

# **ZONGULDAK TAŞKÖMÜRÜ HAVZASI KÖMÜR ÇEVRE KAYAÇLARININ DEFORMASYON MODÜLÜNÜN ANALİTİK OLARAK BELİRLENMESİ**

## **DETERMINATION OF THE DEFORMATION MODULUS OF THE COAL MEASURES ROCKS IN ZONGULDAK HARDCOAL BASIN FROM AN ANALYTICAL POINT OF VIEW**

**Ekin Köken<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 67100 Zonguldak  
ekin.koken@beun.edu.tr*

### **Öz**

Uzunayak madenciliğinde kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülü, yalancı tavan katılığının kestirilmesi ve yalancı tavanın yükler altındaki davranışı hakkında önemli bilgiler vermesi sebebiyle oldukça önemli bir büyüklük olarak kabul edilmektedir. Yeraltından uygun kaya numunelerinin alınmasının zor olması ve statik elastik sabitler deney düzeneğinin genellikle kömür işletmelerinde bulunmaması sebebiyle kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülü yapılması kolay, tekrarlanabilirliği yüksek ve ekonomik kaya mekaniği deneyleri ile kestirilebilir.

Bu çalışmada Zonguldak Taşkömürü Havzası'ndaki kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünün analitik olarak kestirilmesi için kömür çevre kayaçlarının porozitesi ve tek eksenli basınç dayanımı gibi elde edilmesi nispeten kolay deney verilerinden yararlanılmıştır. Böylece deney verilerinin en küçük kareler yöntemi ile irdelenmesi sonucunda birkaç görgül bağıntı önerilmiştir. Önerilen görgül bağıntılardan elde edilen deformasyon modülü değerleri laboratuvar çalışmalarından elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve ortaya çıkan sonuçlar tartışılmıştır. Önerilen görgül bağıntıların uygunluğu ise ki kare ( $x^2$ ) uygunluk testi ile irdelenmiştir. Ki kare testlerine göre tek değişken içeren görgül bağıntıların geçerli olmadığı buna karşın iki değişkenli görgül bağıntının  $G = 0,9$  mertebesinde geçerli olduğu görülmüştür. Ayrıca ilgili mühendislerin pratik olarak kullanması için kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünü kestirmeyi amaçlayan bir yüzey modeli geliştirilmiştir. Sonuç olarak, kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünün iki değişkenli görgül bağıntı ile yeterli güvenilirlikte kestirilebileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler :** Taşkömürü, Kömür çevre kayaçları, Uzunayak, İstatistik, Deformabilite

### **Abstract**

The deformation modulus of the coal measures rocks in longwall mining is acknowledged as a crucial quantity owing to estimating the stiffness of the immediate roof and the behavior of the immediate roof under loads. Hence difficulties obtaining proper rock samples from underground and generally lacking of the static elastic testing apparatus in the coal corporations, the deformation modulus of the coal measures rocks can be estimated with the help of easily performable, highly repeatable and economic rock mechanics tests. To estimate the deformation modulus of the coal measures rocks in Zonguldak Hardcoal Basin, some experimental data which are free for the taking such as porosity and uniaxial compressive strength are practiced upon. So several empirical formulae are proposed by scrutinizing the experimental data with least squared approximation method:

The deformation modulus values obtained from the proposed empirical formulae are compared with the experimental data obtained from the laboratory studies and the generated results are discussed. The convenience of the proposed empirical formulae is scrutinized via chi-squared ( $x^2$ ) compliance test. According to the chi-squared tests it is seen that the proposed empirical formulae which involve one variable are not valid, whilst the empirical formula with two variables is valid in the order of  $G = 0,9$ . Furthermore, a surface model aimed to estimate the deformation modulus of coal measures rocks is developed to practically use by the relevant engineers. It is concluded that the deformation modulus of the coal measures rocks could be estimated with sufficient reliability by the proposed empirical formula with two variables.

**Key Words:** Hardcoal, Coal measures rocs, Longwall, Statistics, Deformability

## GİRİŞ

En genel anlamda kayaçların deformasyon modülü, kayaçların yükler altındaki davranışlarının belirlenmesi açısından oldukça önemli bir büyüklük olarak tanımlanmaktadır. Kayaçların gevrek veya sünümlü davranış göstermeleri hakkında önemli bilgiler veren deformasyon modülü, uzunayak madenciliğinde yalancı tavan katılığının belirlenmesi, ayak arkasının kırılma şeklini etkilemesi, mühendislik jeolojisinde de kaya temel ve şev tasarım uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir değiştirge olarak kullanılmaktadır. Bunlar dışında, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde deformasyon modülü, önemli bir girdi parametresi olarak uygulamalarda kendine yer bulmaktadır.

Literatürde oldukça fazla yer alan kaya kütlelerinin deformasyon modülünün kestirilmesini amaçlayan görgül bağıntılarda da kaya malzemesinin deformasyon modülü yer almaktadır. Kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin deformasyon modülü değerlerinin kullanıldığı uygulamalardan bazıları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Yalancı tavan katılığı kavramı, tavanın içerdiği süreksizlikler ile tavan tabakalarının deformasyon modülünün bir bileşkesi olarak tanımlanmaktadır. Yalancı tavan katılığı özetle, kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{gm}$ ) ve deformasyon modülü ( $E_m$ ) ile ifade edilebilir. Özel (1995), uzunayaklarda yürüyen tahkimat tasarımı hakkında yaptığı çalışmalarda, yalancı tavan katılığını, tavan tabakalarının tek tabaka halinde (yekpare tabaka) ve ardalanmalı tavanlar (tabakalı tavanlar) olmak üzere iki farklı şekilde incelemiştir (Şekil 1).

