

# ASFALT ÇİMENTOLARINDA DUKTULİTENİN BULANIK MANTIKLA TAHMİNİ

**Ercan ÖZGAN**

Yapı Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Konuralp Yerleşkesi, Düzce  
[ercanozgan@hotmail.com](mailto:ercanozgan@hotmail.com), [ercanozgan@duzce.edu.tr](mailto:ercanozgan@duzce.edu.tr)

(Geliş/Received: 11.09.2008 ; Kabul/Accepted: 30.03.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada, asfalt çimentosunun farklı sıcaklık ve bekleme sürelerine bağlı olarak duktulitesindeki değişim incelenmiştir. Bu amaçla AC 40 sınıfı asfalt çimentosu kullanılarak 15, 20 ve 25 °C sıcaklıklarda sırasıyla 1, 1.5 ve 2 saat bekletilerek 72 adet duktulite deneyi yapılmış ve deney sonuçları referans duktulite değerleri ile karşılaştırılarak aralarındaki ilişkiler belirlenmeye çalışılmıştır. Referans sıcaklığın ve bekleme sürelerinin sağlanamadığı şartlarda da duktulite deneylerinin yapılabilirliği gösterilmiş, deneylerle belirlenmemiş olan duktulite değerlerinin sıcaklık ve bekleme sürelerine bağlı olarak tahmin edilebilmesi için de Bulanık Mantık metoduyla tahmin modeli oluşturulmuş ve oluşturulan modelin bu amaçla kullanılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karayolu, asfalt çimentosu, duktulite, bulanık mantık.

## PREDICTION OF DUCTILITY ON ASPHALT CEMENT VIA FUZZY LOGIC

### ABSTRACT

In this study, the changing of ductility for asphalt cement in different temperature and waiting times were researched. For this aim, by using AC40 asphalt cement 72 ductility experiments were conducted at 15, 20, and 25°C temperatures for 1, 1.5 and 2 waiting times respectively. Comparing the experimental results with references ductility values, the relationship between references value and experimental results tried to determine. It was showed that the ductility tests could be done in a condition that is not ensured the references temperature and waiting times. Also, by using Fuzzy Logic method, prediction model was constituted based on temperature and waiting time to predict the ductility of asphalt cement which could not be determined with experimental. It was showed that the prediction model could be used to predict the ductility of asphalt cement based on temperature and waiting time.

**Keywords:** Highway, asphalt cement, ductility, fuzzy logic.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karayolu esnek üst yapısında lastik bandajlarından etki eden gerilmelerle doğal etkilere maruz kalan aşınma ve binder tabakaları trafik ve yol güvenliğinin sağlanması, karayolundan beklenen ekonomik hizmet ömrüne ulaşılabilmesi ve bakım-onarım masraflarının azaltılması açısından önem taşımaktadır [1]. Karayolu üst yapısının performansını asfalt betonunun stabilitesi belirlemektedir. Düşük stabiliteli asfalt betonu karayolu üst yapısında farklı bozulmalara neden olabilir [2,3]. Asfalt betonunun stabilitesi; karışımın kalınlığına, asfalt miktarına, asfaltın yumuşama noktası sıcaklığına, viskozitesine, agrega gradasyonuna, yapım sırasındaki şartlar ile trafik ve iklim

şartlarına bağlıdır [4]. Asfalt betonu kaplamalarında çatlak oluşumu, özellikle tekrar eden yüklerden dolayı oluşan yorulma çatlaklarının önemli bir problem olduğu belirtilmiştir [5]. Düşük sıcaklıklarda asfaltın reolojik özelliklerinin asfalt karışımının davranışına olan etkisi laboratuvar ortamında incelenerek değerlendirilmiştir [6]. Monismith ve Secor üç eksenli deneyler yaparak geniş bir sıcaklık ve basınç aralığında asfalt betonunun mekanik özelliklerini tahmin etmek için model oluşturmuşlardır. Modelin etkinliğini tespit edebilmek için de yaptıkları deneylerin sonuçlarını referans olarak kullanmışlardır [7]. Farklı sıcaklık ve bekleme sürelerinin asfalt betonunun stabilitesine etkisi tahribatlı ve tahribatsız metotlarla incelenmiş ve her iki metot arasında orta düzeyde negatif bir ilişki

