



Orijinal Araştırma / Original Research

BAZI KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN FARKLI DERİNLİKLERDEKİ KAYA TUZU ÖRNEKLERİNİN ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN TAHMİNİ

PREDICTING THE MODULUS OF ELASTICITY OF ROCK SALT SAMPLES AT DIFFERENT DEPTHS FROM SOME ROCK PROPERTIES

Fatih Bayram^{a,*}, İlker Bektaşoğlu^{b,**}

^a Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, TÜRKİYE

^b BOTAŞ Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 27 Aralık / December 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 10 Ağustos / August 2020

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Kaya tuzu,
 Elastisite modülü,
 Kayaç özellikleri,
 İstatistiksel model.

Elastisite modülü, kaya mühendisliği yapılarının tasarımlarında ve analizlerinde temel girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Tuz domları içerisinde yapılacak olan yeraltı açıklıklarının tasarımı ve yapımı kaya mühendisliği açısından önemlidir. Bu açıklıkların tasarımında ve yapımı sırasında uygulanan çözeltili madencilik parametrelerinin ayarlanması için kayaç özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Tuz Gölü Havzasından alınan tuz karotlarına ait bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerin elastisite modülü ile ilişkileri incelenmiştir. Elastisite modülünün bazı kayaç özelliklerinden tahminine yönelik istatistiksel çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda, tuz örneklerinin derinlik farklılığı temel alınarak elastisite modülü tahmin modelleri geliştirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen istatistiksel modellerin tuz örneklerinin elastisite modüllerinin genel ve derinliğe bağlı tahmininde oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bu istatistiksel modellerle, Tuz Gölü Havzasında yapılacak yeraltı açıklıklarının tasarımında ve yapımında gerekli olan elastisite modülü değerlerinin belirlenmesinde yüksek güvenilirlikte tahmini bir yaklaşım sağlanmıştır.

ABSTRACT

Keywords:

Rock salt,
 Modulus of elasticity,
 Rock properties,
 Statistical model.

The modulus of elasticity is used as the basic input parameter in the design and analysis of rock engineering structure. The design and construction of underground caverns in salt domes is important for rock engineering. It is necessary to determine the rock properties in order to adjust the solution mining parameters applied during the design and construction of underground caverns. In this study, the relationships between some physical, mechanical and physicochemical properties of salt core samples taken from Tuz Gölü Basin and the modulus of elasticity were investigated. Statistical studies were carried out to predict the modulus of elasticity from some rock properties. At the same time, prediction models for modulus of elasticity were developed based on the depth difference of salt samples. As a result, the developed statistical models are very successful in the general and depth dependent prediction of the modulus of elasticity. A predicted approach with high reliability in determining the modulus of elasticity required in the design and construction of underground caverns in Tuz Gölü Basin is provided with these statistical models.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: bayramfatih@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8510-7936>

** ibektasoglu@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-7905-1112>

GİRİŞ

Yeraltı tuz domları, depo amaçlı açılacak açıklıklar özellikle yeraltı doğal gaz depoları için oldukça uygun formasyonlardır. Geçirgenliklerinin düşük olması, açılan açıklıkların uzun süre tahkimatsız duraylıklarını sürdürebilmesi, çözelti madenciliğiyle istenilen boyut ve şekillerde açıklıkların oluşturulabilmesi gibi özellikleri tuz domlarının depo amaçlı kullanım olanaklarını artırmaktadır.

Kaya tuzu içerisinde depo amaçlı açılacak olan açıklıkların tasarımında birçok parametre (çözünme hızı, çözünme açısı, örtü gazı derinliği, açıklık sıcaklığı, sondaj dizgi seviyeleri, çözünmeyen madde miktarı, tuzun fiziksel ve mekanik özellikleri vb.) etkilidir. Bu tür parametreler, açıklık şeklinin tasarlandığı modelleme programlarında (WinUbro. Net, PCL 5 vb.) temel girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Özellikle kaya tuzunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, yapılacak olan eritme işlemlerinde açıklık şeklinin tasarımında önem arz etmektedir (Bektaşoğlu, 2016).

