T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAYA MALZEMELERİNİN BASMA VE ÇEKME DAYANIMLARI ÜZERİNDE BİRİM DEFORMASYON HIZININ ETKİSİ

Mustafa ALTUN

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa ALTUN tarafından hazırlanan "KAYA MALZEMELERİNİN BASMA VE ÇEKME DAYANIMLARI ÜZERİNDE BİRİM DEFORMASYON HIZININ ETKİSİ" adlı tez çalışması 05/02/2024 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. Erhan TERCAN (Hacettepe Üniversitesi)	……..
Danışman Prof. Dr. İhsan ÖZKAN (Konya Teknik Üniversitesi)	……..
Üye Prof. Dr. Kemal GÖKAY (Konya Teknik Üniversitesi)	……..
Üye Prof. Dr. Alparslan TURANBOY (Necmettin Erbakan Üniversitesi)	……..
Üye Doç. Dr. İbrahim ÇINAR (Konya Teknik Üniversitesi)	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M079 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.

İmza

Mustafa ALTUN

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KAYA MALZEMELERİNİN BASMA VE ÇEKME DAYANIMLARI ÜZERİNDE BİRİM DEFORMASYON HIZININ ETKİSİ

Mustafa ALTUN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

2024, 324 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. İhsan ÖZKAN
Pof. Dr. A. Erhan TERCAN
Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
Doç. Dr. İbrahim ÇINAR

Bu çalışmanın amacı, laboratuvar ortamında seçilen model doğal (mermer) ve yapay (beton) kayalar üzerinde farklı gerilmeler altında ortaya çıkan zamana dayalı pekleşme davranışların belirlenmesi, değerlendirilmesi ve genel bir yaklaşımın geliştirilmesi olmuştur.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle kaynak araştırması gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada kaya mühendislik yapılarının tahkimat tasarım çalışmalarında kaya malzeme ve kaya kütle özelliklerinin öncelikle dikkate alındığı görülmüştür. Kaya mühendislik yapılarının tahkimat tasarım çalışmalarında gerekli olan kaya mekaniği deneylerine yönelik ISRM ve ASTM tarafından ortaya konan öneriler bulunmaktadır. Ancak yoğun bir şekilde kullanılan kaya malzeme ve kütle mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yönelik deney prosedürlerinin birçoğunda zaman etkisi dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte sahada yapılan ölçüm, gözlem ve incelemelerde kaya malzeme ve kütlesinin bilinen dayanım değerlerinin altında kalan düşük gerilme değerlerinde bile kaya malzemesinin pekleşme süreci sonrasında yenildiği ve duraysızlıkların olduğu gözlenebilmektedir. Özellikle yeraltı kaya mühendislik yapılarına ait tasarım çalışmasında dikkate alınan rutin deney sonuçları, uzun dönemde kazı açıklıklardan beklenen duraylılıkların sağlanamaması sorununu gündeme getirmektedir. Bundan dolayı zamana dayalı olarak gerilme altındaki bir kaya malzemesinde gözlenen pekleşme (hardening) ve yumuşama (softening) sonucundaki dayanım değerlerinin belirlenmesi ve tahkimat tasarım analizlerinde bu değerlerin dikkate alınması daha doğru olacaktır.

Yukarıda ortaya konan problemin çözümü için laboratuvar ortamında bir seri deneyin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu çalışmada zamanın etkisini incelemek için deneylerde kullanılmak üzere 0-20 MPa, 20-40 MPa, 40-60 MPa, 60-80 MPa, 80-100 MPa dayanım aralıklarında 5 adet model doğal (mermer) kaya malzemesi (DKM) ve 5 adet model yapay (beton) kaya malzemesi (YKM) seçilmiştir. Bu modeller üzerinde servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme (Grup2) deneyleri gerçekleştirilmiştir. DKM ve YKM model malzemeleri üzerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilerek hakem niteliği taşıyan temel kaya mekaniği veri tabanı hazırlanmıştır. İkinci aşamada araştırma amaçlı kaya mekaniği çalışmaları kapsamında Grup1 olarak tanımlanan gerilme-hız-kontrollü deneylerinde pekleşmeye dayalı model kaya malzemesinin dayanım özelliklerinin değişimi, farklı yükleme hız (MPa/s) değerlerinde incelenmiştir. Deneyler sonucunda yükleme hız değerlerinin azalmasıyla malzemenin yenilme değerlerinin düştüğü buna karşın yenilme sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum kritik pekleşme olarak

değerlendirilmiş ve farklı yükleme hızlarına maruz kalan model malzemelerin pekleşmeye dayalı kritik sınır yenilme değerleri belirlenmiştir. Benzer şekilde araştırma amaçlı kaya mekaniği çalışmaları kapsamında Grup2 olarak tanımlanan sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerinde pekleşmeye dayalı dayanım davranış değişimi, farklı sabit yük (kN) değerlerinde araştırılmıştır. Sünme deneyleri sonucunda sabit yük değerlerinin azalmasıyla malzemenin yenilmediği gözlemlenerek, bu durum kritik pekleşme olarak değerlendirilmiştir. Farklı sabit yüklere maruz kalan model malzemelerin pekleşmeye dayalı kritik sınır yenilme değerleri ortaya konmuştur. Farklı iki deney sonuçları ile belirlenen pekleşmeye dayalı malzeme özelliklerinin birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür. Bu yüzden DKM ve YKM deney sonuçları birleştirilmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında model olarak seçilen kaya malzemelerine ait pekleşmeye dayalı kritik sınır dayanım değerleri SPSS istatistik programı kullanılarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında güçlü R^2 değerleri ile açıklanan pekleşmeye dayalı tek eksenli basma dayanımı ($\sigma_c(t)$), dolaylı çekme dayanımı ($\sigma_t B(t)$), elastik modül ($E_i(t)$), kohezyon ($c(t)$), içsel sürtünme açı ($\Phi(t)$), değerlerini veren matematiksel modeller ortaya konmuştur. Ayrıca deneyler esnasında yenilme öncesi elastik modül (E_i) ile yenilme sonrası elastik modül (E_d) değerleri belirlenmiş, her iki büyüklük arasında güçlü bir ilişki belirlenerek bir matematiksel model ile ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Birim deformasyon, gerilme, kaya malzeme özellikleri, kaya mekaniği, matematiksel modelleme, zamana bağlı pekleşme davranışı.

ABSTRACT

PhD THESIS

EFFECT OF STRAIN RATE ON COMPRESSIVE AND TENSILE STRENGTH OF ROCK MATERIALS

Mustafa ALTUN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering

Advisor: Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

2024, 341 Pages

Jury
Prof. Dr. İhsan ÖZKAN
Pof. Dr. A. Erhan TERCAN
Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
Assoc. Prof. Dr. İbrahim ÇINAR

The aim of this study was to determine and evaluate the time-dependent hardening behavior of selected model natural (marble) and artificial (concrete) rocks under different stresses and to develop a general approach.

In line with this objective, a literature review was conducted. In this research, it has been seen that rock material and rock mass properties are primarily taken into consideration in the support design studies of rock engineering structures. There are recommendations put forward by ISRM and ASTM for rock mechanics tests required in the support design studies of rock engineering structures. However, the time effect is not taken into account in most of the test procedures for determining rock material and mass engineering properties that are used extensively. However, in field measurements, observations and investigations, it can be observed that even at low stress values below the known strength values of the rock material and mass, the rock material is defeated and unstable after the hardening process. Routine test results, which are taken into consideration especially in the design work of underground rock engineering structures, bring up the problem of not providing the expected stability of the excavation openings in the long term. Therefore, it would be more accurate to determine the strength values as a result of hardening and softening observed in a rock material under stress based on time and to take these values into account in support design analysis.

In order to solve the above problem, a series of experiments were planned to be carried out in the laboratory environment. In this study, in order to examine the effect of time, 5 models of natural (marble) rock material (DKM) and 5 models of artificial (concrete) rock material (YKM) were selected in the strength ranges of 0-20 MPa, 20-40 MPa, 40-60 MPa, 60-80 MPa, 80-100 MPa to be used in the experiments. Strength-velocity-controlled (Group 1) and constant-strength-controlled-creep (Group 2) experiments were carried out on these models with the help of servo-controlled hydraulic press. Firstly, rock mechanics experiments recommended by ISRM (1981, 2007) were carried out on DKM and YKM model materials and a basic rock mechanics database was prepared. In the second stage, the changes in the strength properties of the model rock material based on hardening were investigated at different loading rate values (MPa/s) in stress-velocity-controlled experiments defined as Group 1 within the scope of exploratory rock mechanics studies. As a result of the experiments, it was observed that the failure values of the material decreased with decreasing loading rate values, while the failure times increased. This situation was considered as critical hardening and the critical limit failure values of the model materials

exposed to different loading rates were determined based on hardening. Similarly, within the scope of exploratory rock mechanics studies, the change in strength behavior due to hardening in constant-stress-controlled-breakdown experiments, defined as Group 2, was investigated at different constant load (kN) values.As a result of the creep experiments, it was observed that the material did not fail as the constant load values decreased, and this was considered as critical hardening. The critical limit failure values of the model materials subjected to different constant loads based on hardening were determined. It was observed that the material properties based on hardening determined by the results of two different experiments overlapped with each other. Therefore, DKM and YKM test results were combined. As a result, the critical limit strength values of the rock materials selected as models in this thesis were determined using SPSS statistical program. In this thesis, mathematical models that give the values of uniaxial compressive strength ($\sigma_c(t)$), indirect tensile strength ($\sigma_t B(t)$), elastic modulus ($E_i(t)$), cohesion ($c(t)$), internal friction angle ($\Phi(t)$), based on hardening, which are explained by strong R2 values, were presented. In addition, pre-failure elastic modulus (E_i) and post-failure elastic modulus (E_d) values were determined during the experiments, and a strong relationship between both quantities was determined and expressed by a mathematical model.

Keywords: Mathematical modeling, rock material properties, rock mechanics, strength, strain, time-dependent hardening behavior.

ÖNSÖZ

Uzun bir araştırmanın ve çalışmanın sonucunda ortaya çıkan bu tez çalışmasının her aşamasında kıymetli bilgi ve tecrübesiyle bana rehberlik eden ve tezle ilgili her çıkmaza girdiğimde büyük bir sabırla bana her türlü desteği sunan saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İhsan ÖZKAN'a sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Doktora tezim sırasında, kıymetli desteklerini esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Abdullah Erhan TERCAN ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Kemal GÖKAY'a teşekkür ederim.

Doktora tez savunma sınavı jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Alparslan TURANBOY ve Sayın Doç. Dr. İbrahim ÇINAR'a değerli görüşleri, yapıcı eleştirileri ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) 122M079 nolu 1002 projesi (Hızlı Destek Programı) ile tez çalışmasını desteklediği için teşekkür ederim. Ayrıca doktora eğitim-öğretim süresince dahil olduğum Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP)'na teşekkür ederim.

Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik laboratuvarında yeralan servo kontrollü hidrolik pres ile deneylerimizin büyük bir kısmını gerçekleştirmemize imkan sağlayan Sayın Prof. Dr. Murat OLGUN ve Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA'ya teşekkür ederim.

Deneylerde kullanılan beton yapay kaya malzemelerinin hazırlanmasında destek veren Konya Hazır Beton A.Ş'ne, Hazır Beton Teknik Müdürü İnşaat Mühendisi Ercan KARATAŞ'a ve birimin teknik personeline teşekkür ederim.

Deneylerde kullanılan doğal kaya malzemelerinden Karaman Traverten blok numunelerinin temininde destek veren Lütfi Takavcı Mermer A.Ş'ne, Maden Mühendisi Servet BUĞDAYCI'ya ve teknik personeline teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullanılan numunelerin hazırlanmasında emeği geçen bölümüz laboratuvarında görev yapan Tekniker İbrahim KÜÇÜK'e ve bölümüzdeki araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Sevgi ve fedakarlıklarını kelimelere dökemediğim her zaman yanımda olan ailem ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Huzur kaynağım ve gönlümün sultanı olan eşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mustafa ALTUN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vi**

ÖNSÖZ ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xv**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Problemin Tanımı 1
1.2. Çalışmanın Amacı 1
1.3. Çalışmanın İçeriği 2

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**

2.1. Genel 3
2.2. Kaya Malzeme ve Kütle Özellikleri 3
2.2.1. Kaya malzeme özelliklerinin laboratuvar deneyleri yardımıyla belirlenmesi 4
2.2.2. Kaya kütle özelliklerinin belirlenmesi ve kaya sınıflandırma sistemleri 5
2.3. Kaya Malzemesinin Yenilme Davranışı 8
2.3.1. Yenilme davranışında birim deformasyon-gerilme ilişkisi 8
2.3.2. Kaya malzemesinin pekleşme davranışı 9
2.3.3. Kaya malzemesinin sünme davranışı 12
2.4. Sayısal Analiz Yöntemleri 12
2.5. Tez konusu ile ilgili yapılan çalışmalar 14

3. MATERYAL VE YÖNTEM **27**

3.1. Deneysel Çalışmalar için Model Örnek Tespiti ve Temini 27
3.1.1. Model kaya malzemesinin belirlenmesi 27
3.1.2. Model kaya malzemesinin temini 29
3.1.3. Model kaya bloklarından karot örneklerinin hazırlanması 30
3.2. Karot Örnekleri Üzerinde Kaya Mekaniği Deneysel Çalışmaları 36
3.2.1. Temel kaya mekaniği deneyleri 37
3.2.2. Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri 39
3.3. Elde Edilen Verilere Dayalı Matematiksel Bir Modelin Geliştirilmesi 40
3.4. İki ve Üç Boyutlu Nümerik Çözümlemeler ile Modelin Test Edilmesi 43

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI **44**

4.1. Temel Kaya Mekaniği Deneyleri 44
4.1.1. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deneyleri 44
4.1.2. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deneyleri 46

4.2. Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri 47
4.3. Doğal Kaya Malzemeleri (DKM) için Gerilme-Hız-Kontrollü Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup1/DKM)..... 48
4.3.1. Doğal model kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde yükleme hızlarının tespiti..... 48
4.3.1.1. TEBD ve TEB-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti 49
4.3.1.2. DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti 50
4.3.2. 0-20 MPa aralığında yer alan Konya-Hatunsaray tüf kaya birimine (DKM-1) ait deneysel sonuçlar..... 52
4.3.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-1 için gerçekleştirilen deneyler..... 52
4.3.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-1 için gerçekleştirilen deneyler..... 55
4.3.3. 20-40 MPa aralığında yer alan Konya-Sille andezit kaya birimine (DKM-2) ait deneysel sonuçlar..... 57
4.3.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-2 için gerçekleştirilen deneyler..... 57
4.3.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-2 için gerçekleştirilen deneyler..... 58
4.3.4. 40-60 MPa aralığında yer alan Karaman traverten kaya birimine (DKM-3) ait deneysel sonuçlar..... 59
4.3.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-3 için gerçekleştirilen deneyler..... 59
4.3.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-3 için gerçekleştirilen deneyler..... 60
4.3.5. 60-80 MPa aralığında yer alan Marmara Adası mermer kaya birimine (DKM-4) ait deneysel sonuçlar..... 61
4.3.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-4 için gerçekleştirilen deneyler..... 62
4.3.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-4 için gerçekleştirilen deneyler..... 62
4.3.6. 80-100 MPa aralığında yer alan Kayseri bazalt kaya birimine (DKM-5) ait deneysel sonuçlar..... 64
4.3.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-5 için gerçekleştirilen deneyler..... 64
4.3.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-5 için gerçekleştirilen deneyler..... 64
4.4. Yapay Kaya Malzemeleri (YKM) Gerilme-Hız-Kontrollü Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup1/YKM)..... 66
4.4.1. Yapay model kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde yükleme hızlarının tespiti..... 66
4.4.1.1. TEBD ve TEB-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti 67
4.4.1.2. DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti 68
4.4.2. 0-20 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-1) ait deneysel sonuçlar..... 69
4.4.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-1 için gerçekleştirilen deneyler..... 70
4.4.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-1 için gerçekleştirilen deneyler..... 72

4.4.3. 20-40 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-2) ait deneysel sonuçlar 75
4.4.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-2 için gerçekleştirilen deneyler 75
4.4.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-2 için gerçekleştirilen deneyler 75
4.4.4. 40-60 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-3) ait deneysel sonuçlar 77
4.4.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-1 için gerçekleştirilen deneyler 77
4.4.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-3 için gerçekleştirilen deneyler 78
4.4.5. 60-80 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar 79
4.4.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-4 için gerçekleştirilen deneyler 80
4.4.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-4 için gerçekleştirilen deneyler 81
4.4.6. 80-100 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-5) ait deneysel sonuçlar 82
4.4.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-5 için gerçekleştirilen deneyler 82
4.4.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-5 için gerçekleştirilen deneyler 83
4.5. Doğal Kaya Malzemeleri (DKM) için Sabit-Gerilme-Kontrollü-Sünme Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup2/DKM) 84
4.5.1. Doğal model kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde sabit yük koşullarının tespiti 84
4.5.1.1. S-TEB deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti 85
4.5.1.2. S-DÇ deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti 86
4.5.2. 0-20 MPa aralığında yer alan Konya-Hatunsaray tüf kaya birimine (DKM-1) ait deneysel sonuçlar 88
4.5.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 88
4.5.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 90
4.5.3. 20-40 MPa aralığında yer alan Konya-Sille andezit kaya birimine (DKM-2) ait deneysel sonuçlar 94
4.5.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 94
4.5.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 95
4.5.4. 40-60 MPa aralığında yer alan Karaman traverten kaya birimine (DKM-3) ait deneysel sonuçlar 96
4.5.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 97
4.5.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 98
4.5.5. 60-80 MPa aralığında yer alan Marmara mermer kaya birimine (DKM-4) ait deneysel sonuçlar 99

4.5.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 99
4.5.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 101
4.5.6. 80-100 MPa aralığında yer alan Kayseri bazalt kaya birimine (DKM-5) ait deneysel sonuçlar 102
4.5.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 102
4.5.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 103
4.6. Yapay Kaya Malzemeleri (YKM) için Sabit-Gerilme-Kontrollü-Sünme Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup2/YKM) 104
4.6.1. Yapay model kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde sabit yük koşullarının tespiti 104
4.6.1.1. S-TEB deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti 105
4.6.1.2. S-DÇ deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti 107
4.6.2. 0-20 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-1) ait deneysel sonuçlar 108
4.6.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 108
4.6.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 112
4.6.3. 20-40 MPa aralığında yer alan yapay beton kaya birimine (YKM-2) ait deneysel sonuçlar 114
4.6.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 114
4.6.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 116
4.6.4. 40-60 MPa aralığında yer alan yapay beton kaya birimine (YKM-3) ait deneysel sonuçlar 117
4.6.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 117
4.6.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 118
4.6.5. 60-80 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar 119
4.6.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 120
4.6.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 121
4.6.6. 80-100 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-5) ait deneysel sonuçlar 122
4.6.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 122
4.6.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri 124
4.7. Genel Değerlendirme 125

5. TARTIŞMA 129

5.1. Tek Eksenli Basma (TEB) Koşulunda Kritik Eşik Pekleşme σc(t) Değerinin Belirlenmesi 130
5.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1) 130
5.1.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 130
5.1.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 136
5.1.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1) 142
5.1.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 143
5.1.2.1. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 143
5.1.2.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 149
5.1.2.3. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 155
5.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel değerlendirmesi 156
5.2. Dolaylı Çekme (DÇ) Koşulunda Kritik Eşik Pekleşme $\sigma_{tB}(t)$ Değerinin Belirlenmesi 160
5.2.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1) 160
5.2.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 160
5.2.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 166
5.2.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1) 172
5.2.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 173
5.2.2.1. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 173
5.2.2.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 180
5.2.2.3. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 186
5.2.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel değerlendirmesi 187
5.3. TEB koşulunda pekleşme davranışına dayalı kritik eşik $E_i(t)$ değerlerinin belirlenmesi 191
5.3.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1) 191
5.3.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 191
5.3.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 194

5.3.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1) 195
5.3.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 198
5.4. DÇ koşulunda pekleşme davranışına dayalı kritik eşik $E_i(t)$ değerlerinin belirlenmesi 199
5.4.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1) 199
5.4.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 199
5.4.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 202
5.4.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1) 203
5.4.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 206
5.5. TEB koşulunda yenilme sonrası elastik modül E_d değerinin belirlenmesi 206
5.5.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1) 207
5.5.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 207
5.5.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1) 208
5.5.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1) 210
5.5.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 213
5.6. TEB ve DÇ koşullarına dayalı kritik eşik pekleşme $c(t)$ ve $\phi(t)$ değerlerinin belirlenmesi 214
5.6.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1) 214
5.6.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2) 218
5.6.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel değerlendirmesi 223
5.7. Örnek bir uygulama 228
5.7.1. Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde yapılan deneysel kaya mekaniği çalışmaları 230
5.7.2. Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde yapılan sayısal analiz çalışmaları 235

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 247

6.1 Sonuçlar 247
6.2 Öneriler 256

KAYNAKLAR 257

EKLER 264

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ : Yoğunluk
I_{d1} : I. döngü sonunda suda dağılmaya karşı dayanım indeksi
I_{d2} : II. döngü sonunda suda dağılmaya karşı dayanım indeksi
σ_c : Tek eksenli basma dayanımı
$I_{s(50)}$: Nokta yükü dayanım indeksi
R_o : Eğilme dayanımı
τ : Kesme gerilmesi
J_n : Eklem takımı sayısı
J_r : Eklem pürüzlülük sayısı
J_a : Eklem alterasyon sayısı
J_w : Hacimsel eklem sayısı
σ_{kritik} : Kritik gerilme
ε_{kritik} : Kritik birim deformasyon
σ_c : Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı
E_i : Kaya malzeme elastisite modülü
E_s : Sekant elastisite modülü
D_{pf} : Gevşeme modülü
σ_{tB} : Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian)
$E_{i\text{-}TEB}$: Tek eksenli basma koşulunda yenilme öncesi elastik modül
$E_{d\text{-}TEB}$: Tek eksenli basma koşulunda yenilme sonrası elastik modül
$E_{i\text{-}DÇ}$: Dolaylı çekme koşulunda yenilme öncesi elastik modül
υ : Poisson oranı
γ : Birim hacim ağırlık
N : Schmidt sertliği
c : Kohezyon
Φ : İçsel sürtünme açısı
t : Zaman
σ_c' : Tek eksenli basma dayanımı (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
σ_{tB}' : Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian, Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
ε' : Düşey birim deformasyon (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$(\varepsilon_k)'$: Kritik düşey birim deformasyon (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$E_{i\text{-}TEB}'$: Tek eksenli basma koşulunda yenilme öncesi elastik modül (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$E_{d\text{-}TEB}'$: Tek eksenli basma koşulunda yenilme sonrası elastik modül (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$E_{i\text{-}DÇ}'$: Dolaylı çekme koşulunda yenilme öncesi elastik modül (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
c' : Kohezyon (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
ϕ' : İçsel sürtünme açısı (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
t' : Zaman (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$(\sigma_{c\text{-}k})'$: Kritik tek eksenli basma dayanımı (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$(\sigma_{tB\text{-}k})'$: Kritik dolaylı çekme dayanımı (Brazilian, Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu, Grup 1)
$t_{S\text{-}TEB}''$: Zaman (Tek eksenli basma, Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)

$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$: Düşey birim deformasyon (Tek eksenli basma, Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$\sigma_{S\text{-}TEB}''$: Gerilme (Tek eksenli basma, Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$t_{S\text{-}DÇ}''$: Zaman (Dolaylı çekme, Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$: Düşey birim deformasyon (Dolaylı çekme, Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$\sigma_{S\text{-}DÇ}''$: Gerilme (Dolaylı çekme, Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$(\sigma_{c\text{-}k})''$: Kritik tek eksenli basma dayanımı (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$(\sigma_{tB\text{-}k})''$: Kritik dolaylı çekme dayanımı (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$(\varepsilon_k)''$: Kritik düşey birim deformasyon (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
$\sigma_c(t)$: Pekleşmeye dayalı tek eksenli basınç dayanımı
$\sigma_{tB}(t)$: Pekleşmeye dayalı çekme dayanımı
$E_i(t)$: Pekleşmeye dayalı elastisite modülü
$c(t)$: Pekleşmeye dayalı kohezyon
$\phi(t)$: Pekleşmeye dayalı içsel sürtünme açısı
σ_c'' : Tek eksenli basma dayanımı (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
E_i'' : Elastik modül (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
t'' : Zaman (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
ε'' : Düşey birim deformasyon(Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)
σ'' : Gerilme (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu, Grup 2)

Kısaltmalar

A	: Alan
A-KM	: Araştırma amaçlı kaya mekaniği
ASTM	: Amerikan test ve malzeme topluluğu
dk	: Dakika
DÇ-DEF	: Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri
DÇD	: Dolaylı çekme dayanımı
DKM	: Doğal kaya malzemesi
F	: Kuvvet
G	: Gözeneklilik
Grup1	: Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu
Grup2	: Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu
GSI	: Jeolojik dayanım indeksi
ISRM	: Uluslararası kaya mekaniği topluluğu
KE-KMV	: Kritik eşik-kaya mekaniği verisi
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
NYD	: Nokta yükleme dayanımı
O-KMV	: Orijinal kaya mekaniği verisi
RMR	: Kaya kütle puanı
RQD	: Kaya kalite belirteci
s	: Saniye
S-DÇ	: Dolaylı çekme-sünme (creep) deneyleri

S-TEB	: Tek eksenli basma-sünme (creep) deneyleri
SCH	: Schmidt sertliği
SDD	: Suda dağılma dayanımı
SF	: Emniyet katsayısı
SPSS	: Sosyal bilimler için istatistik programı
SRF	: Gerilme azaltma katsayısı
TEB-DEF	: Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite deneyleri
TEBD	: Tek eksenli basma dayanımı
YKM	: Yapay kaya malzemesi
Y	: Yoğunluk

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Çağdaş bir yaşam içerisinde teknolojinin tüm fırsatlarından faydalanmak isteyen insanoğlu bütün gücü ile teknolojik atılımlar yapma gayreti içerisindedir. İnsanoğlunun teknolojik gelişiminde ise yeraltı zenginlik kaynakları önemli bir yer tutmaktadır. Cevher olarak tanımlanan maden kaynaklarının bulunduğu yerden çıkarılması ve işlenmesi madencilik disiplini içerisinde yapılmaktadır. Açık ocak ve yeraltı madenciliği şeklinde yapılan çalışmalarda öncelikle yeraltı zenginlik kaynağının bulunduğu yerden kazılarak çıkarılması ve sonrasında ise cevher hazırlama yöntemleri ile işlenmesi gerekmektedir. Günümüzde çoğunlukla daha derinde olan cevher zonları yeraltı madencilik yöntemleri ile işlenmek zorunda kalınmaktadır. Bu çerçevede hazırlık ve üretim çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Maden kuyuları, galeriler, bacalar, bürler, topuklar gibi hazırlık çalışmaları aşamasında yeraltında açılan açıklıkların duyarlılığı için gerçekleştirilen tahkimat çalışmalarında kaya malzeme ve kaya kütle özellikleri dikkate alınmaktadır. Benzer şekilde diğer kaya mühendislik yapılarının tahkimat tasarım çalışmalarında kaya malzeme ve kaya kütle özellikleri dikkate alınmaktadır. Kaya mühendislik yapılarının tahkimat tasarım çalışmaları için gerekli olan kaya mekaniği deneylerine yönelik ISRM (International Society of Rock Mechanics-Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu) ve ASTM (American Society for Testing and Materials- Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) tarafından öneriler bulunmaktadır. Ancak yoğun bir şekilde kullanılan kaya malzeme ve kütle mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yönelik deney prosedürlerinin birçoğunda zaman etkisi dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte sahada yapılan ölçüm, gözlem ve incelemelerde kaya malzeme ve kütlesinin bilinen dayanım değerlerinin altında kalan düşük gerilme değerlerinde bile kaya malzemesinin pekleşme süreci sonrasında yenildiği ve duraysızlıkların olduğu gözlenebilmektedir (Ünlü ve Reddish, 1994; Ünal ve diğ. 2001; Özşen ve diğ. 2019; Liu ve diğ. 2020). Özellikle yeraltı kaya mühendislik yapılarına ait tasarım çalışmasında dikkate alınan rutin deney sonuçları, uzun dönemde kazı açıklıklardan beklenen duraylılıkların sağlanamaması sorununu gündeme getirmektedir. Sonuç olarak ciddi can ve mal kayıplarının oluşması gündeme gelmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Yeraltı kaya mühendislik yapılarının tahkimat gereksinimleri açıklık civarındaki kaya malzeme ve kütle davranışı, birincil gerilmeler ve açıklık geometrisi büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Yeraltı açıklıkları için günümüzde ampirik ve sayısal tahkimat tasarımları yaklaşımları kullanılmaktadır. Tahkimat analizlerinde öncelikle kaya malzeme ve kütle özelliklerinin kaya mekaniği ilkeleri çerçevesinde belirlenmesi için ISRM ve ASTM gibi uluslararası kuruluşların önerileri doğrultusunda laboratuvar ve sahada kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmektedir. Tasarım çalışmalarında sıklıkla tek eksenli basma dayanımı (σc), Brazilian çekme dayanımı (σtB), elastik deformabilite (E, υ), direkt makaslama dayanımı (τ), üç eksenli basma dayanımı (σ1, σ3), kohezyon ve içsel sürtünme açısı (c, ϕ), yoğunluk (γ), nokta yükleme dayanımı (Is(50)) değerleri kullanılmaktadır. Ayrıca kaya kütle sınıflama sistemleri (RMR, Q, GSI, M-RMR gibi) yardımıyla kaya kütle davranışları belirlenebilmektedir. Bunlar sırasıyla yerinde tek eksenli basma dayanımı (σcm), yerinde elastik modül (Em) değeri, yerinde kohezyon (cm) ve içsel sürtünme açıları (ϕm)'dır. Ampirik yaklaşımlar ile tahkimat önerileri belirlenebilirken sayısal analizler yardımıyla kazı çalışmaları sonrasında açıklık etrafında tahkimatlı ve tahkimatsız durumda oluşabilecek gerilme ve deformasyon değişimleri tahmin edilebilmektedir. Zamana dayalı olarak gerilme altındaki bir kaya malzemesinde gözlenen pekleşme (hardening) ve yumuşama (softening) sonucundaki dayanım değerlerinin belirlenmesi ve tahkimat tasarım analizlerinde bu değerlerin dikkate alınması daha doğru olacaktır. Bu çalışmanın amacı, laboratuvar ortamında seçilen model doğal (mermer) ve yapay (beton) kayalar üzerinde farklı gerilmeler altında ortaya çıkan zamana dayalı pekleşme davranışların belirlenmesi, değerlendirilmesi ve genel bir yaklaşımın geliştirilmesi olmuştur.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Bu doktora tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalar altı başlık altında verilmiştir. Giriş bölümünde problemin tanımı, çalışmanın amacı ve içeriği verilmiştir. İkinci bölüm kaynak araştırmasına dayalı literatür bilgisi sunulmuştur. Üçüncü bölümde bu çalışma için planlanan model kaya malzemelerinin tespiti ve temini, yapay kaya (beton) malzemelerinin hazırlanması çalışmaları yanında deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar sunulmuştur. Beşinci bölümde elde edilen bulgular üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler verilmiştir. Son bölümde ise ulaşılan sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Genel

Kaya mekaniği, kaya malzemesine etki eden kuvvetleri ve bu kuvvetlerin sebep olduğu mekanik davranışları inceleyen bir bilim dalıdır. Kaya mekaniği, farklı mühendislik (maden, jeoloji ve inşaat mühendisliği gibi) alanlarındaki projelerin en temel yapıtaşlarından biridir. Bu bilim dalı, kayaların davranışlarını detaylı bir şekilde inceleyerek, kaya mühendislik yapılarının tasarlanmasında aktif bir rol oynar. Bu bölümde kaya malzeme ve kütle özellikleri, kaya malzemesinin yenilme davranışı, sayısal analiz yöntemleri ve tez konusu ile ilgili yapılan çalışmalara değinilecektir.

2.2. Kaya Malzeme ve Kütle Özellikleri

Kaya malzemesi, tabakalanma, eklem, fay ve şistozite gibi süreksizlikler tarafından çevrelenmiş olan sağlam kaya kütle bölümleridir. Kaya malzemesi, çekme dayanımını etkileyecek büyük kırıklar veya zayıflıklar içermez. Bunun yanında mikro çatlaklar süreksizlik olarak kabul edilmezler. Milimetrik boyuttan metrik boyuta ulaşan kaya malzemesi genellikle elastik ve izotropik (her yönde homojen ve benzer) özellikler gösterir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Kaya kütlesi, süreksizliklerden ve kaya malzemelerinden meydana gelen daha geniş bir yapıdır. Süreksizlikler, kaya kütlesinin yapısal bütünlüğünü kesintiye uğratan yüzeylerdir ve kaya bloklarının özelliklerini etkileyerek kaya kütlesinin genel davranışının belirlenmesinde rol oynarlar. Yeraltı açıklıklarının kararlılığı, kaya malzemesi ve süreksizlikler arasındaki bu etkileşim tarafından şekillendirilir ve bu etkileşim kaya kütlesinin karmaşık yapısının mühendislik tasarım süreçlerinde önemli bir faktördür (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Kaya malzeme ve kütle özellikleri, doğal afetlerin yönetimi, inşaat mühendisliği, jeolojik araştırmalar, çevre koruma ve madencilik gibi alanlarda çok büyük önem taşır. Kaya malzeme ve kütle özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi kaya mühendislik projelerinin başarılı olması için çok önemlidir. Bundan dolayı kaya mühendislik yapılarının tasarlanmasında, kaya malzemesinin ve kütlesinin özelliklerini anlamak için yapılan alan araştırmaları ve laboratuvar deneyleri, temel anlamda oldukça önemlidir.

