

-Araştırma Makalesi-

Grovaklarda Tabaka Kalınlığı Kaya Direnci İlişkisi

The Relationship between Bed Thickness and Rock Strength in Greywackes

Erkan BOZKURTOĞLU^{1*}, Rahmi EYÜBOĞLU¹ ve Baran ÇİÇEK²

ÖZ

Tabakalı kayalarda yapılacak teknik girişimlerde ortamın emniyetli gerilme değerinin (özellikle birden fazla çatlak sistemleri ile pek çok birim kaya elemanı içeren ortamlarda) doğru tahmin edilmesi önemlidir. Bu çalışmada, kaya ortamda herhangi bir teknik girişim gerektiren durumda ilgili mühendisinin (inşaat -jeoteknik uzmanlığı- ve jeoloji -mühendislik jeolojisi uzmanlığı- mühendisleri) kaya ortamı süreksizlik özellikleri ile tanımlayıp ortamın emniyetli gerilme değerini mostra başında irdelemesi ve sonuca varması için geliştirilmiş yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kaya ortam, teknik girişim, jeoteknik

ABSTRACT

The prediction of the real safe stress value is very important for the technical attempts concerning stratified rocks (especially rock mass containing multiple crack systems and many rock units). In this study, it is aimed that the determining the real stress values of the rock media with discontinuities on outcrops by geotechnical engineers (civil -specialized in geotechnical and geological -specialized in engineering geology- engineers).

Keywords: Stratified rock media, technical interference, geotechnics

GİRİŞ

Tabakalı kaya ortamlarda yapılacak teknik girişimlerde ortamın yüklenebileceği emniyetli gerilme değerinin isabetli tahmini mühendislik yapılarının ve jeoteknik amaçlı mekanik ortam iyileştirme girişimlerinin doğru boyutlandırılmaları için son derece önemlidir. Bu çalışmada tabakalı kayalarda gerçekleştirilecek herhangi bir jeoteknik uygulamada inşaat ve jeoloji mühendisinin yamaç, şev ve temel ortamda karşılaşılabileceği kaya (mostra) yüzeyine bakarak sistem büyüklüğü içinde ortamın gerçek emniyetli gerilme değerini belirleyebilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla jeoloji mühendisinin proje sahasında kaya yüzeyini temsil edecek şekilde seçeceği bir alanda karşılaştığı tabaka sayısı ile toplam tabaka yüksekliği arasında kuracağı ilişkiyi bu çalışma kapsamında önerilen ilgili eşitliklerde kullanılmasıyla proje sahasında uygulayabileceği emniyetli yük ve gerilme kolayca hesaplanabilecektir. Böylelikle bir teknik girişimin başlangıcından bitimine gerçekleştirilecek çalışma adımlarından birisi olan mühendislik jeolojisi aşamasında jeoteknik mühendisi ortam değerlendirmesinde teknik girişimde uygulanabilecek emniyetli yükler konusunda laboratuvar çalışması sonuçlarını beklemeden öngörülebilir bulunabilecektir. Bu çalışma İstanbul'da geniş yayılımı olan Trakya formasyonunun grovak kesimlerinde gerçekleştirilmiştir.

TRAKYA FORMASYONU ve ÖZELLİKLERİ

Karbonifer yaşlı kırıntılı tortul kayaç topluluğu olan birim Avrupa ve Anadolu yakasında yayılım sunar (Şekil 1). Şekil 1 ile verilen jeolojik haritada Ct sembolü ile gösterilmiş olan Trakya formasyonu fosfat yumruları içeren çört tabakalarıyla başlamakta, bunun üzerine ardışıklı (münavebeli) olarak sıralanmış şeyl, kiltası, kumtaşı, türbiditik kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı gibi klastik bir istif gelmektedir (Özgül, 2011). Fliş veya molas niteliğindeki Trakya formasyonu önce Hersiniyen Orojenezi döneminde ve daha sonra Alpin Orojenezi döneminde şiddetle deforme olmuş, kıvrılmış, kırılmış, farklı doğrultularda çatlak sistemleri ve kayma düzlemleriyle parçalanmıştır (Ketin, 1983).

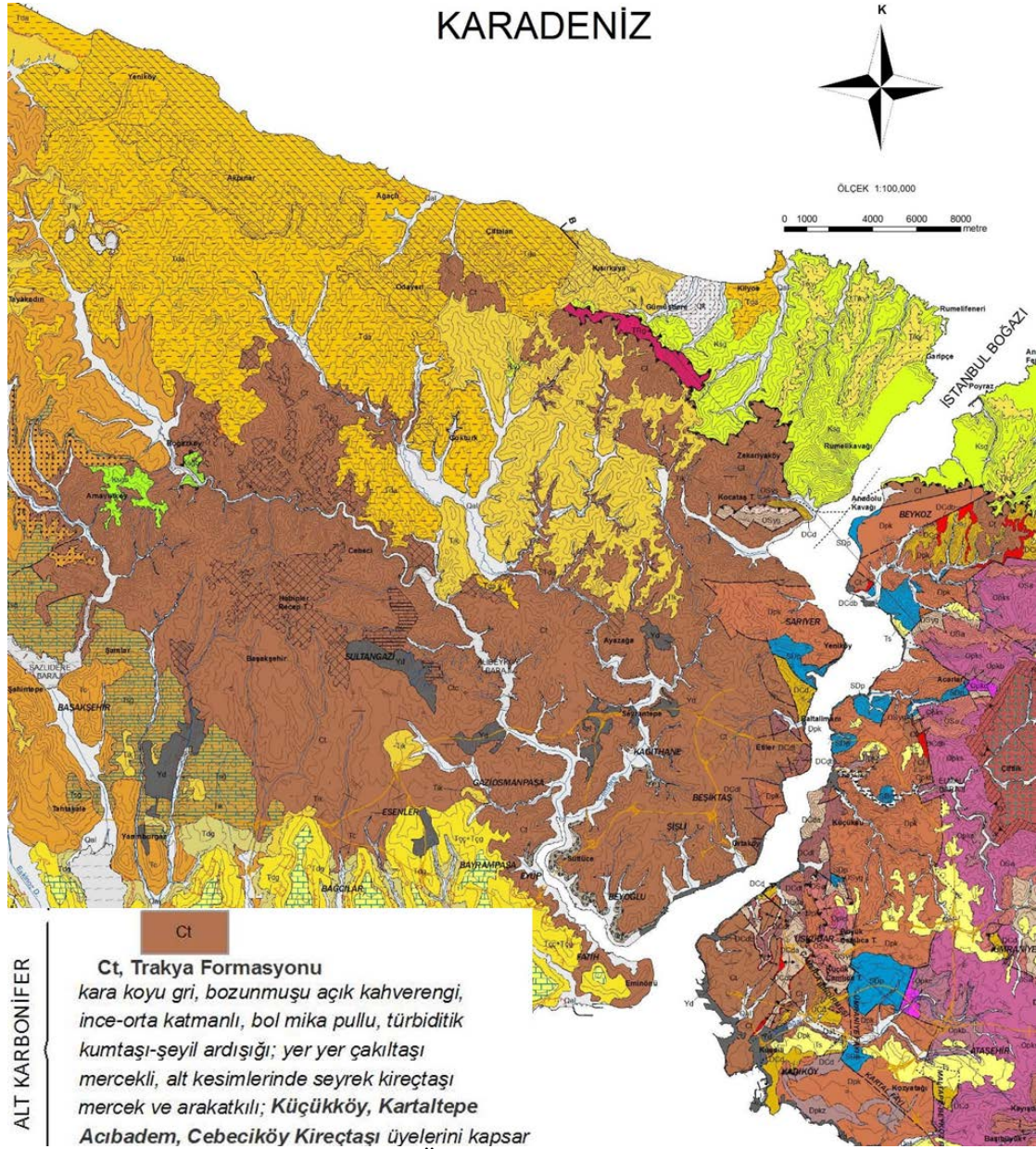
¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul-TÜRKİYE

