



## Prediction of base and subbase resilient modulus ( $M_r$ ) using regression methodology

Altan Yılmaz

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur 15030, Turkey

### Highlights:

- A new regression model for the estimation of resilient modulus value for granular materials.
- Potentials use of dynamic triaxial test results
- Comparison of new multiple regression model and Uzan constitutive model

### Keywords:

- Granular materials
- Highway pavements
- Resilient modulus estimation
- Linear multiple regression

### Graphical/Tabular Abstract

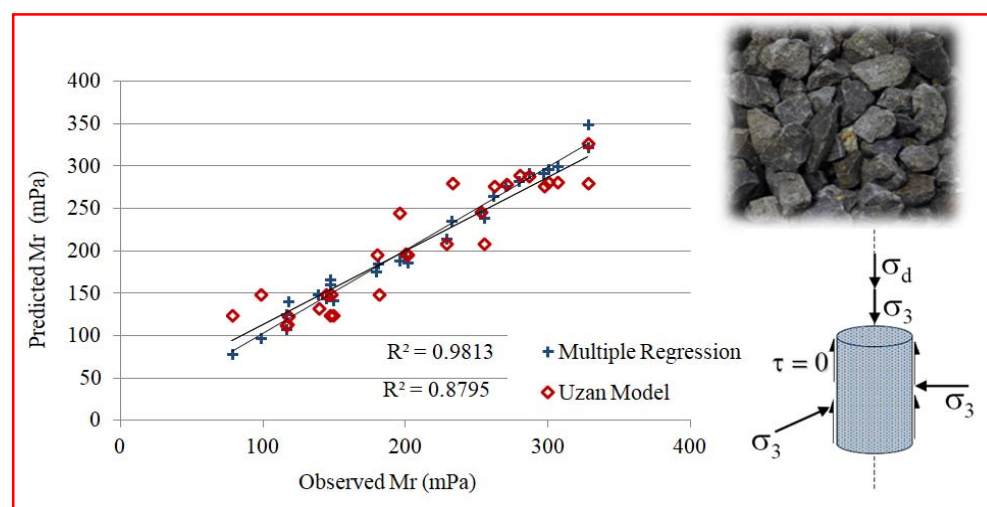


Figure A. Comparison of multiple regression model and Uzan model  $M_r$  predictions

### Article Info:

Research Article  
Received: 13.11.2018  
Accepted: 31.08.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.482225

### Correspondence:

Author: Altan Yılmaz  
e-mail: altan\_y@yahoo.com  
phone: +90 248 213 2740

**Purpose:** The aim of this paper is demonstrate the applicability of regression methodology for estimating the resilient modulus of pavement layers using the results of dynamic triaxial tests.

### Theory and Methods:

Initial work content of triaxial tests to obtain the resilient modulus of aggregate samples. Aggregate samples were collected from 7 different quarries of central Anatolia. All of the aggregate sources were igneous rock. Than new regression model proposed by using the results of dynamic triaxial tests. In the model; aggregate physical properties, aggregate mixture properties and loading factors (a total of 8 variables) which are used as input parameters and the resilient modulus of the aggregate mixture obtained as output. In order to compare the effectiveness of the new method, coefficients for the Uzan constitutive model were also determined for laboratory testing and were compared with the approach described in this paper.

### Results:

The accuracy levels of  $R^2:0.98$  and Standard error (SE):10.51 obtained by using multiple regression analysis is significantly higher compared with those obtained using the Uzan constitutive model. The new regression model has made quite successful predictions for data it never encountered. Among the input variables, the one which has the most effective on  $M_r$  is the dry unit weight (DD) variable. The aggregate impact value (AIV) and flakiness index (FI) follow in importance.

### Conclusion:

This study tested a regression model developed to estimate the  $M_r$  value of pavement granular materials by using aggregate physical properties and triaxial test data. This methodology is proposed as an alternative to conventional nonlinear constitutive relationships. The regression model assumed the resilient response to be like a function by using the stated material parameters. So, this approach makes it possible to estimate the resilient modulus of the different aggregates samples in real-time.



## Granüler yol malzemeleri için regresyon yöntemiyle Esneklik modülü ( $M_r$ ) tahmin modeli geliştirilmesi

Altan Yılmaz\*<sup>ORCID</sup>

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 15030 Burdur, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Granüler malzemelerin esneklik modülünün tahmini için yeni birçoklu regresyon modeli
- Dinamik üç eksenli deney bulgularının potansiyel kullanım alanı
- Non-linear tahmin modellerinden birisi ile (Uzan modeli) istatistiksel karşılaştırma

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.11.2018

Kabul: 31.08.2019

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.482225

#### Anahtar Kelimeler:

Granüler malzemeler,  
yol üst yapısı,  
esneklik modülü,  
lineer çoklu regresyon

#### ÖZET

Yol üstyapılarının mekanik-ampirik tasarımında granüler malzemelerin mekanik direncinin tespiti amacıyla kullanılabilir en gerçekçi parametre Esneklik modülü olarak karşımıza çıkmaktadır. Esneklik modülü uygulanan gerilme durumuna, yükleme süresine, su muhtevasına, kuru yoğunluğa ve gradasyon gibi faktörlere bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, ülkemizdeki yol inşaatlarında kullanılmakta olan volkanik kökenli agregalardan elde edilen deneysel bulgular kullanılarak agrega karışımlarının Esneklik modülünü ( $M_r$ ) tahmin etmek amacıyla matematiksel bir model oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan agrega örnekleri (bazalt ve traki-bazalt) Anadolu yarımadasının güney ve iç bölgelerinden farklı ocaklardan temin edilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında dinamik üç eksenli deneyi uygulanarak silindirik numunelerin esneklik modülü bulunmuştur. Daha sonra elde edilen deneysel bulgular kullanılarak matematiksel bir model oluşturulmuştur. Çoklu regresyon yöntemiyle oluşturulan modelde, agrega fiziksel özellikleri, agrega karışım özellikleri ve numune yükleme durumu ile ilgili parametreler (8 farklı değişken) giriş verisi olarak alınmış ve agrega karışımlarına ait  $M_r$  değeri çıkış parametresi olarak elde edilmiştir. Yeni ortaya konan model, Uzan modeli gibi geleneksel tahmin modellerine alternatif olarak ortaya konmuş ve bu modeller ile istatistiki olarak karşılaştırılmıştır. Çoklu regresyon yöntemiyle elde edilen performans değerleri oldukça yüksek çıkmıştır ( $R^2:0,98$ , SE:10,51). Model belirli değişkenler kullanılarak, yeni giriş değerleri için sonuç üretebilmektedir. Bunun sonucu olarak, gerçek-zamanlı olarak farklı gerilmeler altındaki esneklik modülü değerinin hesaplanabilmesini mümkün kılmaktadır.

