





**DERİNLİĞİN DÜŞÜK DAYANIMLI KAYA  
KÜTLELERİNİN DEFORMASYON MODÜLÜ  
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATING THE EFFECT OF DEPTH ON  
MODULUS OF DEFORMATION OF ROCK MASSES  
WITH LOW STRENGTH**

**KÜRŞAT TOKGÖZOĞLU**

**PROF. DR. CANDAN GÖKÇEOĞLU**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.



*Sevgili aileme ve değerli eşime...*



## ÖZET

### DERİNLİĞİN DÜŞÜK DAYANIMLI KAYA KÜTLELERİNİN DEFORMASYON MODÜLÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

**Kürşat TOKGÖZOĞLU**

**Doktora, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU**

**Ocak 2021, 157 sayfa**

Mühendislik tasarımları açısından çok önemli olan ve kaya kütlelerinin deformasyon davranışını ifade eden kaya kütleleri deformasyon modülü, yerinde deneylerin yanı sıra; çeşitli yaklaşımlar ile elde edilen ampirik eşitliklerle de belirlenebilmektedir. Bu çalışmada, kaya kütleleri deformasyon modülünün tahmininde derinlik ve örtü yükünün etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı kaya gruplarından faydalanılarak 12 yeni kestirim modeli geliştirilmiştir. Kestirim modellerinin geliştirilmesinde kullanılmak üzere oluşturulan veri tabanı, İstanbul İli'nde 4 farklı çalışma bölgesinden 124 adet araştırma sondajından yerinde ölçülen kaya kütleleri deformasyon modülü, kaya kalite göstergesi (RQD), kaya kütle puanı (RMR), kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü ve birim hacim ağırlık verilerini içermektedir. Tespit edilen kaya grupları ve tüm parametreler için, veri tabanının güvenilirliğini artırmak ve genel dağılıma aykırı verilerin tespitini sağlamak amacı ile uç değer analizleri gerçekleştirilmiştir. Rafine edilen veri tabanı kullanılarak, deformasyon modülünün tespitinde 10 mevcut ampirik eşitlik yardımı ile deformasyon modülleri hesaplanmış, yerinde ölçülen deformasyon modülleri karşılaştırılarak bu eşitliklerin performansları irdelenmiştir. Deformasyon modülünün derinlikle ilişkisini araştırmak amacı ile, öncelikle korelasyon analizleri ve basit

regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan korelasyon analizlerinde, kaya kütlesi deformasyon modülü ve RMR puanlarının derinlik – örtü yükü ile anlamlı bir ilişki içerisinde olduğu; kaya malzemesi parametrelerinin derinlik ile daha düşük anlamlılık derecesine sahip olduğu anlaşılmıştır. Gerçekleştirilen basit regresyon analizlerinde; veri çiftlerinin önemli bir kısmında 0.40 ve üzeri korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Kaya kütlesi deformasyon modülünün derinlik – örtü yükü ve diğer parametrelerle kestirimine yönelik olarak, nihai modelin oluşturulması ve ampirik eşitliklerin ortaya konulması amacıyla, çok değişkenli doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri çalışılmıştır. Elde edilen modellerde, deformasyon modülünün kestiriminde en yüksek performansın örtü yükü ve RMR puanı kullanılan modellerden elde edildiği tespit edilmiştir. Oluşturulan 12 farklı ampirik eşitlik için, 0.40 – 0.84 arası korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Söz konusu eşitliklerin tahmin performanslarını değerlendirebilmek için, VAF ve RMSE indeksleri hesaplanmıştır. Elde edilen RMSE ve VAF değerlerine göre; ampirik eşitliklerin tahmin performanslarının yüksek ve başarılı olduğunu belirlenmiştir. Elde edilen ampirik eşitliklerde, sığ derinliklerde (< 5 m) ve masif kayalarda kullanıma yönelik sınırlamalar bulunmaktadır. Sonuç olarak, kaya kütlelerinde deformasyon modülünün derinlik ve örtü yükü ile değişiminin belirgin olduğu çalışmada ortaya konulmuş ve ampirik olarak ifade edilmiştir

**Anahtar Kelimeler:** deformasyon modülü, kaya kütlesi, kaya kütle puanı, elastisite modülü, presiyometre, derinlik, ampirik eşitlik



## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATING THE EFFECT OF DEPTH ON MODULUS OF DEFORMATION OF ROCK MASSES WITH LOW STRENGTH**

**Kürşat TOKGÖZOĞLU**

**Doctor of Philosophy, Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU**

**January 2021, 157 pages**

Rock mass deformation modulus, which has a very important role in engineering design and which is the parameter that controls the deformation behavior of rock masses, could be obtained with empirical equations obtained with various approaches besides in – situ tests. In this study, the effect of depth and vertical stress on the estimation of deformation modulus was investigated. For this purpose, 12 new prediction models were developed by using different rock types. The database used to develop the prediction models consisted of parameters such as Rock Mass Deformation Modulus, Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR), Uniaxial Compressive Strength (UCS), Intact Elasticity Modulus ( $E_i$ ) and unit weight, which have been evaluated on 4 different study areas of the İstanbul province. For the described parameters, outlier analyses were carried out in order to increase the reliability of the data and in order to determine the extreme values against the general distribution. Using the refined database, deformation modulus values were calculated with the help of the 10 existing empirical equations commonly used in the literature by comparing calculated along with discussing estimated deformation modulus values and the performances of these equations. In order to

investigate the relationship between deformation modulus and depth – vertical stress, correlation and regression analyses were carried out. In the correlation analysis, it was found out that the rock mass deformation modulus and RMR given significant correlations with depth – vertical stress. On the other hand, it was found out that the intact rock parameters led to less significant correlations with depth/vertical stress. Within the simple regression analyses, correlation coefficients of 0.40 and above were calculated for most of the variable pairs. With the aim of prediction of the rock mass deformation modulus with depth – vertical stress and other rock parameters, multivariate linear and nonlinear regression models were utilized to establish the final prediction models and hence, to validate the reliability of the empirical equations. For the obtained models, it was determined that the best performance for prediction of the deformation modulus was obtained in models used depth – vertical stress and RMR score. For the 12 different empirical equations obtained, correlation coefficients were determined to vary between 0.40 and 0.84. In order to assess the prediction performance of the empirical equations obtained in the present study, VAF and RMSE indices were calculated. According to the RMSE and VAF values, it was found out that the prediction performances of the empirical equations were high and hence, acceptable. For the generated equations, some limitations existed in regards to the utilization of the equations in shallow depths (< 5m) and for massive rock conditions. As a conclusion, it was determined and empirically validated that the variation of rock mass deformation modulus with depth – vertical stress was evident.

**Keywords:** deformation modulus, rock mass, rock mass rating, Elasticity Modulus, pressuremeter, depth, empirical equation.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarının başlangıcından itibaren bittiği ana dek, tüm bilgi birikimi, tecrübesi ve öngörülerini ile yol gösterici olan, hiçbir zaman katkılarını ve ilgisini esirgemeyen; tezin son aşamasına gelmesinde çok büyük emek sahibi olan tez danışmanım kıymetli hocam Prof. Dr. Candan Gökçeoğlu'na,

Tez çalışmaları boyunca, farklı fikirleri, yönlendirmeleri ve katkıları ile tezin gelişiminde çok büyük emekleri olan Tez İzleme Komitesi'nin kıymetli üyeleri, Prof. Dr. Reşat Ulusay'a, Doç. Dr. Ali Kayabaşı'na ve komiteye sonradan dahil olan Doç. Dr. Hakan A. Nefesioğlu'na,

Kıymetli katkıları, yorum ve fikirlerini esirgemeyen tez savunma sınavı jüri üyeleri değerli hocalarım Prof. Dr. Haluk Akgün'e ve Dr. Öğr. Üyesi Nurgül Gültekin'e,

Tez çalışmalarında kullanılan veri tabanına; sahada, laboratuvarında ve ofiste yaptığı çalışmalarla hayat veren Yüksel Proje A.Ş. çalışanlarına,

Tez çalışmalarında kullanılan veri tabanının kullanımı için gerekli kolaylığı gösteren ve yasal izinleri sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ne,

Bu yolda beni hiç yalnız bırakmayan sevgili aileme,

İçten teşekkürlerimi sunarım.

Kürşat TOKGÖZOĞLU

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MÜHENDİSLİK TASARIMLARINDA BAŞLICA KULLANILAN KAYA MALZEMESİ VE KAYA KÜTLESİ PARAMETRELERİ.....	29
3.1. Mühendislik Tasarımında Kullanılan Başlıca Kaya Malzemesi Parametreleri....	29
3.1.1. Kaya Malzemesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı .....	29
3.1.2. Kaya Malzemesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı .....	30
3.1.3. Kaya Malzemesinin Elastisite Modülü .....	32
3.1.4. Kaya Malzemesinin Poisson Oranı .....	32
3.1.5. Kaya Malzemesinin Birim Hacim Ağırlığı .....	33
3.1.6. Kaya Malzemesi Sabiti.....	34
3.2. Mühendislik Tasarımında Kullanılan Başlıca Kaya Kütle Parametreleri.....	35
3.2.1. Kaya Kalite Göstergesi (RQD) .....	36
3.2.2. Kaya Kütle Puanlaması (RMR).....	37
3.2.3. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI).....	41
3.2.4. Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülü.....	42
3.3. Kaya Kütlelerde Düşey Gerilmeler ve Derinlikle İlişkileri .....	44
4. VERİ TOPLAMA SAHALARININ JEOLJİK – JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ ...	47
4.1. Genel Jeoloji ve Stratigrafi.....	47
4.2. Veri Toplama Bölgelerindeki Litolojik Birimlerin Özellikleri .....	49
4.2.1. Kurtköy Formasyonu (Oku) .....	50

4.2.2. Gözdağ Formasyonu (OSg) .....	51
4.2.3. Dolayoba Formasyonu (SDyd) .....	52
4.2.4. Kartal Formasyonu (Dk) .....	53
4.2.5. İslambeyli Formasyonu (Teoi).....	54
4.2.6. Kırklareli Kireçtaşı (Tek).....	56
4.2.7. İhsaniye Formasyonu (Tei).....	57
4.3. Yapısal Jeoloji ve Tektonizma.....	58
5. VERİ TABANI OLUŞTURMA ÇALIŞMALARI.....	60
5.1. Jeoteknik Amaçlı Araştırma Sondaj Çalışmaları.....	60
5.2. Presiyometre Deneyleri ve Deformasyon Modülü Tayinleri.....	66
5.3. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri .....	71
5.4. Kaya Kütle Parametrelerinin Elde Edilmesi .....	73
6. İSTATİSTİK ANALİZLER .....	75
6.1. Uç Değer Analizlerinin Yapılması ve Veri Tabanının Hazırlanması .....	75
6.2.Elde Edilen Veri Tabanının Genel Özellikleri.....	90
6.2.1. Kartal Formasyonu – Kıltaşı.....	91
6.2.2. Kurtköy Formasyonu – Çakıltaşı.....	91
6.2.3. Kurtköy Formasyonu – Kumtaşı.....	92
6.2.4. Gözdağ Formasyonu – Kireçtaşı.....	92
6.2.5. Gözdağ Formasyonu – Kuvars Kumtaşı.....	93
6.2.6.Dolayoba Formasyonu – Kıltaşı .....	94
6.2.7. Dolayoba Formasyon – Kireçtaşı .....	95
6.2.8. İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Çakıltaşı, Kireçtaşı, Kumtaşı Ardalanması.....	95
6.2.9. İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Kıltaşı Siltaşı Seviyeleri.....	96
6.2.10. İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Marn .....	97
6.2.11. Kırklareli Formasyonu – Kireçtaşı .....	98
6.3. Literatürdeki Ampirik Deformasyon Modülü Eşitliklerinin Yorumlanması.....	99
6.4. Korelasyon Analizleri ve Parametrelerin Anlamlılıklarının Yorumlanması .....	110
6.5. Basit Regresyon Analizleri .....	111
6.5.1. Örtü Yüğü – Derinlik’in Bağımlı Değişken Olduğu Regresyon Analizleri	112

6.5.2. Deformasyon Modülünün Bağımlı Değişken Olduğu Basit Regresyon Analizleri.....	116
6.6. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizleri .....	124
6.8. Çok Değişkenli Doğrusal Olmayan Regresyon Analizleri .....	127
7. BULGULAR VE İRDELEME.....	131
7.1. Basit Regresyon Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	131
7.2. Çok Değişkenli Regresyon Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	132
7.2.1. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizlerinin Değerlendirilmesi .....	132
7.2.2. Çok Değişkenli Doğrusal Olmayan Regresyon Analizlerinin ve Nihai Kestirim Modellerinin Değerlendirilmesi.....	134
7.3. Tahmin Performansına Yönelik Analizler .....	135
7.4. Eşitliklerin Bağımsız Veriler ile Test Edilmesi ve Yorumlanması.....	138
7.5. Deformasyon Modülünün Derinlikle Değişiminin Değerlendirilmesi, Avantaj ve Sınırlamaları .....	143
8. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	148
9. KAYNAKLAR.....	152

## EKLER

- EK 1 – Jeoteknik Amaçlı Sondaj Logları
- EK 2 – Presiyometre Deney Sonuçları
- EK 3 – Kaya Mekaniği Laboratuvar Deney Sonuçları
- EK 4 – Karot Sandık Fotoğrafları
- EK 5 – Veri Kullanım İzinleri
- EK 6 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu

## ÖZGEÇMİŞ

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Örneklemelerin yapıldığı alanlara ait yer bulduru haritası .....	3
Şekil 2.1. Kaya kütlelerinde yerinde ölçülen deformasyon modülü ile RMR arasındaki bazı ilişkileri gösterir grafik (Serafim ve Pereira, 1983) .....	6
Şekil 2.2. Farklı yöntemlerle gerçekleştirilen yerinde (in – situ)deformasyon modülü ölçümleri (Palmström ve Singh, 2001) .....	9
Şekil 2.3. Norveç Gjøvik Mağara Bölgesi'nde elde edilen ve derinliğe bağlı değişimleri gösterilen RQD, P dalga hızı ve metrede süreksizlik sayıları (Barton, 2002) .....	10
Şekil 2.4. $Q_c$ puanının hesaplanmasına yönelik olarak, deformasyon modülü, $V_p$ dalga hızı, gözeneklilik ve destek gerilme – mukavemet değerlerinin kullanıldığı entegre diyagram (Barton, 2002) .....	11
Şekil 2.5. RSR puanı ile deformasyon modülünün korelasyonunu gösteren grafikler (tüm veri seti için gerçekleştirilmiştir) (Sarma ve Sarsby, 2005) .....	13
Şekil 2.6. MR değerinin seçimi için önerilen kılavuz (Hoek ve Diederichs, 2006) .....	14
Şekil 2.7. Kaya malzemesinin elastisite modülünün tahmini için yapay sinir ağır yöntemi ile elde edilen kılavuz (Sönmez vd., 2006) .....	15
Şekil 2.8. Farklı literatür eşitlikleri kullanılarak hesaplanan deformasyon modül değerlerinin karşılaştırılması (Zhang, 2010) .....	17
Şekil 2.9. Ordu tünel bölgesi için deformasyon karşılaştırma grafiği (Aksoy vd., 2011) .....	18
Şekil 2.10. Farklı grup eşitlikler için hesaplanan $R^2$ ve RMSE değerleri (Grup 1 – Grup 5) (Shen vd., 2012) .....	19
Şekil 2.11. Farklı metodlarla hesaplanan ve sahada ölçülen deformasyon modülü değerlerinin karşılaştırılması (Ajalloeian ve Mohammadi, 2012) .....	21
Şekil 2.12. Sırası ile yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik programlama ile elde edilen eşitliklerin korelasyon katsayıları (Alemdag vd., 2016) .....	24
Şekil 3.1. Numune boyutlarının kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımına olan etkisini farklı kayaç grupları için gösteren diyagram (Hoek – Brown, 1980a) .....	30
Şekil 3.2. Üç eksenli yenilme koşulları ve Mohr-Coulomb yenilme zarfı (Fell ve Jeffery, 1987) .....	31

Şekil 3.3. Çok sayıda üç eksenli deney sonucu kullanılarak elde edilen genelleştirilmiş yenilme zarfı (Fell ve Jeffery, 1987) .....	31
Şekil 3.4. Eksenel yükleme – birim deformasyon eğrilerinden değişik elastisite modül değerlerinin hesaplanması (ISRM, 1978).....	32
Şekil 3.5. Farklı kaya türleri için tespit edilen Poisson oranı aralıkları (Gerçek, 2007) .	33
Şekil 3.6. Kaya Malzeme Sabiti Abağı (Hoek, 2007).....	35
Şekil 3.7. Numune boyutunun büyümesi ile birlikte, kaya malzeme kavramından kaya kütle kavramına geçişi simgeleyen diyagram (Hoek, 1995'den derlenmiştir).....	36
Şekil 3.8. RQD değerinin tespit edilmesi (Deere, 1964).....	37
Şekil 3.9a. RMR Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (Bieniawski, 1989) .....	39
Şekil 3.9b. RMR puanlamasında, RQD, tek eksenli sıkışma dayanımı ve süreksizlik aralığı için hassas puan seçilmesine olanak tanıyan abaklar (Bieniawski,1989 .....	40
Şekil 3.10. Temel GSI abağı (Hoek ve Marinos, 2000'den basitleştirilmiştir).....	41
Şekil 3.11. Kaya malzemesi ve kaya kütlelerinde farklı modüllerin belirlenmesi (Hoek ve Diedherichs, 2006) .....	44
Şekil 4.1. İstanbul ili batı kesimi genel stratigrafik istifi (Yurtsever ve Çağlayan, 2002) .....	48
Şekil 4.2. İstanbul ili doğu kesimi (Anadolu yakası) genel stratigrafik istifi (Yurtsever ve Çağlayan, 2002) .....	50
Şekil 4.3. Kurtköy formasyonuna ait seviyeler (Mostra(a) ve karot(b) görüntüleri – kumtaşı ve çakıltaşı örnekleri) .....	51
Şekil 4.4. Gözdağ formasyonuna ait seviyeler (Mostra(a) ve karot (b) görüntüleri – kumtaşı örnekleri) .....	52
Şekil 4.5. Dolayoba formasyonuna ait seviyeler (Mostra (a) ve karot (b) görüntüleri – kireçtaşı örnekleri).....	53
Şekil 4.6. Sondaj çalışmalarında kesilen Kartal formasyonuna ait seviyeler – kıltaşı örnekleri .....	54
Şekil 4.7. İslambeyli formasyonuna ait seviyeler (Mostra(a) ve karot(b) görüntüleri – kıltaşı örnekleri) .....	55
Şekil 4.8. Kırklareli formasyonuna ait seviyeler (Mostra (a) ve karot (b) görüntüleri – kireçtaşı örnekleri).....	56



Şekil 4.9. İhsaniye formasyonuna ait seviyeler (Mostra (a) ve karot (b) görüntüleri – marn örnekleri).....	57
Şekil 5.1. Hesaplanan RQD değerlerine ait dağılım grafiği .....	66
Şekil 5.2. Presiyometre deeyinde kullanılan probun şematik gösterimi (FHWA, 1997) 67	
Şekil 5.3. Deney sırasında elde edilen basınç - hacim grafiği (ApaGeo, Geovision programı ile oluşturulmuştur) .....	69
Şekil 5.4. Sahada gerçekleştirilen presiyometre deneylerinden bir görüntü (Küçükçekmece – Sazlıdere bölgesi).....	70
Şekil 5.5. Elde edilen deformasyon modülü değerlerine (MPa) ait istatistiksel veriler .	71
Şekil 5.6. Kaya mekaniği laboratuvar deney çalışmalarından bir görüntü.....	72
Şekil 5.7 Elde edilen kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa) ve kaya malzemesi elastisite modülüne (GPa) ait istatistiksel veriler .....	72
Şekil 5.8. Hesaplanan RMR puanlarına ait istatistiksel veriler .....	74
Şekil 6.1. Kartal formasyonu’na ait kiltası seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları.....	76
Şekil 6.2. Kurtköy formasyonu’na ait çakiltası seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	77
Şekil 6.3. Kurtköy formasyonu’na ait kumtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	78
Şekil 6.4. Gözdağ formasyonu’na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	79
Şekil 6.5 Gözdağ formasyonu’na ait kuvars kumtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları.....	80
Şekil 6.6. Dolayoba formasyonu’na ait kiltası seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	81
Şekil 6.7. Dolayoba formasyonu’na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	82
Şekil 6.8. İslambeyli – İhsaniye formasyonları’na ait çakiltası seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	83
Şekil 6.9. İslambeyli – İhsaniye formasyonları’na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	84
Şekil 6.10. İslambeyli – İhsaniye formasyonları’na ait kumtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları .....	85

Şekil 6.11. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait kiltası – silttaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları.....	86
Şekil 6.12. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait marn seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları.....	87
Şekil 6.13. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları.....	88
Şekil 6.14. Kartal formasyonu'na ait kiltaları için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)) .....	100
Şekil 6.15. Kurtköy formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)) .....	101
Şekil 6.16. Gözdağ formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)) .....	102
Şekil 6.17. Dolayoba formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)) .....	103
Şekil 6.18. İhsaniye - İslambeyli formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)) ..	104
Şekil 6.18. (devam ediyor) İhsaniye - İslambeyli formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)).....	105
Şekil 6.19. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa)) .	106
Şekil 6.20. Kartal formasyonu'na ait kiltaları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	112
Şekil 6.21. Kurtköy formasyonu'na ait çakilttaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	113
Şekil 6.22. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	113
Şekil 6.23. Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	113
Şekil 6.24. Gözdağ formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	114
Şekil 6.25. Dolayoba formasyonu'na ait kiltaları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	114

Şekil 6.26. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	114
Şekil 6.27. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait marnlar için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	115
Şekil 6.28. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait kıltaşı/silttaşı seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	115
Şekil 6.29. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait çakıltaşı/kumtaşı/kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	115
Şekil 6.30. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	116
Şekil 6.31. Tüm veri tabanı için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	116
Şekil 6.32. Kartal formasyonu'na ait kıltaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	117
Şekil 6.33. Kurtköy formasyonu'na ait çakıltaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	117
Şekil 6.34. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	118
Şekil 6.35. Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	118
Şekil 6.36. Gözdağ formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	119
Şekil 6.37. Dolayoba formasyonu'na ait kıltaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	119
Şekil 6.38. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	120
Şekil 6.39. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait marnlar için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	120
Şekil 6.40. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait kıltaşı/silttaşı seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	121
Şekil 6.41. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait çakıltaşı/kumtaşı/kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	121
Şekil 6.42. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri.....	122

Şekil 6.43. Tüm veri havuzu için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri .....	122
Şekil 6.44. Regresyon analizlerinde uygulanan yaklaşımlar.....	125
Şekil 6.45 SPSS programında çok değişkenli regresyon modelinin kurulması .....	129
Şekil 7.1. Deneme verileri ile elde edilen belirleme katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı) .....	140
Şekil 7.1. (devam ediyor) Deneme verileri ile elde edilen belirleme katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı).....	141
Şekil 7.2. Deneme verileri ile elde edilen belirleme katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, Ei veya q <sub>u</sub> ) .....	142
Şekil 7.3. Kartal formasyonuna ait kiltaşları kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.5.) sınırlama alanları.....	146
Şekil 7.4. Kurtköy formasyonuna ait çakıltaşları kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.7.) sınırlama alanları.....	146
Şekil 7.5. İslambeyli İhsaniye formasyonlarına ait marn seviyeleri kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.11. ve eşitlik 6.16.) sınırlama alanları .....	147
Şekil 7.6. İslambeyli İhsaniye formasyonuna ait çakıltaş – kumtaş – kireçtaş seviyeleri kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.12.) sınırlama alanları .....	147

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. RQD sınıflaması (Deere, 1964) .....	37
Çizelge 3.2. Süreksizlik koşulu puanının daha hassas yapılabilmesi için önerilen kılavuz puanlama tablosu (Bieniawski, 1989).....	40
Çizelge 3.3. Düşey gerilimin derinlikle (z) değişimine ait çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen eşitlikler (Zhang, 2017'den düzenlenmiştir) .....	45
Çizelge 5.1. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Sazlıdere – Küçükçekmece Bölgesi).....	61
Çizelge 5.2. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Sabiha Gökçen Havalimanı Bölgesi).....	62
Çizelge 5.3. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Kaynarca – Tuzla Bölgesi) ....	63
Çizelge 5.4. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Sancaktepe – Sultanbeyli Bölgesi) .....	64
Çizelge 5.5. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Deneme verileri) .....	65
Çizelge 5.6. Hesaplanan RQD değerlerinin istatistiksel verileri .....	65
Çizelge 5.7. Elde edilen deformasyon modülü değerlerine ait istatistiksel veriler.....	70
Çizelge 5.8. Elde edilen kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzemesi elastisite modülüne ait istatistiksel veriler .....	73
Çizelge 5.9. Hesaplanan RMR puanlarına ait istatistiksel veriler .....	73
Çizelge 6.1. Kartal formasyonu'na ait kıltaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları .....	91
Çizelge 6.2. Kurtköy formasyonu'na ait çakıltaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları.....	92
Çizelge 6.3. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları.....	92
Çizelge 6.4. Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları.....	93
Çizelge 6.5. Gözdağ formasyonu'na ait kuvars kumtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları.....	94
Çizelge 6.6. Dolayoba formasyonu'na ait kıltaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları.....	94

Çizelge 6.7. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları .....	95
Çizelge 6.8. İslambeyli – İhsaniye formasyonu'na ait çakıltaşı, kireçtaşı ve kumtaşı seviyelerinde elde edilen parametre değer aralıkları.....	96
Çizelge 6.9. İslambeyli – İhsaniye formasyonu'na ait kıltaşı - silttaşı seviyelerinde elde edilen parametre değer aralıkları.....	97
Çizelge 6.10. İslambeyli – İhsaniye formasyonu'na ait marn seviyelerinde elde edilen parametre değer aralıkları.....	97
Çizelge 6.11. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşı seviyelerinde elde edilen parametre değer aralıkları.....	98
Çizelge 6.12. Seçilen literatür çalışmalar ve kullanılan parametreler.....	100
Çizelge 6.13. Farklı kayaç grupları ve farklı literatür eşitlikler için gerçekleştirilen performans analizlerinin sonuçları .....	109
Çizelge 6.14. Korelasyon analizleri ile elde edilen korelasyon katsayısı (Pearson – Spearman).....	110
Çizelge 6.15. Korelasyon katsayıları (Örtü Yüğü – Parametre Analizleri).....	123
Çizelge 6.16. Korelasyon katsayıları (Deformasyon Modülü – Parametre Analizleri)	124
Çizelge 6.17. Korelasyon katsayılarına ilişkin özet tablo .....	126
Çizelge 6.18. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modelleri ve ortaya çıkartılan eşitlikler (Örtü Yüğü ve RMR Puanı) .....	129
Çizelge 6.19. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modelleri ve ortaya çıkartılan eşitlikler (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, Ei veya qu) .....	130
Çizelge 7.1. Elde edilen eşitlikler, korelasyon katsayıları, RMSE ve VAF değerleri (Örtü Yüğü ve RMR Puanı).....	136
Çizelge 7.2. Elde edilen eşitlikler, korelasyon katsayıları, RMSE ve VAF değerleri (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, Ei veya qu).....	137
Çizelge 7.3. Deneme verileri ile elde edilen korelasyon katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı) .....	139
Çizelge 7.4. Deneme verileri ile elde edilen korelasyon katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, Ei veya qu) .....	140

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A	Numune Taban Alanı (cm <sup>2</sup> )
c	Kohezyon
Ct	Trakya Formasyonu
D <sub>c</sub>	Süreksizlik Koşulu (Discontinuity Condition)
D <sub>f</sub> , D	Örselenme Faktörü (Disturbance Factor)
e	Euler Sayısı (Euler's number)
E <sub>i</sub>	Kaya Malzemesi Elastisite Modülü (GPa)
E, E <sub>m</sub> , E <sub>mr</sub> , E <sub>mass</sub>	Kaya Kütlesi Deformasyon Modülü (MPa,GPa)
F	Yenilme Kuvveti (kN)
h, z	Derinlik (m) / Örtü Kalınlığı (m)
K <sub>s</sub>	Sarıyer Volkanitleri
log	Logaritmik taban
ln	Doğal Logaritma (e Tabanında Logaritma)
m <sub>i</sub>	Kaya Malzemesi Sabiti (Material Constant)
N	Örnek Sayısı
Oku	Kurtköy Formasyonu
OSg	Gözdağ Formasyonu
p <sub>0</sub>	Presiyometre Cidar Başlangıç Basıncı
p <sub>f</sub>	Presiyometre Cidar Nihai Basıncı
R <sup>2</sup>	Belirleme (determinasyon) Katsayısı
r	Korelasyon Katsayısı
SDyd	Dolayoba Formasyonu
sig.	Anlamlılık Değeri (Significance)

tan	Tanjant
Tei	İslambeyli Formasyonu
Teoi	İhseniye Formasyonu
Tek	Kırklareli Kireçtaşı – Formasyonu
Tmg	Güngören Formasyonu
Tod	Danişmen Formasyonu
$q_u, q_{ci}, \delta_{ci}$	Kaya Malzemesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)
Q	NGI Tünel Sınıflama Sistemi (Q System)
$Q_c$	Modifiye NGI Tünel Sınıflama Sistemi (Modified Q System)
$V_p$	Primer Ses Dalga Hızı (P-wave Velocity)
$v_0$	Presiyometre Prob Başlangıç hacmi
$v_f$	Presiyometre Prob Son hacim
$v$	Birim Hacim Ağırlık
$\emptyset$	İçsel Sürtünme Açısı (derece)
$\sigma_n$	Normal Gerilme
$\sigma_h$	Yatay Gerilme
$\sigma_v$	Düşey Gerilme
T	Makaslama Dayanımı
$\nu$	Poisson Oranı (Poisson's Ratio)
$\Sigma$	Toplam

### **Kısaltmalar**

AF	Plaka Yükleme Deney Düzeneği Faktörü
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
BHA	Birim Gacim Ağırlık
DMT	Dilatometre Deneyi



EModul	Kaya Kütlesi Deformasyon Modülü (MPa)
Eş	Eşitlik
EXP	Ekspansiyonel
ER	Hata Oranı (Error Ratio)
FHWA	Amerikan Karayolları İdaresi (Federal Highway Administration)
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index)
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu (International Society for Rock Mechanics)
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (Mean Absolute Percentage Error)
MR	Modül Oranı (Modulus Ratio)
MTA	Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü
ÖY	Örtü Yüğü
PLT	Plaka Yükleme Deneyi (Plate Loading Test)
PJT	Plaka Soket Deneyi (Plate Jacking Test)
PMR	Tahmin edilen – Ölçülen Oranı (Predicted – Measured Ratio)
PMT	Presiyometre Deneyi
RQD	Kaya Kalite Göstergesi (Rock Quality Designation)
RMi	Kaya Kütle İndeksi (Rock Mass Index)
RMR	Kaya Kütlesi Puanı (Rock Mass Rating)
RMSE	Standart Sapmaların Ortalama Kare Kökü (Root Mean Square Error)
RSR	Kaya Yapı Puanı (Rock Structure Rating)
SRF	Stres Azaltım Faktörü (Stress Reduction Factor)
TM	Enlem Mekatörü (Transverse Mercator)
UCS	Kaya Malzemesi Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)

VAF	Varyans Değerleri Yüzdesel Oranı (Values Account For)
vd.	Ve Diğerleri
WGS	Küresel Jeodezik Sistem (World Geodecit System)

# 1. GİRİŞ

Artan nüfus ve insan ihtiyaçlarına bağlı olarak tüm dünyada çok sayıda tünel, viyadük, baraj ve çok yüksek binalar gibi büyük mühendislik yapıları inşa edilmekte olup, yakın gelecekte de bu süreç daha da artış gösterme eğilimindedir. Çünkü bu yapılar gerek insanların zorunlu ihtiyaçlarını karşılama gerekse ciddi ekonomik yararlar sağlama açısından önemlidir. Sözü edilen tüm bu mega mühendislik yapıları doğal zemin üstünde veya içinde inşa edilmektedir. Diğer bir ifade ile mega mühendislik yapıları kaya kütlelerinin de üstünde veya içinde olduğundan, kaya kütleleri ile doğrudan etkileşim içindedir.

Kaya kütleleri üzerinde veya içinde inşa edilen tüm mühendislik yapılarında, yapım giderlerinin ve yapım zamanının azaltılması, diğer bir ifade ile optimize edilmesi, bunun yanı sıra sürdürülebilir, güvenli ve konforlu yapıların inşa edilmesi önemli kriterlerdir. İnşa edilecek bütün mühendislik yapıları başlıca bu ana kriterleri sağlayacak şekilde tasarlanmakta, yapılan tüm araştırma çalışmaları, tüm yaklaşımlar, yöntemler ve bilgi birikimi bu kriterlerin genişletilmesini ve geliştirilmesini hedefleyerek devam ettirilmektedir.

Zaman ve maliyetten tasarruf ile güvenilirlik kriterlerinin en üst noktada sağlanması hedeflenen tüm mühendislik yapılarının tasarımında, mümkün olan ortamı en temsil edici ve eksiksiz jeolojik ve jeoteknik özelliklerin ihtiyaç duyulan detayda iyi bir şekilde tanımlanması önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra, tanımlanan jeolojik yapı içindeki farklı birimler için, yeterli ve güvenilir verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer bir ifade ile, litolojik birimlerin, jeolojik – jeoteknik zonların ve bölgelerin jeomekanik tasarım parametreleri, güvenilir olmalı ve pratik bir şekilde elde edilebilmelidir. Ancak bazı jeomekanik parametreler her zaman güvenilir bir biçimde kolaylıkla elde edilememektedir.

Mühendislik tasarımlarının içinde gerçekleştirildiği kaya ortamlarda, tasarımda kullanılan başlıca parametreler; kaya malzemesinin elastisite ve dayanım parametreleri ile kaya kütlelerinin deformasyon ve dayanım parametrelerinden oluşmaktadır. Öte yandan, birimin süreksizlik sistemlerinin sayısı ve yönelimi, süreksizlik aralığı ve açıklığı, bozunma, dolgu türü gibi özellikler kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerini önemli oranda etkilemektedir. Dolayısıyla, kaya kütlelerinin mühendislik

davranışı bir çok faktör tarafından denetlenmekte ve tasarım açısından oldukça önemli olan parametrelerin temsil edici nitelikte tayin edilmesi oldukça güç bir işlem olmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, dünya literatüründe de hala tartışma konusu olan kaya kütlesi deformasyon modülünün derinliğe bağlı olarak değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, dünya üzerinde coğrafi, jeomorfolojik, tektonik ve jeolojik süreçlerin bir sonucu olarak yaygın biçimde karşılaşılan orta – çok bozunmuş ve düşük dayanımlı kaya kütlelerinde, mühendislik yapılarının tasarımında esas olarak kullanılan bir parametre olan Kaya Kütle Deformasyon Modülü dikkate alınmıştır. Kaya kütlelerinin deformasyon modülü, yerinde (in – situ) deneyler yardımı ile belirlenebilmekte, ancak bu yöntemler için; maliyet, zaman, pratiklik vb. kriterler göz önüne alındığında sınırlamalar yaşanabilmektedir. Bu nedenle kaya kütlelerinin deformasyon modülünün ampirik yöntemlerle tayin edilmesi kaya mekaniği ve kaya mühendisliği açısından oldukça ilgi çekici bir konu olmuştur. Bu çalışmada, önceki araştırmacılar tarafından geliştirilmiş bir çok eşitlik ile kestirimi mümkün olan kaya kütle deformasyon modülünde, derinliğin etkisi araştırılmış, yapı derinliği ve derinlik ile ilişkili olan örtü yükü gerilmelerindeki değişimin kütle deformasyon modülünün değişimindeki etkisi irdelenmiştir. Ancak ilgili bölümde de değinileceği üzere bu konudaki araştırmalar oldukça sınırlıdır (Zhang, 2016) Bu çalışma ile, mühendislik yapılarının tasarımında, yerinde deneyler ile tayin edilmesinin derinliğin yüksek olduğu nispeten zor kesimler için, deformasyon modülünün belirlenmesinin kolaylaştırılması ve bu modülün tayininde örtü yükünün de kullanılabilir bir girdi parametresi haline getirilmesi, bu sayede tasarım çalışmalarının güvenilirliğinin ve ekonomikliğin artırılması hedeflenmiştir.

Çalışmalar kapsamında, İstanbul İli'nin 4 farklı bölgesinde; farklı projeler kapsamında gerçekleştirilmiş jeoteknik araştırma çalışmalarından oluşturulan veri tabanı kullanılmıştır. Söz konusu veriler farklı formasyonlar ve kaya grupları özelinde ayrılmıştır. Örneklemlerin yapıldığı bölgelere ait yer bulduru haritası Şekil 1.1'de verilmiş olup, şu şekilde özetlenebilir;

- Küçükçekmece – Sazlıdere Bölgesi
- Sancaktepe – Sultanbeyli Bölgesi
- Sabiha Gökçen Havalimanı Bölgesi
- Kaynarca – Tuzla Bölgesi



Şekil 1.1. Örneklemelerin yapıldığı alanlara ait yer bulduru haritası

Bu çalışmalardan, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), kaya malzemesinin elastisite modülü ( $E_i$ ), kaya malzemesinin birim hacim ağırlığı (BHA) ile, kaya kalite göstergesi (RQD) verileri alınmış ve veri tabanı oluşturulmuştur. Öte yandan, yine aynı seviyeler için kaya kütle sınıflamaları (RMR) gerçekleştirilmiş ve veri tabanına dahil edilmiştir. Hazırlanan veri grupları üzerinde öncelikle uç değer analizleri ile iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirilmiş veri tabanında, basit regresyon ve korelasyon analizleri gerçekleştirilmiş; kaya malzeme ve kaya kütle parametrelerinin değişiminde derinliğin etkisi, diğer taraftan kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin deformasyon modülünün değişimindeki etkisi irdelenmiştir. Nihai olarak, deformasyon modülünün derinlik ile değişiminin irdelenmesi ve deformasyon modülünün kestirimine yönelik olarak örtü yükü parametresinin de yer aldığı modeller üretmek amacıyla çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizleri yapılmıştır.

Elde edilen regresyon modellerinin tahmin performansları model geliştirilirken kullanılmayan benzer nitelikte test verisi kullanılarak irdelenmiştir. Yukarıda özetlenmiş olan bu çalışma planı, maddeler halinde aşağıdaki şekilde verilebilir;

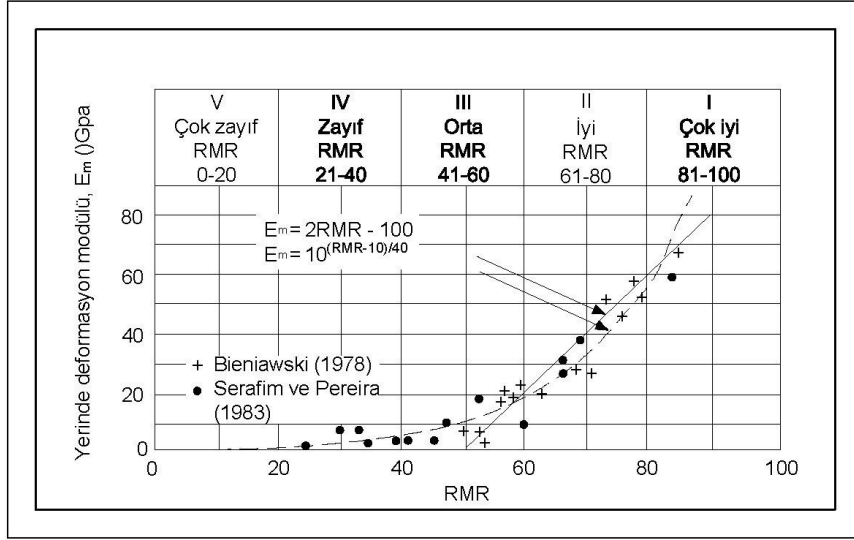
- a) Literatür araştırması ve literatürdeki sınırlamaların tartışılması
- b) Veri tabanının oluşturulması ve bu verilerin kaya gruplarına ayrılması
- c) Verilerin kullanılabilirliğinin irdelenmesi amacı ile, verilerin literatürde yer alan bazı eşitliklerle test edilmesi.
- d) Kaya malzeme ve kaya kütle parametreleri ile, derinlik ve deformasyon modülü arasında basit regresyon analizlerinin analizlerinin yapılması
- e) Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinin yapılması
- f) Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizlerinin yapılması ve kestirim modellerinin oluşturulması
- g) Oluşturulan modellerin tahmin performanslarının belirlenmesi
- j) Elde edilen sonuçların tartışılması
- h) Eşitliklerin, bağımsız verilerle test edilmesi
- i) Deformasyon modülünün derinlikle değişiminin değerlendirilmesi, avantaj ve sınırlamalarının tartışılması.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülünün tayininde, bugüne kadar çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler ile ilgili özet bilgiler ve bunların sınırlamaları bu bölümde özetlenmektedir. Özellikle güncel ve literatürde sıklıkla kullanılan çalışmaların irdelenmesinde, tez çalışmalarına yön veren bazı sınırlamaların veya avantajlı yönlerin tartışılmasına dikkat edilmiştir.

Bieniawski (1978), az eklemlili ve iyi kaliteli kaya kütlelerinde, kaya kütle deformasyon modülünün tayinine yönelik olarak gerçekleştirdiği çalışmalarda, arazide yapılan plaka yükleme deney sonuçlarından yararlanarak, kaya kütlesi deformasyon modülünü, RMR puanı ile ilişkilendirmiş ve  $E = 2 \times RMR - 100$  (Eş. 2.1) ampirik bağıntısını önermiştir. Ancak bu eşitlikte, RMR puanı'nın  $\geq 50$ 'den büyük olması sınırlaması bulunmaktadır. Burada kaya kütle deformasyon modülü GPa cinsinden elde edilmektedir. Bu eşitlikte, RMR puanının 50'den büyük olması ve yaklaşımın zayıf kaya kütlelerinde kullanılmıyor olması önemli bir sınırlama olarak görülmekle beraber, literatürde kaya kütlesi deformasyon modülünün dolaylı tespitine yönelik önemli bir yaklaşımdır. Daha sonraki yıllarda yine aynı araştırmacı tarafından RMR modifiye edilmesine rağmen eşitlikte bir modifikasyon yapılmamış ve bu eşitlik 1990'ların sonundan itibaren mühendislik uygulamalarındaki önemini tamamen kaybetmiştir.

Serafım ve Pereira (1983), kaya kütle deformasyon modülünün tayininde yine Bieniawski (1978) gibi RMR ve kaya kütle modülü arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Süreksizlik düzeltilmesi gerçekleştirilmeden hesaplanacak temel RMR puanından yararlanılarak  $E = 10^{(RMR-10)/40}$  (Eş.2.2) eşitliği araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Buradaki sınırlama ise RMR puanı'nın 50'den küçük olmasıdır. Önerilen söz konusu eşitlikte, yer altı açıklıkları gibi yapıların boyut etkisinin herhangi bir değerlendirme içerisinde olmaması ve asal gerilim etkilerinin dikkate alınmaması, önemli birer sınırlama olarak göze çarpmaktadır. Bu sınırlamaların giderilebilmesi amacı ile Nicholson ve Bieniawski (1990) bir azaltma faktörü önermişlerdir. Bu azaltma faktörü  $E_m = E_i \times (AF)$  eşitliği (Eş.2.3) ile ifade edilmektedir. Burada AF, plaka yükleme deney düzenek ölçeği ile belirlenen faktör sayısıdır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Kaya kütlelerinde yerinde ölçülen deformasyon modülü ile RMR arasındaki bazı ilişkileri gösterir grafik (Serafim ve Pereira, 1983)

Nicholson ve Bieniawski (1990), laboratuvar ortamında elde edilen kaya malzemesi elastisite modülünün ( $E_i$ ) bir katsayı yardımı ile kaya kütle deformasyon modülü'ne dönüştürülebileceği düşüncesinden yola çıkarak bir eşitlik önermiştir. Söz konusu eşitlik  $E = E_i k$  şeklinde ifade edilmiş olup,  $k$  katsayısı araştırmacıların bu çalışmada kullandıkları plaka yükleme deneylerinden yararlanılarak elde edilmiş ve  $k = 0.0028x(RMR)^2 + 0.9\exp[(RMR)/22.82]$  (Eş. 2.4) şeklinde ifade edilmiştir. Pratik mühendislik uygulamalarında kolay kullanımı için bir abak da geliştirilmiştir

Mitri vd. (1994) tarafından, RMR puanı ve kaya malzemesinin elastisite modülünü girdi parametreleri olarak esas alan;  $E_m = E_i \times [(1 - (\cos(\pi RMR/1000)))]$  (Eş.2.5) eşitliği elde edilmiş ve bu eşitlikle kaya kütle deformasyon modülünün tayin edilebileceği belirtilmiştir. Nicholson ve Biniawski (1990)'nin verilerini kullanarak, bu eşitliğe ve çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen benzer eşitliklere de ilişkin bir performans değerlendirmesi yapan Sönmez vd. (2006) eşitliğin bazı noktalarda yerinde ölçülen değerlere oranla çok yüksek kütle deformasyon modülü değerleri verdiği tespit edilmiştir.

Verman vd. (1997), belirli bir derinlikteki yer altı açıklığının bulunduğu bölgedeki kaya kütlelerinin deformasyon modülünün hesaplanmasında,  $E = 0.3H \times a \times 10^{(RMR-20)/38}$  eşitliğinin (Eş.2.6) kullanılabilirliğini belirtmiştir. Bu çalışma ilk kez derinliğin dikkate



alınarak kaya kütlesi deformasyon modülü ampirik eşitliğini önermekte olup,  $a$ , 0.16 ile 0.30 arasında değişen bir katsayıdır.  $H$  ise yüzeyden itibaren derinliktir. Ancak, bu eşitlik derinliğin 50 m'den daha küçük olması durumunda kullanılmamalıdır. Öte yandan, derinlik ile ilgili bir üst sınır belirtilmemiştir. Bu çalışma, kaya kütle deformasyon modülünün belirlenmesinde derinliğin etkisi ile ilgili öncel bir çalışma niteliğindedir ancak, derinlik limitleri ile ilgili sınırlamalara sahiptir. Bununla birlikte, bu eşitlikte, koşulların zayıf kaya koşullarını temsil etmediği ve su içermeyen kaya kütleleri için geçerli olacağı ek sınırlamalardır. Ayrıca, bu eşitlikte dikkat çeken önemli bir sınırlama, sıklıkla görülen; metro tünel inşaatı gibi derinliği ~50.00 metre seviyelerinde veya daha sığ kesimlerde yapılan kazı çalışmaları ve bunlara ilişkin mühendislik tasarımlarında, ilgili eşitliğin kullanılmaması önemli bir zaafiyet oluşturmaktadır. Öte yandan, bu eşitlikte, çok yüksek derinliklerde hesaplanan deformasyon modülleri için (örn 2000 m) aşırı yüksek değerler tespit edilmektedir. Aynı RMR sayıları baz alınarak farklı eşitliklerden yararlanılarak hesaplanan deformasyon modüllerine göre, bu yaklaşım çok yüksek değerler vermektedir. Bu durum, derinlik koşulunun bir üst sınırı olması gerektiğini ortaya çıkarmaktadır (Gerçek, 2001).

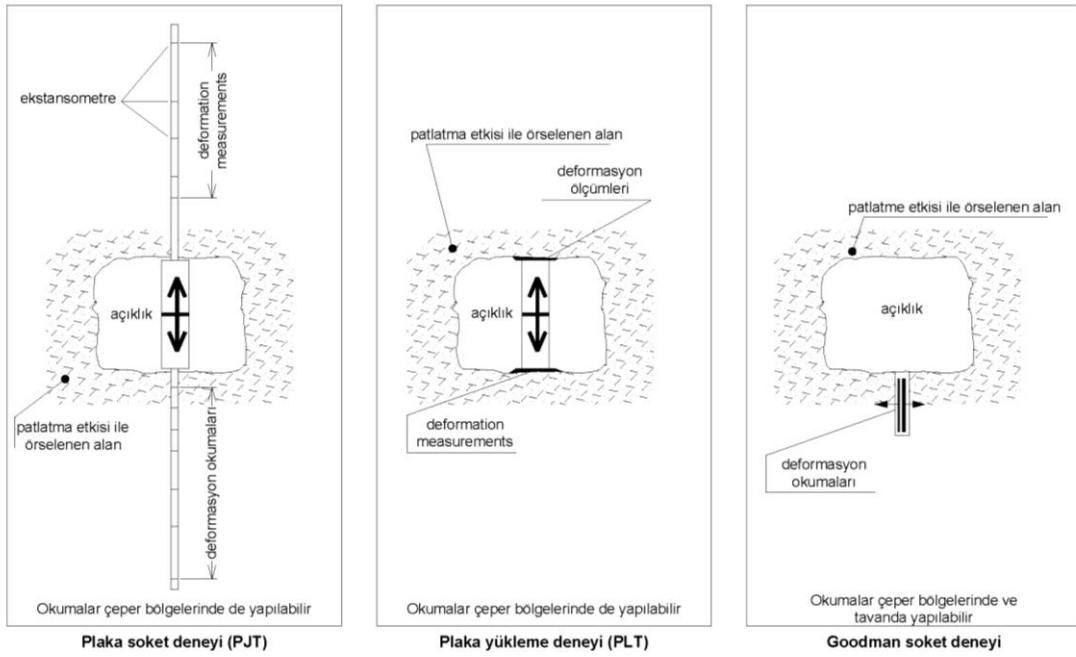
1997 yılında, Hoek ve Brown (1997) tarafından kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımının ve GSI puanının kullanıldığı bir eşitlik önerilmiştir. GPa cinsinden sonuç veren bu eşitlikte, jeolojik dayanım indeksi (GSI), deformasyon modülü hesaplamalarında ilk kez kullanılmıştır. Kaya kütesinin deformasyon modülü  $E = (q_{ci}/100)^{0.5} \times 10^{((GSI-10)/40)}$  eşitliği (Eş.2.6) ile hesaplanabilmektedir. Söz konusu eşitlik, sonraki dönemde aynı araştırmacılar tarafından 2002 yılında revize edilmiştir. Bu eşitlikte, kazı – patlatma etkisi, yerindeki gerilme değişimleri etkisini konu alan “örselenme faktörü” de dikkate alınmış ve  $E_m = (1-(D/2)) \times (q_{ci}/100)^{0.5} \times 10^{((GSI-10)/40)}$  (Eş.2.7) eşitliği önerilmiştir. İkinci olarak önerilen bu eşitlikte, özellikle yüksek GSI değerine sahip kaya kütlelerinde, beklenmedik derecede yüksek  $E_m$  değerlerin tahmin edildiğine yönelik bir sınırlama mevcuttur. Öte yandan ilgili ampirik eşitliklerin, arazide 100 MPa üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımına sahip kaya türlerinde çalışıp çalışmayacağı konusunda bir performans değerlendirmesi bulunmamaktadır.

Read vd. (1999), kaya kütlesinin deformasyon modülünün hesaplanmasında, RMR puanının girdi parametresi olarak kullanıldığı  $E_m = 0.1 \times (RMR/10)^3$  (Eş.2.8) üssel ilişkisini önermişlerdir. Ancak; üçüncü derece kuvvet ilişkisi ile hesaplanan bu yöntemde, RMR puanındaki az miktardaki değişimler, deformasyon modülünde çok yüksek değişimlere neden olmaktadır. Öte yandan, yüksek RMR puanına sahip kayalarda, aşırı yüksek deformasyon modüllerinin ortaya çıkması, önemli bir sınırlama olarak ortaya çıkmakta olup, bu nedenle bu yaklaşım, mühendislik tasarımlarında yaygın bir kullanım alanı bulamamıştır.

Palmström ve Singh (2001), deformasyon modülünün tespitine yönelik olarak farklı yerinde deney yöntemlerini (in – situ) karşılaştırmış, yorumlamış ve çeşitli düzenlemeler önermiştir. Plaka yükleme deneyi, plaka soket deneyi (plate jack test) and Goodman soket deneyi (Goodman jack test) sonuçlarının karşılaştırıldığı çalışmada, deney boşluklarında; patlatma etkisi ile oluşan örselenme zonlarının ölçümlerde sapmalara neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.3.). Bu deneyler içerisinde, plaka soket deneyi; deformasyon ölçümlerinin örselenmemiş zona erişebilmesi nedeni ile en temsil edici değerleri üretmektedir. Diğer iki deneyin patlatma ve örselenme etkisinde kalan alanda yapılması, bu deneylerden elde edilen deformasyon modüllerinin olduğundan daha düşük elde edilmesine neden olmaktadır. Araştırmacılar (Palmström ve Singh, 2001), plaka soket deneyi ve diğer deneyler arasında denkliğin oluşabilmesi için, ideal olarak 2.5 katsayısının kullanılmasını önermişlerdir.

Öte yandan, ölçülen deformasyon modül değerleri de kullanılarak, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin kullanıldığı ampirik eşitliklerin performans analizleri yapılmış ve bu eşitliklerin geliştirilmesine yönelik öneriler sunmuşlardır. Kaya kütlesinde, patlatma ve örselenme etkisine bağlı olarak, kaya kütlesindeki süreksizliklerin örselenmesi ve bu kesimlerde deformasyon modülünde yaşanan düşüş, örselenme tarafından kontrol edilmektedir. Yapılan analizlerde, patlatmaya bağlı örselenme etkisinin, deformasyon modülünü 2 ila 4 kat arasında azalttığı görülmüştür. Patlatmaya bağlı örselenmenin yaşandığı kaya kütlelerinde RMR ve RMI puanlarının yer aldığı eşitliklerin anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Araştırmacılar (Palmström ve Singh, 2001); deformasyon modülünün dolaylı yoldan tespitinde birden fazla ampirik eşitliğin kullanılması gerektiğini, farklı eşitliklerden elde edilen sonuçların ya da bu eşitliklerin birbirleri ile doğrudan ilişkilendirilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. RMR ve RMI gibi, kaya

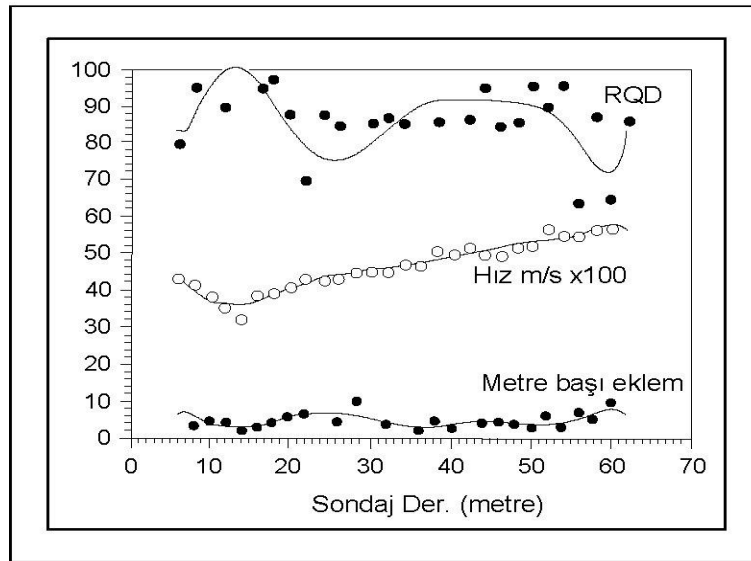
kütlesinin süreksizlik özelliklerine bağlı olarak değişen kaya kütlesi sınıflama sistemlerini içeren ampirik eşitlikler, yerinde ölçülen deformasyon modüllerine daha yakın sonuçlar vermektedir. Ancak, mineralojik yapı olarak zayıf kaya niteliğinde olan ancak süreksizlik koşulları iyi olan zayıf dayanımlı kayalarda; söz konusu eşitlikler, yerinde ölçülene göre çok yüksek sonuçlar vermektedir. Bu durumda, düşük dayanımlı kaya kütlelerinde deformasyon modülünün kestiriminin geliştirmeye açık bir konu olduğu belirtilmektedir (Palmström ve Singh, 2001).



Şekil 2.2. Farklı yöntemlerle gerçekleştirilen yerinde (in – situ)deformasyon modülü ölçümleri (Palmström ve Singh, 2001)

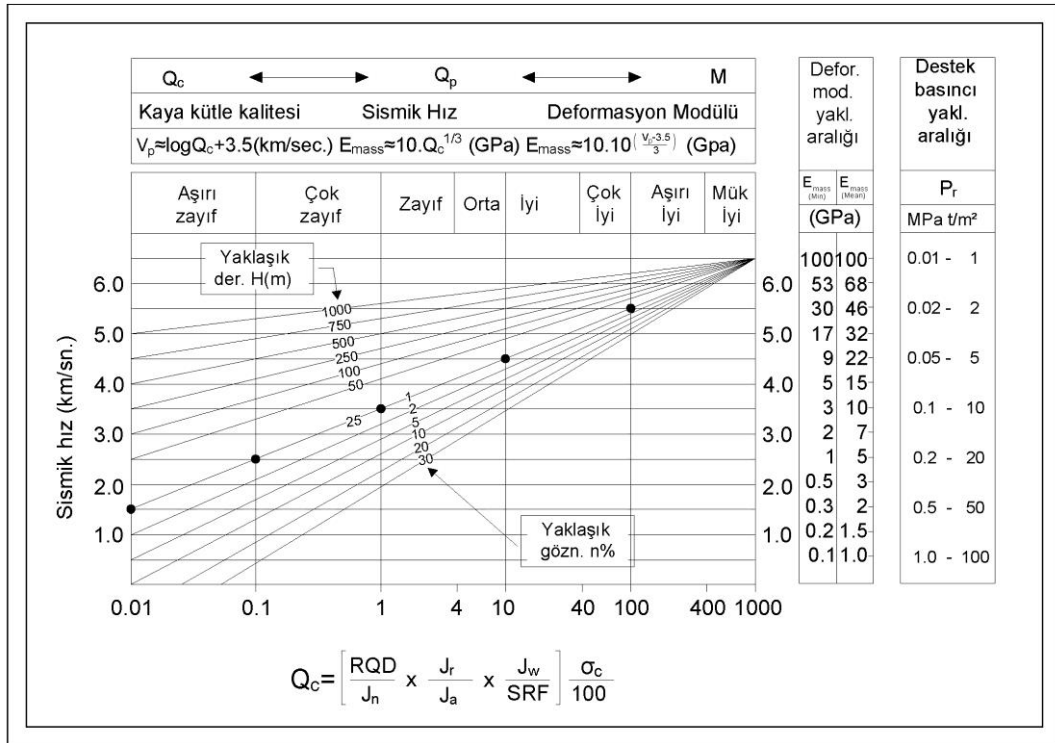
Barton (2002), tünel sınıflaması ve destek tipinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan NGI (Q) sistemi ve bu sınıflamada girdi parametresi olarak kullanılan 6 parametreyi irdelemiş, derinlik – efektif gerilme, sismik dalga hızları, Lugeon deney sonucu gibi parametrelerin Q sistemine olası etkilerini değerlendirmiş ve Q sistemin kapsamını genişletmiştir. Bu çalışmada (Barton, 2002), kaya kütlesinin sınıfını belirlemede çeşitli iyileştirmeler yapılmış, bu kaya kütlelerinde yapılacak mühendislik yapılarındaki destek sistemlerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın, tez çalışma konusunu yakından ilgilendiren kesimi; Q puanının hesaplanmasında ve kaya kütlesinin statik deformasyon

davranışında, derinliğin ya da efektif gerilmenin etkisinin irdelenmesidir. Araştırmacı (Barton, 2002), tek eksenli sıkışma dayanımı, sismik dalga hızı, gözeneklilik, permeabilite gibi kaya malzemesi ve kaya kütlesi parametrelerinin, Q puanının hesaplanmasında etken parametreler olduğunu belirtmiş, tüm bu parametrelerin entegre edildiği bir abak oluşturmuştur. Bu kapsamda, Q puanına etki eden söz konusu bu parametrelerin arasında da istatistiksel ilişkilerin varlığı ön plana çıkmıştır. Kaya kütlelerinde uygulanan jeofizik yöntemler ile elde edilen sismik dalga hızları, kaya kütlesi içerisinde yer alan eklem sistemleri, fay zonları ve poroziteye bağlı olarak değişim göstermektedir. Kaya kütlelerinde derinliğin, bir başka deyişle düşey gerilmenin artması ile birlikte bu eklem sistemlerinde kapanmaların ve azalmaların olacağı, bu durumun  $V_p$  değerlerini de artırdığı düşünülmektedir. Çalışma alanlarından biri olan 62.00 metre açıklığa sahip olan Gjovik Yeraltı Boşluğu Bölgesi'nde (Norveç)  $V_p$  dalga hızlarının 0 – 70.00 metre derinlik aralığında, RQD puanı ve metrede eklem sayısı sabit olmasına rağmen, derinliğe bağlı olarak sürekli olarak arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.3.). Bu durum, bu tez kapsamında araştırılan temel konudur. Diğer bir ifade ile, uzun süredir kavramsal olarak derinliğe veya örtü yüküne bağlı olarak kaya kütlesi deformasyon modülünün değişebileceği konusunda bir fikir olsa da, bugüne kadar veriye dayalı kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmemiştir. Bu tez çalışmasında anılan hususun bir ölçüde açıklığa kavuşturulması yönünde veriye dayalı kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.3. Norveç Gjovik Mağara Bölgesi'nde elde edilen ve derinliğe bağlı değişimleri gösterilen RQD, P dalga hızı ve metrede süreksizlik sayıları (Barton, 2002)

Barton (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışma içerisinde Q puanının hesaplanmasında  $V_p$  dalga hızının matematiksel etkisini ifade eden  $V_p=3.5+\log Q_c$  (Eş.2.9) genel eşitliği ve  $E_{mass}=10.Q_c^{1/3}$  eşitliği (Eş.2.10) birleştirilmiş ve kütle deformasyon modülünün kestirimine yönelik olarak  $E_{mass}=10 \times 10^{(V_p-3.5)/3}$  bağıntısı (Eş.2.11) elde edilmiştir. Bu bağıntıdan ve  $V_p$  hızlarının derinlikle artışından yola çıkan araştırmacı (Barton, 2002), deformasyon modülünün derinliğe ve düşey gerilmeye bağlı olarak arttığını belirtmiş, bu önermeyi çeşitli projelerde gerçekleştirilen deformasyon ölçümleri,  $Q_c$  hesaplamaları ve bu parametrelerin farklı derinliklerdeki değişimleri ile desteklemiştir (Şekil – 2.4). Ancak, derinlik ile başta  $Q_c$  ve kaya kütlesi deformasyon modülü olmak üzere söz konusu parametrelerin değişiminde, kaya kütlelerinin anizotropisi de önemli bir rol oynamaktadır (Barton, 2002).



