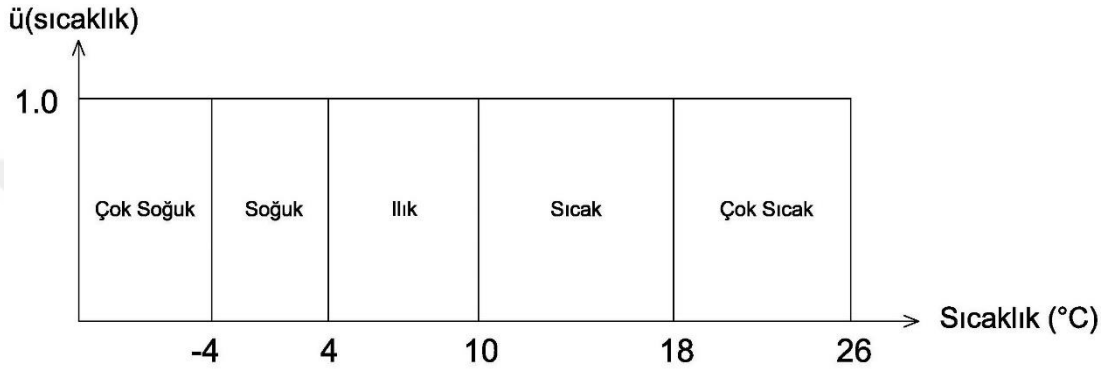
Tablo 3.1 Klasik Mantık – Bulanık Mantık Arasındaki Temel Farklılıklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A veya A Değil	A ve A Değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belirli Derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 Arasında Süreklilik
İkili Birimler	Bulanık Birimler

3.3. Bulanık Kümeler ve Üyelik Fonksiyonları

Bulanık mantık, sayıların komşuluğu felsefesine dayanmaktadır. Karar sürecinde bir durum bir sayı ile ifade ediliyorsa, söz konusu durumun kabul edilirliği o sayının gerçekleşmesinde sağlanacaktır. Ancak söz konusu sayıya yakın sayılar karar sürecinin bir parçası olarak algılanmayacaktır. Örneğin; bir araç motorunun sıcaklığının 135 °C' a ulaşması motor parçalarının zarar göreceği sürecini başlatan bir durumsa; sıcaklığın 130 °C' a ulaştığında da motor parçalarının zarar göreceği sürecinin başlaması için bir ön şart olarak kabul edilebilir. Diğer bir örnek; bir bölgede hava sıcaklığı derecesinin değişim aralığının yaklaşık -4 °C ile 26 °C olduğu söyleniyor. Bu, söz konusu bölgenin sıcaklık kümesi öğelerinin bulunabileceği aralığı belirtir. Böylece bu bölge için tüm sıcaklık uzayı belirlenmiştir. “Çok soğuk” ,

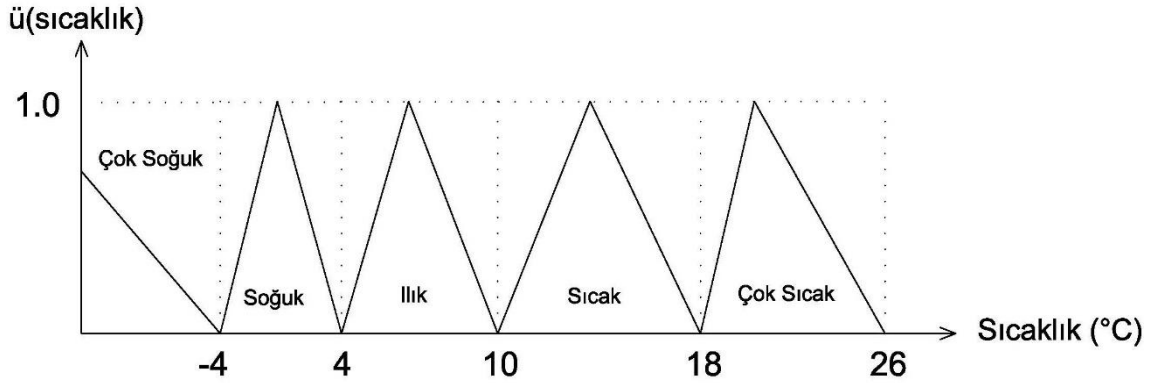
“soğuk”, “ılık”, “sıcak”, “çok sıcak” gibi her bir alt terim aralığının net bir çıktısı yoktur. Çok soğüğün $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ altı, soğüğün $-4\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında, ılığın $4\text{ }^{\circ}\text{C} - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında, sıcaklığın $10\text{ }^{\circ}\text{C} - 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında ve çok sıcaklığın $18\text{ }^{\circ}\text{C} - 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında olduğu söylenebilir (Şekil 3.3). Şekil 3.3’ e dikkat edilirse aralık tahminlerinde, her bir alt aralıktan biri biter bitmez diğeri başlamıştır. Bu durumda aynı amaç için hizmet eden sayıların komşuluğundan söz etmek olasıdır [17].



Şekil 3.3 Bitişik Dikdörtgen Gösterim

Şekil 3.3’ te üyelik fonksiyonlarının tümü dikdörtgen şeklindedir. Bunun anlamı herhangi bir ögenin ayrıca bir aitliği yoktur. Ögelerin her biri aynı derece o alt kümenin birer ögesidir. Şekil 3.3’ teki fonksiyona göre; $3.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ soğukken, $4.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ nin ılık olduğuna karar verilir. Bu şekildeki gösterimlerde sıcaklık değerlerinin üyelik fonksiyonu her alt aralıkta 1’ e eşit olurken, diğer alt aralıklarda 0’ a eşittir. Herhangi bir alt aralıktaki ögelerin o alt kümeyle aitlik derecelerine o elemanın üyelik derecesi denir [17].

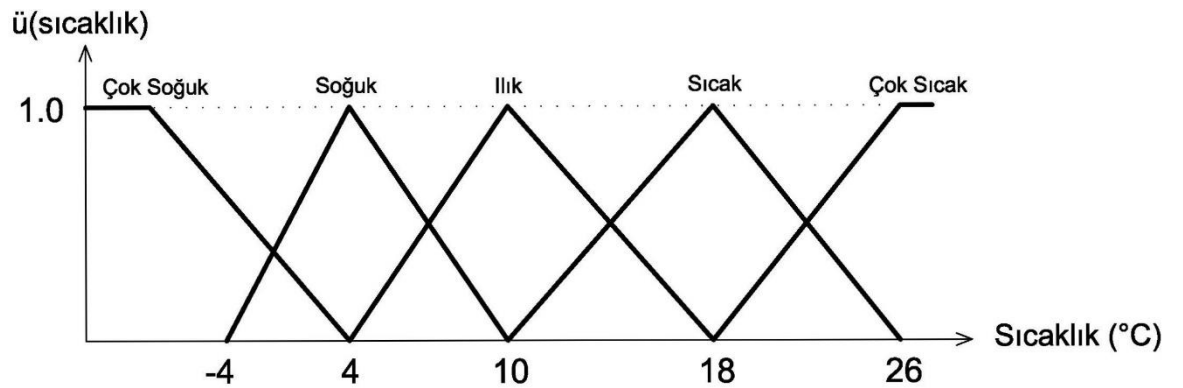
Şekil 3.4’ te ise Şekil 3.3’ teki fonksiyona göre alt kümedeki her ögenin ayrıcalıklı üyelik derecelerinin olduğunu gösterir üçgen biçimindeki üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. Fakat bu üçgenlerin de sıcaklık alt kümelerini tam olarak yansıtmadığı açıktır. Çünkü sınırlardaki sıcaklık değerlerinin üyelik dereceleri sıfırdır. Bu sınır değerleri kendinden önceki ve sonraki komşu sıcaklık alt kümeleri ile örtüşmez. Kısmen de olsa herhangi bir yakın değer alınamaz. Bu yüzden sınır değerler için tam anlamıyla belirsizlik ve karmaşıklık vardır [17].



Şekil 3.4 Bitişik Üçgen Gösterim

Burada da aynı durum söz konusudur. $3.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ soğukken, $4.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' nin ılık olduğuna karar verilir.

Biraz daha makul bir düşünceyle, birbirine komşu alt aralıkların geçişlerinin, birbirine sınır olması durumu değil de birbiriyle örtüşmesi sağlanırsa daha mantıklı ve geçerli çözüm sağlanmış olacaktır. Çünkü “sıcak” sınırlarının $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ üyelik derecelerinin sıfıra eşit olması savunulacak bir durum değildir. Günlük hayatta sınıra en yakın olan değerlerin hangi aralıkta olacağı oldukça bulanıktır. Böylece birbiriyle örtüşmeli geçişlere sahip alt aralıkların olmasının gerekliliği ile Şekil 3.5’ te verilen üyelik fonksiyonları ortaya çıkmaktadır [17].