Literatürde kaya tuzunun kayaç özellikleriyle ilgili oldukça fazla çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar içerisinde yeraltı tuz domlarına yönelik çalışmalar incelendiğinde, bazı araştırmacıların kaya tuzunun zamana bağlı deformasyonu, sünme ve bozulma davranışları üzerine çalışmalar yaptıkları gözlenmektedir (Brouard vd., 1997; Arıkan ve Şenyur, 2008; Wang vd., 2010; Moghadam vd., 2013; Jianqiang vd., 2013; Passaris vd., 2015). Literatürde yeraltı tuz açıklıklarının mühendislik açısından tasarımı ve jeomekanik açıdan duraylılığı üzerine yapılan çalışmalara da rastlanılmaktadır (Vouille ve Tassel, 1979; Özarslan vd., 2007; Xiangzhen vd., 2013; Wijermars, 2013; Minkley vd., 2014; Zapf, 2014; Rouabhi vd., 2017; Qiqi vd., 2018; Wang vd., 2018).

Bu çalışmaların yanında, DeVries vd. (2002) tuz numuneleri üzerinde yaptıkları çeşitli laboratuvar deneyleriyle yeraltı doğal gaz depolarının duraylılığını doğru şekilde belirlemek için sahaya özgü sünme, deformasyon ve iyileştirme parametreleriyle bir model oluşturmaya çalışmışlardır. Özkan ve Düzyol (2004), kaya tuzu üzerinde bazı mühendislik tasarım parametreleri belirlemişlerdir. Liang vd. (2007), tabakalı tuz yataklarında tek eksenli ve üç eksenli mekanik

özelliklerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Liang vd. (2012), farklı tuz yataklarının mekanik davranışlarını araştırmak için tek eksenli basma dayanımı deneyleri çevrimsel yükleme altında gerçekleştirmişlerdir. Xing vd. (2014), çeşitli üç eksenli deneyleriyle kaya tuzunun mekanik ve hidrolik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Singh vd. (2017), kaya tuzunun gerilim-deformasyon davranışının tahminine yönelik reolojik bir model önermişlerdir.

Yukarıda belirtilen çalışmalar incelendiğinde, kaya tuzunun elastisite modülünün, bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özellikleriyle ilişkilendirildiği ve kaya mekaniği deneyleri düşünüldüğünde, belirlenmesi özel donanım gerektiren, zaman alıcı ve hassas olan elastisite modülünün tahminine yönelik literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu doğrultuda, fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklere bağlı olarak, tuz domunun elastisite modülünün farklı derinlikler için tahminine yönelik istatistiksel modellerin geliştirilmesi bu çalışma amacı olarak seçilmiştir.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma, temel olarak iki aşamadan oluşmuştur. Birinci aşama, tuz domuyla ilgili gerekli fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal deneylerin takibi ve sonuçların elde edilmesi çalışmalarıdır. İkinci aşama ise, elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve tuz domuna ait bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerin elastisite modülü ile ilişkilerinin incelenerek elde edilen sonuçların istatistiksel olarak irdelenmesidir.

1.1. Tuz Domunun Bazı Fiziksel, Mekanik ve Fizikokimyasal Özellikleri

Tuz Gölü Havzasında yeraltı doğal gaz depolama projesi için yapılan sondaj çalışmalarında tuz formasyonu içerisinde üç farklı derinlikten (1150-1168 m, 1340-1358 m, 1440-1458 m) her biri 18 m olan karotlar alınmıştır. Karotların alındığı derinlikler, yeraltı açıklıklarının tasarımı sırasında belirlenen depo oluşturma fazlarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Tuz formasyonu içerisinde üç farklı derinlikten alınan numuneler üzerinde bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerin

belirlenmesine yönelik çeşitli deneyler depolama projesi kapsamında anlaşmalı laboratuvarlar tarafından gerçekleştirilmiştir (Bektaşoğlu, 2016). Bu kapsamda yapılan ve çalışmada kullanılan deneyler aşağıda sıralanmıştır:

- Birim hacim kütlesi (UVM)
- Nem içeriği (MC)
- Tek eksenli basma dayanımı (UCS)
- Çekme dayanımı (TS)
- Kohezyon (c)
- Deneysel yatay çözünme hızı (K_H)
- Deneysel dikey çözünme hızı (K_V)

Yapılan deneysel çalışmalarda ISRM (1981) standartları kullanılmıştır. Bu kapsamda kullanılan çapları 90-100 mm arasında değişen karot numunelerinin boy/çap oranları, tek eksenli basma dayanımı, elastisite modülü ve kohezyonun belirlendiği üç eksenli basma dayanımı deneyleri için 2, çekme dayanımı deneyleri için 0,5 olacak şekilde düzenlenmiştir. Tuz domuna ait yukarıda belirtilen fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.