Şekil 2.4.  $Q_c$  puanının hesaplanmasına yönelik olarak, deformasyon modülü,  $V_p$  dalga hızı, gözeneklilik ve destek gerilme – mukavemet değerlerinin kullanıldığı entegre diyagram (Barton, 2002)

Grimstad ve Barton (2002), kaya kütle deformasyon modülünün tayininde, tünel sınıflamaları için kullanılan Q sistem sınıflamasının çıktı puanı olan Q puanı ile kaya kütlesi deformasyon modülünü ilişkilendirmişlerdir. Q puanının 1'den büyük olduğu durumlarda,  $E = 25 \times \log Q$  eşitliğini (Eş.2.12) öneren araştırmacılar, diğer durumlar için

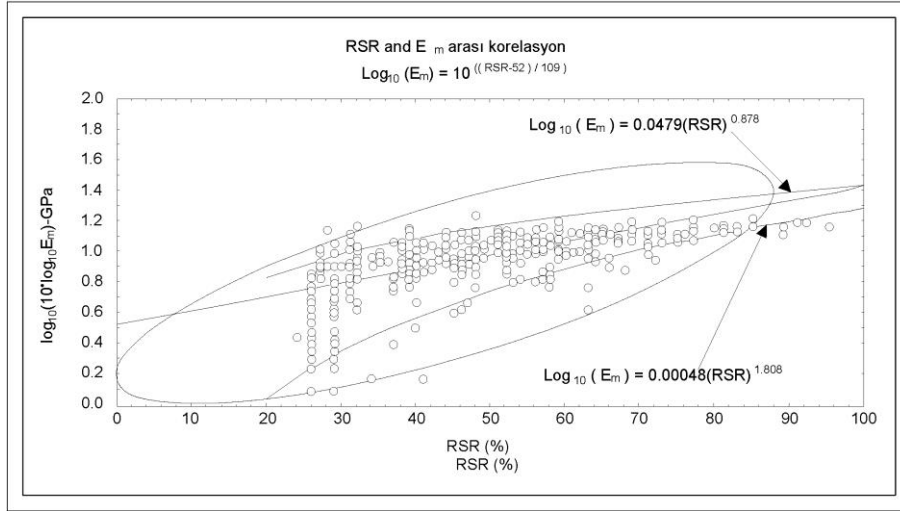
$E = 10 \times Q_c^{1/3}$  (burada  $Q_c = Q_{ci}/100$ )<sup>1/3</sup> (Eş.2.13) olarak alınmıştır) eşitliğini tespit etmişlerdir. Geliştirilen bu eşitliklerde, bazı sınırlamaların varlığı söz konusudur (Palmstrom ve Broch, 2006). Bunlar;

- ✓ Yüksek Q değerleri için sonuçlarda sınırlamalar söz konusudur.
- ✓ İkinci eşitlik, düşük Q değerleri için sınırlı doğruluk vermektedir.
- ✓ İlk eşitlikte, kaya malzemesinin dayanımı dikkate alınmamaktadır.

Kayabaşı vd. (2003) ve Gökçeoğlu vd. (2003), kaya kütlesi deformasyon modülünün belirlenmesinde birbirini takip eden ve geliştirilen iki eşitlik oluşturmuşlardır. Kullanılan eşitliklerde, kaya kalite göstergesi (RQD) puanı ile, bozunma derecesi (WD) ve kaya malzeme elastisite modülü, girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Söz konusu eşitlikler Kayabaşı vd.(2003)'te  $E=0.135 \times [(E_i \times (1+RQD/100)) / WD]^{1.811}$  (Eş.2.14); Gökçeoğlu vd. (2003)'de ise,  $E=0.001 \times [(E_i/q_{ci})(1+(RQD/100))/WD]^{1.5528}$  (Eş.2.15) olarak önerilmiştir. Bu eşitliğin önerilmesinde ek 58 adet veriden faydalanılmıştır. Sonraki yıllarda, aynı veritabanı kullanılarak Sönmez vd. (2004b) tarafından geliştirilen eşitlikte,  $GSI=100$  koşulunda kaya kütesinin modül oranının ve kaya malzemesinin modül oranının birbirine eşit olacağı düşünülmüş ve kaya kütle sabiti de kullanılarak  $E_m = E_i (s^a)^{0.4}$  (Eş.2.16) eşitliği geliştirilmiştir. Söz konusu eşitliğin RMR değerinin 60 ve 80 değeri arasında olan kaya kütlelerinde ölçülen değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum da, özellikle bozunmuş kayalar ve zayıf kaya kütleleri üzerinde yapılması planlanan mühendislik tasarımları düşünüldüğünde önemli bir sınırlama olarak öne çıkmaktadır.

Sarma ve Sarsby (2005), kaya kütle deformasyon modülünün tayininde, kaya yapısı puanı (rock structure rating – RSR) parametresinin etkisini konu alan bir araştırma gerçekleştirmiştir. Söz konusu bu çalışmada, Güneydoğu Hindistan'da (Eastern Ghats), o dönem yapımı sürdürülen demiryolu projeleri kapsamında açılan 45 adet sondaja ait veri ve inşaat çalışmalarından elde edilen gözlemsel veriler kullanılmıştır. Bölgede, granit, sillimanit, şist türü kaya gruplarının yer aldığı formasyonlar bulunmaktadır. Kaya kütesinin dayanım özelliklerindeki belirsizlikler ve doğru jeolojik modelin oluşturulmasındaki sorunlar nedeni ile, yapım sırasında önemli stabilite problemleri gelişmiştir. Bu durum, demiryolu inşaatının tamamlanmasının 6 yıl gecikmesine neden olmuştur. Araştırmada, 45 lokasyonda yer alan sondajlardan elde edilen kaya numuneleri

üzerinde ve yerinde gözlemler yardımı ile, kaya kütlelerinin kazı sırasındaki davranışlarını ve dayanımlarını niteleyen RSR puanları, derinlik aralıkları da gözetilerek hesaplanmış, yine bu sondajlardan elde edilen deformasyon modülü ( $E_m$ ) değerleri ile regresyon analizleri gerçekleştirilerek, korelasyon katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. RSR puanı ile deformasyon modülünün korelasyonunu gösteren grafikler (tüm veri seti için gerçekleştirilmiştir) (Sarma ve Sarsby, 2005)

Tüm veri seti için yapılan analizlerde, verinin üst limitteki değerleri, alt limitteki değerleri ve ortalama değerleri için 3 farklı eşitlik geliştirilmiştir. Geliştirilen eşitlikler şu şekildedir.

$$\text{Log}_{10}(E_m) = 10^{((RSR-52)/109)} - \text{Ortalama Değerler} \quad (2.17)$$

$$\text{Log}_{10}(E_m) = 0.0479(RSR)^{0.878} - \text{Üst Uç Değerler} \quad (2.18)$$

$$\text{Log}_{10}(E_m) = 0.00048(RSR)^{1.808} - \text{Alt Uç Değerler} \quad (2.19)$$

Gerçekleştirilen regresyon analizlerinde, 0.7 üzeri korelasyon katsayıları tespit edilmiş, bu bağlamda RSR puanı ile deformasyon modülü arasında güçlü bir ilişki olduğu, RSR puanı bilinen kesimlerde pratik bir şekilde deformasyon modülünün hesaplanabileceği Sarma ve Sarsby (2005) tarafından belirtilmiştir.

Hoek ve Direderichs (2006), kaya malzemesinin Elastisite Modülü ( $E_i$ ), Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), örselenme faktörü (D) girdilerinin kullanıldığı ve günümüzde de yaygın olarak kullanılan bir ampirik eşitlik geliştirmişlerdir, bu eşitlik  $E = E_i \times (0.02 + (1 -$

$(D/2) / 1+e^{((60+15D-GSI)/11)}$  (Eş.2.20) şeklindedir. Kaya malzemesinde Elastisite Modülünün belirlenemediği durumlarda, araştırmacılar söz konusu eşitlikte kullanılmak üzere Deere (1968) tarafından önerilen  $E_i = MRxq_{ci}$  eşitliğinin kullanılmasını önermişlerdir. Burada MR, “Modül Oranı”nı temsil etmekte olup, değişik kaya türleri için rehber niteliğinde bir abak önerilmiştir (Şekil 2.6.). Söz konusu bu çizelge, çok geniş değişim aralıkları göstermekte ve bu sebep ile farklı kaya türleri arasında bazı çakışmalar yaşanabilmektedir. Buradan hareketle,  $E_i$  parametresinin MR puanı üzerinden belirlendiği bu yöntemde, oldukça yaklaşık değerlerin bulunması, önemli bir başarı olarak dikkat çekmektedir.

Kaya türü	Sınıf	Grup	Yapı			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
Sedimenter	Kırıntılı		Konglomera 300-400	Kumtaşı 200-350	Silttaşı 350-400	Kiltaşı 200-300
			Brey 230-350		Gravak 350	Şeyl 150-250' Marm 150-200
	Kırıntısız	Karbonatlar	Kristalin kireçtaşı 400-600	Sparitlik kireçtaşı 600-800	Mikritik kireçtaşı 800-1000	Dolomit 350-500
		Evaporitler		Jips (350) <sup>c</sup>	Anhidrit (350) <sup>b</sup>	
Organik					Tebeşir 1000 <sup>+</sup>	
Metamorfik	Foliasyonsuz		Memser 700-1000	Hornfels 400-700 Metakumtaşı 200-300	Kuarsit 300-450	
	Az foliasyonlu		Migmatit 350-400	Amfibolit 400-500	Granıs 300-750 <sup>c</sup>	
	Foliasyonlu <sup>a</sup>			Sist 250-1100 <sup>b</sup>	Filit/Mikaşist 300-800 <sup>c</sup> Sleyt 400-600 <sup>c</sup>	
Magmatik	Plutonik	Açık	Granit 300-550	Diyorit 300-350 Granodiyorit 400-450		
		Koya	Gabro 400-500	Dolerit 300-400 Norit 350-400		
	Hipabisal		Porfir (400) <sup>b</sup>	Diyabaz 300-350		
	Volkanik	Lav		Riyolit 300-500 Andezit 300-500	Dasit 350-450 Bazalt 250-450	
		Piroklastik	Aglomera 400-600	Volkanik breş (500) <sup>b</sup>	Tuf 200-400	

<sup>a</sup> Oldukça anisotropik kaya; düşey yöndeki birim deformasyon ve/veya yüklemeye zayıflık düzlemine paralel (yüksek MO) veya dikey (düşük MO) yönde. Tek eksenli deneyde yüklemeye yönü arazidekiyle aynı olmalıdır

<sup>b</sup> Ver. yok, jeolojik durum dikkate alınarak tahmin edilmiştir

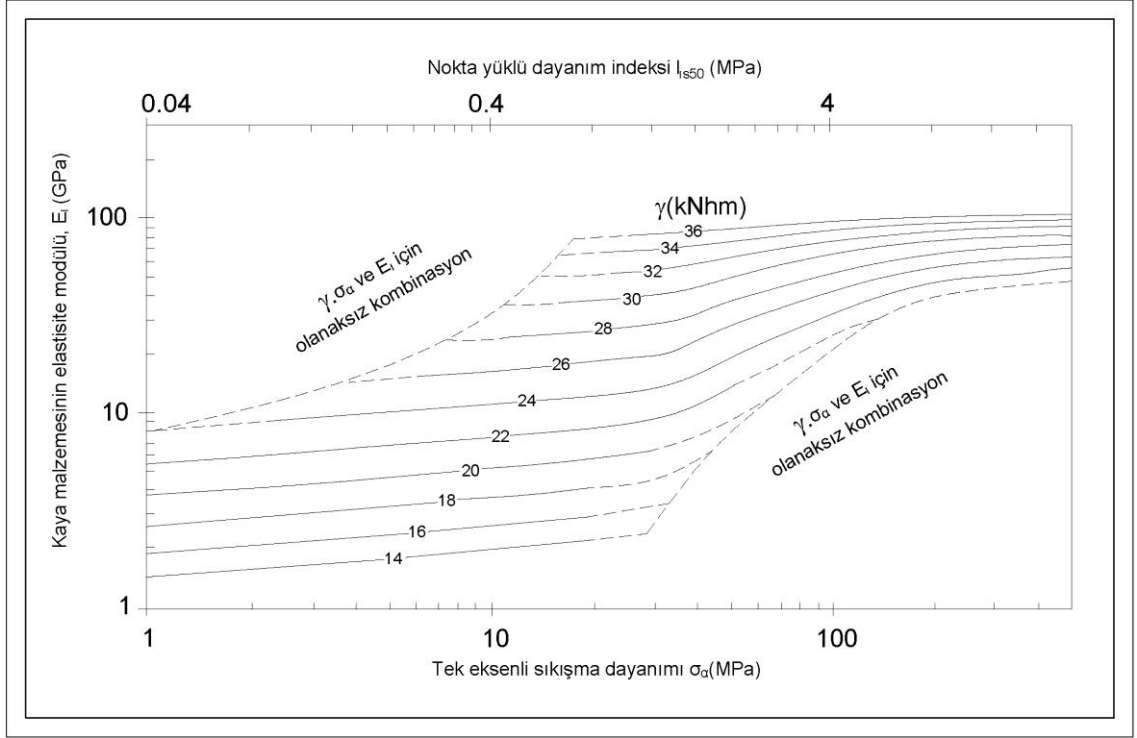
<sup>c</sup> Felsik granitoid: iri taneli veya bozunmuş (yüksek MO), ince taneli (düşük MO).

Şekil 2.6. MR değerinin seçimi için önerilen kılavuz (Hoek ve Diederichs, 2006)

Sönmez vd. (2006) tarafından, kaya malzemesinin elastisite modülünü bir azaltma faktörü ile çarparak kaya kütle deformasyon modülünü tahmin eden bir yaklaşım getirilmiştir. Bu



eşitlik,  $E_m = E_i \times 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/4000 \exp(-RMR/100)]}$  (Eş.2.21) şeklinde ifade edilmektedir.  $E_i$  değerlerinin laboratuvar ortamında elde edilmesinin faydalı olacağını öneren Sönmez vd. (2006), aksi durumlarda, detayları Şekil 2.7.'de verilen abağı önermişlerdir. Bu abak yapay sinir ağı yöntemi ile elde edilmiş olup, nokta yükü dayanım indeksi veya tek eksenli sıkışma dayanımı ile birim hacim ağırlık verilerinden yararlanmaktadır.



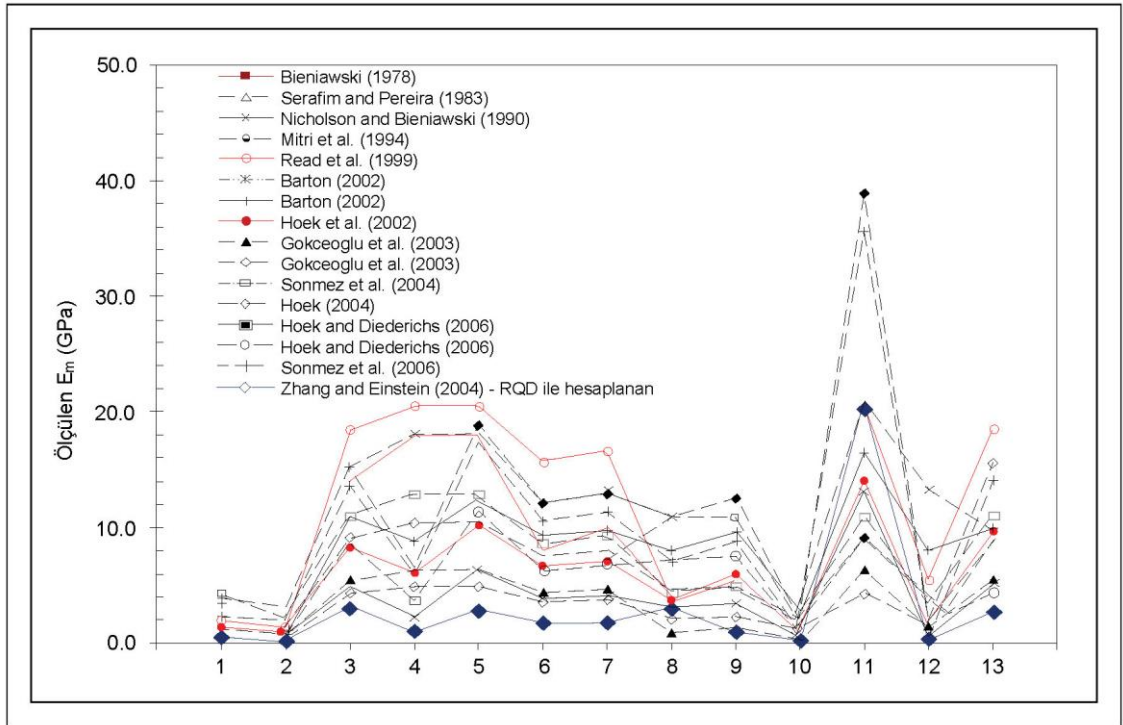
Şekil 2.7. Kaya malzemesinin elastisite modülünün tahmini için yapay sinir ağı yöntemi ile elde edilen kılavuz (Sönmez vd., 2006)

Justo vd. (2010), eklemlı kayalarda, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin dayanım parametrelerinin ve deformasyon parametrelerinin belirlenmesine ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, İspanya'da Tenerife'de inşaatı sürdürülen yaklaşık 135 metre yüksekliğindeki ikiz kule yapısının temel kazıları sırasında elde edilen veri tabanından faydalanmışlardır. Çalışma bölgesi olan Tenerife, volkanik seviyelerden oluşmaktadır ve bölgedeki coğrafi ve topoğrafik yapı ile birlikte, buradaki bazaltlar eklemlı durumdadır. Araştırmacılar, sahada 29 farklı bölgeden aldıkları numune üzerinde; tek eksenli sıkışma dayanımlarını tayin etmişler, kazı aynalarında süreksizlik hat etüdü çalışmaları gerçekleştirmişler ve tasarım çalışmalarında kullanmak üzere, RMR Puanı, GSI Puanı ve Q Sınıfını hesaplamışlardır. Öte yandan, aynı lokasyonlarda

presiyometre deneyleri gerçekleştirilerek kaya kütlesinin deformasyon modülü tespit edilmiştir. Yerinde ölçülen deformasyon modülünün haricinde, GSI, RMR ve Q puanlarını kullanan ampirik eşitliklerle deformasyon modülleri tespit edilmiştir. Söz konusu veri tabanı ile, bina temel kazılarının ve temel oturumlarının yer aldığı stabilite analizleri, “sonlu elemanlar yöntemi” ile incelenmiştir. Bu analizlerden elde edilen deformasyon miktarları, yerinde ölçülen deformasyon modülü ve ampirik eşitlikler ile elde edilen deformasyon modülü değerleri ile alternatifli olarak tespit edilmiştir. Modelden elde edilen deformasyon miktarlarını, reel durumla karşılaştırabilmek amacı ile, inşaat çalışmaları sırasında, belirli bölgelerde ekstansometreler yerleştirilmiş, kazı ve inşaat çalışmaları sırasındaki yerindeki deformasyon miktarları kaydedilerek, modelde hesaplanan deformasyonlarla kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda, özellikle presiyometre verilerinden faydalanılarak oluşturulan model parametrelerinin, aşırı yüksek deformasyon miktarları gösterdiği; reel durumda daha düşük deformasyonların yaşandığı sonucuna varılmıştır. Ampirik eşitliklerden elde edilen deformasyon modülü ile oluşturulan modellerde, reel durum ile örtüşen deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu durum, deformasyon modülünün tespitinde ampirik eşitliklerden faydalanılmasının, tasarım çalışmalarında pratik olacağı sonucunu doğurmuş olup, bu konudaki ampirik çalışmaların önemini arttırmıştır.

Alemdağ (2010), Elazığ ili’nde yer alan Simaki formasyonu’na ait silttaşlarının deformasyon özelliklerini incelemiş ve genel olarak silttaşlarının deformasyon modülünün tahmin edilmesine yönelik çalışmalarda bulunmuştur. Bu çalışmada, 12 farklı lokasyondan toplam 50.00 metre derinliğinde ve değişik açılarda araştırma sondajı gerçekleştirilmiş, presiyometre deneyleri ile birimlerin deformasyon modülleri tayin edilmiştir. Öte yandan, birimlerin kaya malzeme parametreleri ve RQD, RMR ve R<sub>Mi</sub> gibi kaya kütle parametreleri de tespit edilmiştir. Elde edilen bu parametreler ile, deformasyon modülünün tespitine yönelik ampirik eşitlikler oluşturulmuş ve bu eşitliklerde yüksek korelasyonlar tespit edilmiştir. Em ve RMR, Em ve GSI, Em ve RQD arasındaki eşitliklerde, 0.76 – 0.89 arasında değişen korelasyon katsayıları tespit edilmiştir. Silttaşı birimlerinin süreksizlik yönelimleri ile deformasyon modülü ve kaya malzemesinin elastisite modülünün bir arada düşünüldüğü ampirik eşitliklerde ise, yine yüksek korelasyon katsayıları tespit edilmiştir.

Zhang (2010), kaya kalite göstergesi (RQD) parametresinin, diğer kaya kütlesi – kaya malzemesi parametreleri ile etkileşimlerinin incelendiği bir araştırma gerçekleştirmiştir. Söz konusu bu çalışmanın, tez çalışmalarını yakından ilgilendiren yönü, kaya kalite göstergesinin (RQD), kaya kütlelerinde deformasyon modülüne olan etkisinin araştırılması ve bu yönde kullanılan mevcut eşitliklerle ilgili değerlendirmelerin yapılmış olmasıdır. Araştırmacı, bu irdelemeyi yaparken, 5 farklı literatür çalışmasında kullanılan veri tabanından yararlanarak, hem RQD, hem de RMR puanı ve Q puanı gibi kaya kütlesi parametreleri ve sınıflama sistemlerinin kullanıldığı ampirik eşitlikler ile hesaplanan deformasyon modül değerlerini karşılaştırmıştır. 16 eşitliğin kullanıldığı karşılaştırma çalışmalarında, 13 farklı örnek bölgesinde ölçülen ve hesaplanan deformasyon modül değerlerini gösteren grafik Şekil 2.8.'de verilmektedir.



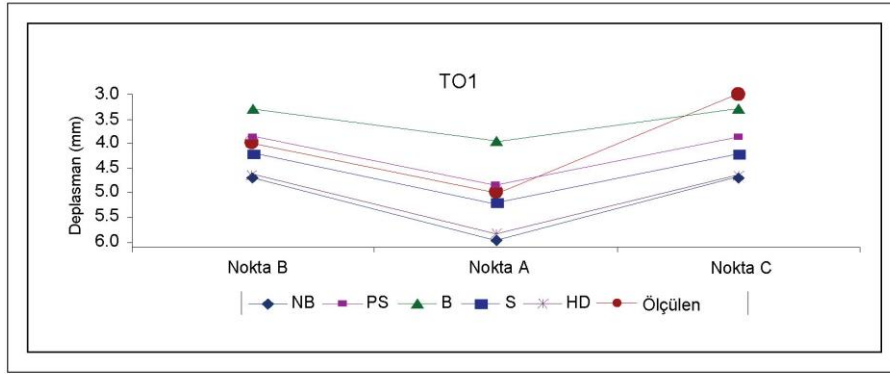
Şekil 2.8. Farklı literatür eşitlikleri kullanılarak hesaplanan deformasyon modül değerlerinin karşılaştırılması (Zhang, 2010)

Aksoy vd. (2011), deformasyon modülünün kestirimine yönelik var olan farklı eşitliklerin performanslarının kıyaslandığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada araştırmacılar, Türkiye'nin çeşitli şehirlerinde bazalt, kireçtaşı, kumtaşı, kıltaşı ve andezit türü kayaç gruplarında açılan tünel imalatlarında ölçülen deformasyonları, literatürde yer

alan eşitliklerde elde edilen deformasyon modül değerleri ile oluşturulan nümerik analizlerde tespit edilen deformasyonlarla kıyaslamışlardır.

Bu bağlamda, söz konusu tünel sahalarında yapılan araştırma çalışmaları yardımı ile, kaya malzemesi parametrelerinin yanı sıra, deformasyon modülü kestiriminde kullanılacak, RMR, Q, GIS ve RMI puanları elde edilmiştir.

Devamında ise araştırmacılar, yukarıda belirtilen eşitlikler ve elde edilen kaya kütlesi – kaya malzemesi parametrelerinden faydalanarak deformasyon modül değerlerini hesaplamışlar, bu deformasyon modülleri kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirmişlerdir. Farklı tünel bölgelerinde ölçülen deformasyon ölçümleri ile nümerik analizlerde tespit edilen deformasyonlar kıyaslanmıştır. Örnek kıyaslama grafiği Şekil 2.9.'da verilmektedir

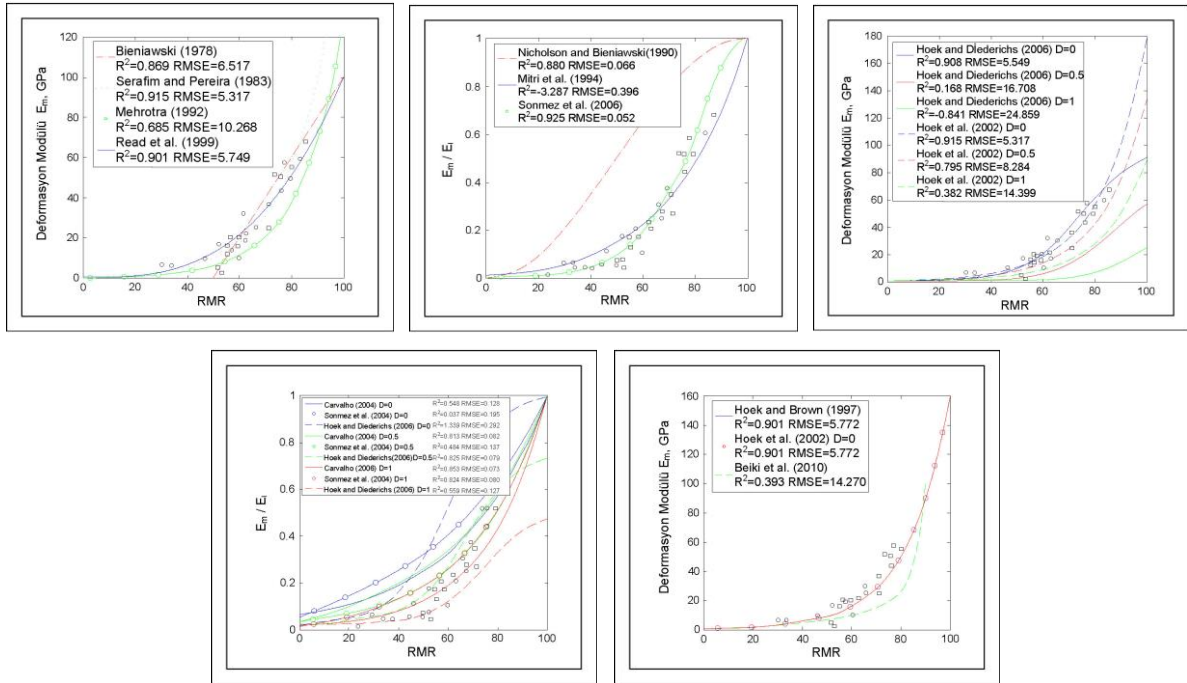


Şekil 2.9. Ordu tünel bölgesi için deformasyon karşılaştırma grafiği (Aksoy vd., 2011)

Gerçekleştirilen bu analizler sonucunda Palmstörn ve Singh (2001) tarafından geliştirilen eşitliklerin tespit edilen değerlere en yakın sonuçları verdiği, Barton (2002) tarafından önerilen eşitliklerin tespit edilenlere oranla yüksek sonuçlar verdiği, Sönmez vd (2004) ile Hoek ve Diederichs (2006) tarafından verilen eşitliğin birbirine yakın sonuç vermesine rağmen düşük sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda not edilmesi gereken önemli bir sınırlama, tünel sahalarında yerinde gerçekleştirilen deformasyon ölçümlerinin zamanlamasına çok dikkat edilmesi gerektiği, mümkün olduğunca ilk deformasyon ve kemerlenme sürelerinin kaçırılmaması gerektiği şeklindedir.

Shen vd. (2012), deformasyon modülünün tahmininde kullanılan bazı ampirik eşitliklerin karşılaştırıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu çalışmada kaya

mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan ve RMR, GSI gibi kaya kütleli parametrelerini girdi olarak kullanan ampirik eşitliklerin performansı, geçmiş dönemde çeşitli araştırmacılar tarafından yayınlanan ve yüksek güvenilirliğe sahip yerinde deney verileri ile irdelenmiştir. Bu çalışmada, kullanılan ampirik eşitlikler, ihtiyaç duyduğu girdi parametrelerine göre gruplandırılmıştır. Bu eşitlikler, önceki dönemde Bieniawski (1978), Serafim ve Pereira (1983), Stephen ve Banks (1989) tarafından kullanılan verilerle performans analizlerine sokulmuştur. Bu performans analizleri, eşitliklerle elde edilen ölçülen – tahmin edilen deformasyon modüllerinin korelasyon katsayılarının hesaplanması ve sapma ortalamalarının karekökünün hesaplanması (RMSE) şeklinde gerçekleştirilmiştir. Farklı gruplar için oluşturulan dağılım grafikleri ve RMSE değerleri Şekil 2.10.'de verilmektedir.



Şekil 2.10. Farklı grup eşitlikler için hesaplanan  $R^2$  ve RMSE değerleri (Grup 1 – Grup 5) (Shen vd., 2012)

Öte yandan araştırmacılar, eldeki veri tabanı ile, Gauss fonksiyon modelini kullanarak iki farklı kestirim modeli geliştirmişlerdir.  $y = ae^{-((x-b)/c)^2}$  genel formülü ile önerilen iki farklı eşitlik aşağıda verilmektedir.

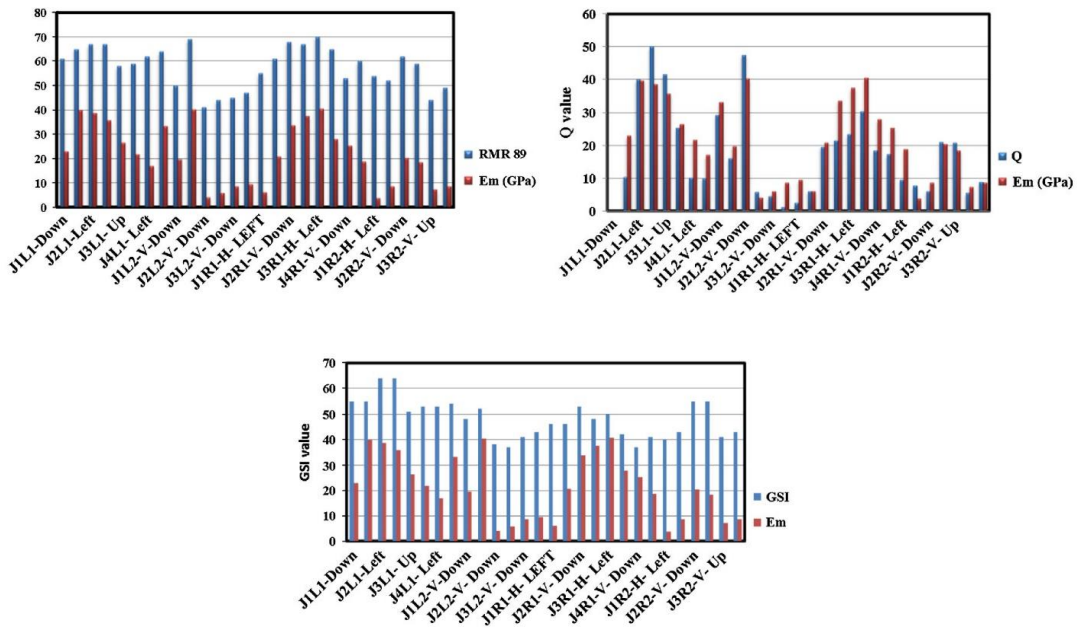
$$E_m = 110e^{-((RMR-110)/37)^2} \quad (2.22)$$

$$E_m = 1.14E_i e^{-((RMR-116)/41)^2} \quad (2.23)$$

Söz konusu eşitlikler ile gerçekleştirilen tahmin edilen – ölçülen deformasyon modül dağılımlarında, korelasyon katsayısı ve RMSE değerlerinde, mevcut irdelenen ampirik eşitliklere göre iyileşmeler fark edilmiştir. Gerçekleştirilen karşılaştırma çalışmalarında, kaya malzemesinin elastisite modülünü içeren ve içermeyen gruptaki eşitlikler irdelendiğinde, Read et al. (1999), Hoek ve Diederichs (2006) ile, Sönmez vd (2006) ve Carvalho (2004) tarafından oluşturulan eşitliklerin en iyi performansı verdiği belirlenmiştir. Ancak, ilave olarak geliştirilen ampirik eşitlikler ve tahmin performanslarından da görülebileceği üzere, deformasyon modülünün kestirimine yönelik bu modeller, yeni verilerin elde edilmesi ile birlikte sürekli olarak geliştirilmeye açıktır.

Khabbazi vd. (2012), kaya sınıflama sistemleri yardımı ile deformasyon modülünün tespitine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, hem literatürde yer alan çalışmalara ait bir değerlendirme yapılmış, hem de iki farklı baraj bölgesinden elde edilen 82 dilatometre deney sonucu yardımı ile erişilebilen diğer kaya kütle ve kaya malzeme parametreleri kullanılarak deformasyon modülü tespitine yönelik yaklaşımlar önermişlerdir. Çalışma sahasında, hem dilatometre deneylerinden elde edilen deformasyon modül verileri, sahada elde edilen diğer parametrelerle basit regresyon analizleri yardımı ile ilişkilendirilmiş, hem de literatürde değişik kaya kütle ve malzeme parametrelerinin ön plana çıktığı eşitlikler kullanılarak deformasyon modülleri hesaplanarak dilatometre sonuçları ile test edilmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalar neticesinde, özellikle RMR puanı, RQD ve GSI puanı gibi kaya kütle kalitesi parametrelerinin, deformasyon modülünün tespitinde en belirleyici parametreler olduğu ortaya çıkmıştır.

Ajalloeian ve Mohammadi (2012), kireçtaşı türü kaya gruplarında deformasyon modülünün tahminine yönelik yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, inşaat çalışmaları o yıllarda sürdürülen ve İran’da yer alan Khersan 2 Barajı projesinde sahada gerçekleştirilen plaka yükleme deneylerinden ve burada yapılan araştırma çalışmalarından elde ettikleri RMR, GSI ve Q Puanı gibi kaya kütlesi parametrelerinden faydalanmışlardır. Yapılan çalışmalarda, 14 adet sol sahil bölgesi, 14 adet sağ sahil bölgesinden olmak üzere toplam 28 adet deformasyon modülü sonucu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen plaka yükleme deneyleri Ünal (1997) metodu ve ASTM yöntemleri ile hesaplamalara tabi tutulmuştur. Ayrıca, benzer seviye ve lokasyonlarda yapılan araştırma çalışmalarına bağlı olarak, kaya kütlesi puanı (RMR), jeolojik dayanım indeksi (GSI) ve Q puanı hesaplanmış ve bu parametrelerin, yerinde ölçülen deformasyon modül değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 2.11.).



Şekil 2.11. Farklı metodlarla hesaplanan ve sahada ölçülen deformasyon modülü değerlerinin karşılaştırılması (Ajalloeian ve Mohammadi, 2012)

Karaman vd. (2014), kaya kütlesi deformasyon modülünün kaya kütle parametreleri ile tespit edilmesine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, Trabzon’da inşaat çalışmaları devam eden bir tünel bölgesinde 37 farklı noktada alınan, farklı kaya gruplarına ait örnekler kullanılarak çalışma alanına özel bir ampirik eşitlik geliştirilmiştir. Söz konusu bu eşitlik, yine aynı veri tabanı kullanılarak, literatürde yaygın olarak

kullanılan 6 farklı ampirik eşitlik ile karşılaştırılmıştır. Seçilen ampirik eşitlikler, RQD, RMR, Q puanlarının ve kaya malzemesi elastisite modülünün ön plana çıktığı eşitliklerdir. Geliştirilen eşitlik RQD puanı ve kaya malzeme elastisite modülüne dayalı bir eşitliktir. Bu çalışmada not edilmesi gereken önemli bir husus, RQD puanının üstel olarak deformasyon modülüne etki ettiği, bunun da diğer literatür çalışmalar ile yüksek oranda örtüşmesidir. Bu durum, RQD puanının deformasyon modül tayininde yüksek oranda etken olmasının bir sonucudur. RQD puanlarının birçok kaya kütlelerinde derinlikle değişimi takip edildiğinde, dolaylı yoldan derinlikteki değişimlerin RQD ile de deformasyon modülüne etki ettiği anlaşılmaktadır.

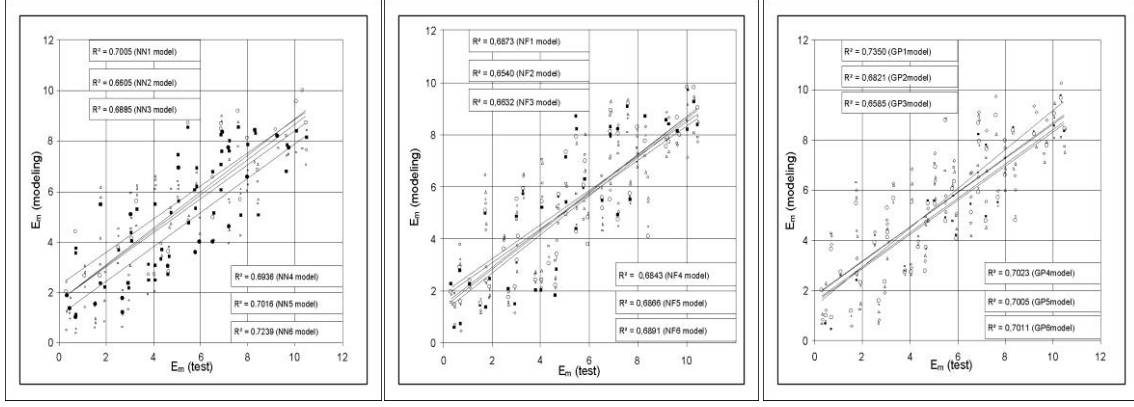
Tahir ve Mohammed (2014), kaya kütle sınıflamalarına bağlı olarak deformasyon modülünün tespitinde kullanılan ampirik eşitliklerin performansına ve genelleştirilmesine – iyileştirilmesine yönelik olarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, RMR puanı, GSI puanı ve Q Sınıflama Puanı temel alınarak elde edilen literatürdeki eşitliklerden bir veri tabanı yaratılmış, farklı kaya kütle parametrelerine göre, eşitlikler gruplandırılmıştır. Yapılan gruplandırmalarda, her gruba ait eşitlikler ve veri tabanları Sigmoid ve Gauss dağılımı yardımı ile genelleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, RMR ve GSI tabanlı literatür eşitliklerinin, tahmin performanslarının daha yüksek olduğu, ancak GSI puanının daha geniş tahmin aralığı olması nedeni ile burada tahmin performansının daha zayıf olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, Q sistemi esas alınarak elde edilen ampirik eşitliklerde, genellemenin daha zor olduğu, daha düşük tahmin performanslarının olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Q puanının kaya kütlelerinin geneline yönelik bir parametre olmasından daha çok, kaya kütlelerinin tünellilik davranışları ile ilgili bir parametre olması ile açıklanabilmektedir.

Alemdağ vd. (2015), deformasyon modülünün tespitine ilişkin, basit regresyon analizlerinin kullanıldığı bir yaklaşım üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, dört farklı lokasyondan elde edilen veri tabanı kullanılmıştır. Çalışma alanlarında, kaya kütle deformasyon modüllerinin doğrudan tespitine yönelik olarak presiyometre deney sonuçlarından faydalanılmış, bağımsız değişkenler olarak da kaya malzeme ve kaya kütle parametreleri kullanılmıştır. Yapılan değerlendirme çalışmaları iki ana başlıktadır. Birinci olarak, sahada elde edilen presiyometre sonuçları ile, kaya kütle parametrelerinin



bir arada kullanıldığı basit regresyon analizleri yapılarak, bu veri tabanı için, deformasyon modülünün hesaplanabileceği bir ampirik eşitlik elde edilmiştir. Diğer bir ana başlık olarak, çalışma alanındaki kaya kütle parametreleri (ağırlıklı RMR puanı) kullanılarak, RMR puanının girdi parametresi olarak ön plana çıktığı literatürde bilinen 11 eşitlik yardımı ile, deformasyon modülleri hesaplanmıştır. Bölgelerde elde edilen RMR puanı ile ölçülen deformasyon modüllerinin regresyon analizi ile, yüksek anlamlılık ( $R^2=0.97$ ) elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, buradaki deformasyon modül değerlerinin, RMR puanı ile yakın ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Öte yandan, 11 farklı eşitlik yardımı ile elde edilen deformasyon modüllerinin ortalamaları alınmış, presiyometre deneyleri yardımı ile ölçülen deformasyon modülleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Söz konusu bu karşılaştırmada  $R^2=0.75$  tespit edilmiştir. Bu durum, çalışmada elde edilen eşitliğin, çalışmada kullanılan mevcut eşitliklerin ortalaması niteliğinde bir eşitlik olarak kullanılabilmesi sonucunu doğurmuştur. Ancak, diğer birçok çalışmada olduğu gibi, bu çalışmada da aynı kaya kütle koşullarında, farklı eşitliklerin farklı deformasyon modülü değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum, kaya kütlelerin anizotrop ve heterojen yapısı, kaya kütle üzerindeki normal gerilme ve derinlik koşullarının deformasyon modülüne direkt olarak önemli oranda etki ettiği ve bu etkilerin araştırılmasının son derece faydalı olacağı anlamına gelmektedir.

Alemdağ vd. (2016), Elazığ yöresinde yüzeyleyen Simaki formasyonu'na ait siltaşı türü kayalarda deformasyon modülünün tespitine yönelik olarak; yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik programlama yöntemlerini kullanarak bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çalışmada, deformasyon modülünün kestiriminde kullanılmak üzere, RMR ve RQD puanları, tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzemesi elastisite modülü gibi kaya kütle ve kaya malzemesi parametrelerinden faydalanılmıştır. Maksimum deney derinliğinin 5.00 m olması nedeni ile, bu çalışmada deformasyon modülünün derinlik ile etkileşimi ihmal edilmiştir. Yapay sinir ağları yöntemi, bulanık mantık yöntemi ve genetik programlama yöntemi ile elde edilen kestirim modelleri, sahada ölçülen deformasyon modülleri ile karşılaştırılmış ve korelasyon katsayıları elde edilmiştir (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. Sırası ile yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik programlama ile elde edilen eşitliklerin korelasyon katsayıları (Alemdag vd., 2016)

Gerçekleştirilen bu çalışmalar neticesinde, üç farklı metodoloji ile yapılan kestirim modellerinde en başarılı sonucun genetik programlama ile elde edilen kestirim modeli olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, bu metod ile yapılan kestirim modellerinin, deformasyon modülünün belirlenmesinde kullanılabilecek nitelikte olduğunu tespit etmiş, ancak modelin kısıtlı bir veri tabanı ile oluşturulduğunu, daha geniş veri tabanı desteği ile modelin geliştirilebileceğini, modeli kullanmadan önce de başka tahmin yöntemleri veya eşitliklerle desteklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Zhang (2016), deformasyon modülünün tayininde, ampirik eşitliklerin kullanımına ait gelişimi değerlendirdiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, deformasyon modülünün tayinine ilişkin farklı kaya kütle parametrelerine (GSI, RMR, R<sub>Mi</sub> vb.) bağlı eşitlikler, farklı kaya malzeme parametrelerine bağlı ( $E_i$ ,  $\delta_c$ ,  $m_i$  vb.) eşitlikler, bu eşitliklerin elde edilme süreçleri ve kendi içlerindeki tutarlılıkları irdelenmiş ve yorumlanmıştır. Öte yandan, gerçekleştirilen çalışmada, 13 farklı araştırma bölgesinden elde edilen veri tabanı ile, birçok kaya kütle ve kaya malzeme parametresi ile ilişkili olarak geliştirilen ampirik eşitlik kullanılmıştır. Buradaki parametreler ve farklı eşitlikler yardımı ile elde edilen deformasyonlar karşılaştırılmıştır. Araştırmacı, gerçekleştirdiği bu çalışmalar neticesinde, benzer kaya kütleleri için farklı ampirik eşitliklerde farklı sonuçların ortaya çıkabileceğini, deformasyon modülünün tayini için tek bir eşitlikten yararlanılmaması gerektiğini, ilgili ampirik eşitliğin elde edildiği verinin üretildiği kaya grubunun özelliklerinin belirleyici olduğunu belirtmiştir. Öte yandan araştırmacı, deformasyon modülünün tayininde birçok değişkenin kullanıldığı, deformasyon

modülüne, boyut kavramının, gerilmelerin ve anizotropinin önemli oranda etki ettiğini belirtmiştir. Ancak, araştırmacının da vurguladığı gibi, anizotropi ve örtü yükü – gerilme etkisinin yansıtıldığı çalışmalar yeterli değildir ve geliştirilmelidir. Bu çalışmada belirtilen hususlar da, deformasyon modülünün değişiminde derinlik etkisinin araştırılmasının son derece önemli olduğunu doğrulamaktadır.

Zoorabadi (2016), gerçekleştirdiği çalışmada, deformasyon modülünün tayininde RMR, GSI, RQD ve bu parametrelerle bağlantılı birçok eşitlikte, kaya kütle parametrelerini kontrol eden süreksizlik koşullarının ve bu süreksizlik koşullarının oluşmasında etkili olan çevre faktörlerin önemli ölçüde dikkate alınmadığını belirtmiştir. Çalışma özelinde, süreksizlik yönelimleri, süreksizliğin belirli düzlemlerde ve hacimlerde dağılımlarının çevre gerilmeleri ve ana gerilme yönleri ile bu koşullarının oluşumunu matematiksel boyutta literatür çalışmaların yardımı ile ortaya koymuş ve bu koşulların deformasyon modülüne etkisini irdelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, özellikle çevre gerilmelerinin ve gerilmelerin etkisi ile oluşan yönelimler ve süreksizlik özelliklerine ait durumun da kullanıldığı ve ana kaya malzeme parametresi olarak “kaya malzemesi elastisite modülü”nün de kullanıldığı, daha yüksek güvenilirlik derecesine sahip bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada, dikkate alınması gereken çok önemli bir husus, deformasyon modülünün derinlikle değişiminin bir noktaya kadar belirli bir ivme ile arttığı, ancak bir noktadan sonra derinliğin etkisinin kalmadığını gösteren tespitlerdir. Bu derinlikler, bu tez çalışmasında hedef alınan esas derinliklere göre çok yüksek mertebelerdir ve bu nedenle dikkate alınacak bir husus değildir. Ancak, çevre gerilmeleri ve diğer gerilme koşullarının, süreksizliklerin özelliklerini doğrudan etkileyen, dolayısı ile deformasyon modülünü etkileyen önemli bir parametre olduğu, Zoorabadi (2016) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada da tespit edilmiştir. Bu durum, deformasyon modülünün derinlikten etkilendiği fikrini desteklemektedir.

Kayabaşı ve Gökçeoğlu (2018), deformasyon modülünün tayininde var olan ampirik eşitliklerin değerlendirildiği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, Artvin Barajı'nın inşaatında, araştırma amacı ile açılan dört ayrı galeriden elde edilen deformasyon modül verileri ve jeoteknik veri için, literatürde sıkça kullanılan 26 ampirik eşitlik kullanılmıştır. 34 farklı veri noktasından elde edilen kaya kütle ve kaya malzeme

parametreleri ile, 4 grupta özetlenebilecek, farklı girdi parametrelerinin ön plana çıktığı eşitlikler yardımı ile deformasyon modülleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu deformasyon modülleri, sahada 34 farklı noktada plaka yükleme deneyleri yardımı ile ölçülen deformasyon modülleri ile çapraz kontrole tabi tutulmuştur. Basit regresyon analizleri ile yapılan çapraz kontrollerde, söz konusu çalışma bölgesi için en yüksek performansı, Gökçeoğlu vd. (2003) ve Galera vd. (2005) tarafından önerilen ampirik eşitlikler vermiştir. Söz konusu bu iki ampirik eşitlik, RQD, Bozunma Derecesi ve RMR puanı gibi kaya kütle parametrelerinin ön plana çıktığı eşitliklerdir ve deformasyon modülü üzerinde yüksek kontrole sahiptir. Bu parametrelerin ortaya çıkışında, kaya kütlesi içerisindeki süreksizlik özellikleri, bu süreksizliklerin gelişimleri, kaya ortamına etki eden gerilmeler önem arz etmektedir. Bu sebeple, bu parametrelere etki eden tüm koşulların göz önüne alındığı ilave çalışmalar, deformasyon modülünün tahminine katkı sağlayacaktır. Bu bağlamda, bu parametrelerin değişiminde önemli yere sahip olduğu düşünülen derinlik faktörünün de deformasyon modülüne etkisinin araştırılması, bu makalede öne çıkan hususlarla örtüşen amaçlara hizmet edecektir.

Bahaddini ve Moghadam (2018), deformasyon modülünün tahminine yönelik olarak geçmiş dönemde yaygın olarak kullanılan bazı ampirik eşitliklerin performanslarını karşılaştırmış ve kaya mühendisliği açısından hangi eşitliklerin daha pratik ve kullanışlı olduğunu irdelemişlerdir. Bu karşılaştırma ve irdelemede İran’da halihazırda devam eden 3 farklı baraj projesinde gerçekleştirilen araştırma verisinden faydalanılmıştır. Sahada elde edilen veri tabanı ile, farklı girdi parametre ihtiyaçlarına göre gruplandırılan toplam 30 ampirik eşitlik üzerinde istatistiksel yöntemler kullanılarak performans analizleri yapılmıştır. Söz konusu eşitliklerin performans analizlerini yapmak için, RMSE, MAPE, VAF indeksleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış, F testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler esas alındığında, farklı istatistiksel yöntemlere göre farklı ampirik eşitliklerin yüksek performans gösterdikleri ancak, genel olarak en yüksek performansı Hoek ve Diederichs (2006) ile Ajalloeian (2014) tarafından geliştirilen ampirik eşitliklerin gösterdiği belirlenmiştir. Bu iki eşitlikte, Q puanı, GSI puanı ve örselenme faktörü ön plana çıkmaktadır ve geniş çaplı bir veri tabanı ile oluşturulmuş eşitliklerdir. Bu durum, kaya kütle deformasyon modülünün kestiriminde, kaya kütlesi parametrelerinin ve geniş – çeşitli veri tabanı ile çalışmanın önemini vurgulamaktadır. Detayları çalışmada verilen bu veri tabanı ile, RMR puanı, GSI puanı ve Q puanı’nın girdi

parametresi olarak kullanıldığı 9 farklı eşitlik üzerinde performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Bahaddini ve Moghadam (2018) tarafından yapılan bu değerlendirmelerde, korelasyon katsayıları ve RMSE hesaplanmıştır. Söz konusu 9 eşitlikte,  $R^2$  sayıları 0.73 – 0.84 aralığında, RMSE ise 4.68 – 9.36 aralığında hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışma ile, özellikle baraj inşaatı kapsamında yapılan araştırma çalışmaları ve elde edilen veri tabanında, deformasyon modülü ve kaya kütlesi parametreleri arasında güçlü bir ilişki olduğu ve RMR, GSI ve Q puanı arttıkça, bir başka deyişle kaya kütlelerinin dayanım koşulları iyileştikçe, deformasyon modülü de yükselmektedir. Ancak, araştırmacının tespitine göre; deformasyon modülü ve kaya kütle dayanım özelliklerine etki eden önemli bir husus da, kaya kütlelerinin anizotropisidir.

Öge (2018), zayıf kayalarda deformasyon modülünün tespitine yönelik olarak, presiyometre deneylerinden faydalanarak yeni yöntemler geliştirmiştir. Araştırmacı, deformasyon modülünün kestiriminde, kaya kütle parametreleri, kaya malzemesi parametrelerinin yanı sıra, kaya kütlelerinin süreksizlik sistemlerinin ve normal gerilme, yatay gerilmenin etkisini araştırmıştır. Yapılan bu araştırmada, sonlu elemanlar metodu ile yapılan nümerik modeller kullanılmıştır. Nümerik modeller, ilk olarak kırık – çatlak sistemlerinin entegre edilmediği “izotropik” kaya kütle ortamı olarak oluşturulmuş olup; burada deformasyon miktarlarının ve deformasyon modülünün derinlik ve gerilmelerden önemli oranda etkilenmediği gözlemlenmiştir. İkinci bir alternatif olarak, eklem sistemlerinin de entegre edildiği nümerik modeller kullanılmış, burada derinlik ve yatay – düşey gerilmelerin deformasyon miktarlarına ve deformasyon modülüne doğrudan etki ettiği gözlemlenmiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan ve RMR, GSI; Q ve RMQR puanlarını girdi parametresi olarak kullanan 16 eşitlik, Öge (2018) tarafından irdelenmiş ve eldeki veri tabanı ile performans analizleri yapılmıştır. Öte yandan, doğrusal olmayan regresyon modelleri yardımı ile, 4 farklı eşitlik üretilmiş, bu eşitliklerin de performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Performans analizleri; RMSE hesaplamaları, ER (hata oranı) hesaplamaları ve PMR (ölçülen – tahmin edilen oranı) hesaplamaları ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı tarafından üretilen 4 adet eşitlik aşağıda verilmektedir:

$$E_{rm} = (RQD+100)^{0.648124} \times q_{ci}^{1.06661} + D_c^{2.23513} \quad (2.24)$$

$$E_{rm} = 100((RQD+1+D_c \times 11.7478)/30)^{1.1056} \times (q_{ci}/100)^{0.251} \quad (2.25)$$

$$E_{rm} = (H/10)^{0.4797} \times (RQD+100)^{0.6496} \times (q_{ci})^{1.038} + D_c^{2.229} \quad (2.26)$$

$$E_{rm} = 1.25 \times (RQD + 5)^{0.75} \times (0.075 \times q_{ci})^{2.25} + (2 \times D_c)^{1.5} \quad (2.27)$$

Gerçekleştirilen performans testlerine göre, Öge (2018) tarafından geliştirilen eşitliklerin kullanılabilir nitelikte olduğu, ancak RQD puanı ve derinlik miktarları gibi sınırlamalarının olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çalışılan kaya gruplarının zayıf kaya olması ve yerinde deneylerin belirli derinliklerle yapılmış olması ile ilgilidir. Gerçekleştirilen bu çalışmalar ışığında, RQD kullanılarak hesaplanan deformasyon modüllerinin, diğer girdi parametreleri ile hesaplanan deformasyon modül değerlerine göre daha düşük olduğu ve güvenli tarafta kaldığı; RMR, Q puanı ve GSI gibi girdi parametreleri ile genel olarak daha yüksek kaya kütlesi deformasyon modül değerleri elde edildiği tespit edilmiştir.

Yukarıda kronolojik olarak verilen kaya kütlesi deformasyon modülünün tahmin edilmesine yönelik ampirik eşitliklerin gelişimi dünya literatüründe son 40 yıldır devam eden bir süreçtir. Ancak, yine bazı çalışmalarda da vurgulandığı üzere, derinlik veya örtü yükünün kaya kütlesi deformasyon modülünün üzerinde etkisinin olduğu ancak veriye dayalı kapsamlı bir araştırmanın henüz yapılmadığı ortaya çıkmaktadır.

### **3. MÜHENDİSLİK TASARIMLARINDA KULLANILAN BAŞLICA KAYA MALZEMESİ VE KAYA KÜTLESİ PARAMETRELERİ**

Mühendislik çalışmalarında, tasarıma esas parametre bütününü oluşturan kaya malzeme ve kaya kütle parametrelerinin saha koşullarını temsil edici biçimde tayin edilmesi ve uygun şekilde kullanılması, optimum bir tasarım için hayati öneme sahiptir. Kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin belirlenmesinde, kaya mekaniği laboratuvar deneyleri ve sahadan elde edilen yerinde süreksizlik, bozunma ve yeraltı suyu gibi özellikler girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Kaya kütlesinin deformabilite özellikleri ise yerinde (in – situ) deney yöntemleri ile tespit edilebilmektedir. Ancak, özellikle derin tüneller gibi özel yapılarda karşılaşılan yerinde deney imkanlarının zorlaştığı, zaman ve maliyet açısından problem yaşandığı durumlarda, çeşitli kaya malzeme ve kaya kütle parametrelerini kullanan ampirik eşitlikler yaygın biçimde dikkate alınmaktadır. Kaya mekaniği pratiğinde, kaya malzemesi ve kaya kütlesi parametrelerinin doğrudan veya dolaylı biçimde tayinine yönelik yöntemler sürekli olarak geliştirilmiş, aynı zamanda söz konusu parametrelerin birbirleri ile matematiksel ilişkisi de irdelenmiştir. Bu bölümde mühendislik tasarımlarında kullanılan kaya malzemesi ve kaya kütlesi parametreleri ayrı başlıklar altında sunulmaktadır.

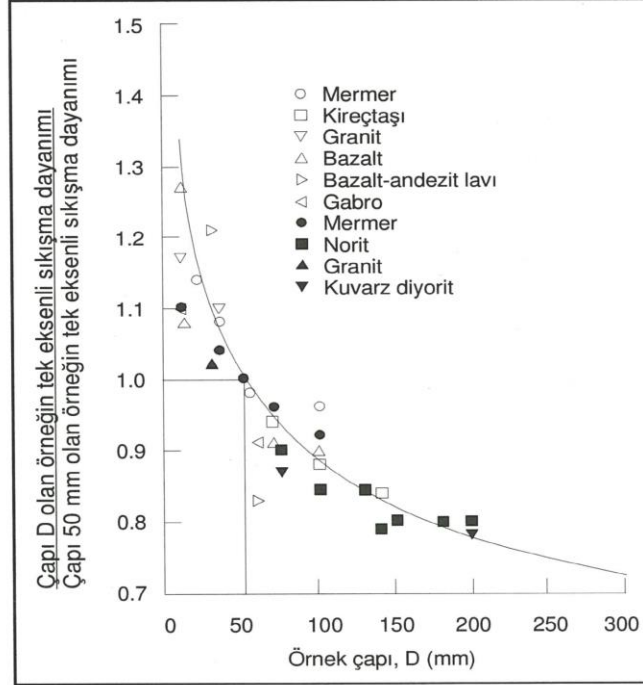
#### **3.1. Mühendislik Tasarımında Kullanılan Başlıca Kaya Malzemesi Parametreleri**

Kaya ortamları içinde inşa edilen tüm mühendislik yapılarında (yarma şevleri, tüneller, galeriler, shaftlar, vb.) tasarıma temel olarak kullanılan, kaya malzemesinin fiziksel, mekanik ve deformabilite özelliklerini yansıtan parametreler bulunmaktadır. Tez çalışmaları sürecinde esas olarak çeşitli aşamalarda yararlanılan bu parametreler ile ilgili genel bilgiler bu bölümde özetlenmektedir.

##### **3.1.1. Kaya Malzemesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı**

Tek eksenli sıkışma koşulları altında, boyunun çapına oranı 2.5 ile 3 arasında değişen silindirik (karot) örneklerle (ISRM, 1981; ISRM, 2007) yenilme anında uygulanan gerilme, tek eksenli sıkışma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tek eksenli sıkışma dayanımı  $UCS = F / A$  (Eş.3.1) bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada F, yenilme anında deney örneğine uygulanan kuvveti ifade ederken, A ise yükleme yapılan örneğin dairesel kesitli alt veya üst yüzeyinin alanını ifade etmektedir. Kaya malzemenin örnek çapı arttıkça içerisindeki mikro çatlak miktarının da artacağı düşünülerek, bu durumun tek

eksenli sıkışma dayanımını azaltacağı öngörülmektedir. Hoek ve Brown (1980a) yaptığı çalışmada örnek boyutunun tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki etkisini bir diyagram üzerinde göstermişlerdir (Şekil 3.1.)



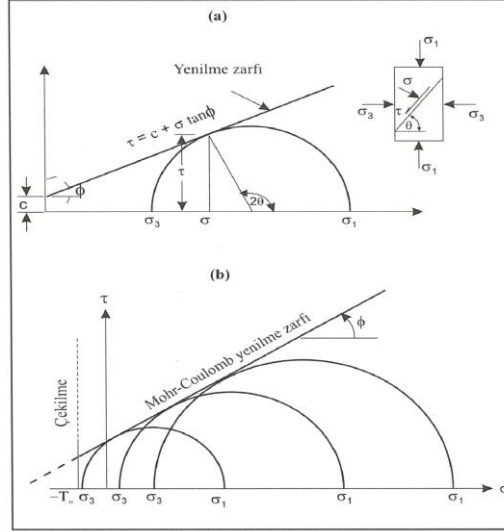
Şekil 3.1. Numune boyutlarının kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımına olan etkisini farklı kayaç grupları için gösteren diyagram (Hoek – Brown, 1980a)

### 3.1.2. Kaya Malzemesinin Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı

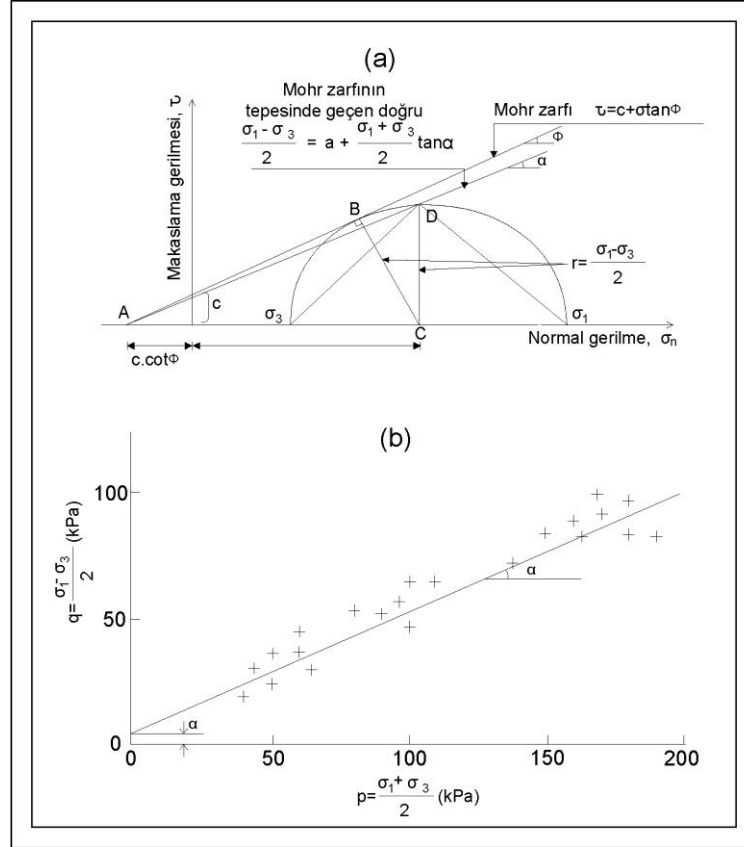
Kaya malzemelerinin makaslama dayanımı parametrelerinin tayin edilebilmesi amacı ile, silindirik karot örnekleri üzerinde en az üç farklı yanal basınç uygulanarak gerçekleştirilen üç eksenli sıkışma deneylerinden elde edilen veriler kullanılmaktadır. Burada, doğrusal Mohr – Coulomb yenilme ölçütüne göre, makaslama dayanımı  $T = c + \sigma_n \tan \phi$  (Eş.3.2) ile tanımlanır. Burada c, malzemenin kohezyonu,  $\phi$  içsel sürtünme açısı,  $\sigma_n$  ise yenilme yüzeyi üzerinde etkiyen normal gerilmedir.

Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde en büyük ve en küçük asal gerilme çiftleri kullanılarak, her bir deneyde yenilme koşulunu tanımlayan Mohr daireleri normal gerilme – makaslama dayanımı grafiğine çizilerek, dairelerin ortak teğetinin Y eksenini kestiği nokta kohezyonu, teğetin eğimi ise içsel sürtünme açısını ifade eder (Şekil 3.2. ve 3.3.).





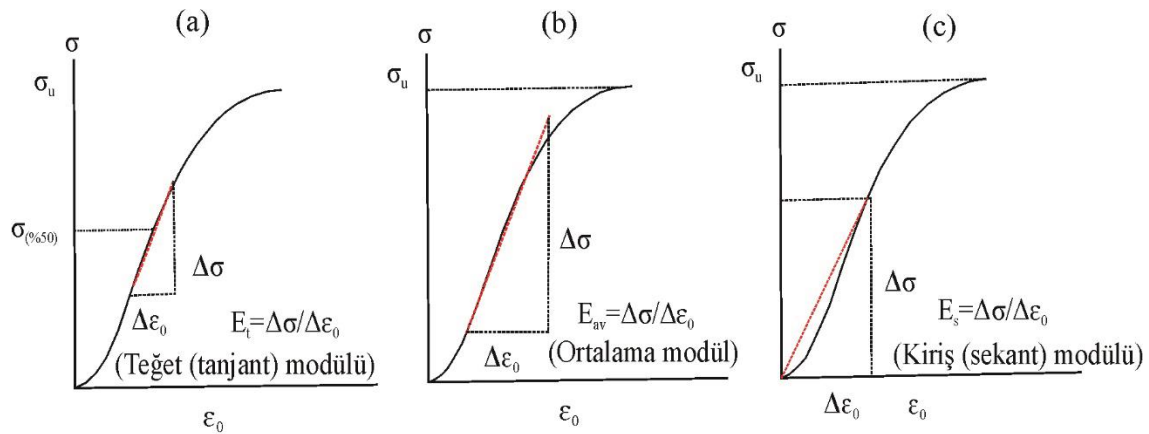
Şekil 3.2. Üç eksenli yenilme koşulları ve Mohr-Coulomb yenilme zarfı (Fell ve Jeffery, 1987)



Şekil 3.3. Çok sayıda üç eksenli deney sonucu kullanılarak elde edilen genelleştirilmiş yenilme zarfı (Fell ve Jeffery, 1987)

### 3.1.3. Kaya Malzemesinin Elastisite Modülü

Elastisite Modülü, kaya malzemesinin belirli gerilmeler altında uğradığı birim deformasyonun sayısal ifadesidir. Kaya malzemesi üzerine bir gerilme uygulandığında, farklı fazlarda deformasyon davranışı gösterir. Eksenel yükleme ve numune üzerindeki deformasyon miktarının oluşturduğu eğrinin doğrusal kısmının eğimi, elastisite modülü ya da Young modülü ismini almaktadır (ISRM, 1978). Eksenel yükleme – deformasyon eğrisinin değişik fazlarında tespit edilen doğrular, teğet (tanjant) modülü, kiriş (sekant) modülü ve ortalama modül olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.4.). Gerilme – deformasyon eğrisinin doğrusala yakın olduğu nokta, Ortalama Elastisite Modülü olarak adlandırılmaktadır ve kaya malzemesinin genel elastisite modülüne en yakın değeri vermektedir. Söz konusu bu parametre laboratuvar ortamında, tek eksenli sıkışma deneyi yaparken deformasyonların ölçülmesi ile tespit edilmektedir.

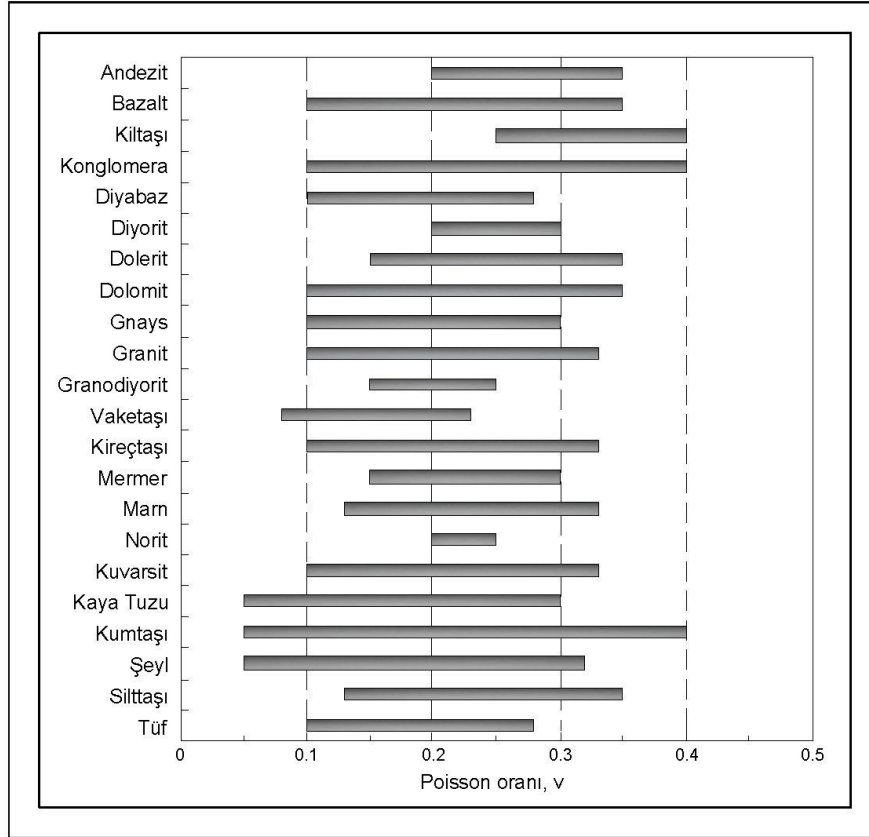


Şekil 3.4. Eksenel yükleme – birim deformasyon eğrilerinden değişik elastisite modül değerlerinin hesaplanması (ISRM, 1978)

### 3.1.4. Kaya Malzemesinin Poisson Oranı

ISRM'e göre, Kaya malzemesinin Poisson oranı, çekilme etkisi altındaki bir kaya malzemesinde, yatay yöndeki kısılmanın kuvvetin uygulandığı yöndeki uzamaya oranı olarak tanımlanmıştır. Ancak, Poisson oranlarının belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen güncel çalışmalarda, Poisson oranının tanımı, “tek eksenli gerilmeye maruz kalan elastik bir malzemede yatay yöndeki birim deformasyonun eksenel yöndeki birim deformasyona oranı” şeklinde yapılmıştır. Bu bağlamda, birim deformasyon miktarlarına bağlı olarak Poisson oranında negatif işaret bulunması gerekmektedir.

Kaya malzemelerde, poisson oranı dolaylı olarak (ISRM, 1977) ve/veya doğrudan statik deneyler yardımı ile (ISRM, 1977; ASTM, 1998a) belirlenebilmektedir. Gerçek (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, değişik kaya türleri için önerilen Poisson oranı aralıkları derlenmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Farklı kaya türleri için tespit edilen Poisson oranı aralıkları (Gerçek, 2007)

### 3.1.5. Kaya Malzemesinin Birim Hacim Ağırlığı

Birim hacim ağırlık, kaya malzemesinin birim hacimde oluşturduğu ağırlığı temsil etmekte olup,  $\gamma = W_t / V_t$  formülünden bulunmaktadır. Burada  $W_t$  numunenin ağırlığını,  $V_t$  ise malzemenin hacmini temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında, tespit edilen birim hacim ağırlık değerleri, ISRM (1981) tarafından önerilen “civa taşıma yöntemi” kullanılarak hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlık; kuru, yarı – doymun ve doymun birim hacim ağırlık olarak üç farklı biçimde tespit edilebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, birim hacim ağırlık tayini hayati öneme sahiptir. Kullanılan veri tabanında, tüm kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin derinlik karşılıkları, kaya gruplarının birim hacim ağırlıkları kullanılarak normal gerilme – örtü yükü parametresine çevrilmiş ve çalışmalar bu şekilde sürdürülmüştür.

### 3.1.6. Kaya Malzemesi Sabiti (mi)

Kaya malzemesinin farklı hücre basınçları altında üç eksenli sıkışma deneylerinden elde edilen veri çiftleri kullanılarak Hoek vd. (1995) tarafından önerilen ve kaya malzemesinin içindeki tanelerin dayanımı ve kenetlenme derecesi vb kriterlere bağlı olarak ortaya çıkan malzeme sabiti  $m_i$ , eğrisel Hoek – Brown yenilme ölçütünün yenilme zarfının davranışını belirlemede rol oynayan önemli bir parametredir. Hoek-Brown yenilme ölçütünün genel formülü

$$\sigma_1 = \sigma_3 + m \sigma_3 \sigma_c + s \sigma_c^2 \quad (3.3)$$

şeklindedir. Burada,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  en büyük ve en küçük asal gerilmeleri ifade ederken,  $\sigma_c$  ise, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımını ifade etmektedir. Formül içerisindeki  $s$ , süreksizlik yoğunluğuna bağlı olarak kaya kütlesi sabitini ifade ederken,  $m_i$  ise kaya türüne bağlı olan kaya malzemesi sabitini ifade etmektedir.  $m$  parametresi, kaya malzemesi için  $m_i$  ile gösterilmektedir.

Malzeme sabitinin hesaplanmasına yönelik olarak, Hoek ve Brown tarafından geliştirilen eşitlikler şu şekildedir,

$$m/m_i = \exp((RMR-100)/14) - \text{Örselenmemiş kaya kütlesi için} \quad (3.4)$$

$$m/m_i = \exp((RMR-100)/28) - \text{Örselenmiş kaya kütlesi için} \quad (3.5)$$

Hoek (2007), farklı kaya gruplarına göre malzeme sabitlerinin değişim aralıklarını bir çizelge ile özetlemektedir. Söz konusu malzeme sabiti abağı, günümüz mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.6.).

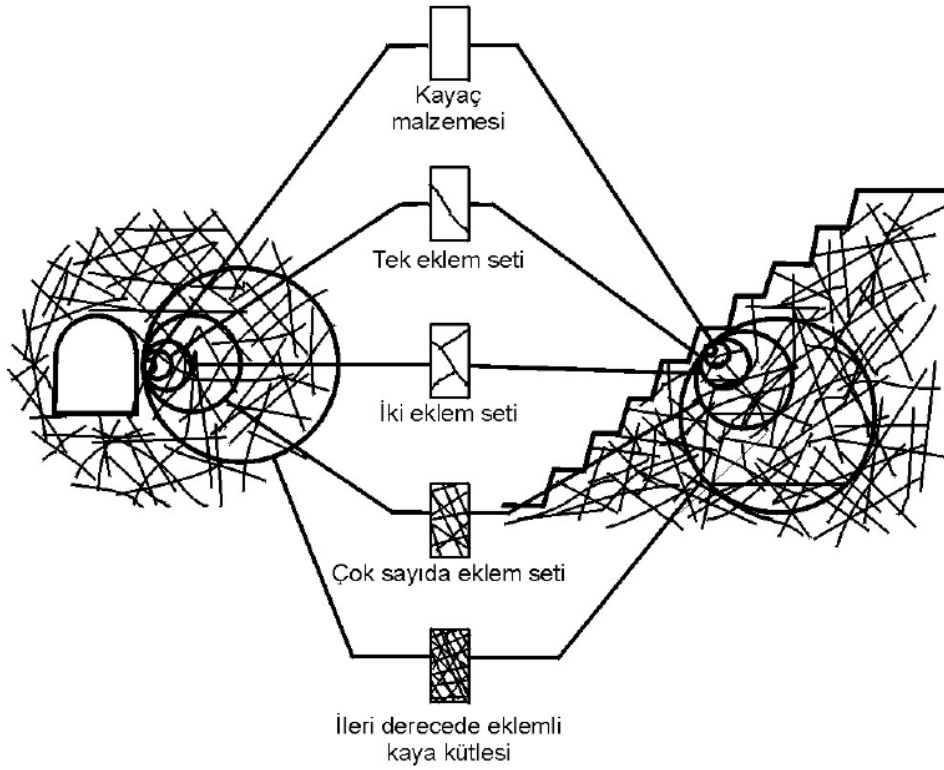
Kaya türü	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Kırıntılı		Konglomeralar * (21±3) Breşler (19±5)	Kumtaşları 17±4	Silttaşları 7±2 Grovaklar (18 ±3)	Kiltaşları 4±2 Şeyller (6±2) Mamlar (7±2)
		Karbonatlar	Kristalin kireçtaşı (12±3)	Sparitik kireçtaşları (10±2)	Mikritik kireçtaşları (9±2)	Dolomitler (9±3)
	Evaporitler		Jips 8±2	Anhidrit 12±2		
	Organik				Tebesir 7±2	
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9±3	Hornfels (19±4) Metakumtaşı (19±3)	Kuarsit 20±3	
	Az foliasyonlu		Migmatit (29±3)	Amfibolitler 26±6		
	Foliasyonlu **		Gnays 28±5	Sistler 12±3	Filitler (7±3)	Sleytler 7±4
MAGMATİK	Plutonik	Açık renkli	Granit 32±2 Granodiyorit (29±3)	Diyorit 25±5		
		Koyu renkli	Gabro 27±3 Norit 20±5	Dolorit (16±5)		
	Hipabisal		Porfirler (20±5)		Diyabaz (15±5)	Peridotit (25±5)
	Volkanik	Lav		Riyolit (25±5) Andezit 25±5	Dasit (25±3) Bazalt (25±5)	Obsidiyen (19±3)
		Piroklastik	Aglomera (19±3)	Breş (19±5)	Tüf (13±5)	

Şekil 3.6. Kaya Malzeme Sabiti Abağı (Hoek, 2007)

### 3.2. Mühendislik Tasarımında Kullanılan Başlıca Kaya Kütleleri Parametreleri

Kaya ortamları, küçük ölçekte değerlendirildiklerinde, ağırlıklı olarak kaya malzeme davranışı gösterirken, bu ortama ait ölçek büyüdüğünde, kaya malzemesi tanımından; kaya kütleleri tanımına geçiş söz konusudur (Şekil 3.7.). Burada, kaya malzemesinin fiziksel özellikleri ve dayanım özelliklerinin yanısıra, gelişmiş çok sayıda süreksizlikler tarafından bölünmüş büyük ölçekli kaya kütlelerinde, bu süreksizliklerin yönelim ve dayanım özellikleri ile yeraltı suyu şartları, kaya kütlelerinin dayanımını kontrol etmektedir. Bu nedenle; kaya kütlelerinin deformasyon ve dayanım parametreleri belirlenirken, kaya malzemesinin yanı sıra, kaya kütleleri içerisindeki süreksizliklerin özelliklerinin de tayin edilmesi gerekmektedir. Bu tayin, laboratuvar ortamında imkansız olacağı için; kaya

kütlesinin malzeme ve süreksizlik özelliklerinin bütün olarak nitelenebileceği ve sınırlandırılabilmesi yaklaşım geliştirilmiştir.



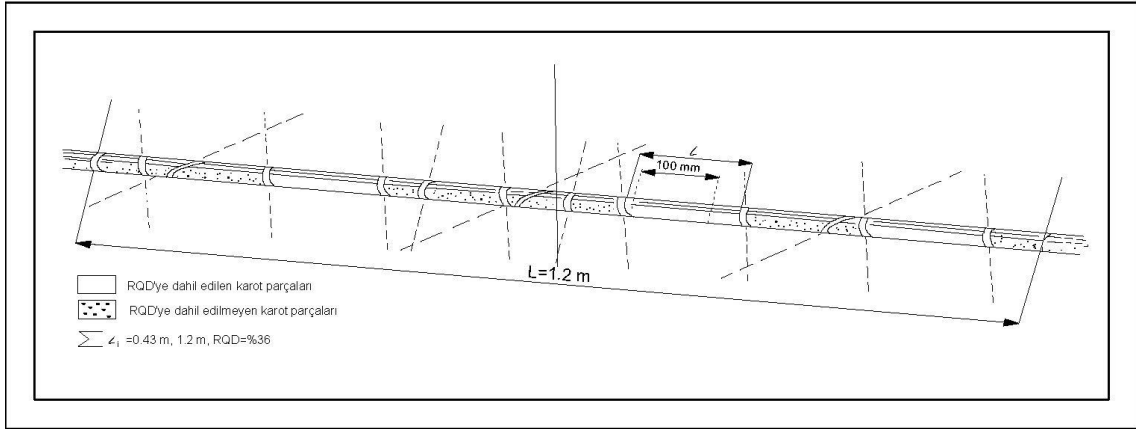
Şekil 3.7. Numune boyutunun büyümesi ile birlikte, kaya malzeme kavramından kaya kütle kavramına geçişi simgeleyen diyagram (Hoek, 1995'den derlenmiştir)

Kaya kütleleri heterojen ve anizotrop olduğu için, mühendislik yapısının inşa edileceği kaya kütlelerinin tüm mühendislik kriterlerini temsil edici bir şekilde tanımlanması en optimum yapı tasarımını mümkün kılmaktadır. Mühendislik tasarımında ve literatürde yaygın olan bazı kaya kütle parametrelerine ait özellikler ayrı başlıklar altında sunulmaktadır. Söz konusu kaya kütle parametrelerinin önemli bir kısmı tez çalışmalarında doğrudan kullanılmıştır.

### 3.2.1. Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

RQD, bir ilerleme aralığındaki doğal süreksizliklerle ayrılmış, boyu 10 cm ve daha uzun olan ve silindirik şeklini koruyan kaya türü karot parçalarının toplam uzunluğunun, ilerleme aralığının uzunluğuna oranı olarak ifade eden bir değerdir (Şekil 3.8.). RQD değeri, tezin ileri aşamalarında ayrıntılı verilecek çok sayıda kaya kütle

sınıflamalarında girdi parametresi olarak kullanılmakta olup, belirli RQD değerlerine göre kaya kütleleri sınıflandırılabilir (Çizelge 3.1.) (Deere, 1964).



Şekil 3.8. RQD değerinin tespit edilmesi (Deere, 1964)

Çizelge 3.1. RQD sınıflaması (Deere, 1964)

RQD (%)	Kaya Kalite Göstergesi
0-25	A.Çok Zayıf
25-50	B.Zayıf
50-75	C.Orta
75-90	D.İyi
90-100	E.Çok İyi (Mükemmel)

### 3.2.2. Kaya Kütle Puanlaması (RMR)

RMR sınıflama sistemi veya ilk adı ile, CSIR Jeomekanik Sınıflama sistemi; ilk olarak Bieniawski (1979) tarafından, sedimanter kaya grupları içerisinde açılan tünellerde yapılan gözlemsel çalışmalara dayalı olarak geliştirilmiştir. 1980 yılı itibarı ile “Rock Mass Rating (RMR) – Kaya Kütle Puanı” adı ile kullanılan sınıflama sistemi, çeşitli tünelcilik, şev kazıları ve madencilik uygulamalarını içeren 351 farklı vakanın derlenmesi ile 16 yıllık süreç içerisinde gelişmiş ve 1989 yılında, yapılan tüm değişikliklerin derlenmesi ve sade bir ifadeye kavuşturulması ile nihai halini almıştır (Ulusay ve Sönmez, 2007). Kaya kütlelerinin, mühendislik yapılarının inşası sırasında göstereceği

davranışının esas alınarak sınıflanması amacı ile geliştirilen bu sistemde, kaya kütlelerine ilişkin 6 ana parametreden elde edilen puanlar toplanarak sınıflama gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.9a.).

Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı

- RQD
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlik koşulu
- Yeraltı suyu durumu
- Süreksizlik yönelimine göre düzeltme

1989 yılında sınıflama sisteminin geliştirilen son versiyonunda, puanlama sistemi ve adımlarına ek olarak getirilen yenilikler şu şekildedir,

- Kaya malzemesinin dayanımı, RQD puanı ve süreksizlik aralığı için, çizelgeden uygun aralığa düşen puanın seçilmesinin yanı sıra; daha hassas bir puanlama yapılabilmesi için “parametre – puan” grafikleri geliştirilmiştir (Şekil 3.9b.).
- Süreksizlik koşulu puanının daha hassas ve daha doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için, ISRM (1981)’de verilen tanımlama kriterlerine uygun olarak, bu puanın alt gruplara bölünmesi ve her grubun ayrıca puanlanması sağlanmıştır (Çizelge 3.2.)
- Yeraltı maden işletmeciliği uygulamalarında sıklıkla görülen galerilerde patlatma, faylara yakınlık durumu ve gerilmelerdeki değişimin RMR puanına etkisinin irdelenmesine olanak sağlayan düzeltme katsayıları oluşturulmuştur.

Bu tez çalışması sırasında, araştırma delgilerinden elde edilen veriler üzerinden kaya kütle puanlaması yapılmıştır. Bu sebeple, yeraltı suyu akışı ve süreksizlik – yapı yönelim ilişkisi ile ilgili puanlamalar, hesaplamalarda dikkate alınmamıştır.



### A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI

1*	Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım			
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa	
		Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2*	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25			
	Puan		20	17	13	8	3			
3*	Süreksizlik aralığı		> 2 m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm			
	Puan		20	15	10	8	5			
4**	Süreksizlik koşulu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu < 5 mm veya 1-5 mm açık eklem, sürekli eklem	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm kalınlıkta veya açık eklem > 5 mm devamlı süreksizlikler			
	Puan		30	25	20	10	0			
5	Yeraltı-suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	< 25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk			
		Eklemdaki su basıncı	ORANI	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		En büyük asal gerilme								
		Genel koşullar	T <sub>e</sub> veya T <sub>g</sub>	Veya i	Veya j	Veya k	Veya ma	≤ Veya l		
Puan		15	10	7	4	0				

\* Şekil 4.5'deki grafiklerden tayin edilir.

(1 MPa = 10.197 kgf/cm<sup>2</sup>)

\*\* Çizelge 4.15'den belirlenir

### B. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM ve DOĞRULTUSUNUN ETKİSİ

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Doğrultuya bakılmaksızın, eğim 0°-20° arasında
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı yönde ilerleme		Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	
Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta	Orta

### C. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME

Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	
Puan	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

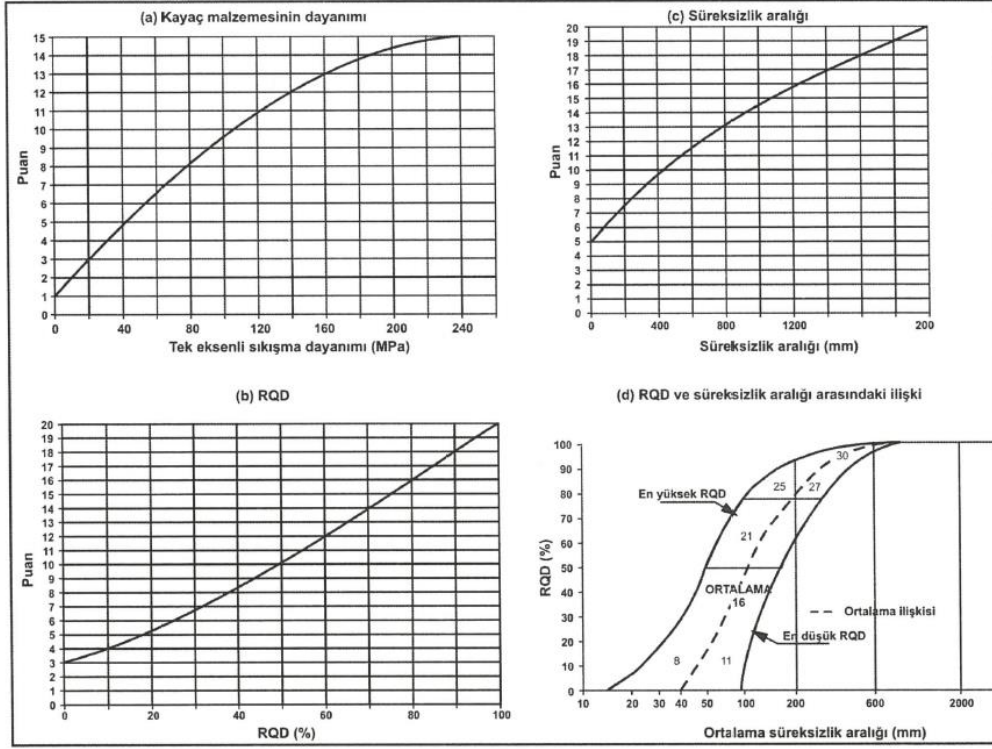
### D. KAYA SINIFLARI VE PUANLARI

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20

### E. KAYA SINIFLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Ortalama desteksiz kalabilme süresi	15m açıklık için 20 yıl	10m açıklık için 1 yıl	5m açıklık için 1 hafta	2.5m açıklık için 10 saat	1m açıklık için 30 dakika
Kaya kütlelerinin kohezyonu (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı (derece)	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15

Şekil 3.9a. RMR Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (Bieniawski, 1989)



Şekil 3.9b. RMR puanlamasında, RQD, tek eksenli sıkışma dayanımı ve süreksizlik aralığı için hassas puan seçilmesine olanak tanıyan abaklar (Bieniawski,1989)

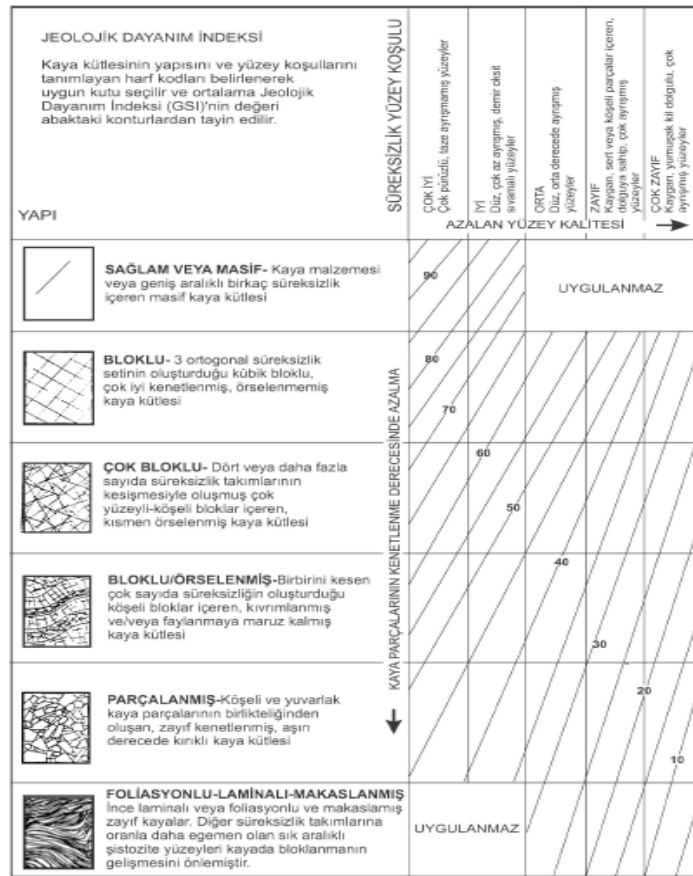
Çizelge 3.2. Süreksizlik koşulu puanının daha hassas yapılabilmesi için önerilen kılavuz puanlama tablosu (Bieniawski, 1989)

Parametre	Puanlar				
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılık)	< 1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)
Süreksizlik açıklığı	Yok (6)	< 0.1 mm (5)	0.1-1.0 (4)	1-5 mm (1)	> 5 mm (0)
Pürüzlülük	Çok pürüzlü (6)	Pürüzlü (5)	Az pürüzlü (3)	Düz (1)	Kaygan(0)
Dolgu	Yok (6)	Sert dolgu		Yumuşak dolgu	
		< 5 mm (4)	> 5 mm (2)	< 5 mm (2)	> 5 mm (0)
Bozunma	Bozunmamış (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)

### 3.2.3. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Hoek – Brown eğrisel yenilme zarfını kontrol eden parametrelerden biri olan ve kaya kütlelerinin dayanımının tayininde önemli bir parametre olan “Jeolojik Dayanım İndeksi” ya da kısa adı ile GSI puanı, kaya kütleindeki malzeme özelliklerini ve süreksizlik özelliklerini tayin ederek kaya kütlelerinin dayanımının tespitine bir yaklaşım getirmektedir. Hoek – Brown eğrisel yenilme zarfının ilk kullanım döneminde, RMR puanının (Bieniawski, 1989) yeraltısuyu koşulunun modifiye edilmesi ile (tamamen kuru koşul) GSI puanı oluşturulmaktaydı. 1994 yılı sonrasında, Hoek vd. (1995), GSI puanının, bağımsız olarak kendi başına hesaplanabileceği kaya tiplerine göre değişkenlik gösteren iki farklı abak geliştirmişlerdir.

1994 yılından günümüze uzanan süreçte, farklı kaya tipleri için; hesaplamada kullanılacak girdi parametrelerinin durumuna da uygun olarak, çeşitli modifikasyonlar gerçekleştirilmiştir. Farklı ayrışma koşulları ve kaya tiplerinin de dahil edilerek günümüzde de ağırlıklı olarak kullanılan temel GSI abağı (Hoek ve Marinos, 2000) Şekil 3.10.’da verilmektedir.



Şekil 3.10. Temel GSI abağı (Hoek ve Marinos, 2000’den basitleştirilmiştir)

### 3.2.4. Kaya Kütlelerinin Deformasyon Modülü

Kaya kütleleri, kaya malzemesi ile birlikte süreksizlik setlerini de içeren bir yapıdır. Bu kütlelerden, laboratuvar ortamında deney yapılabilecek boyutlarda yeterli büyüklüklerde örneklerin alınabilmesi neredeyse imkansızdır. Bu durum, kaya kütle deformasyon modülünün tayininde, yerinde (in – situ) deneyler ile birlikte, ampirik yaklaşımların da kullanılmasını yaygın hale getirmiştir. Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün tespitine yönelik olarak sıklıkla kullanılan yerinde (in – situ) deneylerin bazıları;

- Plaka Yükleme Deneyi (Yerinde yüzey koşullarında veya araştırma galerilerinde gerçekleştirilebilir).
- Presiyometre Deneyi (Sondaj çalışmaları sırasında, orta dayanımlı – zayıf kaya kütleleri için gerçekleştirilebilir).
- Dilatometre deneyi (Sondaj delgilerinde, zayıf ve sağlam kaya kütleleri için gerçekleştirilebilir).

Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün belirlenmesinde, birçok araştırmacı, bugüne kadar araştırmalar gerçekleştirmiş, deformasyon modülünün tayininde kaya kütlelerine ve kaya malzemesine ilişkin girdi parametreleri kullanılarak çeşitli eşitlikler üretilmiştir. Bu eşitlikler tezin 2. bölümünde ayrıntılı biçimde verilmiştir. Bununla beraber, kaya kütlelerinin dayanım özelliklerinin değişiminde önemli bir etki yaratan örtü yükünün, kaya kütlelerinin deformasyon modülünün tayininde de diğer parametrelerin yanı sıra belirleyici bir parametre olarak kullanılması ve kütle deformasyon modülüne etkisinin anlamlı bir şekilde ortaya konması, tez çalışmasının başlıca konusunu ve hedefini oluşturmaktadır.

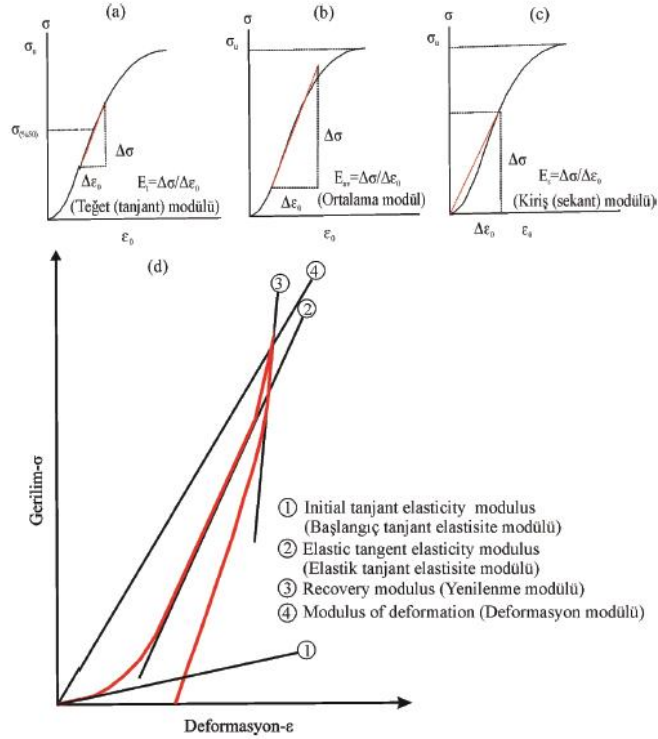
Kaya malzemesinin ve kaya kütlelerinin elastisite ve deformasyon modülleri, birçok mühendislik yapısının tasarımında sıklıkla kullanılan girdi parametreleri olmakla birlikte, elastisite ve deformasyon modülü kavramları sıklıkla kavramsal olarak karıştırılmaktadır (Kayabaşı, 2019). Kaya malzeme ve kaya kütlelerinin elastisite ve deformasyon modülüne ilişkin önemli farklar aşağıda verildiği gibi özetlenebilir,

- Elastisite modülü kaya malzemesi (intact kaya) özelliği olup, genellikle karot boyutunda ölçülmektedir. Tek Eksenli Sıkışma ortamında mekanik olarak laboratuvar ortamında belirlenebilmektedir. Malzemeye yükleme sırasında malzemenin elastik davranışını içeren kesimin gerilim / deformasyon oranı olarak tanımlanır (Kayabaşı, 2019).
- Deformasyon modülü bir kaya kütlesi özelliğidir. Yükleme – boşaltma eğrilerinin genel eğiliminden belirlenmektedir. Laboratuvar ortamında deformasyon modülü tayini gerçekleştirilebilir, ancak bu durum kaya kütlesini temsil etmemektedir. Yükleme sırasında, kaya kütlesinin elastik ve plastik davranışını bir arada içeren kesimde gerilim / deformasyon oranıdır (Palmström ve Singh, 2001).
- Doğayı oluşturan her malzemenin yük altında kalması ve yükün kalkması, azalması koşullarında başlangıçtaki konumuna geri gelmesi sınırlarına, bu malzeme için elastiklik sınırı adı verilir. Mühendislik uygulamalarında gerek kaya ve gerekse de kaya kütlelerinin elastiklik sınırlarının belirlenmesi önemli bir araştırma konusu olmuştur. Eksenel yükleme-deformasyon eğrisinin doğrusal kısmının eğimine “Young modülü” diğer bir deyişle “elastisite modülü” adı verilir (ISRM, 1978). Laboratuvarda yapılabilen tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde Young modülünün belirlenmesi değişik ölçüm yöntemleriyle, teğet (tanjant) modülü, kiriş (sekant) modülü ve ortalama modül gibi parametreler adı altında tayin edilebilir.

Şekil 3.11.’de, kaya malzemesi ve kaya kütlesi üzerinde modüllerin belirlenmesine yönelik grafikler verilmiştir (Hoek ve Diederichs, 2006). Şekil 3.6’daki (a), (b) ve (c) grafiklerinde, kaya malzemesine ait sırası ile, teğet elastisite modülü, ortalama ve kiriş elastisite modülleri gösterilmektedir. (d) grafiğinde ise, kaya kütlesinde uygulanan tek eksenli yükleme – boşaltma döngüsünden belirlenen modüller gösterilmektedir. (4) numara ile gösterilen modül eğrisi, kaya kütlensinin elastik ve plastik davranışının bir arada görüldüğü (grafikte yer alan kırmızı çizgi) ve tasarımda esas olarak kullanılan deformasyon modülünü temsil etmektedir.

Tez çalışmasında, kaya kütle deformasyon modülünün tayinine yönelik olarak “Menard Tipi Presiyometre” kullanılarak belirlenen deformasyon modülü değerleri dikkate alınmıştır. Presiyometre deneyinin metodoloji ve hesap yöntemine bağlı olarak elde edilen “Menard presiyometre modülü”, tasarıma esas herhangi bir katsayı

uygulanmaksızın, çalışma içerisinde “deformasyon modülü” olarak adlandırılmış ve bu şekli ile kullanılmıştır



Şekil 3.11. Kaya malzemesi ve kaya kütlelerinde farklı modüllerin belirlenmesi (Hoek ve Diedherichs, 2006)

### 3.3. Kaya Kütlelerinde Düşey Gerilmeler ve Derinlikle İlişkileri

Düşey gerilme, örtü kalınlığı ve birim hacim ağırlığın artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle düşey gerilme, derinliğe bağlı olarak doğrudan artmaktadır. Zhang (2017) gerçekleştirdiği derleme çalışmasında, düşey gerilmenin örtü kalınlığı ile (derinlikle) değişimini gösteren farklı eşitlikleri özetlemiştir. Söz konusu eşitliklerden bazıları, Çizelge 3.3.’te verilmektedir. Çizelge 3.3.’te ayrıca, çalışma lokasyonları ve derinlik aralıkları da belirtilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmalar göstermektedir ki; düşey gerilme, çalışılan lokasyonlardaki kaya tiplerine ve örtü kalınlıklarına (derinliğe) bağlı bir parametredir. Yürütülen tez çalışmasında, derinlik parametresi, her kaya grubundan elde edilen ortalama birim hacim ağırlıklar kullanılarak; vektörel bir büyüklük olan düşey gerilmeye çevrilmiş ve kullanılmıştır. Tüm istatistik analiz çalışmalarında “Örtü Yükü” olarak da adlandırılan bu

veri grubunda, hesaplamalarda yalnızca derinlik ve kaya gruplarına ait birim hacim ağırlık değerlerinin çarpımı ile elde edilen değerler kullanılmıştır. Bu metodolojinin kullanılmasının ana sebepleri, çalışma derinlik aralıklarının daha düşük olması (~0 – 80.00m) ve çalışmalar sırasında kaya kütlesi içinde ani değişimlere neden olacak fay zonu, ezik zon, pışme zonu, dayk vb. yapısal unsura ait verilerin çalışma veri tabanından çıkarılmış olmasıdır.

Çizelge 3.3. Düşey gerilimin derinlikle (z) değişimine ait çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen eşitlikler (Zhang, 2017'den düzenlenmiştir)

Araştırma Lokasyonu ve Araştırma Derinliği	Eşitlik (Düşey gerilme MPa cinsinden ve Derinlik metre olarak verilmiştir)
Küresel Data (0 – 2400 m)	$(1.9+-1.26) + (0.0266+-0.0028)z$ (Eş.3.6)
Kuzey Amerika (0 – 1500 m)	$(0.942+-1.31) + (0.0339+-0.0067)z$ (Eş.3.7)
Küresel Data (100 – 3000 m)	$0.0265z$ (Eş.3.8)
Küresel Data (0 – 3000 m)	$0.027z$ (Eş.3.9)
Kanada Kalkanı (0 – 2200 m)	$(0.026 – 0.0324)z$ (Eş.3.10)
Japon Adaları (0 – 1200 m)	$0.027z$ (Eş.3.11)
Güney Kore (0 – 850 m)	$0.233 + 0.024z$ (Eş.3.12)

Kaya kütleleri içinde, yatay gerilmenin tespiti, düşey gerilmelere göre oldukça zor ve karmaşıktır. Kaya kütlelerinin herhangi bir noktasındaki düşey gerilmelerin, yönelim ve yönlere göre değişiklik göstereceği varsayılmaktadır. En yüksek yatay gerilme, en düşük yatay gerilme ve düşey gerilme arasındaki ilişki, kaya kütlesi içindeki yapıya, fay / şistozite vb. yapıların yönelimlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel bir yaklaşım olarak bir kaya kütlesi veya bölgedeki gerilim dağılımlarının ana fay sistemlerinin tipi ile değişimini gösteren mekanizma, şu şekilde özetlenebilir;

- $\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$  , normal fay bölgelerinde,
- $\sigma_{hmax} > \sigma_{hmin} > \sigma_v$ , ters fay bölgelerinde
- $\sigma_{hmax} > \sigma_v > \sigma_{hmin}$ , doğrultu atım fay bölgelerinde,

Tez çalışması kapsamında, yalnızca jeoteknik amaçlı sondaj çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu nedenle, kaya kütlesi üzerine etki eden yatay gerilmelerin deformasyona etkisine yönelik araştırma çalışmaları tez kapsamına dahil edilmemiştir.



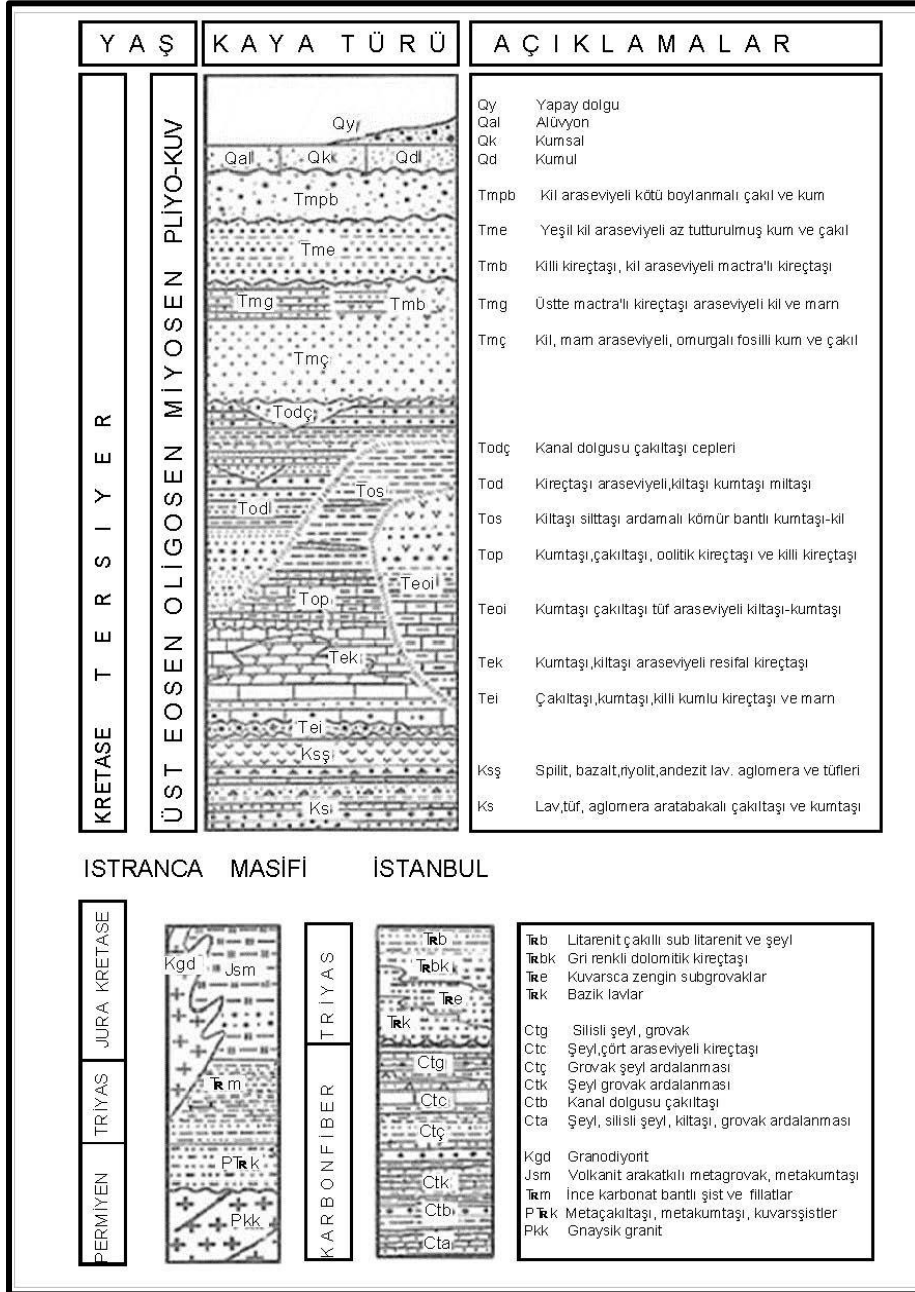
## 4. VERİ TOPLAMA SAHALARININ JEOLojİK – JEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

### 4.1. Genel Jeoloji ve Stratigrafi

Veri toplama sahaları, İstanbul Avrupa ve Anadolu Yakası'nda olmak üzere iki farklı bölgeye ayrılmaktadır. İstanbul İli'nin her iki yakasına ilişkin genel jeolojik ve stratigrafik özellikler, farklı jeolojik yaş ve konum özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir.

Çalışma alanının Avrupa Yakası'nda yer alan bölümü, İstanbul'un batı yakasında üç farklı jeolojik zaman diliminin gözleendiği bir alandır. Bölgenin doğuya, diğer bir ifade ile İstanbul Boğazı'na doğru olan kesimlerinde Paleozoyik yaşlı temel birimler gözlenirken, kuzey kesimlerde yersel olarak Üst Kretase yaşlı volkanik ve volkanojenik kırıntılı filiş istifli yüzeylenmektedir (Kaya, 1973; Kaya ve Lys, 1980). Bu istife ait genel stratigrafik kesit Şekil 4.1.'de verilmektedir. Birimler arasında yer yer dik konuma yakın ters faylar gözlenmektedir ve aralarında yersel olarak yaklaşık D – B uzanımlı Triyas yaşlı kumtaşı – kireçtaşı birimlerinin izlendiği sığ denizel istif gözlenmektedir. Yine aynı şekilde bu istif de tabandaki Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu (Ct) ve Üst Kretase yaşlı Sarıyer Volkanitleri (Ks) ile tektonik dokanaktır. İstifte, kuzeyden – güneye doğru bakıldığında; birbirine yüksek açılı ters faylanma ile üstte Trakya formasyonu, altında Triyas yaşlı kırıntılı ve karbonatlı birimler ile bu birimlerin altında Üst Kretase yaşlı filiş yer almaktadır. Tüm bu birimlerin üzerinde ise Trakya Havzası'nın genelinde gözlenen Paleojen ve Neojen sedimanter birimler çökelmiştir (Kaya ve Lys, 1980). Bu istif tabanda resifal (Tes) ve resif önü – gerisi karbonatlarından ve / veya karbonatlı kırıntılılardan (Teoi ve Tei) oluşmakta ve çok geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu kesimlerde, aynı zamanda yersel olarak karasal kırıntılı çökelleri de görmek mümkündür. Karadeniz kıyılarına doğru geniş yayımlı olan bu birimlerin bir bölümü işletme koşulları sağlayabilen kömür tabakaları içermektedir (Tod). Oligo – Miyosen yaşlı bu istif genelinde kiltası – silttaşı marn aralanmalı olup yer yer az tutturulmuş kumtaşı seviyeleri de içermektedir. Tüm bu birimlerin en üstünde ise İstanbul'un batı ve güney kesimlerinde geniş yayımlıla yüzeylenen görsel karbonatlar, killeri ve yersel olarak akarsu çökellerinden oluşan istif yüzeylenmektedir. Saha genelinde bu istifin yalnızca Güngören formasyonuna (Tmg) ait aşırı konsolide killeri gözlenmektedir. Örtü birimlerin en üst seviyesini ise Miyosen – Pliyosen zaman aralığında çökelmiş, ağırlıklı olarak karasal

kırıntılı çökellerin oluşturduğu Belgrat formasyonu (Tmpb) oluşturur. Belgrat formasyonuna ait kırıntılı çökeller özellikle kuzey kesimlerde hemen hemen her kaya biriminin (Ct, Ks, Tod) üzerinde yer almaktadır. Yüksek röliyefli kesimlerde ise temel birimlerden türemiş Yamaç Molozu (Qym) ve kolüvyal çökelleri gözlemek mümkündür (Yurtsever ve Çağlayan, 2002).



Şekil 4.1. İstanbul ili batı kesimi genel stratigrafik istifi (Yurtsever ve Çağlayan, 2002)

Çalışma alanının Anadolu Yakası'nda, yaygın olarak İstanbul Paleozoyik İstifi'ne ait kaya grupları yer almaktadır (Ketin, 1959). İstanbul Paleozoyik İstifi'ni oluşturan kayaç grupları arasında, stratigrafik olarak herhangi bir uyumsuzluk görülmemektedir (Önalın,1981). İstanbul Paleozoyik İstifi ayrıca eski dönemde, Penck (1919) tarafından "Trakya Serisi, Fosilli Seri ve Kuvarsit Seri" olarak üç ara istife ayrılmıştır. Ordovisyen – Erken Karbonifer yaş aralığındaki Paleozoyik istifi sığ denizel şeyl birimleri ile başlar ve üst katmanlara doğru, kumtaşı – şeyl ardalanması ile temsil edilen sedimanter birimlere geçiş yapar. Bu çökelleri arkozik çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşı-şeylden oluşan akarsu birimleri (Kurtköy Formasyonu) izler. Söz konusu birimler üzerinde uyumlu olarak kıyı-sığ denizel kuvars kumtaşları (Aydos Formasyon) yer alır. İstif üste doğru lagün – şelf ardalanmasına (Gözdağ formasyonu) geçer. Bu birim resifal kireçtaşları (Dolayoba formasyonu) ile şelf – derin şelf çökeli laminalı kireçtaşı, kireçtaşı, yumrulu kireçtaşları izler. Karbonat serisi üzerinde geçişli olarak derin şelf çökeli kumtaşı, şeyl ve kireçtaşı ardalanması (Kartal formasyonu) yer alır. Bunları, yamaç çökeli fosfatik yumrulu çörtler (Baltalimanı formasyonu) izler. İstif, kireçtaşı ara katkılı türbiditik kumtaşı ve şeyl ardalanması (Trakya formasyonu) ile son bulur. Bu istif, Geç Kretase yaşlı granit – granodiyorit ve diyoritler tarafından kesilir. Granitik kayaçların kestiği çökel kayalarda kontak metamorfizma etkileri gözlenir (Yurtsever ve Çağlayan, 2002). İstanbul Paleozoyik İstifi'nin, denizel ve olası delta çökelleri olarak gözlenen Bakacak ve Kocatöngel formasyonları üzerine istiflendikleri, Gedik ve diğerleri (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda vurgulanmıştır.

Paleozoyik kayaçlar, oldukça yoğun faylıdır (Ketin, 1959). Hem Paleozoyik ve hem de Permo – Triyas'ın farklı istifleri birbiriyle tektonik ilişkilidir. Çalışma alanındaki en önemli tektonik yapı, bindirme düzlemi güneye eğimli olan Sarıyer – Şile Bindirmesi'dir. Bu kesimde yüzleklenen kayaç gruplarına ait genelleştirilmiş stratigrafik istif ise, Şekil – 4.2.'de sunulmaktadır.

#### **4.2. Veri Toplama Bölgelerindeki Litolojik Birimlerin Özellikleri**

Tez çalışmaları kapsamında, İstanbul ili içerisinde, jeolojik – jeoteknik araştırma amaçlı sondaj çalışmalarının yapıldığı bölgelerde çalışmaya konu olacak belirli litolojik birimler tespit edilmiş, yapılan çalışmalardan elde edilen veritabanı ise bu birimlere göre ayrılanmıştır. Söz konusu birimlere ait genel özellikler aşağıda verilmektedir. Değınilen bu genel özellikler, literatürde yer alan önceki çalışmalardan edinilen bilgilerin yanı sıra,

veri toplanan lokasyonlarda yapılan gözlemsel saha çalışmaları ve mühendislik jeolojisi hat etüdü çalışmalarından derlenmiştir.

SİSTEM		KUVATNERER		TERSİYER		KRETASE		TRİYAS		KARBONİFER		DEVONİYEN		SİLURİYEN		ORDOVİSİYEN		KAYATÜRÜ	AÇIKLAMALAR	
SERİ	KAT	ALTI	ÜST	ALTI	ÜST	SANTON-KAMP	YEMİŞLİÇAY	ALTI	ORTA	ÜST	ALTI	ÜST	ALTI	ORTA	ÜST	ALTI	ÜST			
GRUP	FORMASYON	ÜYE	KALINLIK (m)																	
	ALAÇALI KL		20																	Traverten, yamaç molozu, kumul, plaj kumu, alüvyon
	MEŞETEPE KAYALITEPE		100																	UYUMSUZLUK Traverten görünümü kumtaşı UYUMSUZLUK Kumtaşı, kilttaşı, çakilttaşı, kömür Çakilttaşı, kumtaşı
	AKVEREN		50-70																	UYUMSUZLUK Kireçtaşı, killi kireçtaşı DİŞLİ ÇÖZLENMEDİ
	RİVA İSHAKLI		500																	Granodiyorit, kuvarsdiyorit Kontakt metamorfik zon Aglomera, andezit, bazalt, tuf Volkanojenik kumtaşı, şeyl
	BAKIRLIKIRAN		35																	TEKTONİK Kumtaşı, şeyl
	BALLIKAYA		50-75																	Dolomit, dolomitik kireçtaşı, kireçtaşı
	DEMİRCİLER		200-300																	Killi kireçtaşı, şeyl, kumtaşı,
	ERİKLİ		40-50																	Kumtaşı, sililttaşı, şeyl
	KAPAKLI		10-70																	Çakilttaşı, kumtaşı, çamurtaşı, şeyl UYUMSUZLUK
	TRAKYA	UĞURDERE	75-500-1000																	Türbiditik kumtaşı, şeyl, kireçtaşı Kireçtaşı, şeyl Kireçtaşı
	BALTALIMANI		200																	Fosfatik yumrulu radyolarit, çört, silisifiye şeyl, kireçtaşı
	BÜYÜKADA	AYINEBURNU YÖRÜKALİ BOSTANCI	200																	Küçük yumrulu kireçtaşı, şeyl Çört, silisifiye şeyl Çörtlü kireçtaşı
	KARTAL	KOZYATAGI	750																	Şeyl, kumtaşı, kireçtaşı Türbiditik kireçtaşı, kireçtaşı, şeyl Şeyl, kumtaşı, kireçtaşı
	İSTİNYE	KAYNARCA GEBZE SEDEFADASI	300																	İri yumrulu killi kireçtaşı, şeyl Kireçtaşı, şeyl Laminalı kireçtaşı, şeyl
	DOLAYOBA	AYDINLI	100																	Resifal kireçtaşı
	GÖZDAĞ		500																	Feldispatlı kuvars kumtaşı Şeyl (graptoliti), kumtaşı
	AYDOS		10-100																	Kuvarsitik kumtaşı, çakilttaşı,
	KURTKÖY	AYAZMA	1000																	Kumtaşı (subarkoz), çakilttaşı Feldispatlı kumtaşı, şeyl, çakilttaşı (arkozik)
	BAKACAK		750																	Yeşil kumtaşı, mor şeyl
	KOCATÖNGEL		1500																	Yeşil şeyl, kumtaşı

Şekil 4.2. İstanbul ili doğu kesimi (Anadolu yakası) genel stratigrafik istifi (Yurtsever ve Çağlayan, 2002)

#### 4.2.1. Kurtköy Formasyonu (Oku)

Mor renkli kumtaşı, çamurtaşı – şeyl ve çakilttaşı ardalanmasından (arkoz serisinden ) oluşan birim Haas (1968) tarafından “Kurtköy Tabakaları” olarak adlandırılmış, Önalın

(1981,1982) tarafından “Kurtköy Formasyonu” olarak adlandırılmıştır. Birim, adını Pendik’in kuzeydoğusundaki Kurtköy Beldesi’nden alır.

Gözlemsel saha çalışmaları ve mühendislik jeolojisi çalışmalarında elde edilen verilere göre, bu formasyon genelde soluk mor, kırmızı ve nadiren yeşilimsi gri renkli, orta – kalın tabakalı, feldispatlı kumtaşı, çakıllı kumtaşı, kumlu çakıltaşı, çakıltaşı, subarkoz ve koyu mor – bordo renkli, laminalı, feldispatlı şeyl ardalanmasından (arkoz serisinden) oluşur (Şekil 4.3.). Sıkı tutturulmuş olup muhtelif kökenli tane bileşenlidir. Araştırma çalışmalarında tespit edilen kumtaşları ve çakıltaşları, dayanımlı – orta dayanımlı, orta sert, orta – çok – yer yer tümüyle ayrılmış özellik göstermektedir.



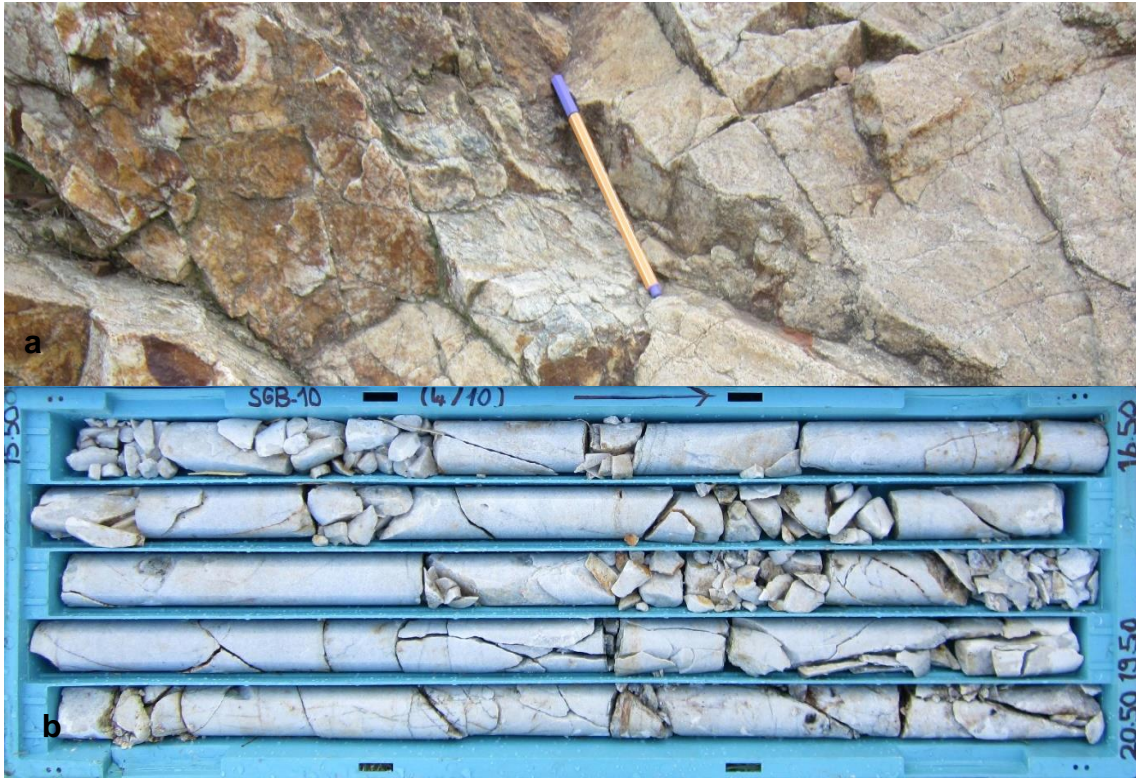
Şekil 4.3. Kurtköy formasyonuna ait seviyeler (Mostra(a) ve karot(b) görüntüleri – kumtaşı ve çakıltaşı örnekleri)

#### 4.2.2. Gözdağ Formasyonu (OSg)

Kumtaşı (grovak) ve şeyl ardalanmasından oluşan birim, Önalın (1981, 1982) tarafından “Gözdağ Formasyonu” olarak adlanmıştır. Adını Pendik kuzeyindeki Gözdağ Tepe/Gözdağ Mahallesi’nden alır. Birimin üst seviyelerinde yer alan bu seviyeler, Önalın (1981, 1982) tarafından da “Aydınlı formasyonu” olarak adlandırılan merceksel

geometrilili feldispatlı kuvars kumtaşıları (subarkozlar), “üye” mertebesinde değeriendirilerek Gözdağ formasyonu kapsamında incelenmiştir.

Birim genel olarak yeşilimsi gri, gri, altere olmuş kesimleri sarımsı gri renkli, orta – yer yer ince tabakalı kuvars kumtaşılarından oluşur (Şekil 4.4.). Gözdağ formasyonu’nun yüzeylendiği mostralarda ve veri elde edilen araştırma sondajlarında, sarımsı gri – bej renkli, oolitik yapıda kireçtaşılarının da varlığı tespit edilmiş; Gözdağ formasyonu içerisinde gözlenen ayrı bir kayaç grubu olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 4.4. Gözdağ formasyonuna ait seviyeler (Mostra(a) ve karot (b) görüntüleri – kumtaşı örnekleri)

#### 4.2.3. Dolayoba Formasyonu (SDyd)

Pendik kuzeyindeki Dolayoba (Dolayba) beldesi civarında yüzeyleyen resifal özellikli, Halysites ve brakiyopodlu kireçtaşıları, Önalın (1981, 1982) tarafından “Dolayoba Formasyonu” olarak adlandırılmıştır.

Birim genelde açık gri ve yer yer pembe, yer yer de açık kahve renkli, ince-kalın tabakalı resifal kireçtaşılarından oluşur (Şekil 4.5.). Tabanına yakın kesimlerinde yer yer sarı ve

bej renkli, ince tabakalı, silisifiye şeyl ara düzeylerini kapsayan birimde bol mercan, brakiyopod gibi fosiller tespit edilmiştir. Birimin bazı seviyeleri dolomitik, sparitik, pel-sparitik, biyo-sparitik, rekristalize, bantlı, kumlu ve killi kireçtaşı karakterindedir. Bu ayrımlar oluşturulan veri tabanına yansıtılmamıştır. Üst düzeyleri çoğunlukla iri yumruludur. Birim limonitli vaketaşı, istiftaş, ikincil dolomitleşmiş bağlamtaş, çok az dolomitli vaketaşı ve tanetaşı mikrofasiyesindedir (Önal, 1981, 1982).

Birim altta Gözdağ, üstte İstinye formasyonları ile dereceli geçişlidir Kalınlığı 100 m dolayında olan birim, yanal ve dikey yönde kendisini oluşturan kaya türleri arasında değişim gösterir.



Şekil 4.5. Dolayoba formasyonuna ait seviyeler (Mostra (a) ve karot (b) görüntüleri – kireçtaşı örnekleri)

#### 4.2.4. Kartal Formasyonu (Dk)

Alt düzeyleri yer yer kireçtaşı ara katkılı grovak ve şeyllerden, orta düzeyleri çoğunlukla kireçtaşı aratabakalı kireçli grovak ve şeyllerden ve üst kesimleri de nadiren kireçtaşı

araseviyeli şeyllerden oluşan birim, Önalın (1987, 1988) tarafından “Kartal Formasyonu” olarak tanımlanmış. alt düzeyleri “Pendik üyesi”, orta düzeyleri “Kozyatağı üyesi”, üst düzeyleri ise “İçerenköy şeyl üyesi” olarak ayırtlanmıştır. “Kartal” adı ilk kez Haas (1968) tarafından “Kartal Tabakaları” olarak kalkerli grovak şeyller (yukarıda tanımlanan alt düzeyler) için kullanılmıştır. Sonrasında, Önalın (1982) tarafından, sözkonusu “Kartal Tabakaları” ile bunların altında yer alan “Soğanlı Tabakaları”na (Haas. 1968; marnlı, yumrulu kireçtaşı) yeniden tanımlanarak “Kartal Formasyonu” adı uygulanmıştır. Ancak, alt ve üstteki üyelere ait kaya türlerinin geniş alanlarda benzer karakterde olduğu gözlemlenmiş, dolayısıyla alt ve üstteki üyeler “Kartal Formasyonu” adı altında birleştirilmiştir. Kozyatağı üyesi ise korunmuştur. Birim adını İstanbul ’un Anadolu yakasındaki Kartal İlçesi ’nden alır.

