

Mermer ve beton atıkları ile üretilen bitümlü sıcak karışımların Marshall parametrelerinin incelenmesi ve YSA ile tahmin edilmesi

Investigation of Marshall parameters of bituminous hot mixtures produced with marble and concrete wastes and estimation by ANN

Erdinç Halis ALAKARA*, Melih Naci AĞAOĞLU, Sinan NACAR

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat

• Geliş tarihi / Received: 26.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 31.01.2023

Öz

Bu çalışmada, mermer ve beton atıkları ile üretilen bitümlü sıcak karışımların binder tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında, altı farklı agrega karışım grubu için Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak 126 adet asfalt numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin pratik özgül ağırlık (D_p), hava boşluğu (V_h), bitümle dolu boşluk (V_f), agregalar arası boşluk (VMA), Marshall stabilitesi (MS) ve akma değerleri yapılan deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Daha sonra, agrega karışım gruplarındaki yüzdesel oranlar ve bitüm yüzdesi bağımsız değişkenleri kullanılarak klasik regresyon analizi (KRA) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri ile MS, V_h ve V_f değerleri tahmin edilmiştir. KRA yönteminde doğrusal (LF), üs (ÜF), üstel (EF) ve kuadratik (KF) olmak üzere dört farklı fonksiyon uygulanmış ve bu fonksiyonlara ait katsayılar hesaplanmıştır. YSA yönteminde ise farklı nöron sayıları kullanılarak modeller kurulmuş ve bu modeller arasından en başarılı tahmin oranına sahip model belirlenmiştir. Kullanılan yöntemlerin tahmin performanslarının değerlendirilebilmesi amacıyla çeşitli performans istatistikleri (ortalama karesel hatanın karekökü, ortalama mutlak hata, saçılım indeksi ve Nash Sutcliffe verimlilik katsayısı) kullanılmıştır. Elde edilen performans istatistikleri karşılaştırıldığında; KRA yönteminde kullanılan dört farklı fonksiyon içerisinde, en başarılı tahmin sonuçlarının KF'den elde edildiği görülmüştür. YSA'nın özellikle MS'yi tahmin etmede KF'ye kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. YSA modelinin NS performansı KF ile kıyaslandığında; MS, V_h ve V_f 'nin eğitim veri setini sırasıyla %13.58, %1.28, %0.86 oranında iyileştirdiği, test veri setlerini ise sırasıyla %48.57, %3.48 ve %1.78 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen performans istatistikleri, Marshall tasarımına ait performans özelliklerinin kısa bir süre içerisinde, daha az numune ve maliyet ile yüksek bir tahmin oranında belirlenebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Atık agrega, Bitümlü sıcak karışım, Klasik regresyon analizi, Marshall tasarımı, Yapay Sinir Ağları

Abstract

In this study, the usability of bituminous hot mixtures produced with marble and concrete wastes in the binder layer was investigated. Within the scope of the study, 126 asphalt samples were prepared using the Marshall Design Method for six different aggregate mixture groups. The practical specific gravity (D_p), air void (V_a), bitumen filled void (V_f), void of mineral aggregate (VMA), Marshall stability (MS) and flow values of the prepared samples were determined as a result of the experiments. Then, MS, V_a and V_f values were estimated by classical regression analysis (CRA) and Artificial Neural Networks (ANN) methods using percentage ratios in aggregate mixture groups and bitumen percentage independent variables. In the CRA method, four different functions, namely linear (LF), power (PF), exponential (EF) and quadratic (QF), were applied and the coefficients of these functions were obtained. In the ANN method, models were established using different neuron numbers and the model with the most successful prediction rate was determined among these models. Various performance statistics (root mean square error, mean absolute error, scatter index and Nash Sutcliffe efficiency coefficient) were used to evaluate the estimation performance of the methods. When the performance statistics are compared; among the four different functions used in the CRA method, it was seen that the most successful estimation results were obtained from QF. It has been found that ANN is more successful than QF, especially in predicting MS. When the NS performance of the ANN model is compared with the QF; It was observed that MS, V_a , and V_f improved the training dataset by 13.58%, 1.28%, and 0.86%, respectively, and the test datasets by 48.57%, 3.48%, and 1.78%, respectively. The performance statistics obtained as a result of the modeling studies showed that the performance characteristics of Marshall design can be determined in a short time, with less samples and cost, at a high estimation rate.

Keywords: Waste aggregate, Bituminous hot mixture, Classical Regression Analysis, Marshall design, Artificial Neural Network

* Erdinç Halis ALAKARA; erdinchalis.alakara@gop.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Bitümlü sıcak karışım (BSK), agrega ve bitümün kombinasyonundan oluşan kompozit yapıdan meydana gelmektedir. Agregalar, bu kompozit yapının iskeletini oluştururken bitüm ise yapıştırma görevini üstlenmektedir. BSK'nın yaklaşık olarak ağırlıkça %95'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu sebeple agrega özellikleri, BSK'nın performansı üzerinde doğrudan önemli bir etkiye sahiptir. BSK ile imal edilen kaplamalarda görülen tekerlek izi, soyulma vs. gibi üstyapı sorunları çoğu zaman yanlış agrega seçimine bağlanabilmektedir (Kandhal vd., 1997; Ahmedzade & Şengöz, 2009).

BSK'lar; stabilite, sürüş konforu, dayanıklılık ve su geçirimsizliği sağlamadaki üstün hizmet performansları nedeniyle tüm dünyada en yaygın kullanılan kaplama çeşididir (Yılmaz vd., 2011; Sargın vd., 2013). BSK üretiminde kullanılan agregaların büyük bir kısmı doğal taş ocaklarından elde edilmektedir. Ancak bu agregaların temin edilmesi sırasında çevre kirliliği oluşturulmakta dolayısı ile ekolojik dengeye büyük zararlar verilmektedir. Ayrıca kullanılan malzeme ve enerji maliyetleri de her geçen gün artış göstermektedir. Tüm bu durumlar araştırmacıları mevcut kaynakların idareli bir şekilde kullanımı ve alternatif agrega kaynakları üzerine araştırmalar yapmaya teşvik etmiştir (Yılmaz vd., 2011). Yapılan çalışmalarda genel olarak hem atık malzemelerin BSK'larda agrega olarak değerlendirilmesi hem de kaplama performans ve ömrünün artırılması hedeflenmiştir (Terzi & Vural, 2020; Chen vd., 2011a; Chen vd., 2011b; Kardeşin & Terzi, 2007; Akbulut ve Gürer, 2007; Huang vd., 2009). Dünyada oluşan katı atıkların yarısına inşaat sektörünün sebep olduğu bilinmektedir. Katı atıkların yaklaşık olarak %20-25'ini ise beton atıklarının oluşturduğu düşünülmektedir. Yüksek miktarda katı atık oluşturan bir diğer sektör de mermer madenciligidir. Mermerlerin ocaktan çıkarılması halinde %50 oranında atık parçalar oluşurken tesislerde işlenmesi sırasında %15-50 civarında atık tozlar meydana gelmektedir (Maçin ve Demir, 2018).

Atık malzemelerin BSK'larda kullanımına ve performanslarının değerlendirilmesine yönelik literatürde yer alan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir. Akbulut & Gürer (2007) Afyonkarahisar-İscehisar bölgesinde bulunan mermer ve andezit ocağı atıklarından üretilen geri dönüştürülmüş agregaların BSK'da kullanımını incelemiştir. Bu amaçla hem agrega deneyleri hem de Marshall testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, atık agregaların fiziksel özelliklerinin belirtilen sınırlar içinde olduğu ve bu atık malzemelerin potansiyel olarak hafif ila orta trafiğe sahip asfalt kaplamaların, binder tabakasında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Chen vd. (2011) asfalt karışımlarında filler agrega olarak geri dönüştürülmüş ince agrega tozunu kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ince agrega tozunun, su hassasiyeti ve yorulma direnci dahil üzere asfalt karışımların özelliklerini iyileştirebileceği görülmüştür. Özellikle sıcak bölgelerdeki asfalt kaplamalarda ince agrega tozunun kullanılmasının uygun olabileceği tespit edilmiştir. Akbulut vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada, graniti kesme ve cilalama işlemi sırasında ortaya çıkan atık granit çamurunun BSK'da filler agrega olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Karışımlarda atık granit %0, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında filler agrega olarak kullanılmış ve her bir filler oranı için Marshall yöntemi kullanılarak optimum bitüm oranları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre BSK'da filler agrega olarak optimum %7.3 oranında granit çamuru kullanılması ile aşınma tabakaları için mühendislik özelliklerinin iyileştirebileceği tespit edilmiştir. Arabani vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada, dasit ve geri dönüştürülmüş atık betonun BSK'da kullanımını incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre Marshall stabilitesi, yorulma, kalıcı deformasyon ve esneklik modülü bakımından optimum özellikleri gösteren karışımın kaba agrega olarak dasit, ince agrega olarak beton atığının kullanıldığı karışımların olduğu tespit edilmiştir. Gedik vd. (2021) geri dönüştürülmüş floresan lamba atıklarının BSK'da filler agrega olarak kullanımını araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda, atık floresan lambaların düşük ve orta trafiğe maruz kalan yollarda kullanılmasının uygun olabileceği görülmüştür. Ayrıca hem maliyet açısından tasarruf sağlayacağı hem de çevre kirliliğinin de büyük ölçüde önlenilebileceği tespit edilmiştir.

Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin de gelişmesi ile mühendislik problemlerinin çözümünde modelleme tabanlı birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir (Mardani-Aghabaglou vd., 2021; Karasu vd., 2020; Xu vd., 2021). Yapılan çalışmalar incelendiğinde, esnek üst yapılara ait parametrelerin farklı yöntemler kullanılarak tahmin edilebileceği görülmüştür (Ektaş & Karacasu, 2012; Kara & Karacasu, 2017; Pourtahmasb vd., 2015; Arslan & Bayırtepe, 2018). Ozgan (2011) yapmış olduğu çalışmada asfalt numunelerinin farklı sıcaklık ve bu sıcaklıklara maruz kalma sürelerine göre belirlemiş olduğu Marshall stabilitesi değerlerini yapay sinir ağı (YSA) kullanarak modellemiştir. Modelde girdi parametreleri olarak asfalt numunelerinin fiziksel özellikleri, numunelerin maruz kaldığı sıcaklık ve süre değerleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda deney verileri ile YSA

modelinden elde edilen tahmin verileri arasındaki korelasyon katsayısının (eğitim ve test verileri için sırasıyla %96.9 ve %93.3) oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Chandra vd. (2013) çalışmalarında IRI ile oyulma, çatlaklar, tekerlek izi, soyulma ve yama gibi bozulma parametreleri arasındaki ilişkiyi doğrusal regresyon, doğrusal olmayan regresyon ve YSA yaklaşımlarını kullanarak modellemişlerdir. Çalışmada geliştirilen modeller kıyaslandığında, YSA'nın tahmin yeteneğinin diğer regresyon yöntemlerine kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Shafabakhsh & Tanakizadeh (2015) uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemini kullanarak yüklem özelliklerinin asfalt karışımlarının esneklik modülü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. ANFIS modelinde giriş katmanı parametreleri olarak sıcaklık, yüklem süresi ve dinlenme süresinin yüklem süresine oranı (R/L) değerleri kullanılırken çıkış katmanı olarak esneklik modülü verileri kullanılmıştır. Tahmin edilen esneklik modülü değerleri ile deneysel veriler arasında çok yakın ilişki olduğu ve R^2 değerinin %99.33 olduğu tespit edilmiştir. Arslan & Bayırtepe (2018) BSK'lara ait akma değerlerini malzeme ve karışım özelliklerine bağlı olarak regresyon modelleri kullanarak tahmin etmişlerdir. Geliştirilen modellerde regresyon katsayısı %73.9'a kadar ulaşmıştır. Zehtabchi vd. (2018) BSK'ya ilave etmiş oldukları polimer yüzdesi ve karışımlarda kullanılan geomateriyalin kırılma yüzdesine bağlı olarak Marshall stabilitesi değerlerini bulanık mantık yöntemiyle tahmin etmişlerdir. Çalışma sonucunda %5.12'lik bir hata oranıyla stabilize değerlerinin yüksek ölçüde tahmin edilebileceği görülmüştür. Kırbaç vd. (2018) düzgünlük (IRI) ile kaplamalardaki yüzey bozulmaları arasındaki ilişkiyi doğrusal regresyon, çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (MARS) ve YSA yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Yapılan modelleme çalışması sonucunda, en başarılı tahmin sonuçlarının YSA modelinden elde edildiği bunu sırasıyla MARS ve doğrusal regresyon yöntemlerinin izlediği belirtilmiştir. Kıyıldı (2021) yapmış olduğu çalışmada, YSA metodunu kullanarak bitüm yüzdesi, hacim özgül ağırlığı ve boşluk değerlerine bağlı olarak Marshall stabilitesi (MS) değerlerini tahmin etmiştir. Tahmin edilen değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Tokat ili Türkiye'deki mermer rezervinin yaklaşık %20'sine sahiptir (Ertaş vd., 2011). Bu rezervlerden çıkarılan mermerlerden kaynaklı olarak ortaya çıkan atıkların Tokat'taki yol inşaatlarında kullanılarak bertaraf edilebilirliği bu çalışmanın motivasyonu olmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, atık mermer agregalarının BSK'da kullanılması halinde stabilitede düşüslere neden olduğu görülmüştür. Bu amaçla çalışma kapsamında, mermer agregaları atık beton agregaları ile birlikte kullanılarak bu iki atık malzemenin stabiliteye etkisi incelenmiştir. Ayrıca deneyler sonucunda elde edilen MS, hava boşluğu (V_h) ve bitümle dolu boşluk (V_f) gibi Marshall parametreleri klasik regresyon analizi (KRA) ve YSA yöntemleri ile kurulan farklı modeller altında tahmin edilmiştir. Hazırlanan modellerde bitüm ve agrega karışım oranları bağımsız değişken olarak, MS, hava boşluğu oranı (V_h) ve bitümle dolu boşluk (V_f) değerleri ise bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. KRA modellerinde doğrusal (LF), üs (ÜF), üstel (EF) ve kuadratik (KF) olmak üzere dört farklı fonksiyon uygulanmış ve bu fonksiyonlara ait katsayılar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar farklı performans istatistikleri kullanılarak kıyaslanmış ve deneysel sonuçlara en yakın değerleri veren fonksiyonlar ve bu fonksiyonlara ait katsayılar belirlenmiştir. Daha sonra KRA'da en başarılı tahmin sonuçlarını veren fonksiyon ile YSA modelinden elde edilen tahmin sonuçları birbiri arasında kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

2.1. Materyal ve karışım oranları

2.1. Material and mixing ratios

Çalışmada 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. Tablo 1'de bitümün fiziksel özellikleri verilmiştir. Agrega olarak kalker kökenli doğal agrega, atık mermer ve beton atığı agregası olmak üzere üç farklı agrega kullanılmıştır. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 2'de gösterilmiştir. Agregalar, karışımlarda farklı oranlarda kullanılmış olup toplamda altı farklı agrega karışım grubu hazırlanmıştır.

Tablo 3'te karışım gruplarına ait yüzdesel oranlar verilmiştir. Agrega karışımları hazırlanmadan önce mermer ve beton atığı agregaları, doğal agreganın elenmesi işleminde kullanılan eleklerden elenmiştir. Hazırlanan karışımlarda mermer atığı agregası kaba agrega grubuna %100 oranında, beton atığı agregası ise ince agrega grubuna %25 ve %50 oranında ikame edilmiştir. Filler agrega grubu tüm karışımlarda sabit tutulmuş olup %100 oranında kalker kökenli doğal agrega içermektedir.

Tablo 1. Bitümün fiziksel özellikleri
Table 1. Physical properties of bitumen

Test	Deney sonucu	Standart
Penetrasyon (25°C)	58	TS EN 1426
Yumuşama Noktası (°C)	50	TS EN 1427
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	1.036	TS 1013 EN ISO 3675
Düktilite (25°C, 5 cm/min)	> 100	TS EN 13589
Parlama Noktası (°C)	302	TS EN ISO 2592

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri
Table 2. Physical properties of aggregates

Malzeme özellikleri	Doğal agregata			Atık mermer	Beton atığı	Standart
	Kaba	İnce	Filler	Kaba	İnce	
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.714	2.734	2.724	2.71	2.68	TS EN 1097-6
Su emme (%)	0.45	0.67	-	0.30	6.82	TS EN 1097-6
Los Angeles Aşınma değeri	20.65	-	-	20.78	-	TS EN 1097-2
Yassılık indeksi değeri (%)	17.6	-	-	23.1	-	BS 812
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	1.54	1.86	-	1.48	1.55	TS EN 1097-3
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	1.40	1.69	-	1.33	1.42	TS EN 1097-3

Tablo 3. Agregata gruplarının karışım oranları
Table 3. Mixing ratios of aggregate groups

Grup adı	Kaba agregata (Σ %100)		İnce agregata (Σ %100)		Filler agregata (Σ %100)
	Doğal	Mermer atığı	Doğal	Beton atığı	Doğal
1	100	-	100	-	100
2	-	100	100	-	100
3	-	100	50	50	100
4	100	-	50	50	100
5	-	100	75	25	100
6	100	-	75	25	100

Şekil 1’de binder tabakası için hazırlanmış olan agregata gradasyon eğrisi gösterilmiştir. Hazırlanan agregata gradasyonuna göre karışımın; %58.6’sı kaba agregata, %36.7’si ince agregata ve %4.7’si filler agregatadan oluşmaktadır.

