



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAYAÇ VE BETONLARDA ÇATLAK
İLERLEMESİ VE TOKLUK İLİŞKİSİ

Mehmet UZBAŞ

DOKTORA

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet UZBAŞ tarafından hazırlanan “KAYAÇ VE BETONLARDA ÇATLAK İLERLEMESİ VE TOKLUK İLİŞKİSİ” adlı tez çalışması 08/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Niyazi BİLİM
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Ömer Kaan BAYKAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Ramazan ÇOMAKLI
(Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması ÖYP tarafından 2017-ÖYP-026 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet UZBAŞ

Tarih: 08/08/2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KAYAÇ VE BETONLARDA ÇATLAK İLERLEMESİ VE TOKLUK İLİŞKİSİ

Mehmet UZBAŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. M. Kemal GÖKAY

2024, 144 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
Prof. Dr. Niyazi BİLİM
Doç. Dr. Ömer Kaan BAYKAN
Doç. Dr. Ramazan ÇOMAKLI

Bu tez çalışmasında kayalarda tokluk ve çatlak ilerleme ilişkisini incelemek amacıyla temel olarak masif yapıya sahip Meram Andeziti, Ankara Andeziti, Afyon Gri mermeri, Evliyatekke Tüfü, Sille Andeziti, Karaman Traverteni ve alçı tozu karışımından elde edilen laboratuvar ölçekli numuneler kullanılmıştır. Laboratuvar deneyleriyle çentikli standart yarım disk şeklindeki Mod-1 kırılma tokluğu deney numuneleri (SCB) ve bina kolon benzeri (kare-prizma), numuneler üzerinde, düşey yükleme şartları altında çatlak oluşum ve yayılımı izlenmiştir. Deneyler sırasında çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin analizi için, dijital görüntü korelasyonu (DIC) ve gri seviye eş oluşum matrisi (GLCM) görüntü işleme sistemine uygun deney görüntü verileri oluşturularak deney sonrasında görüntülerin sunduğu çatlak oluşum anı ve ilerleme yönleri değerlendirilmeye alınmıştır.

Numuneler üzerinde standart kaya mekaniği deneyleri olan tek eksenli basınç dayanımı, indirekt çekme dayanımı, su içeriği, yoğunluk, gözeneklilik belirleme, schmidt sertlik belirleme ve nokta yükleme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin kırılma dayanımlarını belirlemek amacıyla kırılma deneyleri yapılmıştır. Yarım disk çentikli numuneler kullanılarak Mod-1 kırılma tokluğu değerleri belirlenmiştir. Tokluk ve çatlak ilerleme özelliklerini incelemek amacıyla alçı tozu karışımından elde edilen, kare kesitli prizmatik numuneler hazırlanmış, bu numunelerin masif ve üzerinde sonradan açılan dairesel deliklerle birlikte düşey yükleme şartlarında verdikleri deformasyonlar izlemeye alınmış, bunlar üzerinde çatlak oluşum ve ilerleme davranışları gözlemlenmiştir. İnşaat mühendisliği alanında, yapıların dayanıklılığı düşüncesi kapsamında betonarme bina kolonları için benzer yük taşıma deneyleri laboratuvar ölçeğinde araştırılmıştır. Bu deneyimlerle, bu çalışmada yapılan tokluk deney sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır. Çatlak ilerlemesini gözlemlemek amacıyla plaka şeklinde, çentikli ve çentiksiz numuneler düşey yükleme şartları altında çatlak ilerleme davranışları açısından incelenmiştir. Görüntü işleme yöntemleriyle numuneler üzerinde oluşan deplasmanlar çatlak ilerleme davranışlarını analiz etmek amacıyla yüksek hızlı ve çoklu fotoğraf çeken ekipmanlarla kaydedilmiştir. Bu kayıtların dijital görüntü korelasyonu (DIC) ve gri seviye eş oluşum matrisi (GLCM) yöntemleri kullanılarak incelenmesi çatlak tokluğu ve çatlakların ilerleme davranışları konusunda bilgi vermiştir. Kolon benzeri numuneler, masif olarak ve orta noktalarında açılan yatay karot benzeri silindirik deliklerle birlikte dayanım testine tabi tutulmuş, ilgili numunelerin tokluk değerleriyle bu numuneler üzerinde oluşan çatlaklar ve bunların mikro seviyedeki ilerlemeleri DIC ve GLCM yöntemleriyle değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çatlak ilerlemesi, DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu), GLCM (Gri seviye eş oluşum matrisi), Kırılma tokluğu.

ABSTRACT

PhD THESIS

CORRELATION BETWEEN CRACK PROPAGATION AND TOUGHNESS IN ROCKS AND CONCRETES

Mehmet UZBAŞ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering**

Advisor: Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

2024, 144 Pages

Jury

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

Prof. Dr. Alparslan TURANBOY

Prof. Dr. Niyazi BİLİM

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÇOMAKLI

In this study, laboratory scale samples obtained from massive rock samples (Meram Andesite, Ankara Andesite, Afyon Grey Marble, Evliyatekke Tuff, Sille Andesite, Karaman Travertine), and massive artificial rock samples (moulded from gypsum powder mixtures) were used to examine relations between their toughness and crack propagation issues. Through laboratory tests, crack formation and propagation were observed in notched standard semi-circular bend (SCB) toughness test specimens and square-prismatic specimens resembling building columns, under vertical loading conditions. During the experiments, data suitable for digital image correlation (DIC) and gray level co-occurrence matrix (GLCM) image processing systems were generated, and the moments of crack initiation and propagation directions were analyzed post-experiment based on the experimental images.

Standard rock mechanics tests, including uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, water content, density, porosity, Schmidt hardness, and point load strength tests, were performed on the specimens. Furthermore, brittleness tests were conducted to determine the brittleness of the samples. Mode-I fracture toughness values were determined using notched semi-circular bend (SCB) specimens. To investigate toughness and crack propagation characteristics, prismatic specimens with square cross-sections made from a mixture of gypsum powder were prepared, and the deformation behavior of both solid specimens and those with circular perforations was monitored under vertical loading conditions. Crack formation and propagation behavior were observed in these specimens. In the field of civil engineering, similar load bearing tests for reinforced concrete building columns have been investigated at laboratory scale within the scope of the durability of structures. A comparative evaluation of these experiences with the results of the toughness tests performed in this study was made.

To observe crack propagation, both notched and intact plate specimens were subjected to vertical loading and examined for their crack propagation behavior. Displacements on the specimens were recorded using high-speed, multi-shot equipment to analyze crack propagation behaviors through image processing techniques. The data from these recordings were analyzed using DIC and GLCM methods, providing insights into fracture toughness and crack propagation behavior. Column-like specimens, both solid and those with horizontally cored cylindrical holes at their centers, were subjected to strength tests. The toughness values of these specimens, along with the micro-level progression of cracks, were evaluated using DIC and GLCM methods.

Keywords: Crack propagation, DIC (Digital Image Correlation), GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix), Fracture toughness.



ÖNSÖZ

Tez çalışmaları boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana her aşamada yardımcı olan danışmanım Sayın Prof.Dr. M. Kemal Gökay'a teşekkür ederim.

Tez izleme komite üyeleri olarak fikirleriyle tez çalışmasının olgunlaşmasına katkıda bulunan Sayın Prof.Dr. Niyazi Bilim'e ve Sayın Doç.Dr. Ömer Kaan Baykan'a teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez savunma sınavı jüri üyeleri Sayın Prof.Dr. Alparslan Turanboy ve Sayın Doç.Dr. Ramazan Çomaklı'ya değerli görüşleri ve katkıları için teşekkür ederim.

Numune hazırlama çalışmalarında ve kaya mekaniği deneylerinin yapılmasında yardımcı olan KTÜN Maden mühendisliği bölümü laboratuvar teknikeri Sayın İbrahim Küçük'e, çentikli numunelerin hazırlanmasında yardımcı olan KTÜN- Süstaşları Uygulama ve Araştırma Merkezi yöneticileri ve çalışanlarına, deneylerde görüntü kaydı için kullanılan ışık kaynakları ve kameranın temininde yardımcı olan Sayın Dr.Öğr.Üyesi Hasan Ali Taner'e, KTÜN-MERLAB yöneticileri ve çalışanlarına, KTÜN, İnşaat mühendisliği zemin laboratuvarında bulunan hidrolik presi kullanmamıza yardımcı olan Sayın Prof.Dr. Murat Olgun ve Sayın Öğr.Gör. Alican Şenkaya'ya, Maden Mühendisliği Bölümü asistanları ve öğretim üyelerine yardımlarından ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana her zaman destek olan değerli aileme, çalışmalarım süresince yardım ve desteğini esirgemeyen kıymetli eşime şükranlarımı sunarım.

Mehmet UZBAŞ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihçesi	3
1.2. Kayaçlarda Kırılma Mekaniğinin Uygulama Alanları	7
1.3. Çatlak İlerleme Türleri	9
1.4. Kırılma Mekaniğinde Kullanılan Temel Faktörler	11
1.4.1. Gerilme şiddet faktörü	11
1.4.2. Kırılma tokluğu	11
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
2.1. Malzemelerin Tokluk Özellikleri	12
2.2. Kolon/Sütun Benzeri Yerüstü ve Yeraltı Taşıyıcı Yapı Elemanları	16
2.3. Açılan Delikler Nedeniyle Kolonların Taşıyıcı Özelliklerinde Oluşan Bozulmalar	20
2.4. Çatlak Oluşumlarının Tespiti İçin Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Yönteminin Kullanımı	34
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Deneylerde Kullanılacak Numunelerin Temini	39
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	40
3.3. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri	43
3.4. Çentikli Yarım Disk Numune İçin Mod-1 Kırılma Tokluğu Belirlenmesi Metodu	43
3.5. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Analizleri İçin Veri Seçimi Algoritması	44
3.6. Ncorr Programı	45
3.7. Gri Seviye Eş Oluşum Matrisi (GLCM)	46
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	50
4.1. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri	50
4.1.1. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi	50
4.1.2. Schmidt sertlik belirleme deneyi	54
4.1.3. Nokta yükleme dayanımı deneyi	56
4.1.4. Endirekt çekme dayanımı (Brazilian) deneyi	60
4.1.5. Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi.....	63

4.1.6. Kırılma deneyi	64
4.2. Kolon Benzeri Alçı Bazlı Deney Numuneleri ve Doğal Kayaç Numuneleri İçin DIC Analizleri.....	65
4.3. Afyon Gri Mermer Numunesi ile Yapılan GLCM Analizi.....	100
4.4. SCB Tipi Numune Üzerinde Uygulanan GLCM ve DIC Analiz Sonuçları	103
4.4. SCB Tipi Yarım Disk Numuneler ile Yapılan Kırılma Tokluğu Deneyleri	105
4.5. Kırılma Tokluğunun Yapay Kayaç Numuneleri Yardımıyla Değerlendirilmesi	117
4.6. Plaka Numuneleri ile Yapılan Deneyler	120
4.7. Alçıdan Yapılan Yapay Kayaç Numunelerine Ait SCB Kırılma Tokluğu Deney Sonuçları	124
4.8. Kaya Mekanik Deney Sonuçları ve Kırılma Tokluğu (K_{IC}) Değerlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi	127
4.8.1 Tek eksenli basınç dayanımı ve kırılma tokluğu ilişkisi.....	127
4.8.2 Schmidt sertlik değeri ve kırılma tokluğu ilişkisi.....	128
4.8.3 Nokta yükleme değeri ve kırılma tokluğu ilişkisi.....	129
4.8.4 Endirekt çekme dayanımı (Brazilian) ve kırılma tokluğu ilişkisi.....	130
4.8.5 Yoğunluk ve gözeneklilik değerleri ve kırılma tokluğu ilişkisi	131
4.8.6 Kırılma değeri ve kırılma tokluğu ilişkisi.....	133
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	135
5.1 Sonuçlar	135
5.2 Öneriler	141
KAYNAKLAR	142

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	: Elastisite modülü,
σ	: Gerilme,
Φ	: İçsel sürtünme açısı,
C	: Kohezyon,
ϵ	: Deformasyon,
σ_c	: Tek eksenli basınç dayanımı,
σ_t	: Çekme dayanımı,
$I_{s(50)}$	: Nokta yükü dayanım indeksi
P	: Düşey gerilme,
q	: Yanal gerilme,
K_{IC}	: Mod-1 kırılma tokluğu,
Y'	: Gerilme şiddet faktörü,
S_{20}	: Kırılmalık indeksi,

Kısaltmalar

DIC	: Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation),
GLCM	: Gri seviye eş oluşum matrisi (Gray Level Co-occurrence matrix),
FPZ	: Fracture Process Zone,
2D	: İki boyutlu,
3D	: Üç boyutlu,
LVDT	: Doğrusal Değişken diferansiyel dönüştürücü,
RGB	: Red, Green, Blue,
BMG	: Dökme Metalik Camlar (Bulk Metallic Glass),
SPSS	: Statistical Package for the Social Sciences.

1. GİRİŞ

Maddenin fiziksel durumunu açıklamak için kullanılan katı, sıvı ve gaz halleri özellikle mühendislerin son yıllarda üzerinde daha derin düşüncelerini gerektirmektedir. Bunun dışında başka madde hallerinin de bulunma olasılığının göz ardı edilmemesi gerektiği de mantıksal bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Maddenin katı hâli ve katı maddelerin çeşitliliği dünyayı meydana getiren ve üzerinde yaşadığımız önemli malzemeleri oluşturur. Uzayda gaz formundan çekim gücüyle birleşerek oluşan dünyamız; çekirdeği, bir tür sıvı olduğu düşünülen magma ve bunun üzerinde magmanın soğumasıyla oluşan “kayaçlardan” oluşmaktadır. Dünyanın oluşumundan günümüze kadar geçen sürede gerçekleşen değişimler, tektonik plakaların yer değiştirmesi, yeniden magmaya batması ve farklı magmatik kayaçlar olarak yeniden oluşması, yerkabuğundaki kayaçların farklılaşmasına, içlerindeki kırıkların ve kıvrımların artmasına yol açmıştır. Aslında sıvı formda yeryüzüne derinlerden çıkarken soğumaya başlayan magmanın, yeryüzüne çıkıp soğuma esnası da dâhil katılaşması termodinamik kurallar kapsamında birdenbire olan bir olay olmamakta, belirli bir süreci kapsamaktadır. Bu süre içinde dış taraftan (daha soğuk ortama yakın kısımda) soğuyan magma kütleleri kayaca dönüşürken içlerindeki mineral tane büyüklüğüne ve diğer farklı faktörlere bağlı olarak çatlamaktadır. Bu çatlaklara ek olarak daha sonraki zamanlarda, tektonik kuvvetlere maruz kalan kayaçların içindeki kırıklar sınırsız sayılara ulaşmaktadır.

Fabrikalarda belirli amaçlar için üretilen katı metal alaşımların, diğer katı formdaki ürünlerin içinde çatlak olmaması istenilen bir hedeftir. Fakat mikro veya nano ölçekte fabrikalarda üretilen bu katı maddelerin içinde boşluklar olduğu unutulmamalıdır. Bu ürünler ısıtılma işlemi sonucu üretilmişlerse ve soğuma hızları tam kontrol edilmemişse, içlerinde mikro-nano seviyede çatlaklar oluştuğu da bilinmektedir. Bu nedenle hassas optik objektifleri oluşturan cam karışımların döküm ve soğuma işlemlerinin uzun soğuma aşamalarını kapsayacak şekilde düzenlendiği genel fizik bilgileri içinde yer almaktadır. Yer kabuğunda çatlaksız bir lokasyon bulma olasılığı olmadığına göre bu çatlakların özelliklerinin ve mühendislik amaçlarına göre değerlendirilmelerinin önemi de anlaşılmaktadır. Yer kabuğu içinde ve üzerinde hiçbir mühendislik uygulaması yapılmayacaksa, yerkabuğundaki maddelerin ve çatlakların önemi anlaşılmayabilir. Fakat dünya üzerinde bulunan canlıların tamamı yerkabuğundaki maddelere ve enerjiye ihtiyaç duyduğundan, yerkabuğunun analiz edilerek farklı amaçlar için sürdürülebilir olarak değerlendirilebilme yöntemlerinin anlaşılması önemlidir. Biyolojik yaşam

kapsamındaki biyokimyasal faydalanmaların (oksijen, su, gıda gibi) dışında, yerkabuğunun canlılara yerleşim alanı (mekânı), enerji ve mineral kaynağı olduğunun da unutulmaması gerekir. Madencilik kapsamında üretilen bütün katı maddeler ve katı yakıt türleri (katı formdaki fosil karbon türündeki maddeler, radyoaktif mineraller vb.); petrol endüstrisi kapsamında üretilen sıvı ve gaz formundaki karbon türevleri çevremizdeki uygarlığın enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Uygarlıkların oluşturduğu şehirler, onların içinde yaşayan insanların ihtiyaçları, yeraltı madencilik ve tünelcilik endüstrisinin itici gücünü oluşturmuştur. Yerkabuğunu oluşturan kayaçların içinde veya üstünde oluşturulan bu uygarlık yapıları, kayaçların mekanik davranışlarının deneyimsel olarak algılanmasıyla daha da kapsamlı projelerle ilerlemektedir. İnsanlar, kayaçlardan sağlam evler yapılabildiğini, nerelerde kayma & göçme tehlikesinin düşük olduğunu zaman içinde deneyimlemişlerdir. Bu denemelerde yıkılan yerler (köyler, şehirler) yok olmuş veya izleri arkeolojik çalışmalarla bulunmayı beklemektedir. Yerkabuğunu dünyanın dönüş hızına rağmen yerinde tutan yerçekimi, katı maddeleri onların birim hacim ağırlıklarına göre etkilemektedir. Katı maddeleri kullanarak onların içinde veya üstünde yerleşim amaçlı veya çalışma ortamı oluşturacak şekilde hacimler geliştirmek isteyen insanların karşılarına çıkan en önemli güç yerçekimidir. Bu gücün madencilik ve inşaat mühendisliğindeki karşılığı her zaman, “alt seviyelere aktarılması gereken düşey kuvvet” olarak karşımıza çıkar. Yeryüzündeki binalarının yüksekliğine ve yapım tekniklerine göre bir ağırlıkları, bunlarda uygulanan tasarım yöntemlerinden dolayı da bu ağırlığı yeryüzüne aktardığı kolonları & kirişleri olacaktır. Benzer şekilde yeraltındaki mineralleri almak için hazırlanan maden planlarına göre açılan yeraltı galeri ve boşlukları, daha önce bu boşluk lokasyonlarındaki kayaçlardan geçerek alt seviyelere giden yükleri kendi etraflarındaki kayaçlara dağıtarak sağlam durabileceklerdir. Mühendislik tasarımlarında yapılan mekanik davranış beklenti yanılgıları, inşaat ve madencilik sektöründe oluşan bu yerçekimi kaynaklı yüklerin aktarımı sırasında (katı maddelerin farklı davranışı nedeniyle), istenmeyen durumların oluşmasına neden olacaktır. Bu nedenle, maden ve inşaat mühendisleri ilgilendikleri katı maddelerin mekanik davranışlarını bilmek zorundadırlar. Kaya mekaniği bu konuda zaman içinde ihtiyaçtan dolayı oluşan bir mühendislik dalıdır ve “kayaçların davranışı” konusu, dünya ve ötesindeki uzayda bütün kayaçların davranışını içine alacak şekilde ilerlemektedir. İnşaat mühendislerinin yük aktarımı için kullandıkları maddeler genel anlamda; beton, betonarme (çelik çubuk kuşatma karkaslı beton) ve kalın çelik I & H kesitli çubuklarıdır. Bu yapı elemanlarının mekanik davranışları söz konusu olduğunda, daha fazla masif

(mikro çatlağı nispeten çok az) katı maddelerden söz edilse de bunların içinde de çatlakların olabileceği unutulmamalıdır. Tasarım açısından düşünüldüğünde, maliyetleri düşünülerek çok daha az katı madde kullanılarak yapılmaya çalışılan binalar, yük taşıma elemanlarının madencilikteki gibi büyük boyutlarda tasarlanmasını engellemektedir. Üzerlerinden geçmesi (transfer edilmesi) beklenen gerilmelere göre tasarlanan kolon & kiriş boyutları ve bunları oluşturan katı maddelerin mekanik davranışları bu nedenle önemli tasarım parametrelerindendir. Yerçekimi nedeniyle oluşan ağırlığın tasarım nosyonuna etki seviyesi, buna dayanarak ilgili yükü alt kısımlara aktaracak mühendislik tasarım elemanları, inşaatlarda kolonlar & kirişler, madenlerde topuklar, yük taşıma konusundaki incelemelerde önemli yer kaplarlar. Bunların tasarlandığı “özelliklerle” mühendislik hizmetinin süresi boyunca (maden ömrü veya inşaat bina ömrü boyunca) sağlam durması ve bu özelliklerinin mümkünse hiç değişmemesi sağlanmalıdır. Fakat üzerlerinden geçen düşey yükün farklılaşması, bu yükün oluşturduğu iç gerilmeler nedeniyle, bu yükleri taşıyan kolonların ve topukların içinde bulunan mikro çatlakların ilerlemesi bu yapı elemanlarının yük taşıma özelliklerini (mekanik davranışlarını) değiştirecektir. Bu nedenle özellikle yük altında katı maddelerin yenilme özelliğini belirleyen faktörler ve bunların birisi olan tokluk özelliği, çatlakların ilerlemesi sırasında ortaya çıkan çatlak tokluğu değer farklılaşmaları sonucunda katı maddeleri birbirinden ayıracaktır. Bu özelliklere göre tasarımların madencilik ve inşaat sektöründe baştan düşünülmesi bu sektörlerde ek değer katacağı için bu konunun üzerinde durulması ve araştırılması önemlidir. Uçak ve gemi sanayi sektöründe “çatlak mekaniği” önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkarken, son yıllarda kayaçların bu özelliklerinin araştırılması da üzerinde önemle durulan konular arasına girmektedir. Sunulan tez çalışması kapsamında; seçilen kayaçlar içindeki çatlak ilerleme aşamaları mikro seviyedeki farklılaşmaların gözlenebildiği “Sayısal Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation, DIC)” yöntemiyle izlenerek değerlendirilmiştir.

1.1. Kırılma Mekaniğinin Tarihçesi

Kırılma ile ilgili bir problemin ilk başarılı analizi Griffith tarafından 1920 yılında camlardaki çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleşmiştir. Griffith “Bir çatlağın büyümesi ancak bu sırada serbest kalan elastik enerji yeni yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebilir” kriterini ortaya koymuştur. Griffith, gevrek bir katı maddede çatlak bulunması halinde, malzemenin

kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıyı geliştirmiştir. Gevrek malzemeler için geçerli olan bu kriter kırılma mekaniğinin temelini oluşturur. Irwin daha sonra 1956 yılında Griffith teorisinin metallere uygulanması ile ilgili yaklaşımını sunmuştur (Irwin, 1956).

Griffith enerji yaklaşımı, kırılmanın, çatlak büyümesi için mevcut enerjinin malzemenin direncini aşacak seviyede olduğunda gerçekleştiğini belirtir. Anderson'un açıkladığı gibi (Anderson, 2017); malzemenin direnci, yüzey enerjisi, plastik deformasyon veya ilerleyen bir çatlakla ilişkili diğer enerji dağılımı türlerini içerebilir. Bu yaklaşımda Irwin'in (1956) belirttiği şekilde enerji yayılım hızı; G , doğrusal elastik bir malzeme için potansiyel enerjinin çatlak alanına bağlı değişim oranı olarak tanımlanır. Kırılma anında $G=G_c$ olur; burada G_c kritik enerji yayılım hızıdır ve kırılma tokluğunun bir ölçüsüdür. Uzak bir çekme gerilmesine maruz kalan sonsuz bir levha içerisinde uzunluğu $2a$ olan bir çatlak için (Şekil 1.1.) enerji yayılım hızı şu şekilde verilir:

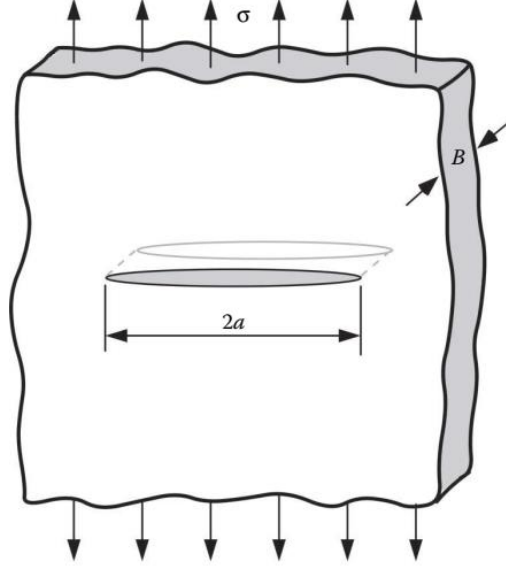
$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (1.1)$$

Burada E , Young modülü, σ uzaktan uygulanan gerilme ve a çatlağın yarı uzunluğudur. Kırılma anında $G=G_c$ olur ve denklem (1.1), kırılma için kritik gerilme ve çatlak boyutu kombinasyonlarını açıklar:

$$G_c = \frac{\pi \sigma_f^2 a_c}{E} \quad (1.2)$$

Burada dikkat edilmelidir ki, Andeson'un (2017) da belirttiği gibi; sabit bir G_c değeri için, kırılma gerilmesi σ_f $1/\sqrt{a}$ ile değişir. Enerji yayılım hızı G , kırılma için itici kuvvet iken, G_c malzemenin kırılmaya karşı direncidir. Çekme gerilmesi benzetmesi, benzerlik kavramını açıklamak için de faydalıdır. Laboratuvar örneğiyle ölçülen bir akma dayanımı değeri, büyük bir yapı için de geçerli olmalıdır; malzeme yeterince homojen olduğu sürece akma dayanımı örnek boyutuna bağlı değildir. Kırılma mekaniğinin temel varsayımlarından biri, kırılma tokluğunun (bu durumda G_c) çatlaklı cismin boyutu ve geometrisinden bağımsız olduğudur; bir laboratuvar örneğinde ölçülen kırılma tokluğu bir yapı için de geçerli olmalıdır. Bu varsayım geçerli olduğu sürece, tüm yapı etkileri

itici kuvvet G ile hesaba katılır. Benzerlik varsayımı, malzemenin davranışı büyük ölçüde doğrusal elastik olduğu sürece geçerlidir, (Anderson, 2017).



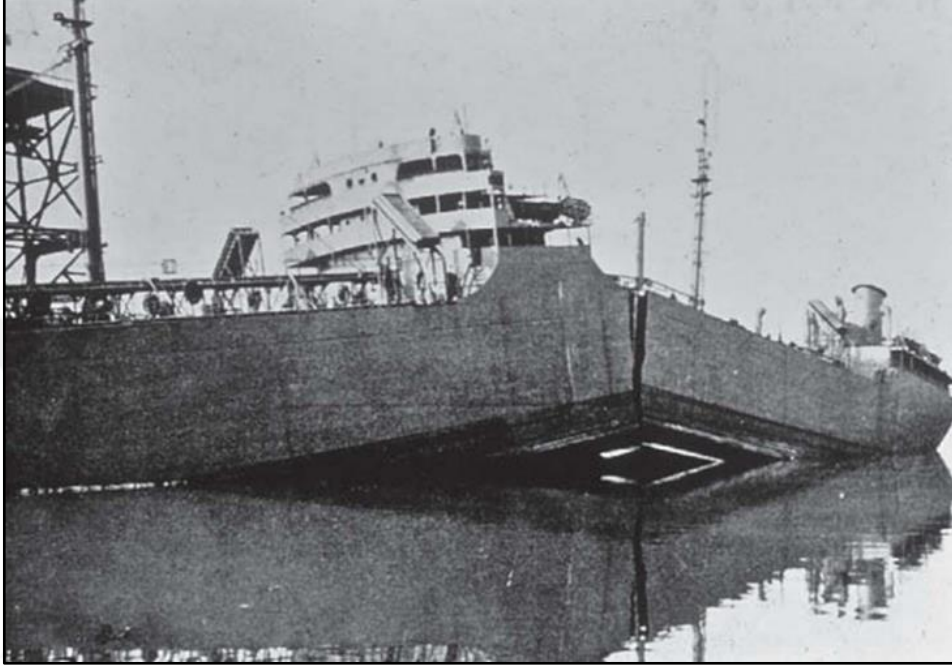
Şekil 1.1. Kalınlık boyunca uzanan bir çatlğa sahip sonsuz levha, uzaktan uygulanan bir çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Pratik açıdan “sonsuz” terimi, levhanın genişliğinin $2a$ ’dan büyük olması anlamına gelir, (Anderson, 2017).

Kırılma mekaniği alanının bir mühendislik disiplini haline gelmesinin sebebi, II. Dünya Savaşı sırasında “Liberty” gemilerinin başına gelen olaylardır (Williams ve Ellinger, 1953). O tarihlerde kargo gemilerinin daha hızlı imal edilmesi bir zorunluluk haline gelmişti. ABD’de Henry Kaiser önderliğinde, gemileri daha hızlı imal edebilmek için devrim niteliğinde bir yöntem geliştirildi. “Liberty” gemileri denilen bu gemilerin imalatında, geleneksel perçinli üretim yöntemi yerine tamamen kaynaklı üretim şekline geçildi. Bu gemilerden birisi 1943 yılında Sibiryaya-Alaska arasında seyir halindeyken ikiye bölünene kadar bu proje başarılı bir proje olarak niteleniyordu. Daha sonra diğer gemilerde de çatlamlar görülmeye başlandı. Bu gemiler incelendiğinde, II. Dünya savaşı sırasında üretilen yaklaşık 2700 Liberty gemisinin 400’ünde önemli hasarlar meydana geldiği görülmüştür. Bu gemilerde oluşan hasarların 90 tanesinin ciddi sonuçlara yol açtığı bilinmektedir. Bu hasarlı gemilerden 20’sinde oluşan çatlaklar geminin kaybına (parçalanmasına) yol açmıştır. Yapılan araştırmalarda bu gemilerin bölünmesine sebep olarak üç ana etken öne çıkmıştır. Bunlar;

-Düşük nitelikli iş gücü tarafından yapılan kaynaklarda çatlak benzeri hataların olması,

- Kırılmaların büyük bir bölümünün gemi gövdesinde, gerilmelerin yoğunlaştığı (yığıldığı) kare şeklindeki ambar girişlerinin köşelerinde başlıyor olması,

-Charpy darbe deneylerinin gemilerin yapıldığı çeliğin tokluk özelliğinin düşük olduğunu göstermesiydi.



Şekil 1.2. Hasar gören bir Liberty gemisi, (Parker, 1957).

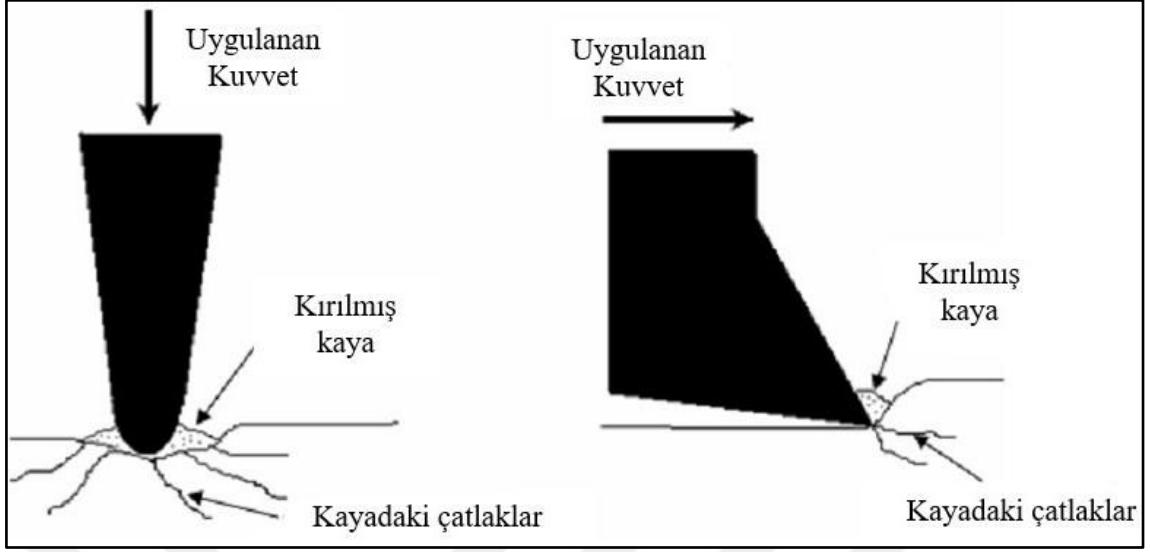
Söz konusu çelik, perçinli gemiler için bir problem teşkil etmiyordu, çünkü kırılmaların perçinli kısımlardan ilerlemesi mümkün olmuyordu. Fakat kaynaklı yapı tek bir metal plaka gibi davrandığından, oluşan bir çatlak hiçbir engelle karşılaşmadan ilerliyor ve bazen gövdenin tümünü geçebiliyordu. Çatlamaların nedenleri anlaşıldıktan sonra gemilerdeki zayıf noktalar güçlendirilerek daha sonraki çatlama olayları engellenmiştir. Uzun vadede tokluk özelliği daha iyi hale getirilmiş çelikler geliştirildi ve kaynak kalitesi standartları uygulamaya konuldu. Ayrıca Washington DC'deki ABD Deniz Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarında bir grup araştırmacı katı maddelerin çatlaması ve kırılması ile ilgili konularda detaylı çalışmalar başlatmıştır. Günümüzde kırılma mekaniği olarak bilinen bilim dalı, II. Dünya savaşındaki sonraki on yılda bu laboratuvarda yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır (Anderson, 2017).

1.2. Kayaçlarda Kırılma Mekanizmasının Uygulama Alanları

Doğal kayaçlar yapılarında çatlaklar ve kusurlar barındırdıkları için genellikle standart kaya mekaniği laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler, her zaman bu çatlaklar ve kusurların etkisi altındadır. Bu nedenle kayaçların kırılma mekaniği açısından incelenmesi son derece kritiktir. Kırılma mekaniğinin kayaçlar için çeşitli uygulama alanları vardır, bunlar; hidrolik çatlatma, patlatma, kesilebilirlik, yeraltı açıklık tasarımı ve cevher hazırlamada boyut küçültme işlemleri olarak düşünülebilir.

Hidrolik çatlatma yönteminde sondaj kuyularının seçilen derinliklerindeki kayaçlara, kuyu içinden basınçlı sıvı pompalanarak buralarda çatlak oluşturulması veya mevcut çatlakların ilerletilmesi (büyütülmesi) hedeflenmektedir. Daha sonra oluşturulan bu çatlakların kapanmaması için çatlaklar içine kum ve benzeri dolgu maddeleri enjekte edilir. Bu yöntemin amacı su, petrol veya doğalgaz rezervlerinden yapılan üretimin verimini arttırmaktır. Hidrolik çatlatmanın ilk endüstriyel uygulaması 1903 yılında granit kaya bloklarını ana kayadan ayırmak amacıyla yapılmıştır, (Watson, 1910).

Kaya kesilebilirliği uygulamalarında; keski uçlarının oluşturduğu yeni çatlaklar ve daha önce kayaçlarda bulunan mevcut çatlakların beraberce kaya kesme işlemine etkisi, üzerinde durulan araştırma konularındandır. Kesici makinelerin kesme işlemi yapan uçlarının performansı (kalem, kama, disk) kesim sırasında oluşturdukları çentiklerin yanı sıra kesilen kayaç içinde (varsa mikro eski çatlaklarla birleşecek şekilde) oluşan yeni mikro çatlamalara bağlıdır. Bu çatlaklar “kaya köprüsü” denilen masif kayaç içinde ilerleyerek diğer çatlaklarla birleşimi sağlarlar ve böylece kayanın kesilmesi sırasında ana kayaçtan parçalanıp çıkan parçaları oluştururlar. Kesici uçlardan olan kalem uçlar, kesilmek istenen yüzeye dik veya dike yakın güç uygularken, kama uçlar neredeyse bu yüzeye paralel şekilde güç uygulurlar (Şekil 1.3), (Hood ve Roxborough, 1992). Her iki kesici uç uygulamasında da kesicinin temas ettiği yüzeyde “Mod-1 (açılma)” tipinde çatlaklar oluşur. Oluşan bu çatlakların ilerlemesiyle kayaç kesim işlemi devam eder. Kırılma mekaniği konularını içine alan araştırma sonuçları, kaya kesme işlemlerinin mekanik temellerini açıklamak için kullanılabilir durumdadır. Buradan yola çıkarak, sonlu elemanlar yöntemi ile kaya kesilebilirlik simülasyonu ilk olarak Saouma ve Kleinosky (1984) tarafından gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.3. Kalem ve kama uç, (Hood ve Roxborough, 1992).

Kırılma mekaniğinin kullanıldığı bir başka alan, yeraltı boşluklarının çevresinde oluşan çatlakların durumunun incelenmesidir. Yeraltında açılacak herhangi bir boşluğun etrafında kırıklı bölgeler varsa, kırılma mekaniği yaklaşımı yeraltı açıklığının duraylılığının hesaplanmasında ve tahkimat sisteminin tasarımında yardımcı olabilir. Yeraltında çalışılan lokasyonun özellikleri biliniyorsa, burada bulunan çatlakların durumları (uzanımları, pürüzlülükleri, dolguları, yönelimleri vb.) doğru bir şekilde tahmin edilebilirse (nitelikli kaya mekaniği temelli, kaya kütlesi raporu mevcutsa), açılacak yeraltı boşluklarının tahkimat yükü değerlendirilerek tasarımları yapılabilir. Örneğin, Pathan (1987) yeraltı açıklıklarının duraylılığını tahmin etmek için, çeşitli kayalar üzerinde, kırılma mekaniğinin konusu kapsamında çalışmalarda bulunmuştur. Açık ocak işletmeciliği sırasında şevlerde çatlakların oluşması, bunların ilerleyerek daha önceden kayalar içinde var olan diğer çatlaklarla birleşmesi, şev duraylılık problemlerine yol açacağı için yakinen takip edilmesi gerekli olan durumlardır. Bu incelemelerin yapılması sırasında kayalar çatlaklarının tokluk özelliklerinin incelemeye dâhil edilmesi, konunun daha kapsamlı anlaşılması aşamasında katkı sağlayacaktır.

Cevher hazırlamada boyut küçültme işlemi, kayaları istenilen boyuta indirmek için yapılan kırma işlemidir. Bir cevher hazırlama tesisinde bu işlem iki aşamada meydana gelir, kırma ve öğütme. Bu işlemler sırasında istenilen boyutta ürün elde etmek

için uygulanan enerji miktarıyla, boyut küçültme sonunda ortaya çıkan yüzey alanı arasında bir ilişki vardır. Bu ilişki kırılma mekaniği içinde açıklanabilir (Alkılıçgil, 2010).

Kırılma mekaniğinde kırılma ile ilgili parametreler; “*kırılma tokluğu*” ve “*gerilme şiddet faktörü*” dür. Gerilme şiddet faktörü « K » sembolü ile ifade edilmektedir. Gerilme şiddet faktörü, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna göre değişmektedir. Gerilme şiddet faktörü, başlangıçta çatlağın uzunluğunun artmasıyla artmakta, bir zaman sonra sabitlenmektedir. Bu sabit değer « K_{IC} » kırılma tokluğu olarak adlandırılır.

Diğer yandan, kırılma genel olarak sünek ve gevrek olmak üzere iki şekilde görülür. Sünek kırılmada çatlağın oluşması ve büyümesinde katı maddede önemli ölçüde kalıcı şekil değişimi de olur. Gevrek kırılmada ise çatlak büyük bir hızla ilerler ve kırılma ani olarak gerçekleşir. Bu yüzden en tehlikeli kırılma türü gevrek kırılmadır (Aran, 1981).

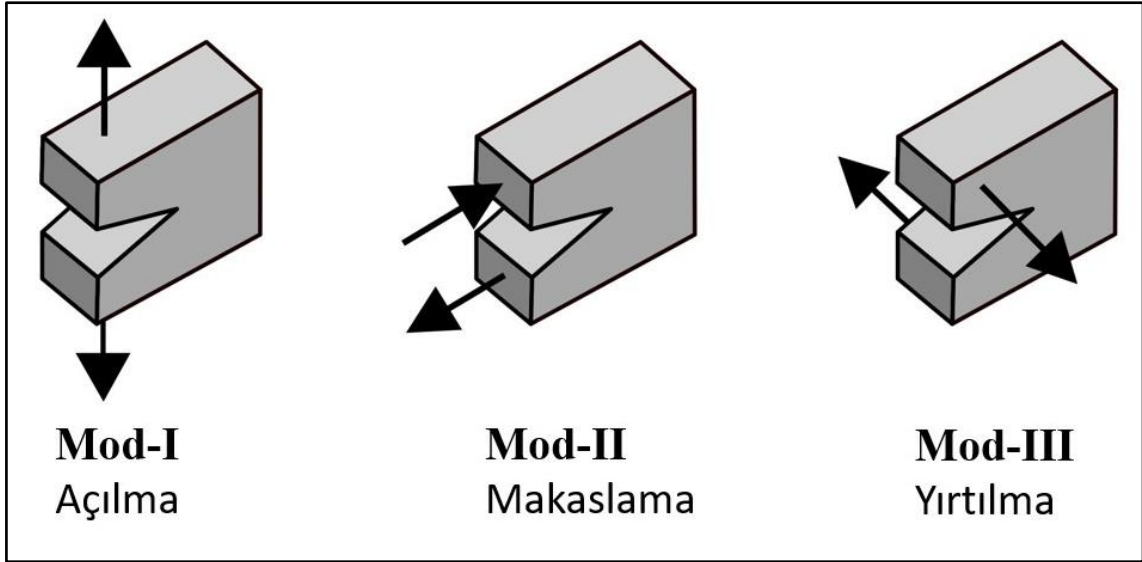
Kırılma tokluğu, kayaçların parçalanma ve çatlamasında önemli bir parametredir, bu kavramın kuram ve uygulamaları hâlen geliştirilmek için üzerinde çalışılan konular arasındadır. Bir malzemenin kırılma tokluğu, onun çatlak gelişimine karşı direncini gösterir. Daha yüksek kırılma tokluğu değerine sahip bir malzeme, çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olur. Kırılma tokluğunun sembolü « K_{IC} » ve birimi « $MPa\sqrt{m}$ » dir (Whittaker ve diğ., 1992).

1.3. Çatlak İlerleme Türleri

Bir malzemede meydana gelen kırılma temel olarak 3 farklı şekilde oluşur ve ilerler. Bunlar; Mod-1(açılma), Mod-2(makaslama) ve Mod-3(yırtılma) tipi kırılmadır (Şekil 1.4.), (Anonymous,2024).

Çatlağın ilerlemesi, bu türlerin biri veya birden fazlasının aynı anda gerçekleşmesi ile oluşur. Birden fazla türün bir arada etki ettiği durumlara Karışık Mod adı verilir. Gevrek malzemeler için temel kırılma türü Mod-1’dir, çünkü bu tür malzemelerin birincil zayıflığı çekme dayanımlarının düşük olmasıdır. Mod-1 teknik olarak en önemli kırılma modudur çünkü bu mod çatlağın daha fazla açılmaya zorlanması durumunda meydana

gelir. Diğer bir sebep ise katı maddelerde en yaygın çatlama hasarlarının, çatlak ilerlemesinden dolayı oluşmasıdır (Yayla, 2007).



Şekil 1.4. Temel kırılma türleri, (Anonymous, 2024).

Kırılma mod farklılıkları konusunda yapılan araştırmalar ele alındığında Şengün'ün (2009), kayaçların dairesel testereler ile kesilmesi işleminde, kayaç özelliklerinden Mod-1 kırılma tokluğu ve gevrekliğin etkisini incelediği görülmektedir. Kırılma tokluğu konusunda Alkılıçgil'in (2010) yaptığı deneysel çalışmalarda ise; yarı dairesel eğilme yöntemi ve V tipi çentikli Brazilian disk yöntemi sonuçları ile düzleştirilmiş brazilian disk ve uyarlanmış halka deneyi yöntemleri karşılaştırılmıştır. Karakaş (2011), yeni dairesel plaka tipi numuneleri Mod-2 kırılma tokluğu deneyleri için kullanmıştır. Araştırmacı kendi deney sonuçlarını, yaygın olarak kullanılan diğer yöntemlerle karşılaştırmıştır. Mod-2 kırılma tokluğu deneyleri konusunda araştırma yapan Het, (2014), deneyler sırasında oluşan gerilme dağılımlarını analiz ederek, çeşitli numune geometrilerinin plaka tipi Mod-2 modeliyle uyumunu değerlendirmiştir. Erarslan'da (2017), farklı mod içeren (Mod-1, Mod-2 gibi) kırılmaları kaya ve beton numuneler için incelemiştir. Farklı araştırmacıların kayaçların kırılma tokluğu konusunda yapacakları farklı deneysel yaklaşımlar, kayaçalarda çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi konularında ek bilgiler (veriler), sağlayacağı için önemlidir.

1.4. Kırılma Mekanğinde Kullanılan Temel Faktörler

1.4.1. Gerilme şiddet faktörü

Barenblatt (1962) tarafından geliştirilen gerilme şiddet faktörü, tekil gerilme büyüklüğünü tanımlar. Bu faktör, çatlak ucu ve uzunluğu etrafında uygulanan gerilmenin büyüklüğü ile ilişkilidir ve K olarak temsil edilir. K, uygulanan yükün, çatlağın boyutu ve numunenin şekli gibi özelliklerin bir fonksiyonudur (Yoncacı, 2019).

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f \left(\frac{a}{w} \right) \quad (1.3)$$

σ : uygulanan gerilme,

a : çatlak uzunluğu,

w : numune genişliği,

f : numune ve çatlak geometrisine bağlı düzeltme faktörü.

1.4.2. Kırılma tokluğu

Gerilme şiddet faktörünün kritik değeri kırılma tokluğu olarak adlandırılır ve “ K_C ” olarak gösterilir. Kırılma tokluğu malzemelerin çatlak ilerlemesine karşı direncini gösterir. Bir malzeme özelliğidir, ortama, sıcaklığa, yükleme hızına, malzemenin bileşimine, mikro yapısına ve geometrik etkilere bağlıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

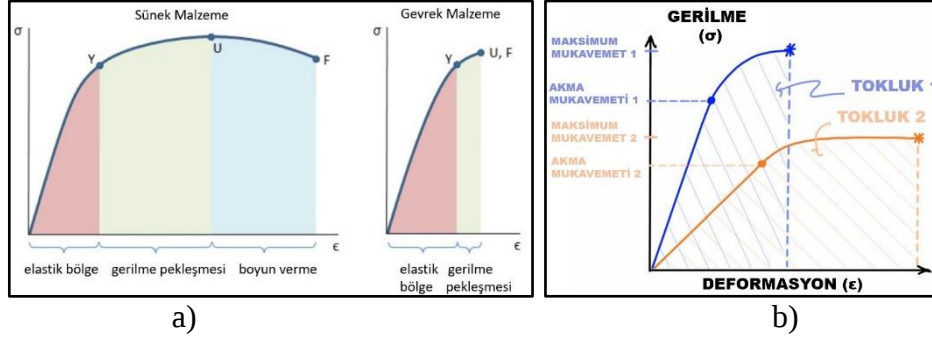
2.1. Malzemelerin Tokluk Özellikleri

Malzemelerin üç boyutlu gerilme durumlarına göre mukavemeti, genellikle mühendislik eğitiminde, malzemeler üzerine uygulanan kuvvetlerin dengede olduğu statik durumlardan sonra araştırılır. Mukavemet, katı malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine göre, uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği dirençtir. Temel mekanik özellikler basınç, çekme, makaslama, eğilme, darbe vb. kuvvet türleriyle ilgilidir. Uygulanan üç boyutlu yük seviyeleri, katı malzeme mukavemet seviyelerine göre çok düşükse, mikro seviye ölçümleri olmadan deplasmanlar fark edilemez. Örneğin kalınlıkları 5 cm civarında olan, 5x20x350 cm boyutundaki gevrek veya yumuşak ahşap kirişlerin bükülme davranışı arasındaki fark, bu kirişler üzerinde yürüyen insanlar tarafından anlaşılabılır. Benzer şekilde, farklı tipte/boyutta yayların deplasman davranışları, herhangi bir ölçme ekipmanı olmadan da kolayca gözlemlenebilir. Ancak yüksek mukavemet değerlerine sahip malzemelerin mikro deplasmanları, özel ölçüm cihazları/metotları kullanılmadan tanımlanamaz.

Elastisite, katı malzemelerin mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde ana parametredir ve 2 boyutlu veya 3 boyutlu basınç/çekme deneylerinden elde edilen gerilme-deformasyon grafikleri aracılığıyla tanımlanabilir. Kayaçlar ve beton dâhil olmak üzere katı malzemelerin elastik modülleri, gerilme-deformasyon grafikleri üzerinden tanımlanır (Şekil 2.1). Bu grafikteki eğim açıları (akma dayanımı), Y değerine kadar olan lineer bölgede “*Elastik (Young) modülü*” olarak adlandırılır; ($E = \sigma / \epsilon$, burada E: Katı malzemenin elastik modülü, σ : Uygulanan gerilme ve ϵ : Birim yer değiştirme seviyesini temsil eder). Gerilme-deformasyon grafiklerindeki eğriler, elastik modül değerlerinin yanı sıra katıların; akma (Y değerleri); maksimum (U değerleri) ve yenilme (F değerleri) mukavemet değerlerini de göstermektedir. Gerilme-deformasyon eğrisi altındaki alan, katı malzemelerde depolanan enerji ile ilgilidir. Gerilme-deformasyon eğrilerinin elastik bölgelerinde, uygulanan yükler sırasında katı malzemelerde depolanan enerji, yükleme sona erdiğinde geri salınır. Eğer gerilmeler tamamen ortadan kaldırıldığında, numunelerde kalıcı şekil/boyut farklılıkları yoksa bu malzemeler için enerji depolama prosedürü daha sonra “*elastik durumda çalışma*” olarak adlandırılabilir. Eğer numunelerden tüm gerilmeler kaldırıldıktan sonra, numunelerde kalıcı, mikro/nano seviyede şekil farklılıkları algılanmışsa veya mikro/nano seviyede yer değişiklikleri tespit

edilirse, bu malzemenin mekanik davranışı artık "elastik" olarak kabul edilemez. Katı malzemelerin tam kırılması (F değerleri ile tanımlanan mukavemet seviyesi; Şekil 2.1) öncesinde gerilme-deformasyon eğrilerinin altında kalan alanın miktarı, depoladıkları enerji miktarını da temsil eder. Bu enerji seviyeleri, tam kırılma öncesinde uygulanan yükleme koşulları için dayanım, tokluk seviyesi olarak da kabul edilebilir.

Gerilme-deformasyon eğrilerinin şekilleri katı malzemelerin E değerleri gibi benzer veya farklı olabilir. Eğrilerin şekilleri ve akma (Y değerleri), maksimum (U değerleri) ve yenilme (F değerleri) gerilme seviyeleri, katı malzemelerin mekanik davranışı arasındaki farklılıkları göstermektedir. Sünek veya gevrek (kırılgan) davranışlarda katı malzemelerin mekanik davranış farkları, Şekil 2.1'de gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır. Gerilme-deformasyon eğrilerindeki akma, maksimum ve kırılma mukavemet seviyeleri ile birbirlerine göre pozisyonları, katı malzemelerin sünek ve kırılgan özelliklerinin tanımlanmasını sağlar. Elastik, gerilme pekleşmesi ve gerilme yumuşaması (boyun verme) bölgelerinde depolanan enerji seviyelerinin farklılıkları, katı malzemelerin ayırımında kullanılır. Şekil 2.1.a, U ve F değerleri için aynı stres seviyesi nedeniyle gevrek (kırılgan) malzemelerde bulunmayan *boyun oluşumu* bölgesinin sünek malzemelerdeki durumunu göstermektedir. Öte yandan, sünek malzemeler, gerilme-deformasyon eğrilerindeki Y, U ve F değerlerindeki farklı seviyeler nedeniyle farklı depolanan enerji alanı şekilleri sağlar (Şekil 2.1.b). Bu alan farklılıkları, katı malzemelerin mekanik davranış özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Depolanan enerji alanı farklılıkları (mekanik davranış farklılıkları), aynı zamanda; “Bir malzemenin kırılmasından hemen önce absorbe edebileceği birim hacim başına (gerilme enerjisi yoğunluğu) gerilme enerjisi miktarı”, tokluk modülü olarak da tanımlanmaktadır (MechaniCalc, 2023). Alan miktarı, toklukta belirleyici bir faktördür. Şekil 2.1.b'de gösterilen alanlar iki farklı katı malzemeyi temsil etmektedir. Test edilen katı malzemeler, daha yüksek (Katı-1) veya daha düşük (Katı-2) akma (Y) ve maksimum (U) mukavemet değerlerine sahip olabilir. Bununla birlikte, eğrilerinin altındaki alanların miktarları farklı olabilir, bu farklılık da doğrudan katıların tokluk özellikleriyle ilgilidir. Katı malzemeler, üzerlerine uygulanan gerilme seviyesi F değerlerine kadar dayanım gösterirler, katı maddeler F değerlerine farklı Y ve U değerlerini geçerek ulaşabilirler. Bu gerilme seviyelerini geçerken ilgili katı maddelerin gösterdikleri birim deformasyonlar katı maddeleri temsil eden gerilme-deformasyon eğrilerini oluşturacaklardır. Bu eğrilerin altında kalan alan, katı maddeler içinde kırılma esnasında depolanan enerjiyi temsil eder.



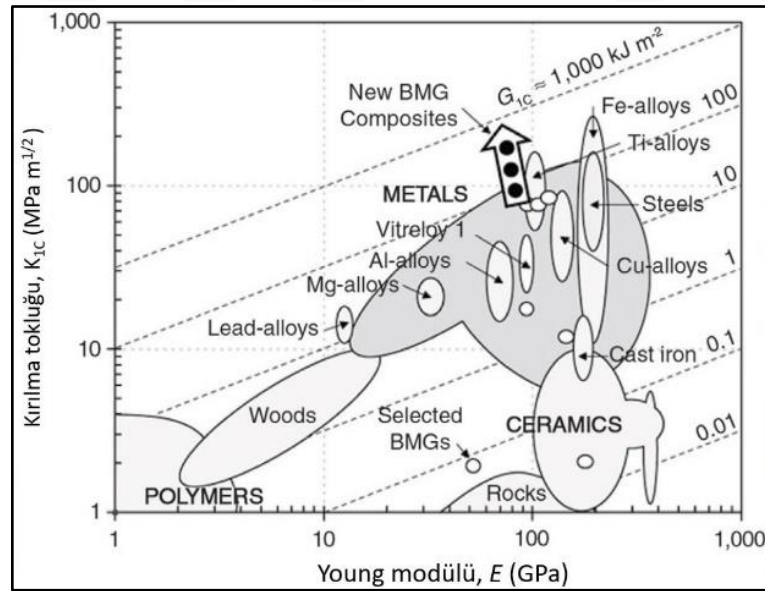
Şekil 2.1. a) Katı malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri örnekleri. Sünek ve gevrek malzeme özellikleri, kırılma dayanımı (F değeri) seviyesinden hemen önce depolanan enerjiyi etkiler, (MechaniCalc, 2023); b) Katı malzemelerin iki farklı tokluk karakteristiğinin şematik genel gösterimi, (SEN, 2023).

Şekil 2.1b’de görüleceği gibi bir katı maddenin Y, U ve F değerleri yüksek olurken (Katı-1), kırılma sırasında içinde depolanan enerji seviyesi, bir başka katı maddeye göre (Katı-2) düşük olabilir. Aslında Katı-2 maddesinin Y, U ve F değerleri Katı-1 değerlerine göre daha düşük fakat kırılma sırasında içinde depoladığı enerji daha yüksek seviyededir. Dolayısıyla, Katı-2 malzemesi, Katı-1 malzemesinden daha yüksek tokluk, dayanıklılık, özelliğine sahiptir. Başka bir deyişle; Katı-2 malzemesi, Katı-1 malzemesinden daha düşük bir mukavemete sahip olabilir, ancak yenilmeden önce daha fazla toplam enerjiyi depolayabilir, (SEN, 2023). Şekil 2.1b'deki çizimin, iki farazi katı malzemenin gerilme-birim deformasyon eğrilerini yansıttığını unutmadan, gerçek katı malzemelerin mukavemet ve tokluk özellik farklılıklarına bağlı olarak, çok farklı gerilme-deformasyon eğrileri sunabilecekleri unutulmamalıdır.