² Jeoloji Mühendisi, 34469, İstanbul-TÜRKİYE

*İlgili yazar / Corresponding author: erkan@itu.edu.tr / 533 225 31 88

Gönderim Tarihi: 07.01.2019

Kabul Tarihi: 23.06.2019



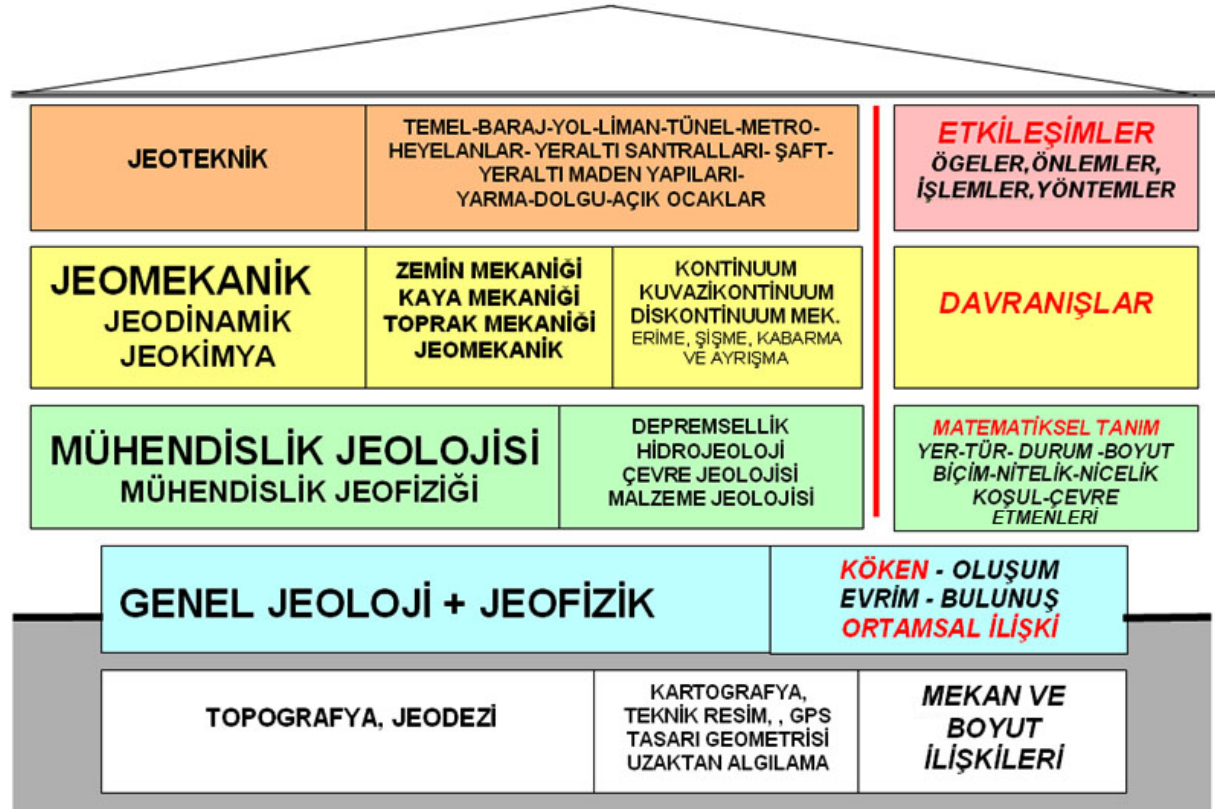
Şekil 1. Trakya formasyonunun yayılımı (Özgül, 2011).
Figure 1. Spread of the Thrace formation (Özgül, 2011).

Mühendislik özellikleri açısından birbiriyle yatay ve düşeyde sık geçişleri bulunan, genellikle gri kahverengi- mavimsi gri renkli ince orta taneli, sık eklemlili, ince-orta tabakalı, yüzeye yakın kesimlerde fiziksel ayrışmanın fazla olduğu zayıf-orta ve sağlam kaya özellikleri sergiler. Çeşitli klastik kayaç topluluğundan oluşan bu formasyon çok yönlü olarak gelişen kırılma ve kayma yüzeyleriyle parçalanmış, ezilmiş ve dilimlenmiştir. Kayaç sahip olduğu bu özellikleri nedeniyle dayanım olarak ta farklı dirençler gösterir. Trakya formasyonu üzerinde günümüze kadar yapılan pek çok mühendislik projesi, bilimsel araştırma, lisans, yüksek lisans çalışmaları ile kayacın tek eksenli basınç dayanımının 200 kg/cm^2 (19.61 MPa) ile 1800 kg/cm^2 (176.52 MPa) arasında değişmekte olduğu belirlenmiştir (Bozkurtoğlu, 1996). Aşırı derecede çatlaklı-kırıklı zeminleşmiş kesimlerde ise kayacın direnci minimum direncine ait genel değer olan 200 kg/cm^2 değerinin altında olup bu değerler bile en sert zemin dayanım değerinden büyüktür. Kayaç, hidrojeoloji (yeraltısuyu) açısından da aşırı derecede kırıklı ve çatlaklı kesimlerinde sınırlı hacimli yersel kırıklı-çatlaklı akifer ortamdır. Kayaç bu

kesimlerinde ana kökeni yağış olan yüzey suyunu depolayıp bir noktadan diğer bir noktaya birbiri ile ilintili çatlak sistemi yanı sıra yeraltında karşılaşacağı ezik zon (ayrık ve/veya aşırı çatlaklı-kırıklı) içinde taşıyarak yüzey sularını kayaç derinliğine doğru iletip yeraltısuyunu oluşturur. Kayaç bünyesinde hareket ederek topografik üst kotlardan topografik alt kotlara ilerleyen yeraltısuyu hareket yönünde topografya yüzeyi ile karşılaşınca kendisini kaynak suyu olarak boşaltır. Trakya formasyonunun yayılım sunduğu yüksek topografik kotlardaki alanlarda açılmış çeşitli amaçlı sondaj kuyularının hemen hemen tümünde fay, kırık, çatlaklı kesimler geçilse de bu kuyularda nadiren yeraltı suyuna rastlanılır. Bu kuyulardaki statik su seviyeleri ise çoğunlukla topografya yüzeyinden 120-130 metre derindedir. Trakya formasyonu içinde çatlak sistemi kontrolünde gelişen doğal su boşalmaları (kaynak suları) ise son derece kısa ömürlü, düşük-çok düşük debilidir. Tüm bu özellikleri ile Trakya formasyonu yayılım sunduğu alanlarda hidrojeolojik açıdan rezervuar kapasitesi son derece yetersiz sınırlı hacimli birbirinden bağımsız yersel çatlaklı kayaç akiferleri oluşturur. Bu akiferlerin bünyesindeki yeraltısuyunun üzerinde inşa edilen yapılara karşı olumsuz bir etkisi neredeyse söz konusu olmadığı gibi formasyon içinde açılmış olan metro tünelleri, yeraltı otopark alanları vb. yeraltı yapılarında yanlış boyutlandırmaya dayalı mekanik iyileştirme uygulamalarındaki yersel başarısızlıklar dışında mühendislik açısından çözümü son derece zor ciddi sorunlar ile karşılaşmamıştır.

TEKNİK GİRİŞİMDE DİSİPLİNLER ARASI İLİŞKİ

Teknik bir girişimin ilk basamağı mekânsal-boyutsal ilişkilerin belirlenmesi olup bunu jeoloji ve jeofizik çalışmaları ile tanımlanan kökensel ve ortamsal ilişkilerin belirlenmesi izler. Kökensel ilişkileri anlaşılmalı ortamların matematiksel tanımlamaları ve davranışları modelleri mühendislik jeolojisi ve jeofiziği çalışmalarıyla elde edilen verilerin yorumlanmasıyla gerçekleşir. Davranışı doğru tanımlanan ortamlarda daha doğru jeoteknik projeleri gerçekleştirilir (Şekil 2).



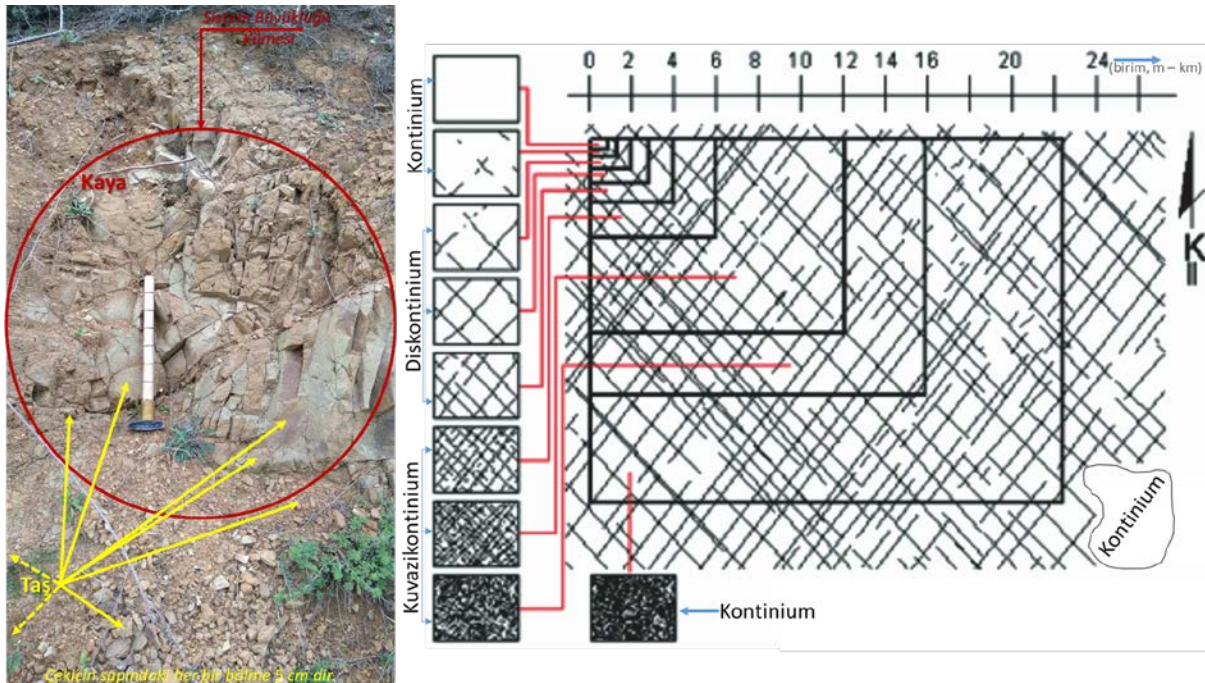
Şekil 2. Teknik girişimde disiplinler arası uzmanlık ilişkisi (Vardar, 2000).

Figure 2. Relationship among interdisciplinary expertise in technical initiative (Vardar, 2000).

Bu çalışma ile teknik bir girişimde Şekil 2 de açıklanan çalışma adımlarının 3. basamağını oluşturan mühendislik jeolojisi amaçlı arazi değerlendirmesinde ortam (bu çalışma özelinde Trakya formasyonu, genelde grovaklar) taşıyabileceği yükler açısından da kolayca değerlendirilmiştir.

KATMANLILIK (TABAKALILIK)

Tortul kayaçlar çökelme ortamında depolanırken ortamda egemen olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler ile çeşitli özellikler sergiler. Bu özelliklerden bir tanesi katmanlılıktır. Katman ya da tabaka olarak bilinen bu belirgin düzeyler ile çökel kayaç tabakasının üstü ile altı belirlenir. Tabaka, altındaki ve üstündeki diğer katmandan belirgin biçimde gözlenen farklı bileşim, dane boyu, renk veya bu özelliklerin birlikteliği ile ayırt edilir. Mühendislik açısından ortam süreksizlikler ile sınırlanmış birim kaya elemanlarından oluşur ve tabakalar (katmanlar) sistem büyüklüğü içinde jeoteknik uygulamasının amacına yönelik değerlendirilir (Şekil 3).



