







# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## ANFIS ve Bulanık Mantık Yöntemlerinin Köpük Bitümün Genleşme Oranı ve Yarılanma Süresi Parametreleri Tahmininde Kullanılabilirliğinin Araştırılması

 Kemal Muhammet ERTEN<sup>a,\*</sup>,  Serdal TERZİ<sup>b</sup>,  Hüseyin AKBULUT<sup>c</sup>,  
 Ekinhan ERİŞKİN<sup>d</sup>

<sup>a</sup> *Yapı Denetimi Bölümü, Dazkırı Meslek Yüksekokulu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, TÜRKİYE*

<sup>b</sup> *İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE*

<sup>c</sup> *İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, TÜRKİYE*

<sup>d</sup> *İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, TÜRKİYE*

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ertenkema@windowslive.com

DOI: 10.29130/dubited.686047

### ÖZET

Teknolojik gelişmeler sayesinde asfalt üretim sıcaklıkları düşürülerek sıcak karışımlara benzer performanslı karışımlar elde edilebilmektedir. Sıcak karışım asfaltların malzemelerinin yani agrega ve bitümün yüksek sıcaklıklarda ısıtılması nedeniyle yarattıkları olumsuz çevresel etkiler, üretim maliyetlerinde meydana gelen sürekli artış ve hammadde kaynaklarındaki azalma nedenleriyle asfalt üretim sıcaklıklarının düşürülmesi eğilimi ve malzemelerin geri kazanımının popülerliği giderek artmaktadır.

Köpük bitüm ve geri kazanılmış/doğal agrega kullanılarak uygulanan köpük bitümle geri kazanım yöntemi, çevresel ve ekonomik olarak avantajları olan bir yöntemdir. Köpük bitümle uygun bir karışım hazırlayabilmek için ilk aşama, karışımda kullanılacak bitümün en ideal köpürme özelliklerinin (genleşme oranı ve yarılanma süresi) doğru şekilde belirlenebilmesidir. Bu nedenle çalışmada, farklı asfalt çimentolarının köpürme özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan bitümlerin köpürme özellikleri Bulanık Mantık ve ANFIS yöntemleri kullanılarak modellenmiş ve sonuçlar deneysel olarak elde edilen verilerle kıyaslanmıştır.

Elde edilen veriler ışığında kullanılan tüm bitümlerin farklı köpürtme su yüzdeleri için kullanımlarının literatürde önerilen minimum köpürme özelliklerini sağladığı ve kullanılan tahminleme yöntemlerinin benzer sonuçlarla deneysel verileri desteklediği sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Köpük Bitüm, Genleşme Oranı, Yarılanma Süresi, ANFIS, Bulanık Mantık

## Investigation of the Usability of ANFIS and Fuzzy Logic Methods in Estimation of Foam Bitumen Expansion Ratio and Half Life Parameters

### ABSTRACT

Thanks to the technological advances, asphalt production temperatures can be lowered and performance mixes similar to hot mixes can be obtained. The trend of lowering asphalt production temperatures and the popularity

of materials recycling are gradually increasing due to the negative environmental effects caused by the heating of hot mix asphalt materials, that is, aggregate and bitumen at high temperatures.

Recycling with foam bitumen method, applied using foam bitumen and recycled / natural aggregate is a method that has environmental and economic advantages. The first step to prepare a suitable mixture with foam bitumen is to determine the most ideal foaming properties (expansion ratio and half life) of the bitumen to be used in the mixture.

For this reason, foaming properties of different asphalt cements are determined experimentally. In addition, the foaming properties of bitumens used in experiments were modeled using Fuzzy Logic and ANFIS methods and the results were compared with the experimental data.

In the light of the data obtained, it was concluded that the use of all bitumen used for different foaming water percentages provides the minimum foaming properties recommended in the literature and the estimation methods used support experimental data with similar results.

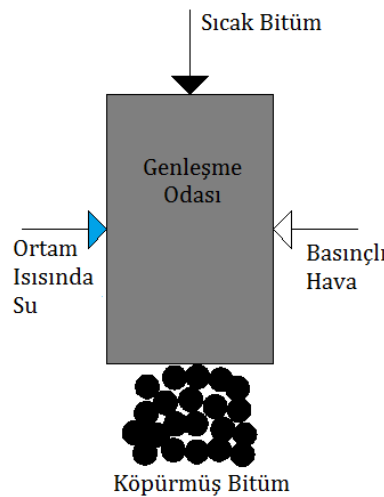
**Keywords:** Foam Bitumen, Expansion Ratio, Half Life, ANFIS, Fuzzy Logic

## I. GİRİŞ

### A. KÖPÜK BİTÜM

Köpük bitüm, köpük bitümle soğuk geri kazanım tekniğinin kritik bir parçası olan bitüm köpürtme ürünüdür [1]. Bitüm köpürtme tekniği, asfalt karışımının üretim sıcaklığını düşürerek enerji tüketimini azaltmak, çevreyi korumak için ideal bir tekniktir [2]. Bitümü köpürtmenin amacı, bitümün ortam sıcaklığında soğuk RAP ve/veya granül malzemelere dağılmasını kolaylaştırmaktır [3].