Tokluk söz konusu olduğunda, aynı tokluk değerini temsil edebilecek farklı gerilme-deformasyon eğri profilleri bulunabilir. Bu nedenle, gerilme-deformasyon eğrileri altındaki toplam alan özellikleri dikkate alınmalıdır. "Elastik bölge", "deformasyon" ve "boyun verme" bölgeleri altındaki alan miktarları, malzeme özellik farklılıklarını tanımlamak için belirleyici faktörlerdir. Burada tanımlanan tokluk değerleri, katı malzemelerin bütünüyle ilgilidir. Ancak “darbe tokluğu”, “çentik tokluğu” ve “kırılma (çatlak) tokluğu” gibi başka tokluk özellikleri de vardır. Kaya ve beton kütlelerinde veya diğer katı malzemelerde çatlak başladığında, kırılma genellikle; uygulanan üç boyutlu gerilme seviyeleri, malzeme mukavemet özellikleri, kırılma (çatlak) geometrisi ve malzeme tokluğu/kırılma tokluğu özellikleri ile ilgilidir. Kırılma (gevrek) malzemelerin U ve F mukavemet değerleri neredeyse aynıdır, bu nedenle akma mukavemetinden (Y değerleri), maksimum mukavemete (U değerleri) kadar oluşan

mikro çatlaklar, kırılmalar önemlidir. U değerlerinden sonra, kırılğan malzemeler uygulanan gerilmelere direnç göstermeden kırılır, parçalanır (kopar). Ancak, sünek malzemeler, U mukavemet değerlerine ulaşıldığında uygulanan gerilmelere direnç gösterirler. Sünek malzemelerde genellikle F mukavemet değerlerine ulaşmak daha fazla zaman alır (uygulanan gerilmelere dayanırken oluşan çatlaklar aracılığıyla deplasman sağlarlar). Bu nedenle, kaya malzemelerinin kırılma tokluğu özellikleri aracılığıyla kontrol edilen kırılma yayılımı, kaya ve beton kütlesi gibi katı malzemeler için ayırıcı bir özelliktir.

Polimerler, kayaçlar, ahşaplar, seramikler, metaller, metal alaşımları, çelikler vb. gibi katı malzemelerin kırılma tokluk özellikleri vardır. Kırılma tokluğu değerleri, (Dökme Metalik Camlar (BMG) dahil), Greer (2009) tarafından sunulan Şekil 2.2.'de katı malzemelerin elastik modül özelliklerine göre gösterilmektedir. Yu ve diğ., (2018): “tepe gerilmesinden önce, çentikli çatlağın ucunda kırılma süreci bölgesi, (FPZ), olarak tanımlanan elastik olmayan bir bölgenin ortaya çıkabileceğini” belirtmişlerdir. Bu araştırmacılar, kırılma mekaniği araştırmalarının, katı malzemelerin mekanik davranışlarını anlamada, Hillerborg ve diğ., (1976) tarafından FPZ bölgesini tanımlamak için önerilen *kohezif çatlak modeli* ile farklılık kazandığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.2 Yaygın malzemeler ve kayaçlar arasındaki kırılma tokluğu farklılıkları (Greer, 2009).

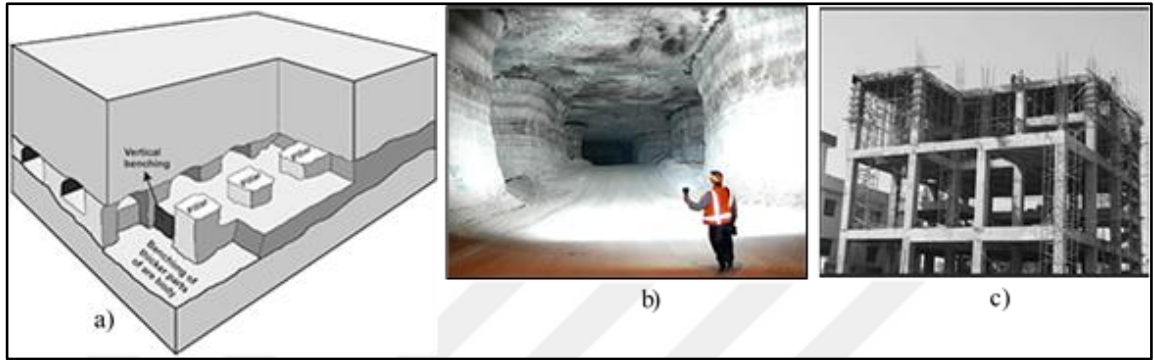
Katı malzemelerin mekanik davranışları, temel olarak; basınç, çekme, kesme ve eğilme dayanımı özellikleri için çeşitli laboratuvar deneyleri ile test edilmiştir. Kayaç ve/veya yapay kayaç benzeri katı malzeme (beton, alçı) numunelerinin yenilmesi de

benzer deneylerle test edilebilir. Bu deneyler sırasında, “*doğal kaya numuneleri*” ve/veya “*yeni hazırlanan yapay kayaç benzeri deney numuneleri*” içindeki çatlak (kırılma) başlangıçları ve yayılımları, bunların mekanik davranışlarını etkileyen konulardır. Bu numunelerdeki kırılma davranışları temel olarak; uygulanan üç boyutlu gerilme koşulları, kırılma ile ilgili parametreler ve kaya malzemesi özellikleri tarafından kontrol edilir. Kaya türleri ve bunların mineralojik ve petrografik özellikleri, doğal olarak mevcut çatlak yoğunlukları, yeni oluşan çatlaklar ve bunların yoğunluk değerleri, çatlak geometrileri ve çatlakların yönelimleri, yüksek/düşük çatlak yoğunluklu alanların lokalizasyonu da kırılma-kopma koşullarını ve dolayısıyla kaya malzemelerinin tokluğunu etkilemektedir. Doğal kaya malzemeleri ve yapay olarak çimentolanarak (veya ısıtma işlemiyle) hazırlanan yapay kaya benzeri malzemeler (beton, beton briketler, ateş tuğlası, modern tuğlalar), şehirleşme tarihi boyunca temel yük taşıyıcı malzemeler olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri, dayanıklı çalışma & yaşama alanları için daha kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Yerleşim alanında veya üzerinde kentsel alanlar (yerleşim yerleri) oluşturmak için yük taşıyıcı sütunlar ve kirişlerin kullanımı önemlidir. Bunlar dayanıklı koşullarda üstten gelen yükleri transfer etmek üzere tasarlanır. Bu yapı elemanlarının (sütunlar, kirişler) mukavemeti, mühendislik tasarım çalışmalarında modelleme yapılırken hayati bir konudur. Sağlam & dayanıklı yerleşim yapılarının tasarımlarının yapılması için, yeterli ve yetkin mühendislik bilgisinin önemi büyüktür. Mühendislik faaliyetlerinden önce doğal kaya kütlesi yapısal koşullarını korumak ve minimum iç mikro boşluklara sahip beton sütunlar/kirişler oluşturmak, mühendislik tasarımlarının sonuçları üzerinde etkili iki anahtar faktördür (yük taşıyan yapısal elemanlar dâhil). Mühendislik projelerinin taşıyıcı yapı elemanlarında kaya ve beton malzemelerin sağlamlığına önem verilirken, bunlara kasıtlı olarak eklenen kusurlar (delik açmak gibi) sonuçları açısından daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmelidir.

2.2. Kolon/Sütun Benzeri Yerüstü ve Yeraltı Taşıyıcı Yapı Elemanları

Yeryüzü ve yeraltında inşa edilen yapılarda yük taşıyıcı yapı elemanlarının dayanıklılıkları hem kendileri için hem de tüm yapının genel dayanıklılığı için önemlidir. Yeraltı madenlerinde topukların ve yeryüzü/yeraltı yapılarında betonarme kolonların (Şekil 2.3) (Obinna, 2020), üzerlerindeki yükleri taşıyabilmeleri için dikkatli bir şekilde tasarlanması gerekir. Planlanan mühendislik çalışmasının özelliğine göre, ilgili yapı elemanlarının uzun veya kısa vadeli dayanıklılık koşullarının kontrol edilerek

tasarlanmaları önerilir. Bu nedenle, tasarım konusunda uzmanlaşmış mühendislerin, topuklar ve kolonlardaki yükleri önceden öngörerek, bunların planlanan mühendislik yapılarındaki konumlarını ve ölçülerini belirten 3 boyutlu planlar hazırlamaları ve hâlihazırda mevcut kriterlerden yola çıkarak ilgili kolon ve topukların duraylılıklarını gerekli sorumlulukları üstlenerek değerlendirmeleri beklenir.



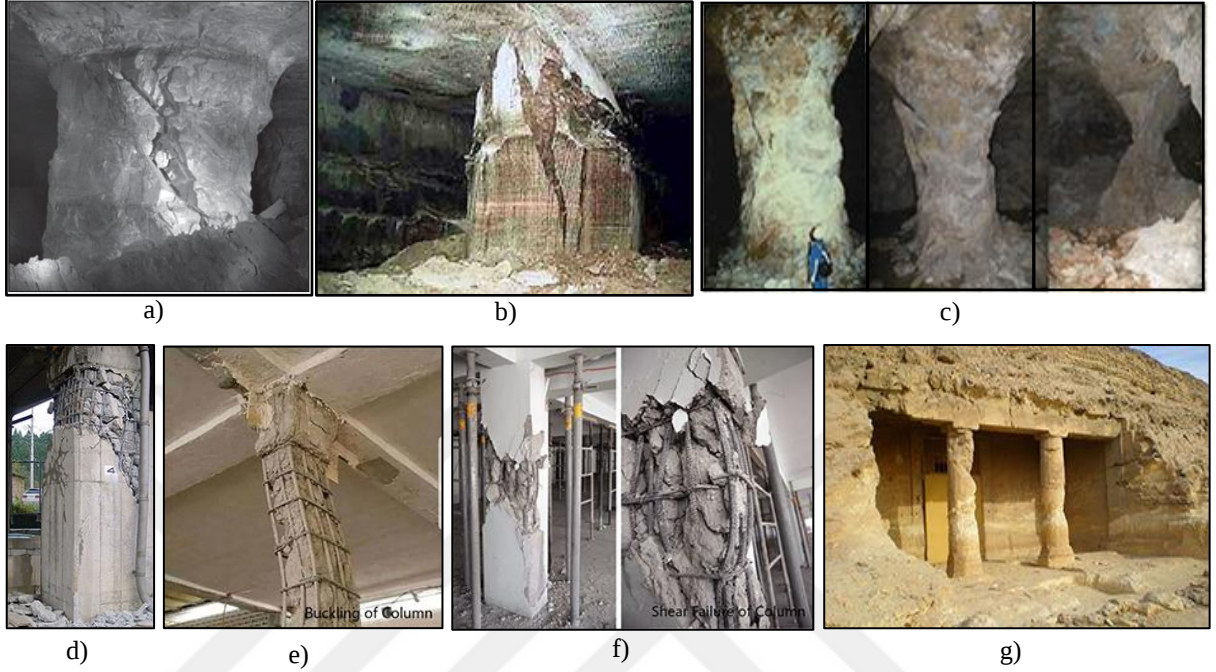
Şekil 2.3. Kolon benzeri taşıyıcı yapı elemanları; a) Oda-topuk madenciligi için topuk konfigürasyonu (3 Boyutlu şematik gösterim), (Hamrin, 1980), b) Yeraltı kireçtaşı maden ocağındaki topuk örnekleri, (derinlik:275m), (Esterhuizen ve diğ., 2011), c) Yapım aşamasındaki bir binada yük taşıması için boyutlandırılan ve konumlandırılan betonarme kolonlar ve kirişler, (Obinna, 2020).

Katı malzemelerin yük taşıma kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda, laboratuvarlarda, laboratuvar deney örneği standartlarına uygun numuneler üzerinde, farklı yükleme koşullarında tek eksenli veya üç eksenli basınç deneyleri yapılmaktadır. Bunun yanında, bazı araştırmalar için, inşaat mühendisliği laboratuvarlarında gerçek boyutlardaki betonarme kolonlar üzerinde de yük taşıma deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deney numuneleri veya gerçek boyuttaki deney numuneleri, farklı tasarım ve hammadde karışım konfigürasyonları uygulanarak (yük taşıma performansları için) test edilmiştir. Maden topukları ve inşaat kolonlarının yerinde (madende veya binanın kendi yapısında) test edilmesi, detaylı araştırma faaliyetleri için mümkün olabilir, ancak bu yük taşıyan yapısal elemanlardan birini ezmek, kesinlikle daha fazla duraylılık sorununa neden olacaktır. Bu nedenle, dayanım özellikleri laboratuvarlarda belirlenen "malzeme dayanımı" özellikleri üzerinden değerlendirilmektedir. Kaya mekaniği alanında çalışan mühendisler, "maden topuklarının gerçek boyutları" ile "laboratuvarlarda test edilen numunelerin boyutları" arasındaki boyut-etki farklılıklarının, topukların yerinde dayanım değerlerinin yeterli bir şekilde tahmin edilmesini gerektirdiğini iyi bilmektedirler. Bu tahminlerin, mühendislik uygulamalarında her zaman “verilen kararlar” açısından riskleri vardır. Maden

topuklarının boyutları büyüdükçe, içerdikleri süreksizliklerin sayısı da artar. Topukların üç boyutlu maden planlarındaki konumları ve topukları çevreleyen kayaçların/cevherlerin dayanım değerleri, topukların yük taşıma özellikleri üzerinde etkili parametrelerdir. Bu nedenle ilgili etkilerin ve yük taşıma özelliklerinin araştırılması, kolonların ve topukların yük taşıma kapasitelerini azaltacak durumların (çatlamalar gibi) incelenmesi önemlidir. Bu aşamada mühendislik uygulamalarında karşılaşılabilecek çatlaklara (Şekil 2.4.a, 2.4.b, 2.4.c'de (maden topukları) ve 2.4.g'de (kayaç kolon/sütun) gösterildiği gibi) (FTS, 2019) hazırlıklı olmaları ve gözlemledikleri çatlakların nedenlerini doğru analiz edebilmeleri gerekir. Kaya topukları ve betonarme kolonlardaki (çatlaklar) kırıklar, bu yapı elemanlarının yük taşıma kapasiteleri başta olmak üzere mekanik davranışlarını etkilemektedir. Kayaç topuklar için mekanik davranış tahmini sırasında, kaya malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri (*akma, maksimum ve yenilme aşamalarındaki ortalama dayanım değerleri, elastik modül, malzeme ve kırılma tokluğu vb. dahil*) mühendislerin düşünmesi gereken önemli tasarım karar parametreleridir. Kaya topuklarının yapılarındaki malzeme farklılıkları (*topuk gövdelerindeki kaya/cevher tabaka farklılaşması, hasar bölgeleri, topuklardaki süreksizlikler ve bunların yapısal özellikleri vb.*) bu topukların mekanik davranışlarını doğrudan etkilerler. Bu konularda karar verecek mühendislerin (örneğin; Kaya mühendisliği konusunda özel olarak eğitilen maden mühendislerinin), sağlam, duraylı ve iş güvenliği sağlanmış yapıların veya maden ocaklarının farklı çalışma ortamları için alınması gereken ilave önlemleri, her vardiyada farklı çalışma şartları altında düşünmeye hazır olacak şekilde mezun edilmeleri beklenir.

Betonarme kolonlar için dayanım özellikleri ele alındığında, kullanılan beton hammaddeleri (agrega çeşitleri, farklı çimentolar, katkı maddeleri, su) ve bunların farklı oranda karışım oranları, inşaat mühendisliği bağlamında farklı amaçlar için farklı mukavemet özelliklerine sahip beton türlerinin üretilmesini sağlamıştır. Farklı agrega türlerinin (farklı fiziko-mekanik özellikleri, dayanımlarının vb.), farklı çimento türlerinin, su kalitelerinin, farklı katkı türlerinin ve özelliklerinin, donatı türlerinin (boyut ve kalite farklılıklarının) betonarme kolonların & kirişlerin performansına etkileri inşaat mühendisliğinde geniş araştırma alanları oluşturmuştur. Yapıların inşaat işlemleri sırasında veya sonrasında, zamanın ve insan faaliyetlerinin betonarme kolonların mukavemet özellikleri üzerindeki etkileri (örneğin; basınç ve çekme dayanımlarında, elastik modül ve tokluk değerlerindeki farklılaşmalarda olduğu gibi) üzerinde düşünülmesi gereken karmaşık koşulların oluşmasına neden olmaktadır. Bir betonarme kolon içindeki mekanik özelliklerin farklılaşması (bozulması) zaman içinde ilerledikçe,

bu bozulmaların derecesinin öğrenilmesi amacıyla (veya daha farklı nedenlerden dolayı) bu kolonda kasıtlı olarak bir delik açılması, bu betonarme kolonun mekanik davranışlarını negatif yönde etkilemekte ve ek yıkıcı mukavemet koşulları oluşturmaktadır.



Şekil 2.4. Sütun benzeri taşıyıcı yapı elemanlarında oluşan yenilmeler; a) Kırılmış/çatlamış yeraltı maden topuğu (Esterhuizen, ve diğ., 2011), b) Topuk yenilmesi, Cleveland ,US, (Fotoğraflar Franks, A.M. ve bilgiler Coleman, T.) (ECIA, 2023), c) Bir alçı taşı madeninde topuğun zamanla dökülmesi (1996, 2000, 2004 yıllarına ait fotoğraflar), (Sorgi ve Watelet, 2007; Sorgi ve diğ., 2011), d) Donatılı bir bina kolonunda/Betonarme bir kolonda basınç gerilmesine bağlı göçme (Structural guide, 2023), e) Betonarme bir kolonda burkulmaya bağlı göçme (Structural guide, 2023), f) Betonarme kolonda makaslama yenilmesi (Structural guide, (2023), g) Kaya sütunlarda oluşan kırıklar ve bozulmalar, El Minya arkeolojik alanı, Mısır, (FTS, 2019).

Betonarme kolonlar, üzerlerine uygulanan gerilme türlerine göre farklı türde hasar belirtisi gösterirler (Şekil 2.4.d, 2.4.e, 2.4.f). Maden topukları için gözlemlenen (giderek artan) dökülme hasar tipleri (Şekil 2.4.c), betonarme kolonlar için beklenen hasar formlarından biri olmayabilir, ancak mekanik özellik bozulması ve mikro kırılma (kırılma başlangıcı ve yayılması) zamanla betonarme kolonların yük taşıma kapasitelerini etkileyen iki önemli faktördür. Bu nedenle, inşaat sektöründe kullanılan betonun (veya diğer katı malzemelerin) tokluk özellikleri ile birlikte kırılma tokluğu özelliklerinin de detaylı bir şekilde incelenmesi önemlidir.

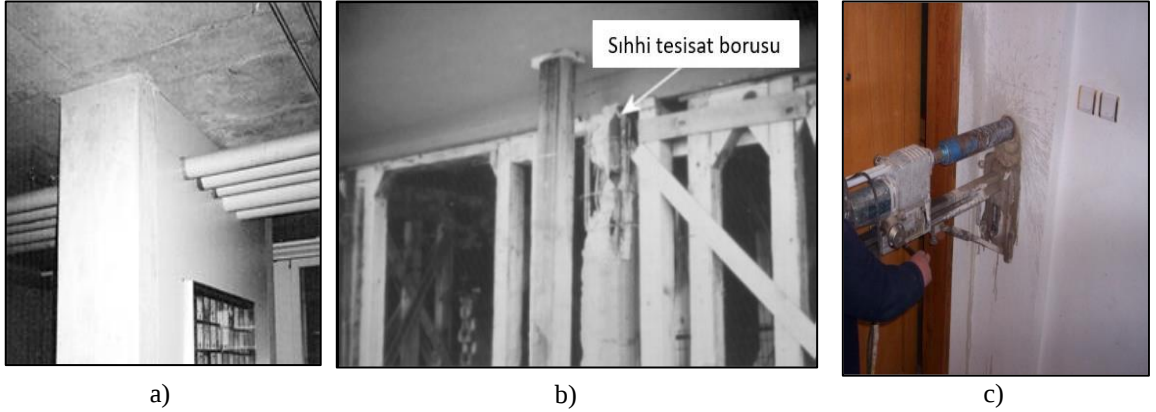
Aynı şekilde, betonarme kolonların mekanik davranışlarının herhangi bir yöntemle (örneğin; karot alma) negatif yönde etkilenmesi, yapıların duraylılığı açısından hayati önem taşımaktadır. İnşaatlarda uygulanan tasarım aşamaları, inşaat işlemi başlamadan önce mevcut teknolojiye göre gerekli tüm inşaat yapım aşamalarını

(adımlarını) dikkate alacak şekilde planlanmalıdır. Dolayısıyla, zamanla ortaya çıkan herhangi bir uygulamayla taşıyıcı betonarme kolonlarda delik açılması, tüm yerüstü ve yeraltı insan yapımı yapılar (inşaatlar) için istenmeyen bir durumdur. Ancak bazı yapılarda izinsiz yapılan uygulamalar bu tür deliklerin açılmasına neden olabilmektedir. Aslında, dünyanın neresinde olursanız olun, yeryüzü ve yeraltı yapılarının yük taşıyıcı unsurlarında izinsiz bir delik delme işlemi fark edildiğinde, bu durum resmi olarak kaydedilmeli ve yasal konular kurallara ve kanunlara göre takip edilmelidir. Bazı özel durumlarda, yasal anlaşmazlıkların çözümü için inşaat işleri tamamlandıktan sonra betonarme kolon mukavemet özelliklerinin (karot numuneleri yoluyla) belirlenmesi istenebilir. Benzer şekilde, kamu binalarının (özellikle hastane binaları) inşaatlarından sonra bir güvenlik ve kontrol eylemi olarak, bu yapıların depreme dayanıklılık özelliklerini analiz etmek için bunların kolonlarının mekanik özellikleri için yasal belgeler istenebilir. Bütün bu yaklaşımların yanında, yerüstü/yeraltı inşaatlarında taşıyıcı betonarme kolonların üzerinde yapılacak ek işlemlerin (karot alma işlemi gibi), binaların duraylılığı açısından ayrıntılı olarak ele alınması gereken konuların içinde yer aldığı unutulmamalıdır.

2.3. Açılan Delikler Nedeniyle Kolonların Taşıyıcı Özelliklerinde Oluşan Bozulmalar

Modern dünyada kentleşme oldukça yaygınlaşmıştır. Yerkabuğunun içine veya üzerine yapılan inşaatlar, insan topluluklarının ana faaliyetlerinden birini oluşturmuştur. Yüzey veya yer altı yapıları için yaşam alanları planlandığında, tasarlanan alanların yüklerini taşıyacak taşıyıcı kolon, topuk ve kirişlere ihtiyaç duyulmaktadır. Maden ve inşaat mühendisliği uygulama alanları özellikle bu taşıyıcı kolon ve topukların tasarım prosedürlerini kapsamaktadır. Maden topukları, maden açıklıklarının tavan katmanlarını desteklemek için yeraltı maden işletme katmanlarında kazı işlemi uygulanmadan (dokunulmadan, bozulmadan) bırakılan kaya/cevher kısımlarıdır. Maden topukları, seçilen bazı yeraltı madencilik yöntemlerinde, tavan yüklerini, tabantaşına aktaran ana maden tahkimatı olarak planlanırlar. Maden mühendisleri, maden topuklarının bütünlüğünü etkileyen herhangi bir doğal ve/veya insan kaynaklı hasarın, onların mukavemetini ve dolayısıyla madenlerin güvenliğini etkilediğini bilirler. Bu nedenle, böylesi durumların oluşmaması için gerekli önlemleri alarak görevlerini yaparlar.

Betonarme kolonlar modern yapılar (binalar), için ana taşıyıcı yapı elemanlarından biri haline gelene kadar, antik yapılarda, özellikle anıtsal binalarda sütun benzeri, büyük boyutlara sahip kayaçlar kullanılmıştır. Mühendislerin kolon tasarımıyla ilgili önlemlerin ve bu konuda oluşan olumsuzlukların farkında olmaları gerekir. Bu kusurların betonarme kolonların dayanımını nasıl etkilediğini bilmek mühendisleri bu konuda önlemler almaya yönlendirecektir. Ancak yine de zaman içinde bina kolonlarının yük taşıma dayanımını etkileyen bazı durumlar oluşabilir. Kolonun içinden delik açmak, gözlemlenen kusurlardan biridir. Malzemenin (beton) mukavemeti hakkında bilgi eksikliği, yapıların duraylılık kontrolündeki eksiklikler de Şekil.2.5.a ve 2.5.b'de gösterilen örneklerin asıl nedenleri olabilir. Üzerinde delik açılmış betonarme kolonlarda rastlanan hasarlı durumları bulunduğumuz yerleşim alanlarında gözlemleyebiliyorsak, yapıların inşaatı sırasında ve sonrasındaki kontrollerin yeterli olmadığı konusu ortaya çıkar. Bazı durumlarda kolonların kalıplanması sırasında kullanıma hazır delikler oluşturmak için kasıtlı olarak bırakılan çelik borular, muhafazalı delikler bile gözlenebilir. Diğer durumlarda, bu delikler farklı amaçlar için, inşaat sonrasında kolonların içine delinerek açılmaktadır. Bu durumlarda, betonarme kolonların donatıları için kullanılan birkaç çelik çubuğun kesilme olasılığı bile mevcuttur. Bunlardan birkaçının kesilmesi, betonarme kolonlarda tasarlanan donatı konfigürasyonunun toplam güçlendirme özelliğini doğrudan azaltacaktır.

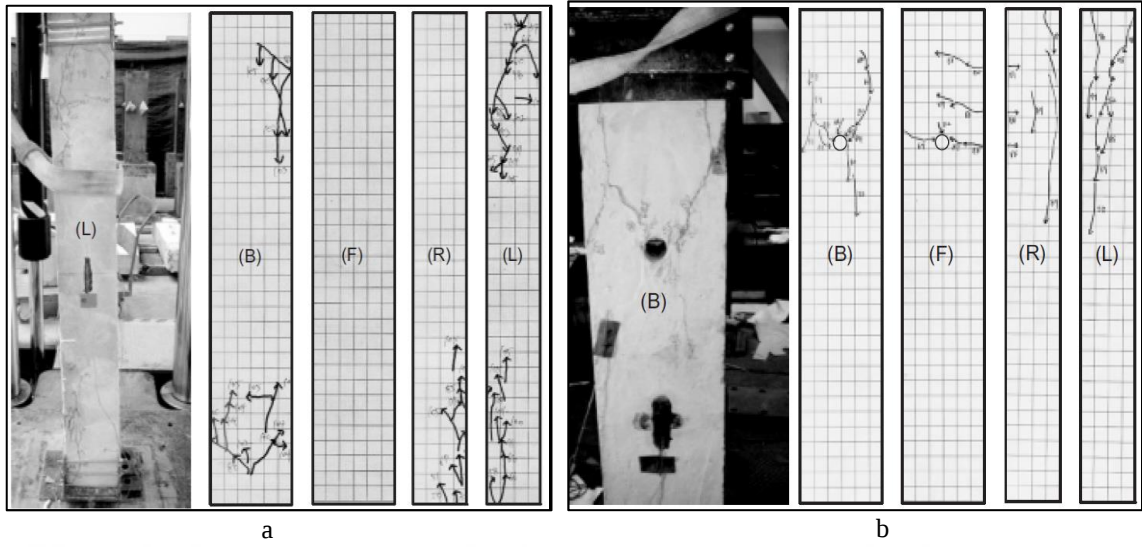


Şekil 2.5. Delinmiş betonarme kolonlar; a) Bina tesisatı için açılan yatay delikler (Son ve diğ., 2006), b) Betonarme kolonda tesisat borusu olarak açılmış düşey delik, “tesisat borusu içeren kolonların depremde gördüğü hasar”, (Son ve diğ., 2006), c) Taşınabilir bir karot makinesi ile bir binanın betonarme kolonunda karot alma, (Kurtuluş ve Bozkurt, 2011).

Bütün bu olumsuzlukların yanında, bazı özel durumlarda, mevcut yapıların beton kalitesini resmi olarak tespit etmek için, bazen yapıların betonarme kolonlarından karot

numuneleri alınmasına da karar verilebilmektedir. Kürklü (2005) ve Akdağ (2015) kolon karot delik delme işlemleri ve analizleri ile ilgili örnekler sunmuşlardır. Nedenler farklı olsa da yük taşıyan masif bir yapı kolonunun delinerek hasarlı duruma getirilmesinin sonuçları çok daha detaylı olarak değerlendirilmelidir. İhtiyaç duyulan mühendislik kontrol işlemlerinin mümkün olduğunca hasarsız ölçüm yöntemleriyle gerçekleştirilmesinin önemi ülkemiz gibi aktif depremlere maruz kalan yerler için çok fazladır.

Alwash (2017) tarafından da belirtildiği gibi, mevcut beton yapılar için karot alma ve test işlemleriyle ilgili tahribatsız test yöntemleri ve bunların değerlendirmeleri için farklı standartlarda açıklanan prosedürler vardır. Son ve diğerleri (2006), betonarme kolonlarda açılan deliklere odaklanmış ve "*ek hizmetler veya ekipman monte etmek için*" bazı delik delme uygulamalarından bahsetmişlerdir. Değerlendirmelerine göre bu eylemler, kolonlarda "mukavemet kaybına ve olası yapısal hasarlara yol açabilir". Ayrıca, 2006 yılına kadar yapı kolonlarındaki delikler üzerine çok az çalışma yapıldığını yazmışlardır. Bu araştırmacılar, betonarme kolonların mukavemet kapasiteleri üzerinde deliklerin etkilerini analiz etmek için, 200x300x1600mm boyutlarında laboratuvar ölçekli kolon numuneleriyle delikli ve deliksiz olarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmacılar hazırlanan deney numunelerinin düşey ve yatay merkezlerine farklı çaplarda dairesel kesit alanlı delikler yerleştirmişler, tekli ve çoklu delikleri olan numuneler için laboratuvar da düşey yükleme test sonuçlarını elde etmişlerdir. Bu testlerde, Son ve diğ. (2006) delik konumlarını (düşey/yatay) farklı mesafelerde yapılandırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, numune içindeki delikler, numunelerin düşey (tek eksenli) basınç dayanımını ve numuneler üzerinde gelişen çatlak yayılımını etkilemektedir (Şekil 2.6). Aynı şeklin, Şekil 2.6.b kısmında gösterilen çatlak (kırılma) izleri deliğin etkilerini ortaya koymaktadır. Çatlak izleri (50 mm'lik deliği olan test numunelerinin yüzeylerinde), çatlak yayılımının ve yönelimlerinin mevcut delikten olumsuz bir şekilde etkilendiğini göstermiştir. Şekil 2.6.b'de mevcut delik ile bağlantısı olan çatlaklar açıkça bu iki şeklin (Şekil 2.6.a ve 2.6.b) karşılaştırması sırasında gözlenen sapmadır. Katı bir malzemede dairesel kesit alanlı bir delik etrafında çatlakların başlamasını ve yayılmasını (ilerlemesini) anlamak, kolon test numunelerinde (delikli/deliksiz) oluşan düşey yük taşıma kapasitelerinin yorumlanmasında etkili olmaktadır.

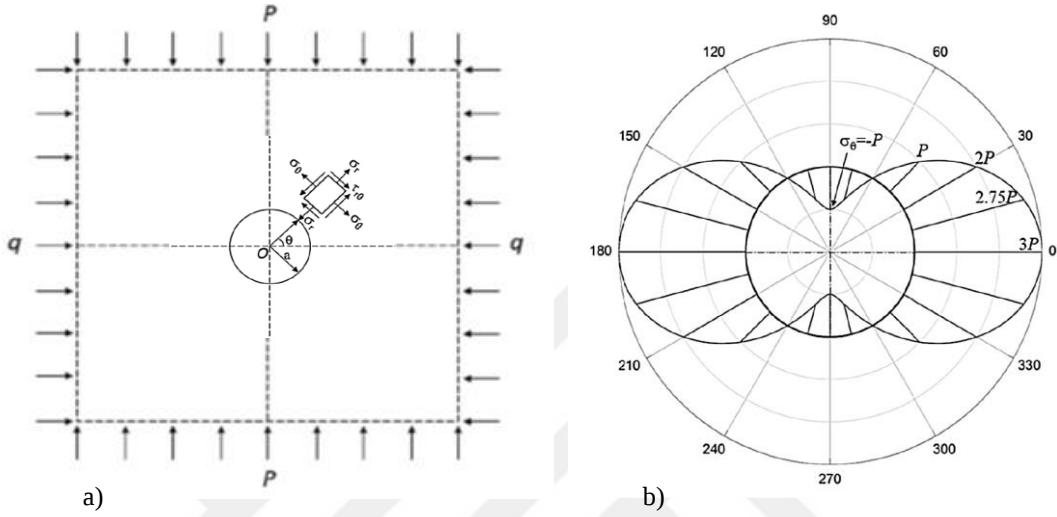


Şekil 2.6. Betonarme kolon numunelerinin düşey yük taşıma kapasiteleri için test edilen laboratuvar ölçekli kolon numuneleri (200x300x1600mm boyutlarında), (yüzeylerden alınan görüntü; F: ön, B: arka, R: sağ, L: sol), a) Sağlam, masif numune üzerindeki çatlak izleri, b) Matkap deliği (50mm çapında) olan numune üzerindeki çatlak izleri, (Son ve diğ., 2006).

Kirsch tarafından önerilen 2-Boyutlu (2B), gerilme-deformasyon çözümleri (Şekil 2.7.a), homojen olarak uygulanan 2B yük (p ve q) altındaki homojen-masif özellikli katılar içinde açılan dairesel bir açıklığın çevresinde oluşan gerilme-deformasyon dağılımını tahmin etmenin yollarından biridir, (Şekil 2.7.a), (Kirsch, 1898; Li ve diğ., 2017). Homojen katı malzemeler için önerilen Kirsch yaklaşımı, dairesel bir tünelin homojen kaya malzemelerinde açıldığı varsayılarak, bu tünelin etrafında oluşan (ikincil) gerilme dağılımlarının seçilen kaya konumlarında (tüneli çevreleyen) kaya malzemelerinin dayanım kapasitelerini aşıp aşmadığını değerlendirmek için kaya mühendisleri tarafından ilk aşamada kullanılabilecek yaklaşımlardandır. Bu varsayım, tünellerin etrafındaki gerçek kaya koşullarında geçerli olmayabilir. Ancak, tünellerin homojen kaya kütlelerinde açılması durumunda ortaya çıkan gerilme seviyelerini anlamaya imkân tanıdığı için özel önem taşımaktadır.

Kirsch yaklaşımıyla sunulan hesaplamalarda, bu yaklaşımda ele alınan dairesel açıklığın çevresinden uzaklaştıkça oluşan teğetsel gerilme seviyeleri azalmaktadır. Boşluk etrafındaki teğetsel gerilmelerin seviyeleri, 2B alan yükleme koşulları (p ve q) dikkate alındığında da farklıdır. Bu seviyelerin genellikle, masif ve homojen katı bir malzemede açılan bir boşluktan 3 kat daha büyük yarıçapı olan dairesel bir bölgede etkili olduğu kabul edilmektedir (Kirsch, 1898). Oluşan gerilmelerin, bu varsayımsal "etki bölgesi" dışında etkisi olduğu kabul edilse de seviyelerinin gerilme-deformasyon

analizlerinde dikkate alınmayacak kadar düşük olduğu varsayılmaktadır. Li ve diğ., (2017) tarafından yapılan değerlendirme, betonarme kolonlardaki deliklerin etrafındaki çatlamların analizleri sırasında da dikkate alınabilir. Bu araştırmacıların sundukları grafik (Şekil 2.7.b), dairesel bir delik (*homojen bir katı içinde açılmış ve tek eksenli basınç gerilmesi "P" altında*) etrafında oluşan çekme ve basınç gerilmelerini içermektedir.



Şekil 2.7. a) Kirsch çözümü, homojen malzemede bir boşluğu çevreleyen etkilenmiş dairesel bir bölgede (noktalı daire içindeki alan) oluşan gerilme konfigürasyonu (Kirsch, 1898; Li ve diğ., 2017). (Kirsch, 1898, Li, ve diğ., 2017'den sonra), b) Tek eksenli basınç altında dairesel bir deliği çevreleyen teğetsel gerilme farklılaşması, (P). (Li ve diğ., 2017).

Bu araştırmacılar; "Çekme gerilmesi bölgesinin dairesel deliğin üst ve alt kısmında maksimum $-P$ büyüklüğünde oluştuğunu ve buna karşılık, basınç gerilmesi bölgesinin deliğin sol ve sağ duvarlarında maksimum $3P$ büyüklüğünde oluştuğunu" yazmışlardır. Birden fazla delik varsa ve aralarındaki mesafe yeterince yakınsa, oluşturdukları gerilme-deformasyon etki bölgeleri üst üste biner. Bu durumda ortaya çıkan gerilme-deformasyon seviyelerinin etkinliğinin katı malzeme dayanım kapasiteleri için daha tehlikeli olabileceği anlamına gelir (kırılmaya neden olabilir). Bu nedenle, herhangi bir betonarme kolonda açılan delikler etrafında gözlemlenen çatlakların başlama şartları ve ilerleme durumları, betonarme kolonların yük taşıma kapasiteleri yanında bunların tokluk özelliklerini de göz önünde bulundurarak değerlendirilmelidir.

Betonarme kolonların yük taşıma kapasiteleri üzerinde yapılan bazı araştırmalarda, kolonlar içinde açılan deliklerin etkileri de incelemeye alınmıştır. Bu araştırmalardan birisi olan, Campione ve diğ. (2015)'nin çalışması dikkat çekicidir. Araştırmanın ana çıkış noktası olarak, diğer tüm araştırmacılar gibi onlar da taşıyıcı

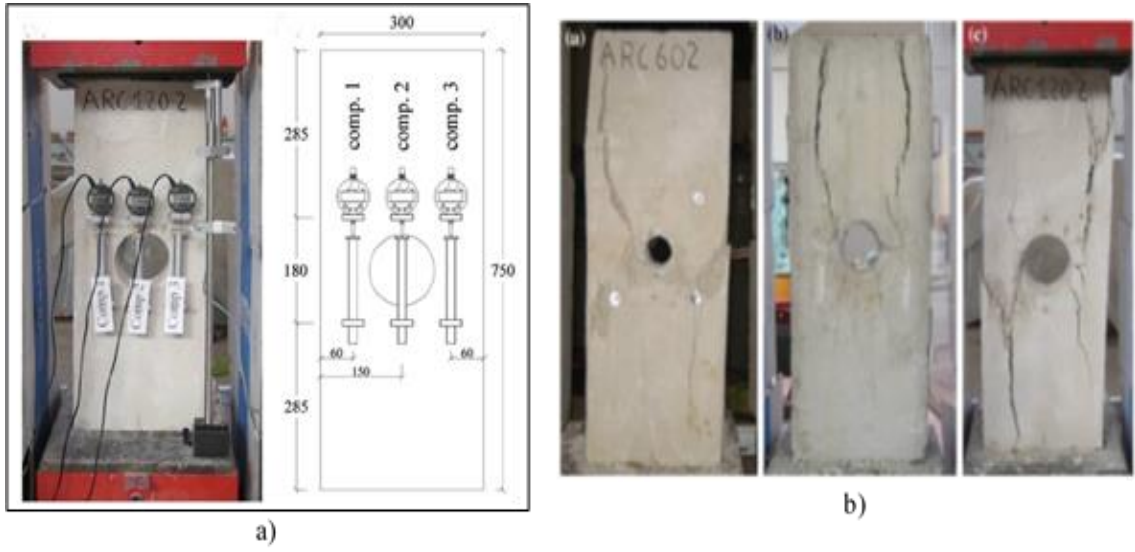
betonarme kolonlarda delik açılmasının nedenlerini özetlemişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar "karot alma" tekniğinin günümüzde, mevcut yapılarda kullanılan betonun mekanik özelliklerini araştırmak ve yapıların duraylılık durumlarını izleme amacıyla neden kullanıldığı konusunda değerlendirmeler yapmışlardır. Campione ve diğ. (2015) mühendislik uygulamaları betonarme kolonların delinmesini tavsiye etmese bile, *"bu çoğu zaman kaçınılmaz olabilmektedir"* demişlerdir. Kaya blokları, kaya sütunları, beton malzemeler ve betonarme kolonlardaki kusurlu bölgeler, çatlaklar, boşluklar ve kasıtlı olarak açılmış delikler, bu katı malzemelerin dayanım (tek eksenli, iki eksenli veya 3 eksenli yükleme şartları) ve mekanik davranış özelliklerini etkilediğinden, bu katı malzemeler içindeki boşluklar (delinecek yeni karot delikleri dâhil) daha detaylı incelenmelidir.

Campione ve diğ. (2015), betonarme kolonlarda (delikli/deliksiz) gerilme-deformasyon farklılaşması durumlarını incelemek amacıyla, A serisi ve B serisi numuneler için iki farklı tek eksenli basınç dayanımı değerine sahip olacak şekilde iki farklı beton bileşimi ile kalıplanmış iki set laboratuvar boyutunda betonarme kolon hazırlamışlardır. Test edilen laboratuvar boyutlu betonarme kolonların boyutları 150x300x750 mm'dir. Araştırmacılar, A ve B serisi beton bileşimleri için 4 tip betonarme kolon hazırlamışlardır. Bu 4 tip kolon, deliklerinin olup olmamasına göre ayrılmıştır. Laboratuvar boyutundaki bu 4 tip betonarme kolon, delik çapına göre; i) normal numuneler (deliksiz), ii) 60 mm, iii) 90 mm ve iv) 120 mm olarak sınıflandırılmıştır. Delikler, numunelerin merkezine yerleştirilmiştir (300mm genişliğindeki numune yüzeylerinden delinmiştir). Deneyler sırasında, uygulanan düşey basınç gerilmelerinden kaynaklanan şekil değiştirmeler, Şekil 2.8.a'da gösterildiği gibi deney numuneleri üzerine yerleştirilen LVDT cihazlarıyla ölçülmüştür. Test edilen betonarme kolonların yüzeyinde oluşan çatlaklar genellikle düşey yönlüdür. Delikler etrafındaki çatlaklar, bu deliklerin kolon numunelerinin mekanik davranışları üzerindeki açık etkilerini göstermektedir.

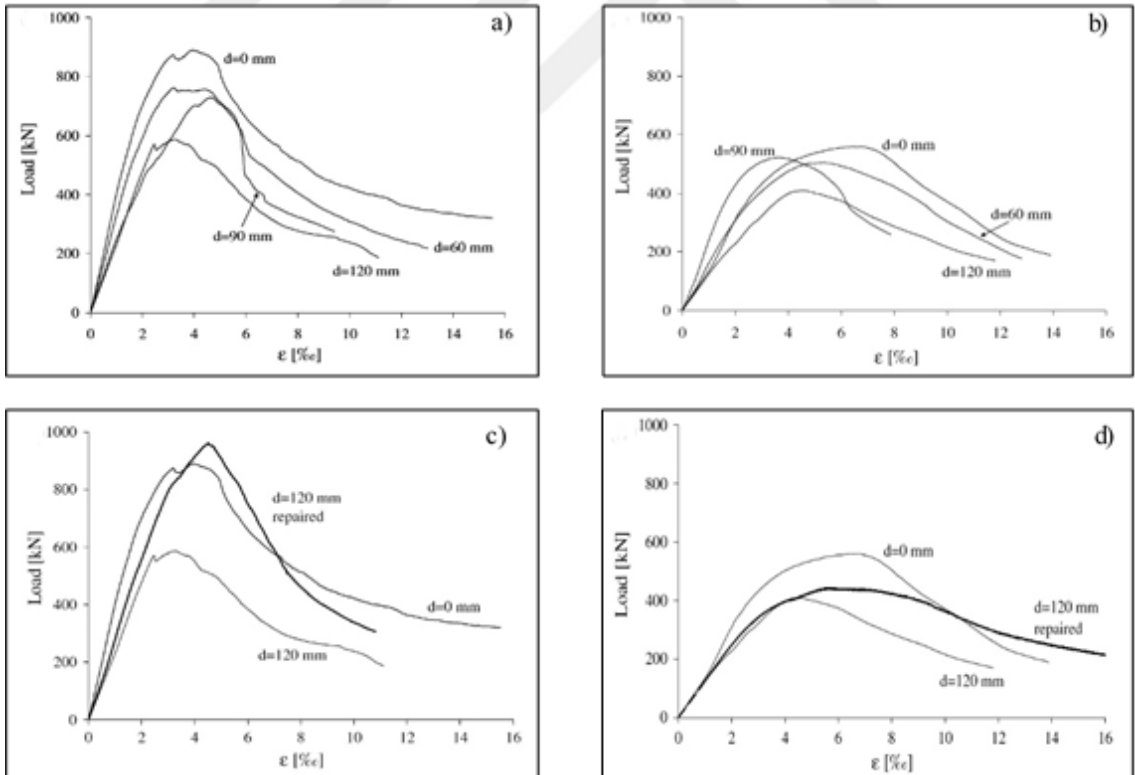
Deliklerin her iki yanında oluşan maksimum basınç gerilimi yoğunlaşma alanları, (Şekil 2.8.b), numunelerin çatlama süreçlerini etkilemişlerdir. Deliklerin üst ve alt tarafları yerine deliklerin etrafındaki bölgelerde gözlemlenen çatlaklar (kırılmalar) bu gözlemleri doğrulamaktadır. Şekil 2.9'da gösterilen tek eksenli gerilme-deformasyon grafikleri, deliklerin deney numunelerinin (A serisi ve B serisi beton bileşimleriyle hazırlanmış/oluşturulmuş/kalıplanmış) dayanım ve tokluk özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır, (Campione ve diğ., 2015).

Bu grafiklerde $d=0\text{mm}$ etiketiyle belirtilen eğriler, delik içermeyen deney numunelerinden elde edilmiştir. Delik çapları arttıkça maksimum gerilim (U) değerlerinde bir azalma gözlemlenmektedir. Bu gerilme-deformasyon eğrilerinin altındaki alanlar yani laboratuvar ölçekli kolon numunelerinin malzeme tokluğu değerleri, delik çapları arttıkça benzer şekilde azalmaktadır (Şekil 2.9.a ve 2.9.b). Campione ve diğerleri (2015), laboratuvar boyutundaki betonarme kolon mukavemet özellikleri üzerindeki etkilerini test etmek amacıyla seçilen delikler için de onarma işlemi uygulamışlardır. A-serisi ve B-serisi deney numuneleri için seçilen deliklere onarım harcı hazırlamak için A-serisi beton bileşimini kullanmışlardır. Onarılmış deliklere sahip laboratuvar boyutundaki betonarme kolon numuneleri için düşey yükleme deneyleri sırasında elde edilen eksenel gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 2.9.c ve 2.9.d' de verilmiştir. A serisi numuneler B serisine göre daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğundan, Şekil 2.9'da sunulan gerilme-deformasyon eğrileri buna göre değerlendirilmelidir. Campione ve diğ., (2015), A serisi ve B serisi betonlar için hazırladıkları beton karışımlarını, 28 günlük olgunlaşmadan sonra ölçülen basınç dayanımları; silindirik beton numuneleri ($150 \times 300 \text{ mm}^2$) ve kübik beton numuneleri aracılığıyla test ettiklerini yazmıştır. Silindirik numuneler için ortalama basınç dayanımını A-serisi için 33.32 MPa ve B-serisi için 14.01 MPa olarak belirlenmiştir. Küp beton numuneleri için benzer basınç dayanımı test sonuçları A-serisi için 23.02 MPa ve B-serisi için 11.49 MPa olarak belirlenmiştir.

Test numunelerindeki deliği beton harç karışımı ile doldurma işlemi için yazarlar şunları belirtmişlerdir: "Delik onarımı için kullanılan malzeme yüksek dayanımlı polimerik mikro fiber katkılı tiksotropik çimento esaslı bir harçtır. Hazırlanan bu harç polimerik mikro lif katkı malzemesiyle takviye edilmiştir ve harcın yedi günlük basınç dayanımı 51 MPa'dır." Onarım katkı harcının basınç dayanımı, A-serisi ve B-serisi betonlardan daha yüksek olduğundan, onarılmış kolon davranışı düşey yükleme koşullarında Şekil 2.9.c ve 2.9.d'de gösterilen farklı gerilme-deformasyon karakteristiklerinde gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, onarım harcı ile onarılan deliklere sahip olan B-serisi laboratuvar ölçekli kolon örneklerinin daha düşük mukavemet özelliklerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.8. a) Matkap delikleri ve bağlı LVDT aparatı konumları (birimler: mm) ile laboratuvar boyutunda kolon test numunelerinden biri (Campione ve diğ., 2015) b) Deneylerden sonra laboratuvar boyutunda kolon test numunesi görüntüleri; ARC60 ($d=60$ mm delikli A serisi numune), BRC90 ($d=90$ mm delikli B serisi numune) ve ARC120 ($d=120$ mm delikli A serisi numune) numunelerinin kırılma modelleri, (Campione ve diğ., 2015).



Şekil 2.9. Farklı delik çaplarına sahip laboratuvar boyutlu kolon deneyleri için tek eksenli gerilme-deformasyon eğrileri; a) A-serisi numuneler, b) B-serisi numuneler, c) A-serisi numunelerde onarılmış delik, d) B-serisi numunelerde onarılmış delik, (Campione ve diğ., 2015).

Araştırmacılar bu konuyu: "B tipi kolonun genel davranışı, daha zayıf malzemenin direnci tarafından belirlenir (A tipi ile karşılaştırılabilir bir mukavemete sahip olan malzeme ile onarılır)." şeklinde belirtmişlerdir.

Deliklerin kolon içindeki konumu dâhil olmak üzere, laboratuvar ölçekli kolonların mukavemeti üzerinde deliklerin etkilerini araştıran bir diğer çalışma da Zhu ve diğ., (2010) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar, deneylerini 3 grup (laboratuvar ölçekli) kolon test örneğiyle gerçekleştirmiştir. Testlerde elde edilen sonuçlar; farklı delik konumları ve farklı güçlendirme düzenlemeleri için belirlenen basınç dayanım değişimlerini rapor etmiştir. Bu araştırmacıların hazırladığı test numunelerinin boyutları 300x300x1200mm, 400x400x1200mm ve 400x600x1200mm'dir. Araştırmacılar basınç dayanımı 19,5 MPa civarında olan beton elde etmek için belirli hammadde oranları kullanarak deney numunelerini hazırlamışlardır. Ayrıca "hafif genleşmeli, yüksek dayanımlı" (ortalama basınç dayanımı değeri 58,6 MPa) beton üretmek için özel hammadde oranlarına sahip tamir harcı kullandıklarını da bildirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, açılan deliklerin laboratuvar ölçekli kolonların taşıma kapasitesini, test konfigürasyonlarına göre %5,63 ila %22,14 arasında azalttığını göstermektedir. Delikleri tamir harcı ile takviye ettikten sonra, kolonlarda ortalama taşıma kapasitesinin yaklaşık %3,76 azaldığını yazmışlardır. Şekil 2.9.c ve Şekil 2.9.d'de gösterilen gerilim-deformasyon eğrileri göz önüne alındığında, kullanılan tamir harcının deney örneklerinden elde edilen eğrilere olumsuz etkileri görülmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, Campione ve diğ. (2015), 120mm çaplı tamir edilmiş deliklere sahip A-serisi ve B-serisi kolonlar arasındaki tepe basınç dayanımı (U) değerleri arasındaki farkları açıklamıştır. Bu araştırmacılar tarafından sunulan analizler ve açıklamaların yanı sıra, daha kapsamlı yenilme koşullarını anlamak için aşağıdaki senaryoların da dikkate alınması gerekmektedir (Uzbaş ve Gökay, 2023).

Betonarme kolonların içinde açılan deliklerin onarım süreçlerinden sonra, bu kolonların göstermeleri beklenen 3 farklı mekanik davranış şekli olabilir. Bu durumları açıklamak için Şekil 2.10.a' daki gibi bir betonarme kolon deney numunesinin elastik modülü, E_s , tek eksenli basınç dayanımı, σ_{cs} ve tek eksenli çekme dayanımı, σ_{ts} , değerlerine sahip olduğu varsayılmıştır. Deliklere uygulanan dolgu malzemesinin dayanım değerlerinin E_r , σ_{cr} ve σ_{tr} değerleri olarak belirlendiği varsayılmıştır. Betonarme kolonlardaki deliklerin onarımında dolgu harcı kullanıldığında;

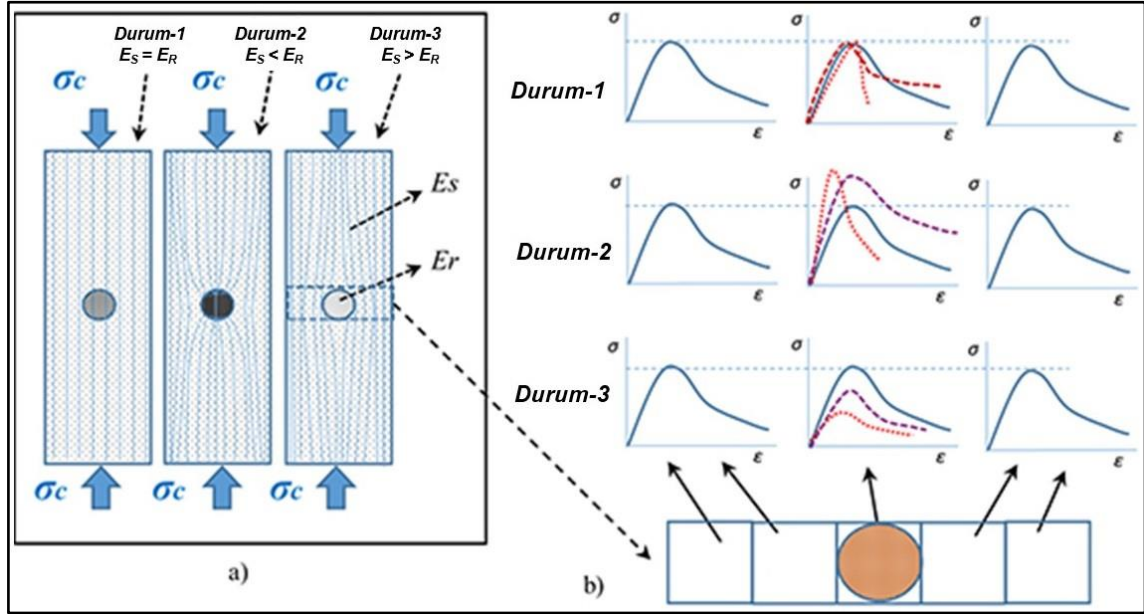
- a) $E_s = E_r$,
- b) $E_s < E_r$ ve
- c) $E_s > E_r$ olmak üzere üç durum göz önünde bulundurulmalıdır.

Tamir harcı tipleri ile betonarme kolonlardaki deliklerin iç çeperleri arasındaki temas yüzeyi koşulları da değerlendirmeye alınmalıdır. Dolgu harçlarının katılma süreçleri sırasında deliğe uygulanan harç kütlesinde ve/veya delik çevresinin temas yüzeylerinde oluşan boşluklar (mikro/nano boşluklar), mikro ölçekli açıklıklar, daha sonra betonarme kolonların mukavemet ve tokluk özelliklerini etkileyeceklerdir. Bu açıklıklar/bosluklar, mikro/nano ölçekte bile olsa temas yüzey alanlarını etkiler. Bu temas yüzeylerinin alanlarındaki herhangi bir azalma, delik çevrelerinin belirli konumlarında gerilme yoğunlaşmalarına neden olur ve bu da daha fazla yenilme sorununa neden olabilir.

İlk durum (durum-1), $E_s = E_r$ koşuluyla tanımlanabilecek olup (Şekil 2.10a), tamir edilmiş kolonların yük taşıma özelliklerinin homojen bir duruma yakın olması beklenmektedir. Deliklerin kenarları, çevre izleri nedeniyle kolonlardaki düşey yük dağılımlarını etkileyebilir. Deliklerin doldurulması durumunda;

- a) Dolgu işleminin uygun kalıplama ve basınçlandırma ekipmanı ile yapılması önemlidir,
- b) Tamir edilen deliklerde herhangi bir boşluk veya açıklık olmaması önemlidir,
- c) Katılma sonrasında benzer tek eksenli basınç dayanımı ve tokluk özellikleri sunabilecek tamir harçları (malzemeler) ile deliklerin doldurulması gerekmektedir (tamir harçlarının deliklerin çeperine iyi yapışmasını sağlamak için bunların güçlü bir yapışma özelliğinin olması da beklenir).