2.2.1. Kaya malzeme özelliklerinin laboratuvar deneyleri yardımıyla belirlenmesi

Uluslararası kaya mekaniği derneği (ISRM), kaya malzeme özelliklerini belirlemek için standartlar oluşturmuş ve kaya mekaniği laboratuvar deneylerinin bu standartlar çerçevesinde yapılmasını önermiştir. Bu deneylerden bazıları Çizelge 2. 1'de verilmiş ve kısaca açıklanmıştır.

Çizelge 2. 1. Bazı kaya mekaniği deneyleri ve kaya malzeme özellikleri (ISRM, 2007; Ceylanoğlu, 1996)

Deney Adı	Sembol	Birim	Kaya Malzeme Özellikleri
Su içeriği, Yoğunluk ve Gözeneklilik Belirleme Deneyi	W, ρ, Pv	gr,gr/cm^3, cm^3	Su içeriği, yoğunluk, gözeneklilik
Suda Dağılma Dayanımı Deneyi	I_{d1}, I_{d2}		Suda dağılma dayanım indeksi
Kaya Sertlik ve Sertlik Belirleme Deneyi			Schmidt çekici değeri
Tek Eksenli Basma Dayanımı Deneyi	σ_c	MPa	Tek eksenli basma dayanımı ve malzeme kırılma açısı
Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian) Deneyi	σ_t	MPa	Çekme dayanımı
Nokta Yükleme Dayanımı Deneyi	$I_{s(50)}$	MPa	Nokta yükleme dayanımı indeksi
Tek Eksenli Deformabilite Deneyi			Gerilme-Birim deformasyon özellikleri, Young modülünü, Poisson Oranı
Darbe Dayanımı Deneyi	D	kgf-cm/cm^3	Darbe dayanımı
Direkt Çekme Dayanımı Deneyi	σ_t	MPa	Çekme dayanımı
Eğilme Dayanımı Deneyi	R_o	kg/ cm^2	Eğilme dayanımı
Üç Eksenli Basma Dayanımı Deneyi			Kohezyon ve içsel sürtünme açısı
Direkt Makaslama Dayanımı Deneyi	τ	MPa	Makaslama gerilmesi dayanımı

Su içeriği, yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneyi: Kaya malzemelerinin su içeriği, yoğunluğu ve gözenekliliği malzemenin kütlesel ve hacimsel özelliklerini belirleyen ana parametrelerdir. Su içeriği deneyi, malzemedeki nem miktarını; yoğunluk deneyi, birim hacim başına düşen kütleyi; gözeneklilik deneyi ise malzemenin boşluk oranını belirler. Bu özellikler, kaya malzemesinin mukavemet ve elastisite gibi değerleri üzerinde etkilidir.

Suda dağılma dayanımı deneyi: Kaya malzemesinin suyla teması sonucu malzemenin dağılma dayanımının belirlenmesi için yapılan bir deneydir.

Kaya sertlik ve sertlik belirleme deneyi: Kaya sertliği, malzemenin direnç göstermesinin bir ölçüsüdür ve genellikle Schmidt çekici gibi aletlerle belirlenir. Sertlik değeri, kaya malzemesinin aşınma direnci, delinme hızı ve dolaylı olarak yaklaşık basma-çekme dayanımları hakkında bilgi verir.

Tek eksenli basma dayanımı deneyi: Bu deney kaya malzemesinin basınç altında ne kadar direnç gösterebildiğini belirler. Bu deneyden elde edilen veri, kaya mühendislik yapılarının tasarımı için temel bir parametredir.

Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyi: Brazilian deneyi olarak da bilinen bu deney, kaya malzemesinin çekme kuvvetlerine karşı gösterdiği direnci dolaylı olarak ölçer. Yani bu deney, dolaylı çekme mukavemetini belirlemek için kullanılır.

Nokta yükleme dayanımı deneyi: Bu deney, küçük kaya örneklerine noktasal bir yük uygulayarak malzemenin noktasal direncini ölçer. Taşınabilir tertibatı sayesinde saha koşullarında hızlı bir ölçüm yapılmasına olanak sağlar. Böylece sahada hızlı bir değerlendirme yapılabilir.

Tek eksenli deformabilite deneyi: Kaya malzemelerinin elastik ve plastik deformasyon davranışlarını inceler. Bu deneyde, kaya malzemesinin gerilme altında nasıl bir deformasyon davranışı göstereceği gözlemlenebilir.

Darbe dayanımı deneyi: Bu deney kaya malzemesinin ani yük altındaki kırılma davranışını belirler. Bu özellik, değişken yük altındaki yapıların tasarımında önem taşır.

Direkt çekme dayanımı deneyi: Kaya malzemesinin direkt çekme kuvvetlerine karşı gösterdiği direnci belirlemek amacıyla gerçekleştirilir.

Eğilme dayanımı deneyi: Kaya malzemesinin eğilme (bükülme) kuvvetlerine karşı direncini belirler.

Üç eksenli basma dayanımı deneyi: Bu deneyi, kaya malzemesinin farklı yönlere uygulanan basınç kuvvetlerine karşı gösterdiği mekanik mukavemeti ölçmeyi amaçlar.

Direkt makaslama dayanımı deneyi: Bu deney, kaya ve zeminlerin yüzeyler arasındaki kayma kuvvetlerine karşı gösterdiği mukavemeti ölçer.

Yukarıdaki deneylerden elde edilen sonuçlar (σ_c, σ_t, $I_{s(50)}$ vb. değerler), kaya mühendislik projelerinin tasarım ve optimizasyonunda kullanılır.

2.2.2. Kaya kütle özelliklerinin belirlenmesi ve kaya sınıflandırma sistemleri

Kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesi, doğal afetlerin değerlendirilmesi, madencilik faaliyetlerinin planlanması ve kaya kütlesi stabilitesinin analizi gibi birçok alanda kritik bir öneme sahiptir. Kaya kütle özellikleri belirlenirken kaya kütlesi içinde bulunan süreksizlikler büyük önem taşımaktadır. Bu süreksizlikler, tabakalanma düzlemleri, kıvrımlar, faylar, ezilme zonları, dayklar ve eklemler olarak sınıflandırılabilir (Karpuz ve Hindistan, 2012).

i. Tabakalanma Düzlemleri: Kaya katmanlarının ayrılma yerlerini temsil eder. Bu düzlemler, kaya kütlelerinin yatay bölümlerini oluşturan ayrılmaları belirler. Tabakalanma düzlemleri, jeolojik incelemeler sırasında belirlenir ve bu bilgi mühendislik tasarımları ve yeraltı stabilitesi analizlerinde kullanılır.

ii. Kıvrımlar: Kaya katmanlarının bükülmüş veya kıvrılmış olduğu yapısal deformasyonlardır. Kıvrımların varlığı, kaya kütlelerinin geçmiş jeolojik olaylarının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Kıvrımların türü, kaya kütlelerinin mekanik davranışını ve dayanımını etkileyebilir.

iii. Faylar: Kaya kütlelerindeki zayıf noktalardır ve kaya katmanlarının kayma veya yer değiştirmesine neden olabilir. Fayların belirlenmesi, yeraltı stabilitesi analizlerinde ve deprem tehlikesi incelemelerinde önemli bir rol oynar. Fayların türü ve büyüklüğü gibi özellikleri, kaya mühendislik yapılarının tasarımında önemli bir rol oynar.

iv. Ezilme zonları: Kaya kütlelerindeki ezilme zonları, kaya kütlesinin içindeki kırıklar ve çatlakların belirlenmesiyle karakterize edilir. Bu ezilme zonları, kaya kütlelerinin özelliklerini ve dolayısıyla yeraltı açıklıklarının duraylılığını etkileyebilir. Ezilme zonları, zemin stabilitesi analizlerinde ve tünel projelerinin oluşturulmasında ön planda incelenmesi gereken süreksizlik yapılarındandır.

v. Dayklar: Kaya kütlelerindeki bir çatlak içerisinde ilerleyen ve diğer kayaların arasına giren dar, uzun kaya tabakalarıdır. Bu büyük tabakalar, kaya kütlesini farklı bölümlere ayırır. Daykların varlığı, kaya kütlelerinin mekanik davranışını etkiler.

vi. Eklemler: Kaya kütlesi içerisindeki çatlaklar ve ayrışma yerleri eklemleri oluşturur yani kaya kütleleri içindeki zayıf noktalardır. Eklemlerin sayısı, boyutu ve konumu gibi özellikleri kaya malzemesinin dayanımını etkiler.

Kaya sınıflandırma sistemleri, kaya kütlesinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve belirlenen bu özelliklerle güvenli ve ekonomik kaya mühendislik tasarımlarının ortaya konmasında büyük rol oynar. Bieniawski (1973) tarafından RMR Kaya Kütle Sınıflama Sistemi, Barton ve diğ. (1974) tarafından Q Kaya Kütle Sınıflama Sistemi ve Hoek ve Marinos (2000) tarafından geliştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) bu sınıflandırma sistemlerinin üçünü oluşturmaktadır.

I. Jeomekanik Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (RMR): RMR sistemi veya Jeomekanik Sınıflandırma, Bieniawski (1973) tarafından Güney Afrika'da tünellerin kararlılığını ve destek gereksinimlerini değerlendirmek üzere geliştirilmiştir (Bieniawski, 1973). İlk geliştirilmesinden bu yana, incelenen vaka sayısının artmasıyla sistem sürekli olarak iyileştirilmiş ve detaylandırılmıştır. Bu sistemin üstünlüğü, kaya kütlesinin şekli

ve mekanik koşullarıyla bağlantılı bazı temel parametrelerin kullanılmasından ileri gelmektedir. RMR sistemi kaya kütlesini gruplandırmak için, aşağıdaki temel parametreleri dikkate alır (Bieniawski, 1989).

- Bütün kaya için tek eksenli basma dayanımı (σ_c)
- Kaya kalite belirteci (RQD)
- Süreksizlik aralıkları
- Süreksizliklerin durumu
- Yeraltı suyu durumu
- Süreksizliklerin konumu

II. Barton ve arkadaşlarının Kaya Kütle Sınıflama Sistemi (Q Sistemi): Q-sistemi, Norveçte Barton ve diğ. (1974) tarafından kaya kütle özelliklerinin belirlenmesi ve tünel tahkimat tasarımı için geliştirilmiştir. Bu nicel mühendislik sistemi, İskandinavya'dan 212 sert kaya tüneli vaka analizine dayanarak önerilmiştir (Barton ve diğ., 1974). Q'nun değeri şu şekilde hesaplanır:

$$Q = \left(\frac{RQD}{\mathrm{Jn}}\right) * \left(\frac{\mathrm{Jr}}{\mathrm{Ja}}\right) * \left(\frac{\mathrm{Jw}}{\mathrm{SRF}}\right)$$

Burada;

RQD: Kaya kalite belirteci

Jn : Eklem takımı sayısı

Jr : Eklem pürüzlülük sayısı

Ja : Eklem alterasyon sayısı

Jw: Eklem su azaltma faktörü

SRF: Gerilme azaltma katsayısı'dır.

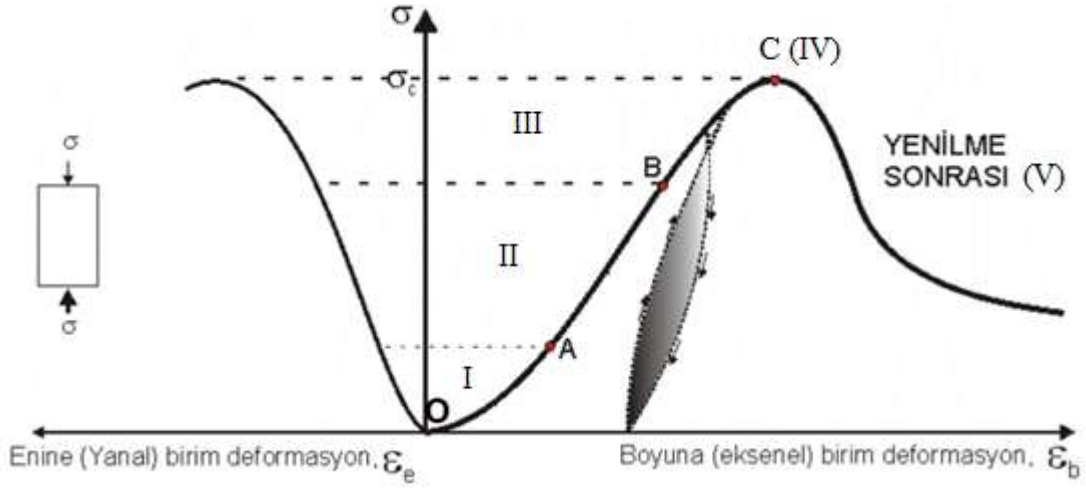
III. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI): 1994 yılında Hoek, hem sert hem de zayıf kaya kütleleri için kaya mühendisliğinde kullanılmak üzere kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesini kolaylaştırmak amacıyla jeolojik dayanım indeksi (GSI)'yi tanıttı (Hoek, 1994). Jeolojik dayanım indeksi, kaya kütlesinin yapısal durumu ve süreksizlik yüzeylerinin durumu gibi görsel olarak belirlenebilen özelliklere dayalı bir kaya kütlesi sınıflama sistemidir. GSI, jeolojik sürecin iki temel parametresi olan kütlenin blokluluğunu ve süreksizliklerin koşullarını birleştirerek, bir oluşumu yöneten ana jeolojik kısıtlamaları dikkate alır ve böylece sahada uygulanması kolay, jeolojik olarak sağlam bir indekstir. Evert Hoek ve Peter Marinos tarafından 1990'ların sonlarında geliştirilmiş ve bazı araştırmacılar tarafından modifiye edilmiştir (Sonmez ve Ulusay,

1999; Cai ve diğ., 2004; Hoek ve Marinos, 2000; Marinos ve Hoek, 2000; Hoek ve diğ., 1998; Marinos ve diğ., 2005).

2.3. Kaya Malzemesinin Yenilme Davranışı

2.3.1. Yenilme davranışında birim deformasyon-gerilme ilişkisi

Gerilme altındaki kaya malzemesinin davranışı, elastik, elastoplastik, veya plastik ideal davranış modellerine uymayan karmaşık bir yapı sergiler. Gerilme miktarının artmasıyla kaya malzemesi çeşitli deformasyon davranışları gösterir. Kaya malzemesinin gerilmeye bağlı birim deformasyon ilişkisi temel haliyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Karpuz ve Hindistan, 2012).



Şekil 2. 1. Bir kaya örneği için gerilme-birim deformasyon ilişkisi (Karpuz ve Hindistan, 2012)

Gerilmenin etkisiyle kaya malzeme davranışını, I., II., III. bölge, yenilme noktası(C) ve yenilme sonrası olmak üzere beş bölgede incelemek mümkündür (Şekil 2.1) (Karpuz ve Hindistan, 2012).

I. Bölge (OA arası): Eğri yukarı yönde kavislidir. Yükleme sonucunda, kaya malzemesi içindeki boşluk, çatlak gibi süreksizlikler kapandığından dolayı deformasyon miktarı artar ve deformasyon modülü azalır. Histerik özelliklerin sınırlı olduğu bu bölgede, boşaltma anında yükleme sırasında elde edilen birim deformasyonun tamamı geri kazanıldığından dolayı kaya örneği bu alanda elastik bir davranış sergiler.

II. Bölge (AB arası): Gerilme – birim deformasyon eğrisinin doğrusal davranış ya da doğrusala yakın elastik davranış bölgesidir. Elastik modül değeri ($E=d\sigma/d\varepsilon$) bu

bölgeden hesaplanır ve tüm kayayı temsil eden bu değer ortalama modül şeklinde de tanımlanabilir. Örnekteki boy kısalması yanal uzamadan fazla olduğu için, bu bölgede örneğin tamamında hacim azalması gözlemlenir.

III. Bölge (BC arası): B noktasından itibaren kaya elastik özelliği kaybetmeye ve plastik özellik göstermeye başlar. Malzeme üzerindeki yük boşaltıldığı takdirde deformasyonların kalıcı olduğu ve malzemenin histerik özellik gösterdiği gözlemlenir. Boşaltma ve tekrar yükleme yapılması durumunda malzeme BC arasındaki grafikteki koyu alandaki gibi oklarla işaret edilen yönde yeni bir yol takip eder. Kayadaki çatlakların gelişmesi ve yeni çatlakların oluşması gerçekleşebilir. Bu bölgede örneğin hacminde artış gözlemlenir ve C noktasında kayanın yenilmesiyle son bulur.

IV. Bölge (C noktası): Bu nokta, yenilme noktasıdır. Gerilme-birim deformasyon eğrisinin eğimi sıfır olduğu için elastik modül de sıfırdır. Bu aşamada kararsız çatlak oluşumu başlar. Çatlakların birbirini keserek ve birleşerek kaya içinden dışarı doğru uzanan büyük bir yenilme düzlemi oluşturmasıyla numune kırılarak yenilir. Bu noktadaki gerilme değeri en yüksek gerilme değeridir ve malzemenin tek eksenli basınç dayanımı değeridir.

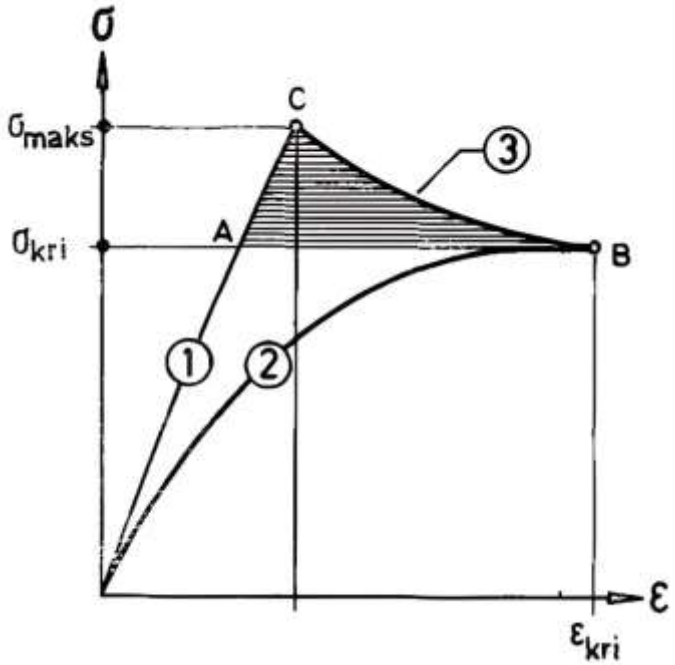
V. Bölge: Yenilme sonrası bölgedir. Bu aşamada eğrinin eğimi negatiftir. Boşaltma-yeniden yükleme işleminde büyük kalıcı deformasyonlar ve histerik özellik oluşur. Bu bölgede kaya kırılgan, gevrek (brittle) davranış sergiler. Kaya, yükleme karşısındaki mukavemetini hızla kaybeder ve yenilmeye müsait hale gelir. Yanal büyüme miktarı, boyuna kısalma miktarından daha büyük olduğu için deneyi yapılan örnekte hacim artışı gözlenir.

2.3.2. Kaya malzemesinin pekleşme davranışı

Çeşitli kaya numuneleri üzerinde yapılan deneysel model çalışmaları ve laboratuvar incelemeleri, elde edilen tek eksenli basma dayanımının yükleme hızına göre değiştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, farklı gerilme değerlerine maruz kalan malzemenin zaman içerisinde pekleştiği veya beklenen kırılma değerlerinden daha düşük gerilme değerlerinde kırıldığı gözlemlenmiştir. Yükleme hızından dolayı kırılma değerlerindeki artış ile zaman içerisinde malzemenin pekleşmesi bir diyagram üzerinde çizildiğinde kayanın davranışını gösteren üç eğri ortaya çıkmaktadır (Şekil 2. 2.) (Vardar, 1981).

Bunlar;

1. Hızlı yüklenme eğrisi (elastiklik karakteristiği)
2. Pekleşme eğrisi (pekleşme karakteristiği)
3. Direnç azalma eğrisi (yorulma karakteristiği)



Şekil 2. 2. Kaya malzemesinin tipik eğrileri ve sınır durumları (Vardar, 1981)

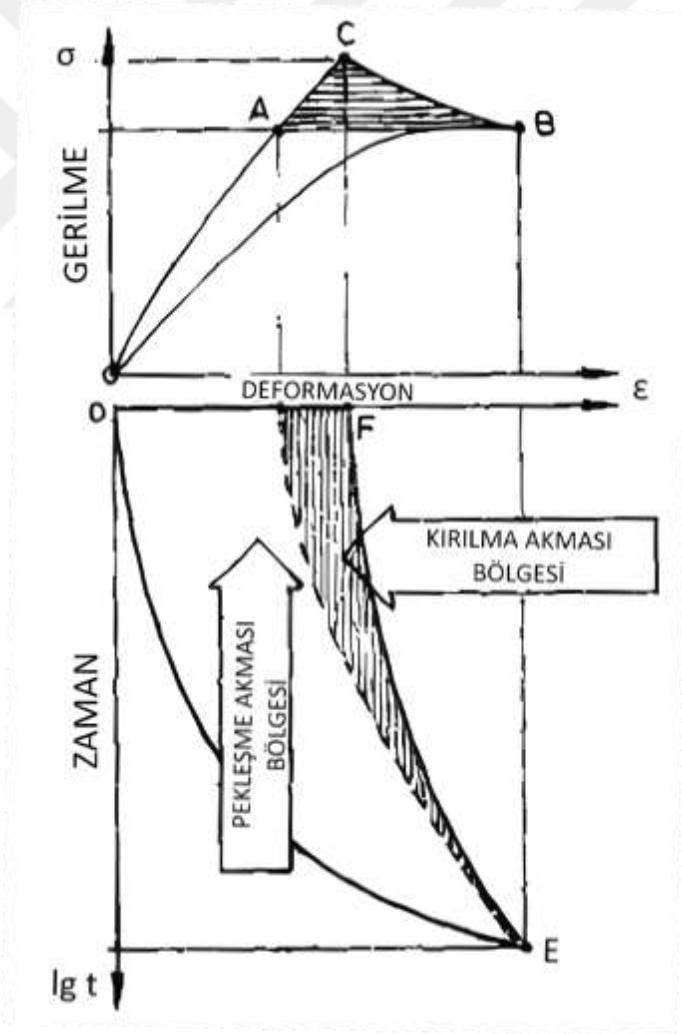
Kaya malzemesinin hızlı yük artışları karşısında Şekil 2. 2. 'deki gibi 1 numaralı eğriyi izleyerek tepe (C) noktasında kırıldığı gözlemlenir. Bu izlenen yol boyunca (1 numaralı eğri) kaya malzemesinin deformasyonunun şekillenmesinde, kayanın elastik özelliklerinin etkili olduğu gözlemlenir.

Yükleme hızının düşürülmesiyle, kırılma noktası, C noktasından B noktasına yönelerek, 3 numaralı direnç azalma eğrisi (yorulma karakteristiği) üzerinde yer alacaktır. Uzun dönemli yükleme deneylerinde, kayanın gösterdiği davranış 2 numaralı eğri boyunca olacaktır. Kayanın üzerindeki gerilme B noktasındaki (σ_{kritik}) gibi düşük bir gerilme değerine ulaştığında kayanın plasto-viskoz özellikleri etkin olduğundan, kayanın taşıma mukavemetinin yok olduğu gözlenmektedir. Bu durum, A noktasına kadar ani bir şekilde yüklenmiş olan kaya malzemesinin, bu ulaşılan gerilme altında yeterince uzun süre kalmasıyla da görülmektedir (Vardar, 1981).

Vardar (1981) tarafından direnç azalma eğrisi (3 numaralı eğri) ile pekleşme eğrisinin kesiştiği nokta olan B noktasından kritik gerilme (σ_{kritik}) ve deformasyon (ε_{kritik}) verileri elde edilmektedir. Herhangi bir yükleme hızıyla kritik gerilme (σ_{kritik}) noktasına

gelindiğinde, kaya malzemesi sünme-akma ayırt edici özelliğini gösterecek ve ε_{kritik} değerine ulaşılınca plastik deformasyonlardan dolayı kırılacaktır.

σ_{kritik} altındaki değerlerde, kaya malzemesi, zamanla kendiliğinden kırılmayacak ve kademeli olarak sönümlenen deformasyonlardan dolayı pekleşecektir. Bununla birlikte, σ_{kritik} üstündeki gerilme değerlerinde kaya malzemesi, her zaman kırılma noktalarının olduğu direnç azalma eğrisine (yorulma karakteristiğine) ulaşacağından, belirli bir zamanın sonunda kırılacaktır. Kaya malzemesi yeterince uzun zaman gerilme altında bekletildiğinde, pekleşme ve çok yavaş yükleme eğrisi birbirleriyle örtüşür. Şekil 2. 3'te görüldüğü gibi, üç eğri arasındaki alan, kayanın zaman, deformasyon ve tek eksenli gerilme koşulları altında göstereceği her davranışın olduğu alanı tanımlamaktadır (Vardar, 1981).



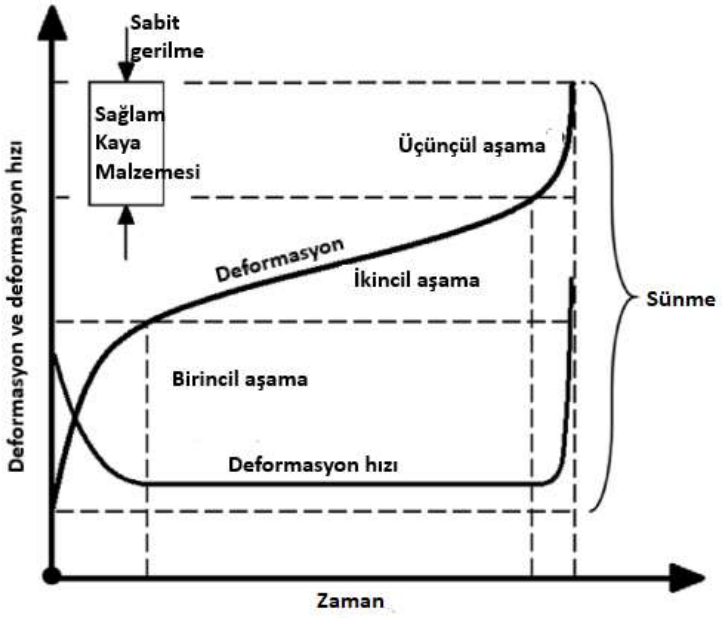
Şekil 2. 3. Kaya malzemesinin zamana bağlı pekleşme akması ve kırılma akması bölgeleri (Vardar, 1981)

Şekil 2.3'teki grafikte zaman faktörününde dahil edilmesiyle, pekleşme ve kırılma akması bölgelerini grafikte rahatça gözlemleyebiliriz.

2.3.3. Kaya malzemesinin sünme davranışı

Bir kaya malzemesi, yenilme dayanımının altındaki sabit bir yüke maruz bırakıldığında, zaman içerisinde devamlı olarak deforme olabilir. Zaman içerisindeki bu deformasyon süreci sünme olarak adlandırılır (Hardy ve diğ., 1969).

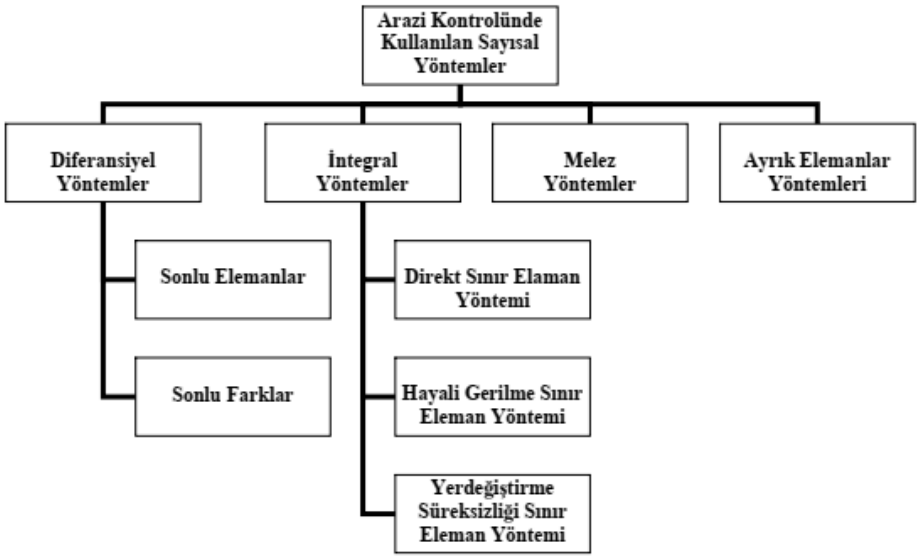
Şekil 2. 4., kaya malzemesinin sünme davranışını şematik olarak göstermektedir. Ani bir yükleme sonrasında ilk olarak anlık elastik deformasyon görülür. Sonrasında, sabit yük altında kaya malzemesi zaman içinde deforme olmaya devam edebilir. Sünme olarak adlandırdığımız bu süreç ve genellikle kaya malzemesinin yenilmesine kadar üç aşamayı içerir: birincil (ya da geçici sünme) aşama, ikincil (ya da istikrarlı sünme) aşama ve üçüncül (ya da hızlanan) aşama. Birincil aşama, başlangıçta çok yüksek bir sünme deformasyon hızına sahiptir ve deformasyon hızı zamanla azalır. İkincil aşama, zamanla neredeyse sabit bir sünme deformasyon hızına sahiptir. Üçüncül aşama, sünme deformasyon hızının artmasıyla ve kaya malzemesinin yenilmesiyle sonlanan aşamadır (Wang ve diğ., 2019).



Şekil 2. 4. Kaya malzemesinin sünme davranışı (Wang ve diğ., 2019)

2.4. Sayısal Analiz Yöntemleri

Sayısal analiz yöntemlerinin amacı, laboratuarda veya arazideki kaya mekaniği deneylerinden elde edilen sonuçlar ile buna bağlı deformasyon verilerinin uyuşacağı bir model oluşturulması ve yeraltı açıklıklarının tasarlanmasıdır. Yani, laboratuvar koşullarında kaya mekaniği özellikleri belirlenir ve belirlenen bu özellikler saha gerilme ve deformasyon koşullarına uyarlanarak geçerli bir model oluşturulur.



Şekil 2. 5. Sayısal analiz yöntemleri (Yazıcı ve Nasuf, 1993)

Çizelge 2. 2. Sayısal analizlerde kullanılan bazı bilgisayar programları

Program İsmi	Yöntem	Firma
Visage	Sonlu Elemanlar Yöntemi	Bharü Eng.
Flac	Sonlu Elemanlar Yöntemi	Itasca Cons. Group
Examine	Sınır Eleman Yöntemi	Toronto University
3DBEM	Sınır Eleman Yöntemi	Mine Modelling Ltd.
UDEC	Ayrık Elemanlar Yöntemi	Itasca Cons. Group
BEFE	Hibrit	Quennsland University
RS2	Hibrit	Toronto University
PLAXİS	Ayrık Elemanlar	Bentley Systems
ABAQUS	Sonlu Elemanlar Yöntemi	Dassault Systèmes Simulia Corp.
LS-DYNA	Sonlu Elemanlar Yöntemi	Livermore Software Technology Corp.
GEOSTUDIO	Sonlu Elemanlar Yöntemi	GEO-SLOPE International Ltd.

Sayısal analiz yöntemleri integral ve diferansiyel yöntemler olarak iki kategoride incelenir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemi diferansiyel yöntemin alt başlıklarıdır. Sınır eleman, yer değiştirme süreksizliği sınır eleman ve hayali gerilme sınır eleman yöntemleri ise integral yöntemleri oluşturur. Bu bahsedilen iki yöntemin birleştirilmesinden meydana gelen hibrit(melez) yöntem her iki yaklaşımın avantajlarından yararlanma amacını taşır. Bunlara ek olarak ayrık elemanlar yöntemi, gerilme hesaplamalarını temel olarak diferansiyel yönteme dayandırması ve yeni

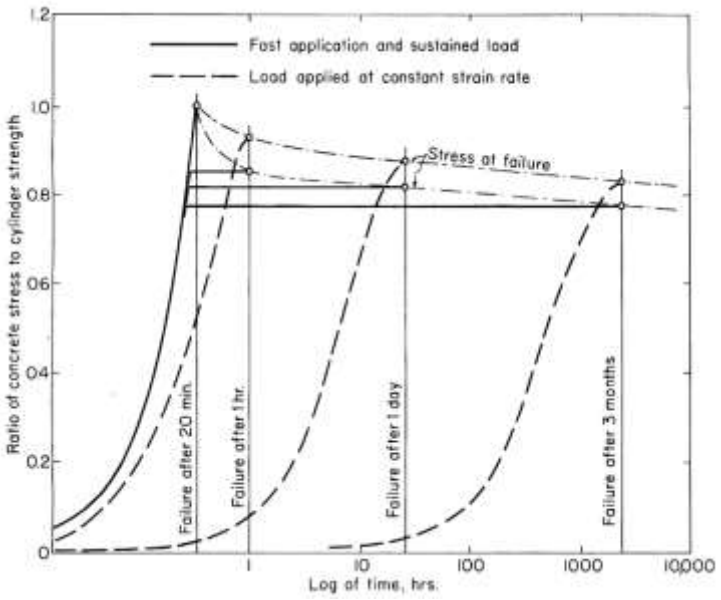
kavramlar içermesinden dolayı ayrı bir kategori olarak değerlendirilir (Şekil 2.5.) (Yazıcı ve Nasuf, 1993; Özşen, 2009). Sayısal analizlerde kullanılan bazı bilgisayar programları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

2.5. Tez konusu ile ilgili yapılan çalışmalar

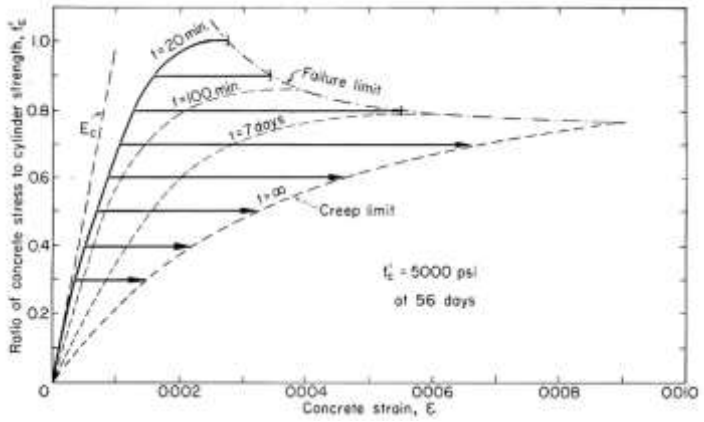
Bu tez çalışma konusu üzerinde gerçekleştirilmiş daha önceki çalışmalara ait genel bir değerlendirme aşağıda sunulmuştur.