## Prediction of base and subbase resilient modulus ( $M_r$ ) using regression methodology

### H I G H L I G H T S

- A new regression model to predict the resilient modulus of granular materials.
- Potentials use of dynamic triaxial test results
- Comparison of new multiple regression model and Uzan constitutive model

#### Article Info

Research Article

Received: 13.11.2018

Accepted: 31.08.2019

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.482225

#### Keywords:

Granular materials,  
highway pavements,  
resilient modulus,  
linear multiple regression

#### ABSTRACT

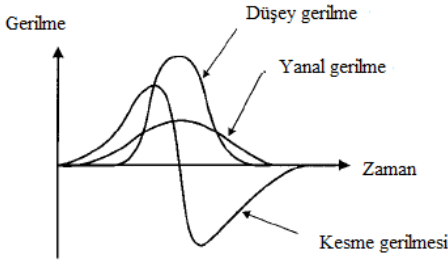
Resilient modulus is an important design parameter for highway pavement structures because it represents the structural strength of pavement layers. The resilient modulus depends on the factors such as applied stress, loading time, water content, dry density and gradation. This paper demonstrates the applicability of regression methodology for estimating the ( $M_r$ ) Resilient modulus of pavement layers using the results of dynamic triaxial tests. Aggregate samples were collected from several different quarries of central Anatolia. All of the aggregate sources were igneous rock (basalt, and trachy-basalt). Initial work content of triaxial tests to obtain the resilient modulus of cylindrical aggregate samples. Then new mathematical model proposed by using the results of dynamic triaxial tests. In the regression model; aggregate physical properties, aggregate mixture properties and loading factors (a total of 8 variables) which are used as input parameters and the resilient modulus of the aggregate mixture obtained as output. In order to compare the effectiveness of the new method, coefficients for the Uzan constitutive model were also determined for laboratory testing and were compared with the approach described in this paper. Performance parameters of  $R^2 :0.98$  and Standard error: 10.51 was obtained from model prediction. These results are quite sufficient, and the regression model assumed the resilient response to be like a function by using the stated material parameters. So, this approach makes it possible to estimate the resilient modulus of the different aggregates samples in real-time.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: altanyilmaz@mehmetakif.edu.tr / Tel: +90 248 213 2740

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Esnek üstyapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin gerçekçi bir şekilde tespiti için, düşey yüklerden dolayı oluşan gerilmelerin büyüklüğü ve frekansı, malzeme gradasyonu ve sıkıştırma yöntemi gerçek ortam şartlarına en uygun şekilde dikkate alınmalıdır [1]. Yol üstyapılarının tasarımında granüler malzemelerin mekanik direncinin tespiti amacıyla kullanılacak en gerçekçi parametre Esneklik modülü olarak karşımıza çıkmaktadır. Dinamik Üç Eksenli (DÜE) deneyi ile bulunan Esneklik modülü değeri granüler malzemeler için Şekil 1’de görülen ve gerçek saha ortamına en yakın gerilme şartlarında elde edildiği için birçok çalışmada tercih edilmektedir [2]. Ancak Dinamik deney sistemlerinin kompleks yapısı ve yüksek maliyeti nedeniyle üç eksenli deneyleri çok yaygın şekilde uygulanmamaktadır. Agregaların bir takım fiziksel özelliklerinden ampirik bağıntılar yardımıyla dönüştürülerek bulunan esneklik modülü genel bir yaklaşım olarak hesaplamalarda kullanılmaktadır.

Dinamik üç eksenli deneylerinde numuneye uygulanan düşey ve yanal gerilmeler Şekil 2’de görülmektedir. Kesme gerilmesinin tekerlek eksenine altında sıfır olduğu kabul edilmektedir. Deneylerde numuneye, araçların tekerlek yükünü temsil edecek şekilde, aksel yönde yarım sinüs dalgası formunda tekrarlı yük uygulanmaktadır. Maksimum aksel yük ( $\sigma_1$ ), tekrarlı yük ( $\sigma_d$ ) ile hücre basıncının ( $\sigma_3$ ) toplamından oluşmaktadır [3, 4].



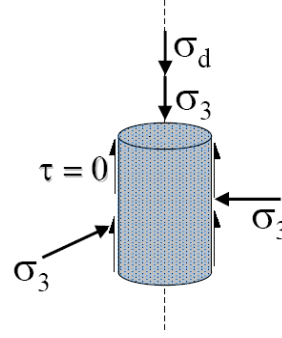
**Şekil 1.** Üstyapı içerisindeki bir zemin numunesine trafik yükleri dolayısıyla etki eden gerilmeler  
(In situ stresses on a pavement element caused by traffic load)

Üç eksenli deneylerinde, tekrarlı yükler altında test edilen malzemelerin Esneklik modülü ( $M_r$ ) aşağıdaki Eş.1 ile hesaplanmaktadır [6, 7].

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

Burada:  $M_r$  : Esneklik Modülü

- $\sigma_d$  : Deviyör gerilme ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )
- $\epsilon_r$  : Esnek birim şekil değiştirme (Eksenel yönde)
- $\sigma_3$ : Hücre basıncı



**Şekil 2.** Üç eksenli deneyinde numuneye uygulanan gerilmeler  
(Applying stresses on a triaxle test sample) [5]

Literatürde yer alan önceki çalışmalara bakıldığında daha çok ince taneli taban zeminleri üzerinde yapılan saha deneyleri veya laboratuvar deneyleri ile esneklik modülü tahmin çalışmalarının yoğun olduğu görülmektedir [8-11]. Granüler malzemeler ile ilgili çalışmalar ise daha sınırlı düzeyde kalmaktadır. Güncel birkaç örnek çalışma aşağıda verilmiştir.