Başarılı sayılabilecek kolon deliği tamir çalışmaları, tamir edilmiş deliklerin, kolon kütlesine benzer mekanik davranış göstermesini sağlamalıdır (Şekil 2.10b'de Durum-1). Ancak, kolonlardaki karot delikleri veya başka amaçla açılmış deliklerin tamir çalışmalarının sonuçlanabileceği diğer olasılıklar da vardır. Onarım için kullanılan özel harcın delik yerinde oluşturacağı katkılı beton malzemenin tek eksenli basınç dayanımı özelliklerini tanımlayan ve noktalı çizgilerle verilen gerilme-deformasyon eğrileri (Şekil 2.10b) farklı harç karışımları için farklı olabilecektir. Onarım harcı karışımlarının düzenlenmesi sonucu elde edilen dolgu betonlarının tek eksenli basınç dayanımları birbirleriyle ve kolonun genel beton yapısıyla aynı olabileceği (Durum-1) gibi, onarım betonlarının bu özellikleri, kolon yapısındaki yapı betonunun tek eksenli basınç değerinden büyük (Durum-2) veya küçük (Durum-3) de olabilir.



Şekil 2.10. a) Farklı koşullarda ($E_s = E_R$, $E_s < E_R$ ve $E_s > E_R$) analiz edilebilen onarılmış kolonlar için tek eksenli yükleme koşullarında beklenen gerilme projeksiyon çizgileri, b) Kolonların tek eksenli basınç dayanımı ve tokluk özelliklerine göre onarılmış malzeme tek eksenli basınç dayanımı ve tokluk farklılıkları, (Uzbaş ve Gökay, 2023).

Harç karışımlarıyla elde edilecek dolgu betonlarının tek eksenli basınç seviyelerindeki farklılıktan başka, bunların ve kolon yapı betonunun tokluk özelliklerindeki farklılıklar da düşünülmesi gereken özellikler arasındadır. Onarımda kullanılan dolgu betonunun kolon yapı betonuna göre farklı mekanik davranışlar göstermesinden dolayı, dolgu çevresinden başlayarak dolgu deliği civarının yeni çatlak oluşumlarına neden olabileceği unutulmamalıdır. Söz konusu mekanik davranışların bertaraf edilememesi durumunda (böyle bir sonuca ulaşma olasılığının oldukça düşük olabileceği akıldan çıkarılmamalıdır), tüm onarılmış betonarme kolonların yük taşıma kapasitelerinde daha fazla mukavemet özelliği değişikliklerinin beklenilmesi doğal bir sonuçtur.

Beton kalitesini kontrol etmek amacıyla taşıyıcı kolonda karot deliği açma kararı veren mühendisler, bu uygulama konusunda çok dikkatli olmalıdır. "Teorik $E_s = E_R$ koşullarını" (Şekil 2.10' da Durum-1) elde etmek çok zordur, bu nedenle mühendisler taşıyıcı kolonları delmekten kaçınmalıdır. Mühendisler ayrıca, zaman içinde dinamik olarak farklılaşan mekanik özelliklere sahip yerüstü/yeraltı yapılarının betonarme kolonlarında kullanılan betonun mekanik davranış değişikliklerinin de farkında olmalıdır. Zaman içinde dayanım özellikleri kötüleşebileceği için, mevcut yerüstü ve yeraltı

yapılarının kolonlarının gerçek tek eksenli basınç dayanımı ve tokluk değerleri, tamamen aynı planlar ve inşaat prosedürleriyle inşa edilen yeni yapılarla karşılaştırıldığında farklı olabilir. Bu nedenle mühendisler, yapı kolonlarında farklı nedenlerden dolayı açılmış bulunan deliklerin tamir işlemlerinde $E_s=E_r$ koşullarını sağladıklarından bahseden raporlar hazırlama konusunda dikkatli olmalıdırlar. Çünkü bu "teorik koşulu" sağlamak neredeyse imkânsızdır.

İkinci durum (Durum-2), tamir edilmiş kolonlardaki tamir malzemesi davranışları için (Şekil 2.10'da Durum-2) $E_s<E_r$ elastik modül koşulunu kapsar. Tamir edilmiş delikler, taşıyıcı kolonda tek eksenli basınç altında kapalı bir hacim olarak varsayıldığında, tamir dolguları için kullanılan katılaşmış dolgu betonlarının mekanik davranışları, onarılan deliklerin her iki tarafındaki betonarme kolon gövde parçalarını kapsayacak biçimde analiz edilmelidir (Şekil 2.10b). E_s ve E_r arasındaki elastik modül farklılıkları (Durum-2' de belirtildiği gibi: $E_s<E_r$), tokluk özelliklerindeki farklılaşma gibi ekstra mekanik özellik değişikliklerini getirir. Bunların, tamir edilmiş kolonlar üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalı ve buna göre değerlendirilmelidir. Durum 2' de; katılaşmış tamir harçlarının (dolgu betonlarının) daha yüksek E_r değerleri, karakteristik kırılma/sünek davranışlarıyla kolonlardaki deliklere uygulanır. Bu dolgu betonlarının (deliklerde) daha yüksek akma, maksimum ve kırılma dayanım seviyeleri ve farklı tokluk davranışları, bunların deliklerdeki pozisyonlarında üzerlerine gelecek düşey yüklemelere karşı (kolon yapı betonun gösterdiği dirençten daha fazla) direnç göstermesini sağlayacaktır. Bu tür dolgu betonlarının, ayrıca, daha yüksek gerilme-deformasyon enerji depolama kapasitesine ve daha yüksek tokluğa sahip olabilecekleri de unutulmamalıdır. Şekil 2.10b'de gösterildiği gibi; Durum 2'de onarılmış bir betonarme kolonun çalışma koşulları için tanımlanan normal gerilme-deformasyon koşulları örneğinde betonarme kolon üzerindeki yük arttıkça, ulaşılan ilk akma dayanımı (Y değeri) seviyesi betonarme kolonların malzemesiyle ilgili olan seviyedir, bu seviye Durum 2' deki katılaşmış dolgu harçlarının (dolgu betonlarının) akma (Y değeri) dayanımı seviyesinden daha düşüktür. Bu sonuç Campione ve diğerleri (2015) tarafından da elde edilmiştir.

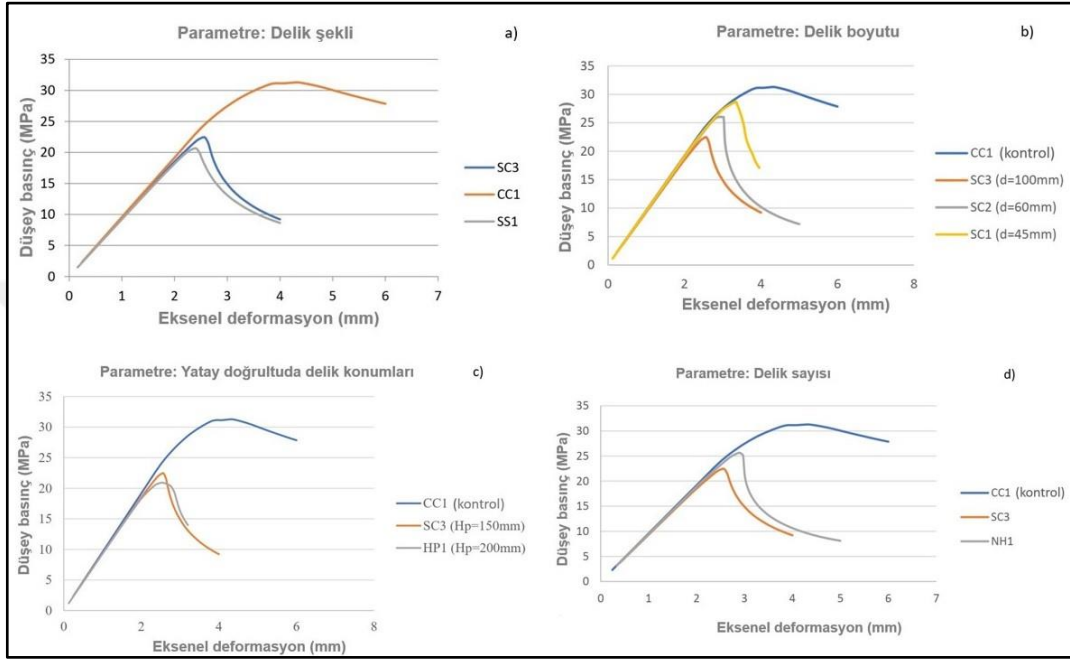
Üçüncü durum (Durum-3), tamir edilmiş kolonlardaki elastik modül koşullarını, $E_s>E_r$ olarak tanımlar (Şekil 2.10'da Durum-3). Bu durumda, katılaşmış tamir harçları, (dolgu betonları) tamir edilmiş delikteki dolgu betonları ile kolonun kendi yapı beton malzemesi arasındaki elastik modül farkları nedeniyle, daha yumuşak malzeme özelliklerine, daha düşük E_r değerlerine sahip olduğu için tamir edilmiş delikli bir kolonun yük taşıma koşulları altında sıkışır. Tamir harçlarının katılaşmış dolgu betonu

olduktan sonraki mekanik özellikleri (örn.; tek eksenli basınç dayanımı ve tokluk özellikleri), Şekil 2.10b'de gösterildiği gibi farklı (daha düşük) olabilir. Tamir edilmiş kolon artan bir yük altında olduğunda, (Şekil 2.10b, Durum-3), tamir edilmiş malzemenin (dolgu betonunun) akma dayanımına (Y değerleri), kolon yapı betonundan (malzemesinden) önce ulaşılır. Dolgu betonlarının tek eksenli basınç dayanımları ve tokluk özellikleri, dolgu betonları üzerinden gerçekleşecek yük transferleri için belirleyici faktörlerdir. Aşırı yük altında dolgu betonlarının tek eksenli basınç seviyelerine yaklaşılması durumunda bu dolgu betonlarının sünek davranış göstermeye başlaması, dolgulu delik içeren beton kolonlarda üstten gelen yük dağılımının kademeli olarak betonarme kolon yapı betonuna aktarılmasına neden olacaktır. Böylesi şartlar içeren delikli yapı kolonlarında çatlama (kırılma) başlangıç şartlarının tayini, bu çatlamların yayılma (ilerleme) şartlarının incelenmesi yapı sektöründe üzerinde durulması gereken önemli konular olarak karşımıza çıkar.

Kolonlar üzerinde açılan deliklerin etkileri, sayısal analizlerle de değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarda; kolonlardaki delik çapları, konumları ve sayısının, kolonların duraylılığı üzerindeki etkilerini anlamak için ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Negassa, (2020) ANSYS programı ile sonlu elemanlar yöntemini kullanarak delikli ve deliksiz betonarme kolonlardaki gerilme-deformasyon dağılımlarını değerlendiren araştırmacılardan biridir. Bu çalışmada 300x300x3000mm boyutlarındaki betonarme kolonlar farklı delik konfigürasyonları ile modellenmiştir.

Deliklerin çapları ve test numunelerindeki konumları (tek, çift veya üçlü), dijital analizler kullanılarak etkilerini anlamak için farklı şekillerde yerleştirilmiştir. Negassa (2020), betonarme kolon mekanik davranışları üzerindeki şekil farklılıklarını incelemek için kare kesitli delik için de sonuçlar elde etmiştir. Farklı delik konfigürasyonları için sunulan gerilme-deformasyon farklılaşma eğrileri aynı zamanda tokluk özelliklerini de barındırır. Farklı şekillerde açılan boşlukların etkilerini analiz etmek için elde edilen eğriler Negassa (2020) tarafından Şekil 2.11a' da sunulmuştur. Bu eğriler incelendiğinde; deliği olmayan kolondan (CC1: katı kontrol kolonu) elde edilen eğrinin, kare delikli, SS1 (genişlik=uzunluk=88.60 mm, hacim değişikliği =2354.99 mm³) ve dairesel, SC3 (çap=100mm, hacim değişikliği = 2355 mm³) delikli kolon numunelerinden elde edilen değerlere göre daha yüksek U ve F değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 2.11b' de verilen eğriler, delik çaplarının betonarme kolonların gerilme-deformasyon davranışları üzerindeki etkilerini göstermektedir. Bu grafikteki eğriler, delik çapları arttıkça nihai dayanım seviyesinin azaldığını göstermektedir.

Deliklerin yatay konumlarının etkileri Şekil 2.11c'de çizilen grafiklerde verilmiştir. Bu şekil, sağlam numune (CC1) ve farklı yatay konumlarda dairesel delik bulunan numuneler (SC3: $d=100\text{mm}$, delik numunenin merkezinde; HP1: $d=100\text{mm}$, delik merkezi kolon numunesinin merkezinden yatay olarak 50mm uzakta (sağda)) için dijital analiz sonuçlarını (gerilme-deformasyon eğrileri) içermektedir.



Şekil 2.11. RC-kolonlar için düşey basınç gerilme-deformasyon farklılaşma grafikleri için sayısal analiz sonuçları. Farklı delik konfigürasyonlarının etkileri karşılaştırmak için ele alınmıştır; a) deliklerin şekli, b) deliklerin boyutu, c) yatay konumlarda deliklerin merkez konumları, d) düşey konumlarda deliklerin sayısı, (Negassa, 2020).

Ayrıca deliklerin sayısının kolonun tokluk özellikleri üzerinde etkili olduğu da belirtilmiştir (Şekil 2.11d). Bu grafikteki eğriler CC1, SC3 ve NH1 ile kodlanan numunelerden elde edilmiştir. NH1 olarak kodlanan dijital analiz numunesinde, numunenin düşey orta noktasında yatay olarak konumlandırılmış iki adet delik (çapları= 50 mm) bulunmaktadır. Negassa (2020)'nın dijital analizlerdeki değerlendirmeleri, Zhu ve diğ. (2010) ve Campione ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen laboratuvar test çalışmalarıyla benzerlik göstermektedir. Bu araştırmalar, taşıyıcı bir betonarme kolonda delik açılmasının karmaşık ve istenmeyen sonuçlara neden olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Deliklerin etkileri, deliklerin sayısı ve delik pozisyonları, delik hacimleri arttıkça daha karmaşık hale gelmekte ve artmaktadır. Ayrıca, betonarme kolonlarda açılan delikler nedeniyle oluşan etkiler geri alınamaz. Yani deliklerin özel beton harçlarla veya diğer katkılı katı malzemelerle doldurularak

onarılması, betonarme kolonların yük taşıma kapasitesindeki kaybı tamamen ortadan kaldıramaz.

2.4. Çatlak Oluşumlarının Tespiti İçin Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC)

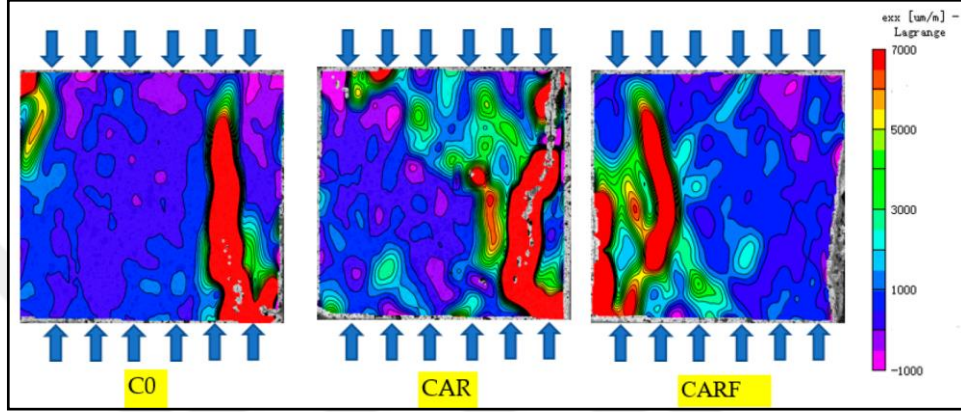
Yönteminin Kullanımı

Bilgisayar teknolojisi ve farklı bilgisayar işletim sistemlerindeki yazılımların gelişi, mühendislerin işini kolaylaştıracak yeni imkânlar sağlamaktadır. Bilgisayar ekranlarındaki Kırmızı, Yeşil, Mavi (RGB) renklerin 24 bitlik renk tanımı, gerçek renk üretmek için her renk için (8) bit, 256x256x256 matris formatları aracılığıyla tanımlanması, bilgisayar kullanıcılarına bilgisayar grafik uygulamalarında yaklaşık 16.777 milyon renk tonu farkını yönetme fırsatı sunmaktadır. Ardışık fotoğraflar çekmek ve aralarındaki renk farklarını tanımlamak; mevsimsel tarım arazi kullanımlarını, orman sınırlarını, kentsel alanların genişlemesini, yeni kentsel gelişmeleri, yeni yolları, yağışlı mevsimlerdeki su baskını alanlarını, çölleşme alanlarını vb. belirlemek için hava/uydu fotoğrafçılığında bir görüntü işleme uygulamasıdır. Burada kullanılan ardışık fotoğraflar, gerekli analizler için farklı hızlarda çekilebilir. Bir saniyede mümkün olduğunca çok sayıda dijital görüntü almak (yani saniyede 60, 360, 6000, 750K, vb. görüntü karesi) görüntü yakalama bilgisayar teknolojisini ve analizleri üst seviyeye taşımaktadır. Belirli bir zaman aralığında (*salise zaman dilimlerinden daha küçük zaman aralıklarında*) çekilen ardışık karelerdeki renk farklılıklarının ayırt edilmesi, dijital görüntü korelasyonu (DIC) olarak adlandırılan bir görüntü işleme yöntemi sağlar.

Cheng ve diğerleri (2023), gerilme ölçümleri için DIC'in kısa bir tanımını şu şekilde yapmıştır; "DIC teknolojisi, bir numune yüzeyinin tam alan gerilme bilgisini elde edebilen tahribatsız bir ölçüm yöntemidir". DIC metodolojisinde görüntülerin birçok küçük blok olarak bölündüğünü ve bunların bir önceki adımda elde edilen görüntü ile karşılaştırıldığını belirtmişlerdir. Piksel konum farklılıkları, mekanik ölçüm cihazlarında ölçülmesi mümkün olmayan çok küçük yer değiştirmelerin anlaşılmasını sağlamıştır. Örneğin; Yıldırım, (2018), araştırma çalışmasında, Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Kompozitleri, (ECC), ele almıştır. Bu çalışmada; DIC yöntemini bu malzemelerin çekme birim şekil değiştirme ölçümlerine uygulamış ve çeşitli parametrelerin (benek yoğunluğu, aydınlatma koşulları, altküme boyutu, adım aralığı vb.) etkilerini incelemiştir.

Cheng ve diğerleri (2023), yüksek dayanımlı, kendiliğinden yerleşen, C80 kodlu betonun (çalışmalarındaki CO numuneleri) tek eksenli basınç dayanımı için yaptıkları

kırılma analiz çalışmalarını sunmuşlardır. Bu araştırmacılar, 100x100x100mm boyutundaki numunelerde, DIC analiz yöntemini kullanmışlardır. CAR kodlu numuneler (ekstra: kauçuk parçacıkları ve polimer lateks tozları ekleyerek) ve CARF kodlu numuneler (ekstra: kauçuk parçacıkları, polimer lateks tozları ve polietilen lifler ekleyerek) elde etmek için C80 hammadde bileşimine özel olarak hazırlanmış ek hammaddeler katmışlardır. Şekil 2.12'de sunulan DIC analiz sonuçları CO, CAR ve



Şekil 2.12. Özel olarak hazırlanan numunelerde tek eksenli basınç altında gerilme dağılımları; CO C80 betonu, CAR ve CARF numuneleri ise beton numunelerin tokluğunda farklılaşma elde etmek için ekstra malzeme eklenerek elde edilmiştir, (Cheng ve diğ., 2023).

CARF numuneleri için gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneylerinden elde edilmiştir (Cheng ve diğ., 2023). Benzer şekilde, DIC yöntemi kullanılarak, farklı amaçlar için, benzer analiz çalışmaları da yapılmıştır. Örneğin; Kozicki ve Tejchman, (2007) tarafından sunulan çalışmalar, DIC analizlerinin çentikli beton numuneler için uygulanabilirliğini içermektedir. Mikro düzeyde yer değiştirme tanımlamaları, "üç nokta eğilme" prosedürleri ile test edilen "çentikli beton numunelerdeki" çatlakları, mikro çatlakları (kırıkları) analiz etmeyi amaçlamıştır. Kozicki ve Tejchman, (2007) "deneyler sırasında yük-eğilme eğrilerinin ve kırılma süreci bölgelerinin gelişiminin belirlendiğini" belirtmiştir. Çatlak (kırılma) başlangıcı ve yayılımı kavramları, katı malzemelerin karakteristiklerinde ana araştırma alanı olmuştur. Özellikle gemi, uçak ve otomobil imalat sanayinde metal alaşımların kullanıldığı endüstri dalları, araştırmacıları çatlakları daha detaylı bir şekilde analiz etmeye zorlamaktadır.

Benzer şekilde, kaya ve beton kütlelerindeki süreksizliklerin (çatlaklar, boşluklar vb.) kenarları, bu kütlelerdeki yayılmış kırıkların başlangıç noktalarıdır. Kaya mekaniği bağlamında mühendisler, süreksizliğe sahip olmayan masif kaya kütlelerinin bulunma olasılığının çok düşük olduğunu bilmektedir. Kaya kütlelerindeki ve betondaki

süreksizlikler, çatlaklar, uygulanan dış gerilmeler nedeniyle aralarındaki kaya veya beton köprülerin yenilmeye başlamasıyla birbirlerine bağlanmaya hazırdır. Betonarme kolonlar yüklerini düşey doğrultuda tek eksenli olarak alırlar ve ömürleri boyunca bu düşey gerilmeyi taşımak zorundadırlar. Gökay ve diğ. (2004) masif kaya kütlelerinde mevcut süreksizliklerin kırılma yayılımları üzerindeki etkileri üzerinde çalışmışlardır. Masif mermer örneklerinin her bir dikey kenarı boyunca 20 mm'lik çentikler ekleyerek masif mermer plakalarda (20x100x150 mm) farklı yükleme şartlarında oluşan çatlakları (kırıklar), bunların yayılımlarını, yayılan kırık izlerini gözlemlemişlerdir. Kırık izlerini kaydetmiş ve düşey yükleme koşullarına bağlı olarak yayılma davranışlarını değerlendirmek için analiz etmişlerdir.

İlgili çalışmada, betonarme kolonların, tek eksenli basınç yükü altında, delikli veya onarılmış delikli olarak kırılması/yenilmesi, karakteristik gerilme-deformasyon dağılımlarını ve tokluk değerlerini sağlamıştır. Kırıklar, bu beton yapı elemanlarında 3 boyutlu gerilme şartları tarafından yönetilen ve bu şartlara göre yönleri değişebilen zayıflık düzlemleri olarak karşımıza çıkarlar. Beton kolonlardaki/kirişlerdeki mikro-kırıkların genellikle görünür izlerinden çok daha ileriye uzandığı tespit edilmiştir. Kırık uzanımlarının görünmeyen kısımları Gökay (2016) tarafından gerçekleştirilen elektriksel özdirenç ölçüm testi sonuçlarında görüntülenmiştir. Bu araştırmada, ölçüm alanı olarak tarif edilen (*görünen kırıklar ve görünmeyen kırıkları kapsadığı düşünülen*), kolon veya kiriş parçaları üzerine işaretlenen ağ-örgü noktalarına göre alınan elektriksel özdirenç değerleri, görünmeyen çatlaklardan dolayı oluşan elektriksel direnç farklılıklarıyla insanlar için fark edilemeyen (görünmeyen) çatlakların yerlerini (izlerini) belirgin hale getirmiştir.

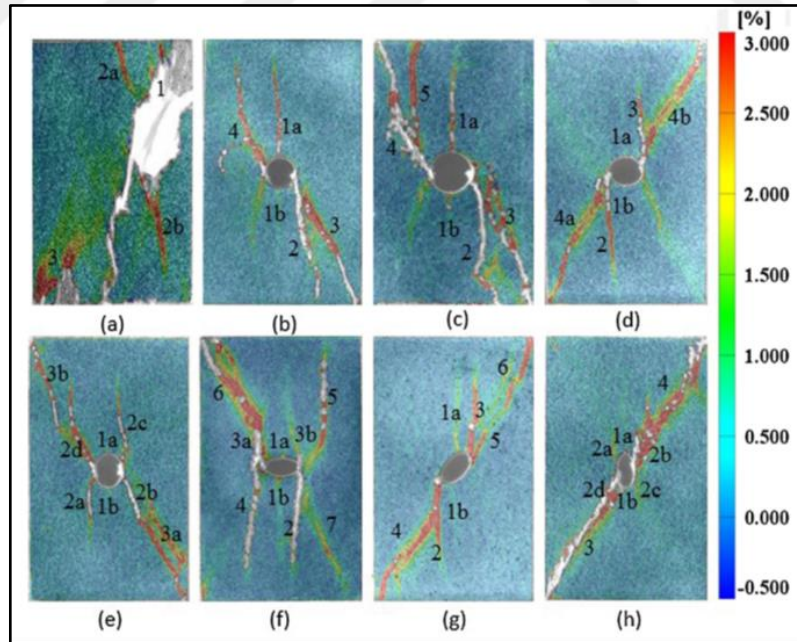
Çatlak belirleme yöntemlerinin (*akustik emisyon, elektriksel özdirenç, elektro manyetik rezonans görüntüleme teknikleri, vb.*), birlikte kullanım kombinasyonları, bunlara ilave olarak, DIC analizleri, test numunelerinde gerilme-deformasyon dağılımları, numune yüzeylerinde çatlama (kırık) izlerinin haritalanması ve analizi katı maddelerde çatlak başlangıçlarının tayini ve bunların ilerleme mekanizmasının nedenlerini kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Betonarme kolonlarda başlayan ve yayılan kırıklar, mühendisler tarafından duraylılık ile ilgili önlemler almak ve güvenlik prosedürleri oluşturmak için yıllardır üzerinde çalışılan konulardandır. Kırılma başlangıç konumlarını ve beklenen kırılma yayılma yönlerini belirlemek için DIC analizleri, pratik mühendislik operasyonlarında uygun imkânlar sağlamaktadır.

Mühendisler genellikle laboratuvar/saha numunelerindeki kırıkları, örneğin; petrol ve jeotermal rezerv aramalarında, betonarme kolon kusurları vb. araştırmalarda incelemek isterler. Deney numunelerine takılan çeşitli sensörler aracılığıyla DIC ve akustik emisyon analizleri, örneğin Alam ve diğerleri (2014) tarafından kullanılmıştır. Bu araştırmacılar, akustik emisyon verileri aracılığıyla numunelerin iç gövde kısımlarını detaylı olarak değerlendirerek buralardaki kırık başlangıçlarını ve yayılımlarını incelemişlerdir.

Bu araştırma örneklerine ek olarak, Li ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmalardan da bahsetmek gerekir. Bu araştırmacılar, mermer numunelerindeki dairesel ve eliptik kesit alanlı deliklerin çevresinde oluşan kırıklar üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar, mikro düzeydeki yer değiştirmeleri, çatlakların başlama ve genişleme aşamalarını (Şekil 2.13) belirlemek için DIC test prosedürlerini ve analizlerini uygulamışlardır. Burada sunulan DIC grafikleri, üzerinde çalışılan test numunelerinin kırılma başlangıç aşamalarını ve kırılma izlerini göstermektedir, (Numuneler: 3 sağlam plaka, 6 dairesel delikli plaka (çap farklılıklarına göre A ve B tipleri), 15 eliptik delikli plaka numunesi (konum konfigürasyonlarına göre A, B, C, D ve E tipleri) olmak üzere toplam 24 numune). Bu çalışmada, deneyler için hazırlanan mermer plakaların boyutları, mermer kesim prosedürleri nedeniyle biraz farklılaşmış ve deney numune boyutları şu değerler arasında değişmiştir: (59.90-60.22)x(99.35-100.15)x(14.89-15.10) mm. Bu çalışmada mermer plaka örneklerinin merkezinde 10 mm ve 15 mm çaplarında dairesel delikler açılmıştır. Eliptik delikli mermer plaka örnekleri ise uzun eksenleri (12 mm) ve kısa eksenleri (10 ve 6 mm) uzunluğunda olacak şekilde düzenlenmiştir. Eliptik delikler, uzun eksenlerinin yatay doğrultuda (merkezlerinden geçen) uzama açılarına göre (0°, 45°, 90°) farklı konumlandırılmıştır.

Seçilen mermer plakalar için DIC prosedürleri (Şekil 2.13) aracılığıyla gerçekleştirilen kırılma analizleri aşağıdaki gibidir: İçinde delik olmayan sağlam plaka numunesi (Şekil 2.13a'da Sağlam-3); Çapları 10 mm (Şekil 2.13b'de Daire-10-1) ve 15 mm (Şekil 2.13c'de Daire-15-3) olan dairesel deliklere sahip plaka numuneleri. Eliptik deliklere sahip plaka numuneleri şu şekilde yapılandırılmıştır; (uzun eksen uzunluğu, mm; kısa eksen uzunluğu, mm; eğim açıları, derece): [(Şekil 2.13.d'de Eliptik-A-2: (12, 10, 0 °)); (Şekil 2.13.e'de Eliptik-B-1: (12, 10, 90°)); (Şekil 2.13.f'de Elips-C-3: (12, 6, 0 °)); (Şekil 2.13.g'de Elips-D-2: (12, 6, 45°)); (Şekil 2.13.h'de Eliptik-E-1: (12, 6, 90°))]. Bu çalışmada da görüleceği gibi, çatlak oluşumu ve gelişmesi uygulanan gerilmenin artmasıyla devam etmekte ve çatlakların oluşumları birbirlerini takip eden ilerleme

aşamalarıyla devam etmektedir. Deney yapılan numuneler içinde gelişen gerilme-deformasyon şartları, (numune yapısının homojen olması durumunda) çatlakların ilerleme yönünün oluşmasında belirleyici unsur olmaktadır. Masif mermer numuneler için verilen yukardaki çatlak aşamaları (Şekil 2.13) örnekleri; betonarme kolon örneklerinde yapılan deneyler kapsamında gelişen çatlak örnekleri [deliksiz ve delik içeren laboratuvar ölçekli betonarme kolon örneklerinde gözlenen çatlak izlerinde (Şekil 2.6, ((Son ve diğ., 2006); Şekil 2.8, (Campioni ve diğ., 2015)], katkılı küp beton laboratuvar örneklerinin kırılma aşamalarındaki çatlak izleri [Şekil 2.12, (Cheng ve diğ., 2023)], katı maddelerin kırılma aşamalarında malzeme dayanıklılığının, malzeme genel tokluk (gerime-deformasyon eğrisi altındaki alan büyüklüğü) özelliklerinin önemi konusunda ipuçları sunarken, çatlakların başlaması ve ilerlemesinin de katı maddelerin parçalanması aşamasındaki önemini ortaya koymuştur. Bu açıdan bakıldığında özellikle çatlakların uç vermesinden sonra ilerlemesinin hangi şartlarda değiştiğinin gözlenmesi, ilerlemenin bağlı olduğu parametrelerin incelenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle, katı maddelerdeki çatlakların oluşum ve ilerleme mekaniğinin araştırılmasında, çatlak (kırılma) mekaniği önemli bir yer tutar.



Şekil 2.13. Mermer numunelerinde farklı delik tiplerindeki ana gerilim dağılımları: (a) Sağlam-3; (b) Daire-10-1; (c) Daire-15-3; (d) Elips-A-2; (e) Elips-B-1; (f) Elips-C-3; (g) Elips-D-2 ve (h) Elips-E-1. Test numuneleri üzerinde meydana gelen kırıklar sıralarına göre numaralandırılmıştır, (Li ve diğ., 2017).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneylerde Kullanılacak Numunelerin Temini

Tez çalışmasında kullanılacak numuneler, maden ocaklarından ve doğal taş işleme tesislerinin stok sahalarından bloklar şeklinde temin edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Blok şeklinde maden ocağından ve stok sahalarından temin edilen numunelerin görünümü; a) Meram Andezit ocak görünümü, b) Evliyatekke Tüf numuneleri c) Karaman Traverten numuneleri, d) Afyon Gri Mermer numuneleri, e) Meram Andezit numuneleri.

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Blok olarak temin edilen numuneler, temel kaya mekaniği deneyleri ve diğer deneyler için gerekli şekil ve boyutlarda hazırlanmıştır. Öncelikle karot alma makinesi ile 54 mm ve 100 mm çapında karot alınmıştır (Şekil 3.3). Elde edilen karotlar ilgili deneyler için dairesel testereli numune kesme makinesi kullanılarak deney standartlarına uygun boyutlara getirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Karotiyer ve Dairesel Testereli Numune Kesme Makinesi.

Yarım disk çentikli numunelerin hazırlanabilmesi için, 100 mm'lik karotiyer ile alınan karotlar, dairesel testere kullanılarak yarım disk şekline getirilmiştir. Daha sonra bu numuneler üzerinde çentik açılması amacıyla KTÜN-SÜSEM bünyesinde bulunan 1,5 mm'den daha ince olan hassas dairesel testere kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.3. Karot alma işlemi sonrası blok numunelerin görünümü.



Şekil 3.4. Yarım disk numune üzerinde çentik açma işlemi.

Doğal kayaç numunelerinden, prizmatik numuneler (50x50x150mm) elde etmek amacıyla Maden mühendisliği laboratuvarında bulunan dairesel testereli numune kesme makinesi kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerin orta noktalarına 8 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm çapında delikler matkap kullanılarak açılmıştır (Şekil 3.5).

Yapay kayaç (beton, alçı) numunelerini simüle etmek için, alçı bazlı numunelerin hazırlanmasında %75 oranında alçı tozu (hrn- α) ve %25 oranında musluk suyu kullanılmıştır. Prizmatik numuneler elde etmek için özel kalıplara dökülen alçı tozu karışımı katılaştıktan sonra kalıplardan çıkarılmış ve üzerlerinde 8 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm'lik delikler açılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Üzerine delik açılmış prizmatik numuneler.

Alçı bazlı deney numunelerinin SCB Mod-1 kırılma tokluğu değerlerinin hesaplanması amacıyla yarım disk numuneler elde etmek için öncelikle 150x150x150 mm ölçülerine sahip küp kalıp içine alçı tozu karışımı dökülmüştür. Katılaştıran numuneler kalıptan çıkarılarak 100 mm çapındaki karotiyer kullanılarak karotlar elde edilmiştir. Elde edilen karotlardan dairesel testereli numune kesme makinesi kullanılarak yarım disk numuneler elde edilmiştir. Yarım disk numuneler üzerinde 1,5 mm'den ince olacak şekilde çentikler açılmıştır.

Hazırlanan tüm numuneler deneylerden önce isimlendirilmiş ve numune boyutları dijital kumpas ile ölçülerek kaydedilmiştir.

Deneyler esnasında video kaydı alınıp daha sonra görüntü işleme yöntemleri ile analiz edilecek numunelerin yüzeylerine spreyci boya ile desenler oluşturulmuştur.

3.3. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri

Tez çalışmasında kullanılacak doğal kaya numunelerinin temel kaya mekaniği özelliklerini belirlemek amacıyla ISRM standartlarına uygun olarak; Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, Schmidt sertlik belirleme deneyi, Nokta yükleme dayanımı deneyi, Endirekt çekme dayanımı (Brazilian) deneyi, Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin uygulanması ile ilgili bilgiler ve deney sonuçları bu tez çalışmasının 4. bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

Kaya mekaniği deneylerine ek olarak, kayaçların kırılma tokluğu değerinin belirlenmesi için Kırılma tokluğu deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu deney yöntemi kayaçların tekrarlı darbelere karşı gösterdiği direncin belirlenmesinde kullanılmaktadır ve 1943 yılında İsveç'te Matern & Hjelm tarafından geliştirilmiştir. Deney süreci ve sonuçları ile ilgili detaylar 4. bölümde verilmiştir.

3.4. Çentikli Yarım Disk Numune İçin Mod-1 Kırılma Tokluğu Belirlenmesi

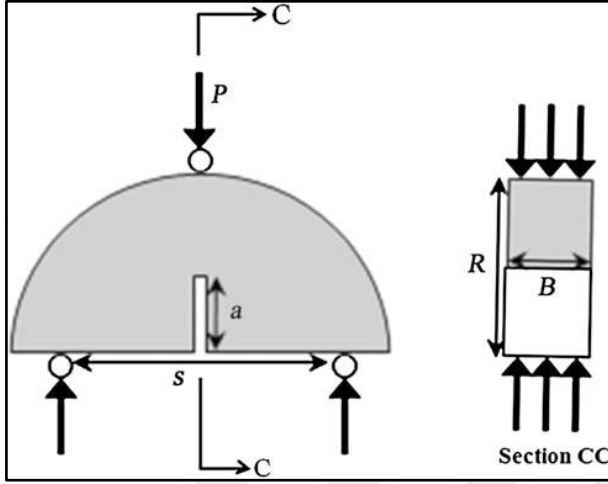
Metodu

Katı maddelerin yenilmesinde önemli yer tutan Y , U ve F değerleri ve bunların ifade ettiği katı madde içindeki çatlaklılık durumu, direkt olarak katı maddenin tokluğunu etkilemektedir. Çatlaklılık durumunun analizi, çatlak mekaniği kapsamındaki incelemelerde “çentik deneyleri” ile gerçekleştirilmektedir.

Bu deney, Mod-1 statik kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerini ölçmek amacıyla, dinamik yükleme etkilerini engellemek için yavaş yükleme hızlarında uygulanan bir yöntemdir (Kuruppu ve diğ., 2014). Deneyde kullanılan numuneler yarım disk şeklinde ve bir çentik içerecek biçimde hazırlanmaktadır, bu deneylerde yükleme hızı 0,2 mm/dk veya daha yavaş olmalıdır. Disk numuneler içine açılan çentiğin 1,5 mm'den ince olması gereklidir. Deney numunesi için tavsiye edilen ölçüler Çizelge 3.1' de sıralanırken, numune şekli, özellikleri ve yükleme şartları da Şekil 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.1. SCB numunesi için tavsiye edilen geometrik ölçüler, (Kuruppu ve diğ., 2014).

Tanımlar	Değerler/Aralıklar
Çap(D)	Tane boyutunun 10 katından veya 76 mm'den büyük
Kalınlık(B)	0,4 D 'den büyük veya en az 30 mm
Çentik Uzunluğu (a)	$0,4 \leq a/R (= \beta) \leq 0,6$
Mesnetler Arası Mesafe (s)	$0,5 \leq s/2R \leq 0,8$



R : Yarıçap,
P : 3 noktadan eğilme deneyinde, yükleme hızına bağlı olarak düzenli bir şekilde artan basıncın uygulandığı nokta,
a : Çentik uzunluğu,
B : Numune kalınlığı,
S : Alt taraftaki pimler arası mesafe,

Şekil 3.6. SCB numune geometrisi ve şematik yükleme düzeni, (Kuruppu ve diğ., 2014).

Mod-1 kırılma tokluğu K_{Ic} hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılır (Kuruppu ve diğ., 2014);

$$K_{Ic} = Y' \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (3.1)$$

K_{Ic} : Mod- 1 kırılma tokluğu,

a: Çentik uzunluğu,

Y' : Gerilme şiddet faktörü,

R: Numune yarıçapı,

P_{max} : Maksimum yük,

B: Numune kalınlığı,

3.5. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Analizleri İçin Veri Seçimi Algoritması

Dijital görüntü korelasyonu için kullanılan yazılımlarda girdi olarak numunenin ilk durumunu gösteren görüntünün referans görüntü olarak yüklenmesi önemlidir. Bu referans görüntü ile karşılaştırılma yapılabilmesi için deney süresince elde edilen

fotoğraflar ilgili programa istenilen sayıda yüklenir. Yapılan deneylerde, deney süresine, yükleme hızına ve saniyede çekilen kare sayısına göre elde edilen görüntü sayısı numune başına 10000 ile 200000 arasında değişmektedir. Bu fotoğraflar arasından seçim yapabilmek amacıyla bir algoritma geliştirilmiştir. Öncelikle numunenin stabil hale geldiği an ve kırılma anı belirlendikten sonra, bu anlardaki (bu iki zaman noktasındaki) görüntülerin dosya numarası tespit edilir. Numunenin yenilme anına yaklaştıkça numunedeki değişimin daha hızlı olacağı düşünülerek görüntü seçme sıklığı deney sonuna doğru artacak şekilde ayarlanmıştır. Bu algoritma, numunenin yüklenmeye başladığı an ve kırılma anı ile kaç adet görüntü seçileceği şeklinde girdiler kullanılarak ilgili görüntü seçimini yapabilmektedir. Algoritmanın çalışma mantığı çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Grupların başlangıç ve bitiş numaraları çizelge 3.2’de gösterildiği şekilde oluşturulur. Seçilmek istenen toplam görüntü sayısı “M” ise, her gruptan “M/10” adet görüntü seçilerek elde edilmektedir.

Çizelge 3.2. Veri seçimi için kullanılan algoritmanın çalışma prensibi.

Grup	Grup Aralığı	Başlangıç	Bitiş
1	N/2	Grup1_Başlangıç: X	Grup1_Bitiş = Grup1_Başlangıç + N/2
2	N/4	Grup2_Başlangıç= Grup1_Bitiş	Grup2_Bitiş = Grup2_Başlangıç + N/4
3	N/8	Grup3_Başlangıç= Grup2_Bitiş	Grup3_Bitiş = Grup3_Başlangıç + N/8
4	N/16	Grup4_Başlangıç= Grup 3_Bitiş	Grup4_Bitiş = Grup4_Başlangıç + N/16
5	N/32	Grup5_Başlangıç = Grup4_Bitiş	Grup5_Bitiş = Grup5_Başlangıç + N/32
6	N/64	Grup6_Başlangıç= Grup5_Bitiş	Grup6_Bitiş = Grup6_Başlangıç + N/64
7	N/128	Grup7_Başlangıç = Grup6_Bitiş	Grup7_Bitiş = Grup7_Başlangıç + N/128
8	N/256	Grup8_Başlangıç = Grup7_Bitiş	Grup8_Bitiş = Grup8_Başlangıç + N/256
9	N/512	Grup9_Başlangıç = Grup8_Bitiş	Grup9_Bitiş = Grup9_Başlangıç + N/512
10	N/512	Grup10_Başlangıç= Grup9_Bitiş	Grup10_Bitiş= Grup 10_Başlangıç + N/512 = Y

Burada: X: Numunenin Yüklenmeye Başladığı Andaki Görüntü Numarası,

Y: Yenilme Anındaki Görüntü Numarası,

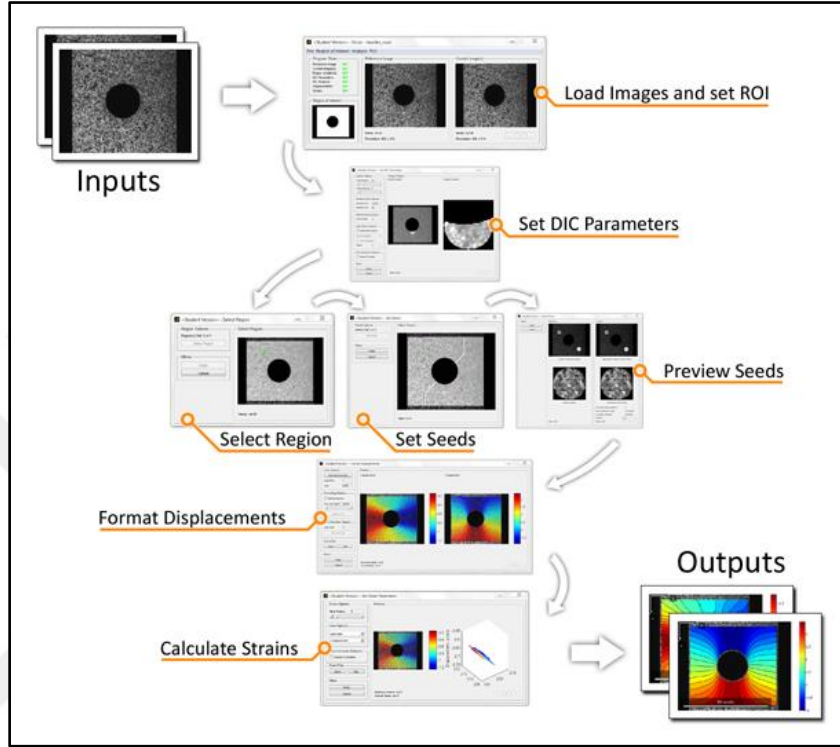
N= Y- X : Verilerin Seçileceği Aralıktaki Görüntü Sayısı.

3.6. Ncorr Programı

Ncorr programı MATLAB temelli çalışan, açık kaynak kodlu 2 boyutlu bir dijital görüntü korelasyonu (DIC) yazılımıdır. Georgia Teknoloji Enstitüsü, (Atlanta, ABD) bünyesinde geliştirilmiştir.

Açık kaynak olarak sunulan bu programla, dijital görüntüler üzerinden iki boyutlu deplasman analizleri yapılabilmektedir. Bu programa önce üzerinde çalışılacak referans

görüntü eklendikten sonra, özellikle incelenecek olan alan bu görüntü üzerinde işaretlenir. Daha sonra sırayla, zaman akışına göre diğer görüntüler (yapılan deneyler sırasında elde edilen görüntüler) programa yüklenir ve ilgili ayarlar yapıldıktan sonra analiz başlatılır. Programın işlem aşamaları Şekil 3.7’ de verilmiştir.



Şekil 3.7. Ncorr programı işlem aşamaları, (Blaber, 2024).

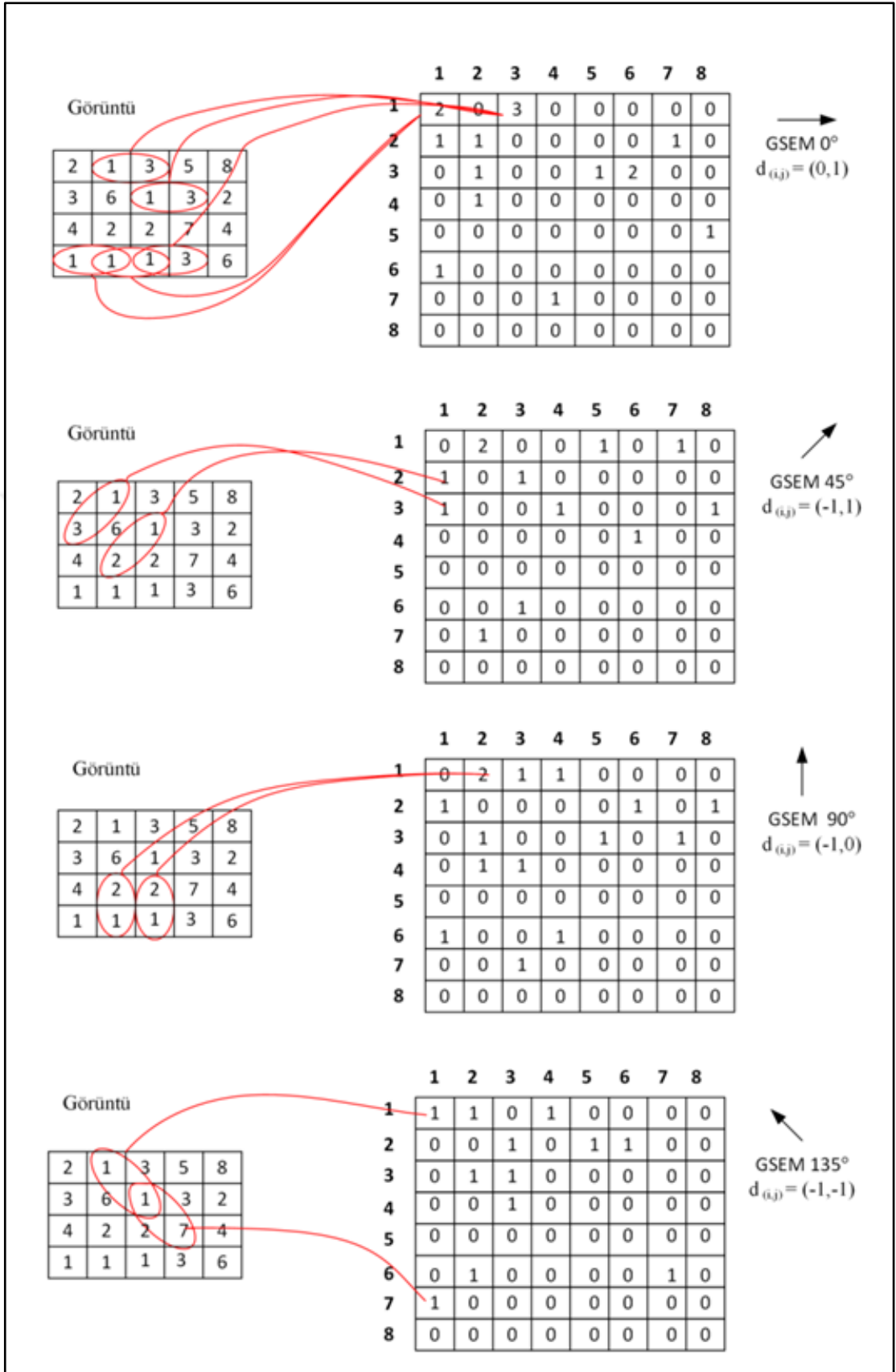
3.7. Gri Seviye Eş Oluşum Matrisi (GLCM)

Gri seviye eş oluşum matrisi yöntemi gri seviye görüntü içindeki iki farklı pikselin aralarındaki ilişkiyi inceleyen bir özellik çıkarma yöntemidir. Yöntemde ilk önce belirli değerler ve mekânsal ilişkiler içinde piksel çiftlerinin görülme sıklığı hesaplanır ve GLCM oluşturulur. Sonraki aşamada bu matris kullanılarak analizde kullanılacak özellikler çıkarılır. GLCM belli bir yönde aralarında belli bir uzaklık olan gri seviyeli bir çift pikselin birbirlerine göre oluşma sıklıklarını veren bir kare matristir. Bu matris pikseller arasındaki uzaklık d ve açı θ iken gri seviye i 'den, gri seviye j 'ye geçme olasılığını gösterir. Bu matris üzerinde genellikle $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ve 135° olacak şekilde dört yönde inceleme yapılır.

GLCM için Matlab programının “graycoprops” fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon görüntüye ait kontrast, korelasyon, enerji ve homojenlik özelliklerinin çıkarılmasını sağlamaktadır (Şekil 3.8.).

Görüntüler seçildikten sonra yapılacak çalışmayla ilgili klasöre kaydedilir. Görüntülerin analizden önce, deneyler sırasında kameraların kaydettiği görüntülerin kırılması gerekli olan kısımları için ilgili piksel bilgileri programa girilerek bunların kırılması sağlanır. Görüntü istenilen şekilde kırıldıktan sonra gri görüntüye dönüştürülür ve GLCM analizi yapılır. GLCM özellikleri ve formülleri Çizelge 3.5’te verilmiştir. Kullanılan programın arayüzü Şekil 3.9’da verilmiştir.

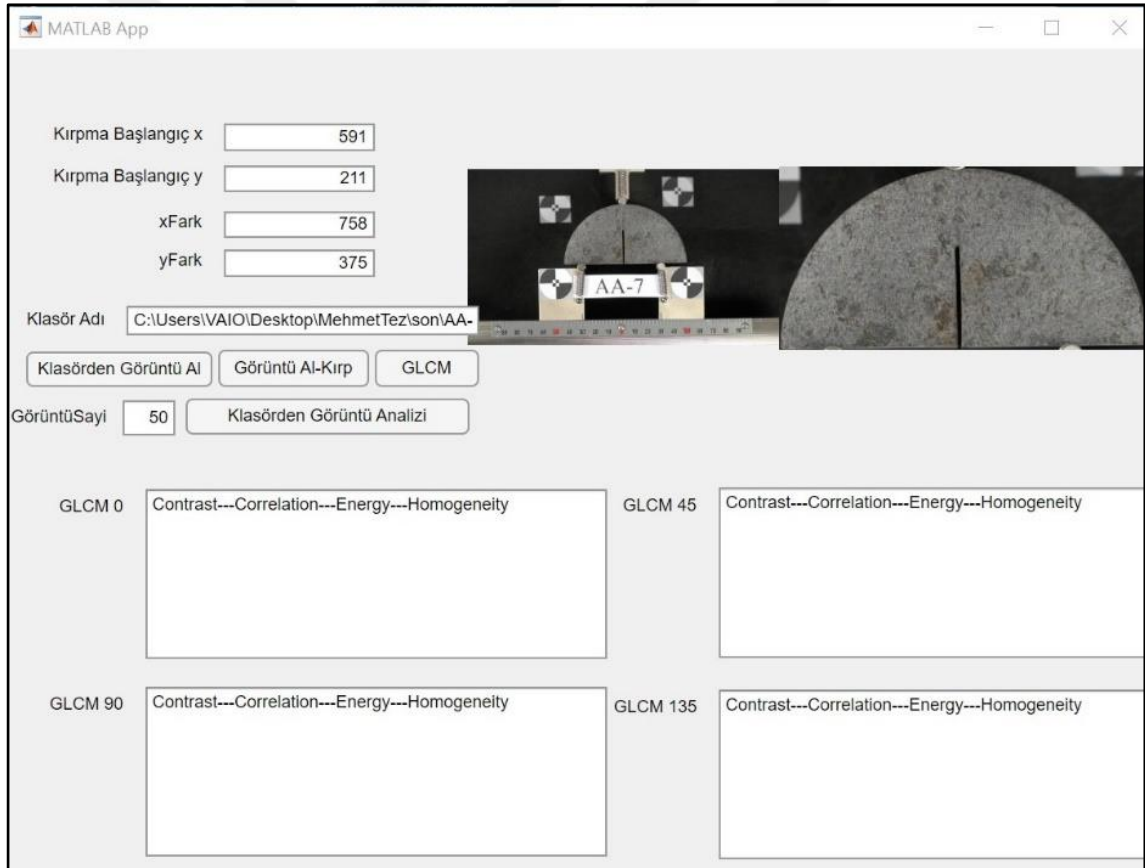




Şekil 3.8. Görüntüden GLCM oluşturma işlemi, (Uzbaş, 2017).

Çizelge 3.5. GLCM özellikleri, tanımları ve formülleri, (Anonymous, 2024).

Özellik	Tanım	Formül
Kontrast	Gri seviye eş oluşum matrisindeki yerel varyasyonları ölçer. Bir piksel ile komşusu arasındaki yoğunluk zıtlığıdır. Sabit görüntülerde kontrast 0'dır.	$\sum_{i,j} i - j ^2 p(i, j)$
Korelasyon	Belirtilen piksel çiftlerinin bileşik olasılığını ölçer. Birbiri ile tamamen pozitif ilişkili görüntülerde 1 ve tamamen negatif ilişkilerde -1'dir.	$\sum_{i,j} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)p(i, j)}{\sigma_i \sigma_j}$
Enerji	GLCM'deki karesi alınmış elemanların toplamını verir. Üniformalık veya açısal ikinci moment olarak da bilinir.	$\sum_{i,j} p(i, j)^2$
Homojenlik	GLCM'deki öğelerin GLCM köşegenine yakınlığını ölçer.	$\sum_{i,j} \frac{p(i, j)}{1 + i - j }$



Şekil 3.9. GLCM analizi için kullanılan programın arayüz görüntüsü.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri

Deneylerde kullanılan numuneler, bloklar (büyük parçalar) halinde temin edilmiştir (blok boyutları ~30x30x40 cm). Temin edilen numuneler, Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletmesi Laboratuvarında bulunan karot alma makinesiyle ve dairesel testere ile boyutlandırılıp kesildikten sonra, numune düzgünlük kontrolleri yapılmış ve deney yapmaya hazır hale getirilmiştir.

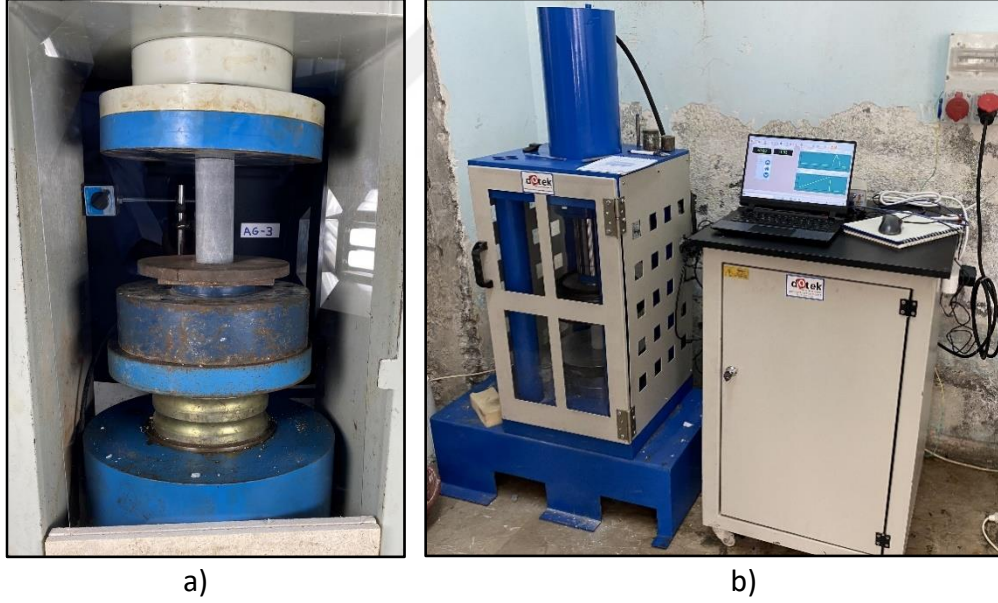


Şekil 4.1. Karot alma işlemi.

