

## Tekrarlı yüklerin kayaçların deformasyon özelliklerine etkisi

*The effect of the cyclic loading on deformation properties of the rocks*

Melek Hanım BEŞER\*<sup>1</sup> , Kerim AYDINER<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 28.05.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 16.09.2024

### Öz

Kayaçlar, doğal afetler ve delme patlatma gibi dışsal etmenlerden kaynaklı tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır. Bu tekrarlı yüklerin kayaç deformasyon özelliklerine farklı etkileri olabilmektedir. Tekrarlı yüklerin kayaçların deformasyon özelliklerine etkilerini belirlemek; köprüler, yollar, binalar, yer altı depoları gibi mühendislik yapılarının uzun vadeli stabilitesi ve güvenliği için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma tekrarlı yüklemenin kayaçların deformasyon özelliklerine etkilerini ve tekrarlı yükleme koşullarında kaya yorulma mekanizmasını açıklamayı amaçlamaktadır. Çalışma üç tema üzerinde oluşturulmuştur. İlk aşamada tekrarlı yüklemenin tanımı, tekrarlı yükleme nedenli yorulma mekanizması, kaya yapıları/kütleleri için tekrarlı yükleme kaynakları ve tekrarlı yükleme ve yorulmanın kaya kütlelerinin deformasyonu açısından önemi açıklanmıştır. İkinci aşamada farklı yükleme parametreleri ve farklı mekanik özelliklerin yorulma ile ilişkisi tartışılmıştır. Son aşamada ise literatürde yer alan konu ile ilgili çalışmaların sonuçları/bulguları özetlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Deformasyon, Frekans, Tekrarlı yükleme

### Abstract

Rocks are subjected to cyclic loads due to natural disasters and external factors such as drilling and blasting. Determining the effects of cyclic loading on the deformation properties of rocks is critical for the long-term stability and safety of engineering structures such as bridges, roads, buildings and underground storage. This study aims to describe the effects of cyclic loading on the deformation properties of rocks and the mechanism of rock fatigue under cyclic loading conditions. The study is organized on three stages. In the first stage, the definition of cyclic loading, the mechanism of fatigue due to cyclic loading, the sources of cyclic loading for rock structures/masses and the importance of cyclic loading and fatigue for the deformation of rock masses are explained. In the second stage, the relationship between different loading parameters and different mechanical properties and fatigue is discussed. In the last stage, the results/findings of the relevant studies in the literature are summarized.

**Keywords:** Deformation, Frequency, Cyclic loading

\*Melek Hanım BEŞER; mhates@ktu.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Yeraltında ve yer üstündeki yapılar delme, patlatma, mekanik kazılar, deprem vb. sebeplerden statik, dinamik ve tekrarlı yüklere maruz kalır. (Şekil 1). Statik yüklem, kayanın belli bir zaman aralığında büyüklüğü değişmeyen yüke maruz kalma durumu olarak tanımlanır. Statik yük, kaya biriminin ya da yapının üzerinde yer alan kaya kütlelerinin ağırlığı olarak da ifade edilebilir. Dinamik yükler; deprem, patlama, iş makinelerinin (kamyon, ekskavatör vb.) hareketleri ya da delici makinelerin delik delmesi sırasında meydana gelirler. Belli bir zaman aralığında tekrar eden ve şiddet ve yayılma karakteristikleri zaman ve mesafeye bağlı değişen yüklerdir. Tekrarlı yük ise belirli bir frekans ve genlikte tekrar eden yüklerdir. Bu yüklere maruz kalan kayalar bazen statik dayanımlarından daha yüksek yüklerde yenilmeye uğrarken bazen de dayanımlarından daha düşük yüklerde yenilirler. Tekrarlı yüklere maruz kalan kayaların statik dayanımlarından daha düşük yüklerde yenilme durumu literatürde yorulma olarak tanımlanmaktadır (Burdine, 1963; Singh, 1989).

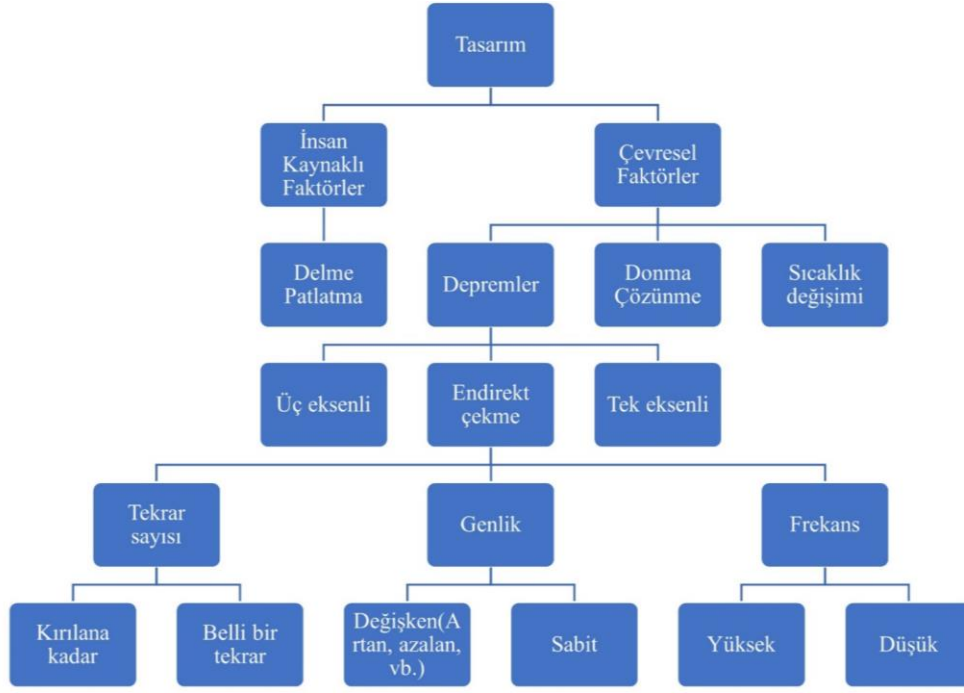


**Şekil 1.** Yorulmaya neden olan faktörler  
**Figure 1.** Factors causing the cyclic loading

Kaya yorulması konusundaki ilk çalışmalar 1950’li yıllarda gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmalarda çoğunlukla kayaların mekanik özelliklerine tekrarlı yüklemenin etkisi araştırılmıştır (Attewel & Farmer, 1973). Tekrarlı yüke neden olan faktörler ve uygulanabilecek deney akım şeması Şekil 2’de verilmiştir. Kayalarda yorulmaya neden olan faktörlerle ilgili farklı çalışmalar literatürde mevcuttur. Çevresel sebeplerden (delme, patlatma ve deprem vb. gibi) dolayı kaya yapılarının nasıl etkilendiği belirlenmeye çalışılmıştır (Haimson 1978; Hashash vd., 2001; Oraee-Mirzamani vd., 2011). Doğal olaylardan dolayı meydana gelen termal yorulma (Kim vd., 2014; Zhou vd., 2015; Zhu vd., 2020), donma çözünme (Li vd., 2003) gibi faktörlerin de etkisini belirlemek amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Petrol ve doğal gaz depoları, süper iletken manyetik enerji depoları ve yeraltı CO2 depoları gibi jeo-rezervuarlar da tekrarlı yüklemelere maruz kalır. Bu nedenle gazların depolanma işlemlerinde de basınçtan dolayı kayaların yorulma durumu araştırılmıştır (Fan vd., 2016). Son yıllarda yorulmanın kazılabilirlik üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Dehkoda & Detournay, 2017; Ghamgosar vd., 2017). Güçlü patlama yatkınlığı olan kömürler üzerinde de tekrarlı yüklemenin etkisi araştırılmıştır (Zhang vd., 2020).