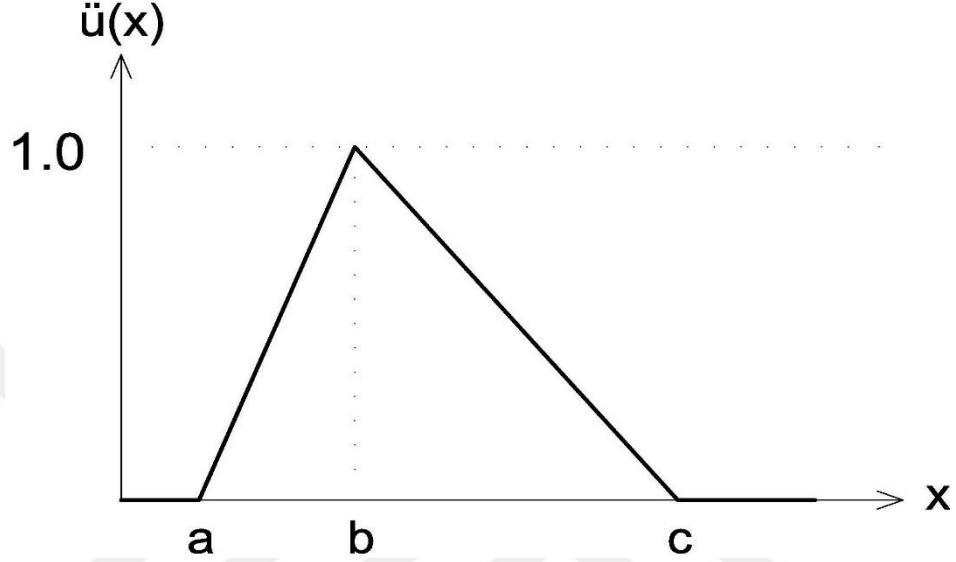


Şekil 3.5 Örtüşmeli Üçgen Gösterimi

Bulanık mantıkta genel olarak kullanılan üyelik fonksiyonları “üçgen” ve “yamuk” gösterimli üyelik fonksiyonlarıdır.

3.3.1. Üçgen Gösterimli Üyelik Fonksiyonu

En basit üyelik fonksiyonudur. Dayanak x ile gösterilirse, kedisini tanımlayan birer a , b ve c değerleri vardır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Üçgen Üyelik Fonksiyonu

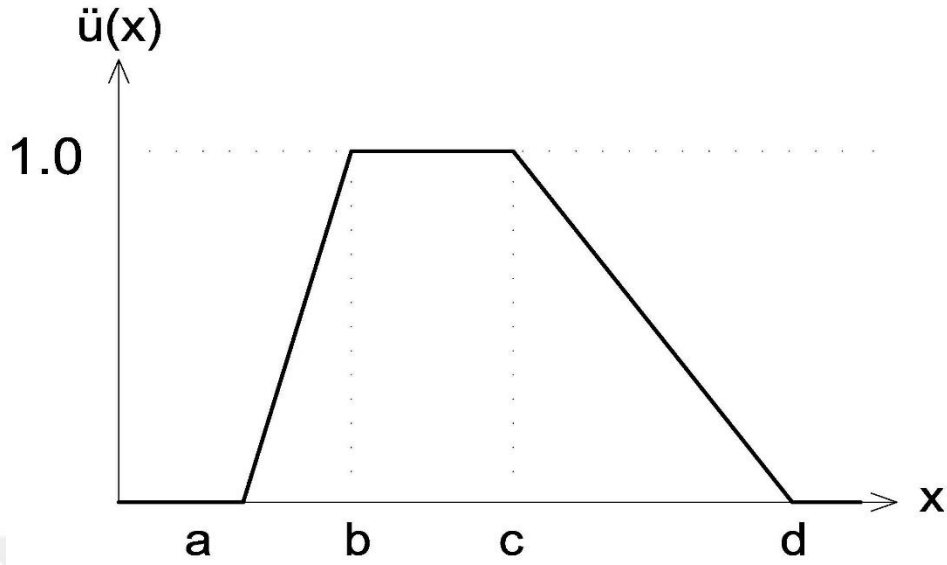
Üçgen gösterimli üyelik fonksiyonunun matematiksel formülü Denklem 3.1' deki gibidir.

$$\ddot{u}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada a ve c parametreleri dayanağın değişim aralığını, b ise bulanık kümenin öz kısmını (üyelik derecesi 1' e eşit durumu) göstermektedir [17].

3.3.2. Yamuk Gösterimli Üyelik Fonksiyonu

Yamuk gösterimli üyelik fonksiyonunun üçgene göre dayanak ve öz kısımları temsil eden dört adet değer vardır. Bunlar Şekil 3.7' de a , b , c ve d olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Yamuk gösterimli üyelik fonksiyonunun matematiksel formülü Denklem 3.2’ deki gibidir.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (3.2)$$

Burada a ve d öğeleri dayanağın geçiş yerlerini belirtmektedir [17].

3.4. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi

Bu yaklaşım türünde girdilerin ve çıktılarının tamamı bulanıktır. Çıktıların da bulanık olması ile yapılan modeldeki kalıcı belirsizliklere yer verilmiş olur. Mamdani (1974) bulanık girdi kümelerinin bir kural tabanı ile yine bulanık olan çıktı kümelerine akılcı bir yaklaşımla bağlanmasını sağlamıştır [17]. Bu yaklaşımın sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi için; “bulanıklaştırma”, “çıkarım”, “birleştirme” ve “durulaştırma” adımlarının yapılması gereklidir.

3.4.1. Bulanıklaştırma

Girdilerin bulanık kümelerle temsil edilmesi durumudur. Daha sonra kural tabanında bu kümeler kullanılır [17].

3.4.2. Çıkarım

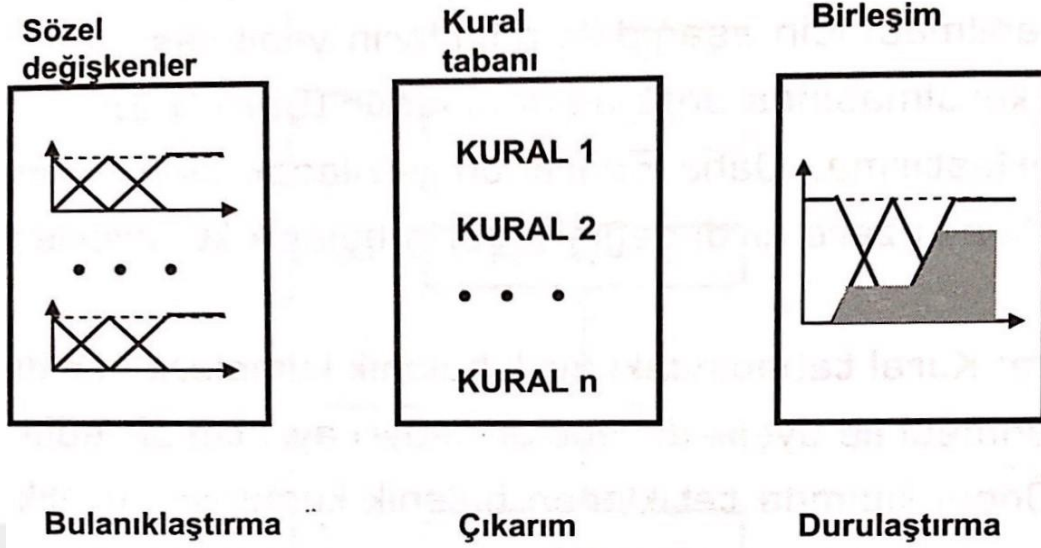
Oluşturulan bulanık kümelerinin mevcut veriler ile kullanılarak üyelik derecelerinin belirlenmesi şarttır. Üyelik derecelerinin “VE” lenmesi ile üyelik derecelerinin en küçüğü veya tüm üyelik derecelerinin çarpımı alınır. Böylece öncül kısımda farklı iki çıkarım söz konusu olur. Öncül kısımdaki üyelik derecesinin ardıl kısma direkt geçtiği kabul edilerek, ardıl kısımda mevcut çıktı bulanık kümesinin altında kalan kısım o kural için bulanık çıktı olarak alınır [17].

3.4.3. Birleştirme

Kısmi çıkarımlar birleştirilerek tüm kurallar için ortak bir çıkarımın yapılması için kurallar arasında “VEYA” lama işlemi düşünüldüğünde tetiklenen her kural için yapılan çıkarımların enbüyüklenmesi ile bütünleşik bir bulanık küme elde edilir. Üyelik derecesi 1 olan eleman olmaz. “VEYA” lama işlemi aslında kesik olan bulanık çıktıların çıktı değişkeni eksenini üzerindeki silüetidir [17].