4.1.1. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Bu deneyin yapılmasındaki amaç düzgün geometrik şekilli kaya numunelerinin ISRM önerilerine göre tek eksenli basınç dayanımlarının ölçülmesidir. Kayaların basınç dayanımı, kaya maddesi ve kütlesinin tanımlanmasında, kayaçların mukavemetlerini tanımlama işlemlerinde ve kayaç dayanım ve/veya kütle sınıflandırmaları için kullanılmaktadır. Deneylerde küp numuneler kullanılabileceği gibi silindirik karot numuneler de kullanılabilmektedir. NX karot standartlarındaki silindirik numunelerin çapının en az 54 mm ve boy/çap oranının 2,5-3,0 arasında olması gereklidir. Deney yapılacak bölüm laboratuvarında bulunan karot alma makinası ile bu deney için silindirik

numuneler elde edilmiş, gerekli kontroller yapıldıktan sonra ve boyutları ölçüldükten sonra numaralandırılmıştır. Bu numuneler üzerinde yapılacak deneyler sırasında DIC yöntemine göre veri toplanması için, numunelerin seçilen bir yüzeyinde siyah noktalamalar elde etmek amacıyla spreyci boya ile desen oluşturulmuştur. Daha sonra hazırlık işlemleri tamamlanan numuneler, KTÜN-Maden Müh. Bölümü ve İnşaat Müh. Bölümü laboratuvarlarında bulunan hidrolik pres ile uygun yükleme hızında deneylere tabi tutulmuştur. Bu deneyler yapılırken, DIC yöntemine göre görüntü kaydı alınabilmesi için, hidrolik pres ile görüntü algılayıcı kamera & ışık sistemi arasına 3 mm kalınlığında şeffaf koruyucu bir plaka yerleştirilmiştir. Bu plaka deney sırasında DIC sistemi kameralarını kontrol etmesi gereken kişilerin korunmasında da yardımcı olmuştur. Hidrolik preste deney yaparken deney numunesi kayalarından ani olarak kaya parçası fırlamasının olma olasılığı nedeniyle bu koruyucu tedbirleri almak iş güvenliği kurallarına uygun bir davranış olmuştur (Şekil 4.2.). Deneylerde kullanılan numunelerin bir kısmı Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Maden laboratuvarı tek eksenli basınç dayanımı deney düzeneği ve Koruyucu Plaka Kullanımı,
b) İnşaat mühendisliği zemin laboratuvarı hidrolik pres.

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin yapıldığı laboratuvarlarda hidrolik presin yükleme hızı; ISRM standartlarına uygun olacak şekilde, bir numunenin 5 ila 10 dakika arasında yenilmesini sağlayacak şekilde veya 0,5-1,0 MPa/sn yükleme hızına uygun olacak şekilde ayarlanmıştır.

Deneye tabi tutulan numunelerin boyutları, yenilme yükleri ve tek eksenli basınç dayanımları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir (Çizelge 4.1., 4.2., 4.3., 4.4., 4.5., 4.6.).



Şekil 4.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney numuneleri.

Çizelge 4.1. Meram Andezit kayacına ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	Numune Çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Kırılma Yükü (kN)	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)
MA-1	53,09	141,74	93,67	42,32
MA-2	52,53	141,61	84,88	39,17
MA-3	52,54	141,19	85,52	39,45
MA-4	52,54	141,64	69,25	31,94
MA-5	52,55	140,84	108,57	50,06
MA-6	52,55	141,73	67,57	31,16
MA-7	52,61	141,71	131,41	60,46
MA-8	52,55	141,14	156,54	72,18
MA-9	52,52	141,25	82,54	38,10
MA-10	52,53	141,79	62,66	28,91
Ortalama σ_c : 43,37 MPa S.Sap: ±13,10				

Çizelge 4.2. Ankara Andezit kayacına ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	Numune Çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Kırılma Yükü (kN)	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)
AA-1	55,56	141,74	142,68	58,85
AA-2	54,46	142,09	143,16	61,46
AA-3	54,51	141,57	136,56	58,52
AA-4	54,95	140,87	129,29	54,52
AA-5	54,34	141,20	119,17	51,39
AA-6	54,44	140,92	198,10	85,11
AA-7	54,44	141,18	129,48	55,63
AA-8	54,39	140,59	146,66	63,13
AA-9	54,36	140,95	155,66	67,08
AA-10	54,42	141,45	102,53	44,09
Ortalama σ_c : 59.98 MPa S.Sap: ± 10.36				

Çizelge 4.3. Afyon Gri Mermer kayacına ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	Numune Çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)
AG-1	54,18	139,84	178,40	77,39
AG-2	54,23	139,61	64,77	28,05
AG-3	54,23	139,58	126,26	54,67
AG-4	54,25	139,43	464,69	201,01
AG-5	54,27	139,36	83,31	36,02
AG-6	54,29	139,71	171,15	73,93
AG-7	54,49	139,08	70,44	30,21
AG-8	54,13	139,53	177,00	76,90
AG-9	54,26	139,70	133,92	57,91
AG-10	54,19	139,37	250,24	108,50
Ortalama σ_c : 74,46 MPa S.Sap: $\pm 48,42$				

Çizelge 4.4. Evliyatekke Tüf kayacına ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	Numune Çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)
ET-1	53,67	150,67	15,72	6,95
ET-2	53,74	150,67	21,98	9,69
ET-3	53,72	150,32	19,35	8,54
ET-4	53,56	150,41	17,01	7,55
ET-5	53,62	150,58	17,65	7,82
ET-6	53,80	150,19	22,33	9,82
ET-7	53,77	150,27	13,91	6,13
ET-8	53,73	150,35	20,81	9,18
ET-9	53,75	150,36	16,37	7,21
ET-10	53,79	150,25	16,48	7,25
Ortalama σ_c : 8,01 MPa S.Sap: $\pm 1,18$				

Çizelge 4.5. Silile Andeziti kayacına ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	Numune Çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)
SA-1	54,24	140,86	40,10	17,35
SA-2	54,11	140,69	35,30	15,35
SA-3	54,08	140,85	33,90	14,76
SA-4	54,08	140,69	45,40	19,76
SA-5	54,07	140,70	40,00	17,42
SA-6	54,13	140,87	41,20	17,90
SA-7	54,07	140,75	41,00	17,85
SA-8	54,11	140,88	53,80	23,40
SA-9	54,10	140,88	55,10	23,97
SA-10	54,07	141,08	38,10	16,59
Ortalama σ_c : 18,44 MPa S.Sap: $\pm 2,94$				

Çizelge 4.6. Karaman Traverteni kayacına ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	Numune çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)
KT-1	54,09	150,10	87,7	38,17
KT-2	54,21	150,02	79,1	34,27
KT-3	54,15	149,83	62,4	27,09
KT-4	54,18	150,09	89,1	38,65
KT-5	54,09	149,74	82,4	35,86
KT-6	54,20	149,72	84,7	36,71
KT-7	54,17	150,15	80,7	35,02
KT-8	54,07	149,81	90,8	39,55
KT-9	54,11	149,65	83,6	36,36
KT-10	54,10	150,04	103,8	45,16
Ortalama σ_c : 36,68 MPa S.Sap: $\pm 4,33$				

4.1.2. Schmidt sertlik belirleme deneyi

Bu deney genel olarak kayaların sertliğini belirlemek ve dolaylı yoldan tek eksenli basınç dayanımlarını tahmin etmek amacıyla yapılır. KTÜN-Maden Müh. Bölümü, Maden İşletme Laboratuvarında bulunan L tipi Schmidt çekici ile, temin edilen blok numuneler üzerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sırasında her bir numune için 20 noktaya 5'er defa 90° açıyla Schmidt çekici uygulanmıştır. Elde edilen ölçümlerden en yüksek olanları seçilerek, her kayaç örneği için 20 adet değer elde edilmiştir. Elde edilen sertlik değerleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Yapılan deney okumalarından sonra her kayaç örneği için ortalama Schmidt sertliği değeri hesaplanırken en yüksek 10 ölçüm değeri göz önüne alınmıştır. Bu deneylerde kullanılan Schmidt çekici, deneyler öncesinde "kalibrasyon örsü" kullanılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonrası belirlenen düzeltme katsayısı kullanılarak, deneyler sırasında okunan ölçüm değerleri düzeltilmiş ve nihai sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 4.7. Meram Andezit, Schmidt sertlik belirleme dayanımı deney sonuçları.

Ölçüm No	Sertlik değeri	Ölçüm No	Sertlik değeri
1	53	11	59
2	57	12	59
3	57	13	59
4	57	14	59
5	58	15	59
6	58	16	60
7	58	17	60
8	58	18	61
9	58	19	61
10	59	20	62
Ortalama: 59,90 S.Sap: $\pm 1,04$ Düzeltilmiş: 68,89			

Çizelge 4.8. Ankara Andezit, Schmidt sertlik belirleme dayanımı deney sonuçları.

Ölçüm No	Sertlik değeri	Ölçüm No	Sertlik değeri
1	49	11	54
2	51	12	55
3	52	13	55
4	52	14	56
5	53	15	56
6	53	16	56
7	53	17	57
8	54	18	57
9	54	19	57
10	54	20	57
Ortalama: 56,00 S.Sap: ±1,00 Düzeltilmiş: 64,40			

Çizelge 4.9. Afyon Gri Mermer, Schmidt sertlik belirleme dayanımı deney sonuçları.

Ölçüm No	Sertlik değeri	Ölçüm No	Sertlik değeri
1	61	11	66
2	62	12	66
3	63	13	66
4	63	14	66
5	64	15	66
6	64	16	67
7	64	17	67
8	64	18	68
9	66	19	68
10	66	20	70
Ortalama: 67,00 S.Sap: ±1,33 Düzeltilmiş: 77,05			

Çizelge 4.10. Evliyatekke Tüf, Schmidt sertlik belirleme dayanımı deney sonuçları.

Ölçüm No	Sertlik değeri	Ölçüm No	Sertlik değeri
1	23	11	33
2	27	12	33
3	28	13	34
4	29	14	34
5	29	15	34
6	29	16	35
7	30	17	37
8	31	18	38
9	31	19	42
10	31	20	42
Ortalama: 36,20 S.Sap: ±3,46 Düzeltilmiş: 41,63			

Çizelge 4.11. Silile Andeziti, Schmidt sertlik belirleme dayanımı deney sonuçları.

Ölçüm No	Sertlik değeri	Ölçüm No	Sertlik değeri
1	29	11	36
2	30	12	36
3	30	13	38
4	31	14	39
5	31	15	39
6	32	16	40
7	32	17	40
8	34	18	40
9	35	19	41
10	36	20	42
Ortalama: 39,10 S.Sap: ±1,97 Düzeltilmiş: 44,97			

Çizelge 4.12. Karaman Traverteni, Schmidt sertlik belirleme dayanımı deney sonuçları.

Ölçüm No	Sertlik değeri	Ölçüm No	Sertlik değeri
1	51	11	48
2	46	12	49
3	45	13	45
4	47	14	52
5	46	15	48
6	56	16	45
7	46	17	42
8	54	18	49
9	48	19	48
10	47	20	49
Ortalama: 50,40 S.Sap: ±2,80 Düzeltilmiş: 57,96			

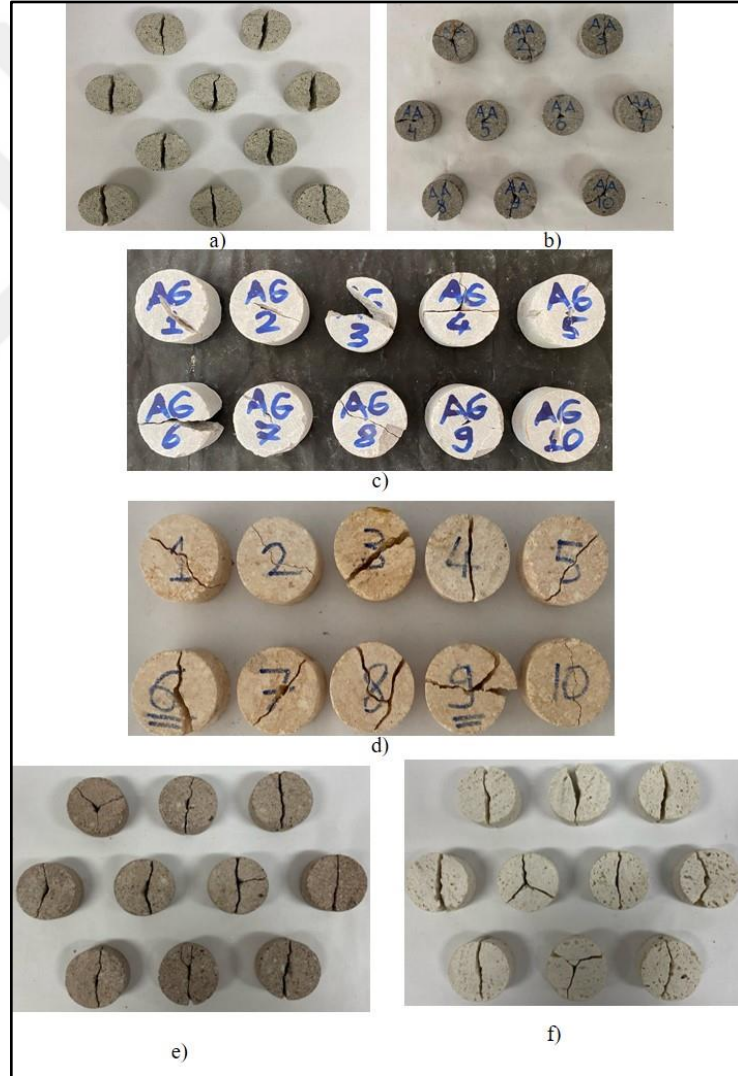
4.1.3. Nokta yükleme dayanımı deneyi

Nokta yükleme dayanımı deneyi kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılması için kullanılan bir indeks deneyidir. Nokta yük dayanım deneyi sonucundan yola çıkılarak tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı gibi özelliklerin tahmin edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Deneyde kullanılacak numuneler silindirik karot şekilli veya blok biçiminde olabileceği gibi düzgün olmayan parçalar halinde de olabilir. Bu deneyde kullanılan nokta yükleme deney düzeneği Şekil 4.4'te görüldüğü gibidir.

Bu çalışma sırasında, nokta yükleme dayanımı deneyi için, disk şeklindeki numuneler kullanılmıştır ve eksenel nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda geçerli şekilde kırılan numuneler Şekil 4.5'teki gibidir. Deneye tabi tutulan numunelerin ölçüleri, kırılma yükleri ve nokta yükleme dayanımlarını gösteren çizelgeler aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.13., 4.14., 4.15., 4.16., 4.17., 4.18.).



Şekil 4.4. Nokta yükleme deney düzeneği.



Şekil 4.5. Nokta yükleme dayanımı deneyi numunelerinin deney sonrası görüntüleri; a) Meram Andezit, b) Ankara Andezit, c) Afyon Gri Mermer, d) Evliyatekke Tuf, e) Silile Andeziti, f) Karaman Traverteni

Çizelge 4.13. Meram Andezit numunelerinin nokta yükleme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap D (mm)	Kalınlık, w (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Düzeltilmiş Nok. Yüğü. Dayanımı Is(50) MPa
1	52,62	28,06	7,54	4,11
2	52,49	27,98	5,19	2,84
3	52,54	27,95	6,51	3,56
4	52,47	27,98	7,21	3,94
5	52,52	28,09	6,75	3,68
6	52,50	28,02	5,85	3,19
7	52,82	27,94	6,81	3,72
8	52,49	28,24	6,80	3,68
9	52,45	28,04	5,76	3,14
10	52,53	28,05	6,26	3,41
				Ortalama: 6,47 MPa S.Sap: ±0,68

Çizelge 4.14. Ankara Andezit numunelerinin nokta yükleme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap D (mm)	Kalınlık, w (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Düzeltilmiş Nok. Yüğü. Dayanımı Is(50) MPa
1	54,22	28,20	9,94	5,30
2	54,44	28,55	11,88	6,24
3	54,44	29,65	10,85	5,49
4	54,45	29,20	12,86	6,60
5	54,26	28,53	11,54	6,08
6	54,45	29,18	10,26	5,27
7	54,27	28,76	11,16	5,83
8	54,27	28,00	10,71	5,75
9	54,55	28,51	11,00	5,78
10	54,23	28,71	11,72	6,13
				Ortalama: 5,85 MPa S.Sap: ±0,40

Çizelge 4.15. Afyon Gri Mermer numunelerinin nokta yükleme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap D (mm)	Kalınlık, w (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Düzeltilmiş Nok. Yüğü. Dayanımı Is(50) MPa
1	54,17	30,39	6,26	3,10
2	54,22	30,57	7,32	3,60
3	54,20	30,60	14,65	7,20
4	54,19	30,53	15,49	7,63
5	54,27	30,80	19,45	9,49
6	54,34	30,18	19,89	9,89
7	54,24	30,21	12,94	6,44
8	54,21	30,68	13,46	6,59
9	54,20	30,63	19,86	9,75
10	54,18	29,84	7,39	3,72
				Ortalama: 6,74 MPa S.Sap: ±2,45

Çizelge 4.16. Evliyatekke Tüf numunelerinin nokta yükleme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap D (mm)	Kalınlık, w (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Düzeltilmiş Nok. Yüğü. Dayanımı Is(50) MPa
1	53,88	28,95	1,93	1,01
2	53,71	28,94	1,11	0,58
3	53,61	28,90	0,70	0,37
4	53,72	29,38	0,79	0,41
5	53,40	29,02	1,78	0,93
6	53,76	29,38	1,47	0,76
7	53,81	29,02	0,88	0,46
8	53,88	29,29	0,70	0,36
9	53,83	29,12	1,18	0,61
10	53,78	28,94	0,70	0,37
Ortalama: 0,58 MPa S.Sap: ±0,23				

Çizelge 4.17. Silile Andezit numunelerinin nokta yükleme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap D (mm)	Kalınlık, w (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Düzeltilmiş Nok. Yüğü. Dayanımı Is(50) MPa
1	53,49	27,53	2,20	1,21
2	53,81	27,29	6,68	3,69
3	53,71	27,39	4,43	2,44
4	53,85	27,53	4,78	2,62
5	53,87	27,52	2,55	1,40
6	53,82	27,53	3,44	1,89
7	53,76	27,15	3,63	2,02
8	53,78	27,95	5,26	2,84
9	53,84	27,81	2,64	1,43
10	53,74	27,87	2,32	1,26
Ortalama: 2,08 MPa S.Sap: ±0,77				

Çizelge 4.18. Karaman Traverten numunelerinin nokta yükleme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Çap D (mm)	Kalınlık, w (mm)	Kırılma Yüğü (kN)	Düzeltilmiş Nok. Yüğü. Dayanımı Is(50) MPa
1	54,10	27,97	6,66	3,58
2	54,08	27,82	6,41	3,47
3	54,11	27,43	6,61	3,63
4	54,19	29,52	5,74	2,92
5	54,17	27,89	5,68	3,06
6	54,08	27,84	6,59	3,56
7	54,18	27,78	5,15	2,79
8	54,30	27,86	5,96	3,21
9	54,12	27,83	7,30	3,95
10	54,13	27,16	6,27	3,47
Ortalama: 3,36 MPa S.Sap: ±0,34				

4.1.4. Endirekt çekme dayanımı (Brazilian) deneyi

ISRM standardına göre yapılan bu deneyin amacı, kayaçların tek eksenli çekme dayanımlarının dolaylı yoldan belirlenmesidir. Deney, disk şeklindeki numunelerin düşey yönde uygulanan baskı sonucunda yatay yönde oluşan çekme kuvveti neticesinde kırılması esasına dayanır. Deney için 10 adet disk şeklindeki numune kullanılır. Numuneler iki adet çelik çene arasına yerleştirilir ve 200 N/s hızında yükleme yapılır, yükleme hızının zayıf kayaçları, deneyler sırasında 15-30 saniye aralığında kırarak şekilde ayarlanması tavsiye edilmektedir.

Meram Andezit, Ankara Andeziti ve Afyon Gri Mermer, Evliyatekke Tüf, Sille Andezit ve Karaman Traverten numunelerinin endirekt çekme dayanımlarının belirlenmesi için Brazilian deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyleri gerçekleştirmek üzere önce örnek kayaçların bloklarından 54 mm çapında karot alma işlemi gerçekleştirilmiş, daha sonra elde edilen silindirik karot numuneler boy-çap oranı $\frac{1}{2}$ olacak şekilde, Brazilian deney numuneleri için uygun boyutlarda kesilmiştir. Numunelerin deneyleri, disk numuneler hidrolik preste çelik çeneler arasına yerleştirildikten sonra, yaklaşık 200 N/s yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin (Şekil 4.6) boy ve çap ölçüleri ile kırılma yükleri ve hesaplanan çekme dayanımları aşağıdaki çizelgelerde (Çizelge 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24) verilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, test yapılan kayaç örneğinin tek eksenli çekme dayanımı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır:

$$\sigma_t = 0,636 \cdot F_c / D.L \quad (4.1)$$

Burada;

σ_t : Numunenin tek eksenli çekme dayanımı; (kgf/cm²),

F_c : Yenilme anındaki yük; (kgf),

D : Numunenin çapı; (cm),

L : Numunenin kalınlığı; (cm), dir.



Şekil 4.6. Endirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney düzeneği ve deney sonrası numune görüntüleri.

Çizelge 4.19. Meram Andezit numunelerine ait endirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney sonuçları.

Numune İsmi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Çekme Dayanımı, σ_t (MPa)
MA-1	52,51	28,78	6,72	2,83
MA-2	52,55	28,16	6,36	2,73
MA-3	52,56	28,72	6,42	2,71
MA-4	52,54	28,91	6,66	2,79
MA-5	52,52	28,49	6,24	2,65
MA-6	52,65	28,26	8,60	3,68
MA-7	52,54	28,14	5,76	2,48
MA-8	52,56	28,40	7,03	2,99
MA-9	52,53	27,91	6,54	2,84
MA-10	52,55	28,78	6,85	2,88
Ortalama : 2,86 MPa				S.Sap: $\pm 1,04$

Çizelge 4.20. Ankara Andezit numunelerine ait endirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney sonuçları.

Numune İsmi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Çekme Dayanımı, σ_t (MPa)
AA-1	54,24	28,68	11,02	4,50
AA-2	54,25	28,74	10,48	4,28
AA-3	54,23	28,80	11,15	4,54
AA-4	54,24	28,57	12,66	5,20
AA-5	54,24	28,64	10,00	4,09
AA-6	54,23	28,69	10,60	4,33
AA-7	54,24	28,40	9,75	4,03
AA-8	54,23	28,48	9,75	4,02
AA-9	54,41	28,78	7,75	3,15
AA-10	54,29	28,62	8,30	3,40
Ortalama : 4,15 MPa				S.Sap: $\pm 0,55$

Çizelge 4.21. Afyon Gri Mermer numunelerine ait indirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney sonuçları.

Numune İsmi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Çekme Dayanımı, σ_t (MPa)
AG-1	54,23	28,25	14,72	6,11
AG-2	54,12	29,05	22,30	9,02
AG-3	54,23	28,77	18,66	7,61
AG-4	54,23	29,18	14,18	5,70
AG-5	54,25	29,87	20,72	8,13
AG-6	54,21	29,45	12,66	5,04
AG-7	54,11	28,77	20,90	8,54
AG-8	54,23	28,48	14,06	5,79
AG-9	54,18	28,20	19,27	8,02
AG-10	54,23	29,27	9,63	3,86
Ortalama: 6,78 MPa <u>S.Sap:</u> ±1,62				

Çizelge 4.22. Evliyatekke Tüf numunelerine ait indirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney sonuçları.

Numune İsmi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Çekme Dayanımı, σ_t (MPa)
ET-1	53,84	29,13	2,92	1,19
ET-2	53,83	28,91	2,46	1,01
ET-3	53,70	29,47	2,46	0,99
ET-4	53,78	29,47	1,58	0,63
ET-5	53,85	29,07	4,03	1,64
ET-6	53,47	29,14	1,34	0,55
ET-7	53,75	28,13	1,29	0,54
ET-8	53,68	29,03	1,70	0,69
ET-9	53,58	29,21	1,52	0,62
ET-10	53,77	29,21	3,45	1,40
Ortalama: 0,93 MPa <u>S.Sap:</u> ±0,36				

Çizelge 4.23. Sille Andezit numunelerine ait indirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney sonuçları.

Numune İsmi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Çekme Dayanımı, σ_t (MPa)
SA-1	53,59	28,19	3,30	1,39
SA -2	53,76	28,49	4,56	1,90
SA -3	53,74	27,84	4,01	1,71
SA -4	53,78	28,24	3,46	1,45
SA -5	53,69	27,19	5,08	2,22
SA -6	53,70	26,49	4,89	2,19
SA -7	53,80	27,99	4,76	2,01
SA -8	53,75	27,75	4,06	1,73
SA -9	53,41	28,02	4,36	1,85
SA -10	53,46	27,63	5,14	2,22
Ortalama: 1,87 MPa <u>S.Sap:</u> ±0,29				

Çizelge 4.24. Karaman Traverten numunelerine ait indirekt çekme dayanımı (Brazilian) deney sonuçları.

Numune İsmi	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Kırılma Yüğü P (kN)	Çekme Dayanımı, σ_t (MPa)
KT-1	54,06	27,83	7,72	3,27
KT -2	54,16	28,52	9,77	4,03
KT -3	54,07	27,93	10,02	4,22
KT -4	54,03	27,96	8,72	3,67
KT -5	54,09	27,76	8,71	3,69
KT -6	54,18	27,94	7,99	3,36
KT -7	54,12	27,88	9,01	3,80
KT -8	54,19	27,67	7,80	3,31
KT -9	54,14	27,52	10,02	4,28
KT -10	54,09	28,08	7,49	3,14
Ortalama: 3,68 MPa <u>S_{Sap}</u> : ±0,39				

4.1.5. Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi

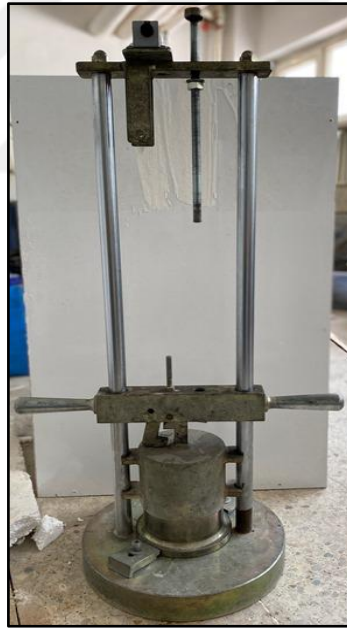
Bu özellikleri belirlemek için; Meram Andezit, Ankara Andeziti, Afyon Gri Mermer, Evliyatekke Tüf, Sille Andezit ve Karaman Travertenini kayaç blok numunelerinden silindirik karot numuneleri alınmıştır. Bu numunelerin numune hazırlama işlemleri tamamlandıktan sonra, deneylere uygunluk kontrolleri yapılmış ve numunelerin doğal ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra bu numuneler suya doygun hale gelmesi için su içinde bekletilmiştir. Doygun hale gelen numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra bu numuneler 105°C sıcaklığındaki fırında 24 saat bekletilmiştir ve kuru yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu deneyler sırasında ISRM standartlarına göre belirlenen, yoğunluk, gözeneklilik, su içeriği değerleriyle ilgili sonuçlar Çizelge 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4.25. Su içeriği, yoğunluk, gözeneklilik deneyi sonuçları.

Numune İsmi	Doğal Yoğunluk (ρ), (gr/cm ³)	Kuru Yoğunluk (ρ_d), (gr/cm ³)	Suya Doygun Yoğunluk (ρ_s), (gr/cm ³)	Açık Gözeneklilik (%)	Gözenek Hacmi (Pv), (cm ³)	Boşluk Oranı	Su İçeriği (w), (%)	Ağırlıkça Su Emme Oranı (Aw), (%)	Hacimce Su Emme Oranı (Hw), (%)
Meram Andezit	2,41	2,39	2,47	7,65	23,53	0,08	0,76	3,20	7,65
Ankara Andezit	2,51	2,48	2,53	4,50	14,52	0,04	0,86	1,80	4,49
Afyon Gri	2,86	2,85	2,86	0,91	2,87	0,01	0,17	0,32	0,91
Evliyatekke Tüf	1,25	1,09	1,44	35,35	114,80	0,55	15,04	32,42	35,35
Sille Andezit	2,15	2,13	2,25	11,58	44,10	0,13	0,67	5,43	11,58
Karaman Traverten	2,45	2,45	2,48	3,13	10,60	0,03	0,14	1,28	3,13

4.1.6. Kırılgenlık deneyi

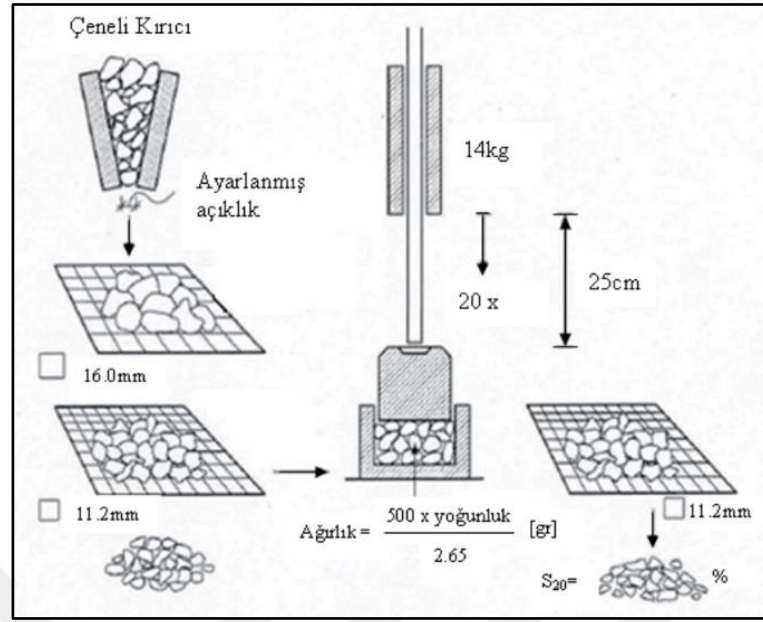
Deneyin amacı kayaçların kırılgenlık değeri belirlenmesidir. Kayaçların tekrarlı darbelere karşı gösterdiği direncin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntem 1943 yılında İsveç'te Matern ve Hjelmer tarafından geliştirilmiştir. Öncelikle numuneler çeneli kırıcıda 13,6 mm açıklığında kırılır ve sonra 16 mm'lik elekten elenir. Daha sonra -16 mm ve +11,2 mm boyut aralığındaki malzemeden 500 gramlık kısmı deney düzeneğinde kullanılan havanın içine konulur. Yaklaşık 25 cm yükseklikten 14 kg ağırlığındaki çekiç 20 defa arka arkaya düşürülür. Kırılan malzeme 11,2 mm'lik elekten geçirilir ve elek altında kalan malzemenin miktarından, kırılgenlık yüzde değeri (S_{20}) hesaplanır. Kırılgenlık deney cihazının görünümü Şekil 4.7'de verilmiştir, bu deneyden elde edilecek sonuçlara göre yapılan (önerilen) sınıflandırma limitleri Çizelge 4.26'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.7. Kırılgenlık deney aletinin genel görünümü.

Çizelge 4.26 . Kırılgenlık indeks sınıflaması (Dahl ve diğ., 2012).

Sınıf	S_{20} (%) Değeri
Oldukça yüksek	$\geq 66,0$
Çok yüksek	60,0-65,9
Yüksek	51,0-59,9
Orta	41,0-50,9
Düşük	35,0-40,9
Çok düşük	29,1-34,9
Oldukça düşük	$\leq 29,0$



Şekil 4.8. Kırılgenlik deneyinin aşamaları ve sınıflandırması, (Dahl ve diğ., 2012).

Kırılgenlik deneyi aşamaları Şekil 4.8'deki gibidir. Meram Andezit, Ankara Andezit, Afyon Gri Mermer, Evliyatekke Tüf, Sille Andezit ve Karaman Traverten numuneleri için kırılgenlik deneyleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.27. Kırılgenlik deneyi sonuçları.

Numune İsmi	S ₂₀ Değeri, (%)	Kırılgenlik Sınıfı
Meram Andezit	71,71	Oldukça Yüksek
Ankara Andezit	63,75	Çok Yüksek
Afyon Gri Mermer	53,45	Yüksek
Evliyatekke Tüf	80,62	Oldukça Yüksek
Sille Andezit	74,75	Oldukça Yüksek
Karaman Traverten	51,49	Yüksek

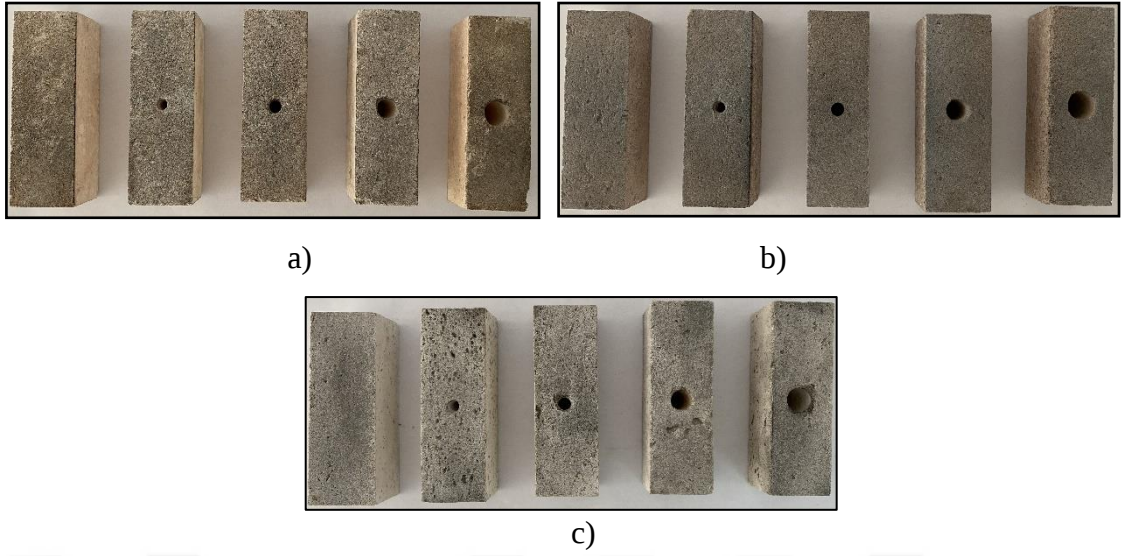
4.2. Kolon Benzeri Alçı Bazlı Deney Numuneleri ve Doğal Kayaç Numuneleri İçin DIC Analizleri

Bu tez kapsamında, Ncorr programı kullanılarak test yapılan laboratuvar deney numunelerinin yüzeyinde oluşan mikro deplasmanların izlenmesi mümkün olmuş, deneyler sırasında, seçilen numunelerin yüzeylerinde oluşan çatlakların başlaması ve ilerleme durumları gözlenebilmiştir. Yük taşıma şartlarının anlaşılmasına çalışıldığı yapı elemanları (örn; kolonlar), için laboratuvar ortamında yapılan deneylerde DIC yönteminin uygulanması mekanik ölçü aletleriyle elde edilemeyen mikro-yer değiştirmelerin algılanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle kayaç topukların (madenlerde)

ve beton kolonların (inşaatlarda) modellendiği laboratuvar numunelerinde uygulanması önemli görülmektedir.

Katı malzemelerin kırılmasında tokluk farklılaşmasının etkilerini anlamak kritik nokta olarak görülmüştür. Bu amaçla, öncelikle özel alçı tozu karışımı kullanılarak yapay kayaç laboratuvar deney numuneleri hazırlanmış, doğal kayaç numuneleri ise kayaç bloklarından kesilerek elde edilmiştir. Daha sonra bazı deney numuneleri içine, farklı çapta daire kesitli delikler delinmiştir. Hazırlanan deney numuneleri delik çaplarına (d) göre 5 gruba ayrılmıştır; [i) Sağlam, masif numuneler, (d=0mm); b) S-d8 numuneler (d=8mm); c) S-d10 numuneler (d=10mm); d) S-d15 numuneler (d=15mm); e) S-d20mm numuneler (d=20mm)]. Numuneler içine açılan, delik merkezleri, düşey ve yatay olarak numunelerin merkez konumlarında olacak şekilde düzenlenmiştir. Alçı bazlı numuneler 50x50x150 mm boyutlarında alçı harcı kullanılarak hazırlanmıştır (ağırlıkça %75 oranında alçı tozu karışımı, (özel "hrn- α " alçısı; YYM, 2023), ve %25 oranında musluk suyu ile birlikte hazırlanmıştır). Numune gövdelerinde ve yüzeylerinde herhangi bir donatı veya güçlendirme kullanılmamıştır.

Doğal kayaç numuneleri (Evliyatekke Tüf, Sille Andeziti, Karaman Traverteni) ise aynı şekilde prizmatik olarak boyutlandırılmış ve üzerlerinde delikler açılmıştır (Şekil 4.9.). Geometrik hacim olarak prizma (kare kesitli kolon benzeri) şeklinde hazırlanan kalıplarda dökümü yapıldıktan sonra, kalıptan çıkan katı alçı numuneleri; masif, sağlam ve homojen yapıdadır. Bu numuneler kalıplarından çıkarıldıktan sonra nem içeriklerinin stabilize olması için oda sıcaklığında bekletilmiştir. Ardından, DIC analizlerinde kullanılması gerekli olan siyah noktalı desenleri elde etmek için numunelerin seçilen bir yüzü noktacıklarla bezenmiştir (sprey boya uygulaması yapılmıştır). Bu noktacık bezemeli yüzlerin DIC analizlerinin görüntü yakalama ve mikro-deplasman tanıma prosedürlerinde kullanılmasından dolayı, bu desenlerin homojen ve DIC yönteminde istenen özelliklerde hazırlanması önemlidir. Bu çalışmada, Konya Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan hidrolik preste ve Üniversitenin diğer araştırma merkezlerindeki hassas hidrolik presler kullanılarak, hazırlanan numunelere düşey yük verilmiş, onlar üzerinde gerçekleşen yenilme kaynaklı yüzey çatlaklılık durumları DIC yöntemiyle mikro deplasmanlar seviyesinde izlenmiştir. Ayrıca, hidrolik preslerde uygulanan düşey yükleme hızları 0,1 kN/sn seviyesini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 4.9. Prizmatik olarak boyutlandırılmış, üzerinde delikler açılmış ve desen oluşturulmuş doğal kayaç numuneleri; a) Evliyatekke Tüfü, b) Silile Andeziti, c) Karaman Traverteni.

Deneyler sırasında elde edilen görüntülerin incelenmesi sonucunda sağlam (deliksiz), S-d10 ve S-d20 alçı numunelerine ve doğal kayaç numunelerine (Evliyatekke tüf, Silile andezit, Karaman traverten) ait, çatlama anının başlangıcı ve parçalanma (F değeri seviyesi) öncesi son görüntüleri içeren ve bu görüntüler üzerinde yapılan DIC analizi sonucunda elde edilmiş, yatay deplasman, düşey deplasman ve gerinim analizi sonuçlarını gösteren görseller elde edilmiştir. Deneyler sırasında, numuneler üzerindeki düşey yükleme çok yavaş bir hızda artırılırken (0,1 kN/sn), numunelerin noktalarla bezenmiş yüzeylerinde gelişen çatlaklar, mikro yerdeğiştirme seviyeleri, DIC yöntemi ile incelenmek üzere, özel kamera sistemleriyle (Full HD, 120 fps) kare kare kaydedilmiştir.

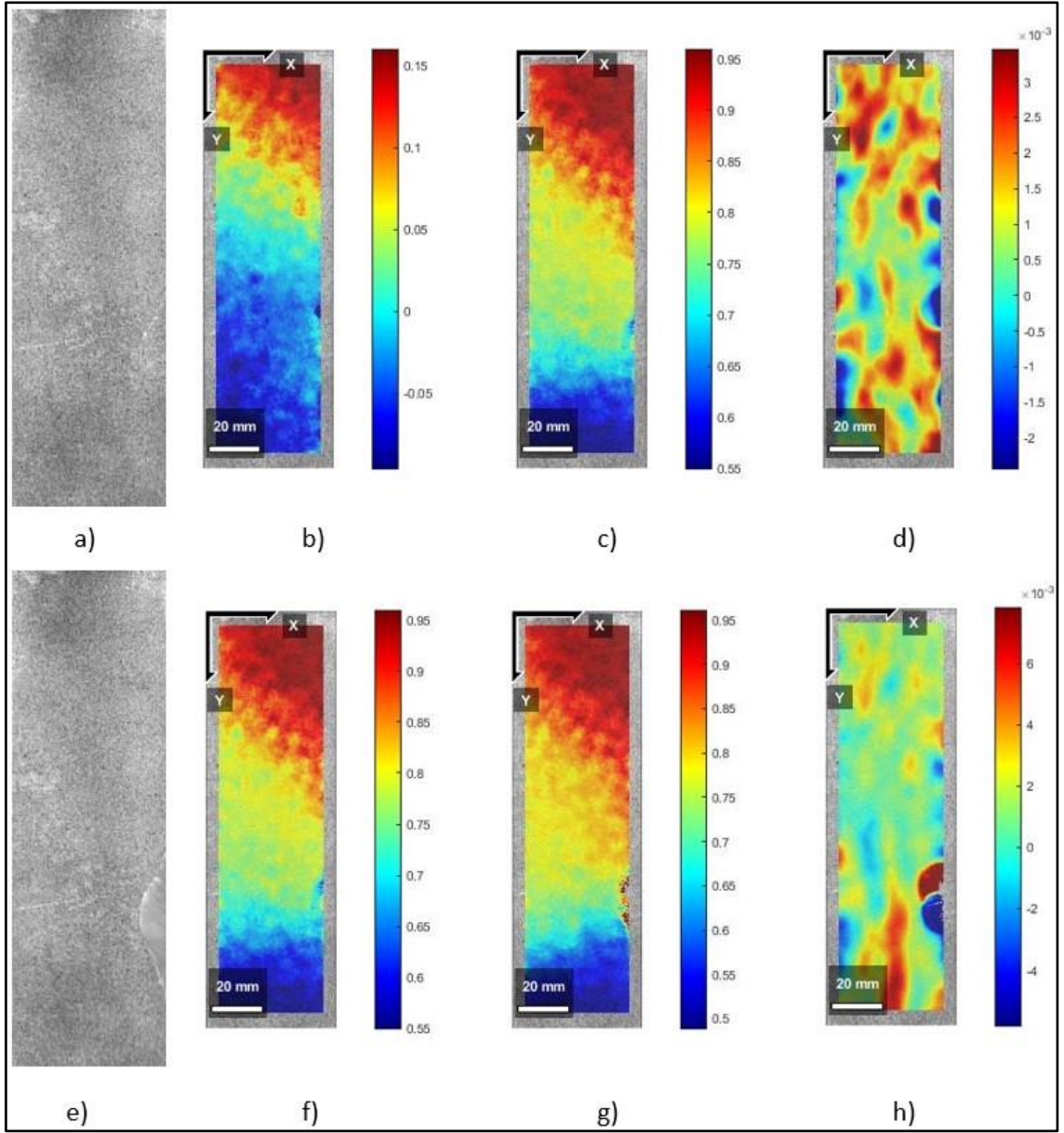
Ncorr yazılımı kullanılarak yatay ve düşey deplasman hesaplamaları programın “format displacement” (Şekil 3.2.) basamağında gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada programın deplasmanları ölçeklendirebilmesi amacıyla kalibrasyon görüntüsü yüklenir ve bu görüntü üzerinde ölçek belirlenir, program bu ölçeği referans olarak bir pikselin ölçüsünü hesaplar ve numune üzerindeki deplasmanları mm cinsinden gösterir.

Deplasmanlar belirlendikten sonra, numune yüzeyindeki gerinim hesaplamaları Ncorr programının işlem aşamalarından “calculate strain” basamağında (Şekil 3.2) gerçekleştirilir. İşlem sonucunda E_{xx} , E_{xy} , E_{yy} yönlerinde “Green-Lagrangian” gerinim hesaplamaları sonucunda oluşturulan gerinim grafikleri program arayüzünde görülebilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda, numune yüzeyinde oluşan çatlakların

net olarak gözlemlenebildiği E_{xx} gerinim hesaplama sonuçları sunulmuştur. E_{xx} Green-Lagrangian gerinimi x yönündeki toplam gerinimi ifade eder.

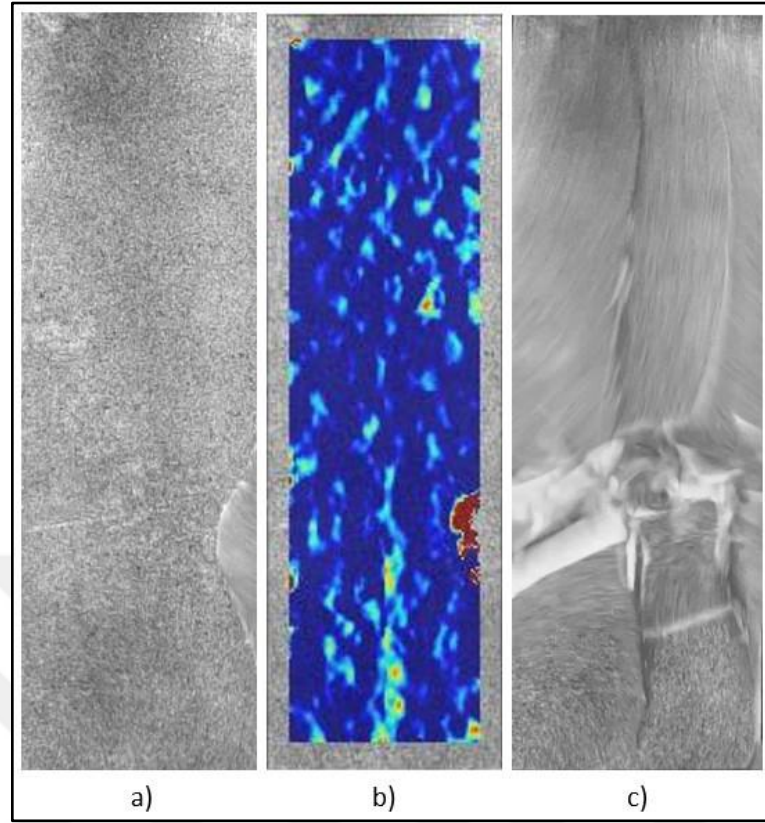
Şekil 4.10’da, sağlam (deliksiz, “S-int”) alçı numunesinin DIC analizlerinde, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde sağ alt tarafta gözlemlenen ilk çatlağın yüzeysel olarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Numunenin parçalanmasına sebep olan ana çatlak oluşumundan önce, numunenin alt kısmının ortasında gerinim artışı gözlemlenmiştir. Bu an numunenin parçalanmasından önce gözlemlenebilen son andır, daha sonra numune tamamen parçalanmıştır. Bu numunenin referans anına ait görüntü sonrası 10618. karede (yaklaşık 88. saniye) ilk çatlamanın olduğu görülmüştür, bu andan hemen sonraki görüntü, numune parçalanmadan önce analiz edilebilen son görüntü olarak alınmıştır. Deliksiz alçı numunesinin çatlak oluşumunun ani bir şekilde geliştiği görülmüştür.

Şekil 4.11’de numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Burada görülebileceği gibi numunenin orta alt kısmından başlayan çatlak yukarı uca kadar ulaşmış ve numunenin parçalanmasına sebep olmuştur. Ana çatlağa paralel olarak ikinci bir çatlağın da numune yüzeyinde gözlemlenen ilk yüzeysel çatlağı da kapsayacak şekilde büyüdüğü ve numune yüzeyini boydan boya geçtiği görülmüştür.



Şekil 4.10. S-int-1 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

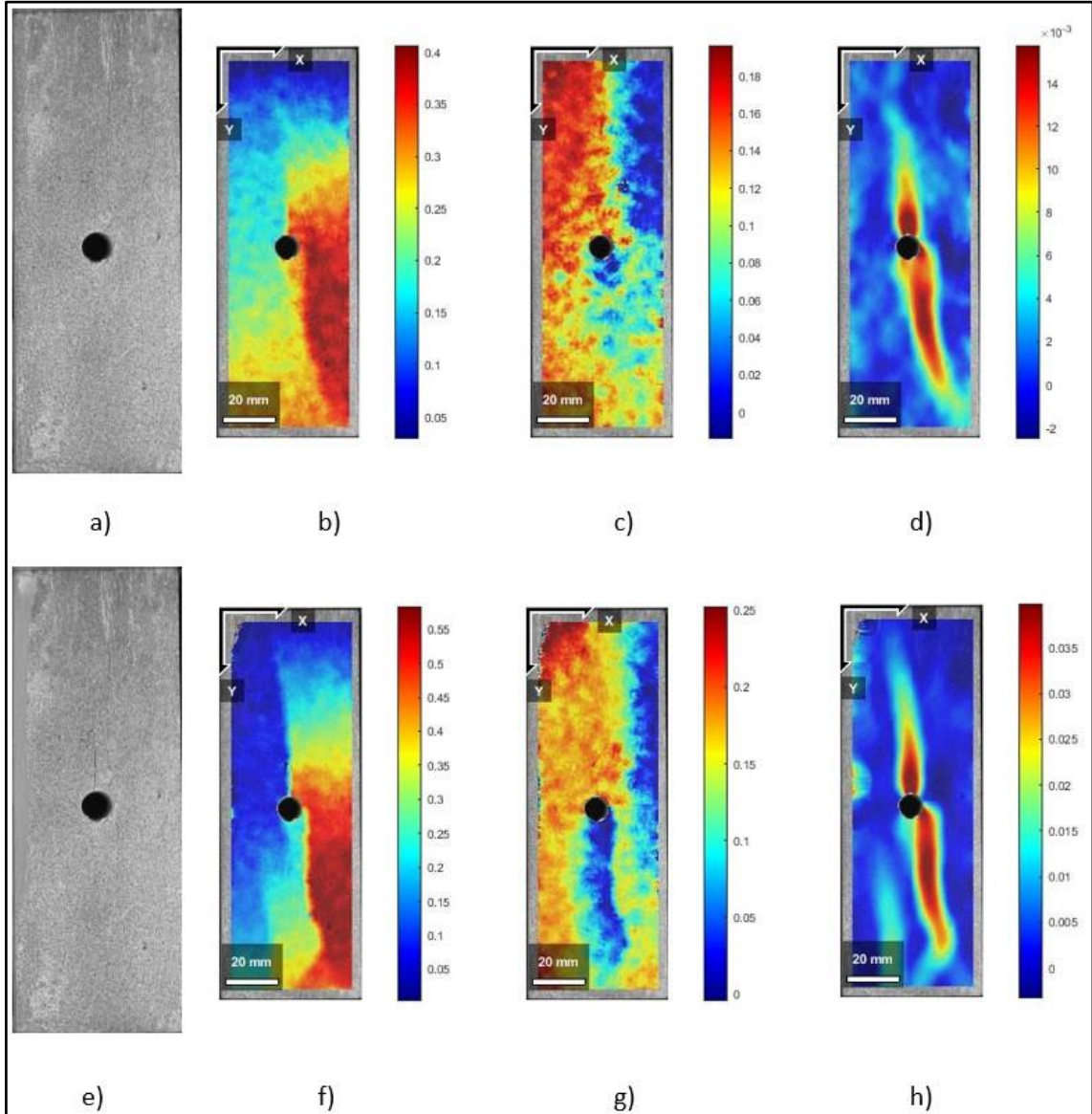


Şekil 4.11. S-int-1 numunesine ait parçalanma öncesi DIC gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

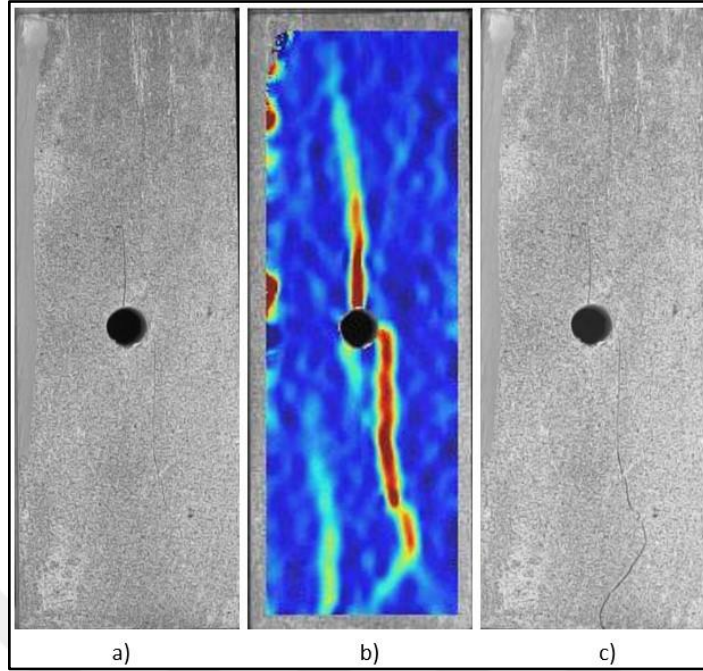
Şekil 4.12’de, 10 mm deliğe sahip alçı numunesinin DIC analizlerinde, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde 10 mm açıklığa sahip deliğin üst ve alt kısmında gözlemlenen ilk çatlağın her iki yönde de ilerlediği gözlemlenmiştir. Çatlağın gözlemlendiği görüntünün, referans görüntüden sonraki 97674. kare (814. saniye) olduğu görülmüştür. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 130231. kare görüntüsünde (1085. saniye) yenilmiştir. Delik çeperinden başlayan çatlak, numunenin iki ucuna ulaşarak numunenin parçalanmasına sebep olmuştur. İlk çatlak oluşumu ve parçalanma öncesi son durumu kıyaslayan E_{xx} gerinim grafiklerinden de çatlağın gelişimi anlaşılabilmektedir.

Şekil 4.13’te numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Burada görülebileceği gibi numunenin

ortasında bulunan delik çevresinden başlayan çatlak, yukarı ve aşağı yönde ilerleyerek numunenin parçalanmasına sebep olmuştur. Şekil 4.13.b’de verilen gerinim grafiği Şekil 4.12.h’de verilen grafik ile aynıdır, oluşan çatlakların daha iyi gözlemlenebilmesi amacıyla renk skalasında değişiklik yapılmıştır. Bu şekilde, gözle görülemeyen çatlak uzanımlarının da analiz sonucu elde edilen gerinim grafiklerinde fark edilebildiği görülmektedir.