Şekil 3. Sistem büyüklüğü içinde kaya ve taş ilişkisi.

Figure 3. Relationship between rock and monolith in system scale.

Şekil 3 ile gösterilen sistem büyüklüğü her jeoteknik uygulamanın detay değerlendirme aşamasında farklı alanlardan oluşacaktır. Diğer bir deyişle basit bir temel ile bir viyadük temeli, beton kemer barajın yüklerini taşıyacak vadi tabanı ve yamaçları ile ağırlık barajın yükünü taşıyacak vadi tabanı ve yamaçları, tek katlı bir bina yükünü taşıyacak alan ile çok katlı bina yükünü taşıyacak alan vb. pek çok uygulamada kökensel ve ortamsal ilişkileri belirlenmiş jeolojik ortam kendi içinde tekil ortamlar olarak mühendislik jeolojisi değerlendirmesinde yeniden birbirinden bağımsız alanlar olarak ele alınacaktır.

Bu çalışma ile önerilen katmanlılık (ζ) ifadesi; herhangi bir mostra (yamaç, şev, temel) yüzeyinde yüzeyi temsil edecek alanın seçilip o alan içinde gözlenecek katman sayısının seçilmiş alanın yüksekliğine/bir boyutuna oranlanmasıdır (Eşitlik 1). Kayaçlar için alan yüksekliği/boyutu en fazla 100 cm alınmalıdır.

$$\zeta = (\text{mostra yüzeyinde seçili alandaki katman sayısı})/(\text{seçili alanın yüksekliği/bir boyutu}) \quad (1)$$

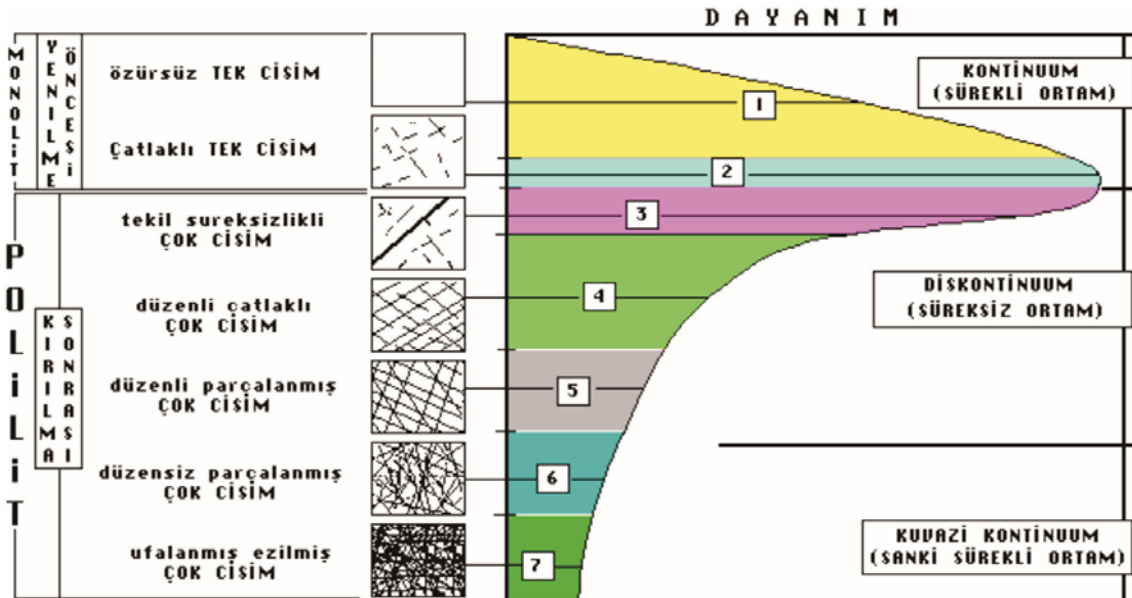
Eşitlik 1 ile önerilen ilişki içinde katmanlılık 0 ile 1 arasında değişen sayılar olacaktır. Örneğin katman kalınlığı 100 santimetreden büyük ise bu durumda seçili en büyük alan içinde 1 tane katman gözükecek ve $\zeta = 1/100 = 0.01$ olacaktır. Katman kalınlığı 30 cm ise bu durumda seçili en büyük alan içinde 3 tane katman gözükecek ve $\zeta = 3/100 = 0.03$, katman kalınlığı 1 cm ise bu durumda da $\zeta = 1$ olacaktır. Katmanlılığın sıfıra yaklaşan değerleri masif kayaç ortamı temsil ederken 1 değeri ise şistler gibi iğnemi parçalar içeren aşırı dağınık ortamları temsil edecektir. Böylece katmanlılığın 1 değerine karşılık gelecek iğnemi her bir kayaç parçasının kalınlığı da 1 cm olacaktır. Bu kalınlığın altındaki ortamlar ise zemin olarak değerlendirilmeli ve katmanlılık ilişkisi ile ilişkilendirilmemelidir.

Grovaklarda/Trakya formasyonunda gerçekleştirilecek herhangi bir teknik girişim çalışmasının Şekil 2 ile açıklanan ilişkinin mühendislik jeolojisi aşamasında jeoteknik mühendisi mostra yüzeyinde yüzeyi temsil edecek şekilde seçeceği bir alanda Eşitlik 1 ile önerilen şekilde katmanlılık (ζ) değerini kolaylıkla hesaplayacaktır. Hesapladığı ζ değerini bu çalışmada önerilen Eşitlik 2, 3 ve 4'te kullanarak ortamda taşıtılabilecek yükler ve gerilmeler hakkında ön fikri oluşacaktır.

Bu çalışma Trakya formasyonu grovakları için yapıldığından önerilen eşitlikler sadece farklı formasyonlardaki grovaklar için kullanılmalı farklı litolojilerden oluşan tortul kayaçlara ait formasyonlar için kullanılmamalıdır.

ORTAM DAYANIMI

Mühendislik uygulamalarında kayaç ortamlar Şekil 3 ile gösterildiği gibi sistem büyüklüğü içinde değerlendirilir. Kayanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için arazide ve laboratuvarında farklı pek çok deney yapılır. Kayanın dayanım değeri çoğunlukla laboratuvarında tek eksenli basınç deneyi yapılarak belirlenirse de bu deney ile kayanın değil taşın dayanımı belirlenmiş olur. Taştan kayaya ve zemine doğru gelişen evrilme Şekil 4 ile gösterilmiştir.

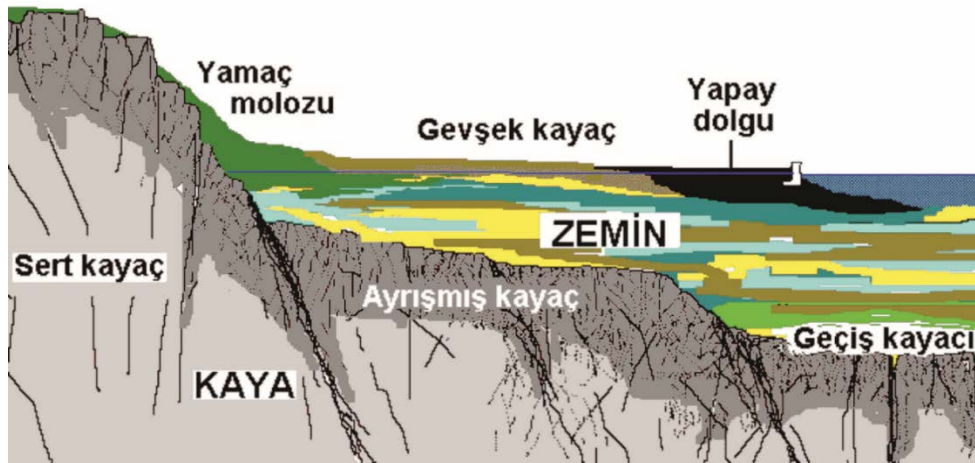


Şekil 4. Taştan kayaç ve zemine ortam gelişimi (Vardar, 2000).

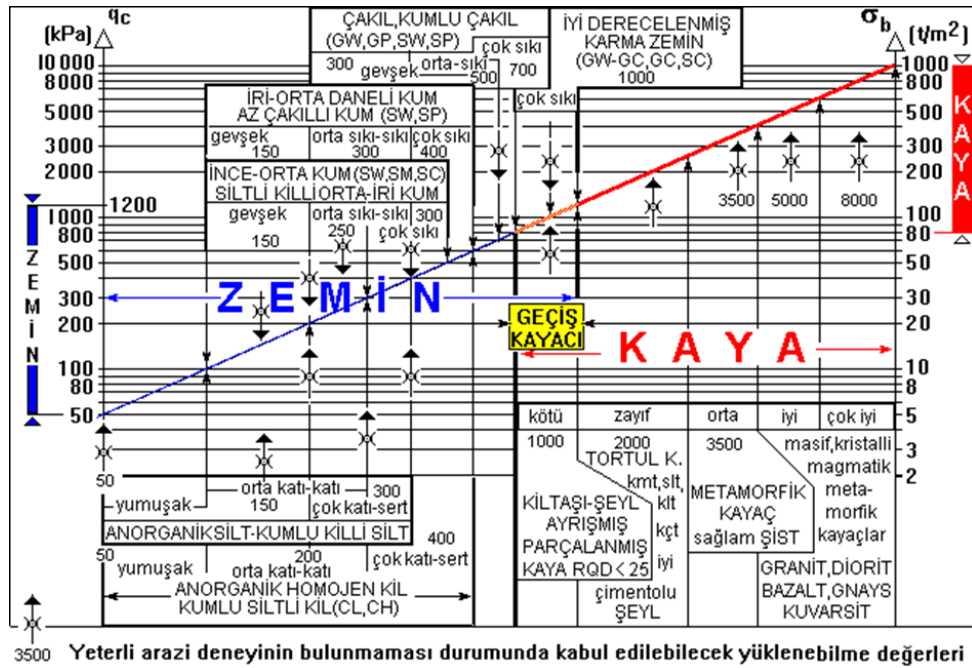
Figure 4. The development of rock and soil from monolith (Vardar, 2000).