olduğu belirlenmiştir [8]. Asfalt betonunda ortam sıcaklığının Marshall Stabilesini önemli ölçüde düşürdüğü belirlenmiş ve artan sıcaklığın asfaltın viskoziteni azaltarak akıcılığını arttırdığı tespit edilmiştir. Artan viskozitenin asfalt betonunda Marshall Stabite değerini arttırdığı görülmüştür [9]. Asfalt betonu farklı çaplardaki agregalar ve farklı oranlardaki asfaltın karışımından oluştuğu ve bu nedenle asfaltın visko-elastik bir malzeme olduğu, asfalt beton karışımının da lineer visko-elastik bir malzeme olarak kabul edilebileceği belirtilmiştir [7,10, 11, 12]. Aşınma ve binder tabakalarında trafiğin etkisiyle basma gerilmeleri ve lastik bandajlarının yol yüzeyi ile sürtünmesi sonucunda da çekme ve kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan basınç gerilmeleri daha çok karışım içinde bulunan agregalar tarafından karşılanmakta olup çekme ve kayma gerilmelerini ise büyük oranda asfalt çimentosu karşılamaktadır. Bu nedenle, aşınma ve binder tabakası için yapılacak karışım hesapları önemlidir. Karışıma katılacak asfalt çimentosunun miktarı ve bağlama yeteneği belirlenmelidir. Asfalt çimentosunun bağlama yeteneği çimentonun duktulitesine, viskozitesine ve yumuşama noktası sıcaklığı gibi özelliklerine bağlıdır. Duktulite değeri yüksek olan asfalt çimentolarının bağlayıcılık özelliklerinin yüksek olduğu söylenebilir. Ancak çok yüksek duktulite değerine sahip asfalt çimentoları ısıya karşı fazla duyarlılık göstermektedirler [13]. Asfalt çimentosunun duktulitesi bekleme süresi ve ortam sıcaklığı değişkenlerine göre deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar istatistiksel analizlerle yorumlanmıştır [14].

Bu çalışmada, farklı ortam sıcaklığı ve farklı bekleme sürelerine maruz bırakılan asfalt çimentosunun duktulitesi incelenmiş ve elde edilen sonuçlarla referans deney şartlarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak aralarındaki ilişkiler belirlenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçları kullanılarak bulanık mantık metoduyla da asfalt çimentosunun duktulitesi ortam sıcaklığı ve bekleme süresi parametrelerine bağlı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada kullanılan asfalt çimentosunun sınıfı TS 118 prEN 1426'e göre belirlenmiş olup AC 40 sınıfıdır [15]. Kullanılan asfalt çimentosunun özgül ağırlığı TS 1087'ye göre  $0.958 \text{ gr/cm}^3$  olarak belirlenmiştir [16]. Yumuşama noktası sıcaklığı ise TS 120 pr EN 1427'e göre  $64,5^\circ\text{C}$  olarak tespit edilmiştir [17]. Duktulitenin ölçülmesinde kullanılan cihaz 5 cm/dakika hızla çekme yapabilen, sabit su sıcaklığı sağlayan, su tahliye musluğu ve cihaz haznesinde bulunan suyun her tarafta aynı sıcaklıkta olmasını sağlayarak olası ısı farklarını ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan devir daim pompası bulunmaktadır. Duktulite cihazının genel görünüşü ve numu-

nelerin deney cihazına yerleştirilmiş hali aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Duktulite cihazı (Machine of ductulity)



Şekil 2. Duktulite cihazı ve numuneler (Machine of ductulity and samples)

### 2.2. Metot (Method)

Asfalt çimentosunun Duktulite deneyleri TS EN 13589 'a uygun olarak yapılmıştır [18]. Çalışmada, her bir deney serisi için 3'er adet olmak üzere toplam 72 adet numune hazırlanmıştır. Her 3 numune için elde edilen duktulite değerlerinin ortalamaları alınarak o deney serisi için tek bir duktulite değeri elde edilmiştir.

Deneylerin yapılabilmesi için asfalt çimentosu ısıtılarak akıcı kıvama getirilmiş ve  $280 \mu\text{m}$  gözenekli süzgeçten süzülükten sonra pirinçten yapılmış ve içerisi film tabakası şeklinde vazelinlenmiş olan 3 ayrı duktulite kalıbına kalıp seviyesinin üst hizasına kadar doldurulmuştur (Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 3. Duktulite deney kalıpları (Ductulity test formworks)



Şekil 4. Asfalt çimentosunun kalıba konması (Putting of asphalt cement into the formwork)

Şekil 3'te görülen deney kalıpları pirinçten yapılmış olup iki tane yan iki tane de baş kısmında olmak üzere toplam dört parçadan oluşmaktadır. Asfalt çimentosu kalıp içine yerleştikten sonra kalıbın yan taraflarında bulunan parçalar çıkartılarak uçlarındaki delikli kısımlarda duktulite deney cihazına bağlanmıştır.

### 2.3. Numunelerin hazırlanması (Preparing of the samples)

Kalıp içinde olan akıcı kıvamdaki asfalt çimentosu oda sıcaklığında 35 dakika süre ile bekletilmiştir. Daha sonra aynı numuneler sırasıyla 15 °C, 20 °C ve 25 °C sabit sıcaklık sağlayan su banyosunda 30 dakika bekletilmişlerdir. Sabit sıcaklık su banyosundan çıkarılan numuneler kalıba ilk konuldukları durumlarına göre daha katı bir hal almıştır. Bu durumda iken kalıptan taşan fazla kısımlar ısıtılmış bir spatula ile alınarak numunelerin üst yüzeyleri düzeltilmiştir. Bu işlemden sonra asfalt çimentosu 15°C, 20°C ve 25°C sıcaklıktaki sabit su banyosunda sırasıyla 1, 1.5 ve 2 saat bekletildikten sonra deneylere başlanmıştır ve her bir zaman aralığı için duktulite değerleri ölçülmüştür.