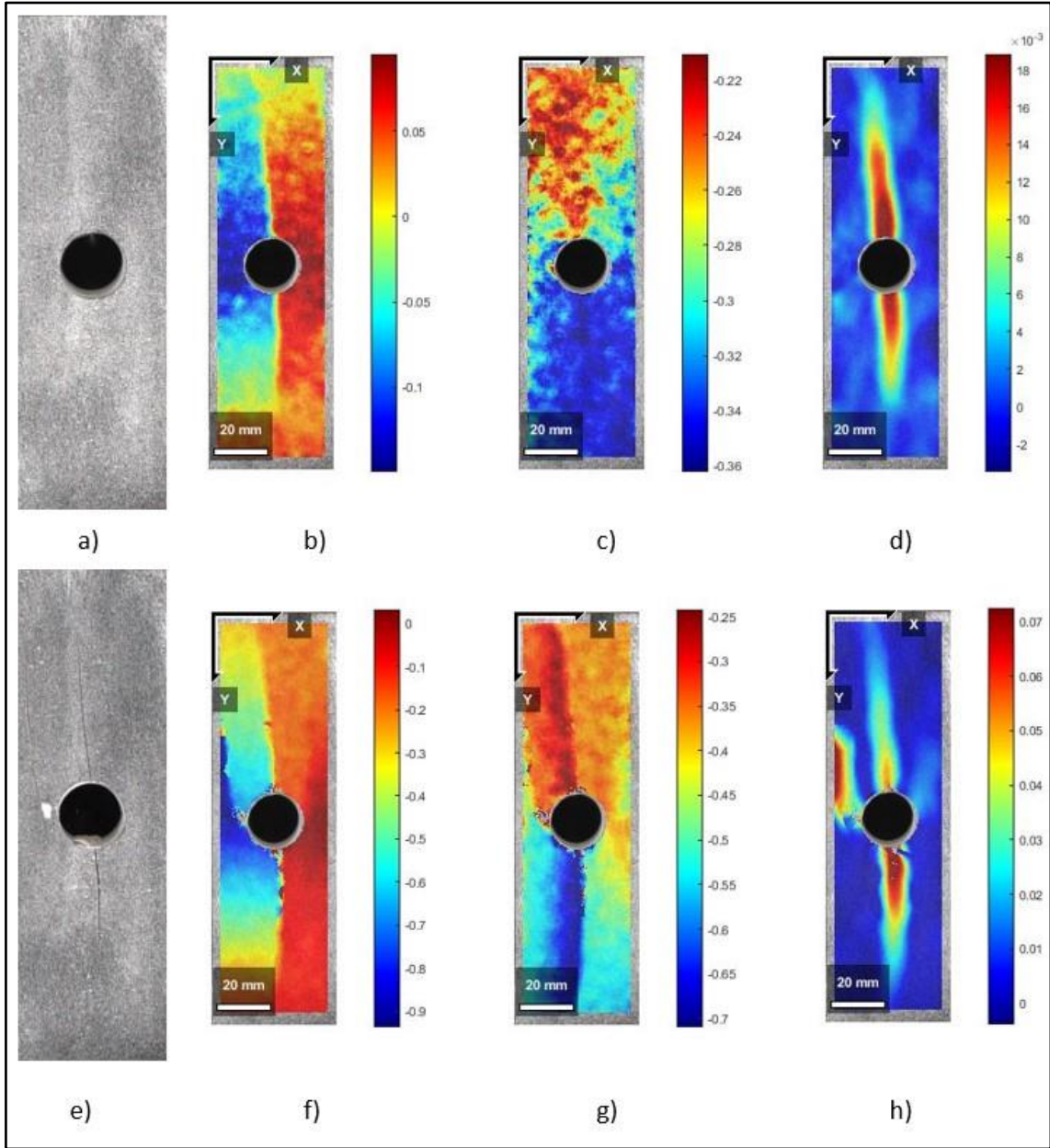
Şekil 4.12. S-d10-1 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir. a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.



Şekil 4.13. S-d10-1 numunesine ait parçalanma öncesi DIC gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

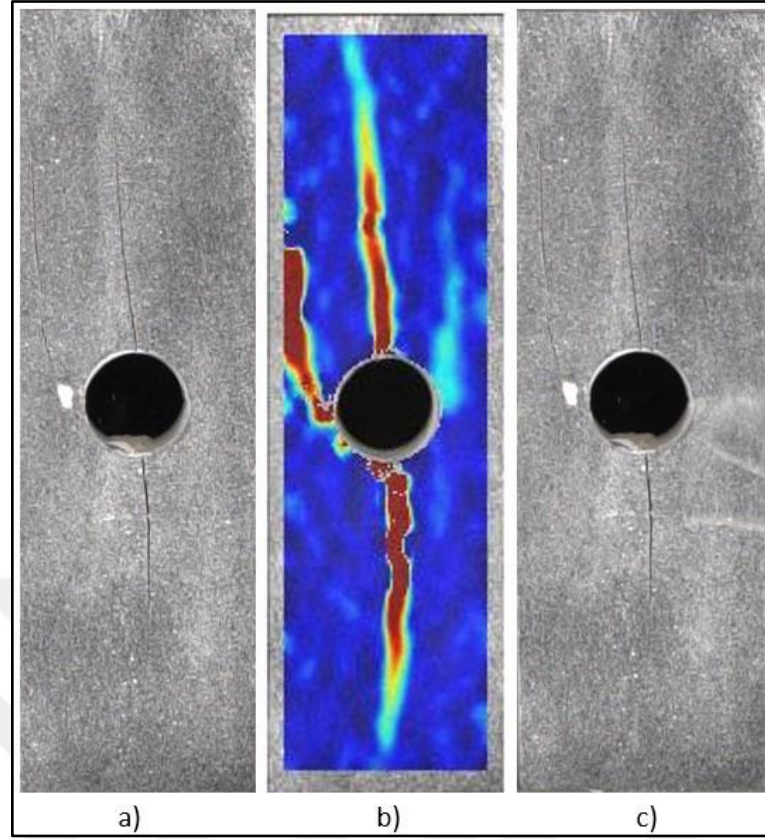
Şekil 4.14’te, 20 mm deliğe sahip alçı numunesinin DIC analizlerinde, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde 20 mm açıklığa sahip deliğin üst ve alt ucundan başlayarak ilerleyen çatlak, numunenin ilk durumunda görülebilmektedir. Çatlağın gözlemlendiği görüntünün, referans görüntüden sonraki 23787. kare (198. saniye) olduğu görülmüştür. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 54057. görüntüde (450. saniye) yenilmiştir. Delik çevresinin üst ve alt kısmından başlayan çatlaklara ek olarak, çeperin sol tarafından da üçüncü bir çatlak başlamış ve numunenin sol kenarına ulaşmıştır. Bunlara ek olarak, analiz sonuçlarından anlaşılabilen dördüncü bir çatlağın da delik çevresinin sağ tarafında oluştuğu görülmüştür.

Şekil 4.15’te numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Burada görülebileceği gibi numunenin ortasında bulunan delik çevresinden başlayan çatlaklar yukarı ve aşağı yönde ilerleyerek numunenin parçalanmasına sebep olmuştur. Son ana ait fotoğrafta gözle görülemeyen çatlak uzanımları analiz sonuçlarında gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.14. S-d20-3 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

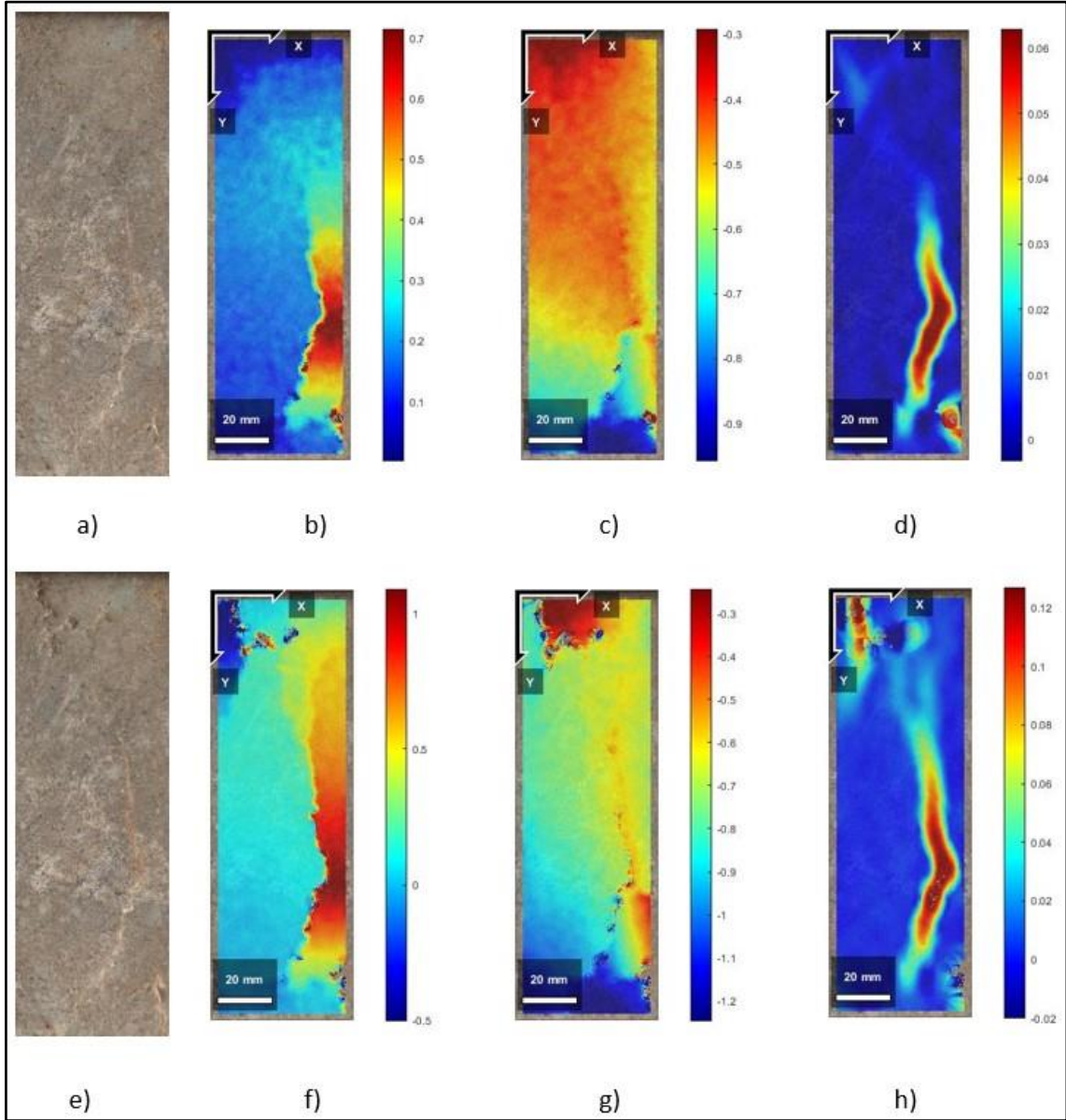


Şekil 4.15. S-d20-3 numunesine ait parçalanma öncesi DIC gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

Şekil 4.16’da, deliksiz (sağlam, “ET-int”) Evliyatekke tüf numunesinin DIC analizlerinde, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde sol üst ve sağ alt kısımda çatlak oluşumları görülmüştür. Çatlakların gözlemlendiği görüntü, referans görüntüden sonraki 10620. karedir (88. Saniye). Bu andan sonra 10624. görüntü numune parçalanmadan önce incelenmesi mümkün olan son görüntü olarak analiz edilmiştir. Numunenin çatlak oluşumu ve yenilmesi kısa süre içinde gerçekleşmiştir.

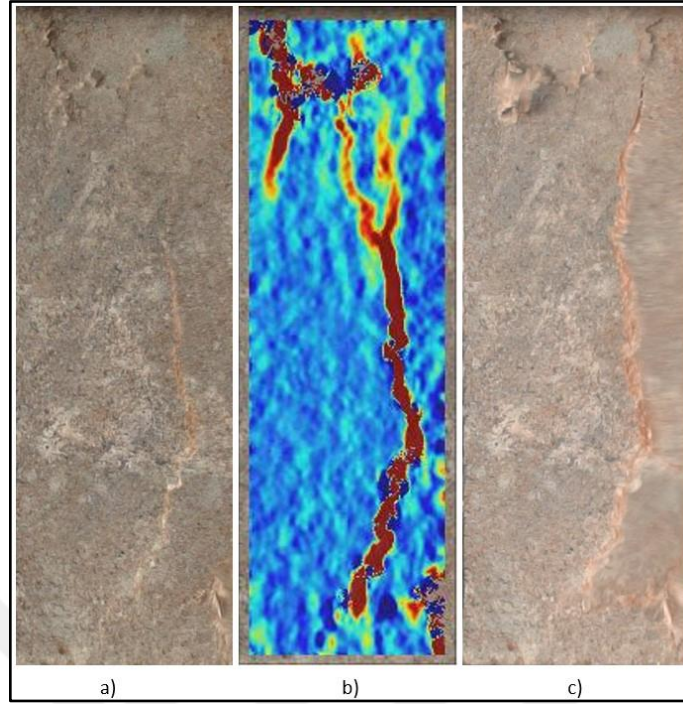
Şekil 4.17’de numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi sonucunda elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Şekil 4.17.b’de verilen gerinim grafiği Şekil 4.16.h’de verilen analiz sonucu ile aynıdır, oluşan çatlakların daha iyi gözlemlenebilmesi amacıyla renk skalasında değişiklik yapılmıştır.

Bu şekilde, gözle görülemeyen çatlak uzanımlarının da analiz sonucu elde edilen E_{xx} gerinim grafiklerinde fark edilebildiği görülmektedir.



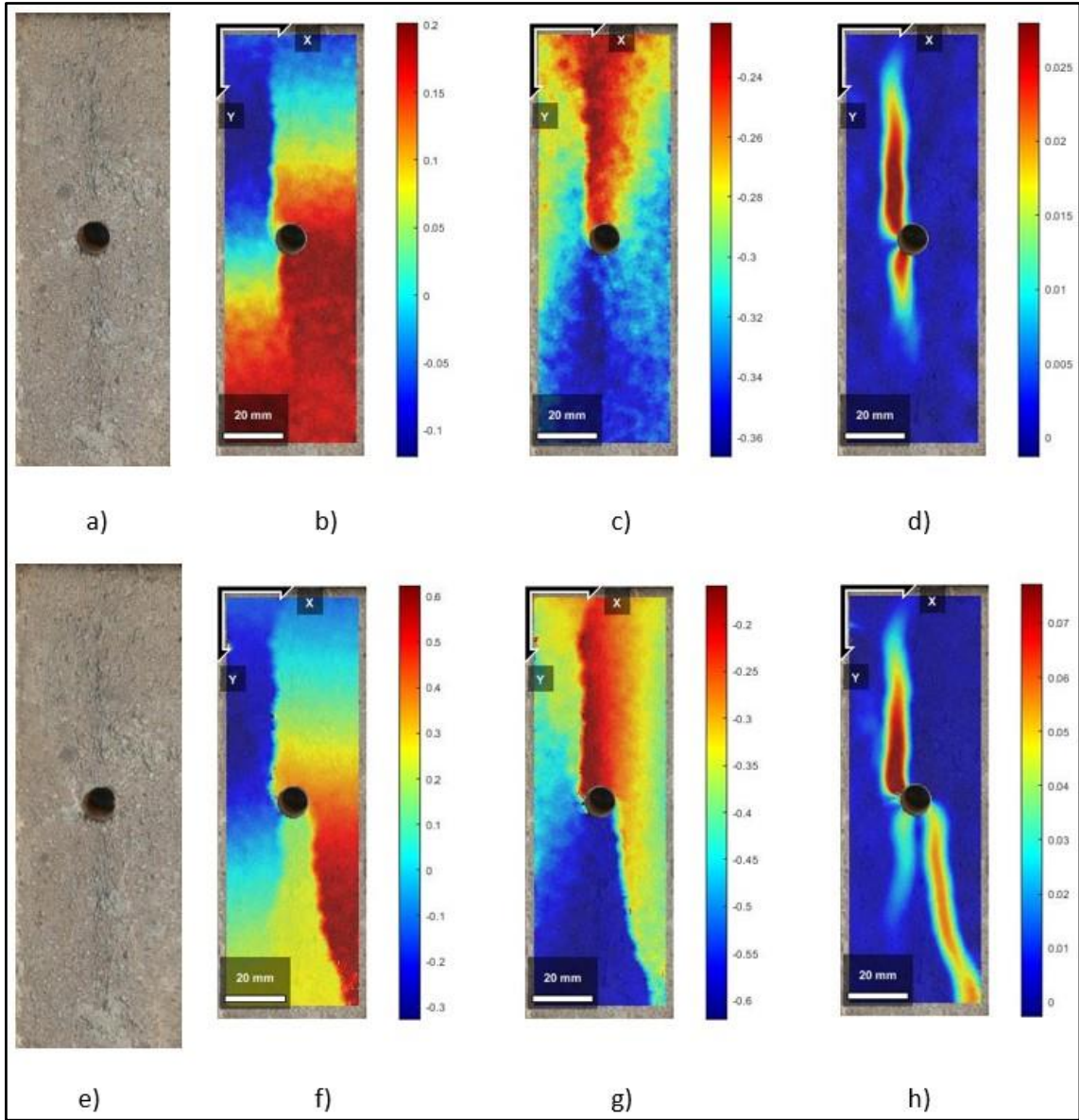
Şekil 4.16. ET-int numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.



Şekil 4.17. ET-int numunesine ait parçalanma öncesi DIC gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

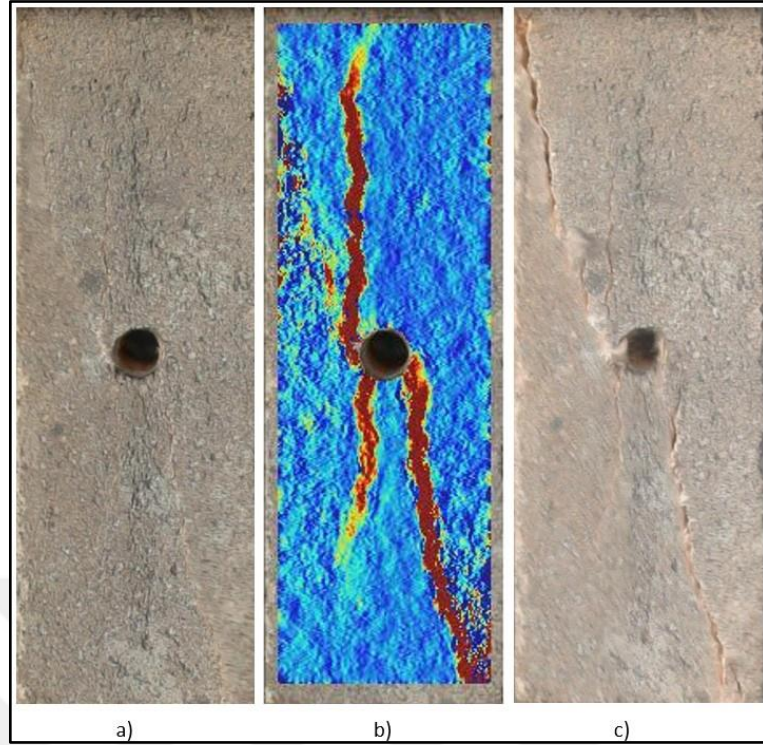
Şekil 4.18’de, 10 mm deliğe sahip Evliyatekke tüf numunesinin DIC analizleri kapsamında, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyindeki 10 mm çapındaki deliğin sol tarafından başlayan çatlak oluşumuna ek olarak ilerleyen aşamalarda sağ tarafta da oluşan çatlak gözlemlenmiştir. Numunenin yenilmesine yakın gözlemlenebilen son durumda üç adet çatlak görülebilmektedir. İlk çatlakın gözlemlendiği görüntünün referans görüntüden sonraki 7742. kare (64. Saniye) olduğu görülmüştür. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 10327. görüntüde (86. saniye) yenilmiştir. Delik çeperinden başlayan çatlaklar, numunenin iki ucuna ulaşmıştır. Şekil 4.18’de verilen yatay deplasman, düşey deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplamaları sonuçlarından ilk çatlak oluşumu ve sonrasında çatlakın ilerlemesi aşamasında numune yüzeyinde oluşan değişimler sayısal olarak anlaşılabilir. Bu şekilde verilen renk ölçekleri sabit bir değere sahip değildir, incelenen numune üzerindeki değişimlere göre oluşan renk skalasını incelerken ölçeğe dikkat etmek gereklidir. Burada verilen değişimler mm cinsinden numune yüzeyinde oluşan deplasmanları ve E_{xx} gerinimleri ifade etmektedir.



Şekil 4.18. ET-10 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

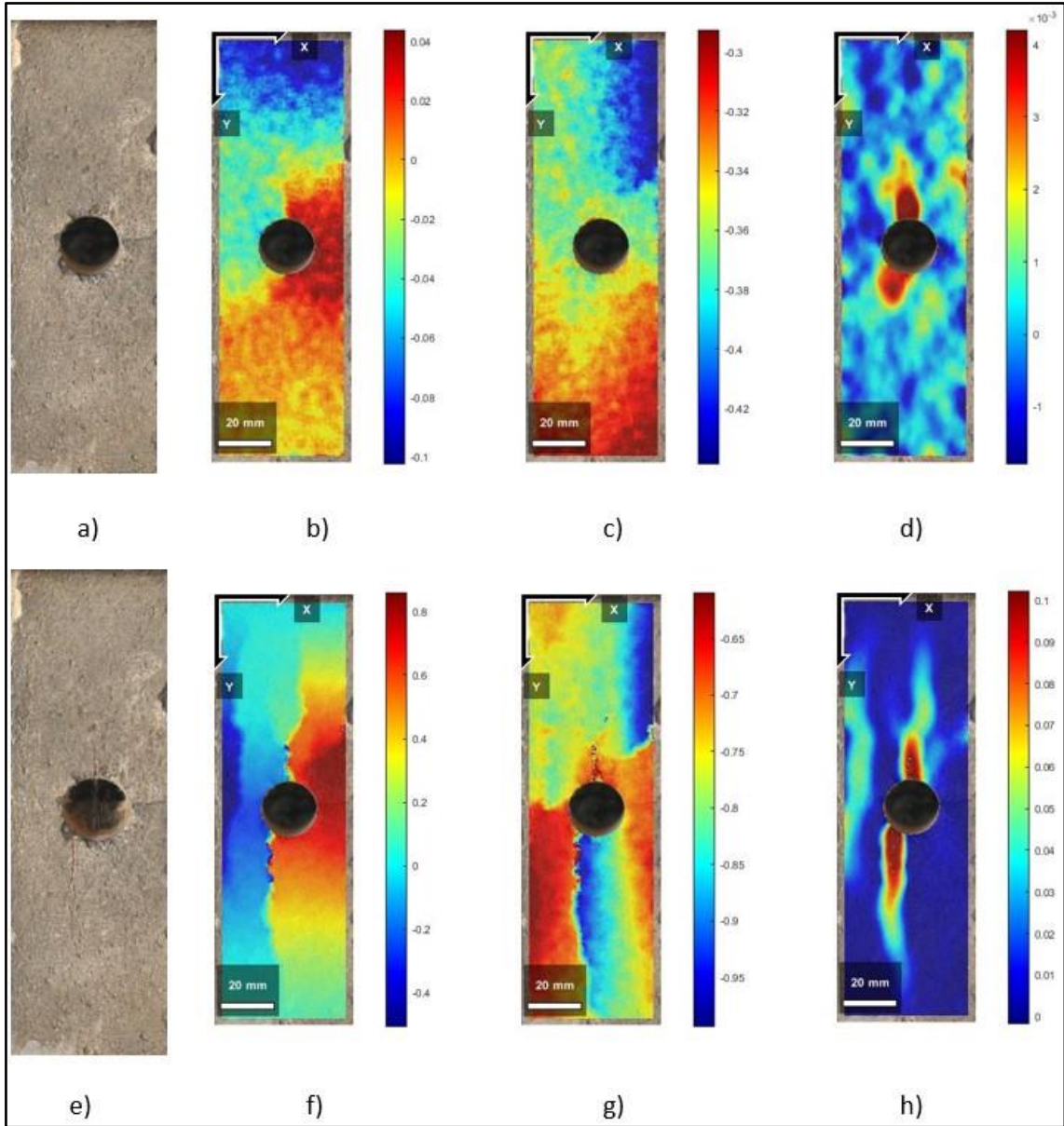
a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

Şekil 4.19’da numunenin yenilmeden önceki son anına ait görüntünün gerinim grafiği ve numunenin parçalanmaya başladığı andaki görüntüsü verilmiştir. Bu şekilde ilk bakışta çıplak gözle fark edilemeyen çatlak uzanımları net bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 4.19. ET-10 numunesine ait parçalanma öncesi DIC gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

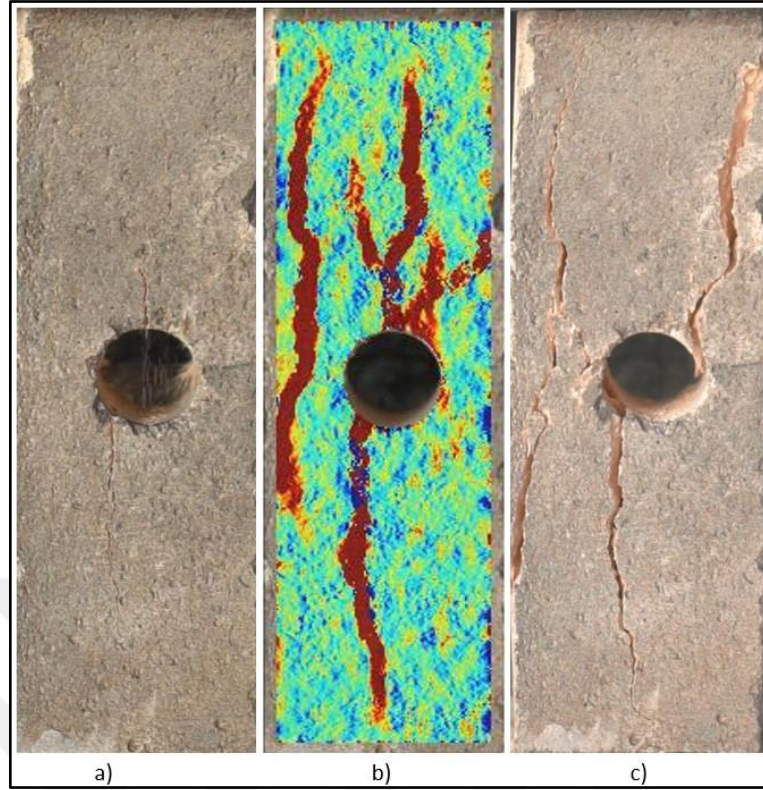
Şekil 4.20’de, 20 mm deliğe sahip Evliyatekke tüf numunesinin DIC analizleri için ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyindeki 20 mm çapındaki deliğin üst kısmında ilk çatlağın olduğu gözlemlenmiştir. Deneyin ilerleyen aşamalarında ilk oluşan çatlağın numunenin üst kenarına doğru ilerlediği, buna ilave olarak deliğin alt kısmından başlayan ikinci bir çatlak olduğu görülmektedir. Delik çeperinden başlayarak ilerleyen bu çatlaklara ek olarak numunenin sol kenarına paralel sayılabilecek bir konumda diğer bir çatlak olduğu analiz sonuçlarından anlaşılabilmektedir. İlk çatlağın gözlemlendiği görüntü referans görüntüden sonraki 2496. kare (21. saniye) olduğu görülmüştür. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 3332. görüntüde (28. saniye) yenilmiştir. Delik çeperinin üst kısmından başlayan çatlak, yukarı doğru dallanarak ilerlemiştir. Deliğin alt kısmından başlayan çatlak ise numunenin alt kenarına ulaşmıştır.



Şekil 4.20. ET-20 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

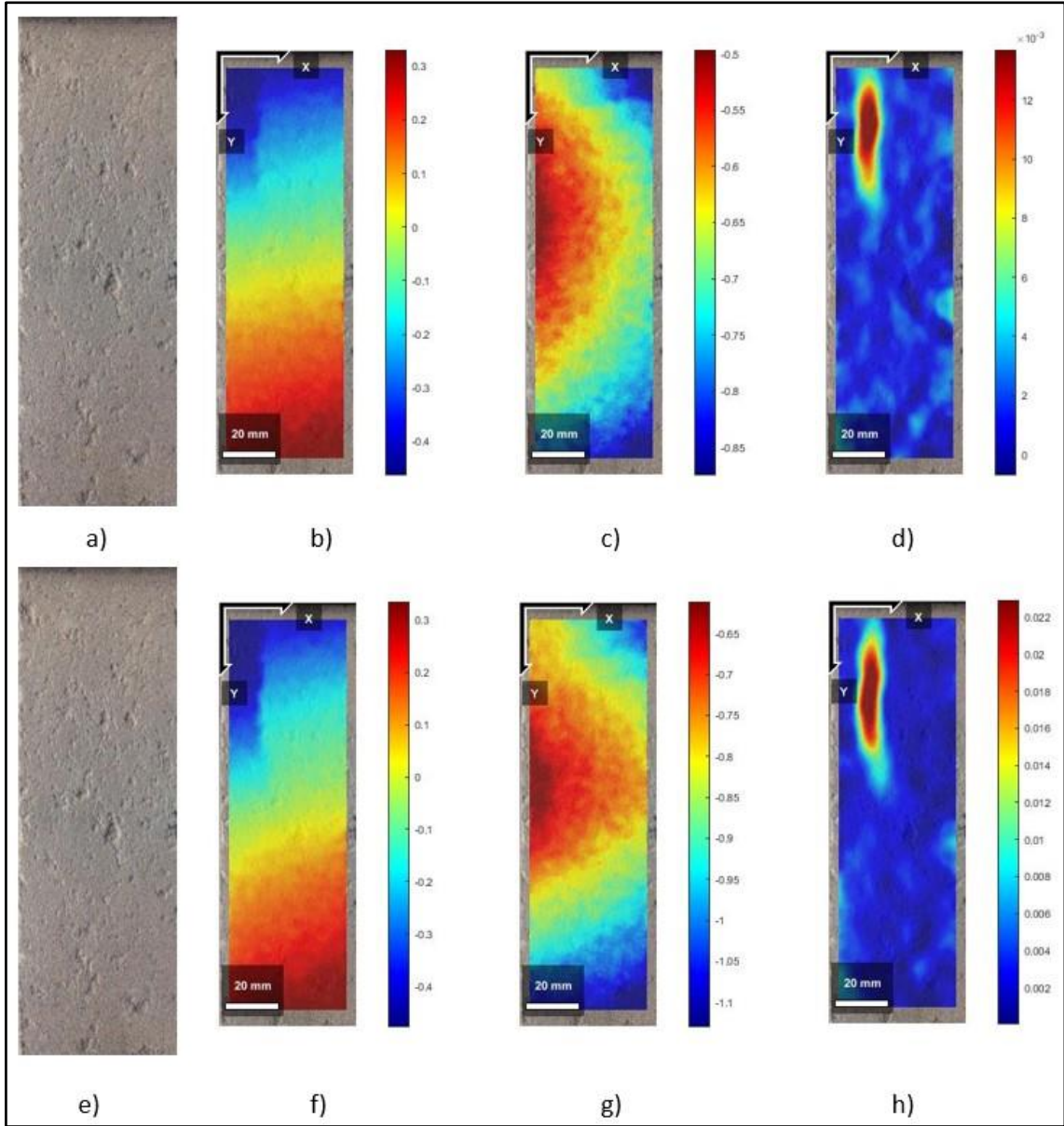
Şekil 4.21’de numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi sonucunda elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Numune üzerinde oluşan çatlak uzanımlarının analiz sonucu elde edilen gerinim grafiklerinde net bir şekilde fark edilebildiği görülmektedir.



Şekil 4.21. ET-20 numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

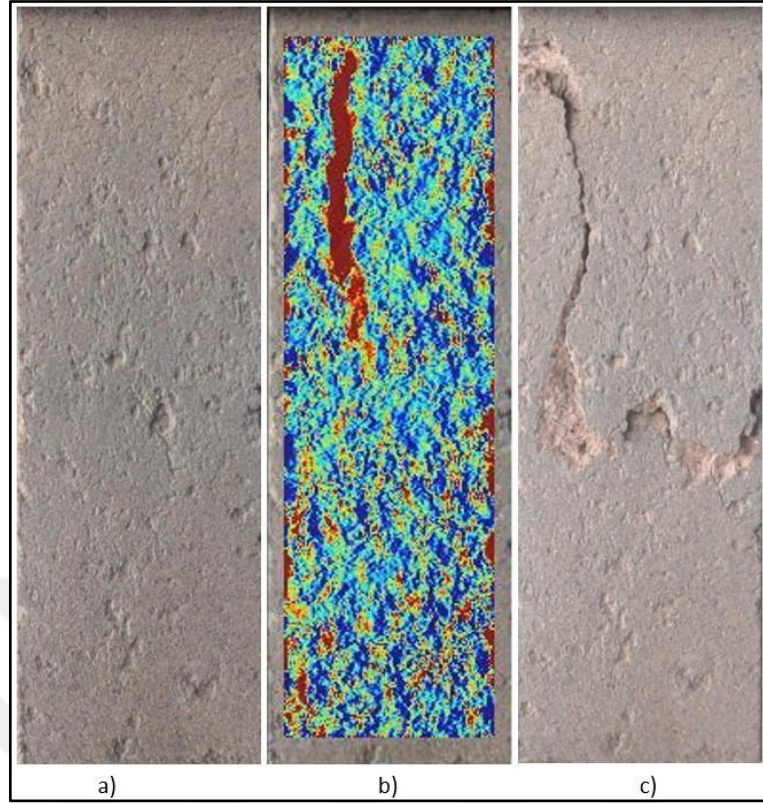
Şekil 4.22, sağlam (deliksiz, “SA-int”) Sille Andezit numunesinin DIC analizleri kapsamında, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ile parçalanma öncesi durumun karşılaştırmasını göstermektedir. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde sol üst kenara yakın kısımda çatlak başlangıcı tespit edilmiştir. Çatlağın gözlemlendiği an, referans görüntüden sonraki 25389. kare (211. saniye)’dir. Bu noktadan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 35109. karede (226. saniye) kırılmıştır. Sol üst taraftan başlayan çatlak numunenin merkezine doğru ilerlemiştir.

Şekil 4.23’te numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi sonucunda elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Numune üzerinde oluşan çatlakın son durumu gerinim grafiğinde açık bir biçimde görülebilmektedir. Numune parçalanmaya başladığı andan alınan görüntü de E_{xx} gerinim grafiğinde görülen çatlakın nihai durumunu göstermektedir.



Şekil 4.22. SA-int numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

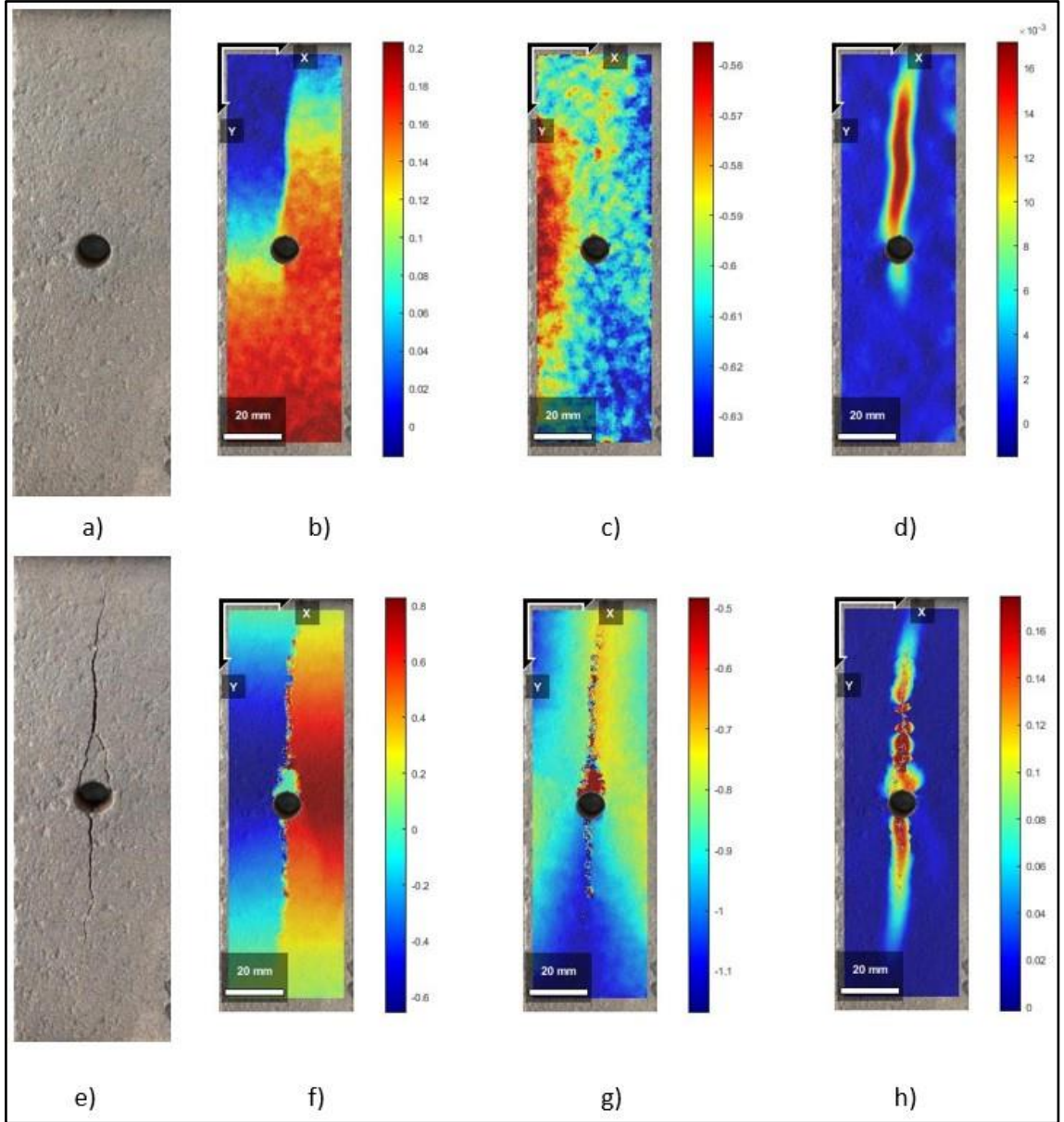


Şekil 4.23. SA-int numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

Şekil 4.24'te, 10 mm deliğe sahip Sille Andeziti numunesinde ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum DIC analizleri ile kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde 10 mm açıklığa sahip deliğin üst kenarından başlayarak yukarı doğru ilerleyen çatlak, numunenin ilk durumunda yatay deplasman görüntüsünde (Şekil 4.24.b) ve E_{xx} gerinim grafiğinde (Şekil 4.24.c) görülebilmektedir. İlerleyen aşamalarda deliğin alt kenarından başlayan ve numunenin alt kenarına kadar ilerleyen ikinci çatlağın oluştuğu görülmektedir. İlk çatlağın gözlemlendiği görüntü, referans görüntüden sonraki 21236. kare (176. saniye)'dir. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 35109. görüntüde (293. saniye) yenilmiştir.

Şekil 4.25'te numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir.

Burada görülebileceği gibi numunenin ortasında bulunan delik çevresinden başlayan çatlaklar yukarı ve aşağı yönde ilerleyerek numunenin üst ve alt kenarına ulaşmıştır.

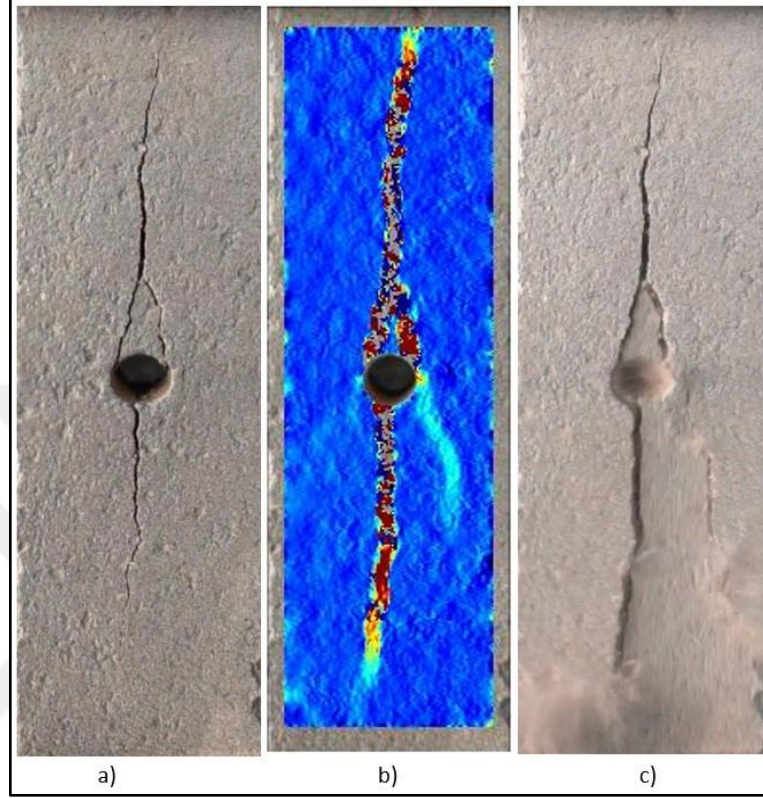


Şekil 4.24. SA-10 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

Şekil 4.25.b’de verilen E_{xx} gerinim grafiği şekil 4.24.h’de verilen grafik ile aynıdır ve çatlak uzanımlarının daha net gözlemlenebilmesi için renk skalası değiştirilmiştir. Bu analiz sonucunun yanında numunenin parçalanmaya başladığı andaki görüntü yer

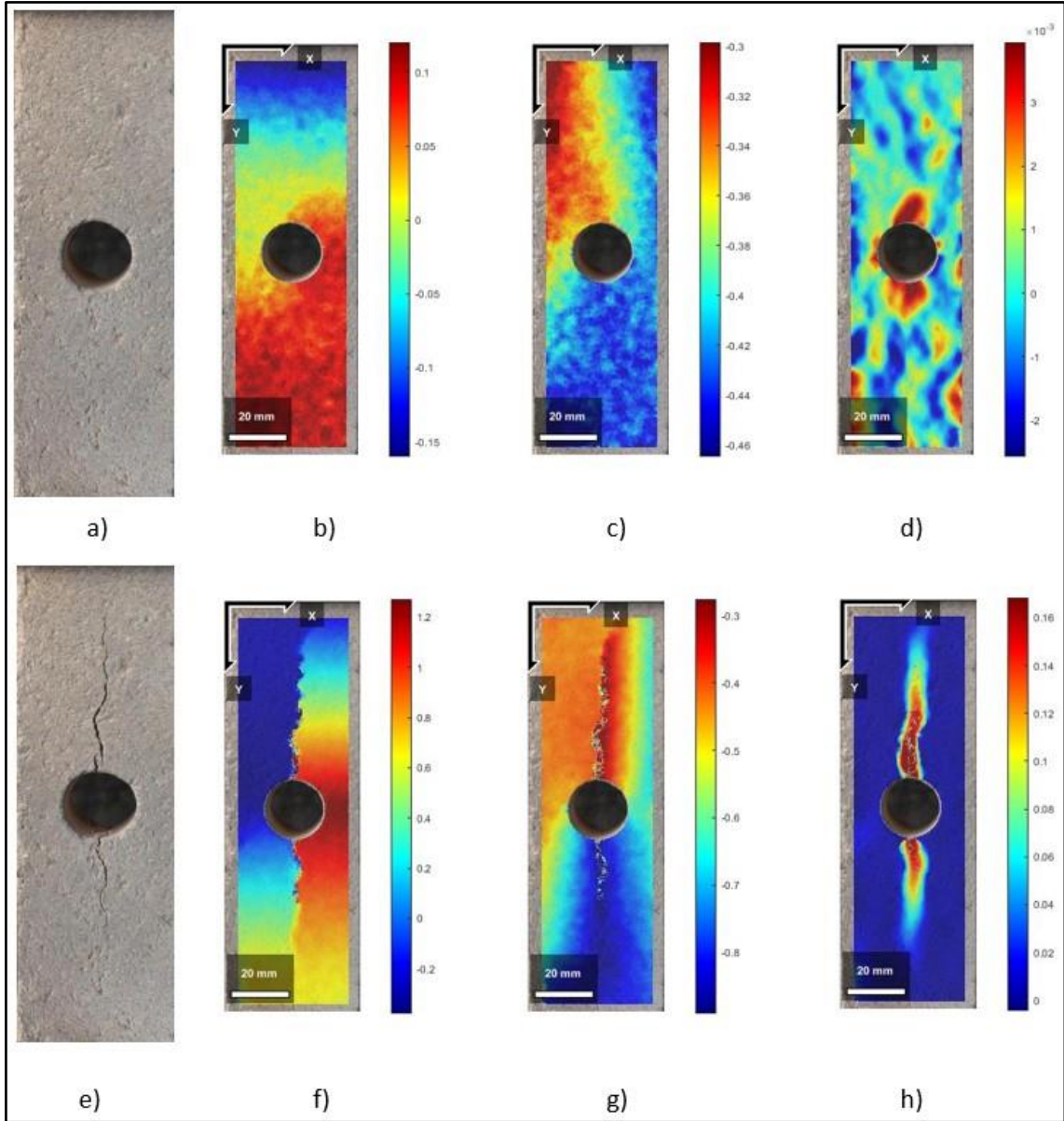
almaktadır (Şekil 4.24.c). Dikkatli bir şekilde incelendiğinde, deliğin üst kısmında yer alan çatlağın bir uzanımı olarak numunenin sağ alt tarafına doğru ilerleyen üçüncü çatlak gerinim grafiğinde fark edilebilmektedir.



Şekil 4.25. SA-10 numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesi görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

Şekil 4.26’da 20 mm deliğe sahip Sille andeziti numunesinde ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum DIC analizleri ile kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde 20 mm açıklığa sahip deliğin üst kenarında oluşmaya başlayan çatlak, numunenin ilk durumunda yatay ve düşey deplasman görüntüsünde (Şekil 4.26.b, 4.26.c) ve E_{xx} gerinim grafiğinde (Şekil 4.26.d) görülebilmektedir. İlerleyen aşamalarda deliğin üst kenarından başlayan çatlağın ilerleyerek numunenin üst kenarına ulaştığı ve deliğin alt kenarından başlayan ikinci çatlağın numunenin alt kenarına kadar ilerlediği görülmektedir. İlk çatlağın gözlemlendiği görüntü, referans görüntüden sonraki 16718. kare (164. saniye)’dir. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 22294. kare (293. saniye)’de yenilmiştir.

Şekil 4.27’de numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir.

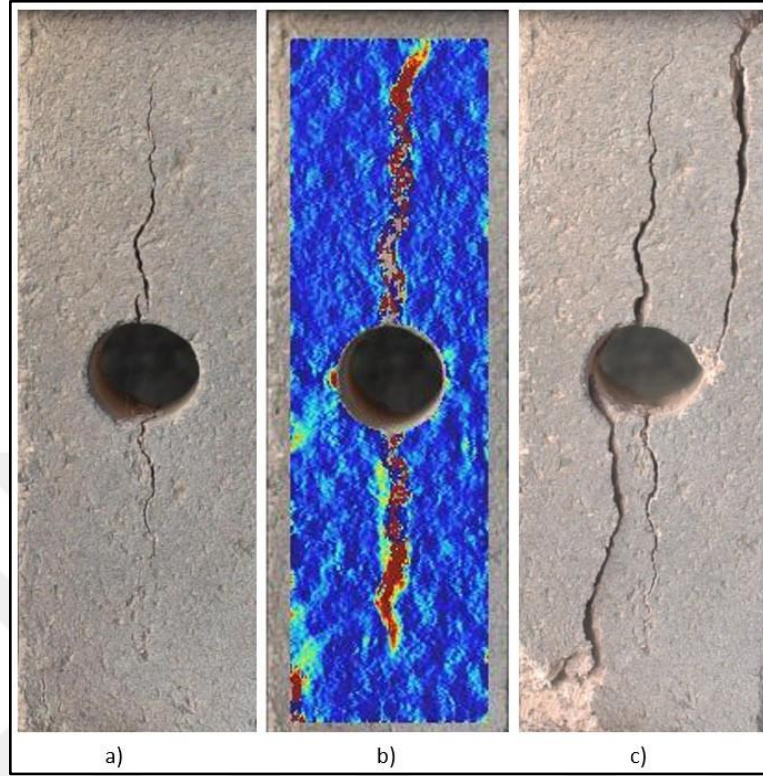


Şekil 4.26. SA-20 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

Burada görülebileceği gibi numunenin ortasında bulunan delik çevresinden başlayan çatlaklar yukarı ve aşağı yönde ilerleyerek numunenin üst ve alt kenarına ulaşmıştır. Bunlara ek olarak son E_{xx} gerinim grafiğinde deliğin sol kenarında gözlemlenen gerinim

artışı, parçalanma anının başlangıcını gösteren fotoğrafta görülen ikincil çatlağın oluşum noktasına işaret etmektedir.

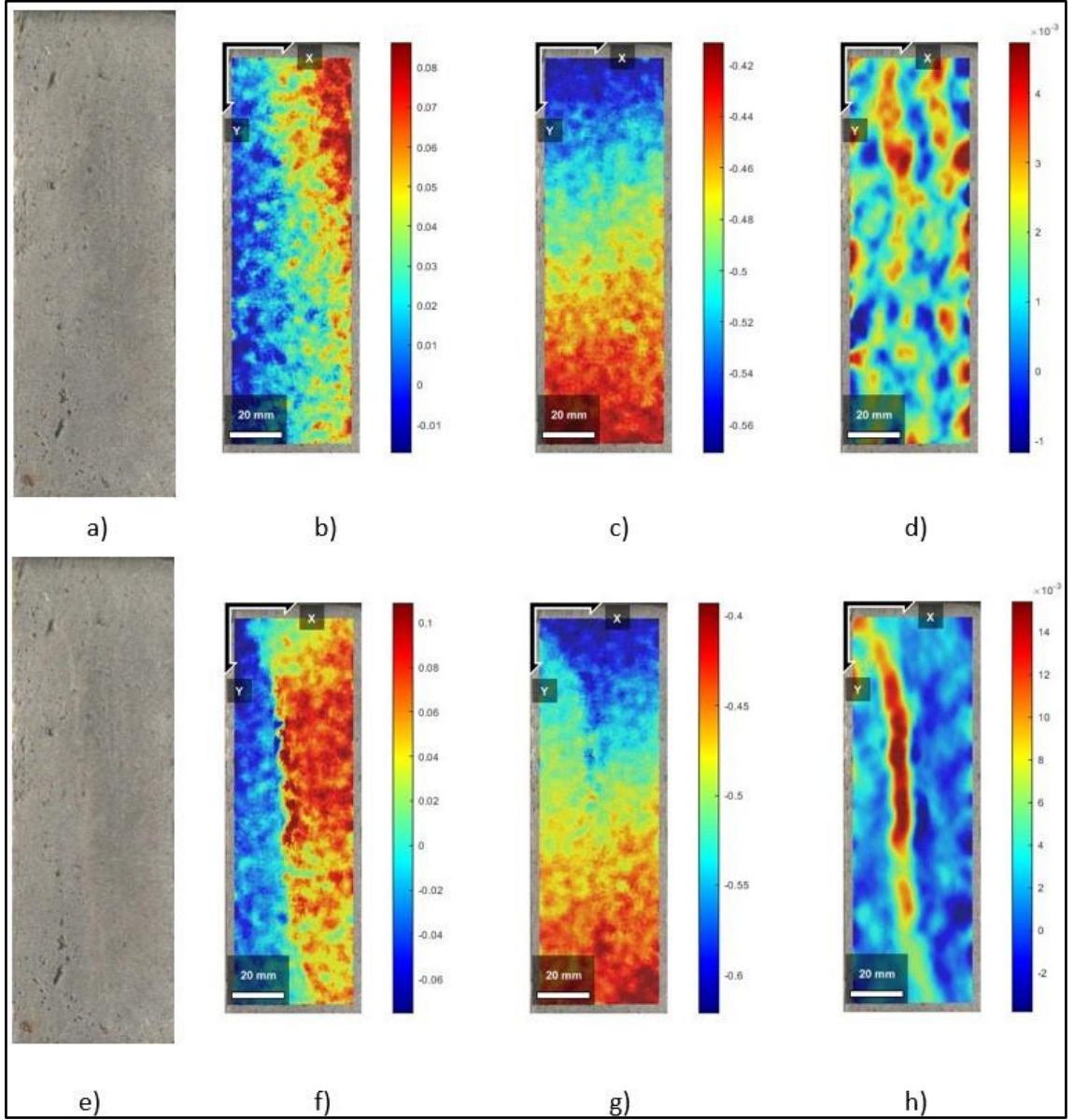


Şekil 4.27. SA-20 numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim analizi ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

Şekil 4.28, sağlam (deliksiz, “KT-int”) Karaman traverten numunesinin DIC analizleri kapsamında, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ile parçalanma öncesi durumun karşılaştırmasını göstermektedir. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinde sol üst kenara yakın kısımda çatlak başlangıcı tespit edilmiştir. Çatlağın gözlemlendiği an, referans görüntüden sonraki 23273. kare (194. saniye)’dir. Bu görüntüden bir sonraki görüntü olan 23274. kare’de numune yenilmiştir. Çatlağın başlangıcı ve numunenin yenilmesi ardışık iki karede ancak gözlemlenebilmiştir. İlk görüntüde oluşumu başlayan çatlak hızlı bir şekilde ilerlemiş ve numune yüzeyini boydan boya geçerek yenilmeye sebep olmuştur.

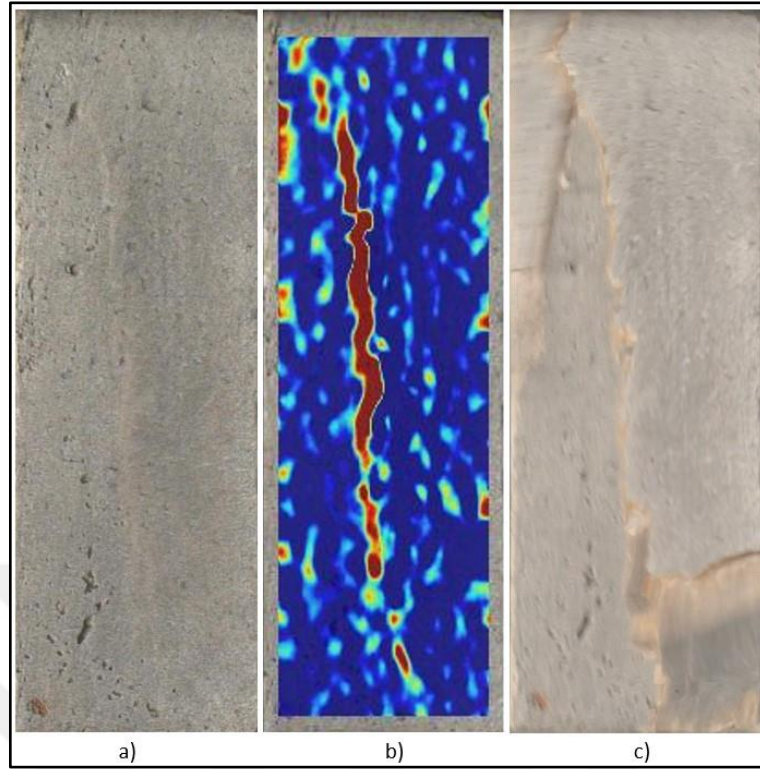
Şekil 4.29’da numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi sonucunda elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Numune üzerinde oluşan çatlağın son durumu gerinim grafiğinde açık bir biçimde görülebilmektedir. Numune parçalanmaya

başladığı andan alınan görüntü de E_{xx} gerinim grafiğinde görülen çatlakın nihai durumunu göstermektedir.