Rüsch (1960), beton üzerindeki yapmış olduğu deneylerden elde ettiği verilere göre, sürekli yük dayanımının kısa süreli dayanıma oranı beton dayanımından bağımsızdır. Bununla birlikte, kısa süreli mukavemet, dökümden sonra zamanla arttığından, yenilmeye kadar geçen süre, sürekli yük kuvvetinin mutlak değeri üzerinde hala belirgin bir etkiye sahiptir (Şekil 2. 6).

a)



b)



Şekil 2. 6. a) Yükleme türünün nihai dayanım üzerindeki etkisi b) Yük yoğunluğu ve süresinin beton birim deformasyon üzerindeki etkisi (Rüsch, 1960)

Bieniawski (1970), düşük oranlarda yüklemeye maruz kalan kararlı kaya yapıları için tasarım verileri elde etmek için:

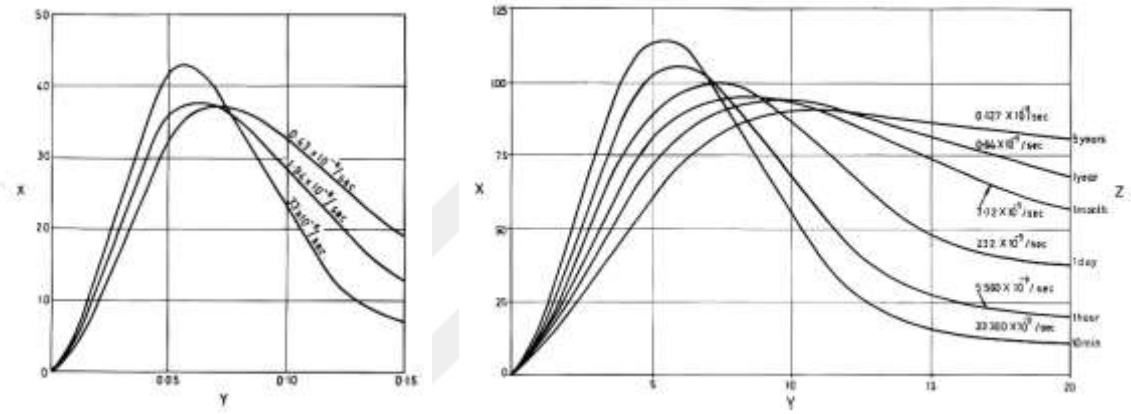
-Sabit birim deformasyon hızlarında kademeli olarak artan sıkıştırma (Şekil 2. 7);

- Değişen birim deformasyon hızlarında kademeli olarak artan sıkıştırma (Şekil 2. 8.a);

-Çeşitli zaman sürelerinde sabit yük (Şekil 2. 8.b);

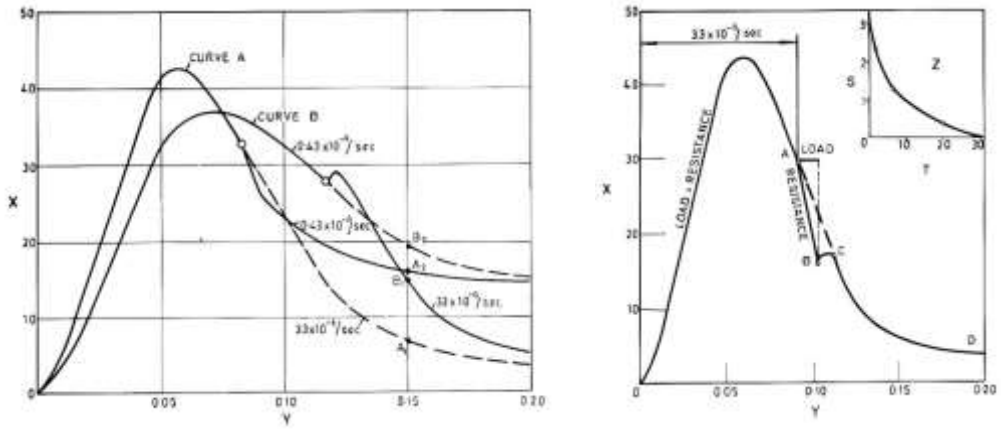
Uygulamalarını yapmış ve Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'deki grafikleri elde etmiştir.

a) b)



Şekil 2. 7. a) Tek eksenli basınç altında kumtaşının toplam yük-birim deformasyon eğrisine birim deformasyon hızının etkisi, X=Yük(kN); Y=deformasyon(mm). b) Çeşitli sabit birim deformasyon hızlarında kumtaşı için gerilme-birim deformasyon ilişkisi X= Eksenel gerilme (MN/m^2); Y=Eksenel birim deformasyon (10^{-3}); Z= Belirtilen birim deformasyon hızlarında 20. 10^{-3} birim deformasyon elde etmek için gerekli olan zaman (Bieniawski, 1970)

a) b)

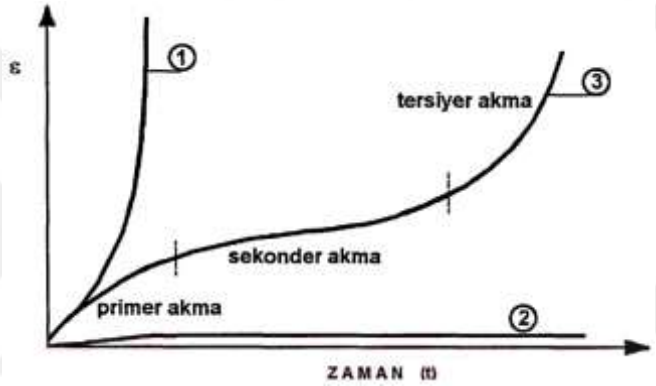


Şekil 2. 8. Birim deformasyon hızının kırıklı kayanın davranışına etkisi, X=Yük(kN); Y=deformasyon(mm) b) Tek eksenli sıkıştırmada kırıklı kayanın sabit yük altındaki deformasyon davranışı, X=Yük veya direnç(kN); Y=deformasyon(mm); Z= A ve B noktaları arasındaki birim deformasyon hızındaki değişiklikler (Bieniawski, 1970)

Hudson ve Brown (1972); Peng (1973); Sano ve diğ. (1981), birim deformasyon hızının artmasıyla daha yüksek bir elastisite modülüne ve daha yüksek bir mukavemete yol açtığını belirtmişlerdir.

Chong ve diğ. (1980), birim deformasyon hızının petrol şistinin kırılmasına etkisini araştırmışlar ve nihai gerilim, organik hacim ve logaritmik birim deformasyon hızı arasında doğrusal bir ilişki gözlemişlerdir. Ayrıca Young modülünün birim deformasyon hızına bağlı olduğunu, daha yüksek birim deformasyon hızlarının daha yüksek Young modülünü gösterdiği gözlemlemişlerdir.

Farmer (1983), farklı gerilme seviyeleri için zamana bağlı davranışı gösteren 3 tip deformasyon-zaman eğrisi önermiştir (Şekil 2. 9.).



Şekil 2. 9. Kayanın farklı gerilme seviyelerinde zamana bağlı deformasyonu **(**Farmer 1983)

1-Kritik çatlak yoğunluğunun oluştuğu gerilme seviyesi (kritik direnç) üzerindeki sabit gerilmelerde malzemede kararlı olmayan çatlakları hızla gelişerek kırılma meydana gelir.
2-Kritik gerilmenin yeterince altında olan sabit gerilmelerde örnekte zamanla gecikmeli olarak çatlaklar oluşabilir, fakat yenilme olmadan çok az sünme gerçekleşir.
3-Geçiş bölgesi; kritik sayıdaki çatlak oluşumu için gerekli kritik gerilme seviyesinde gerilmenin sabit tutulması halinde kararlı mikro çatlaklar gelişmeye başlar, akma yavaşlar ve kritik çatlak yoğunluğuna ulaşıldığında sünme hızlanır ve kırılma olayı gerçekleşir.

Lajtai ve Schmidtke (1986), anortizite ve granit üzerinde yapmış oldukları tek eksenli statik yorulma deneylerinde suya doygun olan numunelerin kırılma direncinin kuru numunelere göre zamana bağlı olarak %60 oranında azaldığını tespit etmiştir.

Chong ve Boresi (1990), New Albany petrol şistinin Young modülü ve Poisson oranı üzerinde birim deformasyon hızının etkisini incelemişler. İstatistiksel analiz ve deneysel sonuçlara bakıldığında, Young modülünün güçlü bir şekilde birim deformasyon

hızına bağlı olduğu ve birim deformasyon hızının artmasıyla hızlı bir şekilde yükseldiğini görülmüştür. Diğer taraftan Poisson oranın birim deformasyon hızına bağlı olmadığını gözlemlemişlerdir.

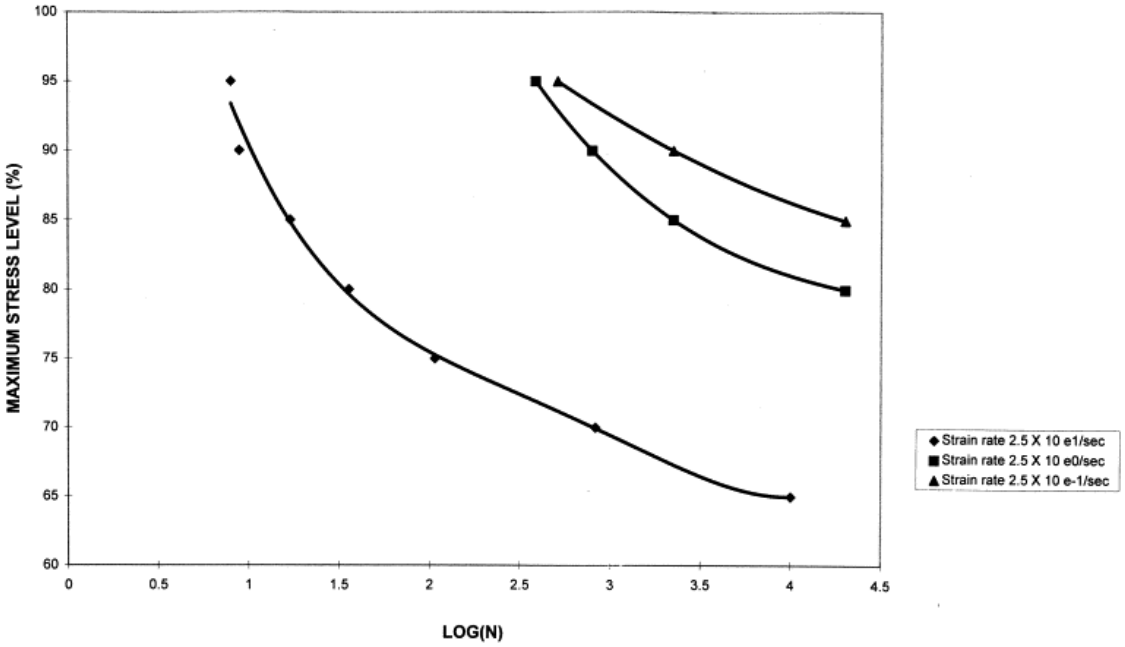
Lajtai ve diğ. (1991), birim deformasyon hızının, birbirinden tamamen farklı yapıda olan kırılabilir kireç taşı ile sünek kaya tuzunun mukavemeti üzerindeki etkiyi araştırmışlar. Bir dolomitik kireçtaşı olan Tyndallstone üzerindeki statik ve dinamik yorulma deneyleri sonucunda, artan gerilme ve birim deformasyon hızıyla birlikte, oran etkisi çok küçük olmasına rağmen mukavemette bir artış olduğunu göstermektedir. Statik ve dinamik yorulma testlerinin aynı gerilme korozyon parametresini vermesi beklenmesine rağmen, böyle bir durum gözlenmemiştir.

Wu ve Pollard (1993), düşük deformasyon hızlarında aşamalı olarak artan ve büyüyen çatlakların, yüksek yükleme hızlarında az sayıda oluşan çatlaklara göre, direnç üzerindeki etkisinin göreceli olarak daha fazla olduğu sonucuna ulaşmış ve yüksek deformasyon hızlarında kırılma direncinin çatlak boyutu ve şeklinden bağımsız olacağını ileri sürmüştür.

Mahmutoğlu (1995), Tünel mühendisliğinde kayanın gevşeme modülünü belirlemek için yaptığı çalışmada;

- Gevşeme deneyleri ile fiziksel gevşemeye bağlı (inelastik hacim artışı) kayada önemli direnç kayıplarının meydana geldiği kanıtlanmıştır. Elde edilen deney verilerinden inelastik hacim deformasyonunun kayanın direnci üzerindeki etkisi, $GM = (\sigma_1 - \sigma_r)/\delta$ bağıntısı oluşturulmuştur.
- Kırılma sonrası bölgede birim hacim deformasyonu ile direnç düşümleri arasında lineer bir ilişki tespit edilmiştir. Bu bağıntı($\Delta\sigma_1 = f(\delta, \sigma_3)$) ile kaya mekaniğine yeni bir kavramın "gevşeme modülü" bilimsel ve teknik anlamda tanımı yapılmıştır.
- Elde edilen sonuçlar çevre basıncının artmasıyla gevşeme modülünün azaldığını göstermektedir. Yani teknik olarak çevre gerilmesiyle ilişkili olarak kayanın sağlamlığı göreceli olarak değişecektir.

Ray ve diğ. (1999), Chunar kumtaşının farklı birim deformasyon hızlarında yorulma gerilmesi ve Young modülü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı birim deformasyon hızlarında Chunar kumtaşının yorulma eğrisini elde etmişlerdir ve yorulma gerilmesinin birim deformasyon hızı ile arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2. 10).



Şekil 2. 10. Farklı birim deformasyon hızlarında Chunar kumtaşının yorulma eğrisi **(**Ray ve diğ., 1999)

Ayrıca değişen birim deformasyon hızlarında Çizelge 2.3'teki Young modülü, birim deformasyon ve gerilme değerlerini elde etmişlerdir.

Çizelge 2.3. Değişen birim deformasyon oranlarındaki Young modülü, birim deformasyon ve gerilme değerleri (Ray ve diğ., 1999)

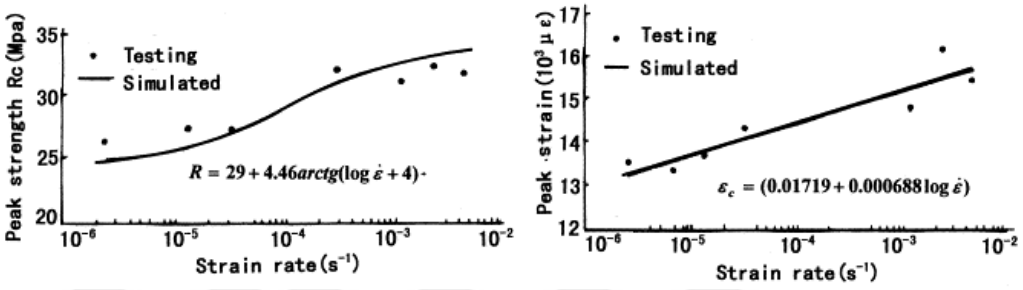
Strain rate/s	Fatigue stress (MPa)	Young's Modulus (MPa)
2.5×10^{1}	64.647	5734.191
2.5×10^{0}	60.048	3545.779
2.5×10^{-1}	54.918	2603.478

Strain rate/s	Stress (MPa)	Strain	Young's Modulus (MPa)
2.5×10^{1}	99.458	0.0174	5715.322
2.5×10^{1}	104.431	0.01765	5916.754
2.5×10^{1}	94.485	0.01715	5509.329
2.5×10^{1}	101.944	0.01750	5825.371
2.5×10^{1}	96.971	0.0170	5704.176
2.5×10^{-1}	65.678	0.0245	2679.653
2.5×10^{-1}	62.366	0.0245	2544.545
2.5×10^{-1}	64.022	0.02475	2586.237
2.5×10^{0}	72.853	0.0210	3469.176
2.5×10^{0}	77.286	0.0215	3593.861
2.5×10^{0}	75.060	0.0210	3574.300

Birim deformasyon hızındaki artış ile tek eksenli basınç mukavemetinde net bir artış gözlemlenmiştir. Yorulma gerilmesinin birim deformasyon hızıyla arttığı ve Young

modülünde birim deformasyon hızına bağlı olduğu Çizelge 2.3'deki tablodan görülmektedir.

Li ve Xia (2000), kırmızı kumtaşı numuneleri için 9 farklı birim deformasyon hızında (2.43×10^{-6} ile 4.38×10^{-3}/s aralığında) gerilme birim deformasyon eğrileri elde etmişlerdir. Birim deformasyon hızının artmasıyla kırmızı kumtaşının maksimum mukavemeti ve maksimum birim deformasyonun arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2. 11).



Şekil 2. 111. Birim deformasyon hızı ile maksimum mukavemet ve maksimum birim deformasyon arasındaki ilişki (Li ve Xia, 2000)

Özşen (2009), kaya tuzunun mekanik özelliklerin belirlenmesi ve sünme davranışının matematiksel modellenmesi için Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzlarından alınan numunelerle sünme deneyleri yapmıştır. Bu deneyler aracılığıyla sünme davranışını gösteren bir matematiksel model $[\varepsilon_d = A\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[1 - e^{-t/B}\right]\left[C + e^{-Q/RT}\right] + \frac{1}{t_{max}-t}]$ geliştirmiş ve bu model aracılığıyla tasarım verileri belirlemiştir. Bu eşitlikde A,B,C istatiksel katsayı, t zaman (h), t_{max} toplam test süresi (h), σ_c tek eksenli basma dayanımı (MPa), σ_s kritik pekleşme dayanımı (MPa), Q aktivasyon enerjisi (kcal/mol), R gaz sabiti (kcal/mol K), T sıcaklık (K)'tır. Bu model yardımıyla kaya tuzunda, uzun zaman alan sünme deneylerini yapmaya gerek kalmadan sünme davranışı tahmin edilmektedir.

Liang ve diğ. (2011), kaya tuzunun mekanik özelliklerine birim deformasyon hızının etkisini incelemek için 6 adet kaya tuzu numunesini ve 2 adet tenardit numunesi üzerinde çalışma yapmışlardır. 6 adet kaya tuzu numunesi ve $2x10^{-5}$, $2x10^{-4}$, $2x10^{-3}$ /s birim deformasyon hızlarında 2 adet tenardit numunesinin de $2x10^{-5}$, $2x10^{-4}$/s birim deformasyon hızlarında deneye tabi tutmuşlardır ve şu sonuçlara ulaşmışlardır;

- Kaya tuzunun mukavemeti, yükleme birim deformasyon hızından çok az etkilenir. Elastik modülü, birim deformasyon hızı ile hafifçe artar, ancak artış küçüktür.

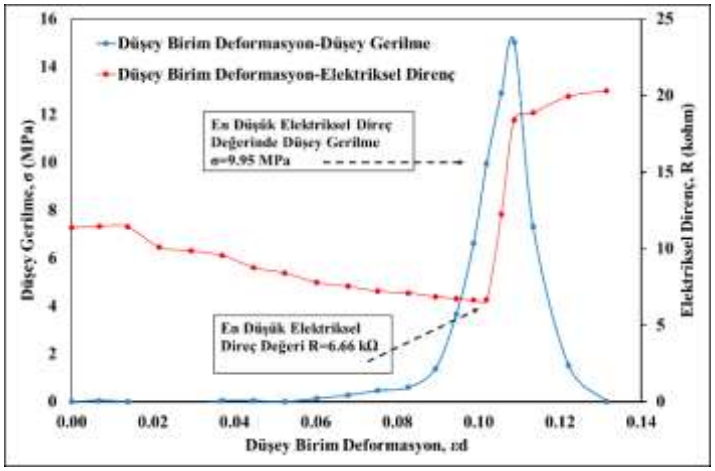
Aynı birim deformasyon hızında, tenarditin mukavemeti, kristal tane yapısı ve minerallerin dokusuna bağlı olarak kaya tuzuna göre biraz daha büyüktür.

- Birim deformasyon hızı artışı ile kaya tuzunun Poisson oranı azalır ve yanal deformasyon kapasitesi azalır. Ayrıca birim deformasyon hızı, yenilmeden önceki kaya tuzunun birim deformasyon hızını etkiler. Kaya tuzunun yenilmeden önceki birim deformasyonu, birim deformasyon hızıyla birlikte azalır.
- Kaya tuzunun kırılma şekli birim deformasyon hızıyla birlikte değişmedi, bu durum kırılabilir kayalara göre farklıdır. Kaya tuzunun güçlü viskoz deformasyon yeteneği, tek eksenli sıkıştırma sırasında enerjiyi emmesini sağlar. Sonuçta ortaya çıkan iç yanal sıkıştırma etkisi azalmıştır, bu nedenle kaya tuzunun mukavemeti ve kırılma tarzı, yükleme gerinim hızı ile neredeyse değişmez.

Bharti ve Deb (2014), çimento harcı numunelerinin tek eksenli basma dayanımı deneyleriyle, 5 farklı deformasyon hızında (10^{-6} s^{-1}, 10^{-5} s^{-1}, 10^{-4} s^{-1}, 10^{-3} s^{-1}ve 10^{-2} s^{-1}), dayanım ve elastik davranışlarını ve numunelerdeki kırılma şekillerini incelemişlerdir. Birim deformasyon hızı ile mekanik ve elastik özelliklerinin arttığını ama Poisson oranında çok büyük değişiklikler görülmediğini kaydetmişlerdir.

Mesutoğlu ve Özkan (2014); Özkan ve diğ. (2018), birim deformasyon gerilme davranışları belirleme çalışmalarında aynı zamanda elektriksel direnç değerlerini ölçmüşlerdir. Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalardan gerilme değeri arttıkça birim-deformasyon değerlerinin arttığını buna karşın malzeme üzerindeki elektriksel direncin azaldığını ancak malzemenin yenilme noktasından sonra elektriksel direnç değerlerinin arttığı belirlemişlerdir.

Şekil 2. 12 Şekil 2. 12'te görüldüğü üzere malzemenin yenilmesi elektriksel direnç ölçümleriyle belirlenebileceğini ortaya koymuşlardır.

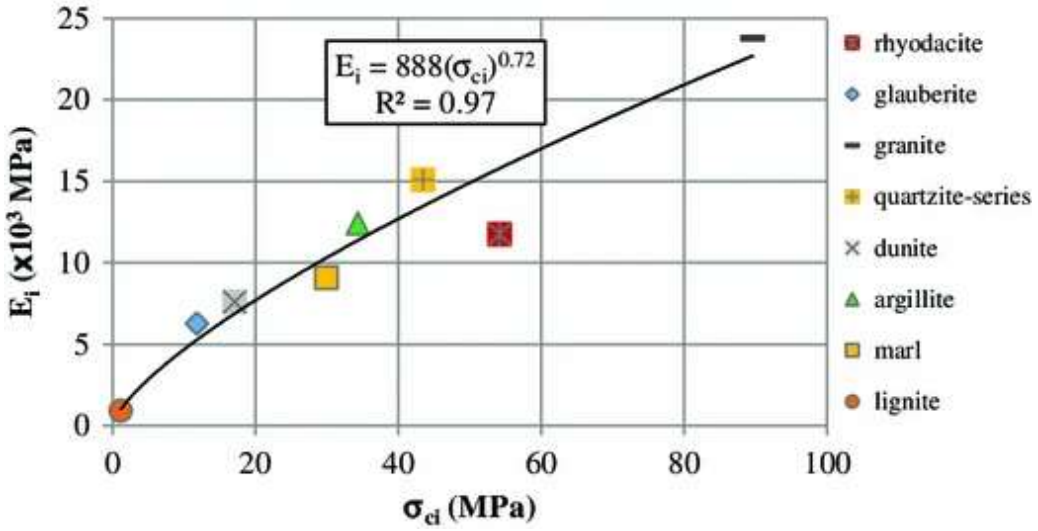


Şekil 2. 122. Gerilme-Birim deformasyon-Elektriksel direnç davranışı (Mesutoğlu ve Özkan, 2014)

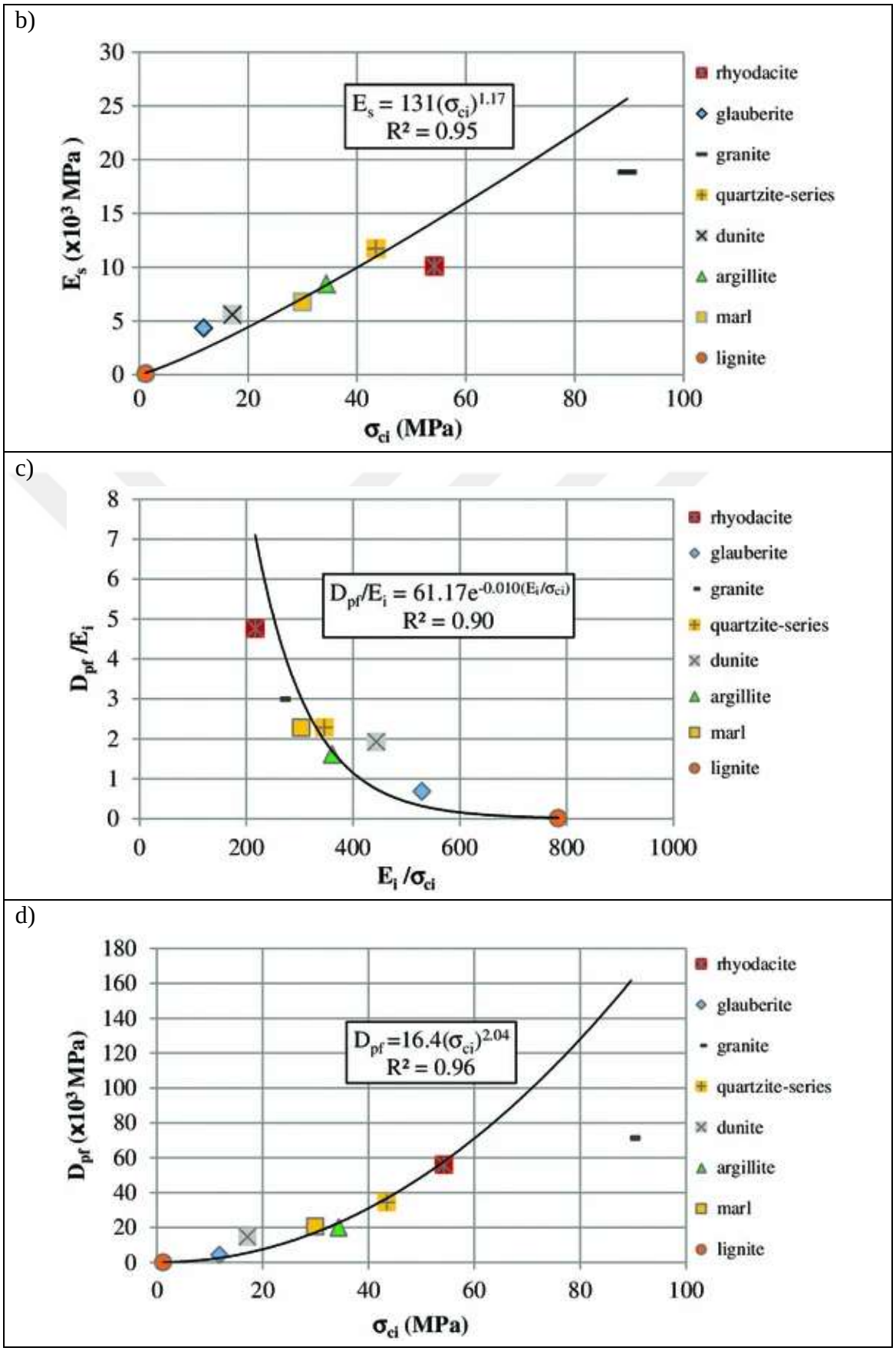
Yavuz ve diğ. (2014), kaya malzemesinin dinamik yükler altında mekanik davranışını bir kireçtaşından alınan 7 adet numuneyi ayrık Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) yöntemi ile test ederek incelemişlerdir. Birim zamandaki gerilme artışının yüksek mukavemete sahip numunelerde fazla, düşük mukavemete sahip numunelerde düşük olduğu belirlenmiştir. Mukavemeti yüksek olan malzemelerde oluşan elastik deformasyonlar zayıf malzemedekilere göre fazla olduğundan, birim deformasyon oluşum süresinde de zayıf malzemelere göre artış gözlemlenmiştir. Numunelerde oluşan birim deformasyonun artış hızıyla elastisite modülü arasında ilişki olup olmadığı incelenmiş ve elastisite modülünün büyük ölçüde birim deformasyon hızına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı koşullar altında daha hızlı şekil değiştiren malzemelerin elastisite modüllerinin düşük değerler aldığı ortaya çıkmıştır. Deneyde kullanılan kireçtaşının dinamik basınç dayanımı ile statik dayanımını arasındaki oranın 2.5 olduğunu tespit etmişlerdir.

Tutluoğlu ve diğ. (2015), kaya malzemesinin kırılma öncesi ve kırılma sonrası mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek için 8 farklı kökenli kaya malzemesi üzerinde 73 tane gerilme-birim deformasyon deneyi yapmışlar ve kaya malzemesinin tek eksenli basma dayanımı σ_{ci} arttıkça gevşeme modülünü(drop modulus) D_{pf} ,tanjant modülü E_i ve sekant modülünün E_s arttığını ve E_i/σ_{ci} oranı azaldıkça üstsel bir eğilimle D_{pf}/E_s oranının arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2. 13.).

a)

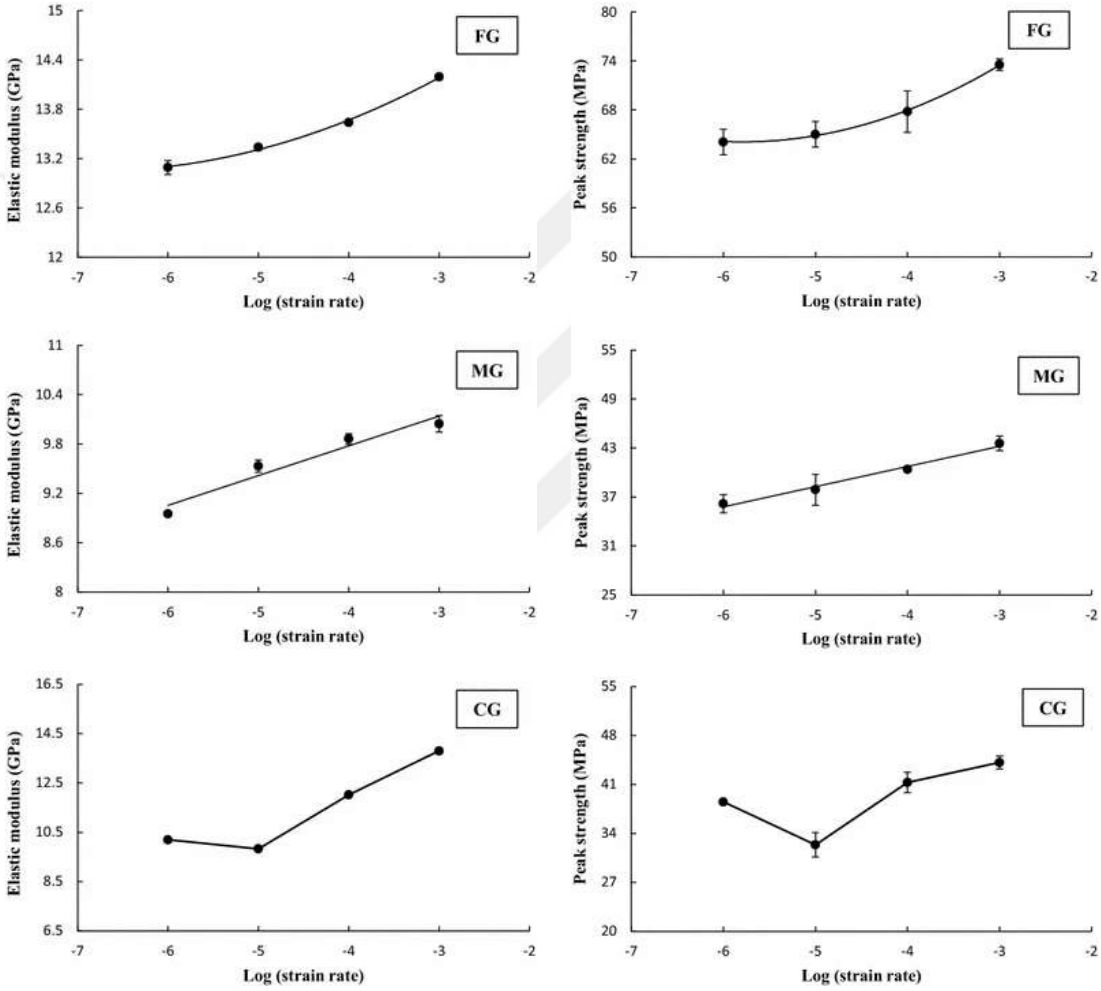


Şekil 2. 13 (Devam)



Şekil 2. 133. a) E_i -σ_{ci} grafiği b) E_s -σ_{ci} grafiği c) D_{pf} -σ_{ci} grafiği d) D_{pf} / E_s- E_i /σ_{ci} grafiği (Tutluoğlu ve diğ., 2015)

Wasantha ve diğ. (2015), farklı tane boyutuna sahip kumtaşlarının [105,4 µm (ince taneli), 228 µm (orta taneli) ve 321 µm (iri taneli)], 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4} ve10^{-3} s^{-1} birim deformasyon hızlarında, tane boyutunun ve birim deformasyon hızının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlar. Artan deformasyon hızı ile birlikte orta taneli kumtaşında lineer, ince taneli kumtaşında lineer olmayan, iri tanelide ise sistematik olmayan bir mukavemet artışı gözlemlemişlerdir. Üç tip kumtaşı için elastik modülü ile birim deformasyon hızı arasındaki ilişkiler benzer eğilimler göstermiştir (Şekil 2. 14).