Sahada yapılan çalışmalara ve araştırma sondajlarında elde edilen verilere göre, formasyon genelde yeşilimsi gri – siyah renkli, ince – orta tabakalı, kıltaşı ve yer yer kumtaşı – şeyl seviyeleri şeklinde gözlenmiştir. Nadir olmakla birlikte, killi kireçtaşı arakatmanları içerir. Formasyonun belirli kesimleri, Trakya Formasyonu ile oldukça büyük benzerlik göstermektedir. Alt bölümlerinde yumrulaşmış karbonatlı şeyller olağandır (Önalın, 1988).



Şekil 4.6. Sondaj çalışmalarında kesilen Kartal formasyonuna ait seviyeler – kıltaşı örnekleri

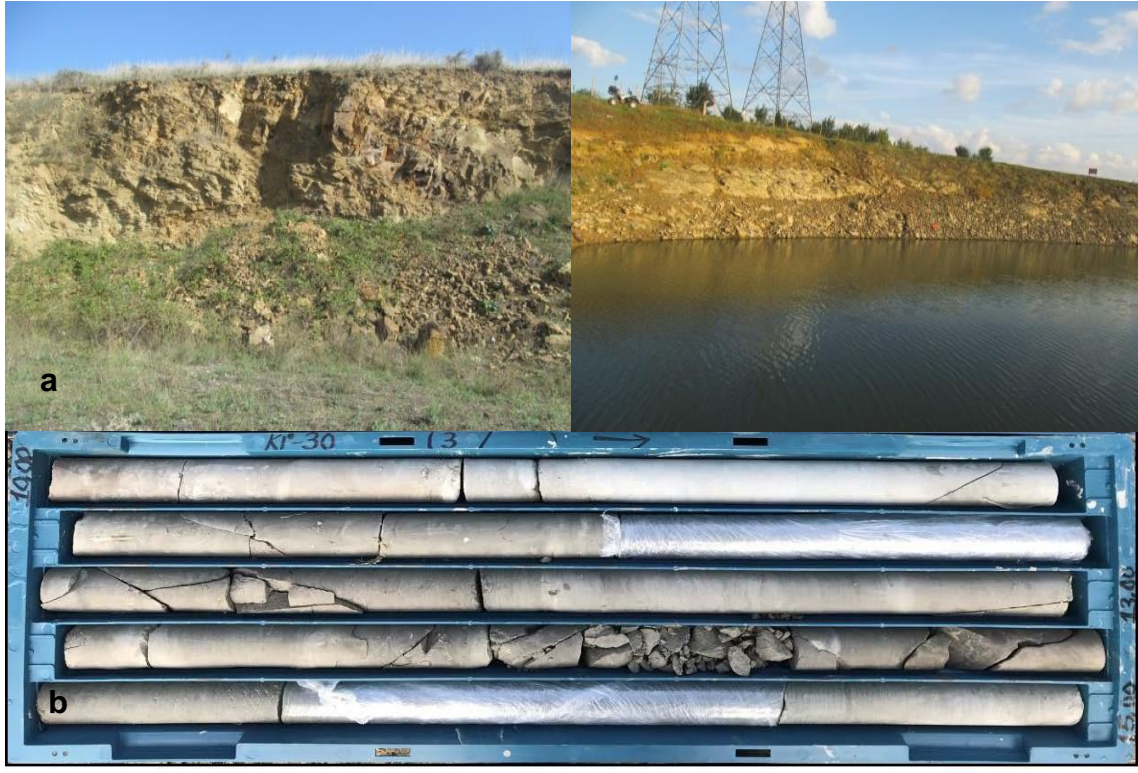
#### 4.2.5. İslambeyli Formasyonu (Teoi)

Formasyon yer yer yüzey sellenmeli çakıltaşıyla başlayan, çakıltaşı, kumtaşı ve killi kumlu kireçtaşı ardalanması ile kumtaşı ve marnlardan oluşan resif gerisi çökelleri ile temsil edilir. İlk kez Keskin (1966) tarafından adlandırılmıştır. İslambeyli formasyonu



dayanımsız litolojisi nedeniyle vadi içlerinde ve Kırklareli Kireçtaşı (Tek) altında, yarlarda yüzeylenir (Şekil 4.7.).

Birim, tabanda az tutturulmuş, kötü boylanmalı, köşeli blok, çakıl, çakılcık ve kaba kumdan meydana gelen akarsu çökelleriyle başlar. Üzerine sarı, kirli beyaz, gri renkli, sert, sıkı tutturulmuş, karbonat çimentolu, kumtaşı, kiltası, killi kireçtaşı, marn ve kireçtaşı ardalanması gelir. Lamelli branş, gastropod, ekinit, nümmilit içeren bu seviyeler, ince – orta katmanlıdır. Lalapaşa ve Sırpsındığı civarında, yer yer beyaz renkli, konvolüt yapılı, marn ara seviyeli tüfitler içermektedir. İslambeyli formasyonu genelde 30 – 50 metre kalınlıktadır. Kıyıköy ölçülü kesitinde ise 109 metre kalınlıktadır. Formasyondan derlenen makro fosiller genellikle Lütesiyen – Alt Priaboniyen yaşını vermektedir (Yurtsever ve Çağlayan, 2002)



Şekil 4.7. İslambeyli formasyonuna ait seviyeler (Mostra(a) ve karot(b) görüntüleri – kiltası örnekleri)

#### 4.2.6. Kırklareli Kireçtaşı (Tek)

Kumtaşı ve kıltaşı ara seviyeli, bol makro ve mikro fosilli kireçtaşlarından oluşan birim, ilk kez Keskin (1966 ve 1971) tarafından Kırklareli kireçtaşı olarak adlandırılmıştır. Birimin taze yüzeyi beyaz, grimsi beyaz, sarımsı beyaz, krem renkli; bozuşma yüzeyi, açık gri, gri renklidir. Orta – kalın katmanlı, sert, kavkı kırıntılı olduğu kesimleri erime boşluqludur. Tabanında 0.5 metre kalınlığında çakıltaşı içeren birim, alt kesimlerde killi, kumlu, tekçe mercanlı, bol nümmit ve mikrofosilli, yer yer yama resif özelliğindeki biyostromal kireçtaşından oluşmuştur (Şekil 4.8.). Kırklareli kireçtaşı, altındaki İslambeyli formasyonu ve üzerine gelen İhsaniye Formasyonu ile yanal ve düşey yönde geçişlidir. Kırklareli kireçtaşı, İstanbul Yarımadası'nda genellikle 75 – 125 metre kalınlığında iken sahada ölçülebilen kalınlık ise 50 metre dolayındadır. Çatalca dolayında kalınlık 96 metredir. Kırklareli kireçtaşı, Çatalca dolayında Geç – Orta Eosen'de çökelmeye başlamış, Priyaboniyen'de ise tüm alanı kaplamıştır (Keskin, 1971).

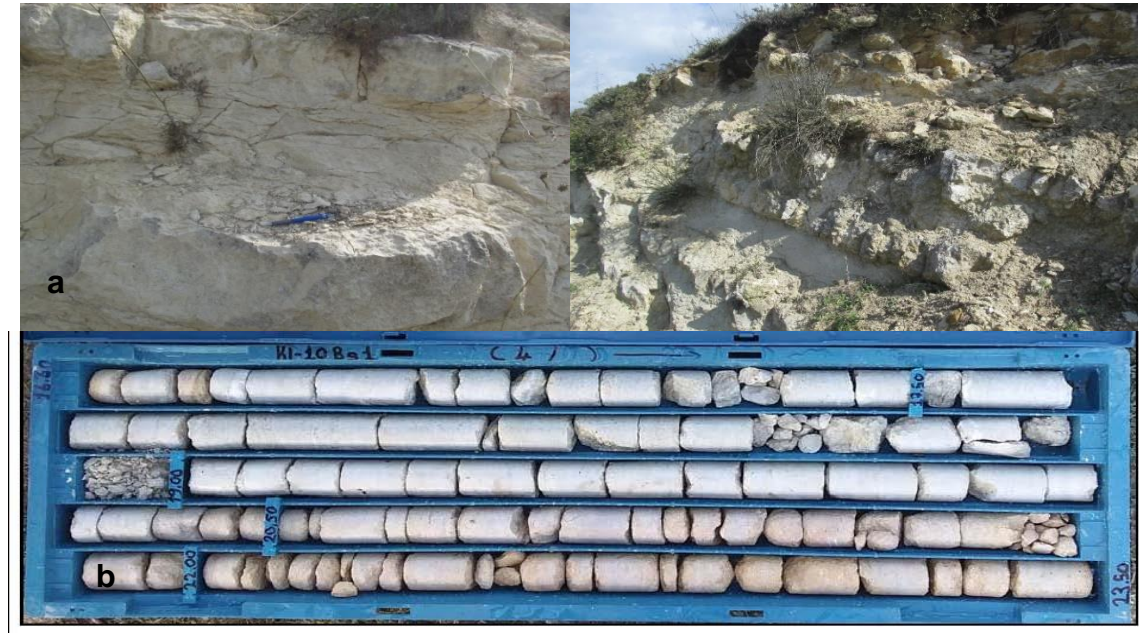


Şekil 4.8. Kırklareli formasyonuna ait seviyeler (Mostra (a) ve karot (b) görüntüleri – kireçtaşı örnekleri)

#### 4.2.7. İhsaniye Formasyonu (Tei)

Karbonat çimentolu kumtaşı – çakıltaşı ara tabakalı, yer yer tuf seviyeli, killi kireçtaşı, marn, kumlu kireçtaşı ile kireçli miltaşı, kıltaşı, kumtaşı ve marn ardalamasından oluşmuştur. Doust ve Arıkan (1974) tarafından İhsaniye üyesi olarak tanımlanan birime, Trakya havzasıyla korelasyon sağlamak amacıyla İhsaniye Formasyonu (Yurtsever ve diğ., 1993) adı verilmiştir. İstanbul Yarımadası'nda ve Terkos Gölü çevresinde geniş alanlar kaplayan İhsaniye Formasyonu, Terkos Gölü'nün doğu ve batısından, güneyde Büyükçekmece ve Küçükçekmece göllerine kadar olan alanda geniş yüzeylemeler sunar. Karaburun sahilinde ise şerit şeklinde yüzeylenir.

Kirli beyaz, açık gri renkli killi kireçtaşı; bej renkli, kavkı kırıntılı miltaşı – silttaşı, sarımsı beyaz renkli kireçtaşı ve tüflerden oluşur (Şekil 4.9.). Orta ve kalın tabakalı birim içinde ince ve orta tabakalı kıltaşı, kumtaşı ve çakıltaşı seviyeleri olağandır. Aralarında yer yer taze yüzeyleri sarımsı beyaz, grimsi ve nadiren yeşilimsi beyaz, aşınma yüzeyi kirli beyaz renkli, yumuşak ve sert konkresyonlu marn seviyelerine sıkça rastlanır. İhsaniye Formasyonu' nun üst kesimlerinde taze yüzeyi beyaz, gri, mavimsi gri renkli, bozuşma yüzeyi kirli beyaz renkli kumtaşı, beyazımsı sarı – grimsi renkli kumlu kireçtaşı – kireçtaşı ara tabakalı marnlar egemendir (Yurtsever ve Çağlayan, 2002).



Şekil 4.9. İhsaniye formasyonuna ait seviyeler (Mostra (a) ve karot (b) görüntüleri – marn örnekleri)

### 4.3. Yapısal Jeoloji ve Tektonizma

Marmara bölgesinde, Erken Karbonifer – Neojen aralığında değişik süreçlerde tektonik devinimler etkin olmuştur. Bu devinimlere bağlı olarak kıvrım, fay, eklem vb. yapısal unsurlar bölgeye oldukça karmaşık yapısal özellik kazandırmıştır (Özgül vd., 2009).

Miyosen başlarında önemli bir peneplenleşme aşaması geçirmiş olan bölgede özellikle kuvarsit gibi aşınmaya dayanıklı birimlerin tepeler şeklinde yüzeylemekte olması olağandır. Arkoz ve kuvarsit ağırlıklı olan ve bölgedeki stratigrafik istifin en alt kesimlerine ait Aydos ve Kurtköy Formasyonunun yüzeyleme dağılımı ile bunların üstünde yer alan daha genç Paleozoyik istifinin yüzeyleme dağılımı arasındaki ilişki, bölgede bazı araştırmacıların belirttiği nap gibi büyük yatay harekete katılmış kütlelerin varlığına bir engel oluşturmaktadır. Yanal yönde sürekliliği saptanabilen büyük fay kuşaklarında, fayların genelde dik-çok dik eğimli oldukları, bu fayların yakınında fay eğimini saptamak amacıyla yapılmış sondajlardan ve fayların harita üzerindeki doğrusal gidişlerinden de anlaşılmaktadır. Büyük fayların doğrultularındaki değişimler genelde sert dirsekler şeklinde olmaktadır (Özgül vd., 2005).

Paleozoyik istifinin alt kesimlerine ait Ordovisiyen yaşlı Aydos ve Kurtköy formasyonlarını kapsayan büyük kütlelerle, istifin üst kesimlerine ait Silüriyen-Devoniyen – Alt Karbonifer yaşlı kaya – stratigrafi birimlerinin arasında, önemli boyutlarda fayların varlığını kabul etmeden açıklanması olanaksız türden dokanak ilişkisi gözlenmektedir. Üst Miyosen(?) – Pliyosen karasal çökellerinin yerleşmiş oldukları çukurların, sondajlarla ortaya konmuş olan taban röliyefi göz önüne alındığında, KB – GD ve KD – GB doğrultulu, eğim atımlı faylarla oluşmuş tektonik çöküntüler oldukları anlaşılmaktadır. Yapılan jeolojik araştırmalarda bölgede aktif fayların varlığına ait ipuçları bulunamamıştır. Aksine Geç Miyosen – Pliyosen yaşlı Sultanbeyli Formasyonunun bölgedeki fayları örttüğü, diğer bir anlatımla bu faylardan etkilenmediği gözlenmiştir.

Bu alanında özellikle Paleozoyik-Alt Tersiyer yaşta kaya birimlerinin yüzeylettiği kesimlerde D – B, K – G, KD – GB ve KB – GD doğrultulu büyüklü küçüklü çok sayıda fayların varlığı dikkati çekmektedir. Doğrudan izlenen ya da dokanak, kılavuz düzey vb. çizgiselliklerin izlenmesi sırasında harita örneği ile kendini belli eden fayların yanında, kilometrelerce uzunlukta bölgesel faylar gelişmiştir: Maltepe – Beykoz Fay, Yakacık Fayı, Dragos Fayı, Çamlıca Bindirmesi, Ümraniye Fayı, Kartal Fayı, Gölcük Tepesi Fayı,

Büyükada Fayları izlenmiş ve haritalanmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi bu faylar aktif değildir; Geç Miyosen – Pliyosen yaşlı Sultanbeyli Formasyonu tarafından örtülmüşlerdir (Kaya,1973; Özgül vd., 2005).

## 5. VERİ TABANI OLUŞTURMA ÇALIŞMALARI

Tez çalışması kapsamında, veri tabanının oluşturulabilmesi amacı ile, dört farklı çalışma bölgesinde değişik amaçlı projeler için jeolojik – jeoteknik amaçlı araştırma sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiş, bu çalışmalar dahilinde yerinde (in – situ) deneyler ve kaya mekaniği laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan veriler temel olarak sözü edilen çalışmalardan sağlanmıştır. Öte yandan, söz konusu çalışma bölgelerinde sahada tez çalışmasının amacına uygun incelemeler yapılmış, sondaj çalışmalarında elde edilen veriler teyit edilmiş ve zenginleştirilmiştir. Veri tabanının oluşturulmasına yönelik tüm bu çalışmalara ilişkin detaylar bu bölümde sunulmaktadır.

### 5.1. Jeoteknik Amaçlı Araştırma Sondaj Çalışmaları

Tez çalışmaları kapsamında, farklı kaya gruplarına ilişkin kaya kütle ve kaya malzeme özelliklerini doğrudan ve dolaylı yollarda tayin etmek amacı ile, toplam 4 farklı çalışma bölgesinde, 124 farklı lokasyonda, İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü uhesinde, muhtelif projeler kapsamında; gerçekleştirilen jeoteknik amaçlı sondaj faaliyetlerinden ve çalışmalara ait veritabanından gerekli yasal izinler alınarak faydalanılmıştır. Araştırma sondajlarının gerçekleştirildiği bölgeler ve sondaj sayıları aşağıda verilmiş olup, sondaj çalışmalarına ilişkin özet bilgiler Çizelge 5.1. – 5.5. aralığında sunulmuştur.

- Sabiha Gökçen Havalimanı Bölgesi: 35 Sondaj
- Kaynarca – Tuzla Bölgesi: 25 Sondaj
- Sancaktepe – Sultanbeyli Bölgesi: 34 Sondaj
- Sazlıdere – Küçükçekmece Bölgesi: 30 Sondaj

Bu çalışmalar kapsamında, gerekli veri tabanını elde edebilmek amacı ile, karotlu ilerleme yapılan sondajlar seçilmiştir. Bu sondajlarda, belirli seviyelerde karot numuneleri laboratuvar deneyleri için alınmış ve benzer seviyelerde presiyometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karot numuneleri düzenli olarak karot sandıklarına konularak muhafaza edilmiştir. Yeraltı suyu seviyesini tespit etmek için gün sonunda sondaj kuyusundaki sirkülasyon suyu “bailer” kovasıyla boşaltılarak ve ertesi gün sabah kuyulardaki sular ölçülerek yeraltı suyunun derinliği kaydedilmiştir. Ayrıca sondaj işlemi tamamlandıktan sonra kuyulara perfore PVC boru indirilerek yeraltı suyu periyodik olarak gözlenmiştir.

Çizelge 5.1. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Sazlıdere – Küçükçekmece Bölgesi)

Sondaj No	KOORDİNAT (TM30 WGS84)		Derinlik (m)
	X	Y	
KI-05	4 549 220	394 226	41.00
KI-09	4 551 843	393 002	39.00
KI-10Bg1	4 555 217	390 905	78.00
KI-11	4 560 004	387 287	55.00
KI-12	4 560 575	387 170	55.00
KI-13	4 561 053	386 960	55.00
KI-14	4 561 664	386 641	54.00
KI-15	4 562 494	386 356	54.00
KI-17	4 564 865	386 171	58.00
KI-18g1	4 564 555	386 292	80.00
KI-20	4 566 455	387 148	68.00
KI-21	4 567 545	387 025	73.00
KI-22g1	4 568 670	387 188	100.00
KI-23	4 569 820	387 132	98.00
KI-24	4 570 133	387 589	95.00
KI-25	4 570 773	388 006	117.00
KI-26	4 572 273	388 637	108.00
KI-27g1	4 573 510	389 341	65.00
KI-28	4 574 257	389 655	44.00
KI-29	4 574 943	389 916	79.00
KI-30	4 575 156	390 653	90.00
KI-31g1	4 576 177	390 982	70.00
KI-32	4 577 015	391 532	77.00
SKI-01	4 553 343	392 245	50.00
SKI-03	4 554 066	391 612	50.00
SKI-09	4 556 260	389 444	50.00
SKI-11	4 556 868	388 972	50.00
SKI-12	4 557 548	388 504	50.00
SKI-13	4 557 947	388 048	50.00
SKI-14	4 558 595	387 944	50.00

Çizelge 5.2. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Sabiha Gökçen Havalimanı Bölgesi)

Sondaj No	KOORDİNAT (TM30 WGS84)		Derinlik (m)
	X	Y	
SGB-01	4 527 631	437 022	50.00
SGB-04	4 528 523	437 859	38.50
SGB-08_rev	4 529 445	438 101	50.00
SGB-10	4 529 713	438 408	47.00
SGB-10C	4 529 815	438 468	45.00
SGB-11	4 530 166	438 990	43.00
SGB-14	4 530 299	439 287	48.00
SGB-21	4 530 515	441 083	36.00
SGB-28	4 530 217	439 099	30.00
SGB-29	4 529 253	437 968	50.00
SGB-33	4 530 365	441 915	30.00
SGB-34	4 530 422	441 980	30.00
SGB-35	4 530 495	442 055	30.00
SGB-37	4 529 840	438 512	42.00
SGB-38	4 530 029	438 715	46.00
SGB-41	4 530 566	439 678	50.00
SGB-42	4 530 669	439 812	45.00
SGB-43	4 530 723	439 998	45.00
SGB-45	4 530 935	440 379	58.00
SGB-46	4 530 931	440 605	44.00
SGB-47	4 530 887	440 596	43.00
SGB-48	4 530 825	440 728	40.00
SGB-49	4 530 843	440 796	41.00
SGB-51	4 530 706	440 954	38.00
SGB-55	4 530 580	442 144	36.00
SGB-56	4 527 611	437 103	42.00
SGB-57	4 527 695	437 209	53.00
SGB-60	4 527 798	437 612	48.00
SGB-62	4 527 872	437 680	58.00
SGB-67	4 528 059	437 761	58.00
SGB-70	4 528 104	437 786	64.00
SGB-72	4 528 379	437 835	74.00
SGB-73	4 528 476	437 819	69.00
SGB-74	4 528 555	437 878	67.00
SGB-75	4 528 748	437 919	73.00



Çizelge 5.3. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Kaynarca – Tuzla Bölgesi)

Sondaj No	KOORDİNAT (TM30 WGS84)		Derinlik (m)
	X	Y	
KTS-03	4 527 483	439 416	36.00
KTS-04	4 527 334	439 571	38.50
KTS-05	4 527 272	439 780	43.00
KTS-06	4 526 994	440 398	32.00
KTS-07	4 526 649	440 692	63.00
KTS-08	4 526 432	440 759	63.00
KTS-10	4 525 821	440 646	42.00
KTS-11	4 525 616	440 579	42.00
KTS-12	4 525 242	440 444	48.00
KTS-13	4 525 102	440 356	39.00
KTS-14	4 524 460	440 442	28.00
KTS-15	4 524 052	440 727	29.00
KTS-16	4 523 795	440 960	33.00
KTS-17	4 523 662	441 089	31.00
KTS-18	4 526 925	440 438	28.00
KTS-19	4 527 211	439 880	43.00
KTS-20	4 527 641	439 159	25.00
KTS-21	4 527 312	438 287	29.00
PKS-01	4 527 602	435 039	32.00
PKS-03	4 527 651	435 664	31.00
PKS-03A	4 527 682	435 745	32.00
PKS-04	4 527 616	436 352	42.00
PKS-06	4 527 472	436 968	49.00
PKS-07	4 527 395	437 411	40.00
PKS-08	4 527 624	437 766	46.00

Çizelge 5.4. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Sancaktepe – Sultanbeyli Bölgesi)

Sondaj No	KOORDİNAT (TM30 WGS84)		Derinlik (m)
	X	Y	
CSS-04	4 541 980	432 521	41.00
CSS-05	4 541 936	432 647	38.00
CSS-06	4 541 928	433 153	46.00
CSS-07	4 542 076	433 619	53.00
CSS-08	4 542 010	433 707	54.00
CSS-09	4 542 013	433 753	54.00
CSS-10	4 541 918	433 899	56.00
CSS-11	4 541 667	434 047	45.00
CSS-12	4 541 058	434 187	34.00
CSS-13	4 540 922	434 238	33.00
CSS-14	4 540 487	434 570	31.00
CSS-15	4 539 978	435 106	38.00
CSS-16	4 539 879	435 147	41.00
CSS-17	4 539 341	435 359	35.00
CSS-18	4 539 158	435 351	39.00
CSS-19	4 538 950	435 283	40.00
CSS-24	4 537 384	435 930	51.00
CSS-26	4 537 225	436 677	59.50
CSS-27	4 537 329	437 238	43.00
CSS-28	4 537 389	437 418	40.00
CSS-29	4 537 521	438 076	41.00
CSS-30	4 537 126	438 665	42.00
CSS-31	4 536 978	438 794	40.00
SYS-02	4 542 399	434 258	36.00
SYS-03	4 542 653	434 562	39.00
SYS-04	4 542 746	434 631	36.00
SYS-05	4 543 182	434 588	32.00
SYS-06	4 543 570	434 761	29.00
SYS-07	4 543 637	434 859	27.00
SYS-08	4 543 859	435 185	27.00
SYS-09	4 543 889	435 646	30.00
SYS-10	4 543 682	435 783	30.00
SYS-11	4 543 622	435 879	28.00
SYS-13	4 540 915	432 738	30.00

Çizelge 5.5. Verilerin toplandığı sondajlara ait bilgiler (Deneme verileri)

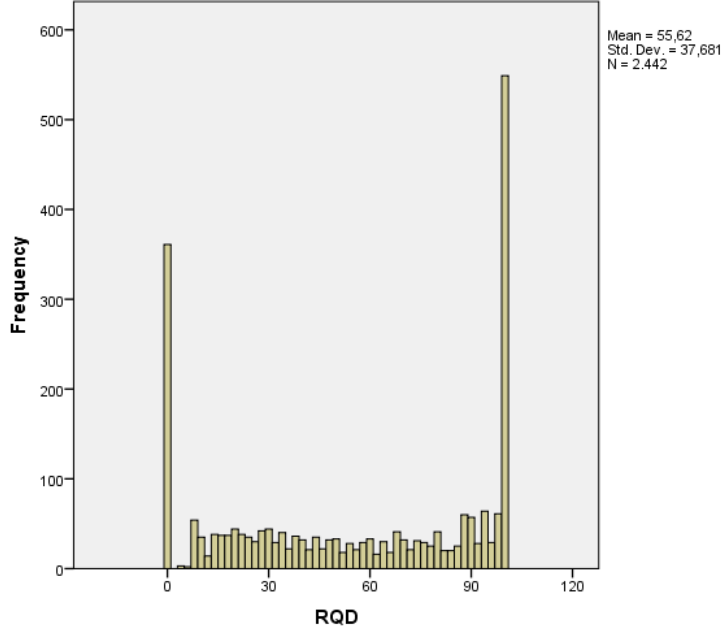
Sondaj No	KOORDİNAT (TM30 WGS84)		Derinlik (m)
	X	Y	
KIS-02	4 549 137	393 668	127.00
KIS-03	4 549 989	393 317	52.00
KIS-05	4 551 324	393 587	73.00
KIS-08	4 553 109	391 678	72.00
KIS-11	4 556 762	388 566	50.00
KIS-15	4 558 508	387 494	47.00
KIS-17	4 560 337	386 859	35.00
KIS-31	4 569 645	388 034	110.00
SGB-43A	4 530 699	439 962	45.00
SGB-43B	4 530 770	439 990	50.00
SGB-43C	4 530 795	440 048	52.50
SGB-43D	4 530 761	440 036	55.00
SKM-02	4 531 107	442 280	41.00
SKM-05	4 531 770	442 075	32.00
SKM-06	4 531 917	442 107	34.00
SKM-07	4 532 051	442 115	35.00

Sondajlar sırasında hazırlanan loglarda, birimlerin mühendislik tanımlamaları, TCR, RQD değerleri ve bozunma dereceleri yer almaktadır. Tezde kullanılan tüm sondajlara ait sondaj logları Ek – 1’de sunulmaktadır. Öte yandan, sondaj loglarında, genel süreksizlik özellikleri (açıklık, yüzey özellikleri, dolgu durumu vb.), yüzey dayanımı, yapılan deney seviyeleri, TCR, RQD yüzdeleri gibi bilgileri de yer almaktadır. Sondaj çalışmalarında irdelenen kaya kütlelerinde hesaplanan RQD puanlarının istatistiksel verileri Çizelge 5.6.’da verilmektedir. RQD puanlarının dağılım grafiği ise Şekil 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.6. Hesaplanan RQD değerlerinin istatistiksel verileri

	Veri Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma	Varyans
RQD	2442	100	0	100	55,62	37,681	1419,849

Öte yandan, araştırma sondaj çalışmalarının bulunduğu bölgelerde genel jeolojik birimleri ve kaya gruplarını da alansal olarak yerinde tespit etmek, sondaj verilerinde elde edilen verileri gözlemsel olarak değerlendirmek amacı ile, ulaşılabilen mostralarda üzerinde hat etüt çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda tespit edilen yüzlekler üzerinde, genel jeolojik – jeoteknik tanımlama, süreksizlik durumu, dayanım, bozunma bilgileri ayrıca not edilmiş ve sondaj logları ile korelasyonu sağlanmıştır.

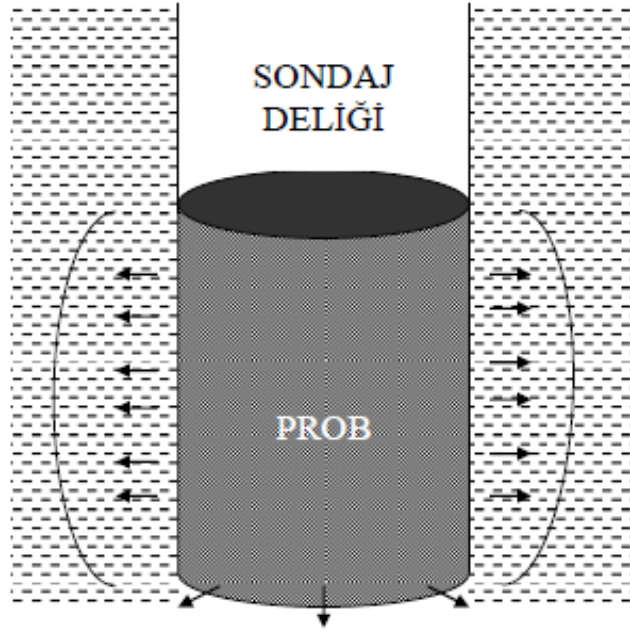


Şekil 5.1. Hesaplanan RQD değerlerine ait dağılım grafiği

## 5.2. Presiyometre Deneyleri ve Deformasyon Modülü Tayinleri

Presiyometre deneyi arazide (in – situ) uygulanan, zemin ve/veya zayıf kayaların deformasyon modülünün tayini amacıyla kullanılan, kuyu için yanal yükleme deneylerinden biridir. Jeoteknik problemleri içine alan bir çok konuda doğrudan ve dolaylı olarak faydalanılan bir yerinde deney yöntemidir (Clarke, 1995).

Presiyometre deney aleti; zeminin basınç – deformasyon ilişkilerin belirlemek amacı ile ilk defa Almanya’da geliştirilmiş, daha sonra 1950’li yıllarda Lois Menard tarafından gerçek kullanım amacına getirilmiş ve mühendislik pratiğinde kullanılmaya başlanmıştır. Deneyin amacı, zeminin basınç deformasyon ilişkilerini ölçmek için sondaj delgisi içine bir prob yerleştirilip şişirilmesi ve çevresinde yaratılan hacim değişiminin ölçülmesidir (Şekil 5.2.) (FHWA, 1997).



Şekil 5.2. Presiyometre deeyinde kullanılan probun şematik gösterimi (FHWA, 1997)

Daha önceden kalibre edilmiş prob, istenilen derinliğe indirilir ve yavaş yavaş şişirilmeye başlanır. Her kademedede (1,2,3,.. bar) basınçlar sabitlendikten sonra 15,30,60 sn okumaları (basınç artışlarına karşılık gelen hacim değişimleri) kaydedilir. Boşluk hacminde meydana gelen bu artış kuyunun yalnızca radyal olarak deformasyonundan kaynaklanır. Deney ilgili derinlikte en az 10 kademelik basınç uygulanarak yapılır. Bir deney yaklaşık olarak 10 dak. kadar sürer. Başlangıçta prob kuyu cidarına gelene kadar belirli bir hacme çok hızlı bir şekilde ulaşır, kuyu cidarına dayanması ile beraber kuyu çeperlerine belirli basınçlar uygulanarak hacim - basınç okumaları kaydedilir Yatay eksen basınç ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), düşey eksen hacim ( $\text{cm}^3$ ) değişimlerine karşılık gelecek şekilde deney sonuçlarının grafiği çizilir. Deney sırasında uygulanan basınç seviyesindeki 15,30,60 saniyeye karşılık gelen hacim okumalarının ortalaması alınmakla birlikte, genelde uygulamada doğrudan 60 saniye okuması dikkate alınmaktadır. Orjinden başlayan eğrinin basınç-hacim artışı prob kuyu cidarına temas edene kadar hızla exponansiyel olarak artar ve bu nokta zeminin  $P_0$  basınç noktasıdır. Bu noktadan sonra hafif bir eğrisellikle doğrusal olarak artmaya başlar. Eğrinin bu kısmı psödoelastik safhayı oluşturur. Bu noktadan sonra eğri yükselir ve  $P_L$  (limit basınç) değerine ulaşınca eğri asimtotik olur. Bu safhaya ise plastik safha adı verilir.

Deney sırasında elde edilen veriler sonucunda basınç-birim deformasyon eğrisi çizilir. Çizilen eğrilerden ilk olarak “Menard elastisite modülü/deformasyon modülü” ve eğer zemin yenildiye “limit basınç değeri” hesaplanır. Sonsuz elastik bir ortamda boşluk içinde radyal genişlemenin teorisi 1852 de Lamé tarafından geliştirilmiştir. Buna göre Menard Elastisite Modülü aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$E_m = 2(1 + \mu)(v_c + v_m)(\Delta P / \Delta V) \quad (5.1)$$

Burada  $v_m$  ve  $p/v$  ifadelerinin açılımları şu şekildedir

$$\Delta P / \Delta V = (p_f - p_0) / (v_f - v_0) \quad (5.2)$$

$$v_m = 0.5(v_0 + v_f) \quad (5.3)$$

Burada;

$\mu$  : poisson oranını (zemin veya kaya koşulları ile drenaj durumuna bağlı olup, ortalama 0,33 gibi bir değerle ifade edilir ve 0-0,5 arasında değerler alır)

$v_c$  : probun ilk hacmini

$p_0$  : probun kuyu cidarına temasından sonraki basınç başlangıç safhasını (eğrinin ilk kırıldığı nokta)

$p_f$  : probun zemini yendiği ve artık eğrinin doğrusallıktan saparak asimtotik hal almaya başladığı basınç değerini

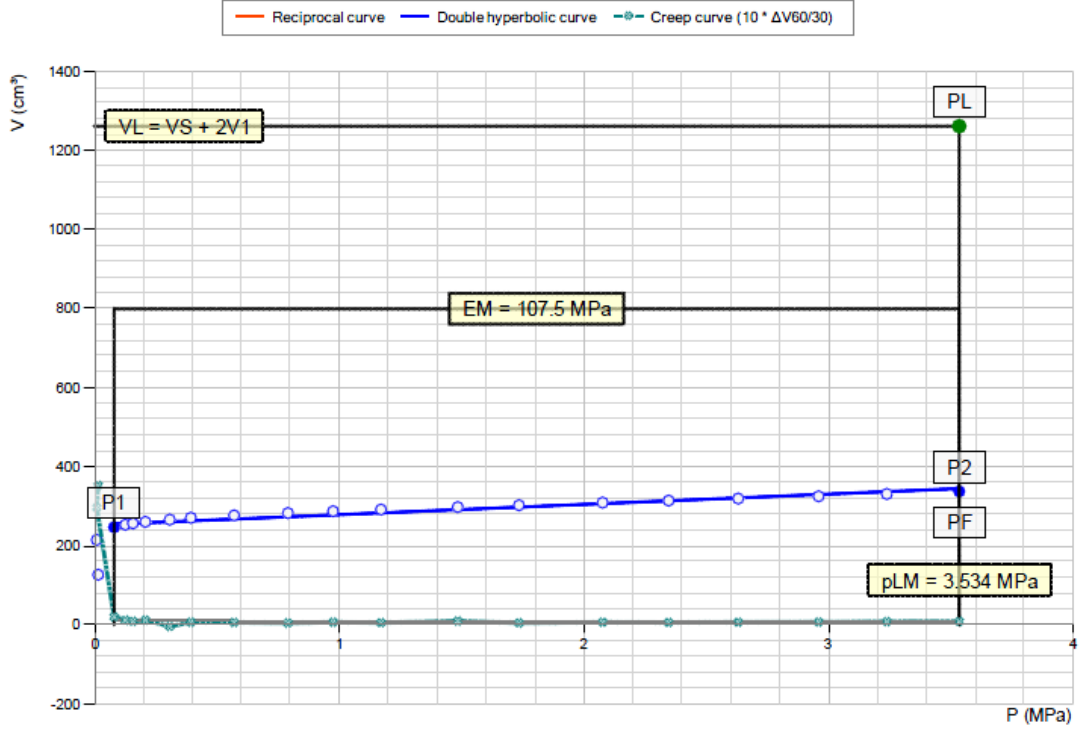
$v_0$  : probun kuyu cidarına temasından sonraki basınç başlangıç safhasına karşılık gelen volumetredeki hacim okumasını (eğrinin ilk kırıldığı an)

$v_f$  : probun zemini yendiği ve eğrinin doğrusallıktan saparak asimtotik hal almaya başladığı andaki basınç okumasına karşılık gelen hacim değerini

$\Delta P$ : kalibrasyonları yapılarak çizilmiş presiyometre deney eğrisinde, doğrusal kısımdaki basınç farkını

$\Delta V$ : kalibrasyonları yapılarak çizilmiş presiyometre deney eğrisinde, doğrusal kısımdaki hacim farkını ifade eder.

Presiyometre hesabı sırasında oluşturulan örnek bir Basınç / Hacim grafiği Şekil 5.3.’te sunulmaktadır.



Şekil 5.3. Deney sırasında elde edilen basınç - hacim grafiği (ApaGeo, Geovision programı ile oluşturulmuştur)

Verileri temin edilen araştırma sondaj çalışmaları sırasında, uygun kesimlerde düşük dayanımlı ve orta – çok ayrışmış kaya kütlelerinin deformasyon modülünün tayini amacı ile bu projelerde esas alınan referans ve yöntemlere bağlı olarak presiyometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Louis Menard GA tipi presiyometre ile 60 mm’lik N tipi probe kullanılmıştır (Şekil 5.4). Her sondaj için deformasyon modülü (Em) ile limit (Pl) ve net limit (Pln) basınçlarının derinlik boyunca değişimi belirlenmiş, deney sonuçları sondaj logları ile birlikte Ek – 1 ’de, presiyometre deney grafikleri ise yine jeoteknik tanımlamalar ve derinlik eşliğinde Ek – 2 ’de verilmiştir. Gerçekleştirilen presiyometre deneylerinden elde edilen veriler, çalışma veri tabanının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Gerçekleştirilen deneylere ait veriler farklı kayaç grupları ve jeolojik formasyonlar bazında ayrılanmış ve değerlendirilmiştir.



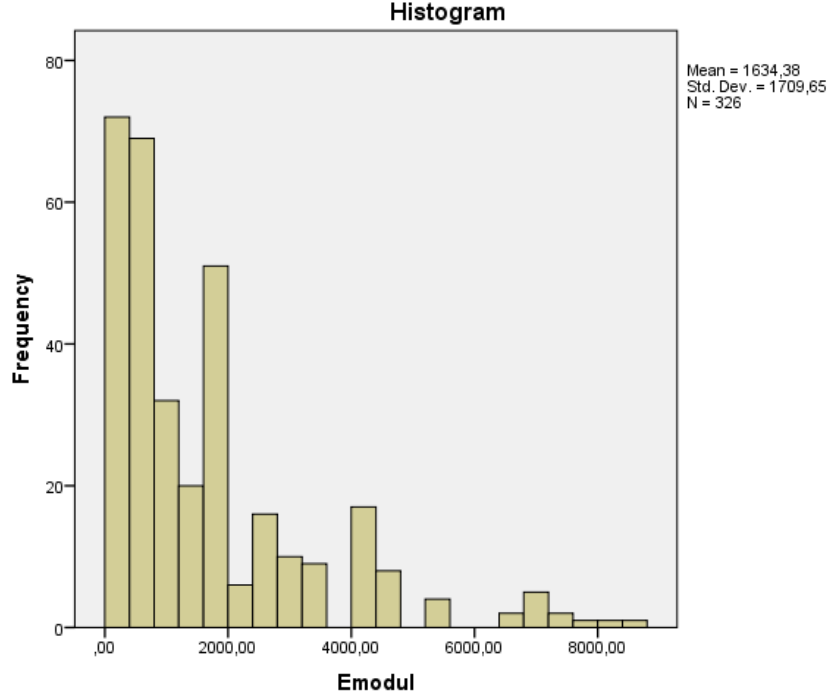
Şekil 5.4. Sahada gerçekleştirilen presiometre deneylerinden bir görüntü (Küçükçekmece – Sazlıdere bölgesi)

Veri toplama sahalarında yapılan sondajlarda, gerçekleştirilen presiometre deneyleri ile elde edilen deformasyon modülü değerlerinin istatistiksel bilgileri Çizelge 5.7 ve Şekil 5.5'te verilmektedir.

Çizelge 5.7. Elde edilen deformasyon modülü değerlerine ait istatistiksel veriler

	Örn.Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma	Varyans
Def.Modülü (MPa)	326	8496,74	1,16	8497,90	1634,3806	1709,65047	2922904,721





Şekil 5.5. Elde edilen deformasyon modülü değerlerine (MPa) ait istatistiksel veriler

### 5.3. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri

Verileri temin edilen araştırma sondajlarında elde edilen karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilen kaya mekaniği laboratuvar deneylerinden tez çalışması kapsamında önemli oranda faydalanılmıştır (Şekil 5.6.). Söz konusu kaya mekaniği laboratuvar deneyleri ve deney standartları şu şekildedir;

- Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Tayini (ISRM 1981)
- Elastisite Modül Tayini (ISRM 1981)
- Birim Hacim Ağırlık Tayini (ISRM 1981)

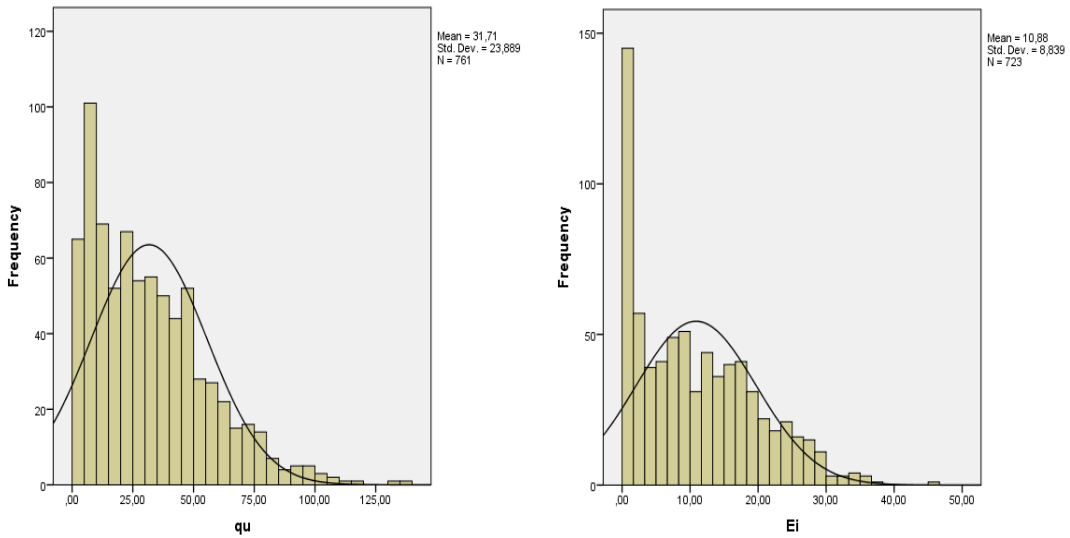
Kaya mekaniği laboratuvar deneyleri ile, hedeflenen kaya malzeme parametrelerine ait hesaplama yöntem ve metodolojileri; “Bölüm 3 – Mühendislik Tasarımında Başlıca Kullanılan Kaya Malzeme ve Kaya Kütle Parametreleri” kesiminde detaylı olarak verilmiştir.

Elde edilen söz konusu veriler yine kayaç grupları ve jeolojik formasyonlar özelinde ayırt edilmiş ve gruplandırılmıştır, gerçekleştirilen kaya mekaniği laboratuvar deneylerinde elde edilen kaya malzemesi parametreleri, Ek – 3’te toplu olarak verilmektedir.



Şekil 5.6. Kaya mekaniği laboratuvar deney çalışmalarından bir görüntü

Kaya mekaniği laboratuvar deneylerinden elde edilen ve tez çalışmalarında ana girdi parametreleri olarak kullanılan kaya malzemesine ait tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) ve kaya malzemesi elastisite modülüne ( $E_i$ ) ait istatistiksel veriler Şekil 5.7 ve Çizelge 5.8’de verilmektedir.



Şekil 5.7 Elde edilen kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa) ve kaya malzemesi elastisite modülüne (GPa) ait istatistiksel veriler

Çizelge 5.8. Elde edilen kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzemesi elastisite modülüne ait istatistiksel veriler

	Örn.Sy.	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortlama	Std.Sapma	Varyans
UCS(MPa)	761	136,30	,30	136,60	31,7054	23,88940	570,704
Ei(GPa)	723	45,80	,00	45,80	10,8834	8,83935	78,134

#### 5.4. Kaya Kütle Parametrelerinin Elde Edilmesi

Jeoteknik amaçlı saha araştırma çalışmaları ile, analiz çalışmaları sırasında kullanılacak olan kaya malzeme parametreleri ve deformasyon modülü parametresinin yanı sıra; kaya kalite göstergesi (RQD), ayrışma derecesi ve kaya kütle süreksizlik özellikleri de belirlenmiştir. Bu özellikler, analiz çalışmalarında kullanılan ve önemli yer tutan kaya kalite puanı (RMR) hesaplamalarında kullanılmıştır.

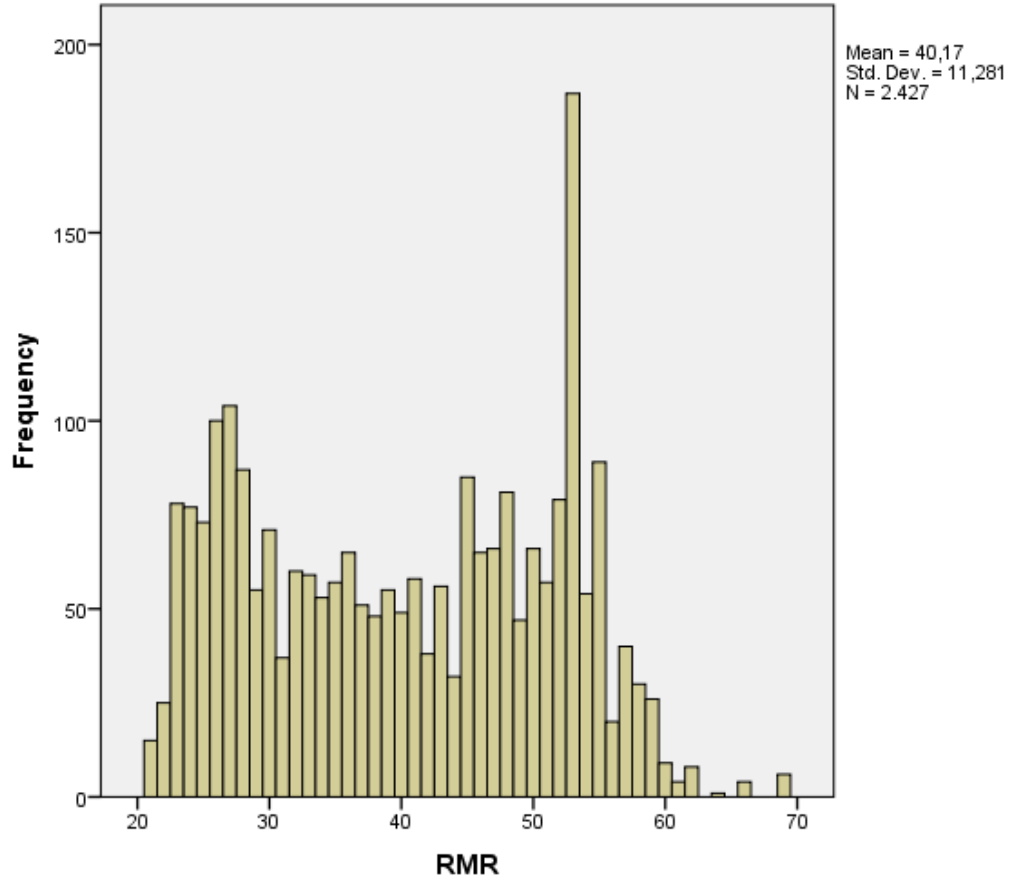
RQD yüzdesi hesaplaması Deere,1964'e göre gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, ayrışma derecesinin ve kaya kütle süreksizlik özelliklerinin tayini ise ISRM,1981'e göre gerçekleştirilmiştir. RMR puan hesaplaması Bieniawski, 1989'e göre gerçekleştirilmiş olup, "kazı süreksizlik eğim – doğrultu" düzeltilmesi uygulanmamış; tüm hesaplamalarda yeraltısuyu puanı eşit tutulmuş ve "7" olarak seçilmiştir.

RQD hesaplamalarının, ayrışma derecesi tayinlerinin ve kaya kütle süreksizlik özellikleri, karot sandıkları üzerinden tek tek yapılmış, sondaj bölgelerinde yer alan kaya mostralar üzerinde gerçekleştirilen gözlemsel etüt çalışmaları ile desteklenmiştir.

Sahada elde edilen verilerin ışığında, hesaplanan RMR puanlarının istatistiksel dağılımları, Çizelge 5.9 ve Şekil 5.8'de verilmektedir.

Çizelge 5.9. Hesaplanan RMR puanlarına ait istatistiksel veriler

	Örn.Sy.	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma	Varyans
RMR	2441	48	21	69	40,17	11,281	127,26



Şekil 5.8. Hesaplanan RMR puanlarına ait istatistiksel veriler

## 6. İSTATİSTİKSEL ANALİZLER

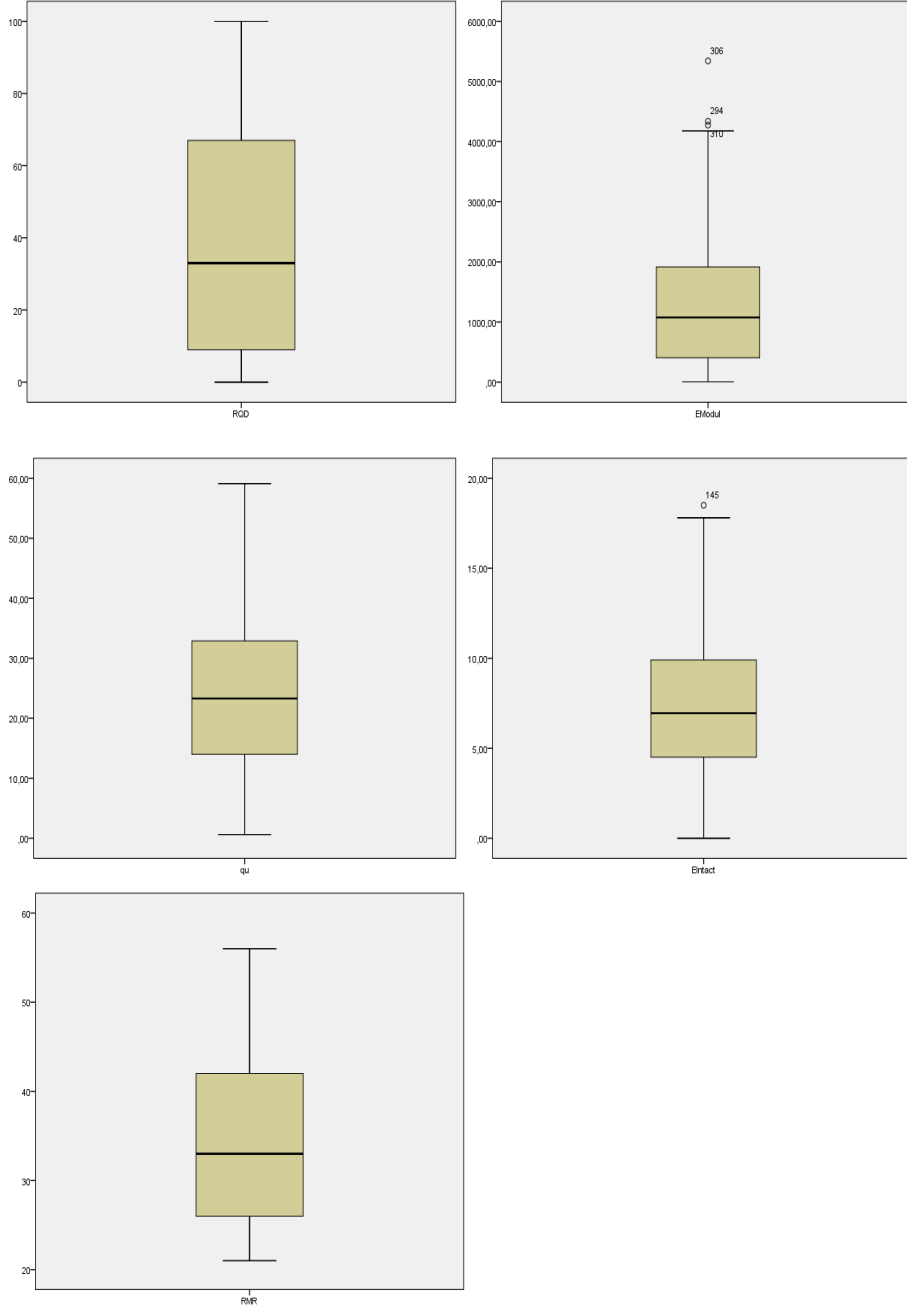
### 6.1. Uç Değer Analizlerinin Yapılması ve Veri Tabanının Hazırlanması

Farklı kaya grupları için oluşturulan, kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinden oluşan veri tabanında, özellikle sahada yapılan çalışmalarda elde edilen veriler üzerinde, aykırı değerlerin tespit edilmesi, ayıklamanın yapılması ve veri tabanının tezin amacına uygun olarak yapılacak analizlere hazır hale getirilmesi gerekli bir husustur. Söz konusu bu uç değer analizlerinin gerçekleştirilme gerekçeleri ve ana prensipler aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

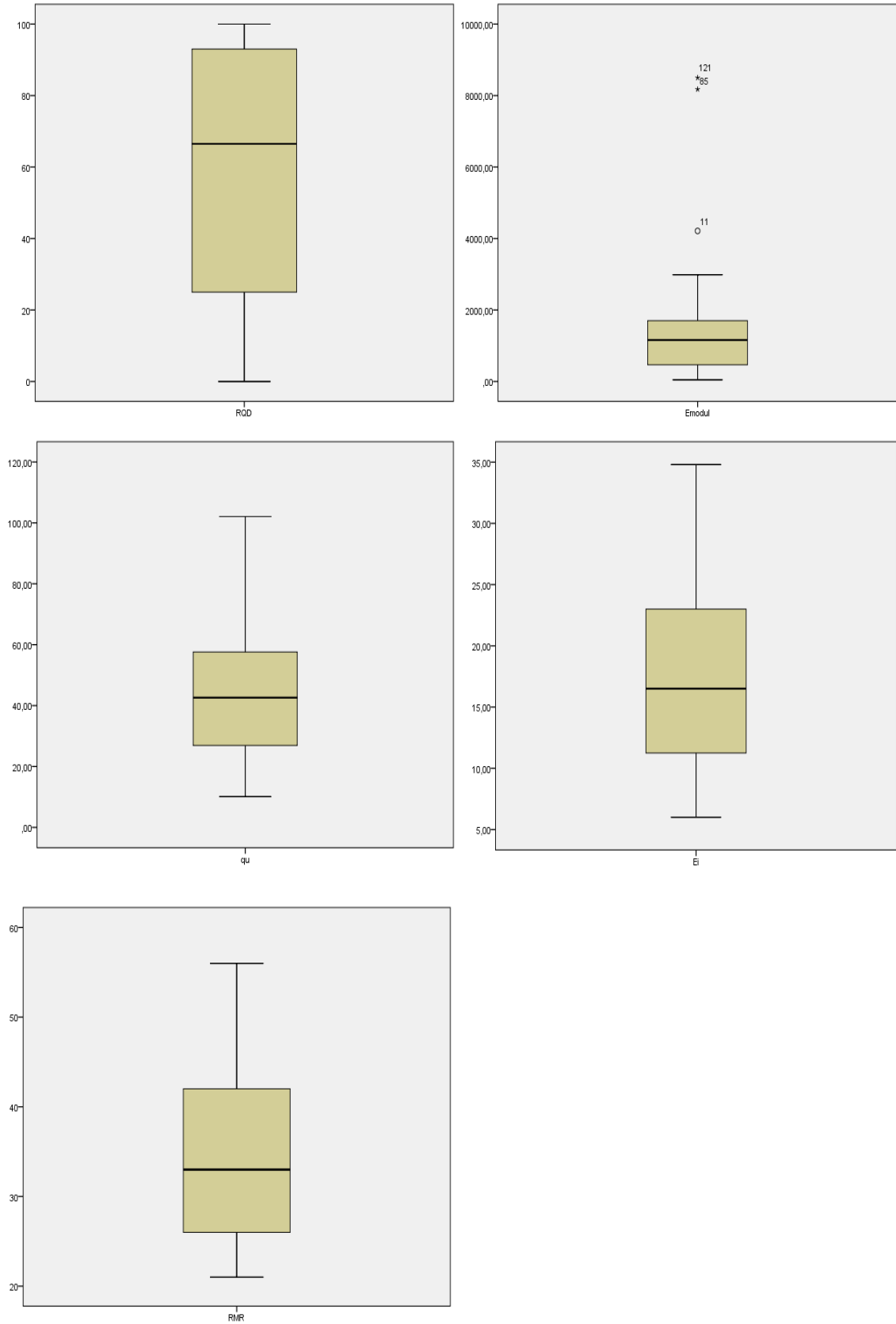
- Farklı kaya grupları için ayrı ayrı hazırlanan veri tabanında, kaya kütlelerinin heterojen ve anizotrop yapısı gereği, genel kaya kütle özelliklerinin ve parametre dağılımlarının dışında değerler elde edilmesine sebep olan; çok yüksek dayanımlı seviyeler yer almaktadır. Çalışmanın ana konusu düşük dayanımlı kaya kütleleridir ve genel dağılım düşük dayanımlı kaya kütlelerini temsil etmektedir. Dolayısı ile, araştırma çalışmalarında elde edilen veri tabanında tespit edilen bu tarz masif kesimler çalışmanın amacının dışında kalıp, tutarlılığını azaltacaktır.
- Kaya grupları içerisinde, elde edilen veri tabanında sahada ve laboratuvar ortamında yapılan deneylerde, test yöntemleri ve insan hatasından kaynaklanan uç değerler gözlenebilmektedir. Özellikle presiometre deneylerinden elde edilen deformasyon modül verilerinde, kuyunun aşırı genişlemesinden kaynaklanan düşük değerler temsil edici olmayıp, yanıltıcı olacaktır.
- Tüm kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametreleri üzerinde uç değer analizlerinin yapılması ile birlikte, veri dağılımında yaşanan aşırı saçılmanın önüne geçilmesi; basit ve çok değişkenli regresyon analizlerinin temsil edici ve daha yüksek tutarlılık ile gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Uç değer analizleri, IBM SPSS Statistics v23 programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile tespit edilen uç değerler, herhangi bir sistematik hata sonucu elde edilen değerler olmadığı için, herhangi bir düzeltme işlemine gerek görülmeden doğrudan olarak veri tabanından çıkartılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda, tek eksenli sıkışma dayanımı verilerinde ve kaya malzemesi elastisite modülünde yakalanan uç değerler, aynı örnekler üzerinde elde edilen test verileridir. Bu da, söz konusu uç değerlerin genel dağılımın dışında bırakılmasının doğru olacağı anlamına gelmektedir.

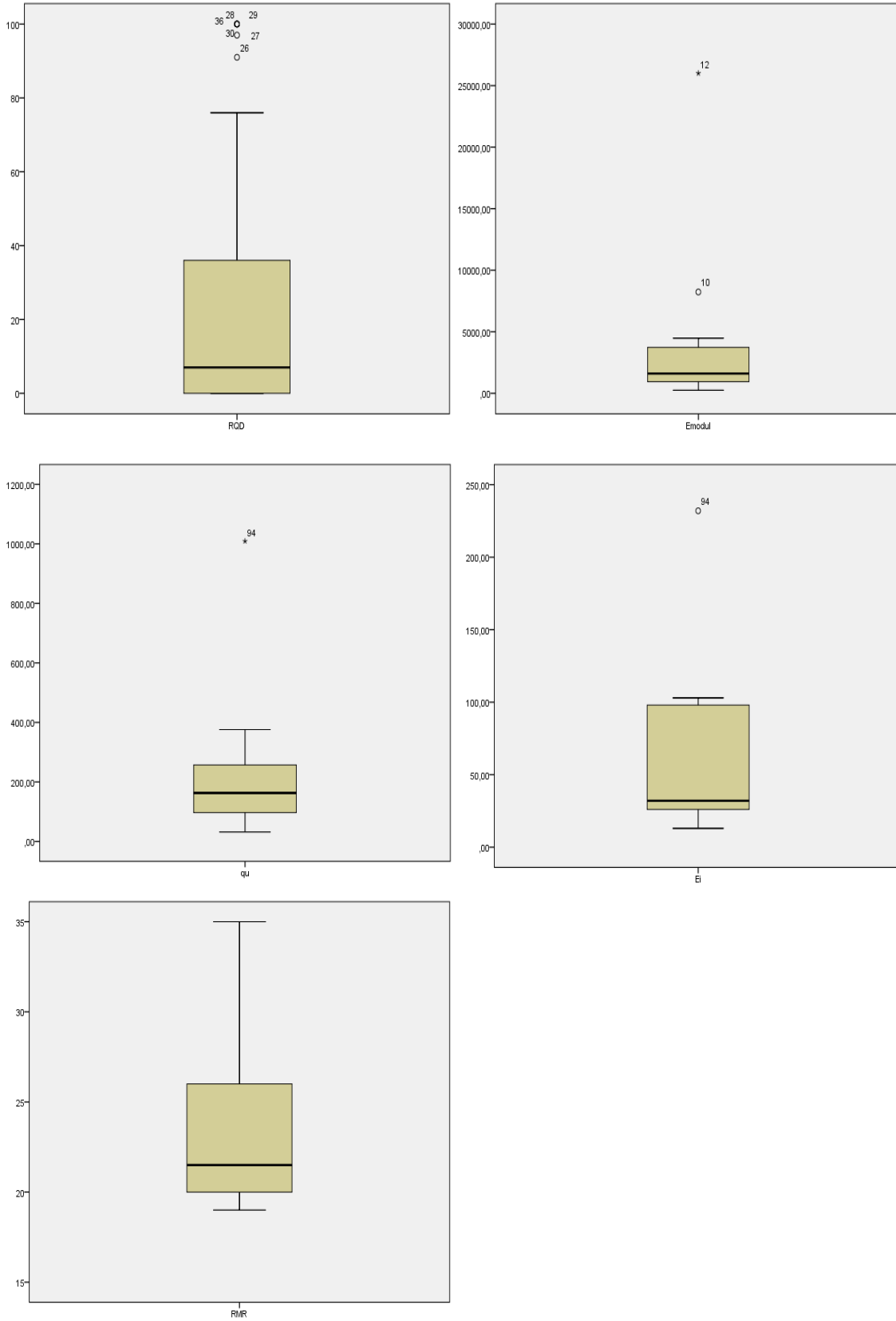
Farklı kaya grupları için yapılan uç değer analizler için, genel dağılımı; kabul edilebilir aralığı ve uç değer olarak gözüken değer satırlarını gösterir “box plot” grafikleri; Şekil 6.1. ve Şekil 6.13. aralığında gösterilmektedir. Çalışmalar, uç değer analizleri ile tespit edilen verilerin ayıklanması ile iyileştirilen veri tabanı üzerinden devam ettirilmiştir.