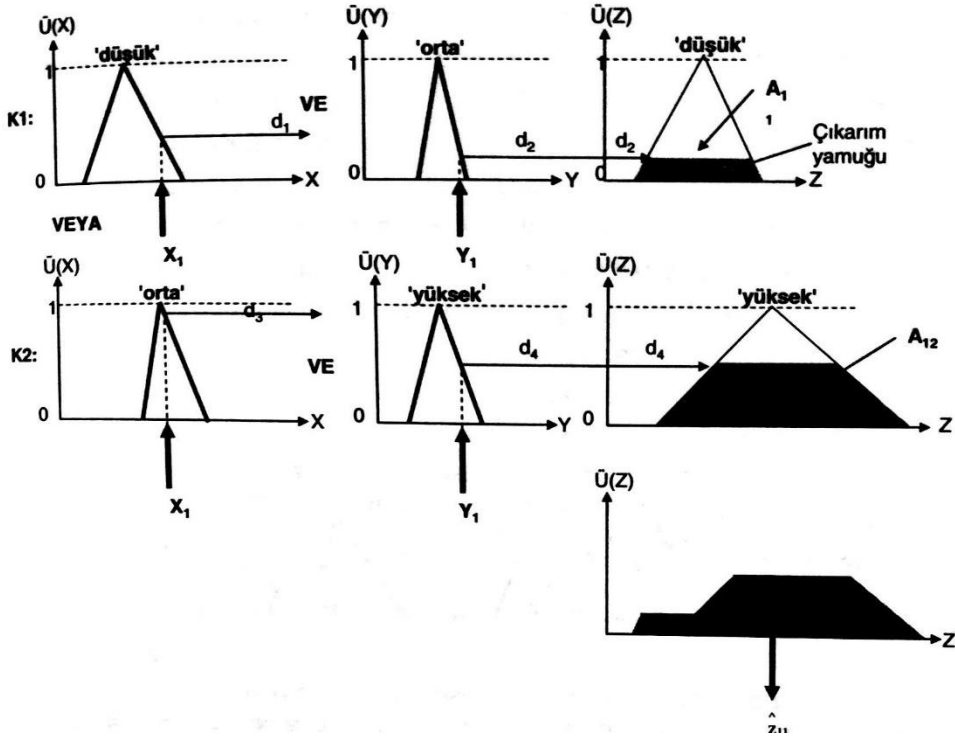
3.4.4. Durulaştırma

En sonunda elde edilen sistem çıktısı olan bulanık silüetin tek bir sayıya indirgenmesine durulaştırma denir [17]. Şekil 3.8’ de belirtilmiştir.



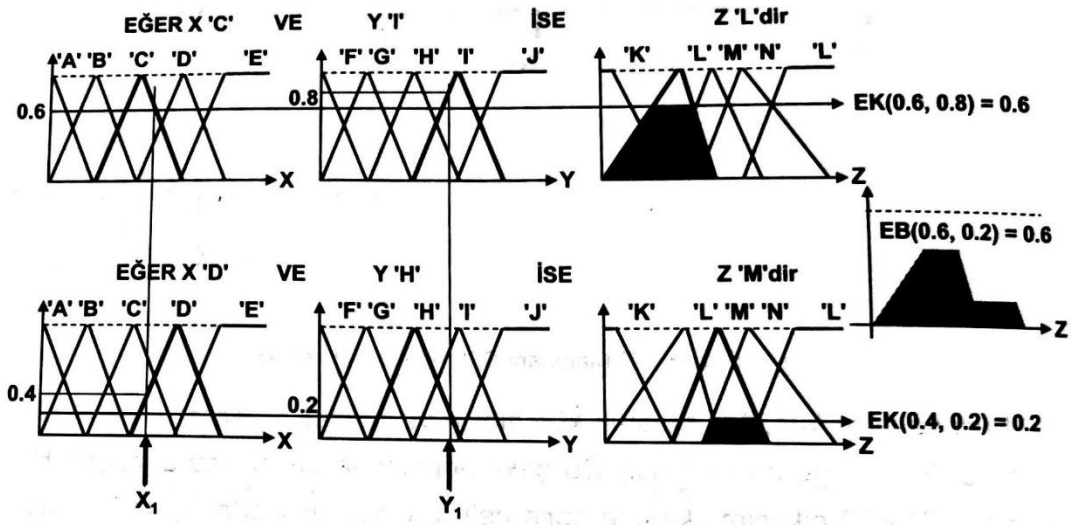
Şekil 3.8 Genel Mamdani BÇS Yapısı

Girdi verileri X ve Y, çıkış verisi Z olan bir sistemde girdi verilerini Z ile nasıl ilişkilendirildiği Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Burada durulaştırma işlemi tek bir sayıya indirgenmiştir. Yani enküçükleme yapılmıştır [17].



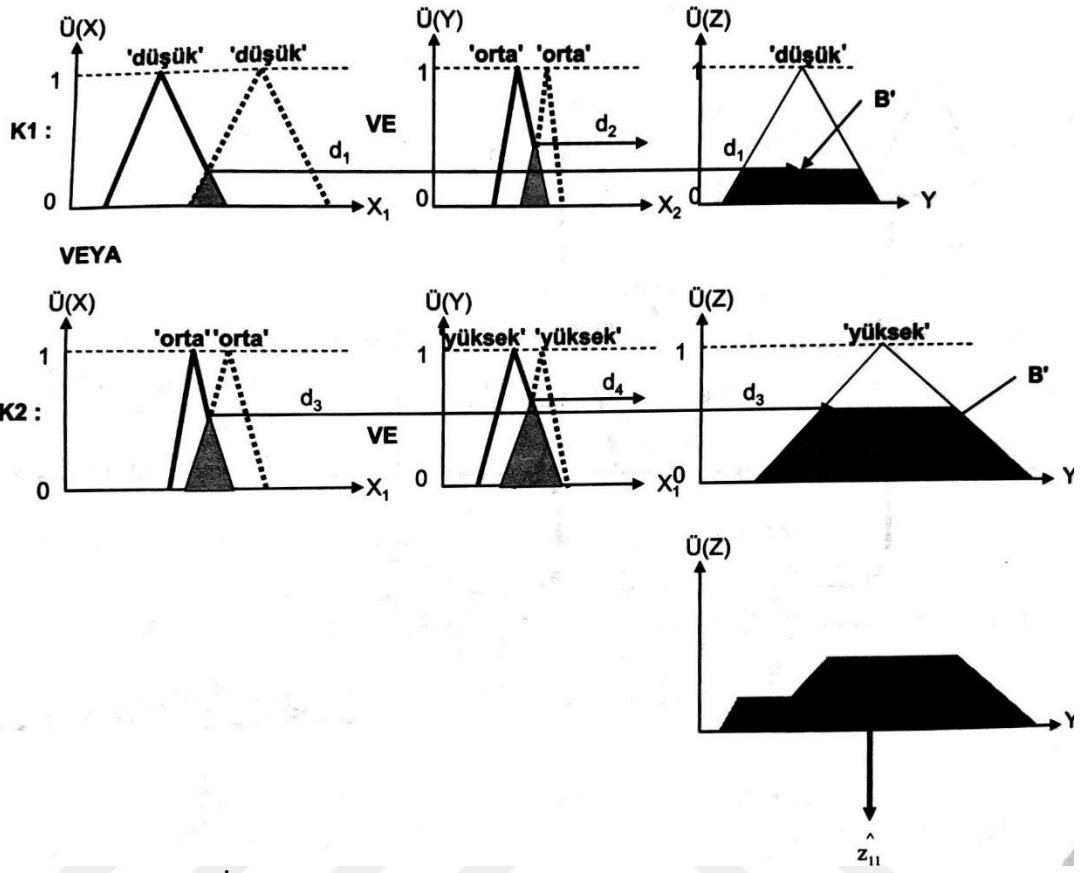
Şekil 3.9 E.K. Mamdani BÇS ve Sayısal Veriler

Şekil 3.9’ da “VE” leme ile birbirine bağlanan bulanık kümelerde ilk kuraldaki d_1 ve d_2 ile diğer kuraldaki d_3 ve d_4 kendi aralarında enküçükleme yapılarak bir bulanık çıkarım elde edilmiştir. Bu iki kuralın çıkarımı sonunda, her iki durum için altta kalan yamuk kısım bu bulanık sistemin çıktısıdır. Üst taraftaki üçgen kısım ihmal edilir. Benzer işlemler, d_4 üyelik derecesi ile diğer kurala da uygulanırsa buradan da yüksek bulanık çıktı kümesinin kesilmesiyle farklı çıkarımlar elde edilir ve böylece her iki kural için ayrı iki çıkarım elde edilmiş olur. Sayısal verili bir çıkarım örneği Şekil 3.10’ da gösterilmiştir [17].



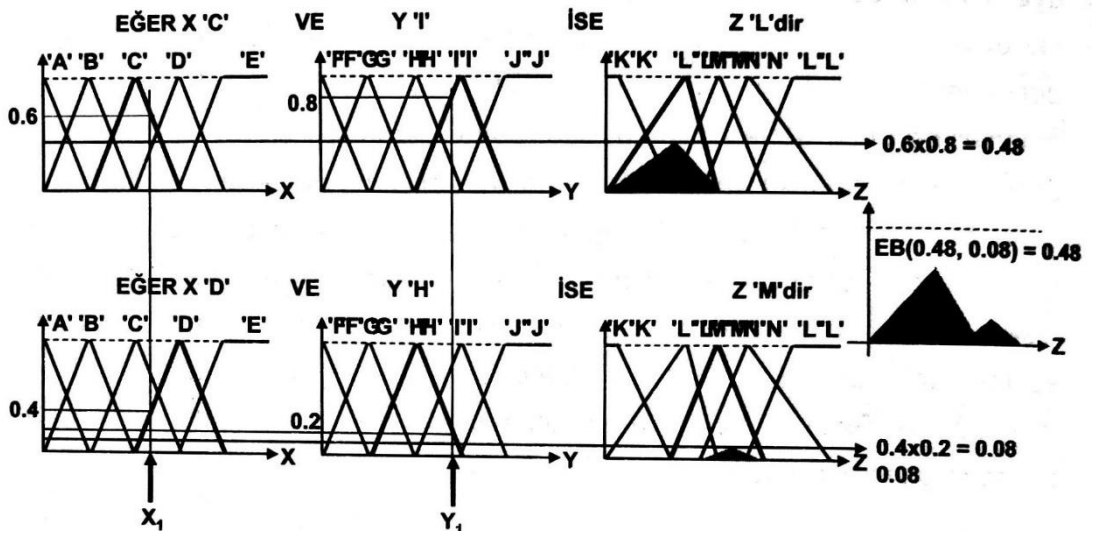
Şekil 3.10 E.K. ile Yapılan Sayısal Mamdani BÇS Örneği

Bir başka çıkarım üyelik derecelerinin çarpımları ile yapılır. Şekil 3.11’ de; d_1d_2 ve d_3d_4 çarpımları sonucunda elde edilen yeni üyelik dereceleri ardıl kısımlara taşınır. Sistem 0 – 1 arasında olduğu için üyelik derecelerinin çarpımı, çarpımı alınan üyelik derecelerinden daha küçük olmasına sebep olur. Çarpımın üyelik derecesi sıfıra yakın olduğundan çıkarımın bir anlamı olmayabilir. Öncül kısımlarında fazlaca bulanık küme bulunduran sistemlerde bu yöntemin kullanılmamasına dikkat edilmelidir [17].