Arshad [12] tarafından yol üstyapısında temel ve alttemel tabakalarda kullanılan granüler malzemelerin Esneklik modülü ( $M_r$ ) ile düşey yönde sınırlandırılmış modül ( $M_c$ ) değerleri arasında bir korelasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmada doğal agrega, asfalt kaplama geri-dönüşüm numuneleri ve beton kaplama geri-dönüşüm numuneleri kullanılarak 32 adet deney sonucu karşılaştırılmıştır.  $R^2$  değerleri 0,75 ile 0,90 arasında bulunmuştur. Nagula vd. [13] yaptıkları çalışmada karayolu üstyapısındaki granüler malzemelerin mekanik özelliklerin belirlenmesi için sonul elemanlar yaklaşımı ile “hardening soil” modeli adı verilen bir model oluşturmuşlar ve bulgularını basit static üç eksenli deney verileri ile karşılaştırmışlardır. Bulguların model ile uyumlu olduğu sonucuna varılmış olsa da statik üç eksenli deneylerinin granüler yol malzemeleri için gerçek saha koşullarını temsil etmede yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bilodeau ve Plamondon [14] yol üstyapısının temel tabakasında kullanılan granüler malzemelerin Esneklik modülünün tahmini için agrega tane boyutu dağılımını ve agrega aşınma özellikleri etkisini birlikte dikkate alan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada -37% ile 66 % arasında standart sapma değerleri elde edilmiştir. Bilodeau ve Plamondon’nun bu çalışmada agrega karışım özelliklerini – Su muhtevası, birim ağırlık, CBR dayanımı - hiç dikkate almamış olduğu görülmektedir. Granüler malzemeler ile ilgili çalışmaların literatürde yeterince yer almamasının sebebi olarak kullanılan numune boyutlarının ve deney hücresinin oldukça büyük olması ve çalışma yapmanın güçlüğü gösterilebilir.

Mevcut çalışmada literatürdeki boşluğun doldurulması amacıyla granüler malzemelere ait; agrega fiziksel özellikleri, karışım özellikleri ve yükleme büyüklükleri olmak üzere  $M_r$ ’ye etki edebilecek olan 8 farklı bağımsız

değişken kullanılmış ve dinamik üç eksenli deneyleri uygulanarak malzemelerin esneklik modülü ( $M_r$ ) değerleri bulunmuştur. Çalışmada Türkiye’de yol inşaatlarında kullanılmakta olan volkanik kökenli agregalardan elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır. Agregal örnekleri Anadolu yarımadasının güney ve iç bölgelerinden 7 farklı ocaktan temin edilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında agregal karışımları ile oluşturulan silindirik numunelerin esneklik modülü değerleri bulunmuştur. Daha sonra elde edilen deneysel bulgular kullanılarak agregaların esneklik modülünü tahmin etmek amacıyla matematiksel bir model oluşturulmuştur. Esneklik modülü deneylerinde AASHTO TP46-94 [15] deney standardının granüler malzemeler için (temel/alttemel malzemeleri) önerdiği yöntem takip edilmiştir.

### 1.1. Volkanik Kayaçlar ve Agregal Temini (Igneous Rocks and Aggregate Demand)

Türkiye’de yol inşaatlarında yoğunlukla kullanılan granüler malzemeler karbonat kayacı kökenli; kireçtaşı ve volkanik kökenli; bazalt, andezit kayaçlarıdır. Son yıllarda kireçtaşından elde edilen agregaların karasal iklim bölgelerinde (donma-çözülme etkisi ile) bazı zayıflıklar göstermesi nedeniyle volkanik kökenli agregalara olan talep artmaktadır. Volkanik kayaçlar sert, dayanıklı ve yoğun oldukları için ideal bir agregal kaynağı olarak bilinmektedir [16, 17]. Bazı volkanik kayaç türleri ise çok gevrek veya oldukça gözenekli bir yapıda olabilmektedir [18]. Bu çalışmada volkanik kökenli bazalt ve traki-bazalt agregaları kullanılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde kullanılan malzemeler hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METHOD (MATERIALS AND METHOD)

**Bazalt agregası:** Volkanik kayaçlar içerisinde bazalt doğada en yaygın olarak bulunan kayaçlardan birisidir. Geniş alanlarda yayılıma sahip lav akıntıları olup, bazen yüzlerce kilometrekarelik alanları kaplayacak şekilde (plato bazaltları) bulunabilirler. Türkiye’de Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Kastamonu, Kahramanmaraş, Sivas, Çorlu, Şanlıurfa, Manisa ve Ankara-Kızılcahamam bölgesinde bazalt ve dayk yayılımları bulunmaktadır [19]. Şekil 3’de konkasörde kırılmış bazalt agregası örnekleri görülmektedir.



Şekil 3. Konkasörde kırılmış bazalt agregası örnekleri (Crushed basalt aggregates)

Bazaltın aşınma direncinin yüksek olması ve dış etkilere karşı mukavemeti bazaltın kullanım alanlarını arttırmaktadır. Fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak bazalt taşı, değişik oranlarda agregal olarak betona katılmaktadır. Cam-seramiklerde, mineral tabanlı yalıtım sistemlerinde, karayollarında yapı malzemesi olarak, demiryollarında balast olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bazalt yüksek çekme mukavemeti, alkalilere karşı yüksek direnci, yüksek termal iletkenliği, kanserojen yada diğer sağlık sakıncaları içermemesi, inert olması sayesinde dış etkenlerden etkilenmemesi, asit gibi agresif kimyasallara karşı yüksek direnci, iyi yorulma dayanımı ve elektro-manyetik direnci sayesinde pek çok alanda kullanılmaktadır [20].