Köpük bitüm; sıcak bitüm, %2-3 oranında su ve havanın bir genişleme odasına enjekte edilmesiyle oluşur (Şekil 1) [4].



**Şekil 1.** Bitüm köpürme mekanizması

Köpürme işlemi dinamik bir süreçtir [5-6]. Köpürtme maddesi (yani su) sıcak asfalt bağlayıcısına enjekte edilerek süreç başlatılır. Buhar haline gelen su, bitümün içindeki küçük kabarcıklar içerisinde hapsolür, anlık olarak köpürme sağlar ve asfalt bağlayıcı hacmi büyük oranda artar. Ancak köpük form çok kısa sürede eski haline döner. Bu nedenle bitümün köpük formda kaldığı süre içerisinde asfalt karışım üretilmelidir [6-7].

Temelde köpük bitüm kabarcıklarının çökmesinin iki önemli nedeni vardır. Birincisi, daha düşük sıcaklıktaki ortam havası ile bitüm filmlerinin temasından dolayı buharın sıcaklığının düşmesidir. İkincisi ise kabarcıkların bitüm filminin uzama sınırını aşmış olmasıdır. Kabarcık içindeki buhar basıncı, bitüm filmini sünek sınırının ötesine uzatırsa, kabarcık bozulur [7].

Köpürtülmüş bitümün kalitesi; kullanılabilir köpürme destekleyici katkı maddesi [10-11], bitüm penetrasyonu [10-11-12], bitüm kökeni [10-12], bitüm sıcaklığı [4], köpürtme suyu yüzdesi ve sıcaklığı [4,10], köpürtme suyu ve hava basınçları [4], bitümün genleşme odasına giriş basıncı [13] gibi birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Köpürmeyi sağlayacak en iyi bitümler, en fazla genleşen ve mümkün olduğunca uzun süre köpük formda kalanlardır [14] bu nedenle köpük bitüm; ERmax (maximum expansion ratio-maksimum genleşme oranı) ve HL (half life-yarılanma süresi) ile karakterize edilir.

ERmax, köpük durumunda elde edilen maksimum hacim ile bağlayıcının nihai hacmi arasındaki oran olarak tanımlanır. HL, köpüğün maksimum hacmine ulaştığı an ile maksimum hacmin yarısına indiği an arasındaki saniye cinsinden geçen süredir [15].

Köpüğün hacmi ne kadar artarsa, bitümün agregaya içindeki dağılımı da o kadar iyi olur. Karıştırma işlemi sırasında, bitüm kabarcıkları patlayarak, mastik oluşturmak üzere ince parçacıklara (ince kum ve daha küçük) yapışır ve agregaya boyunca dağılan minik mastik damlacıklar üretilir [16].

Maccarrone vd. [17], genleşmesi yüksek köpük bitümün agreganın bitümle kaplanmasını geliştirdiğini ve dolayısıyla daha iyi karışım özellikleri sağladığını ileri sürmüşlerdir.

*Tablo 1. Literatürden bazı minimum genleşme oranı ve yarılanma süresi önerileri*

Kaynak	Minimum ER	Minimum HL
[7]	10	12
[18]	10	10
[19]	10	20
[13] Agregaya sıcaklığı 10-15°C	10	8
[13] Agregaya sıcaklığı >15°C	8	6

## **B. BULANIK MANTIK ve ANFIS**

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) sistemlerin ve modellerin tanımlanmasında ve kontrol edilmesinde geniş çapta kullanılan bir sistemdir [20].

Temelde bulanık bir sistemin yaptığı, insan bilgisini matematiksel formüle dönüştürmektir. Bu önemli eylem, dilsel değişkenler, eğer-ise (if-then) bulanık kurallar ve haritalama sistemi (bulanık motor) ile yapılır. Moazami vd. [21]'nin, Albitres vd. 2005'den aktardığı gibi; bulanık sistemler bilgi ve kurallara dayanır. Bulanık sistemin kalbi, bulanık eğer-ise kurallarından oluşan bir bilgi tabanıdır. Kısaca, bulanık bir sistem oluşturmanın başlangıç noktası, uzmanların bilgisinden veya ilgili alandaki çalışmalardan bir dizi eğer-ise kuralları toplamaktır. Bir sonraki adım bu kuralları aritmetik formlarında birleştirmektir [21].