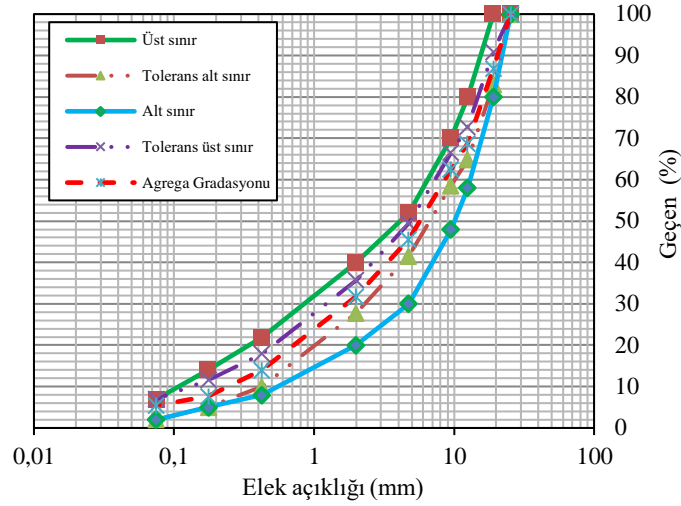
2.2. Metot

2.2. Method

2.2.1. Marshall tasarımı

2.2.1. Marshall design

BSK numuneleri hazırlanırken Marshall Tasarım Metodu kullanılmıştır. Tablo 3’te verilen her bir agregata karışım grubu için 7 farklı bitüm oranı (%3.5-%4-%4.5-%5-%5.5-%6-%6.5) ve her bir bitüm oranı için de üç adet olmak üzere toplamda 126 (6×7×3) adet numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken 1150 gram agregata karışımları ile bitüm 155 °C sıcaklığa ulaşmaya kadar etüvde ısıtılmıştır. Daha sonra agregata ve bitüm tartılarak alttan ısıtma özelliğine sahip karıştırıcı ile karıştırılmış ve kalıplara yerleştirilerek Marshall tokmağı ile 75 darbe yapılarak sıkıştırılmıştır. Numuneler soğuduktan sonra test aşamasına geçilerek pratik özgül ağırlık (D_p), V_h , V_f , agregatlar arası boşluk (VMA), MS ve akma değeri parametreleri belirlenmiştir. Son olarak “Hava boşluğu-Bitüm oranı” grafiğinden her bir agregata karışım grubuna ait optimum bitüm oranı belirlenmiştir (KGM, 2021).



Şekil 1. Agregra gradasyon eğrisi
Figure 1. Aggregate gradation curve

2.2.2. Klasik regresyon analizi (KRA)

2.2.2. Classical regression analysis (CRA)

İki ya da daha fazla rastgele değişkenin olduğu problemlerde, değişkenlerin aynı gözlem sırasında aldığı değerler istatistiksel olarak birbirinden bağımsız değildir. Bu değişkenlerin birbiri arasında önemli bir ilişki vardır. Ancak bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiler fonksiyonel değildir. Kısaca açıklanacak olursa; bağımsız değişkenin birisi bir değer aldığı anda diğer değişkenler de bu değere karşılık her zaman aynı değeri alamayabilir. Fonksiyonel olmayan bu ilişkiyi gösteren matematiksel ifadeye regresyon denklemi denir (Bayazıt & Oğuz, 2005; Nacar vd., 2018). Çalışma kapsamında kullanılan fonksiyonlar Eşitlik 1-4'te verilmiştir.

$$y_{Doğrusal} = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots + w_n x_n \quad (1)$$

$$y_{Üs} = w_0 x_1^{w_1} x_2^{w_2} x_3^{w_3} x_4^{w_4} \dots x_n^{w_n} \quad (2)$$

$$y_{Üstel} = w_0 + \exp(w_1 + w_2 x_1 + w_3 x_2 + \dots + w_{n-1} x_n) \quad (3)$$

$$y_{Kuatratik} = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_5 x_1 x_2 + w_6 x_1 x_3 + \dots + w_{11} x_1^2 + w_{12} x_2^2 + \dots + w_{14} x_4^2 \quad (4)$$

Verilen eşitliklerde w 'ler regresyon katsayılarını, x 'ler bağımsız değişkenleri gösterirken y 'ler ise MS , V_h ve V_f değerlerini göstermektedir. KRA, bir rastgele değişkenin değerini bir veya daha fazla sayıda değişkenin değerine bağlı olarak tahmin etmeye yarayan matematiksel ifadenin belirlenmesidir (Bayazıt, 1981). KRA, değişkenler arasındaki ilişkiyi belirleyerek tahmin eşitliğini geliştirir. Bu sayede, bağımsız değişkenlerin değerleri bilindiğinde bağımlı değişkenler tahmin edilebilmektedir (Arslan & Bayırtepe, 2018; Şentürk, 2008; Ünver & Gamgarn, 1996).

2.2.3. Yapay sinir ağı (YSA)

2.2.3. Artificial neural network (ANN)

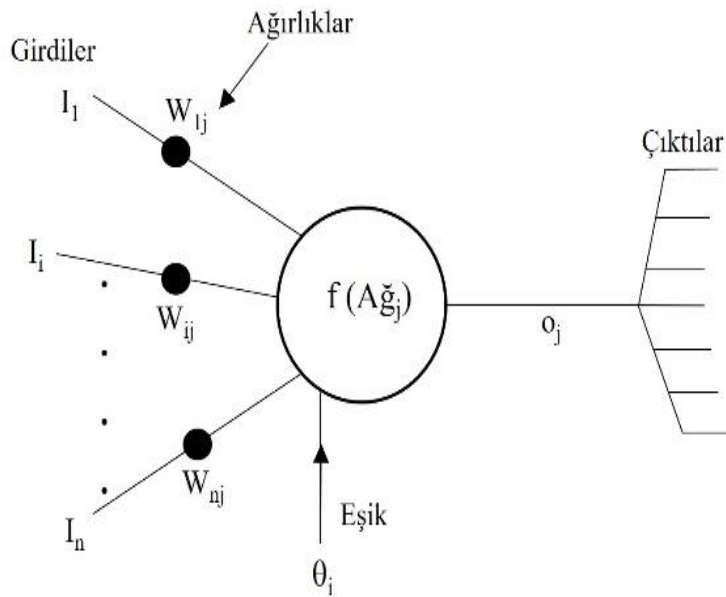
YSA, beyin gibi biyolojik sistemlerden ilham alan bir bilgi işleme yöntemidir. Sinir ağları, belirli sorunları çözmek için uyum içinde çalışan çok sayıda işlem ögelerinden (nöron) oluşmaktadır. Nöronlar, yönlendirilmiş bağlantılar sayesinde birbirlerine bağlanırlar. Her bir bağlantı kendisiyle ilişkilendirilmiş bir ağırlığa sahiptir. YSA, ağa bilinmeyen bir veri girildiğinde geçmiş deneyimlerine dayalı olarak en etkili çözümü bulabilme mantığına sahiptir (Kok vd., 2010). Şekil 2'de YSA nöronunun yapısal şeması verilmiştir. Burada, $I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$ girdi değerleri ve $w_{1j}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{nj}$ ağırlık değeri olarak kabul edilirse $Ağ_j$, gelen nöronun aktivasyonunun çarpımlarının toplamıdır. Eşik değeri olan θ_j ise çıktıya eklenir. Eşitlik 5'te $Ağ_j$ verilmiştir. Burada;

- i , girdi nöronlarının vektör gösterimini,
- n , girdi nöron sayısını,
- w ağırlıkların vektör gösterimini,
- θ_i eşik noktasını göstermektedir.