Eğer tavan tabakaları tek tabaka halindeyse, yalancı tavan katılığı Eşitlik 1 ile; ardalanmalı (n tabakalı) tavanların hakim olduğu bölgelerde ise, yalancı tavan katılığı Eşitlik 2 ile belirlenmektedir.

$$K_{im} = \frac{E_m A}{h_{im}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{K_{im}} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \frac{h_{im(i)}}{E_{m(i)}} \quad (2)$$

Burada  $E_m$  tavan tabakalarının (tavan kaya kütlelerinin) deformasyon modülü (GPa), A tahkimat ünitelerinin kapladığı yüzey alanı ( $m^2$ ) ve  $h_{im}$  yalancı tavan kalınlığı (m) olarak tanımlanmaktadır. Bu birimlere göre yalancı tavan katılığı  $K_{im}$ 'in birimi GN/m olmaktadır.

Köken (2013a), Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda yer alan bazı uzunayaklarda yaptığı çalışmalar sonucunda niceliksel bir yalancı tavan katılığı sınıflaması önermiştir (Çizelge 1). Çizelge 1'de önerilen yalancı tavan katılığı sınıflaması, tavan davranışı ve ayak arkasının kırılma mesafesinin kestirilmesi açısından kullanılmıştır.

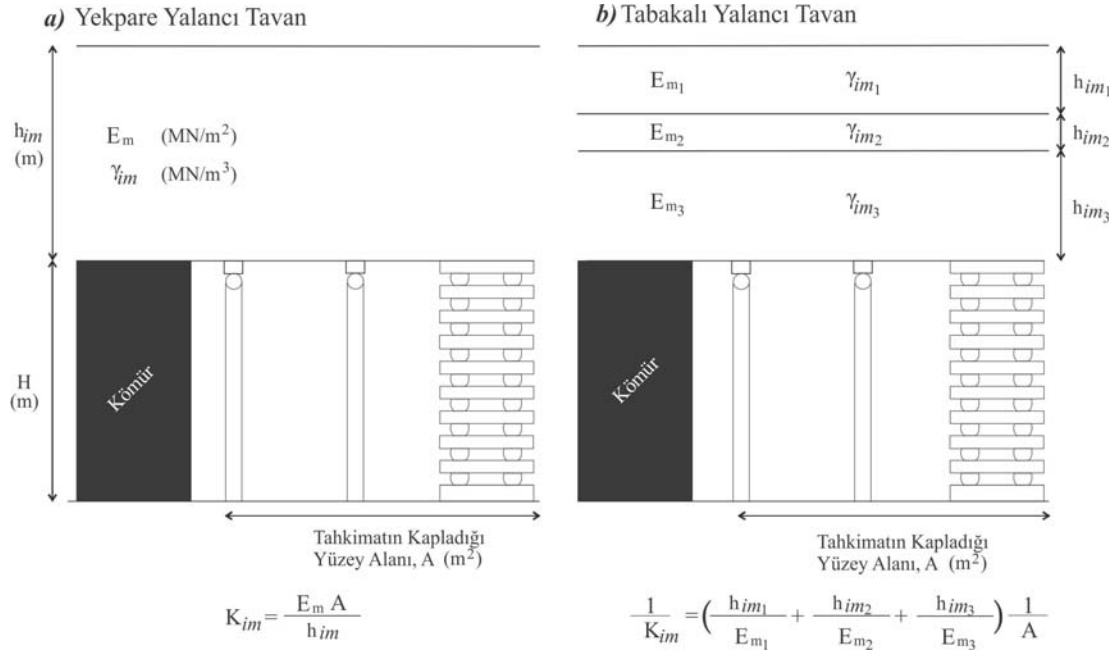
**Çizelge 1.** Zonguldak Havzası'na ait yalancı tavan katılığı sınıflaması (Köken 2013a).  
**Table 1.** Immediate roof stiffness classification related to Zonguldak Basin (Köken 2013a)

Tavan Katılığı	$K_{im}$ (GN/m)
Gevşek	< 2
Orta Katılıkta	2 - 6
Katı	6 - 10
Çok Katı	> 10

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de yer alan kaya kütlelerinin deformasyon modülü ( $E_m$ ) arazide Plaka Yükleme, Flatjack, veya Pressiyometre deneyleri yardımıyla belirlenmektedir. Ancak bu deneyler özel ekipmanlar gerektirmesi ve yüksek maliyetleri nedeniyle uygulamalarda pek yer almamaktadır. Bunun yerine farklı araştırmacıların önerdiği görgül bağıntılar yardımı ile  $E_m$  belirlenebilir.  $E_m$ 'nin kestirimi için 1964 yılından 2012 yılına kadar pek çok araştırmacı bazı görgül bağıntılar önermiştir (Protodyakonov (1964), Bieniawski (1978), Serafim ve Pereira (1983), Nicholson ve Bieniawski (1990), Kalamaras ve Bieniawski (1995), Trueman (1998), Hoek et al. (2002), Gökçeoğlu vd. (2003), Kayabaşı vd. (2003), Zhang ve Einstein (2004), Sönmez vd. (2004), Hoek ve Diedrichs (2006), Sönmez vd. (2006), Beiki et al. (2010), Shen et al. (2012), vb.).

Bu araştırmacıların önerdikleri görgül bağıntıların pek çoğunda kaya malzemesinin deformasyon modülü ( $E_i$ ) bir girdi parametresi olarak kullanılmaktadır.