### 3. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME (RESULTS AND EVALUATION)

Bu çalışmada, AC 40 asfalt çimentosundan alınan numuneler 15, 20 ve 25°C sabit sıcaklıklarda sırasıyla 1, 1.5 ve 2 saat bekletildikten sonra duktulite deney-

lerine yapılmış ve deney sonuçları her bir sıcaklık için zamana bağlı olarak verilmiştir (Tablo 1).

Deney sonuçları incelendiğinde, 15°C sabit sıcaklıkta en düşük duktulitenin 1 saat için 506mm, en yüksek duktulite ise 2 saat için 901mm olduğu görülmektedir. 20°C sabit sıcaklıkta en düşük duktulitenin 1 saat için 620mm, en yüksek duktulitenin ise 2 saat için 918mm olduğu, buna karşılık 25°C sabit sıcaklıkta en düşük duktulitenin 693mm ve en yüksek duktulitenin ise 936mm olduğu görülmektedir. Asfalt çimentolarında duktulite deneyleri 25°C sıcaklıkta ve 1.5 saat bekletilen numuneler üzerinde yapılmaktadır. Buna göre, referans duktulite değerleri 826, 854 ve 989mm olarak ölçülmüştür. Deney sonuçlarının anlamlı hale getirilebilmesi amacıyla SPSS programı ile istatistiksel analizler yapılmış ve duktulite, ortam sıcaklığı ve bekleme süreleri arasındaki ilişkiler 0.05 önemlilik düzeyinde belirlenmiştir (Tablo 2).

Asfalt çimentolarında, bekleme süresi ile duktulite arasında 0,726 ile iyi düzeyde ve sıcaklık ile duktulite arasında ise 0,522 ile orta düzeyde bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

### 4. BULANIK MANTIK METODU'NUN UYGULANMASI (APPLICATION OF FUZZY LOGIC METHOD)

Asfalt çimentolarında, ortam sıcaklığı ve bekleme sürelerinin duktuliteye etkisi bulanık mantık metoduyla modellenmiş ve farklı ortam sıcaklığı ve bekleme süreleri için duktulite değerleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Matlab programı kullanılarak, deney sonuçlarına göre bulanık mantıkla oluşturulan tahmin modelinin asfalt çimentosunun duktulitesinin tahmininde kullanılabileceği görülmüştür.

#### 4.1. Bulanık Mantık Sistemi (Fuzzy Logic System)

Bulanık mantık sistemi üyelik fonksiyonu, bulanık mantık operatörleri ve if-then kurallarından oluşmaktadır [19]. Mamdani ve Sugeno olmak üzere iki tip bulanık mantık sistemi mevcuttur. Bu çalışmada asfalt çimentosunun duktulitesi Mamdani tipi bulanık mantık sistemi ile tahmin edilmiştir [20, 21, 22]. Modelde,

Tablo 1. Zamana ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen duktulite değerleri (mm) (Ductility values obtained to the temperature and the waiting time mm)

Deney No/ Sıcaklık	Bekleme Süresi								
	1 saat			1.5 saat			2 saat		
	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C
1	547	620	693	676	751	826	856	868	880
2	506	641	776	673	764	854	883	896	909
3	567	725	884	637	813	989	901	918	936
Toplam ( $\Sigma x$ )	1620	1986	2353	1986	2328	2669	2640	2682	2725
Ortalama Değerler	540	662	784	662	776	890	880	894	908
Bulanık Mantıkla tahmin edilen değerler ( $R^2=0,96$ )	513	649	785	622	743	864	791	842	893

ortam sıcaklığı ve bekleme süresi sistemin girdisi olarak kullanılırken duktulite ise çıktı olarak kullanılmıştır. Oluşturulan model aşağıda şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 5).

**Tablo 2.** Duktulite, sıcaklık ve bekleme süreleri arasındaki korelasyon katsayıları (Correlation coefficients between ductulity, temperature and waiting time)

Değişkenler	Bekleme süresi	Ortam sıcaklığı	Duktulite
Bekleme süresi	1	,000	,726
Ortam sıcaklığı	,000	1	,522
Duktulite	,726	,522	1