Şekil 3.11 Çarpım İşlemlili Bulanık Girdili Mamdani BÇS

Kullanılan veriler her zaman kesin sayılar olmayabilir. Girdi verilerinin bulanık sayılar şeklinde olduğu çarpımlı bir örnek Şekil 3.12' de gösterilmiştir [17].



Şekil 3.12 Çarpım İşlemlili Bulanık Girdili Mamdani BÇS Örneği

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Bitümlü Bağlayıcı

Bu çalışmada Kayseri Karayolları Bölge Müdürlüğü' nün Kırşehir – Nevşehir, Nevşehir – Kayseri, Kırşehir – Kayseri illeri arası yol üst yapısı yapım işi için Kırıkkale Rafinerisinden temin ettiği 50 – 70 penetrasyonlu bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Bitümlü bağlayıcının özellikleri Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Bitümlü Bağlayıcının Özellikleri

Bitümlü Bağlayıcının Özellikleri		Deney Standardı
Özgül Ağırlığı	1.030	TS 1087
Penetrasyonu	57	TS EN 1426
Yumuşama Noktası	49	TS EN 1427

4.1.2. Filler

Çalışmada 0.075 mm' lik elekten geçen agrega malzemesi olan filler kullanılmıştır. Filler olarak kullanılan malzemeler Kalker, Bazalt, Portland Çimentosu ve Sönmüş Kireç' tir.

Her biri 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 filler/bitümlü bağlayıcı oranlarında bitümlere ilave edilerek mastik numuneleri elde edilmiştir.

4.2. Yapılan Çalışmalar

4.2.1. Bitümlü Bağlayıcının Hazırlanması

Bitüm, hazırlanacak filler/bitümlü bağlayıcı numuneleri kadar alınmış, etüvde 150°C' de 2 saat kadar bekletilerek eritilmiştir. Daha sonra temiz teneke kaplara 100' er gram olarak paylaşılmasıyla 21 adet 100 gram bitüm içeren numuneler elde edilmiştir. (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).



Şekil 4.1 100' er Gram Ayrılmış Bitümler

4.2.2. Filler - Bitümlü Bağlayıcı Karışımlarının Hazırlanması

Çalışmada, ağırlıkça filler/bitümlü bağlayıcı oranı 0.0 yani saf bitüm, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 ve 1.5 oranlarında olan numuneler hazırlanmıştır. Şekil 4.2' de görüldüğü gibi hassas tartı ile Kalker, Bazalt, Portland Çimentosu ve Sönmüş Kireç, belirtilen gramajlarda tartılarak etüvde 150 °C' de 2 saat bekletilmiş 100' er gram bitümlere eklenilmiş ve karıştırma işlemine geçilmiştir. Karıştırma işlemi, 1000 devir/dk hızla 30 dk süreyle ısıyı koruyacak ocak üzerinde her numune için gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Fillerin Hazırlanması



Şekil 4.3 Karıştırma İşlemi

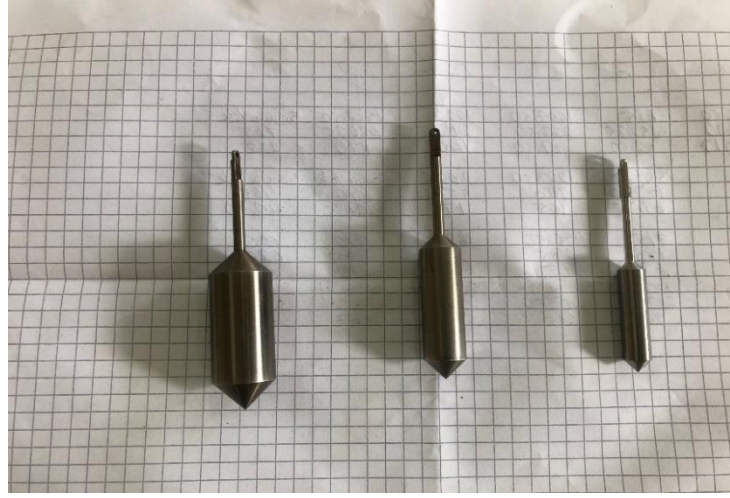
4.2.3. Viskozite Deneyi

Filler/bitüm oranları 0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 ve 1.5 olan numuneler hazırlandıktan sonra numunelerin viskozite ölçümüne geçilmiştir. Viskozite ölçümü için “Brokfield Dönel Viskozimetresi” ile (Şekil 4.4) Dönel Viskozimetre deneyi her numune için yapılmıştır. Deneylerde viskozimetrenin üç farklı “spindle” ı kullanılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.4 Brokfield Dönel Viskozimetresi ve Isı Sistemi

Deneyde bağlayıcı içerisinde duran milin (spindle) (Şekil 4.5) dönmeye karşı gösterdiği direnç ile viskozite ölçümü yapılmaktadır. Viskozitesinin yüksek olması sebebiyle yoğun akışkanlık seviyesine sahip numunelerin ölçümünde değer alınamadığı durumlarda mevcut mil (spindle) küçültülmüş ve numune yenilerek ölçüme devam edilmiştir. Numuneler kaplardan, Şekil 4.6’ daki tüplere, ölçümün yapıldığı mil için gereken gramajlarda konulmuştur. Kullanılan mil (spindle) konulması gereken numune ağırlıkları Tablo 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Brookfield Dönel Viskozimetresi ve Spindle (Mil)

Tablo 4.2 Spindle Numune Hacimleri Tablosu

SPINDLE (MİL)	NUMUNE HACMİ
SC4-29	10.0 mL
SC4-27	10.5 mL
SC4-21	8.0 mL



Şekil 4.6 Metal Tüpler

Karışım tüplere doldurulmuş, numune bölmesi sıcaklığı sabit değere ulaşmış sıcaklık kontrollü kaba yerleştirilmiştir. Numune 15 dakika sabit sıcaklıkta bekletildikten sonra her oran için; 135 °C, 165 °C ve 195°C’ de mil 100 RPM hızda döndürülerek deney yapılmıştır. Yaklaşık olarak eşit viskozite değerlerine erişildikten itibaren her numune için üç adet okuma yapılmış ve bu üç değerın ortalamasından numunenin viskozitesi elde edilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI

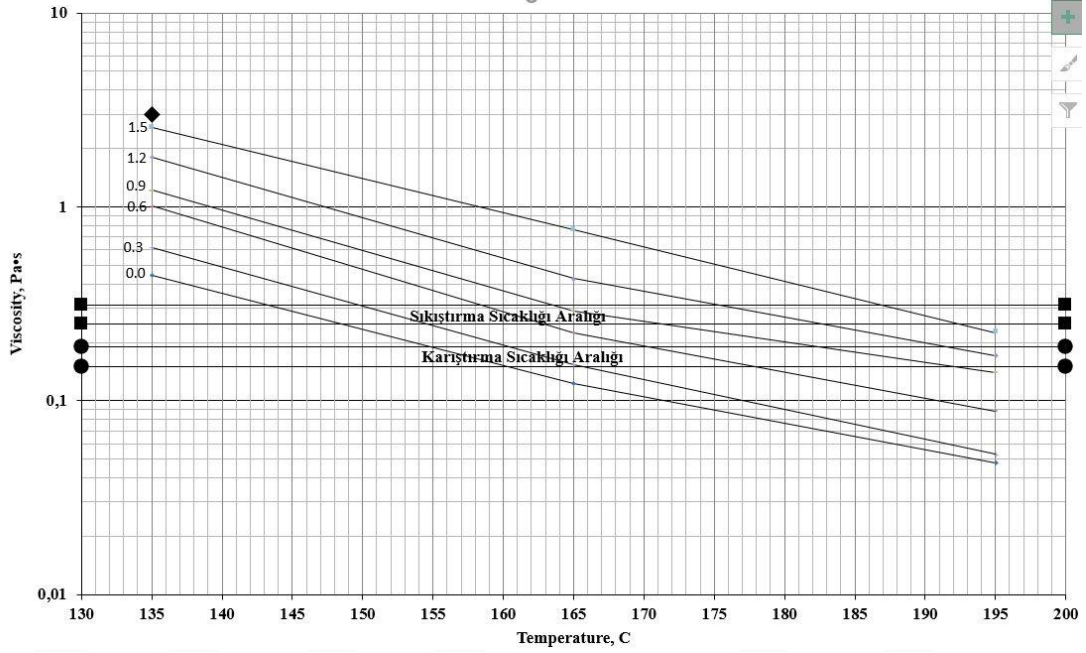
Elde edilen farklı oran ve sıcaklıklardaki viskozite değerleri Tablo 5.1’ de gösterilmiştir. Tabloda 5.1’ de görüldüğü gibi Sönmüş Kireç ile 1.2 oranında yapılan karışımın 135 °C’ de, 1.5 oranında yapılan karışımın 135 °C ve 165 °C’ lerde ölçümü yapılamamıştır. Bunun en temel nedeni karışımın çok kıvamlı olmasıdır. Bu da karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının yüksek olmasına sebep olur ki üretim maliyeti de aynı oranda fazla olur.