Mevcut çalışmada Isparta, Afyon, Ankara ve Konya illerindeki taş ocaklarından alınan agregal kullanılmıştır. Alınan numunelerin lokasyonları Tablo 1’de, elek analizi sonucu sınıflandırılmış görüntüleri ise Şekil 4’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan agregal numuneleri  
(Name of the aggregate samples)

Malzeme adı
Ankara Yaprıkcık Bazaltı
Ankara Polatlı Bazaltı
Afyon Sandıklı Bazaltı
Afyon İncehisar Bazaltı
Konya Kulu Bazaltı
Isparta Kayı Bazaltı
Isparta Geyran Bazaltı

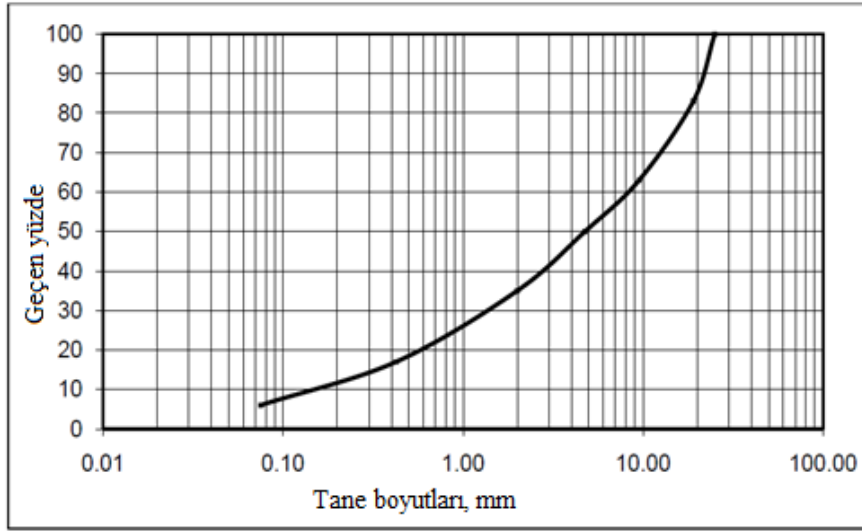
Bu çalışmada Karayolları Teknik Şartnamesinin [21] granüler temel tabakaları için önerdiği “Tip-C” agregal gradasyonu kullanılmıştır. Burada maksimum tane büyüklüğü 25 mm ve No.4 elekten geçen malzeme miktarı %50’dir. Şekil 5’de agregal tane büyüklüğü dağılım eğrisi verilmiştir.

### 2.1. Esneklik Modülü Tahmin Modeli Geliştirilmesi (Developing a resilient modulus estimation model)

Bu bölümde, elde edilen deneysel bulgulardan yararlanarak esneklik modelini tahmin etmeye yarayan matematiksel bir model oluşturulmuştur. Esneklik modülü rijitlik modülünde



Şekil 4. Bazalt agregaların tane büyüklüğüne göre sınıflandırılması (Grain size classification of basalt aggregates)



Şekil 5. Çalışmada kullanılan agregaların tane büyüklüğü dağılımı eğrisi  
(Grain size distribution curve of aggregate mixture)

olduğu gibi sabit bir mukavemet parametresi değildir. Uygulanan gerilme durumuna, yükleme süresine, su muhtevasına, kuru yoğunluğa ve gradasyon gibi faktörlere bağlıdır [6, 22]. Bu çalışmada ayrıca bazı agrega fiziksel özellikleri de modele dahil edilmiştir. Çalışmada kullanılan ve esneklik modülüne etki edebilecek malzeme parametreleri, karışım parametreleri ve deney yükleme parametreleri Tablo 2’de toplu olarak verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere  $M_r$  bağımlı değişken olmak üzere,  $M_r$ ’ye etki edebilecek olan 10 farklı bağımsız değişken yer almaktadır. Tablodaki bağımsız değişkenler içindeki ilk 5 satır karışıma giren agrega fiziksel özelliklerini, sonraki 3 satır agrega karışım özelliklerini, sonraki 2 satır ise yükleme parametrelerini göstermektedir. Çalışmada 7 farklı agrega türü için tablodaki tüm değişkenleri temsil etmek üzere 105 adet deney seti, her deney setinde 12 veri olmak üzere toplam 1260 adet veri kullanılmıştır.

## 2.2. Çoklu Regresyon Modeli Oluşturulması (A new multiple linear regression model)

Modelleme çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada deneysel veriler kullanılarak lineer çoklu regresyon

analizi yöntemi ile bir regresyon denklemi oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise daha önce kullanılmamış deneysel veriler kullanılarak modelin doğruluğu test edilmiştir. Çoklu regresyon, ikiden daha çok değişken arasındaki doğrusal ilişkinin fonksiyonel şeklini, biri bağımlı diğerleri bağımsız değişken olarak bir doğru denklemi olarak, göstermekle kalmaz, değişkenlerden birinin değeri bilindiğinde diğerleri hakkında kestirim yapılmasını sağlar. Değişkenlerin hepsinin niceliksel ölçekli olması zorunluluğu vardır [23]. Y bağımlı değişkenin  $X_1, X_2, \dots, X_m$  gibi bağımsız değişkenlerden etkilendiği kabul edilir ve aralarındaki ilişki için doğrusal bir denklem seçilirse Y’nin regresyon denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m \quad (2)$$

Eş. 2’de y, bağımsız değişkenler  $X_1= x_1, X_2= x_2, \dots, X_m= x_m$  değerlerini aldığı anda Y değişkeninin beklenen değerini göstermektedir.

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  regresyon katsayıları basit regresyondakine benzer şekilde, gözlem noktalarının regresyon denkleminin gösterdiği düzlemde olan  $e_{yi}$  uzaklıklarının karelerinin

**Tablo 2.**  $M_r$  Tahmin modeli geliştirmede kullanılan değişkenler ve değişim aralığı  
(Variables used to developing a  $M_r$  estimation model and range of the variables)

Değişken Tipi	Sembol	Tanımı	Değişim Aralığı (Min - Max)	
Bağımlı değişken	$M_r$	Esneklik modülü değeri	70	385
Bağımsız değişkenler	AIV	Agrega darbelenme değeri	6,06	15,07
	FT	Agrega donma-çözülme kaybı (Kütlece %)	1,1	29
	FI	Agrega yassılık indeksi	25	43
	MD*	Agerega mikro-Deval aşınma katsayısı	8,02	33,65
	ÖA*	Agrega zahiri özgül ağırlığı	2,49	2,85
	W	Karışımın su muhtevası %	6,5	10,5
	DD	Karışımın kuru birim ağırlığı	1,88	2,37
	CBR	Karışımın CBR Değeri	100	200
	$\sigma_d$	Uygulanan Deviator gerilme (kPa)	19,0	255,08
	$\sigma_3$	Uygulanan Hücre basıncı (kPa)	20,68	137,90

\*Etki katsayısı sıfır çıktığı için ilerleyen bölümlerde modele dahil edilmemiştir.

toplamı olan aşağıdaki denklemi minimum yapacak şekilde hesaplanır [23].

$$\sum_{i=1}^N e_{yi}^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - a - b_1 x_{1i} - b_2 x_{2i} - b_m x_{mi})^2 \quad (3)$$

Modelin doğruluğu standart hata (SE) ve determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) yardımıyla belirlenmiştir.