Şekil 6.1. Kartal formasyonu'na ait kiltashi seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları

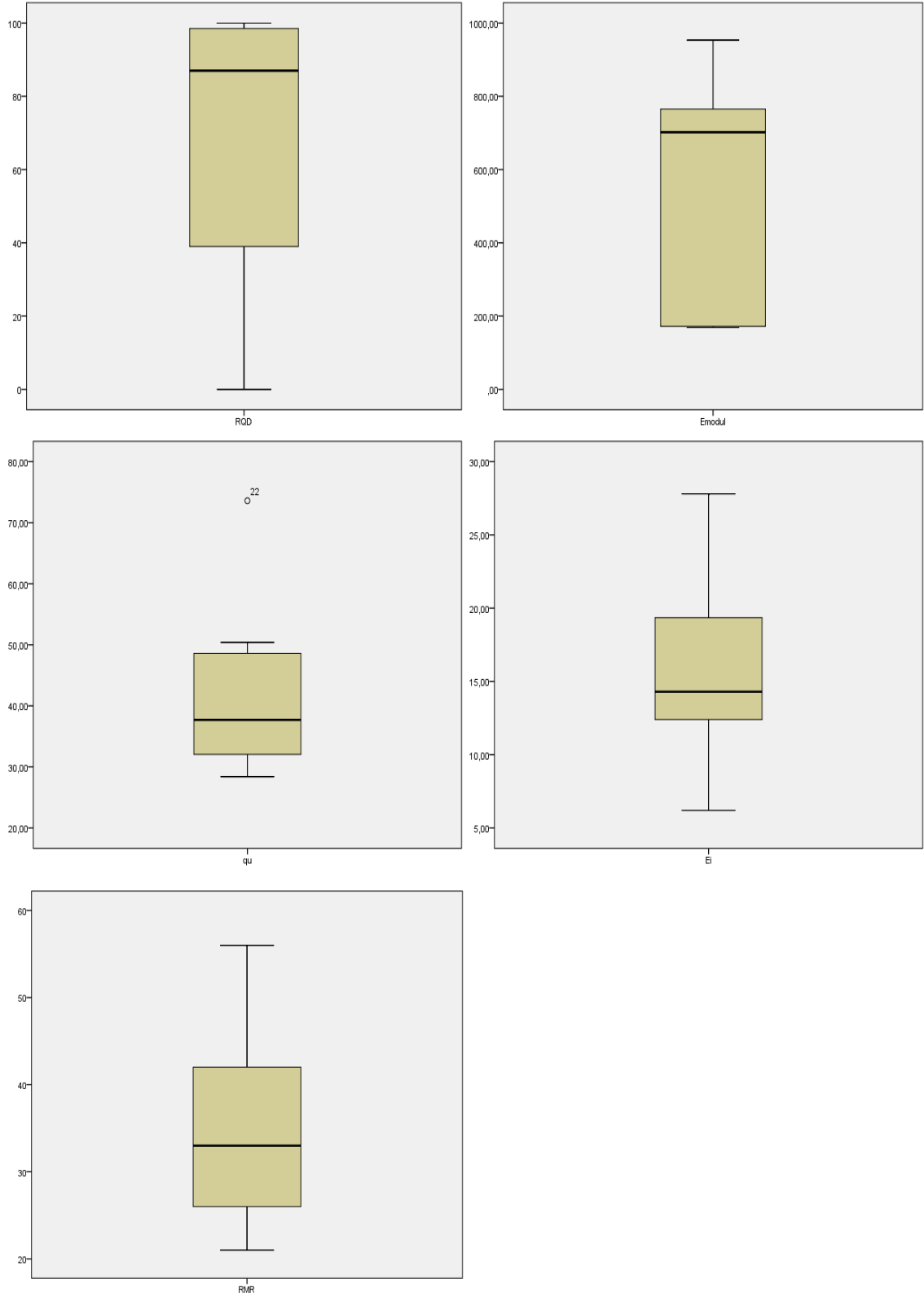


Şekil 6.2. Kurtköy formasyonu'na ait çakıltaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları

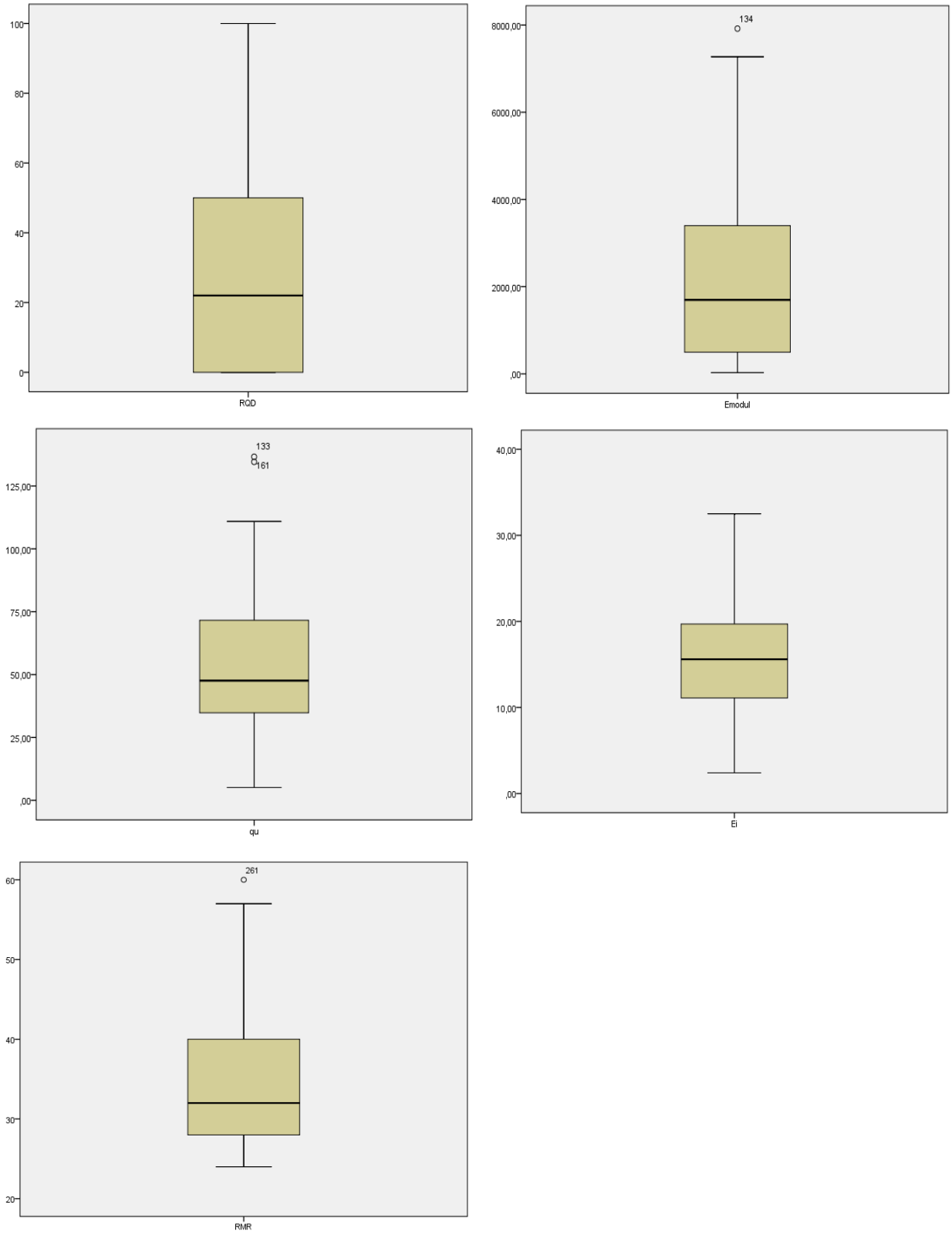


Şekil 6.3. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları

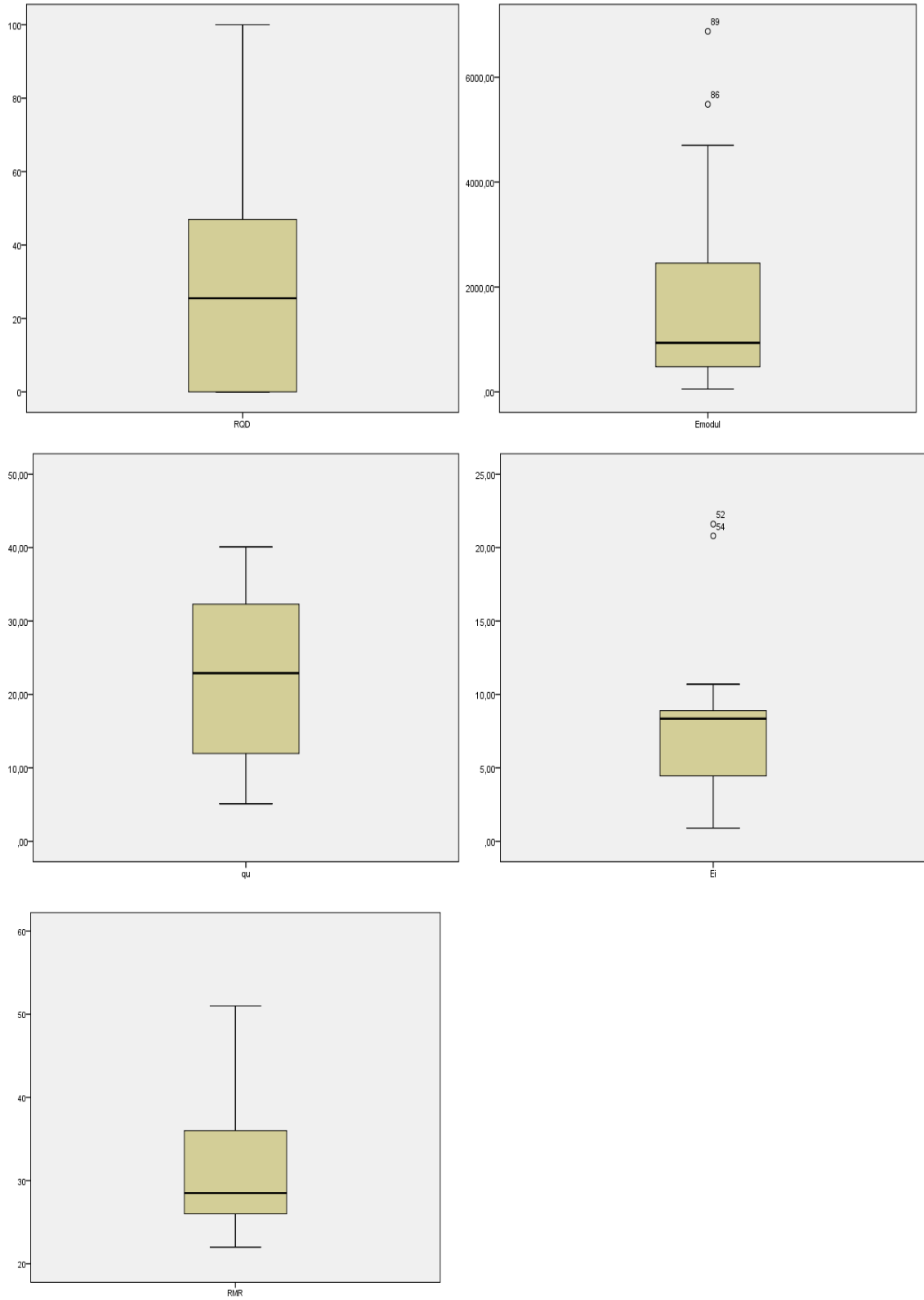




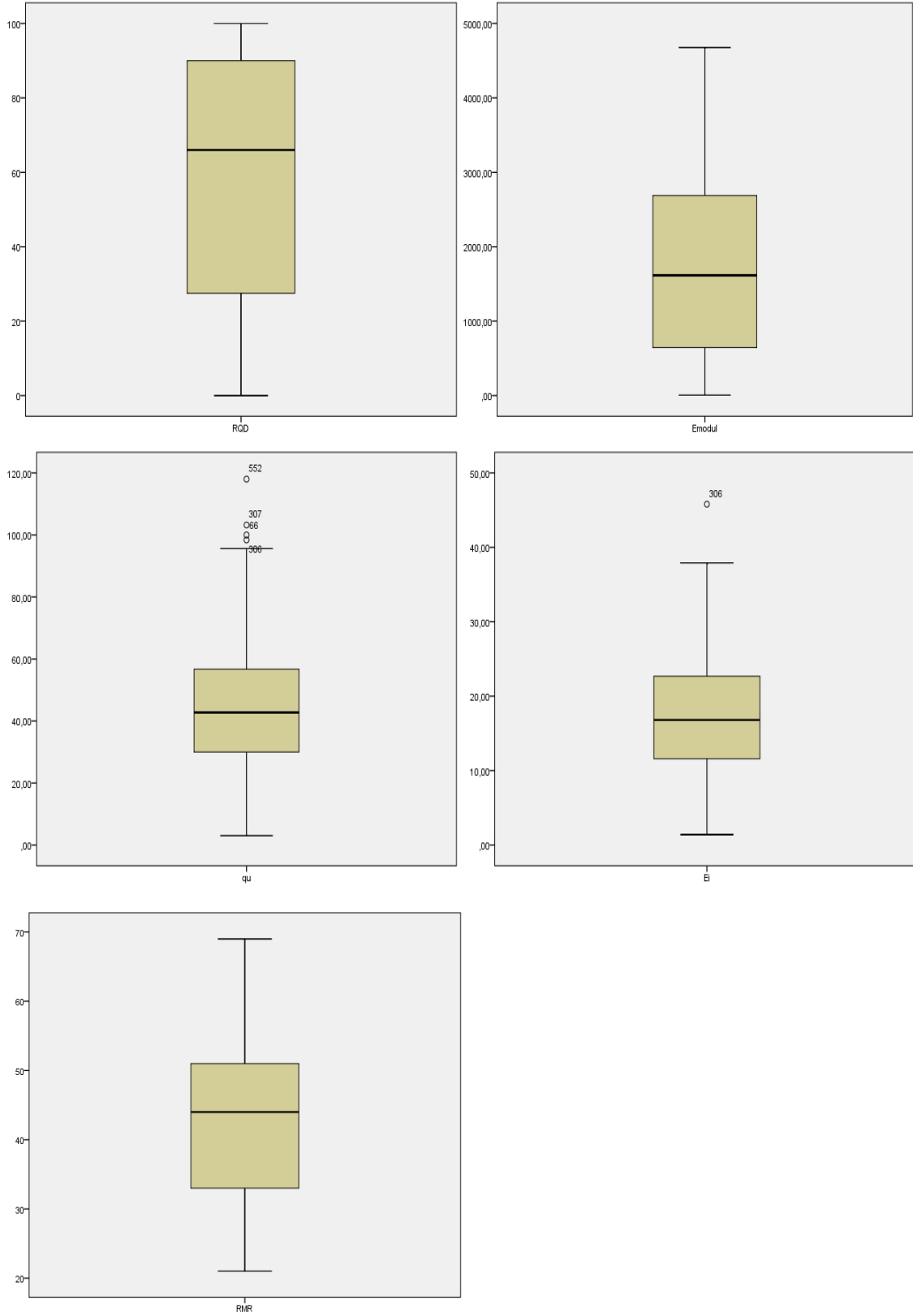
Şekil 6.4. Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları



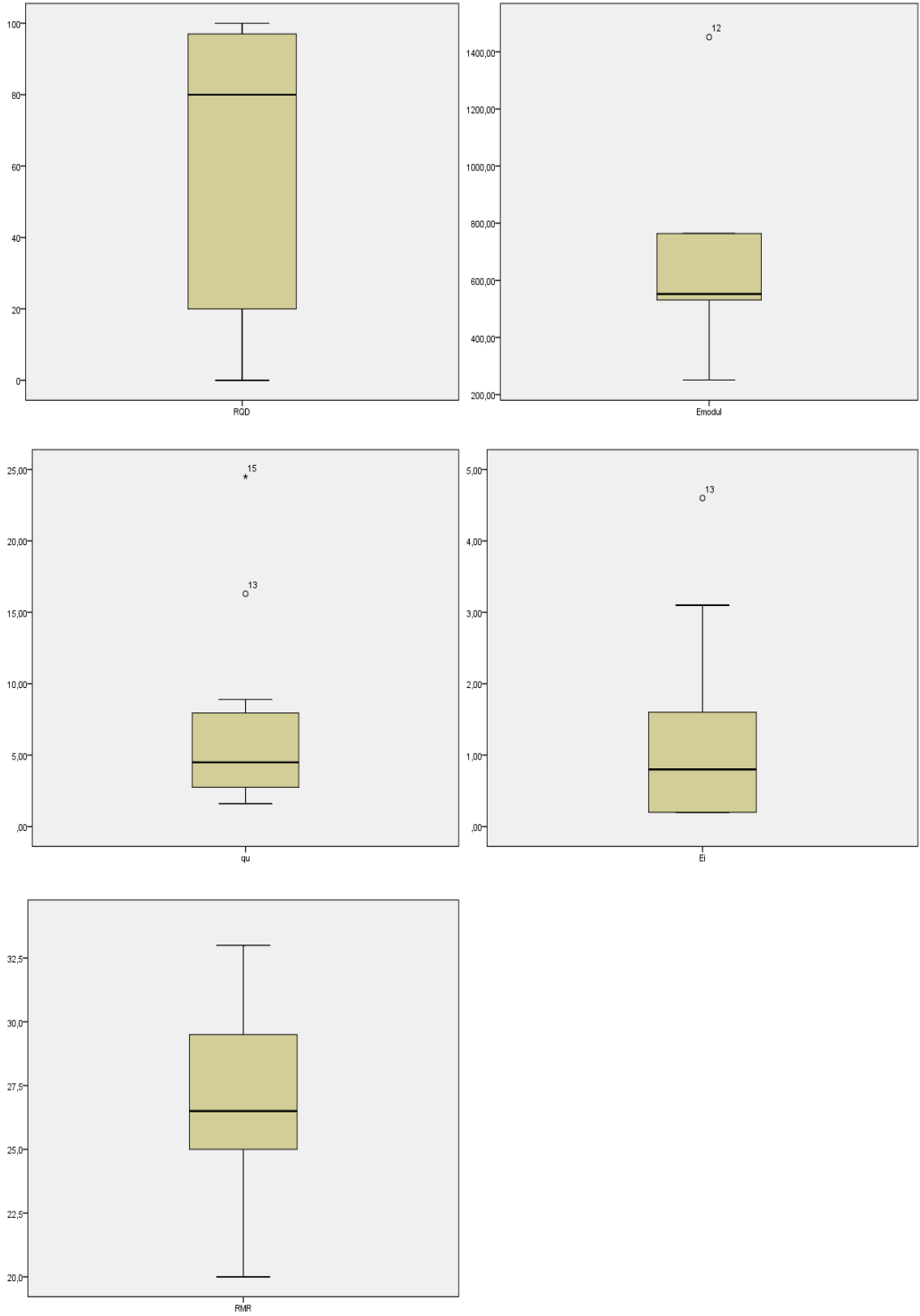
Şekil 6.5 Gözdağ formasyonu'na ait kuvars kumtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları



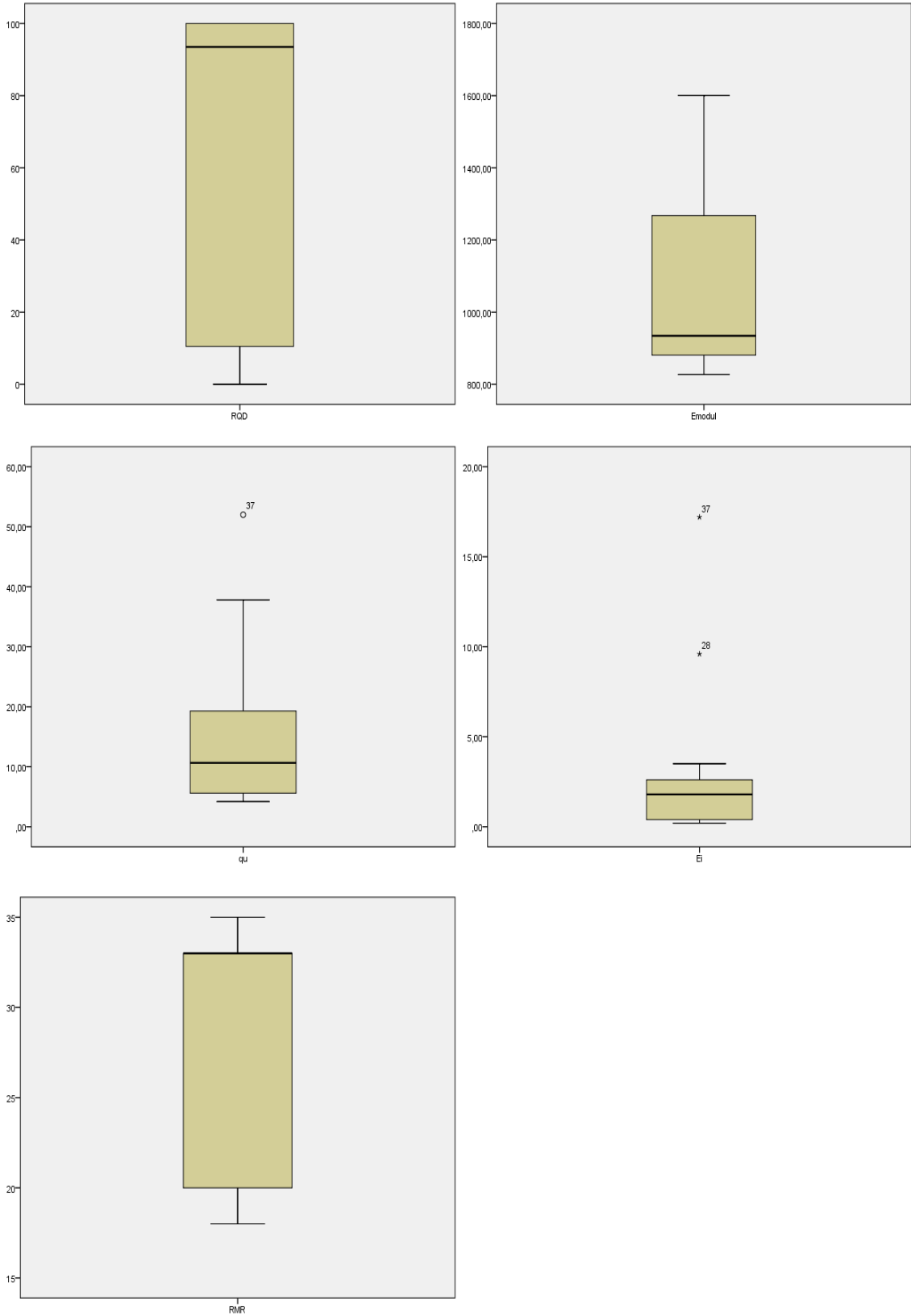
Şekil 6.6. Dolayoba formasyonu'na ait kıltaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları



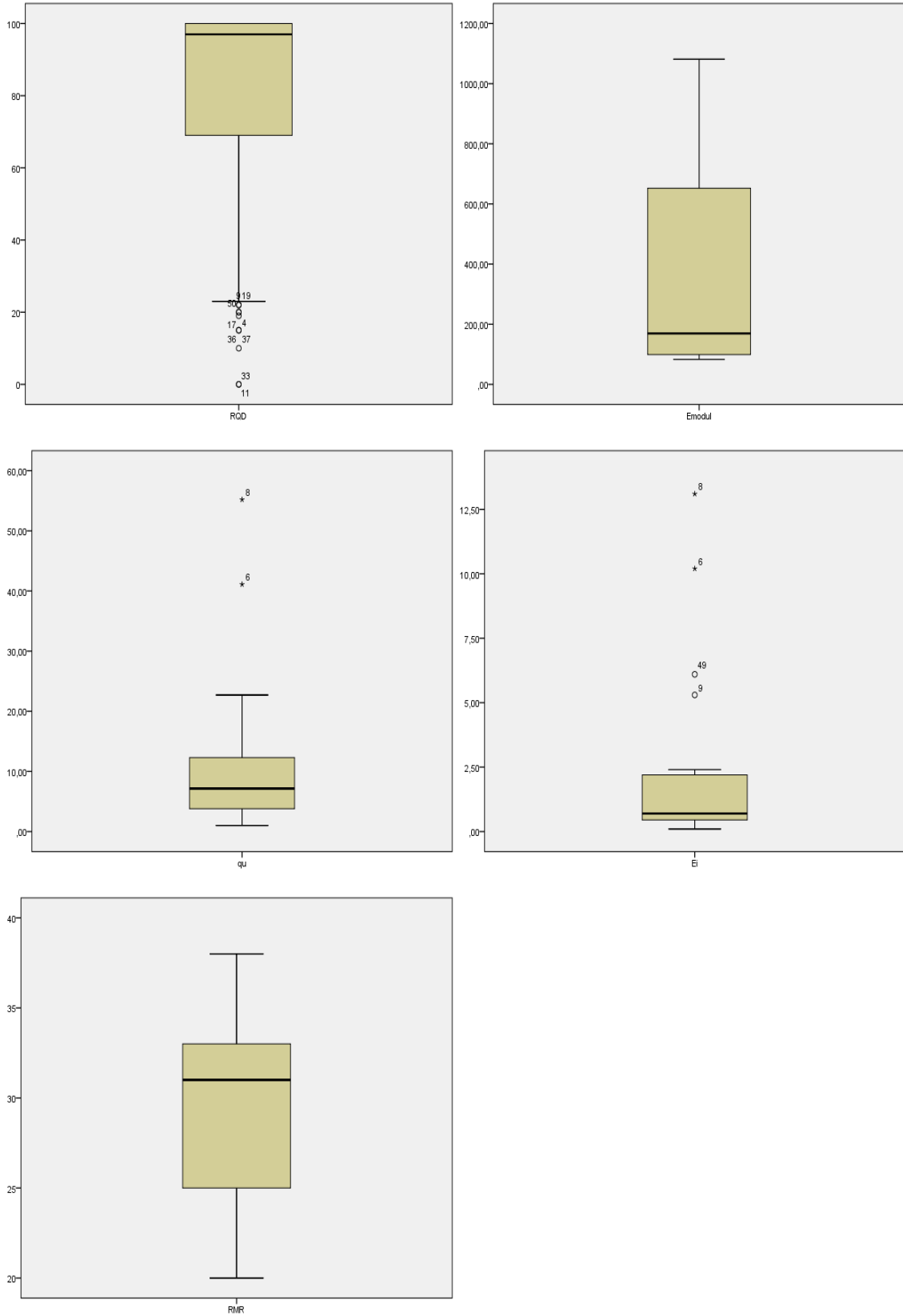
Şekil 6.7. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları



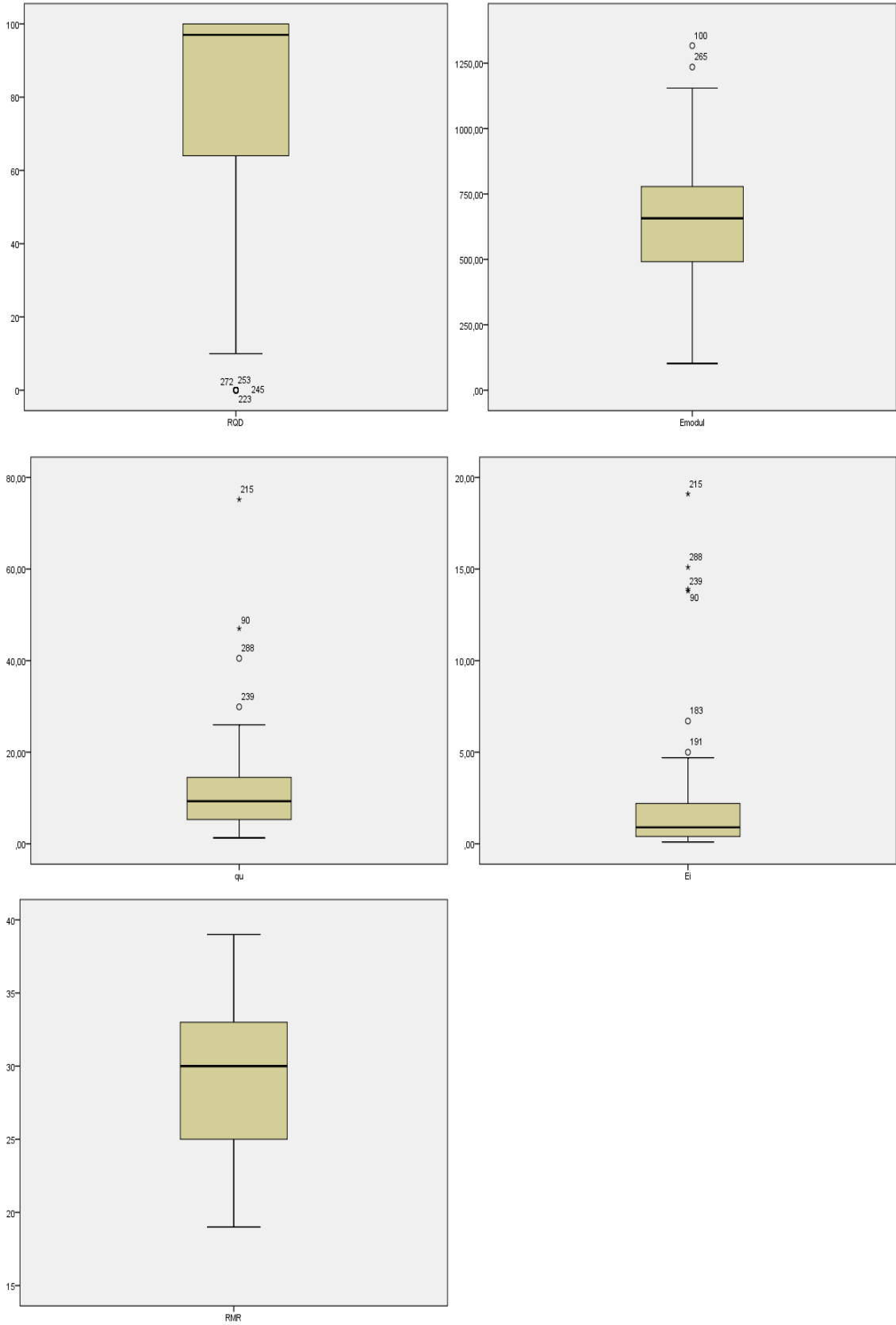
Şekil 6.8. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait çakıltaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları



Şekil 6.9. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları

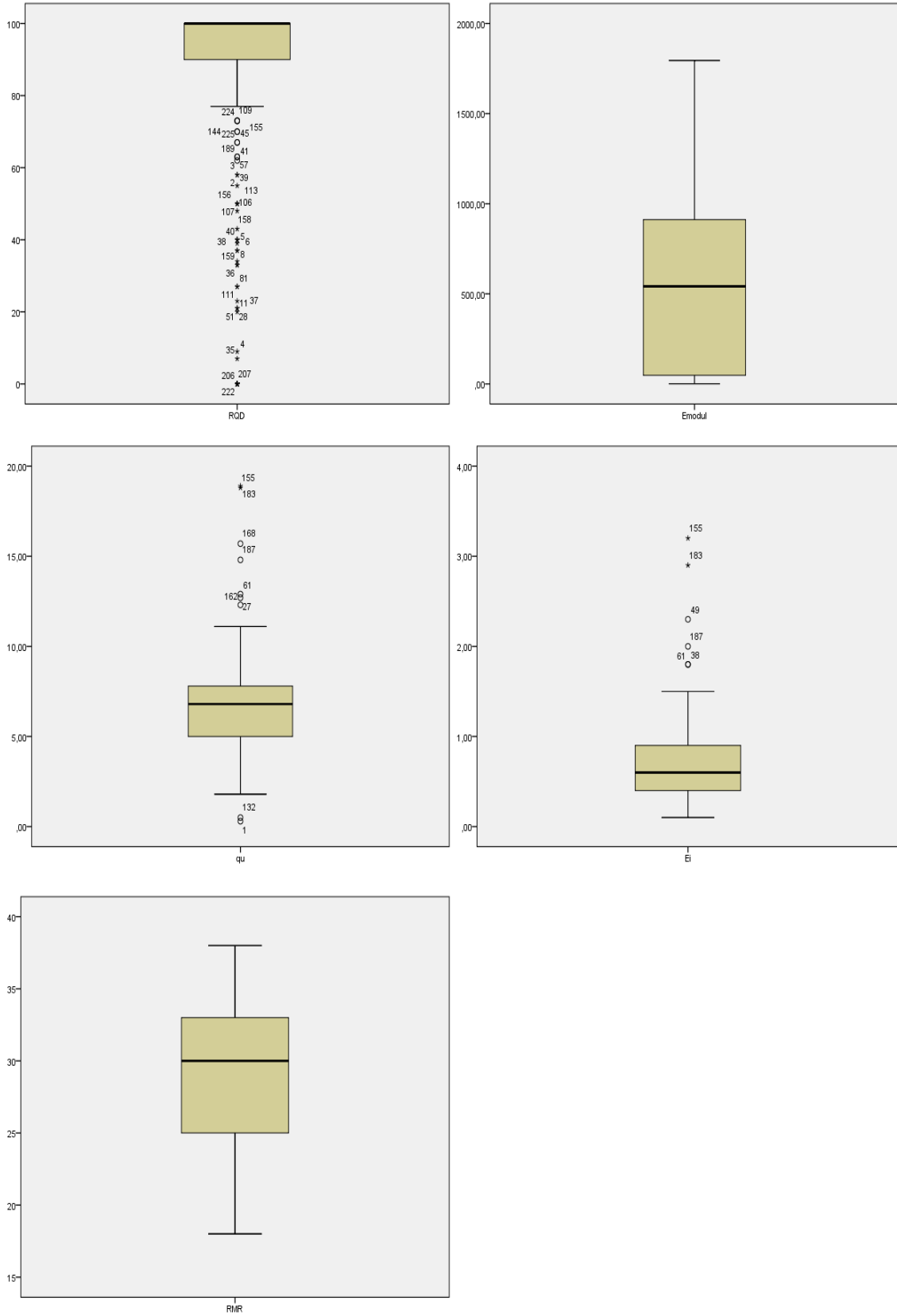


Şekil 6.10. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait kumtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları

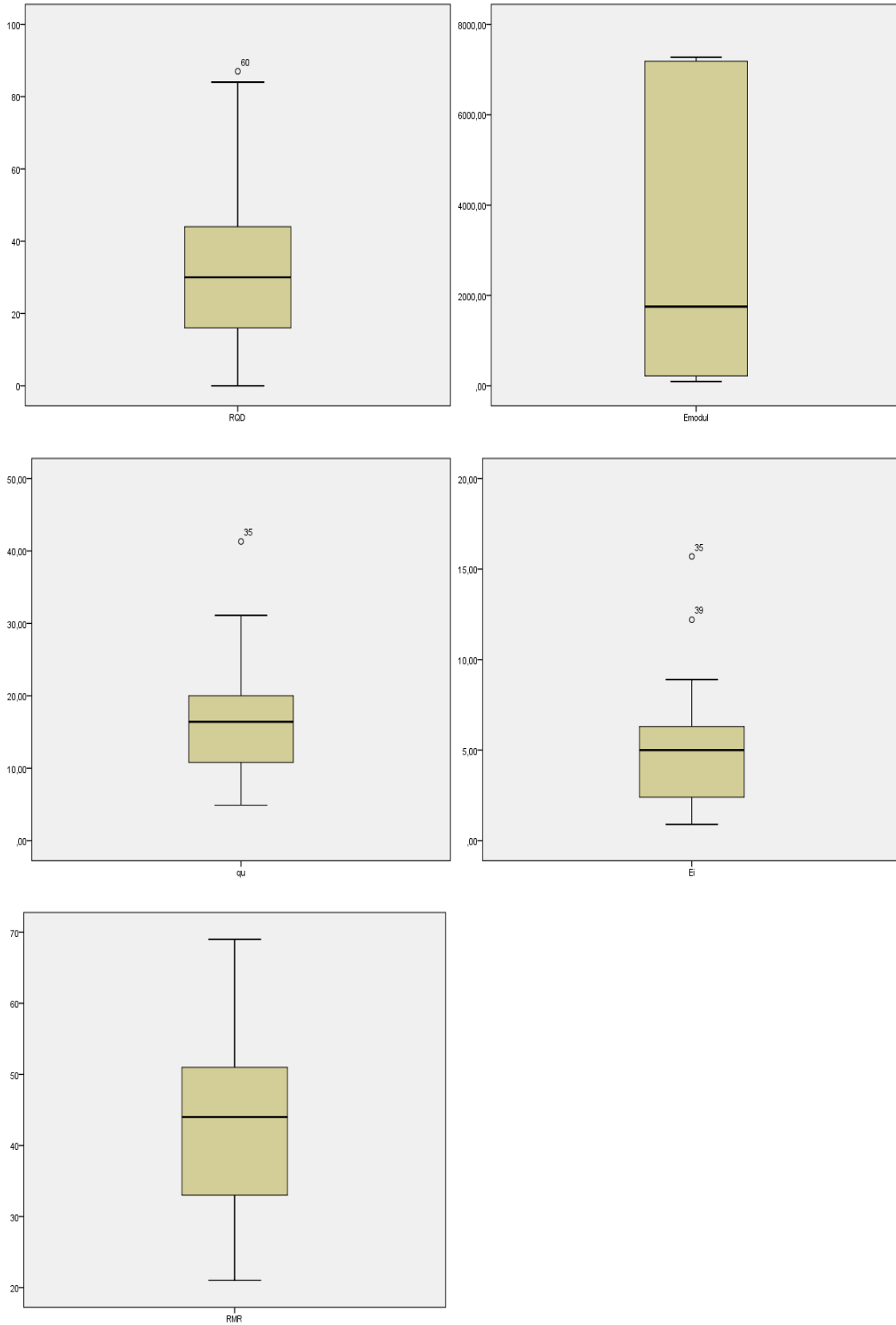


Şekil 6.11. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait kıltaşı – siltaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları





Şekil 6.12. İslambeyli – İhsaniye formasyonları'na ait marn seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları



Şekil 6.13. Kırklareli fornasyonu'na ait kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen uç değer analiz çıktıları

Gerçekleştirilen uç değer analizlere bağlı olarak ortaya çıkan “box plot” grafiklerinde, farklı kayaç grupları ve farklı parametreler özelinde, genel dağılımın dışında yer alan ve dışarıda bırakılan veriler gösterilmiştir. Kayaç gruplarında, farklı parametrelerin uç değerlerine ilişkin değerlendirmeler şu şekilde özetlenebilir,

- Kartal formasyonu’na ait kiltaşlarında, kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametreleri genel olarak belirli bir dağılım içerisinde kalmaktadır. Deformasyon modülü ve kaya malzemesi elastisite modülü için, genel dağılım içerisinde kalan münferit değerler yer almaktadır.
- Kurtköy formasyonu’na ait çakıltaşı seviyelerinde tüm parametreler belirli bir dağılım aralığında yer almakta ve uç değer vermemektedir. Aynı formasyona ait kumtaşı seviyelerinde %90 – 100 arasında yer alan RQD değerine sahip seviyeler uç değer olarak belirlenmiştir. Bu seviyeler, çoğunluğu kırıklı ve orta – çok ayrılmış kaya kütleleri içinde yer alan masif kesimlerdir ve değerlendirme dışı bırakılmıştır.
- Gözdağ formasyonu’na ait kireçtaşı seviyelerinde, değerlendirme dışı bırakılacak uç değer grupları yer almamaktadır.
- Dolayoba formasyonu’na ait kiltaş seviyelerinde, tekil veriler dışında uç değer tespit edilmemiştir. Bu formasyona ait kireçtaşı seviyelerinde, 100 MPa ve üzeri UCS değerleri, genel aralıkların çok üstünde tespit edilmiştir. Formasyonun masif ve kristalin kesimlerini temsil eden bu değerler, kayaç grubunun genel özelliklerinden farklıdır ve değerlendirme dışı bırakılmıştır.
- İhsaniye – İslambeyli formasyonları’na ait kumtaşı – çakıltaşı ve kireçtaşı seviyelerinde, yazılım algoritmasına göre %30 değerinden düşük RQD puanları, uç değer olarak nitelendirilmiştir. Bu kayaç grubu, yüksek RQD ve düşük kaya malzemesi dayanım parametreleri sunan düşük dayanımlı kaya kütlesi özelliğindedir. Bu bağlamda, bu kesimlerdeki düşük RQD yüzdesine sahip kesimler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Aynı formasyon içerisinde yer alan marn seviyelerinde de, %70 ve altı RQD değeri sunan kesimler, değerlendirme dışı bırakılmıştır. Veri toplama bölgelerinde elde edilen karotlar %80 – 100 arası değere sahiptir ve bu nedenle, %70 altı RQD değeri veren kesimler uç değer olarak belirlenmiştir. Öte yandan, bu kayaç grubu için kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülü için sırası ile, 10 MPa ve 2 GPa

üzeri değerler genel ortalamanın çok üzerinde değerler oldukları için uç değer olarak nitelendirilmiş ve değerlendirme dışı bırakılmıştır. Formasyona ait kıltaşı – silttaşı seviyelerinde ise, marn seviyelerinde olduğu gibi, 20 MPa ve üzeri olarak ölçülen kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı ile, 5 GPa ve üzeri olarak ölçülen kaya malzemesi elastisite modül değerleri, ortalamaların üzerinde olduğu ve zayıf dayanımlı kaya malzemesi özelliğini yansıtmadığı gerekçesi ile uç değer olarak belirlenmiştir.

- Yapılan uç değer analizlerinde, hesaplanan RMR puanlarında sistematik uç değerler tespit edilmemiştir. Bunun nedeni, RMR puanının bir çok parametre esas alınarak hesaplanması, veri toplamada karşılaşılabilecek ölçüm – hesaplama hatalarının burada asgari düzeye indirgenmiş olmasıdır.

Uç değer analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, her kayaç grubunda; sistematik olarak ortaya çıkan uç değerler tespit edilmiş ve ayrılmıştır. Bu kesimler, kaya malzemesi olarak zayıf dayanımlı ancak devamlılığı yüksek kaya kütlelerdeki düşük RQD puana sahip kesimler ile, bu kayaç grupları içerisinde ortalamanın üstünde yer alan kaya malzemesi parametrelerine sahip kesimler olarak ön plana çıkmıştır. Her iki durumda da, kaya kütlesi; çok zayıf dayanımlı kaya kütlesi veya yüksek dayanımlı kaya kütlesi özelliklerine doğru geçiş yaptıkları için araştırma konusu kayaç grubu olmamaktadır ve bu geçişlere sebep olacak değerler, çalışma veri havuzundan çıkarılmıştır. Sahada yerinde ölçülen deformasyon modülü değerlerinde ve hesaplanan RMR puanlarında ise, münferit değerlerin dışında sistematik uç değerlere rastlanmamıştır. Bu durum, yerinde ölçülen deformasyon modüllerinin ve hesaplanan RMR puanlarının doğru metodolojiler ile elde edildiği fikrini ortaya çıkarmaktadır.

## **6.2.Elde Edilen Veri Tabanının Genel Özellikleri**

Saha, laboratuvar ve ofis ortamında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen ve uç değer analizleri ile iyileştirilerek nihai haline getirilen veri tabanına ait genel özellikler ve kullanılan değer aralıkları, bu bölümde irdelenmektedir. Tez çalışmalarının en önemli süreci olan, istatistiksel analiz çalışmaları; kaya grupları özelinde ön plana çıkan genel özellikler ve değer aralıkları üzerinden sürdürülmüştür. Farklı kaya grupları özelinde verilerin genel durumu, kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin tanımlayıcı istatistiksel parametreleri aşağıda özetlenmektedir. Değer aralıklarında, uç değer analizlerinde sistematik olarak elenen değerlerin haricinde kalan ancak yine de münferit

olarak gözükebilen parametreler yer almaktadır. Bu değerler sistematik olmadığı için, analizlerde dikkate alınmamaktadır.

### 6.2.1. Kartal Formasyonu – Kıltaşı

Çalışma bölgelerinde, koyu gri – siyah renkli, orta dayanımlı ve orta – çok bozunmuş özellikte gözlenen kıltaşları için, sondajlar, yerinde deneyler ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar ve hesaplanan RMR puanlarına bağlı olarak ortaya çıkan değer aralıkları Çizelge 6.1.’de verilmektedir. Kartal formasyonu’na ait kıltaşlarında elde edilen veriler dikkate alındığında, RQD puanına göre zayıf (Deere,1964) ve RMR puanına göre zayıf kaya özelliği sunmaktadır (Bieniawski, 1989). Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanım değerlerine göre ise yine zayıf dayanımlı kaya özelliği göstermektedir (ISRM, 1981).

Çizelge 6.1. Kartal formasyonu’na ait kıltaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	342	61,50	1,00	62,50	24,9000	12,36546
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	342	147,60	2,40	150,00	59,7600	29,67710
EModul(MPa)	53	4173,24	4,36	4177,60	1230,8201	1060,65843
RQD(%)	342	100	0	100	39,26	33,096
RMR	342	35	21	56	34,73	10,252
qu(MPa)	117	58,50	,60	59,10	23,6538	12,48166
EIntact(GPa)	113	17,80	,00	17,80	7,3062	4,15104

### 6.2.2. Kurtköy Formasyonu – Çakıltaşı

Çalışma bölgesinde yapılan sondajlarda, bordo renkli, orta dayanımlı ve orta ayrıışmış karakterde gözlenen Kurtköy formasyon’na ait çakıltaşı kesimleri için, saha ve laboratuvar araştırma çalışmaları ile, hesaplanan RMR puanları ve çalışma derinlik aralıkları Çizelge 6.2.’de verilmektedir. Çakıltaşı seviyeleri için ağırlıklı olarak hesaplanan RQD ve RMR değerleri, bu seviyelerin zayıf – orta dayanımlı kaya kütlesi olduğunu göstermektedir (Deere, 1964 ve Bieniawski, 1989). Laboratuvarda ölçülen tek eksenli sıkışma dayanım değerleri, Atlewell ve Farmer (1976) tarafından tarif edilen “zayıf çimentolu sedimanter kayaçlar” tanımına uymaktadır.

Çizelge 6.2. Kurtköy formasyonu'na ait çakıltaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Derinlik(m)	164	56,00	1,40	57,40	25,0024	12,83328
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	164	140,00	3,50	143,50	62,5061	32,08319
EModul(MPa)	29	4165,70	46,90	4212,60	1193,5793	965,32214
RQD(%)	164	36	24	60	41,53	10,911
RMR	164	100	0	100	58,18	36,029
qu(MPa)	54	92,00	10,10	102,10	44,0019	21,54514
EIntact(GPa)	51	28,80	6,00	34,80	17,1510	6,80269

### 6.2.3. Kurtköy Formasyonu – Kumtaşı

Kurtköy formasyonu'nun kumtaşı seviyeleri de tıpkı çakıltaşı seviyeleri gibi bordo renkli, orta dayanımlı – dayanımlı ve orta – çok ayrılmış karakterdedir. Bu kayaç grubu için elde edilen kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerinin değer aralıkları ile çalışma derinlikleri Çizelge 6.3.'te verilmektedir.

Çizelge 6.3. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	94	39,80	2,00	41,80	25,7840	8,22858
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	94	99,50	5,00	104,50	64,4601	20,57145
EModul(MPa)	15	2576,50	24,30	2600,80	485,6200	746,17731
RQD(%)	89	100	0	100	16,93	24,319
RMR	94	33	22	55	29,04	8,650
qu(MPa)	9	91,20	9,70	100,90	34,8111	28,32263
EIntact(GPa)	9	21,90	1,30	23,20	9,1111	7,85660

### 6.2.4. Gözdağ Formasyonu – Kireçtaşı

Gözdağ formasyonu içinde yer alan kireçtaşı seviyeleri, formasyon içinde nadir olarak gözükmemektedir. Beyaz – krem renkli, dayanımlı ve orta – çok ayrılmış yapıda tespit

edilmiştir. Bu kayaç grubuna ait kaya kütle ve kaya malzeme parametreleri ile çalışma derinliklerinin değer aralıkları Çizelge 6.4.’te sunulmaktadır. Formasyona ait kireçtaşı seviyelerinden elde edilen RQD ve RMR değerleri, kayaç grubunun orta dayanıma sahip kaya kütle özelliğinde olduğunu, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanım değerleri ise zayıf – orta dayanımlı kaya özelliğinde olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.4. Gözdağ formasyonu’na ait kireçtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	40	41,10	5,70	46,80	28,5350	11,82469
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	40	115,08	15,96	131,04	79,8980	33,10914
EModul(MPa)	10	784,08	169,32	953,40	544,4770	330,12819
RQD(%)	40	100	0	100	69,23	32,967
RMR	40	35	27	62	45,57	10,713
qu(MPa)	12	45,20	28,40	73,60	41,5083	12,85743
EIntact(GPa)	11	21,60	6,20	27,80	15,7727	6,32188

#### 6.2.5. Gözdağ Formasyonu – Kuvars Kumtaşı

Gözdağ formasyonu’nun ana kayaç grubunu oluşturan kuvars kumtaşı seviyelerinde, yer yer kuvarsitler yer almaktadır. Ancak yüksek dayanım ve masif kaya kütle özelliğine sahip bu kesimlerde elde edilen veriler, bu kayaç grubu için veri tabanına dahil edilmemiştir. Söz konusu kayaç grubuna ait parametre değer aralıkları Çizelge 6.5.’tedir. Formasyon içinde yer alan kuvars kumtaşı seviyeleri, ağırlıklı RQD ve RMR puanlarına göre düşük dayanımlı (Deere,1964; Bieniawski, 1989) özelliktedir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen tek eksenli sıkışma dayanımları ise zayıf dayanımlı sedimanter kayaç özelliği sunmaktadır (Atlewell ve Farmer, 1976).

Çizelge 6.5. Gözdağ formasyonu'na ait kuvars kumtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	269	70,80	2,20	73,00	30,8888	16,14582
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	269	169,92	5,28	175,20	74,1332	38,74996
EModul(MPa)	37	7246,30	27,10	7273,40	2236,8378	2082,43829
RQD(%)	269	100	0	100	29,63	29,871
RMR	268	36	24	60	34,59	8,415
qu(MPa)	77	129,50	5,10	134,60	52,4753	26,55831
EIntact(GPa)	78	30,10	2,40	32,50	15,7846	6,41512

### 6.2.6.Dolayoba Formasyonu – Kıltaşı

Kıltaşları, Dolayoba formasyonu içerisinde nadir gözlenen bir kayaç grubu olarak yer almaktadır. Litolojik yapısı gereği ile zayıf kaya özelliği gösteren kıltaşı seviyelerine ait araştırma çalışmalarında tespit edilen ve hesaplanan kaya kütle ve kaya malzeme parametreleri Çizelge 6.6.'da verilmektedir. Kireçtaşı seviyelerinde olduğu gibi, bu formasyona ait kıltaşı seviyelerinde de düşük dayanımlı kaya kütlelerine uygun RQD ve RMR seviyeleri ön plana çıkmaktadır. Kıltaşı türü kayaç grubunun genel fiziksel özellikleri ile uyumlu şekilde, düşük dayanımlı kaya malzemesi özelliği, bu kayaç grubunda tespit edilmiştir (ISRM,1981).

Çizelge 6.6. Dolayoba formasyonu'na ait kıltaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Ornek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	110	44,70	3,80	48,50	21,2118	9,41538
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	110	107,28	9,12	116,40	50,9084	22,59690
EModul(MPa)	22	4644,60	55,70	4700,30	1422,5000	1441,22211
RQD(%)	110	100	0	100	31,98	30,421
RMR	108	29	22	51	31,94	7,239
qu(MPa)	24	35,00	5,10	40,10	22,1958	11,41960
EIntact(GPa)	26	9,80	,90	10,70	6,8231	2,99350



### 6.2.7. Dolayoba Formasyon – Kireçtaşı

Çalışma alanında en yüksek sayıda verinin elde edildiği kireçtaşları, yer yer masif kaya kütle özelliği gösteren ancak, yer yer karstik boşluklar ve karstik boşluk dolguları içeren kayaç grubudur. Veri tabanında yer alan kayaç grupları içerisinde en iyi kaya kalite değerini veren parametreler, Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşları içerisinde yer almaktadır. Bu kayaç grubuna ait parametre değer aralıkları ve çalışma derinlikleri Çizelge 6.7.'de yer almaktadır. Deere,1964 ve Bieniawski,1989 tarafından önerilen RQD ve RMR tabanlı sınıflamalara göre, kireçtaşı seviyeleri orta dayanımlı kaya kütlelerini temsil etmektedir. Ancak ölçülen kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanım verileri zayıf dayanımlı – orta dayanımlı kaya malzemesi tanımı yapmaya uygundur.

Çizelge 6.7. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşlarında elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	575	54,60	2,40	57,00	25,1855	11,14643
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	575	147,42	6,48	153,90	68,0008	30,09537
EModul(MPa)	109	4671,20	6,00	4677,20	1752,9844	1371,46636
RQD(%)	575	100	0	100	58,41	33,960
RMR	568	48	21	69	42,54	11,049
qu(MPa)	249	95,40	3,00	98,40	43,1205	19,89858
EIntact(GPa)	234	36,50	1,40	37,90	16,9607	7,90386

### 6.2.8. İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Çakıtaşı, Kireçtaşı, Kumtaşı Ardalanması

İhsaniye ve İslambeyli formasyonları içerisinde, bir çok sondajda ardalanmalar veya birbirini takip eden seviyeler olarak gözlenen bu kayaç grupları, veri sayılarının az olması ve çalışmalarda kullanılabilmesi amacı ile birleştirilmiştir. Kaya malzeme ve kaya kütle özellikleri birbirine yakın seyreden bu kayaç grupları, orta – çok ayrılmış zayıf kaya özellikleri gösterirler. Birleştirilmiş kayaç gruplarına ait parametre değer aralıkları ve derinlik aralıkları, Çizelge 6.8.'de verilmektedir. Bu seviyelere ait kaya kütle parametreleri, orta dayanımlı kaya kütlelerini tarif etmesine karşın, ölçülen kaya malzemesi

tek eksenli sıkışma dayanım değerleri, çok zayıf – zayıf dayanım özelliği göstermektedir. Bu nedenle, bu seviyeler de düşük dayanımlı kaya kütle özelliğini yansıtmaktadır.

Çizelge 6.8. İslambeyli – İhsaniye formasyonu'na ait çakıltaşı, kireçtaşı ve kumtaşı seviyelerinde elde edilen parametre değer aralıkları

	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	178	115,70	,70	116,40	37,3084	19,91861
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	178	266,11	1,61	267,72	85,8094	45,81280
EModul(MPa)	12	1517,75	82,85	1600,60	701,2008	504,40432
RQD(%)	178	100	0	100	71,92	36,891
RMR	177	36	22	58	44,20	11,596
qu(MPa)	52	36,80	1,00	37,80	9,6827	7,57146
EIntact(GPa)	46	9,50	,10	9,60	1,6174	1,87940

### 6.2.9. İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Kıltaşı Silттаşı Seviyeleri

İhsaniye ve İslambeyli formasyonları içerisindeki kıltaşı ve silттаşı seviyeleri de, çok yakın kaya malzeme ve kaya kütle özellikleri göstermeleri ve belirli kesimlerde geçişler göstermeleri nedeni ile bir grup olarak nitelendirilmiş ve çalışmalarda kullanılmıştır. Açık bej – kahverengi renkli, orta – çok ayrıışmış zayıf kaya kütle özellikleri gösteren bu birimlere ait veri tabanında yer alan parametreler Çizelge 6.9.'da verilmektedir. Formasyona ait kıltaşı – silттаşı seviyeleri, iyi kaya kalitesi özelliği sunan RQD ve orta kaya kütle özelliği sunan RMR değerlerine sahiptir (Deere, 1964 ve Bieniawski, 1989) ancak, bu seviyelere ait kaya malzemesi parametreleri zayıf pekişmiş ve ayrıışmış kaya malzemesi özelliklerini ifade etmektedir.

Çizelge 6.9. İslambeyli – İhsaniye formasyonu’na ait kilitaşı - silttaşı seviyelerinde elde edilen parametre değeri aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	315	96,90	,60	97,50	41,4362	21,75565
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	315	213,18	1,32	214,50	91,1596	47,86242
EModul(MPa)	13	1052,60	102,20	1154,80	579,1692	282,94193
RQD(%)	311	100	0	100	80,35	29,240
RMR	315	37	22	59	45,82	9,986
qu(MPa)	71	24,70	1,30	26,00	9,9831	5,83499
EIntact(GPa)	64	4,60	,10	4,70	1,2422	1,09759

### 6.2.10. İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Marn

Çalışma alanında tespit edilen marn türü kayaçlar, krem – bej – beyaz renkli, yüksek karbonat içerikli, düşük dayanımlı – yer yer dağılgan, orta – çok ayrışmış ve zayıf kaya kütle özellikleri taşımaktadır. Kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerinin genel değeri, diğeri kayaç gruplarına göre daha düşük seviyelerde olup, çalışmalarda kullanılan bu parametrelerin genel dağılımlarını gösteren parametre, Çizelge 6.10’da verilmektedir. Çizelgedeki ortalama RQD ve RMR değeri, kaya kütlelerinin devamlılığı ve süreksizlik koşulları anlamında, iyi kalitede olduğunu göstermektedir. Ancak, kayaç grubunun çok düşük tek eksenli sıkışma dayanımı ve elastisite modülüne sahip olması, marn seviyelerinin de düşük dayanımlı kaya kütleleri olarak nitelendirilmesine olanak tanımaktadır.

Çizelge 6.10. İslambeyli – İhsaniye formasyonu’na ait marn seviyelerinde elde edilen parametre değeri aralıkları

Parametre	Örnek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	256	107,80	,70	108,50	36,8934	26,28467
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	256	237,16	1,54	238,70	81,1654	57,82627
EModul(MPa)	17	1793,74	1,16	1794,90	605,2200	589,97674
RQD(%)	231	100	0	100	91,99	20,387
RMR	256	36	22	58	46,82	8,546
qu(MPa)	54	11,10	1,80	12,90	6,4315	2,64887
EIntact(GPa)	51	1,90	,10	2,00	,6235	,36474

### 6.2.11. Kırklareli Formasyonu – Kireçtaşı

Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları, krem – beyaz renkli, orta sert, orta dayanımlı ve orta – çok ayrılmış kaya özelliği göstermektedir. Neojen yaşlı genç bir kireçtaşı olması nedeni ile, içerisinde karstik boşluklar ya da karstik boşluk dolguları gözlemlenmemiştir. Bu kayaç grubuna ait kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerine ilişkin genel özellikler Çizelge 6.11.'de verilmektedir. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları, kaya kütlesi parametreleri ve kaya malzemesi parametreleri değerlendirildiğinde, düşük dayanımlı kaya kütlesi özelliği göstermektedir. (Deere,1964; Bieniawski, 1989 ve ISRM,1981)

Çizelge 6.11. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşı seviyelerinde elde edilen parametre değer aralıkları

Parametre	Ornek Sy	Aralık	Minimum	Maksimum	Ortalama	Std.Sapma
Derinlik(m)	98	38,90	2,30	41,20	24,0929	10,05428
O.Yuku(t/m <sup>3</sup> )	98	89,47	5,29	94,76	55,4136	23,12484
EModul(MPa)	12	7178,50	93,20	7271,70	3362,2083	3435,25636
RQD(%)	97	84	0	84	30,56	20,548
RMR	95	26	24	50	33,00	6,140
qu(MPa)	28	26,20	4,90	31,10	15,3393	6,75367
EIntact(GPa)	28	11,30	,90	12,20	4,8543	2,76354

Yukarıda ayrı ayrı irdelenen kayaç gruplarında, İstanbul Paleozoyik İstifi'ne ait kayaç gruplarında genel olarak kaya malzemesi parametreleri, yüksek dayanımlı özellik gösterirken, kaya kütlesi parametreleri parçalı kaya özellikleri taşımaktadır. Avrupa yakasındaki veri toplama bölgelerinden elde edilen genç sediman çökelleri ise; kaliteli kaya kütlesi özellikleri gösterip (orta – yüksek RQD ve orta RMR), zayıf ve düşük dayanımlı kaya malzemesi özellikleri ile temsil edilmektedir. Her iki durum, kaya kütlelerinin dayanımına bütün olarak bakıldığında, düşük dayanımlı kaya kütlesi özelliğini temsil etmektedir. Presiyometre deneyleri ile yerinde ölçülen deformasyon modül değerleri ayrıca bu duruma işaret etmektedir.

Kayaç gruplarına ait verilere bakıldığında, ortalama ve uç değerlere oranla en yüksek standart sapmalar RQD puanlarında ve deformasyon modüllerinde tespit edilmiştir. Bu durum, söz konusu parametrelerin daha geniş yayılım aralığına sahip olduğu, farklı derinlik ve örtü yükü koşullarında değişkenlik göstermesi ile ilgilidir. Kaya malzemesinin

elastisite modülü ve tek eksenli sıkışma dayanım değerleri, kayaç tipi özelinde daha spesifik değerler ile ifade edildiğinden standart sapmaları kıyasla daha düşük seviyededir.

### **6.3. Literatürdeki Ampirik Deformasyon Modülü Eşitliklerinin Yorumlanması**

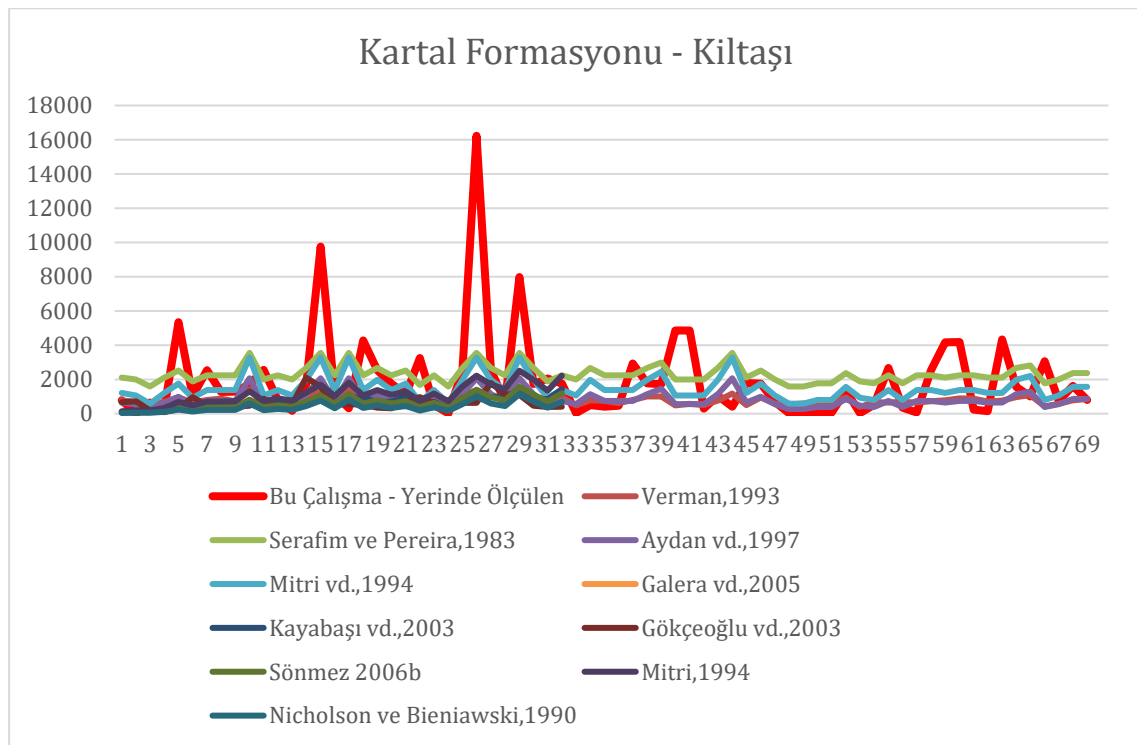
Elde edilen veri tabanı ve veri grupları üzerinde, literatürde var olan, akademik çalışmalarda ve tasarım çalışmalarında sıklıkça kullanılan ampirik eşitlikler yardımı ile, eşitlik test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Veri tabanında yer alan kaya kaya malzeme parametreleri ve kaya kütle parametreleri kullanılmış, literatür çalışmalarında yer alan yaklaşım ve formüller kullanılarak kaya kütle deformasyon modülleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu deformasyon modülleri, kayaç grupları içerisinde yer alan ve presiyometre deneyleri ile tayin edilen kaya kütle deformasyon modülleri ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Yapılan bu çalışma ile, literatürde sıklıkla kullanılan seçili ampirik eşitliklerin tahmin performansı; bu çalışmaya ait veri tabanı esas alınarak yorumlanmıştır.