1.2. Elastisite Modülü (E)

Elastisite modülü, eksenel gerilimin, gerilim değişiminin neden olduğu eksenel birim deformasyon artışına oranıdır. Dolayısıyla elastisite modülünün belirlenebilmesi için, tek eksenli yükleme koşulları altında oluşan eksenel birim deformasyonun ölçülmesi gerekmektedir.

Elastisite modülü kaya mühendisliği tasarımlarında ve analizlerinde temel girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Kayaçların bu parametresinin belirlenebilmesi için kalitesi oldukça yüksek karot numunelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı durumlarda (yüksek kil içeriği, iri tane boyutu, yüksek porozite vb.) bu özellikte karot numunesi elde etmek mümkün olmamaktadır. Deney düzeneğinin ayrıntılı ve yapılacak deneyin de hassas ve dikkat isteyen bir deney olması nedeniyle kaya mekaniğinde elastisite modülü dolaylı olarak da belirlenebilmektedir.

Çalışma kapsamında belirlenen tuz domuna ait elastisite modülü (E) değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma kapsamında kullanılan tuz domuna ait özellikler (Bektaşoğlu, 2016)

Karot no	Ortalama karot derinliği (ACD) (m)	UVM (t/m^3)	MC (%)	UCS (MPa)	TS (MPa)	c (MPa)	K_H (m/h)	K_V (m/h)	E (MPa)
K1-I	1159	2,178	0,086	19,650	1,620	8,520	0,1364	0,0641	6039
K1-II	1349	2,148	0,094	21,400	1,480	15,850	0,0600	0,0636	4968
K1-III	1449	2,160	0,100	28,200	1,750	16,250	0,0596	0,0681	5594
K2-I	1159	2,121	0,083	14,600	1,945	9,750	0,0647	0,0794	4181
K2-II	1349	2,216	0,124	29,570	1,760	9,090	0,0582	0,0602	6230
K2-III	1449	2,178	0,090	30,270	2,300	16,250	0,0600	0,0642	5624
K3-I	1159	2,170	0,086	23,100	1,695	9,710	0,0866	0,0709	3934
K3-II	1349	2,107	0,086	28,000	1,650	8,780	0,0809	0,0946	3253
K3-III	1449	2,134	0,096	31,400	1,715	22,510	0,0630	0,0590	6360

2. İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMALAR

Birçok bilimsel çalışmada en önemli nokta, çalışma sonucunda elde edilen önemli çıktıların (yanıtların) kullanılabilir seviyede açıklanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, genellikle çıktıların birbirleri ile ilişkilerinin incelenmesinde basit veya çoklu doğrusal regresyon modelleri kullanılmaktadır. Regresyon analizinde kurulan model, bağımlı (açıklanan) değişken ve bağımsız (açıklayan) değişkenlerden oluşan bir modeldir. Bu modelde, bağımlı değişkendeki farklılık, bağımsız değişkenler ile ortaya konmaya çalışılır. Bu konuda en önemli parametre olan belirtme katsayısı (R^2), bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranıdır. Regresyon katsayısı (R) ise, bağımsız değişkendeki artışın bağımlı değişken üzerinde yapacağı değişim miktarıdır. Basit veya çoklu doğrusal regresyon modellerinin oluşturulmasında ilk aşama, modeli oluşturan değişkenlerin ve katsayılarının belirlenmesidir. Daha sonra model geçerliliği varyans analizi ile istatistiksel olarak test edilmelidir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen istatistiksel işlemler Minitab isimli istatistiksel analiz programıyla iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada elde edilen verilerle genel bir elastisite modülü tahmin modeli türetilmiş, ikinci aşamada ise, ortalama karot derinlikleri dikkate alınarak elastisite modülü tahmin modelleri türetilmiştir. Yapılan istatistiksel çalışmalara bağımlı değişkenin (elastisite modülü), bağımsız değişkenlerin (birim hacim kütlesi, nem içeriği, tek eksenli basma ve çekme dayanımları, malzeme kohezyonu, deneysel yatay ve dikey çözünme hızları) ve kategorik değişkenin (ortalama karot derinliği) temel istatistiklerinin incelenmesiyle başlanmıştır. Modelde kullanılacak parametrelerin temel istatistikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Temel istatistik çizelgesinde, parametreler için önemli tanımlayıcı istatistiklerin (ortalama, standart sapma, maksimum ve minimum değerler vb.) verildiği görülmektedir. Özellikle Skewness (çarpıklık) ve Kurtosis (basıklık) katsayıları değerlendirildiğinde, verilerin normal dağılım gösterdiği belirtilebilir. Verilerin çarpıklık katsayıları, normal dağılım için kabul edilen değerler (± 3) arasındadır.