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Burada;  $\sigma$  standart sapma, n: örnek sayısı

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} \quad (5)$$

Burada;

$SS_{reg}$  : regresyon kareler toplamı

$SS_{tot}$  : toplam kareler toplamı

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tüm değişkenler kullanılarak MS Excel'de yapılan regresyon analiz sonucunda bazı değişkenlerin katsayılarının "0" olduğu, dolayısıyla esneklik modülü üzerinde etkisinin kayda değer olmadığı ortaya çıkmıştır. Bunlar; mikro-Deval katsayısı (MD) ve agrega zahiri özgül ağırlık (ÖA) değerleridir. Yeni oluşturulan modelde MD ve ÖA değişkenleri veri havuzundan çıkartılarak 8 bağımsız değişken kullanılmıştır. Bunlardan üçü agrega fiziksel özellikleri, üçü karışım özellikleri ve ikisi numune yükleme durumu ile ilgili değişkenlerdir. Analizde 7 farklı agrega türü için elde edilen toplam 105 farklı veri seti ve  $105 \times 8 = 840$  adet veri kullanılmıştır. 105 farklı veri setinin yaklaşık %75'i (77 veri seti) regresyon modeli oluşturmada geriye kalan 28 veri seti ise kurulan modeli (doğrulama) test etmede kullanılmıştır. Regresyon analizinde kullanılan 77 veri seti ile gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen matematiksel model aşağıda verilmiştir.

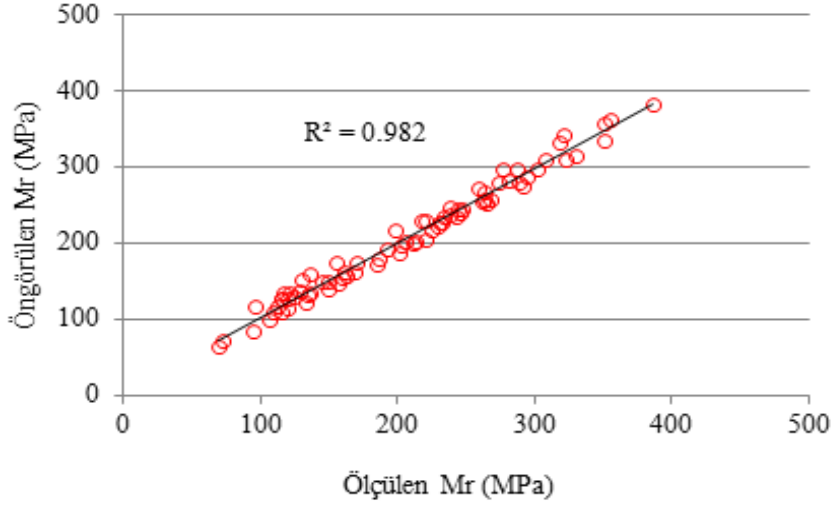
$$M_r = 1246,08 - 37,86.AIV - 7,15.FT - 10,31.FI + 8,82.W + 55,93.DD - 4,23.CBR + 0,41. \sigma_d + 1,21. \sigma_3 \quad (6)$$

Eş. 6'da  $a_0$  sabiti (1246,08) regresyon analizindeki kesişim katsayısını, diğer katsayılar ise değişkenlerin regresyon sabitlerini göstermektedir. Regresyon katsayılarından anlaşıldığı üzere, değişkenler arasında esneklik modülü üzerinde en yüksek etkiye sahip olanı agrega karışımının Kuru birim ağırlık (DD) değeridir. Ardından agrega darbelenme değeri (AIV) ve yassılık indeksi (FI) gelmektedir.

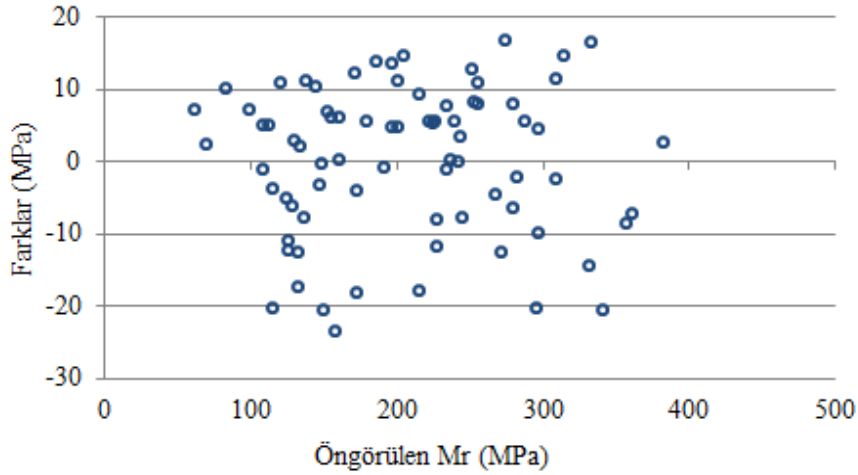
Oluşturulan  $M_r$  tahmin modelinde standart hata (SE):10,897 ve Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ):0,982 bulunmuştur. Model oluşturma aşamasında elde edilen tahmin değerleri ile deneysel  $M_r$  değerleri Şekil 6'da grafikte verilmiştir. Öngörülen  $M_r$  değerlerinin hata miktarları da MPa cinsinden Şekil 7'de görülmektedir. Şekil 7'deki farklar sıfıra ne kadar yakınsa modelinin doğruluk oranı o kadar yüksektir. Eğer hata diyagramında veriler belirli bir eğimde ise (lineer, parabolik, üstel vb.) model denkleminde değişikliğe gitmek gerekir. Bu çalışmada farklar kabul edilebilir düzeyde çıkmıştır.