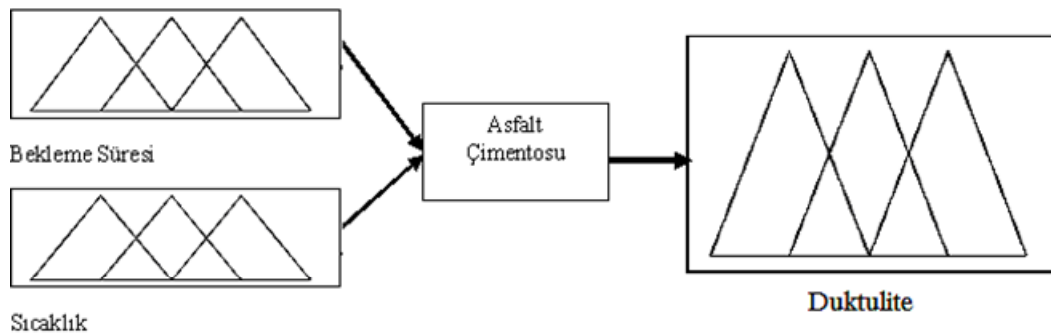
#### 4.2. Üyelik Fonksiyonu (Membership Functions)

Üyelik işlevi bir kümenin elemanlarının o kümeye hangi üyelik derecesi ile ait olduğunu gösteren ve “0” ile “1” arasında değer alabilen bir işlevdir. Üyelik işlevinden faydalanılarak girilen bilgilerin ait olduğu bulanık küme ve üyelik derecesi tespit edilmiş ve girilen sayısal değerlerin tanımlanan dilsel ifadelere dönüştürülebilmesi daha basit hesaplamalar gerektiren üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonun dereces “ $\mu$ ”, bekleme süresi, ortam sıcaklığı ve duktulite için gösterilmiştir (Şekil 6,7 ve 8). Üyelik fonksiyonu grafiğinde bekleme süresi, ortam sıcaklığı ve duktulite için “ $y$ ” değeri maksimum “ $\mu=1$ ” ve minimum “ $\mu=0$ ”dır. Bekleme süresi, ortam sıcaklığı ve duktulitenin üyelik fonksiyonu grafikleri az, orta, çok ve en çok şeklinde olmak üzere dört alt kategoride oluşturulmuştur (Şekil 6, 7 ve 8).

#### 4.3. Bulanık Mantıkta Kurallar, Kuralların ve Yüzeyin Görünüşü (Rule Editors, Rule Viewer and Surface Viewer in Fuzzy Logic)

Bulanık mantıkta, If-then kuralları bulanık mantığı oluşturan şartların formüle edilebilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışma için örnek bir if-then kuralı aşağıdaki gibi yazılabilir;

“if bekleme süresi is az and ortam sıcaklığı is az then



**Şekil 5.** Asfalt çimentosunda duktulitenin tahmini için bulanık mantık sistemi (Fuzzy logic system to predict of the ductulity for the asphalt cement)

duktulite is az”

Burada, bekleme süreleri ve ortam sıcaklıkları; sayısal değerlerle tanımlanmış az, orta, çok ve en çok şeklindeki gruplandırılmış sözel ifadelerdir.

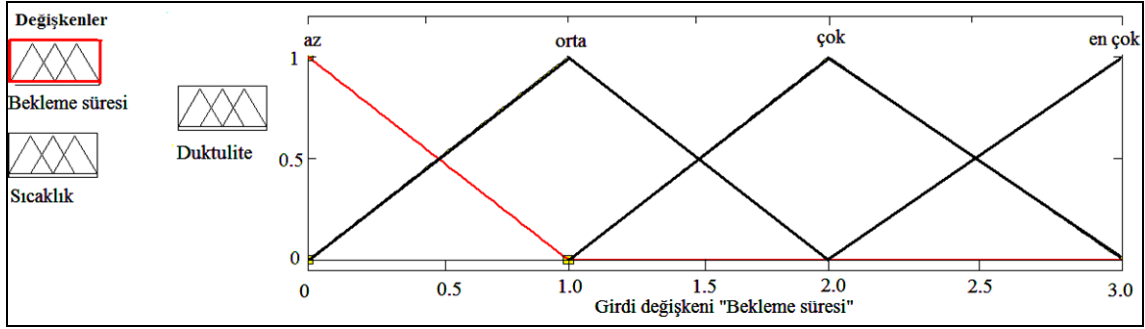
Oluşturulan bulanık mantık modelinde bekleme süresi ve ortam sıcaklığı ile ilgili yazılan kuralların “if” kısmı girdi olarak tanımlanırken “then” kısmından sonraki Duktulite ise sonuç olarak isimlendirilmektedir. Bulanık mantık modelinde sistemin bir bütün olarak çalışmasını sağlayan kurallar deney sonuçları, istatistiksel analiz sonuçları ve tecrübeye bağlı olarak yazılmış ve bu kuralların bir kısmı Matlab ara yüzünde bilgisayar ekranında olduğu haliyle aşağıda gösterilmiştir (Şekil 9).