Şekil 4' den de anlaşılacağı gibi teknik girişim uygulanacak alanda arazide sondaj ile alınan karot örnek veya laboratuvara getirilen kayaçtan laboratuvarında alınan karot örnek üzerinde gerçekleştirilecek tek eksenli basınç deneyi ile monolite ait dayanım değeri elde edilir. Oysa jeoteknik uygulama Şekil 3 ile gösterilen ve hem taş hem de süreksizliklerden oluşma kayaç ve/veya zemin ortam üzerinde yapılacaktır.

Mühendislik açısından ortamlar ise doğal ve yapay olarak ikiye ayrılırlar. Doğal ortamlar kaya, geçiş kayası, zemin'den oluşurken yapay ortamlar insanoğlu tarafından oluşturulan dolgulardır. Bu dolgular kontrolsüz (hafriyat döküm alanı, çöp döküm alanı vb.) ve kontrollü (toprak baraj gövdesi, otoyol altyapısı, geçirimsizlik perdesi vb.) imal edilebilir. Mühendislikte ortamlar Şekil 5 ile gösterilmiştir. Şekil 5 ile gösterilen ortamların her birinin mühendislik davranışı birbirinden farklı olacaktır. Bu nedenle teknik girişim uygulanacak alanda her bir ortam uygulama projesinin detayında sistem büyüklüğü içinde gereken detayda değerlendirilmelidir. Mühendislik jeolojisi açısından ortam tanımlamalarının benzer özelliklerinde (birim hacim ağırlıklar, dayanım, içsel parametreler vb.) gözlenecek değer değişimleri Şekil 6 ile gösterilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde sadece dayanım açısından zemin ortamların türemiş olduğu kayacık ortama göre (Şekil 5) 15 – 20 kat daha zayıf olduğu anlaşılmaktadır. Bir teknik girişimde ortamda uygulanacak yüklerin belirlenmesi için ilksel yaklaşım taşın dayanım değerinden hareket etmektir. Bu anlayış içinde taşın yenilme ve kırılma mekanizması ise Şekil 7 ile gösterilmiştir.

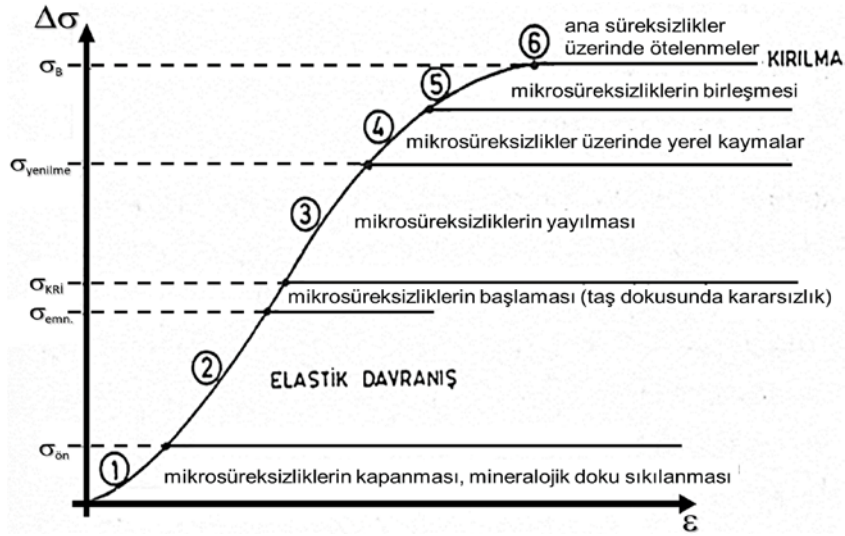


Şekil 5. Mühendislik uygulamaları açısından ortamlar (Vardar, 2000).
Figure 5. Grounds in terms of engineering applications (Vardar, 2000).



Şekil 6. Ortamların mühendislik özelliklerindeki farklar (Vardar, 2000).
Figure 6. The differences in engineering properties of grounds (Vardar, 2000).

Şekil 7 incelendiğinde pres altındaki taşa (karot örneğin) ilkin monolit (çatlaklı tek cisim) bünyedeki mikro süreksizlikler kapanmakta ve mineralojik dokuda sıkışma olmaktadır ($\sigma_0 - \sigma_{\text{ön}}$ aralığı). Bu durum Şekil 7 de verilen grafikte 1 nolu alan ile gösterilmiştir. Taşın ön gerilme ($\sigma_{\text{ön}}$) değerinin aşılmasına neden olacak bünyede artan gerilmeler sonucunda taş elastik davranmaya başlayacak ve emniyetli gerilme (σ_{emn}) değerinin de aşılması ile monolit bünyede yeni mikro süreksizlik gelişimi başlayarak taş doku kararsız evreye girecektir. Taş dokudaki bünye kararsızlığı kritik gerilme (σ_{kri}) değerine kadar devam edecektir.



Şekil 7. Taşın yenilme ve kırılma mekanizması (Yüzer ve Vardar, 1986).

Figure 7. Pre and post failure mechanism of the stone (Yüzer and Vardar, 1986).

Bu durum ise Şekil 7 de verilen grafikte 2 nolu alan ile gösterilmiştir. Kritik gerilme değerinin aşılması ile monolit bünyede mikro süreksizlikler yayılmaya başlayacak ve taş yenilmeye doğru gidecektir (3 nolu alan). Taşın yenilmesine neden olacak gerilme (σ_{yenilme}) değerinin aşılması ile monolit bünyede gelişmiş olan yeni mikro süreksizlikler üzerinde yerel kaymalar oluşacak (4 nolu alan) ve bu kayma düzlemlerinin artan gerilme altında ilerlemesi sonucunda bağımsız mikro süreksizlikler birbirleri ile birleşmeye başlayacaktır (5 nolu alan). Mikro süreksizliklerin birbirleri ile birleşmesi sonucunda ana süreksizlik düzlemi gelişecek ve bu düzlemin gelişmesi ile de taş (monolit) kırılacaktır (6 nolu nokta). Doğada ise kırılma olayı jeolojik süreç boyunca sürekli olarak devam edecek ve kayalar ezilip ufalanarak zeminleşmeye doğru evrilecektir. Taştan kaya ve zemine oluşacak bu evrilmeye ayrışma olayları başta olmak üzere farklı pek çok etmen bu süreçte etkin rol oynayacaktır.

KATMANLILIK-ORTAM DAYANIM İLİŞKİSİ

Çalışmada İ.T.Ü. Ayazağa Yerleşkesinde yayılım sunan Trakya formasyonunda 9 farklı noktada Eşitlik 1 ile açıklanan katmanlılık tarifi çerçevesinde örnekleme yapılmıştır. Örnekler İ.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği laboratuvarında kırılmış (Şekil 8) ve katmanlılık yük ilişkisi araştırılmıştır (Şekil 10).

Şekil 10 ile gösterilen ilişkide kayaç örneklerin kırılmasına neden olan yükler (Şekil 8) belirlendikten sonra bu yüklerin ortalama değeri hesaplanmış ve yük-katmanlılık ilişkisi içinde ortalama değeri verecek en uygun denklem araştırılmıştır. Sonuçta, grovaklar için yük-katmanlılık arasında Eşitlik 2 ile verilen ilişkinin geçerli olduğu belirlenmiştir.

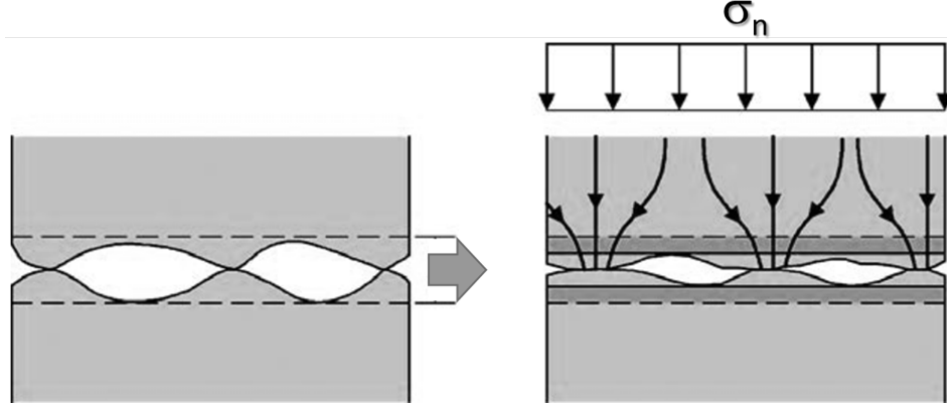
$$P = 1257.8 \exp^{-3.158\zeta} \quad (2)$$



Şekil 8. Katmanlılık-yük ilişkisi deneyleri.
Figure 8. Bedding-load relationship experiments.