#### 3.1. Regresyon Modelinin Doğrulaması (Verification of new regression model)

Regresyon modeli oluşturmada kullanılmayan 28 veri seti (toplam verilerin %25'i) modeli doğrulamada (test etmede) kullanılmıştır. 8 farklı girdi değişkeni regresyon modelinde Eş.6'da yerine konarak daha önce modelin hiç karşılaşmadığı  $M_r$  değerleri tahmin edilmiştir. Regresyon modeli öngörüsü ile gerçek deneysel veriler Şekil 8'de birlikte gösterilmiştir. Oluşturulan  $M_r$  tahmin modelinin doğrulama aşamasında standart hata (SE): 10,51 ve Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ): 0,981 bulunmuştur. Elde edilen SE ve  $R^2$  değerlerine göre modelin doğruluk oranını oldukça yüksektir.  $R^2$  değeri tek başına model verilerinin eş doğrusallığını göstermediği için farklar grafiğinin de incelenmesinde fayda vardır (Şekil 9). Diyagramdan



**Şekil 6.** Regresyon yönteminde öngörülen  $M_r$  ile ölçülen  $M_r$  değeri karşılaştırması  
(Comparison of regression model's  $M_r$  prediction and real  $M_r$ )



**Şekil 7.** Çoklu regresyon  $M_r$  tahmin modelinden elde edilen farklar (saçılım grafiği)  
(Regression residuals, scatter chart)

farkların -22,94 ile +15,75 arasında rastgele dağıldığı görülmektedir.

### 3.2. Regresyon Modeli Bulgularının Uzan Modeli ile Karşılaştırılması (Comparison of new regression model and Uzan constitutive model)

Granüler yol malzemeleri için en çok bilinen  $M_r$  tahmin modeli, Modifiye Uzan modeli [24] olarak adlandırılan ve numuneye etkiyen gerilmeleri dikkate alan modeldir. Bu bölümde geleneksel olarak kullanılmakta olan Modifiye Uzan modeli ile regresyon analiz bulguları karşılaştırılmıştır. Eş. 7'de görülen Modifiye Uzan modeli esas itibarıyla numuneye etkiyen deviatör gerilme ile toplam gerilmeyi dikkate alan non-lineer bir tahmin modelidir. Bu model kullanılarak yapılan analizler aşağıda verilmiştir.

$$M_r = (k_1 Pa) \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{Pa}\right)^{k_3} \quad (7)$$

$M_r$  = Esneklik modülü

- $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$  (Toplam gerilme)
- $k_1, k_2, k_3$  = Regresyon katsayıları
- $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$  = Deviatör gerilme
- Pa = Pascal

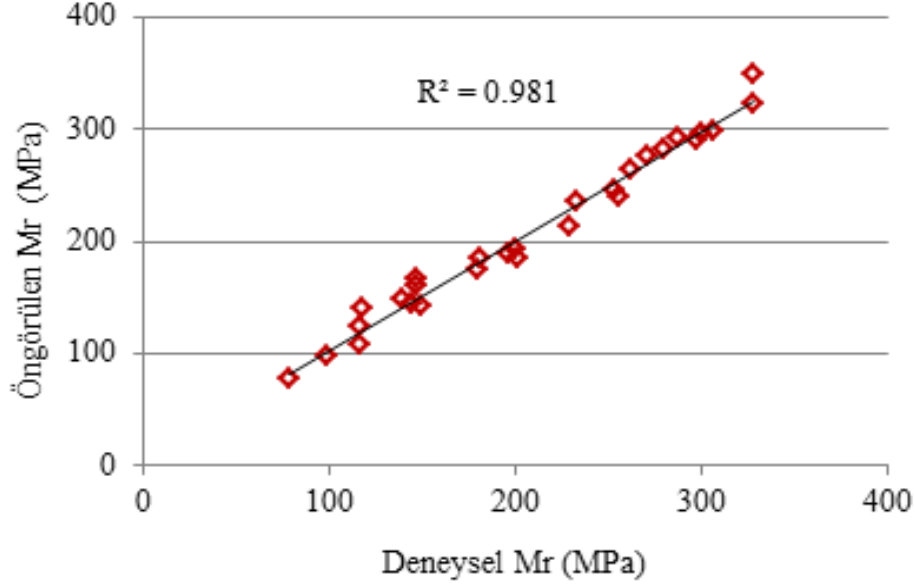
Uzan modelini çözümleyebilmek için eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak lineer regresyona uyumlu forma çevrilmiştir.

$$\text{Log}(M_r) = \text{Log}(k_1 Pa) + k_2 \text{Log}(\theta/Pa) + k_3 \text{Log}(\sigma_d/Pa) \quad (8)$$

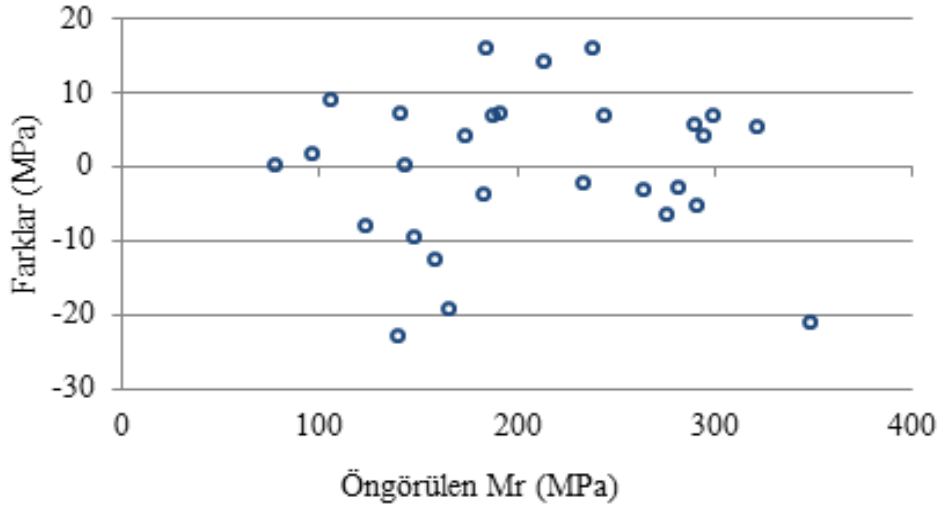
Bu haliyle model aşağıdaki eşitliğe benzemektedir.

$$Y = A_1 + A_2 X_1 + A_3 X_2 \quad (9)$$

Buradaki bilinmeyenler;  $M_r$ ,  $\theta$  ve  $\sigma_d$  deney sonuçlarından elde edildiğine göre eşitlikte  $A_1, A_2, A_3$  katsayıları regresyon



**Şekil 8.** Regresyon modelinin  $M_r$  tahminleri ile deneysel verilerin karşılaştırılması (Doğrulama aşaması)  
(Comparison of regression model's  $M_r$  prediction and observed  $M_r$ ; Verification stage)



**Şekil 9.** Regresyon modelinde öngörülen  $M_r$  ile deneysel  $M_r$  farkları (Doğrulama aşaması)  
(Regression residuals, Verification stage)

analizi ile bulunur. Bu katsayılardan  $A_1 = \text{Log}k_1$ ,  $A_2 = k_2$  ve  $A_3 = k_3$ 'ü ifade eder.