Tünel ve köprü gibi uzun ömürlü yapıların tekrarlı yükler altındaki deformasyon davranışı, içinde buldukları kaya kütlelerinin yorulma davranışı ile yakından ilişkilidir. Kaya yapıların tasarlanması sürecinde yorulma kaynaklı yenilmelerin göz önünde bulundurulması ve yorulma mekanizmasının ve buna etki eden faktörlerin anlaşılması gerekir (Xiao vd., 2010).

Bu çalışmanın amacı tekrarlı yüklemenin neden olduğu yorulma kayalar üzerindeki etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarını genel olarak değerlendirmek ve bu konuda bir genel bakış sağlamaktır. Bu amaçla literatürdeki çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş ve çalışmalardan elde edilen önemli sonuçlar derlenmiştir. Böylece bu konudaki eksiklikler ve boşluklar ortaya konulmaya çalışılmıştır.

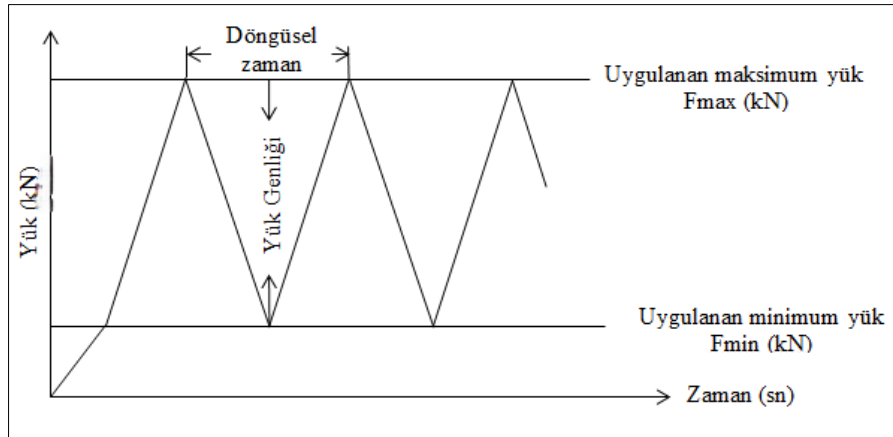


**Şekil 2.** Deneysel akım şeması  
**Figure 2.** Experimental flow chart

## 2. Tekrarlı yükleme

### 2. Cyclic loading

Tekrarlı yükleme maksimum yük ( $F_{max}$ ) ile minimum yük ( $F_{min}$ ) arasında belirli bir tekrar sayısında ( $N$ ) ve belirli bir frekansta kaya üzerine etkileyen yük tekrarları olarak tanımlanır (Singh, 1989) (Şekil 3). Tekrar sayısı, frekans ve yükleme genliği tekrarlı yükleme durumunu belirleyen ana parametrelerdir. Birçok çalışmada tekrarlı yükleme durumunda bu faktörlerin kayalar üzerine etkisi araştırılmıştır (Arora vd., 2019; Peng vd., 2020). Yapılan çalışmalarda frekans, tekrar sayısı ve yükleme genliğinin değişimi ile kayacın yorulma dayanımı ve deformasyon özellikleri üzerine etkileri araştırılmış ve ayrı başlıklar altında irdelenmiştir.



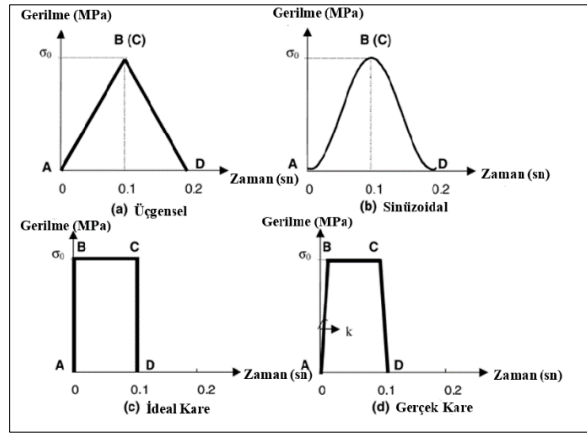
**Şekil 3.** Tekrarlı yükleme  
**Figure 3.** Cyclic loading

### 2.1. Yük etkisi

#### 2.1. Load effect

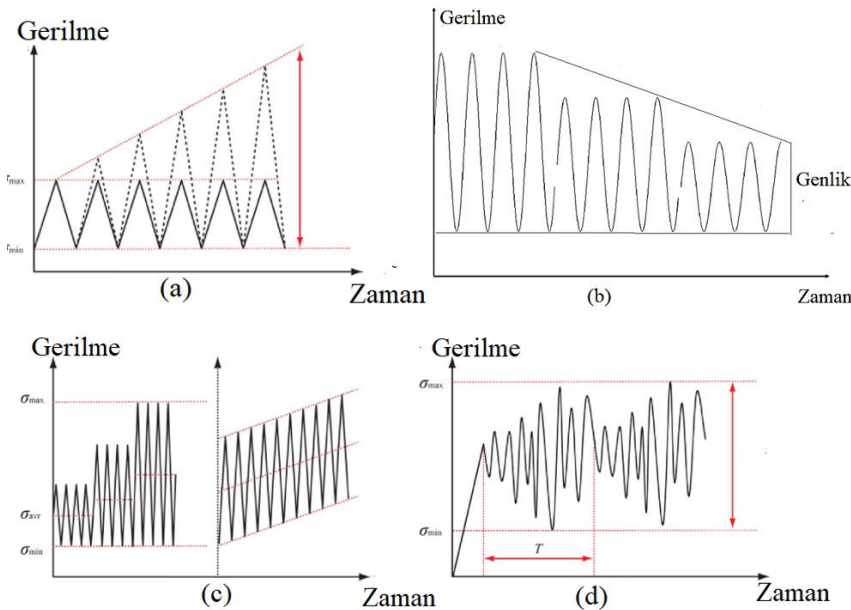
Tekrarlı yüklemede yük belirli bir minimum yük ile belirli maksimum yük arasında yükleme-boşalma şeklinde uygulanır. Yük değişimi sadece maksimum yükün değişimi ile uygulanabilirken, minimum ve maksimum yük arasındaki farkın (genliği) değişimi olarak da uygulanır (Ray vd., 1999; Song vd., 2021).

Yükün kayacın mekanik davranışlarında belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Kayacın dayanımına yakın bir maksimum yük uygulandığında kayaçlar yenilir (Eberhardt vd., 1999; Yang vd., 2015; Yang vd., 2017). Artan yük ile kayadaki hasar miktarında artış gözlenmiştir. Kaya içerisindeki çatlaklar daha hızlı bir şekilde birleşerek daha büyük bir çatlığa yol açtığı ve böylelikle kayacın daha erken yenildiği görülmüştür (Bagde & Petros, 2009). Bazı çalışmalarda yükleme/boşaltma döngülerinde kayaçlar daha erken yenilirken bazı çalışmalarda (Yang vd., 2015) dayanım artmıştır. Bu yüklerin etkileri kayacın türüne, uygulanan yükün büyüklüğüne ve tekrar sayısına bağlı olarak değişmektedir. Tekrarlı yüklemeyi dalga şekli ve yükleme türü etkiler. Dalga şekli sinüzoidal, üçgen ve kare şeklindedir (Şekil 4). (Gong & Smith, 2003) yaptıkları deneylerde kare dalga formunda hasar birikiminin daha hızlı gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Kare dalga sırasında yük çok hızlı bir şekilde artmakta, daha sonra uzun bir süre sabit kalmakta ve ardından hızla azalmaktadır. Bu şekilde ilerleyen yükleme modelinin etkileri de daha yıkıcı olmaktadır (Gong & Smith, 2003). Üçgen dalga boyunda ise yükün hafifçe arttığını ve sonra aynı şekilde azaldığını, dolayısıyla daha az hasar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sinüzoidal dalga boyunda ise yükleme oranı daha yüksek olduğu için yıkıcı etkiler daha fazla olmaktadır. Zhenyu & Haihong (1990) sinüzoidal dalga boyunun üçgen dalga boyuna göre daha büyük deformasyona neden olduğunu belirtmiştir.