Şekil 8 ile gösterilmiş olan deneyler doğada pürüzlü kaya ortamın yüklenmesi (örneğin; temeller, dolgu vb.) durumunda yükün yükleme alanından itibaren kayanın derinliğine doğru iletilmesi sırasında kayanın vereceği reaksiyonun belirlenmesi amacı için tasarlanmıştır. Doğada oluşturulacak yükleme alanları ise Şekil 8 ile gösterilen alanlardan daha büyük olacaktır. Bir mühendislik projesinde yükleme alanı gerekli kazı işlemlerinden sonra yapılacak yüzey müdahaleleri ile kayadan hazırlanan bir karot örneğin yüklenme alanına benzer şekilde kusursuz olarak oluşturulsa da bu kusursuz yapay katman kalınlığının altında süreksizlikleri ile birbirine farklı noktalarca temas eden kaya kütesi yer alır. Bunu

bir örnek ile açıklamak gerekirse kayalarda oluşturulacak sıg temellerde ayrışmamış kayalar (ISRM, 2007) için temel derinliğinin 60 cm, diğer kayalar için 150 cm olması önerilir (Sivakugan vd., 2013). Önerilen derinliklerde kazının yapılması ve kazı taban yüzeyinin grobeton ile düzeltilmesi durumunda bile temel yükleri grobeton katmanının altında düzensiz olacaktır. Grobeton katmanda derinlikle düzenli olan gerilme akıları grobeton katman ile ilk kaya katman sonrası kaya ortamda her iki katman arasındaki süreksizlik geometrisi nedeniyle düzensizleşecektir. Mevcut kaya katmanda düzensizleşen gerilme akılarının izleyen her bir katmana aktarılması sırasında katmanlar arası süreksizlik dokanaklarının birbirini düşeydeki düzensiz takibi nedeniyle gerilme akıları yer derinliğine ilerlerken bazı kesimlerde sıçrama yapıp azalacak bazı kesimlerde ise daha fazla yoğunlaşır değer artışı gösterecektir (Şekil 9).



Şekil 9. Normal gerilme altında yüklenmiş kısmi kapalı, kaba ve düzensiz süreksizliklerde gerilme akılarının davranışı (Wittke, 2014'ten değiştirilerek).

Figure 9. Behavior of the stress flux on a rough or uneven, not fully closed discontinuity, loaded by a normal compressive stress (modified from Wittke, 2014).

Şekil 9'da gösterilen ilişkide pürüzlü çatlak yüzeyleri uygulanan yükler ile tamamıyla kapanmayarak kaya malzemede süreksizliklerin birbiri ile temas noktalarında gerilme akılarının yoğunlaşması ve bu kesimler ile süreksizlik boyunca çevresinde plastik bölgelerin oluşması ile sonuçlanacaktır (Wittke, 2014). Artan gerilmeler karşısında süreksizliklerin kontak noktaları kırılabilirler. Böylece temel altından yer derinliğine farklı derinliklerde alınacak yatay düzlemlerdeki gerilme değerleri her bir katman arasındaki süreksizliklerin birbiri ile düşey ve yatay düzlemlerde sergileyeceği farklı dokanak noktaları nedeniyle hem her bir ilgili yatay düzlemde hem de yer derinliği boyunca ki düşey düzlemlerde heterojen olacaktır.

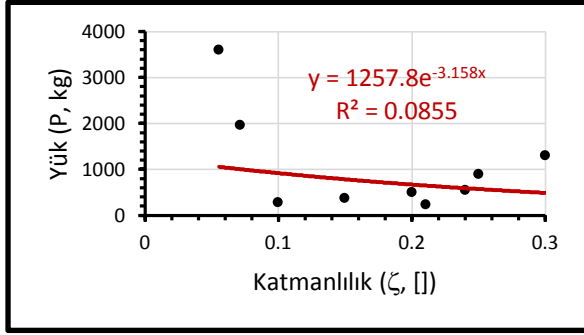
Kayanın uygulanan yükler karşısında bünyesinde oluşacak heterojen gerilme akısı dağılımını modelleyebilmek için Şekil 8 ile verilen deney düzeneğinde bazı varsayımlar yapılarak arazi örnekleme/deney tasarımı bu varsayımlara göre oluşturulmuştur. Bu varsayımlar;

- katmanlar arası süreksizlik açıklıkları düzenlidir ve üstteki katman ile altındaki katman arasındaki süreksizlik yüzeyleri birbirleri ile bir çok noktada dokanak halindedir,
- katmanlar arası süreksizlik açıklıkları düzensizdir ve üstteki katman ile altındaki katman arasındaki süreksizlik yüzeyleri birbirleri ile sınırlı noktalarda dokanak halindedir,
- deney sırasında süreksizlik dokanak alanlarının belirlenmesinde karşılaşılabilecek güçlükler nedeniyle her bir örnek ilgili yatay düzlem için doğadaki yükleme alanının birbirini bütünleyen kısımlarıdır ve birim kaya elemanlarındaki farklılıklar nedeniyle örneklerin ortalama alanı tüm örnekler için yükleme alanını temsil eder (süperpoze ilkesi).

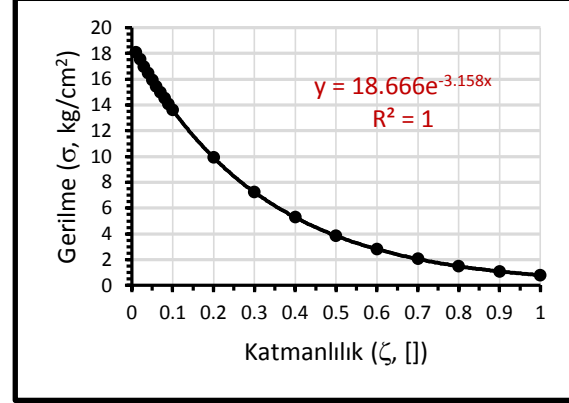
Varsayımlar doğrultusunda araziden toplanan örneklerin pek çoğunda düzenli süreksizlik açıklıklarını temsil edebilmek için presin katman yüzeyine olabildiğince çok noktadan basarak yükleme yapmasına özen gösterilmiştir. Bazı deneyler ise düzensiz süreksizlik açıklıkları için tasarlanmış ve bu deneylerde örnekler minimum süreksizlik dokanaklarına yüklenmiştir (Şekil 8). Örneklerin yükleme alanının belirlenmesi için her bir deneyde katmanlılık ilişkisi içinde en üst katmana ait örneğin tavanındaki orta noktası belirlenip bu noktadaki en ve boy ölçülmüş ve alan = en x boy ifadesi ile hesaplanmıştır. Bu

ölçümler ile hesaplanmış olan alanların ortalama değeri alınarak tüm örnekler süperpoze ilkesi kapsamında bu alan değeri ile değerlendirilmiştir. Böylece Eşitlik 2 ile elde edilen ilişki içinde gerilme değerlerine ait ortalama değerler hesaplanmıştır. Bu durumda 0 ile 1 arasında değişen katmanlılık ilişkisinde katmanlılık-gerilme değerleri arasında Şekil 11 ile gösterilen ilişki (Eşitlik 3) belirlenmiştir.

$$\sigma = 18.666\exp^{-3.158\zeta} \quad (3)$$



Şekil 10. Katmanlılık-yük ilişkisi.
Figure 10. Strata-load relationship



Şekil 11. Katmanlılık-gerilme ilişkisi.
Figure 11. Strata-stress relationship

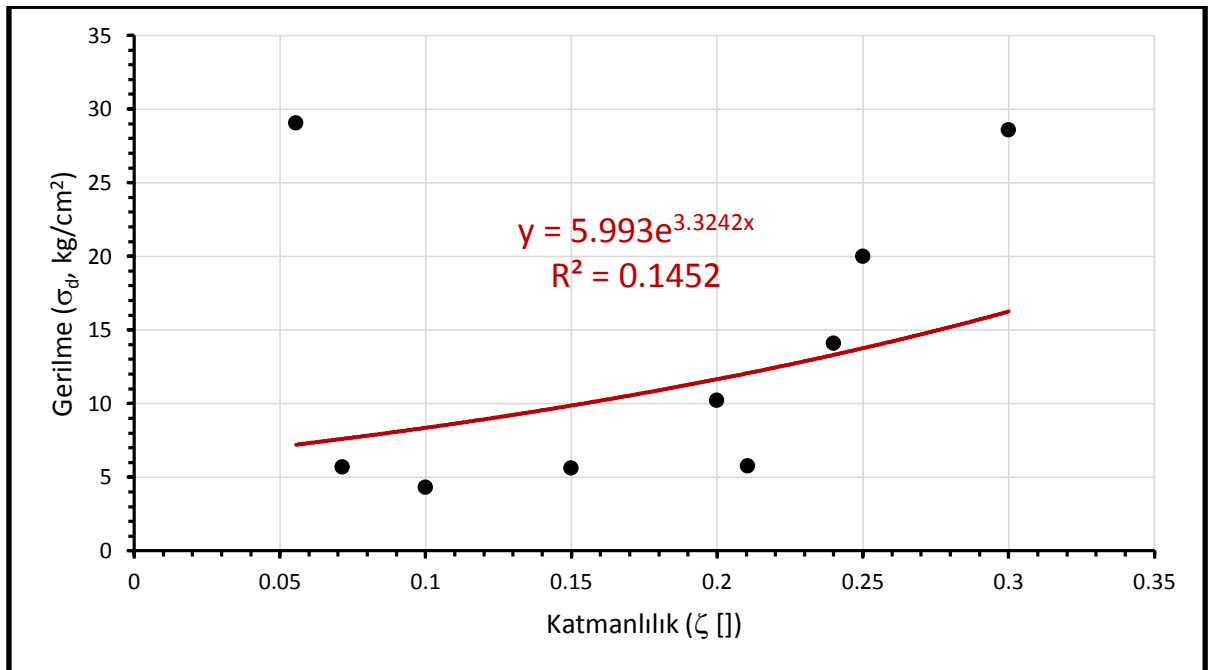
Bu çalışmada tanımlanan katmanlılık tanımı (Eşitlik 1) kapsamında grovıklar için yük-katmanlılık ve yük-gerilme değerleri önerilmiş olan Eşitlik 2 ve 3 ile kolaylıkla hesaplanabilecektir. Herhangi bir jeoteknik projenin gerek araştırma gerekse uygulama aşamasında gerekli olması durumunda jeoteknik mühendisi grovıklardaki mostra yüzeyinde yüzeyi temsil edecek alanını belirleyerek katmanlılık değerini hesaplayabilecek (Eşitlik 1) ve ortamdaki gerilme değeri hakkında fikir yürütebilecektir.