O_j olarak gösterilen j 'inci nöral bağlantının çıktısı olarak kabul edilen aktivasyon fonksiyonu Eşitlik 6'da verilmiştir. Bu fonksiyon, bir nöronun giriş modelini belirten çıktı aralığına eşitlemek için kullanılmaktadır. En sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları tanjant hiperbolik, tanjant sigmoid ve doğrusal fonksiyonlardır. YSA mimarisinde temel olarak giriş tabakası, gizli tabaka ve çıkış tabakası bulunmaktadır (Kırbaş vd., 2018; Kızılda, 2021).

$$A\check{g}_j = \sum_{i=1}^n I_i W_{ij} + \theta_i \quad (5)$$

$$O_j = f(A\check{g}_j) \quad (6)$$



Şekil 2. YSA nöronunun fonksiyonel yapısı (Kırbaş vd., 2018)

Figure 2. The functional structure of the ANN neuron (Kırbaş vd., 2018)

2.2.4. Modelleme

2.2.4. Modeling

Modelleme çalışmalarında kaba mermer agrega (KMA), ince beton agrega (İBA) ve bitüm oranı (BO) değerleri bağımsız değişken olarak MS , V_h , V_f değerleri ise bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Toplamda 42 adet veri kullanılarak hazırlanan modelde 30 adet veri eğitim için, 12 adet veri ise test için ayrılmıştır. Verileri eğitim ve test setlerine ayırırken her iki sette de tüm veri grubunu temsil edebilecek değerlerin olmasına özen gösterilmiştir. Eğitim veri seti için en yüksek performansı veren modeller test veri takımı kullanılarak ayrıca değerlendirilmiştir. Tablo 4'te eğitim, test ve tüm veriler için en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma temel istatistik değerleri gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin değer aralıkları farklı olduğu için modellenmesi zorlaşabilmektedir. Bu sebeple çözümün daha hızlı ve daha kolay elde edilmesi amacıyla verilere normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda veri setinde bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait veriler 0.1 ile 0.9 arasında normalize edilmiştir. Bu işlem Eşitlik 7'de verilen formül kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bayram vd., 2015).

$$\text{Normalize değer} = \left[\frac{\text{Ham değer} - \text{Minimum değer}}{\text{Maksimum değer} - \text{Minimum değer}} \right] \times (0.8) + 0.1 \quad (7)$$

Tablo 4. Modellemedeki değişkenlere ait temel istatistikler
Table 4. Basic statistics of the variables in the modeling

Veri seti	Değişken	Birim	En küçük	Ortalama	En büyük	Standart sapma
Tümü	BO	%	3.5	5.0	6.5	1.00
	KMA	%	0.0	50	100	50.00
	İBA	%	0.0	25	50	20.41
	MS	kg	954	1256.2	1557	137.92
	V _h	%	0.96	4.10	8.98	2.37
	V _f	%	38.5	70.6	93.5	16.37
Eğitim	BO	%	3.5	5.0	6.5	1.04
	KMA	%	0.0	50	100	50.00
	İBA	%	0.0	25	50	20.41
	MS	kg	954	1244.3	1557	137.45
	V _h	%	0.96	4.13	8.98	2.51
	V _f	%	38.5	70.4	93.5	17.41
Test	BO	%	3.5	5.0	6.5	0.89
	KMA	%	0.0	50	100	50.00
	İBA	%	0.0	25	50	20.41
	MS	kg	1126	1286.2	1533	134.49
	V _h	%	1.44	4.04	7.68	1.98
	V _f	%	48.3	71.1	89.8	13.43

2.2.5. Model performansının değerlendirilmesi

2.2.5. Evaluation of model performance

Kullanılan modellerin tahmin performanslarını karşılaştırmak amacıyla ortalama karesel hatanın karekökü (OKHK), ortalama mutlak hata (OMH), saçılım indeksi (SI) ve Nash Sutcliffe verimlilik katsayısı (NS) performans istatistikleri Eşitlik 8-11 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$OKHK = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - td_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_i - td_i| \quad (9)$$

$$SI = \frac{OKHK}{\bar{t}} \quad (10)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - td_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (11)$$

Verilen eşitliklerde; t_i ölçüm değerlerini, td_i tahmin değerlerini, \bar{t} ölçüm değerlerinin ortalamasını ve n veri sayısını göstermektedir. NS değeri $-\infty$ ile 1 arasındadır. NS=1 olması, kullanılan yöntemin mükemmel olduğunu belirtmektedir. [Moriasi vd. \(2007\)](#) NS için Tablo 5'teki gibi bir aralık önermişlerdir.

Tablo 5. NS değer aralığı

Table 5. NS value range

Parametre	Çok iyi	İyi	Yeterli	Yetersiz
NS	0.75-1.00	0.65-0.75	0.50-0.65	<0.50

3.Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Deneysel sonuçların değerlendirilmesi

3.1. Evaluation of experimental results

Marshall numunelerine ait parametreler yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda %5 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm değeri, optimum bitüm miktarı olarak kabul edilmiştir. Optimum bitüm miktarına karşılık gelen asfaltla dolu boşluk, agregalar arası boşluk, stabilite ve akma değerlerinin şartname limitlerine uygunluğu kontrol edilmiştir (KGM, 2021). Tablo 6’da verilen değerler incelendiğinde tüm karışım gruplarının şartname limitleri arasında kaldığı görülmektedir.

Tablo 6. Optimum bitüm miktarına karşılık gelen Marshall parametreleri

Table 6. Marshall parameters corresponding to the optimum amount of bitumen

Karışım grupları	Optimum bitüm (%)	Pratik özgül ağırlık (g/cm ³)	Hava boşluğu (%)	Asfaltla dolu boşluk (%)	Agregalar arası boşluk (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
1	4.20	2.410	5	64.44	13.89	1379	2.23
2	4.02	2.419	5	63.31	13.51	1113	2.38
3	5.03	2.347	5	64.54	14.10	1253	2.27
4	4.78	2.352	5	63.17	13.48	1542	2.55
5	4.35	2.387	5	63.23	13.47	1236	2.67
6	4.33	2.386	5	62.98	13.33	1310	2.52
Şartname limitleri							
min	-	-	4	60	13	750	2
max	-	-	6	75	15	-	4

Tablo 6’da verilen deney sonuçları incelendiğinde, tüm karışımların şartnamede verilen minimum stabilite (750 kg) değerinin oldukça üzerinde kaldığı görülmektedir. Ancak kaba agrega olarak mermer atıklarının kullanıldığı karışımların stabilite değerlerinde düşüşler görülmektedir. Bu durumun nedeninin, mermer agregalarının yassılık indeksinin yüksek olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Beton atığının kullanıldığı karışımların stabilite değerlerinde genel olarak artışlar tespit edilmiştir. Bu sayede, mermer agregasının sebep olduğu stabilite düşüşlerinin beton atığı ile giderilebileceği görülmüştür. Beton atığı kullanılan karışımların optimum bitüm miktarı ve hava boşluğu değerleri artarken pratik özgül ağırlık değeri düşmüştür. Bu durumun nedeni, beton atıklarının poroz bir yapıya sahip olmasından dolayıdır. Genel olarak tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, mermer ve beton atıklarının BSK’ların binder tabakasında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Bu sayede, büyük miktarlarda açığa çıkan iki farklı atık malzemenin yol kaplamalarında kullanılarak önemli ölçüde bertaraf edilebileceği belirlenmiştir.

3.2. Modelleme sonuçlarının değerlendirilmesi

3.2. Evaluation of modeling results

3.2.1. Klasik regresyon analizi (KRA) model sonuçları

3.2.1. Classical regression analysis (CRA) model results

KRA modelleme çalışmaları sonucunda LF, ÜF, EF ve KF fonksiyonları için Tablo 7’deki katsayı değerleri elde edilmiştir. KRA yöntemlerinin uygulanması sonucunda, fonksiyonlara ait katsayılar eşitliklerdeki yerlerine yazılarak eğitim ve test veri setleri üretilmiştir. Tablo 8’de MS, Tablo 9’da V_h ve Tablo 10’da V_f eğitim ve test veri setlerine ait tahmin değerleri ile ölçüm değerleri arasında hesaplanan performans istatistikleri verilmiştir. Tablo 8, Tablo 9 ve Tablo 10 incelendiğinde en düşük OKHK, OMH ve SI ile en yüksek NS değerlerini veren fonksiyon türünün hem eğitim için hem de test için KF olduğu tespit edilmiştir. Tablo 8’de görüldüğü üzere KF fonksiyonu eğitim için NS performans istatistiğine göre “çok iyi” düzeyde tahmin yaparken test için “yeterli” düzeyde bir tahmin yapmıştır (Moriassi vd., 2007). Tablo 9 ve Tablo 10 için tahmin değerleri ile ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanan performans istatistiklerinin birbirine oldukça yakın ve “çok iyi” düzeyde olduğu görülmektedir (Moriassi vd., 2007). Şekil 3’te MS, V_h ve V_f için KF

fonksiyonu ile elde edilen eğitim ve test verilerinin tahmin değerleri ile ölçüm değerlerine ait saçılım grafikleri verilmiştir.