Bunların yanında sönmüş kirecin, deneysel çalışma sırasında kullanılan diğer filler malzemelerine göre yoğunlukça fazla olduğu görülmüştür. Bu durum fillerin bitümlü bağlayıcı içinde askıda kalmasını zorlaştırmakta viskozite deneyi sırasında numunede bekleyen karışımda çökelti oluşmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Deneysel çalışmada 0.9 oran üstünde hazırlanacak sönmüş kireç fillerli karışımların viskozitesinin ölçümünde sağlıklı sonuçların alınamayacağı açıkça görülmüştür. Bu nedenle de bulanık çıkarım sistemi ile yapılan modelin kurulumunda, sönmüş kirecin 1.2 ve 1.5 oranlarında alınan viskozite değerleri, model yapısının güvenilirliğinde şüpheli bir durum oluşturmaması için kullanılmamıştır.

Tablo 5.1 Ölçülen Viskozite Değerleri

Viskozite (Pa.s)	Filler Oranı	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
	Sıcaklık						
Kalker	135	0.446	0.615	1.007	1.220	1.803	2.580
	165	0.122	0.154	0.223	0.291	0.426	0.765
	195	0.048	0.053	0.088	0.140	0.170	0.225
Bazalt	135	0.446	0.801	1.228	2.065	2.870	4.500
	165	0.122	0.188	0.300	0.518	0.690	1.160
	195	0.048	0.064	0.105	0.170	0.221	0.413
Portland Çimentosu	135	0.446	0.715	1.181	1.275	1.610	1.980
	165	0.122	0.185	0.275	0.310	0.375	0.630
	195	0.048	0.068	0.095	0.098	0.130	0.155
Sönmüş Kireç	135	0.446	1.038	3.130	7.900	-	-
	165	0.122	0.258	0.658	1.620	6.000	-
	195	0.048	0.090	0.215	0.513	1.567	5.670

Karıştırma – sıkıştırma sıcaklığı için optimum viskozite değerleri sırasıyla 0.17 ± 0.02 Pa.s ve 0.28 ± 0.03 Pa.s' dir. Kalker filleri/ bitümlü bağlayıcı karışımının viskozite eğrisi ve karıştırma – sıkıştırma sıcaklık bant aralığı Şekil 5.1' de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Kalker Filleri/Bitümlü Bağlayıcı Viskozite Eğrisi

Şekil 5.1' ye göre 0.3 orana sahip kalker filleri/bitümlü bağlayıcı karışımının karıştırma sıcaklığının $160\text{ }^{\circ}\text{C} - 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında olduğu, sıkıştırma sıcaklığının ise $150\text{ }^{\circ}\text{C} - 155\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında olduğu görülmektedir.

Filler/Bitümlü bağlayıcı karışımlarının viskozite ile belirlenen karıştırma – sıkıştırma sıcaklıklarının tümü Tablo 5.2' de gösterilmiştir.

Tablo 5.2' de görüldüğü üzere filler/bitümlü bağlayıcı oranının artmasıyla karıştırma – sıkıştırma sıcaklıkları da artmaktadır. Yine Şekil 5.1' de görüldüğü üzere de viskozitenin karışım oranlarıyla doğru orantılı arttığı ve karıştırma – sıkıştırma sıcaklıkları aralığının da bu oranda arttığı gözlemlenmektedir.

Tablo 5.2 Karıştırma – Sıkıştırma Sıcaklıkları

T (°C)	Filler/Bitümlü Bağlayıcı Oranı					
	0.0		0.3		0.6	
	Sıkıştırma	Karıştırma	Sıkıştırma	Karıştırma	Sıkıştırma	Karıştırma
Kalker	146	157.50	152.35	163.15	161.05	174.60
Bazalt	146	157.50	156.75	167.90	167.00	181.30
Portland Çimentosu	146	157.50	155.90	167.75	165.15	178.65
Sönmüş Kireç	146	157.50	163.50	177.00	188.00	201.00
T (°C)	Filler/Bitümlü Bağlayıcı Oranı					
	0.9		1.2		1.5	
	Sıkıştırma	Karıştırma	Sıkıştırma	Karıştırma	Sıkıştırma	Karıştırma
Kalker	167.45	187.35	182.25	193.75	189.75	201.65
Bazalt	181.60	195.20	188.75	201.70	206.30	220.80
Portland Çimentosu	167.80	180.90	173.40	187.50	182.40	193.00
Sönmüş Kireç	210.50	223.00	233.25	244.00	-	-

AASHTO-M323 Superpave Volumetric Mix Design standardına göre, önerilen filler/bitümlü bağlayıcı oranı 0.6 – 1.2 arasındadır [19]. Kalker ülkemizde yaygın olarak bulunduğu ve yeterli kalitede kaplama sağlanabildiğinden, Türkiye’ de asfalt kaplamalarda en çok kullanılan filler malzemesi kalkerdir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak; AASHTO-M323 standardına göre, filler/bitümlü bağlayıcı oranı 0,9 olan kalker – bağlayıcı karışımını optimum kriter olarak belirlediğimizde, deneysel çalışmada kullanılan diğer filler malzemeleri için optimum oranların olması gereken değerleri Tablo 5.3’ te gösterilmiştir.

Tablo 5.3 Kalker Fillerine Eşdeğer Oranlar

Optimum Kriter					
Kalker Filleri/Bitümlü Bağlayıcı Oranı			0,9		
Eşdeğer Kriter					
Bazalt Filleri/Bit. Bağ.		P. Çimentosu/Bit. Bağ.		Sönmüş Kireç/Bit. Bağ.	
Sıkıştırma İçin	Karıştırma İçin	Sıkıştırma İçin	Karıştırma İçin	Sıkıştırma İçin	Karıştırma İçin
0,57	0,76	0,81	1,17	0,32	0,42

Tabloya 5.3' te görüldüğü üzere karışımın belirlenen optimum sıkıştırma sıcaklığı kriterine denk olması için; filler olarak “bazalt” kullanıldığında filler/bitümlü bağlayıcı oranı **0.57**, Portland Çimentosu kullanıldığında filler/bitümlü bağlayıcı oranı **0.81** ve Sönmüş Kireç kullanıldığında filler/bitümlü bağlayıcı oranı **0.32** olması gerekmektedir. Belirlenen optimum karıştırma sıcaklığı kriterine denk olması için ise; filler olarak “bazalt” kullanıldığında filler/bitümlü bağlayıcı oranı **0.76**, Portland Çimentosu kullanıldığında filler/bitümlü bağlayıcı oranı **1.17** ve Sönmüş Kireç kullanıldığında filler/bitümlü bağlayıcı oranı **0.42** olması gerekmektedir. Bu oranlar; sıkıştırma sıcaklığı – filler/bitümlü bağlayıcı oranı ve karıştırma sıcaklığı – filler bitümlü bağlayıcı oranı arasındaki ilişkiyle belirlenmiştir. Kısaca bahsedilecek olursa; kalker filleri/bitümlü bağlayıcı oranı 0.9 olduğunda tespit edilen sıkıştırma sıcaklığı Şekil 5.1' den 167.45 °C, karıştırma sıcaklığı 187.35 °C' dir. Diğer filler malzemelerinin kullanıldığı karışımlarda, bu sıcaklığa eşdeğer filler/bitümlü bağlayıcı oranının bulunması ile sonuca varılır [2].

5.1. ASTM-D2493' e Göre Viskozite Tahmini ve Bulanık Sistem Kurulması

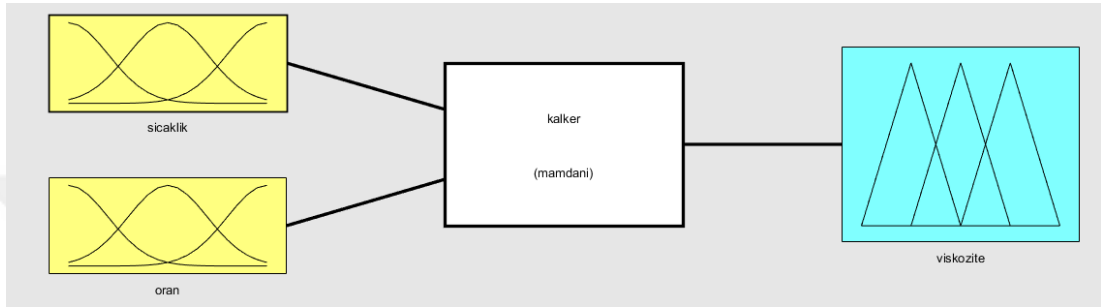
ASTM (American Society for Testing and Materials)-D2493 standardına göre, asfalt mastiğinde, filler/bitümlü bağlayıcı oranı ile viskozite arasındaki ilişki Denklem 5.1' deki gibi tanımlanmıştır [20].

$$y = \log[\log(V \times 1000)] = Ax + B = A \log\left(\frac{9}{5}T + 32 + 459.7\right) + B \quad (5.1)$$

Denklem 5.1' de V; Deneysel Viskozite (Pa.s), T; Sıcaklık (°C), A; y lineer fonksiyonunun eğimi ve B; y lineer fonksiyonunun sabit sayısı olmak üzere, ölçülen viskozite değeri ve o viskozite değerinin ölçüldüğü sıcaklık denkleme yazılarak bir “y” fonksiyonu eşitliği bulunur. Bulunan eşitlikte “A ve B” katsayıları belirlenir ve bir “y=Ax+B” fonksiyonu elde edilir. Elde edilen fonksiyonda sıcaklık değeri denklemde yerine koyularak viskozite değerine ulaşılır [20].