- Karşılaştırma ve yorumlama süreçlerinde faydalanılan literatür formüller ve kullandığı parametreler Çizelge 6.12’de verilmektedir. Kullanılan eski eşitliklerde, veri havuzunda yer alan parametrelerin kullanıldığı formüller seçilmiştir (Çizelge 6.12.). Farklı formüller ile birlikte elde edilen tüm parametreler presiyometre sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için MPa birimine çevrilmiş, karşılaştırmalar bu şekilde yapılmıştır.
- Presiyometre deneylerinden elde edilen deformasyon modülleri üzerinde, herhangi bir düzeltme katsayısı uygulanmamıştır.
- Karşılaştırma ve yorumlama çalışmaları sırasında, formül ile bulunan sonuç ile presiyometre ile bulunan sonuçlar çizelgeler üzerinde dağıtılarak gösterilmiştir. Yorumlamalar bu doğrultuda yapılmıştır.

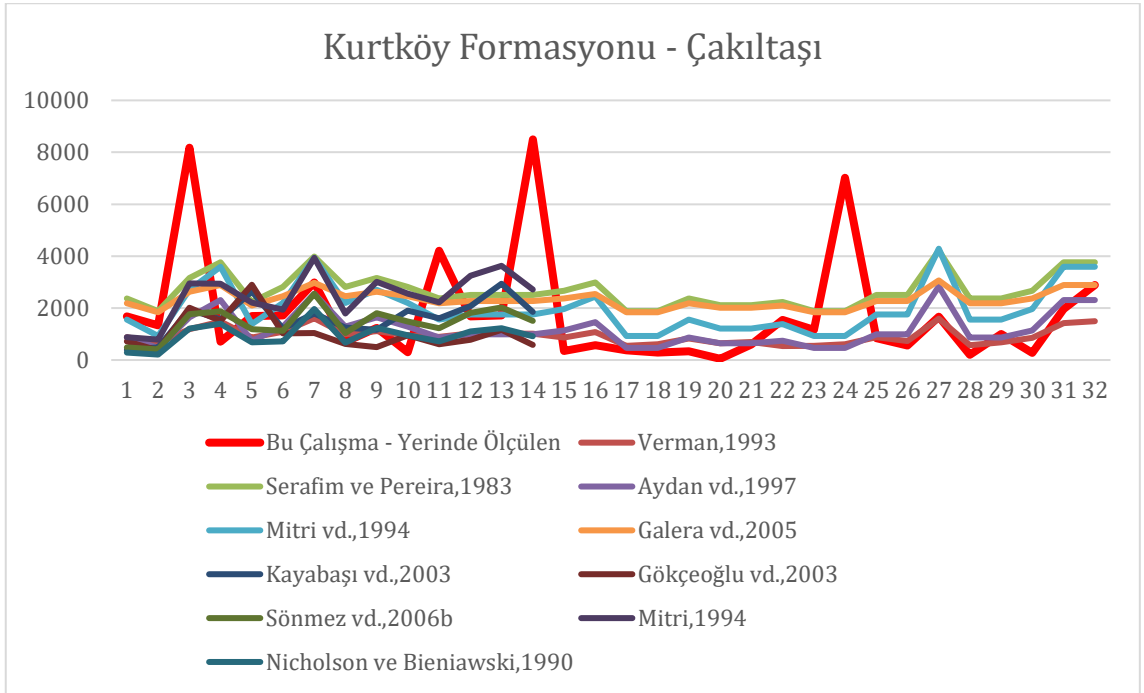
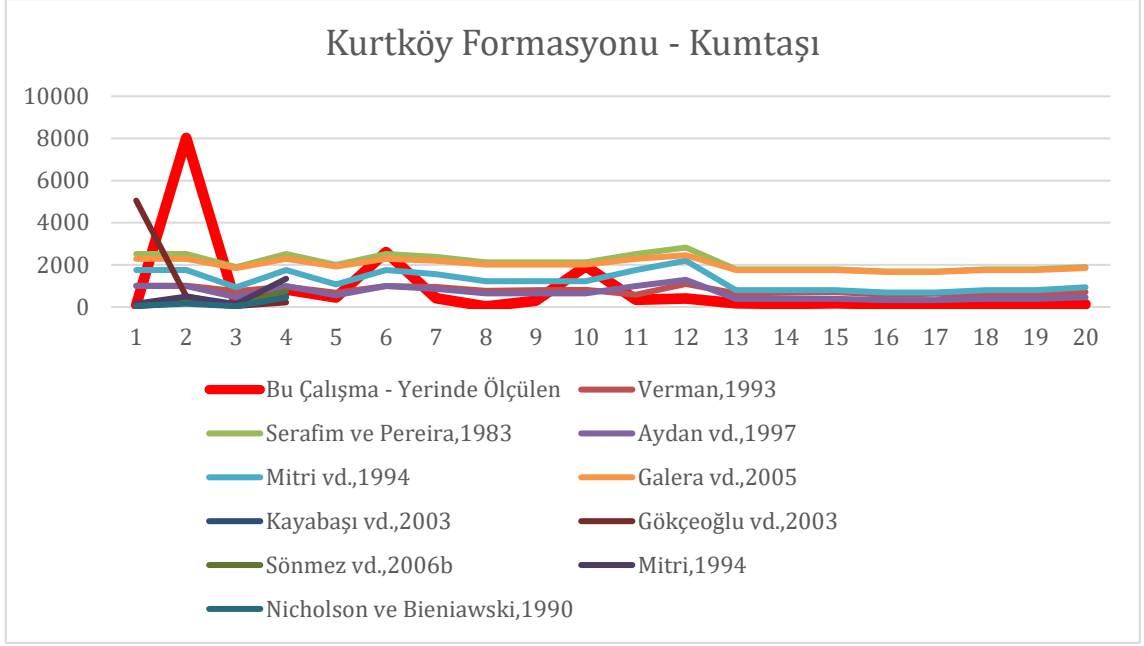
Farklı kayaç grupları üzerinde, sahada elde edilen deformasyon modül değerlerini ve hesaplanan deformasyon modül değerlerini gösteren grafikler Şekil 6.14. ve Şekil 6.19. aralığında verilmektedir.

Çizelge 6.12. Seçilen literatür çalışmalar ve kullanılan parametreler

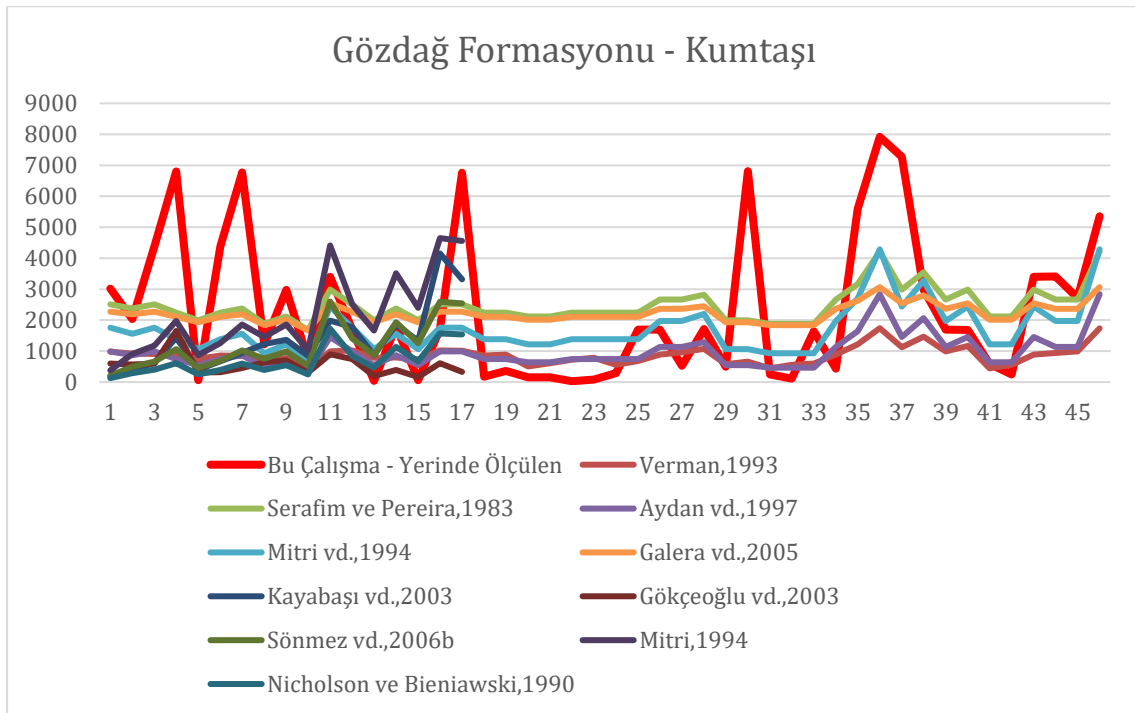
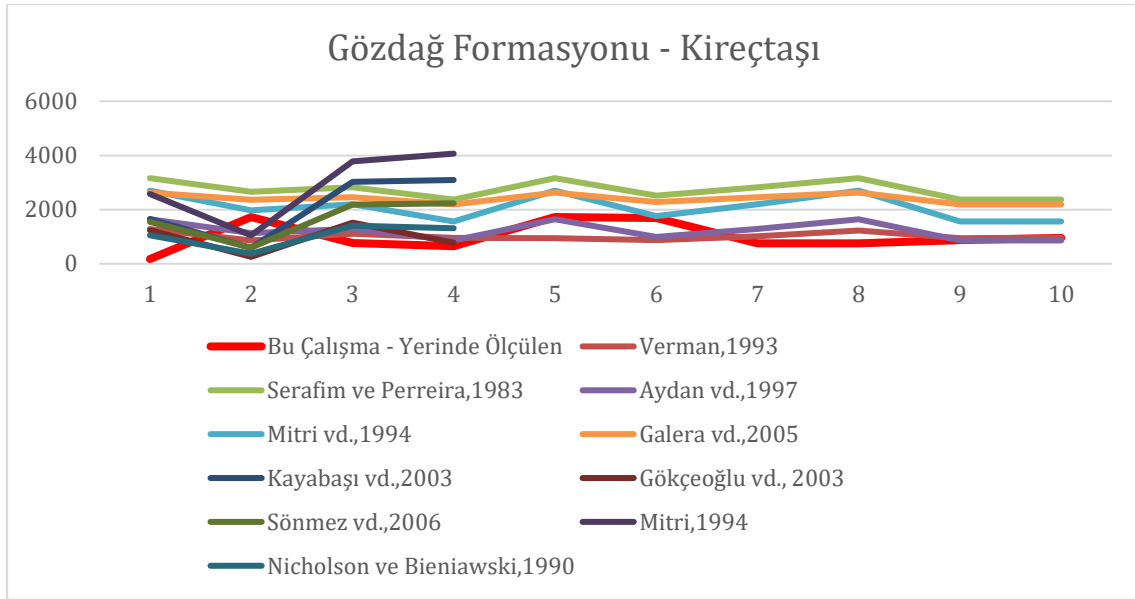
Literatür Formül	Kullanılan Parametreler
Verman,1993	Derinlik, RMR
Bieniawski,1978	RMR
Aydan vd., 1997	RMR
Mitri,1994	RMR
Galera vd.,2005	RMR
Kayabasi vd., 2003	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, Kaya Malzeme E Modülü ve Ayrışma Derecesi
Gökçeoğlu vd., 2003	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, Kaya Malzeme E Modülü ve Ayrışma Derecesi
Sönmez vd., 2006b	RMR, Kaya Malzeme E Modülü
Mitri vd., 1994	RMR, Kaya Malzeme E Modülü
Nicholson ve Bieniawski, 1990	RMR, Kaya Malzeme E Modülü



Şekil 6.14. Kartal formasyonu'na ait kıltaşları için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))

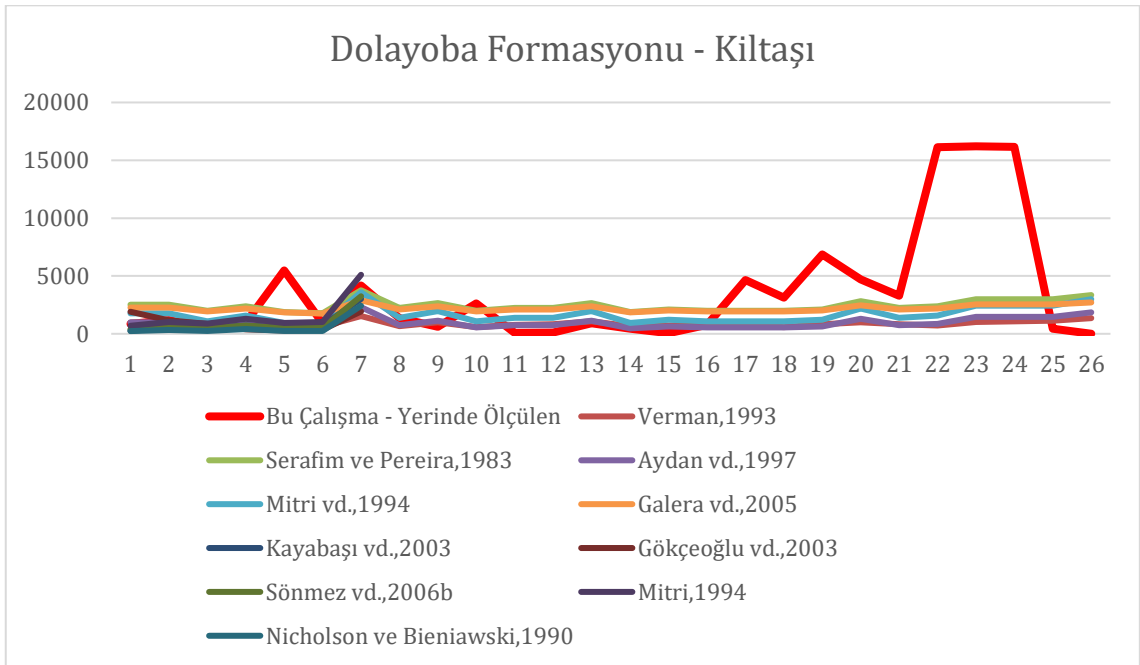
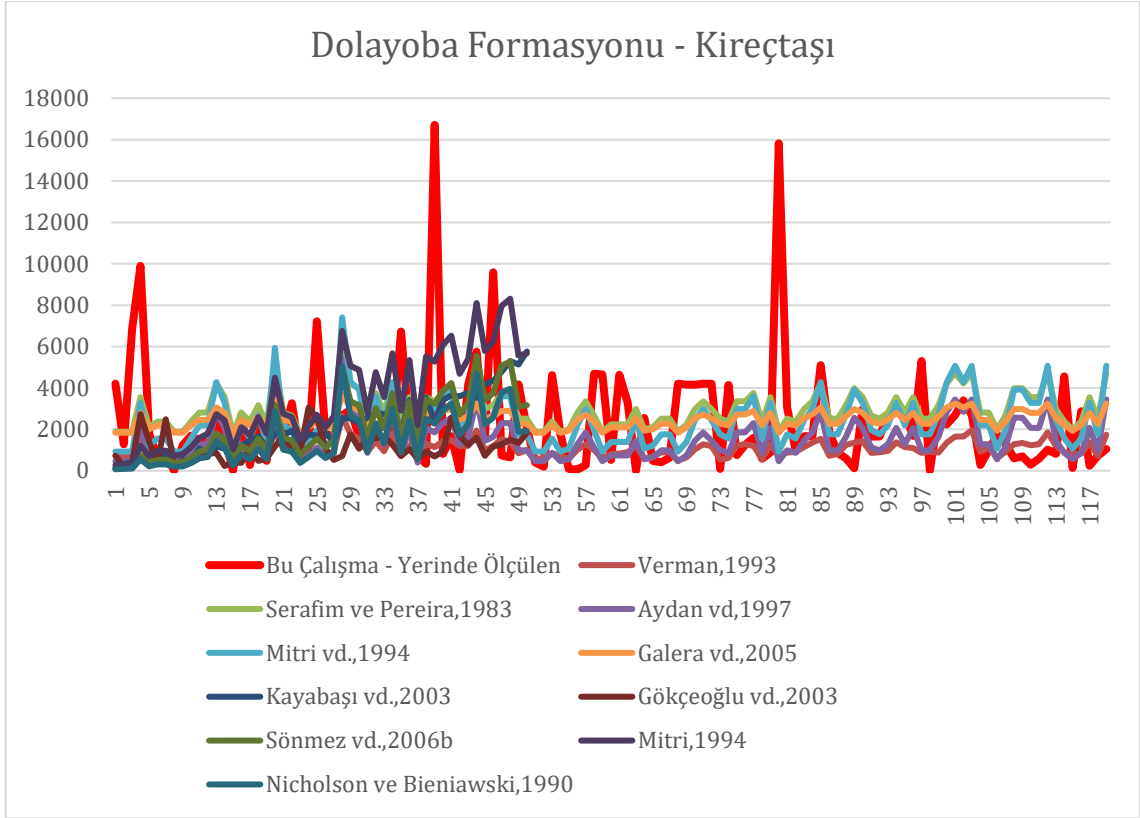


Şekil 6.15. Kurtköy formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))

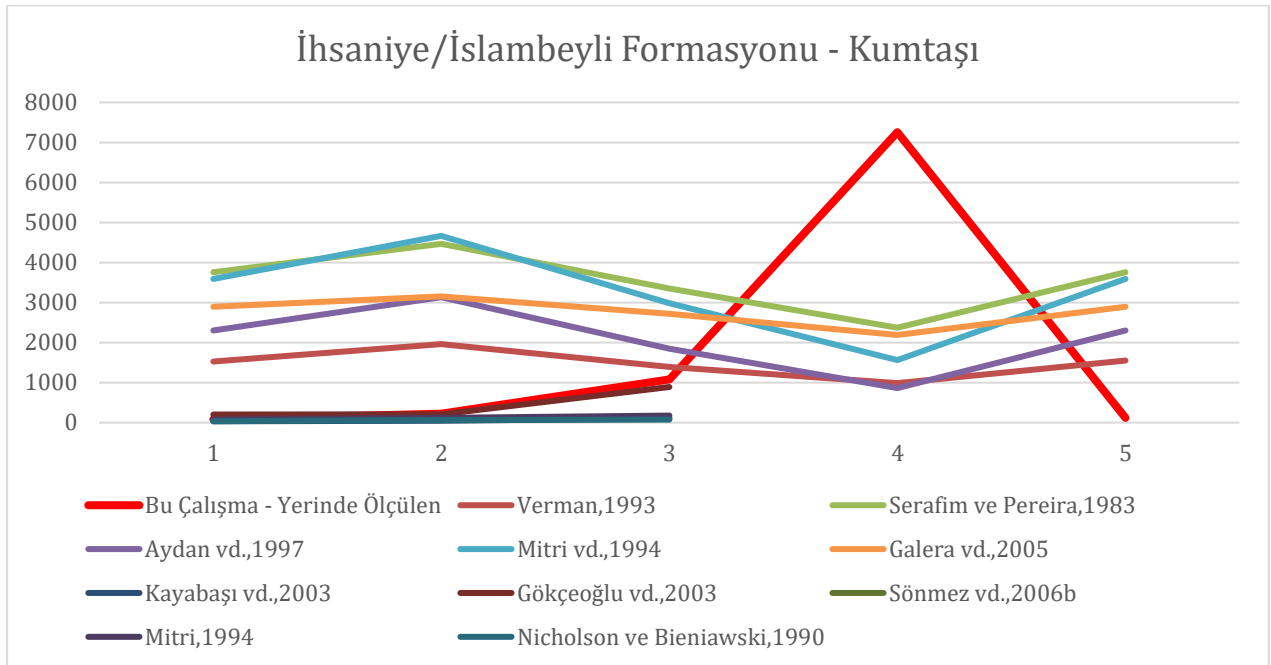
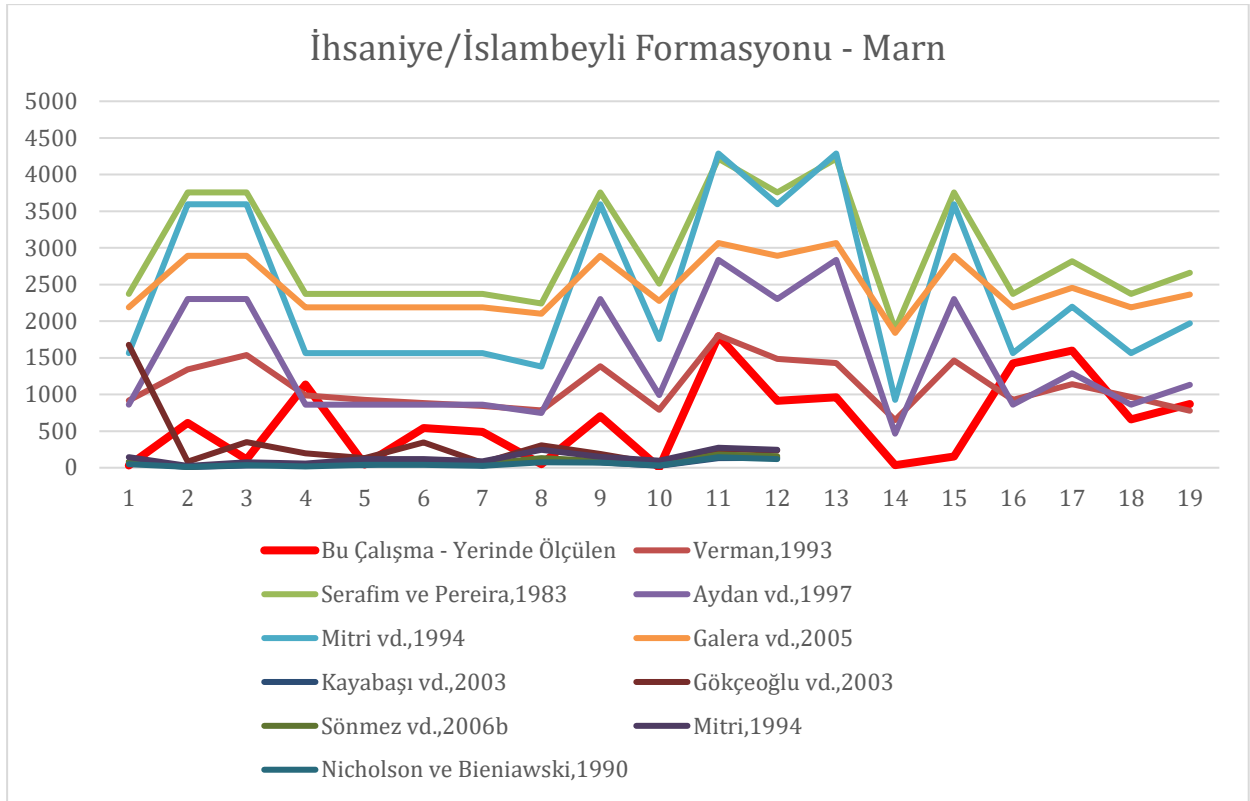


Şekil 6.16. Gözdağ formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))

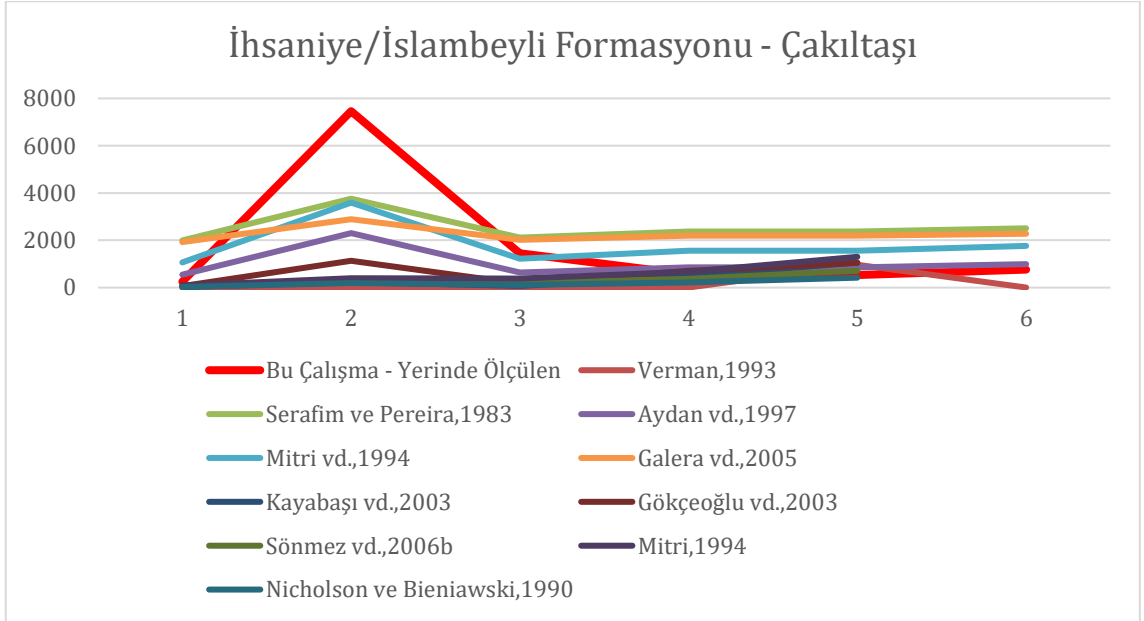
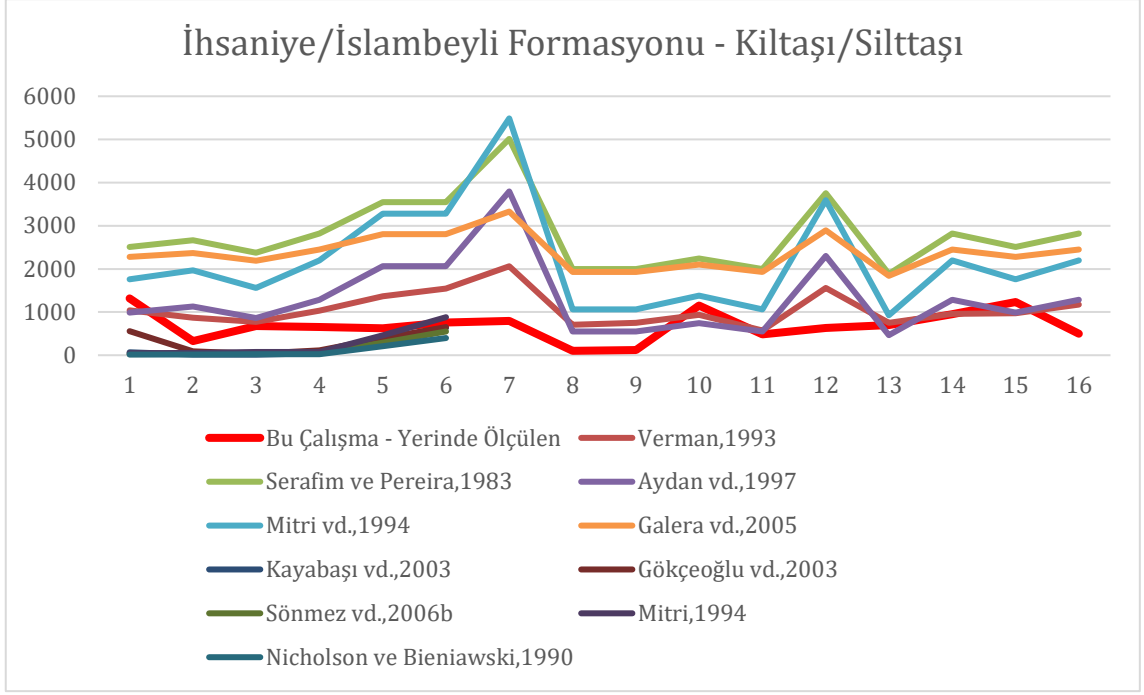




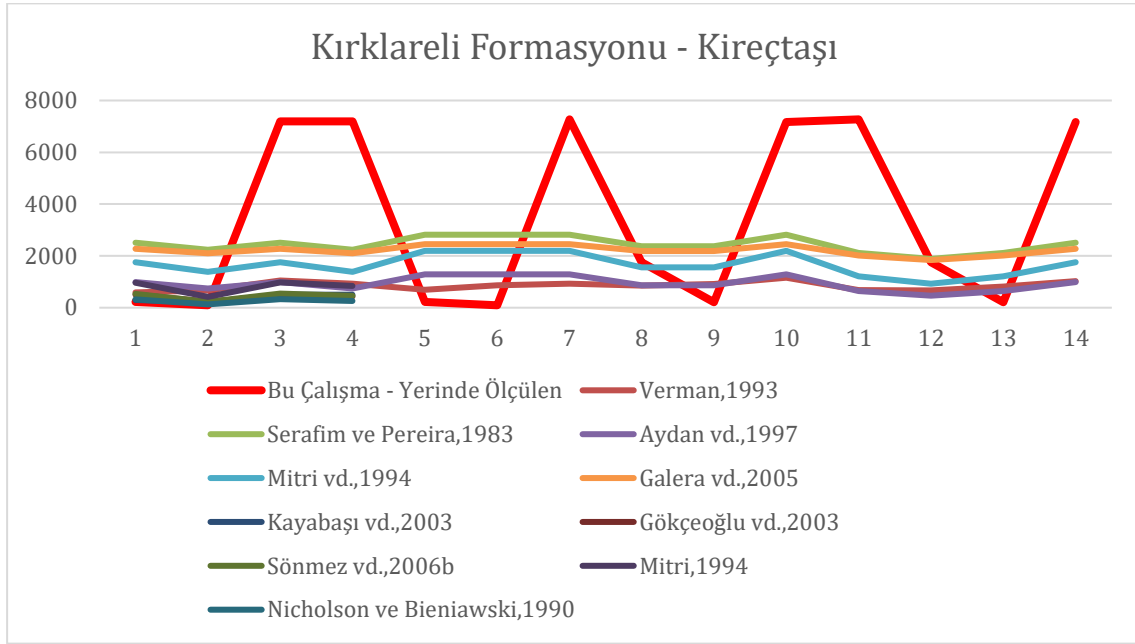
Şekil 6.17. Dolayoba formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))



Şekil 6.18. İhsaniye - İslambeyli formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))



Şekil 6.18. (devam ediyor) İhsaniye - İslambeyli formasyonu'na ait birimler için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))



Şekil 6.19. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için oluşturulan karşılaştırma grafikleri (ölçülen presiyometre değerleri (MPa) – hesaplanan değerler (MPa))

Gerçekleştirilen karşılaştırma çalışmalarında, farklı kayaç grupları üzerinde, sahada presiyometre deneyleri ile elde edilen deformasyon modülü değerleri ile farklı eşitlikler kullanılarak hesaplanan deformasyon modüllerinin benzer değer aralıklarında kaldıkları; artma ve azalma eğilimlerinin benzer noktalarda olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, esas alınan ampirik eşitlikler ile hesaplanan deformasyon modüllerinin kullanılabilir nitelikte olduğunu göstermektedir. Grafiklerde, presiyometre deneylerinden elde edilen deformasyon modüllerinde bazı uç değerler tespit edilmişse de bunların genel dağılımı temsil etmediği ve marjinal olarak kabul edilebileceği düşünülmektedir.

Öte yandan, ilave bir yaklaşım olarak, yukarıda bahsedilen görgül kıyaslama ve değerlendirmenin yanı sıra, elde edilen veri tabanı ile; söz konusu eşitliklerin performansları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, performans analizlerinin yapılması için literatürde sıklıkla kullanılan yöntemler olan Varyans değerleri yüzdesel oranı (Value account for– VAF) ve standart sapmaların ortalama kare kökü (Root mean square error – RMSE) kullanılmıştır (Eşitlik 6.1 ve 6.2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (6.1)$$

$$VAF = \left[ 1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)} \right] \times 100 \quad (6.2)$$

Yukarıdaki eşitlikler ile deformasyon modülünün sahada tespit edilen ve eşitlikler ile hesaplanan değerleri üzerinden performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada y değeri sahada ölçülen modül değerlerini, y' değeri ise eşitlikle hesaplanan modül değerlerini ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen RMSE ve VAF analizlerinde, sonuca bağlı olarak yorumlamaya esas kriterler şu şekildedir,

- VAF değerinin %100 olması eşitliğin tahmin performansının mükemmel olduğu anlamına gelmektedir. VAF değerinin negatif çıkması durumunda ise, eşitlik iyi bir tahmin performansı göstermemektedir.
- RMSE değeri, 0'a yaklaştıkça eşitliğin tahmin performansının mükemmel doğru gittiği söylenebilir. RMSE değerlerinin, asgari koşullarda sahada ölçülen deformasyon modül değerlerinin sayısal ortalamasından daha düşük olması beklenmektedir. Aksi durum, daha saçılımlı bir dağılım anlamına gelmekte olup, 1:1 eşitlik çizgisinden uzaklaşma anlamına gelmektedir.

Kurtköy formasyonuna ait kumtaşı seviyelerinde, Gözdağ formasyonuna ait kireçtaşı seviyelerinde, Dolayoba formasyonuna ait kiltası seviyelerinde ve Kırklareli formasyonuna ait kireçtaşı seviyelerinde, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzemesinin elastisite modül verileri sınırlı olduğu için, bu parametreleri içeren eşitliklerin performansı değerlendirilmemiştir.

İhsaniye – İslambeyli formasyonu'na ait kiltası ve marn seviyelerinde; sahada ölçülen deformasyon modül değerleri, hesaplanan deformasyon modüllerinden tüm eşitliklerde düşük değerler vermektedir. Bu nedenle bu iki kayaç grubu için gerçekleştirilen bütün performans testlerinde negatif VAF değerleri elde edilmiştir (Çizelge 6.13.). Öte yandan,

bu formasyona ait kireçtaşı, kumtaşı ve çakıltası seviyeleri veri azlığı nedeni ile birleştirilerek performans testlerine tabi tutulmuştur.

Farklı eşitliklere ait RMSE ve VAF değerleri incelendiğinde, en düşük RMSE değerinin ve en yüksek VAF oranının (ortalama olarak), Mitri (1994) tarafından önerilen eşitlikte yakalandığı tespit edilmiştir. Elde edilen veri tabanında; tüm kaya grupları dikkate alındığında, en yüksek performansı Mitri (1994) tarafından geliştirilen eşitlik vermiştir. Yine RMSE ve VAF değerlerine bakıldığında, Serafim ve Perreira (1983) tarafından önerilen eşitlik diğer eşitliklere kıyasla düşük performans göstermektedir.

Farklı kaya gruplarına ait RMSE ve VAF değerleri incelendiğinde ve ortalamalarına bakıldığında, İhsaniye – İslambeyli formasyonlarına ait kumtaşı – çakıltası – kireçtaşı seviyelerinin en yüksek performansı gösterdiği anlaşılmıştır. Eşitliklerin en düşük tahmin performansı gösterdiği kayaç grubu ise, Kırklareli formasyonuna ait kireçtaşı seviyeleridir. İslambeyli – İhsaniye formasyonlarına ait marn ve kiltası – silttaşı seviyelerinde düşük RMSE puanları hesaplanmıştır ancak; ölçülen deformasyon modül değerleri ile hesaplanan deformasyon modülleri arasındaki farkın sürekli olarak tek taraflı olması nedeni ile yüksek varyans değerleri elde edilmektedir. Bu nedenle bu kaya gruplarının VAF oranları negatif çıkmaktadır ve zayıf tahmin performansına işaret etmektedir.

Çizelge 6.13. Farklı kayaç grupları ve farklı literatür eşitlikler için gerçekleştirilen performans analizlerinin sonuçları

Kayaç Grubu / Eşitlik	Verman, 1993 (MPa)		Serafim Pereira, 1983 (MPa)		Aydan vd., 1997 (MPa)		Mitri vd., 1994 (MPa)		Galera vd.,2005 (MPa)		Kayabaşı, 2003 (MPa)		Gökçeoğlu vd., 2003 (MPa)		Sönmez vd, 2006b (MPa)		Mitri, 1994 (MPa)		Nicholson Bieniawski, 1990 (MPa)	
	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF	RMSE	VAF
Kartal Formasyonu – Kilitaşı	2,68	8	2,36	14	2,58	14	2,32	18	2,41	9	2,62	8	3,67	5	3,58	12	3,29	16	3,74	10
Kurtköy Formasyonu – Kumtaşı	0,66	88	2,09	11	1,65	10	1,7	13	2,04	10	HESAPLAMA YAPILMAMIŞTIR									
Kurtköy Formasyonu – Çakiltası	1,56	49	2,09	27	1,86	27	2,26	9	1,92	29	1,99	36	2,92	9	1,04	80	2,5	87	2,21	40
Gözdağ Formasyonu – Kireçtaşı	0,61	32	1,84	35	0,66	36	1,3	51	1,49	17	HESAPLAMA YAPILMAMIŞTIR									
Gözdağ Formasyonu – Kuvars Kumtaşı	2,3	28	2,09	20	2,33	26	2,12	25	2,07	20	2,32	12	3,09	11	2,38	19	2,17	4	2,65	20
Dolayoba Formasyonu – Kireçtaşı	2,78	7	2,54	17	2,9	-5,4	2,9	-15	2,67	23	2,94	2,7	3,4	1	3,25	-11	2,97	14	3,35	-7
Dolayoba Formasyonu – Kilitaşı	4,7	25	4,91	7	5,5	4	5,7	5	5,04	3	HESAPLAMA YAPILMAMIŞTIR									
İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Kilitaşı Silttaşı	0,58	-7	2,14	-4	1,06	-5	1,88	-10	1,96	2	0,65	-5	0,48	34	0,66	-5	0,63	11	0,69	-3
İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Marn	0,69	12	2,43	-98	0,73	-34	2,06	-4	1,91	-2	0,69	7	0,78	-10	0,68	8	0,64	8	0,03	8
İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Çakiltası, Kumtaşı, Kireçtaşı Ardalannması	2,19	10	2,48	33	2,14	12	2,3	22	2,12	40	0,66	89	0,52	94	0,55	95	0,57	92	0,68	95
Kırklareli Formasyonu - Kireçtaşı	3,73	11	3,18	5	3,31	13	3,07	11	3,22	6	HESAPLAMA YAPILMAMIŞTIR									

#### 6.4. Korelasyon Analizleri ve Parametrelerin Anlamlılıklarının Yorumlanması

Bu bölüm kapsamında yapılan analizlerde, kullanılacak veri tabanında yer alan kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin derinlik ve örtü yükü ile nasıl bir ilişki gösterdiği irdelenmiş; bu parametrelerin derinlikle değişiminin irdelenmesinde öncelikle anlamlılık aranmıştır. Bu nedenle, söz konusu parametre setleri ile derinlik – örtü yükü parametresi arasında korelasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Korelasyon analizi; iki farklı değişken arasındaki ilişkinin test edilmesi ve ilişki düzeyinin tespiti için kullanılan bir yöntemdir (Tüysüz ve Yaylalı, 2005). Çalışma verilerinde, özellikle RQD değerleri ve deformasyon modül değerleri daha geniş dağılım aralıkları gösterirken, kaya malzemesi parametreleri daha kısa dağılım aralıkları vermektedir. Bu nedenle, korelasyon analizlerinde, Pearson ve Spearman korelasyon katsayıları ayrı ayrı hesaplanmıştır ve değerlendirilmiştir.

Korelasyon analizlerinde, %95 güven aralığı esas alınmıştır. Pearson ve Spearman korelasyon katsayısında sig < 0.05 koşulu gözetilmiştir. Çalışma verilerini oluşturan farklı kaya grupları için gerçekleştirilen korelasyon analiz sonuçları Çizelge 6.14.'te verilmektedir

Çizelge 6.14. Korelasyon analizleri ile elde edilen korelasyon katsayısı (Pearson – Spearman)

Kaya Tipi	Örtü Yükü - RQD	Örtü Yükü – Def Md	Örtü Yükü - UCS	Örtü Yükü - Ei	Örtü Yükü - RMR
<b>Kartal Formasyonu</b>					
<i>Kiltaşı</i>	0.000 - 0.000	0.014 - 0.017	0.002 - 0.003	0.013 - 0.052	0.000 - 0.000
<b>Kurtköy Formasyonu</b>					
<i>Kumtaşı</i>	0.084 - 0.008	0.369 - 0.424	0.211 - 0.668	0.093 - 0.020	0.337 - 0.138
<i>Çakıltası</i>	0.000 - 0.000	0.001 - 0.000	0.000 - 0.000	0.000 - 0.000	0.000 - 0.000
<b>Gözdağ Formasyonu</b>					
<i>Kireçtaşı</i>	0.012 - 0.010	0.041 - 0.038	0.974 - 0.812	0.749 - 0.832	0.022 - 0.033
<i>Kumtaşı</i>	0.000 - 0.000	0.000 - 0.000	0.016 - 0.005	0.011 - 0.011	0.000 - 0.000
<b>Dolayoba Formasyonu</b>					
<i>Kireçtaşı</i>	0.000 - 0.000	0.562 - 0.281	0.944 - 0.953	0.417 - 0.517	0.018 - 0.034
<i>Kiltaşı</i>	0.004 - 0.026	0.305 - 0.901	0.061 - 0.063	0.390 - 0.894	0.800 - 0.996
<b>İhsaniye - İslambeyli Formasyonu</b>					
<i>Marn</i>	0.000 - 0.000	0.013 - 0.018	0.871 - 0.854	0.612 - 0.532	0.000 - 0.000
<i>Kumtaşı</i>	0.299 - 0.596	0.865 - 0.200	0.929 - 0.565	0.525 - 0.822	0.060 - 0.171
<i>Kireçtaşı</i>	0.000 - 0.000	0.738 - 0.667	0.328 - 0.202	0.296 - 0.170	0.000 - 0.000
<i>Kiltaşı-Silttaşı</i>	0.000 - 0.000	0.084 - 0.058	0.933 - 0.546	0.488 - 0.779	0.003 - 0.001
<i>Çakıltası</i>	0.002 - 0.000	0.461 - 0.873	0.536 - 0.247	0.378 - 0.038	0.000 - 0.001
<b>Kırklareli Formasyonu</b>					
<i>Kireçtaşı</i>	0.100 - 0.022	0.006 - 0.030	0.797 - 0.259	0.089 - 0.021	0.086 - 0.058



Elde edilen korelasyon sayıları ışığında, derinlik – örtü yükü parametresi ile en fazla anlamlılık gösteren parametrelerin kaya kalite göstergesi (RQD) ve kaya kütle puanı (RMR) olduğu, presiyometre deneylerinden elde edilen kaya kütle deformasyon modülünün de örtü yükü ile anlamlı ilişki içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Kaya malzeme parametreleri olan, tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzemesi elastisite modül değerlerinde ise, derinlik – örtü yükü parametresi ile daha düşük bir anlamlılık derecesi elde edilmiştir. Bu durum, kaya malzeme parametrelerinin; kaya gruplarının malzeme özellikleri ile ilişkili olduğu, derinlik – örtü yükü, yanal yükler vb. koşullar ile daha az etkileşimde olduğunun göstergesi olarak açıklanabilmektedir.

Parametrelerden bağımsız olarak, Dolayoba formasyonu'na ait kilitaşı ve kireçtaşı seviyelerinde, özellikle deformasyon modülü ile örtü yükü arasında anlamlı bir ilişki olmadığı gözlemlenmiştir. Yine İhsaniye – İslambeyli formasyonlarına ait kireçtaşı, kumtaşı ve çakıltası seviyelerinde, veri sayılarının azlığına bağlı olarak ilişkide bir anlamlılık elde edilememiştir. Bu nedenle, litolojik olarak aynı formasyon içerisinde ardalama şeklinde gözlenen bu kayac gruplarına ait veriler birleştirilerek tek bir kayac grubu olarak regresyon çalışmalarına dahil edilmiştir.

Yapılan korelasyon analizlerinden de anlaşılacağı üzere, hemen hemen tüm kaya grupları için; örtü yükü/derinlik ile deformasyon modülü ve kaya kütlesi parametreleri arasında anlamlı ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, deformasyon modülünün kestirimine yönelik olarak yapılan tüm çalışmalarda, örtü yükünün ve diğer kaya kütlesi parametrelerinin ön plana çıktığı basit ve değişkenli regresyon modelleri dikkatlice değerlendirilmiş olup, kaya malzemesi parametreleri de destekleyici parametreler olarak kullanılmıştır.

### **6.5. Basit Regresyon Analizleri**

İstatistiksel araştırma çalışmalarının ilk aşaması olan basit regresyon analizleri, farklı iki bağımsız değişken arasındaki matematiksel ifadeyi irdelemek ve tahmin etmek için kullanılmaktadır (Tüysüz ve Yaylalı, 2005). Basit regresyon analizlerinde irdelenen kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametreleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Örtü Yükü – Derinlik (t/m<sup>2</sup>) – (ilk çalışmada bağımlı değişken olarak kullanılmıştır)
- Kaya Kütlesi Deformasyon Modülü (Presiyometre Modülü) – (MPa)

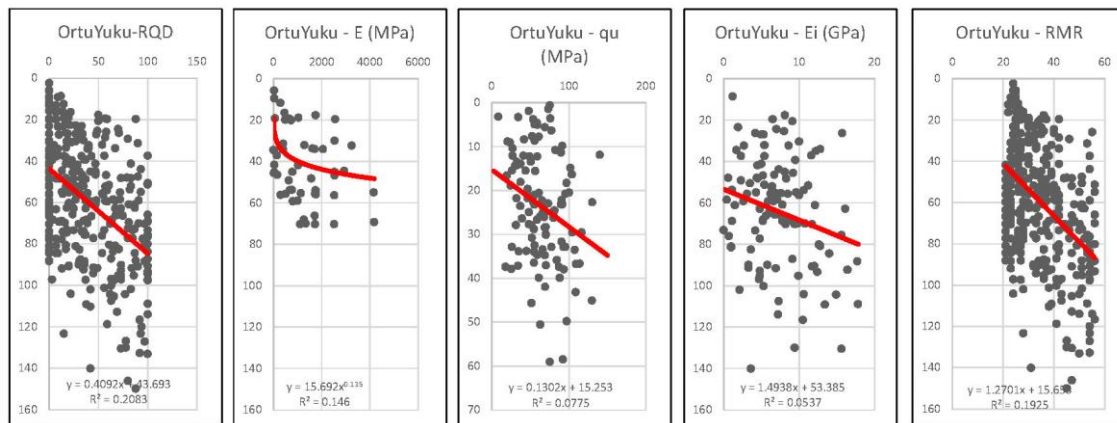
- Kaya Kalite Göstergesi - RQD (%) – (ikinci çalışmada bağımlı değişken olarak kullanılmıştır)
- Kaya Kütle Puanı – RMR
- Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)
- Kaya Malzemesi Elastisite Modülü (GPa)

Söz konusu parametreler, bağımlı – bağımsız değişken ikilileri olarak iki farklı grupta ile basit regresyon analizlerinde kullanılmıştır. Bunlardan ilki Örtü Yükü – Derinlik ve diğer parametrelerin basit regresyon ilişkisidir. Diğer grup ise Deformasyon Modülü ile diğer parametrelerin basit regresyon ilişkisidir. Bu iki gruptandırmanın amacı, Örtü Yükü – Derinlik koşulu ile kaya kütle ve malzeme parametrelerinin değişimini irdelemek; ayrıca Deformasyon Modülü'nün diğer parametrelerle değişimini araştırmaktır. Basit regresyon analizleri ve bu analizlere ilişkin grafik düzenlemeleri Microsoft Excel 2013 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

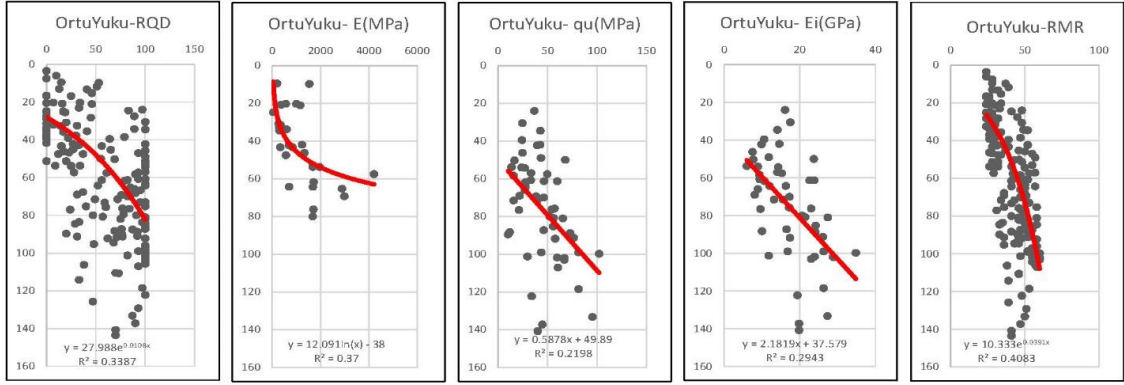
### 6.5.1. Örtü Yükü – Derinlik'in Bağımlı Değişken Olduğu Regresyon Analizleri

Yukarıda bahsedilen kaya kütle ve kaya malzemesi parametrelerinin, Örtü Yükü – Derinlik koşulu bağımlı değişken olarak alındığında gösterdiği davranış incelenmiştir. Çalışmalar sırasında basit fonksiyon olarak, doğrusal, logaritmik, üssel ve eksponansiyel fonksiyonların tamamı için değerlendirme yapılmış, en yüksek korelasyon katsayısını veren eşitlik esas alınmıştır.

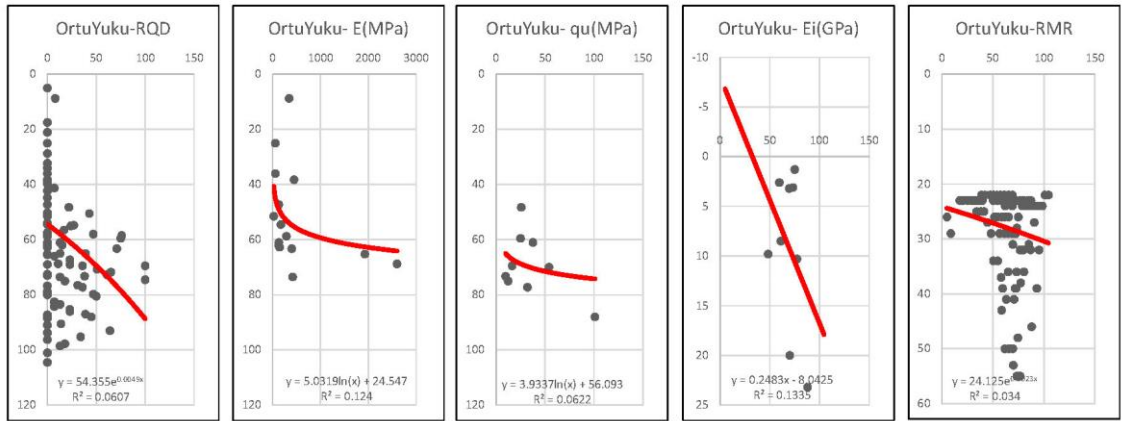
Gerçekleştirilen regresyon analizlerine ilişkin grafikler Şekil 6.20. ve Şekil 6.30. aralığında verilmektedir.



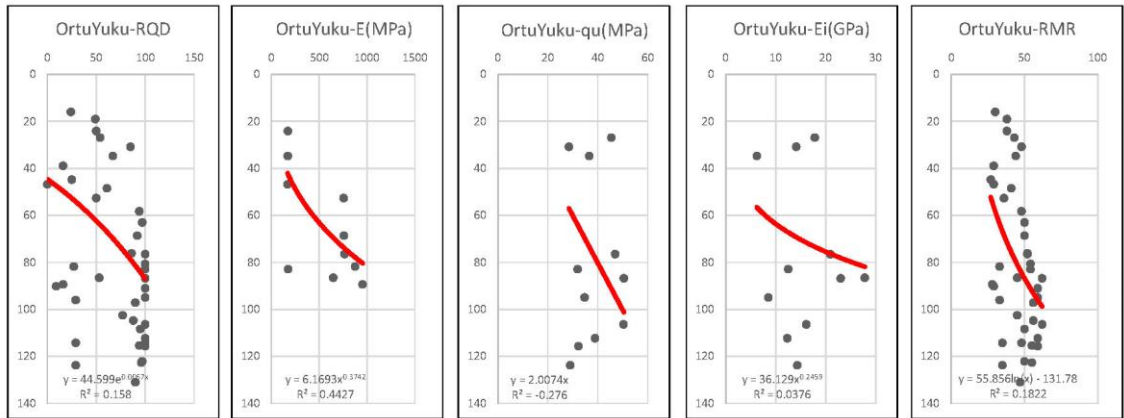
Şekil 6.20. Kartal formasyonu'na ait kilttaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



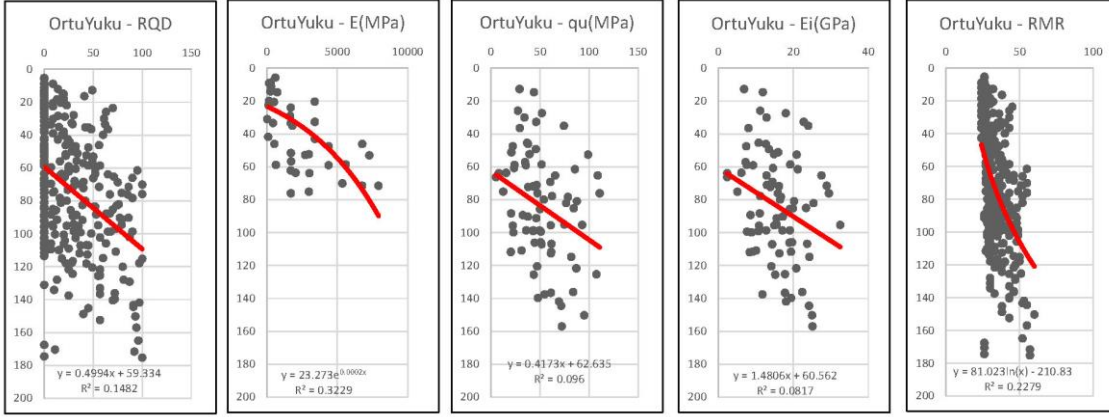
Şekil 6.21. Kurtköy formasyonu'na ait çakıltaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



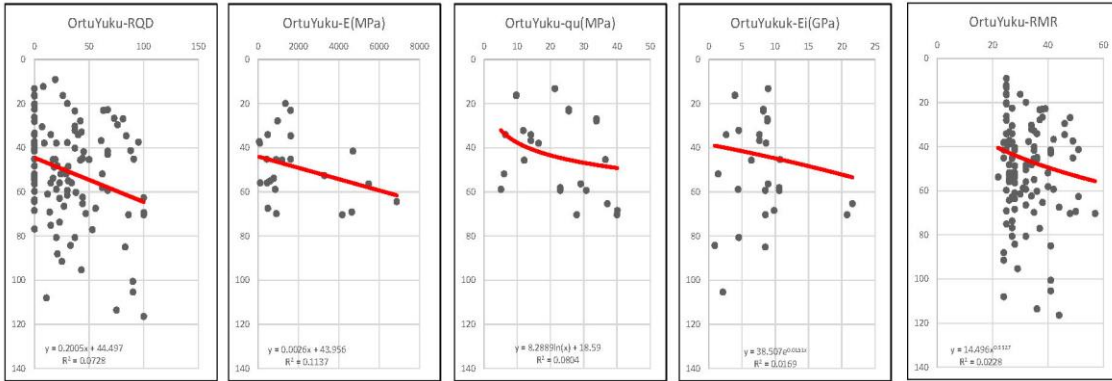
Şekil 6.22. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



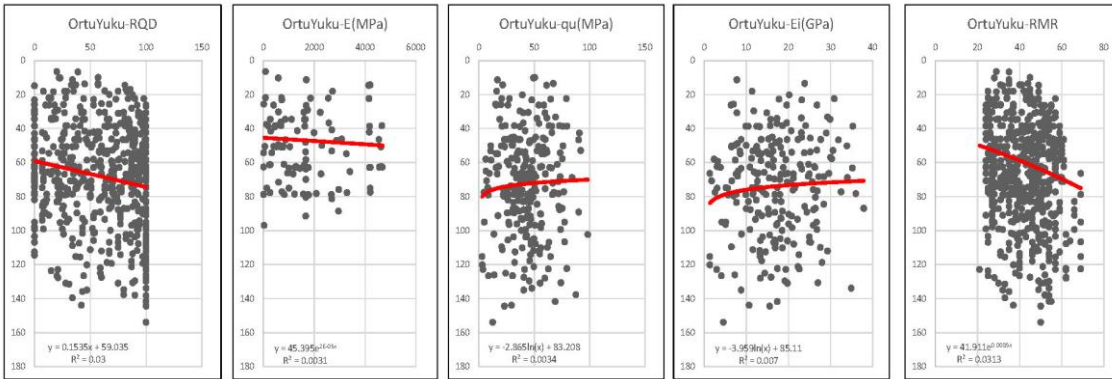
Şekil 6.23. Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



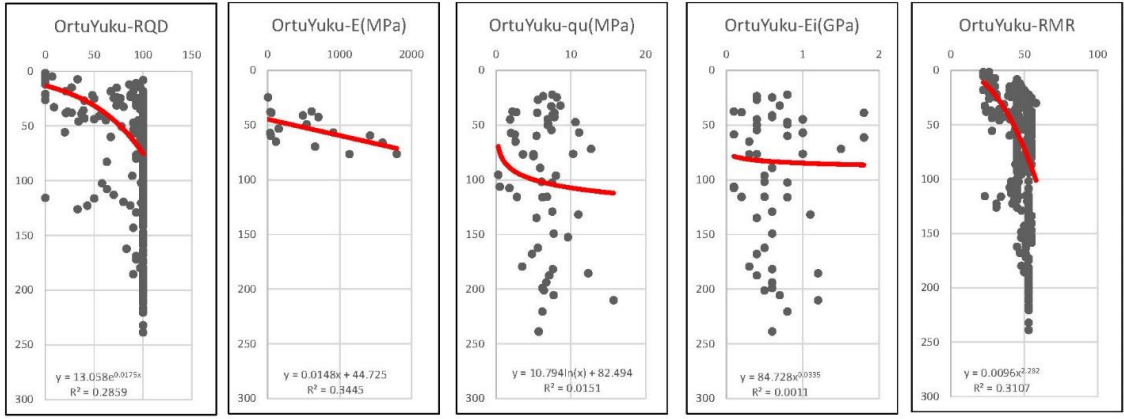
Şekil 6.24. Gözdağ formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



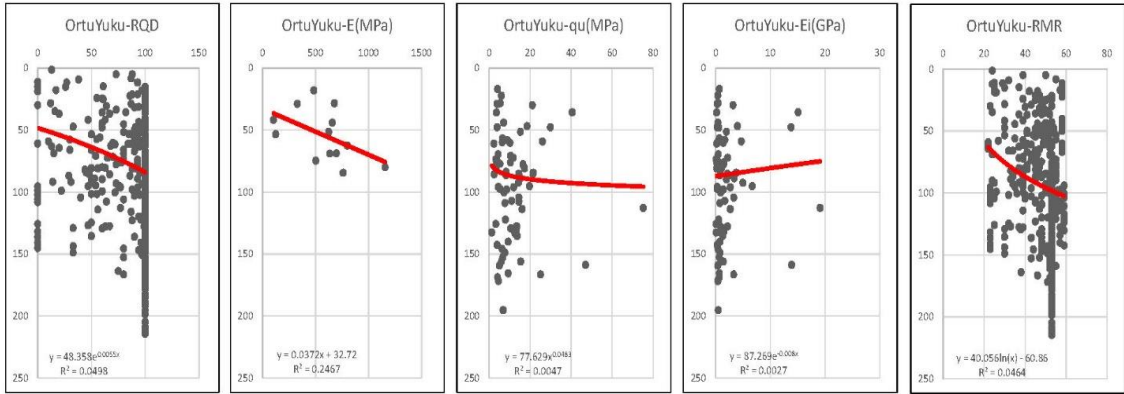
Şekil 6.25. Dolayoba formasyonu'na ait kilttaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



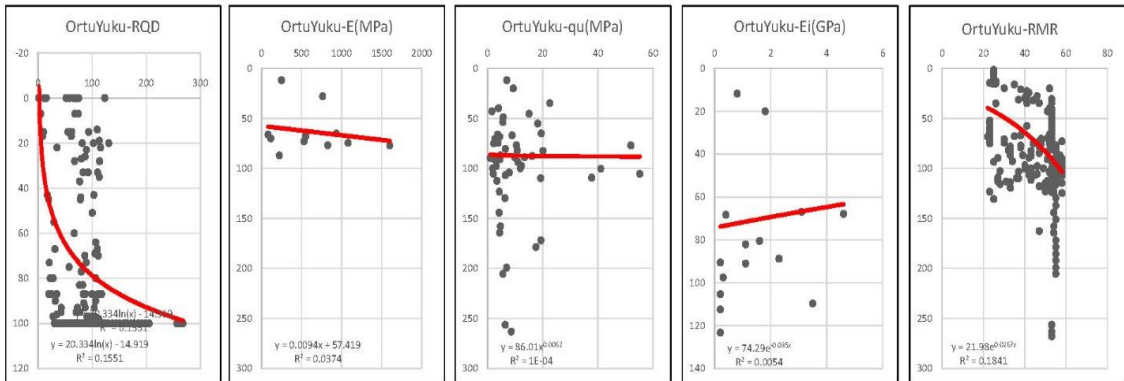
Şekil 6.26. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