Yapay sinir ağları (YSA), gelecekteki değerlerin tahmininde geçmişe ait bir veri setini kullanan denetimli öğrenme algoritmalarıdır. Yapay sinir ağları verilerden kolayca öğrenebilir. Bulanık mantık, verilerden öğrenemez. Ancak bulanık tabanlı modeller, dilsel terimleri kullandığı için kolayca anlaşılabilirler [22].

ANFIS (Uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi), hem sinir ağlarının hem de bulanık mantığın özelliklerini miras alan “nöro bulanık ağlar” olarak adlandırılan bir hibrit sistem ailesine aittir [22-23].

Her iki yöntemin özelliklerini taşıdığı gibi yöntemlerin tek başlarına kullanıldıkları durumlardaki bir kısım dezavantajları da bertaraf etmektedir [24].

Çalışmada; farklı bitüm sınıflarının köpürme davranışlarını incelemek amacıyla, Wirtgen firmasının geliştirdiği laboratuvar köpük asfalt plenti kullanılarak (Şekil 2), Kırıkkale Tüpraş Rafinerisinden temin edilen 50/70, 70/100, 100/150 ve 160/220 sınıfı bitümler köpürtülerek Genleşme Oranı ve Yarılanma Süresi değerleri bulunmuştur.



*Şekil 2. Laboratuvar köpük asfalt plenti*

Bitümün köpürme özelliklerini belirlemek için hem Mamdani hem de Sugeno bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin her ikisinde de, Deneysel Çalışma başlığında verilen; penetrasyon, köpürtme suyu yüzdesi ve bitüm sıcaklığı değerleri girdi olarak kullanılırken, genleşme oranı ve yarılanma süresi değerleri model çıktıları olmuştur. Son olarak deney ve model verileri kıyaslanarak sonuçlar ortaya koyulmuştur.

## **II. DENEYSEL ÇALIŞMA**

Bitümlerin köpürme özelliklerinin belirlenmesi için Wirtgen [13]'de önerilen ve aşağıda anlatılan prosedürden yararlanılmıştır.

Genleşme oranının bulunabilmesi için öncelikle köpürtülecek miktarda bitümün köpürtme öncesi hacminin hesaplanması gereklidir. Bu nedenle her bitüm sınıfı için, köpürtme kovasına ısıtılmış (sıvı haldeki) bitüm koyularak yükseklikleri ölçüm çubuğu vasıtasıyla ölçülmüş ve bu değere göre kapladıkları hacimler hesaplanmıştır (Tablo 2).

*Tablo 2. Kullanılan bitümlerin köpürmemiş haldeki hacimleri*

<b>Bitüm Sınıfı</b>	<b>Minimum ER</b>	<b>Minimum HL</b>
50/70	53,6	479,13
70/100	85,2	481,17
100/150	102,1	487,29
160/220	172	489,33

Daha sonra her bitüm sınıfı için 160°C, 170°C ve 180°C sıcaklıklarda, her sıcaklık için %1-2-3-4 su içeriklerinde, her su içeriği için 3'er defa olmak üzere (bir bitüm sınıfı için toplam 36 kez) bitüm

köpürtme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Her köpürtme işlemi 500gr. bitüm kullanarak gerçekleştirilmiştir.



*Şekil 3. Bitüm köpürtme işlemi ve köpürtme işlemi sonrası sönmüş bitüm*

Her köpürtme işlemi öncesi, bitümün püskürtüleceği kova, anlık ısı kaybını önlemek ve buna bağlı bitümün erken çökmesini engellemek için, etüvde 70°C sıcaklığa ısıtılmıştır. Köpürtme işlemleri öncesinde köpürtme kovaasına ölçüm çubuğu yerleştirilerek maksimum genişleme noktaları bu çubuk vasıtasıyla belirlenmiştir.

Köpürme esnasında bitüm püskürtülmesi tamamlandıktan sonra köpüğün maksimuma ulaştığı ve bu seviyenin yarısına düştüğü noktalar gözlemlenerek ve aynı anda kronometre yardımıyla da bu süreler ölçülerek yarılanma süreleri belirlenmiştir. Daha sonra kova içerisindeki ölçüm çubuğu çıkarılarak köpüğün ulaştığı en yüksek nokta cm cinsinden ölçülmüş ve genişleme miktarı da bu sayede belirlenmiştir. Bu miktara göre belirlenen hacim bitümün köpürmemiş hacmine oranlanarak genişleme oranı değerleri her köpürtme işlemi için bulunmuştur (Tablo 3-4-5-6).