Şekil 4. Dalga boyu çeşitleri  
Figure 4. Types of waveform

Yükleme türü sabit genlik, artan genlik, azalan genlik ve kademeli artan genlik olmak üzere dört farklı genlikte uygulanabilmektedir (Şekil 5). Gong & Smith (2003), düşük yükten yükseğe doğru olan tekrarlı yükleme, yüksek orandan düşüğe doğru olan yükleme şekline göre daha az hasar verici olduğunu belirlemiştir. Zhou vd. (2015) tekrarlı yükleme deneylerini çok aşamalı genlik (multi-level amplitude) şeklinde gerçekleştirmiştir. Fan vd. (2017) yükleme-boşaltma tekrarlarını belirli zaman aralıkları ekleyerek deneylerini gerçekleştirmiştir.



Şekil 5. a) Sabit ve kademeli olarak artan genlikli dalga şekilleri b) Azalan genlik (Xiao vd., 2009) c) Çok seviyeli tekrarlı genlikli ve artan ortalama genlikli ve sabit genlikli dalga şekli d) Rastgele tekrarlı yükleme (Liu & Dai, 2021)

Figure 5. a) Constant and gradually increasing amplitude b) Decreasing amplitude (Xiao et al., 2009) c) Multi-level cyclic amplitude d) Random cyclic loading (Liu & Dai, 2021)

## 2.2. Frekans

### 2.2. Frequency

Frekans birim zaman başına meydana gelen tekrar sayısı olarak ifade edilir. Frekans genellikle Hertz (Hz) birimiyle ifade edilir ve 1 Hz, saniyede bir tekrar sayısı olarak tanımlanır. Kayaların yorulması üzerine yapılan çalışmalarda genellikle 1 Hz. frekans değeri kullanılmıştır. Bunun temel nedeni deprem ve diğer etkilerin yaklaşık olarak 1 Hz. civarında meydana gelmesidir (Haimson, 1978; Jobli vd., 2017). Frekans aralığı genellikle kullanılan cihaza bağlı olarak da belirlenir. Yapılan çalışmalarda çok düşük (0.05 Hz) frekanslarda veya çok yüksek (50- 60 Hz) frekanslarda analizler gerçekleştirilmiştir. Düşük frekanslar, yükün kaya üzerinde çok uzun süre kalmasına neden olurken aynı zamanda kaya içerisinde var olan çatlakların ilerlemesine ve birleşmesine imkân sağlayabilmektedir. Bu nedenle daha düşük frekanslarda kayalar daha erken yenilir (Geranmayeh vd., 2020; Momeni vd., 2015; Peng vd., 2020). Yüksek frekanslarda ise tam tersi bir etki görüldüğü belirtilmiştir. Kaya içerisindeki çatlaklar ilerlemeye zaman bulmadan kapandıkları için kayalarda sertleşme (strain hardening) gerçekleşebilir (Ishizuka vd., 1990). Bundan dolayı frekansın etkisinin belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir.

## 2.3. Tekrar sayısı

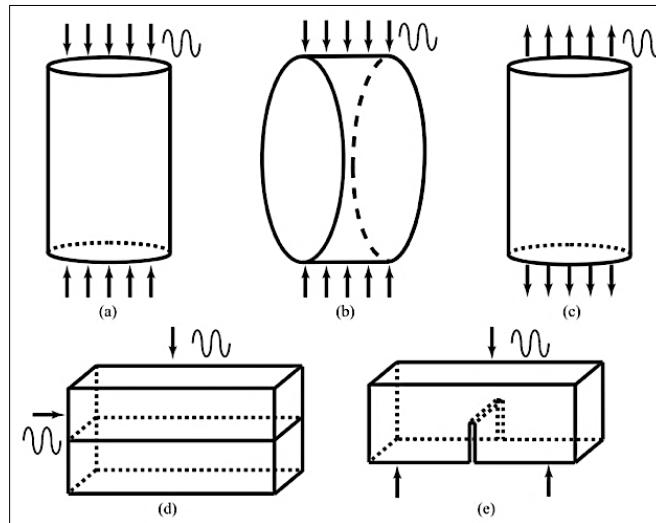
### 2.3. Number of cycles

Yorulma ömrü yenilmeye kadar olan döngü sayısını tanımlar ve malzemeden malzemeye değişir. Tekrarlı yükleme deneylerinde tekrar sayısı kayalar yenilene kadar yapılabilirken belirli bir tekrara kadar da uygulanabilir. Yenilene kadar uygulanan tekrar sayıları kayacın yorulma ömrü olarak tanımlanır (Singh, 1989). Genelde tekrar sayısı belli bir tekrara kadar olduğunda etkisi ihmal edilecek kadar az olabilirken belirli bir değerden sonra yükün kaya üzerindeki süresi arttığı için kayacın daha erken yenilmesine sebep olabilir. Örneğin, Ray vd. (1999) 100 ila 600 döngü sayısı üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada, 100 ila 300 döngü arasında kayanın dayanımında hızlı bir düşüş, 300 ila 500 döngü arasında biraz daha yavaş bir düşüş ve 500 ila 600 döngü arasında çok daha yavaş bir düşüş gözlemlenmiştir.

## 3. Tekrarlı yükleme deneyleri

### 3. Experiments of cyclic loading

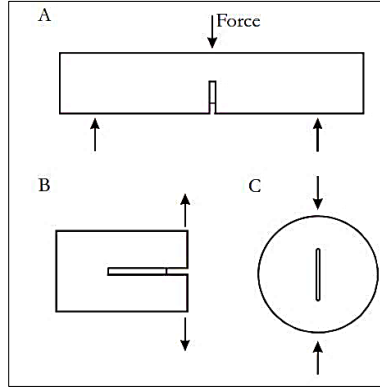
Tekrarlı yükleme deneyleri kayaların farklı mekanik özellikleri (tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, kırılma tokluğu vb.) için uygulanmaktadır. (Şekil 6). Yapılan çalışmaların çoğunda tek eksenli basınç dayanımı üzerine odaklanılmıştır (Fuenkajorn & Phueakpum, 2010; Rajaram, 1981; Royer-Carfagni & Salvatore; 2000, Xiao vd., 2010). Laboratuvar ölçekli yapılan deneylerle yeraltı madenlerinin tasarımlarında, topluklarda tekrarlı yüklemenin etkisi (Jiang vd., 2016; Liang vd., 2012) araştırılmıştır.