Temel istatistik incelemesinin ardından tuzun bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerinden elastisite modülünün tahminine yönelik yapılan

istatistiksel çalışmalarda, regresyon denkleminde kullanılacak tuz parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Elastisite modülünün tahmininde kullanılacak çoklu doğrusal regresyon modelinin geliştirilmesi için, ilk olarak en iyi değişkenlerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu seçim, en iyi alt kümeler regresyonu (best subsets regression) ile yapılmıştır. En iyi alt kümeler regresyonu, bağımsız değişkenleri kullanarak en uygun regresyon modelleri tanımlayan otomatik bir işlemdir. Bu işlemde temel yaklaşım, istatistiksel kıstasları tamamen sağlayacak en küçük bağımsız değişken alt kümesini seçmektir. Bütün değişkenlerden oluşan setin yerine, alt küme setini kullanmanın nedeni, daha az bağımsız değişken kullanarak bağımlı değişkenin daha küçük değişimlerle (daha düşük varyanslarla) tahmin edilebileceğidir.

En iyi alt kümeler regresyonunda kurulacak modelleri karşılaştırmada en çok kullanılan ölçütler, düzeltilmiş belirtme katsayısı (düzeltilmiş R^2) ve Mallows' C_p istatistiğidir. Düzeltilmiş R^2 değeri, R^2 değerinden daha düşüktür ve ne kadar yüksekse model o kadar uygundur. Mallows' C_p istatistiği ne kadar düşükse model o kadar uygundur (Bektaşoğlu, 2016).

Çalışma parametreleri kullanılarak yapılan en iyi alt kümeler regresyonu sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

En iyi alt kümeler regresyonu sonucunda 5 nolu modelin, en yüksek düzeltilmiş R^2 ve en düşük Mallows' C_p değerine sahip olduğundan elastisite modülünün tahminine yönelik en uygun model olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin kullanılmasıyla oluşturulan çoklu doğrusal regresyon modeli Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$E = -11999 + 102431 MC - 85,6 UCS + 2076 TS + 227,2 c + 40773 K_H \quad (1)$$

Eşitlik 2.1'de verilen regresyon denkleminin belirtme katsayısı (R^2) 0,993 olarak bulunmuştur. Kurulan bu model istatistiksel anlamda tuz domunun elastisite modülünü oldukça güvenilir bir şekilde tahmin edebilmektedir. Belirlenen değerlerle Eşitlik 2.1'den elde edilen tahmini değerler arasındaki ilişki de bu kapsamda değerlendirilmiştir. Belirlenen ve tahmini değerler

Çizelge 2. Elde edilen parametrelerin temel istatistikleri

Değişken	Ortalama	Standart sapma	Minimum değer	Maksimum değer	Skewness (Çarpıklık)	Kurtosis (Basıklık)
ACD	1319	127,6	1159	1449	-0,43	-1,71
UVM	2,157	0,033	2,107	2,216	0,19	-0,12
MC	0,094	0,012	0,083	0,124	2,00	4,49
UCS	25,130	5,720	14,600	31,400	-0,75	-0,53
TS	1,768	0,235	1,480	2,300	1,57	3,21
c	12,970	4,930	8,520	22,510	0,91	-0,15
K_H	0,074	0,025	0,058	0,136	2,21	5,14
K_V	0,069	0,011	0,059	0,094	1,65	2,64
E	5131	1112	3253	6360	-0,59	-1,09

Çizelge 3. En iyi alt kümeler regresyonu sonuçları

Model No	R^2	Düzeltilmiş R^2	Mallows C_p	Ortalama karesel hata (MSE)	UVM	MC	UCS	TS	c	K_H	K_V
1	77,7	74,5	36,3	561,4							X
2	80,7	74,3	32,7	563,6			X				X
3	82,5	72,0	31,4	588,2			X			X	X
4	90,1	80,2	19,4	495,0		X		X	X	X	
5	99,3	98,2	4,3	149,1		X	X	X	X	X	
6	99,5	97,8	6,0	164,0		X	X	X	X	X	X
7	99,5	95,7	8,0	231,0	X	X	X	X	X	X	X

Çizelge 4'te, bu değerler arasındaki ilişki Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde, belirlenen değerlerle tahmini değerler arasında da % 99,3 oranında bir ilişki olduğu görülmüştür.