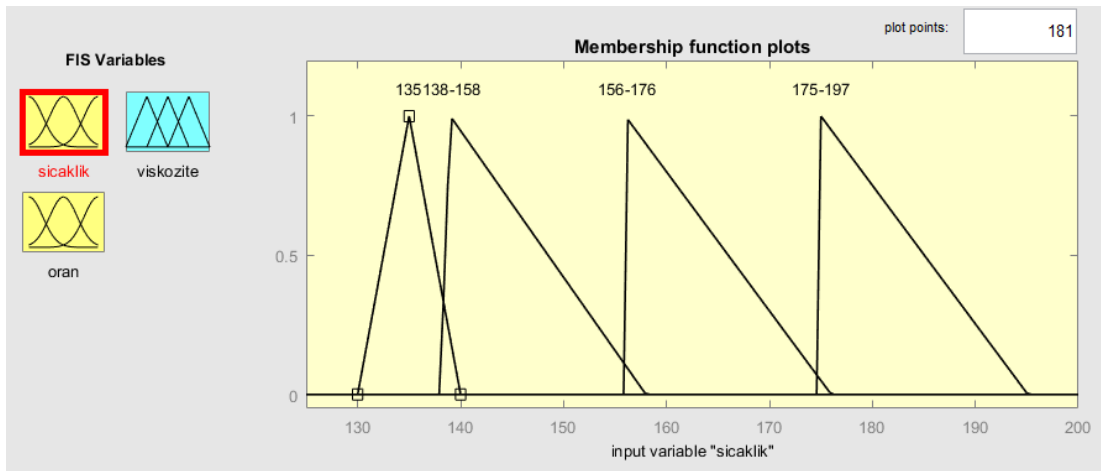
Ulaşılan yeni viskozite değerleri ile ölçülen viskozite değerleri karşılaştırılarak fonksiyonun hata kriterlerine (Bölüm 5.1.1' de açıklandığı gibi) göre sistemin güvenilirliği irdelenmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlar kullanılarak soft hesaplama yöntemi olan bulanık mantık modeli kurulmuştur.

Modelin girdileri (bağımsız değişkenleri) her filler/bitümlü bağlayıcı oranı için “Sıcaklık” ve “Oran” olmak üzere iki adettir. Çıkış verisi ise viskozite değeridir. Çalışma yapılırken viskozite değerlerinin sıcaklık ile ters orantılı, filler/bitümlü bağlayıcı oranı ile doğru orantılı olması göz önünde bulundurularak model oluşturulmuştur. Çalışmada üçgen gösterimli üyelik fonksiyonları kullanılarak modelleme yapılmıştır (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4).

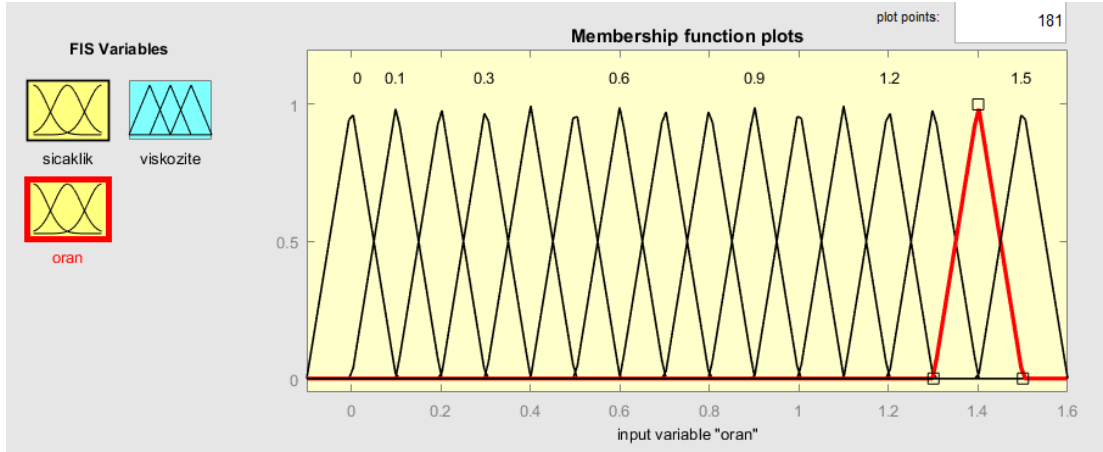


Şekil 5.2 Kurulan Bulanık Sistemin Genel Hali

Sistemin genel durumu Şekil 5.2’ de de görüldüğü gibi; sıcaklık ve oran girdileri, viskozite çıkış verisidir. Sistem girdilerinin bulanıklaştırılması Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Sıcaklık Giriş Verilerinin Bulanıklaştırılması



Şekil 5.4 Oran Giriş Verilerinin Bulanıklaştırılması

Bulanık Mantık modeli kurulduktan sonra; ASTM-D2493 Denklem 5.1' e göre elde edilen değerler ile bulanık model sonuçları karşılaştırılmış ve irdelenmiştir.

5.1.1. Hata Kriterleri, Bulanık Model ve ASTM-D2493 Sonuçlarının İrdelenmesi

Determinasyon Katsayısı (R^2), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) ve Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Squared Error, RMSE) istatistikleri değerlendirme kriterleri olarak kullanılmıştır.

A_j Deneysel sonuçlar, P_j model sonuçları, n data seti sayısı, $A_j - P_j = e_j$ ve A_{jort} deneysel sonuçların aritmetik ortalaması olmak üzere;

R^2 (Determinasyon Katsayısı), deneysel verilerin doğrusal bir eğriye ne kadar iyi uyduğunun en iyi ölçütüdür. Bu değer "1" olması gerçek ve model arasında kusursuz bir doğrusal eğri sağlandığının kanıtıdır. Yani hatanın "sıfır" olması demektir. Ne kadar çok veri noktası varsa, R^2 ' nin güvenilirliği o kadar yüksek olup formülü Denklem 5.2' deki gibidir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(A_j - P_j)^2}{\sum(A_j - A_{jort})^2} \quad (5.2)$$

Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE), iki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsüdür. MAE, her gerçek değer ile veriyi en iyi uyan çizgi arasındaki

ortalama dikey mesafedir. Değeri sıfırdan sonsuza kadar değişebilir. Sıfıra en yakın hata değerine sahip sistemler daha iyi performans gösterir ve formülü Denklem 5.3' teki gibidir;

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |e_j| \quad (5.3)$$

Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Squared Error, RMSE), bir makine öğrenmesi modelinin, tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki uzaklığın bulunmasında sıklıkla kullanılan, hatanın büyüklüğünü ölçen kuadratik bir metriktir. Değeri sıfırdan sonsuza kadar değişebilir. Hata değeri sıfıra ne kadar yakın olursa modelin performansı o kadar iyi denilebilir ve formülü Denklem 5.4' teki gibidir;

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2} \quad (5.4)$$

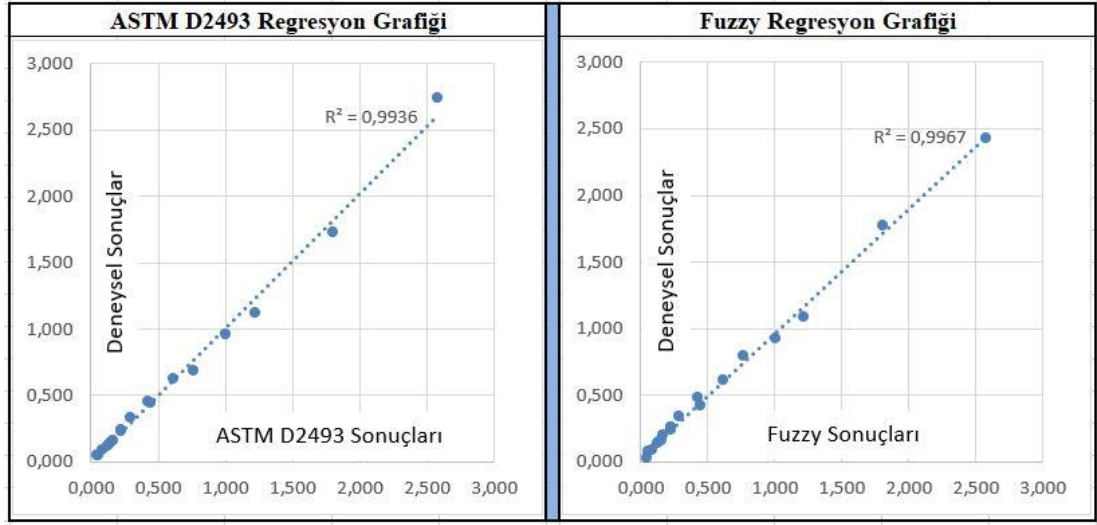
ASTM-D2493 sonuçları, Bulanık Mantık modeli tahminleri ile deney sonuçları her filler/bitümlü bağlayıcı karışımları için karşılaştırılmış, hata verileri ve regresyon grafikleri aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 5.4 Kalker-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deney, ASTM-D2493 ve Model Sonuçları