*Tablo 3. 50/70 sınıfı bitüm için gerçekleştirilen 3'er köpürmenin ortalama değerleri*

<b>Köpürtme Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Su Yüzdesi (%)</b>	<b>Ort. Genleşme Oranları</b>	<b>Ort. Yarılanma Süreleri (s)</b>
160	1	13,97	11,06
	2	18,68	12,75
	3	19,03	11,2
	4	20,82	10,29
170	1	15,42	11,21
	2	19,03	10,15
	3	21,91	9,95
	4	23,37	9,37
180	1	15,78	9,64
	2	19,75	10,88
	3	21,55	9,65
	4	24,09	8,46

**Tablo 4.** 70/100 sınıfı bitüm için gerçekleştirilen 3'er köpürtmenin ortalama değerleri

<b>Köpürtme Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Su Yüzdesi (%)</b>	<b>Ort. Genleşme Oranları</b>	<b>Ort. Yarılanma Süreleri (s)</b>
160	1	15,72	11,14
	2	18,60	9,92
	3	20,37	9,39
	4	22,18	8,37
170	1	16,44	11,21
	2	20,01	10,27
	3	20,73	9,77
	4	24,34	8,51
180	1	16,44	9,26
	2	20,01	9,66
	3	21,82	9,20
	4	25,42	7,81

**Tablo 5.** 100/150 sınıfı bitüm için gerçekleştirilen 3'er köpürtmenin ortalama değerleri

<b>Köpürtme Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Su Yüzdesi (%)</b>	<b>Ort. Genleşme Oranları</b>	<b>Ort. Yarılanma Süreleri (s)</b>
160	1	18,71	10,36
	2	19,41	10,48
	3	20,83	9,20
	4	25,45	7,57
170	1	19,41	10,13
	2	21,19	10,20
	3	24,75	7,73
	4	25,81	6,56
180	1	18,71	9,32
	2	19,76	9,87
	3	22,62	8,66
	4	25,81	7,05

**Tablo 6.** 160/220 sınıfı bitüm için gerçekleştirilen 3'er köpürtmenin ortalama değerleri

<b>Köpürtme Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Su Yüzdesi (%)</b>	<b>Ort. Genleşme Oranları</b>	<b>Ort. Yarılanma Süreleri (s)</b>
160	1	18,99	9,74
	2	20,74	9,28
	3	23,23	8,04
	4	25,00	7,13
170	1	19,68	9,34
	2	20,74	8,93
	3	23,25	8,68
	4	25,35	7,00
180	1	17,58	9,06
	2	22,52	9,08
	3	23,20	8,90
	4	26,05	7,23

Deneyisel bulgular ışığında; hem genişleme oranı hem de yarılanma süresi için elde edilen deneysel sonuçların literatürde önerilen limitleri (Tablo 1) genel olarak sağladığı görülmektedir.

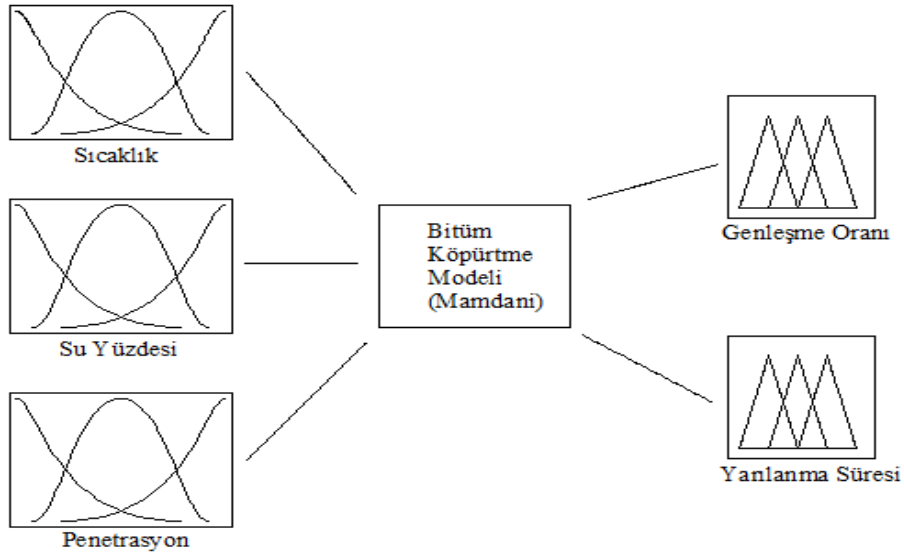
Tablo 3-4-5 ve 6 'ya göre şu genellemeler yapılabilir:

- Yarılanma sürelerinin bitüm sıcaklığı arttıkça azaldığı ve genişleme oranlarının bitüm sıcaklığı arttıkça arttığı görülmektedir.
- Aynı bitüm sıcaklığında su miktarı artırılırsa yarılanma süresi azalmakta ve genişleme oranı artmaktadır.
- Su miktarındaki değişikliklerin bitüm sıcaklığına göre genişleme oranı değerlerini daha fazla etkilediği görülmektedir.
- Bitüm penetrasyon değeri arttıkça, genişleme oranı değerleri artmakta ve yarılanma süresi değerleri azalmaktadır.

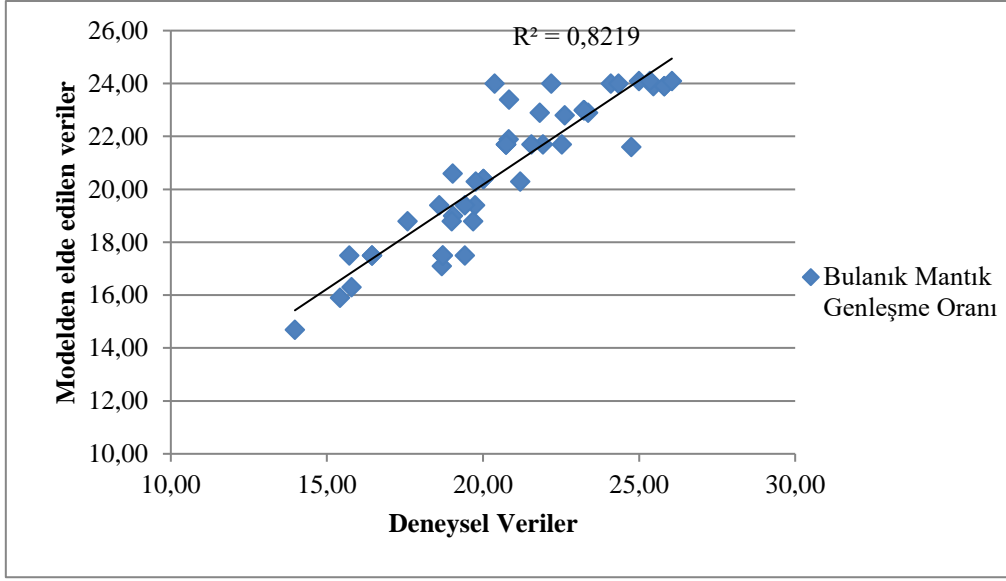
### **III. GELİŞTİRİLEN MODELLER**

#### **A. BULANIK MANTIK**

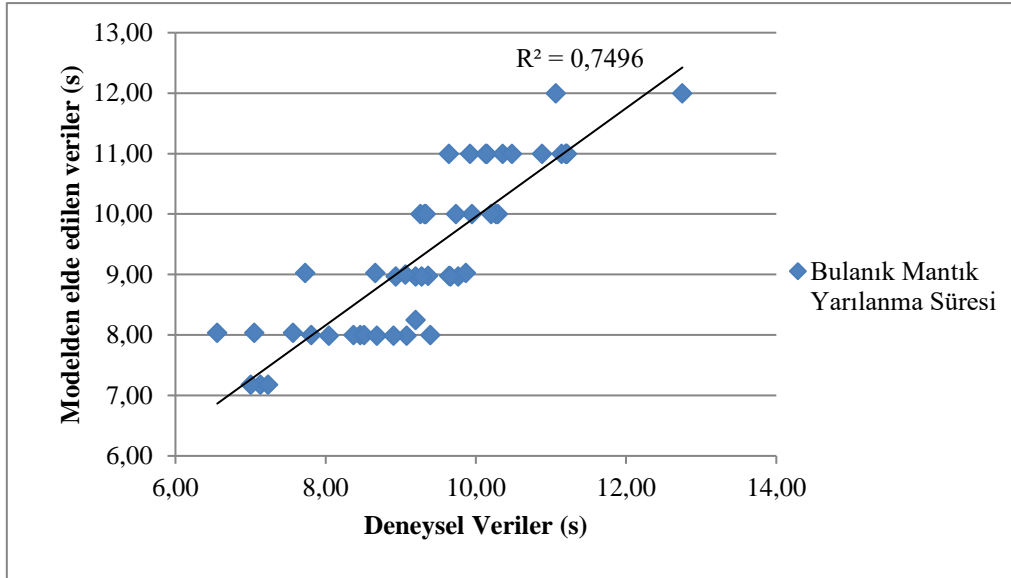
Model için mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Model, 3 girdi ve 2 çıktıdan oluşmaktadır (Şekil 4). Üyelik fonksiyonlarının ayakları, yukarıda bahsedilen sıcaklık, su yüzdeleri ve penetrasyon değerlerine göre oluşturulmuştur. Modelden elde edilen verilere göre Şekil 5 ve 6'da görülen  $R^2$  (belirleme katsayısı) değerleri elde edilmiştir. Bilindiği gibi belirleme katsayısı y eksenindeki değişkenliğin regresyon doğrusu tarafından ne kadar açıklanabildiğini ifade eder ve bu değerdeki artış elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır.