**Şekil 6.** Tekrarlı yükleme deneylerinin türleri a) Tek eksenli basınç testi, b) Dolaylı çekme testi, c) Doğrudan çekme testi d) Kesme testi e) Kırılma tokluğu testi

**Figure 6.** Types of cyclic loading test a) Compressive strength test d) Indirect tensile test c) Direct tensile test D) Shear test e) Fracture test

Farklı yanal basınçlar altında üç eksenli sıkışma dayanımı için yapılan deneysel çalışmalar da mevcuttur (Gatelier vd., 2002; Liu & He, 2012; Wang vd., 2013; Yang vd., 2017). Birçok ülkenin kalkınmasında katkısı olan petrol vb. yakıtların depolanması için yapılan kaya yapılarında da yorulma davranışının incelenmesi önem arz etmektedir (Wang vd., 2015). Bu çalışmalara ek olarak patlatma faaliyetlerinden dolayı kayalarda çekme durumunda da yorulma davranışının etkisi incelenmiştir (Erarslan & Williams, 2012a). Kayaların içerisinde önceden var olan çatlakların da tekrarlı yükleme durumunu etkileyip etkilemediğini belirlemek amacıyla kayaların kırılma tokluğu için de deneyler gerçekleştirilmiştir (Erarslan & Williams, 2012b; Tang vd., 2020). Kırılma tokluğu belirlenirken farklı metotlar kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan metotlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. A) Çentik eğilme, B) Short rod, C) Çatlak çentikli brazilian testi

Figure 7. A) Chevron bend, B) Short rod, C) Cracked chevron notched brazilian disc method

## 4. Kayalarda yorulma

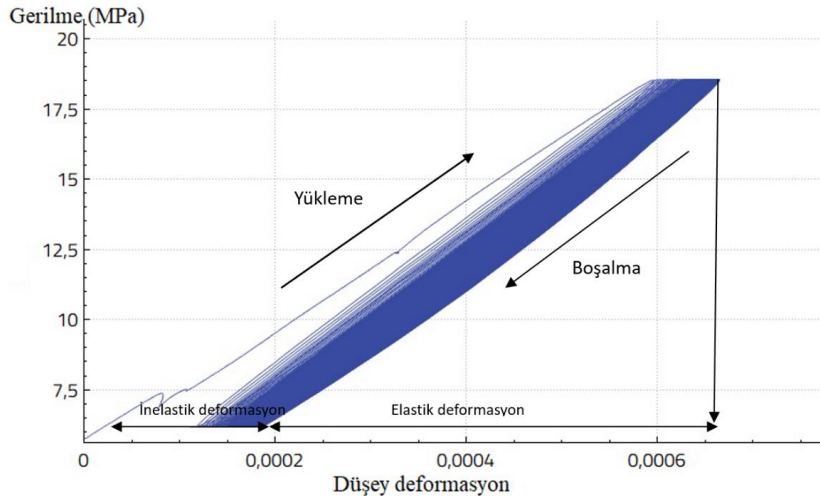
### 4. Rock fatigue

Tekrarlı yükleme çalışmalarında kayaların deformasyon özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek yüklerin etkisini analiz edebilmek için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle kayaların mekanik ve deformasyon özelliklerine etkisini değerlendirmek gerekir. Yapılan çalışmalardaki değerlendirmeler aşağıda derlenmiştir.

### 4.1. Yorulma dayanımı ve deformasyon

#### 4.1. Fatigue strength and deformation

Tekrarlı yüklemenin etkilerini değerlendirmek için genellikle kayanın yorulma dayanımı ve zamana bağlı gerilme-gerinim grafikleri analiz edilir. Tekrarlı yükleme ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda tekrarlı yük altında sağlam kayaların gerilim-gerinim eğrilerinin histerezis şeklinde olduğu belirtilmiştir (Beşer, 2024) (Şekil 8).

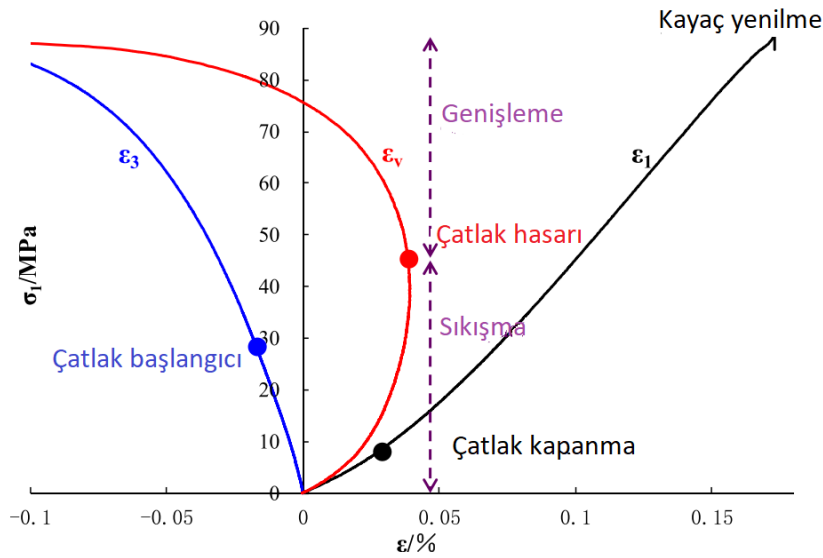


Şekil 8. Gerilme-deformasyon histerezis (Beşer, 2024)

Figure 8. Stress-deformation hysteresis (Beşer, 2024)

Yük arttıkça oluşan deformasyon sırasında kayalarda önce sıkışma meydana gelir ve eksenel deformasyon azalır, ardından yanal deformasyon artar ve belli bir noktadan sonra kaya yenilir. Bu süreçte kayanın deformasyonu ilk iterasyonlarda azalma eğilimindedir. Daha sonra deformasyon sabit kalır ve belirli bir döngüden sonra deformasyon artar. Bu noktada kayada makro çatlaklar meydana gelir.

Marthin & Chandler (1994) gerilme-deformasyon eğrilerinin çatlak kapanması, çatlak başlangıcı, kontrolsüz çatlak büyümesi ve kaya yenilmesi olarak dört aşamada gerçekleştiğini belirtmişlerdir (Şekil 9). Öncelikle yükleme işlemi ile kaya içerisinde önceden var olan boşluklar kapanmaya başlar ardından yeni çatlaklar oluşmaya başlar ve yük artınca belirli bir noktadan sonra çatlak kontrolsüz bir şekilde ilerler ve kaya yenilmeye uğrar. Bu süreçte kayalar elastik ve plastik davranışlar sergiler. Plastik süreçte kaya içerisinde biriken enerji geriye dönülmez hale geldiği için kayada hasar oluşumuna neden olur. Yapılan çalışmalarda frekansın kaya dayanımını olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir (Arora vd., 2019). Fakat frekansın artışı ile sabit tekrar sayısında uygulanan yükün etki süresi azalır. Böylece kaya içerisindeki çatlakların büyümesi ve yeni çatlakların oluşması engellenir ve kaya daha sağlam olur. Sonuç olarak artan frekans ile kayacın yorulma ömrü ve elastisite modülünde artış meydana gelmiştir (Bagde & Petros, 2009; Haghgouei vd., 2018; Li vd., 2001; Liu vd., 2012). Yük değişiminin kayacın yorulma dayanımına etkisini araştıran çalışmalarda yükleme genliğinin artması ile her bir tekrarda meydana gelen hasar oranının da arttığını belirlenmiştir (Ray vd., 1999; Song vd., 2013). Sonuç olarak artan yük ile kaya dayanımının azaldığı anlaşılmıştır. Bozunmuş kaya üzerine tekrarlı yük uygulandığında kayacın dayanımının yaklaşık %15 oranında azaldığı ortaya koyulmuştur (Jobli vd., 2017). Ayrıca, tekrar sayısının artışı ile kayacın plastik deformasyonunda yavaş yavaş artış olduğu ifade edilmiştir (Zhenyu & Haihong, 1990).