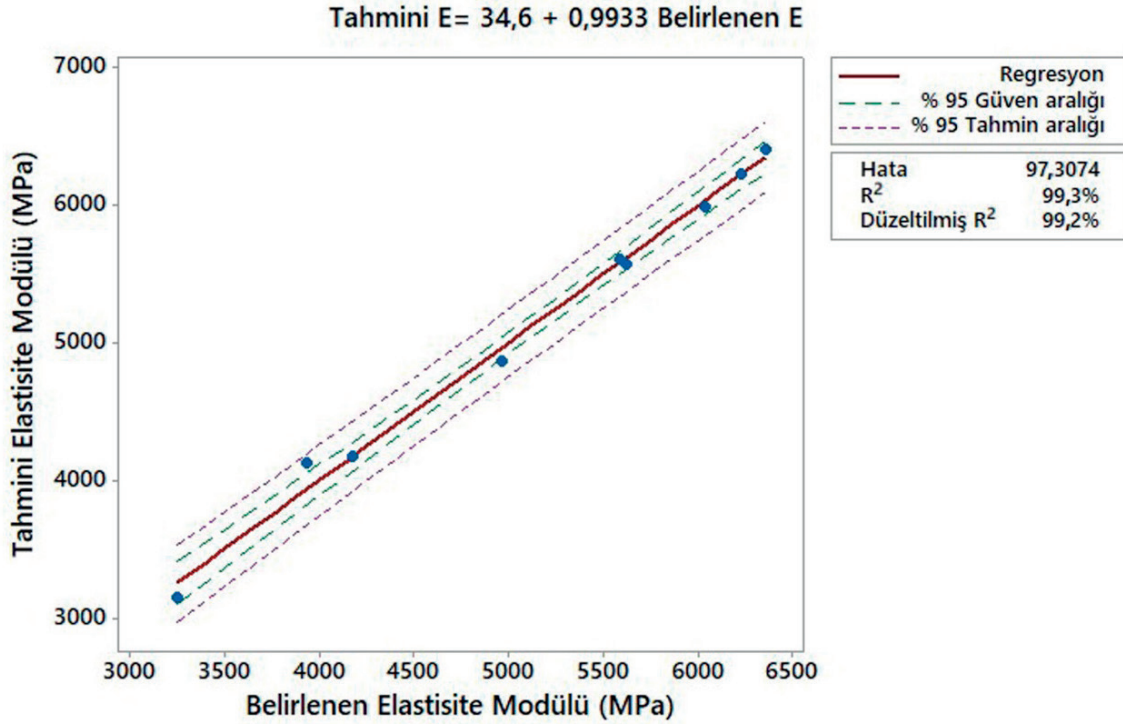
Çalışma kapsamında kurulan regresyon modelinin geçerliliği, varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Yapılan analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. Belirlenen ve tahmini elastisite modülü

Belirlenen elastisite modülü (MPa)	Tahmini elastisite modülü (MPa)
6039	5989
4968	4878
5594	5606
4181	4186
6230	6234
5624	5574
3934	4140
3253	3164
6360	6412

P olasılık değeri, istatistiksel olarak modelin geçerliliğinin ve anlamlılığının tespitinde kullanılır ve P olasılık değerinin 0,005 ile 0,001 arasında olması, yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık ifade etmektedir. Çizelge 5'te verilen varyans analizine göre kurulan modelin P olasılık değeri (0,002) bu durumu karşılamaktadır. Dolayısıyla, kurulan model istatistiksel olarak geçerli ve anlamlı bir modeldir.

İstatistiksel çalışmaların ikinci aşamasında, elastisite modülünün farklı derinliklere göre tahminine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. İstatistiksel çalışmaların bu aşamasında, ortalama karot derinliği ilk aşamadaki çoklu doğrusal regresyon analizine kategorik değişken olarak ilave edilmiş ve ilk aşamadaki tüm verilerle kategorik değişkenli çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Bu regresyon analizi sonucunda ortalama karot derinliğine göre elde edilen elastisite modülü tahmin modelleri Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 1. Belirlenen ve tahmini elastisite modülü arasındaki ilişki

Çizelge 5. Elastisite modülü tahmini için kurulan regresyon denkleminin varyans analizi

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş karelerin toplamı	Düzeltilmiş ortalamanın karesi	F değeri	P (Olasılık)
Model	5	9822153	1964431	88,31	0,002
MC	1	6400796	6400796	287,76	0,000
UCS	1	913540	913540	41,07	0,008
TS	1	1476127	1476127	66,36	0,004
c	1	5256673	5256673	236,32	0,001
K _H	1	4344513	4344513	195,31	0,001
Hata	3	66731	22244		
Toplam	8	9888884			