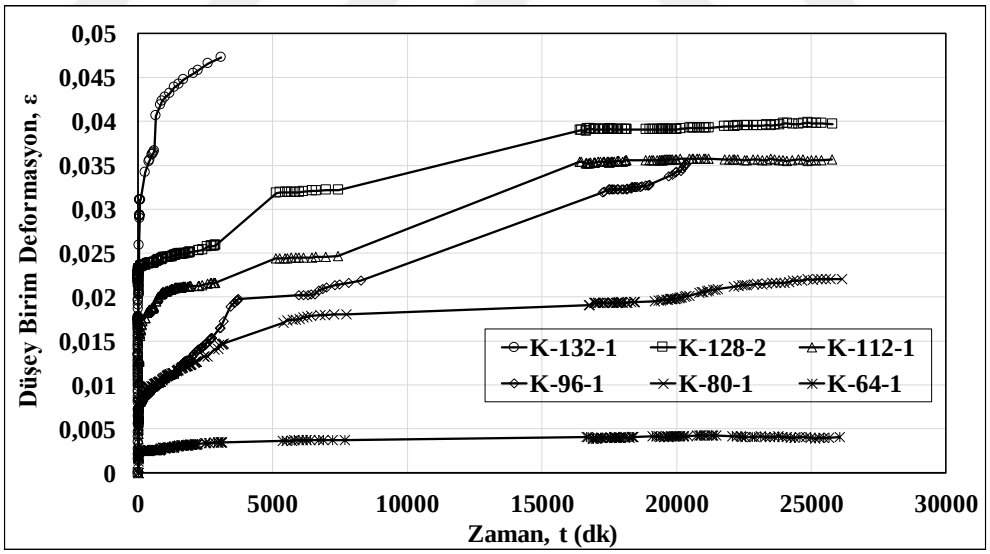
Şekil 2. 144. Üç tip kumtaşı için birim deformasyon hızı ile maksimum mukavemet ve elastik modülü arasındaki ilişki (Wasantha ve diğ., 2015)

Yang ve diğ. (2018), akustik özelliklerdeki değişiklikleri izleyerek kömürün sünme davranışının deneysel olarak incelemişler ve şu sonuçları elde etmişlerdir;

- Kömürün homojen olmaması, sünme birim deformasyon hızları verilerinin elde edilmesinde ciddi düzensizliklere yol açtığından geleneksel birim deformasyon-zaman deneylerinin yetersiz kaldığını görmüşler.

- Sünme sıkıştırması altındaki numunelerin mekanik tepkisi, sıkıştırma ve çatlama arasındaki rekabetin sonucudur. Çatlama yapıyı bozar ve ultrasonik zayıflamayı arttırırken, sıkıştırma eksenel eksen boyunca yoğunlaşmaya neden olur ve zayıflamayı azaltır.
- Kısa süreli sünme yükleme aşamasında dikey çatlaklar oluşur ve numuneyi ayrılmış kolonlardan oluşan bir yapıya dönüştürür. Kömürün daha fazla bozulması, tek tek kolonların çekme ve kesme yenilmesi olasılığını artırır ve bu durum zaten kırılgan olan bir yapının şiddetli çöküşünü tetikleyebilir.

Özkan ve diğ. (2022) tarafından Kars-Kağızman kaya tuzunun uzun dönemli tek eksenli sünme (creep) davranışını belirlemek üzere bir seri deneysel kaya mekaniği çalışması gerçekleştirmiştir. Bu deneysel çalışmalar sonucunda belirlenen zaman-düşey birim deformasyon davranışları Şekil 2.15'te sunulmuştur. Sunulan grafikten görüldüğü üzere sünme deneylerinde uygulanan sabit yük değeri azaldıkça birim deformasyon değerleri zaman içinde sabitleşmektedir (K-64-1). Buna karşılık K-132-1 örneğinde olduğu gibi 132 kN sabit yük değerinde malzeme hızla deformasyona uğramıştır.



Şekil 2.15. Farklı sabit gerilme altındaki örneklere ait düşey birim deformasyon sünme davranışı (Özkan ve diğ , 2022)

Bu çalışmada Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlara ait sünme davranışlarının modellenmesinde Aydan (2016) tarafından önerilen Eşitlik 2.1'in kullanılmasına karar verilmiştir. Önerilen modelin (Aydan, 2016)

uygulanması için SPSS (Statistical Package for the Social Sciences - Sosyal Bilimler İçin İstatistik Programı, 2016) istatistiksel programından yararlanılmıştır.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + A(1-e^{-t/\tau 1}) + B(e^{t/\tau 2}- 1) \quad (2.1)$$

Eşitlikte verilen t zamandır. A, B, ε0, τ1, τ2 ise istatistiksel sabittir. ε0 ilk oluşan birim deformasyon olup A, B, τ1 ve τ2 sünme deneyinde uygulanan sabit gerilme seviyesine bağlı birer katsayıdır. İstatistiksel analizlerde zamana bağlı düşey birim deformasyon verileri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen istatistiksel analiz sonuçları topluca Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Zamana bağlı düşey birim deformasyon ait sünme deney sonuçlarının Eşitlik 2.1 ile modellenmesi (Özkan ve diğ. 2022)

Örnek No	İstatistiksel katsayılar ve başarı derecesi					
	ε_0	A	τ_1	B	τ_2	R^2
K-64-1	0.002	0.002	2000	0.0001	$20\ 10^3$	0.919
K-80-1	0.007	0.009	2246	0.004	$30\ 10^3$	0.982
K-96-1	0.007	0.011	2692	0.018	$30\ 10^3$	0.992
K-112-1	0.006	0.014	66.998	0.069	$10\ 10^4$	0.975
K-128-2	0.022	0.022	10000	0.0001	$20\ 10^3$	0.954
K-132-1	0.010	0.023	34.20	0.175	$30\ 10^3$	0.932

Aydan (2016) tarafından önerilen matematiksel modelin istatistiksel başarısının yüksek R^2 (R^2>0.9) değerlerinde olduğu görülmektedir. Eşitlik 2.1'de sunulan sünme modelinde yer alan istatistiksel katsayılar SPSS analizleri ile belirlenmiştir. Model zaman haricinde kaya tuzuna ait mekanik özellikleri (σ_c, E gibi) ve örnek üzerinde oluşturulan sabit gerilme (σ_s) değerini içermemektedir. Bu durum, önerilen eşitliğin sadece zaman (t) ve birim deformasyon (ε) deneysel verisi olan sünme sonuçlarının modellenmesinde oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Kaya mühendislik yapılarının tahkimat tasarım çalışmalarında kullanılan kaya malzeme ve kütle mühendislik özelliklerinin belirlenmesine yönelik önerilen deney yöntemlerinde (ISRM ve ASTM) zaman etkisi dikkate alınmamaktadır. Ancak yeraltı ve yerüstü maden ocaklarında yapılan ölçüm, gözlem ve incelemelerde kaya malzeme ve kütlesinin bilinen dayanım değerlerinin altındaki bir değerde bile kaya malzemesinin pekleşme süreci sonrasında yenildiği ve duraysızlıkların olduğu gözlenebilmektedir (Ünlü ve Reddish, 1994; Ünal ve diğ. 2001; Özşen ve diğ. 2019; Liu ve diğ. 2020).

Ünlü ve Reddish (1994) ve Liu ve diğ. (2020) kömür madenciliğinde topukların davranışlarını yerinde ölçümlerle izlemişler ve topuk duraylılığına zamanın etkisini

vurgulamışlardır. Benzer şekilde Özşen ve diğ. (2019) oniki farklı açık ocak kömür maden şevinde şev deformasyonlarını topoğrafik, inklonometre ve ekstansometre ile izlemişler, şev duraylılığı üzerinde kaya malzeme özellikleri ve zaman etkisini incelemişlerdir. Ayrıca Ünal ve diğ. (2001) uzunayak kömür madenciliğinde uzunayak kazı çalışmalarının oluşturduğu dinamik yüklerin tabanyolu tahkimat sistemine etkisinin konverjans ölçümleriyle izlemişler, galeri tavanındaki tabakaların zaman içersindeki davranışını farklı tahkimat türlerinde analiz etmişlerdir. Saha ölçümlerine dayalı benzer yayınların oldukça sık bir şekilde yapıldığı görülmektedir. Burada tipik örnek olarak verilen yayınların (Ünlü ve Reddish, 1994; Ünal ve diğ. 2001; Özşen ve diğ. 2019; Liu ve diğ. 2020) ortak özelliği sahada gerçekleştirilen deformasyon ölçümlerinin zaman içerisindeki değişimini ve kaya mühendislik yapısı (topuk galeri şev gibi) üzerindeki duraylılık etkisini konu edinmişlerdir. Kaya mühendislik yapılarına ait tasarım çalışmalarında kullanılan deney sonuçları, uzun dönemde beklenen duraylılıkları sağlayamadığı görülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında aşağıdaki altı aşama izlenmiştir. Bunlar sırasıyla;

- Model kaya malzemesinin belirlenmesi,
- Model blok kaya malzemelerinin temini,
- Model kaya bloklarından karot örneklerinin hazırlanması,
- Karot örnekleri üzerinde kaya mekaniği deneysel çalışmaları (Temel kaya mekaniği ve araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri),
- Elde edilen verilere dayalı matematiksel bir modelin geliştirilmesi,

3.1. Deneysel Çalışmalar için Model Örnek Tespiti ve Temini

3.1.1. Model kaya malzemesinin belirlenmesi

Bu tez çalışmasında kullanılacak kaya malzemesinin homojen olması ve kaya dokusunda yapısal bozuklukların olmaması hedeflenmiştir. Ülkemizde üretilen farklı yapıtaşı kaya malzemeleri üzerinde diğer araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan TEBD deney sonuçları derlenmiştir.

Çizelge 3. 1. Literatür taramasıyla belirlenen farklı yörelere ait mermer kaya malzemelerinin tek eksenli basma dayanımı sonuçları

No	Mermer Türü	TEBD, MPa	Kaynak	No	Mermer Türü	TEBD, MPa	Kaynak
1	Afyon Ayazini Tüf	14	Engin (2006)	61	Diyarbakır Hani	72	Çıra (2014)
2	Uşak Küfeki Taşı	15	Engin (2006)	62	Muğla Kristal Beyaz	73	Engin (2006)
3	Pembe Tüf (Nevşehir-Ürgüp)	21	Gündoğdu (2008)	63	Uşak Yeşil	75	Büyüksağiş (1998)
4	Sille Andezit	21	Karakaya (2018)	64	Isparta Bej Mermer	75	Dündar (2017)
5	Siyah Tüf (Nevşehir-Demirtaş)	26	Gündoğdu (2008)	65	Sivrihisar Bej	75	Atıcı (1999)
6	Kahverengi Tüf (Kayseri-İncesu)	29	Gündoğdu (2008)	66	Kırklareli (Vize)	76	Önder (1998)
7	Kırmızı Tüf (Nevşehir-Başdere)	29	Gündoğdu (2008)	67	Çankırı Kahverengi	76	Özbek (2008)
8	Seydişehir Traverten	29	Dündar (2017)	68	Sivrihisar Bej	77	Güneş (2005)
9	Sarı Tüf (Kayseri-Talas)	30	Gündoğdu (2008)	69	Bursa Karacabey Siyah	78	Atıcı (1999)
10	Karaman Traverten-1	30	Dündar (2017)	70	Marmara Beyaz	78	Yavuz (1996)
11	Manyas Beyazı	33	Yavuz (1996)	71	K.Maraş Göksun	78	Çıra (2014)
12	Denizli Traverten	36	Engin (2006)	72	Afyon Şeker	79	Güneş (2005)
13	Ankara Andezit (Hüseyingazi)	36	Özdoğan (1991)	73	Akşehir Siyah	79	Atıcı (1999)
14	Manyas Beyazı	39	Büyüksağiş (1998)	74	Afyon Beyaz	80	Engin (2006)
15	Ankara Andezit (Yenimahalle)	41	Özdoğan (1991)	75	Elazığ Vişne	81	Güneş (2005)
16	Manyas Beyazı	41	Atıcı (1999)	76	Afyon Menekşe	81	Engin (2006)

17	Muğla Kozağaç Beyaz	42	Özçelik (1999)	77	Afyon Gri	82	Engin (2006)
18	Karaisalı Bej	42	Tutuş (2007)	78	K.Maraş Afşin	84	Çıra (2014)
19	Mut Traverten	42	Dündar (2017)	79	Korkuteli Krem	84	Kubat (2020)
20	Karaman Traverten-2	42	Dündar (2017)	80	Akşehir Siyah	85	Engin (2006)
21	Ankara Andezit (Keçiören)	42	Özdoğan (1991)	81	Kütahya Menekşe	87	Büyüksağiş (1998)
22	Antalya Finike Limra	43	Güneş (2005)	82	Muğla Milas Leylak	87	Güneş (2005)
23	Antalya Finike Limra	48	Bilici (2019)	83	Muğla Milas Limon	88	Engin (2006)
24	Uşak Grili	50	Büyüksağiş (1998)	84	Afyon Bal	89	Engin (2006)
25	Afyon Gök	50	Görgülü (1998)	85	Sivrihisar Pembe	89	Atıcı (1999)
26	Denizli Kaklık Traverten	51	Kuşcu ve Demiray (2015)	86	Isparta-Sütçüler	90	Özgül (2010)
27	Ege Bordo	51	Atıcı (1999)	87	Tokat Zile Bej	92	Görgülü (1998)
28	Bilecik Akköy Bej	52	Görgülü (1998)	88	Eskişehir Süpren	95	Engin (2006)
29	Tarsus Bej	52	Tutuş (2007)	89	Uşak Beyaz	98	Engin (2006)
30	Muğla Beyaz	53	Büyüksağiş (1998)	90	Elazığ Vişne	98	Engin (2006)
31	Osmaniye Vişne Çürüğü	54	Tutuş (2007)	91	Burdur-Karamanlı	99	Görgülü (1994)
32	Kozan Bej	54	Tutuş (2007)	92	Sivrihisar Beyaz Mermer	99	Dündar (2017)
33	Afyon Çizgili Şeker	54	Büyüksağiş (1998)	93	Bilecik	100	Atıcı (1999)
34	Muğla Milas Leylak	55	Özçelik (1999)	94	Burdur Kahve	100	Atıcı (1999)
35	Gri Tüf (Nevşehir-Başdere)	55	Gündoğdu (2008)	95	Elazığ Vişne	100	Atıcı (1999)
36	Karaman Traverten-3	57	Dündar (2017)	96	Eskişehir Leopar	100	Atıcı (1999)
37	Ankara Bazalt	60	Karakaya (2018)	97	Muğla Menekşe	100	Atıcı (1999)
38	Muğla Beyaz	61	Görgülü (1998)	98	Alanya Siyah Mermer	100	Dündar (2017)
39	Adıyaman Kahta	62	Çıra (2014)	99	İzmir Ak Bej	102	Hacımustafaoğlu (1999)
40	Afyon Kaplan Postu	63	Büyüksağiş (1998)	100	Isparta Fonolitik	103	Güneş (2005)
41	Afyon Kaplan Postu	64	Atıcı (1999)	101	Muğla Milas Sedef	104	Engin (2006)
42	Elazığ Siyah	64	Güneş (2005)	102	Bilecik Bej	106	Yavuz (1996)
43	Afyon Kaymak	64	Özçelik (1999)	103	Korkuteli Ottoman	106	Kubat (2020)
44	Mustafa Kemal Paşa Bursa	65	Önder (1998)	104	Isparta Kadılar	107	Aksoy (2018)
45	Bozkır Bej Mermer	65	Dündar (2017)	105	Elazığ Hazar Traverten	110	Engin (2006)
46	Muğla Grili	65	Güneş (2005)	106	Marmara	112	Önder (1998)
47	Bursa Mustafa Kema lPaşa	66	Atıcı (1999)	107	Sivas Geynik	112	Görgülü (1994)
48	Afyon Şeker	66	Görgülü (1998)	108	Burdur Çaltepe	113	Özsan (2006)
49	Eskişehir Süpren	67	Atıcı (1999)	109	Afyon Gri Mermer	114	Dündar (2017)
50	Sivas Yıldız Siyah	68	Görgülü (1998)	110	Isparta-Büyük Gökçeli	121	Görgülü (1994)
51	Ankara Andezit (Solfasol)	68	Özdoğan (1991)	111	Ankara Andezit (Çubuk)	122	Özdoğan (1991)
52	Afyon Beyazı	69	Atıcı (1999)	112	İzmir Antik Bej	126	Hacımustafaoğlu (1999)
53	Uşak Beyaz	69	Özçelik (1999)	113	İzmir Ege Vişne	128	Hacımustafaoğlu (1999)
54	Marmara Beyaz	69	Atıcı (1999)	114	Bilecik Bej	130	Engin (2006)
55	Afyon Beyazı	70	Yavuz (1996)	115	İzmir Gülü	136	Hacımustafaoğlu (1999)
56	Yeşilova Bej	70	Özçelik (1999)	116	Amasya Bej	141	Engin (2006)
57	Sivrihisar	70	Özçelik (1999)	117	Gemlik Diyabez	158	Yavuz (1996)
58	Muğla Beyaz	70	Engin (2006)	118	Marmara Dolomitik	158	Engin (2006)
59	Manisa Akhisar Oniks	70	Engin (2006)	119	Alanya Koyu Füme	165	Yazıcı (2020)
60	Ege Bordo	72	Yavuz (1996)	120	Marmara Dolomitik	204	Önder (1998)

Bu tez çalışmasında homojen bir doku yapısına sahip içerisinde mikro düzeyde çatlak gibi jeolojik bozuklukların bulunmadığı model kaya birimlerinin seçimi planlanmıştır. Bunun yanında dayanımlarınında 0-100 MPa aralığında dağılım göstermesi istenmiştir. Bu çerçevede yapılan değerlendirmeler ışığında belirlenen doğal kaya malzemelerine DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4, DKM-5 tanımı yapılmıştır. Bu malzemelerin DKM-1, DKM-2, DKM-5 mağmatik kökenli diğerleri ise metamorfik kökenli olmuştur. Bu tez çalışmasına ayrıca olabildiğince homojen yapay kaya malzemelerinin hazırlanması hedeflenmiştir. Buradaki gaye tüm jeolojik bozukluklardan uzak hakem niteliği taşıyan model kaya malzemelerinin hazırlanması olmuştur. Bu çerçevede 0-100 MPa aralığında dağılım gösteren YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4, YKM-5 isimli beton yapay malzemeleri hazırlanmıştır.

Çizelge 3. 1'de sunulan TEBD değerleri dikkate alınarak kullanılacak model kaya malzemeleri belirlenmiştir. Dayanım aralıklarının sırasıyla 0-20 MPa, 20-40 MPa, 40-60 MPa, 60-80 MPa ve 80-100 MPa olması planlanmıştır. Sonuç olarak bu tez çalışmasında planlanan dayanım aralıklarına giren doğal yapıtaşlarının (DKM) kullanılmasına karar verilmiştir. Bu tez çalışmasında ayrıca agrega, çimento, su ve kimyasal katkı malzemelerinin farklı oranlarda bileşimi ile sırasıyla 0-20 MPa, 20-40 MPa, 40-60 MPa, 60-80 MPa ve 80-100 MPa dayanıma sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) hazırlanması hedeflenmiştir.

3.1.2. Model kaya malzemesinin temini

Doğal ve yapay model kaya malzemesi için temin edilmesi planlanan örnek adetleri ve temin yeri Çizelge 3. 2 ve Çizelge 3. 3'te sunulmuştur. Yapay malzemeler için özel bir firmadan teknik destek alınmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3. 2 ve Çizelge 3. 3'te görüldüğü üzere farklı dayanımlara sahip 35 adet blok doğal kaya malzemesi (DKM) ve 90 adet silindir yapay kaya malzemesi (YKM) temin edilmiştir.

Çizelge 3. 2. Tez çalışmasında kullanılan model doğal kaya malzemesine (DKM) ait örnek bilgileri

Sıra No	Dayanım Aralığı, TEBD (MPa)	Küp Blok Boyutu (cm X cm X cm)	Blok Adedi	Temin Edilen Yapıtaşı	Doğal Kaya Malzemelerinin Kökenlerine Göre Jeolojik Sınıfı
DKM-1	0-20	Düzensiz Boyutlarda	2	Konya-Hatunsaray Tüf Kaya Birimi	Mağmatik (Igneous)
DKM-2	20-40	Düzensiz Boyutlarda	18	Konya-Sille Andezit Kaya Birimi	Mağmatik (Igneous)
DKM-3	40-60	30 X 30 X 30	5	Karaman Traverten Kaya Birimi	Metamorfik (Metamorphic)
DKM-4	60-80	30 X 30 X 30	5	Marmara Adası Marmara Mermer Kaya Birimi	Metamorfik (Metamorphic)
DKM-5	80-100	10 X 15 X 50	5	Kayseri Bazalt Kaya Birimi	Mağmatik (Igneous)
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			35 Adet		

Çizelge 3. 3. Tez çalışmasında kullanılan model yapay kaya malzemesine (YKM) ait silindir örnek bilgileri

Sıra No	Dayanım Aralığı, TEBD (MPa)	Silindir Örnek Boyutları	Silindir Örnek Adedi	Temin Edilen Yapıtaşı
YKM-1	0-20	D = 10 cm H = 20 cm Silindir Örnek	18	Konya Çimento Fabrikası kuruluşu olan Konya Hazır Beton biriminin teknik desteği ile Konya Hazır Beton Numune Hazırlama Laboratuvarında örnekler hazırlanmıştır.
YKM-2	20-40		18	
YKM-3	40-60		18	
YKM-4	60-80		18	
YKM-5	80-100		18	
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			90 Adet	

3.1.3. Model kaya bloklarından karot örneklerinin hazırlanması

Bu tez çalışmasında, ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda doğal kaya malzeme (DKM) bloklarından 54 ve 100 mm çaplı karot örnekleri bölüm laboratuvarında alınmasına karar verilmiştir. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için karot özelliği taşıyan hazır silindir örnekler hazırlanmıştır (D=10cm, L=20cm, L/D=2). Deneyler için hazırlanan örneklerin boyutları ve adetleri gerçekleştirilecek deneyler bazında Çizelge 3.4 – Çizelge 3.9 arasında sunulmuştur. Çizelge 3.4 ve 3.5'te temel kaya mekaniği deneylerine ait, Çizelge 3.6 ve 3.7'de araştırma amaçlı gerilme-hız-kontrollü (MPa/dk) (stress-rate-controlled) servo hidrolik pres ile gerçekleştirilecek kaya mekaniği deneylerine ait ve Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9'da araştırma amaçlı sabit-gerilme-kontrollü-

sünme (MPa) (constant-stress-controlled-creep) servo hidrolik pres ile gerçekleştirilecek sünme deneylerine ait karot örnekleri açıklanmaktadır. Temel kaya mekaniği deneyleri için toplam 40 adet (Çizelge 3.4 ve 3.5), araştırma amaçlı gerilme kontrollü kaya mekaniği deneyleri için toplam 100 adet (Çizelge 3.6 ve 3.7) ve araştırma amaçlı creep sünme deneyleri için toplam 100 adet (Çizelge 3.8 ve 3.9) karot örneği hazırlanmıştır.

Sunulan çizelgelerin (Çizelge 3.4- Çizelge 3.9) son iki sütunda görülen kısaltmalar ve semboller takip eden başlıklarda ifade edilmiştir. Tez çalışmaları için doğal model kaya malzemelerine ait örneklerin hazırlanmasına ait tipik bir görünüm Şekil 3.1'de sunulmuştur. Ayrıca yapay model kaya malzemesine (beton) ait örnekler Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 4. Doğal kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilecek temel kaya mekaniği deneyleri

Örnek Tanımı	Planlanan Dayanım Değeri (MPa)	Örnek Adı	Adet Karot	D (mm)	L/D ve t/D	Uygulanan Test Türü	Hedeflenen Sonuç
Doğal	0-20	DKM-1	5	54	2.5 ve 0.5, Düzensiz parça örnekler	Temel Kaya Mekaniği Deneyleri	σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Doğal	20-40	DKM-2	5				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Doğal	40-60	DKM-3	5				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Doğal	60-80	DKM-4	5				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Doğal	80-100	DKM-5	5				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			25				

Çizelge 3. 5. Yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilecek temel kaya mekaniği deneyleri

Örnek Tanımı	Planlanan Dayanım Değeri (MPa)	Örnek Adı	Adet Karot	D (mm)	L/D ve t/D	Uygulanan Test Türü	Hedeflenen Sonuç
Yapay	0-20	YKM-1	3	100	2.0 ve 0.5 Düzensiz parça örnekler	Temel Kaya Mekaniği Deneyleri	σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Yapay	20-40	YKM-2	3				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Yapay	40-60	YKM-3	3				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Yapay	60-80	YKM-4	3				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
Yapay	80-100	YKM-5	3				σ_c, σ_{tB}, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$, $E_{i\text{-}DÇ}$, υ, I_{d2}, $I_{s(50),}$ N, γ, c, ϕ
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			15				

Çizelge 3. 6. Doğal kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilecek araştırma amaçlı gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) kaya mekaniği deneyleri (Servo kontrollü hidrolik pres)

Örnek Tanımı	Planlanan Dayanım Değeri (MPa)	Örnek Adı	Adet Karot	D (mm)	L/D ve t/D	Uygulanan Test Türü	Hedeflenen Sonuç
Doğal	0-20	DKM-1	10	54	2.5 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri TEB-DEF, DÇ-DEF	σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Doğal	20-40	DKM-2	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Doğal	40-60	DKM-3	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Doğal	60-80	DKM-4	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Doğal	80-100	DKM-5	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			50				

Çizelge 3. 7. Yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilecek araştırma amaçlı gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) kaya mekaniği deneyleri (Servo kontrollü hidrolik pres)

Örnek Tanımı	Planlanan Dayanım Değeri (MPa)	Örnek Adı	Adet Karot	D (mm)	L/D ve t/D	Uygulanan Test Türü	Hedeflenen Sonuç
Yapay	0-20	YKM-1	10	100	2.0 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri TEB-DEF, DÇ-DEF	σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Yapay	20-40	YKM-2	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Yapay	40-60	YKM-3	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Yapay	60-80	YKM-4	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
Yapay	80-100	YKM-5	10				σ_c', σ_{tB}', $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$, υ', c', ϕ', $(\sigma_{c\text{-}k})'$, $(\sigma_{tB\text{-}k})'$
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			50				

Çizelge 3. 8. Doğal kaya malzemeler (DKM) üzerinde gerçekleştirilecek araştırma amaçlı sabit-gerilme-kontrollü-sünme (MPa) (constant-stress-controlled-creep) kaya mekaniği deneyleri (Servo kontrollü hidrolik pres)

Örnek Tanım 1	Planlanan Sabit Gerilme Değeri (MPa)	Örnek Adı	Adet Karot	D (mm)	L/D ve t/D	Uygulanan Test Türü	Hedeflenen Sonuç
Doğal	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	DKM-1 0-20 MPa Aralığı	1+1	100	2.5 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S-DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Doğal	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Doğal	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Doğal	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Doğal	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Doğal	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	DKM-2	1+1	100	2.5 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$,
Doğal	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Doğal	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				

Doğal	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$	20-40 MPa Aralığı	1+1			Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Doğal	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Doğal	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	DKM-3 40-60 MPa Aralığı	1+1	100	2.5 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Doğal	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Doğal	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Doğal	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Doğal	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Doğal	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	DKM-4 60-80 MPa Aralığı	1+1	100	2.5 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Doğal	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Doğal	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Doğal	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Doğal	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Doğal	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	DKM-5 80-100 MPa Aralığı	1+1	100	2.5 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Doğal	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Doğal	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Doğal	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Doğal	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
TOPLAM ÖRNEK ADETİ			25 adet S-TEB + 25 adet (S-DÇ)				

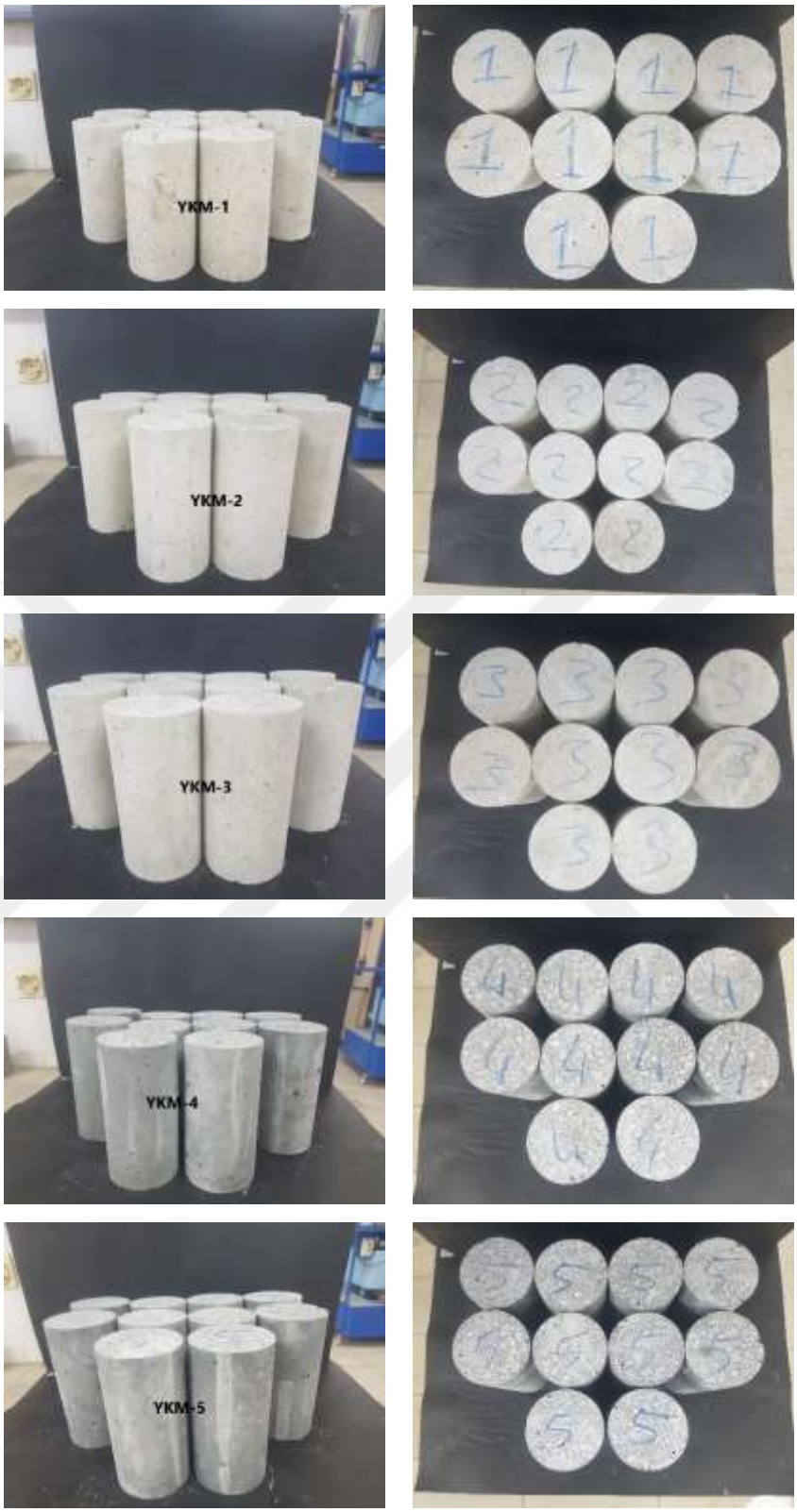
Çizelge 3. 9. Yapay kaya malzemeler (YKM) üzerinde gerçekleştirilecek araştırma amaçlı sabit-gerilme-kontrollü-sünme (MPa) (constant-sress-controlled-creep) kaya mekaniği deneyleri (Servo kontrollü hidrolik pres)

Örnek Tanım ı	Planlanan Sabit Gerilme Değeri (MPa)	Örnek Adı	Adet Karot	D (mm)	L/D ve t/D	Uygulanan Test Türü	Hedeflenen Sonuç
Yapay	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	YKM-1 0-20 MPa Aralığı	1+1	100	2.0 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Yapay	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Yapay	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Yapay	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Yapay	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Yapay	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	YKM-2 20-40 MPa Aralığı	1+1	100	2.0 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Yapay	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Yapay	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Yapay	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Yapay	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Yapay	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	YKM-3 40-60 MPa Aralığı	1+1	100	2.0 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Yapay	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Yapay	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Yapay	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Yapay	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Yapay	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	YKM-4	1+1	100	2.0 ve 0.5	Araştırma Amaçlı	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$,
Yapay	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				