Bulanık çıkarımın sonucu yine bir bulanık kümedir. Bu sonucun tekrar sisteme uygulanabilmesi için giriş değerleri gibi sayısal değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Böylece bulanık bir bilgidен bulanık olmayan (durulmuş, netleştirilmiş) ve uygulamada kullanılacak gerçek değerler elde edilmiştir. Uygulamalarda durulama (netleştirme) işlemi; “Maksimum üyelik yöntemi”, “Ağırlık merkezi üyelik yöntemi”, “Ağırlık ortalaması yöntemi ve Ortalama-maksimum üyelik yöntemi” gibi yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu çalışmada, durulama işlemi için üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan alanların ağırlık merkezlerine göre işlem yapan ve en çok kullanılan yöntem olan ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Hangi kuralın aktif olduğu ya da üyelik fonksiyonlarının duktulite sonuçlarını nasıl etkilediği Matlab programında grafik ara yüzeyi olarak elde edilmiş olup bu ara yüzeyin bilgisayar ekranında görülen kısmı aşağıda gösterilmiştir (Şekil 10).

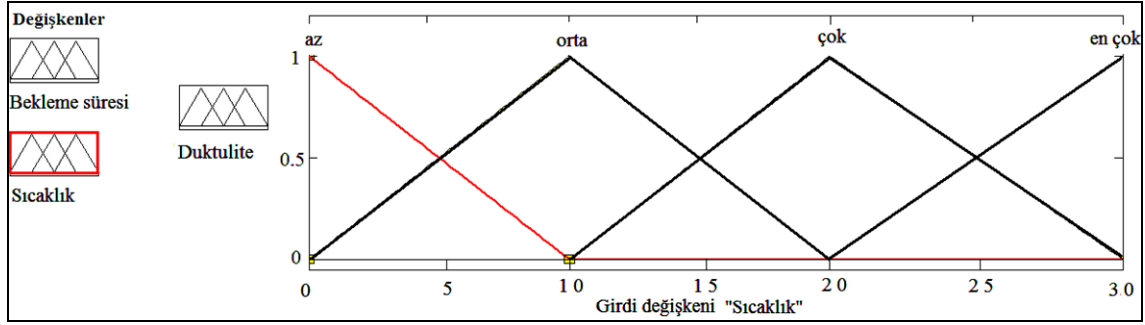
Grafik ara yüzeyi ile birlikte duktulitenin, bekleme süresi ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimi üç boyutlu yüzeysel grafikte gösterilmiştir. Bu grafik bulanık mantıkla oluşturulan tahmin modelinin tamamını bir bütün olarak göstermektedir (Şekil 11).

Bulanık mantık metoduyla tahmin edilen duktulite değerleri ile deneyler sonucunda elde edilen duktulite değerleri arasındaki ilişki aşağıda gösterilmiştir (Şekil 12).

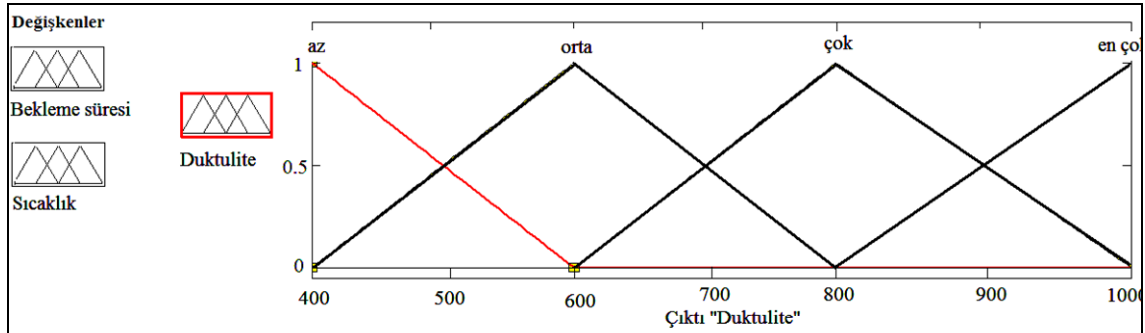




Şekil 6. Bekleme süresi için üyelik fonksiyonu grafiği (Membership function graph for waiting time)



Şekil 7. Sıcaklık için üyelik fonksiyonu grafiği (Membership function graph for temperature)



Şekil 8. Duktulite için üyelik fonksiyonu grafiği (Membership function graph for ductility)

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER (RESULT AND RECOMMENDATIONS)