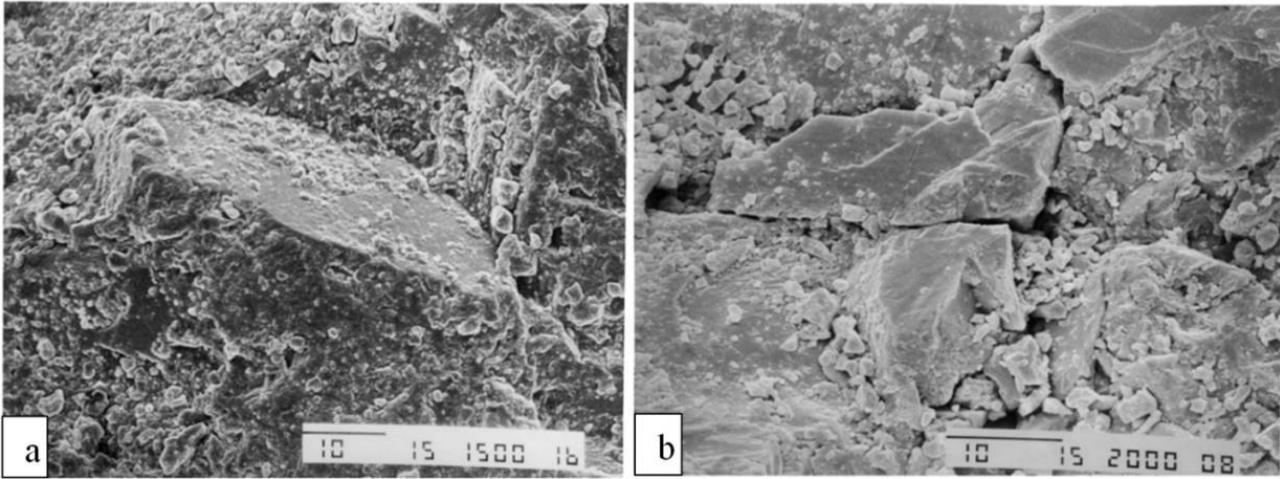


Şekil 9. Çatlak ilerleme süreci (Fu vd., 2020; Martin & Chandler, 1994)  
Figure 9. Crack propagation process (Fu et al., 2020; Martin & Chandler, 1994)

## 4.2. Çatlak ilerlemesi ve değerlendirilmesi

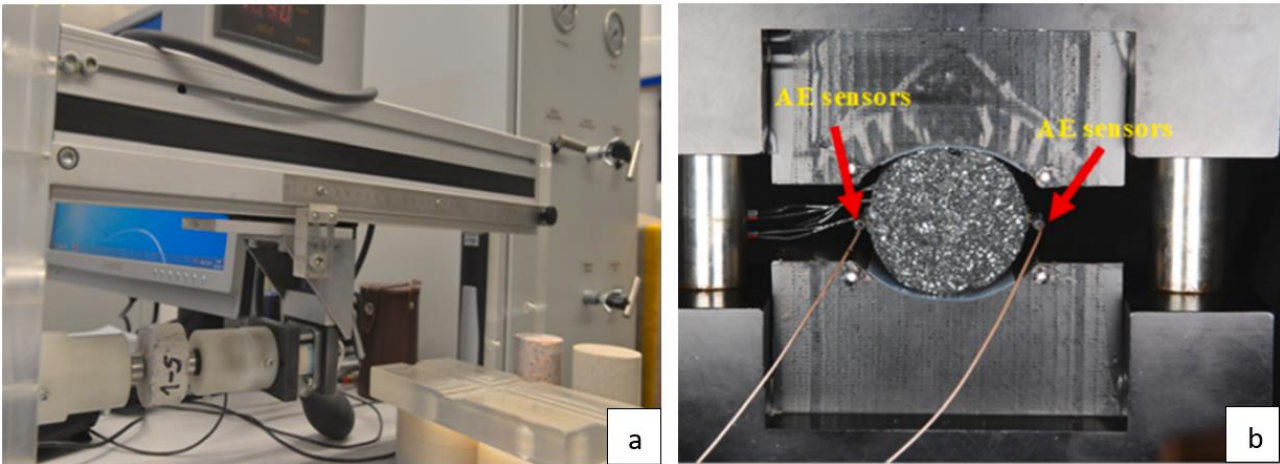
### 4.2. Crack propagation and evaluation

Yarı gevrek/kırılgan kayalarda çatlak gelişimi, kaya yenilmesinin ana nedeni olarak görülür. Bu nedenle, kayalardaki yenilme durumunu daha iyi tanımlamak için mikro çatlakların gelişim sürecini incelemek gerekir. Çatlak yapısının incelenmesi amacı için kullanılan bir yöntem taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleridir. Yenilme sonrası kayalardan alınan işlem görmemiş numune parçalarına analizler yapılmıştır (Erarslan & Williams, 2012b; Zhang vd., 2002) (Şekil 10). Kayacın yenilme durumunda çok fazla çatlak oluşumunun meydana geldiği ve kaya tanelerinde daha fazla ve ince parçalandığı belirlenmiştir (Liu vd., 2017; Royer-Carfagni & Salvatore, 2000). Benzer sonuçlar, polarizan mikroskop kullanılarak da elde edilmiştir (Akesson vd., 2004).



**Şekil 10.** SEM görüntüleri a) Statik yükleme b) Tekrarlı yükleme (Dal Pino vd., 1999)  
**Figure 10.** SEM images a) Static loading b) Cyclic loading (Dal Pino et al., 1999)

Çatlak ve hasar oluşumunu anlamak için kullanılan diğer yöntemler ultrasonik dalga hızı ve akustik emisyonudur (Şekil 11). Tahribatsız bir test olduğu için deney öncesi ve sonrasında numune üzerinde ultrasonik hız ölçümleri gerçekleştirilmiş ve kayadaki boşlukların artışı ve çatlakların ilerlemesi analiz edilmiştir. Ultrasonik dalga hızının statik yüklemelerde neredeyse hiç değişim göstermediği, tekrarlı yükleme durumunda ise kırılmaya yakın tekrar sayısında azaldığı ortaya konmuştur (Song vd, 2021). Gupta (1973), tek eksenli sıkıştırma altındaki bir kireçtaşı küpünde üç dik yön boyunca P ve S dalga hızlarını ölçmüş ve hem P hem de S dalga hızlarının kırılmadan önce her üç yönde de farklı miktarlarda azaldığını bulmuştur. P-dalgasının S-dalgası hızına oranı yükleme yönü boyunca neredeyse sabit kalmış, kayma düzlemine paralel yön boyunca hafifçe azalmış ve kayma düzlemine dik yön boyunca önemli ölçüde azalmıştır. Stanchits vd. (2006) bazalttaki P-dalga hızının atmosferik basınçta yaklaşık 3 km/s olduğunu, ancak hidrostatik basınç 120 MPa'a çıkarıldığında %50'den fazla arttığını bulmuştur. Granit örneklerinde, başlangıçtaki P-dalgası hızı 5 km/s'dir ancak artan basınçla birlikte %20'den daha az artmıştır. Rao & Ramana (1992) granit numuneler üzerinde tek eksenli tekrarlı yükleme testleri gerçekleştirmiş ve uygulanan gerilmeye dik yönde basınç dalgası hızındaki değişiklikleri izlemiştir. Basınç dayanımının %30'una kadar yük artışı ile basınç dalgası hızında sabit bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kaya tekrar basınç dayanımının %80'ine kadar yüklendiğinde, basınç dalgası hızı hızla düşerek mikro çatlakların geliştiğini göstermiştir. Üç eksenli dayanım koşulunda tekrarlı yüklere maruz kalan kömürün akustik emisyon ile sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Toplam akustik emisyon sayısının ilk tekrarda arttığı ancak tekrarlı yükleme devam ettikçe yenilmeden hemen önceki tekrarda azaldığı tespit edilmiştir (Duan & Ma, 2020). Wang vd. (2019), üç eksenli basınç altında kayadaki çatlakların yanal basıncın etkisiyle kapandığını, bunun da kayanın dayanımını artırdığını ve dolayısıyla sınırlama basıncındaki artışa bağlı olarak toplam akustik aktivitenin arttığını belirtmiştir.