Uzunayak madenciliğinde ayak arkasının göçebilirliği ve yalancı tavanın kırılma davranışında da tavan tabakalarının deformasyon modülü etkilidir.



Şekil 1. Farklı tavan koşullarında yalancı tavan katılığının belirlenmesi a) Yekpare yalancı tavan b) Tabakalı yalancı tavan (Özel'den 1995 Değiştirilerek).

Figure 1. Determination of the immediate roof at different roof stipulations a) Single immediate roof b) Stratified immediate roof (Revised from Özel (1995)).

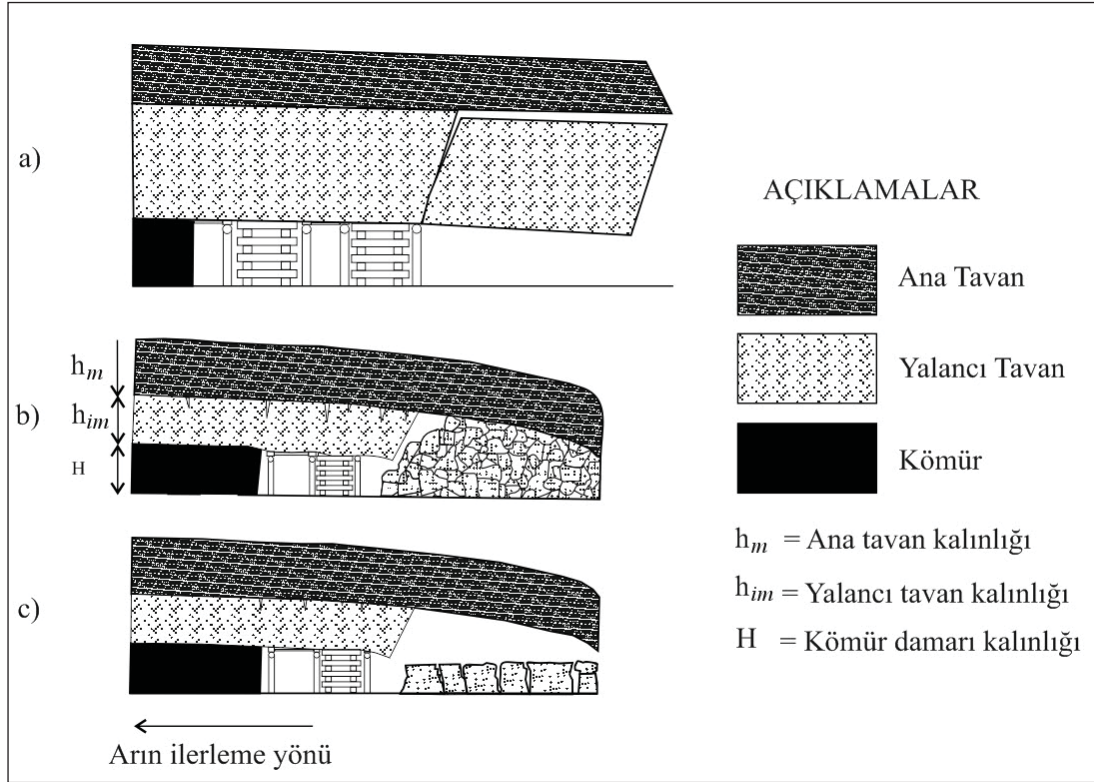
Hindistan kömür madenlerinde yalancı ve ana tavanın eğilme durumlarını gözlemleyen Singh ve Singh (1999); yalancı tavan kalınlığının kömür damar kalınlığından yüksek ve nispeten duraylı yalancı tavanlarda, tavan kırılmasının yekpare büyük bloklar şeklinde olduğunu ifade etmektedir (Şekil 2a). Tavan iri bloklar şeklinde ve belirli aralıklarla kırılmakta olup, periyodik kırılma şeklinde bir göçme davranışı bu tip tavanlarda izlenmektedir. Periyodik kırılmada gözlenen başka bir özellik ise, ana ve yalancı tavanlarda gözle görülebilir bir eğilme davranışının izlenememesidir.

Yalancı tavan kalınlığının kömür damarı kalınlığına yakın olduğu durumlarda ise, tavan genellikle iki farklı şekilde kırılmaktadır. Eğer yalancı tavanın eğilme dayanımı ana tavanın eğilme dayanımından yüksek ise, parçalı-bloklı bir göçme davranışı gözlenir (Şekil 2b).

Burada ifade edilen yalancı ve ana tavanın eğilme dayanımlarının farklılıkları tabakaların kalınlıkları ve litolojik farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Uzunayaklarda ayak arkasındaki en çok karşılaşılan göçme davranışı bu şekildedir. Ana ve yalancı tavan tabakalarında belirgin bir eğilme

izlenmekte olup, tavanda tabakalarındaki çekme çatlaklarını devrilmiş bloklar üzerinden gözlemek mümkündür. Gevşemiş tavan blokları; tabaka, süreksizlik veya ara kesme düzlemleri boyunca kayarak veya yalancı tavandan koparak devrilmektedir. Tavan kırılma süreleri ve ayağın kırılma mesafesi genellikle tahmin edilebilmektedir. Bu tip tavanlarda yalancı tavan süreksizliklerinin konumları da göçme davranışını etkileyen önemli bir değişken olarak ortaya çıkar. Ana tavanın çekme dayanımı yalancı tavanınkinden yüksek ise, bu sefer de yalancı tavanda bloklı dökülmeler şeklinde bir göçme davranışı izlenir. Birbirini kesen süreksizliklerin oluşturduğu bloklar yalancı tavanda askıda beklemektedir. Arın ilerledikçe ayak arkasındaki giriş şeklinde yalancı tavandan dökülerek göçen bu bloklar genellikle eş boyutlu bir görünümde (Şekil 2c). Tavan kırılma şekilleri ve kırılma mesafelerini etkileyen tavan tabakalarının deformasyon modülünün bu açıdan ne denli önemli olduğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 2.** Ana ve yalancı tavan tabakalarının eğilme durumlarına göre tavan kırılma şekilleri ve göçme davranışları (Singh ve Singh 1999'dan değiştirilerek).