Tablo 7. Regresyon analizinden elde edilen LF, ÜF, EF ve KF fonksiyonlarına ait katsayılar
Table 7. Coefficients of LF, PF, EF and QF functions obtained from regression analysis

Model fonksiyonları		Regresyon analizinden elde edilen katsayılar									
		w_0	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
MS	LF	0.506	-0.029	-0.305	0.292						
	ÜF	0.462	0.045	-0.226	0.224						
	EF	-0.495	-0.014	-0.024	-0.312	0.300					
	KF	-18.422	0.891	208.615	0.073	0.065	0.196	-0.109	-1.070	-208.876	0.199
V_h	LF	0.726	-0.811	-0.003	0.195						
	ÜF	0.262	-0.559	-0.021	0.181						
	EF	-0.120	-0.119	-1.566	-0.022	0.363					
	KF	-55.551	-1.295	626.128	0.136	0.014	-0.288	0.036	0.618	-626.166	0.178
V_f	LF	0.243	0.832	0.004	-0.193						
	ÜF	0.873	0.670	0.007	-0.072						
	EF	-42.040	3.744	0.020	0.000	-0.005					
	KF	56.535	1.209	-626.034	-0.179	0.002	0.221	-0.022	-0.490	626.056	-0.109

Tablo 8. MS için eğitim ve test verilerinin OKHK, OMH, SI ve NS değerleri
Table 8. RMSE, MAE, SI and NS values of training and test data for MS

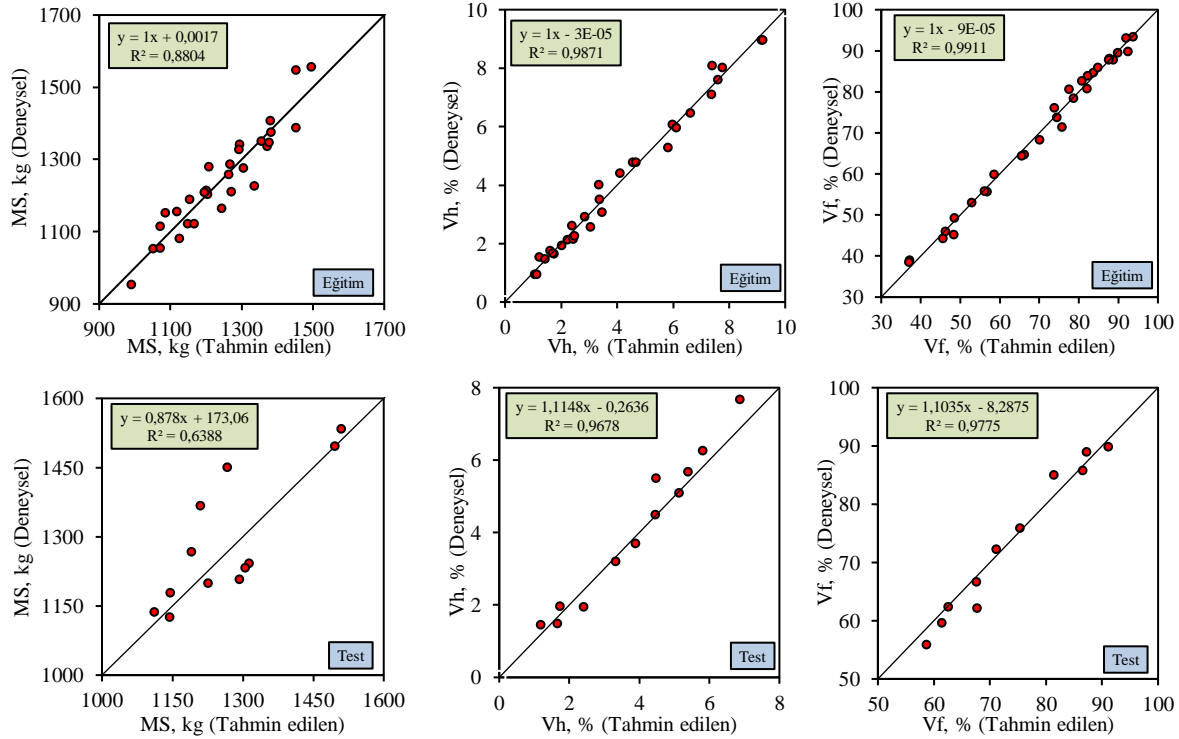
Veri seti	Eğitim				Test			
	LF	ÜF	EF	KF	LF	ÜF	EF	KF
Fonksiyon								
OKHK	71.2170	73.7950	70.7420	47.5350	99.2920	118.5390	98.5840	84.2350
OMH	56.6990	59.6510	57.7110	38.8510	85.7750	93.1920	83.2720	64.4910
SI	0.0570	0.0590	0.0570	0.0380	0.0770	0.0920	0.0770	0.0650
NS	0.7320	0.7120	0.7350	0.8800	0.4550	0.2230	0.4630	0.6080

Tablo 9. V_h için eğitim ve test verilerinin OKHK, OMH, SI ve NS değerleri
Table 9. RMSE, MAE, SI and NS values of training and test data for V_h

Veri seti	Eğitim				Test			
	LF	ÜF	EF	KF	LF	ÜF	EF	KF
Fonksiyon								
OKHK	0.5931	0.6649	0.3191	0.0817	0.6158	1.1791	0.5786	0.4452
OMH	0.4725	0.6907	0.2300	0.2270	0.5321	1.0897	0.4246	0.3371
SI	0.1436	0.1610	0.0773	0.0198	0.1526	0.2922	0.1434	0.1103
NS	0.9443	0.8947	0.9839	0.9871	0.9032	0.6452	0.9146	0.9494

Tablo 10. V_f için eğitim ve test verilerinin OKHK, OMH, SI ve NS değerleri
Table 10. RMSE, MAE, SI and NS values of training and test data for V_f

Veri seti	Eğitim				Test			
	LF	ÜF	EF	KF	LF	ÜF	EF	KF
Fonksiyon								
OKHK	3.1943	3.7662	3.2316	1.6445	3.3337	4.3124	3.3509	2.5137
OMH	2.4726	2.9823	2.5031	1.3128	2.8587	3.6597	2.8726	3.5971
SI	0.0453	0.0535	0.0459	0.0233	0.0469	0.0607	0.0472	0.0354
NS	0.9663	0.9532	0.9655	0.9911	0.9384	0.9029	0.9377	0.9699



Şekil 3. KF fonksiyonu ile elde edilen eğitim ve test veri setleri MS, Vh ve Vf tahmin sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

Figure 3. Training and test data sets obtained with the QF function (comparison of MS, Vh and Vf estimation results with measurement values)

Verilerin saçılım grafiklerinde köşegen üzerine dağılması tahmin değerlerinin ölçüm değerlerine çok yakın olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle köşegen üzerindeki noktaların RMSE ve MAE değerlerinin sıfır olduğu anlamına gelmektedir (Bayram & Kankal, 2015; Nacar vd., 2020). Şekil 3'te KF fonksiyonu kullanılarak üretilen saçılım grafikleri incelendiğinde; MS'ye ait eğitim verileri ile V_h ve V_f'ye ait eğitim ve test verilerinin büyük bir çoğunluğunun köşegen üzerinde dağıldığı görülmüştür. Bu durum, tahmin verilerinin deneysel verilere oldukça yakın olduğunu belirtmektedir. MS'ye ait test veri seti incelendiğinde ise test verilerinin saçılım grafiğindeki köşegenden biraz uzak olduğu görülmüştür. Ancak bu veri setine ait NS değerine bakıldığında 0.6080 olduğu, bu değer de NS performans istatistiğine göre "yeterli" düzeyinde yer aldığı görülmektedir.