**Şekil 11.** a) Ultrasonik dalga hızı b) Akustik emisyon  
**Figure 11.** a) Ultrasonic wave velocity b) Acoustic emission

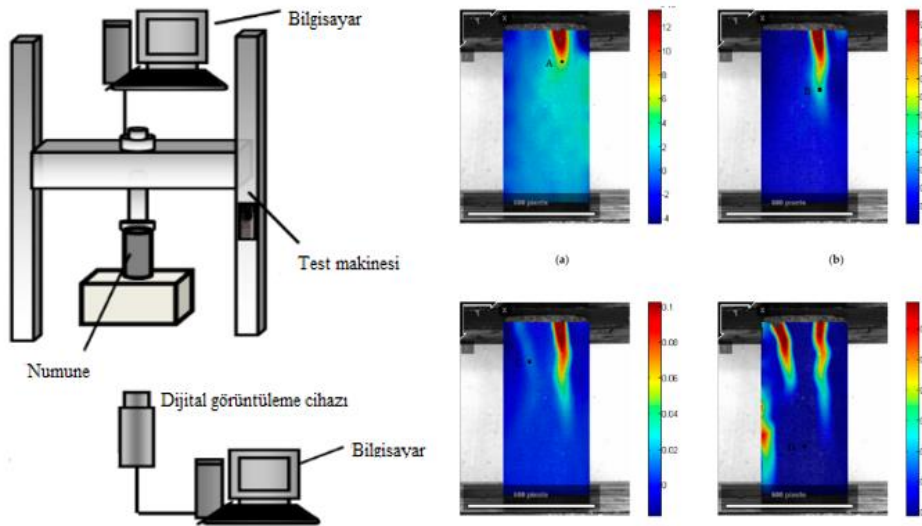


Kayaların çatlak gelişimini analiz etmek için kullanılan diğer yöntem ise CT (Bilgisayarlı Tomografi) cihazıdır (Şekil 12). Farklı tekrarlı yüklemelerde kayalardaki çatlakların gelişimini ve yayılımını izlemek için yüksek çözünürlüklü bir cihaz kullanılır (Wang vd., 2020). Fan & Sun (2019) kayaların iç yapısındaki boşlukların değişimiyle orantılı olarak kayadaki çatlakların ve hasarın ilerlemesini analiz etmiştir. Çatlakların gelişiminin hasar birikimine neden olduğunu ve sonuç olarak ana gerilme yönüne dik yönde oluşan makroskopik ana çatlakların ilerlemesi ile kayanın yenilmeye uğradığını belirtmişlerdir.



Şekil 12. Mikro bilgisayarlı tomografi  
Figure 12. Micro computed tomography

Dijital görüntü korelasyonu (DIC) numune yüzeyindeki yer değiştirme ve gerinim alanlarını belirlemek için kullanılan temassız bir yöntemdir (Şekil 13). DIC metodu ile yük altındaki bir numunenin görüntüleri elde edilir ve daha sonra malzemelerin yer değiştirme ve gerinim tepkilerini nicel olarak görüntüleyerek analiz edilmesine imkan sağlar (Bello vd., 2023; Nguyen vd., 2011). Metodun çalışma prensibi, bir koordinatta aynı konumundan iki ayrı görüntüyü karşılaştırılması ile elde edilen yer değiştirme verilerine dayanır. Song vd. (2013) çalışmasında farklı genliklerde tekrarlı yüke maruz kalan kumtaşı numunelerini test etmiş ve numune yüzeyinin yükleme-boşalma tekrarlarında dijital görüntü korelasyonu (DIC) ile optik görüntüleri analiz etmişlerdir. DIC metodu ile görünen gerilmeler ile hasar süreci ve kırılana kadar ki çatlakların yayılma süreci tanımlanmıştır. Eksenel yük-yer değiştirme eğrileri, artık yer değiştirmenin tekrarların artmasıyla hafifçe arttığını ve dağılan enerjinin ilk tekrardan sonra hızla azaldığını ve daha sonra sabit kalma eğiliminde olduğunu göstermiştir.



Şekil 13. Dijital görüntü korelasyonu (Chen vd., 2020)  
Figure 13. Digital image correlation (Chen et al., 2020)

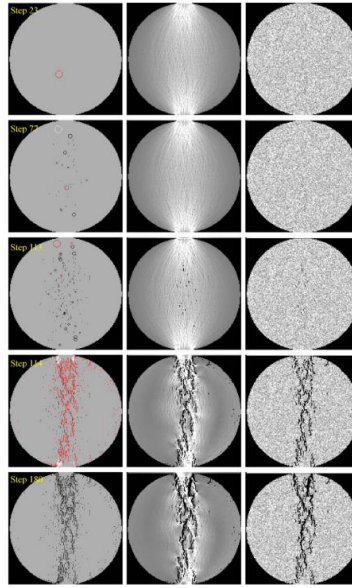
Çatlak gelişimi ve ilerlemesinin belirlenmesi kayadaki hasar birikimini analiz etmede önemli bir adımdır. Çatlak gelişiminin analizinde kayacın kırılmaya karşı gösterdiği direnç ve kırılma indeksinin belirlenmesi de önemli bir katkı sağlamaktadır. Kırılma durumlarını analiz eden bazı çalışmalar mevcuttur (Nejati & Ghazvinian, 2014).

### 4.3. Numerik analizler

#### 4.3. Numerical analysis

Kayaların yenilmesinde ve farklı yükler altında ve mühendislik yapılarının stabilizasyon çalışmalarını modellemede RFP (Rock Failure Process Analysis) (Fu vd., 2020; Zhu & Tang, 2006) vb. simülasyon programları kullanılmıştır. Ayrıca kayaların yenilme modelleri de simüle edilmeye çalışılmış ve farklı yükleme aşamalarında farklı yenilme modellerinin olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 14).

Yorulmanın hasar oluşumu ve deformasyona etkisi geçmiş bazı çalışmalarda formüle edilmiştir. Bu çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir. Tekrarlı yükleme durumunda hasar birikimi aşamalı olarak gerçekleştiği için her bir tekrarda farklı hasarlar meydana gelir. Bu durumu ifade eden denklemlerde kayadaki hasar durumunu belirleyen elastisite modülü, gerinme ve enerji birikimi gibi faktörler üzerine denklemler elde edilmiştir. Böylelikle kayalardaki hasar birikimleri matematiksel olarak da belirlenmiştir.



Şekil 14. Yenilme modeli (Liu vd., 2017)  
Figure 14. Failure model (Liu et al., 2017)

**Tablo 1.** Yorulma hasarını belirleyen yaklaşımlar

**Table 1.** Approaches about rock damage

Yöntem	Formül	Açıklama	Referans
Ultrasonik dalga hızı	$D=1-(V_{Tn}^2/V_T^2)$	V değerleri anlık dalga hızlarını ifade eder. $V_{Tn}^2$ ve $V_T^2$ sırası ile belirli bir tekrardan sonraki dalga hızı ve başlangıçtaki dalga hızı	(Xiao vd., 2010)
Elastisite metodu	$D=1-(\check{E}/E)$	$\check{E}$ ve E sırası ile belirli bir tekrardan sonra kayacın elastik modülü, sağlam kayacın elastik modülü	(Liu vd., 2014)
Enerji yayılım metodu	$D=(\sum_i^n u_d^i)/\sum_i^{N_f} u_d^i$	n belirli bir tekrara kadar yayılan enerji, $N_f$ yorulma ömrü.	(Wang vd., 2022)
Akustik emisyon	$D=N/N_T$	N belirli bir tekrardaki akustik emisyon sayısı iken $N_T$ kırılana kadar biriken akustik emisyon sayısı	(Cui vd., 2022)
Kalıntı eksenel gerinim metodu	$D=\epsilon_N/\epsilon_f$	$\epsilon_f$ yenilme anındaki kalıntı gerinme, $\epsilon_N$ belirli bir tekrar anındaki maksimum gerinme	(Liu & He, 2012)