Eşitlik 2 ile elde edeceği değer ise formasyonun o kesimindeki ortalama yük değerini temsil edecek ve Şekil 7 ile gösterilen ilişki içinde (σ_{kri}) değeri kesiminde bir noktada olacaktır (Şekil 7 de 2 ile 3 nolu alan). Uygulama projelerinde ise kayaç ortama aktarılacak yüklerin Şekil 7 ile gösterilen ilişkide 2 nolu alan içinde kalması ve (σ_{emn}) değerini aşmaması istenir. Eşitlik 2 ile elde edilecek sayısal değerler ile proje mühendisi de ortama aktarması gereken yükler hakkında hızlı ve güvenilir veri elde edecek emniyet katsayısını kolaylıkla belirleyebilecek, uygulama projesini ortam hakkında daha güvenilir değerler ile planlayabilecektir.

Bu çalışma ile önerilen yaklaşımda süreksizlik ve taş birlikteliğinde kaya örnekler kırılmıştır (Şekil 8). Laboratuvarında ise taş örnekler kırılmaktadır (Şekil 12). Laboratuvarında taş örnekler kırılmadan önce karot veya küp numune olarak hazırlanmakta ve örneğin kusursuz geometrik şekilde olması için özen gösterilmektedir. Deney sırasında ise taşın kırılması aşamasında uygulanan yükün taş bünyesinde birbirine paralel gerilme akıllarını oluşturması gerekir (Şekil 12-b). Bu nedenle hazırlanmış olan taş örneğin şekli her ne kadar kusursuz geometrik şekil olarak gözüksün de son derece küçük açılar altında örneğin alt ve üst kesiminin düzlemsellikten sapmasını önleyebilmek için küresel başlıklar kullanılarak (Şekil 11-a) tek eksenli basınç deneyi uygulanır. Şekil 8 ile gösterilen katmanlılık-yük ilişkisi deneylerinde ise kırılmış olan kaya örneklerin bünyesinde oluşacak gerilme akılları Şekil 12-b ile gösterildiği gibi düzenli (lineer) olmayacak, kayaç bünyede gerilmeler düzensiz dağılacaktır (Şekil 9). Bu durumda katmanlar arasında süreksizlik yüzeyinin özelliğine ve katman boyutlarına bağlı olarak kayaç bünyenin bazı yerlerinde gerilme sıçramaları bazı yerlerinde ise gerilme akıllarında artmalar oluşacak ve kayaç bünye içinde olması gereken gerilme değerleri taşın sergileyeceği gerilme değerlerinin çok üzerindeki değerlere ulaşabilecektir. Bu gerilmelerin etkisiyle kaya ortamda kırılma, akma, kopma ve göçme türü deformasyonlar gelişecektir. Bu deformasyonların kritik değerleri aşması ile de kaya kültede duraysızlıklar oluşacaktır. Kaya ortam bünyesinde düzensiz gerilme akısı oluşması durumunda ise gerilme-katmanlılık ilişkisi Şekil 13 ile gösterilmiştir (Eşitlik 4).



Şekil 12. Kayadan hazırlanmış karot örnekte (taş, monolit) tek eksenli basınç deneyi.
Figure 12. Uniaxial pressure test on rock sample prepared from rock (stone, monolith).



Şekil 13. Düzensiz gerilme akısı altında katmanlılık-gerilme ilişkisi.

Figure 13. Bedding-stress relationship under irregular stress flux.

$$\sigma_d = 5.993 \exp^{3.3242\zeta}$$

(4)

Çalışma kapsamında önerilen eşitlikler ile grovaplarda katmanlılık tanımı kapsamında kayaç ortama yapılacak yükleme (P), yükler ile ortama aktarılacak gerilme değerleri (σ) ve bu gerilme değerlerinin kayaç ortam içinde düzensiz dağılımı sonucunda ulaşabileceği değerler (σ_d) Eşitlik 2, 3 ve 4 ile hesaplanmıştır (Çizelge 1).

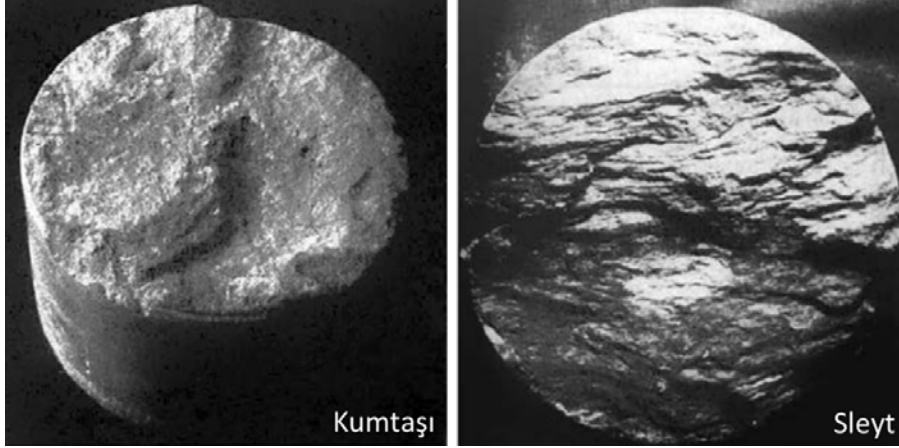
Çizelge 1. Grovaplarda katmanlılık-yük-gerilme ilişkisi.

Table 1. Bedding-load-stress relationship in greywacke.

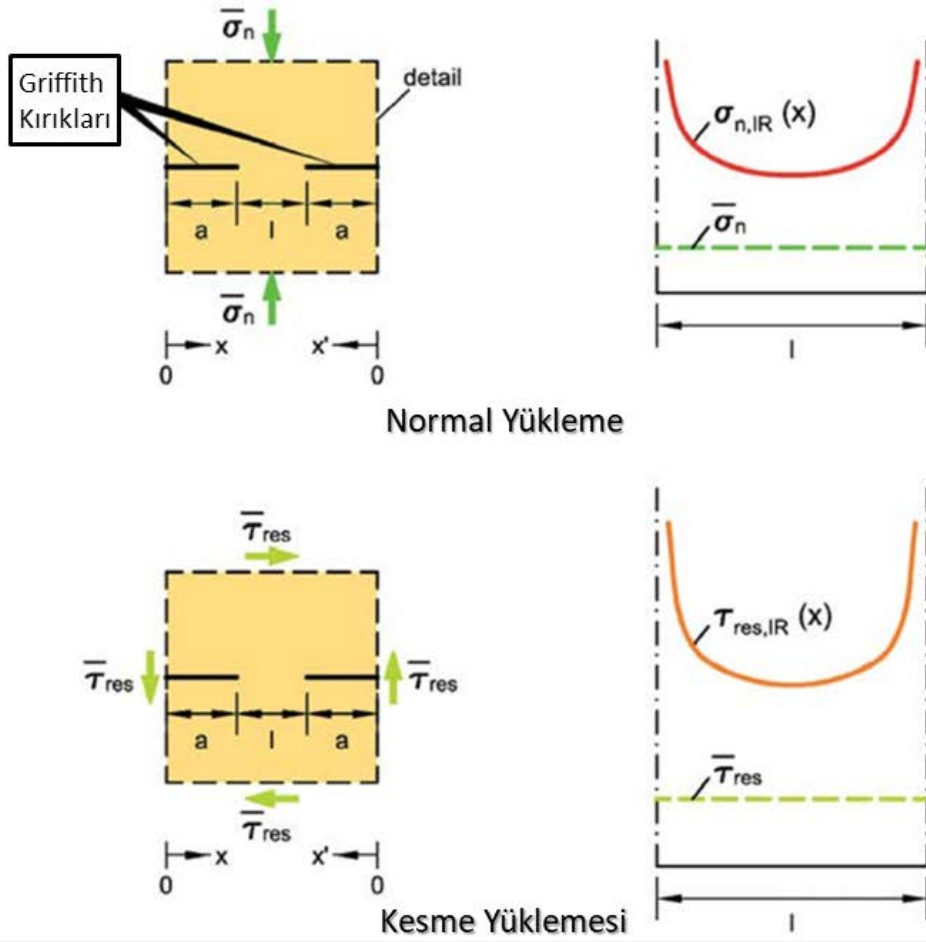
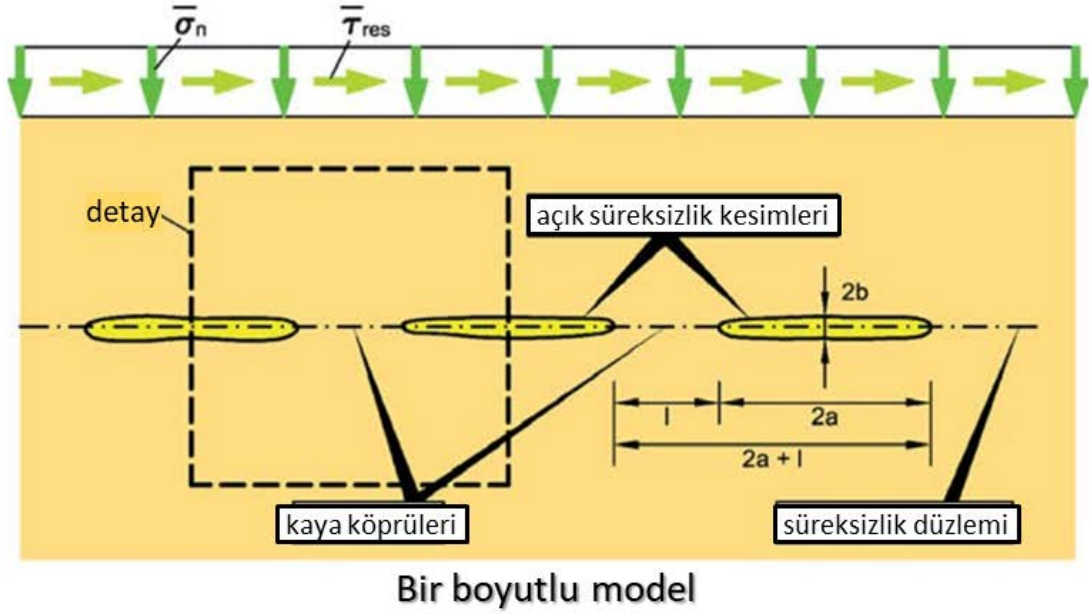
ζ	Eşitlik 2 Yük (kg)	Eşitlik 3 σ (kg/cm ²)	Eşitlik 4 σ_d (kg/cm ²)	Oransal Katlılık σ_d/σ
0.01	1218.699325	18.08574	6.1955675	0.34256647
0.02	1180.814156	17.52351	6.404982	0.365507834
0.03	1144.106706	16.97877	6.6214748	0.38998556
0.04	1108.540365	16.45096	6.8452852	0.416102537
0.05	1074.079658	15.93955	7.0766605	0.443968544
0.06	1040.690217	15.44405	7.3158565	0.473700712
0.07	1008.338738	14.96395	7.5631375	0.505424016
0.08	976.9929559	14.49877	7.8187768	0.539271801
0.09	946.621606	14.04805	8.0830568	0.575386341
0.1	917.194397	13.61135	8.3562697	0.613919439
0.2	668.822994	9.925465	11.651467	1.173896356
0.3	487.7092563	7.237702	16.246088	2.244647368
0.4	355.6401632	5.27777	22.652543	4.292066997
0.5	259.3346836	3.848578	31.585309	8.20700809
0.6	189.1082197	2.806403	44.040608	15.69290084
0.7	137.8987116	2.046444	61.407509	30.00693238
0.8	100.5564682	1.492278	85.622844	57.37728162
0.9	73.32630719	1.088177	119.38722	109.7130624
1	53.46993012	0.793504	166.46617	209.7860988