3.2.2. Yapay sinir ağı (YSA) model sonuçları

3.2.2. Artificial neural network (ANN) model results

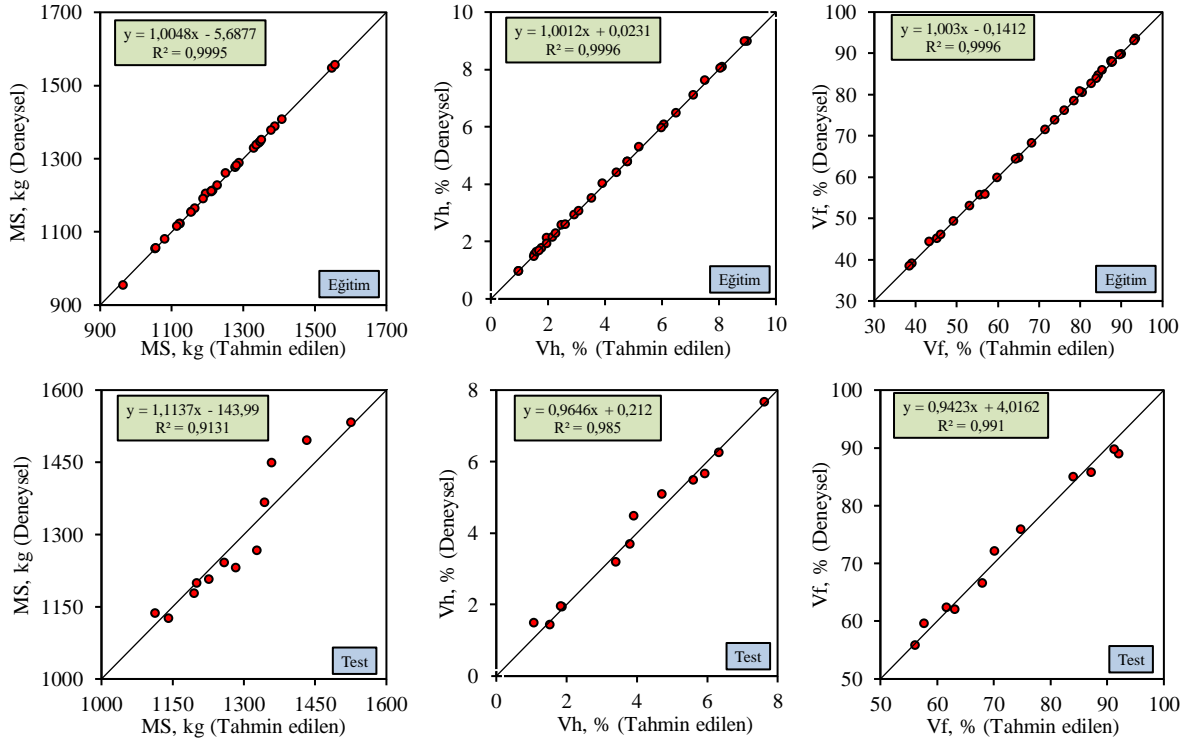
YSA modellemesinde, KRA'da eğitim ve test için ayrılan veri setleri aynen kullanılmış olup YSA'nın KRA'ya kıyasla tahmin sonuçlarını ne kadar iyileştirebildiği incelenmiştir. MS, V_h ve V_f için kurulan YSA modellerinde farklı nöron sayıları denenmiş ve optimum sonucu veren nöron sayıları belirlenmiştir. Tablo 11'de MS, V_h ve V_f'ye ait eğitim ve test veri setleri için optimum performans istatistiklerini veren nöron sayıları ve istatistik sonuçları sunulmuştur.

Tablo 11. Gizli katmandaki optimum nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri

Table 11. Performance values of the estimations of the optimum number of neurons in the hidden layer

Parametre	Nöron sayısı	Eğitim				Test			
		OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
MS	12	0.3195	0.1295	0.0001	0.9995	41.8147	32.7339	0.0325	0.9033
V _h	18	0.0049	0.0026	0.0009	0.9997	0.2629	0.2051	0.0651	0.9824
V _f	7	0.0329	0.0133	0.0004	0.9996	1.5177	1.3521	0.0214	0.9872

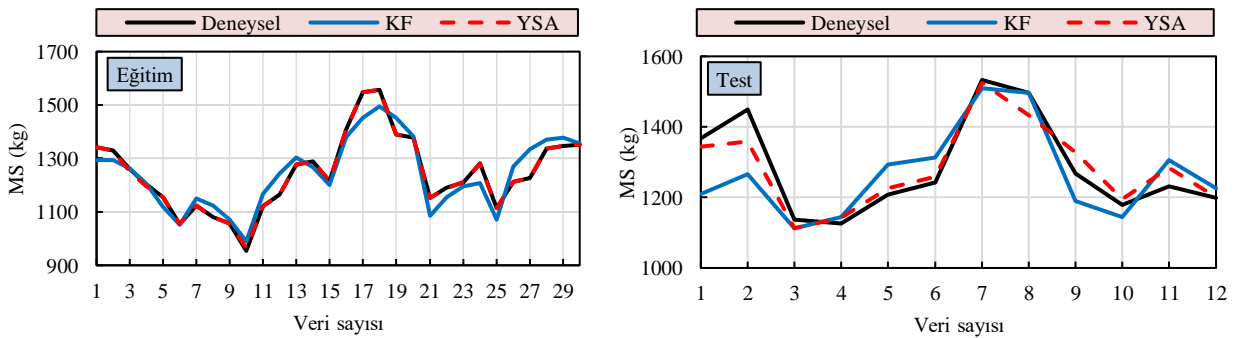
Ekler kısmında verilen Tablo 12, Tablo13 ve Tablo 14 incelendiğinde en düşük OKHK, OMH ve SI ile en yüksek NS değerlerini veren nöron sayılarının MS, V_h ve V_f için sırasıyla 12, 18 ve 7 olduğu tespit edilmiştir. Tablo 5’te görüldüğü üzere kurulan YSA modellerinin hem eğitim hem de test verileri için “çok iyi” düzeyde tahmin yaptığı belirlenmiştir (Moriyası vd., 2007). YSA modellerinden en iyi performansı gösteren nöron sayıları için elde edilen tahmin sonuçlarına ait saçılım grafikleri MS, V_h ve V_f için Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. YSA modelinden elde edilen eğitim ve test veri setleri; MS, V_h ve V_f tahmin sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

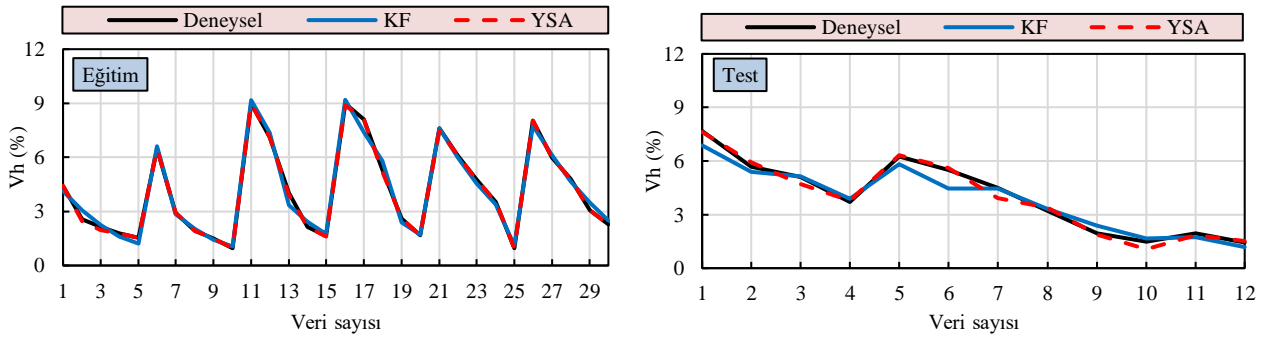
Figure 4. Training and test data sets obtained from the ANN model (comparison of MS, V_h and V_f estimation results and measurement values)

Şekil 4’te YSA modeli kullanılarak eğitim ve test verileri için elde edilen saçılım grafikleri incelendiğinde, verilerin büyük bir çoğunluğunun köşegen üzerinde dağıldığı görülmüştür. Bu durum, tahmin verilerinin deneysel verilere oldukça yakın olduğunu belirtmektedir. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de KRA yönteminde en iyi performansı sergileyen KF fonksiyonu ve YSA modelleri ile tahmin edilen eğitim ve test verilerinin deneysel verilerle karşılaştırılması zaman serisi olarak gösterilmiştir. Verilen şekiller incelendiğinde, deneysel verilere en yakın sonuçların YSA modellerinden elde edildiği ve YSA’nın KRA modellerine kıyasla daha başarılı tahmin sonuçları verdiği görülmektedir. Bu durum literatürde yapılan çalışmalarla da uyum göstermiştir (Chandra vd., 2013; Kırbas vd., 2018).