## 5. Sonuçlar

### 5. Conclusion

Bu çalışmada tekrarlı yüke maruz kalan kayaların sergiledikleri davranışlar derlenmiştir. Tekrarlı yük ile kayaların deformasyon özellikleri ve yenilme mekanizmaları arasındaki ilişki gösterilmiştir ve bazı belirsizlikler tartışılmıştır. Çalışma sonucunda çıkarılacak sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Tekrarlı yükün etkisiyle kayacın deformasyonu üç aşamada gerçekleşir. İlk tekraralarda kayaçtaki deformasyon yavaş yavaş ilerler. Daha sonra sabit kalır ve bir değerden sonra hızlıca artar ve kayaç yenilir. Bu durumda kayaca uygulanan parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Kayalarda yorulmanın etkisini belirlerken değişkenler oldukça fazla olduğu için (frekans, tekrar sayısı, genlik, yükleme şekli vb.) değişkenlerin etkilerini belirlemek de oldukça zor olmaktadır. Çalışmalarda genel olarak yüksek yük altında tekrarlı yüklemeye statik duruma göre kayada daha hızlı ve daha büyük hasarlar meydana geldiği ve bu nedenle kayaların daha erken yenildiği gözlemlenmiştir. Farklı frekanslar ve tekrar sayılarında kayacın deformasyon özellikleri malzemenin özelliğine ve yükleme koşullarına göre farklılık göstermektedir. Tekrarlı yüke maruz kalan kayalarda çatlak oluşumu ve parçalanmalar daha fazla olur ve aniden yenilirken bazen kayaçlarda sertleşme durumu gerçekleşerek kayaçlar statik dayanımlarından daha yüksek yüklerde yenilebilirler. Bu durumda kayacın mineralojik yapısına ve maruz kaldığı koşullara bağlı olarak değişebilir.

Kayaların homojen yapıda olmamasından ve iç yapısının tam olarak belirlenememesinden dolayı çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle kayacın mineralojik ve petrografik özelliklerinin, boşluklarının çatlak yapısının önceden belirlenebilmesi oldukça önem arz etmektedir. Kayacın iç yapısını kapsamlı bir şekilde tanımlayabilecek sistemler ile tekrarlı yüklemenin etkisi daha iyi bir şekilde analiz edilecektir. Ayrıca kayacın nem ve su oranı da tekrarlı yükleme üzerinde etkiye sahip olmasından dolayı (Li vd., 2003) bu gibi faktörlerin de göz bulundurulması daha sağlıklı analizler yapılmasına olanak sağlayacaktır. Ayrıca, kayaların kırılabilirliği ile tekrarlı yük altında çatlak gelişimi ve ilerlemesini belirleyici yeni çalışmaların konuya ışık tutacağı düşünülmektedir.

Kayalara; deprem, delme patlatma ve diğer faktörlerin etkilerinin olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Bu etkiler göz ardı edilemeyecek boyutlarda olabilmektedir. Bunların etkilerini yapıların stabilizasyon analizlerinde göz önünde bulundurulması yapıların daha sağlıklı bir şekilde kullanılmasına imkân sağlayacaktır. Bu nedenle statik ve tekrarlı yüklerin etkilerini birlikte değerlendirecek yaklaşımların gelişmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca konu ile alakalı belirsizlikler oldukça fazladır. Yapılacak sistematik çalışmalar konudaki belirsizliklerin giderileceği düşünülmektedir.

### Yazar katkısı

#### Author contribution

KA: Makaleyi inceleme, denetim ve yönetimi. MHB: DerlemeYazım ve Düzeltme ve Kaynaklar.

### Etik beyanı

#### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### Çıkar çatışması beyanı

#### Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### Kaynaklar

#### References

Akesson, U., Hansson, J., & Stigh, J. (2004). Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Engineering Geology*, 72(1–2), 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.07.001>

- Arora, K., Chakraborty, T., & Rao, K. S. (2019). Experimental study on stiffness degradation of rock under uniaxial cyclic sinusoidal compression loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01835-3>
- Attewell, P. B., & Farmer, I. W. (1973). Fatigue behaviour of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(73\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(73)90055-7)
- Bagde, Manoj N.; Petroš, V. (2009). Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.05.002>
- Bello, I., González-Fonteboa, B., Wardeh, G., & Martínez-Abella, F. (2023). Characterization of concrete behavior under cyclic loading using 2D digital image correlation. *Journal of Building Engineering*, 78(August), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107709>
- Beşer, M. H. (2024). *Investigation of the deformation properties of the rocks under cyclic loads*. [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Burdine, N. T. (1963). Rock failure under dynamic loading conditions. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(01), 1–8
- Chen, F., Wang, E., Zhang, B., Zhang, L., & Meng, F. (2020). Prediction of fracture damage of sandstone using digital image correlation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/app10041280>
- Cui, Y., Liu, C., Qiao, N., Qi, S., Chen, X., Zhu, P., & Feng, Y. (2022). Characteristics of acoustic emission caused by intermittent fatigue of rock salt. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11), 1–22. <https://doi.org/10.3390/app12115528>
- Dal Pino, R., Narducci, P., & Royer-Carfagni, G. (1999). SEM investigation on fatigue damage of marble. *Journal of Materials Science Letters*, 18(19), 1619–1622. <https://doi.org/10.1023/A:1006689022297>
- Dehkhoda, S., & Detournay, E. (2017). Mechanics of actuated disc cutting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(2), 465–483. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1121-y>
- Duan, H., & Ma, D. (2020). Acoustic emission simulation on coal specimen subjected to cyclic loading. *Advances in Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2020/37898292>
- Eberhardt, E., Stead, D., & Stimpson, B. (1999). Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), 361–380. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00019-4)
- Erarslan, N., & Williams, D. J. (2012a). Investigating the effect of cyclic loading on the indirect tensile strength of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(3), 327–340. <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0209-7>
- Erarslan, N., & Williams, D. J. (2012b). The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.015>
- Fan, J., Chen, J., Jiang, D., Chemenda, A., Chen, J., & Ambre, J. (2017). Discontinuous cyclic loading tests of salt with acoustic emission monitoring. *International Journal of Fatigue*, 94, 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.09.016>
- Fan, J., Chen, J., Jiang, D., Ren, S., & Wu, J. (2016). Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure. *International Journal of Fatigue*, 90, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.021>
- Fan, Z., & Sun, Y. (2019). Detecting and evaluation of fatigue damage in concrete with industrial computed tomography technology. *Construction and Building Materials*, 223, 794–805. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.016>
- Fu, B., Hu, L., & Tang, C. (2020). Experimental and numerical investigations on crack development and mechanical behavior of marble under uniaxial cyclic loading compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 130(March), 104289. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104289>

- Fuenkajorn, K., & Phueakphum, D. (2010). Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt. *Engineering Geology*, 112(1–4), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.01.002>
- Gatelier, N., Pellet, F., & Loret, B. (2002). Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(3), 335–354. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00029-1)
- Geranmayeh Vaneghi, R., Thoeni, K., Dyskin, A. V., Sharifzadeh, M., & Sarmadivaleh, M. (2020). Strength and damage response of sandstone and granodiorite under different loading conditions of multistage uniaxial cyclic compression. *International Journal of Geomechanics*, 20(9), 04020159. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001801](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001801)
- Ghamgosar, M., Erarслан, N., & Williams, D. J. (2017). Experimental investigation of fracture process zone in rocks damaged under cyclic loadings. *Experimental Mechanics*, 57(1), 97–113. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0216-4>
- Gong, M., & Smith, I. (2003). Effect of waveform and loading sequence on low-cycle compressive fatigue life of spruce. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 93–99. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:1\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(93))
- Haghgouei, H., Hashemolhosseini, H., Baghbanan, A., & Jamali, S. (2018). The effect of loading frequency on fatigue life of green onyx under fully reversed loading. *Experimental Techniques*, 42(1), 105–113. <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0226-x>
- Haimson, B. C. (1978). Effect of cyclic loading rock. *ASTM Special Technical Publication*, 228–245. <https://doi.org/10.1520/stp35679s>
- Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., & I-Chiang Yao, J. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, (4), 247–293. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00051-7)
- Ishizuka, Y., Abe, T., & Kodama, J. (1990). Fatigue behaviour of granite under cyclic loading. In *ISRM international symposium* (pp. ISRM-IS). ISRM
- Jiang, D., Fan, J., Chen, J., Li, L., & Cui, Y. (2016). A mechanism of fatigue in salt under discontinuous cycle loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 86(July), 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.05.004>
- Jobli, A. F., Md Noor, M. J., Tawie, R., Hampden, A. Z., & Julai, N. N. (2017). Uniaxial compressive strength of Malaysian weathered granite due to cyclic loading. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(14), 4298–4301
- Kim, K., Kemeny, J., & Nickerson, M. (2014). Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(6), 2005–2019. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0523-3>
- Li, N., Chen, W., Zhang, P., & Swoboda, G. (2001). The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), 1071–1079. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00058-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00058-2)
- Li, Ning, Zhang, P. P., Chen, Y., & Swoboda, G. (2003). Fatigue properties of cracked, saturated and frozen sandstone samples under cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 145–150. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00111-9)
- Liang, W., Zhang, C., Gao, H., Yang, X., Xu, S., & Zhao, Y. (2012). Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(1), 54–61. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1235.2012.00054>
- Liu, E., & He, S. (2012). Effects of cyclic dynamic loading on the mechanical properties of intact rock samples under confining pressure conditions. *Engineering Geology*, 125, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.11.007>
- Liu, E., Huang, R., & He, S. (2012). Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(1), 89–102.