Sistem büyüklüğü içinde (Şekil 3) süreksizliklerin kaya kültésinin deforme olabirliği ve yükler karşısında sergileyeceği dayanım üzerinde önemli bir etkisi vardır. Makaslama dayanımı süreksizlik tipinin düzlemsel, dalgalı veya basamaklı, süreksizlik yüzeyinin ise kaygan, düz, pürüzlü olmasına göre değişir. Makaslama dayanımı süreksizliğin düzlemselden basamaklı tipe geçişinde artmakta ve süreksizlik yüzeyi içsel sürtünme açısı üzerinde etkili olmaktadır. Şekil 9’da gösterilen ilişkide yüklemeler karşısında süreksizliklerin büyük açıklıklı kesimleri hiç bir zaman kapanamayacaktır (Wittke, 2014). Basamaklı ve pürüzlü süreksizliklerde oluşacak kapanma lineer olmamakta (Goodman, 1976; Bandis, 1980; Witherspoon ve diğ., 1980; Bandis ve diğ., 1983; Swan, 1983; Malama ve Kulatilake, 2003) ve kapanmanın en gerçekçi yaklaşımı hiperbolik model ile açıklanmaktadır (Bandis, 1980). Süreksizlik yüzeylerinde doğrusal olmayan kesme ölçütleri Patton (1966) tarafından tanımlanmış ve ilerleyen yıllarda çeşitli araştırmacılarca formüle edilmiştir (Ladanyi ve Archambault, 1970; Barton, 1973; Schneider, 1975; Lechnitz, 1981; Erban, 1986; Saeb; 1989; Maksimovic, 1992; Haberfield ve Johnston, 1994; Kulatilake ve diğ., 1995; Seidel ve Haberfield, 1995; Maksimovic, 1996; Zhao, 1997a; Zhao, 1997b). Yüzey profil tanımına dayalı niteliksel tanımlama ISRM (1978)’de Barton ve Choubey (1977) tarafından verilmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda basamaklı ve pürüzlü bir süreksizliğin kalıntı kayma dayanımının süreksizliğin kırılma ölçütü olarak alınabileceği anlaşılmıştır (Wittke, 1990). Doğada ise süreksizlik yüzeyleri süreksizlik profilleri ile yapılan tanımlamanın çoğunlukla dışında sergilediği profiller ile anizotropi gösterir (Şekil 14). Bu durumda ise süreksizliklerin pik kayma dayanımı kesme yönü ile ilintili olacaktır (Huang ve Doong, 1990; Jing ve diğ., 1992, Kulatilake ve diğ., 1995). Süreksizliđin dolgu içermesi durumunda

ise kesme dayanımı üzerinde dolgu malzemenin özelliği de etkili olabilecektir. Örneğin dolgu malzemenin kil veya siltli kum olması durumunda kesme dayanım değeri artan dolgu kalınlığı ile azalacaktır (Ladanyi ve Archambault, 1977). Süreksizliklerin kaya köprüleri içermesi durumunda ise süreksizlik uzunluğu ($a - 2a$), süreksizlik açıklığı ($b - 2b$) ve kaya köprüsü uzunluğu (l) ilişkisi içinde Griffith kırığı yaklaşımı ile çözümlenecektir (Stevenson, 1945). Kaya köprüleri ile devamlılığı kesilen süreksizliklerdeki gerilme dağılımı Şekil 15 ile gösterilmiştir.



Şekil 14. Süreksizlik yüzeylerindeki anizotropik pürüzlülükler (Kulatilake ve diğ., 1995).
Figure 14. Anisotropic roughness of discontinuity surfaces (Kulatilake et al., 1995).



Şekil 15. Devamsız süreksizlikteki kaya köprüsü boyunca gerilme dağılımı (Witke, 2014'ten değiştirilerek).

Figure 15. Stress distribution along a rock bridge of a non-persisting discontinuity (modified from Witke, 2014).

Şekil 15 ile gösterilen yaklaşımda kaya köprülerinden kaynaklı süreksizlik düzlemlerinde gerilme dağılımı süperpoze ilkesi ile çözümlenirken iki boyutlu çözümlenme izotrop ortamdaki düzlemsel ayrılma (κ_p) derecesindeki lineer süreksizlik bölümlenmesi (κ_i) kabulü ile yapılacaktır (Wittke, 2014). Sonuç denklemlerinin ise saha mühendisi tarafından sistem büyüklüğü içinde ortam tanımlamasında kullanılabilirliği tartışmalıdır. Devamlı ve devamsız süreksizliklerdeki kesme dayanım ilişkileri Şekil 16 ile özetlenmiştir.

Devamlı Süreksizlikler			Devamsız Süreksizlikler	
Çoğunlukla düzlemsel	Dolgulu	Dalgalı/Pürüzlü	Açık süreksizlikler	Kapalı süreksizlikler ($\varphi_D \ll \varphi_{IR}$)
T_{res}			\bar{T}_{res}	
Pik kesme dayanımı		Süreksizlik ve kaya kütle birlikteliği (gift çizgisel): if $\sigma_n < \sigma_{ns}$: $= \sigma_n \cdot \tan \varphi_D$ if $\sigma_n \geq \sigma_{ns}$: $= \sigma_n \cdot \tan \varphi_{IR} + C_{IR}$ veya kaya kütle (tek çizgisel): $= \sigma_n \cdot \tan \varphi_D (\sigma_n)$		
$= \sigma_n \cdot \tan \varphi_D$	$= \sigma_n \cdot \tan \varphi_F + C_F$		$= \bar{\sigma}_n \cdot \tan \varphi_{IR} + (1 - \kappa_p) \cdot C_{IR}$	$= (1 - \kappa_p) \cdot \bar{\sigma}_n \cdot \tan \varphi_{IR} + \kappa_p \cdot \bar{\sigma}_n \cdot \tan \varphi_D + (1 - \kappa_p) \cdot C_{IR}$
Kalıntı kesme dayanımı		devamsız: if $\sigma_n < \sigma_{ns}$: $= \sigma_n \cdot \tan \varphi_D$ if $\sigma_n \geq \sigma_{ns}$: $= \sigma_n \cdot \tan \varphi_{IR}^*$ veya devamlı: $= \sigma_n \cdot \tan \varphi_{IR}^*$		
$= \sigma_n \cdot \tan \varphi_D$	$= \sigma_n \cdot \tan \varphi_F^* + C_F^*$		$= (1 - \kappa_p) \cdot \bar{\sigma}_n \cdot \tan \varphi_{IR} + \kappa_p \cdot \bar{\sigma}_n \cdot \tan \varphi_D^*$	
Gerilme dayanımı				
	σ_n			$\bar{\sigma}_n$
= 0	= 0	= 0	≈ 0	≈ 0

Şekil 16. Farklı açıklıklardaki süreksizlikler için kırılma ölçütleri (Wittke, 2014'ten değiştirilerek).

Figure 16. Failure criteria for discontinuities of different appearance (modified from Wittke, 2014).