Kalker			
Oran	DeneySEL Sonuçlar	ASTM-D2493 Sonuçlar	Bulanık Sonuçlar
0	0.446	0.442	0.418
	0.122	0.123	0.143
	0.048	0.048	0.030
0.3	0.615	0.625	0.612
	0.154	0.152	0.160
	0.053	0.054	0.075
0.6	1.008	0.961	0.929
	0.223	0.241	0.258
	0.088	0.085	0.090
0.9	1.220	1.119	1.090
	0.291	0.335	0.344
	0.140	0.131	0.150
1.2	1.803	1.725	1.770
	0.426	0.458	0.484
	0.170	0.165	0.195
1.5	2.580	2.745	2.430
	0.765	0.688	0.798
	0.225	0.236	0.240

Tablo 5.5 Kalker-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Hataları

Kalker					
ASTM-D2493			Bulanık Mantık		
R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
0.994	0.055	0.034	0.997	0.057	0.04



Şekil 5.5 Kalker-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Regresyon Grafiği

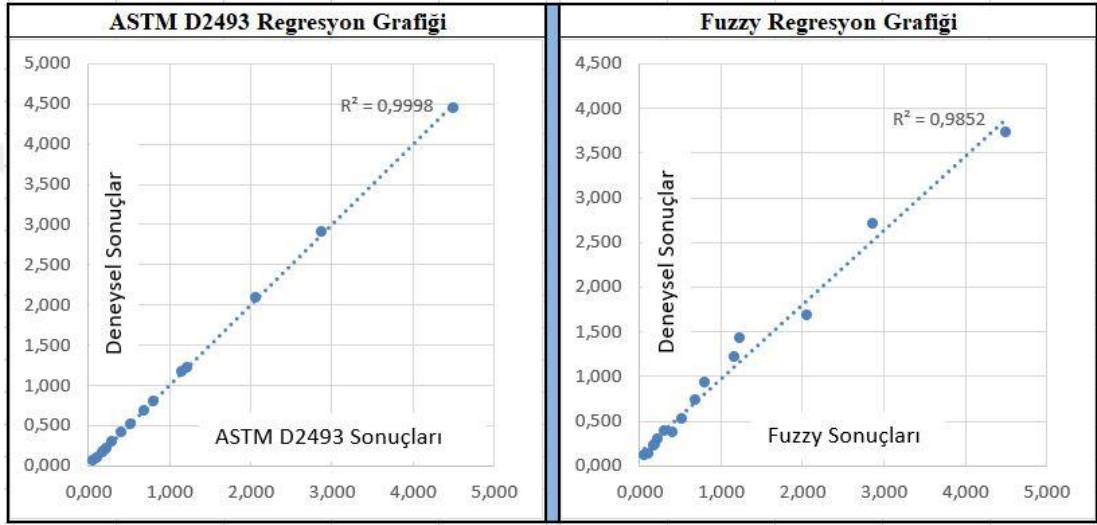
Viskozite sonuçları ve hata değerleri incelendiğinde ASTM-D2493 ve Bulanık mantık modelinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 5.6 Bazalt-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deneysel, ASTM-D2493 ve Model Sonuçları

Bazalt			
Oran	Deneysel Sonuçlar	ASTM-D2493 Sonuçlar	Bulanık Sonuçlar
0.3	0.801	0.805	0.938
	0.188	0.188	0.245
	0.064	0.064	0.115
0.6	1.228	1.225	1.430
	0.300	0.302	0.396
	0.105	0.105	0.138
0.9	2.065	2.092	1.680
	0.518	0.508	0.528
	0.170	0.172	0.230
1.2	2.870	2.902	2.710
	0.690	0.680	0.742
	0.221	0.223	0.299
1.5	4.500	4.452	3.730
	1.160	1.174	1.220
	0.413	0.410	0.368

Tablo 5.7 Bazalt-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Hataları

Bazalt					
ASTM-D2493			Bulanık Mantık		
R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE
1	0.017	0.011	0.985	0.24	0.146



Şekil 5.6 Bazalt-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Regresyon Grafiği

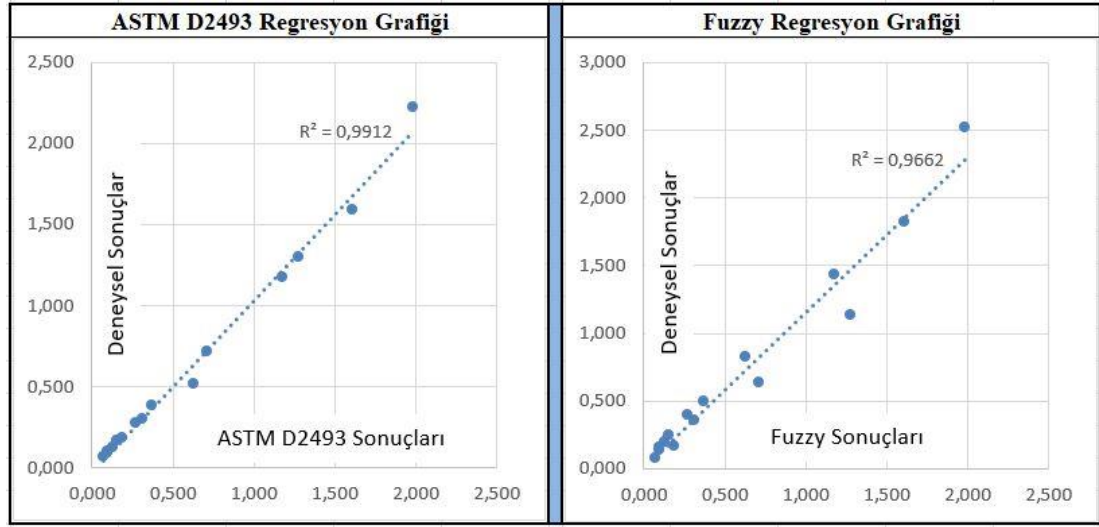
Viskozite sonuçları ve hata değerleri incelendiğinde ASTM-D2493 ve Bulanık mantık modelinin kalker sonuçlarına göre daha az yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. ASTM-D2493 sonuçlarına ait hata değerleri Bulanık mantık sonuçlarına ait hata değerlerine göre sifira daha yakın olduğu için, ASTM-D2493 modelinin daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Tablo 5.8 Portland Çimentosu-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deney, ASTM-D2493 ve Model Sonuçları

Portland Çimentosu			
Oran	Deneysel Sonuçlar	ASTM D2493 Sonuçlar	Bulanık Sonuçlar
0.3	0.715	0.713	0.632
	0.185	0.186	0.165
	0.068	0.068	0.078
0.6	1.181	1.172	1.430
	0.275	0.278	0.396
	0.095	0.094	0.138
0.9	1.275	1.303	1.130
	0.310	0.299	0.355
	0.098	0.099	0.155
1.2	1.610	1.595	1.820
	0.375	0.382	0.500
	0.130	0.129	0.201
1.5	1.980	2.224	2.520
	0.630	0.514	0.825
	0.155	0.168	0.248

Tablo 5.9 Portland Çimentosu-Bitümlü Bağlayıcı Karışımının ASTM-D2493 ve Model Hataları

Portland Çimentosu					
ASTM-D2493			Bulanık Mantık		
R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
0.991	0.071	0.03	0.966	0.185	0.134



Şekil 5.7 Portland Çimentosu/Bitümlü Bağlayıcı Karışımının Deney ve Model Sonuçları Regresyon Grafiği

Viskozite sonuçları ve hata değerleri incelendiğinde ASTM ve Bulanık mantık modelinin kalker sonuçlarına göre daha az yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. ASTM sonuçlarına ait hata değerleri Bulanık mantık sonuçlarına ait hata değerlerine göre sıfıra daha yakın olduğu için, ASTM sisteminin daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

Sönmüş Kireç/Bitümlü Bağlayıcı karışımının 1.2 oranı için 135 °C’ de ve 1.5 oranlı numunesi için hiçbir sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneyinden sonuç alınamamıştır. Sönmüş kirecin birim hacim ağırlığının fazla olması, bitümlü bağlayıcının içinde malzemenin askıda kalmasını zorlaştırmaktadır. Askıdaki malzemenin hızlıca çökelti oluşturduğu gözlemlenmesine rağmen, numunenin kıvamlı olmasından dolayı sonuca varılamadığından sönmüş kireç için 0.9 oranından daha fazla oranlar için sağlıklı sonuçlar alınamayabilir. Hem çökelti nedeniyle karışımın homojenliğine güvenmek zor olacağından, hem de eldeki verilerin sayısı az olduğundan (ölçülemeyen viskozite değerlerinden dolayı), ölçülebilen viskozite değerleri ile oluşturulacak herhangi bir modelin güvenilirliği tartışılır durumda olacaktır. Bu nedenle de model kurulmamıştır.

Değerlendirme kriterleri için kullanılan hataların sıfıra ve R^2 değerlerinin 1’ e yakın olması nedeni ile kurulan bulanık model için “sistemin performansı iyi” denilebilir.