<https://doi.org/10.1007/s00603-011-0185-y>

- Liu, J., Xie, H., Hou, Z., Yang, C., & Chen, L. (2014). Damage evolution of rock salt under cyclic loading in uniaxial tests. *Acta Geotechnica*, 9(1), 153–160. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0236-5>
- Liu, Y., & Dai, F. (2021). A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5), 1203–1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>
- Liu, Y., Dai, F., Zhao, T., & Xu, N. W. (2017). Numerical Investigation of the Dynamic Properties of Intermittent Jointed Rock Models Subjected to Cyclic Uniaxial Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(1), 89–112. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1085-y>
- Martin, C. D., & Chandler, N. A. (1994). The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 31(6), 643–659. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)90005-1)
- Momeni, A., Karakus, M., Khanlari, G. R., & Heidari, M. (2015). Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 77, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.029>
- Nejati, H. R., & Ghazvinian, A. (2014). Brittleness effect on rock fatigue damage evolution. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(5), 1839–1848. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0486-4>
- Nguyen, T. L., Hall, S. A., Vacher, P., & Viggiani, G. (2011). Fracture mechanisms in soft rock: Identification and quantification of evolving displacement discontinuities by extended digital image correlation. *Tectonophysics*, 503(1–2), 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.09.024>
- Oraee-Mirzamani, K.; Goodarzi, A.; Oraee-Mirzamani, N. (2011). Assessment of the dynamic loads effect on underground mines supports. *30th International Conference on Ground Control in Mining*, 74–79
- Peng, K., Zhou, J., Zou, Q., & Song, X. (2020). Effect of loading frequency on the deformation behaviours of sandstones subjected to cyclic loads and its underlying mechanism. *International Journal of Fatigue*, 131(July 2019), 105349. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105349>
- Rajaram, V. (1981). Mechanical behavior of granite under cyclic compression. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 11
- Ray, S. K., Sarkar, M., & Singh, T. N. (1999). Effect of cyclic loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(4), 543–549. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00016-9)
- Royer-Carfagni, G., & Salvatore, W. (2000). Characterization of marble by cyclic compression loading: experimental results. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 5(7), 535–563. [https://doi.org/10.1002/1099-1484\(200010\)5:7<535::AID-CFM102>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1484(200010)5:7<535::AID-CFM102>3.0.CO;2-D)
- Singh, S. K. (1989). Fatigue and strain hardening behaviour of graywacke from the flagstaff formation, New South Wales. *Engineering Geology*, 26(2), 171–179. <https://doi.org/10.1190/segam2013-0137.1>
- Song, H., Zhang, H., Kang, Y., Huang, G., Fu, D., & Qu, C. (2013). Damage evolution study of sandstone by cyclic uniaxial test and digital image correlation. *Tectonophysics*, 608, 1343–1348. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.06.007>
- Song, R., Yue-ming, B., Jing-Peng, Z., De-yi, J., & Chun-he, Y. (2013). Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.08.023>
- Stanchits, S., Vinciguerra, S., & Dresen, G. (2006). Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite. *Pure and Applied Geophysics*, 163(5–6), 974–993. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0059-5>
- Tang, J., Chen, X., & Dai, F. (2020). Experimental study on the crack propagation and acoustic emission characteristics of notched rock beams under post-peak cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 226(November 2019), 106890. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106890>

- Wang, J., Li, J., Shi, Z., Chen, J., & Lin, H. (2022). Fatigue characteristics and fracture behaviour of sandstone under discontinuous multilevel constant-amplitude fatigue disturbance. *Engineering Fracture Mechanics*, 274(June), 108773. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108773>
- Wang, Q., Chen, J., Guo, J., Luo, Y., Wang, H., & Liu, Q. (2019). Acoustic emission characteristics and energy mechanism in karst limestone failure under uniaxial and triaxial compression. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1427-1442
- Wang, Y., Gao, S. H., & Han, J. Q. (2020). Fatigue-damage evolution characteristics of interbedded marble subjected to dynamic uniaxial cyclic loads. *Geotechnical and Geological Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01526-9>
- Wang, Z., Li, S., Qiao, L., & Zhang, Q. (2015). Finite element analysis of the hydro-mechanical behavior of an underground crude oil storage facility in granite subject to cyclic loading during operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.09.018>
- Wang, Z., Li, S., Qiao, L., & Zhao, J. (2013). Fatigue behavior of granite subjected to cyclic loading under triaxial compression condition. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(6), 1603–1615. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0387-6>
- Xiao, J. Q., Ding, D. X., Jiang, F. L., & Xu, G. (2010). Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(3), 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.11.003>
- Xiao, J. Q., Ding, D. X., Xu, G., & Jiang, F. L. (2009). Inverted S-shaped model for nonlinear fatigue damage of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 643–648. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.11.002>
- Yang, S. Q., Ranjith, P. G., Huang, Y. H., Yin, P. F., Jing, H. W., Gui, Y. L., & Yu, Q. L. (2015). Experimental investigation on mechanical damage characteristics of sandstone under triaxial cyclic loading. *Geophysical Journal International*, 201(2), 662–682. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv023>
- Yang, S. Q., Tian, W. L., & Ranjith, P. G. (2017). Experimental investigation on deformation failure characteristics of crystalline marble under triaxial cyclic loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(11), 2871–2889. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1262-7>
- Zhang, M., Dou, L., Konietzky, H., Song, Z., & Huang, S. (2020). Cyclic fatigue characteristics of strong burst-prone coal: Experimental insights from energy dissipation, hysteresis and micro-seismicity. *International Journal of Fatigue*, 133(December 2019), 105429. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105429>
- Zhang, Z. ., Kou, S. ., Jiang, L., & Lindqvist, P. A. (2002). Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 745–762. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(00\)00008-3](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(00)00008-3)
- Zhenyu, T., & Haihong, M. (1990). An experimental study and analysis of the behaviour of rock under cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 27(1), 51–56. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)90008-P](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)90008-P)
- Zhou, Z. L., Wu, Z. B., Li, X. B., Li, X., & Ma, C. De. (2015). Mechanical behavior of red sandstone under cyclic point loading. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(8), 2708–2717. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63895-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63895-X)
- Zhu, W. C., & Tang, C. A. (2006). Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 236–252. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.008>
- Zhu, Y., Yu, J., Cai, Y., Tang, X., Yao, W., & Liu, X. (2020). A novel fatigue damage model of rock considering temperature effects. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/8838335>