Yapay	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$	60-80 MPa Aralığı	1+1			Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Yapay	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Yapay	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
Yapay	$\sigma 90 = \sigma_c * 0.90$	YKM-5 80-100 MPa Aralığı	1+1	100	2.0 ve 0.5	Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri S-TEB, S- DÇ	$t_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $(\sigma_{c\text{-}k})''$, $(\sigma_{tB\text{-}k})''$, $(\varepsilon_k)''$
Yapay	$\sigma 80 = \sigma_c * 0.80$		1+1				
Yapay	$\sigma 70 = \sigma_c * 0.70$		1+1				
Yapay	$\sigma 60 = \sigma_c * 0.60$		1+1				
Yapay	$\sigma 50 = \sigma_c * 0.50$		1+1				
TOPLAM ÖRNEK ADET			25 adet S-TEB + 25 adet (S-DÇ)				



Şekil 3. 1. Model doğal kaya malzemeleri ve örnek hazırlama çalışmaları



Şekil 3. 2. Model yapay kaya malzemeleri

3.2. Karot Örnekleri Üzerinde Kaya Mekaniği Deneysel Çalışmaları

Bu tez çalışmasında seçilen model doğal ve yapay kaya malzemeleri üzerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen rutin kaya mekaniği deneyleri, takibinde ise araştırma amaçlı kaya mekaniği deneylerinin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneysel çalışması ise kendi içerisinde gerilme-hızı-kontrollü (stress-rate-controlled) kaya mekaniği deneyleri ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) kaya mekaniği deneyleri olmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

Model kaya malzemelerinin basma, çekme ve deformabilite davranışlarının belirlenmesi, bu tezin ilk ana hedefidir. Temel kaya mekaniği, zamana bağlı sünme ve gerilme kontrollü kaya mekaniği deneylerinden elde edilen veriler ile tasarım parametrelerinin mühendislik değerlerinin irdelenmesi ve sayısal modelleme çalışmaları bu tez çalışmasının ikinci hedefini oluşturmuştur. Bu çerçevede planlanan deneysel çalışma programı Çizelge 3.10'da sunulmuştur. Planlanan deneysel yöntem ve ilgili gereçler detayları ile aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 3.10. Gerçekleştirilmesi hedeflenen kaya mekaniği deneyleri

Temel kaya mekaniği çalışmaları	**Araştırma amaçlı kaya mekaniği çalışmaları**
1. Tek eksenli gerilme altında tek eksenli basma dayanımı deneyleri (TEBD, σ_c) **2.** Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyleri (DÇD, σ_{tB}) **3.** Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite deneyleri (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$) **4.** Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}$) **5.** Yoğunluk (Y, γ) - Gözeneklilik (G) - Nem içeriği (N) belirleme deneyleri **6.** Nokta yükleme dayanımı deneyleri (NYD, $I_{s(50)}$) **7.** Suda dağılma dayanımı deneyleri (SDD, I_{d2}) **8.** Schmidt sertlik belirleme deneyleri (SCH, N)	Farklı gerilme hızlarında (Servo kontrollü hidrolik pres); **1.** Tek eksenli gerilme altında tek eksenli basma dayanımı deneyleri (TEBD, σ_c') **2.** Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyleri (DÇD, σ_{tB}') **3.** Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite deneyleri (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$) **4.** Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}'$)
	Farklı sabit gerilme altında (Servo kontrollü hidrolik pres); **1.** Tek eksenli basma-sünme (creep) deneyleri (S-TEB, t″, ε″) **2.** Dolaylı çekme-sünme (creep) deneyleri (S-DÇ, t″, ε″)

3.2.1. Temel kaya mekaniği deneyleri

Temel kaya mekaniği deneyleri çerçevesinde belirtilen ilk iki deney (basma ve çekme) bu tez çalışmasının temel verilerini teşkil edecek, diğer son dört deney ise kaya malzemesinin mekanik tanımlanmasına yardımcı olacaktır. Yoğunluk (Y, γ), nokta yükleme dayanımı (NYD, $I_{s(50)}$), Schmidt sertliği (SCH, N), suda dağılma dayanımı (SDD, I_{d2}) belirleme deneyleri Maden Mühendisliği bölüm laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c) ve dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) deneyleri yanında tek eksenli basma yönünde deformabilite (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$) ve Brazilian çekme (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}$) deformabilite deneyleri İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 90 ton kapasiteli servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4 ve 3.5). Bu deneyler için ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yöntemler dikkate alınmıştır (Çizelge 3.4 ve 3.5). Ulaşılan TEBD (σ_c) ve DÇD (σ_{tB}) deney sonuçları yardımıyla model malzemelerin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açı (ϕ) değerleri tespit edilmiştir.





a) Yoğunluk, gözeneklilik ve nem içeriği belirleme çalışmaları





b) Nokta yükleme dayanım indeks değerlerini belirleme deneyleri

Şekil 3.3 (Devam)





c) Schmidt sertlik değerlerini belirleme yönelik çalışmalar (L tipi Schmidt Hammer)





d) Suda dağılma dayanımını belirlemeye yönelik deneyler

Şekil 3.3. Doğal ve yapay model kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deneyleri




Şekil 3.4. Servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilen tek eksenli basma ve deformabilite deney düzeneği, ilgili tipik bir TEBD ve TEB-DEF deneyi.



Şekil 3.5. Servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilen dolaylı çekme dayanımı ve deformabilite deney düzeneği, ilgili tipik bir DÇD ve DÇ-DEF deneyi.

3.2.2. Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri

Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri için 900 kN kapasiteli, 10 N yükleme hassasiyetli, kontrollü yükleme-boşaltma ve yük altında bekletme özellikli, 1 mm/dk ile 20 mm/dk arası deformasyon kontrollü yükleme-boşaltma aralığında ve 10 Mpa/dk ile 20 Mpa/dk arasında yük kontrollü yükleme-boşaltma aralığına sahip servo kontrollü hidrolik press kullanılmıştır. Deney düzeneğinde servo kontrollü hidrolik pres, test edilen malzemedeki düşey yönde oluşan birim deformasyon ve gerilme değerlerini istenilen zaman aralıklarında kayıt edebilmektedir. Araştırma amaçlı deneylerde kullanılan deney düzeneğine ait tipik bir şekil Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.

Deneyler iki grupta gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında ikinci grup deneylerde farklı gerilme-hız-kontrollü (MPa/dk) (stress-rate-controlled) altında tek eksenli basma dayanımı (TEB-DEF, σ_c') ve dolaylı çekme dayanımı (DÇ-DEF, σ_{tB}') ile birim deformasyon ve gerilme davranışlarının ($E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$, $E_{i\text{-}DÇ}'$) belirlenmesi amaçlanmıştır. Hazırlanan örnekler (Çizelge 3.6 ve 3.7) kullanılarak ulaşılan TEBD (σ_c') ve DÇD (σ_{tB}') deney sonuçları yardımıyla model malzemelerin kohezyon (c') ve içsel sürtünme açı (ϕ') değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca pekleşme davranışına dayalı olarak her bir farklı dayanıma sahip model kaya malzemesi için zamana dayalı olarak yenilmenin gerçekleşmediği sınırdaki en düşük kritik tek eksenli basma ($(\sigma_{c\text{-}k})'$) ve Brazilian çekme dayanım ($(\sigma_{tB\text{-}k})'$) değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu pekleşme değerlerine ait kohezyon (c_k') ve içsel sürtünme açı (ϕ_k') değerleri tespit edilmiştir.

İkinci grupta öncelikle temel kaya mekaniği deney sürecinde her bir model kaya malzemesi için belirlenen TEBD (σ_c) ve DÇD (σ_{tB}) değerinin sırasıyla 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 katı belirlenerek bu değere karşılık gelen sabit yük değerleri yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) deneylerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Hazırlanan örneklerin (Çizelge 3.8 ve 3.9) tek eksenli basma-sünme (S-TEB) ve dolaylı çekme-sünme (S-DÇ) deneylerine tabi tutulması planlanmıştır. Deneyler esnasında zamana bağlı olarak oluşan düşey deformasyonlar servo kontrollü pres üzerinden (t'', ε'') ölçülmüştür. Deneysel çalışmalardan ilk önce zaman-birim deformasyon (t''-ε'') davranışlarının daha sonra pekleşme davranışlarının ortaya konması hedeflenmiştir (($\sigma_{c\text{-}k}$)$''$, ($\sigma_{tB\text{-}k}$)$''$, (ε_k)$''$). Ayrıca pekleşme değerlerine ait kohezyon (c_k') ve içsel sürtünme açı (ϕ_k') değerleri tespit edilmiştir.

İki farklı deneysel yöntem ile gerçekleştirilen araştırma amaçlı kaya mekaniği sonuçları ile bir genelleştirme yapılmıştır. Örneğin servo kontrollü deney yardımıyla belirlenen kritik TEBD (($\sigma_{c\text{-}k}$)$'$) ile sünme (creep) deneylerinden belirlenen kritik TEBD (($\sigma_{c\text{-}k}$)$''$) genelleştirilerek $\sigma_{c(t)}$ ile sembolize edilmiştir. Benzer şekilde DÇD deneyleri için $\sigma_{tB(t)}$, deformabilite deneyleri için $E_{i(t)}$ ve $E_{d(t)}$, belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açıları için sırası ile $c_{(t)}$ ve $\phi_{(t)}$ sembolleri kullanılmıştır.

Sonuç olarak, araştırma amaçlı hedeflenen farklı iki deney sonucunun öncelikle birbirleri ile karşılaştırılması, pekleşme davranışlarının örtüştüğünün belirlenmesi, rutin temel kaya mekaniği sonuçları ile karşılaştırılması ve sayısal analizler ile değerlendirilmesi bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

3.3. Elde Edilen Verilere Dayalı Matematiksel Bir Modelin Geliştirilmesi

Kaya mühendislik yapılarının tahkimat ve duraylılık analizlerinde günümüzde kullanılan en yaygın sayısal çözümleme programlarında dikkate alınan kaya mekaniği parametreleri sırası ile σ_c, σ_{tB}, E_i, υ, c, ϕ olmaktadır. Yukarıda özetlenen çalışmalar ile zaman etkisinde kalan pekleşmeye dayalı $\sigma_c(t)$, $\sigma_{tB}(t)$, $E_i(t)$, $\upsilon(t)$, c(t), $\phi(t)$ kritik değerleri bulunabilmektedir.

ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda temel kaya mekaniği deneyleri ile belirlenen TEBD deney sonucunda σ_c için $\sigma_1=\sigma_c$ ve $\sigma_3=0$ kabul edilirse aynı zamanda DÇD deneyi σ_{tB} için $\sigma_1=0$ ve $\sigma_3=\sigma_{tB}$ kabul edilirse Mohr-Coulomb (M-C) yaklaşımına göre Mohr zarfı elde edilebilir. Benzer şekilde araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri ile belirlenen TEBD deney sonucunda $\sigma_c(t)$ için $\sigma_1=\sigma_c(t)$ ve $\sigma_3=0$ kabul edilirse ve yine

aynı zamanda DÇD deneyi $\sigma_{tB}(t)$ için $\sigma_1=0$ ve $\sigma_3=\sigma_{tB}(t)$ kabul edilirse Mohr-Coulomb (M-C) yaklaşımına göre Mohr zarfı elde edilebilecektir. Rutin kaya mekaniği sonuçları (σ_c, σ_{tB}) ile zamana bağlı belirlenen kritik pekleşmeye ait kaya mekaniği sonuçları ($\sigma_c(t)$, $\sigma_{tB}(t)$) yardımıyla belirlenen kohezyon (c, c(t)) ve içsel sürtünme değerleri (ϕ, $\phi(t)$) tipik olarak hazırlanan Şekil 3.6a'da sunulmuştur. Grafik üzerinde ifade edilen Mohr-Coulomb (M-C) zarflarının karşılaştırılması durumunda, zamana bağlı pekleşme davranışı sergilemiş kaya koşulu için kohezyon ve içsel sürtünme açılarının daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3.6a).

Şekil 3.6b'de görüldüğü üzere ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen temel kaya mekaniği deneyleri yardımıyla belirlenen yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerleri (E_i, E_d) ile zaman dayalı pekleşme davranışı sergileyen kaya durumu için geçerli olan elastik modül değerlerinin ($E_i(t)$, $E_d(t)$) farklı olduğu pekleşme durumu için elastik modül değerlerinin daha düşük olacağı öngörülmüştür.

Şekil 3.6'de belirtilen benzer çalışmalar ile tüm doğal model kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM) için Elastik modül [Ei, Ei(t) ve Ed, Ed(t)], Poisson Oranı (υ, $\upsilon(t)$), kohezyon (c, c(t)) ve içsel sürtünme açı (ϕ, $\phi(t)$) değerleri belirlenmiş ve istatistiksel analizler ile Eşitlik 3.1-3.9 arasında belirtilen matematiksel modeller geliştirilmeye çalışılmıştır.

Doğal ve yapay kaya malzemeleri için tek eksenli basma yönünde gerçekleştirilen deneyler ile aşağıdaki eşitliklerin belirlenmesine çalışılmıştır. Eşitliklerde verilen β_{a1}, β_{a2}, β_{a3} ve β_{a4} birer istatistiksel katsayıdır.

$$\sigma_c(t) = f\{ t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow \sigma_c(t) = \beta_{a1}\, \sigma_{ci} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon(t) = f\{ t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow \varepsilon(t) = \beta_{a2}\, \varepsilon_i \quad (3.2)$$

$$E_i(t) = f\{ t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow E_i(t) = \beta_{a3}\, E_i \quad (3.3)$$

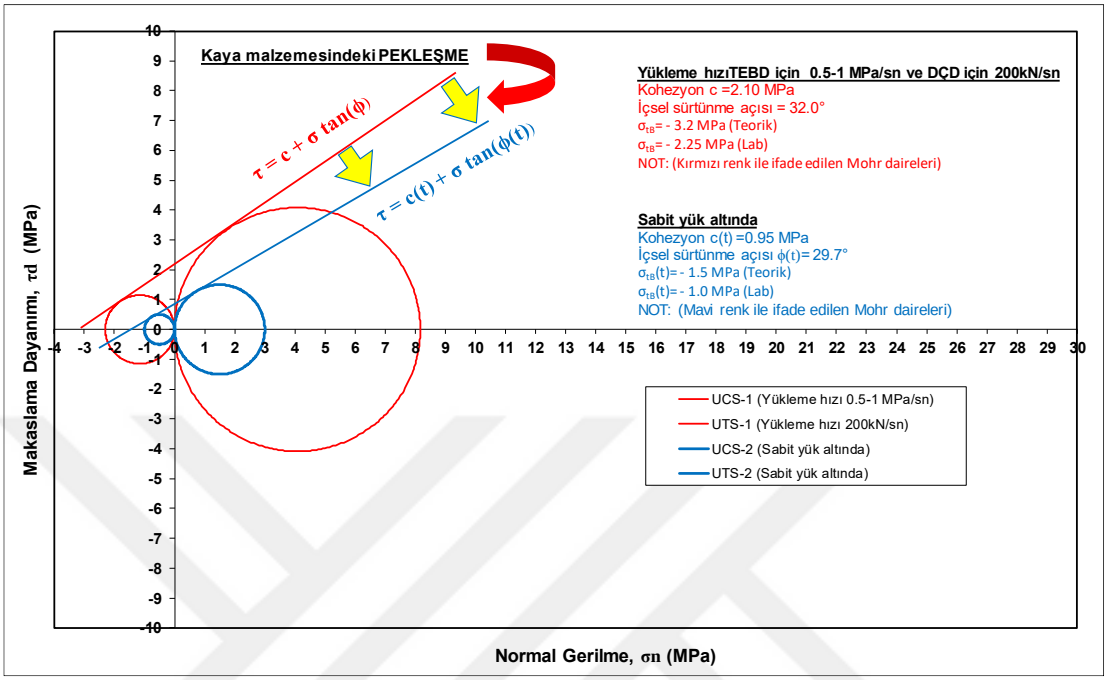
$$E_d(t) = f\{ \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow E_d(t) = \beta_{a4}\, E_d \quad (3.4)$$

Doğal ve yapay kaya malzemeleri için dolaylı çekme yönünde gerçekleştirilen deneyler ile aşağıdaki eşitliklerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Eşitliklerde verilen β_{b1}, β_{b2} ve β_{b3} birer istatistiksel katsayıdır.

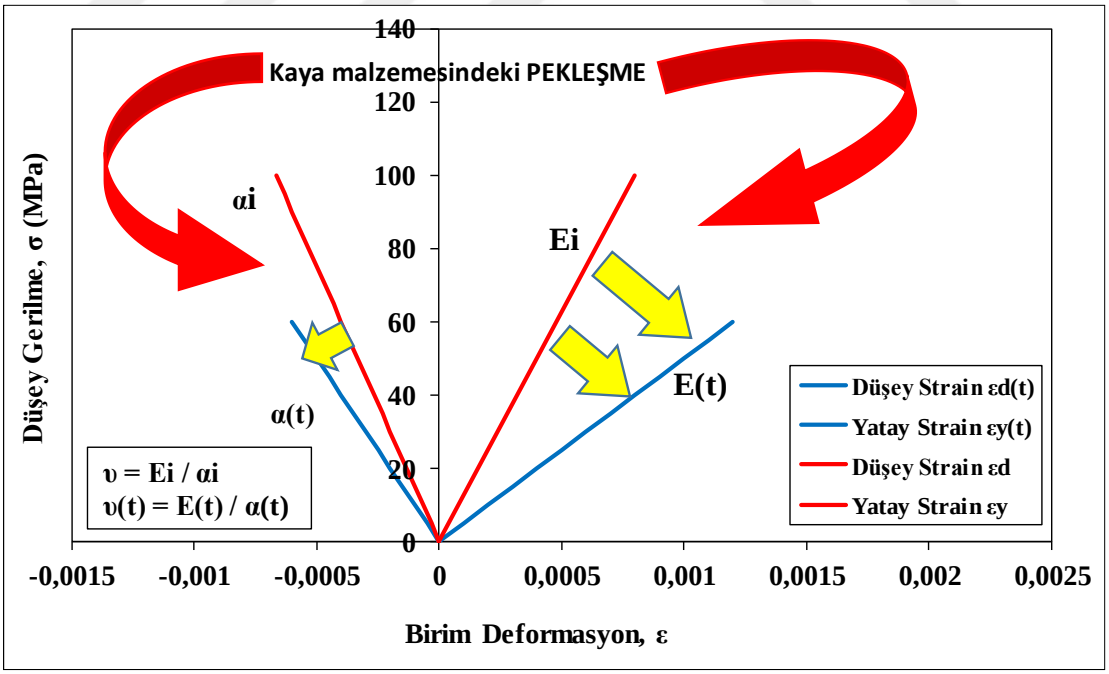
$$\sigma_{tB}(t) = f\{ t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow \sigma_{tB}(t) = \beta_{b1}\, \sigma_{tB} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{tB}(t) = f\{\, t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \,\} \rightarrow \varepsilon_{tB}(t) = \beta_{b2}\, \varepsilon_{tB} \qquad (3.6)$$

$$E_{tB}(t) = f\{\, t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \,\} \rightarrow E_{tB}(t) = \beta_{b3}\, E_{tB} \qquad (3.7)$$



a) Kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinin zamana bağlı pekleşmeye dayalı davranışı.



b) Elastik modül (E) ve Poisson oranı (υ) değerlerinin zamana bağlı pekleşmeye dayalı davranışı.

Şekil 3.6. Farklı birim deformasyon hızlarına maruz bırakılan model malzemelerin elastik deformabilite ve Mohr-Coulomb (M-C) yenilme ölçütü davranışları.

Eşitlik 3.1-3.10 arasında verilen eşitliklerden Eşitlik 3.1 ile Eşitlik 3.5 eşleştirilerek hazırlanan Mohr-Coulomb (M-C) zarfları yardımıyla belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerleri için aşağıdaki modeller geliştirilmesi hedeflenmiştir (Eşitlik 3.8 ve 3.9). Eşitliklerde verilen β_{c1} ve β_{c2} birer istatistiksel katsayıdır.

$$c(t) = f\{ t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow c(t) = \beta_{c1}\, c \tag{3.8}$$

$$\phi(t) = f\{ t, \sigma, E, \upsilon, \varepsilon \} \rightarrow \phi(t) = \beta_{c2}\, \phi \tag{3.9}$$

3.4. İki ve Üç Boyutlu Nümerik Çözümlemeler ile Modelin Test Edilmesi

Doğal model kaya malzemeleri (DKM) ve yatay model kaya malzemeleri (YKM) için elde edilen tek eksenli basma dayanımı (σ_c, $\sigma_c(t)$), dolaylı çekme dayanımı (σ_{tB}, $\sigma_{tB}(t)$), Elastik modül (E_i, $E_i(t)$), Poisson Oranı (υ, $\upsilon(t)$), kohezyon (c, c(t)) ve içsel sürtünme açı (ϕ, $\phi(t)$) değerleri yardımıyla her bir dayanım aralığına ait toplam 5 farklı senaryo hazırlanmıştır. Bu senaryolarda hazırlanan modellerde derinlik, tünel geometrisi ve açıklığı, başlangıç birincil gerilme büyüklükleri ve yönleri gibi parametreler sabit alınmıştır. Bu senaryolar üzerinde iki boyutlu Phase2D(ROCSCIENCE) programı yardımıyla örnek sayısal çözümlemelerin yapılması ve değerlendirilmesi planlanmıştır.

Sonuç olarak Eşitlik 3.1-3.9'da verilen matematiksel eşitlikler, sayısal analizler ile test edilmiş ve zaman etkisini içeren tasarım girdi parametrelerinin kaya mühendislik yapıları üzerindeki duraylılık etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu bölümde doğal ve yapay kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, temel ve araştırma amaçlı kaya mekaniği çalışmaları başlıklarında aşağıda sunulmuştur. Bu tez çalışmasında, temel kaya mekaniği deney sonuçları bilinen semboller (örneğin σ_c, E_i, γ gibi) ile ifade edilirken araştırma amaçlı gerilme-hız-kontrollü deneylerde sembollerin üzerine bir üs çizgisi konmuş (örneğin σ_c', E_i', γ' gibi) diğer araştırma amaçlı sabit-gerilme-kontrollü-sünme (creep) deneyler için ise sembol üzerinde iki üs çizgisi (örneğin σ_c'', E_i'', γ'' gibi) kullanılmıştır.

4.1. Temel Kaya Mekaniği Deneyleri

Tez çalışmalarının çoğunda ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda dikkate alınan temel kaya mekaniği deneyleri bu tez çalışmasında da dikkate alınmıştır (bkz Çizelge 3.10). Bunlar sırasıyla (1) Tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c) deneyi, (2) Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) deneyi, (3) Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$) deneyi, (4) Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}$) deneyi, (5) Yoğunluk (Y,γ) - Gözeneklilik (G) - Nem içeriği (N) belirleme deneyleri, (6) Nokta yükleme dayanımı (NYD, $I_{s(50)}$) deneyi, (7) Suda dağılma dayanımı deneyi (SDD, I_{d2}) ve (8) Schmidt sertlik belirleme deneyi (SCH, N) olmuştur.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel temel kaya mekaniği çalışmalarından elde edilen sonuçlar, takip eden bölümde iki alt başlık altında sunulmuştur.

4.1.1. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deneyleri

Beş farklı dayanıma sahip olacak şekilde doğal model kaya malzemeleri seçilmiştir. Bölüm 3'te detayları ile değinilen bu model doğal kaya birimleri sırasıyla 0-20 MPa aralığı için Konya-Hatunsaray Tüf kaya birimi (DKM-1), 20-40 MPa aralığı için Konya-Sille Andezit kaya birimi (DKM-2), 40-60 MPa aralığı için Karaman Traverten kaya birimi (DKM-3), 60-80 MPa aralığı için Marmara Adası Marmara Mermer kaya birimi (DKM-4) ve 80-100 MPa aralığı için Kayseri Bazalt kaya birimi (DKM-5)

olmuştur. Seçilen model kaya birimlerinden temel kaya mekaniği deneyleri için ilgili örnekler ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda hazırlanmıştır.

Yukarıda sıralanan sekiz temel kaya mekaniği deneyi ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan deney sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1'de topluca sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Doğal model kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deney sonuçları.

Deney İsimleri	Sembol ve Birim	Doğal Kaya Malzemesi ve Hedeflenen Dayanım Aralıkları				
		DKM-1	DKM-2	DKM-3	DKM-4	DKM-5
		0-20 MPa	20-40 MPa	40-60 MPa	60-80 MPa	80-100 MPa
1. Tek eksenli gerilme altında tek eksenli basma dayanımı deneyleri	TEBD, σ_c (MPa)	12.57	20.11	49.89	56.90	132.72
2. Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyleri	DÇD, σ_{tB} (MPa)	1.43	0.8325	6.84	3.22	17.01
3. Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite deneyleri	TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$ (MPa)	2876.10 594.75	2941.46 8223.53	20136.99 3594.34	25823.1 9894.15	23115.21 2666.67
4. Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri	DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}$ (MPa)	138.02	198.43	968.42	303.43	3479.45
5. Yoğunluk (Y, γ) - Gözeneklilik (G) - Nem içeriği (N) belirleme deneyleri	Y, γ (kN/m^3) G (%) N (%)	10.08 22.06 33.53	22.30 5.32 8.52	25.00 1.66 2.60	27.10 0.20 0.32	27.20 2.09 3.26
6. Nokta yükleme dayanımı deneyleri	NYD, $I_{s(50)}$ (MPa)	1.49	2.25	3.22	4.07	11.69
7. Suda dağılma dayanımı deneyleri	SDD, I_{d2} (%)	96.65	98.44	99.49	99.65	99.60
8. Schmidt sertlik belirleme deneyleri	SCH, N (-)	42.00	40.15	51.87	52.63	57.30
Doğal Kaya Malzemeleri	DKM-1: Konya-Hatunsaray Tüf Kaya Birimi DKM-2: Konya-Sille Andezit Kaya Birimi DKM-3: Karaman-Ayrancı Traverten Kaya Birimi DKM-4: Marmara Adası Mermer Kaya Birimi DKM-5: Kayseri Bazalt Kaya Birimi					

Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere seçilen kaya malzemelerinin hedeflenen dayanım aralıkları büyüdükçe (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4, DKM-5) deneylerden belirlenen dayanım aralıklarının da arttığı görülmektedir. Tüm temel kaya mekaniği

değerlerinin hedeflenen dayanım aralıklarına uygun olarak arttığı görülmektedir. Örneğin tek eksenli basma dayanım değerlerinin 12.57 MPa ile 132.72 MPa değeri arasında dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.1).

4.1.2. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deneyleri

Beş farklı dayanıma sahip olacak şekilde yapay model kaya malzemeleri Konya Hazır Beton firmasının laboratuvarlarında imal edilmiştir. Bölüm 3'te detayları ile değinilen bu model yapay kaya malzemeleri sırasıyla 0-20 MPa aralığı için YKM-1, 20-40 MPa aralığı için YKM-2, 40-60 MPa aralığı için YKM-3, 60-80 MPa aralığı için YKM-4 ve 80-100 MPa aralığı için YKM-5 olmuştur. Seçilen yapay model kaya malzemelerine ait temel kaya mekaniği deneyleri için ilgili örnekler TS EN (2002) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda hazırlanmıştır.

Dikkate alınan sekiz temel kaya mekaniği deney çalışması, ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan deney sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere seçilen kaya malzemelerinin hedeflenen dayanım aralıkları büyüdükçe (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4, YKM-5) deneyler yardımıyla belirlenen dayanım aralıklarının da arttığı görülmektedir. Yapay kaya malzemesi olan beton üzerinde gerçekleştirilen temel kaya mekaniği değerlerinin hedeflenen dayanım aralıklarına uygun olarak arttığı görülmektedir. Örneğin tek eksenli basma dayanım değerlerinin 27.33 MPa ile 84.60 MPa değeri arasında dağılım gösterdiği görülmektedir Yapay kaya malzemeleri hazırlanırken dayanım yüksek olması için ters orantılı olarak kullanılan su miktarının azaltılması gerekir dolayısıyla yapay kaya malzemelerinde dayanım arttıkça nem içeriğinin azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Yapay model kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deney sonuçları

Deney İsimleri	Sembol ve Birim	Yapay Kaya Malzemeleri ve Hedeflenen Dayanım Aralıkları				
		YKM-1	YKM-2	YKM-3	YKM-4	YKM-5
		0-20 MPa	20-40 MPa	40-60 MPa	60-80 MPa	80-100 MPa
1. Tek eksenli gerilme altında tek eksenli basma dayanımı deneyleri	TEBD, σ_c (MPa)	27.33 (20.70)	48.04 (32.30)	64.89 (50.27)	84.60 (76.23)	80.01 (88.47)
2. Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyleri	DÇD, σ_{tB} (MPa)	1.98	3.09	4.13	5.46	4.99
3. Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite deneyleri	TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}$, $E_{d\text{-}TEB}$ (MPa)	3563.49 5751.52	17632.56 5593.76	6858.92 1256.72	14644.48 1063.36	8690.88 814.14
4. Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri	DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}$ (MPa)	414.38	762.09	834.83	1915.39	907.97
5. Yoğunluk (Y, γ) - Gözeneklilik (G) - Nem içeriği (N) belirleme deneyleri	Y, γ (kN/m^3) G (%) N (%)	22.30 55.19 15.34	23.40 43.70 12.07	23.70 43.15 12.03	23.60 22.48 6.21	23.70 21.50 6.02
6. Nokta yükleme dayanımı deneyleri	NYD, $I_{s(50)}$ (MPa)	1.36	1.95	2.94	3.82	3.65
7. Suda dağılma dayanımı deneyleri	SDD, I_{d2} (%)	99.12	99.45	99.53	99.13	99.22
8. Schmidt sertlik belirleme deneyleri	SCH, N (-)	31.53	35.47	37.10	40.63	42.00
Yapay Kaya Malzemeleri	YKM-1: C-10 Beton Sınıfı YKM-2: C-30 Beton Sınıfı YKM-3: C-50 Beton Sınıfı YKM-4: C-70 Beton Sınıfı YKM-5: C-90 Beton Sınıfı					

4.2. Araştırma Amaçlı Kaya Mekaniği Deneyleri

Bu kapsamda planlanan çalışmalar iki alt başlıkta yürütülmüştür. İlk deneyler Servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) kaya mekaniği deneyleri (A-KM/Grup1) iken diğer deneyler ise aynı hidrolik preste gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) kaya mekaniği deneyleri (A-KM/Grup2) olmuştur.

Gerilme-hız-kontrollü (1) tek eksenli gerilme altında tek eksenli basma dayanımı deneyleri (TEBD, σ_c'), (2) tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme dayanımı (Brazilian)

deneyleri (DÇD, σ_{tB}'), (3) tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite deneyleri (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$), (4) tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}'$)'ne ait sonuçlar (A-KM/Grup1) DKM için bölüm 4.3'de YKM için bölüm 4.4 hazırlanmıştır. Ayrıca sabit-gerilme-kontrollü-sünme (1) tek eksenli basma-sünme (creep) deneyleri (S-TEB, t'', ε''), (2) dolaylı çekme-sünme (creep) deneyleri (S-DÇ, t'', ε'')'ne ait sonuçlar (A-KM/Grup2) DKM için bölüm 4.5'te ve YKM için bölüm 4.6'da verilmiştir.

Kaynak taramasında belirlenerek bu tezde Bölüm 2'de sunulan Şekil 2.7'de kumtaşı üzerinde tek eksenli basınç altında kumtaşının toplam yük (kN)-birim deformasyon (ε) davranışına birim deformasyon hızının (ε/s) etkisi ve çeşitli sabit birim deformasyon hızlarında (ε/s) yine kumtaşı için gerilme (σ)-birim deformasyon (ε) ilişkisi Bieniawski (1970) tarafından incelenmiştir. Kumtaşı için yükleme hızı arttıkça yenilme değerlerinin arttığı, yükleme hızı azaldıkça yenilme seviyesi düştüğü bu grafiklerden görülmektedir. Bu tez çalışmasında gerilme-hız kontrollü (Grup1) koşulunda yapılan deneysel çalışmalar aşağıda sunulmuştur. Doğal kaya malzemesi DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4, DKM-5 ve yapay kaya malzemesi YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4, YKM-5 için elde edilen birim deformasyon (ε) – gerilme (σ) davranışları hem tek eksenli basma koşulunda hemde dolaylı çekme koşulunda ortaya konmuştur. Elde edilen bu grafiklerden davranış şekillerinin Bieniawski (1970) tarafından kumtaşı için ortaya konan Şekil 2.7'de verilen grafiklerdeki davranışlarla uyumlu olduğu anlaşılmıştır. DKM-1 için tipik iki örnek Şekil 4.1, Şekil 4.3'te ve YKM-1 için ise tipik iki örnek Şekil 4.5, Şekil 4.7'de görülmektedir. Diğer model doğal ve yapay kaya malzemeleri için elde edilen sonuçlar EK-1, EK-2, EK-3, EK-4, EK-5, EK-6, EK-7 ve EK-8'de sunulmuştur.

4.3. Doğal Kaya Malzemeleri (DKM) için Gerilme-Hız-Kontrollü Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup1/DKM)

Bu bölümdeki çalışmalar servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Aşağıda farklı dayanımlara sahip DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 doğal kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) deney sonuçları sunulmuştur.