**Figure 2.** Roof breaking forms and caving behaviors of the main and immediate roof according to the bending states (Revised Singh and Singh (1999)).

Kaya malzemesi deformasyon modülünün yeraltı madenciliğindeki bir başka kullanım alanı ise yeraltı açıklıklarının yeryüzüne olan etkilerinin (tasman) ortaya konulmasıdır. Özellikle şehir altı madenciliğinin yapıldığı Zonguldak'ta gerçekleştirilen tasman araştırmalarında Akçın (1995) kaya malzemesinin deformasyon modülü etkin olarak kullanmıştır. Akçın (1995) yaptığı çalışmalarda, değişik jeolojik yapılara sahip kömür havzalarında yapılan madencilik çalışmalarının yeryüzünde yaratacağı etkinin büyüklüğünü belirleyebilmenin oldukça önemli olduğunu, günümüzde bu konudaki genel eğilimin çalışılan havzanın özgün mekanik parametrelerinin ve üretim boşluğu geometrisinin belirlenmesiyle daha sağlıklı çözümler elde edilebileceğini önemle vurgulamıştır. Tasman araştırmalarında kaya malzemesinin deformasyon modülü, Berry (1977) tarafından önerilen yöntemle göre, tasman büyüklüğü ve geometrisi cevher çevre kayalarının deformasyon modülü ile ilişkilidir. Bu iki büyüklüğün ortaya konması için Berry *Yönsemez İzotropik Yüzey Modeli*'ni geliştirmiştir.

Buraya kadar kaya malzemesi ve kaya kütlesi deformasyon modülünün bazı uygulamalardaki kullanım şekilleri özetlenmiştir. Bu çalışmada, özellikle yeraltı madenciliği uygulamalarında kullanılmak üzere kömür çevre kayalarının deformasyon modülünün analitik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için yeraltından alınan uygun boyutlardaki numuneler kullanılarak statik elastik sabitler deneyleri, porozite deneyleri ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. 18 farklı kömür çevre kayacının kullanıldığı laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçların en küçük kareler yöntemi ile incelenmesi sonucunda kömür çevre kayalarının tabakalanmaya dik  $E_1$  değerlerini tahmin etmeyi amaçlayan birkaç görgül bağıntı önerilmiştir.

#### LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

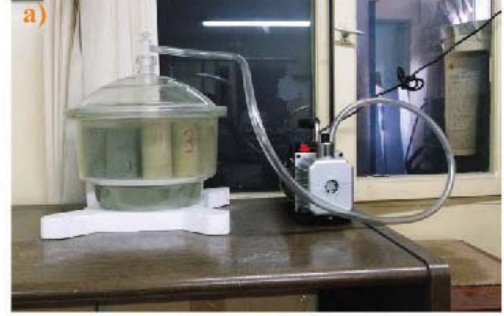
Laboratuvar deneyleri kapsamında 18 farklı kömür çevre kayacı kullanılarak kaya malzemesinin, doğal birim hacim ağırlığı ( $\gamma_n$ , kN/m<sup>3</sup>) porozitesi ( $n$ , %), tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{ci}$ , MPa) ve statik elastik sabitlerin ( $E_1$ , GPa -  $\nu_1$ ) belirlenmesi için bir

dizi kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaya malzemelerinin porozitesinin belirlenmesi için vakum desikatörü kullanılmıştır (Şekil 4a). Oda sıcaklığındaki suda yaklaşık 3 saat vakum altında kayaçlar doymun hale getirilmiş ve kaya malzemelerinin poroziteleri belirlenmiştir. Kaya malzemesi porozitesinin belirlenmesinde TS-699 standardı göz önünde bulundurulmuştur.

Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri ASTM D2938-95, statik elastik sabitlerin belirlenmesinde ise ASTM D3148-96 deney standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde SEIDNER marka katı yükleme makinesi kullanılmış (Şekil 4b) ve yükleme hızı 0,5MPa/s olarak seçilmiştir. Statik elastik sabitler deneylerinde ise LVDT (Linear Variable Differential Transformer) eksenel ve çapsal birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır (Şekil 4c). Statik elastik sabitler deneylerinde kaya malzemelerinin teğetsel deformasyon modülü ( $E_t$ ) ve teğetsel Poisson Oranı ( $\nu_t$ ) değerleri belirlenmiştir.

Yapılan deney sonuçlarına göre ortalama  $\gamma_n$ ,  $n$ ,  $\sigma_{ci}$ ,  $E_t$  ve  $\nu_t$  değerleri toplu olarak Çizelge 3'te verilmiştir. Ayrıca numunelerin renk ve doku değişimlerine göre kaya malzemelerinin ayrışma-bozunma durumları ISRM'e (1981) göre belirlenmiştir. Buna göre incelenen kayaçların ayrışma-bozunma dereceleri Ayrışmamış ( $W_1$ ), Az ayrışmış ( $W_2$ ) ve Orta derecede ayrışmış ( $W_3$ ) arasında değişmektedir (Çizelge 3). İncelenen kayaçların Modül oranları

(MR) ise Eşitlik 3 ile belirlenmiştir. Buna göre incelenen kayaçların modül oranları ortalama ve düşük olarak belirlenmiştir (Şekil 5).