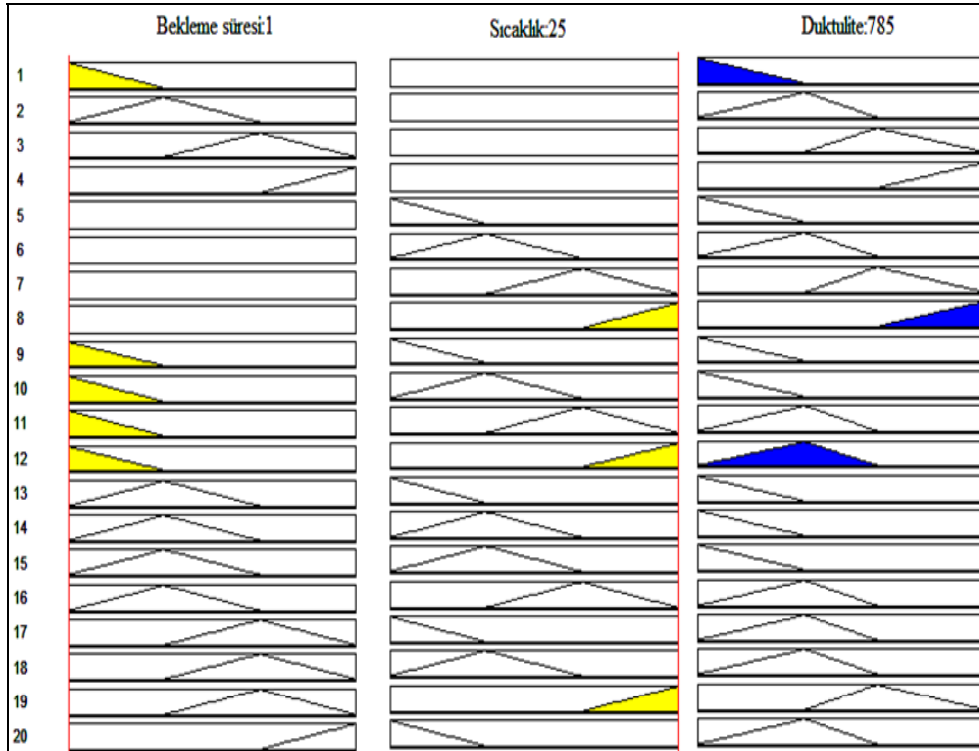
Farklı sıcaklık ve bekleme sürelerinde asfalt çimentosunun duktulitesinin incelendiği bu çalışmada, Bulanık mantık metoduyla da sıcaklık ve bekleme sürelerine bağlı olarak duktulite tahmini yapılmış ve deneysel sonuçlar tahmin sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Buna göre;

- İncelenen asfalt çimentosunda referans duktulite değeri 25<sup>0</sup>C sıcaklık ve 1.5 saat bekleme süresi için 890mm olarak ölçülmüştür.
- Asfalt çimentosunun 15<sup>0</sup>C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek deney yapılması durumunda duktulitenin 540mm olduğu ve referans değerden %39.32 oranında az olduğu belirlenmiştir. 1.5 saat bekletildiğinde 662mm olduğu ve referans değerden %25.61 oranında az olduğu, 2 saat bekletildiğinde ise 880mm olduğu ve referans değerden %1.12 oranında az olduğu belirlenmiştir.
- Asfalt çimentosunun 20<sup>0</sup>C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek deney yapılması durumunda duktulitenin 662mm olduğu ve referans değerden %25.61 oranında az olduğu belirlenmiştir. 1.5 saat bekletildiğinde 776mm olduğu ve referans değerden %12.80 oranında az olduğu, 2 saat bekletildiğinde ise 894mm olduğu ve referans değerden %0,45 oranında fazla olduğu belirlenmiştir.
- Asfalt çimentosunun 25<sup>0</sup>C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek deney yapılması durumunda duktulitenin 784mm olduğu ve referans değerden %11.91 oranında az olduğu, 2 saat bekletildiğinde ise 908mm olduğu ve referans değerden %2.02 oranında fazla olduğu belirlenmiştir.
- Asfalt çimentosunun 15<sup>0</sup>C sıcaklıktaki duktulitesi Bulanık mantıkla 1 saat için 513mm, 1.5 saat için 622mm ve 2 saat için ise 791mm olarak tahmin edilmiştir. Tahmin değerlerinin referans değerden sırasıyla 1 saat için %42.35 oranında, 1.5 saat için %30,11 oranında ve 2 saat için ise %11.12 oranında az olduğu belirlenmiştir.

15. If (bekleme süresi is orta) and (sıcaklık is orta) then (Duktulite is az) (1)  
 16. If (bekleme süresi is orta) and (sıcaklık is çok) then (Duktulite is orta) (1)  
 17. If (bekleme süresi is çok) and (sıcaklık is az) then (Duktulite is orta) (1)  
 18. If (bekleme süresi is çok) and (sıcaklık is orta) then (Duktulite is orta) (1)  
 19. If (bekleme süresi is çok) and (sıcaklık is encok) then (Duktulite is çok) (1)  
 20. If (bekleme süresi is encok) and (sıcaklık is az) then (Duktulite is orta) (1)  
 21. If (bekleme süresi is encok) and (sıcaklık is çok) then (Duktulite is çok) (1)  
 22. If (bekleme süresi is encok) and (sıcaklık is encok) then (Duktulite is encok) (1)  
 23. If (bekleme süresi is encok) and (sıcaklık is orta) then (Duktulite is çok) (1)  
 24. If (bekleme süresi is çok) and (sıcaklık is çok) then (Duktulite is orta) (1)