4.3.1. Doğal model kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde yükleme hızlarının tespiti

Beş farklı dayanıma sahip olacak şekilde doğal model kaya malzemeleri seçilmiştir. Bölüm 3'te detayları ile değinilen bu model doğal kaya birimleri sırasıyla 0-20 MPa aralığı için Konya-Hatunsaray Tüf kaya birimi (DKM-1), 20-40 MPa aralığı için Konya-Sille Andezit kaya birimi (DKM-2), 40-60 MPa aralığı için Karaman-Traverten kaya birimi (DKM-3), 60-80 MPa aralığı için Marmara Adası Marmara Mermer kaya birimi (DKM-4) ve 80-100 MPa aralığı için Kayseri Bazalt kaya birimi (DKM-5) olmuştur. Seçilen model kaya birimlerinden araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri için ilgili örnekler ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur.

Farklı dayanımlara sahip model kaya malzemeleri (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4, DKM-5) üzerinde tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c') ile tek eksenli deformabilite (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$) deneyi birlikte ayrıca Brazilian çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}') ile dolaylı çekme deformabilite (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇD}'$) deneyi birlikte olmak üzere deneyler gerçekleştirilmiştir.

Her bir dayanım sınıfına ait TEBD ve TEB-DEF deneyleri için hazırlanan toplam 45 (5x9) adet örnek ($D = 54$ mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ile DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için hazırlanan toplam 40 (5x8) adet örnek ($D = 54$ mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Takip eden kısımda farklı yükleme hızlarının tespitinde izlenen yol önce TEBD ve TEB-DEF deneyleri için daha sonra DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için detayları ile sunulmuştur.

4.3.1.1. TEBD ve TEB-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti

Temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtan Çizelge 4.1'de görülen TEBD (σc) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) aralığından seçilen 0.75 MPa/s'de gerçekleştirilen deney sonuçlarıdır. Ancak burada tek eksenli düşey gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı basma dayanımı ve deformabilite (TEBD, TEB-DEF) deneylerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırlarının dışına çıkılmıştır. Yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için izlenen yol aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1'de sunulan TEBD ve TEB-DEF deneyleri için seçilen 0.75 MPa/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü bu tür kaya mekaniği deneylerinde 1 katsayısının altında ve üstünde

parametrik katsayılar seçilmiştir. Seçilen bu değerlere karşılık gelen yükleme hız (MPa/s, kN/s, kN/dk) değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.3 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.3. Gerilme kontrollü TEBD ve TEB-DEF deneylerine ait farklı yükleme hız değerlerinin belirlenmesi (örnek çap değerleri D = 54 mm)

Seçilen Oran	Hesaplanan Gerilme Hızı, σ Seçilen Oran x 0.75 MPa/s	Hesaplanan Yükleme Hızı, F σ=F/A'dan	Hesaplanan Yükleme Hızı, F σ=F/A'dan
(-)	(MPa/s)	(kN/s)	(kN/dk)
0.04	0.03	0.067	4
0.07	0.0525	0.117	7
0.14	0.105	0.233	14
0.34	0.255	0.567	34
0.68	0.510	1.134	68
1.00 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	1 x 0.75 = 0.75	1.667	100
1.36	0.975	2.267	136
1.70	1.275	2.834	170
2.04	1.53	3.401	204

Çizelge 4.3'de verilen son sütunda görüldüğü üzere ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı 100 kN/dk iken bu değer 4 kN/dk'ya kadar düşürülmüş ve 204 kN/dk'ya kadar artırılmıştır. Bir başka ifade ile yükleme hızı, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen hız değerinin (0.5-1 MPa/s, bu çalışmada 0.75 MPa/s alınmıştır) 0.04 katı ile 2.04 katı arasında değiştirilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3'de son sütunda ifade edilen yükleme hız (kN/dk) değerleri dikkate alınarak servo kontrollü hidrolik preste gerilme-hız-kontrollü deneyler, tüm model doğal kaya malzemeleri (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.3.1.2. DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti

Çizelge 4.1'de görülen DÇD (σ_{tB}) ve DÇ-DEF ($E_{i\text{-}DÇ}$) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen 200 N/s yükleme hızında gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtmaktadır. Ancak burada Brazilian dolaylı çekme gerilmesi

altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı çekme dayanımı (DÇD) ve deformabilite (DÇ-DEF) deneylerinde, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (200 N/s) değerinin dışına çıkılmıştır. Bunun için dikkate alınan sistematik yol aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 4.1'de ilan edilen deney için kullanılan 200 N/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen bu tür gerilme-hız-kontrollü kaya mekaniği deneylerinde tanımlanan 1 katsayısının altında ve üstünde yükleme hız (N/s) değerleri dikkate alınmıştır. Bu yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için Çizelge 4.4 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.4'te verilen son sütunda görüldüğü üzere ISRM (1981, 2007) önerisine karşılık gelen yükleme hızı 12 kN/dk iken parametrik bu çalışmada bu değer 0.9 kN/dk'ya kadar düşürülmüş ve 24 kN/dk'ya kadar artırılmıştır. Bir başka ifade ile ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı (200 N/s) bu çalışmada 0.08 - 2.0 kat aralığında değiştirilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4'te son sütunda ifade edilen yükleme hız (kN/dk) değerleri dikkate alınarak servo kontrollü hidrolik preste gerilme-hız-kontrollü deneyler, tüm model doğal kaya malzemeleri (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4. Gerilme kontrollü DÇD ve DÇ-DEF deneylerine ait farklı yükleme hız değerlerinin belirlenmesi (örnek çap değerleri D = 54 mm)

Seçilen Oran	Hesaplanan Yükleme Hızı, F Seçilen Oran x 200 N/s	Hesaplanan Yükleme Hızı, F
(-)	(N/s)	(kN/dk)
0.08	15	0.9
0.15	30	1.8
0.38	75	4.5
0.67	133,33	8
1.00 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	1 x 200 = 200	12
1.33	266.67	16
1.67	333.33	20
2.00	400	24

Yukarıda sunulan bölüm 4.3.1.1 ve 4.3.1.2'de ifade edilen yükleme hız koşulları altında beş farklı dayanıma sahip DKM için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde

edilen bulgular, takip eden başlıklarda sunulmuştur. Farklı dayanımlara sahip DKM model örneklerinde elde edilen sonuçlara ait grafikler DKM-1 için aşağıda verilirken DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 için bu grafikler ekler kısmında verilmiş ancak ilgili çizelgeler aşağıda sunulmuştur.

4.3.2. 0-20 MPa aralığında yer alan Konya-Hatunsaray tüf kaya birimine (DKM-1) ait deneysel sonuçlar

DKM-1 olarak tanımlı Konya-Hatunsaray tüf kaya birimi üzerinde tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.3.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-1 için gerçekleştirilen deneyler

Tek eksenli düşey gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı basma dayanımı deneylerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırlarının dışına çıkılmıştır. Yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen sistematik Çizelge 4.3'te verilmiştir.

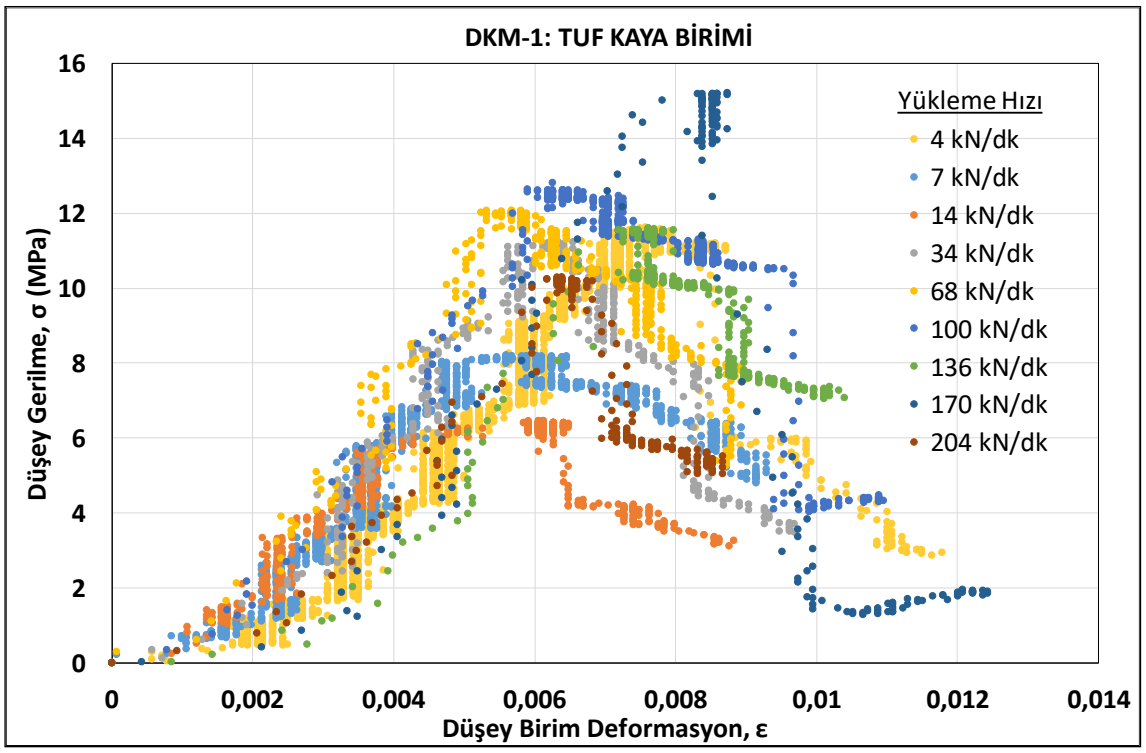
Çizelge 4.3'ün son sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Şekil 4.1'de farklı yükleme hızlarında farklı yenilme değerlerinin (σ_c', MPa) ortaya çıktığı genel olarak görülmektedir. Yükleme hızı arttıkça yenilme öncesinde gerilme-birim deformasyon doğrusal davranış bölgelerindeki eğri eğimlerinin arttığı görülmektedir ($E_{i\text{-}TEB}'$, GPa). Yenilme sonrasında kaya örneği üzerindeki düşey gerilme

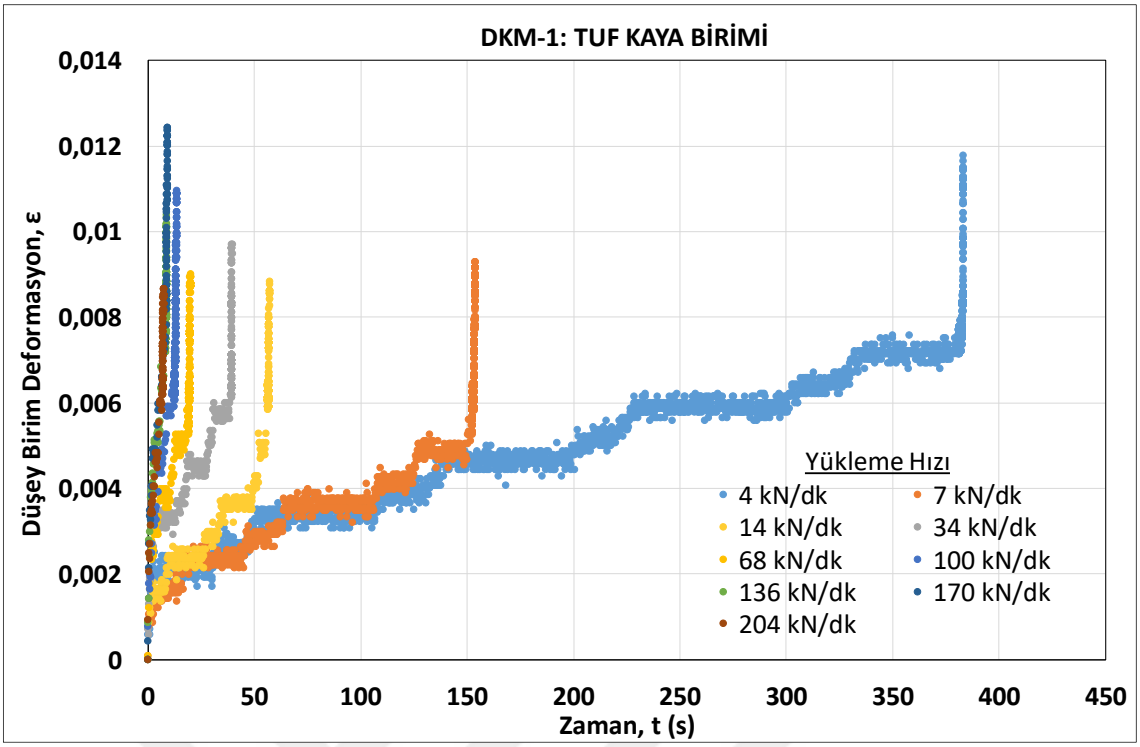
ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt edilebilmiştir. Yenilme sonrası bölge için ayrıca elastik modül ($E_{d\text{-}TEB}'$, GPa) değerleri hesaplanabilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Gerilme kontrollü deneylerde sistematik olarak düzgün artırılan gerilme altında kısa dönemli ortaya çıkan dinamik sünme davranışının birinci, ikinci ve üçüncü aşamaları zaman-birim deformasyon eğrilerinden görülmüştür (Şekil 4.2). Bütün örneklerde üçüncü aşamaya geçildiği ve örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) dikkate alınarak Çizelge 4.5 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.



Şekil 4.1. DKM-1 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



Şekil 4.2. DKM-1 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

Çizelge 4.5. DKM-1 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
4	381.2	11.52	2.152	2.104
7	152.4	8.16	2.557	1.016
14	56.2	6.37	1.861	0.599
34	39.2	11.23	2.981	2.888
68	19.2	12.02	2.795	1.611
100 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	12.4	12.57	2.876	0.594
136	8.2	11.54	3.662	0.586
170	8.8	15.17	3.070	3.927
204	7.0	10.23	2.293	0.722

4.3.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-1 için gerçekleştirilen deneyler

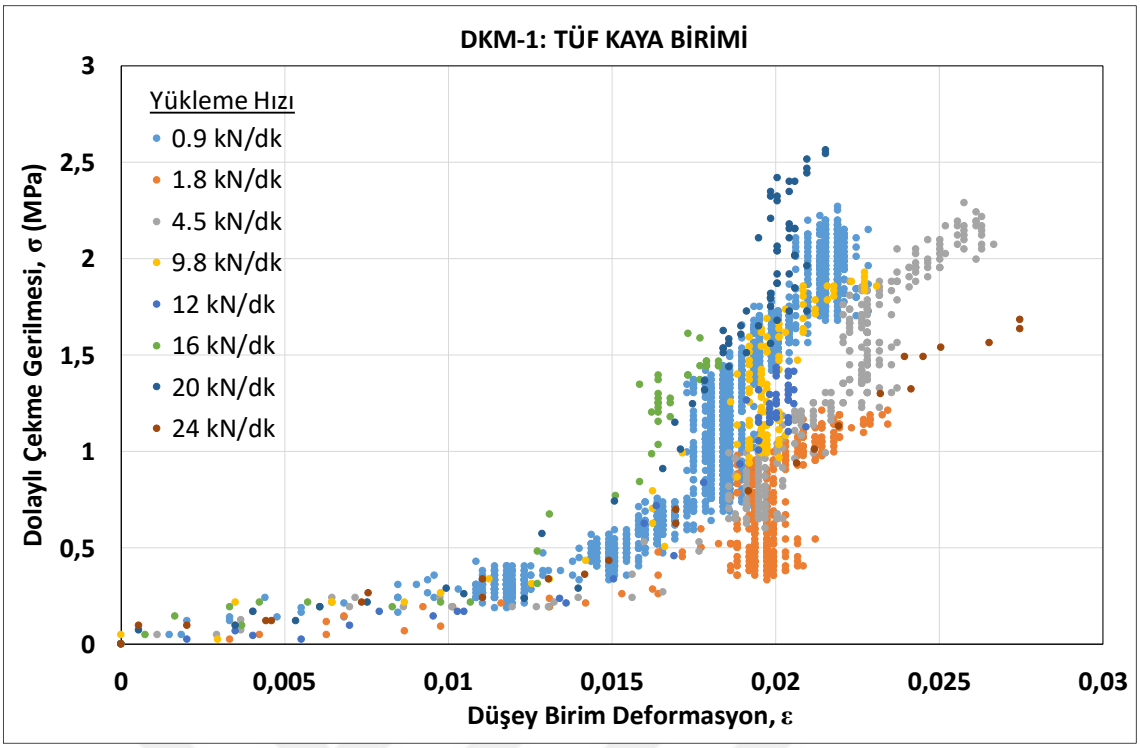
Brazilian dolaylı çekme gerilmesi altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı çekme dayanımı deneylerinde, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (200 N/s) değerinin dışına çıkılmıştır. Bunun için dikkate alınan sistematik yol Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4'ün son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilen grafikler hazırlanmıştır.

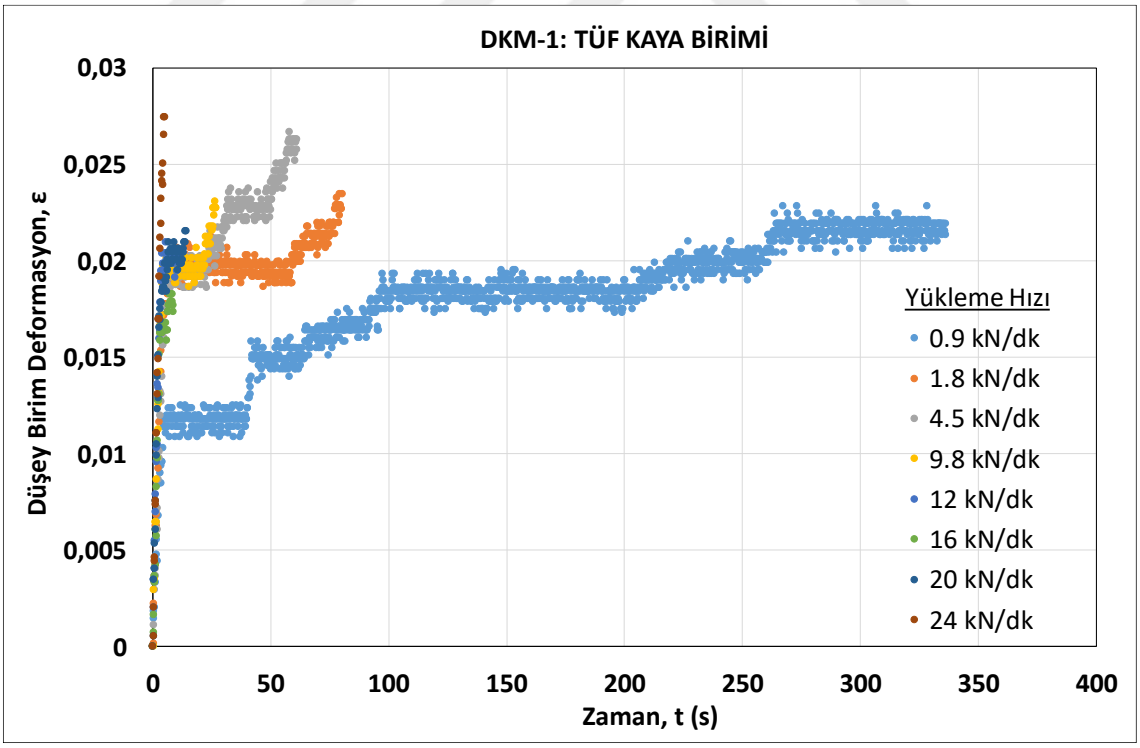
Farklı yükleme hızlarında farklı çekme yenilme değerlerinin (σ_{tB}', MPa) oluştuğu Şekil 4.3'te genel olarak görülmektedir. Yükleme hızı arttıkça yenilme öncesinde doğrusal gerilme-birim deformasyon davranış bölgelerindeki eğri eğimlerinin arttığı anlaşılmaktadır ($E_{i\text{-}DÇ}'$, GPa). Deney bitiminde örneğin dağılması nedeniyle yenilme sonrasında kaya örneği üzerindeki gerilme ve birim deformasyon değerleri kayıt altına alınamamış ve yenilme sonrası deformabilite modülü ($E_{d\text{-}DÇ}'$, GPa) belirlenememiştir.

Şekil 4.4'te verilen gerilme-hız-kontrollü deneylerde sistematik olarak düzgün artırılan çekme gerilmesi altında ortaya çıkan zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının ikinci aşamalarının doğrusal karakterde olduğu anlaşılmaktadır. Yenilme sonrası örneklerin birden dağılmasından dolayı yenilme sonrası sürece ait veri kayıt altına alınamamıştır. Bundan dolayı grafiklerde Şekil 4.2'de olduğu gibi son yenilme süreci bu grafikte (Şekil 4.4) görülmemektedir. Ancak Şekil 4.4'te görülen doğrusal davranış sonrasında örnek kırılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) yardımıyla Çizelge 4.6 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.



Şekil 4.3. DKM-1 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



Şekil 4.4. DKM-1 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

Çizelge 4.6. DKM-1 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	349.20	2.34	0.438
1.8	80.20	1.21	0.140
4.5	61.20	2.29	0.207
8	26.80	1.93	0.236
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	11.20	1.43	0.138
16	8.80	1.61	0.185
20	14.00	2.56	0.271
24	5.00	1.68	0.097

4.3.3. 20-40 MPa aralığında yer alan Konya-Sille andezit kaya birimine (DKM-2) ait deneysel sonuçlar

Tek eksenli basma dayanımı (TEBD) ve deformabilite (TEB-DEF) deneyleri için hazırlanan toplam 9 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ile Brazilian çekme dayanımı (DÇD) ve deformabilite (DÇ-DEF) deneyleri için hazırlanan toplam 8 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$), servo kontrollü hidrolik pres ile Çizelge 4.3 ve 4.4'te belirtilen farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.3.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-2 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.3'te sunulan son sütununda belirtilen yükleme hız (kN/dk) koşulları altında TEBD ve TEB-DEF deneyleri gerçekleştirilirken servo kontrollü hidrolik pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK1'de (EK1/Şekil 1 ve EK1/Şekil 2) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları

DKM-1 (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK1/Şekil 1 ve EK1/Şekil 2) dikkate alınarak Çizelge 4.7 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

4.3.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-2 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.4'ün son sütununda belirtilen yükleme hız (kN/dk) koşulları altında gerilme-hız-kontrollü DÇD ve DÇ-DEF deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklar ile kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla (EK1/Şekil 3 ve EK1/Şekil 4)'de verilen grafikler hazırlanmıştır. EK-1'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının DKM-1 (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler yardımıyla Çizelge 4.8 hazırlanmıştır (EK1/Şekil 3 ve EK1/Şekil 4). Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.7. DKM-2 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı	Deney Süresi	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF
F (kN/dk)	t (s)	σ_c' (MPa)	$E_{i\text{-}TEB}'$ (GPa)	$E_{d\text{-}TEB}'$ (GPa)
4	680.6	20.32	1.832	4.806
7	425.2	22.51	2.220	4.388
14	242.0	26.33	1.748	2.206
34	76.404	21.75	4.061	11.057
68	24.802	19.67	1.856	3.826
100 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	14.8	20.11	2.941	8.223
136	12.6	21.05	2.650	6.982

170	13.802	17.71	2.206	7.251
204	14.6	24.64	1.402	3.798

Çizelge 4.8. DKM-2 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı	Deney Süresi	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF
F (kN/dk)	t (s)	σ_{tB}' (MPa)	$E_{i\text{-}DÇ}'$ (GPa)
0.9	117	0.807	0.162
1.8	180.4	2.603	0.349
4.5	1.6	0,648	0.090
8	31	2,483	0.309
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	5	0,833	0.198
16	3.8	0,860	0.106
20	4.8	0,749	0.099
24	3.6	0,780	0.223

4.3.4. 40-60 MPa aralığında yer alan Karaman traverten kaya birimine (DKM-3) ait deneysel sonuçlar

DKM-3 olarak tanımlı Karaman traverten kaya birimi üzerinde iki farklı deney olan tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney örnekleri ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda hazırlanmıştır.

Farklı yükleme hızlarında tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek ($D = 54$ mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek ($D = 54$ mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile bir seri gerilme-hız- kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.3.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-3 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.3'ün son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir.

Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt edilmiştir. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla EK2'de (EK2/Şekil 5 ve EK2/Şekil 6) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları DKM-1 (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin DKM-2 örneklerine nazaran daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan EK2/Şekil 5 ve EK1/Şekil 6 grafikleri yardımıyla Çizelge 4.9 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

4.3.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-3 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.4'ün son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla EK2/Şekil 7 ve EK2/Şekil 8'de sunulan grafikler hazırlanmıştır. EK-2'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının DKM-1 (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin DKM-2 örneklerine göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK2/Şekil 7 ve EK2/Şekil 8) yardımıyla Çizelge 4.10 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.9. DKM-3 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD deneylerinde belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
4	2053.6	60.33	20.950	4.495
7	815.4	41.95	6.782	4.112
14	534.4	55.70	11.614	4.698
34	149.8	38.12	9.683	6.202
68	82.4	41,81	11.748	3.729
100 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	66.0	49.89	20.137	3.594
136	57.6	60.23	19.900	3.152
170	59.4	76.24	24.269	2.993
204	30.4	49.39	12.286	3.112

Çizelge 4.10. DKM-3 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD deneylerinde belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	815.80	5.28	0.508
1.8	390.40	5.29	0.543
4.5	143.20	4.90	0.409
8	66.40	4.40	0.401
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	72.60	6.84	0.968
16	32.80	4.47	0.558
20	29.80	5.15	0.459
24	32.00	6.64	0.785

4.3.5. 60-80 MPa aralığında yer alan Marmara Adası mermer kaya birimine (DKM-4) ait deneysel sonuçlar

Farklı yükleme hızlarında tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 54 mm, 2.5 ≤ L/D ≤ 3.0) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 54 mm, t/D ≥ 0.5) servo kontrollü hidrolik pres ile bir seri gerilme-hız- kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.3.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-4 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.3'ün son sütununda belirtilen yükleme hız (kN/dk) koşulları altında gerilme-hız- kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri mermer kaya birimi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında servo kontrollü hidrolik pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt edilmiştir. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla EK3'te (EK3/Şekil 9 ve EK3/Şekil 10) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları DKM-1 (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin DKM-3 örneklerine nazaran daha büyük olduğu görülmüştür.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK3/Şekil 9 ve EK3/Şekil 10) yardımıyla Çizelge 4.11 hazırlanmıştır. Değerlendirme sonuçları tartışma bölümünde verilecektir.

4.3.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-4 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.4'ün son sütununda belirtilen farklı kN/dk yükleme hız koşulları altında gerilme-hız- kontrollü yapabilen servo kontrollü hidrolik preste deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla EK3/Şekil 11 ve EK3/Şekil 12'de sunulan grafikler hazırlanmıştır. EK-3'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının DKM-1 (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının

benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin DKM-3 örneklerine göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK3/Şekil 11 ve EK3/Şekil 12) yardımıyla Çizelge 4.12 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.11. DKM-4 için farklı yükleme hızlarında Marmara Adası mermer kaya birimi üzerinde gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı	Deney Süresi	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF
F (kN/dk)	t (s)	σ_c' (MPa)	$E_{i\text{-}TEB}'$ (GPa)	$E_{d\text{-}TEB}'$ (GPa)
4	1707.6	50.11	14.547	3.209
7	1129.4	58.41	13.301	5.352
14	593.0	61.24	11.307	5.049
34	241.0	60.10	13.907	4.636
68	98.2	49.27	21.058	5.216
100 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	75.8	56.90	25.823	9.894
136	64.0	65.06	30.285	3.305
170	60.602	77.80	40.100	3.558
204	33.2	51.45	12.813	3.278

Çizelge 4.12. DKM-4 Marmara mermer kaya birimi için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı	Deney Süresi	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF
F (kN/dk)	t (s)	σ_{tB}' (MPa)	$E_{i\text{-}DÇ}'$ (GPa)
0.9	463.20	3.12	0.217
1.8	297.40	4.14	0.425
4.5	90.80	3.35	0.334
8	68.00	4.33	0.425
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	32.60	3.22	0.303
16	37.20	4.79	0.531
20	24.20	4.23	0.386
24	19.60	4.11	0.390

4.3.6. 80-100 MPa aralığında yer alan Kayseri bazalt kaya birimine (DKM-5) ait deneysel sonuçlar

DKM-5 olarak tanımlı Kayseri bazalt kaya birimi üzerinde iki farklı deney olan tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney örnekleri ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda hazırlanmıştır.

Farklı yükleme hızlarında tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile bir seri gerilme-hız- kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.3.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-5 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.3'ün son sütununda belirtilen yükleme hız (kN/dk) koşulları altında gerilme kontrollü TEBD ve TEB-DEF deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt edilmiştir. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla EK4'de (EK4/Şekil 13 ve EK4/Şekil 14) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları DKM-1 (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin DKM-4 örneklerine nazaran daha büyük olduğu görülmüştür.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK4/Şekil 13 ve EK4/Şekil 14) yardımıyla Çizelge 4.13 hazırlanmıştır. Değerlendirme sonuçları tartışma bölümünde verilecektir.

4.3.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında DKM-5 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.4'ün son sütununda belirtilen kN/dk yükleme hız koşulları altında gerilme kontrollü servo kontrollü hidrolik preste DÇD ve DÇ-DEF deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme

gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla EK4/Şekil 15 ve EK4/Şekil 16'de sunulan grafikler hazırlanmıştır. EK-4'te sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının DKM-1 (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin DKM-4 örneklerine göre daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK4/Şekil 15 ve EK4/Şekil 16) yardımıyla Çizelge 4.14 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.13. DKM-5 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı	Deney Süresi	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF
F (kN/dk)	t (s)	σ_c' (MPa)	$E_{i\text{-}TEB}'$ (GPa)	$E_{d\text{-}TEB}'$ (GPa)
4	2092.6	62.10	6.185	1.374
7	1502.6	78.99	17.531	5.988
14	572.80	60.10	8.202	5.681
34	279.8	70.54	8.167	8.230
68	126.4	65.46	10.329	4.208
100 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	169.6	132.72	23.115	2.667
136	158	162.41	19.372	2.323
170	87.6	114.11	18.024	2.862
204	9.06	142.58	37.624	1.818

Çizelge 4.14. DKM-5 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı	Deney Süresi	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF
F (kN/dk)	t (s)	σ_{tB}' (MPa)	$E_{i\text{-}DÇ}'$ (GPa)
0.9	2144.8	13.46	2.006
1.8	1421.4	18.26	2.494
4.5	486.8	15.53	5.472
8	247.6	14.49	3.452
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	198.6	17.01	3.479
16	162	18.79	5.466
20	120.8	17.61	5.135
24	111.8	19.59	3.759

4.4. Yapay Kaya Malzemeleri (YKM) Gerilme-Hız-Kontrollü Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup1/YKM)

Bu bölümdeki çalışmalar servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Aşağıda farklı dayanımlara sahip YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5 yapay kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları sunulmuştur.

4.4.1. Yapay model kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde yükleme hızlarının tespiti

Beş farklı dayanıma sahip olacak şekilde yapay model kaya malzemeleri üretilmiştir. Bölüm 3'de detayları ile değinilen bu model yapay kaya malzemeleri sırasıyla 0-20 MPa aralığı için YKM-1, 20-40 MPa aralığı için YKM-2, 40-60 MPa aralığı için YKM-3, 60-80 MPa aralığı için YKM-4 ve 80-100 MPa aralığı için YKM-5 tanımlanmıştır. Seçilen model yapay birimlerinden araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri için ilgili örnekler TS EN (2002) önerileri doğrultusunda hazırlanmış ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deneylere tabi tutulmuştur.

Farklı dayanımlara sahip yapay kaya malzemeleri (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4, YKM-5) üzerinde tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c') ile tek eksenli

deformabilite (TEB-DEF, $E_{i\text{-}TEB}'$, $E_{d\text{-}TEB}'$) deneyi birlikte ayrıca Brazilian çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}') ile dolaylı çekme deformabilite (DÇ-DEF, $E_{i\text{-}DÇ}'$) deneyi birlikte olmak üzere deneyler gerçekleştirilmiştir.

Her bir dayanım sınıfına ait TEBD ve TEB-DEF deneyleri için hazırlanan toplam 45 (5x9) adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2,5$) ile DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için hazırlanan toplam 40 (5x8) adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme-hız-kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Takip eden kısımda farklı yükleme hızlarının tespitinde izlenen yol önce TEBD ve TEB-DEF deneyleri için daha sonra DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için detayları ile sunulmuştur.