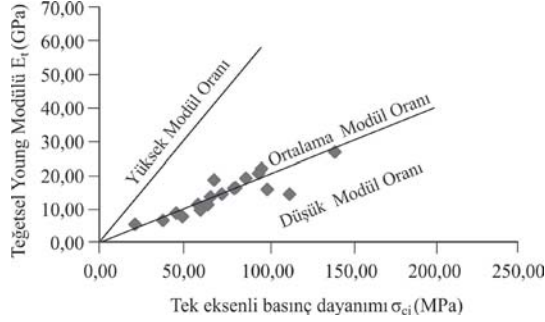
Şekil 4. Laboratuvar deneylerinden bazı görüntüler: a) Kayaçların porozitelerinin belirlenmesi b) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi c) Deformabilite deneyi.  
Figure 4. Some schemes from laboratory tests: a) Determination of porosity of rocks b) Uniaxial compressive strength test c) Deformability Test

Çizelge 3. İncelenen kayaçlara ait toplu deney sonuçları.  
Table 3. The whole test results of examined rocks.

Kayaç Türü	Alındığı Yer	n (%)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_t$ (GPa)	$\nu_t$	MR	Ayrışma-Bozunma ISRM (1981)
Kuvarslı Kumtaşı	Amasra / Bartın	5,14	25,47	81,44	16,27	0,22	199,78	W <sub>2</sub>
Silttaşı	Kandilli / Zonguldak	4,44	25,61	80,40	16,10	0,18	200,25	W <sub>1</sub>
Siltli Kiltası (Arakesme)	Üzülmez / Zonguldak	15,91	24,88	21,40	5,26	0,31	245,79	W <sub>3</sub>
Silttaşı	Üzülmez / Zonguldak	3,45	26,14	68,55	18,60	0,23	271,33	W <sub>2</sub>
Mikalı Kumtaşı	Gelik / Zonguldak	1,27	25,94	100,25	15,76	0,16	157,21	W <sub>1</sub>
Orta Taneli Kumtaşı	Amasra / Bartın	3,05	25,32	73,23	14,37	0,19	196,23	W <sub>2</sub>
İnce Taneli Kumtaşı	Üzülmez / Zonguldak	0,71	25,88	140,60	26,87	0,20	191,11	W <sub>1</sub>
Kumlu Şeyl	Azdavay / Kastamonu	10,20	26,25	58,97	11,24	0,24	190,61	W <sub>2</sub>
Silttaşı	Amasra / Bartın	6,62	26,54	38,10	6,43	0,29	168,77	W <sub>2</sub>
İnce Taneli Kumtaşı	Azdavay / Kastamonu	3,16	25,77	96,86	22,01	0,14	227,24	W <sub>1</sub>
İnce Taneli Kumtaşı	Gelik / Zonguldak	3,23	25,69	95,14	20,57	0,17	216,21	W <sub>2</sub>
İnce Taneli Kumtaşı	Amasra / Bartın	2,83	25,44	87,54	19,10	0,15	218,19	W <sub>2</sub>
Konglomera	Azdavay / Kastamonu	5,94	24,79	60,40	9,57	0,23	158,44	W <sub>3</sub>
Orta Taneli Kumtaşı	Karadon / Zonguldak	4,65	24,20	64,80	11,16	0,22	172,22	W <sub>1</sub>
İri Taneli Kumtaşı	Azdavay / Kastamonu	8,14	25,43	49,70	7,60	0,30	152,92	W <sub>2</sub>
Kiltası	Üzülmez / Zonguldak	8,80	25,71	45,95	8,65	0,27	188,25	W <sub>2</sub>
Konglomera	Üzülmez / Zonguldak	7,17	23,53	66,46	13,52	0,24	203,43	W <sub>2</sub>
Bantlı Kumtaşı	Gelik / Zonguldak	10,21	22,52	113,56	14,33	0,25	126,19	W <sub>1</sub>

$$MR = \frac{E_t}{\sigma_{ci}} \quad (3)$$

Burada  $E_t$  kaya malzemesinin teğetsel Young Modülünü (MPa) ifade etmektedir.



Şekil 5. İncelenen kayaçların modül oranları (MR).  
Figure 5. Modul Ratios (MR) of examined rocks.

### İSTATİSTİKSEL ANALİZ

En küçük kareler yönteminin kullanıldığı istatistiksel çalışmalar, tek değişkenli ve iki değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizlerini içermektedir. Tek değişkenli istatistiksel analizlerde kaya malzemesinin  $n$  ve  $\sigma_{ci}$  değerleri ile  $E_t$  arasındaki ilişkiler ayrı ayrı irdelenmiş, iki değişkenli yapılan analizlerde ise bu iki değer birlikte kullanılması ile doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Tek ve iki değişkenli regresyon analizlerinde doğrusal olmayan üstel yaklaşımlar sırasıyla Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$f(y) = a \times x^b \quad (4)$$

$$f(y) = a \times x^b \times z^c \quad (5)$$

Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'de yer alan  $y$  bağımlı değişkeni regresyon analizlerinde  $E_t$ ,  $x$  ve  $z$  bağımsız değişkenleri ise sırasıyla  $n$  ve  $\sigma_{ci}$  olarak kabul edilmiştir.

Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te ifade edilen  $a$ ,  $b$  ve  $c$  değerleri ise regresyon analizleri sonucunda belirlenen sabitlerdir.

Gerçekleştirilen tek değişkenli regresyon analizlere göre kömür çevre kayaçlarının teğetsel deformasyon modülü  $E_t$  Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 ile belirlenebilir.

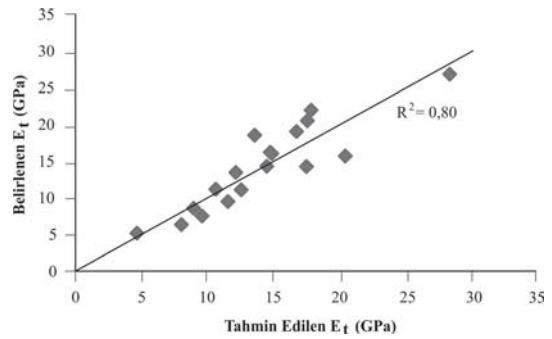
$$E_t = 25,7 \times n^{-0,43} \quad R^2 = 0,61 \quad (6)$$

$$E_t = 0,26 \times \sigma_{ci}^{0,92} \quad R^2 = 0,73 \quad (7)$$

İki değişkenli regresyon analiz sonuçlarına göre ise  $E_t$  Eşitlik 8 ile belirlenebilir. Eşitlik 6, Eşitlik 7 ve Eşitlik 8'de  $E_t$  GPa ve  $n$  % ve  $\sigma_{ci}$  MPa cinsindedir.

$$E_t = 0,63 \times n^{-0,12} \times \sigma_{ci}^{0,76} \quad R^2 = 0,80 \quad (8)$$

İstatistiksel analizler sonucunda geliştirilen bağıntılara (Eşitlik 6, Eşitlik 7 ve Eşitlik 8'e) bakıldığında çoklu regresyon analizinden elde edilen görgül bağıntının (Eşitlik 8) doğruluk katsayısının tekli regresyon analizleri sonucunda türetilmiş bağıntıların doğruluk katsayılarından yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Eşitlik 8 ile kestirilen  $E_t$  değerleri ile laboratuvar'dan elde edilen  $E_t$  değerlerinin karşılaştırılması.  
Figure 6. The comparison of the  $E_t$  values estimated from Equation 8 to the  $E_t$  values obtained from the laboratory studies.

Eşitlik 8 ile verilen görgül bağıntının incelenen kaya örneklerine uygulanması ise Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre Eşitlik 8 ile kestirilen  $E_t$  değerleri ile deney sonuçlarından elde edilen  $E_t$  değerlerinin uyum içinde olduğu Şekil 6'dan anlaşılmaktadır.

Geliştirilen görgül bağıntıların geçerliliği ise ki kare ( $x^2$ ) uygunluk testi ile kontrol edilmiştir. Ki kare testine göre, bir modelin uygun olup olmadığı modelden elde edilen değerlerin (gözlenen değer,  $o_i$ ) deneysel değerlere (beklenen değer,  $e_i$ ) olan yakınlığı ile ilgilidir (Köken 2013b). Daha detaylı bir ifade ile, bir analitik modelin geçerli olup olmadığı, elde edilen  $x^2$  değerlerinin belirli bir güven aralığında ( $G$ ) ve buna bağlı serbestlik derecesinde ( $\lambda$ )  $x^2$  dağılım tablosunda verilen değerlerden küçük olmasına bağlıdır. Aksi durumlarda önerilen model söz konusu araştırmayı temsil etmeyecektir. Geliştirilen görgül bağıntıların uygunluğu bu şekilde irdelenmiştir.

Bu çalışmada önerilen analitik modellerin  $x^2$  değerleri Eşitlik 9 ile serbestlik dereceleri ise Eşitlik 10 ile belirlenmiştir.

$$x^2 = \sum_{i=1}^{n=18} \frac{(o_i - e_i)^2}{o_i} \quad (9)$$

$$\lambda = n - \omega - 1 \quad (10)$$

Burada n çalışmada kullanılan örnek sayısını,  $\omega$  ise analizlerde kullanılan değişken sayısını ifade etmektedir.

Buna göre, geliştirilen görgül bağıntılardan Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'nin  $G = 0,9$  koşullarında geçerli olmadığı, buna karşın Eşitlik 8'in geçerli olduğu Çizelge 4'ten anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.** Ki kare ( $x^2$ ) uygunluk testi sonuçları.