Şekil 4.28. KT-int numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

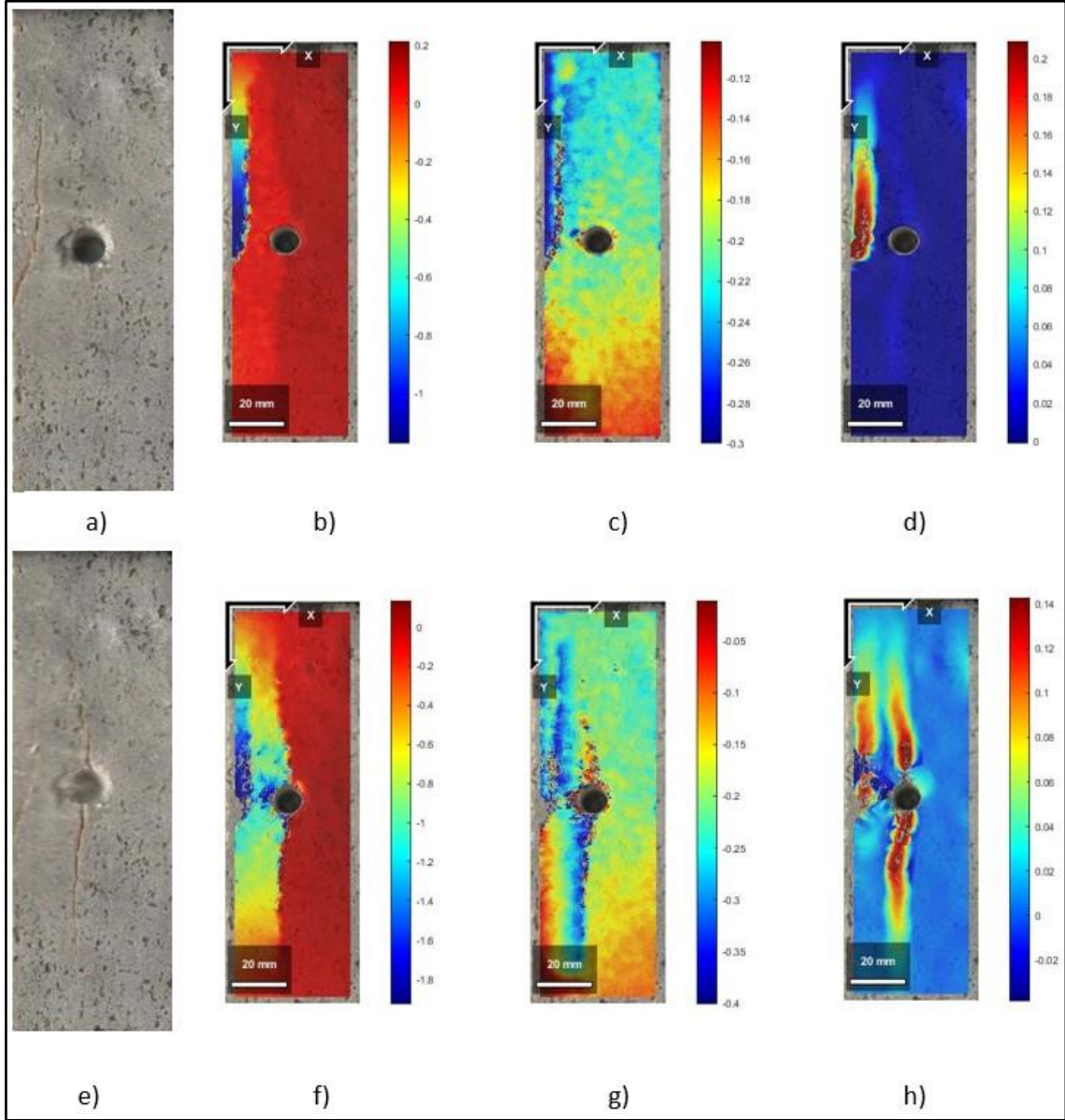


Şekil 4.29. KT-int numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

Şekil 4.30'da 10 mm deliğe sahip Karaman Traverten numunesinin DIC analizlerinde, ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Numune yüzeyinin delik hizasındaki sol tarafında gözlemlenen ilk çatlak oluştuğu an 9404. kare (78. saniye) olarak tespit edilmiştir. Bu andan hemen sonraki kare olan 9405. kare numune parçalanmadan önce analiz edilebilen son görüntü olarak kullanılmıştır. Çatlak gelişimi oldukça hızlı olmuştur. Şekil 4.30.b'de yatay deplasmanları gösteren grafikte numunenin yenilmesine sebep olan ana çatlak fark edilebilmektedir.

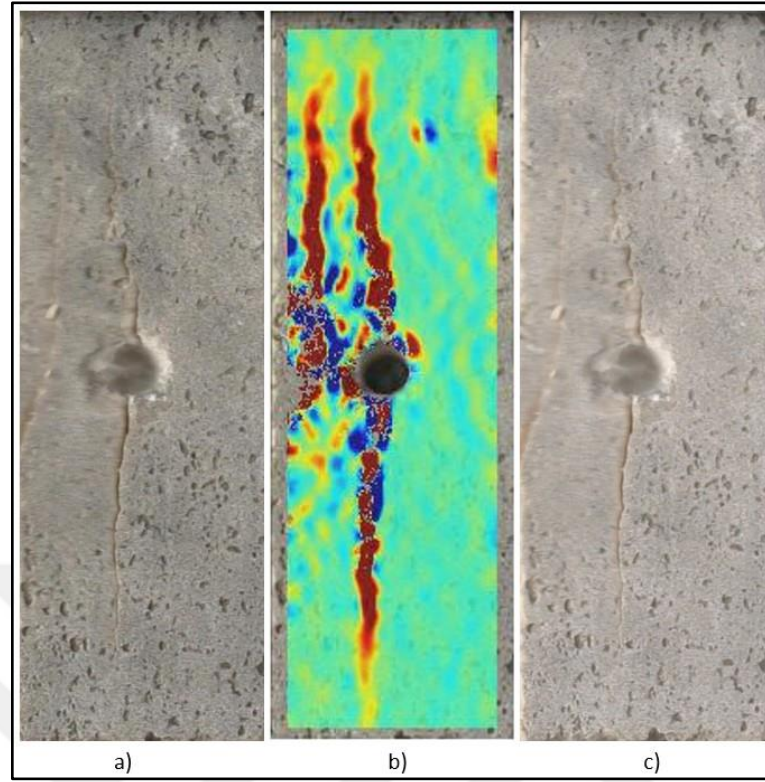
Şekil 4.31'de numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir. Burada görülebileceği gibi numunenin ortasında bulunan delik çevresinden başlayan çatlak, yukarı ve aşağı yönde ilerleyerek numunenin parçalanmasına sebep olmuştur. Numunenin sol tarafında oluşan ilk çatlak

da üst kenara kadar ulaştığı görülebilmektedir. Gözlemlenen bu çatlaklar Şekil 4.31.b'deki E_{xx} gerinim analiz sonucunda da net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.30. KT-10 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

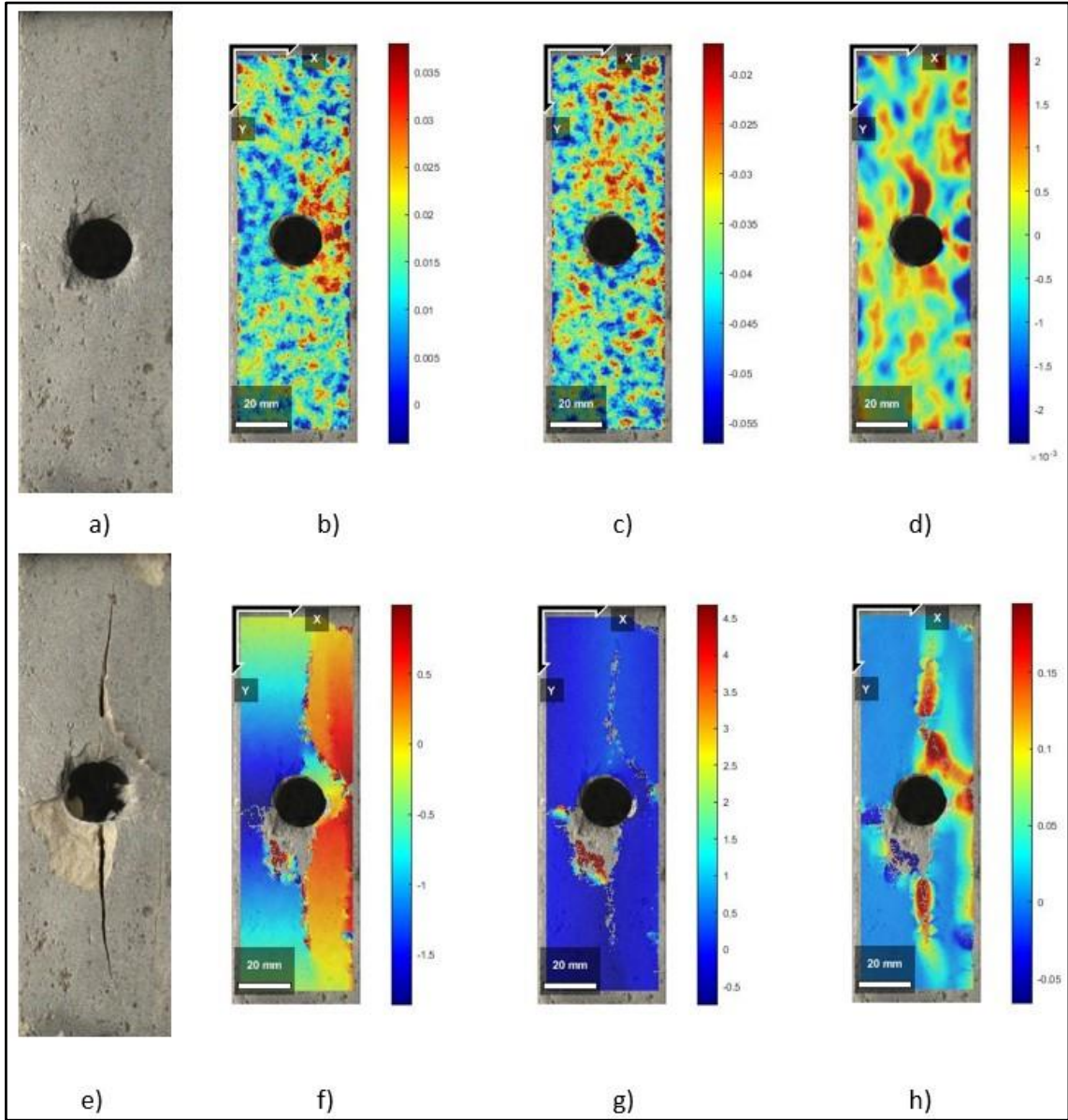
a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.



Şekil 4.31. KT-10 numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim analizi ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

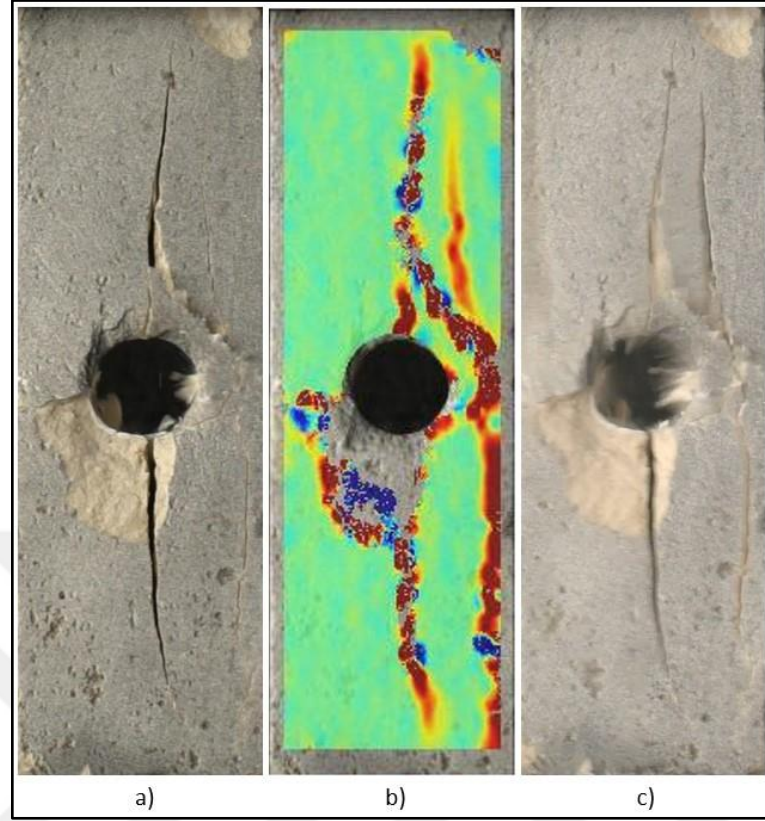
Şekil 4.32’de, 20 mm deliğe sahip Karaman Traverteni numunesinde ilk çatlamanın gözlemlendiği an ve parçalanma öncesi durum DIC analizleri ile kıyaslanmıştır. Burada verilen analiz sonuçları, deney esnasında hidrolik pres plakalarının numunenin alt ve üst yüzeylerine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. 20 mm açıklığa sahip deliğin üst kenarında ilk çatlak oluşmaya başladığı durum, yatay deplasman (Şekil 4.32.b) ve E_{xx} gerinim grafiğinde (Şekil 4.32.d) görülebilmektedir. İlk çatlak gözlemlendiği görüntü, referans görüntüden sonraki 3163. kare (26. saniye)’dir. Bu andan sonra numune yük almaya devam etmiş ve 3237. kare (33. saniye)’de yenilmiştir. Deliğin üst kenarından başlayan çatlak ilerleyerek numunenin üst kenarına ulaştığı ve deliğin alt kenarından başlayan ikinci çatlak numunenin alt kenarına kadar ilerlediği görülmektedir. Bu çatlak paralelinde numunenin sağ kenarına yakın bir başka çatlak oluştuğu ve ana çatlak ile üst kısımda birleştiği de son durum görsellerinde görülmektedir.

Şekil 4.33’te numunenin parçalanmadan önceki son görüntüsü, numune üzerinde yapılan DIC analizi neticesinde elde edilen E_{xx} gerinim grafiği ve numune parçalanmaya başladığı andaki görüntü sıralı olarak verilmiştir.



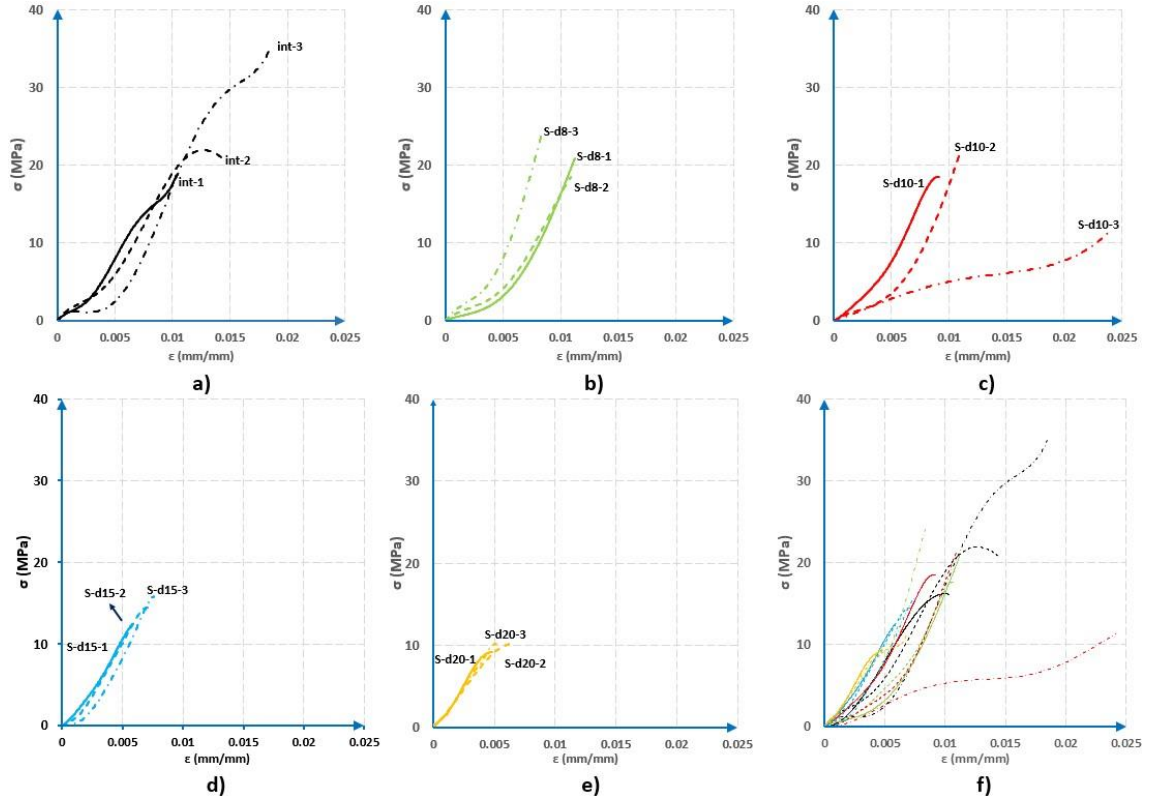
Şekil 4.32. KT-20 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. Burada test edilen numune için verilen DIC analiz grafikleri, gözlemlenen ilk çatlama anı ve parçalanmadan hemen önceki deplasman ve E_{xx} gerinim hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

a) İlk çatlamanın gözlemlendiği andaki numune görüntüsü, b) İlk çatlama anındaki yatay deplasman grafiği, c) İlk çatlama anındaki düşey deplasman grafiği, d) İlk çatlama anındaki E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren görüntü, f) Parçalanma öncesi yatay deplasman grafiği, g) Parçalanma öncesi düşey deplasman grafiği, h) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği.

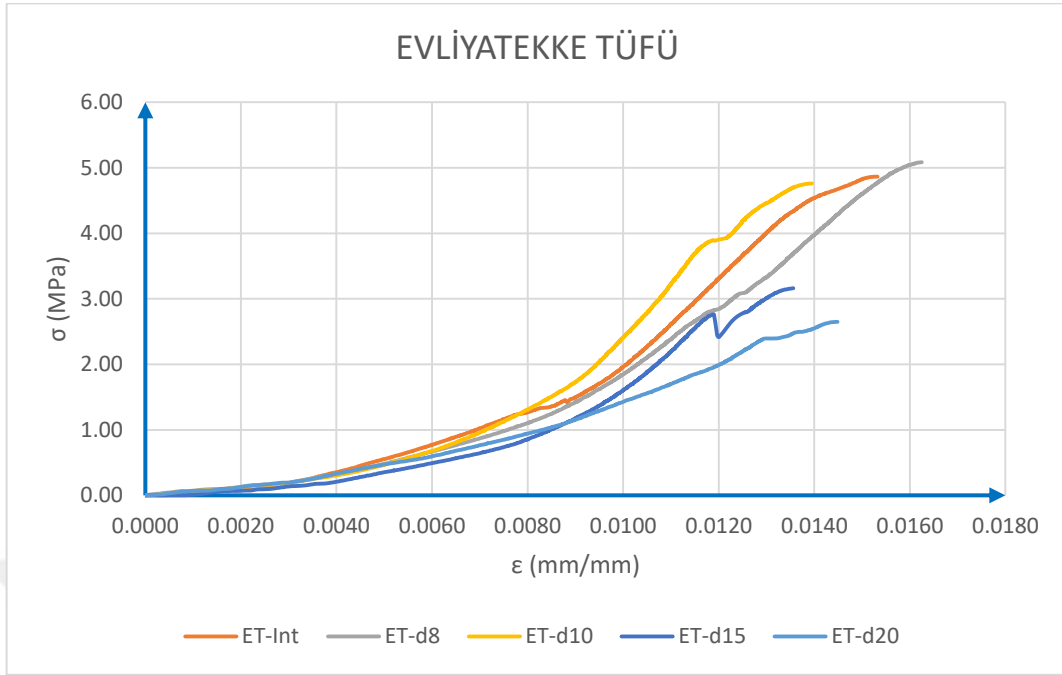


Şekil 4.33. KT-20 numunesine ait parçalanma öncesi DIC E_{xx} gerinim grafiği ve numunenin parçalanması anının görüntüsü. a) Numunenin parçalanma anı öncesini gösteren görüntü, b) Parçalanma öncesi E_{xx} gerinim grafiği, c) Numunenin parçalandığı anın görüntüsü.

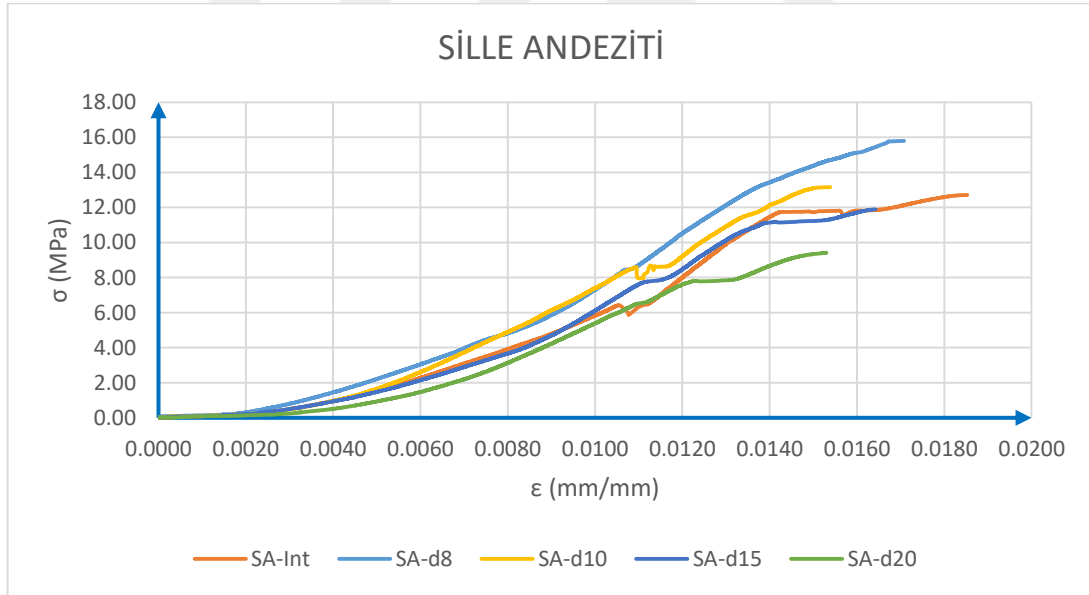
Yapay kayaç, sütun benzeri (alçı bazlı) deney numunelerine ait gerilme-deformasyon grafikleri Şekil.4.34'te, verilmiştir. Doğal kayaç numunelerine de aynı deney prosedürleri uygulanmıştır ve yapılan deneyler sonucunda elde edilen gerilme-deformasyon grafikleri Evliyatekke Tüfü için Şekil 4.35'te, Sille Andeziti için Şekil 4.36'da ve Karaman Traverteni için Şekil 4.37'de verilmiştir.



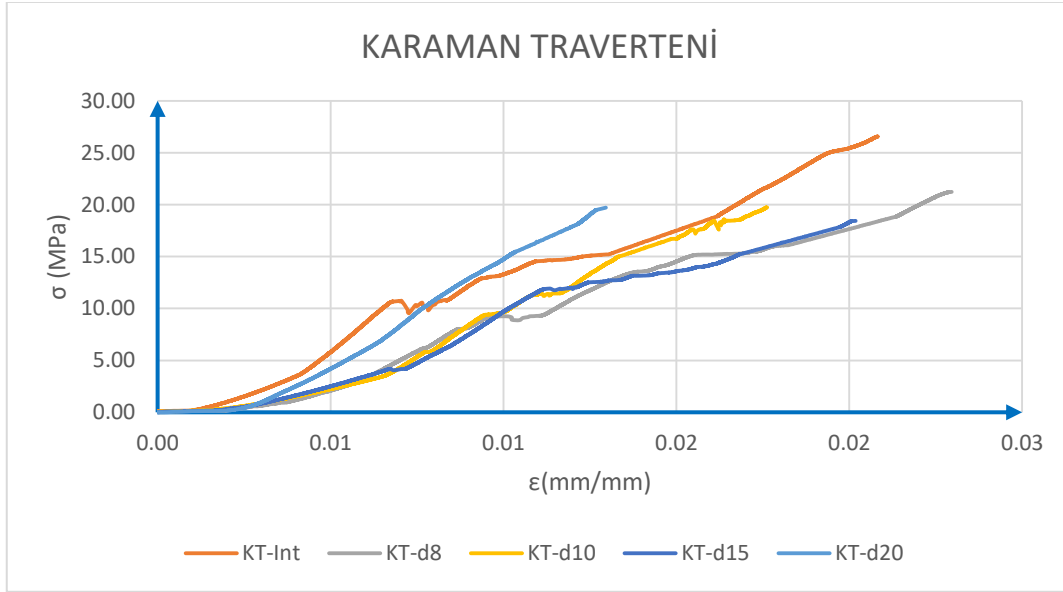
Şekil 4.34. Sütun benzeri deney numuneleri için dikey gerilme-deformasyon dağılımları a) Sağlam numuneler (int-1, int-2 ve int-3), b) 8 mm çapında delikleri olan numuneler (S-d8-1, S-d8-2 ve S-d8-3), c) 10 mm çapında delikleri olan numuneler (S-d10-1, S-d10-2, ve S-d10-3), d) 15 mm çapında delikleri olan numuneler (S-d15-1, S-d15-2 ve S-d15-3), e) 20 mm çapında delikleri olan numuneler (S-d20-1, S-d20-2 ve S-d20-3), f) Tüm test numunelerinin tek eksenli gerilme-deformasyon eğrileri (sağlam, S-d8, S-d10, S-d15 ve S-d20).



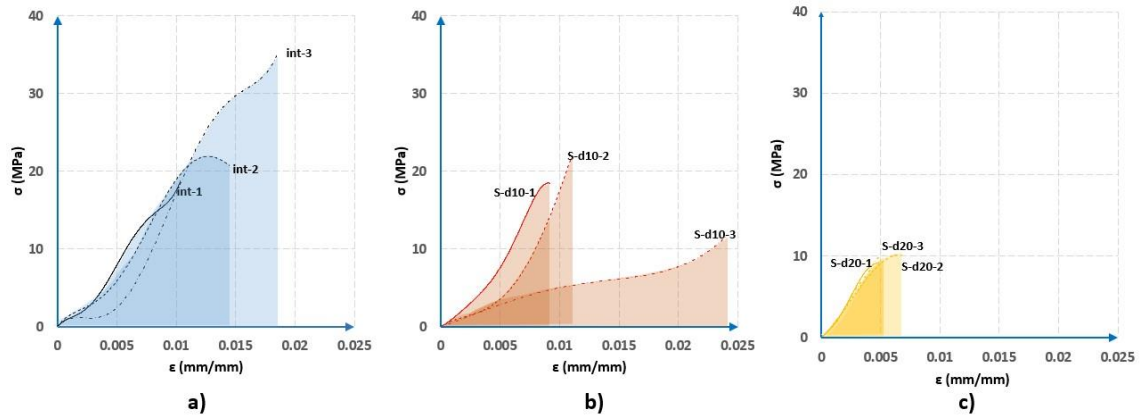
Şekil 4.35. Evliyatekke Tüfü gerilme-deformasyon dağılımı eğrileri.



Şekil 4.36. Sille Andeziti gerilme-deformasyon dağılımı eğrileri.



Şekil 4.37. Karaman Traverteni gerilme-deformasyon dağılımı eğrileri.

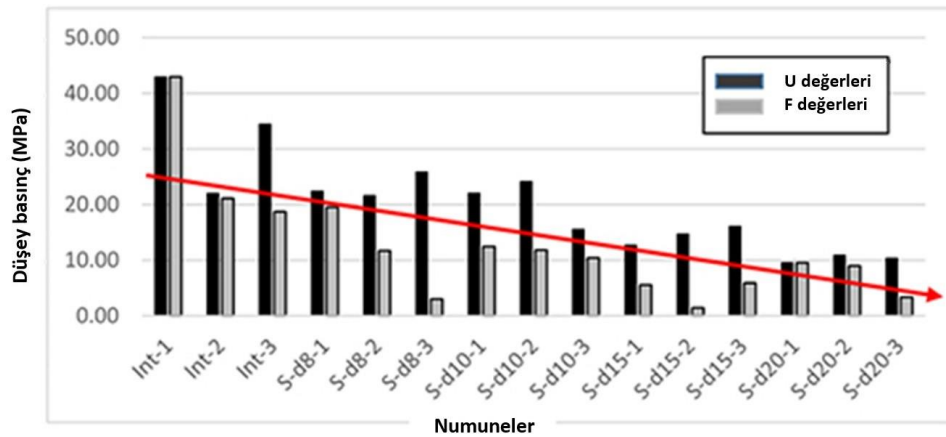


Şekil 4.38. Sütun benzeri alçı deney numunelerinin dikey gerilme-deformasyon dağılımı eğrileri altında depolanan şekil değiştirme enerjisi; a) Sağlam numuneler, b) S-d10 numuneleri ve c) S-d20 numuneleri.

Genel anlamda gerçekleştirilen diğer tek eksenli basınç deneyleri sonuçlarında olduğu gibi, bu çalışmada deneye tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde de gözlenen kırıklar, ya düşey ya da açısallı uzantılardır. Mikro çatlaklar oluşmaya başladığında ve ilgili deformasyonlar test numunelerinin gövdelerini etkilediğinde, numunelerin malzeme tokluğu ve mukavemet özellikleri, parçalanma (toplam kırılma) seviyeleri üzerinde ana belirleyici faktörler olmuştur. DIC analizlerinde gösterilen deney numunelerinin kırılması, delik konumlarına bağlı olarak kırılma yönlerinde oluşan sapmalar deliklerin oluşan çatlaklar üzerindeki etkilerini de göstermiştir. Deneyler sırasında, meydana gelen kırıkların çoğunlukla daha yüksek gerilme konsantrasyonlarının beklendiği delik

çeperlerine yönlendiği gözlenmiştir. Kırıklar, deliklerin hemen üst/alt kısımlarında kavisli görünmektedir.

Düşey yükleme koşullarında deney numunelerinde biriken enerji, numunelerin mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Depolanan enerji miktarını temsil eden tokluk değerleri, numunelerin uygulanan düşey gerilmelere karşı gösterdiği direnç seviyelerini de tanımlamaktadır. Yapılan deneylerden elde edilen tokluk değerlerini gösterebilmek için, numunelerin gerilme-deformasyon grafiklerini çizmek gerekir, (Şekil 4.34, 4.35, 4.36, 4.37). Bu grafikler aynı zamanda, numunelerin kırılma anlarından hemen öncesine kadar süren gerilme-deformasyon şartlarını da göstermektedir. Yapay kayaç benzeri, alçı bazlı test numunelerinde biriken enerji seviyeleri Şekil 4.38’ de gösterilirken, bu grafikler aynı zamanda numunelerin tokluk özellik farklılıklarını daha görünür hale getirmiştir. Özel alçı karışımı kullanılarak hazırlanan deney numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı ortalaması (kübik 50x50x50 mm test numuneleri için) 18,59 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu deneyler, kaya mekaniği deney koşulları için uygulanan standart düşey yükleme hızında gerçekleştirilmiştir. Kolon benzeri deney numuneleri için maksimum (U değerleri) ve yenilme (F değerleri) seviyelerine ait dayanım değerleri dikkate alındığında, Şekil 4.39’da gösterilen grafiği oluşturmak için gerekli verilere ulaşılabacaktır. Bu şekil incelendiğinde, numuneler üzerinde açılan deliklerin, kolon benzeri test numunelerinin mukavemet değerleri üzerinde kesinlikle olumsuz bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.39. Özel alçı tozundan hazırlanmış/kalıplanmış sütun benzeri (50x50x150mm) numuneler üzerinden elde edilen düşey basınç dayanımı deney sonuçları. (Sağlam test numuneleri için tam (25cm²) kesit alanına etki eden düşey yükler, çaplarına göre matkap deliklerinin orta seviyelerinde "Etkin kesit alanına" düşürülmüştür).

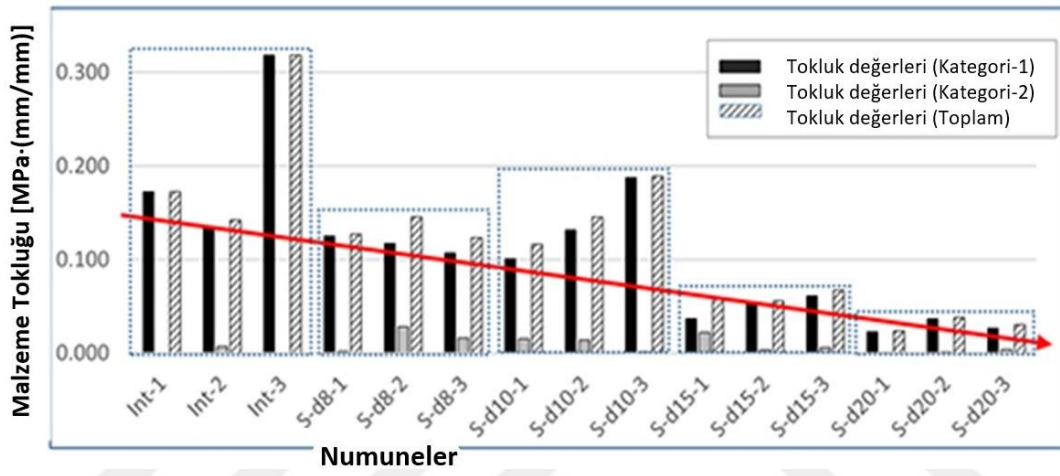
Delik çaplarının artması, uygulanan düşey gerilmenin yoğunlaştığı etkili kesit alanını azaltmaktadır. Kesit alanındaki bu azalmalar, numune gövdelerinden geçen delik boşluklarından dolayı oluşmuştur. Sağlam numune kesit alanı “*tam alan*” olarak kabul edilirse (25 cm², %100), etkili alanlar ve kesit alanlarındaki azalma % olarak şu şekilde hesaplanmıştır; S-d8: (21 cm², %16), S-d10: (20 cm², %20), S-d15: (17,5 cm², %30) ve S-d20: (20 cm², %40). Bu nedenle, numunelerin dayanım değerleriyle (Y, U ve F değerleri) birlikte, deneyler sırasında numunelerde oluşan malzeme tokluk farklılaşmaları tek eksenli basınç dayanımı eğrileri altında kalan alan miktarı olarak; Alan=Gerilme (MPa) x birim deformasyon (mm/mm) değeri olarak çizelgede incelemeye alınmıştır (Çizelge 4.28.).

Çizelge 4.28. Alçı tozu karışımından elde edilen kolon benzeri (50x50x150mm) numuneler için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. Sağlam numuneler için 25cm² olan kesit alanına etki eden düşey etkiler, delik çaplarına göre Etkili Kesit Alanı'na düşürülmüştür.

Numune No.	Delik çapı (cm)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Etkili Kesit Alanı (cm ²); % azalan alan	Tokluk [(MPa).(mm/mm)]	Ortalama Tokluk [(MPa).(mm/mm)]
Int-1	Sağlam	43,18	34,23	0,0 ; 0	0,1266	0,2443
Int-2	Sağlam	25,12		0,0 ; 0	0,1724	
Int-3	Sağlam	34,49		0,0 ; 0	0,4339	
S-d8-1	0,8	22,49	23,33	4,0 ; 16	0,0692	0,0887
S-d8-2	0,8	21,62		4,0 ; 16	0,0716	
S-d8-3	0,8	25,88		4,0 ; 16	0,0656	
S-d10-1	1,0	22,10	20,66	5,0 ; 20	0,0725	0,0688
S-d10-2	1,0	24,16		5,0 ; 20	0,0715	
S-d10-3	1,0	15,73		5,0 ; 20	0,1221	
S-d15-1	1,5	12,74	14,53	7,5 ; 30	0,0328	0,0426
S-d15-2	1,5	14,73		7,5 ; 30	0,0489	
S-d15-3	1,5	16,11		7,5 ; 30	0,0462	
S-d20-1	2,0	9,61	10,31	10,0 ; 40	0,0235	0,0302
S-d20-2	2,0	10,94		10,0 ; 40	0,0407	
S-d20-3	2,0	10,38		10,0 ; 40	0,0263	

Deney numuneleri için malzeme tokluk özellikleri, iki kategoriye ayrılan alanlarda depolanan enerji miktarı hesaplanarak analiz edilmiştir. Birinci kategoride, numunelerin tokluk değerleri (gerilme-deformasyon eğrileri altında kalan alan), Şekil 4.38.'deki gibi üçgenleme ile nihai dayanım (U değerleri) seviyeleri ile sınırlandırılarak hesaplanmıştır. İkinci kategori, nihai (U değerleri) ve yenilme (F değerleri) dayanım seviyeleri ile sınırlandırılmış alanları temsil eden enerji miktarını içermektedir. Test edilen her bir numunenin gerilme-deformasyon eğrileri altında biriken toplam enerji daha sonra bu iki

kategori için tahmin edilen enerji miktarının toplanmasıyla belirlenir (Şekil 4.40.). Ayrıca, boyun verme bölgeleri için tahmin edilmek istenen tokluk değerlerinin (Şekil 2.1), düşey basınç dayanımı deneyinin özel (*stiff test*) (*servo-hidrolik kapalı devre elektronik ve hidrolik sistemlerle donatılmış*) cihazlar ile gerçekleştirilmesi durumunda daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebileceği de bilinmelidir. Özellikle katı malzemelerin kırılma sonrası özellikleri üzerine yoğunlaşan araştırmalar, katıların (kaya malzemelerinin) nihai dayanım (U seviyesi) değer seviyelerinden sonraki özelliklerine odaklanmıştır (Crowder ve Bawden, 2004; Jianxin ve diğ., 2012; Öge, 2013).



Şekil 4.40. Deney numunelerinin malzeme tokluğu farklılıklarının grafiksel gösterimi,

Doğal kayaç numuneleri ile hazırlanan prizmatik deney numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı deneyleri sonucunda elde edilen veriler ve bu verilerin sonucunda hesaplanan tokluk değerleri Çizelge 4.29’da verilmiştir.

Deney numunelerinde gelişen kırılma izleri, numunelerin kırılma tokluğu özelliklerinin önemini göstermiştir. Üzerinde çalışılan yük taşıyıcı yapı elemanları (ve maden ocağı unsurları) olan kolonların & topukların yük altında çatlamaları bunların mühendislik tasarım parametrelerinin yanı sıra; i) düşey gerilme dağılımlarına, ii) bunlar içinde delik bulunması halinde delik çaplarına, iii) ilgili delik konumlarına, iv) ilgili delik şekillerine, v) ilgili delik sayısına, vi) ilgili deliklerde onarım dolgusu varsa bu dolguların mekanik özelliklerine (Y, U, ve F değerleri; elastik modülleri; malzeme tokluk değerleri) de bağlı olduğu kabulü yapılabilir.

Kolon benzeri test numunelerindeki kırılma yayılımları ile ilgili tokluk değerleri, mühendislik kararlarında (daha fazla mekanik davranışı) değerlendirmeye almak için üzerinde araştırma yapılması gereken faktörlerdendir. Benzer deneyler, taşıyıcı

kolonların (delikleri olan/olmayan) kırılma koşullarını anlamak için laboratuvar ölçekli veya gerçek boyutlu beton (veya donatılı beton, betonarme) kolon numuneleriyle de gerçekleştirilebilir. Bu deneyler tokluk farklılıklarıyla kolonların yüzeylerinde oluşan çatlamların bağıntısı konusunda daha gerçekçi (uygulamaya yakın) sonuçlar verecektir.

Çizelge 4.29. Doğal kayalardan elde edilen kolon benzeri (50x50x150 mm) numuneler için tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları. Sağlam numuneler için 25 cm² olan kesit alanına etki eden düşey etkiler, delik çaplarına göre Etkili Kesit Alanı'na düşürülmüştür.

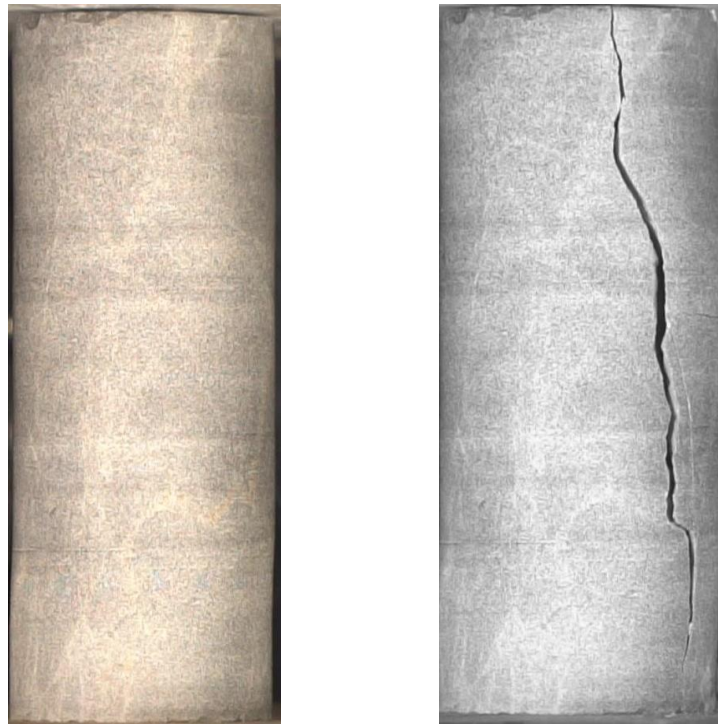
Numune No.	Delik çapı (cm)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Etkili Kesit Alanı (cm ²); % azalan alan	Tokluk [(MPa).(mm/mm)]
ET-Int	Sağlam	4,86	0,0 ; 0	0,0262
ET-d8	0,8	5,09	4,0 ; 16	0,0282
ET-d10	1,0	4,76	5,0 ; 20	0,0220
ET-d15	1,5	3,16	7,5 ; 30	0,0136
ET-d20	2,0	2,65	10,0 ; 40	0,0147
SA-Int	Sağlam	12,71	0,0 ; 0	0,1074
SA-d8	0,8	15,8	4,0 ; 16	0,1135
SA-d10	1,0	13,15	5,0 ; 20	0,0812
SA-d15	1,5	11,89	7,5 ; 30	0,0820
SA-d20	2,0	9,41	10,0 ; 40	0,0564
KT-Int	Sağlam	26,58	0,0 ; 0	0,2658
KT-d8	0,8	21,23	4,0 ; 16	0,2264
KT-d10	1,0	19,74	5,0 ; 20	0,1467
KT-d15	1,5	18,49	7,5 ; 30	0,1743
KT-d20	2,0	20,12	10,0 ; 40	0,1041

Numunelerin yüzeylerinde ortaya çıkan mikro kırıkların, numunelerin gövdelerinde de (numune iç kısımlarında da) gelişmesini beklemenin, doğru bir genelleme olması beklenilmektedir. Numunenin bütünü düşey yüke maruz kalarak, bu yükün oluşturduğu gerilme-yerdeğiştirme etkileri altındayken, üzerinde analiz yapılan katı bir madde örneği olarak ele alınabilir. Burada numunenin bütününden gelen gerilme-yerdeğiştirme verilerinin ve toplam numune hacminde (kütlesinde) oluşan çatlama verilerinin incelenmesi beklenir. Fakat bu verilerin tamamını farklı farklı kapsamlarda ölçmenin henüz bir yöntemi mevcut değildir. Deneyler sırasında numunelerin üzerine uygulanan gerilme değerleri hidrolik prestan okunurken, numunenin toplam yüksekliğinde deney sırasında oluşan yerdeğiştirmeler de LVDT'ler aracılığıyla elde edilmektedir. Bu yerdeğiştirme değerleri, numunenin bütünü niteleyen değerler olarak kabul edilmektedir. Benzer yaklaşımla, numunenin seçilen bir yüzünde oluşan çatlamların DIC yöntemiyle izlenmesinden yola çıkarak, numunenin tamamında oluşan çatlamlar konusunda değerlendirmeler yapılması, bir genelleme olarak kabul edilmiştir.

Numune içlerindeki çatlakların deneyler sırasında izlenmesine yönelik deney düzenekleri hâlihazırda düşünce ve gelişim aşamasında olduğu için ilgili genellemenin yapılan çalışmalarda kullanılması yoluna gidilmiştir. Laboratuvar deneyleri sırasında uygulanan bu kabuller ve değerlendirmeleri mühendisler olarak hiç unutmamak gerektiği burada bir kez daha vurgulanmalıdır. Ayrıca elde edilen bütün laboratuvar sonuçlarının, bu deneylerin standartları da ele alınarak ayrı ayrı tekrardan mühendislik karar verme sezileriyle birlikte yorumlamanın mantıksal bir zorunluluk olduğunu belirtmek yerinde olacaktır.

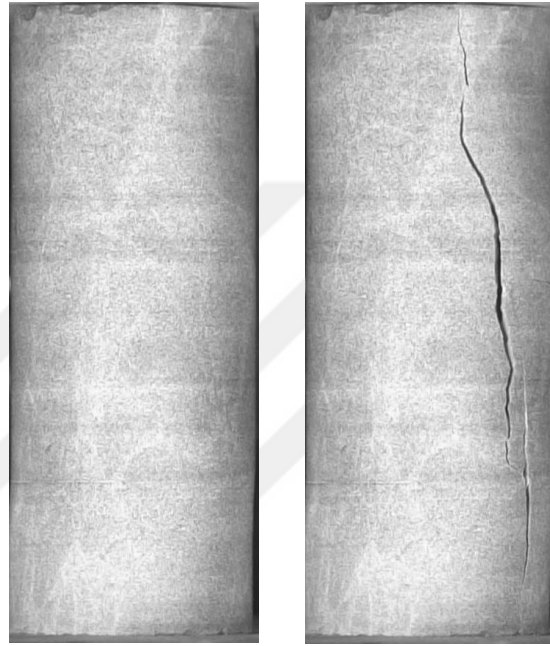
4.3. Afyon Gri Mermer Numunesi ile Yapılan GLCM Analizi

Afyon Gri Mermer numunesine ait silindirik karot numunesi ile yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyi sırasında kaydedilen görüntülerden (video dosyası) seçilen fotoğraflar üzerinde θ açıları 0° , 45° , 90° ve 135° olacak şekilde dört yönde, Gri Seviye Eş oluşum Matrisi (GLCM), analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney numunesine ait “deney öncesi” ve “kırılma sonrası” numune fotoğrafları Şekil 4.41’de verilmiştir.

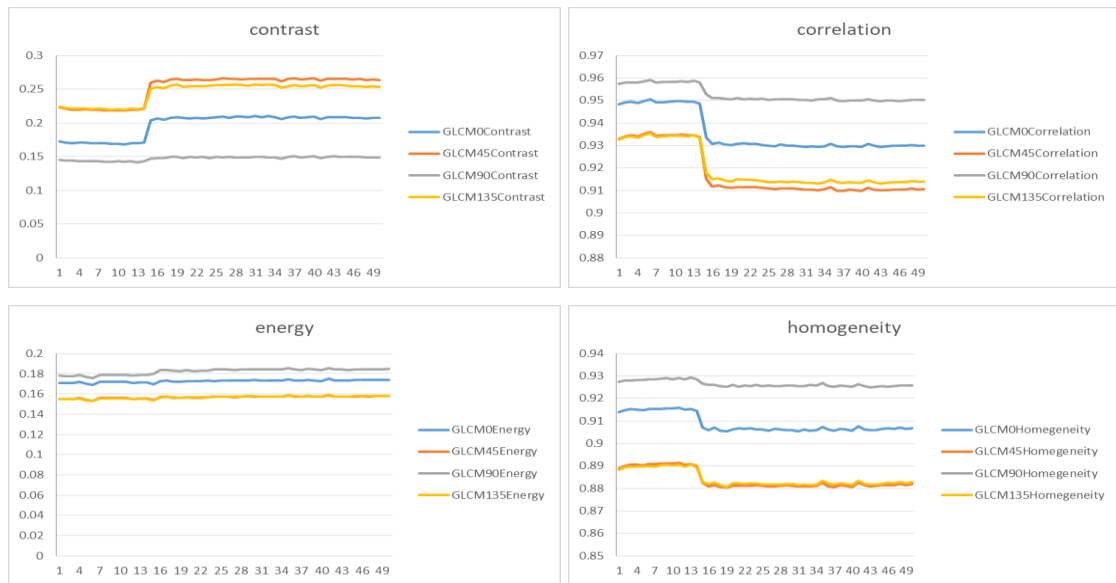


Şekil 4.41. Afyon Gri Silindirik Numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafı.

Bu numune üzerinde GLCM analizi yapabilmek amacıyla 50 adet görüntü seçilmiş ve bu görüntüler üzerinde GLCM analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen sayısal sonuçlar kullanılarak oluşturulan grafikler Şekil 4.43'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde özellikle kontrast ve korelasyon sonuçlarının verildiği iki grafikte farklı açılarda gözle görülür farklılığın olduğu iki görüntü mevcuttur. Bu görüntüler, ilgili GLCM analizinde kullanılan 14. ve 15. görüntülerdir. Bu görüntüler Şekil 4.42' de verilmiştir.

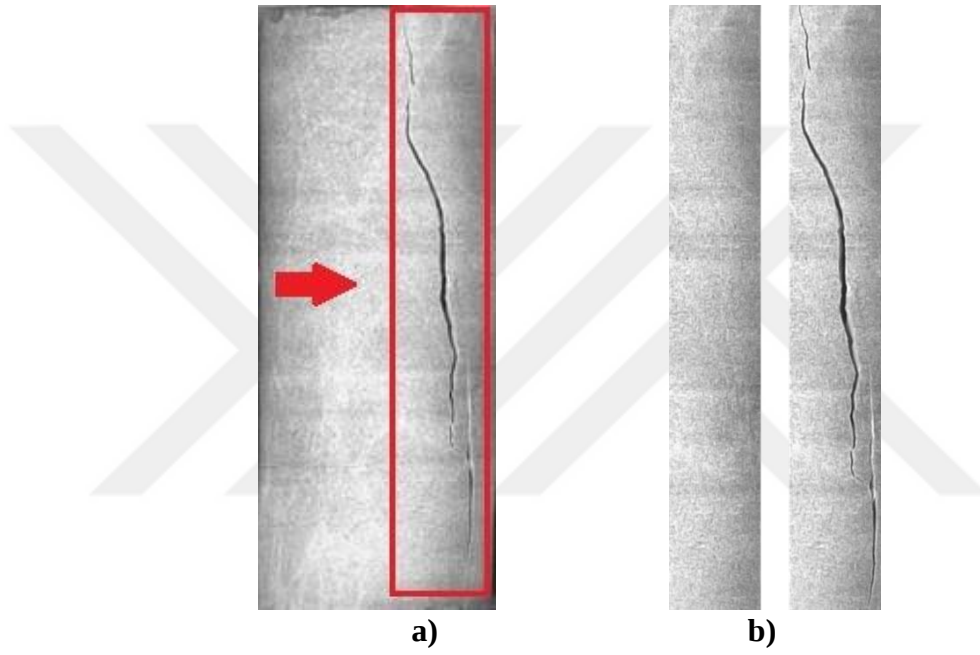


Şekil 4.42. Grafiklerde gözlemlenen değişikliğin olduğu 14. ve 15. görüntü.

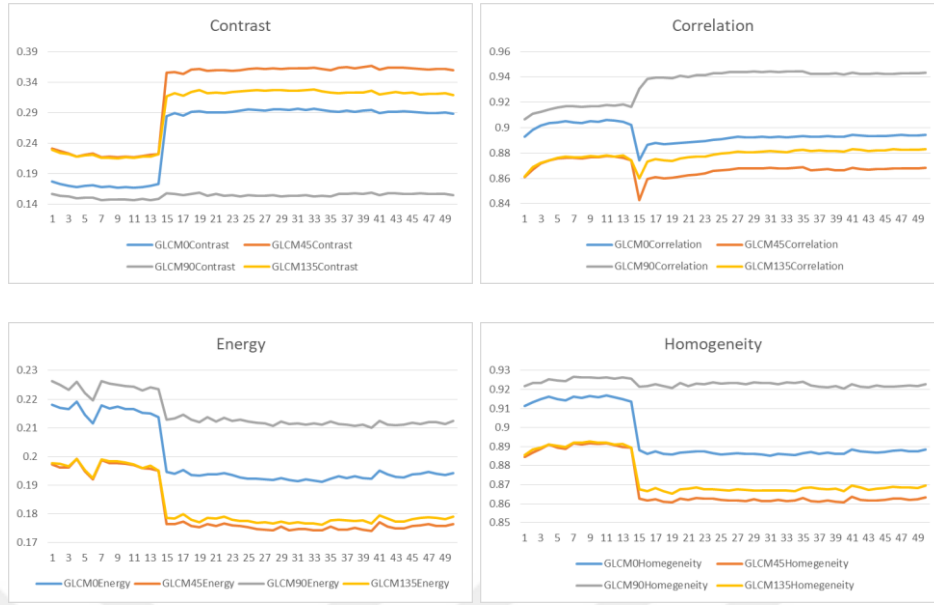


Şekil 4.43. Afyon gri silindirik numunesinin GLCM analizi grafikleri.

Silindirik karot numunesinin gözlemlenen yüzeyinde yapılan GLCM analizine ilave olarak, oluşan çatlağın daha detaylı bir şekilde analiz edilebilmesi amacıyla, çatlağın oluştuğu ve ilerlediği bölge üzerinde GLCM analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.44). Bölgesel analiz sonuçlarında kırılma anında kontrast değerlerinde artış, korelasyon değerlerinde 90° için artış, diğer açılar için düşüş gözlemlenmiştir. Enerji ve homojenlik değerlerinde de tüm açılarda düşüş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.45). Bölgesel analiz sonuçları, numunenin tüm yüzeyine uygulanan analiz sonuçlarına göre daha detaylı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.



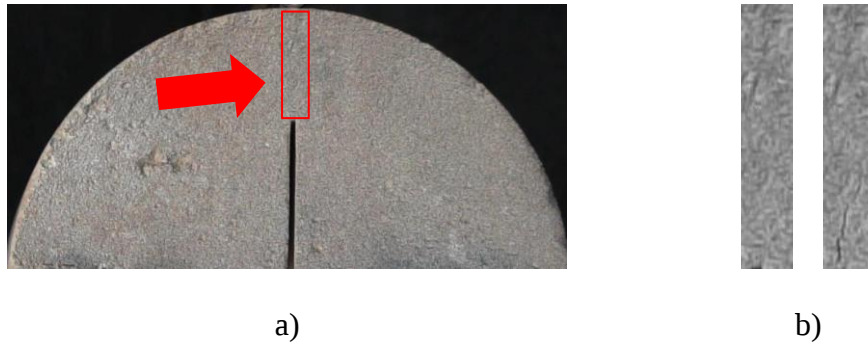
Şekil 4.44. a) Afyon Gri Mermer numunesinde bölgesel GLCM analizi için seçilen kısım, b) Bölgesel GLCM analizi sonucunda gözlemlenen değişimin gerçekleştiği ardışık kareler.



Şekil 4.45. Afyon gri silindirik numunesinin bölgesel GLCM analizi grafikleri.

4.4. SCB Tipi Numune Üzerinde Uygulanan GLCM ve DIC Analiz Sonuçları

Bu araştırmada ele alınan bir adet Evliyatekke Tüf SCB deney numunesi üzerinde Gri seviye eş oluşum matrisi (GLCM), analizleri yapılmıştır. Bu SCB numunesi (yarım disk çentikli numune) ile yapılan kırılma tokluğu belirleme deneyleri sırasında kaydedilen videolardan seçilen görüntüler, GLCM ve DIC yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Yarım disk çentikli numunede GLCM analizi için seçilen inceleme bölgesi Şekil 4.46.a'da işaretlenmiştir. Bu analizde incelemeye alınan ve numune üzerinde çatlaklılık durum değişiminin gözlemlendiği ardışık iki kareye ait görüntü Şekil 4.46.b'de verilmiştir.



Şekil 4.46. a) ET-SCB-1 numunesi ve bölgesel GLCM analizi yapılan kısım, b) GLCM analizleri sonucu gözlemlenen değişimin gerçekleştiği ardışık kareler.

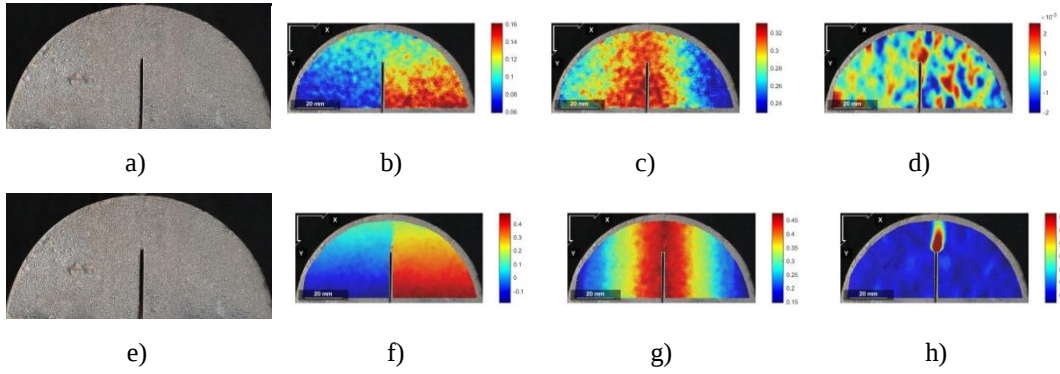
Deney sırasında kaydedilen videodan elde edilen görüntülerden 15 tanesi seçilmiş ve bunlar üzerinde GLCM analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ve 135° açıları için elde edilen kontrast, korelasyon, enerji ve homojenlik değerlerini gösteren grafikler oluşturulmuştur (Şekil 4.47).



Şekil 4.47. ET-SCB-1 numunesinin GLCM analizi grafikleri.