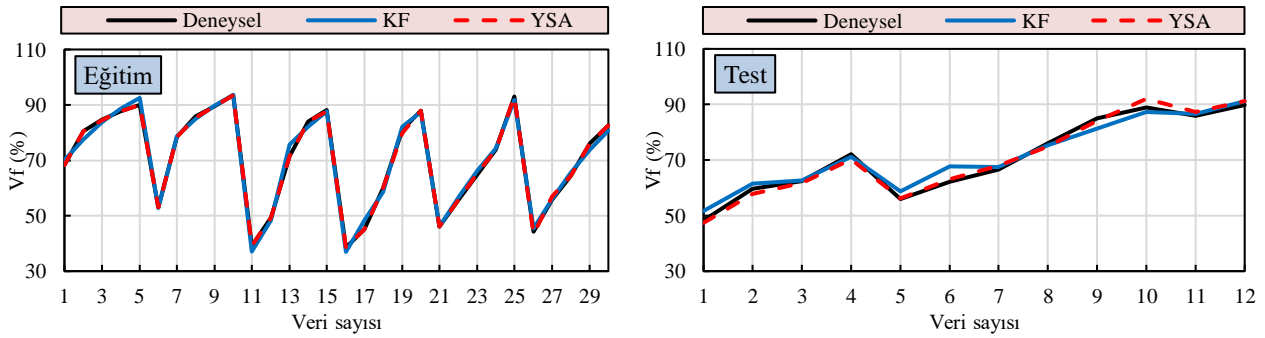


Şekil 5. MS için eğitim ve test veri setlerinin ölçüm-tahmin değerlerinin karşılaştırılması

Figure 5. Comparison of measurement-predictive values of training and test datasets for MS



Şekil 6. V_h için eğitim ve test veri setlerinin ölçüm-tahmin değerlerinin karşılaştırılması
Figure 6. Comparison of measurement-predictive values of training and test datasets for V_h



Şekil 7. V_f için eğitim ve test veri setlerinin ölçüm-tahmin değerlerinin karşılaştırılması
Figure 7. Comparison of measurement-predictive values of training and test datasets for V_f

4.Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışma, iki aşamadan oluşturulmuştur. İlk aşamada mermer ve beton atıkları kullanılarak Marshall Tasarım Yöntemi ile asfalt numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin Marshall parametreleri belirlenerek şartnameye uygunluğu araştırılmıştır. İkinci aşamada ise kaba mermer agregası (KMA), ince beton agregası (İBA) ve bitüm oranı (BO) değerleri kullanılarak Klasik Regresyon Analizi (KRA) ve Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemleri ile asfalt numunelerine ait Marshall stabilitesi (MS), hava boşluğu (V_h) ve bitümle dolu boşluk (V_f) parametreleri tahmin edilmiştir. KRA yöntemi biri doğrusal diğer üçü doğrusal olmayan dört farklı fonksiyona uygulanmıştır. YSA yönteminde ise farklı nöron sayıları denenerek optimum sonucu veren nöron sayıları belirlenmiştir. Son olarak KRA fonksiyonlarından ve YSA modellerinden elde edilen tahmin sonuçları kullanılarak fonksiyonlara ait performans istatistikleri belirlenmiş ve deneysel verilere en yakın tahmin değerlerini veren KRA fonksiyonu ile YSA modelleri kıyaslanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir;

- Atık mermerin kaba agregası olarak kullanıldığı karışımlarda stabilite genel olarak düşmüştür.
- Beton atığının kullanılması durumunda stabilite değerleri artış göstermiştir. Beton atığının porozitesi yüksek olduğu için bu durum optimum bitüm miktarını bir miktar artırmıştır. Fakat bu atıkların çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, optimum bitüm miktarındaki artışlar göz ardı edilebilir. Ayrıca mermer atıklarının sebep olduğu stabilite düşüşlerinin beton atığı agregası ile giderilebileceği görülmüştür.
- Mermer ve beton atığının birlikte kullanıldığı karışımlarda stabilite değerlerinin kontrol karışımlarına yakın çıkması, bu iki farklı atığın birlikte kullanılarak yol kaplamaları gibi agreganın yüksek miktarda kullanıldığı yerlerde bertaraf edilebileceği tespit edilmiştir. Böylece büyük bir çevre kirliliği oluşturan bu atıkların önemli bir kısmı dönüştürülmüş olacaktır.
- Kaba agregası grubunda yer alan atık mermer agregası oranı, ince agregası grubunda yer alan atık beton agregası oranı ve bitüm oranı değerlerine bağlı olarak MS, V_h ve V_f gibi önemli parametrelerin KRA fonksiyonları ve YSA modeli ile yüksek doğrulukta tahmin edilebileceği tespit edilmiştir.

- KRA modellerinden elde edilen performans istatistikleri göz önüne alındığında, deneysel verilere en yakın tahmin değerlerinin KF'den elde edildiği görülmüştür.
- YSA'nın MS, V_h ve V_f parametrelerini tahmin etmede KF'den daha başarılı olduğu görülmüştür. YSA modelinin NS performansı KF ile kıyaslandığında; MS, V_h ve V_f 'nin eğitim veri setini sırasıyla %13.58, %1.28, %0.86 oranında iyileştirdiği, test veri setlerini ise sırasıyla %48.57, %3.48 ve %1.78 oranında iyileştirdiği görülmüştür.
- YSA modelinin Marshall parametreleri için oldukça önemli olan MS değerini, KF'den daha başarılı bir şekilde tahmin ettiği belirlenmiştir.
- Marshall parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler hem yorucu hem de zaman alıcı olabilmektedir. Çalışmada önerilen modeller sayesinde daha az veri ile daha az sürede ve yüksek doğruluk oranı ile Marshall parametrelerinin belirlenebileceği görülmüştür.

Marshall parametrelerinin sadece agrega oranı ve bitüm oranına bağlı olmadığı bilinmektedir. Sıcaklık, bitüm özelliği vs. birçok kriter de Marshall parametreleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle sonraki çalışmalarda farklı kriterler dikkate alınarak bulanık mantık, genetik programlama ve farklı regresyon analizi türleri gibi yöntemler de kullanılarak Marshall parametreleri tahmin edilebilir. Ayrıca mermer ve beton atıklarının BSK'da kullanılması ile ilgili maliyet analizlerinin yapılmasının ileriki çalışmalar için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde 2019/65 No'lu proje kapsamında maddi imkan sağlayan Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu makalenin yazarları çalışmanın planlanması, gerekli hesaplama ve diğer işlemlerin yapılması, yorumlanması ve makalenin hazırlanması aşamalarına birlikte katkı sağlamışlardır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- Akbulut, H., & Gürer, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and Environment*, 42(5), 1921-1930. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.012>
- Akbulut, H., Gürer, C., Çetin, S., & Elmacı, A. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.069>
- Arabani, M., Moghadas Nejad, F., & Azarhoosh, A. R. (2013). Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 531-539. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.747685>

- Arslan, D., & Bayırtepe, H. (2018). Bitümlü sıcak karışımlara ait akma değerinin regresyon modelleri ile tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 45-53. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.310405>
- Bayazıt, M. & Yeğen Oğuz (2005). *B. Mühendisler için istatistik* (1). Birsen Yayınevi.
- Bayazıt, M. (1981). *Hidrolojide İstatistik Yöntemler* (1). İTÜ Matbaası.
- Bayram, A., & Kankal, M. (2015). Artificial neural network modeling of dissolved oxygen concentration in a Turkish watershed. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(4), 1507-1515.
- Bayram, A., Uzlu, E., Kankal, M., & Dede, T. (2015). Modeling stream dissolved oxygen concentration using teaching-learning based optimization algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 73, 6565-6576.
- Chandra, S., Sekhar, C. R., Bharti, A. K., & Kangadurai, B. (2013). Relationship between pavement roughness and distress parameters for Indian highways. *Journal of Transportation Engineering*, 139(5), 467-475.
- Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P., & Liu, C. H. (2011a). Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1532-1536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011b). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- Ektas, S., & Karacasu, M. (2012). Use of recycled concrete in hot mix asphalt and an ANN model for prediction of resilient modulus. *Ekoloji Dergisi*, 21(83). doi: 10.5053/ekoloji.2012.836
- Ertaş, F. C., Döven, M. S. & Özyer, K., (2011). *Tokat ili mermer endüstrisi sektör araştırması ve rekabetçilik analizi. 2011 Yılı Doğrudan Faaliyet Desteği Programı*, Tokat Sanayi ve Ticaret İl Müdürlüğü, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.oka.org.tr/assets/upload/dosyalar/tokat-ili-mermer-endustrisi-sektor-arastirmasi-ve-rekabetcilik-analizi.pdf>
- Gedik, A., Selcuk, S., & Lav, A. H. (2021). Investigation of recycled fluorescent lamps waste as mineral filler in highway construction: A case of asphaltic pavement layers. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105290. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105290>
- Gültekin, M., Nayır, N., Ziya, U., Çalışkan, K. K., Öztürk, A., Tutan, S.N. & Komut, M. (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı* (1). Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E. G. (2009). Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3451-3456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.024>
- Kandhal, P. S., Parker, F., & Mallick, R. B. (1997). *Aggregate tests for hot-mix asphalt: state of the practice*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep97-06.pdf>
- Kara, Ç., & Karacasu, M. (2017). Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach. *Construction and Building Materials*, 141, 598-607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.025>
- Karasu, S., Kankal, M., Nacar, S., Uzlu, E., & Yüksek, Ö. (2020). Prediction of parameters which affect beach nourishment performance using MARS, TLBO, and conventional regression techniques. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 36(1), 245-260. <https://doi.org/10.1007/s41208-019-00173-z>
- Karavaşin, M., & Terzi, S. (2007). Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), 616-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.001>
- Kırbaş, U., Karavaşin, M., Demir, B., Komut, M., & Ünal, E. N. (2018). Bitümlü sıcak karışım üstyapılarda görülen yüzey bozulmaları ile düzgünlük arasındaki ilişkilerin modellenmesinde bazı yaklaşımlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 901-912. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.32804>