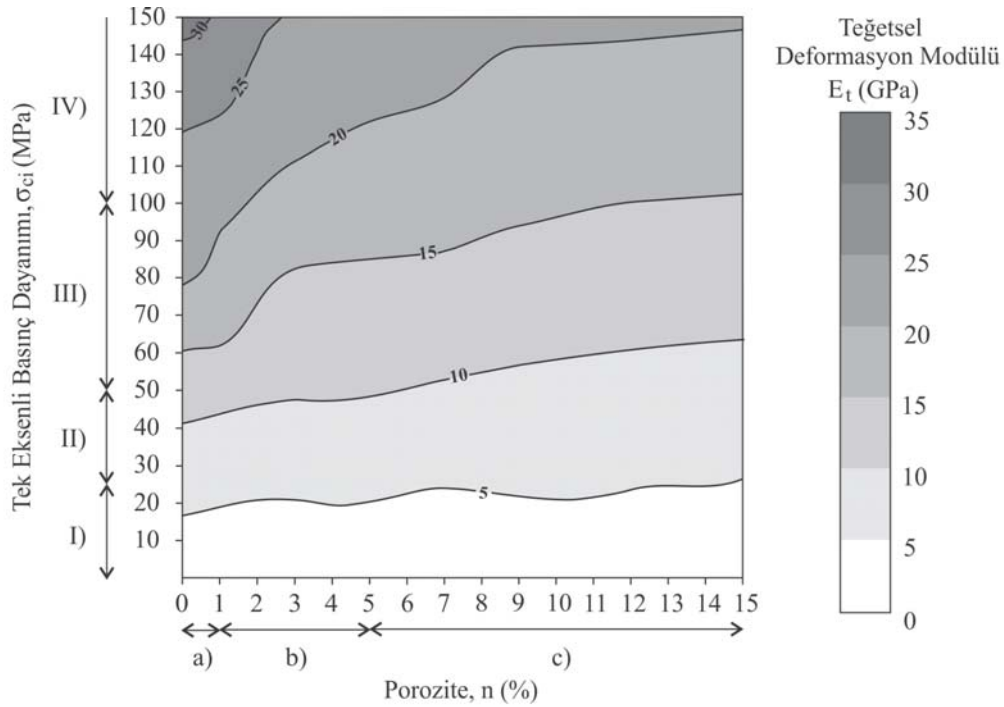
**Table 4.** The Chi - squared ( $x^2$ ) compatibility test results.

Eşitlik No	6	7	8
$x^2$	17,941	8,871	7,252
$x^2$ Tablo ( $G = 0,9$ )	8,547	8,547	7,79
ú	15	15	14

Önerilen görgül bağıntılardan Eşitlik 8 kullanılarak  $E_t$ 'nin kestirimi için saha mühendislerinin kolaylıkla kullanabileceği bir yüzey modeli geliştirilmiştir.

Yüzey modelinin geliştirilmesinde Chiles ve Delfiner (1999)'da detayları ile anlatılan "Kriging Yöntemi" seçilmiş olup, geliştirilmiş model Şekil 6'da verilmiştir.

Şekil 6'da verilen yüzey modelinin kullanımı incelenen kaya malzemesinin porozitesi ve tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin şekil üzerinde kesiştiği yerdeki deformasyon modülünün belirlenmesi şeklindedir. Sözü edilen iki büyüklüğün kesiştiği yerdeki deformasyon modülü, şekil üzerindeki deformasyon modülü kontur çizgileri göz önünde bulundurularak interpolasyon ile belirlenir.



#### AÇIKLAMALAR

Porozite Sınıflaması (Anon, 1979)

- a) Çok Düşük Boşluklu b) Düşük Boşluklu  
c) Orta Derecede Boşluklu

Tek Eksenli Basınç Dayanımı Sınıflaması (ISRM, 1981)

- I) Çok Düşük Dayanımlı II) Düşük Dayanımlı  
III) Orta Derecede Dayanımlı IV) Yüksek Dayanımlı

**Şekil 6.** Eşitlik 8 kullanılarak geliştirilen yüzey modeli.

**Figure 6.** The developed surface model using Equation 8.

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde istatistiksel analizler sonucu elde edilen görgül bağıntıların kuramsal olarak tartışılması yer almaktadır. Doğrusal olmayan basit regresyon analizleri sonucu elde edilen Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'nin  $x^2$  uygunluk testine göre geçerli olmayışı, analitik modellerin tek bağımsız değişkenli bir sistem olmasından kaynaklanacağı gibi incelenen kaya malzemeleri litolojilerinin değişkenliğinden de kaynaklanabilir. Eşitlik 8'de ise kaya malzemesinin deformasyon modülünü önemli ölçüde etkileyen  $n$  ve  $\sigma_{ci}$  değerlerinin beraber kullanılmasının tek değişkenli yapılan analizlere göre daha anlamlı sonuçlar verdiği Eşitlik 8'in  $x^2$  uygunluk testine göre geçerli olmasından da anlaşılmaktadır.

Günümüz istatistiksel çalışmalarında genel eğilim, herhangi bir bağımlı değişkenin kestiriminde o bağımlı değişkeni en çok etkileyen birkaç değişkenin bir arada kullanılması şeklindedir. Bu çalışmada da bu yaklaşım ışığında deneysel ve istatistiksel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan çıkarılacak önemli sonuç ve öneriler ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- i. Zonguldak Taşkömürü Havzası'nda yer alan tipik kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünün kestirimi için bir dizi istatistiksel analiz gerçekleştirilmiş ve kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünün kestirilmesini amaçlayan bazı görgül bağıntılar türetilmiştir. Önerilen görgül bağıntıların uygunluğu  $x^2$  uygunluk testi ile irdelenmiştir. Buna göre tek değişkenli analizler sonucu geliştirilen görgül bağıntıların geçerli olmadığı buna karşın iki değişkenli analiz sonucu önerilen görgül bağıntının (Eşitlik 8)  $G = 0,9$  mertebesinde geçerli olduğu görülmüştür.
- ii. İncelenen kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünün ilgili mühendisler tarafından kolaylıkla kestirilmesini amaçlayan bir yüzey modeli geliştirilmiştir.
- iii. Laboratuvar çalışmalarında incelenen kömür çevre kayaçlarının deformasyon modülünün kestirilmesinde kaya malzemesinin porozitesi ve tek eksenli basınç dayanımının birlikte kullanılmasının gerekliliği istatistiksel analizler sonucunda görülmüştür.
- iv. 18 farklı kömür çevre kayacının kullanıldığı istatistiksel analizlerin örnek sayısı artırılarak önerilen görgül bağıntının ve yüzey modelinin geliştirilmesi önerilmektedir.