*Şekil 4. Bulanık mantık model yapısı*



Şekil 5. Deneyisel olarak bulunan genleşme oranlarının Bulanık mantıktan elde edilen genleşme oranlarıyla kıyaslanması sonucunda oluşturulan dağılım grafiği

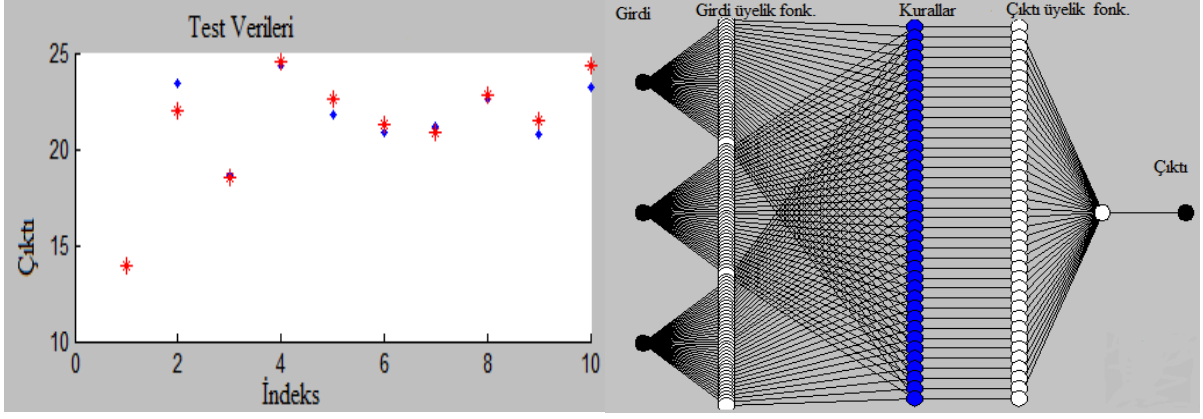


Şekil 6. Deneyisel olarak bulunan yarılanma sürelerinin Bulanık mantıktan elde edilen yarılanma süreleriyle kıyaslanması sonucunda oluşturulan dağılım grafiği