- Kıyıldı, R. K. (2021). Yapay sinir ağları ile Marshall stabilite değerinin tahmini. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 627-633. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.866566>
- Kok, B. V., Yılmaz, M., Sengoz, B., Sengur, A., & Avci, E. (2010). Investigation of complex modulus of base and SBS modified bitumen with artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7775-7780. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.063>
- Maçın, K. E., & Demir, İ. (2018). Kentsel dönüşüm sürecinde İstanbul'da inşaat ve yıkıntı (İ&Y) atıkları yönetimi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(9), 202-210.
- Mardani-Aghabaglou, A., Kankal, M., Nacar, S., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2021). Assessment of cement characteristics affecting rheological properties of cement pastes. *Neural Computing and Applications*, 33(19), 12805-12826. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05925-8>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nacar, S., Kankal, M., & Hınıs, M. A. (2018). Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) ile günlük akarsu akımlarının tahmini-Haldizen deresi örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 38-47.
- Nacar, S., Mete, B. & Bayram, A. (2020). Günlük çözünmüş oksijen konsantrasyonunun çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri ile tahmin edilmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(3), 1479-1498.
- Ozgan, E. (2011). Artificial neural network based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 6025-6030. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.018>
- Pourtahmasb, M. S., Karim, M. R., & Shamshirband, S. (2015). Resilient modulus prediction of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate using an adaptive neuro-fuzzy methodology. *Construction and Building Materials*, 82, 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.030>
- Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390-397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>
- Shafabakhsh, G., & Tanakizadeh, A. (2015). Investigation of loading features effects on resilient modulus of asphalt mixtures using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Construction and Building Materials*, 76, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.069>
- Şentürk, K. (2008). *Akım gözlem istasyonu olmayan havzalarda su potansiyelinin belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]
- Terzi, S., & Vural, M. (2020). Bina beton atıklarının karayollarında bitümlü temelde agregata olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1035-1041.
- Ünver, Ö. & Gamgam, H. (1996). *Uygulamalı İstatistik Yöntemler* (1). Siyasal Kitabevi.
- Xu, J., Fan, Z., Lin, J., Yang, X., Wang, D., & Oeser, M. (2021). Predicting the low-temperature performance of asphalt binder based on rheological model. *Construction and Building Materials*, 302, 124401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124401>
- Yılmaz, M., Kök, B. V., & Kuloğlu, N. (2011). Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4279-4286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.072>
- Zehtabchi, A., Hashemi, S. A. H., & Asadi, S. (2018). Predicting the strength of polymer-modified thin-layer asphalt with fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 169, 826-834. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.002>

Ekler

Tablo 12. MS için gizli katmandaki farklı nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri
Table 12. Performance values of estimations of different neuron numbers in the hidden layer for MS

Nöron sayısı	Eğitim				Test			
	OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
4	14.0306	10.9441	0.0113	0.9598	66.4987	53.4010	0.0517	0.7555
5	9.7150	6.8607	0.0078	0.9581	68.2158	53.1667	0.0530	0.7427
6	2.2376	1.4007	0.0018	0.9497	68.2326	55.9873	0.0531	0.7426
7	0.3201	0.2585	0.0003	0.9662	58.8562	54.0153	0.0458	0.8085
8	0.3783	0.2059	0.0004	0.9712	61.8652	55.1475	0.0481	0.7884
9	0.4101	0.2226	0.0003	0.9646	59.5996	54.2092	0.0463	0.8036
10	0.4134	0.2620	0.0003	0.9796	54.6867	45.8032	0.0425	0.8347
12	0.3195	0.1295	0.0001	0.9995	41.8147	32.7339	0.0325	0.9033
14	0.4216	0.2547	0.0003	0.9912	51.1437	46.3631	0.0398	0.8554
16	0.3974	0.3341	0.0003	0.9939	57.9286	46.5354	0.0450	0.8145
18	0.4185	0.2086	0.0003	0.9882	59.3989	48.9163	0.0462	0.8049
20	0.4037	0.2103	0.0003	0.9809	47.3606	41.1154	0.0368	0.8760
25	0.3982	0.2404	0.0003	0.9963	67.0363	41.1844	0.0521	0.7516
30	0.4066	0.2140	0.0003	0.9958	54.7015	47.0652	0.0425	0.8346
40	0.4259	0.2490	0.0003	0.9971	63.0106	53.6787	0.0490	0.7805

Tablo 13. V_h için gizli katmandaki farklı nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri
Table 13. Performance values of estimations of different neuron numbers in the hidden layer for V_h

Nöron sayısı	Eğitim				Test			
	OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
4	0.1292	0.0991	0.0313	0.9735	0.4718	0.3830	0.1169	0.9432
5	0.0236	0.0133	0.0057	0.9691	0.7013	0.5064	0.1738	0.8744
6	0.0681	0.0310	0.0165	0.9527	0.4848	0.3642	0.1201	0.9400
7	0.0058	0.0040	0.0014	0.9901	0.5028	0.4339	0.1246	0.9355
8	0.0055	0.0036	0.0013	0.9199	0.5458	0.4664	0.1353	0.9237
9	0.0057	0.0042	0.0014	0.9825	0.4291	0.3963	0.1064	0.9530
10	0.0058	0.0035	0.0014	0.9635	0.6499	0.4688	0.1611	0.8922
12	0.0057	0.0031	0.0014	0.9582	0.5262	0.4598	0.1304	0.9293
14	0.0058	0.0041	0.0014	0.9637	0.4374	0.3788	0.1084	0.9512
16	0.0058	0.0035	0.0014	0.9468	0.5740	0.4967	0.1423	0.9159
18	0.0049	0.0026	0.0009	0.9997	0.2629	0.2051	0.0651	0.9824
20	0.0058	0.0033	0.0014	0.9867	0.4959	0.4547	0.1229	0.9372
25	0.0057	0.0039	0.0014	0.9666	0.5863	0.5045	0.1453	0.9123
30	0.0057	0.0043	0.0014	0.9890	0.5917	0.4868	0.1467	0.9107
40	0.0057	0.0035	0.0014	0.9771	0.6465	0.5171	0.1602	0.8933

Tablo 14. V_f için gizli katmandaki farklı nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri
Table 14. Performance values of estimations of different neuron numbers in the hidden layer for V_f

Nöron sayısı	Eğitim				Test			
	OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
4	0.7382	0.4933	0.0105	0.9820	2.9477	1.9875	0.0415	0.9518
5	0.6638	0.4709	0.0094	0.9855	2.4616	2.0325	0.0346	0.9664
6	0.4208	0.3090	0.0060	0.9492	2.4734	1.8174	0.0348	0.9661
7	0.0329	0.0133	0.0004	0.9996	1.5177	1.3521	0.0214	0.9872
8	0.0393	0.0154	0.0006	0.9918	2.1087	1.4690	0.0297	0.9753
9	0.0389	0.0207	0.0006	0.9772	2.2012	1.9547	0.0310	0.9731
10	0.0397	0.0208	0.0006	0.9891	2.7677	2.0590	0.0390	0.9575
12	0.0391	0.0198	0.0006	0.9789	2.1575	1.7195	0.0304	0.9742
14	0.0387	0.0172	0.0005	0.9907	2.5596	1.7697	0.0360	0.9637
16	0.0379	0.0183	0.0005	0.9899	3.1336	2.2750	0.0441	0.9455
18	0.0378	0.0229	0.0005	0.9687	3.1340	2.5052	0.0441	0.9455
20	0.0363	0.0185	0.0005	0.9790	3.9465	3.2854	0.0555	0.9136
25	0.0376	0.0203	0.0005	0.9339	3.4461	2.6930	0.0485	0.9341
30	0.0391	0.0277	0.0006	0.9786	3.8203	3.3910	0.0538	0.9191
40	0.0379	0.0318	0.0005	0.9906	3.2386	2.6263	0.0456	0.9418