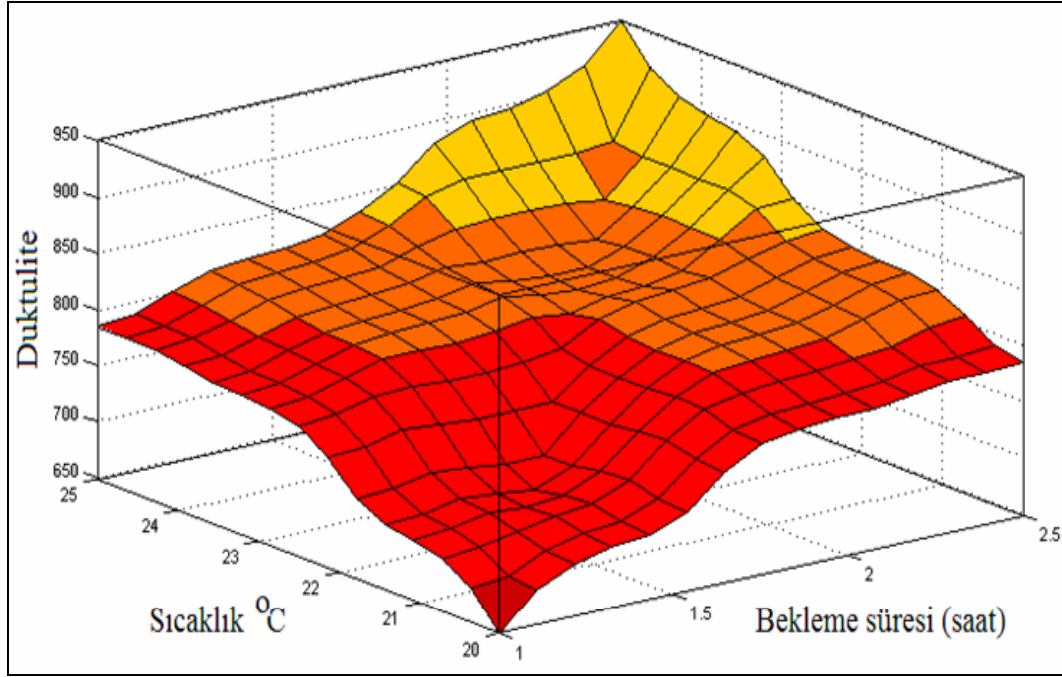
If	and	Then
bekleme süresi is	sıcaklık is	Duktulite is
az orta çok en çok none	az orta çok en çok none	az orta çok en çok none
<input type="checkbox"/> not	<input type="checkbox"/> not	<input type="checkbox"/> not

Şekil 9. Kuralların bir kısmı (A part of the rules)

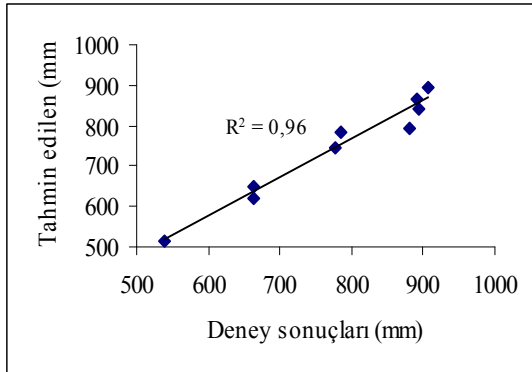


Şekil 10. Asfalt çimentolarında duktulitenin modellenmesi için yazılan kuralların bir kısmı (A part of the rules written for modelling the ductility of asphalt cement)

- Asfalt çimentosunun 20<sup>0</sup>C sıcaklıktaki duktulitesi Bulanık mantıkla 1 saat için 649mm, 1.5 saat için 743mm ve 2 saat için ise 842mm olarak tahmin edilmiştir. Tahmin değerlerinin referans değerden sırasıyla 1 saat için %27.07 oranında, 1.5 saat için %16.51 oranında ve 2 saat için ise %5.39 oranında az olduğu belirlenmiştir.
- Asfalt çimentosunun 25<sup>0</sup>C sıcaklıktaki duktulitesi Bulanık mantıkla 1 saat için 785mm, 1.5 saat için 864mm ve 2 saat için ise 893mm olarak tahmin edilmiştir. Tahmin değerlerinin referans değerden sırasıyla 1 saat için %11.79 oranında, 1.5 saat için %2.92 oranında az olduğu ve 2 saat için ise %0.33 oranında fazla olduğu belirlenmiştir.
- İstatistiksel analizler sonucunda 0.05 anlamlılık düzeyi için duktulite ile sıcaklık arasındaki korelasyon katsayısının 0.522 ile orta düzeyde bir ilişkisi olduğu, duktulite ile bekleme süresi arasında ki korelasyon katsayısının ise 0.726 ile iyi seviyede bir ilişkisi olduğu tespit edilmiştir.
- Bulanık mantık metoduyla tahmin edilen duktulite değerleri ile deneyler sonucu bulunan duktulite değerleri arasındaki korelasyon katsayısı 0,96 ile son derece yüksek olup mükemmel yakın bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 11. Sistemin tamamı için yüzey haritası (The surface map for the entire system)