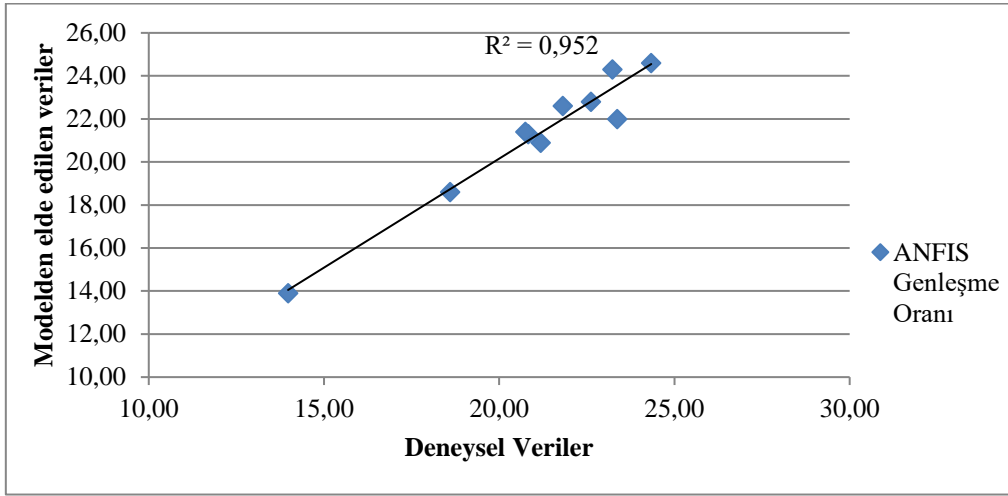
## B. ANFIS

ANFIS bulanık çıkarım yönteminde Sugeno tipi model kurulmuştur. 36 adet bulanık kuraldan oluşan birinci derece modelde Deneyisel Çalışma başlığında bulunan deneysel verilerin rastgele seçilen %80'i eğitim amaçlı kullanılmış ve kalan %20'si ise model aracılığıyla test edilmiştir (Şekil 7). Modelden elde edilen verilere göre Şekil 8 ve 9'da görülen  $R^2$  değerleri elde edilmiştir.

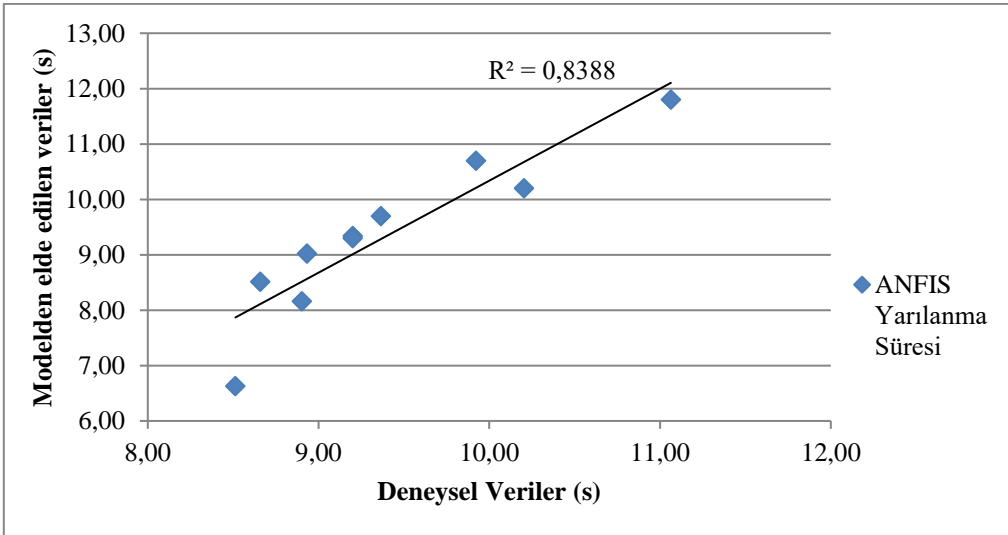




Şekil 7. Verilerin test edilmesi ve ANFIS model yapısı



Şekil 8. ANFIS modeli kullanılarak genişleme oranı için tahmin edilen değerlerin dağılım grafiği



Şekil 9. ANFIS modeli kullanılarak yarılanma süresi için tahmin edilen değerlerin dağılım grafiği

## C. MODEL BULGULARININ TARTIŞILMASI

Deneysel olarak elde edilen sonuçların Bulanık Mantık ve ANFIS'ten bulunan sonuçlarla kıyaslanması sonucunda çizilen dağılım grafikleri incelendiğinde; hem genişleme oranı hem de yarılanma süresi için  $R^2$  değerlerinin daha yüksek bulunması, ANFIS yönteminin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermiştir. ANFIS yönteminin hem YSA hem de bulanık mantığın özelliklerini barındırması ve eğitim verileriyle öğrenebilmesi bu sonucu doğurmuştur.

İlaveten her iki yöntemde de genişleme oranı sonuçları yarılanma süresi sonuçlarına göre deneysel sonuçlara daha yakın çıkmıştır. Bunun nedeninin, yarılanma süresinin tamamen gözleme dayalı olması, buna karşın genişleme oranı değerlerinin ölçüm çubuğuyla bulunması bunun olduğu düşünülmektedir.