Yarım disk çentikli numuneler arasından seçilen Evliyatekke Tüf numunesi için uygulanan DIC analizi sonucunda ele edilen dağılım grafikleri de ayrıca aşağıda verilmektedir. Bu analiz sonuçları deney esnasında numunenin üç noktasına yerleştirilen pimlerin numune yüzeyine tamamen temas ettiği andaki durum referans alınarak elde edilmiştir. Referans görüntü ve numunenin yenildiği andaki görüntü arasında 15 adet görüntü seçilmiş ve bu seçilen görüntüler kullanılarak DIC analizi gerçekleştirilmiştir. Burada yapılan analizlerde GLCM analizlerinde gözlemlenen değişimin başladığı 7. görüntü ve son görüntü olan 15. görüntüye ait analizler sunulmuştur.

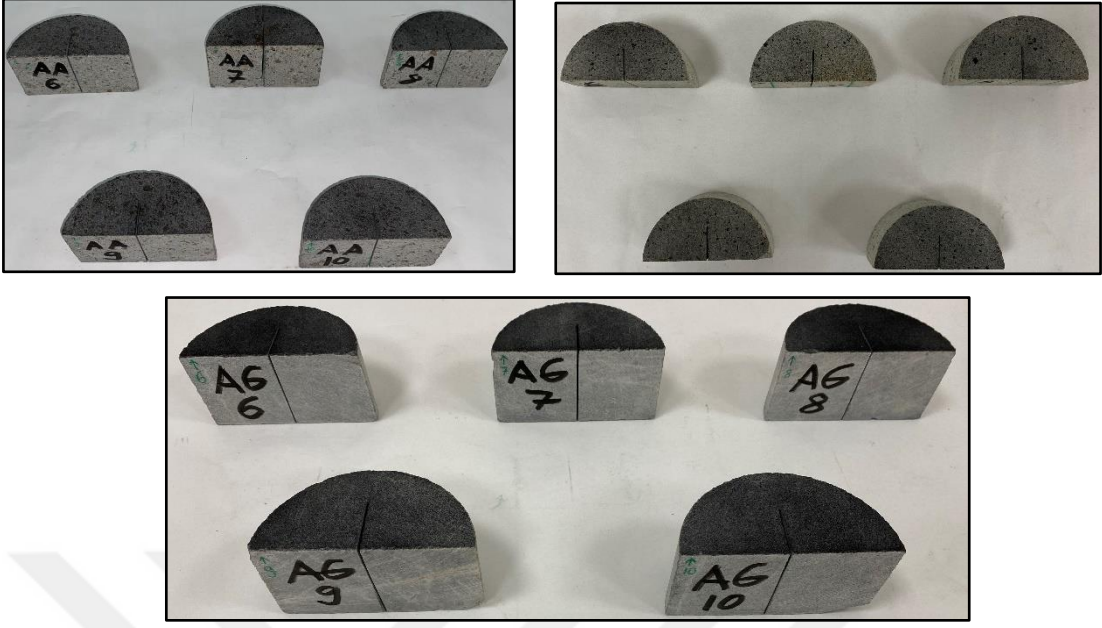
Analizler sonucunda elde edilen yatay ve düşey deplasmanlar ile E_{xx} gerinimi sonuçları verilmiştir (Şekil 4.48).



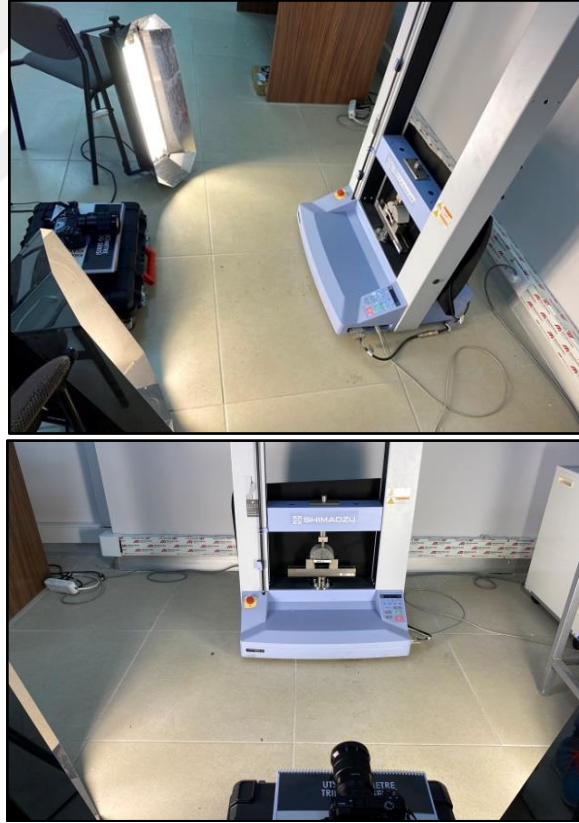
Şekil 4.48. ET-SCB-1 numunesi için düşey basınç gerilme-deformasyon koşullarında DIC analizleri yoluyla kırılma gözlemi. a) İlk durumdaki numune görüntüsü, b) Yatay deplasman görüntüsü, c) Düşey deplasman görüntüsü, d) E_{xx} gerinim grafiği, e) Numunenin parçalanma öncesi anını gösteren fotoğraf, f) Yatay deplasman görüntüsü, g) Düşey deplasman görüntüsü, h) E_{xx} gerinim grafiği.

4.4. SCB Tipi Yarım Disk Numuneler ile Yapılan Kırılma Tokluğu Deneyleri

Öncelikle, Meram Andezit, Ankara Andezit ve Afyon Gri Mermer, Evliyatekke Tüf, Sille Andeziti ve Karaman Traverteni numunelerinin her biri için 10 adet numune hazırlanmıştır. Deneyler, KTÜN-Merkezi Laboratuvar Merkezinde bulunan 10 kN kapasiteye sahip elektromekanik pres ile yapılmıştır. DIC yöntemi kullanılarak çatlama durumunun da izlendiği bu deneyler sırasında, seçilen deney numuneleri yüzeyleri noktalı olarak boyanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler Şekil 4.49’da gösterilirken, DIC yönteminin kullanılmasına yönelik olarak kurulan deney düzeneği fotoğrafları da Şekil 4.50’de verilmiştir. Bu denemeler sırasında hazırlanan SCB yarım disk kırılma tokluğu deney numunelerinin boyutları ve numuneler içine açılan çentiklerin uzunluğu Çizelge 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 ve 4.35’te listelenmiştir.



Şekil 4.49. SCB kırılma tokluğu deneyi için hazırlanan numuneler.



Şekil 4.50. SCB deneylerinde kullanılan pres ve deney düzeneği.

Çizelge 4.30. Meram Andezit numunelerinin boyutları.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
MA-1	93,35	44,83	48,27	24,04
MA-2	93,56	45,56	48,08	23,77
MA-3	93,38	44,57	45,53	23,96
MA-4	93,64	45,60	48,92	24,14
MA-5	93,63	44,96	49,56	23,64
MA-6	93,38	43,98	48,47	24,03
MA-7	93,45	45,38	47,92	23,64
MA-8	93,57	46,25	48,29	23,94
MA-9	93,39	44,79	48,59	23,84
MA-10	93,51	45,66	47,02	23,85

Çizelge 4.31. Ankara Andezit numunelerinin boyutları.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
AA-1	93,62	44,71	52,30	25,26
AA-2	93,84	45,98	52,32	25,33
AA-3	93,92	44,63	52,02	25,27
AA-4	93,61	44,73	51,86	24,63
AA-5	93,87	45,86	51,84	24,36
AA-6	94,10	45,32	47,25	24,26
AA-7	93,88	45,67	51,66	25,17
AA-8	93,81	44,98	47,25	24,22
AA-9	93,90	45,96	46,84	24,42
AA-10	93,91	45,21	47,41	24,11

Çizelge 4.32. Afyon Gri Mermer numunelerinin boyutları.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
AG-1	93,91	45,07	50,63	25,23
AG-2	93,89	46,31	50,79	25,61
AG-3	93,90	45,90	50,76	25,49
AG-4	94,16	45,56	50,24	25,26
AG-5	93,75	44,73	50,90	25,66
AG-6	93,85	45,55	49,50	24,19
AG-7	93,88	44,94	50,39	24,42
AG-8	94,07	45,56	50,40	24,25
AG-9	93,95	45,11	50,46	25,59
AG-10	93,93	46,47	49,46	24,29

Çizelge 4.33. Evliyatekke Tüf numunelerinin boyutları.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
ET-1	93,53	44,17	49,63	25,12
ET-2	93,73	43,75	49,40	25,19
ET-3	93,61	45,97	49,32	25,21
ET-4	94,44	43,91	49,25	25,35
ET-5	93,50	46,38	49,10	25,88
ET-6	93,90	46,21	49,40	25,68
ET-7	93,88	46,13	49,75	25,27
ET-8	93,84	46,45	49,73	25,61
ET-9	93,05	46,01	49,53	25,55
ET-10	93,50	43,99	49,51	25,11

Çizelge 4.34. Sille Andeziti numunelerinin boyutları.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
SA-1	93,75	45,13	49,34	24,64
SA -2	93,92	45,28	49,78	24,90
SA -3	93,58	44,82	50,07	25,18
SA -4	93,64	45,32	49,85	25,19
SA -5	93,57	45,40	49,76	24,97
SA -6	94,19	45,32	50,11	25,08
SA -7	93,73	45,55	50,04	24,58
SA -8	93,72	44,67	49,98	25,17
SA -9	93,72	45,30	49,93	24,98
SA -10	93,78	45,38	49,76	24,96

Çizelge 4.35. Karaman Traverten numunelerinin boyutları.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
KT-1	93,79	45,32	49,17	24,24
KT -2	93,74	44,93	49,67	24,21
KT -3	93,59	45,11	49,57	24,66
KT -4	93,89	45,13	49,14	24,21
KT -5	93,58	44,88	49,40	24,22
KT -6	93,54	45,10	49,70	24,30
KT -7	93,94	45,38	49,07	24,61
KT -8	93,85	44,91	49,07	24,62
KT -9	93,83	45,54	49,42	24,52
KT -10	93,64	44,87	49,62	24,28

Her bir kayaç numunesi için 10 adet yarım disk kırılma tokluğu numunesi hazırlanmıştır. Bu deneyler sırasında DIC yöntemi ile analiz yapılabilmesi amacıyla numunelerin (deney sırasında düşey pozisyonlanacak) bir yüzlerine noktalama desenleri oluşturulmuştur, bu numunelerin Şekil 4.49’da görüldüğü gibi noktalı yüzeyleri siyahımsı bir görünüm almıştır. Deneyler sırasında noktalı yüzeylerdeki hareketin incelenmesi amacıyla, kullanılan DIC analiz programları sayesinde, noktalama işaretlerinin

(binlercesinin deney numuneleri üzerindeki pozisyonları) deneyler sırasında birbirlerine göre pozisyon farklılıklarının kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Bu bilgisayar programları sonuçta deney numuneleri yüzeylerindeki mikro seviyedeki deplasmanları fark ederek onların raporlanmasında kullanılmıştır. Deneyler sırasında, bu deneyler için önerilen 0,2 mm/dk düşey yönlü yükleme hızı kullanılarak yarım disk numunelerde deney öncesinde açılan çentiklere bağlı olarak gelişen çatlak ilerlemeleri izlenmek istenmiştir.

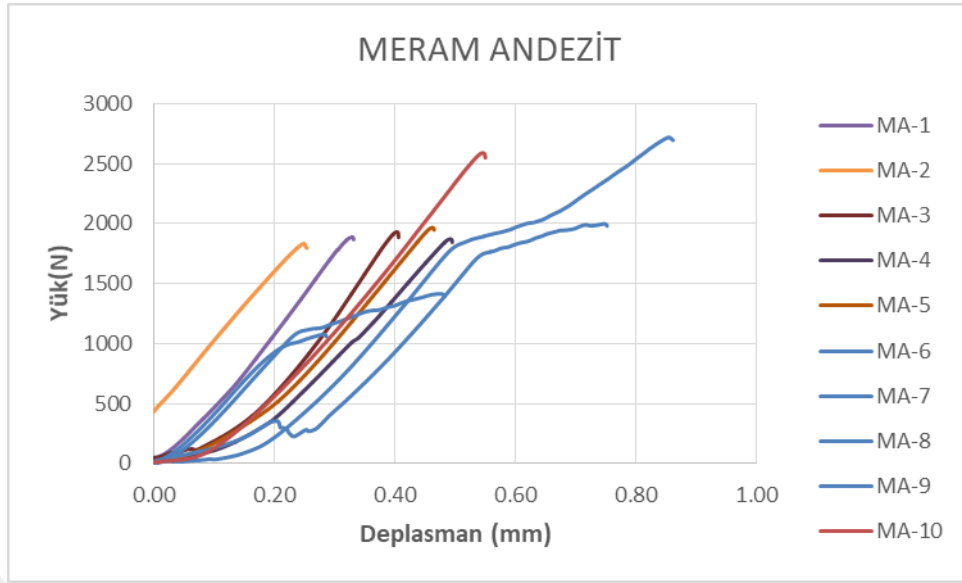
SCB yarım disk deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde, Meram Andezit kayaç numunelerine ait kırılma tokluğu (K_{Ic}) değeri çizelge 4.36’da, deney verileri ile çizilen yük-deplasman grafikleri ise Şekil 4.52’de verilmiştir. Numunelerin deney sonrası kırılmış çatlak içeren görüntüleri Şekil 4.51’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.36. Meram Andezit numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları.

Numune No	s/2R	a/R (=β)	P _{max} (kN)	K _{Ic} (MPa√m)
MA-1	0,67	0,54	1,89	0,70
MA-2	0,66	0,52	1,84	0,63
MA-3	0,67	0,54	1,92	0,77
MA-4	0,66	0,53	1,87	0,65
MA-5	0,67	0,53	1,97	0,68
MA-6	0,68	0,55	1,08	0,43
MA-7	0,66	0,52	1,42	0,49
MA-8	0,65	0,52	1,99	0,66
MA-9	0,67	0,53	2,72	0,99
MA-10	0,66	0,52	2,59	0,91
Ortalama K _{Ic} 0,69 (MPa√m)				S _{Sap} : ± 0,16



Şekil 4.51. Meram Andezit numunelerinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonrası görünümü. Deney öncesi açılan çentiklerden başlayarak ilerleyen çatlamların durumu bu fotoğraflarda gösterilmektedir.

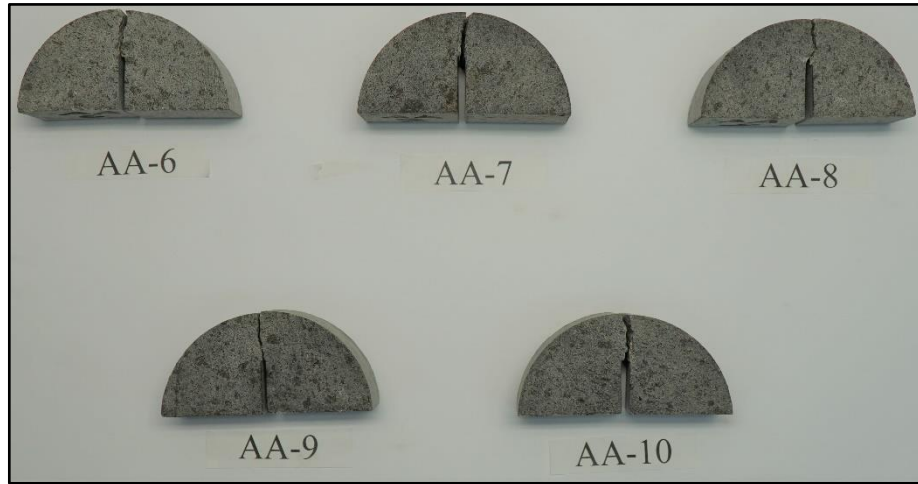


Şekil 4.52. Meram Andezit numunelerine ait yük-deplasman grafikleri.

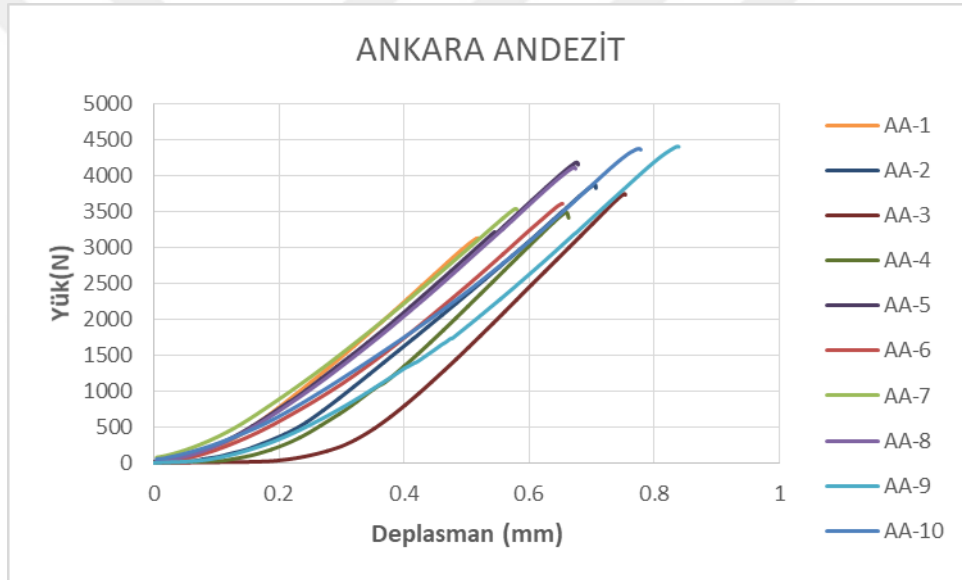
Ankara Andezit kayaç numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları Çizelge 4.37’de verilmiştir. Deney sonucunda çizilen yük-deplasman grafikleri de Şekil 4.54’te sunulmuştur. Deney sonrasında çentiklerden başlayarak ilerleyen çatlamların durumu Şekil 4.53’te gösterilmektedir.

Çizelge 4.37. Ankara Andezit numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları.

Numune No	s/2R	a/R (=β)	P _{max} (kN)	K _{ic} (MPa√m)
AA-1	0,67	0,56	3,13	1,19
AA-2	0,65	0,55	3,87	1,33
AA-3	0,67	0,57	3,75	1,44
AA-4	0,67	0,55	3,48	1,27
AA-5	0,65	0,53	4,18	1,37
AA-6	0,66	0,54	3,61	1,34
AA-7	0,66	0,55	3,54	1,25
AA-8	0,67	0,54	4,11	1,56
AA-9	0,65	0,53	4,40	1,59
AA-10	0,66	0,53	4,37	1,61
Ortalama K _{ic} 1,39 (MPa√m)				S.Sap: ± 0,14



Şekil 4.53. Ankara Andezit numunelerinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonrası görünümü.

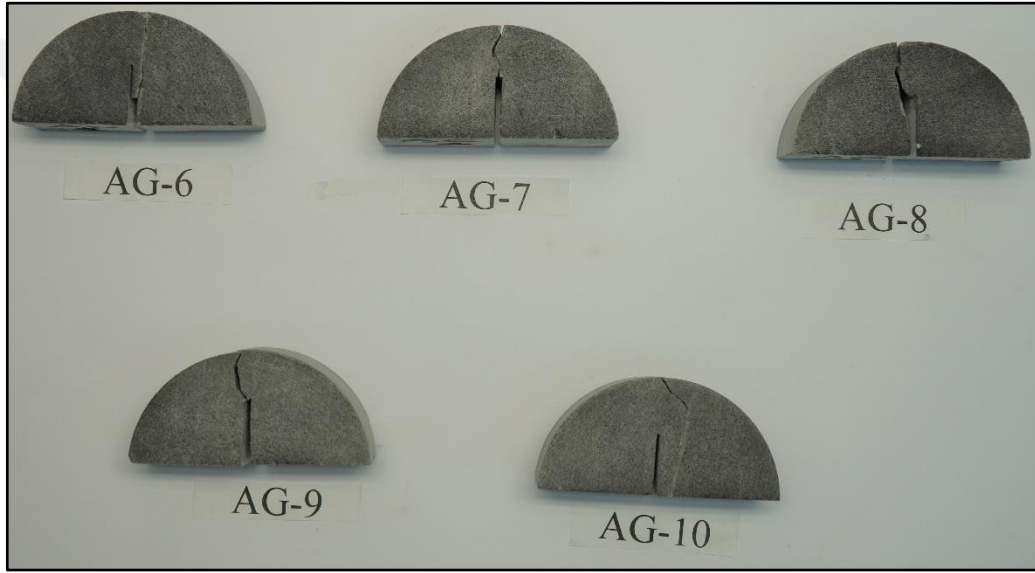


Şekil 4.54. Ankara andezit numunelerine ait yük-deplasman grafiği.

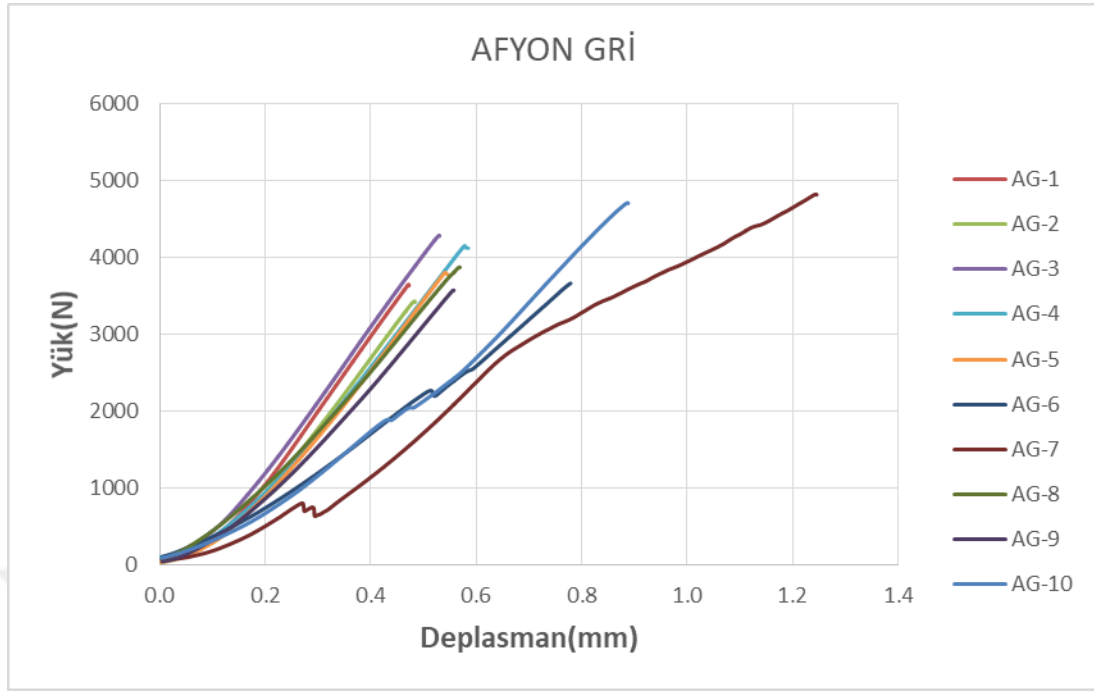
Aynı denemelerin uygulandığı Afyon Gri Mermer SCB yarım disk deney numunelerine ait deney sonuçları Çizelge 4.38’de verilmiştir. Numunelerin deney sonrası görünümü Şekil 4.55’teki gibidir. Bu numunelere ait yük-deplasman grafikleri de Şekil 4.56’da verilmiştir.

Çizelge 4.38. Afyon Gri mermer numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları.

Numune No	s/2R	a/R (=β)	P _{max} (kN)	K _{IC} (MPa√m)
AG-1	0,67	0,56	3,65	1,38
AG-2	0,65	0,55	3,43	1,21
AG-3	0,65	0,56	4,25	1,55
AG-4	0,66	0,55	4,15	1,53
AG-5	0,67	0,57	3,80	1,52
AG-6	0,66	0,53	3,66	1,27
AG-7	0,67	0,54	4,82	1,75
AG-8	0,66	0,53	3,87	1,32
AG-9	0,67	0,57	3,57	1,39
AG-10	0,65	0,52	4,71	1,53
Ortalama K _{IC} 1,45 (MPa√m) S.Sap: ± 0,15				



Şekil 4.55. Afyon Gri Mermer numunelerinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonrası görünümü.

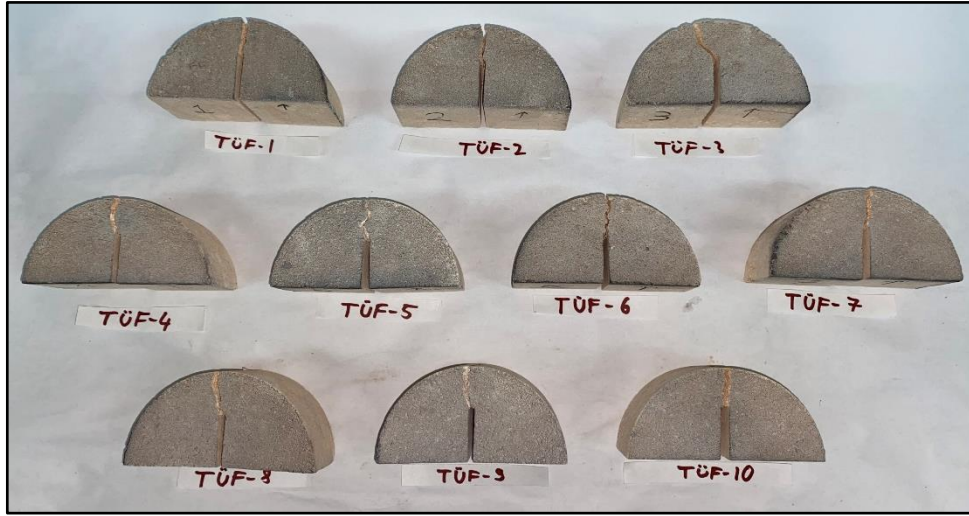


Şekil 4.56. Afyon Gri Mermer numunelerine ait yük-deplasman grafikleri.

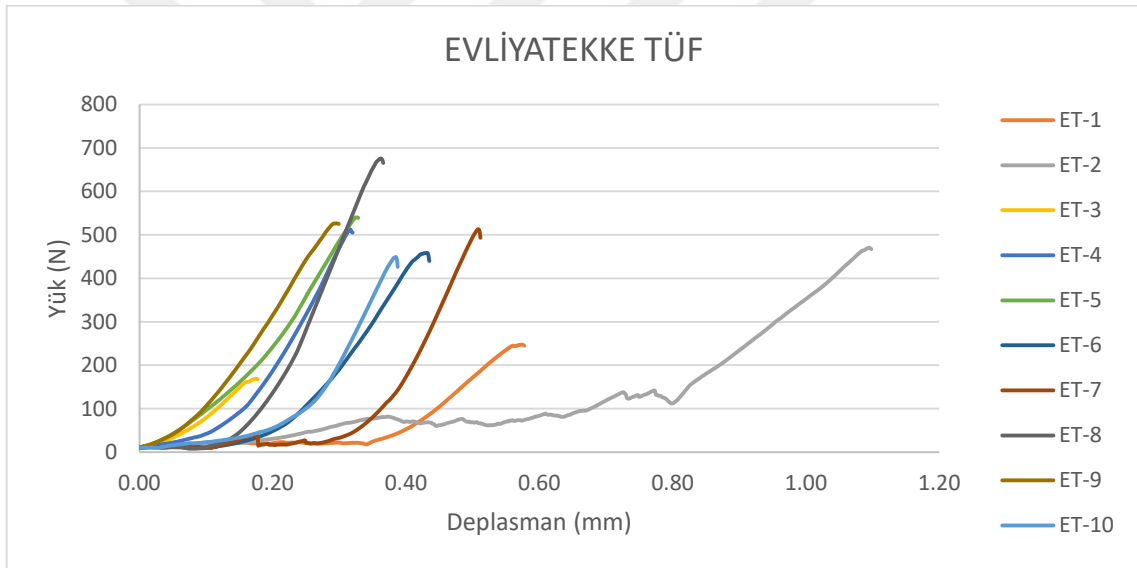
Evliyatekke Tüf kayaç numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları Çizelge 4.39’da verilmiştir. Deney sonucunda çizilen yük-deplasman grafikleri de Şekil 4.58’de sunulmuştur. Deney sonrasında çentiklerden başlayarak ilerleyen çatlakların durumu Şekil 4.57’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.39. Evliyatekke Tüf numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları.

Numune No	s/2R	a/R ($=\beta$)	P _{max} (kN)	K _{ic} (MPa√m)
ET-1	0,68	0,57	0,25	0,10
ET-2	0,69	0,58	0,47	0,20
ET-3	0,65	0,55	0,17	0,06
ET-4	0,68	0,58	0,51	0,22
ET-5	0,65	0,56	0,54	0,20
ET-6	0,65	0,56	0,46	0,17
ET-7	0,65	0,55	0,51	0,18
ET-8	0,65	0,55	0,68	0,24
ET-9	0,65	0,56	0,53	0,19
ET-10	0,68	0,57	0,45	0,19
Ortalama K _{ic} 0,18 (MPa√m)				S.Sap: ± 0,05



Şekil 4.57. Evliyatekke Tüf numunelerinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonrası görünümü.



Şekil 4.58. Evliyatekke Tüf numunelerine ait yük-deplasman grafiği.

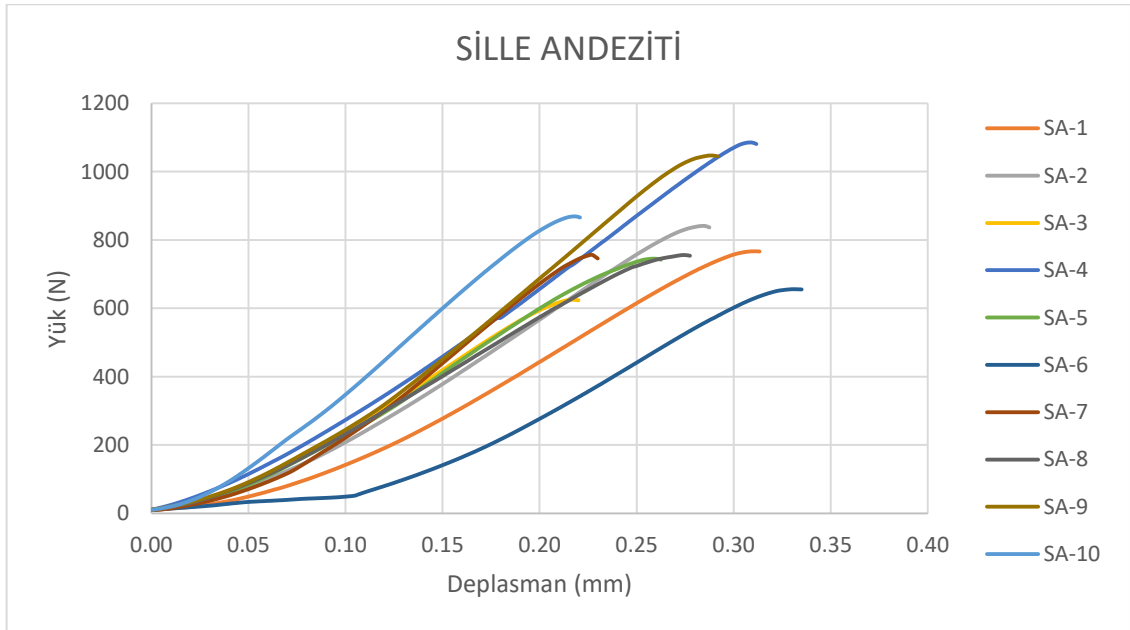
Sille Andeziti kayaç numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları Çizelge 4.40'ta verilmiştir. Deney sonucunda çizilen yük-deplasman grafikleri de Şekil 4.60'ta sunulmuştur. Deney sonrasında numunelerin durumu Şekil 4.59'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.40. Sille Andeziti numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları.

Numune No	s/2R	a/R ($=\beta$)	P _{max} (kN)	K _{ic} (MPa√m)
SA-1	0,66	0,55	0,77	0,28
SA -2	0,66	0,55	0,84	0,31
SA -3	0,67	0,56	0,63	0,24
SA -4	0,66	0,56	1,09	0,41
SA -5	0,66	0,55	0,75	0,27
SA -6	0,66	0,55	0,66	0,24
SA -7	0,66	0,54	0,76	0,27
SA -8	0,67	0,56	0,76	0,30
SA -9	0,66	0,55	1,05	0,39
SA -10	0,66	0,55	0,87	0,32
Ortalama K _{ic} 0,30 (MPa√m)				S.Sap: ± 0,05



Şekil 4.59. Sille Andeziti numunelerinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonrası görünümü.



Şekil 4.60. Sille Andeziti numunelerine ait yük-deplasman grafiği.

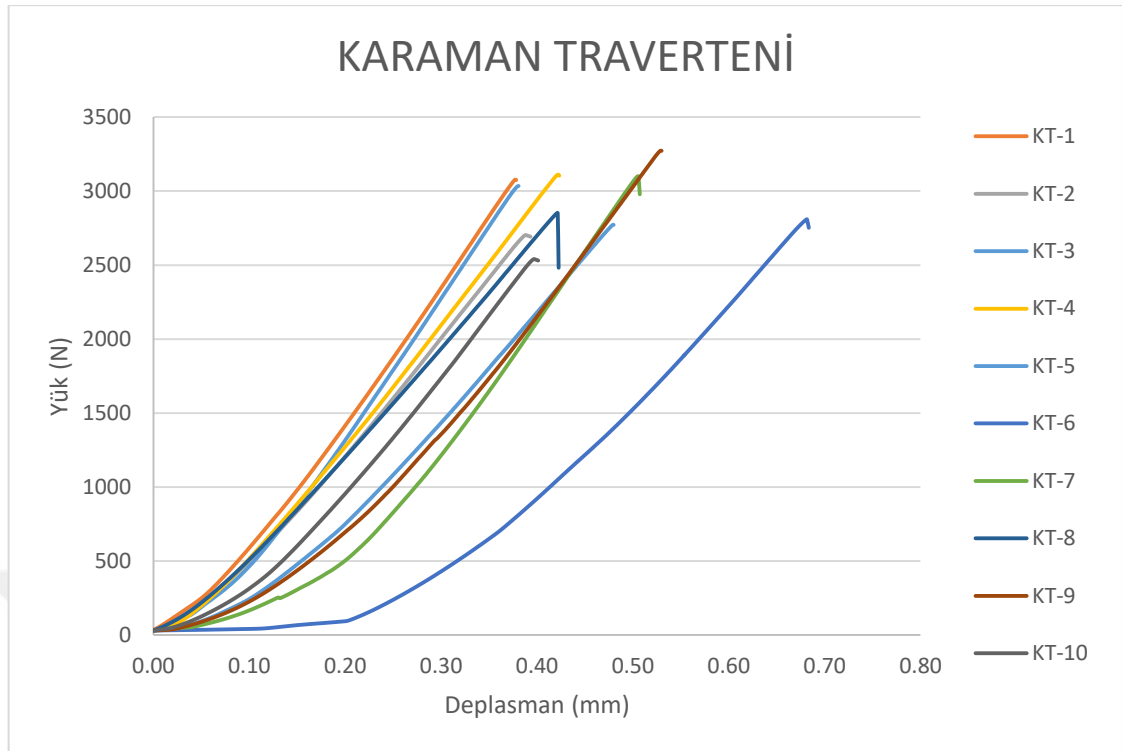
Karaman Traverten kayaç numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları Çizelge 4.41’de verilmiştir. Deney sonucunda çizilen yük-deplasman grafikleri de Şekil 4.62’de sunulmuştur. Deney sonrasında çentiklerden başlayarak ilerleyen çatlakların durumu Şekil 4.61’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.41. Karaman Traverten numunesinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonuçları.

Numune No	s/2R	a/R (=β)	P _{max} (kN)	K _{IC} (MPa√m)
KT-1	0,66	0,53	3,08	1,09
KT -2	0,67	0,54	2,70	0,98
KT -3	0,67	0,55	3,04	1,12
KT -4	0,66	0,54	3,11	1,12
KT -5	0,67	0,54	2,77	1,01
KT -6	0,67	0,54	2,81	1,01
KT -7	0,66	0,54	3,10	1,13
KT -8	0,67	0,55	2,85	1,08
KT -9	0,66	0,54	3,27	1,16
KT -10	0,67	0,54	2,54	0,93
Ortalama K _{IC} 1,06 (MPa√m) S.Sap: ± 0,07				



Şekil 4.61. Karaman Traverten numunelerinin SCB yarım disk kırılma tokluğu deney sonrası görünümü.



Şekil 4.62. Karaman Traverten numunelerine ait yük-deplasman grafiği.

4.5. Kırılma Tokluğunun Yapay Kayaç Numuneleri Yardımıyla Değerlendirilmesi

Kayaçlar ele alındığında, katı maddeler içinde fiziksel ve mekanik davranışlar açısından özel bir öneme sahip bir alanda çalışmaların yürütüldüğü bilinmelidir. Kayaçların süreksizlik içerikleri onları, metal veya plastik katkılı birçok katı maddeden ve onların mekanik özelliklerinden ayırmaktadır. Doğal ortamından alınan kayaçların süreksizlik içerikleri kayaçtan kayaca değişmektedir. İçinde en az süreksizlik olması beklenen magmatik kayaçlardan seçilen örneklerle (Meram Andezit, Ankara Andezit, Afyon Gri Mermer) ve bu kayaçlara ilave olarak içlerinde doğal boşluk ve süreksizlik bulunma ihtimali daha yüksek olan kayaçlar (Evliyatekke Tüfü, Sille Andeziti ve Karaman Traverteni) ile yapılan SCB yarım disk kırılma tokluğu deneylerinden elde edilen sonuçlar yukarıda verilmiştir. İçinde süreksizlik olmadığından emin olunan doğal kaya numunelerinin bulunma olasılığı oldukça az olduğu için, belirli sınırlılıklar içinde yapay kayaç oluşturularak, SCB yarım disk kırılma tokluğu deneylerinin bu yapay kayaçlar içinde tekrarlanması anlamlı bulunmuştur. Yapay kayaç örneklerinden hazırlanan farklı deney örneklerine ek olarak, SCB yarım disk numunelerindeki kırılma

tokluğu davranış farklılıkları doğal kayaçların aynı özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

Bu çalışma sırasında alçı bileşimleri kullanılarak hazırlanan homojen yapay kayaç numuneleri farklı numune şekillerinde kalıplanarak bunlardaki kırılma (çatlama) ve çatlak ilerlemesi durumlarının incelenmesine yardımcı olmuştur. Yapay kayaç numuneleri bu nedenle SCB yarım disk kırılma tokluğu deney numuneleri şeklinde hazırlanırken aynı zamanda, kalınlığı diğer iki boyutuna göre az olan plaka numuneler olarak da hazırlanmıştır. Bu numuneler çatlama incelemesinde numune hacim durumunda 2 boyutlu etkinin, 3. boyut uzunluğunun azaltılmasıyla, artırıldığı düşüncesinden yola çıkılarak hazırlanmıştır. Bir başka yapay kaya numune şekli kare prizma numunelerdir. Bu numuneler de inşaat mühendisliği uygulamalarında düşey yükü taşımak için kullanılan yapı kolonlarına benzediği için ele alınmıştır. Kare prizma hacim şekli maden mühendisliği uygulamalarında da yeraltı ocaklarında kullanılan topuklara benzediği için seçilmiştir. Yeraltı maden işletme yöntemlerinden birisi olan oda-topuk yönteminde, kare prizma veya dikdörtgen prizma hacim şekline sahip çok sayıda topuk tavantaşının yükünü tabantaşına aktarma göreviyle işlev görmektedirler. Her iki mühendislik uygulamalarında düşey yükün güvenli bir şekilde taşınması önceliğiyle planlanmaları gereken bu yapı unsurları (kolanlar ve topuklar), kendilerini oluşturan katı maddenin özelliklerine göre mukavemet davranışları göstereceklerdir. İnşaatlarda kolonların beton malzemeden yapılıyor olması bunların daha homojen bir yapıda olmasını sağlarken, madenlerdeki topuklar doğal kayaç veya cevherin (veya kömürün) kendisinden yeraltında kazılmadan bırakılan hacimler olduğu için daha heterojen yapıdadır. Topukların içinde süreksizliklerin olması da kaçınılmaz doğal bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Katı, yüzey veya yeraltı yapıları için tasarlanan kolon benzeri (silindirik veya prizmatik), yapısal taşıyıcı elemanların mukavemeti; malzeme özelliklerine, geometrik şekil ve boyut faktörlerine, kusur bölgelerine, mikro çatlaklara, boşluklara ve boşluk içeriklerine, bunlar üzerinde oluşan gerilme-deformasyon dağılımlarına, sıcaklık değişimlerine vb. faktörlere bağlı olacaktır. Doğal ortamda üç boyutlu şartlarda oluşan gerilmelere karşı direnç sağlamak için tasarlanmış katı malzemeler farklı mühendislik çalışmalarında farklı amaçlar için kullanılmaktadır. İnşaatlardaki betonarme kolonlar ve yeraltı madenlerindeki topuklar bunlardan ikisidir. Bunlar yüzey/yeraltı mühendislik alanları için benzer kategori içine alınabilecek, yük taşıyıcı yapı elemanlarıdır. Kendi malzeme özelliklerine göre düşey yüklere karşı koyarlar. Betonarme kolonlar, hammadde içerikleri, karışım işlemleri, katkı maddeleri, çelik-demir donatı tasarımları, kalıplama ve

prizlenme şartlarına göre farklılıklar gösterirler ve ilgili tasarım şartlarına göre farklı inşaatlarda kullanılırlar. Beton türleri veya harçların kalıplanmasıyla elde edilen diğer katı maddeler, hammadde türlerinin ve oranlarının herhangi bir farklılığına duyarlı olan kendi mukavemet özelliklerine sahiptir. Bunların, yapılması planlanan yüzey veya yeraltı yapısına göre, bunların yüksekliği veya derinliğine göre tasarlanması işlemleri bu konuda çalışan mühendislerin işlevleri ve sorumlulukları arasındadır.

Maden mühendisleri, maden galerilerinin veya maden kazısıyla oluşan boşlukların duraylılığına ve uygulanan tahkimat sistemine her zaman azami özen gösterirler. Bu nedenle, maden mühendisleri maden topuklarını, madende yapılan bütün işlemler ve çalışmalar sırasında yıllarca korumak zorundadırlar. Benzer şekilde, yerüstü/yeraltı inşaatlarındaki betonarme kolonlar da orijinal tasarım şekil ve boyutlarında korunmalıdır. Topuklar ve diğer tüm maden tahkimatları dâhil olmak üzere madencilik ortamları, vardiya mühendisleri tarafından duraylılık durumları için her vardiyada kontrol edilir. Madencilikle ilgili iş ve işyeri güvenliği kuralları ve yasal düzenlemeler, maden güvenliği için bu işlevlerin yapılmasını zorunlu hale getirmiştir. Öte yandan, inşaat mühendisliği faaliyetlerinde yüzey/yeraltı yapılarının (*taşıyıcı betonarme kolonlar dâhil*) duraylılıklarının (yapısal-sağlığının) kontrol edilmesi farklı yapılarda farklı uygulamaları oluşturmuştur. Kullanım süreleri boyunca yapıların duraylılık durumları ağırlıklı olarak; barajlar, köprüler, limanlar, havaalanları vb. önemli ve toplum güvenliğini daha çok ilgilendiren yapılarda kontrol edilmektedir. İnşaat mühendisliği kapsamında ele alınabilecek barınma amaçlı yapılar, tarihin ilk zamanlarından beri insanlığa hizmet vermektedir. Bu nedenle, bazılarının tasarım ve inşaat yapı komplikasyonları vardır. Bunlarda gerçekleştirilen inşaat sonrası faaliyetlerle (*mühendislik izinleri alınmadan yapılan değişiklikler*) ilgili duraylılık problemleriyle karşılaşılması da olası şartlar içindedir. Yüzey/yeraltı yapılarının duvarlarında, betonarme kolon ve kirişlerinde delikler açılması, bu yapıların duraylılık durumlarını etkileyen eksikliklerden biridir. Tesisat hatlarının, borularının yapı kolanlarının içinden geçecek şekilde uygulanması, binaların yapımından sonraki yıllarda bina beton kalitesinin araştırılması amacıyla yapılan karot numune örneği delikleri, binalardaki delik delme işlemlerinin iki ana nedenidir. Yük taşıyıcı yapı elemanları (kolanlar, topuklar vb.) içinde açılan delikler bu yapı elemanlarının hacimsel kütleleri içinde bir kusur olarak yer alacaktır. Bu deliklerde başlayacak bir çatlama durumunun nasıl geliştiğinin incelenme durumu, ilgili yapı elemanı malzemesinin kaya mekaniği dayanım özelliklerine bağlı

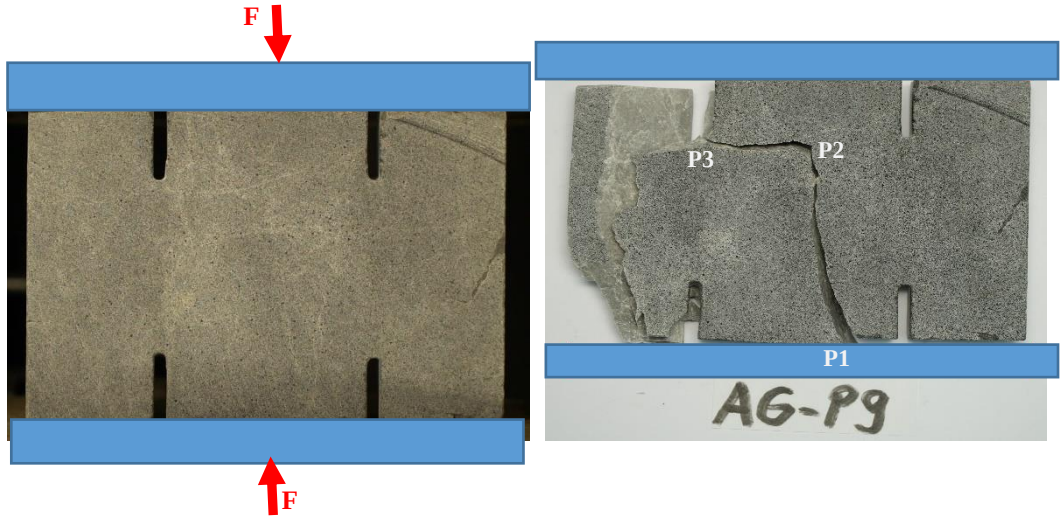
olacaktır. Bu kapsamda kolon veya topuk malzemesinin kırılma tokluğu değerleri kırılma mekaniğini yorumlamada katkı sağlayacaktır.

Bu konuda kırılma tokluğunun sağlayacağı katkıları değerlendirmek ve DIC yönteminin sağladığı avantajları izlemek amacıyla, alçı bileşiminden hazırlanan yapay kaya malzemesi içeren kare prizma deney örnekleri (donatısız yapı kolon benzeri numuneler) laboratuvarda denemelere tabi tutulmuş ve sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır. Deney numunelerinin maksimum ve yenilme dayanım seviyelerini sağlayan gerilme-deformasyon dağılım eğrileri, bu numunelerin malzeme tokluk değerlerini tahmin etmek için de kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yapay kayaç örneklerinde özel alçı tozları kullanılarak hazırlanan harçlar kalıplanmış ve farklı çaplarda delikli/deliksiz kare prizma deney örnekleri olarak hazırlanmıştır. Yapılan tek eksenli basınç deneyleri sonucunda, numunelerdeki deliklerin, deney numunelerinin mukavemet değerleri ile tokluk değerleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu gözlenmiştir. Deliklerinin çapları arttıkça numune mukavemetlerinin ve tokluk değerlerinin azaldığı fark edilmiştir. Bu sonuçlara ilave olarak numunelerin yüzeyinden DIC yöntemi kullanılarak izlenen çatlama yönelimlerinin deliklerden etkilendiği de elde edilen sonuçlar arasındadır.

4.6. Plaka Numuneleri ile Yapılan Deneyler

Doğal kayaçlar içinde üç boyutlu yüklemeler nedeniyle gelişen çatlakların durumunun ve ilerleme yönlerinin anlaşılmasına yönelik çalışmalar farklı mühendislik alanlarında devam etmektedir. Bu çalışmaların temelini oluşturan katı madde çatlak mekaniği prensiplerinin kayaçlardaki uygulama yönleri, deprem çatlaklarının (büyük kırıklar, faylar) anlaşılmasının ötesinde, yeraltı madenciliğinde veya inşaat yapı sektöründe yük taşıyan ve duraylılıklarının olabildiğince uzun sürmesi istenen kolon ve topuklar için önemli yaklaşımlar sunmaktadır. Kayaçlarda kırılmaların başlangıç şartlarının ve oluşan (veya başlangıçta var olan çatlakların) çatlakların ilerleme yönünün tayini (önceden bilinmesi) önemli bir mühendislik çalışması olarak karşımıza çıkar. Doğal kayaçlarda numuneler içine önceden yerleştirilen çatlakların hangi şartlarda ne yöne ilerleyeceğinin araştırılması, topografik arazi şartlarında zor olmakla birlikte, bu fikrin laboratuvar örnekleri üzerinde denenmesi, çatlakların ilerlemesinde kırılma tokluğunun etkisi bu çalışma kapsamında da değerlendirilmek üzere araştırılmaktadır. Bu kapsamda Gökay ve arkadaşlarının 2004 yılında doğal mermer plakalar üzerinde (15x10x2 cm boyutunda) yaptıkları çalışma, çatlak oluşumu ve verilmiş çatlak

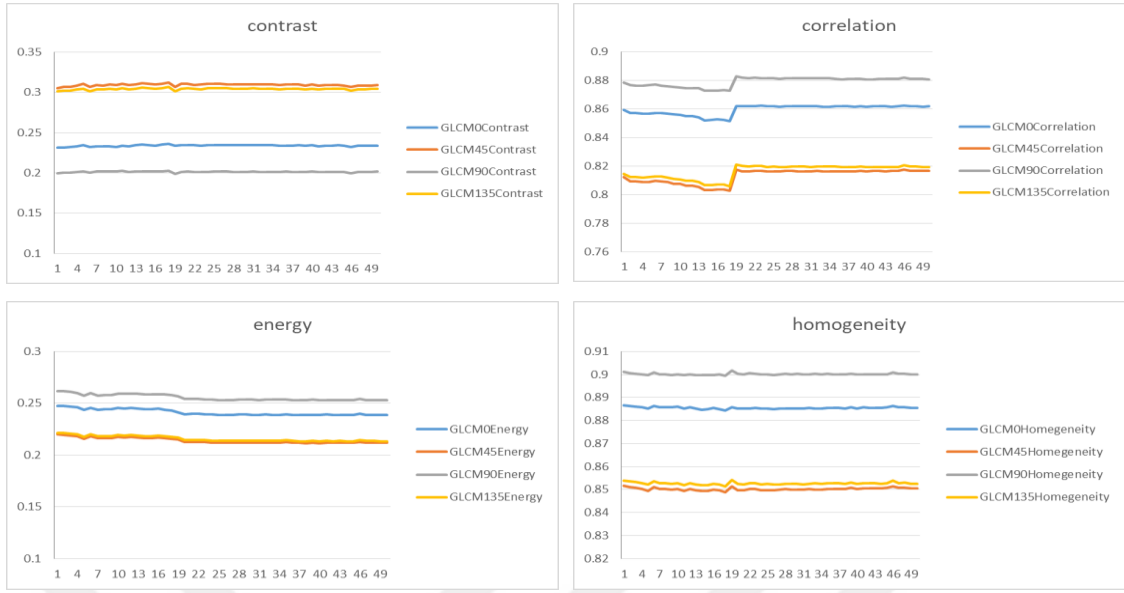
başlangıçlarına göre çatlak ilerlemesine örnek oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen plaka örneklerindeki çatlamların durumu DIC yöntemine göre yapılan ölçümlere göre değerlendirilmiştir. Deney numunelerinin plaka olarak seçilmesi, bir boyuttaki (düşey) yükleme şartlarında, yatay konumdaki bir boyutun çatlamlar üzerindeki etkisini azaltmaktır. Deney numunesini ince (2 cm kalınlığında) bir plaka olarak hazırlamak, deney numunesinin üzerine uygulanan düşey yüklemekten dolayı oluşacak çatlakların diğer iki boyutun etkisinde kalarak ilerlemesini sağlamak ve oluşan çatlağın görünür yüzeyden izlenebilme olasılığını artırmaktır. Bu çalışma kapsamında Afyon Gri Mermer kayacından kesilerek hazırlanan 15x10x2 cm boyutundaki plakaların her iki uzun kenarlarında iki adet 2 cm derinliğinde tam birbirlerinin karşısından 5 mm açıklıklı çatlak uçları açılmıştır. Plaka deney numuneleri daha sonra 3 nokta eğilme deneyinde olduğu gibi düşey yüke maruz bırakılarak açılan çatlak uçları birleşmeye zorlanmıştır. Bu deney sırasında çatlamlar başka noktalardan da başlayabilir. Bu örnekler üzerinde gelişen çatlak durumunun gözlenmesi kayaç yapılarının ve yükleme şartlarının, çatlama ilerlemesini ne kadar etkileyeceğini görmek açısından da önemlidir. Farklı yükleme şartları uygulanan plaka örnekleri uzun kenarları boyunca “*tam temas*” yükleme şartında yüklemeye tabi tutulduğu gibi, “*üç nokta eğilme deneyi*” numunelerinde olduğu gibi de yüklenmiştir. Yapılan üç nokta eğilme deneylerinde plaka numunelerinin üzerine konulduğu mesnetlerin genişliği 4 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. KTÜN-Maden Mühendisliği laboratuvarında yer alan hidrolik preste DIC yöntemi veri toplama çalışmasını kapsayacak şekilde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar daha sonra yükleme şartlarına bağlı olarak gelişen çatlakların durumlarını değerlendirmek üzere genişletilmiştir. Deneylerde kullanılan hidrolik presin yükleme hızı 0,1 kN/sn seviyesine ayarlanarak kullanılmıştır. DIC ölçümleri için noktalama boyaması (deseni) spreyl boya ile yapılan numunelerden deneyler sırasında 120 fps hızında görüntüler elde edilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 4.63 denemeleri yapılan Afyon Gri Mermer plaka numunelerinin birisine ait deney başlangıç ve deney sonu fotoğraflarını göstermektedir. Bu plaka deneyinde deney numunesinin uzun kenarları presin alt ve üst platenlerine “*tam temas*” edecek şekilde ayarlanmış ve yükleme bu şarta göre yapılmıştır. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi deney numunesinin kalınlığının az olması, bu numunenin, eğilme deneylerinde olduğu gibi alt kenarından iki tarafa ayrılarak kırık oluşumunu sağlamıştır. Kırığın başlangıç noktası plakaya önceden kesilen çatlak uçları değil, kırılma sırasında daha fazla zorlanıp çatlama zorlanan P1 noktası olmuştur.



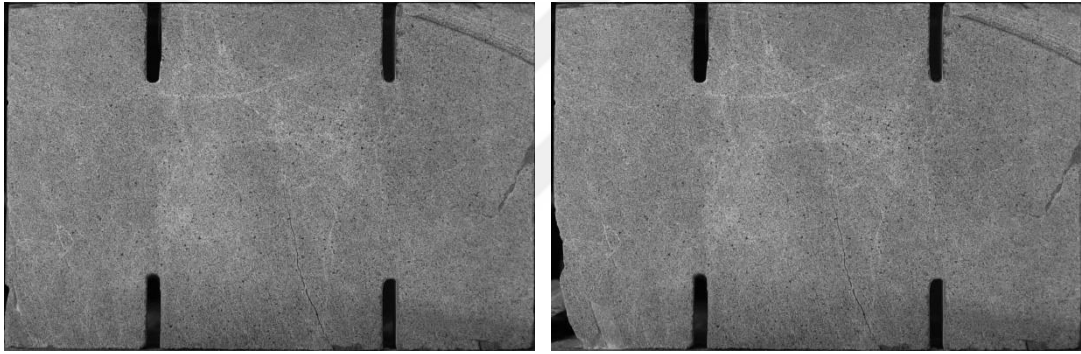
Şekil 4.63. AG-P9 Afyon Gri Mermer plaka numunesinin deney öncesi ve kırılma sonrası fotoğrafları.

Oluşan bu çatlamanın hemen hemen düşey pozisyonda numune üst kenarına ilerlediği P2 noktasından sonra önceden plakaya açılan fotoğrafa bakış açısına göre soldaki kesik ucuna yönelerek P3 noktasında plakayı parçaladığı anlaşılmaktadır. Bu çatlama olayı çok hızlı gerçekleştiğinden plaka içindeki çatlak ilerleyişi gözle takip edilecek bir hızda değildir. DIC analizi deney sırasında gelişen yerdeğiştirmeleri gösterdiği için plaka kırılmalarının anlaşılmasına çok fazla katkısı olmuştur.