Sistem güvenle kullanılabilir. Ayrıca; ASTM-D2493' te geliştirilen modelin de bu çalışmada kullanılan filler malzemeleri için de kullanılabildiği görülmüştür.



SONUÇLAR

Yapılan çalışmalar sonucunda, filler türü ve filler/bitümlü bağlayıcı oranının, sıcaklık ve viskozite arasındaki ilişki üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla filler türü ve filler/bitümlü bağlayıcı oranı, asfalt karışımının sıkıştırma – sıkıştırma sıcaklıkları üzerinde önemli etken olduğu saptanmıştır.

0.9 oranındaki kalker filleri-bitümlü bağlayıcı karışımında gözlemlenmiş sıkıştırma sıcaklıkları ile bazalt filleri-bitümlü bağlayıcı karışımı için 0.57 oranında, portland çimentosu-bitümlü bağlayıcı karışımı için 0.81 oranında ve sönmüş kireç-bitümlü bağlayıcı için 0.32 oranında gözlemlenecek sıkıştırma sıcaklıkları birbirine eşit olabileceği belirlenmiştir. Yine 0.9 oranındaki kalker filleri-bitümlü bağlayıcı karışımında gözlemlenmiş sıkıştırma sıcaklıkları ile bazalt filleri-bitümlü bağlayıcı karışımı için 0.76 oranında, portland çimentosu-bitümlü bağlayıcı karışımı için 1.17 oranında ve sönmüş kireç-bitümlü bağlayıcı için 0.42 oranında gözlemlenecek sıkıştırma sıcaklıkları birbirine eşit olabileceği belirlenmiştir.

ASTM-D2493' te saf bitümlü bağlayıcılar için viskozitelerin bulunması için geliştirilen denklemin bu çalışmada kullanılan filler/bitümlü bağlayıcı karışımı (mastik) için de kullanılabilirdiği görülmüştür. Viskozite sonuçları ve hata değerleri incelendiğinde, bulanık model ile bulunan sonuçların, ASTM-D2493 Standardında belirtilen denklem ile bulunan sonuçlarla yakın olduğu görülmüştür. Değerlendirme kriterleri için kullanılan hata değerlerinin (RMSE, MAE) sıfıra ve R^2 değerlerinin 1' e yakın olması nedeni ile kurulan bulanık modelin de yeterli olabileceği düşünülmektedir. Bu model sayesinde 0.0 – 1.5 oran ve 135 °C – 195 °C sıcaklık arasındaki her değer için deneysel çalışma yapılmadan (bu çalışmada kullanılan malzemeler kullanılmak şartıyla) bulanık çıkarım sistemine oran ve sıcaklık değeri girilerek gerçeğe yakın viskozite tahmini yapılabilir (Örnek olarak; 0.4 oranlı kalker filleri/bitümlü bağlayıcı oranının 172 °C' de viskozitesi yaklaşık olarak tahmin edilebilir, oysa ASTM-D2493 standardındaki denklem ile sadece sıcaklık ile viskozite arasında ilişki kurulabilir, farklı oran için denklem kullanılacaksa o oran için deneysel çalışma yapılmalıdır). Aynı zamanda bu viskozite değerine bağlı olarak yine gerçeğe yakın sıkıştırma – sıkıştırma sıcaklık değerlerine ulaşılabilir. Bitümlü bağlayıcının kullanılacağı bölgede mevcut meteorolojik ve jeolojik şartlara göre

istenilen dayanımın elde edilmesi ancak gerekli optimum viskozite ve yapım kalitesi ile gerçekleşeceğinden, kurulan bulanık çıkarım sistemi ile gerekli viskozitenin hangi oran ve sıcaklıklarda elde edileceği yaklaşık olarak tahmin edilebilir ve böylece yapım süresine önemli ölçüde katkıda bulunulmuş olur.

Sönmüş Kireç/Bitümlü Bağlayıcı karışımının 1.2 oranı için 135 °C’ de ve 1.5 oranlı numunesi için hiçbir sıcaklıkta yapılan dönel viskozimetre deneyinden sonuç alınamamıştır. Sönmüş kirecin birim hacim ağırlığının fazla olması, bitümlü bağlayıcının içinde malzemenin askıda kalmasını zorlaştırmaktadır. Askıdaki malzemenin hızlıca çökelti oluşturduğu gözlemlenmesine rağmen, numunenin kıvamlı olmasından dolayı sonuca varılamadığından sönmüş kireç için 0.9 oranından daha fazla oranlar için sağlıklı sonuçlar alınamamıştır. Hem çökelti nedeniyle karışımın homojenliğine güvenmek zor olacağından, hem de eldeki verilerin sayısı az olduğundan (ölçülemeyen viskozite değerlerinden dolayı), ölçülebilen viskozite değerleri ile oluşturulacak herhangi bir modelin güvenilirliği tartışılır durumda olacaktır. Bu nedenle de model kurulmamıştır. Sönmüş kireçli bir mastiğin karıştırma – sıkıştırma sıcaklık değerlerine sağlıklı ulaşılabilirdi düşünülse dahi, ulaşılan sıcaklık değerleri yüksek olacağından, kaplama yapımı için yapım zorluğu ortaya çıkacak ve kaplama ekonomik olmayacaktır.

İleriki çalışmalarda; bu çalışmada erişilen sonuçlar, farklı mastikler ve asfalt karışımlar test edilerek doğrulanabilir, mastik viskoziteleri üzerinde mineral fillerin yüzey özelliklerinin ve gradasyonunun etkileri incelenebilir, mevcut deneysel değerler ile farklı bulanık modeller kurularak yeni bir yapay zekâ tekniği geliştirilebilir, aynı zamanda yapay sinir ağı modelleri de kurulabilir. Farklı filler maddeleri kullanılarak yeni viskozite değerleri elde edilebilir ve bunlar üzerinde farklı soft hesaplama yöntemleri geliştirilebilir. Farklı bölgelerden temin edilecek, bu çalışmadaki filler malzemeleri ile aynı filler malzemeleri kullanılarak viskoziteye etkisi ve bunun sebepleri araştırılabilir mevcut çalışmadaki bulanık model ve ASTM-D2493 standardındaki denklem ile uygunluğu analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Ceylan F., Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous-Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması ve Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2006.
2. Menglan Z., Chaofan W., Effects of Type and Content of Mineral Filler On Viscosity of Asphalt Mastic and Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Mixture, Journal of the Transportation Research Board, No.2051, Transportation Research of the National Academies, 10.3141/2051-05, 31-40, Washington, 2008.
3. Hesami E., Jelagin D., Kringos N., Birgisson B., An Empirical Framework for Determining Asphalt Mastic Viscosity as a Function of Mineral Filler Concentration, Construction and Building Materials, 35(2012), 23-29, 2012.
4. Çelik O., Yonar F., Ceylan S., Bitümlü Sıcak Karışımların Performansına Filler Etkisi, Selçuk Üniversitesi Müh. Mim. Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, 2007.
5. Yağız F., Keçeciler A.F., Işıksalan C., Akkol G., Bitümlü Malzemeler, İş Matbacılık ve Ticaret, Ankara, 1967.
6. İsfalt A.Ş., Asflat El Kitabı, Büyükşehir Belediyesi, İstanbul, 2002.
7. Ağar E., Umar F., Yol Üst Yapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1991.
8. Dukatz E. L., Anderson D.A., The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behavior of Asphalt and Asphalt Concrete, 38, 46-58, 1970.
9. www.kirectasikalker.blogspot.com
10. www.kayacbazalt.blogspot.com
11. Erdoğan T.Y., Türkiye' de Üretilen Çimentolar, Özellikleri ve Kullanımları, Ortadoğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 1995.
12. Kapkaç F., Çimento Çeşitleri Özellikleri Hammaddeleri ve Üretim Aşamaları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2015.
13. Çubuk M., Gürü M., Çubuk M.K., Arslan D., Bitümün Özelliklerinin Organik Esaslı Magnezyum Katkı Maddesi ile Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 28(2), 257-264, 2013.

14. www.karyapsan.com.tr/BilgiBankasi/Asfalt_Direncleri/BL/1014
15. Yelken F., Belen-Topboğazı (Hatay) Arası Yol Yapım Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2009.
16. www.ihracatturk.com/asphalt-bitum-nedir.html
17. Şen Z., Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme, 2001.
18. Eğrisöğüt Tiryaki A., Kazan R., Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi, Sakarya Üniversitesi Müh Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendis ve Makine Dergisi, 48(565), 3-8, 2007.
19. AASHTO M-323, Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001.
20. ASTM D-2493, Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders, American Society for Testing and Materials, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Cansın Mallı 12.10.1992 Tarihinde Gümüşhane' nin Şiran ilçesinde doğmuştur. İlk öğrenimini Abdi İpekçi İlköğretim Okulu' nda, orta ve lise öğrenimini Özel Çağrı Orta Okulu ve Özel Çağrı Lisesi' nde tamamlamıştır.

2010 yılında Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanmış ve 2014 yılında mezun olmuştur. 2014 yılında özel sektörde İnşaat Mühendisi olarak iş hayatına başlamıştır. 2016 yılında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR' in danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

MALLI, MEK Grup İnş. Aş. Firmasında İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

İletişim Bilgileri

Adres	:	Yukarı Yahyalar Mah. 762. Sokak No:7/B -1 Kaldera Evleri 5 YENİMAHALLE/ANKARA
Telefon	:	0 541 239 92 29
E-posta	:	cansin2012@gmail.com