4.4.1.1. TEBD ve TEB-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti

Temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtan Çizelge 4.2'de görülen TEBD (σ_c) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) aralığından seçilen 0.75 MPa/s'de gerçekleştirilen deney sonuçlarıdır. Ancak burada tek eksenli düşey gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı basma dayanımı ve deformabilite (TEBD, TEB-DEF) deneylerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırlarının dışına çıkılmıştır. Yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için izlenen yol aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.2'de sunulan TEBD ve TEB-DEF deneyleri için seçilen 0.75 MPa/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü bu tür kaya mekaniği deneylerinde 1 katsayısının altında ve üstünde parametrik katsayılar seçilmiştir. Seçilen bu değerlere karşılık gelen yükleme hız (MPa/s, kN/s, kN/dk) değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.15 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.15'te verilen son sütunda görüldüğü üzere ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı 353 kN/dk iken bu değer 14 kN/dk'ya kadar düşürülmüş ve 707 kN/dk'ya kadar artırılmıştır. Bir başka ifade ile yükleme hızı, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen hız değerinin (0.5-1 MPa/s, bu çalışmada 0.75 MPa/s alınmıştır) 0.04 katı ile 2.04 katı arasında değiştirilmiştir (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.15'te son sütunda ifade edilen yükleme hız (kN/dk) değerleri dikkate alınarak servo kontrollü hidrolik preste gerilme-hız-kontrollü deneyler, tüm model yapay kaya malzemeleri (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.15. Gerilme kontrollü TEBD ve TEB-DEF deneylerine ait farklı yükleme hız değerleri (örnek çap değerleri D = 100 mm)

Seçilen Oran	Hesaplanan Gerilme Hızı, σ Seçilen Oran x 0.75 MPa/s	Hesaplanan Yükleme Hızı, F σ=F/A'dan	Hesaplanan Yükleme Hızı, F σ=F/A'dan
(-)	(MPa/s)	(kN/s)	(kN/dk)
0.04	0.03	0.23	14
0.07	0.05	0.42	25
0.14	0.11	0.83	50
0.34	0.26	2.00	120
0.68	0.51	4.00	240
1.00 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	1 x 0.75 = 0.75 MPa/s	5.88	353
1.36	1.02	8.00	480
1.70	1.28	10.00	600
2.04	1.51	11.78	707

4.4.1.2. DÇD ve DÇ-DEF deneyleri için farklı yükleme hızlarının tespiti

Çizelge 4.2'de görülen DÇD (σ_{tB}) ve DÇ-DEF ($E_{i\text{-}DÇ}$) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen 200 N/s yükleme hızında gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtmaktadır. Ancak burada Brazilian dolaylı çekme gerilmesi altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı çekme dayanımı (DÇD) ve deformabilite (DÇ-DEF) deneylerinde, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (200 N/s) değerinin dışına çıkılmıştır. Bunun için dikkate alınan sistematik yol aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 4.2'de ilan edilen deney için kullanılan 200 N/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen bu tür gerilme-hız-kontrollü kaya mekaniği deneylerinde tanımlanan 1 katsayısının altında ve üstünde yükleme hız (N/s) değerleri dikkate alınmıştır. Bu yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için Çizelge 4.18 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.16'da verilen son sütunda görüldüğü üzere ISRM (1981, 2007) önerisine karşılık gelen yükleme hızı 12 kN/dk iken parametrik bu çalışmada bu değer 0.9 kN/dk'ya kadar düşürülmüş ve 24 kN/dk'ya kadar artırılmıştır. Bir başka ifade ile ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı (200 N/s) bu çalışmada 0.08 - 2.0 kat aralığında değiştirilmiştir (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16'da son sütunda ifade edilen yükleme hız (kN/dk) değerleri dikkate alınarak servo kontrollü hidrolik preste gerilme-hız-kontrollü deneyler, tüm model yapay kaya malzemeleri (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.16. Gerilme kontrollü DÇD ve DÇ-DEF deneylerine ait farklı yükleme hız değerleri

Seçilen Oran	Hesaplanan Yükleme Hızı, F Seçilen Oran x 200 N/s	Hesaplanan Yükleme Hızı, F
(-)	(N/s)	(kN/dk)
0.08	15	0.9
0.15	30	1.8
0.38	75	4.5
0.67	133,33	8
1.00 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	1 x 200 = 200	12
1.33	266.67	16
1.67	333.33	20
2.00	400	24

Yukarıda sunulan bölüm 4.4.1.1 ve 4.4.1.2'de ifade edilen yükleme hız koşulları altında beş farklı dayanıma sahip YKM için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, takip eden başlıklarda sunulmuştur. Farklı dayanımlara sahip YKM model örneklerinde elde edilen sonuçlara ait grafikler YKM-1 için aşağıda verilirken YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5 için bu grafikler ekler kısmında verilmiş ancak ilgili çizelgeler aşağıda sunulmuştur.

4.4.2. 0-20 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-1) ait deneysel sonuçlar

YKM-1 olarak tanımlı beton yapay kaya birimi üzerinde tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri

gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.4.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-1 için gerçekleştirilen deneyler

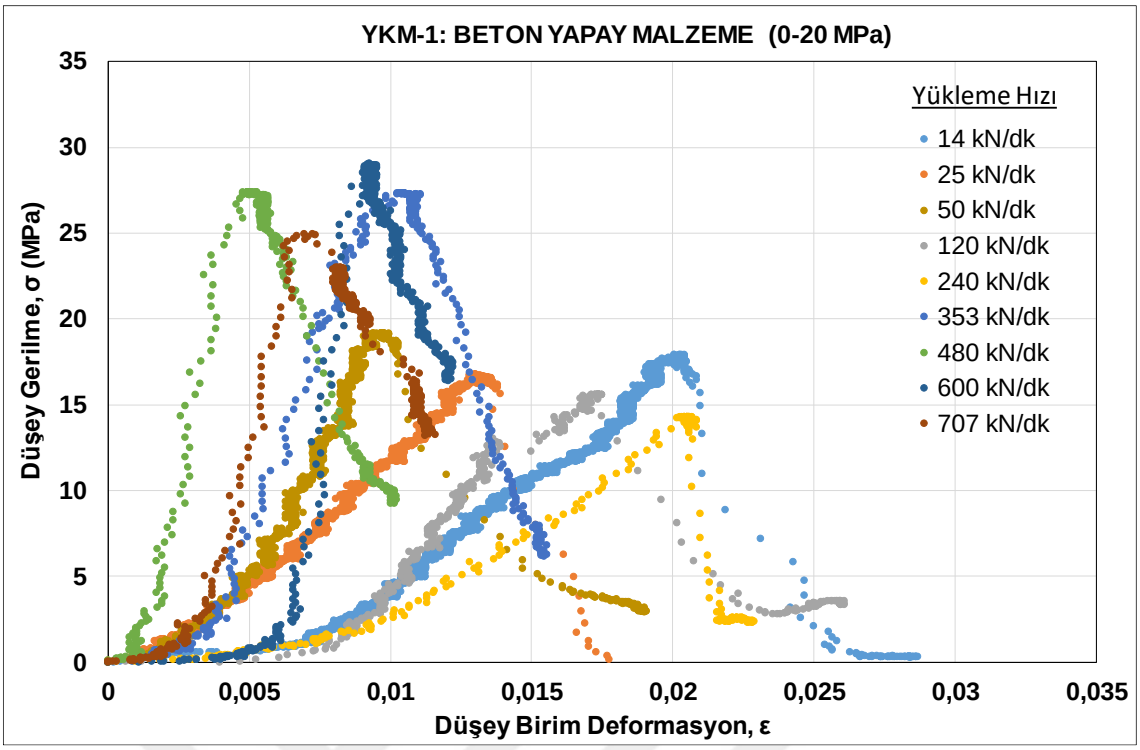
Tek eksenli düşey gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı basma dayanımı deneylerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırlarının dışına çıkılmıştır. Yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen sistematik Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15'nin son sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulan grafikler hazırlanmıştır.

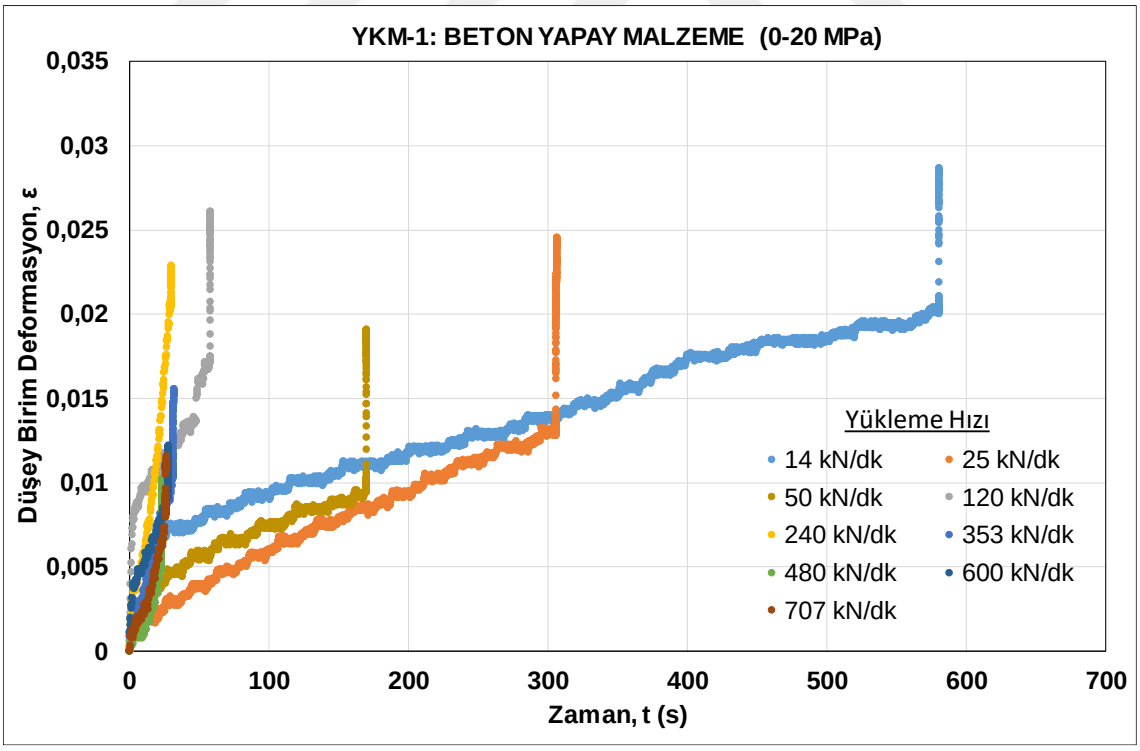
Şekil 4.5'te farklı yükleme hızlarında farklı yenilme değerlerinin (σ_c', MPa) ortaya çıktığı genel olarak görülmektedir. Yükleme hızı arttıkça yenilme öncesinde gerilme-birim deformasyon doğrusal davranış bölgelerindeki eğri eğimlerinin arttığı görülmektedir ($E_{i\text{-}TEB}'$, GPa). Yenilme sonrasında kaya örneği üzerindeki düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt edilebilmiştir. Yenilme sonrası bölge için ayrıca elastik modül ($E_{d\text{-}TEB}'$, GPa) değerleri hesaplanabilmiştir. Bu değerler Çizelge 4.17'da verilmiştir.

Gerilme-hız-kontrollü deneylerde sistematik olarak düzgün artırılan gerilme altında ortaya çıkan zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının son aşamasında örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır. Farklı yükleme hızlarına sahip örneklerde yükleme hızının azalması ile birlikte ikinci doğrusal davranış sürecinin daha uzun sürdüğü tespit edilmektedir (Şekil 4.6).

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) dikkate alınarak Çizelge 4.17 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.



Şekil 4.5. YKM-1 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



Şekil 4.6. YKM-1 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

Çizelge 4.17. YKM-1 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
14	579.4	17.93	1.268	1.822
25	305.2	16.77	1.506	3.015
50	169.6	19.16	2.662	1.958
120	57.8	15.54	2.348	2.352
240	29.6	14.25	0.983	9.339
353 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	31.4	27.33	3.563	5.751
480	22.6	27.37	10.040	4.408
600	27.2	29.04	11.738	3.940
707	24.6	24.94	7.126	2.795

4.4.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-1 için gerçekleştirilen deneyler

Brazilian dolaylı çekme gerilmesi altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı çekme dayanımı deneylerinde, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (200 N/s) değerinin dışına çıkılmıştır. Bunun için dikkate alınan sistematik yol Çizelge 4.16'de sunulmuştur.

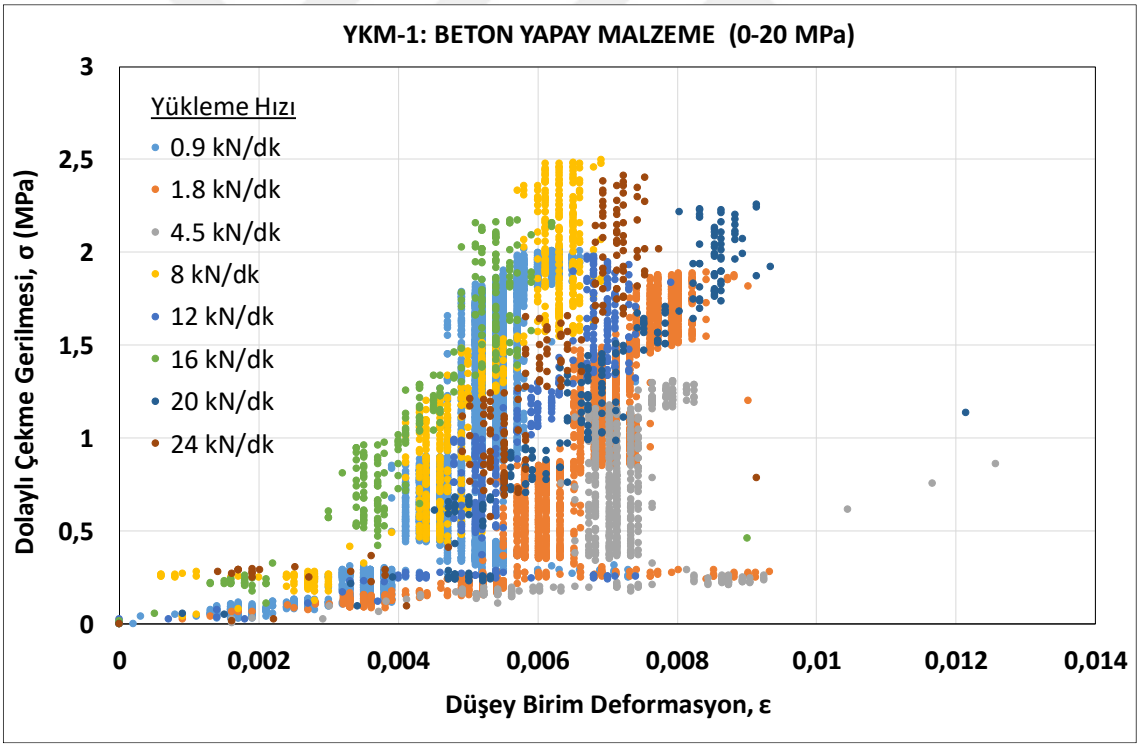
Çizelge 4.16'in son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilen grafikler hazırlanmıştır.

Farklı yükleme hızlarında farklı çekme yenilme değerlerinin (σ_{tB}', MPa) oluştuğu Şekil 4.7'de genel olarak görülmektedir. Yükleme hızı arttıkça yenilme öncesinde doğrusal gerilme-birim deformasyon davranış bölgelerindeki eğri eğimlerinin arttığı anlaşılmaktadır ($E_{i\text{-}DÇ}'$, GPa). Deney bitiminde örneğin dağılması nedeniyle yenilme

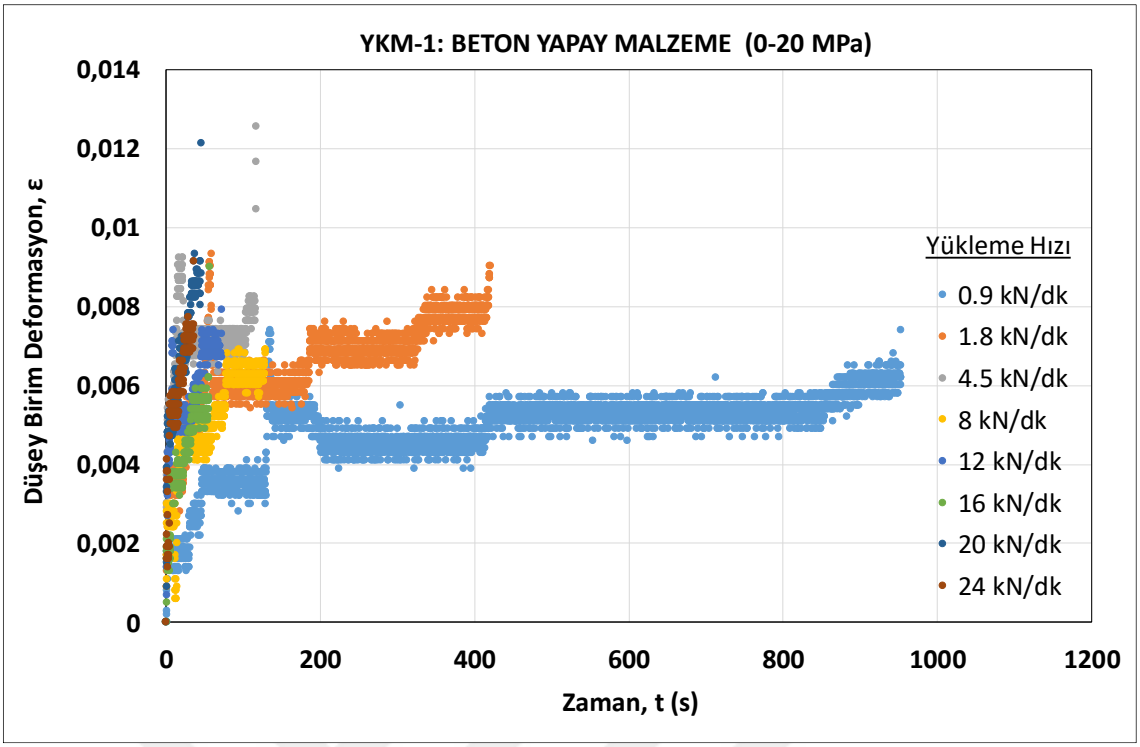
sonrasında kaya örneği üzerindeki gerilme ve birim deformasyon değerleri kayıt altına alınamamış ve yenilme sonrası deformabilite modülü ($E_{d\text{-}DÇ}'$, GPa) belirlenememiştir.

Şekil 4.8'de verilen gerilme-hız-kontrollü deneylerde sistematik olarak düzgün artırılan çekme gerilmesi altında ortaya çıkan zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının ikinci aşamalarının doğrusal karakterde olduğu anlaşılmaktadır. Yenilme sonrası örneklerin birden dağılmasından dolayı yenilme sonrası sürece ait veri kayıt altına alınamamıştır. Bundan dolayı grafiklerde Şekil 4.6'da olduğu gibi son yenilme süreci bu grafikte (Şekil 4.8) görülmemektedir. Ancak Şekil 4.8'de görülen doğrusal davranış sonrasında örnek kırılmıştır. Grafikte ikinci doğrusal sürecin yükleme hızı değerleri azaldıkça daha uzun sürdüğü görülmektedir.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) yardımıyla Çizelge 4.18 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.



Şekil 4.7. YKM-1 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



Şekil 4.8. YKM-1 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

Çizelge 4.18. YKM-1 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	950	2.01	1.142
1.8	418.8	1.89	0.638
4.5	121	1.46	0.056
8	128	2.49	0.529
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	71.2	1.98	0.414
16	54.8	2.17	0.418
20	44.2	2.26	0.400
24	35.4	2.41	0.587

4.4.3. 20-40 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-2) ait deneysel sonuçlar

YKM-2 olarak tanımlı beton yapay kaya birimi üzerinde tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.4.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-2 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.15'nin son sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK5'de (EK5/Şekil 17 ve EK5/Şekil 18) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları YKM-1 (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK5/Şekil 17 ve EK5/Şekil 18) dikkate alınarak Çizelge 4.19 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

4.4.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-2 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.16'nın son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme

gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla (EK5/Şekil 19 ve EK5/Şekil 20)'de verilen grafikler hazırlanmıştır. EK-1'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının YKM-1 (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK5/Şekil 19 ve EK5/Şekil 20) yardımıyla Çizelge 4.20 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.19. YKM-2 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
14	1162	35.73	8.337	4.491
25	830.6	45.25	11.146	2.824
50	451.8	49.83	16.629	4.924
120	155.2	41.69	12.956	2.702
240	1162	35.73	7.104	3.701
353 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	57.4	48.04	17.633	5.594
480	38	44.94	12.079	3.682
600	30.8	44.47	13.270	3.140
707	31.6	49.91	13.550	2.184

Çizelge 4.20. YKM-2 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	1188.4	2.54	1.207
1.8	760.6	3.23	1.008
4.5	296.2	3.22	0.842
8	162.2	3.24	0.617
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	98.4	3.09	0.762
16	86	3.45	0.723
20	59.6	3.08	0.529
24	1.2	0.27	0.748

4.4.4. 40-60 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-3) ait deneysel sonuçlar

YKM-3 olarak tanımlı beton yapay kaya birimi (C50) üzerinde tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.4.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-1 için gerçekleştirilen deneyler

Tek eksenli düşey gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı basma dayanımı deneylerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırlarının dışına çıkılmıştır. Yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen sistematik Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15'in son sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. EK6'da (EK6/Şekil 21 ve EK6/Şekil 22) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları YKM-1 (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK6/Şekil 21 ve EK6/Şekil 22) dikkate alınarak Çizelge 4.21 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.21. YKM-3 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
14	2041.2	62.41	3.061	1.444
25	1140.6	62.23	2.322	1.011
50	522.2	59.00	2.428	1.092
120	220.2	64.82	20.319	0.961
240	103.2	65.84	16.620	0.927
353 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	58	64.89	6.859	1.257
480	28.2	44.38	5.051	1.082
600	32.4	55.65	5.632	1.536
707	31	56.00	6.056	1.805

4.4.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-3 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.16'nın son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla (EK6/Şekil 23 ve EK6/Şekil 24)'de verilen grafikler hazırlanmıştır. EK-1'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının YKM-1 (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK6/Şekil 23 ve EK6/Şekil 24) yardımıyla Çizelge 4.22 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.22. YKM-3 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	803.6	2.99	0.517
1.8	743.8	3.22	1.701
4.5	312	3.37	0.306
8	249.6	4.83	0.568
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	146.4	4.13	0.835
16	115.2	4.43	0.850
20	81.6	3.99	0.885
24	47.4	3.02	0.570

4.4.5. 60-80 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar

YKM-4 olarak tanımlı beton yapay kaya birimi üzerinde tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.4.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-4 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.15'nin son sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK7'de (EK7/Şekil 25 ve EK7/Şekil 26) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları YKM-1 (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler EK7'de (EK7/Şekil 25 ve EK7/Şekil 26) dikkate alınarak Çizelge 4.23 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.23. YKM-4 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
14	2740.8	84.86	12.926	0.983
25	1375.2	75.81	9.147	1.066
50	562.6	61.98	9.677	1.107
120	121.6	38.40	4.516	2.547
240	128.2	85.00	8.554	1.119
353 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	76.4	84.60	14.644	1.063
480	52.6	92.35	8.398	0.904

600	31.4	88.36	10.868	0.878
707	34.4	86.69	10.597	0.932

4.4.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-4 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.16'nın son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla (EK7/Şekil 27 ve EK7/Şekil 28)'de verilen grafikler hazırlanmıştır. EK-1'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının YKM-1 (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK7/Şekil 27 ve EK7/Şekil 28) yardımıyla Çizelge 4.24 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.24. YKM-4 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	337.8	0.75	0.435
1.8	265.4	2.69	0.694
4.5	519.2	5.61	1.487
8	306.2	5.96	1.554
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	191.6	5.46	1.915
16	116.6	4.61	0.795
20	111.8	5.43	0.857
24	102.8	6.10	1.718

4.4.6. 80-100 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-5) ait deneysel sonuçlar

YKM-5 olarak tanımlı beton yapay kaya birimi üzerinde tek eksenli basma dayanımı ve Brazilian çekme dayanımı olmak üzere iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan 9 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve Brazilian çekme dayanımı deneyleri için hazırlanan 8 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı yükleme hızlarında bir seri gerilme kontrollü deneylere maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.4.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-5 için gerçekleştirilen deneyler

Tek eksenli düşey gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı basma dayanımı deneylerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırlarının dışına çıkılmıştır. Yükleme hız değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen sistematik Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15'in son sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü tek eksenli basma dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK8'de (EK8/Şekil 29 ve EK8/Şekil 30) sunulan grafikler hazırlanmıştır. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-düşey gerilme ve zaman-düşey birim deformasyon davranışları YKM-1 (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) örneklerinde olduğu gibi benzer davranış göstermiştir. Ancak dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK8/Şekil 29 ve EK8/Şekil 30) dikkate alınarak Çizelge 4.25 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.25. YKM-5 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen TEBD ve TEB-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Tek Eksenli Basma Dayanımı, TEBD σ_c'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{i\text{-}TEB}'$	Yenilme Sonrası Tek Eksenli Deformabilite, TEB-DEF $E_{d\text{-}TEB}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)	(GPa)
14	2685.2	81.74	8.072	0.591
25	1682	92.26	12.947	0.565
50	796.2	89.58	11.726	0.641
120	317.4	91.34	10.992	0.703
240	133	88.12	7.651	0.681
353 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	66.4	80.01	8.691	0.814
480	60.8	100.12	11.812	0.689
600	38.4	87.37	9.298	0.871
707	31.2	94.65	10.275	0.492

4.4.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı yükleme hızlarında YKM-5 için gerçekleştirilen deneyler

Çizelge 4.16'nın son sütununda belirtilen koşullar altında gerilme kontrollü Brazilian dolaylı çekme dayanım deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında 0.02 saniye aralıklarında pres üzerinden çekme gerilmesine neden olan düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. Oluşturulan veri tabanı yardımıyla (EK8/Şekil 31 ve EK8/Şekil 32)'de verilen grafikler hazırlanmıştır. EK-1'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere düşey birim deformasyon-dolaylı çekme gerilmesi ve zaman-düşey birim deformasyon davranışlarının YKM-1 (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) örneklerinde olduğu gibi davranışlarının benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte dayanım değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonrasında hazırlanan grafikler (EK8/Şekil 31 ve EK8/Şekil 32) yardımıyla Çizelge 4.26 hazırlanmıştır. Değerlendirmeler bir sonraki tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.28. YKM-5 için farklı yükleme hızlarında gerçekleştirilen DÇD ve DÇ-DEF deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler

Yükleme Hızı, F	Deney Süresi, t	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD σ_{tB}'	Yenilme Öncesi Tek Eksenli Deformabilite, DÇ-DEF $E_{i\text{-}DÇ}'$
(kN/dk)	(s)	(MPa)	(GPa)
0.9	2526.4	5.29	2.797
1.8	1195.8	5.06	1.093
4.5	547.2	5.92	2.514
8	252.8	4.94	0.880
12 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	177	4.99	0.908
16	59.8	2.43	1.024
20	130.8	6.34	1.615
24	108.2	6.39	2.088

4.5. Doğal Kaya Malzemeleri (DKM) için Sabit-Gerilme-Kontrollü-Sünme Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup2/DKM)

Bu bölümdeki çalışmalar servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Aşağıda farklı dayanımlara sahip DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 doğal kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) deney sonuçları sunulmuştur.

4.5.1. Doğal model kaya malzemeleri (DKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde sabit yük koşullarının tespiti

Beş farklı dayanıma sahip olacak şekilde doğal model kaya malzemeleri çeşitli maden ocaklarından temin edilmiştir. Bölüm 3'de detayları ile değinilen bu model doğal kaya malzemeleri (DKM) sırasıyla 0-20 MPa aralığı için tüf kaya birimi, 20-40 MPa aralığı için Sille andezit kaya birimi, 40-60 MPa aralığı için Karaman traverten kaya birimi, 60-80 MPa aralığı için Marmara mermer kaya birimi ve 80-100 MPa aralığı için Kayseri Bazalt kaya birimi olmuştur. Seçilen model yapay birimlerinden araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri için ilgili örnekler ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur.

Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4, DKM-5) üzerinde düşey yönde hazırlanan tek eksenli basma ile iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırası ile sünme-tek eksenli basma (S-TEB, $t_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$) ve sünme-dolaylı çekme (S-DÇ, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$) deneyleri olmuştur.

Her bir dayanım sınıfına ait S-TEB deneyleri için hazırlanan toplam 25 (5x5) adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3{,}0$) ile S-DÇ deneyleri için hazırlanan toplam 25 (5x5) adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile her bir örnek için ayrı ayrı olmak üzere sabit yük değerlerinde bir seri sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Takip eden kısımda farklı sabit gerilmelerin uygulandığı sünme koşullarının tespitinde izlenen yol S-TEB ve S-DÇ deneyleri için detayları ile sunulmuştur.

4.5.1.1. S-TEB deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti

Temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtan Çizelge 4.1'de görülen TEBD (σ_c) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) aralığından seçilen 0.75 MPa/s'de gerçekleştirilen deney sonuçlarıdır. Ancak burada örnekler üzerinde farklı sabit gerilmeler yaratılarak malzeme davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Temel kaya mekaniği deneyleri esnasında belirlenen tek eksenli basma dayanım (TEBD, σ_c) değerleri dikkate alınmış ve bu gerilme değerlerinin sırasıyla 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 katları alınarak uygulanacak sabit gerilme değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sabit gerilme ve buna bağlı sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için izlenen yol aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1'de sunulan TEBD ve TEB-DEF deneyleri için seçilen 0.75 MPa/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme türündeki kaya mekaniği deneylerinde 1 katsayısının altında parametrik katsayılar seçilmiştir. Seçilen bu değerlere karşılık gelen sabit gerilme ve yükleme (MPa, kN) değerleri, örnek çapı D=54 mm ve temsilen TEBD değeri 100 MPa olan bir durum için örnek olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.29 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.29'da verilen ilk sütunda seçilen oran değerleri, ikinci sütunda ise belirlenen sabit gerilme değerleri görülmektedir. Üçüncü sütunda, ikinci sütunda belirlenen sabit gerilme değerlerine karşılık gelen sabit yük değerleri hesaplanmıştır. Sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük değerine ulaşıncaya kadar olan deneyin ilk sürecinde yükleme koşulu ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı 0.5-1 MPa/s aralığından 0.75 MPa/s uygulanmıştır. Deney için örnek servo kontrollü hidrolik

prese yerleştirildikten sonra pres 0.75 MPa/s yükleme hızı ile çalıştırılmış ve istenen yük değerine ulaşınca servo kontrollü hidrolik presin yük değerini sabitleme sistemi devreye girmiştir. Deney istenen sabit yük değerinde devam etmiş ve tamamlanmıştır.

Örnek çapı (D) 54 mm ve temsilen TEBD değeri 100 MPa seçilen bir durumda sabit yük (kN) değerlerinin farklı örneklerde 228.91 kN' dan 114.45 kN'ye kadar düşürüldüğü Çizelge 4.29'dan anlaşılmaktadır. Çizelge 4.29'da sunulan yaklaşım DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 için her birinin farklı TEBD değerleri dikkate alınarak ayrı ayrı kullanılmıştır.

Servo kontrollü hidrolik preste sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneyleri, tüm model doğal kaya malzemeleri (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçları takip eden bölümlerde sunulmuştur.

Çizelge 4.29. Sabit yük kontrollü S-TEB sünme deneylerinde sabit gerilme ve yük koşullarını belirleme yaklaşımı (Bu çizelge, D = 54 mm ve TEBD = 100 MPa için temsilen hazırlanmıştır)

Seçilen Oran	Hesaplanan Sabit Gerilme, σ Seçilen Oran x TEBD	Hesaplanan Sabit Yük, F σ=F/A'dan	Uygulanan Sabit Yük Değerine Ulaşıncaya Kadar Başlangıçta Uygulanan Yükleme Hızı
(-)	(MPa)	(kN)	(MPa/s)
1.00 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	1 x 100 MPa = 100	228.91	0.75
0.9	90	206.02	0.75
0.8	80	183.12	0.75
0.7	70	160.23	0.75
0.6	60	137.34	0.75
0.5	50	114.45	0.75

4.5.1.2. S-DÇ deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti

Çizelge 4.1'de görülen DÇD (σ_{tB}) ve DÇ-DEF ($E_{i\text{-}DÇ}$) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen 200 N/s yükleme hızında gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtmaktadır. Ancak burada örnekler üzerinde farklı sabit gerilmeler yaratılarak malzeme davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Temel kaya mekaniği deneyleri esnasında belirlenen dolaylı çekme dayanım (DÇD, σ_{tB}) değerleri dikkate alınmış ve bu gerilme değerlerinin sırasıyla 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 katları alınarak

uygulanacak sabit gerilme değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sabit gerilme ve buna bağlı sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için izlenen yol aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1'de ilan edilen deney için kullanılan 200 N/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme türündeki kaya mekaniği deneylerinde 1 katsayısının altında parametrik katsayılar seçilmiştir. Seçilen bu değerlere karşılık gelen sabit gerilme ve yükleme (MPa, kN) değerleri, örnek çapı D=54 mm ve temsilen DÇD değeri 10 MPa olan bir durum için örnek olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.30 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.30'da verilen ilk sütunda seçilen oran değerleri, ikinci sütunda ise belirlenen sabit gerilme değerleri görülmektedir. Üçüncü sütunda, ikinci sütunda belirlenen sabit gerilme değerlerine karşılık gelen sabit yük değerleri hesaplanmıştır. Sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük değerine ulaşıncaya kadar olan deneyin ilk sürecinde yükleme koşulu ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı 200 N/s uygulanmıştır. Deney için örnek servo kontrollü hidrolik prese yerleştirildikten sonra pres 200 N/s yükleme hızı ile çalıştırılmış ve istenen yük değerine ulaşınca servo kontrollü hidrolik presin yük değerini sabitleme sistemi devreye girmiştir. Deney istenen sabit yük değerinde devam etmiş ve tamamlanmıştır.

Örnek çapı (D) 54 mm ve temsilen DÇD değeri 10 MPa seçilen bir durumda sabit yük (kN) değerlerinin farklı örneklerde 22.89 kN' dan 11.45 kN'e kadar düşürüldüğü Çizelge 4.30'dan anlaşılmaktadır. Çizelge 4.30'da sunulan yaklaşım DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 için her birinin farklı DÇD değerleri dikkate alınarak ayrı ayrı kullanılmıştır.