## KATKI BELİRTME

Bu makalenin hazırlanmasında değerli görüş ve önerileri ile büyük katkı veren Bülent Ecevit Üniversitesi öğretim üyeleri Sayın Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan AKÇIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

## SUMMARY

In this study, the importance of the deformation modulus of rocks regarding underground mining is mentioned. Then, some rock mechanics tests are performed to indirectly estimate the deformation modulus of the coal measures rocks in Hardcoal Basin in Turkey. Right after, some statistical analysis (basic and multiple regression analysis) are conducted. The convenience of the proposed empirical formulae obtained by the regression analysis is checked out by chi-squared test and it is seen that the empirical formula obtained by the multiple regression analysis is valid in the order of  $G = 0,9$ . Consequently, a surface model is generated to estimate the deformation modulus of the coal measures rocks for the related field engineers.

## DEĞİNİLEN BELGELER

- Akçın H (1995) Zonguldak Taşkömürü Havzası (ZTH)'nın Özgün Mekanik Parametrelerine Dayalı Olarak Tasman Tahmini Uygulamaları, 14. Madencilik Kongresi, 247-251.
- Anon (1979) Classification of Rocks and Soils for Engineering Geological Mapping, Part 1: Rock and Soil Materials, Bull. Int. Eng. Geol. 19 : 364-371.
- ASTM D2938-95 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.
- ASTM D3148-96 Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression.
- Beiki M, Bashari A and Majdi A (2010). Genetic programming approach for estimating the deformation modulus of rock mass using sensitivity analysis by neural network. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 47, s. 1091-1103
- Berry D S (1997) Progress in the Analysis of Ground Movements due to Mining, Proc. Conf. Large Ground Movements and Structures, Cardiff, Ed: Geddes J D, Pentech Press, 781-810.
- Bieniawski Z T (1978) Determining Rock Mass Deformability : Experiences from Case Histories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 237-247.



- Chiles J P and Delfiner P (1999) *Geostatistics : Modeling Spatial Uncertainty*, Wiley, 695, Newyork.
- Gökçeoğlu C, Sönmez H and Kayabaşı A (2003) Predicting the Deformation Modulus of Rock Masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40: s. 703-712
- Hoek E, Carranza-Torres C T and Corkum B (2002) Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition, *Proc. of the 5<sup>th</sup> North American Rock Mech. Symp. and 17<sup>th</sup> Tunnelling Assoc. of Canada Conf.*, Toronto, Canada, s. 267–273.
- Hoek E and Diederichs M S (2006) Empirical Estimation of Rock Mass Modulus, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36: s. 203-215
- ISRM (1981) *ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring*, ed. E. T. Brown, Pergamon Press, London.
- Kalamaras G S and Bieniawski Z T (1995) A Rock Mass Strength Concept for Coal Seams Incorporating the Effect of Time, *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Cong. on Rock Mech.*, ISRM , s. 295-302, Tokyo.
- Kayabaşı A, Gökçeoğlu C ve Ercanoğlu M (2003) Estimating the Deformation Modulus of Rock Masses : a Comparative Study, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40: s. 55-63
- Köken E (2013a) Zonguldak Havzası Uzunayakları İçin Bir Göçebilirlik Sınıflamasının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, FBE Bülent Ecevit Üniversitesi, 172s, Zonguldak (yayımlanmamış).
- Köken, E (2013b) Zayıf Kayaçlarda Kohezyonun Dolaylı Olarak Tahmini, *Proc. 23<sup>rd</sup> Int. Min. Cong.*, 537-546, Antalya
- Nicholson G A and Bieniawski Z T (1990) A Non-linear Deformation Modulus Based on Rock Mass Classification, *Int. J. Min. Geol. Eng.* 8: s. 181-202.
- Protodyakonov M M (1964) Mechanical Properties and Drillability of Rocks, *Proc. 5<sup>th</sup> Symp. Rock Mech.*, University of Minnesota. 103-118.
- Serafim J L and Pereira J P (1983) Considerations on the Geomechanical Classification on Bieniawski, *Proc. Int. Symp. on Eng. Geol. and Underground Const.* 1: 33-44 Lisbon.
- Shen J, Karakus M and Xu C (2012) A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnel. and Underground Space Tech.* 32: s. 245-250.
- Singh R and Singh T N (1999) Investigation into the Behaviour of A Support System and Roof During Sublevel Caving of A Thick Coal Seam, *Geotech. And Geol. Eng.*, 17: 21-35.
- Sönmez H, Gökçeoğlu C ve Ulusay R (2004) Indirect Determination of The Modulus of Deformation of Rock Masses based on GSI System, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41: s. 849-857.
- Sönmez H, Nefeslioğlu H A, Gökçeoğlu C, Kayabaşı A (2006) Estimation of Rock Modulus for Intact Rocks with an Artificial Neural Network and for Rock Masses with A New Empirical Equation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 43: s. 224-235.
- Trueman R (1998). An Evaluation Of Strata Support Techniques in Dual Life Gateroads. Phd Thesis, Univ. Wales, Cardiff.
- TS-699 Tabii yapıtaşları - Muayene ve Deney Metotları.
- Özel R (1995) Development of guidelines for selection of longwall shield supports, Doktora Tezi, ODTÜ / FBE Enst., 245
- Zhang L and Einstein H H (2004) Using RQD to Estimate the Deformation Modulus of Rock Masses, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.* 41: s. 337-341.