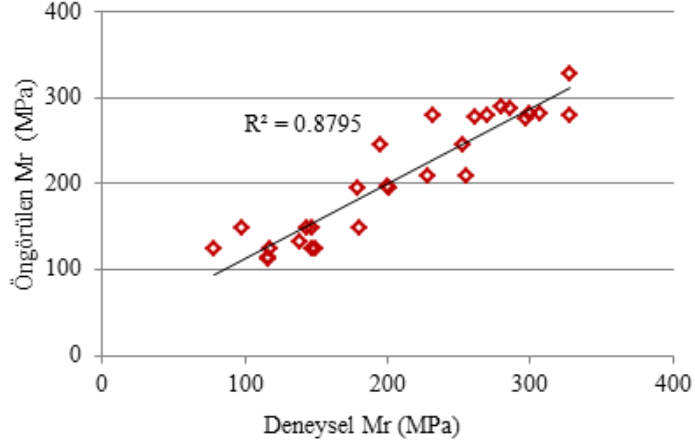
77 veri seti ile yapılan regresyon analizi neticesinde  $k_1 = 8,21$ ,  $k_2 = 0,556$  ve  $k_3 = 0,014$  bulunmuştur.  $k$  katsayıları yerine konularak çalışmada kullanılan agregalar için aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir.

$$M_r = 8,21 \cdot \sigma_d^{0,556} \cdot \sigma_d^{0,014} \quad (10)$$

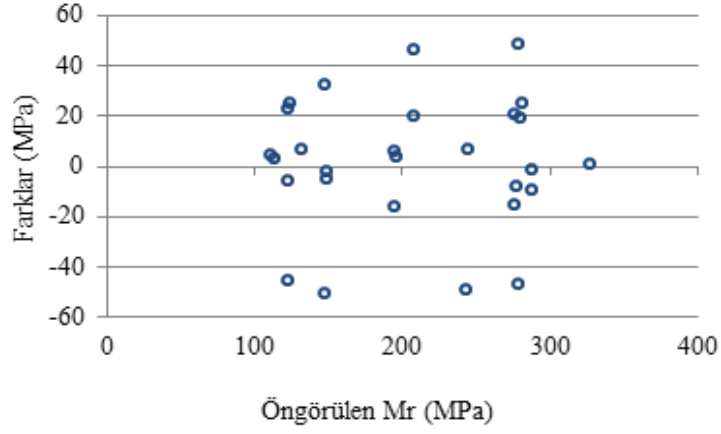
Daha sonra model oluşturmada kullanılmayan 28 veri seti Uzan modelinde yerine konarak  $M_r$  değerleri tahmin edilmiştir. Elde edilen  $M_r$  bulguları Şekil 10'da verilmiştir.  $M_r$  tahmin modelinde standart hata (SE):26,66 ve

Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ):0,88 bulunmuştur. Şekil 11'de farkların -50,06 ile +48,06 arasında rastgele dağıldığı görülmektedir. Lineer çoklu regresyon analizi ile Uzan modeli bulguları Şekil 12'de birlikte verilmiştir. Grafikten Uzan modeli sonuçlarını gösteren kırmızı noktaların, mavi noktalara göre çok daha fazla saçılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Her iki tahmin modelinin istatistiksel karşılaştırması ise Tablo 3'de yapılmıştır. Tablo 3'den görüldüğü üzere çoklu regresyon analizi ile elde edilen doğruluk dereceleri diğer modele göre oldukça yüksektir.  $R^2$ , SE ve RMSE değerlerinin her üçü açısından da regresyon bulgularının oldukça başarılı olduğu söylenebilir. Uzan modeline kıyasla çoklu regresyon analizinde malzeme davranışı daha iyi ortaya konmaktadır.

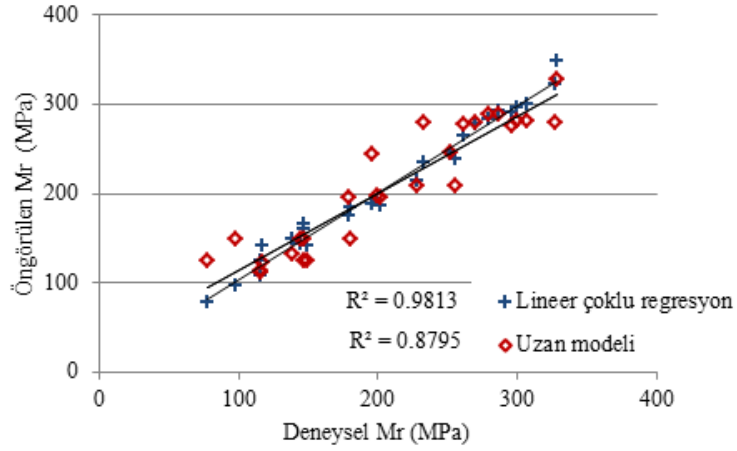




Şekil 10. Uzan modelinde öngörülen  $M_r$  ile deneysel  $M_r$  değerleri karşılaştırması  
(Comparison of Uzan model's  $M_r$  prediction and observed  $M_r$ )



Şekil 11. Uzan modelinde öngörülen  $M_r$  ile deneysel  $M_r$  arasındaki farklar (saçılım grafiği)  
(Residuals of Uzan model  $M_r$  predictions)