Şekil 12. Deney sonuçları ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişki (Relationship between experimental results and predicted values)

- Bu çalışmada duktulite deneyleri 15<sup>0</sup>C, 20<sup>0</sup>C ve 25<sup>0</sup>C sıcaklıklarda sırasıyla 1, 1.5 ve 2 saat bekletilen asfalt çimentosu numuneleri ile yapılmıştır. Ancak, referans sıcaklık ve bekleme sürelerinin sağlanmadığı şartlarda da duktulite deneylerinin yapılabilmesi için Bulanık Mantık metoduyla tahmin modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelle deneyin yapıldığı sıcaklık ve bu sıcaklıkta bekleme süresine bağlı olarak duktulitenin %96 doğruluk oranıyla tahmin edilebileceği görülmüştür.

#### KAYNAKLAR

1. Umar F., Açar, E., **Yol Üst Yapısı**, İTÜ, 4. Baskı-1451, İstanbul, 1991.
2. Kalyoncuoğlu, S. F., Tıgdemir, M., "An alternative approach for modelling and simulation of traffic data: artificial neural networks" **Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT)**, 12 (5):351–362, 2004.
3. Tıgdemir, M., Karasahin, M., and Sen, Z., "Investigation of fatigue behaviour of asphalt concrete pavements with fuzzy logic approach", **International Journal of Fatigue (Int J Fatigue)**, 24 (8):903–910, 2002.
4. Cooper, K. E., and Pell, P. S., "The effect of mix variables on the fatigue strength of bituminous materials", **TRRL Report 633**, 1974,
5. Liang RY, Zhou J., "Prediction of fatigue life of asphalt concrete beams", **International Journal of Fatigue (Int J Fatigue)**, 19(2): 17-24, 1997.
6. Isacsson, U., and Zeng, H., "Cracking of asphalt at low temperature as related to bitumen rheology", **Journal of Material Science (J. Mater. Sci.)**, 33(8):2165–2170, 1998,
7. Krishnan, J. M., and Rajagopal, K. R., "Triaxial testing and stress relaxation of asphalt concrete", **Mechanics of Materials (Mech. Mater.)**, 36 (9):849–864, 2004.
8. Özgan, E., "Determining the stability of asphalt concrete at varying temperature and exposure times using destructive and non-destructive methods", **Journal of Applied Sciences (JAS)**, 7 (24): 3870–3879, 2007.
9. Ukwuoma, O., Ademodi, B., "The effects of temperature and shear rate on the apparent viscosity of Nigerian oil sand bitumen", **Fuel Process Technology (Fuel Process Techno)**, 60:95–101, 1999.
10. Maxwell, J.C., "**Theory of Heat**", Reprint of the 1872 edition, Greenwood Press, Westport, Connecticut, third ed, 1970.
11. Menglan Z., Donald H. S., "Nonlinear thermal expansion and contraction of asphalt concrete", **Canadian Journal of Civil Engineering (Can. J. Civ. Eng.)**, 26(1): 26–34, 1999.

12. Goodrich, J.L., "Asphalt and Polymer-Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphalt Concrete Mixes." **Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists**, 57: 116-175, 1988.
13. Keçeciler, A., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A.F., "**Bitümlü Malzemeler El Kitabı**" Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), 239, 1988.
14. Özgan E., Kap T., "Asfalt Çimentolarında Bekleme Süresi ve Ortam Sıcaklığının Duktuliteye Etkisi" **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**" Cilt:9, Sayı:1, 43-47, 2005.
15. TS 118 prEN 1426 "**Petrol Ürünleri-Bitümler Ve Bitümlü Bağlayıcılar İğne Penetrasyonu Tayini**" Türk Standartı, 1998.
16. **TS 1087 "Bitümlü Maddelerde Özgül Ağırlık Tayini"** Türk Standartı, 1972.
17. TS 120 pr EN 1427 "**Petrol Ürünleri-Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini-Halka-Bilya Metodu**" Türk Standartı, 1998.
18. TS EN 13589 "**Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-İşlem görmüş bitümlerin çekme özelliklerinin duktilometreyle tayini**" Türk Standartı, 2005.
19. **Matlab Documentation Set**, The MathWorks Inc, 2004.
20. E. H. Mamdani, S. Assilian., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller" 7 (1): 1-13, 1975.
21. Sugeno M. "Introductory survey of fuzzy control", **INFO. Sci.**, (36):1-2, 59-83. 1985.
22. Zadeh L., "Man and Computer, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", **IEEE** Bordeaux, France, 130-165, 1972.