Saha mühendislerinin projelerin ön fizibilite ve fizibilite aşamasında sistem büyüklüğü içinde kayanın yükler karşısındaki davranışını doğru tanımlamaları projenin geleceği açısından son derece önemlidir. Bu kapsamda Trakya formasyonu grovaklarında gerçekleştirilen bu çalışma ile elde edilen ve Çizelge 1 ile sunulan bulgular ortam değerlendirilmesi için son derece kullanışlı olacaktır. Çizelge 1 incelendiğinde grovaklar için katmanlılık-yük-gerilme ilişkisinde kritik değerin $\zeta = 0.2$ olduğu anlaşılmaktadır. Katmanlılığın (ζ) 0.2 değerine kadar kayaç bünyesinde yükler ile gelişecek gerilme akısının düzenli veya düzensiz olması kayacın maddesel özelliği tarafından karşılanacak ve sistem büyüklüğü içinde kayanın yüklenme alanı Şekil 7'de gösterilen ilişkideki elastik davranış sınırı içinde kalacaktır. Diğer bir ifadeyle grovaklarda uygulanacak bir teknik girişimde proje sahasında yayılım

sunan kayacın katmanlılık değerleri 0.2 den küçük oldukça ($\zeta < 0.2$) sistem büyüklüğü içinde proje yapısından kaynaklı yüklemeler sonucunda kayanın bünyesinde oluşacak düzensiz gerilme akısı dağılımları taşın maddesel özelliğine bağlı olarak elastik davranış sınırları içinde olacaktır. Böylece kaya ortam $\zeta < 0.2$ değerleri için bünyesinde Şekil 12 ile gösterildiği gibi düzenli gerilme akılarına maruz kalmışçasına bir davranış sergileyecektir. Bu durumda, proje yükleri etkisinde sistem büyüklüğü içinde elastik davranış sergileyecek ortam da kolayca belirlenecektir. Bu durumda kaya ortamın davranışı Şekil 7’de gösterilen ilişki içinde 2 nolu alan içinde kalacaktır. Grovaklar için katmanlılığın 0.2 değerini geçmesi (ince tabakadan iğnemsî dağılgan yapıya evrilmiş kesimler) durumunda kaya bünyesinde oluşacak düzensiz gerilme akıları, bünyede sıçramalar yaparak yer derinliğine doğru bazı kesimlerde ani gerilme artışları vb. sonuçlara neden olacak ve ortam taşıyabileceği gerilme değerinin üzerinde yüklendiğinde çeşitli sorunlar yaşanabilecektir.

Çizelge 1, Trakya formasyonu grovaklarında masif kayadan iğnemsî dağılgan yapıya doğru gidildikçe gerilmelerdeki artışın birkaç kat farklılıktan 200 kat farklılığa kadar ulaşabileceğini göstermektedir. Bu çalışma için katmanlılık tanımının sınır değeri olarak kabul edilen 1 cm kalınlıkta birim kaya elemanlarından oluşan bir sistem büyüklüğünde (Şekil 17) ise gerilmenin kaya bünyesinin taşıyabileceği değer 210 katına varabileceği belirlenmiştir.



Şekil 17. Grovaklarda katmanlılık değerinin 1’e yaklaştığı kesimler.

Figure 17. The sections where the bedding value reach 1 in greywacke.

SONUÇ ve TARTIŞMA

Doğada kayalar her zaman Şekil 12 ile gösterildiği gibi yüklenmez. Kaya bazen belli bir kesiminden yüklenirken bazen de tüm yüzey boyunca etkili olan yükleme kayacın pürüzlülüğünün derecesine bağlı olarak kaya bünyesinde sadece pürüzlü kesimlerle yer derinliğine (içine) aktarılır. Bu çalışmada gerçekleştirilen ve Şekil 8’de gösterilen yüklemelerde arazide kayanın yüklenme durumunun laboratuvarında da oluşturulabilmesine dikkat edilerek yüklenme alanları özenle oluşturulmuştur. Çizelge 1’de elde edilen bulgular kayanın tüm, kısmi veya pürüzlü yüzeylerin temas noktalarıyla yüklenmesini göstermektedir. Kısmi yükleme veya pürüzlü yüzeylerdeki temas noktalarındaki yüklenmelerle bünyeye aktarılacak yüklerde kayanın tüm alanından yüklenme durumuna kıyasla bünyesinde çok daha büyük gerilme akıları etkili olacaktır. Bu durumda gerilme akıları kayanın farklı doğrultudaki düzlemlerinde artarak kayanın süreksizliklerine bağlı sergileyeceği gerilme ve geometrik kemerlenme sınırlarını aşacaktır. Bu durumda kaya ortam düzensiz gerilme akılarının ulaşacağı değerler nedeniyle kırılma, akma, kopma, göçme türü deformasyonların etkisiyle duraysızlaşacaktır. Bu duraysızlıklar ise her türlü güvenlik sınırları içinde aşırı güvenli bölgede kalarak yapıldığı kabul edilen bazı teknik girişimlerin dahi stabilitesini bozacaktır.

KAYNAKLAR

- BANDIS S., 1980.** Experimental studies of scale effects on shear strength and deformation of rock joints. PhD. Thesis, University of Leeds.
- BANDIS S., LUMSDEN A.C., BARTON N., 1983.** Fundamentals of rock joint deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol. 20, p: 249 – 268.
- BARTON N., 1973.** Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology* vol: 7, p: 287 – 332.
- BARTON N., CHOUBEY V., 1977.** The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* vol. 12, p: 1 – 54.
- BOZKURTOĞLU E., 1996.** İTÜ Kampüs Alanındaki Kayaçların Yüzey Pürüzlülüğünün Görüntü Analiz Yöntemi ile Araştırılması. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi. İstanbul, 179 syf.
- ERBAN P.J., 1986.** Räumliche Finite-Element-Berechnungen an idealisierten Diskontinua unter Berücksichtigung des Scher- und Dilatationsverhaltens von Trennflächen. *Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen*, Heft 14.
- GOODMAN R.E., 1976.** *Methods of geological engineering in discontinuous rocks.* West: New York.
- HABERFIELD C.M., Johnston I.W., 1994.** A mechanistically based model for rough rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol. 31, p: 279 – 292.
- HUANG T.H., DOONG Y.S., 1990.** Anisotropic shear strength of rock joints. In: *Proc. ISRM Symp. Rock Joints*, Loen.
- ISRM, 1978.** Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol. 15, p: 319 – 368.
- ISRM, 2007.** *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006.* R. Ulusay and JA. Hudson (eds.). Suggested methods prepared by the commission on testing methods, international society for rock mechanics, compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Offset, Ankara, Turkey, 628 p.
- JING L., NORDLUND E., STEPHANSSON O., 1992.** An experimental study on the anisotropy and stress dependency of the strength and deformability of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol. 29, p: 535 – 542.
- KETİN İ., 1983.** Türkiye Jeolojisine Genel Bakış. İTÜ Vakfı No:32. İstanbul, 595 syf.
- KULATILAKE P.H.S.W., SHOU G., HUANG T.H., MORGAN R.M., 1995.** New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol. 32, p: 673 – 697.
- LADANYI B., ARCHAMBAULT G., 1970.** Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. In: *Proc. 11th U.S. Symp. Rock Mech.*, Urbana.
- LADANYI B., ARCHAMBAULT G., 1977.** Shear strength and deformability of filled indented joints. In: *Proc. AGI Int. Symp. Geotechnics of Structurally Complex Formations*, Capri.
- LEICHNITZ W., 1981.** Mechanische Eigenschaften von Felstrennflächen im direkten Scherversuch. *Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft 89.
- MAKSIMOVIC M., 1992.** New description of shear strength for rock joints. *Rock Mech. Rock Eng.* vol. 25, p: 275 – 284.
- MAKSIMOVIC M., 1996.** The shear strength components of a rough rock joint. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 33, p: 769 – 783.
- MALAMA B., KULATILAKE P.H.S.W., 2003.** Models for normal fracture deformation under compressive loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* vol. 40, p: 893 – 901.
- ÖZGÜL N., 2011.** İstanbul İl Alanının Jeolojisi. İBB, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul, 89 syf.
- PATTON F.D., 1966.** Multiple modes of shear failure in rock. In: *Proc. 1st ISRM Congr.*, vol. 1, Lisbon.

- SAEB S., 1989.** Effect of boundary conditions on the behavior of dilatant rock joints. PhD. Thesis, University of Colorado at Boulder.
- SCHNEIDER H.J., 1975.** Reibungs- und Verformungsverhalten von Trennflächen im Fels. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 65.
- SEIDEL J.P., HABERFIELD C.M., 1995.** The application of energy principles to the determination of the sliding resistance of rock joints. Rock Mech. Rock Eng. vol. 28, p: 211 – 226.
- SIVAKUGAN N., SHUKLA S.K., DAS B., 2013.** Rock Mechanics. An Introduction. CRC Pres, NY. 234 p.
- STEVENSON A.C., 1945.** Complex potentials in two-dimensional elasticity. In: Proc. Roy. Soc., vol. A 184, London.
- SWAN G., 1983.** Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements. Rock Mech. Rock Eng. vol. 16, p: 19 – 38.
- VARDAR M., 2000.** Kaya Mekaniği Ders Notları, İ.T.Ü Jeoloji Mühendisliği Bölümü
- WITHERSPOON P.A., WANG J.S.Y., IWAI K., GALE J.E., 1980.** Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Water Resour. Res. vol: 16, p: 1016 – 1024.
- WITTKÉ W., 1990.** Rock mechanics – Theory and application with case histories. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1076p.
- WITTKÉ W., 2014.** Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). Ernst&Sohn Co. Berlin, 875 p.
- YÜZER E., VARDAR M., 1986.** Kaya Mekaniği. İTÜ Vakfi No:11. İstanbul, 187 syf.
- ZHAO J., 1997a.** Joint surface matching and shear strength. Part A: Joint matching coefficient (JMC). Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 34, p: 179 – 185.
- ZHAO J., 1997b.** Joint surface matching and shear strength. Part B: JRC-JMC shear strength criterion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 34, p: 173 – 178.