Çizelge 6. Kategorik değişkenli çoklu doğrusal regresyon analizinden elde edilen tahmin modelleri

Ortalama karot derinliği (m)	Elastisite modülü tahmin modelleri
1159	$E = -12361 + 102680 MC - 107,45 UCS + 2287 TS + 227,02 c + 44283 K_H$
1349	$E = -11965 + 102680 MC - 107,45 UCS + 2287 TS + 227,02 c + 44283 K_H$
1449	$E = -11988 + 102680 MC - 107,45 UCS + 2287 TS + 227,02 c + 44283 K_H$

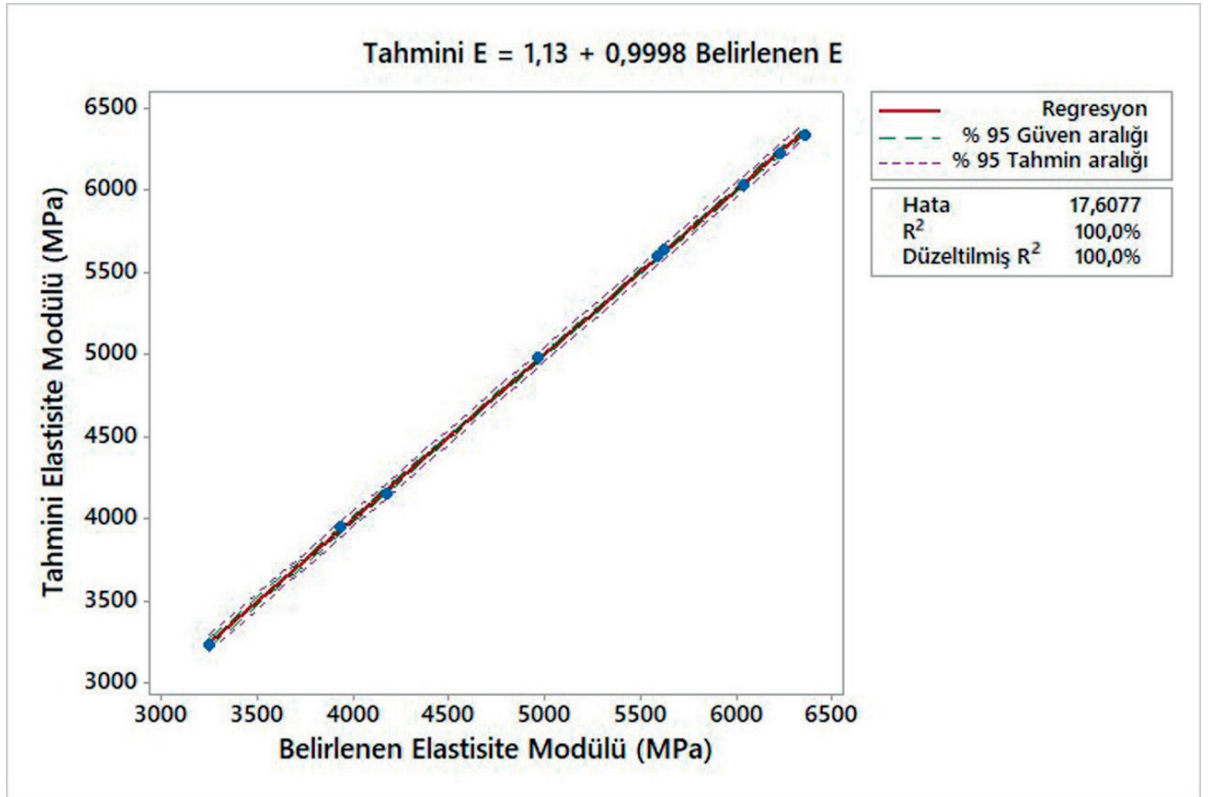
Çizelge 6'da verilen tahmin modelleri kullanılarak elde edilen tahmini elastisite modül değerleri ile belirlenen değerler Çizelge 7'de, bu değerler arasındaki ilişki ise Şekil 2'de verilmiştir. Kategorik değişkenli çoklu doğrusal regresyon analizinde modellerin R^2 değerleri, genellikle çoklu doğrusal regresyon modellerinkinden büyüktür. Şekil 2 incelendiğinde, belirlenen değerlerle tahmini değerler arasında da % 99,9 oranında bir ilişki olduğu görülmüştür.