Şekil 12. Öngörülen  $M_r$  için lineer çoklu regresyon analizi ile Uzan modeli bulgularının karşılaştırılması  
(Comparison of multiple regression model and Uzan model  $M_r$  predictions)

**Tablo 3.**  $M_r$  tahmin modellerinin istatistiksel karşılaştırması (Statistical comparison of two estimation model)

Analiz yöntemi	$M_r$ Aralığı (mPa)	Değişim $R^2$	Standart Hata (SE)	Ortalama hata (RMSE)	karesel
Çoklu Regresyon	70 – 385,4	0,98	10,51	10,14	
Uzan modeli	70 – 385,4	0,88	26,66	25,73	

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada agrega fiziksel özellikleri ve DÜE deney verileri kullanılarak granüler yol malzemelerinin Esneklik modülü ( $M_r$ ) değerini tahmin etmeye yarayan bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelden elde edilen performans değerleri oldukça başarılıdır. Standart hata (SE): 10,897 ve Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ): 0,982 bulunmuştur. Oluşturulan matematiksel model granüler yol malzemeleri için önemli bir mukavemet parametresi olan esneklik modülü değerinin farklı agrega özellikleri ve farklı gerilmeler altında daha fazla deney yapmadan hesaplanabilmesini mümkün kılmaktadır. Yani belirli değişkenler kullanılarak, yeni giriş değerleri için sonuç üretebilmektedir.

Yapılan analizlerde agregaların bazı fiziksel özelliklerinin (mikro-Deval katsayısı ve zahiri özgül ağırlık değerinin) modeldeki etki katsayılarının “0” olduğu, dolayısıyla esneklik modülü üzerinde etkisinin kayda değer olmadığı belirlenmiştir. Değişkenler arasında  $M_r$  üzerinde en yüksek etkiye sahip olan ise agrega karışımının kuru birim ağırlık (DD) değeridir. Ardından agrega darbelene değeri (AIV) ve yassılık indeksi (FI) gelmektedir.

Ayrıca bu çalışmada ortaya konan matematiksel model farklı mineral kökenli agregalar için de oluşturulduğu takdirde yol üstü yapı tasarımı için kullanılan mekanik-ampirik hesap programları ile entegre hale getirilebilir ve daha büyük faydalar elde edilebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Karavaşin M., Tığdemir M., Türkiye koşullarında uygun bir esnek üstü yapı kalınlık tasarım metodu geliştirilmesi için yeni bir yaklaşım, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Asfalt'98. Ankara, pp: 238-247, 1998.
- Kalcheff I.V. and Hicks R.G., A Test procedure for determining the resilient properties of granular materials. Journal of Testing and Evaluation, ASTM, Vol. 1 No.6, Nov 1973.
- Rada G., Witczak M.W., Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular material, Transportation Research Record (TRB), Vol 810, pp: 23-33, 1981.
- Thompson M.R. and Smith K.L., Repeated triaxial characterization of granular bases, Transportation Research Record (TRB), Vol 1278, 1990.
- Yılmaz A., Karavaşin M., Çağlar M.F., Development of low-cost dynamic triaxial test apparatus for granular materials, Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 12-1, 26-34, 2008.
- Lekarp F., Isacsson U. and Dawson A., State of art I: Resilient response of unbound aggregates, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol 1, pp. 66-75, 2000.
- Papagiannakis A.T. and Masad E.A., Pavement design and materials, John Wiley & Sons, New York ABD., 2012.
- Mohammad L.N., Herath A., Abu-Farsakh M.Y., Gaspard K., Gudishala R., Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters, Journal of Materials in Civil Engineering 19 (11), pp. 986-992, 2007.
- Çöleri E, Güler M., Güngör A., Harvey J., Prediction of subgrade resilient modulus using genetic algorithm and curve-shifting methodology, alternative to nonlinear constitutive models, Transportation Research Record (TRB), Vol 2170, pp. 64-73, 2010.
- Han Z., Vanapalli S.K., State-of-the-Art: Prediction of Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils., International Journal of Geomechanics, Volume 16, Issue 4 - August 2016.
- Sadrossadat E., Heidariapanah A., Osouli S., Prediction of the resilient modulus of flexible pavement subgrade soils using adaptive neuro-fuzzy inference systems, Construction and Building Materials, Vol 123, Pages 235-247, October 2016.
- Arshad M., Correlation between resilient modulus ( $M_r$ ) and constrained modulus ( $M_c$ ) values of granular materials, Construction and Building Materials, Vol 159, Pages 440-450, January 2018.
- Nagula S.S, Robinson R.G. and Krishnan J.M., Mechanical characterization of pavement granular materials using hardening soil model, International Journal of Geomechanics, Vol 18, Issue 12 - December 2018.
- Bilodeau J.P., Plamondon C.O., Estimation of resilient modulus of unbound granular materials used as pavement base: combined effect of grain-size distribution and aggregate source frictional properties, Materials and Structures, Vol 49, Issue 10, pp 4363–4373, October 2016.
- AASHTO TP46, Standard test method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing, 17th Edition, Washington D.C., 1994.
- Öztürk Ö., Çelikel M., Erkan M., Türkiye agrega sektörü rapor, Hazır Beton, Sayı 84, s. 52-56, 2007.
- Demir İ., Uzun İ., The Usage properties of Kaman (Kırşehir, Turkey) granites as crushed stone aggregates,

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22(3), 369-378, 2007.

18. Ünsal N., İnşaat mühendisleri için jeoloji. Alp Yayınevi, İstanbul, 1993.
19. Kahveci A.E., Diyarbakır yöresinde bazalt taşının yapı malzemesi olarak kullanımının incelenmesin üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2008.
20. Yılmaz Ş., Volkanik bazalt kayalarından cam- seramik malzeme üretimi ve özellikleri, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 1997.
21. Karayolları Teknik Şartnamesi 2013, Yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler), Karayolları Genel Müdürlüğü yayımları, Ankara, 2013.
22. Santha B.L., Resilient modulus of subgrade soils: comparison of two constitutive equations, Transportation Research Record (TRB), Vol 1462, pp: 79-90, 1994.
23. Bayazıt M., Oğuz B., Mühendisler için istatistik, Birsan Yayınevi, İstanbul, 1998.
24. Uzan J., Characterization of granular materials, Transportation Research Record (TRB), Vol 1022, pp: 52-59, 1985.