Yapılan deney sonucunda elde edilen DIC yöntemi fotoğraf görüntüleri incelenerek, bunlar içinden analiz edilecek kısımlarındaki görüntüler seçilmiştir. Daha sonra seçilen deney kısımlarını kapsayan fotoğraflar üzerinde DIC ve GLCM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sırasında, kullanılmak üzere GLCM yöntemi için 50 adet, DIC yöntemi için 20 adet görüntü seçilmiştir. GLCM analizleri sonucunda 0° 45° 90° 135° açıları karşılaştırılmalı analize sokulan kontrast, korelasyon, enerji ve homojenlik özelliklerine ait değerler ve oluşturulan grafiklerin bir örneği Şekil 4.64'te verilmiştir. Afyon Gri Mermer plaka numunesinin GLCM analizi sonucu elde edilen bu grafikler incelendiğinde, özellikle korelasyon değerlerinin verildiği grafikte dikkat çeken değişimin 18. ve 19. sırada bulunan görüntüler arasında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu iki görüntünün yer aldığı şekil aşağıda verilmiştir (Şekil 4.65).

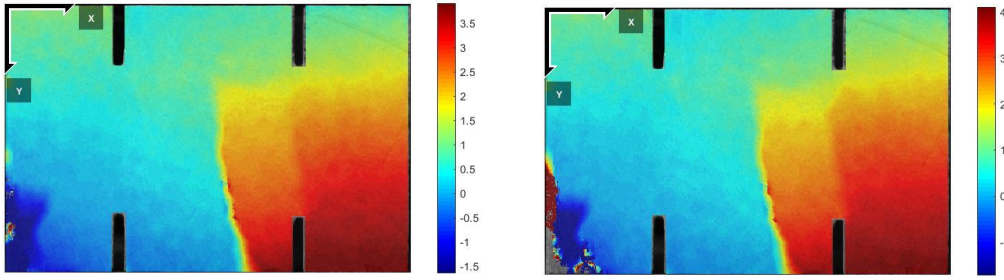


Şekil 4.64. AG-P9 Afyon Gri Mermer plaka numunesinin GLCM analizi sonucu elde edilen grafikleri.

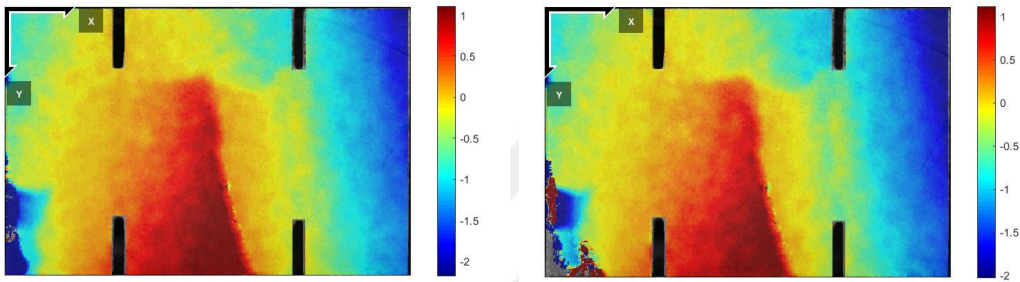


Şekil 4.65. GLCM grafiklerinde gözlemlenen değişikliğin olduğu iki görüntü (18. ve 19. sırada bulunan görüntüler).

GLCM grafiklerinde değişim gözlemlenen 18. ve 19. sırada bulunan görüntülere ait DIC yöntemi analiz sonucu, deneyi yapılan Afyon Gri Mermer plaka örneğinin içinde deney sırasında gelişen yatay (Şekil 4.66) ve düşey (Şekil 4.67) yerdeğiştirmelerin (deplasmanları) durumu, Şekil 4.63'te verilen deney sonrası numune fotoğrafıyla uyumludur.



Şekil 4.66. AG-P9 Afyon Gri Mermer plaka numunesine ait yatay deplasman görüntüsü.



Şekil 4.67. AG-P9 Afyon Gri Mermer plaka numunesine ait düşey deplasman görüntüsü

4.7. Alçıdan Yapılan Yapay Kayaç Numunelerine Ait SCB Kırılma Tokluğu Deney Sonuçları

Yapı sektöründe yük transferi için farklı şekil ve boyutta tasarlanarak yapılarda kullanılması vazgeçilemez bir yapı elemanı olan kolonlara benzetilerek alçı karışımından yapay kayaç örneği olarak hazırlanan deney numuneleri üzerinde de kırılma tokluğu deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle; ağırlıkça %75 oranında alçı tozu karışımı (hrn- α alçı tozu), (YYM, 2023) ve %25 oranında musluk suyu karıştırılarak harç hazırlanmıştır. Bu karışım harcı daha sonra 15x15x15 cm ölçülerine sahip küp şeklindeki bir kalıba dökülmüş ve hazırlanan karışım katılaştıktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Elde edilen küp şeklindeki katı alçı numuneler kullanılarak, bunlardan 10 cm çapındaki karotiyer ile karot numuneleri alınmıştır. Daha sonra elde edilen bu silindirik numuneler uygun boyutlarda kesilerek yarım disk şeklinde kırılma tokluğu ana numuneleri elde edilmiştir. Yarım disk şeklindeki numuneler üzerinde daha sonra, ISRM standartlarında belirtilen çentikler (*SCB Mod-1 kırılma tokluğu deneyi için uygun açıklığa sahip çentikler*) oluşturulmuştur. Numunelerin boyutları Çizelge 4.42’de verilmiştir.

Boyut ölçülerinin kontrolünden sonra, kırılma tokluğu deneyinde kullanılacak alçıdan yapılan yapay kayaç numunelerinin seçilen yüzeylerinde noktalama desenleri (Şekil 4.68) oluşturulmuştur. Bu desenler DIC yöntemi analizlerinde kullanılmıştır.

Çizelge 4.42. SCB alçı numunelerinin ölçüleri.

Numune No	Çap, D (mm)	Yarıçap, R (mm) Merkezden Tepe noktasına	Kalınlık, B (mm)	Çentik Uzunluğu, a (mm)
1	93,93	44,37	50,21	23,77
2	93,75	45,66	50,65	25,06
3	93,72	45,85	50,80	24,21
4	93,52	44,30	50,63	24,08
5	93,68	45,52	50,95	23,40



Şekil 4.68. SCB deneyi öncesi yüzeyleri boyanmış çentikli alçıdan yapılmış yapay kayaç numuneleri.

Deney sonucunda elde edilen verilerden hesaplanan Mod-1 kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri Çizelge 4.43'te sunulmuştur.

Çizelge 4.43. Alçıdan yapılmış yapay kayaç numunelerine ait kırılma tokluğu deney sonuçları.

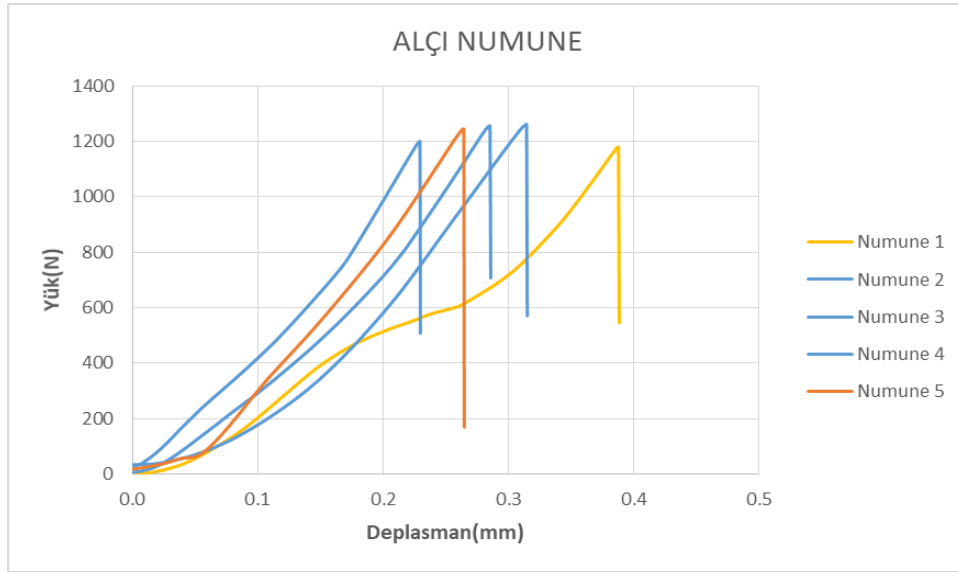
Numune No	s/2R	a/R ($=\beta$)	P_{max} (kN)	K_{Ic} (MPa $\sqrt{m}$)
1	0,68	0,54	1,18	0,43
2	0,66	0,55	1,26	0,45
3	0,65	0,53	1,26	0,41
4	0,68	0,54	1,20	0,44
5	0,66	0,51	1,25	0,40
Ortalama K_{Ic} 0,43 (MPa $\sqrt{m}$) S.Sap: $\pm$ 0,02				

Deney sonucu kırılan numunelerin görünümü Şekil 4.69'da gösterilmiştir. Ayrıca deney sonucu elde edilen verilerle çizilen yük-yerdeğiştirme (deplasman) grafikleri de

Şekil 4.70’te sunulmuştur. Çatlakların önceden kesilen çentiklerin ucundan devam eder şekilde gelişmesi, bu sırada deney numunelerinin gösterdiği mukavemet ve tokluk değerleri bu numunelerin kırılmaları (çatlamaları) konusunda yapılacak değerlendirmelerde kullanılacak bir parametre olarak elde edilmiş durumdadır. Benzer şekilde, yüzey veya yeraltı yapılarında kullanılan kolonlar için benzer bir kırılma tokluğu değerinin deneyler yoluyla elde edilmesinin önemi büyüktür. Yapılar (binalar, köprüler, barajlar, vb.) henüz yapım aşamasındayken, kolon kalıplarının içine dökülen beton harcından alınan örneklerden hazırlanacak kırılma tokluğu ve diğer deney numuneleri (ve bunların test edilmesiyle elde edilecek deney sonuçları), bu yapıların ileriki yıllarda farklı amaçlar için incelenmeye alınması durumunda, kolonlarının çatlama davranışlarını (veya kolonlarda oluşan çatlakların ilerleme davranışlarını) açıklamakta kullanılacak kıymetli veriler ve değerlendirmeler sunacaktır.



Şekil 4.69. SCB deneyi sonrası alçıdan yapılmış yapay kayaç numunelerin görünümü.



Şekil 4.70. Alçıdan yapılan yapay kayaç numunelerine ait SCB deneyi yük-deplasman grafikleri.

4.8. Kaya Mekaniği Deney Sonuçları ve Kırılma Tokluğu (K_{Ic}) Değerlerinin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Tez çalışması kapsamında incelenen Meram Andeziti, Ankara Andeziti, Afyon Gri Mermeri, Evliyatekke Tüfü, Sille Andeziti ve Karaman Traverteni numunelerinin kırılma tokluğu değerleri (K_{Ic}) ve kaya mekaniği deneyleri sonucunda elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, aralarında anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Veriler arasındaki ilişki değerlendirilirken R^2 değerinin yanısıra anlamlılık seviyeleri de dikkate alınmıştır. Yapılan analizlerde, anlamlılık düzeyi %5'in altında olduğu için bu veriler arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir. Bu ilişkilerin ayrıntılı incelenmesi amacıyla istatistiksel veri analizleri için yaygın olarak kullanılan SPSS yazılımı kullanılmıştır. Kaya mekaniği deney sonuçları ile kırılma tokluğu değerlerinin karşılaştırıldığı veriler aşağıda sunulmuştur.

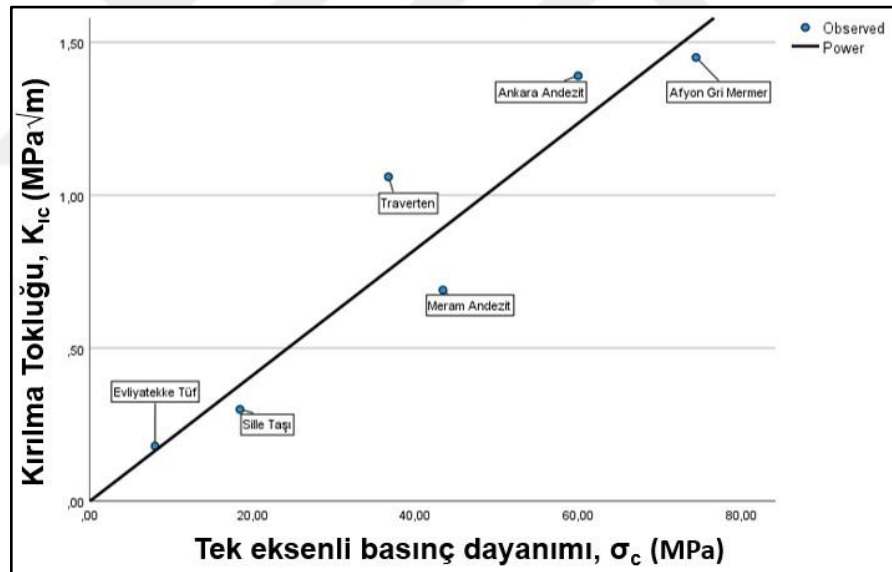
4.8.1 Tek eksenli basınç dayanımı ve kırılma tokluğu ilişkisi

Tez çalışmasında kullanılan altı adet doğal kayaç numunesinin (Meram Andeziti, Ankara Andeziti, Afyon Gri Mermeri, Evliyatekke Tüfü, Sille Andeziti (Sille taşı), Karaman Traverteni) tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri incelenmiştir. Bu değerler arasındaki ilişkinin üssel olduğu ve (R^2) değerinin 0,929

olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.71). Bu değerler, iki parametre arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.72’ de verilmiştir.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,885	,005	,021	,021		
Logarithmic	,835	,011	-1,224	,598		
Quadratic	,892	,036	-,086	,028	-9,252E-5	
Cubic	,896	,152	,060	,009	,000	-4,387E-6
Power	,929	,002	,020	1,001		
Exponential	,856	,008	,181	,032		
The independent variable is Tek_Eksenli_Basinc_Dayanimi.						

Şekil 4.71. Tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



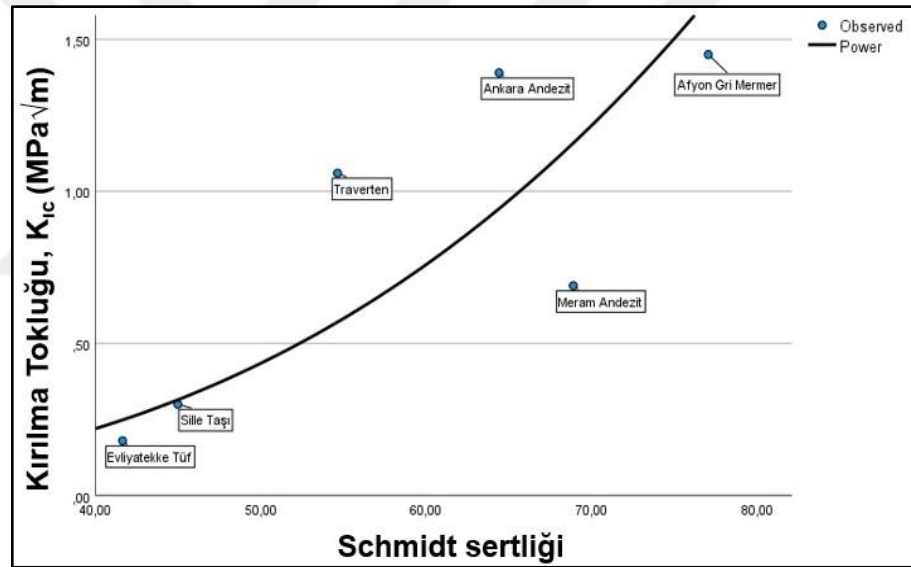
Şekil 4.72. Tek eksenli basınç dayanımı değerleri ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

4.8.2 Schmidt sertlik değeri ve kırılma tokluğu ilişkisi

Numunelerin Schmidt sertlik değeri ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri arasında üssel bir ilişki olduğu görülmüş, $R^2 = 0,805$ düzeyinde bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 4.73). Bu sonuçlar, iki değişkenin aralarında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Bu ilişkinin görselleştirildiği grafik Şekil 4.74’te sunulmuştur.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,699	,038	-1,099	,033		
Logarithmic	,723	,032	-6,850	1,897		
Quadratic	,737	,135	-3,607	,123	-,001	
Cubic	,737	,135	-3,607	,123	-,001	,000
Power	,805	,015	1,654E-6	3,178		
Exponential	,760	,024	,026	,054		
The independent variable is Schmidt_Sertlik_Dayanimi.						

Şekil 4.73. Schmidt sertlik değeri ve kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



Şekil 4.74. Schmidt sertlik dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

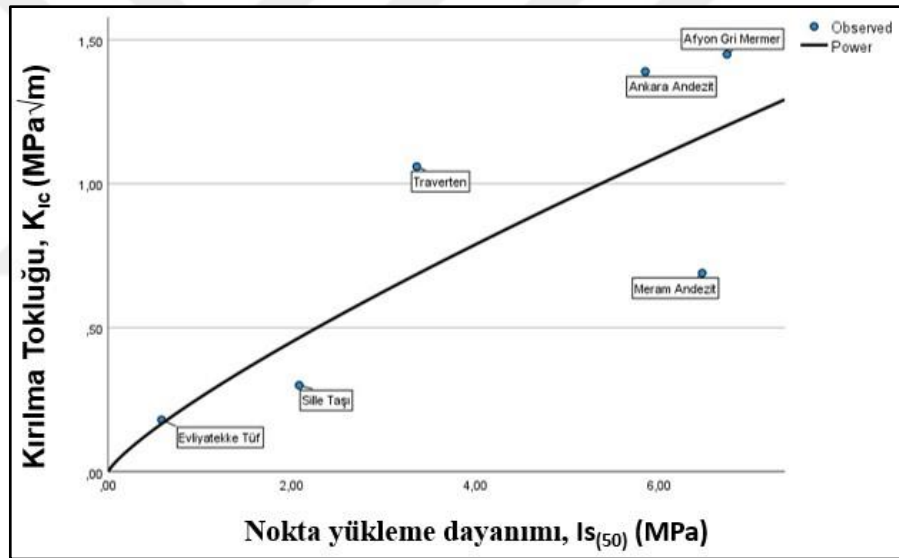
4.8.3 Nokta yükleme değeri ve kırılma tokluğu ilişkisi

Nokta yükleme dayanımı ($IS_{(50)}$) ile kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmuş ve (R^2) = 0,794 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.75). İki değişken arasındaki bu ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.76'da verilmiştir.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,622	,062	,145	,168		
Logarithmic	,632	,059	,320	,454		
Quadratic	,674	,186	-,150	,416	-,032	
Cubic	,703	,411	,128	-,063	,143	-,017
Power	,794	,017	,258	,807		
Exponential	,715	,034	,199	,285		

The independent variable is Nokta_Yukleme_Dayanimi.

Şekil 4.75. Nokta yükleme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



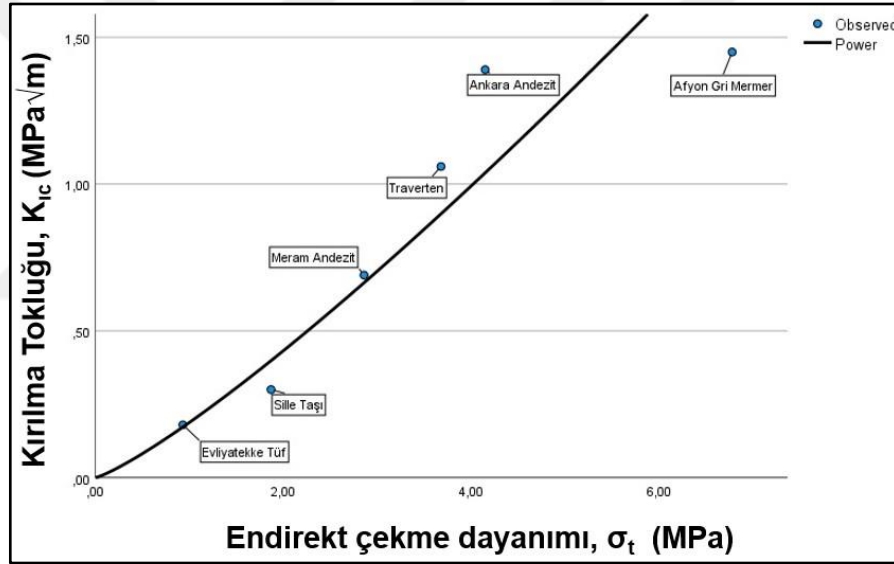
Şekil 4.76. Nokta yükleme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

4.8.4 Endirekt çekme dayanımı (Brazilian) ve kırılma tokluğu ilişkisi

Numunelerin endirekt çekme dayanımı (σ_t) ve kırılma tokluğu (K_{1c}) değerleri arasındaki ilişkinin, istatistiksel analizler sonucunda üssel bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu modelde R^2 değeri 0,929 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.77). Bu bulgu, σ_t ve K_{1c} değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir, ilgili grafik Şekil 4.78’de verilmiştir.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,841	,010	,021	,244		
Logarithmic	,878	,006	,079	,736		
Quadratic	,926	,020	-,431	,552	-,039	
Cubic	,997	,005	,535	-,672	,351	-,034
Power	,929	,002	,188	1,201		
Exponential	,777	,020	,186	,372		
The independent variable is Brazilian_Cekme_Dayanimi.						

Şekil 4.77. Endirekt çekme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



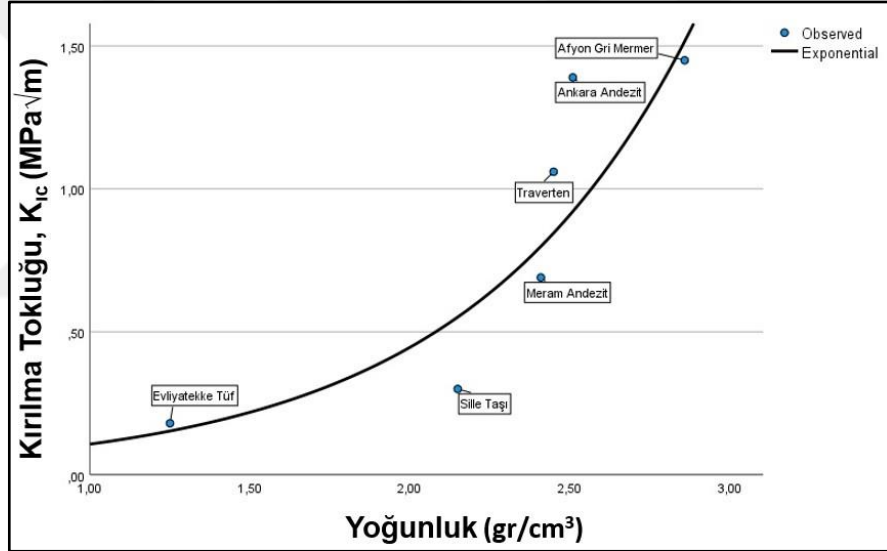
Şekil 4.78. Endirekt çekme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

4.8.5 Yoğunluk ve gözeneklilik değerleri ve kırılma tokluğu ilişkisi

Yoğunluk ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) arasındaki ilişki incelendiğinde R^2 değerinin 0,827 olduğu görülmüştür (Şekil 4.79). Yoğunluk ve kırılma tokluğu arasında üstel bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.80’de verilmiştir.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,700	,038	-1,030	,825		
Logarithmic	,628	,060	-,318	1,474		
Quadratic	,805	,086	1,352	-1,782	,654	
Cubic	,797	,091	,447	-,399	,000	,098
Power	,782	,019	,084	2,610		
Exponential	,827	,012	,026	1,425		
The independent variable is Yoğunluk.						

Şekil 4.79. Yoğunluk ve kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



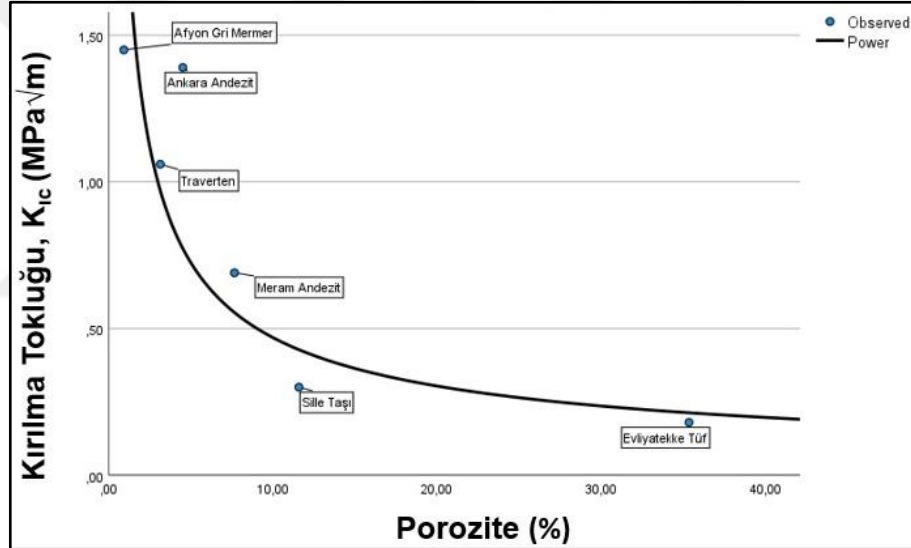
Şekil 4.80. Yoğunluk ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

Gözeneklilik (porozite) ile kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri karşılaştırıldığında ise R^2 değerinin 0,814 olduğu görülmüştür (Şekil 4.81). Bu iki parametre arasındaki ilişkinin üssel olduğu belirlenmiştir. Porozite ve kırılma tokluğu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.82’de verilmiştir.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,627	,061	1,200	-,034		
Logarithmic	,801	,016	1,537	-,391		
Quadratic	,900	,032	1,643	-,142	,003	
Cubic	,921	,115	1,460	-,040	-,008	,000
Power	,814	,014	1,983	-,626		
Exponential	,792	,017	1,237	-,060		

The independent variable is Porozite.

Şekil 4.81. Porozite ve kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



Şekil 4.82. Porozite ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

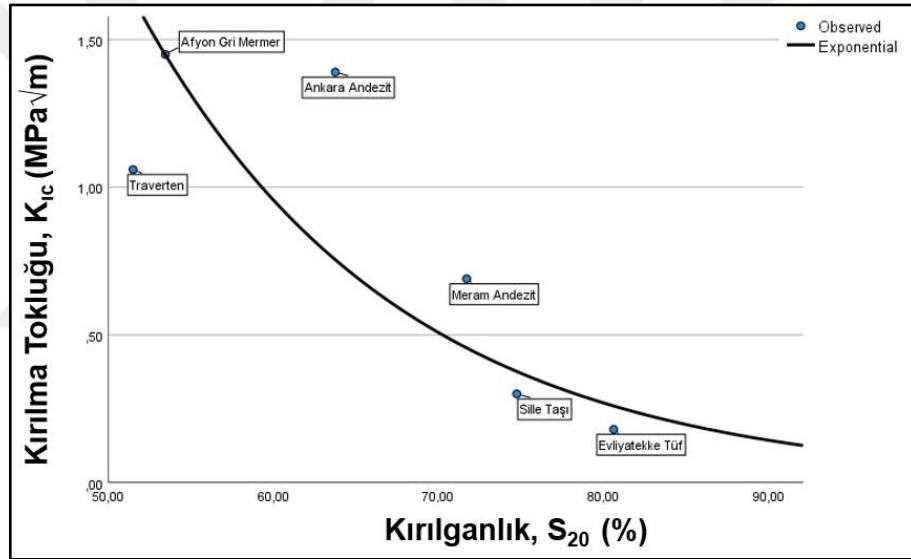
4.8.6 Kırılmalık değeri ve kırılma tokluğu ilişkisi

Kırılmalık ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde üstel bir ilişkinin olduğu ve R^2 değerinin 0,752 olduğu görülmüştür (Şekil 4.83). Bu ilişkiyi gösteren grafik Şekil 4.84'te sunulmuştur.

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Kırılma_Toklugu						
Model Summary			Parameter Estimates			
Equation	R Square	Sig.	Constant	b1	b2	b3
Linear	,728	,031	3,434	-,039		
Logarithmic	,690	,041	11,095	-2,455		
Quadratic	,856	,055	-5,611	,246	-,002	
Cubic	,847	,060	-2,295	,097	,000	-1,052E-5
Power	,706	,036	9271856,643	-3,943		
Exponential	,752	,025	42,727	-,063		

The independent variable is Kırılğanlık.

Şekil 4.83. Kırılğanlık ve kırılma tokluğu değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırıldığı model özeti (SPSS ekran görüntüsü).



Şekil 4.84. Kırılğanlık ve kırılma tokluğu değerleri arasındaki ilişki.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Malzemelerde tokluk kavramı, bir malzemenin deformasyon sırasında ne kadar enerji absorbe edebileceğini ifade eder. Tokluk, hem malzemenin mukavemeti hem de sünekliği ile ilişkilidir. Bu özellik, malzemelerin yük altında kırılmadan önce ne kadar enerji depolayabileceğini gösterir ve gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde ilgili değişim eğrisi altında kalan alan olarak hesaplanır. Kırılma tokluğu ise bir malzemenin mevcut bir çatlakın ilerlemesine karşı ne kadar dirençli olduğunu gösteren bir özelliktir. Kırılma tokluğu yüksek olan malzemeler, düşük olanlara göre çatlak ilerlemesine karşı daha dirençlidir. Kırılma tokluğu, malzemenin bileşimine, mikro yapısı gibi iç özellikleri ve malzeme üzerindeki yükleme hızına, malzemelerin yüke maruz kaldığı ortama, sıcaklığa ve geometrik etkilere bağlıdır.

Yeryüzü ve yeraltında inşa edilen yapılarda, yük taşıyıcı elemanların duraylılıkları hem kendileri hem de yapının genel duraylılığı açısından büyük önem taşır. Yüzey ve yeraltı yapılarında yük taşıyıcı eleman olarak kullanılan betonarme kolonlar veya kayaç topukların tokluk özellikleri, bu yapıların duraylılığı için kritik öneme sahiptir. Bu elemanların üzerlerindeki yükleri güvenle taşıyabilmeleri için dikkatlice tasarlanmaları gerekir. Bu yapılarda oluşacak herhangi bir çatlakın ilerleme davranışı, doğrudan kırılma tokluğu ile ilişkilidir. Bu çatlakların nasıl oluştuğu ve hangi şartlar altında ne kadar ilerleyebileceği ve mevcut yapıda oluşturabileceği hasarlar dikkatle incelenmesi gereken konular arasındadır. Yüksek kırılma tokluğuna sahip malzemeler, çatlakların yayılmasına direnç gösterecek ve yapının bütünlüğünün ve duraylılığının korunabilmesi adına etkili olacaktır.

Bu çalışmada kare kesitli, yapılardaki kolonlara benzeyen ve alçı tozu karışımından elde edilen yapay kayaç numuneleri ve doğal kayaç numuneleri üzerinde yapılan deneylerde düşey yükleme şartları altında çatlak oluşumu ve ilerlemesi gözlenmiştir. Bu numunelere sonradan açılan deliklerin, numunelerin “maksimum dayanım” ve “yenilme seviyesi” mukavemet değerleri ile tokluk değerlerini olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Diğer yandan, delik çaplarının artmasıyla sözü edilen değerlerin azaldığı da tespit edilmiştir. Numunelerin yüzeyinde gözlenen kırık izlerinin yayılma ve ilerleme yönlerinin delikler tarafından etkilendiğini de göstermiştir.

Dijital görüntü korelasyonu (DIC) bir malzeme yüzeyindeki deplasmanları ve yüzey hareketlerini ölçmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Malzeme yüzeyinde rastgele bir desen oluşturulması ve bu malzemenin yük altındaki davranışının yüksek çözünürlüklü şekilde kaydedilmesi sonucu elde edilen görüntüleri analiz ederek numune yüzeyinde “referans anı” ve son durum arasındaki noktasal yer değiştirmelerin hesaplanması ile ilgili sonuçlar elde edilir. Bu araştırma sırasında yapılan deneylerde, dijital görüntü korelasyonu (DIC) yönteminin uygulanması sonucu *(numune üzerine herhangi bir ölçüm aleti yerleştirilmeden sadece deneyler esnasında kaydedilen görüntüler kullanılarak)*, numuneler üzerinde oluşan yerdeğiştirmeleri (deplasmanları) ölçmek mümkün olmuştur. Bu yöntemin, yük altında deforme olan numunelerdeki mikro-deformasyonların analizlerinde kullanılması, oldukça kullanışlı ve faydalı bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemin avantajları, izlenen görüntü alanının bir bütün olarak mikro-deformasyonlar açısından analiz edilebilmesinin sağlanması; elde edilen yüksek ölçüm hassasiyeti; temassız bir ölçüm yöntemi olmasıdır.

Bu yöntemin çatlak oluşumunu ve ilerlemesini gözlemlemek amacıyla kullanıldığı durumlarda ani çatlak gelişimi gösteren numunelerde verimli olabilmesi için video kayıt hızının oldukça önemli olduğu görülmüştür. Kırılma anının hemen öncesine kadar numune üzerinde oluşan deplasmanlar hassas bir şekilde gözlemlenebilmektedir. DIC yöntemi analizlerinde incelenecek görüntü sayısına göre işlemler uzun sürebilmektedir, bundan dolayı DIC yöntemi ile analiz edilecek toplam görüntü sayısı ve görüntülerin hangi deney aşamalarından seçileceği belirlenirken, kritik aşamalar tespit edilmeli ve seçilen verilerin bu aşamaları temsil etmesine dikkat edilmelidir. Ayrıca, veri analizi için kullanılan bilgisayarın işlem gücünün ve kullanılan görüntü işleme programının çalışma hızının analiz süresini etkileyeceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu tez çalışması kapsamında DIC yöntemi farklı numune tipleri üzerinde uygulanmıştır. Kolon benzeri kare kesitli numuneler üzerinde yapılan analizler detaylı olarak verilmiştir. Aynı zamanda yarım disk çentikli Mod-1 kırılma tokluğu deneyleri esnasında da görüntü kaydı alınmış ve sonuçlar DIC yöntemi ile incelenmiştir. Bunlara ek olarak dikdörtgen plaka şeklinde çentikli ve çentiksiz numuneler üzerinde de DIC analizleri uygulanmıştır. Yöntemin oldukça kullanışlı ve verimli bir şekilde çalıştığı ve farklı numune ve deney tipleri için uygulanabilir olduğu ön görülmektedir.

Bir başka görüntü işleme yöntemi olan “Gri seviye eş oluşum matrisi”, GLCM, gri tonlamalı bir görüntüdeki iki farklı piksel arasındaki ilişkiyi inceleyen bir özellik

çıkarma tekniğidir. Bu yöntemde, ilk olarak belirli değerler ve mekânsal ilişkiler dikkate alınarak piksel çiftlerinin görülme sıklığı hesaplanır ve GLCM oluşturulur. Daha sonra, bu matris kullanılarak analizde kullanılacak özellikler çıkarılır. GLCM, belirli bir yönde ve belirli bir uzaklıkta bulunan gri seviyeli bir çift pikselin birbirlerine göre oluşma sıklıklarını gösteren bir kare matristir. Bu matris, pikseller arasındaki uzaklık “d” ve açı θ iken, gri seviye i'den gri seviye j'ye geçme olasılığını gösterir. Bu matris üzerinde genellikle $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ve 135° olmak üzere dört yönde inceleme yapılmıştır.

Gri seviye eş oluşum matrisi, GLCM, yönteminin, çatlak oluşumu ve ilerleme aşamalarının analiz edilmesi amacıyla kullanılabileceği görülmüştür. Bu yöntem incelenen deney numunesi yüzey alanlarıyla ilgili gri seviye matris değer değişimlerinden elde edilen sayısal sonuçları tablo şeklinde vermektedir. Bu veriler kullanılarak istenilen özellik ve açı ile ilgili grafikler çizilebilmektedir. Bu yöntem hız ve veri işleme kapasitesi göz önüne alındığında DIC yöntemine göre daha hızlı sonuç verebilmektedir.

Tez çalışmalarında kullanılmak üzere, Meram Andezit, Ankara Andeziti, Afyon Gri mermeri, Evliyatekke tüfü, Sille andeziti ve Karaman traverteni numuneleri bloklar olarak temin edilmiş, KTÜN-Maden Mühendisliği Laboratuvarında bulunan karot alma makinası ve dairesel testere kullanılarak, kaya mekaniği deneyleri için gerekli numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde ISRM (Ulusay ve Hudson, 2007) standartlarına göre kaya mekaniği deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

Tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) deneyi sonuçları; Meram Andeziti 43,37 MPa ($\pm 13,10$), Ankara Andeziti 59,98 MPa ($\pm 10,36$), Afyon Gri mermeri 74,46 MPa ($\pm 48,42$), Evliyatekke Tüfü 8,01 MPa ($\pm 1,18$), Sille Andeziti 18,44 MPa ($\pm 2,94$) ve Karaman Traverteni 36,68 MPa ($\pm 4,33$) olarak tespit edilmiştir. Doğal kayaç numunelerine ek olarak kolon benzeri, kare kesitli, yapay kayaç numuneleri oluşturmak için kullanılan alçı tozu karışımından elde edilen örneklerle yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonucunda, bu numunelerin ortalama dayanımının 18,59 MPa ($\pm 3,99$) olduğu görülmüştür.

Schmidt sertlik belirleme deneyi sonuçlarına göre sertlik değerleri; Meram Andeziti 59,90 ($\pm 1,04$); Ankara Andeziti 56,00 ($\pm 1,00$); Afyon Gri mermeri 67,00 ($\pm 1,33$); Evliyatekke Tüfü 36,20 ($\pm 3,46$); Sille Andeziti 39,10 ($\pm 1,97$); ve Karaman Traverteni 50,40 ($\pm 2,80$) olarak tespit edilmiştir.

Nokta yükleme deneyi ($Is_{(50)}$) sonuçları; Meram Andeziti 6,47 MPa ($\pm 0,68$), Ankara Andeziti 5,85 MPa ($\pm 0,40$), Afyon Gri mermeri 6,74 MPa ($\pm 2,45$), Evliyatekke

Tüfü 0,58 MPa ($\pm 0,23$), Sille Andeziti 2,08 MPa ($\pm 0,77$) ve Karaman Traverteni 3,36 MPa ($\pm 0,34$) olarak tespit edilmiştir.

Endirekt çekme dayanımı (σ_t) (Brazilian) deney sonuçları; Meram Andeziti 2,86 MPa ($\pm 1,04$), Ankara Andeziti 4,15 MPa ($\pm 0,55$), Afyon Gri mermeri 6,78 MPa ($\pm 1,62$), Evliyatekke Tüfü 0,93 MPa ($\pm 0,36$), Sille Andeziti 1,87 MPa ($\pm 0,29$) ve Karaman Traverteni 3,68 MPa ($\pm 0,39$) olarak tespit edilmiştir.

Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi sonuçlarına göre numunelerin doğal yoğunlukları şu şekildedir; Meram Andeziti 2,41 gr/cm³, Ankara Andeziti 2,51 gr/cm³, Afyon Gri mermeri 2,86 gr/cm³, Evliyatekke Tüfü 1,25 gr/cm³, Sille Andeziti 2,15 gr/cm³ ve Karaman Traverteni 2,45 gr/cm³, porozite oranları ise Meram Andeziti %7,65; Ankara Andeziti %4,50; Afyon Gri mermeri %0,91; Evliyatekke Tüfü %35,35; Sille Andeziti %11,58 ve Karaman Traverteni %3,31 olarak belirlenmiştir.

Bu deneylere ek olarak kayaçların tekrarlı darbelere karşı gösterdiği direncin belirlenmesinde kullanılan kırılmalık deneyi de numuneler üzerinde uygulanmıştır. Kırılmalık deneyi sonucu elde edilen S_{20} değerleri numunelerin kırılmalık sınıfının belirlenmesini sağlamıştır. Bu deney sonuçlarına göre Meram Andeziti %71,71 (oldukça yüksek kırılmalık sınıfı), Ankara Andeziti %63,75 (çok yüksek kırılmalık sınıfı), Afyon Gri mermeri %53,45 (yüksek kırılmalık sınıfı), Evliyatekke Tüfü %80,62 (oldukça yüksek kırılmalık sınıfı), Sille Andeziti %74,75 (oldukça yüksek kırılmalık sınıfı) ve Karaman Traverteni %51,49 (yüksek kırılmalık sınıfı), olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, deneylerde kullanılan doğal kayaç numunelerinin kırılmalık sınıflarının, kırılmalık indeks sınıflamasına göre (Dahl ve diğ., 2012) “yüksek” ve “oldukça yüksek” arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Doğal kayaç numuneleri ve alçı tozu karışımından elde edilen numunelerin Mod-1 kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerini belirlemek amacıyla ISRM (Kuruppu ve diğ., 2014) standartlarına uygun olarak çentikli yarım disk numune (SCB) tipi için kırılma tokluğu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılacak numuneler hazırlanırken önce 10 cm çaplı karot numuneleri alınmış, daha sonra bu numuneler deney standartlarında belirlenen ölçülere uygun olarak yarım disk şekline getirilmiş ve çentikler oluşturulmuştur. Daha sonra DIC analizlerinin yapılabilmesi için deneylerden önce numuneler üzerinde spreyl boya ile desen oluşturulmuş ve deney esnasında görüntü kaydı alınmıştır.

Yapılan Mod-1 SCB kırılma tokluğu deneyi sonuçlarına göre; Meram Andeziti K_{Ic} 0,69 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,16$), Ankara Andeziti K_{Ic} 1,39 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,14$), Afyon Gri

mermeri K_{Ic} 1,45 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,15$), Evliyatekke Tüfü K_{Ic} 0,18 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,05$), Sille Andeziti K_{Ic} 0,30 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,05$) ve Karaman Traverteni K_{Ic} 1,06 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,07$) olarak tespit edilmiştir. Alçı tozu karışımından elde edilen numunelerin kırılma tokluğu değerinin de K_{Ic} 0,43 (MPa $\sqrt{m}$) ($\pm 0,02$) olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara bakıldığında en yüksek kırılma tokluğu değerine sahip olan numunenin Afyon gri mermeri, en düşük kırılma tokluğuna sahip numunenin ise Evliyatekke tüfü olduğu görülmektedir.

Kaya mekaniği deney sonuçları, kırılgenlik deney sonuçları ve Mod-1 kırılma tokluğu deney sonuçları istatistiksel olarak incelenmiş ve aralarında anlamlı bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. SPSS programı kullanılarak yapılan istatistiksel değerlendirmeler sonucunda;

Tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) ilişkisi incelendiğinde, bu iki değer arasındaki (R^2) değeri 0,929 olan üssel bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Schmidt sertlik değeri ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) ilişkisi incelendiğinde, bu iki değer arasındaki üssel bir ilişki olduğu ve (R^2) değerinin 0,805 olduğu tespit edilmiştir. Nokta yükleme dayanımı ($Is_{(50)}$) ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) arasında (R^2) = 0,794 değerine sahip üssel bir ilişki tespit edilmiştir. Endirekt çekme dayanımı (σ_t) ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) arasında (R^2) değeri 0,929 olan üssel bir ilişki olduğu görülmüştür. Numunelerin yoğunluğu ile kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri arasında R^2 değerinin 0,827 olduğu üstel bir ilişki olduğu görülmüştür. Gözeneklilik ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri arasında ise R^2 = 0,814 değerine sahip üssel bir ilişki tespit edilmiştir. Kaya mekaniği deneylerine ek olarak yapılan kırılgenlik deneyi sonucunda hesaplanan kırılgenlik sınıfı değeri $S_{20}(\%)$ ve kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri arasındaki ilişkide R^2 değeri 0,752 olan üstel bir ilişki olduğu görülmüştür.

İstatistiksel ilişkiler incelendiğinde kırılma tokluğu (K_{Ic}) ile en güçlü ilişkinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) ve endirekt çekme dayanımı (σ_t) arasında olduğu (R^2 = 0,929), en zayıf ilişkinin ise kırılgenlik $S_{20}(\%)$ değerleri ile olduğu (R^2 = 0,752) gözlemlenmiştir.

Kare kesitli yapılarıdaki kolonlara benzeyen ve alçı tozu karışımından elde edilen yapay kayaç numuneleri ve doğal kayaç numuneleri üzerinde yapılan deneylerde düşey yükleme şartları altında çatlak oluşumu ve ilerlemesi gözlenmiştir. Bu numunelere sonradan açılan deliklerin, numunelerin “maksimum dayanım” ve “yenilme seviyesi” mukavemet değerleri ile tokluk değerlerini olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Delik çaplarının artmasıyla bu değerlerin daha da azaldığı tespit edilmiştir. Numunelerin yüzeyinde gözlenen kırılma paternlerinde (çatlak dağılım durumlarında), kırık yönlerinin

deliklerden etkilendiğini gözlenmiştir. Kırılma tokluğu deneyleri görüntü kaydı alınmadan da yapılabilmektedir, DIC ve GLCM yöntemleri kullanılarak yapılan analizlerin farkı; görüntü kaydı alınmadan yapılan deneylerde sadece yükleme ve düşey deplasman değerleri elde edilirken, görüntü analizi yapıldığında bu değerlere ilave olarak deney numunelerinin yüzeylerinde oluşan deplasmanların da gözlemlenebilmesidir. Bu gözlemden yola çıkarak yüzey çatlaklarının oluşumu ve ilerlemesi konusunda değerlendirme sağlanırken, bu çatlakların numune içinde de nasıl oluşabileceği konusunda yorumlar yapılabilmektedir.



5.2 Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre şu önerilerde bulunulabilir:

Çatlak oluşumu ve gelişimi incelenecek numunelerin masif, çatlaksız, boşluksuz yapıya sahip olması, yapılan incelemelerin tutarlı olması açısından önemlidir. Numunelerin içyapısındaki boşlukların 3 boyutlu haritasını çıkarma özelliği olan ekipmanların kullanılması çatlak oluşumunun anlaşılmasında ek faydalar sağlayacaktır. Çatlak ilerleme davranışını etkileyen kırılma tokluğu özelliklerinin daha yakından incelenmesi amacıyla kırılan yüzeyler incelenerek tane boyutunda çatlakların ilerlemesi incelenmelidir.

Yükleme şartları, inşaat ve madencilik alanında detaylı tasarımı önem arz eden yük taşıyan kolonlar ve topuklar için yavaş gelişen olaylara bağlıdır (ani gelişen depremler sonucu benzeri yüklemeler haricinde), bu nedenle çatlaklılık durumu incelenirken kullanılması mümkün olan, düşük yükleme hızına sahip (servo-kontrol özelliği olan) hidrolik presler tercih edilmelidir. Dinamik etkileri ortadan kaldırmak amacıyla özellikle çok yavaş yükleme şartları altında yapılan deneyler, çatlak ilerleme davranışını incelemek açısından oldukça önem arz etmektedir, bu deneylerin yapılacağı hidrolik pres seçimi yapılırken bu kriterler göz önüne alınmalı ve gerekli hassasiyete sahip cihazlarda deneyler yapılmasına dikkat edilmelidir.

Numunelerin diğer mekanik özellikleri ile kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme davranışları arasındaki ilişki farklı numune çeşitleriyle birlikte detaylı şekilde incelendiğinde yeni gelişmeler sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akdağ, E., 2015, Bilecik ilinde bulunan özel ve kamu yapılarındaki beton kalitesinin deneysel olarak incelenmesi Yüksek Lisans, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik, 97.
- Alam, S. Y., Saliba, J. ve Loukili, A., 2014, Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques, *Construction and Building Materials*, 69, 232-242.
- Alkılıçgil, Ç., 2010, Development of Specimen Geometries for Mode I Fracture Toughness Testing with Disc Type Rock Specimens, PhD, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, ANKARA, 172.
- Alwash, M. F. A., 2017, Assessment of concrete strength in existing structures using non-destructive tests and cores : analysis of current methodology and recommendations for more reliable assessment., Bordeaux.
- Anderson, T. L., 2017, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.
- Aran, A., 1981, Kırılma mekaniğine giriş-seminer notları, *TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Gebze*.
- Barenblatt, G. I., 1962, The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Advances in applied mechanics*, 7, 55-129.
- Blaber, J., 2024, Ncorr v1.2, <http://www.ncorr.com/index.php/applications:> [05.01.2024].
- Campione, G., Cucchiara, C. ve Minafò, G., 2015, Effects of circular openings on the compressive behaviour of RC columns, *Materials and Structures*, 48, 1995-2008.
- Cheng, Z., Zhao, H., Long, G., Yang, K., Chen, M. ve Wu, Z., 2023, The Mechanical Characteristics of High-Strength Self-Compacting Concrete with Toughening Materials Based on Digital Image Correlation Technology, *Materials*, 16 (4), 1695.
- Crowder, J. ve Bawden, W., 2004, Review of post-peak parameters and behaviour of rock masses: current trends and research, *Rocnews*, fall.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P. D., Nilsen, B. ve Grov, E., 2012, Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 150-158.
- ECIA, 2023, East Cleveland image archive visit the past through photographs, Pillar crush, (Photo by Franks, A.M. & information by Coleman, T.), [www. image-archive.org.uk/?cat=32](http://www.image-archive.org.uk/?cat=32): [11.2023].
- Erarslan, N., 2017, Experimental and numerical studies on tensile and shear fracturing of brittle materials, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 32 (2), 173-181.
- Esterhuizen, G. S., Dolinar, D. R., Ellenberger, J. L. ve Prosser, L. J., 2011, Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines.
- FTS, 2019, El Minya day trip from Cairo by private car, FTS Travels, Webpage, www.fts-travels.com/egypt-excursions/cairo-excursions/day-trip-from-cairo-to-el-minya,: [11.2023].
- Gökay, M. K., Özkan, İ. ve Doğan, K., 2004, Mermerlerde birleşmeye zorlanan çatlakların davranışı, *7th Regional rock mechanics symposium*, Sivas, 151-156.
- Gökay, M. K., 2016, Determination of potential electric values to verify micro fractures in concrete, *International conference on civil, architectural and structural engineering*, Dubai-UAE, 125-129.
- Greer, A. L., 2009, Metallic glasses... on the threshold, *Materials today*, 12 (1-2), 14-22.

- Hamrin, H., 1980, Guide to underground mining: methods and applications, Atlas Copco, p.
- Het, K., 2014, Shear Mode Fracture Toughness of Rock with Different Core-Based Specimen Geometries, PhD, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, 294.
- Hillerborg, A., Modéer, M. ve Petersson, P.-E., 1976, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and concrete research*, 6 (6), 773-781.
- Hood, M. ve Roxborough, F., 1992, Rock breakage: mechanical, *SME mining engineering handbook*, 1, 680-721.
- Irwin, G. R., 1956, Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys.
- Jianxin, H., Shuca, L., Shuchen, L. ve Lei, W., 2012, Post-peak stress-strain relationship of rock mass based on hoek-brown strength criterion, *Procedia Earth and Planetary Science*, 5, 289-293.
- Karakaş, S. Ş., 2011, Shear Mode Rock Fracture Toughness Determination with a Circular Plate Type Specimen Under Three-Point Bending, PhD, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, 135.
- Kirsch, E. G., 1898, Die Theorie der Elastizität und die Bedingungen der Festigkeitslehre, *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 42, 797-807.
- Kozicki, J. ve Tejchman, J., 2007, Experimental investigations of strain localization in concrete using Digital Image Correlation (DIC) technique, *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 54 (1), 3-24.
- Kurtuluş, C. ve Bozkurt, A., 2011, Determination of concrete compressive strength of the structures in Istanbul and Izmit Cities (Turkey) by combination of destructive and non-destructive methods, *International Journal of the Physical Sciences*, 6 (16), 4044-4047.
- Kuruppu, M. D., Obara, Y., Ayatollahi, M. R., Chong, K. ve Funatsu, T., 2014, ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 267-274.
- Kürklü, G., 2005, Mevcut betonarme yapıların deprem güvenliğinin incelenmesindeki teknikler ve beton dayanımının belirlenmesi *Afyon Kocatepe Üniversitesi* Afyon, 149.
- Li, D., Zhu, Q., Zhou, Z., Li, X. ve Ranjith, P., 2017, Fracture analysis of marble specimens with a hole under uniaxial compression by digital image correlation, *Engineering Fracture Mechanics*, 183, 109-124.
- MechaniCalc, 2023, Mechanical properties of materials, MechaniCalc. Inc., <https://mechanicalcalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials>:
- Mechanics, F., Fracture Mechanics, <https://www.fracturemechanics.org/modes123.html>: [01.01.2024].
- Negassa, F., 2020, Numerical investigation of reinforced concrete columns with transverse holes, *Addis Ababa Science and Technology University*, Addis Ababa, 46.
- Obinna, U., 2020, Bracing systems in a high-rise building, Construction, Structville integrated services Ltd., www.structville.com/2020/10/bracing-systems-in-a-high-rise-building.html: [11.2023].
- Öge, İ. F., 2013, A prediction method on the post-failure properties of rock and its application to tunnels, Doktora, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, 132.
- Parker, E. R., 1957, Brittle behavior of engineering structures, (No Title).
- Pathan, A., 1987, A study of fracture toughness in relation to mine design, *University of Nottingham*.

- Saouma, V. E. ve Kleinosky, M.-J., 1984, Finite element simulation of rock cutting: a fracture mechanics approach, *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA-84-0792.
- SEN, 2023, Strength vs. Hardness vs. Toughness, Engineering, Stack Exchange Network, <https://engineering.stackexchange.com/questions/25943/strength-vs-hardness-vs-toughness>: [12.2023].
- Son, K.-S., Pilakoutas, K. ve Neocleous, K., 2006, Behaviour of concrete columns with drilled holes, *Magazine of Concrete Research*, 58 (7), 411-419.
- Sorgi, C. ve Watelet, J., 2007, Fenomeni di degrade e rischio di crollo nelle cave di gesso abbandonate: l'esperienza francese, *Proceedings Dissesti indotti dall'alterazione di rocce evaporitiche*, 41-59.
- Sorgi, C., De Gennaro, V. ve Chen, D., 2011, Water-rock interaction mechanisms and ageing processes in chalk, *Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience*, 9, 163-180.
- StructuralGuide, 2023, Eight types of column failure methods, Structural guide, Civil and structural engineering knowledge base, www.structuralguide.com/types-of-column-failures/: [11.2023].
- Şengün, N., 2009, Kayaçların Kırılma Tokluğu ve Gevrekliğinin Dairesel Testereler ile Kesme Verimi Üzerine Etkileri, Doktora, *Süleyman Demirel Üniversitesi*, Isparta, 165.
- Ulusay, R. ve Hudson, J. A., 2007, International Society for Rock Mechanics (ISRM), the complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, 1974–2006. Ankara, Pergamon, Oxford.
- Uzbaş, B., 2017, Sayısal Dental Modellerden Otomatik Cinsiyet Tespiti, Doktora, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, KONYA, 104.
- Uzbaş, M. ve Gökay, M. K., 2023, Influence of Drill-Holes on Moulded Column-Like Test Samples' Surface Displacements: Digital Image Correlation Analyses, *BIDGE Publications*.
- Watson, T. L., 1910, Granites of the southeastern Atlantic states, 426, US Government Printing Office, p.
- Whittaker, B. N., Singh, R. N. ve Sun, G., 1992, Rock fracture mechanics. Principles, design and applications.
- Williams, M. L. ve Ellinger, G. A., 1953, Investigation of structural failures of welded ships, *Welding Journal*, 32 (10), 498-528.
- Yayla, P., 2007, Kırılma mekaniği, Kocaeli Üniversitesi, p.
- Yıldırım, T., 2018, Dijital Görüntü Korelasyonu Tekniğinin Yapı Malzemelerinin Yük Altında Şekil Değişiminin Ölçümünde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans, *Dokuz Eylül Üniversitesi*, İzmir, 104.
- Yoncacı, S., 2019, Investigation Of Fracture Toughness On Flattened Brazilian Disc Type Molded Shotcrete Specimens, *Middle East Technical University*, Ankara, 167.
- Yu, M., Wei, C., Niu, L., Li, S. ve Yu, Y., 2018, Calculation for tensile strength and fracture toughness of granite with three kinds of grain sizes using three-point-bending test, *PloS one*, 13 (3), e0180880.
- Zhu, L., Xu, Q. F., Li, X. M. ve Zhu, C. M., 2010, Experimental studies of reinforced concrete column capacity affected by core drilling, *Advanced Materials Research*, 133, 1195-1200.