Kurulan kategorik değişkenli regresyon modellerin geçerliliği, varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Yapılan analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8'de verilen varyans analizine göre kurulan modellerin P olasılık değeri 0,03 olarak gerçekleşmiştir. P değeri 0,01 ile 0,05 arasında olması, modellerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, kurulan modeller istatistiksel olarak geçerli ve anlamlı modellerdir.

Çizelge 7. Belirlenen ve ortalama karot derinliğine bağlı tahmini elastisite modülü

Belirlenen elastisite modülü (MPa)	Tahmini elastisite modülü (MPa)
6039	6038
4968	4987
5594	5601
4181	4161
6230	6226
5624	5638
3934	3954
3253	3238
6360	6338



Şekil 2. Belirlenen ve ortalama karot derinliğine bağlı tahmini elastisite modülü arasındaki ilişki

Çizelge 8. Elastisite modülü için kurulan kategorik değişkenli regresyon modellerin varyans analizi

Kaynak	Serbestlik derecesi	Düzeltilmiş karelerin toplamı	Düzeltilmiş ortalamanın karesi	F değeri	P (Olasılık)
Model	7	9886714	1412388	650,66	0,030
MC	1	6426377	6426377	2960,51	0,012
UCS	1	616486	616486	284,00	0,038
TS	1	803567	803567	370,19	0,033
c	1	1521699	1521699	701,02	0,024
K_H	1	3186944	3186944	1468,16	0,017
ACD	2	64561	32280	14,87	0,180
Hata	1	2171	2171		
Toplam	8	9888884			

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Tuz Gölü Havzasına ait tuz numunelerinin elastisite modülü değerlerinin bazı kayaç özelliklerinden tahmini amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Çalışma kapsamında değerlendirilen kayaç özelliklerinden E ile en çok ilişkili olan özelliklerin MC, UCS, TS, c ve K_H olduğu tespit edilmiştir.
- Elde edilen sonuçlara göre kaya tuzunun nem içeriği, elastisite modülünü doğrudan etkileyecek fiziksel bir özelliktir. Nem içeriği, kayacın dayanımını ve dolayısıyla elastisite modülünü etkiler. Tek eksenli basma ve çekme dayanımları ve malzeme kohezyonu da kayacın dayanım ve sertliğinin bir göstergesi sayılabilecek elastisite modülüyle doğrudan ilişkili mekanik özelliklerdir. Kaya tuzu gibi kayaçların çözünmeleri, kayacı oluşturan tanelerin arasındaki bağ ve yüzey özellikleriyle ilişkilidir. Bu yüzden kayacın fizikokimyasal özelliklerinden olan deneysel yatay çözünme hızı ile elastisite modülü arasında bir ilişki kurulabilir.
- MC, UCS, TS, c ve K_H parametreleri kullanılarak E'nin tahminine yönelik çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.
- Regresyon denkleminin belirtme katsayısı (R^2) 0,993 olarak bulunmuştur.

- Elde edilen regresyon denkleminin istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

- Ortalama karot derinliğine bağlı olarak yapılan kategorik değişkenli çoklu regresyon analizinden elde edilen tahmin modelleri, farklı derinlikler için elastisite modülünün gerçek değerlere çok daha yakın tahminini sağlamıştır.

Hem genel hem de kategorik şekilde elde edilen regresyon denklemleri, Tuz Gölü Havzasında farklı derinliklerdeki tuz numunelerinin elastisite modülünün tahmininde kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, makale yazarlarından İlker Bektaşoğlu'nun yüksek lisans tezinin bir alt çalışması olarak üretilen bir çalışmadır. Yazarlar, yüksek lisans tez çalışmasına desteğinden dolayı BOTAŞ Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Arıkan, D., Şenyur, M. G., 2008. Sultanhanı (Aksaray) Beldesi Tuz Örneklerinin Sünme Davranışının İncelenmesi. Türk Kaya Mekaniği Dergisi, 16, 45-52.