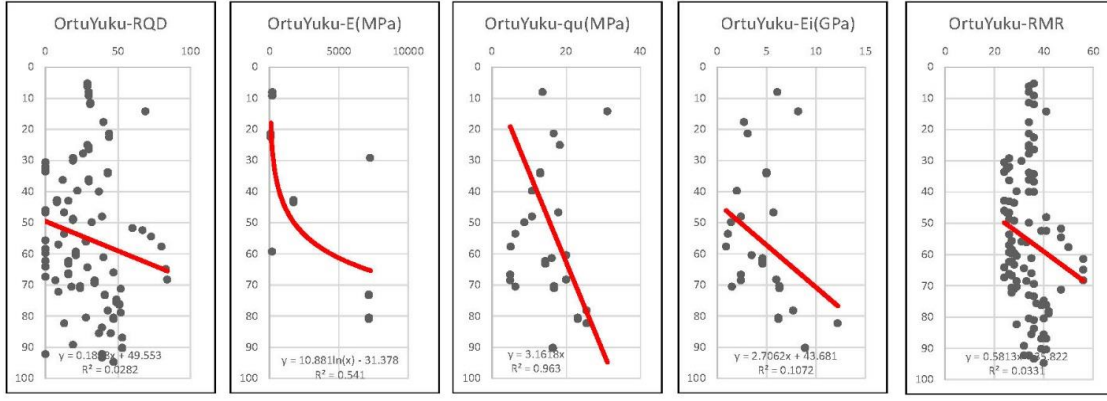
Şekil 6.27. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait marnlar için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



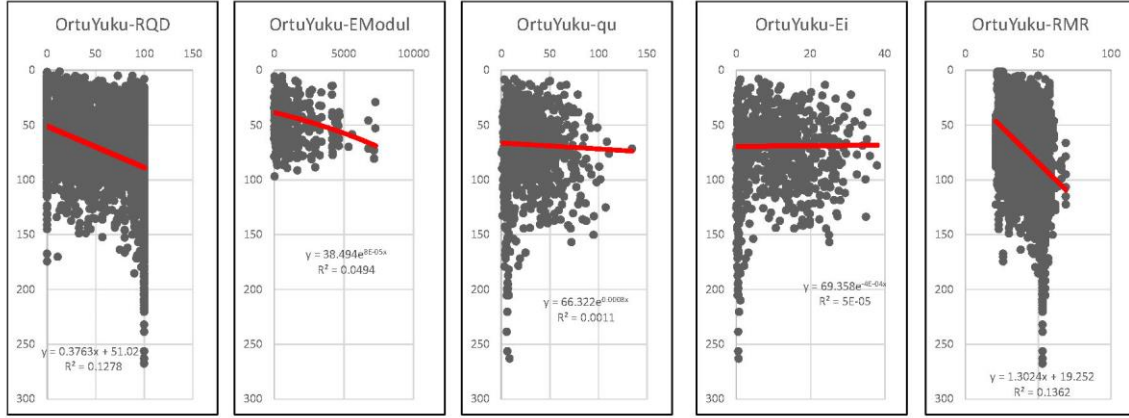
Şekil 6.28. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait kiltaş/silttaş seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



Şekil 6.29. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait çakıltaş/kumtaş/kireçtaş seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



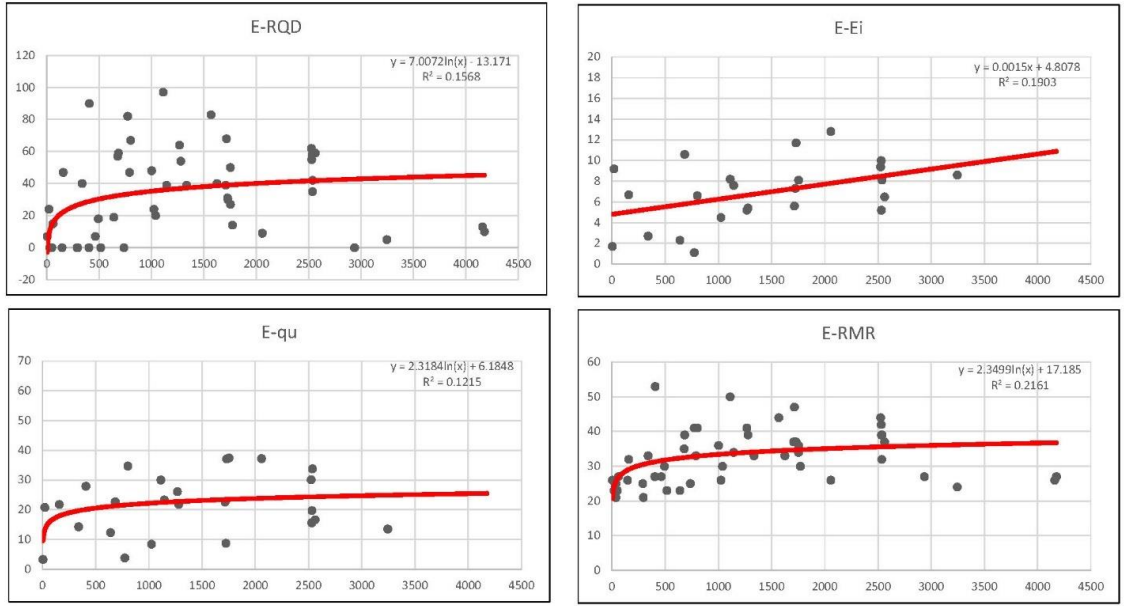
Şekil 6.30. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



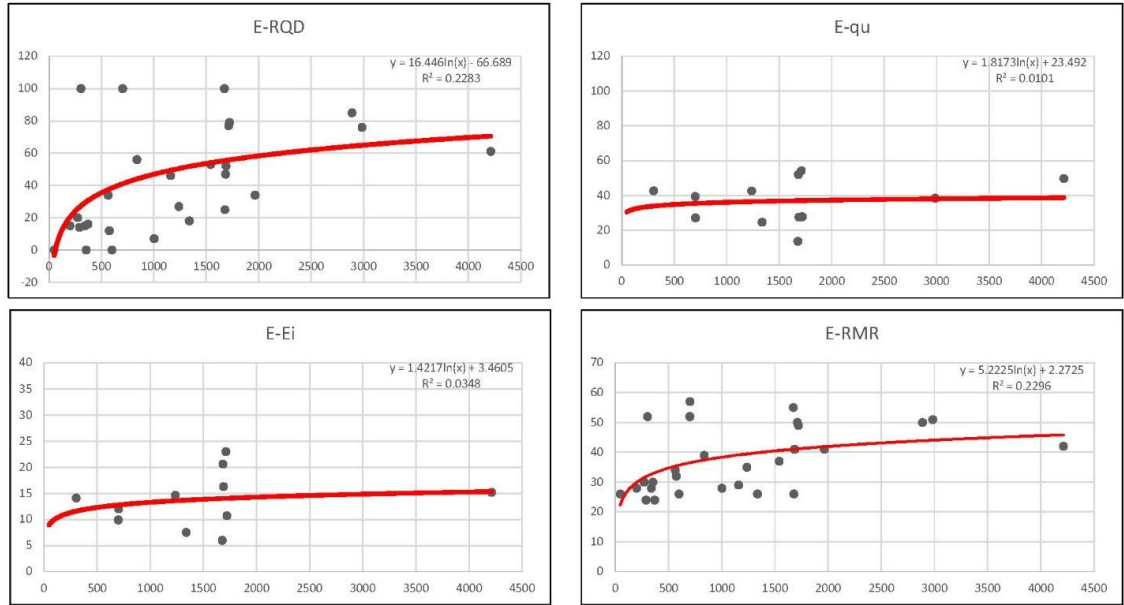
Şekil 6.31. Tüm veri tabanı için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri

## 6.5.2. Deformasyon Modülünün Bağımlı Değişken Olduğu Basit Regresyon Analizleri

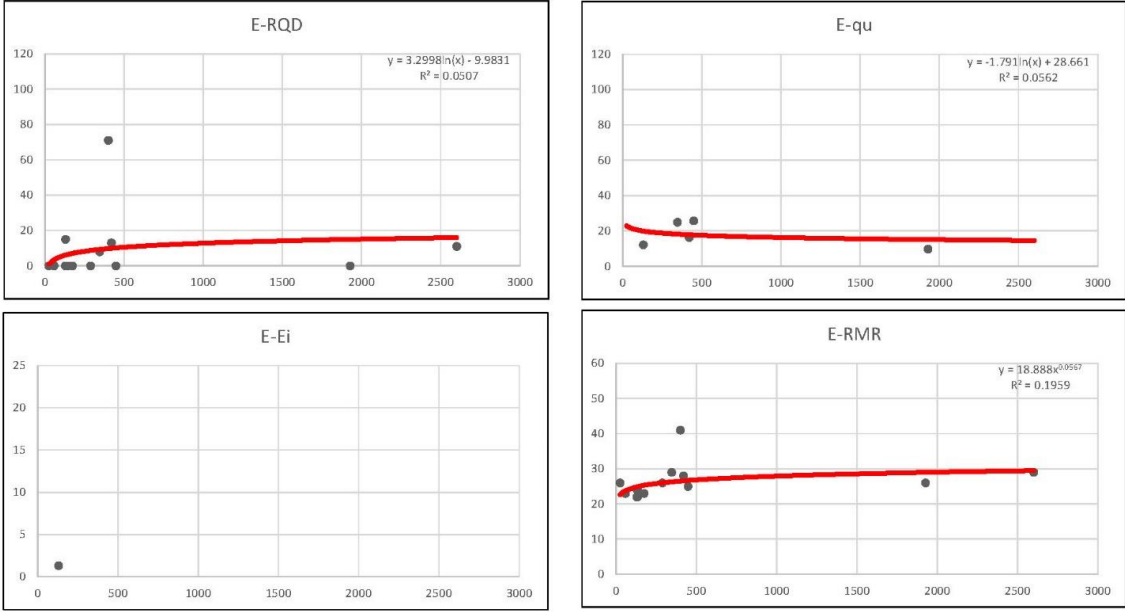
Bu kısımda ise, Deformasyon Modülü'nün bağımlı değişken olarak kabul edildiği koşullar altında diğer kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametreleri ile ilişkisini irdelemek amacıyla basit regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analizlerde, doğrusal, logaritmik, üssel ve eksponansiyel fonksiyonların tamamı dikkate alınmış, en yüksek korelasyon katsayısının elde edildiği eşitlikler esas alınmıştır. Gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda en yüksek korelasyon katsayısını veren fonksiyonlara ait grafikler Şekil 6.32. ve Şekil 6.43. aralığında verilmektedir.



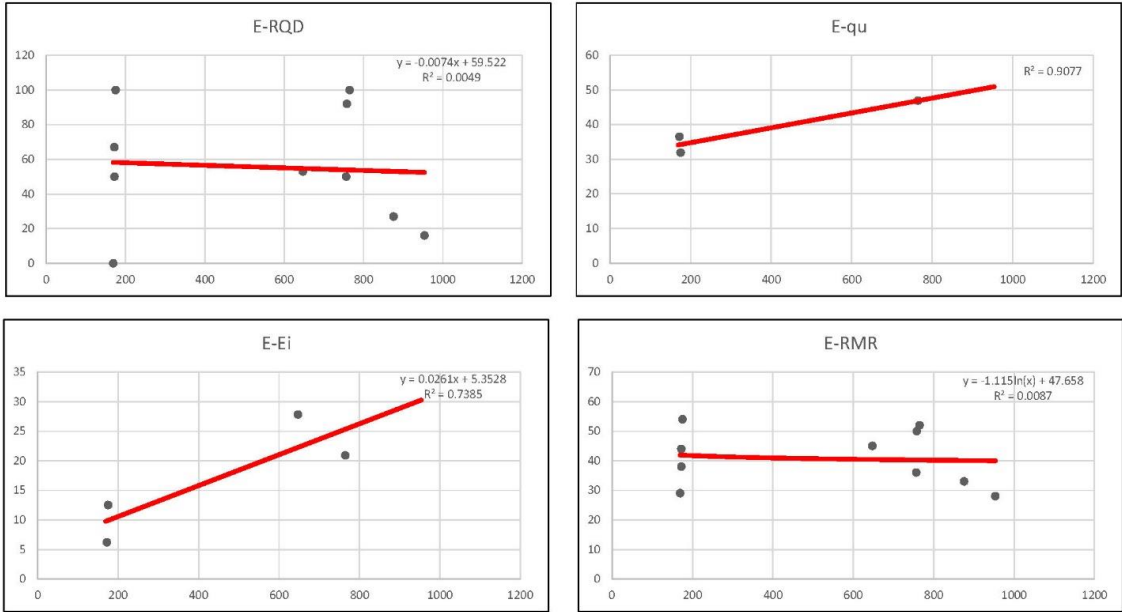
Şekil 6.32. Kartal formasyonu'na ait kilttaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



Şekil 6.33. Kurtköy formasyonu'na ait çakilttaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri

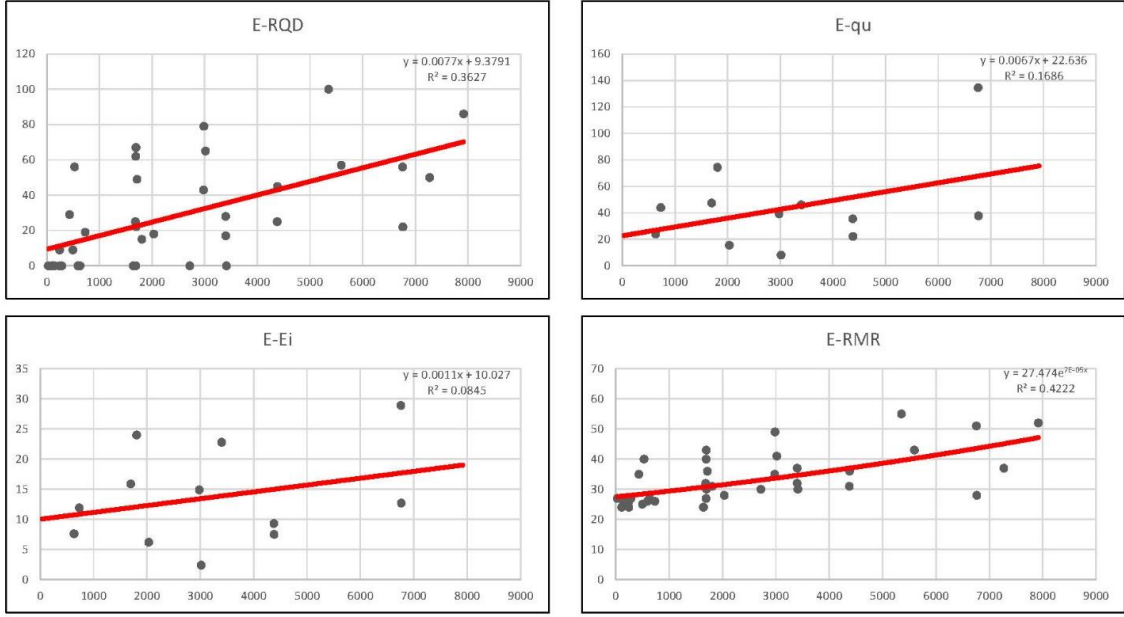


Şekil 6.34. Kurtköy formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri

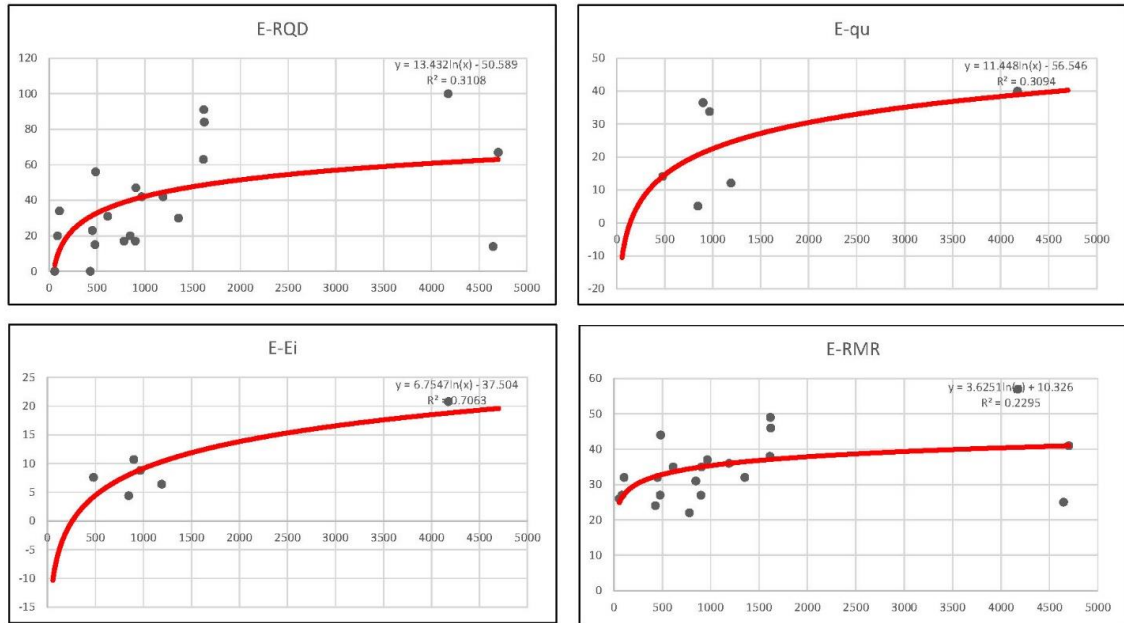


Şekil 6.35. Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri

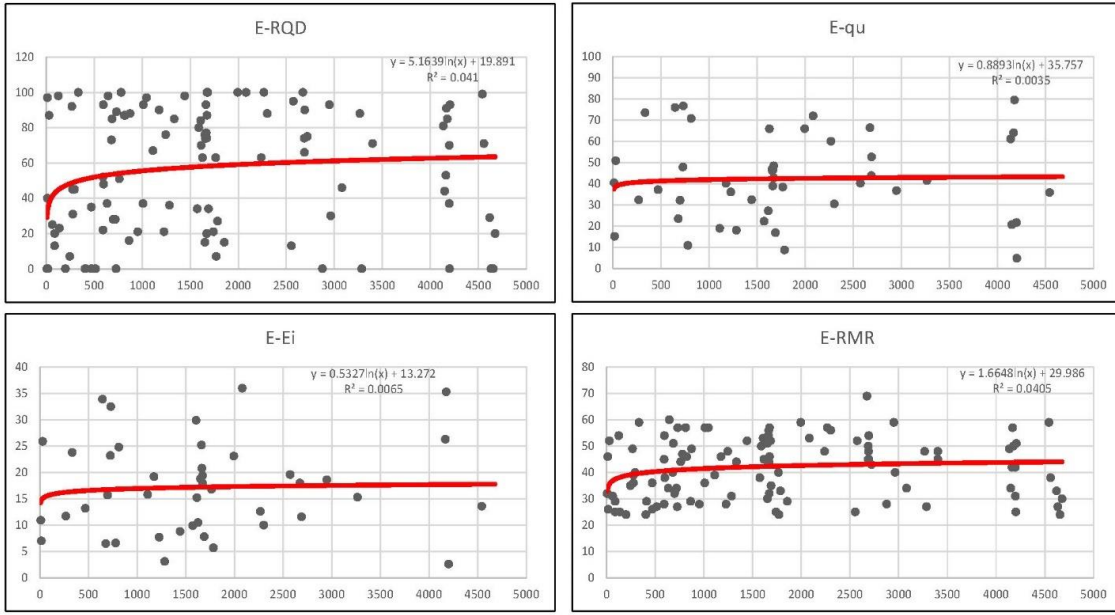




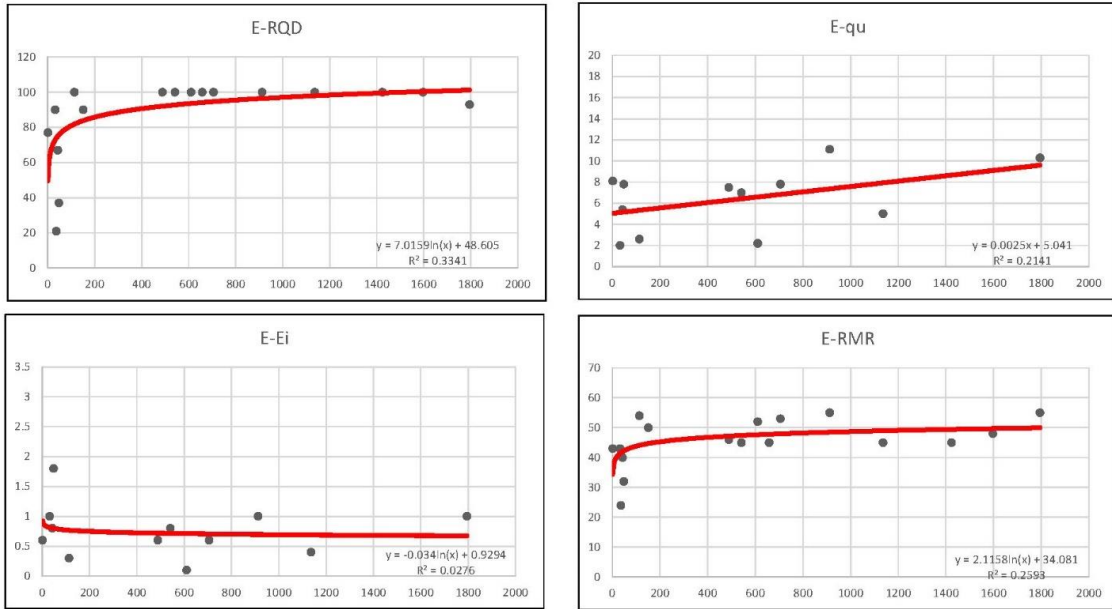
Şekil 6.36. Gözdağ formasyonu'na ait kumtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



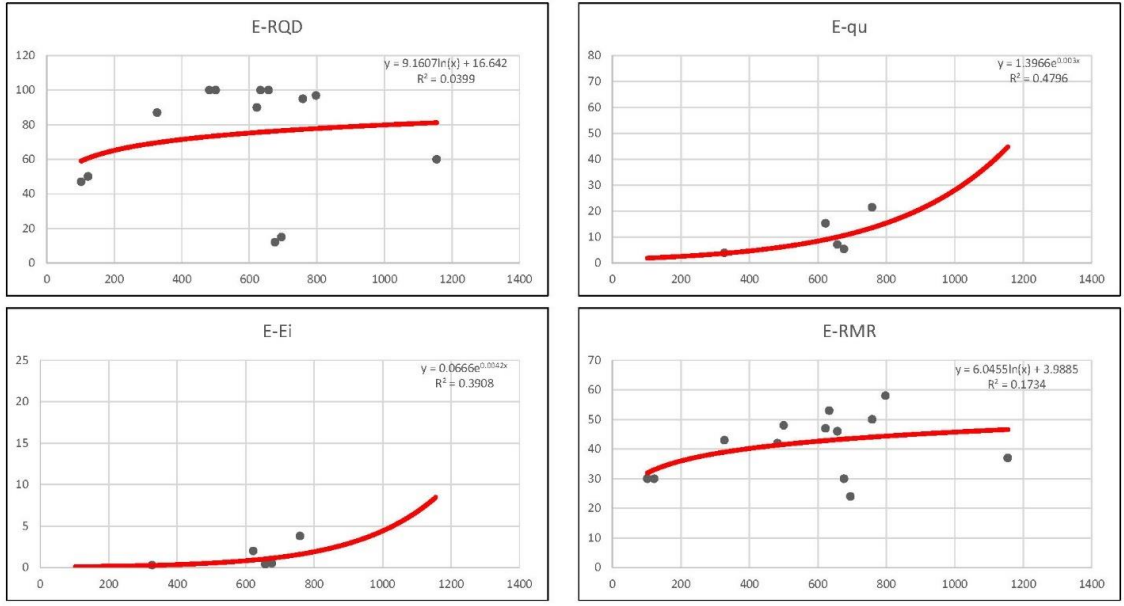
Şekil 6.37. Dolayoba formasyonu'na ait kilaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



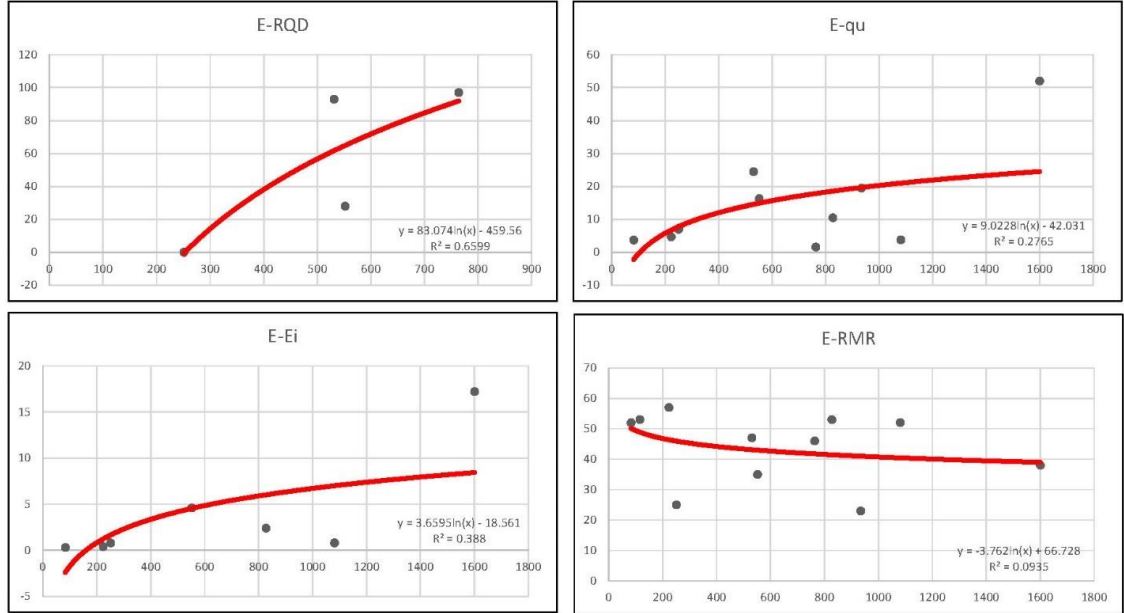
Şekil 6.38. Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



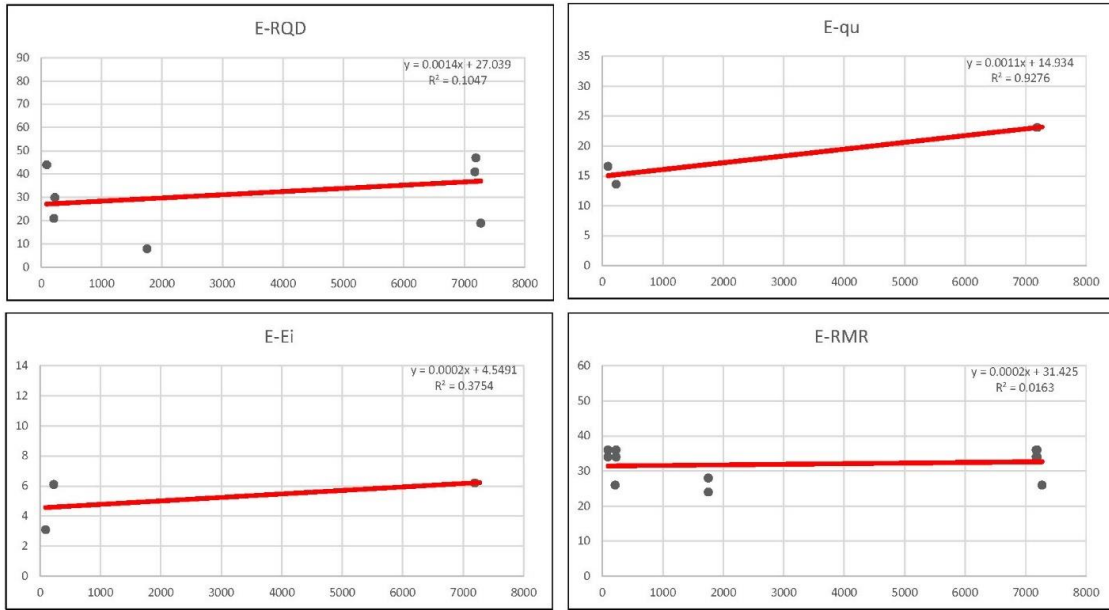
Şekil 6.39. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait marınlar için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



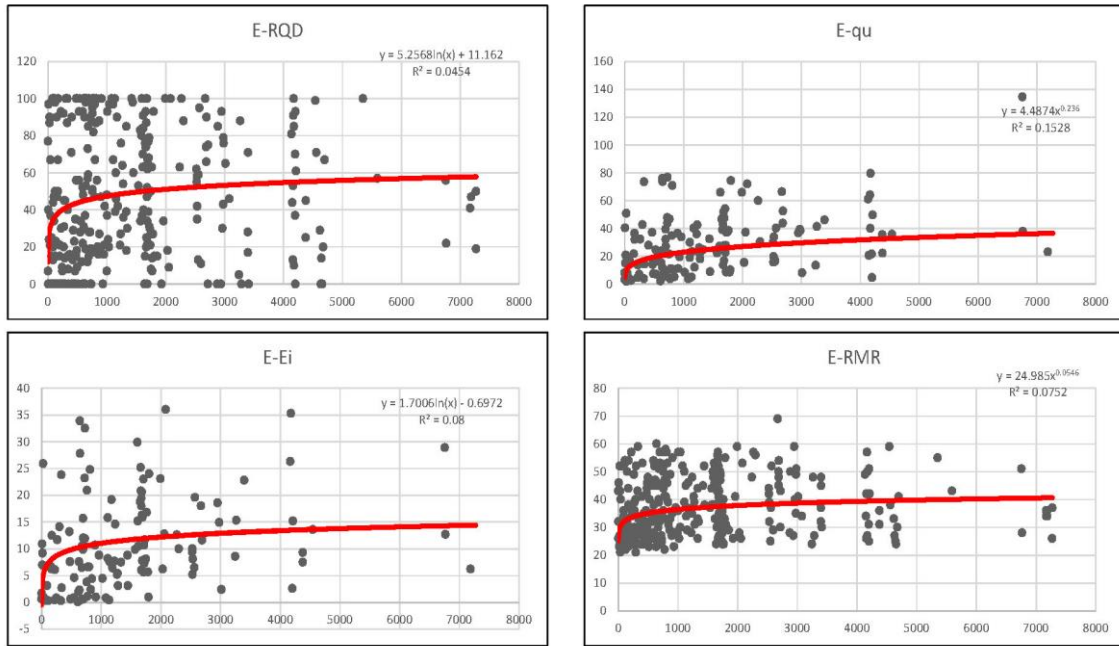
Şekil 6.40. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait kıltaşı/silttaşı seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



Şekil 6.41. İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait çakıltaşı/kumtaşı/kireçtaşı seviyeleri için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



Şekil 6.42. Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri



Şekil 6.43. Tüm veri havuzu için gerçekleştirilen regresyon analiz grafikleri

Gerçekleştirilen regresyon analizleri ile elde edilen korelasyon katsayılarına ait özet bilgiler Çizelge 6.15. ve Çizelge 6.16.’da verilmektedir. Elde edilen korelasyon katsayıları incelendiğinde, Örtü Yüğü’nün bağımlı değişken olarak alındığı regresyon analizlerinde en zayıf performansın Dolayoba formasyonu’na ait kireçtaşlarında, en iyi performansın ise Kırklareli formasyonu’na ait kireçtaşlarından elde edildiğı görülmüştür. Öte yandan, Örtü Yüğü – Derinlik değişimine bağılı olarak başta Deformasyon Modülü olmak üzere, kaya kütle parametrelerinin; kaya malzeme parametrelerine oranla daha yüksek bir ilişki içinde olduğı gözlenmiştir.

Deformasyon Modülü’nün bağımlı değişken olarak kullanıldığı regresyon analizlerinde ise; yine en düşük performansın Dolayoba formasyonu’na ait kireçtaşlarında yaşandığı gözlemlenmiştir. Korelasyon katsayılarına bakıldığında; tüm parametrelerin Deformasyon Modülü’nün değişiminde etkili olduğı ve çok değişkenli kestirim yaklaşımlarında kullanılmasının anlamlı olabileceğı neticesine ulaşılmaktadır. Ayrıca, elde edilen sonuçlara ait yorum ve değerlendirmeler “Bölüm 7 – Bulgular ve İrdeleme” kesiminde detaylı olarak yer almaktadır.

Çizelge 6.15. Korelasyon katsayıları (Örtü Yüğü – Parametre Analizleri)

Birim	Korelasyon Katsayısı (r)				
	Örtü Yüğü- RQD	Örtü Yüğü- E(MPa)	Örtü Yüğü- UCS(MPa)	Örtü Yüğü- Ei(GPa)	Örtü Yüğü- RMR
<b>Kırklareli Fm</b>					
Kireçtaşı	0.17	0.74	0.76	0.33	0.54
<b>Kartal Fm</b>					
Kiltaşı	0.45	0.38	0.29	0.25	0.44
<b>Kurtköy Fm</b>					
Kumtaşı	0.25	0.35	0.45	0.36	0.19
Çakıлтаşı	0.58	0.61	0.47	0.55	0.64
<b>Gözdağ Fm</b>					
Kireçtaşı	0.40	0.83	0.52	0.20	0.42
Kumtaşı	0.39	0.40	0.31	0.28	0.48
<b>Dolayoba Fm</b>					
Kireçtaşı	0.18	0.17	0.13	0.22	0.17
Kiltaşı	0.27	0.20	0.32	0.13	0.15
<b>İslambeyli-İhsaniye Fm</b>					
Marn	0.54	0.39	0.12	0.03	0.56
Kiltaşı- Silttaşı	0.23	0.50	0.22	0.16	0.22
Kumtaşı - Kireçtaşı - Çakıлтаşı	0.40	0.20	0.01	0.01	0.43
<b>Tüm Veri Seti</b>	<b>0.34</b>	<b>0.22</b>	<b>0.1</b>	<b>0.03</b>	<b>0.36</b>

Çizelge 6.16. Korelasyon katsayıları (Deformasyon Modülü – Parametre Analizleri)

Birim	Korelasyon Katsayısı (r)			
	E-RQD	E-UCS	E-Ei	E-RMR
<b>Kırklareli Fm</b>				
Kireçtaşı	0.32	0.96	0.61	0.13
<b>Kartal Fm</b>				
Kiltaşı	0.40	0.35	0.44	0.47
<b>Kurtköy Fm</b>				
Kumtaşı	0.23	0.24	1.00	0.40
Çakıltası	0.48	0.10	0.32	0.48
<b>Gözdağ Fm</b>				
Kireçtaşı	0.22	0.95	0.86	0.30
Kumtaşı	0.60	0.41	0.29	0.65
<b>Dolayoba Fm</b>				
Kireçtaşı	0.08	0.06	0.08	0.20
Kiltaşı	0.56	0.56	0.84	0.48
<b>İslambeyli-İhsaniye Fm</b>				
Marn	0.58	0.46	0.17	0.51
Kiltaşı-Silttaşı	0.20	0.69	0.63	0.42
Kumtaşı - Kireçtaşı -Çakıltası	0.82	0.53	0.63	0.32
<b>Tüm Veri Seti</b>	<b>0.22</b>	<b>0.38</b>	<b>0.28</b>	<b>0.29</b>

## 6.6. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizleri

Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinde amaç, bağımsız değişken olarak örtü yükü – derinlik parametresi ile, yine bağımsız değişken olarak kullanılan kaya malzeme ve kaya kütle parametrelerinin, bağımlı değişken olarak kullanılan deformasyon modülündeki toplam değişikliği matematiksel bir ifade ile açıklamaktır (Alpar, 2003).

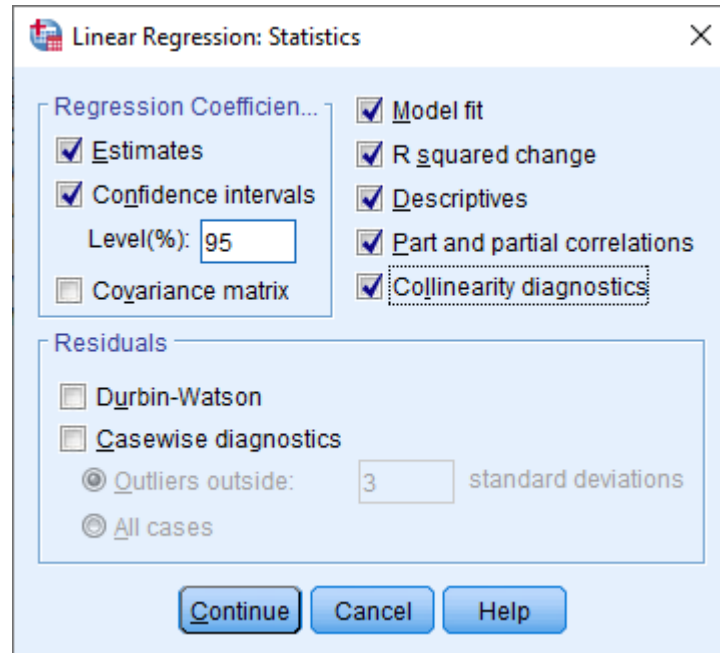
Çok değişkenli doğrusal regresyon modellerinin oluşturulması ile, bazı bağımsız değişkenlerin modele etkisi yüksek, bazılarının düşük olmaktadır. Burada iki amaç ile regresyon modelleri iki amaç ile kurulmuştur. Birincisi kullanılan bağımsız değişkenlerle kurulan modellerdeki korelasyon katsayısının ve anlamlılığın araştırılması, ikincisi de kurulan her modelde, örtü yükü parametresinin eklenmesi ve değişiminin izlenmesidir.

Çok değişkenli doğrusal regresyon modeli, bir bağımlı değişken ve n sayıda bağımsız değişkenin doğrusal fonksiyon üzerinde, aşağıdaki eşitlik yardımı ile (Eşitlik 6.3) kurulmaktadır.

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \dots + a_nx_n + k \quad (6.3)$$

Söz konusu eşitlikte; y bağımlı değişkeni, x her bir bağımsız değişkeni, a katsayıları bağımsız değişkenleri faktörleyen katsayıları ve k ise eşitliğin sabitini ifade etmektedir. Çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinin yapılması sırasında izlenen yöntem ve genel prensipler aşağıda verilmektedir.

- Çalışmalar kapsamında oluşturulan doğrusal regresyon modelleri IBM SPSS Statistics v23. programı ile gerçekleştirilmiştir. Program, yukarıda verilen eşitlikte yer alan katsayıları ve sabiti en yüksek korelasyon katsayısının elde edildiği duruma kadar iterasyon yapmaktadır. Neticede, doğrusal regresyon modeli elde edilmektedir.
- Regresyon analizleri, tüm formasyonlar ve bu formasyon içerisinde yer alan kaya grupları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş, öte yandan tüm verinin yer aldığı veri havuzu için de gerçekleştirilmiştir.
- Regresyon analizleri gerçekleştirilirken, kararlılık aralıkları sabit tutulmuş (%95), R<sup>2</sup> değişimleri, kısmi korelasyonlar ve eş doğrusallık tanımlamaları göz önüne alınmıştır (Şekil 6.44.).



Şekil 6.44. Regresyon analizlerinde uygulanan yaklaşımlar

- Bağımlı değişken olarak kullanılan deformasyon modülünün yanında, bağımsız değişken olarak örtü yükü – derinlik, tek eksenli sıkışma dayanımı, kaya malzeme elastisite modülü ile, RQD ve RMR değerlerinin yer aldığı ikili ve üçlü bağımsız değişken grupları eklenmiştir.
- RQD ve RMR puanları, analizlerde aynı anda bağımsız değişken olarak kullanılmamıştır. Bunun sebebi RMR puanının hesaplanmasında RQD puanının kullanılması ve halihazırda birbiri ile doğrudan ilişkili değişkenler olmasıdır.
- Eş satır sayısının (örnek sayısının) bağımsız değişken sayısına yaklaştığı koşullarda analizler gerçekleştirilmemiştir.

Oluşturulan doğrusal regresyon modelleri ile elde edilen korelasyon katsayılarını gösterir özet bilgiler, Çizelge 6.17.'de verilmektedir.

Çizelge 6.17. Korelasyon katsayılarına (r) ilişkin özet tablo

Birim / Bağımsız Değişkenler	EM > ÖY, RQD	EM > ÖY, qu	EM > ÖY, Ei	EM > ÖY, RMR	EM > RQD, qu	EM > ÖY, RQD, qu	EM > RQD, Ei	EM > ÖY, RQD, Ei*	EM > RQD, Ei, qu	EM > ÖY, RQD, Ei, qu	EM > El, qu	EM > ÖY, Ei, qu	EM > RMR, qu	EM > ÖY, RMR, qu	EM > RMR, Ei	EM > ÖY, RMR, Ei	EM > RMR, Ei, qu	EM > ÖY, RMR, Ei, qu
Kartal Formasyonu – Kilitaşı	0,34 (53)	0,223 (25)	0,455 (24)	0,396 (53)	0,250 (25)	0,250 (25)	0,440 (24)	0,474 (24)	0,447 (24)	0,482 (24)	0,440 (24)	0,457 (24)	0,243 (25)	0,256 (25)	0,496 (24)	0,576 (24)	0,509 (24)	0,588 (24)
Kurtköy Formasyonu – Çakıtaşı	0,614 (29)	0,431 (12)	0,341 (11)	0,606 (29)	0,391 (12)	0,518 (12)	0,401 (11)	0,459 (11)	0,460 (11)	0,622 (11)	0,246 (11)	0,499 (11)	0,356 (12)	0,526 (12)	0,413 (11)	0,478 (11)	0,462 (11)	0,631 (11)
Kurtköy Formasyonu – Kumtaşı	0,359 (15)	ANALİZ YAPILMAMIŞTIR			0,407 (15)	ANALİZ YAPILMAMIŞTIR												
Gözdag Formasyonu – Kireçtaşı	0,67 (10)	ANALİZ YAPILMAMIŞTIR			0,709 (10)	ANALİZ YAPILMAMIŞTIR												
Gözdag Formasyonu – Kıvrak Kumtaşı	0,603 (37)	0,459 (11)	0,399 (11)	0,624 (37)	0,475 (11)	0,485 (11)	0,408 (11)	0,432 (11)	0,492 (11)	0,494 (11)	0,444 (11)	0,468 (11)	0,471 (11)	0,478 (11)	0,435 (11)	0,441 (11)	0,492 (11)	0,492 (11)
Dolayoba Formasyonu – Kireçtaşı	0,107 (109)	0,181 (47)	0,076 (43)	0,099 (109)	0,116 (47)	0,236 (47)	0,195 (43)	0,196 (43)	0,196 (42)	0,197 (42)	0,082 (42)	0,094 (42)	0,157 (47)	0,276 (47)	0,282 (43)	0,282 (43)	0,289 (42)	0,289 (42)
Dolayoba Formasyonu – Kilitaşı	0,415 (22)	0,896 (6)	0,229 (6)	0,172 (22)	0,962 (6)	0,994 (6)	0,769 (6)	0,999 (6)	0,774 (6)	1 (6)	0,498 (6)	0,568 (6)	0,745 (6)	0,969 (6)	0,747 (6)	0,974 (6)	0,747 (6)	1 (6)
İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Kilitaşı Silttaşı	0,497 (13)	0,626 (5)	0,624 (5)	0,527 (13)	0,750 (5)	0,809 (5)	0,668 (5)	0,904 (5)	0,834 (5)	1 (5)	0,650 (5)	0,668 (5)	0,757 (5)	0,818 (5)	0,658 (5)	0,883 (5)	0,838 (5)	1 (5)
İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Marn	0,652 (17)	0,746 (12)	0,546 (11)	0,647 (17)	0,703 (12)	0,835 (12)	0,546 (11)	0,671 (11)	0,692 (11)	0,860 (11)	0,547 (11)	0,816 (11)	0,711 (12)	0,832 (12)	0,614 (11)	0,715 (11)	0,682 (11)	0,841 (11)
İhsaniye – İslambeyli Formasyonu – Kireçtaşı – Çakıtaşı – Kumtaşı	0,372 (12)	0,261 (9)	0,502 (7)	0,475 (12)	0,142 (9)	0,353 (9)	0,561 (7)	0,610 (7)	0,846 (7)	0,871 (7)	0,846 (7)	0,851 (7)	0,186 (9)	0,541 (9)	0,488 (7)	0,518 (7)	0,847 (7)	0,880 (7)
Kırklarlı Formasyonu – Kireçtaşı	0,746 (12)	ANALİZ YAPILMAMIŞTIR			0,744 (12)	ANALİZ YAPILMAMIŞTIR												
Tüm Veri	0,225 (329)	0,332 (136)	0,280 (126)	0,225 (328)	0,351 (136)	0,366 (136)	0,281 (126)	0,337 (126)	0,357 (126)	0,401 (126)	0,328 (126)	0,351 (126)	0,350 (135)	0,364 (135)	0,262 (126)	0,315 (126)	0,348 (126)	0,392 (126)

\*Parantez içerisinde analiz yapılan satır sayısı ifade edilmektedir



Kurtköy Formasyonu'na ait kumtaşı ve kireçtaşı seviyelerinde, deformasyon modülü deney sonuçlarının olduğu derinlik aralıklarında tek eksenli sıkışma dayanımı sonucu ve kaya elastisite modül sonuçları az olduğu için, bu iki kaya malzeme parametresinin bağımsız değişken olarak yer aldığı modeller kurulmamıştır. Aynı durum Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşları için de geçerlidir. Modellerde yer alan ortak satır (örnek) sayısının, bağımsız değişken sayısına yaklaştığı durumlarda; korelasyon katsayısı 1 olarak çıkmaktadır. Oluşan bu modeller, değerlendirme dışı bırakılmaktadır. Gerçekleştirilen çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerine ait değerlendirme ve yorumlamalar, “Bölüm 7 Bulgular ve İrdeleme” kesiminde detaylı olarak verilmektedir.

### **6.8. Çok Değişkenli Doğrusal Olmayan Regresyon Analizleri**

Kaya kütle deformasyon modülünün diğer kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametreleri ile, örtü yükü – derinlik koşullarına bağlı değişimleri incelendiğinde, birçok değişken çiftinin doğrusal olmayan bir ilişkide (logaritmik, üssel vb.) olduğu; gerçekleştirilen basit regresyon analizlerinde tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, kaya kütle deformasyon modülü için; örtü yükü koşulunun yanı sıra, diğer değişkenlerin de yer aldığı kestirim yöntemi için, doğrusal olmayan regresyon modellerinin daha yüksek doğruluk ve başarı elde edebileceği düşünülmüştür. Bu bağlamda, deformasyon modülünün bağımlı değişken; örtü yükü başta olmak üzere, diğer kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin de bağımsız değişken olarak kullanıldığı doğrusal olmayan regresyon modelleri oluşturulmuştur.

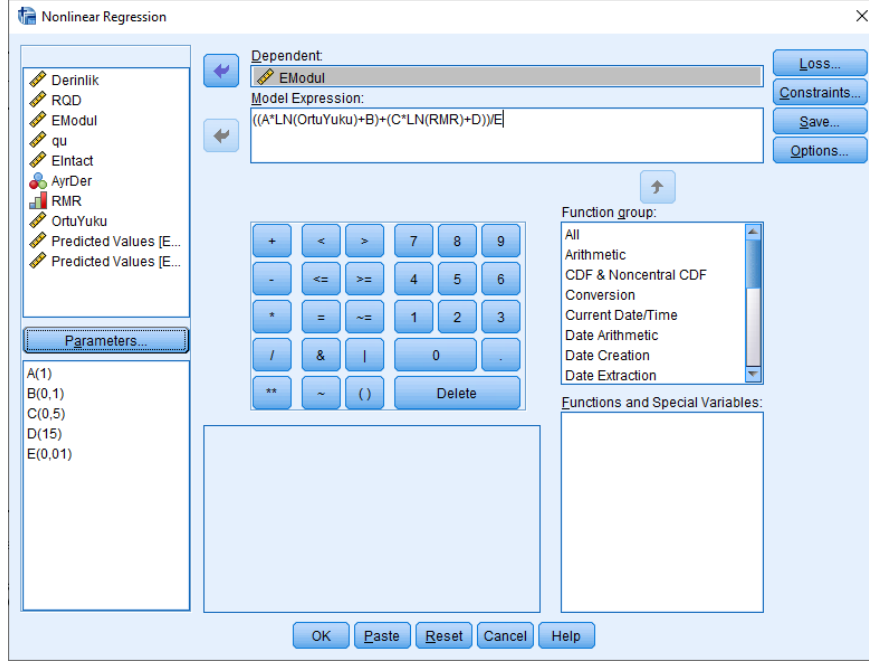
Doğrusal olmayan regresyon modelinde, doğrusal regresyon modelinden farklı olarak; bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişken ile doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel ilişkileri kullanılmakta ve modelleme bu eşitlik üzerinden yürütülmektedir. Doğrusal olmayan regresyon modeline örnek bir eşitlik şu şekilde ifade edilebilir.

$$y = k \left( (a_1 \ln x_1) + (a_2 x_2) + (a_3 x_3^{a_4}) \right) \quad (6.4)$$

Söz konusu eşitlikte; y bağımlı değişkeni, x her bir bağımsız değişkeni, a katsayıları bağımsız değişkenlere uygulanan katsayıları ve k ise isteğe bağlı olarak eklenen bir genel katsayıyı ifade etmektedir. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizlerinin yapılması sırasında izlenen metodoloji ve genel prensipler aşağıdaki şekilde özetlenebilir,

- Doğrusal olmayan regresyon analizleri IBM SPSS Statistics v23 programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizleri, diğer tüm regresyon analizleri gibi formasyonlar ve kaya grupları ayrılarak gerçekleştirilmiştir.
- Doğrusal olmayan regresyon analizleri, önceki analizlerde en yüksek ilişki düzeyinin gözlemlendiği Örtü Yüğü ve RMR ile; Örtü Yüğü – RMR –  $qu/Ei$  bağımsız değişken gruplarının yer aldığı değişkenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu seçimde, ortak satır veri sayısı da dikkate alınmıştır. Yapılan basit regresyon analizleri ve çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinde düşük korelasyon katsayısı tespit edilen Dolayoba formasyonu'na ait kireçtaşı ve kıltaşı seviyelerinde ve tüm verileri içeren genel veri seti için, çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modeli oluşturulmamıştır.
- Regresyon modelleri oluşturulurken, deformasyon modülü bağımlı değişken olarak seçilmiş (SPSS ekranında “EModul” olarak gözükmektedir), Örtü Yüğü, RMR Puanı, tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzeme elastisite modülünün de bağımsız değişken olarak alındığı eşitlikler oluşturulmuştur. Eşitliğe dahil edilen her bir bağımsız değişken için; deformasyon modülü ile basit regresyon analizlerinde ön plana çıkan matematiksel ilişkisi esas alınmıştır. Örtü Yüğü ve RMR puanının yer aldığı matematiksel bir eşitliğin yer aldığı bir örnek model Şekil – 6.45'te görülmektedir.
- Diğer taraftan, matematiksel eşitlikte, bağımsız değişkenlere sabit katsayılar uygulanmaktadır. Bu katsayılar başlangıç parametresi olarak modele tanımlanmaktadır. Yazılım, en yüksek korelasyon katsayısına erişene değin, katsayıları değiştirerek sürekli bir iterasyon gerçekleştirmekte ve en yüksek korelasyon katsayısına erişildiğinde modeli oluşturmaktadır.
- Tüm kaya grupları için, sözü edilen yöntem ve prensiplere bağlı olarak, regresyon modelleri oluşturulmuştur. Farklı bağımsız değişkenlerin yer aldığı eşitlikler birçok varyasyon ve kombinasyonda denenmiş, en yüksek doğruluğun yakalandığı model ve eşitlik; nihai olarak kabul edilmiştir.

Tüm kaya grupları için elde edilen nihai eşitlikler ve korelasyon katsayıları, Çizelge 6.18.'de ve 6.19'da özet olarak verilmiştir. Regresyon modelleri ve bu modellerin performansı ile ilgili detay çalışmalar, yorum ve değerlendirmeler ise “Bölüm 7 – Bulgular ve İrdeleme” kesiminde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 6.45 SPSS programında çok değişkenli regresyon modelinin kurulması

Çizelge 6.18. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modelleri ve ortaya çıkartılan eşitlikler (Örtü Yüğü ve RMR Puanı)

Kayaç Grubu	Eşitlik	Korelasyon Katsayısı (r) (Örnek Sayısı)
Kartal Formasyonu - Kıltaşı	$E_m = \frac{(630 * LN(\ddot{O}Y) - 2650) + (950 * LN(RMR) - 1440)}{1.18} \text{ (Eş. 6.5)}$	0.40 (52)
Kurtköy Formasyonu - Kumtaşı	$E_m = (((16.5 * (\ddot{O}Y)) - 2555) + ((1460 * LN(RMR)) - 2750)) * 0.8 \text{ (Eş. 6.6)}$	0.44 (15)
Kurtköy Formasyonu - Çakıltaşı	$E_m = (595 * LN(\ddot{O}Y) - 775) + (1000 * LN(RMR) - 3775) \text{ (Eş. 6.7)}$	0.56 (28)
Gözdağ Formasyonu - Kireçtaşı	$E_m = (1750 * (\ddot{O}Y^{0.16})) + ((-350 * LN(RMR)) - 1500) \text{ (Eş. 6.8)}$	0.71 (10)
Gözdağ Formasyonu - Kuvars Kumtaşı	$E_m = 2.02 * ((990 * (\ddot{O}Y^{0.22})) + (1820 * LN(RMR)) - 7360) \text{ (Eş. 6.9)}$	0.67 (37)
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Kıltaşı Siltaşı	$E_m = (((7.4 * \ddot{O}Y) + 410) + ((232 * LN(RMR)) - 970)) * 0.83 \text{ (Eş. 6.10)}$	0.53 (13)
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Marn	$E_m = 2.7 * ((-575 + (\ddot{O}Y * 7.1)) + (285 * LN(RMR) - 675)) \text{ (Eş. 6.11)}$	0.64 (17)
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Çakıltaşı, Kumtaşı, Kireçtaşı Arealanması	$E_m = (((160 * LN(\ddot{O}Y)) + 310) + ((-300 * LN(RMR)) + 430)) * 2.5 \text{ (Eş. 6.12)}$	0.46 (12)
Kırklareli Formasyonu - Kireçtaşı	$E_m = (((3010 * LN(\ddot{O}Y)) - 31300) + (11050 * (RMR^{0.225}))) \text{ (Eş. 6.13)}$	0.72 (12)

Çizelge 6.19. Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modelleri ve ortaya çıkartılan eşitlikler (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, Ei veya qu)

<b>Kayaç Grubu</b>	<b>Eşitlik</b>	<b>Korelasyon Katsayısı (r) (Örnek Sayısı)</b>
Kartal Formasyonu - Kıltaşı	$E_m = (0.86 * (\ddot{O}Y^{71})) + (855 * \text{LN}(\text{RMR}) + 2070) + (125 * E_{\text{intact}} - 4500)$ (Eş.6.14)	0.49 (23)
Gözdağ Formasyonu - Kuvars Kumtaşı	$E_m = 250 * ((23250 * (\ddot{O}Y^{0.001})) + ((4.25 * \text{LN}(\text{RMR})) - 11630) + ((0.85 * q_u) - 11650))$ (Eş.6.15)	0.52 (12)
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Marn	$E_m = 3.30 * ((-790 + (\ddot{O}Y * 4.75)) + (405 * \text{LN}(\text{RMR}) - 865)) + ((85 * q_u) - 455)$ . (Eş.6.16)	0.84(12)

## 7. BULGULAR VE İRDELEME

Tez çalışmaları kapsamında, amaç ve yöntem detayları “Bölüm 6, İstatistik Analiz Çalışmaları” içerisinde verilen regresyon analizleri sonucunda, öncelikle kaya kütlesi ve kaya malzemesine ait parametrelerin derinlik – örtü yükü ile ilişkisi, öte yandan bu parametrelerin kendi arasındaki ilişkiler irdelenmiştir. Gerçekleştirilen bu irdelemeler neticesinde, çeşitli kaya gruplarında, birbirleri ile ve derinlik – örtü yükü ile zayıf – orta – yüksek ilişki derecesine sahip parametre grupları belirlenmiş, kaya kütlesi deformasyon modülünün kestirimine yönelik olarak geliştirilen regresyon modelleri bu doğrultuda oluşturulmuştur. İleri aşamada gerçekleştirilen çok değişkenli regresyon analizleri ile birlikte, deformasyon modüllerinin tahminine yönelik olarak eşitlikler ortaya çıkarılmış; öte yandan bu eşitliklere ait sınırlamalar ve önerilen kullanım alanları ortaya çıkarılmıştır. Çalışmalar kapsamında farklı kaya grupları ile gerçekleştirilen analiz başlıkları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Basit Regresyon Analizleri
- Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizleri
- Çok Değişkenli Doğrusal Olmayan Regresyon Analizleri ve Model Oluşturma

### 7.1. Basit Regresyon Analizlerinin Değerlendirilmesi

Basit doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri, tüm kayaç grupları için, kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerinin, Örtü Yükü ile direk değişimini belirlemek; öte yandan söz konusu parametrelerin birbiri ile olan ilişkisini ortaya çıkarmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizler Microsoft Excel 2013 ve IBM SPSS Statistics v23 yardımı ile yapılmıştır. Analizlere ilişkin örnek sayıları, grafik dağılımları, anlamlılık değerleri vb. detaylar Bölüm 6 içerisinde ayrıntılı olarak verilmiştir. Farklı kayaç gruplarına ilişkin yapılan regresyon analizlerinde elde edilen korelasyon katsayıları ve en yüksek korelasyon katsayılarının elde edildiği ilişki tiplerini gösterir özet bilgiler Çizelge 6.15 ve 6.16. içerisinde, önceki bölümde yer almaktadır

Gerçekleştirilen bu çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir,

- Kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerin Örtü Yüğü ile ilişkisini irdeleyen basit regresyon analizlerinde, özellikle Örtü Yüğü – Deformasyon (Presiyometre) Modülü ve Örtü Yüğü – RMR veri ikilileri arasında 0.40 ve üzeri korelasyon katsayısı tespit edilmiştir. Bu durum, söz konusu veri grupları arasında orta – iyi düzeyde ilişki olduğunu göstermektedir. Göreceli olarak, Örtü Yüğü'nün, tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) ve malzeme elastisite modülü ( $E_i$ ) ile nispeten daha düşük korelasyon katsayıları sunduğu gözlenmiştir. Bu durum, kaya malzeme parametrelerinin derinlik ve örtü yüğü ile ilişkisinin daha zayıf olduğunu; bu parametrelerin ağırlıklı olarak kaya gruplarının litoloji ve malzeme özellikleri ile bağdaştığı görüşünü desteklemektedir. Öte yandan, gerçekleştirilen regresyon analizlerinde elde edilen sonuçlar; çoklu regresyon modellerinde; deformasyon modülünün tespitinde derinlik ve Örtü Yüğü parametrelerinin yanı sıra RMR puanının öncelikli olarak öne çıkarılmasını sağlamıştır.
- Kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerinin Presiyometre Modülü ile ilişkisini irdeleyen basit regresyon analizlerinde, 0.40 ve üzeri korelasyon katsayıları (orta – iyi düzeyde ilişki) tespit edilmiştir. Bu duruma bağlı olarak, RQD değeri, RMR puanı, tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) ve kaya malzeme elastisite modülü ( $E_i$ ) parametrelerinin kaya kütle deformasyon modülünün değişiminde etkili olduğu ve deformasyon modülünün derinlik ile değişimini kestirmeye yönelik modellerde kullanılması uygun görülmüştür.

## **7.2. Çok Değişkenli Regresyon Analizlerinin Değerlendirilmesi**

### **7.2.1. Çok Değişkenli Doğrusal Regresyon Analizlerinin Değerlendirilmesi**

Deformasyon modülünün değişimini irdelemek amacı ile kurulan regresyon modellerinin ilk aşaması olarak, iki ve daha fazla bağımsız değişkenin deformasyon modülü ile ilişkisini ele alan doğrusal regresyon modelleri IBM SPSS Statistics v23 programı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, farklı bağımsız değişken gruplarına bağlı olarak elde edilen korelasyon katsayıları ve örneklem sayıları Çizelge 6.17.'de, önceki bölümde verilmektedir.

Gerçekleştirilen çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerine ait değerlendirmeler şu şekildedir:

- Örneklenme sayılarının bağımsız değişken sayısına yaklaştığı kayaç gruplarında ikiden fazla bağımsız değişkenin sisteme dahil edildiği varyasyonlar değerlendirme dışı bırakılmıştır. Az örneklenme sayılarının yer aldığı varyasyonlarda 0.8 – 0.9 üstü yüksek korelasyon katsayıları çıkmıştır ancak bu değerler yanıltıcıdır. Örnek satır sayısı ile değişken sayısının birbirine çok yaklaştığı durumlarda ise korelasyon katsayısı gerçekleştirilmemiştir.
- Farklı kaya gruplarında, bağımsız değişken ile gerçekleştirilen doğrusal regresyon analizlerinde, Örtü Yüğü değişkeninin eklendiği tüm analizlerde korelasyon katsayısında belirli bir artışın yaşandığı gözlenmiştir. Bu durum, derinlik ve örtü yükü değişkenlerinin, deformasyon modülünün değişimine direkt etki etmesi şeklinde yorumlanabilmektedir.
- Yapılan analiz çalışmalarda, deformasyon modülünün kestiriminde en yüksek korelasyon katsayılarını, içinde RMR puanının yer aldığı varyasyonlar sağlamıştır. Bu bağlamda, RMR puanının, deformasyon modelinin tahmini için oluşturulacak regresyon modellerinde; örtü yükü ile birlikte mutlak olması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır.
- Bir diğer kaya kütle parametresi olarak ön plana çıkan RQD de, içinde bulunduğu varyasyonlarda, tek eksenli sıkışma dayanımı ve kaya malzeme elastisite modülü'nün tek başına yer aldığı varyasyonlara göre daha yüksek korelasyon katsayıları sunmuştur. Ancak, RMR puanı halihazırda içerisinde RQD yüzdesinden katma değer barındırmaktadır ve bu nedenle çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modellerinde RQD puanı, mükerrer etki oluşmaması amacı ile kullanılmamıştır.
- Tüm veri seti için gerçekleştirilen çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinde, farklı kayaç grupları için gerçekleştirilen analizlere göre, tüm bağımsız değişken varyasyonları için; daha düşük korelasyon katsayısı tespit edilmiştir. Farklı kayaç grupları ile karşılaştırıldığında, tüm kayaç gruplarını içeren genel veri setinde daha düşük korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bunun en önemli sebeplerinden biri genel veri setinde, verilerin saçılım göstermesidir. Bu bağlamda, deformasyon modülünün tayininde, kaya malzemesini ve kayaç tipini tarif etmede ve ayırt etmede ön plana çıkan parametrelerin de son derece önemli rol oynadıkları anlaşılmaktadır.

## 7.2.2. Çok Değişkenli Doğrusal Olmayan Regresyon Analizlerinin ve Nihai Kestirim Modellerinin Değerlendirilmesi

Çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri ve bu analizlerde elde edilen veri ve bulgular ışığında, deformasyon modülünün derinliğe ve örtü yüküne bağlı değişiminin kestirimine yönelik olarak; nihai modellerin oluşturulması amacı ile çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analiz çalışmaları IBM SPSS Statistics v23 programı ile gerçekleştirilmiştir.