## IV. SONUÇLAR

Köpük bitümlerle yapılan üretimlerde; bitümün köpürtülmesi için kullanılacak optimum su miktarının bulunması ve ideal karışım için bitüm sınıfı seçimi en önemli noktalardır. Köpürtme için gereken optimum suyun belirlenmesi ve bitüm sınıfı seçimi için öncelikle ER ve HL parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmada, 50/70-70/100-100/150 ve 160/220 bitüm sınıflarının ideal köpürme özellikleri belirlenerek farklı bitüm sınıflarının köpürme davranışları kıyaslanmıştır. Deneysel veriler Bulanık Mantık ve ANFIS yöntemleriyle modellenmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Deneysel sonuçlara göre; yumuşak bitümler, daha sıcak bitümler ve daha fazla köpürtme suyu yüzdesi genişleme oranı açısından daha iyi ancak yarılanma süresi açısından daha kötü sonuçlar vermektedir. Model sonuçları, her iki yöntemden de, ama özellikle ANFIS yönteminden, gerçekçi ve uygulanabilir veriler elde edildiğini göstermektedir.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma, 4939-D1-17 numaralı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından ve KGM-ARGE/2017-1 numaralı proje ile Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] A. L. Wang, Z. S. Fu, F. M. Liu, "Asphalt foaming quality control model using neural network and parameters optimization," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 11, pp. 401–407, 2018.
- [2] F. Dong, X. Yu, X. Liang, G. Ding, J. Wei, "Influence of foaming water and aging process on the properties of foamed asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 153, pp. 866–874, 2017.
- [3] D. Rettner, "Overview of mix design and construction," presented at 28th Annual Regional Local Road Conference Foamed Asphalt, Rapid City, USA, 2013.
- [4] K. J. Jenkins, "Mix design considerations for cold and half-cold bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen," Ph.D. dissertation, University of Stellenbosch, South Africa, 2000.
- [5] D. E. Newcomb, E. Arambula, F. Yin, J. Zhang, A. Bhasin, W. Li, Z. Arega, "Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications," National Cooperative Highway Research Program, Washington DC, USA, NCHRP Rep.807, 2015.

- [6] M. R. M. Hasan, Z. You, X. Yang, "A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques," *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 115–133, 2017.
- [7] K. M. Muthen, "Foamed asphalt mixes - mix design procedure," *Sabita Ltd & CSIR Transportek*, Pretoria, South Africa, Rep. CR-98/077, 1998.
- [8] M. Namutebi, B. Birgisson, A. Guarin, D. Jelagin, "Exploratory study on bitumen content determination for foamed bitumen mixes based on porosity and indirect tensile strength," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 131-144, 2017.
- [9] G. P. He, W.G. Wong, "Decay properties of the foamed bitumens," *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp. 866–877, 2006.
- [10] L. P. F. Abreu, J. R. M. Oliveira, H. M. R. D. Silva, D. Palha, P. V. Fonseca, "Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates," *Construction and Building Materials*, vol. 142, pp. 342–353, 2017.
- [11] G. B. Arguelles, F. Giustozzi, M. Crispino, G. W. Flintsch, "Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen," *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 423-433, 2014.
- [12] M. F. Saleh, "Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilized mixes," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 99-110, 2007.
- [13] *Cold recycling–Wirtgen cold recycling technology*, 1st ed., Wirtgen Gmbh, Windhagen, Germany, 2012.
- [14] C. W. Schwartz, S. Khosravifar, "Design and evaluation of foamed asphalt base materials," *State Highway Administration*, Maryland, USA, Rep. SP909B4E, 2013.
- [15] G. P. He, W. G. Wong, "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 30–40, 2008.
- [16] *Technical guideline, bitumen stabilised materials - a guideline for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilized materials*, 2nd ed., Asphalt Academy Co., Pretoria, South Africa, 2009.
- [17] S. Maccarrone, G. Holleran, A. Ky, "Cold asphalt systems as an alternative to hot mix," presented at 9th AAPA International Asphalt Conference, Surfers Paradise Qld, Australia, 1995.
- [18] L. J. Milton, M. Earland, "Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in situ recycling," *Transport Research Laboratory*, Wokingham, United Kingdom, Rep. 386, 1999.
- [19] J. Ramanujam, J. Griffin, "Review of insitu foam bitumen stabilization practises in Queensland," presented at Engineering Technology Forum, Brisbane, Australia, 2016.
- [20] L. A. Zadeh, L.A., "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-352, 1965.
- [21] D. Moazami, H. Behbahani, R. Muniandy, "Pavement rehabilitation and maintenance prioritization of urban roads using fuzzy logic," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 12869–12879, 2011.

- [22] N. Mathur, I. Glesk, A. Buis, “Comparison of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and gaussian processes for machine learning (GPML) algorithms for the prediction of skin temperature in lower limb prostheses,” *Medical Engineering and Physics*, vol. 38, pp. 1083-1089, 2016.
- [23] J. S. R. Jang, “ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993.
- [24] B. Gökçe, G. Sonugür, “ANFIS ve YSA yöntemleri ile işlenmiş doğal taş üretim sürecinde verimlilik analizi,” *AKÜ FEMÜBİD*, c. 16, ss. 174-185, 2016.