- Bektaşoğlu, İ., 2016. Tuz Gölü Havzasında Doğal Gaz Depolama Amaçlı Yeraltı Açıklıklarının Oluşturulmasında Kayaç Özelliklerinin Çözünme Hızına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.109.
- Brouard, B., Berest, P., Couteau, J., 1997. Influence of the Leaching Phase on the Mechanical Behavior of Salt Caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (3-4), 26.e1-26.e15.
- DeVries K. L., Mellegard K. D., Callahan G. D., 2002. Salt Damage Criterion Proof-of-Concept Research, Topical Report RSI-1675 for United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory, p. 188.
- ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods Rock Characterization, Testing and Monitoring, Pergamon Press, Oxford, p. 211.
- Jianqiang, G., Xinrong, L., Junbao, W., Liang, Z., 2013. Creep Model Analysis of Rock Salt Cavern Under Normal Operations. *Journal of Information & Computational Science*, 10 (12), 3815-3823.
- Liang, W., Yang, C., Zhao, Y., Dusseault, M. B., Liu, J., 2007. Experimental Investigation of Mechanical Properties of Bedded Salt Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (3), 400-411.
- Liang, W., Zhang, C., Gao, H., Yang, X., Xu, S., Zhao, Y., 2012. Experiments on Mechanical Properties of Salt Rocks under Cyclic Loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(1), 54-61.
- Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D., 2014. Discontinuum-Mechanical Behavior of Salt Rocks and the Practical Relevance for the Integrity of Salt Barriers. SMRI Technical Conference, Groningen, The Netherlands.
- Moghadam, S. N., Mirzabozorg, H., Noorzad, A., 2013. Modeling Time-Dependent Behavior of Gas Caverns in Rock Salt Considering Creep, Dilatancy and Failure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 171-185.
- Özarlan, A., Geniş, M., Bilir, M. E., 2007. Doğal Gaz Depolama Amaçlı Yeraltı Tuz Çözelti Açıklıklarının Farklı İşletme Koşulları Altında Duraylılığın İncelenmesi. TÜBİTAK MAG Projesi (104M132), s.117.
- Özkan, İ., Düzyol, S., 2004. Kaya Tuzu Üzerinde Bazı Mühendislik Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi. VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Sivas.
- Passaris, E., Jessop, M., Slingsby, J., 2015. Verification of the Salt Creep Parameters Using Data from the Echometric Surveys of Aldbrough Gas Storage Caverns in the UK. SMRI Technical Conference, Rochester, New York, USA, 1-11.
- Qiqi, W., Guosheng, D., Yan, Z., Kang, L., Jingen, D., Yali, Z., 2018. Key Technologies for Salt-Cavern Underground Gas Storage Construction and Evaluation and Their Application. *Natural Gas Industry B*, 5, 623-630.
- Rouabhi, A., Hévin, G., Soubeyran, A., Labaune, P., Louvet, F., 2017. A Multiphase Multicomponent Modeling Approach of Underground Salt Cavern Storage. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 12, 21-35.
- Singh, A., Kumar, C., Kannan, L. G., Rao, K. S., Ayothiraman, R., 2017. Rheological Behaviour of Rock Salt under Uniaxial Compression. *Procedia Engineering*, 173, 639-646.
- Vouille, G., Tassel, P., 1979. Stability of Caverns Created in Rock Salt by Solution Mining. 5th International Symposium on Salt-Northern Ohio Geological Society, 183-185.
- Wang, T. T., Ma, H. L., Shi, X. L., Yang, C. H., Zhang, N., Li, J. L., Ding, S. L., Daemen, J. J. K., 2018. Salt Cavern Gas Storage in an Ultra-Deep Formation in Hubei, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102, 57-70.
- Wang, T. T., Yan, X. Z., Yang, X. J., Yang, H. L., 2010. Dynamic Subsidence Prediction of Ground Surface above Salt Cavern Gas Storage Considering the Creep of Rock Salt. *Science China Technological Sciences*, 53 (12), 3197-3202.
- Wijermars, E. A. M., 2013. Geomechanical Modelling and Subsidence Prediction of Salt Deposits for Solution Mining, MSc Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, p. 145.
- Xiangzhen, Y., Tongtao, W., Henglin, Y., Xiujuan, Y., Tingting, J., Shuai, Z., 2013. A New Shape Design Method of Salt Cavern Used as Underground Gas Storage. *Applied Energy*, 104, 50-61.
- Xing, W., Zhao, J., Düsterloh, U., Brückner, D., Hou, Z., Xie, L., Liu, J., 2014. Experimental Study of Mechanical and Hydraulic Properties of Bedded Rock Salt from the Jintan Location. *Acta Geotechnica*, 9, 145-151.
- Zapf, D., 2014. Rock Mechanical Dimensioning of Gas Storage Caverns in the Salt Dome Edge Region. SMRI Technical Conference, Groningen, The Netherlands.