Basit regresyon analizleri ve çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinde elde edilen bulgular ışığında; çalışmanın ana konusu ile de bağıntılı olarak derinlik – örtü yükü faktörünün yanı sıra; RMR puanı, tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) ve kaya malzeme elastisite modülü ( $E_i$ ) parametrelerinin de yer aldığı kestirim modelleri ve eşitlikler geliştirilmiştir. Dolayısıyla formasyonuna ait kireçtaşı ve kiltası seviyeleri haricinde, çalışılan tüm kayaç grupları için örtü yükü ve RMR puanına bağlı eşitlikler geliştirilmiş; eş veri satırı sayısına bağlı olarak da üç farklı kayaç gruplarında eşitliklere tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) ve kaya malzeme elastisite modülü ( $E_i$ ) dahil edilmiştir.

Regresyon modelleri ile elde edilen eşitlikler ve elde edilen korelasyon katsayıları sırası ile önceki bölümde Çizgel 6.18'de verilmekte olup, bulgular eşliğinde yapılan genel yorum ve değerlendirmeler de şu şekildedir

- Elde edilen regresyon modelleri ve eşitliklerde; 0.40 – 0.84 arasında korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bu korelasyon katsayıları, mevcut koşullarda geliştirilen eşitliklerle tanımlanan ilişkilerin orta – yüksek ilişki düzeyinde olduklarını ve söz konusu regresyon modellerinin kestirim yöntemi olarak kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.
- Kartal formasyonu'na ait kiltaları için geliştirilen regresyon modellerinde, 3 GPa üzeri deformasyon modülü değerleri ihmal edildiğinde, korelasyon katsayısında artışların yaşandığı ve ilişki düzeyinin yükseldiği görülmektedir ( $R=0.72$ ).
- Gözdağ formasyonu'na ait kuvars kumtaşı seviyelerinde, 7 GPa ve üzeri deformasyon değerleri ihmal edildiğinde, korelasyon katsayısında artışların yaşandığı ve ilişki düzeyinin yükseldiği görülmektedir ( $R=0.66$ ) Her iki durum, çalışmaların ağırlıklı olarak düşük dayanımlı kaya kütleler üzerinde yapılması nedeni ile beklenen ve açıklanabilir bir durumdur.



- Oluşturulan regresyon modellerinin önemli bir bölümünde, 5.00 metre ve daha sığ derinlikler ile bu derinliklerle meydana gelen örtü yükü koşullarında; ideal dağılımın çok dışında veya negatif değerler tespit edilmiştir. Eşitliklerin yüzey koşullarından 5.00 metre derinliğe kadar oluşan örtü yükleri için kullanılması önerilmemektedir.
- Regresyon modellerinde; örtü yükünün üssel fonksiyon olarak dahil olduğu kayaç gruplarında, deformasyon modülünün; 50.00 metre ve daha derin seviyelerde oluşan örtü yüklerinde beklenenden daha yüksek değerler verebildiği tespit edilmiştir. Bu tip regresyon modelleri esas alınarak yapılacak kestirim çalışmalarında örtü yükü parametresi hassasiyetle kullanılmalıdır.

Kurulan regresyon modellerinin tahmin performansının tespiti amacı ile, iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk olarak, kurulan regresyon modelleri üzerinde, istatistiksel tahmin performans hesaplamaları yapılmış ve değerlendirilmiş, ikincil olarak ise; oluşturulan eşitlikler her kayaç grubu için ayrı ayrı olmak üzere çalışma veri havuzunda kullanılmamış ve benzer niteliğe sahip deneme verileri ile test edilmiştir. Söz konusu istatistiksel performans analizleri ve deneme analizlerine ilişkin detaylar ve değerlendirmeler, bir sonraki bölümde verilmektedir.

### 7.3. Tahmin Performansına Yönelik Analizler

Elde edilen regresyon modellerinin, tahminine yönelik performanslarını değerlendirebilmek amacı ile, iki farklı istatistik performans indeksi kullanılarak performans analizleri yapılmıştır. Bu yöntemler;

- Varyans değerleri yüzdesel oranı (Value account for– VAF)
- Hataların ortalama kare kökü (Root mean square error – RMSE)

şeklinde dir.

Söz konusu yöntemler ile deformasyon modülünün sahada tespit edilen ve eşitlikler ile hesaplanan değerleri üzerinden performans analizleri gerçekleştirilmiştir (Grima ve Babuska, 1999; Finol et al., 2001; Gökçeoğlu ve Zorlu, 2004). Burada  $y$  değeri sahada ölçülen modül değerlerini,  $y'$  değeri ise eşitlikle hesaplanan modül değerlerini ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen RMSE ve VAF analizlerinde, sonuca bağlı olarak yorumlamaya esas kriterler şu şekildedir,

- VAF değerinin %100 olması eşitliğin tahmin performansının mükemmel olduğu anlamına gelmektedir. VAF değerinin negatif çıkması durumunda ise, eşitlik iyi bir tahmin performansı göstermemektedir.
- RMSE değeri, 0'a yaklaştıkça eşitliğin tahmin performansının mükemmel doğru gittiği söylenebilir. RMSE değerlerinin, asgari koşullarda sahada ölçülen deformasyon modül değerlerinin sayısal ortalamasından daha düşük olması beklenmektedir. Aksi durum, daha saçılımlı bir dağılım anlamına gelmekte olup, 1:1 eşitlik çizgisinden uzaklaşma anlamına gelmektedir.

Doğrusal olmayan regresyon analizleri ile elde edilen tüm eşitlikler üzerinden hesaplanan VAF ve RMSE değerleri Çizelge 7.1. ve Çizelge 7.2.'da verilmektedir.

Çizelge 7.1. Elde edilen eşitlikler, korelasyon katsayıları, RMSE ve VAF değerleri (Örtü Yüğü ve RMR Puanı)

Kayaç Grubu	Eşitlik	Korelasyon Katsayısı (r)	RMSE	VAF (%)
Kartal Formasyonu - Kilitaşı	$Em = ((630 * \ln(\ddot{O}Y) - 2650) + (950 * \ln(RMR) - 1440)) / 1.18$	0.40	0.81	40
Kurtköy Formasyonu - Kumtaşı	$Em = (((16.5 * (\ddot{O}Y)) - 2555) + ((1460 * \ln(RMR)) - 2750)) * 0.8$	0.44	0.34	86
Kurtköy Formasyonu - Çakilitaşı	$Em = (595 * \ln(\ddot{O}Y) - 775) + (1000 * \ln(RMR) - 3775)$	0.56	0.57	61
Gözdağ Formasyonu - Kireçtaşı	$Em = (1750 * (\ddot{O}Y^{0.16})) + ((-350 * \ln(RMR)) - 1500)$	0.71	0.17	68
Gözdağ Formasyonu - Kuvars Kumtaşı	$Em = 2.02 * ((990 * (\ddot{O}Y^{0.22})) + (1820 * \ln(RMR)) - 7360)$	0.67	1.30	65
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Kilitaşı Silttaşı	$Em = (((7.4 * \ddot{O}Y) + 410) + ((232 * \ln(RMR)) - 970)) * 0.83$	0.53	0.20	45
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Marn	$Em = 2.7 * ((-575 + (\ddot{O}Y * 7.1)) + (285 * \ln(RMR) - 675))$	0.64	0.34	58
İhsaniye - İsambeyli Formasyonu - Çakilitaşı, Kumtaşı, Kireçtaşı Ardalanması	$Em = (((160 * \ln(\ddot{O}Y)) + 310) + ((-300 * \ln(RMR)) + 430)) * 2.5$	0.46	0.35	41
Kırklareli Formasyonu - Kireçtaşı	$Em = (((3010 * \ln(\ddot{O}Y)) - 31300) + (11050 * (RMR^{0.225})))$	0.72	1.36	79

Çizelge 7.2. Elde edilen eşitlikler, korelasyon katsayıları, RMSE ve VAF değerleri (Örtü Yüğü ve RMR Puanı,  $E_i$  veya  $q_u$ )

Kayaç Grubu	Eşitlik	Korelasyon Katsayısı (r)	RMSE	VAF (%)
Kartal Formasyonu - Kıltaşı	$E_m = (0.86 * (\ddot{O}Y^{71})) + (855 * \text{LN}(\text{RMR}) + 2070) + (125 * E_{\text{intact}} - 4500)$	0.49	0.78	41
Gözdağ Formasyonu - Kuvars Kumtaşı	$E_m = 250 * ((23250 * (\ddot{O}Y^{0.001})) + ((4.25 * \text{LN}(\text{RMR})) - 11630) + ((0.85 * q_u) - 11650))$	0.52	1.25	58
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Marn	$E_m = 3.30 * ((-790 + (\ddot{O}Y * 4.75)) + (405 * \text{LN}(\text{RMR}) - 865)) + ((85 * q_u) - 455)$	0.84	0.29	69

Yapılan istatistiksel hesaplamalar ile; elde edilen RMSE ve VAF değerlerine bağılı olarak; eşitliklerin tahmin performansına yönelik tespit ve değerlendirmeler şu şekildedir,

- RMSE değerleri dikkate alındığında; Örtü Yüğü ve RMR puanı ile oluşturulan eşitliklerde, Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşları ile, İhsaniye – İslambeyli formasyonları'na ait Kıltaşı Silttaşı seviyelerinin en yüksek tahmin performansı gösterecekleri tespit edilmiştir. Örtü Yüğü ve RMR puanları ile tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) veya kaya malzemesi elastisite modülü ( $E_i$ ) de içeren eşitliklerde ise, İhsaniye – İslambeyli formasyonları'na ait marn seviyeleri için kurulan eşitliğin en yüksek tahmin performansı verdiği görülmüştür. Öte yandan, elde edilen diğer eşitliklerin tahmin performansları RMSE puanına göre daha düşük olmak ile birlikte, kaya grubu bazında, çalışmalarda kullanılan ortalama deformasyon modül değer aralıkları da dikkate alındığında; kabul edilebilir seviye görülmektedir.
- VAF değerleri dikkate alındığında, Örtü Yüğü ve RMR puanı yardımı ile kurulan eşitliklerde; en yüksek tahmin performansının Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşı ve kuvars kumtaşı seviyeleri ile, Kırklareli formasyonu'na ait kireçtaşlarının sahip olduğu, Örtü Yüğü, RMR puanı, tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) veya kaya malzeme elastisite modülü ( $E_i$ ) ile kurulan eşitliklerde ise, en yüksek tahmin performansının İhsaniye – İslambeyli formasyonu'na ait marn seviyelerinde var olduğu belirlenmiştir. Diğer kurulan eşitliklerde, nispeten daha düşük performans kabiliyetleri oluşmakla birlikte, VAF değerlerine bakıldığında; 0'a giden, sonsuz ve/veya negatif değer olmaması nedeni ile; bu tahmin performanslarının da kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

- RMSE ve VAF değerlerine bir arada bakıldığında, Gözdağ formasyonu'na ait kireçtaşları ve İhsaniye İslambeyli formasyonu'na ait Marn seviyeleri için kurulan eşitliklerin en yüksek tahmin performansına eriştiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen istatistik analizler ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kayaç grupları için kurulan eşitliklerin; tahmin performanslarının ağırlıklı olarak kabul edilebilir düzeyde oldukları belirlenmiştir. Tahmin performansının tespitine yönelik diğer bir yaklaşım olarak, elde edilen eşitlikler; bağımsız veriler ile test edilmiş tahmin performansları farklı bir yaklaşım ile yorumlanmıştır. Söz konusu çalışmalar ve değerlendirmeler bir sonraki bölümde sunulmaktadır.

#### **7.4. Eşitliklerin Bağımsız Veriler ile Test Edilmesi ve Yorumlanması**

Çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modelleri ile elde edilen eşitliklerin tahmin performanslarını değerlendirebilmek için, istatistiksel performans analizlerinin yanı sıra; elde edilen eşitlikler, bağımsız verilerle test edilmiştir. Bağımsız veri tabanına ait sahada ölçülen deformasyon modül değerleri ile, eşitlikler ile elde edilen deformasyon modül değerleri karşılaştırılmış, korelasyon katsayıları tespit edilmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu kesimde kullanılan bağımsız veri tabanına ait özellikler şu şekildedir,

- Elde edilen deneme verileri, eşitliklerin elde edildiği bütün kaya grupları için hazırlanmıştır.
- Söz konusu veriler için, çalışma veri tabanında olduğu gibi, eşitliklerde kullanılan tüm kaya kütle ve kaya malzeme parametreleri yer almaktadır.
- Deneme verilerinin yer aldığı veri tabanı, hiçbir şekilde çalışma veri tabanı içerisinde yer almamıştır ve kullanılmamıştır.
- Veri tabanının elde edildiği araştırma sondaj çalışmaları, çalışma verilerinin elde edildiği araştırma sondajları ile aynı bölgelerde gerçekleştirilmiş ancak farklı sondaj lokasyonlarında yer almıştır. Kayaç gruplarının niteliği, araştırma sondajlarının metodolojisi; yerinde (in – situ) deneylerinin metodolojisi ve kaya mekaniği laboratuvar deneylerinin yeri ve metodolojisi aynı niteliktedir.

- Veri tabanında yer alan tüm kaya kütle ve kaya malzeme parametreleri ile çalışma derinliklerinin değer aralıkları; çalışma veri tabanındaki parametrelere ait değer aralıklarının içerisinde kalmaktadır.

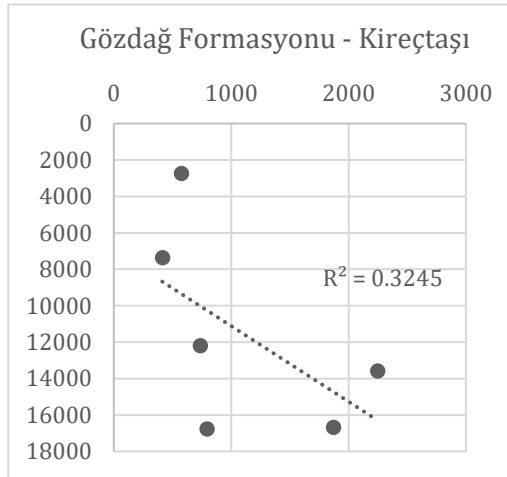
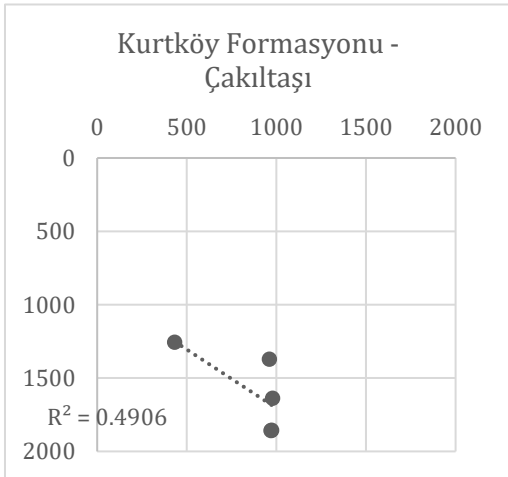
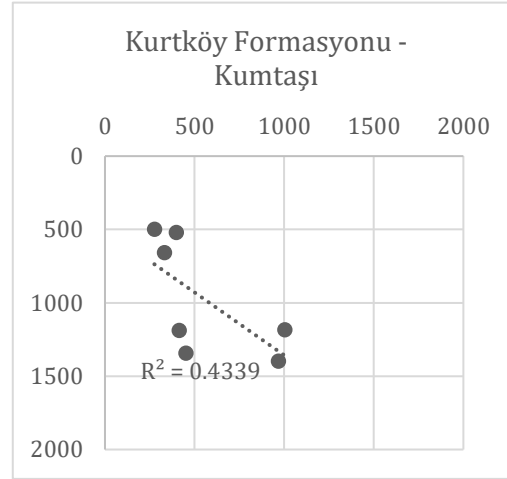
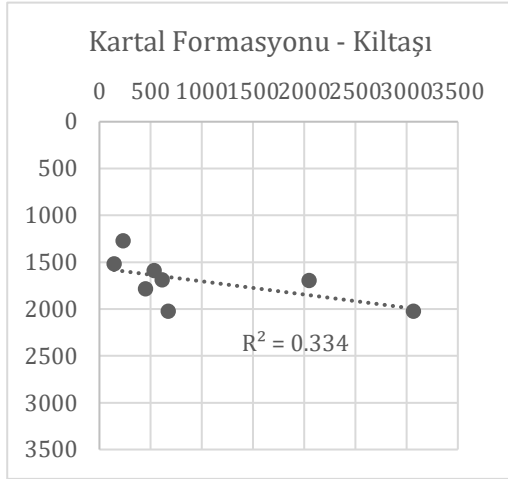
Deneme verileri yardımı ile , Örtü Yüğü, RMR puanı, tek eksenli sıkışma dayanımı ( $q_u$ ) ve kaya malzeme elastisite modülü ( $E_i$ ) kullanılarak hesaplanan deformasyon modül değerleri, aynı seviyeler için tespit edilen deformasyon modülleri ile karşılaştırılmış ve korelasyonu değerlendirilmiştir. Tespit edilen korelasyon katsayıları Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4.'te, dağılım grafikleri ise Şekil 7.1. ve Şekil 7.2.'de verilmektedir. Grafiklerde x eksenini hesaplanan, y eksenini ise yerinde ölçülen deformasyon modüllerini simgelemektedir.

Çizelge 7.3. Deneme verileri ile elde edilen korelasyon katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı)

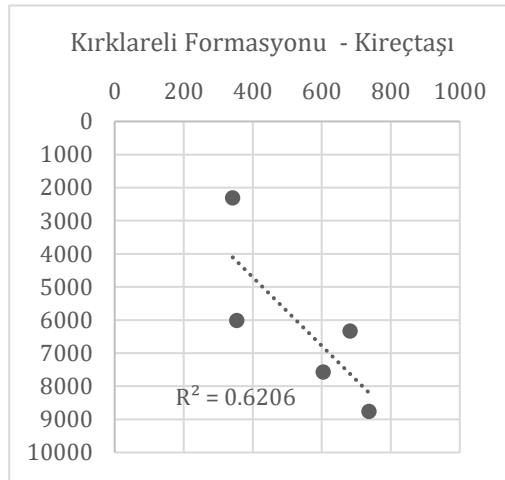
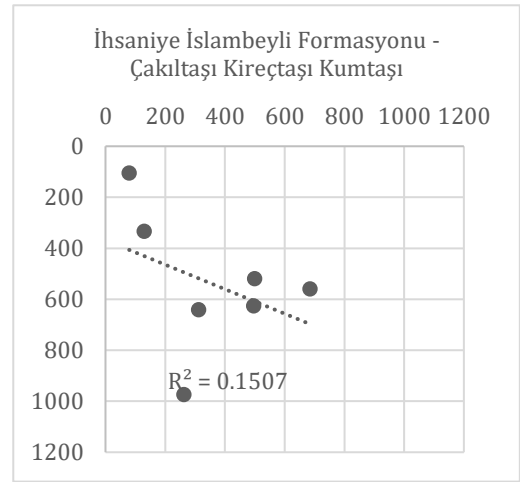
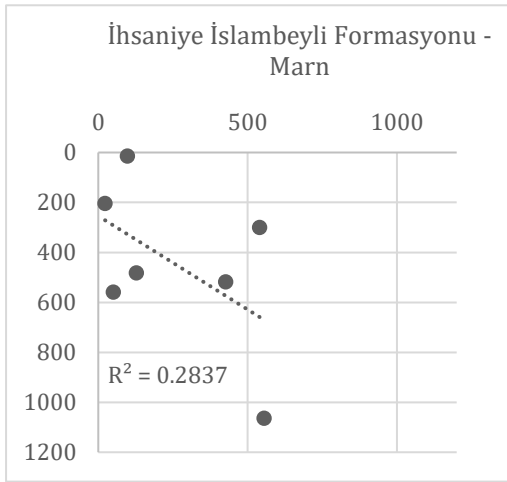
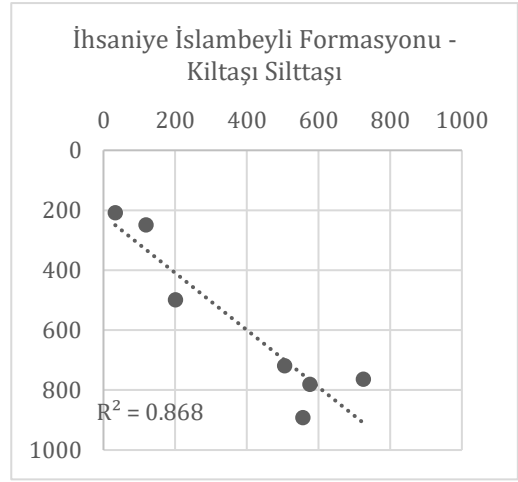
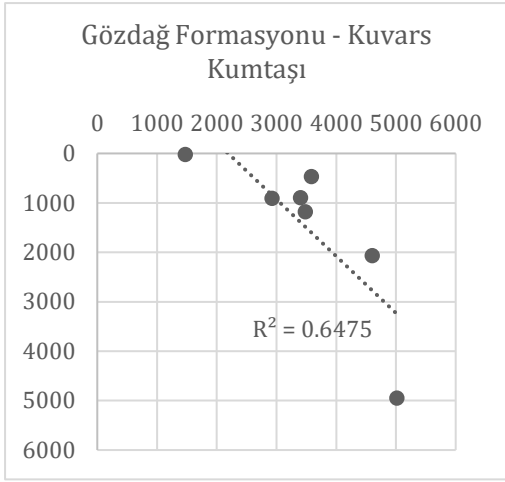
Kayaç Grubu	Eşitlik	Korelasyon Katsayısı (r)	Korelasyon Katsayısı (Deneme Verileri)
Kartal Formasyonu - Kıltaşı	$E_m = ((630 * \ln(\bar{O}Y) - 2650) + (950 * \ln(RMR) - 1440)) / 1.18$	0.40	0.58
Kurtköy Formasyonu - Kumtaşı	$E_m = (((16.5 * (\bar{O}Y) - 2555) + ((1460 * \ln(RMR)) - 2750)) * 0.8$	0.44	0.65
Kurtköy Formasyonu - Çakıltaşı	$E_m = (595 * \ln(\bar{O}Y) - 775) + (1000 * \ln(RMR) - 3775)$	0.56	0.70
Gözdağ Formasyonu - Kireçtaşı	$E_m = (1750 * (\bar{O}Y^{0.16})) + ((-350 * \ln(RMR)) - 1500)$	0.71	0.57
Gözdağ Formasyonu - Kuvars Kumtaşı	$E_m = 2.02 * ((990 * (\bar{O}Y^{0.22})) + (1820 * \ln(RMR) - 7360))$	0.67	0.8
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Kıltaşı Silttaşı	$E_m = (((7.4 * \bar{O}Y) + 410) + ((232 * \ln(RMR)) - 970)) * 0.83$	0.53	0.93
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Marn	$E_m = 2.7 * ((-575 + (\bar{O}Y * 7.1)) + (285 * \ln(RMR) - 675))$	0.64	0.53
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Çakıltaşı, Kumtaşı, Kireçtaşı Ardalanması	$E_m = (((160 * \ln(\bar{O}Y)) + 310) + ((-300 * \ln(RMR)) + 430)) * 2.5$	0.46	0.40
Kırklareli Formasyonu - Kireçtaşı	$E_m = (((3010 * \ln(\bar{O}Y)) - 31300) + (11050 * (RMR^{0.225})))$	0.72	0.78

Çizelge 7.4. Deneme verileri ile elde edilen korelasyon katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, Ei veya qu)

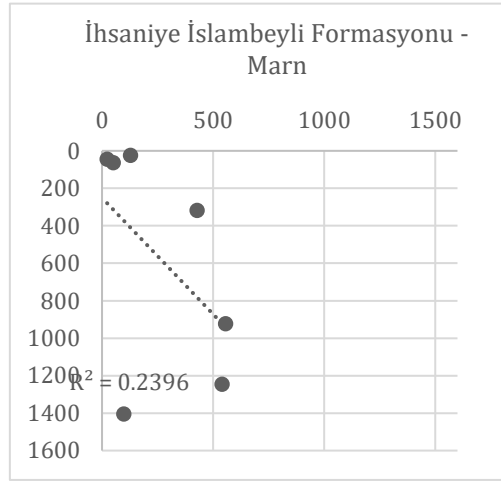
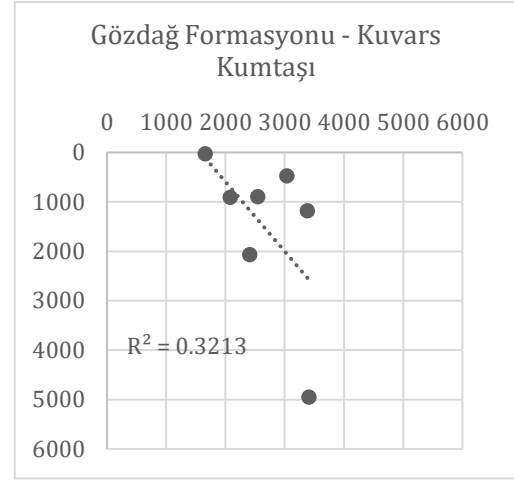
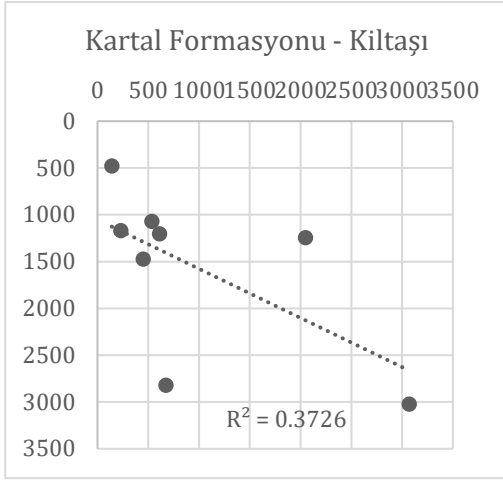
Kayaç Grubu	Eşitlik	Korelasyon Katsayısı (r)	Korelasyon Katsayısı (Deneme Verileri)
Kartal Formasyonu - Kıltaşı	$Em=(0.86*(\ddot{O}Y^{71})+(855*\text{LN}(\text{RMR})+2070)+(125*E_{\text{intact}}-4500)$	0.49	0.61
Gözdağ Formasyonu - Kuvars Kumtaşı	$Em=250*((23250*(\ddot{O}Y^{0.001})+((4.25*\text{LN}(\text{RMR}))-11630))+((0.85*qu)-11650))$	0.52	0.56
İhsaniye - İslambeyli Formasyonu - Marn	$Em=3.30*((-790+(\ddot{O}Y*4.75))+(405*\text{LN}(\text{RMR})-865))+((85*qu)-455).$	0.84	0.49



Şekil 7.1. Deneme verileri ile elde edilen belirleme katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı)



Şekil 7.1. (devam ediyor) Deneme verileri ile elde edilen belirleme katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı)



Şekil 7.2. Deneme verileri ile elde edilen belirleme katsayıları (Örtü Yüğü ve RMR Puanı, E<sub>i</sub> veya q<sub>u</sub>)

Deneme verileri ile elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmaya esas elde edilen korelasyon katsayıları; ağırlıklı olarak, regresyon modelleri ile oluşturulan eşitliklerin korelasyon katsayılarından yüksektir. Ancak korelasyon katsayısının daha düşük olarak gözlemlendiği eşitlikler dahil olmak üzere; korelasyon katsayılarında, orta – yüksek ve çok yüksek ilişki düzeyi ( $r > 0.5$ ) gözlemlenmiştir. Bu durum, eşitliklerin tahmin performansının kabul edilebilir ölçüde ve kabul edilebilir ölçünün üzerinde olduğu anlamına gelmektedir.



## **7.5. Deformasyon Modülünün Derinlikle Değişiminin Değerlendirilmesi, Avantaj ve Sınırlamaları**

Deformasyon modülünün tahminine yönelik olarak, geçmişten günümüze bir çok araştırmacı, belirli kabuller ve eldeki veriler doğrultusunda kestirim yöntemleri geliştirmiştir. Deformasyon modülünün sahada tespitine yönelik deneylerin maliyet zorlukları, araştırma sürelerini uzatan faaliyetler olması nedeni ile, bir çok tasarım çalışmasında da, literatürde yer bulan eşitlikler kullanılmıştır ve kullanılmaktadır.

Önceki araştırmalarda, deformasyon modülünün değişiminde derinlik – örtü yükü faktörlerinin etkisinin araştırılması ve kestirim modellerinde kullanılması, sınırlı olarak ele alınmış ve gelişmeye açık bir konu olarak kalmıştır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen tez çalışmasında, öncelikli olarak; derinliğin – örtü yükünün değişmesi ile birlikte; hangi kaya kütle ve kaya malzeme parametrelerinin değişeceği ele alınmış, öte yandan söz konusu bu parametreler arasında anlamlı bir matematiksel ilişki olup olmadığı irdelenmiştir. Önceki bölümlerde detaylarına değinilen bu irdellemelerde, deformasyon modülünün ve mühendislik tasarımında kullanılan başlıca kaya kütle parametrelerinin ilişkili olduğu, bunun yanı sıra, başta deformasyon modülü olmak üzere; mühendislik tasarımında kullanılan başlıca kaya kütle parametrelerinin de derinlik – örtü yükünün değişimine bağlı olarak etkilendiği; gerçekleştirilen basit regresyon ve korelasyon analizlerinde tespit edilmiştir.

Bu koşullara bağlı olarak, deformasyon modülünün, derinlik – örtü yükü ve belirli kaya kütlesi – kaya malzemesi parametreleri ile ampirik yöntemlerle tespit edilmesine yönelik olarak, veri tabanında yer alan farklı kayaç grupları bazında, çok değişkenli doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modellerine bağlı oluşturulan eşitliklerin istatistiksel analiz yöntemleri ile tahmin performansları değerlendirilmiş, öte yandan deneme verileri ile performansları test edilmiştir. Yapılan regresyon modellerinde korelasyon katsayılarında orta – yüksek ilişki derecesi gözlenmiş, tahmin performanslarının kabul edilebilir – iyi seviyede oldukları tespit edilmiştir.

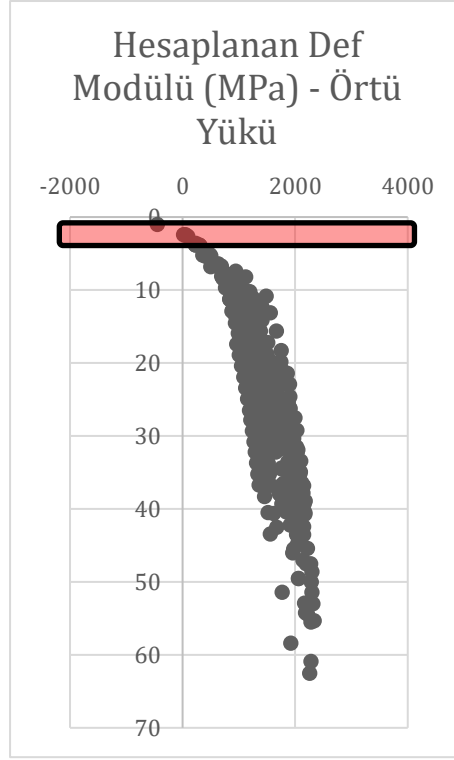
Elde edilen tüm veriler ışığında, deformasyon modülünün derinlikle değişimi ve kestirim modellerindeki rolüne ilişkin ana değerlendirmeler, avantajlar ve sınırlamalar şu şekilde özetlenebilir.

- Kaya kütle deformasyon modülünün derinlik – örtü yükü etkisine bağlı olarak yaşadığı değişim irdelendiğinde, örtü yükünün arttığı tüm koşullarda, deformasyon modülünün arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle gerçekleştirilen basit regresyon modellerinde, diğer kaya kütle parametreleri ile birlikte, deformasyon modülünün çoğunlukla doğrusal veya logaritmik bir ilişki içerisinde olduğu görülmüştür. Bu durum, ilgili derinlikte var olan örtü yükü ve normal gerilmenin artışına bağlı olarak; kaya kütle kalitesine dair tüm parametrelerin derinlikle birlikte bütünü ile iyileşmesinin bir sonucu olarak yorumlanmaktadır. Bir başka deyişle kaya kütle deformasyon modülüne etki ettiği düşünülen tüm kaya kütle parametrelerinin derinliğe bağlı olarak masif kaya özelliklerine doğru gitmesi, deformasyon modülünün de artışını mümkün kılmaktadır.
- Gerçekleştirilen basit doğrusal regresyon modellerinde, ikinci bir bağımsız değişken olarak örtü yükünün dahil edildiği tüm koşullarda, regresyon modellerinin tahmin performansının arttığı gözlenmiştir. Bu durum, derinlik ve örtü yükünün deformasyon modülünün belirlenmesinde kullanılabilir bir parametre olarak değerlendirilebileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır.
- Kurulan nihai regresyon modelleri ve eşitlikler yardımı ile, deformasyon modülünün kestirimine yönelik olarak bir yaklaşım oluşturulmuştur. Kayaç grupları özelinde birbirinden ayrılan farklı eşitlikler kullanılarak, mühendislik projelerinde çok yaygın olarak kullanılan deformasyon modülünün hesaplanması mümkün kılınmış, benzer kayaç grupları için oluşturulan farklı eşitlikler ve varyasyonlar ile, alternatifli hesaplamalar yapılması ve doğruluğun artırılması amaçlanmıştır. Özellikle veri tabanında yer alan kaya gruplarının çeşitliliği ve kullanılan parametrelerin değer aralıkları göz önüne alındığında, birçok mühendislik yapısının tasarımında kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

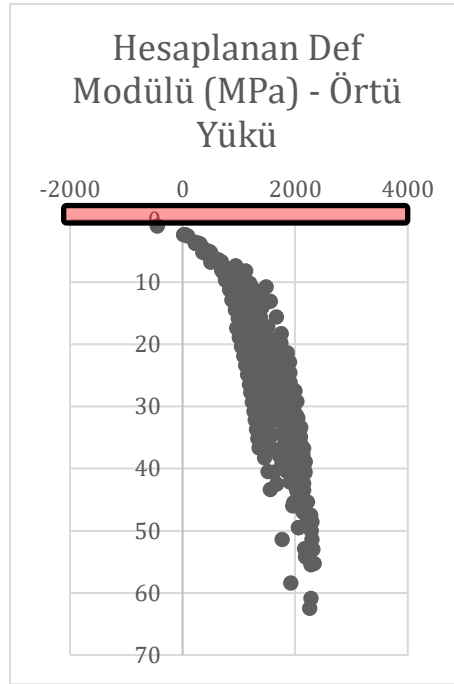
Gerçekleştirilen regresyon modellerinde, oluşturulan eşitliklerin zayıf yönleri ve sınırlamaları da ortaya konmuştur. Farklı kaya grupları için benzer ancak birebir olmayan bu sınırlamaları, çalışma kapsamında genelleştirmek ve genel bir sınırlama olarak ortaya koymak mümkündür. Öte yandan, söz konusu sınırlamalar, derinlik – örtü yükü koşuluna bağlı olarak hesaplanan deformasyon modül değerlerinin dağılım grafiklerinde de “sakıncalı alanlar” olarak Şekil 7.3. ve 7.6. aralığında gösterilmiştir. Söz konusu grafiklerde sakıncalı alan göstermeyen eşitliklerin dağılımları yer almamaktadır.

- Geliştirilen eşitliklerin, 5.00 metre derinlikten daha sığ kesimler için direkt olarak kullanılmaması, kullanılması durumunda; imkanlar dahilinde ilave bir metod ile kontrolünün yapılması önerilmektedir.
- Geliştirilen eşitliklerin, yerinde ölçülen deformasyon modülü 5000 MPa ve üzerinde olması beklenen ve kıyasla daha masif ve kaya kütlelerde daha düşük tahmin performansı ortaya koyacağı öngörülmektedir. Bu tip kaya gruplarında eşitliklerin kullanılması durumunda, kontrolünün sağlanması önerilmektedir.
- Geliştirilen eşitlikler, İstanbul ili içerisinde yaygın olarak gözlenen İstanbul Paleozoyik İstifi mensubu orta – çok ayrışmış parçalı kayalar ve İstanbul Avrupa Yakası'nda yoğun olarak gözlenen miyosen sedimanter kayaç grupları esas alınarak hazırlanmıştır. Bu eşitliklerin, masif kaya kütlelerinde olduğu gibi, volkanik ve/veya metamorfik kökenli kayaç gruplarında kullanılması, geliştirmeye açık bir konudur.
- Kullanılan veri tabanında, derinliğe ait değer aralığı 0.00 – 50.00 metre aralığı ile sınırlandırılmıştır. Eşitliklerin 50.00 metreden derinlikler için de kullanılabilir olduğu öngörülmekle birlikte, daha derin kesimler için oluşacak örtü yükü koşullarındaki tahmin performansının değerlendirilmesi; geliştirmeye açık bir konudur. Öte yandan, matematiksel ilişki içerisinde; örtü yükünün üssel ifade ile yer aldığı eşitliklerde, örtü yükünün çok yüksek olduğu kesimlerde, deformasyon modülünün beklenenden yüksek çıkabileceği öngörülmektedir. Söz konusu eşitliklerin bu şartlarda kullanılması durumunda, kontrolünün de sağlanması avantajlı olacaktır.

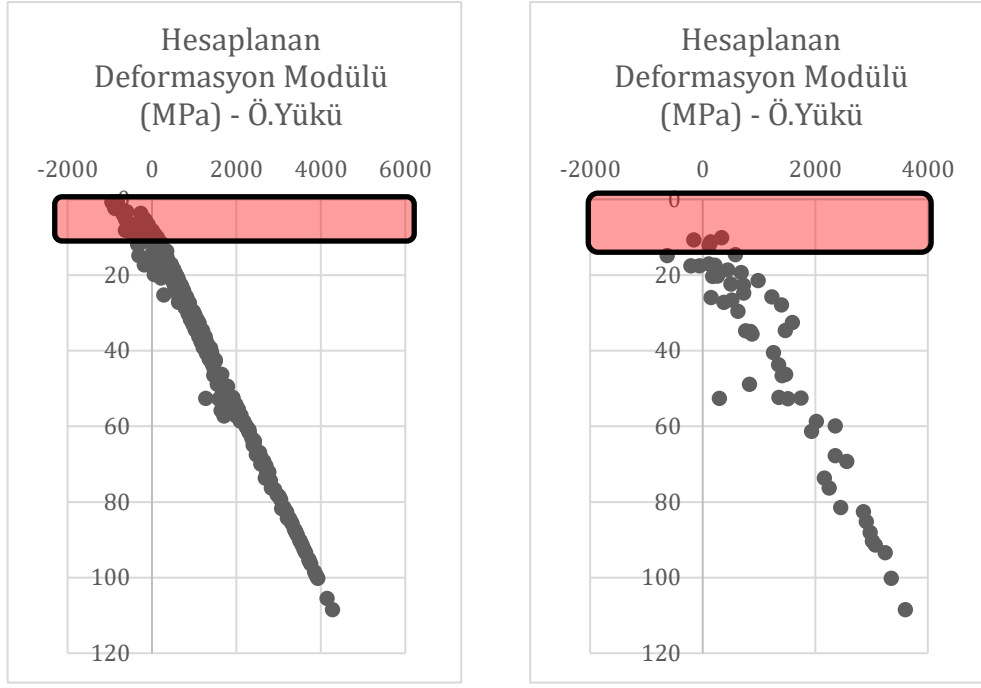
Geliştirilen ampirik eşitlikler, çalışma konusu olan kayaç grupları için ayrı ayrı hazırlanmış ve orta – yüksek tahmin performansı göstermiştir. Regresyon modelleri sürecinde, tüm kayaç gruplarını içinde barındıran genel veri grubu kullanılarak oluşturulan regresyon modellerinin düşük tahmin performansı göstermesi nedeni ile, tüm kayaç gruplarında kullanılacak bir eşitlik geliştirilmemiştir. Ancak, Hoek (1995 ve 2007) tarafından kaya kütlelerin yenilme zarflarında belirleyici bir parametre olan kaya malzemesi sabiti gibi, kayaç tipini ifade eden ve ayırt eden parametre ya da parametrelerin kullanılması ve tüm kayaç grupları için faydalanılabilecek ek bir kestirim yöntemi oluşturulması, geliştirmeye açık bir konu olacaktır.



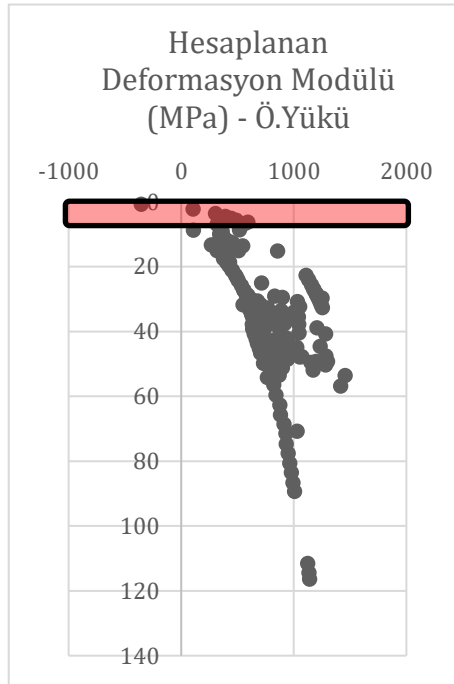
Şekil 7.3. Kartal formasyonuna ait kilttaşları kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.5.) sınırlama alanları



Şekil 7.4. Kurtköy formasyonuna ait çakilttaşları kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.7.) sınırlama alanları



Şekil 7.5. İslambeyli İhsaniye formasyonlarına ait marn seviyeleri kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.11. ve eşitlik 6.16.) sınırlama alanları



Şekil 7.6. İslambeyli İhsaniye formasyonuna ait çakıltaşı – kumtaşı – kireçtaşı seviyeleri kullanılarak elde edilen eşitlikteki (eşitlik 6.12.) sınırlama alanları

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

“Derinliğin düşük dayanımlı kaya kütlelerinin deformasyon modülü üzerindeki etkisinin araştırılması” başlıklı tez çalışmasının temel amacı, kaya kütleleri içinde veya üzerinde inşa edilecek olan büyük mühendislik yapılarının tasarımında önemli bir parametre olan deformasyon modülünün tayininde, derinlik ve örtü yükü etkisinin araştırılması, ilişkisinin değerlendirilmesi ve deformasyon modülünün kestirimine yönelik olarak derinlik koşulunun yanı sıra, kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin de kullanıldığı kestirim modellerinin geliştirilmesidir. Bu yönde, dünya literatüründe oldukça sınırlı sayıda çalışma mevcut olup, tez çalışmalarının sonuçları ile literatüre bu konuda katkı yapılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler şu şekilde özetlenmektedir:

1. Tez çalışmaları kapsamında, 4 farklı çalışma bölgesinde toplam 124 adet jeoteknik amaçlı araştırma sondajına ait loglardan, yerinde (in – situ) deney sonuçlarından ve laboratuvar deney sonuçlarından yararlanılarak bir veri tabanı hazırlanmıştır. Bu veri tabanında, İstanbul Paleozoyik İstifi içerisinde yer alan 7 farklı formasyona ait 11 farklı kaya grubu ayırt edilmiş ve tüm çalışmalar bu kaya gruplarından elde edilen veriler üzerinde yürütülmüştür.
2. Çalışma veri havuzunu oluşturan kaya gruplarına ait, RQD, RMR, Deformasyon Modülü (Em), tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) ve kaya malzemesi elastisite modülü (Ei) parametreleri için uç değer analizleri gerçekleştirilmiş ve tüm kaya grupları için veri tabanı, temel analizlere başlamadan önce rafine edilerek iyileştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, veri tabanında, söz konusu parametreler içerisinde, veri bütünlüğünü ve veri düzenini bozacağı düşünülen uç değerler değerlendirme dışı bırakılmıştır.
3. Veri havuzunda yer alan kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametreleri kullanılarak, literatürde yer alan ve mevcut parametreleri kullanan 10 farklı ampirik eşitlik test edilmiştir. Yapılan test çalışmalarında, kaya gruplarının geneli esas alındığında Mitri (1994) tarafından önerilen eşitliğin en yüksek performansı gösterdiği, formüllerin geneli esas alındığında ise İhsaniye – İslambeyli formasyonlarına ait ardalımalı seviyelerin en yüksek performansı gösterdiği görülmüştür. Öte yandan, her bir kaya grubu için, sahada ölçülen deformasyon modülleri ile 10 farklı eşitlik yardımıyla hesaplanan deformasyon modül değerleri grafik üzerinde karşılaştırılmıştır.

4. Kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinin, derinlikle ilişkisi ve deformasyon modülü ile ilişkisinin irdelenmesi amacı ile, basit regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Veri tabanındaki derinlik değerleri, her kaya grubu için ortalama olarak tespit edilen birim hacim ağırlıkları kullanılarak “örtü yükü” parametresine dönüştürülmüştür. Yapılan analizlerde, RQD, RMR ve Deformasyon Modülü (Em) değerlerinin örtü yükü ile anlamlı bir ilişki içerisinde olduğu (sig.<0.05) belirlenmiştir. Gerçekleştirilen basit regresyon analizleri, kaya kütle – kaya malzeme parametreleri ile örtü yükü arasında ve kaya kütle – kaya malzeme parametreleri ile yerinde ölçülen deformasyon modülü değerleri arasında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen basit regresyon analizlerinde, örtü yükünün değişimi ile en fazla etkilenen parametrelerin RQD, RMR ve deformasyon modülü gibi kaya kütlelerine ait özellikler olduğu, kaya malzemesi parametrelerinin göreceli olarak örtü yükü ile daha düşük korelasyon katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Deformasyon modülünün sabit değişken olarak tutulduğu regresyon analizlerinde ise RMR ve RQD gibi kaya kütlesi parametrelerinin daha yüksek korelasyona sahip olduğu gözlemlenmiştir.
5. Deformasyon modülünün, örtü yükü, RMR puanı, tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) ve kaya malzemesi elastisite modülü (Ei) kullanılarak kestirime yönelik olarak çok değişkenli regresyon modelleri çalışılmıştır. Öncelikle doğrusal regresyon modelleri geliştirilmiş, farklı kaya grupları için yüksek korelasyon katsayısının elde edildiği girdi değişkenleri irdelenmiştir. Burada ön plana çıkan husus, girdi değişkenleri, örtü yükü dahil edilmeden önce ve sonrası olarak kıyaslandığında, korelasyon katsayıların sürekli olarak artmış olmasıdır. Bu kapsamda, ön plana çıkan kaya grupları ve girdi değişkenleri için, nihai kestirim modellerin ve ampirik eşitliklerin geliştirilmesi amacı ile doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, farklı kaya grupları için 12 farklı ampirik eşitlik elde edilmiştir. Söz konusu eşitliklerin korelasyon katsayıları 0.40 – 0.84 arası değişkenlik göstermektedir.
6. Elde edilen ampirik eşitliklerin performanslarını irdelemek amacı ile, literatürde yaygın olarak kullanılan iki farklı performans göstergesi olan varyans değerleri yüzdesel oranı (VAF) ile hataların toplamının ortalama karekökü (RMSE) kullanılmıştır. Tüm eşitlikler için yapılan analizlerde RMSE 0.17 – 1.36 aralığında, VAF (%) değerleri ise %40 - %86 aralığında hesaplanmıştır.

Hesaplanan bu değerler, oluşturulan ampirik eşitliklerin tahmin performanslarının kabul edilebilir seviyede olduğunu ifade etmektedir.

7. İkinci bir yaklaşım olarak, her bir kaya grubu için oluşturulan eşitlikler, regresyon çalışmalarında kullanılmayan ve çalışma verileri ile benzer nitelikler sunan bağımsız veriler ile test edilmiştir. Bağımsız veriler ile gerçekleştirilen yerinde ölçülen deformasyon modülü – hesaplanan deformasyon modülü dağılımlarında, 0.40 ve üzeri korelasyon katsayısı tespit edilmiştir. Bağımsız verilerden elde edilen korelasyon katsayıları da, istatistiksel performans analizleri ile birlikte değerlendirildiğinde, ampirik eşitliklerin güçlü tahmin performansına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
8. Elde edilen ampirik eşitlikler, farklı kaya grupları için hazırlanmış olup, tüm kayaç gruplarını kapsayan ampirik eşitlik oluşturulamamıştır. Gerçekleştirilen regresyon modellerinde, kaya grubunun – kaya tipinin ayırt edilmesinin – belirtilmesinin; deformasyon modülünün tahmin performansını yükselttiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, deformasyon modülünün derinliğe ve diğer kaya kütlesi – kaya malzemesi parametrelerine bağlı kestiriminde tüm kaya gruplarını kapsayan bir modelin geliştirilmesi için; Hoek (1995 ve 2007) tarafından önerilen “kaya malzemesi sabiti” gibi kayaç grubunun ayırt edilmesine yardımcı bir parametrenin de eklenmesi ve modelin geliştirilmesi, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir adım olacaktır.

Mühendislik yapılarının tasarımında oldukça önemli bir tasarım parametresi olarak kullanılan deformasyon modülünün derinlik ve örtü yükü kavramları ile değişiminin araştırıldığı ve bu kapsamda tahmin modellerinin oluşturulduğu tez çalışmasında, deformasyon modülünün yapı derinliklerinin de kullanılacağı yöntemlerle tahmin edilmesi ve yerinde deney imkanlarının kısıtlı olduğu ortam ve projelerde kullanılabilecek pratik eşitliklerin elde edilmesi ana amaç olmuştur. Literatürde birçok çalışmanın yer aldığı deformasyon modülü tahmin yöntemlerinde, derinlik koşulunun ve derinlik etkisinin özellikle zayıf dayanımlı kaya gruplarında çok sınırlı olarak incelendiği gözlenmiş ve literatüre bu yönde katkı amaçlanmıştır. Çalışmalarda kullanılan veri tabanının özellikleri ile de bağlantılı olarak, oluşturulan ampirik eşitliklerin çok sığ derinlik koşullarında (<~5.00 metre) ve masif kayalarda kullanılmasına yönelik sınırlamalar olmuştur. Bu bağlamda, farklı veri toplama teknikleri ile yüzey



koşullarında ve/veya daha yüksek dayanımlı kaya gruplarından veri elde edilerek, yapılan çalışmaların geliştirilmesi ve bu sınırlamaların azaltılması / ortadan kaldırılması olasıdır. Bu amaçla, veri tabanının genişletilerek kaya kütlesi ve kaya malzemesi parametrelerinde değer aralıklarının da genişletilmesi, konuya ilişkin yapılacak sonraki çalışmalarda oldukça yararlı olacaktır. Bununla birlikte, henüz dünya literatüründe bulunmayan, kaya kütlesi deformasyon modülünün kestirilmesinde örtü yükünün de dikkate alındığı ve yapay zeka algoritmalarının kullanılacağı modellerin de oldukça başarılı sonuçlar üreteceği düşünülmektedir.

## 9. KAYNAKLAR

- Ajalloeian, R., Mohammadi, M., Estimation of Limestone Rock Mass Deformation Modulus Using Empirical Equations: Bulletin Engineering Geology and Environment 73 (2014) 541 – 550.
- Aksoy, C.,O., Geniş, M., Aldaş, G., Özacar, V., Özer, S., Yılmaz, Ö., A Comparative Study of the Determination of Rock Mass Deformation Modulus by Using Different Empirical Approaches: Engineering Geology, 131-132 (2011) 19 – 28.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z., Gökçeoğlu, C., A Simple Regression Based Approach to Estimate Deformation Modulus of Rock Masses: Journal of African Earth Sciences, 110 (2015) 75 – 80.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z., Çevik, A., Cabalar, F.A., Gökçeoğlu, C., Modeling Deformation Modulus of Stratified Sedimentary Rock Mass Using Neural Network, Fuzzy Intercafe and Genetic Programming: Engineering Geology, 203 (2016) 70 – 82.
- Alemdağ, S., Simaki Formasyonu Siltaşlarının (Elazığ) Kaya Kütle Deformasyon Özellikleri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2010.
- Alpar, R., Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş 1, 2.Baskı, Nobel Yayınları, Ankara, 2003.
- ASTM, Standart Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, Annual Book of ASTM Standards, Vol 4 – 8, West Conshohocken PA, 1998a.
- Atlewell, P., and Farmer, W., Principles of Engineering Geology, Chapman & Hall, London, 1976, p. 1045.
- Aydan, Ö., Ulusay, R. and Kawamoto, T., Assessment of Rock Mass Strength for Underground Excavations, Proceedings of the 36th US Rock Mechanics Symposium, New York, 1997, p. 777 – 786.
- Barton, N., Some New Q-Value Correlations to Assist in Rock Masses for Design of Tunnel Design: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39 (2002) 185-216.

- Bieniawski, Z.T., Determining Rock Mass Deformability: Experience From Case Histories: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,15 (1978), 237-47
- Bieniaeski, Z.T., The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications, Proceedings of the 4th Congress on Rock Mechanics, ISRM, Montreaux, 1979.
- Bieniawski, Z.T., Rock Mass Classification, John Wiley and Sons, 1989.
- Clarke, B.G., Pressuremeters in Geotechnical Design, Blackie Academic and Professional, An Inprint of Chapman & Hall, 1995, p. 305.
- Deere, D.U., Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes: Rock Mechanics and Rock Engineering, 1 (1964) 17 – 22.
- Fell, R., and Jeffery, R.P., Determination of Drained Shear Strength for Slope Stability Analysis, Soil Slope Instability and Stabilisation, Wolker, B.F., and Fell, R.(eds.), Rotterdam, 1987.
- FHWA, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Training Course in Geotechnical and Foundation Engineering, Subsurface Investigations, New Jersey, 1997, p. 365.
- Finol, J., Guo, Y.K. and Jing, X.D., A Rule Based Fuzzy Model for the Prediction of Petrophysical Rock Parameters: Journal of Petroleum Science and Engineering, 29 (2001) 97 – 113.
- Galera, J.M., Alvarez, M., Bieniawski, Z.T., Evaluation of the Deformation Modulus of Rock Masses: Comparison of Pressure and Dilatometer Tests with RMR Prediction, Proceedings of the ISP5-Pressio 2005 International Symposium, Madrid, 2005, p. 1 – 25.
- Gedik, İ., Timur, E., Duru, M., Alan, İ., Pehlivan, Ş., Altun, İ., Akbaş, B., Önalın, M. ve Özcan, İ., İstanbul Paleozoyik İstifinde Kocatöngel ve Bakacak Formasyonları, 55. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, Ankara, 2002, p. 97 – 99.
- Gerçek, H., Sözlü Görüşme, Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 2001.
- Gercek, H., Poisson's Ratio Values for Rocks: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44 (2007) 1 – 13.
- Gholamnejad, J., Bahaddini, H.,R., Rastegar, M., Prediction of the Deformation Modulus of Rock Masses using Artificial Neural Networks and Regression Methods: Journal of Mining and Environment, 4 (2013) 35 – 43.

- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., and Kayabaşı, A., Prediction the Deformation Moduli of Rock Masses: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (2003) 703-712.
- Gökçeoğlu, C., and Zorlu, K., A Fuzzy Model to Predict the Uniaxial Compressive Strength and Modulus of Elasticity of a Problematic Rock: Engineering Applications of Artificial Intelligence, 17 (2004) 61 – 72.
- Grima, M.A. and Babuska, R., Fuzzy Model for the Prediction of Unconfined Compressive Strength of Rock Samples: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36 (1999) 339 – 349.
- Haas, W., Das Alt-Laozoikum von Bithynien Nordwest – Turkei, National Geology Paleontology Abh., Stuttgart, 1968, p. 178 – 242.
- Hoek E., and Brown, E.T., Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons, London, 1980a.
- Hoek, E., and Brown, E.,T., Practical Estimates of Rock Mass Strength: International Journal of Rock Mass Strength, 34 (1997) 203 – 215.
- Hoek, E., and Diederichs, M.,S., Empirical Estimation of Rock Modulus: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, (2006) 203 – 215.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema, Rotterdam, 1995.
- Hoek E., and Marinos P.G., Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Hetogeneous Rock Masses: Tunnels and Tunneling International, 132 (2000) 45 – 51.
- Hoek, E., Practical Rock Engineering, www.roscience.com, 2007.
- IBM Statistics for Windows, Version 23: A Basic Tutorial, <http://ssric.org/node/582> (Erişim tarihi: Ocak 2020)
- ISRM, Terminology (Englis, French, German), Lisbon, 1975.
- ISRM, Suggested Methdos for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials: International Journal of Rock Mechancs and Mining Sciences and Geomechanics, 16 (1978) 135 – 140.
- ISRM, Suggested Metdhods: Rock Characterization Testing and Monitoring, Brown, E.T.(eds), Pergamon Press, London, 1981.
- ISRM, The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing End Monitoring, Ulusay, R., and Hudson J.A.(eds.), Kozan Press, Ankara, 2007.

- Justo, J.L., Justo, E., Azanon, J.M., Durand, P., Morales, A., The Use of Rock Classification Systems to Estimate the Modulus and Strength of Jointed Rock: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43 (2010) 287 – 304.
- Karaman, K., Cihangir, F., Demirel, S., ve Kesimal, A., Kaya Kütlesi Deformasyon Modülünün Farklı Yöntemlerle Belirlenmesi: *Yerbilimleri*, 35 (2014) 253 – 270.
- Kaya, O., ve Lys, M., İstanbul Boğazı'nın Batı Yakasında Yeni Bir Triyas Bulgusu: *MTA Dergisi*, 94 (1980) 20 – 26.
- Kaya, O., The Devonian and Lower Carboniferous Stratigraphy of the İstinye, Bostancı and Büyükkada Subareas, *Ege University Faculty of Science Book Series*, İzmir, 1973.
- Kayabaşı, A., Kaya Modülleri Arasındaki Farklılıklar: Deriner/Artvin ve Ermenek/Karaman Barajlarından Örnek Çalışmalar: *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43 (2019) 233 – 258.
- Kayabaşı, A., Gökçeoğlu, C., and Ercanoğlu, M., Estimating the Deformation Modulus Rock Masses: A Comperessive Study: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (2003) 55 – 63.
- Khabbazi, A., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.,R., and Cheshomi, A., Estimation of the Rock Mass Deformation Modulus Using a Rock Classification System: *Geomechanics and Geoengineering*, 8 (2012) 45-52
- Keskin, C., Pınarhisar Resif Karmaşığının Mikrofasıyes İncelemesi: *İstanbul Üniversitesi Yer bilimleri Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi*, 3 – 4 (1966) 109 – 146.
- Keskin, C., Pınarhisar Alanının Jeolojisi: *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 14 (1971) 31 – 84.
- Ketin, İ., Çamlıca Bölgesinin Tektoniği Hakkında: *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 7 (1959) 1 – 18.
- Mitri, H.S., Edrissi, R., and Jennings, J, Finite Element Modelling of Cablebolted Slopes in Hord Rock Ground Mines, *SME Annual Meeting, New-Maxico, Albuquerque*, 1994, p. 94-116
- Nicholson, G.A., Bieniawski, Z.T., A Non-linear Deformation Modulus Based on Rock Mass Classification: *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 8 (1990) 181 – 202

- Oge, I.F., Determination of Deformation Modulus in a Wak Rock Mass by Using Menard Pressuremeter: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 112 (2018) 238 – 252.
- Özgül, N., Akdeniz, N., Bilgin, R. ve Gedik, İstanbul'un Kadıköy – Üsküdar İlçeleri ile Kocaeli il Sınırları Arasında Kalan Doğu Kesiminin Jeolojisi, İBB Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Raporu, İstanbul, 2009.
- Önalın, M., İstanbul Ordovisiyen ve Silüriyen İstifinin Çökelme Ortamları: İÜYF Yerbilimleri Dergisi, 3 – 4 (1981) 161 – 177.
- Önalın, M., Pendik Bölgesi ile Adaların Jeolojisi ve Sedimanter Özellikleri, Doçentlik Tezi, İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Fakültesi, 1982.
- Önalın, M., İstanbul Devoniyen Çökellerinin Sedimanter Özellikleri: İstanbul Üniversitesi Yer Bilimleri Fakültesi Yer Bilimleri Dergisi, 1 – 2 (1987 – 1988) 93 – 108.
- Özgül, N., Üner, K., Bilgin, İ., Özcan, İ., Korkmaz, R., Akmeşe, İ., Yıldız, Z., Yıldırım, Ü., Akdağ, Ö., ve Tekin, M., İstanbul İli Temel Jeolojik Özellikleri, İBB Planlama ve İmar Daire Başkanlığı, İstanbul, 2005.
- Palmstorm, A., and Broch, E., Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Referecne to the Q-System : *Tunneling and Underground Space Technology*, 16 (2006) 115-131.
- Palmstrom, A., and Singh, B., The Deformation Modulus of Rock Masses: Comparison Between İnSitu Tests and Indirect Estimates: *Tunneling and Underground Space Technology*, 16 (2001) 115 -131.
- Penck, W., Boğaziçi Jeolojisinin Anahatları, Veröff İns. f. Meereskunde, Berlin, 1919.
- Read, S.,A.,L., Richards, L.,R., and Perrin, N.,D., Applicability of the Hoek-Brown Failure Criterion to New Zealand Greywacke Rocks, *Proceedings of the 9th International Congress on Rock Mechaniscs*, Paris, 1999, p. 655 – 660.
- Sarma, K., and Sarby, W., Empirical Relationship Between Rock Structure Rating and Modulus of Deformation: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (2005) 390 – 397.
- Serafim, J.L. and Pereira, J.P., Considerations of the Geomechanics Considerations of Bieniawski, *Proceedings of the International Symposium on*

- Engineering Geology and Underground Construction, LNEC, Lisbon, Portugal, 1983, p. 33-42
- Shen, J., Karakus, M., Xu, C., A Comparative Study for Empirical Equation in Estimating Deformation Modulus of Rock Masses: Tunneling and Underground Space Technology, 32 (2012) 245 – 250
  - Sönmez, H., Nefeslioğlu, A.,H., Gökçeoğlu, C., and Kayabaşı, A., Estimation of Rock Modulus: for Intact Rock with an Artificial Neural Network and for Rock Masses With a New Ampirical Equation: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43 (2006b) 224 – 235.
  - Tüysüz, N., ve Yaylalı, G., Jeoistatistiksel Kavramları ve Bilgisayarlı Uygulamalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları, Trabzon, 2005, p. 382
  - Ulusay R., ve Sönmez, H., Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, 2.Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2007.
  - Verman, M.K., Rock Mass – Tunnel Support Interaction Analysis, Doktora Tezi, University of Roorke, India, 1993.
  - Yurtsever, A., Çağlayan, M.A., Şengün, M., İmik, M., Özcan, İ., ve Arda A., Yıldız Dağları (Istranca Masifi) Bütüneltilme ve Yeniden Gözden Geçirim Projesi Raporu, MTA Rapor No: 9929, Ankara, 1993.
  - Yurtsever, A., Çağlayan, M.A. Türkiye Jeoloji Haritaları No:65, İstanbul – F21 ve G21 (kısmen) Paftaları, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, 2002.
  - Zhang, L., Determination and Applications of Rock Quality Designation (RQD): Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8 (2016) 389 – 397.
  - Zhang, L., Engineering Properties of Rocks, Second Edition, Elsevier, Cambridge, 2017.
  - Zhang, L., Evaluation of Rock Mass Deformability Using Empirical Methods – A Review: Underground Space, 2 (2017) 1 – 15.
  - Zoorabadi, M., Deformability Modulus of Jointed Rocks, Limitation of Empirical Methods Introducing a New Analytical Approach, in Naj Aziz and Bob Kininmonth (eds), Proceedigs of the 16th Coal Operator’s Conference, University of Wollongong, Australia, 2016, p. 132 – 137.