Servo kontrollü hidrolik preste sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneyleri dolaylı çekme gerilmesi yaratılarak tüm model doğal kaya malzemeleri (DKM-1, DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçları takip eden bölümlerde sunulmuştur.

Yukarıda sunulan bölüm 4.5.1.1 ve 4.5.1.2'de ifade edilen sabit yükleme koşulları altında beş farklı dayanıma sahip DKM'ler için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, takip eden başlıklarda sunulmuştur.

Çizelge 4.30. Sabit yük kontrollü S-DÇ sünme deneylerinde sabit gerilme ve yük koşullarını belirleme yaklaşımı (Bu çizelge, D = 54 mm, t/D = 0.5 ve DÇD = 10 MPa için temsilen hazırlanmıştır)

Seçilen Oran	Hesaplanan Sabit Gerilme, σ Seçilen Oran x DÇD	Hesaplanan Sabit Yük, F σ=F/A'dan	Uygulanan Sabit Yük Değerine Ulaşıncaya Kadar Başlangıçta Uygulanan Yükleme Hızı
(-)	(MPa)	(kN)	(N/s)
1.00 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	1 x 10 MPa = 200	22.89	200
0.9	9	20.60	200
0.8	8	18.31	200
0.7	7	16.02	200
0.6	6	13.73	200
0.5	5	11.45	200

4.5.2. 0-20 MPa aralığında yer alan Konya-Hatunsaray tüf kaya birimine (DKM-1) ait deneysel sonuçlar

DKM-1 olarak tanımlı Konya-Hatunsaray tüf kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.5.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

Tek eksenli düşey sabit gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı S-TEB deneylerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırları içerisinden seçilen 0.75 MPa/s koşulunda TEBD deneyleri gerçekleştirilmiştir. DKM-1 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 19.56 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge

4.29) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.31).

Çizelge 4.31'ün ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.9'da sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.31. DKM-1 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-1 için σ_c=19.56 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	19.56	44.77	4.6	$10.463\ 10^{-5}$	0.896	7.4	$26.158\ 10^{-5}$	4.473
0.9	17.60	40.30	1.2	$10.691\ 10^{-5}$	0.441	4.8	$37.417\ 10^{-5}$	4.656
0.8	15.65	35.82	19.0	$29.767\ 10^{-4}$	15.426	2523.6	$41.255\ 10^{-4}$	15.426
0.7	13.69	31.34	10.6	$28.835\ 10^{-4}$	13.436	61.2	$26.738\ 10^{-4}$	13.316
0.6	11.74	26.86	-	-	-	-	-	-
0.5	9.78	22.39	-	-	-	-	-	-

Şekil 4.9'da DKM-1 kaya birimi için S-TEB türü deneylerde gerçekleştirilen farklı sabit yükleme koşullarında elde edilen zaman-düşey birim deformasyon (a), düşey birim deformasyon-gerilme (b) ve zaman-gerilme davranışları (c) görülmektedir. Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.31'de sunulmuştur. Bilindiği gibi kaya malzemelerinin sünme davranışları özellikle zaman-düşey birim deformasyon eğrilerinde üç aşama şeklinde görülmektedir. Bunlardan aşama-1'de kaya malzemesindeki gözenekler ve çatlaklar kapanmakta, aşama-2'de kaya malzemesi elastik sınırlar içerinde davranmakta ve aşama-3'te ise kaya malzemesi elasto-plastik davranış sergileyerek yenilmektedir. DKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler $1\sigma_c$, $0.9\sigma_c$ ve $0.8\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.31) üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.7\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (Şekil 4.9a,c). Şekil 4.9b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.7\sigma_c$ için gerilme değerinin 13.69 MPa (F=31.34kN, Çizelge 4.31) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Aynı grafikten $0.8\sigma_c$ için ise gerilme

değerinin 15.65 MPa (F=35.82kN, Çizelge 4.31) iken sabit kaldığı ancak pekleşme sonrasında örneğin kırıldığı görülmektedir. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (Şekil 4.9) dikkate alınarak Çizelge 4.31 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

4.5.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

Brazilian dolaylı çekme gerilmesi altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı S-DÇ deneylerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (200 N/s) değerinde DÇD deneyleri gerçekleştirilmiştir. DKM-1 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 1.89 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.30) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.32).

Çizelge 4.32'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.10'da sunulan grafikler hazırlanmıştır.

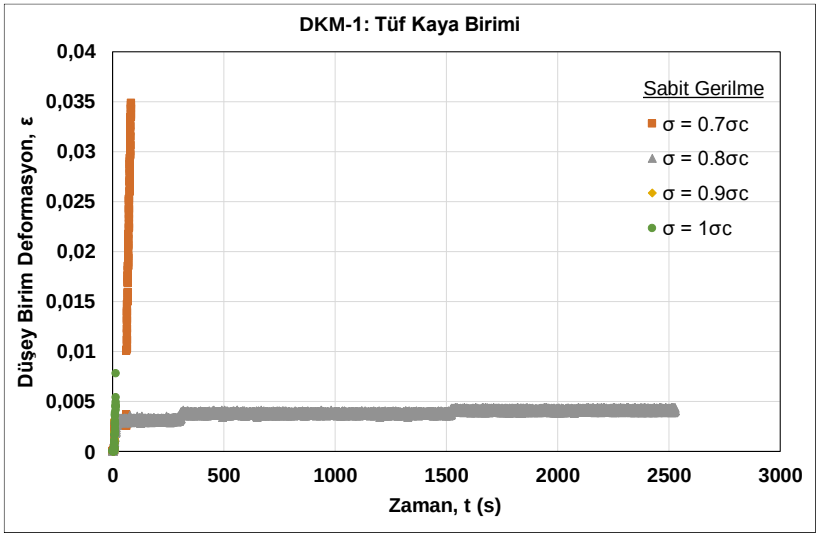
Şekil 4.10'da DKM-1 kaya birimi için S-DÇ türü deneylerde gerçekleştirilen farklı sabit yükleme koşullarında elde edilen zaman-düşey birim deformasyon (a), düşey birim deformasyon-gerilme (b) ve zaman-gerilme davranışları (c) sunulmuştur. Çizelge 4.32'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. Zaman-düşey birim deformasyon eğrilerinde kaya malzemelerinin sünme davranışları birbirini takip eden üç aşama şeklinde görülmektedir. Sabit yük altındaki kaya malzemesindeki gözeneklerin ve çatlakların kapanması Aşama-1'de, kaya malzemesinin elastik sınırlar içerinde davranması aşama-2'de ve kaya malzemesi elasto-plastik davranış sergileyerek yenilmesi ise aşama-3'te ortaya çıkmaktadır. DKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.32) açısından $1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (Şekil 4.10a,c). Şekil 4.10b'de görülen düşey birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_c$ için gerilme değerinin 1.51

MPa (F=3.46kN, Çizelge 4.32) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Aynı grafikten $0.9\sigma_c$ için ise gerilme değerinin 1.70 MPa (F=3.89kN, Çizelge 4.32) iken bir müddet sabit kaldığı ancak pekleşme sonrasında örneğin kırıldığı görülmektedir.

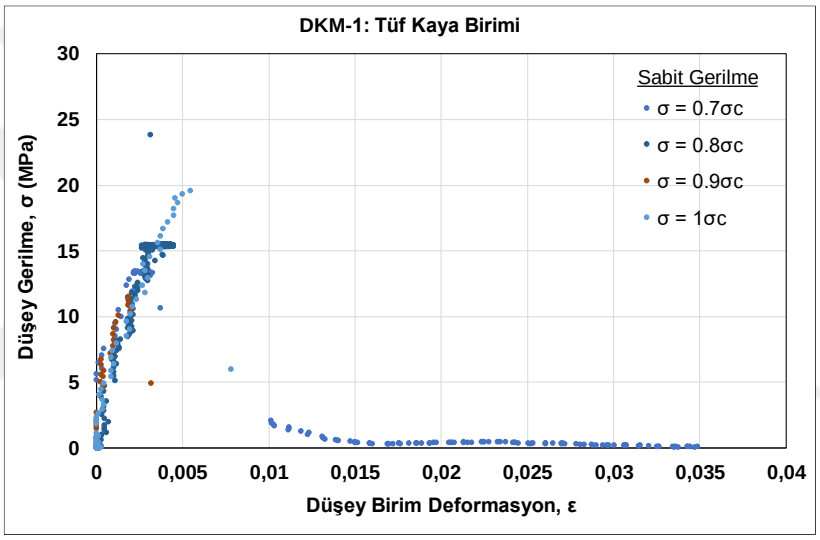
Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (Şekil 4.10) dikkate alınarak Çizelge 4.32 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.32. DKM-1 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler (DKM-1 için σ_{tB}=1.89 MPa)

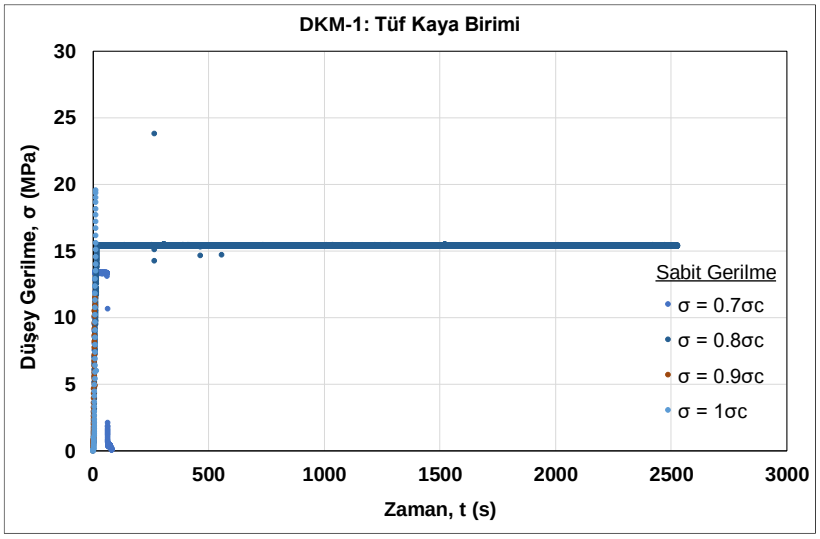
Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	1.89	4.33	1	23.519 10^{-4}	0.147	55.4	80.179 10^{-4}	1.890
0.9	1.70	3.89	5.8	39.517 10^{-4}	0.252	54	91.851 10^{-4}	1.693
0.8	1.51	3.46	35	53.282 10^{-4}	1.164	2565.2	1.012 10^{-2}	1.471
0.7	1.32	3.03	-	-	-	-	-	-
0.6	1.13	2.60	-	-	-	-	-	-
0.5	0.95	2.16	-	-	-	-	-	-



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

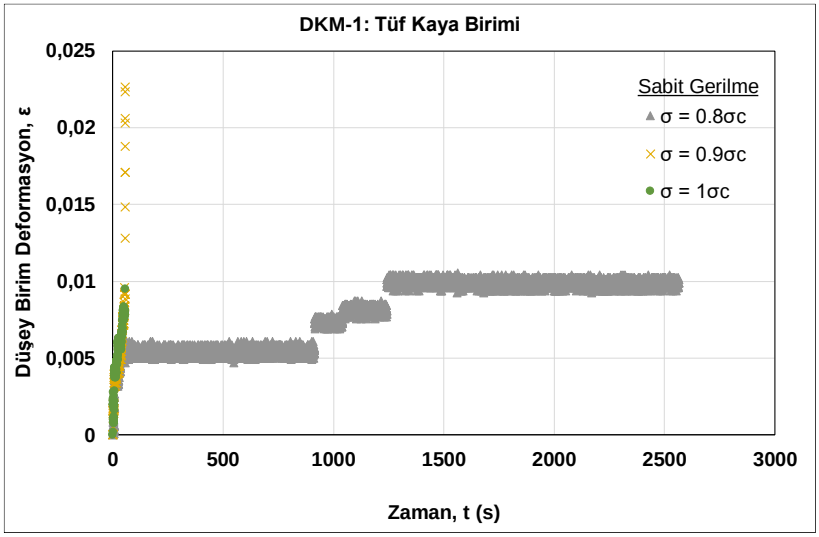


b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

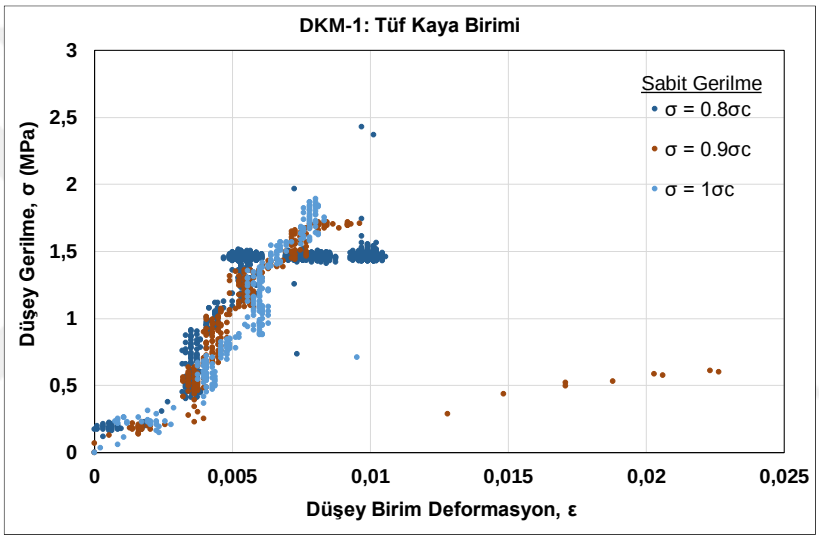


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

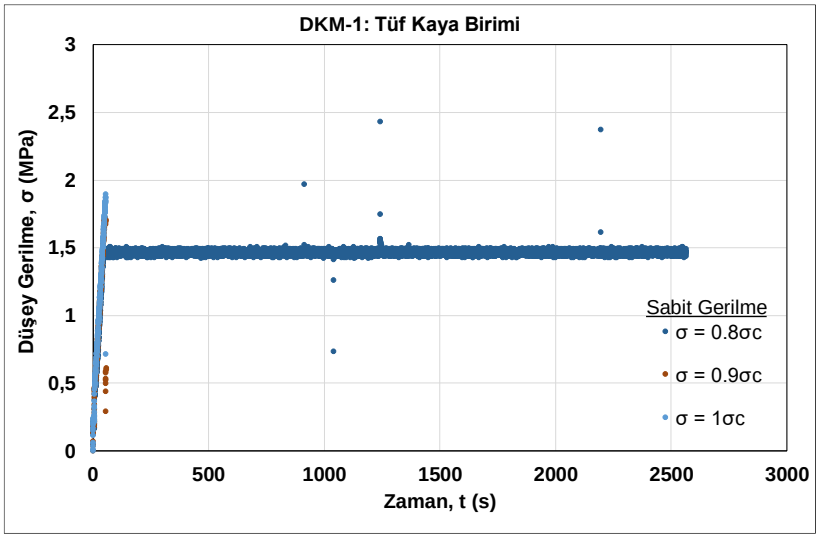
Şekil 4.9. DKM-1 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-düşey birim deformasyon, b) düşey birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

Şekil 4.10. DKM-1 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

4.5.3. 20-40 MPa aralığında yer alan Konya-Sille andezit kaya birimine (DKM-2) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada DKM-2 olarak tanımlanan Konya-Sille andezit kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.5.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-2 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 38.89 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.29) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.33).

Çizelge 4.33'ün ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK9/Şekil 33'te sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.33'te sunulmuştur. DKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$, $0.9\sigma_c$, $0.8\sigma_c$, $0.7\sigma_c$ ve $0.65\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.33) beş örnekte üç sünme aşaması yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.6\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK9/Şekil 33a,c). EK9/Şekil 33b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.6\sigma_c$ için gerilme değerinin 23.33 MPa (F=53.41kN, Çizelge 4.33) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Aynı grafikten $0.65\sigma_c$ için ise gerilme değerinin 25.28 MPa (F=57.86kN, Çizelge 4.33) iken bir süre sabit kaldığı ancak pekleşme

sonrasında örneğin kırıldığı görülmektedir. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK9/Şekil 33) dikkate alınarak Çizelge 4.33 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.33. DKM-2 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-2 için σ_c=38.89 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	38.89	89.02	1.8	77.109 10^{-5}	0.058	8.2	66.094 10^{-5}	1.412
0.9	35.00	80.12	9.6	88.119 10^{-5}	3.928	32.0	76.716 10^{-4}	29.506
0.8	31.11	71.22	6.8	41.673 10^{-5}	0.727	21.8	1.052 10^{-2}	21.858
0.7	27.22	62.32	2.8	52.083 10^{-5}	0.936	12.4	60.938 10^{-4}	18.209
0.65	25.28	57.86	19.2	74.319 10^{-4}	25.299	1518.2	1.058 10^{-2}	25.240
0.6	23.33	53.41	472.2	71.552 10^{-4}	22.441	2601.8	71.029 10^{-4}	22.434
0.5	19.45	44.51	-	-	-	-	-	-

4.5.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-2 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 3.07 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.30) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.34).

Çizelge 4.34'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK9/Şekil 34'te sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.34'te grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. DKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.34)

açısından $1\sigma_c$, $0.9\sigma_c$, $0.8\ \sigma_c$ ve $0.7\ \sigma_c$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.6\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK9/Şekil 34a,c). EK9/Şekil 34b görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.6\sigma_c$ için gerilme değerinin 1.84 MPa (F=4.22kN, Çizelge 4.34) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK9/Şekil 34) dikkate alınarak Çizelge 4.34 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.34. DKM-2 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-2 için σ_{tB}=3.07 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	3.07	7.03	1.8	$30.904\ 10^{-4}$	0.289	70.6	$69.267\ 10^{-4}$	3.073
0.9	2.76	6.32	2.4	$37.313\ 10^{-4}$	0.268	53.8	$67.164\ 10^{-4}$	2.317
0.8	2.46	5.62	7.0	$18.101\ 10^{-4}$	0.499	73.4	$35.136\ 10^{-4}$	2.350
0.7	2.15	4.92	2.4	$55.390\ 10^{-4}$	0.298	50.0	$78.824\ 10^{-4}$	1.718
0.6	1.84	4.22	49.0	$41.587\ 10^{-4}$	1.667	2425	$44.786\ 10^{-4}$	1.737
0.5	1.54	3.51	-	-	-	-	-	-

4.5.4. 40-60 MPa aralığında yer alan Karaman traverten kaya birimine (DKM-3) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada DKM-3 olarak tanımlanan Karaman traverten kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.5.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-3 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 60.29 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.29) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.35).

Çizelge 4.35. DKM-3 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-3 için σ_c=60.29 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	60.29	138.01	4.2	57.342 10^{-5}	0.059	70.2	32.842 10^{-4}	60.143
0.9	54.26	124.21	7.4	15.614 10^{-5}	0.893	64.2	46.841 10^{-4}	53.434
0.8	48.23	110.41	5.2	73.518 10^{-5}	0.152	22.6	40.959 10^{-4}	27.332
0.75	45.22	103.51	9.6	52.621 10^{-5}	3.679	38.6	31.046 10^{-4}	41.359
0.7	42.20	96.61	41.4	39.913 10^{-4}	36.761	2539.6	41.468 10^{-4}	42.229
0.6	36.17	82.80	-	-	-	-	-	-
0.5	30.15	69.00	-	-	-	-	-	-

Çizelge 4.35'ün ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.49'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.35'te sunulmuştur. DKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$, $0.9\sigma_c$, $0.8\sigma_c$ ve $0.75\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.35) dört örnekte üç sünme aşaması yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.7\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK10/Şekil 35a,c). EK10/Şekil 35b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.7\sigma_c$ için gerilme değerinin 42.20 MPa (F=96.61kN, Çizelge 4.35) iken sabit kaldığı

örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK10/Şekil 35) dikkate alınarak Çizelge 4.35 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

4.5.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-3 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 5.38 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.30) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.36).

Çizelge 4.36'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK10/Şekil 36'da sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.36'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. DKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.36) açısından $1\sigma_c$, $0.9\sigma_c$ ve $0.8\ \sigma_c$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.7\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK10/Şekil 36a,c). EK10/Şekil 36b görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.7\sigma_c$ için gerilme değerinin 4.04 MPa (F=9.24kN, Çizelge 4.36) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK10/Şekil 36) dikkate alınarak Çizelge 4.36 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.36. DKM-3 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-3 için σ_{tB}=5.38 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	5.38	12.32	2.4	12.792 10^{-4}	0.053	175.4	46.953 10^{-4}	5.378
0.9	4.84	11.08	13.0	30.877 10^{-4}	0.615	246.2	77.726 10^{-4}	4.941
0.8	4.30	9.85	8.0	55.473 10^{-4}	0.439	186.4	56.539 10^{-4}	4.106
0.7	4.04	9.24	500.0	18.122 10^{-4}	3.589	2421.8	17.056 10^{-4}	3.599
0.6	3.77	8.62	-	-	-	-	-	-
0.5	3.23	7.39	-	-	-	-	-	-

4.5.5. 60-80 MPa aralığında yer alan Marmara mermer kaya birimine (DKM-4) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada DKM-4 olarak tanımlanan Marmara mermer kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.5.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-4 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 70.76 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.29) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.37).

Çizelge 4.37'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK11/Şekil 37'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.37'de sunulmuştur. DKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$, $0.9\sigma_c$, $0.8\sigma_c$, $0.75\sigma_c$ ve $0.7(2)\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.37) beş örnekte üç sünme aşaması görülmüş ve yenilme gerçekleşmiştir. Ancak oran $0.5\sigma_c$, ve $0.6\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve yenilmemiştir (EK11/Şekil 37a,c). EK11/Şekil 37b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.5\sigma_c$, $0.6\sigma_c$ için hedeflenen gerilme değerinin sırası ile 35.38 MPa (F=80.99kN, Çizelge 4.37) ve 42.46 MPa (F=97.18kN, Çizelge 4.37) olduğunda yükün örnek üzerinde sabit kaldığı örneğin yenilmediği görülmüştür. Bununla birlikte $0.7(1)\sigma_c$ oranında deneye tabi tutulan örnekte üzerindeki hedeflenen sabit gerilme 49.53 MPa (F=113.38kN, Çizelge 4.37) seviyesinde iken pekleşmenin sürdüğü ancak daha sonra malzemenin kırıldığı gözlenmiştir. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK11/Şekil 37) dikkate alınarak Çizelge 4.37 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.37. DKM-4 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-4 için σ_c=70.76 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	70.76	161.97	6.4	99.555 10^{-5}	5.932	55.0	23.578 10^{-4}	45.143
0.9	63.68	145.78	13.8	215.336 10^{-5}	15.702	48.6	67.227 10^{-4}	42.048
0.8	56.61	129.58	15.8	12.079 10^{-4}	14.226	74.8	39.391 10^{-4}	57.755
0.75	53.07	121.48	3.8	73.626 10^{-5}	1.691	69.4	52.064 10^{-4}	53.864
0.7 (1)	49.53	113.38	62.2	58.728 10^{-4}	49.677	920.6	58.728 10^{-4}	50.597
0.7 (2)	49.53	117.62	4.2	20.974 10^{-4}	0.3711	56.6	48.241 10^{-4}	53.796
0.6	42.46	97.18	38.0	21.038 10^{-4}	30.608	3002.4	19.460 10^{-4}	43.395
0.5	35.38	80.99	50.4	29.907 10^{-4}	36.170	2726.8	25.709 10^{-4}	36.179

4.5.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-4 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 3.58 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.30) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.38).

Çizelge 4.38'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK11/Şekil 38'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.38'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. DKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.38) açısından $1\sigma_c$, ve $0.9\sigma_c$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını görmüş ve kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK11/Şekil 38a,c). EK11/Şekil 38b görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_c$ için gerilme değerinin 2.86 MPa (F=6.56kN, Çizelge 4.38) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK11/Şekil 38) dikkate alınarak Çizelge 4.38 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.38. DKM-4 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler (DKM-4 için σ_{tB}=3.58 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	3.58	8.19	7.2	$63.952\ 10^{-5}$	0.265	108.0	$10.659\ 10^{-5}$	3.141
0.9	3.22	7.38	19.2	$22.369\ 10^{-4}$	0.761	2420.4	$37.282\ 10^{-4}$	3.298
0.8	2.86	6.56	246.2	$57.569\ 10^{-4}$	2.913	2478.0	$66.098\ 10^{-4}$	2.879
0.7	2.51	5.74	-	-	-	-	-	-
0.6	2.15	4.92	-	-	-	-	-	-
0.5	1.79	4.10	-	-	-	-	-	-

4.5.6. 80-100 MPa aralığında yer alan Kayseri bazalt kaya birimine (DKM-5) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada DKM-5 olarak tanımlanan Kayseri bazalt kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 54 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.5.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-5 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 98.73 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.29) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.39).

Çizelge 4.39'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK12/Şekil 39'da sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.39'de sunulmuştur. DKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.39) deneye tabi tutulan iki örnekte üç sünme aşaması görülmüş ve yenilme gerçekleşmiştir. Ancak oran $0.7\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve yenilmemiştir (EK12/Şekil 39a,c). EK12/Şekil 39b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.7\sigma_c$ için hedeflenen gerilme değerinin 69.11 MPa (F=158.20kN, Çizelge 4.39) olduğunda yükün örnek üzerinde sabit kaldığı örneğin yenilmediği görülmüştür. Bununla birlikte $0.8\sigma_c$ oranında deneye tabi tutulan örnekte üzerindeki hedeflenen sabit gerilme 78.98 MPa (F=180.80kN, Çizelge 4.39) seviyesinde iken

pekleşmenin sürdüğü ancak daha sonra malzemenin yenildiği görülmüştür. Diğer örneklerde pekleşme süreçlerinin kısa sürdüğü ve örneklerin yenildiği anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK12/Şekil 39) dikkate alınarak Çizelge 4.39 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.39. DKM-5 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-5 için σ_c=98.73 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	98.73	226.00	15.2	18.953 10^{-4}	23.005	114.4	58.966 10^{-4}	98.729
0.9	88.86	203.40	15.4	23.680 10^{-4}	22.426	95.0	52.623 10^{-4}	83.248
0.8	78.98	180.80	97.2	83.831 10^{-4}	79.056	259.0	86.451 10^{-4}	79.048
0.7	69.11	158.20	95.4	42.114 10^{-4}	68.909	2546.4	41.588 10^{-4}	68.901
0.6	59.24	135.60	-	-	-	-	-	-
0.5	49.37	113.00	-	-	-	-	-	-

4.5.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında DKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

DKM-5 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 10.10 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.30) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.40).

Çizelge 4.40'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK12/Şekil 40'ta sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.40'ta grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. DKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.40) açısından $1\sigma_c$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını görmüş ve kırılmıştır. Ancak oran $0.9\sigma_c$ ve $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır

(EK12/Şekil 40a,c). EK12/Şekil 40b görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.9\sigma_c$ ve $0.8\sigma_c$ için hedeflenen gerilme değerleri sırası ile 9.09 MPa (F=20.81kN, Çizelge 4.40) ve 8.08 MPa (F=18.50kN, Çizelge 4.40) iken gerilmenin sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Bu süreçte pekleşmenin devam ettiği ve örneğin yenilmediği anlaşılmaktadır. Diğer örnekte ($1\sigma_c$) pekleşme sürecinin oldukça kısa sürdüğü ve örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK12/Şekil 40) dikkate alınarak Çizelge 4.40 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.40. DKM-5 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (DKM-5 için σ_{tB}=10.10 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)
1	10.10	23.12	28.6	19.171 10^{-4}	0.976	323.6	34.082 10^{-4}	10.096
0.9	9.09	20.81	2.0	31.963 10^{-5}	0.018	2538.4	53.271 10^{-5}	10.047
0.8	8.08	18.50	200.6	35.211 10^{-4}	6.194	2848.6	36.278 10^{-4}	7.773
0.7	7.07	16.18	-	-	-	-	-	-
0.6	6.06	13.87	-	-	-	-	-	-
0.5	5.05	11.56	-	-	-	-	-	-

4.6. Yapay Kaya Malzemeleri (YKM) için Sabit-Gerilme-Kontrollü-Sünme Deneysel Kaya Mekaniği Çalışmaları (A-KM/Grup2/YKM)

Bu bölümdeki çalışmalar servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Aşağıda farklı dayanımlara sahip YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5 yapay kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) deney sonuçları sunulmuştur.

4.6.1. Yapay model kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerçekleştirilen deneylerde sabit yük koşullarının tespiti

Beş farklı dayanıma sahip olacak şekilde yapay model kaya malzemeleri Konya Çimento Hazır Beton tesislerinde hazırlanmıştır. Bölüm 3'te detayları ile değinilen bu model yapay kaya malzemeleri (YKM) sırasıyla 0-20 MPa aralığı için YKM-1, 20-40 MPa aralığı için YKM-2, 40-60 MPa aralığı için YKM-3, 60-80 MPa aralığı için YKM-4 ve 80-100 MPa aralığı için YKM-5 olmuştur. Seçilen model yapay birimlerinden araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri için ilgili örnekler TSE (12390-2) önerileri doğrultusunda hazırlanmış ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deneylere tabi tutulmuştur.

Farklı dayanımlara sahip yapay kaya malzemeleri (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4, YKM-5) üzerinde düşey yönde hazırlanan tek eksenli basma ile iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırası ile sünme-tek eksenli basma (S-TEB, $t_{S\text{-}TEB}''$, $\sigma_{S\text{-}TEB}''$, $\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$) ve sünme-dolaylı çekme (S-DÇ, $t_{S\text{-}DÇ}''$, $\sigma_{S\text{-}DÇ}''$, $\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$) deneyleri olmuştur.

Her bir dayanım sınıfına ait S-TEB deneyleri için hazırlanan toplam 25 (5x5) adet örnek ($D = 100$ mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ile S-DÇ deneyleri için hazırlanan toplam 25 (5x5) adet örnek ($D = 100$ mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile her bir örnek için ayrı ayrı olmak üzere sabit yük değerlerinde bir seri sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Takip eden kısımda farklı sabit erilmelerin uygulandığı sünme koşullarının tespitinde izlenen yol S-TEB ve S-DÇ deneyleri için detayları ile sunulmuştur.

4.6.1.1. S-TEB deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti

Temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtan Çizelge 4.2'de görülen TEBD (σ_c) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) aralığından seçilen 0.75 MPa/s'de gerçekleştirilen deney sonuçlarıdır. Ancak burada örnekler üzerinde farklı sabit gerilmeler yaratılarak malzeme davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Temel kaya mekaniği deneyleri esnasında belirlenen tek eksenli basma dayanım (TEBD, σ_c) değerleri dikkate alınmış ve bu gerilme değerlerinin sırasıyla 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 katları alınarak uygulanacak sabit erilme değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sabit gerilme ve buna bağlı sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için izlenen yol aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1'de sunulan TEBD ve TEB-DEF deneyleri için seçilen 0.75 MPa/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme türündeki kaya mekaniği deneylerinde 1 katsayısının altında parametrik katsayılar seçilmiştir. Seçilen bu değerlere karşılık gelen sabit gerilme ve

yükleme (MPa, kN) değerleri, örnek çapı D=100 mm ve temsilen TEBD değeri 100 MPa olan bir durum için tipik bir örnek olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.41 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.41. Sabit yük kontrollü S-TEB sünme deneylerinde sabit gerilme ve yük koşullarını belirleme yaklaşımı (Bu çizelge, D = 100 mm ve TEBD = 100 MPa için temsilen hazırlanmıştır)

Seçilen Oran	Hesaplanan Sabit Gerilme, σ Seçilen Oran x TEBD	Hesaplanan Sabit Yük, F σ=F/A'dan	Uygulanan Sabit Yük Değerine Ulaşıncaya Kadar Başlangıçta Uygulanan Yükleme Hızı
(-)	(MPa)	(kN)	(MPa/s)
1.00 (ISRM Önerisi 0.75MPa/s için)	1 x 100 MPa = 100	785.00	0.75
0.9	90	706.50	0.75
0.8	80	628.00	0.75
0.7	70	549.50	0.75
0.6	60	471.00	0.75
0.5	50	392.50	0.75

Çizelge 4.41'de verilen ilk sütunda seçilen oran değerleri, ikinci sütunda ise belirlenen sabit gerilme değerleri görülmektedir. Üçüncü sütunda, ikinci sütunda belirlenen sabit gerilme değerlerine karşılık gelen sabit yük değerleri hesaplanmıştır. Sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük değerine ulaşıncaya kadar olan deneyin ilk sürecinde yükleme koşulu ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı 0.5-1 MPa/s aralığından 0.75 MPa/s uygulanmıştır. Deney için örnek servo kontrollü hidrolik prese yerleştirildikten sonra pres önce 0.75 MPa/s yükleme hızı ile çalıştırılmış ve istenen yük değerine ulaşınca servo kontrollü hidrolik presin yük değerini sabitleme sistemi devreye girmiştir. Deney istenen sabit yük değerinde devam etmiş ve tamamlanmıştır.

Örnek çapı (D) 100 mm ve temsilen TEBD değeri 100 MPa seçilen bir durumda sabit yük (kN) değerlerinin farklı örneklerde 785 kN' dan 392.5 kN'ye kadar düşürüldüğü Çizelge 4.41'dan anlaşılmaktadır. Çizelge 4.41'da sunulan yaklaşım sırası ile YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5 için her birinin farklı TEBD değerleri dikkate alınarak ayrı ayrı kullanılmıştır.

Servo kontrollü hidrolik preste sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneyleri, tüm model yapay kaya malzemeleri (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçları takip eden bölümlerde sunulmuştur.

4.6.1.2. S-DÇ deneyleri için farklı sabit yükleme değerlerinin tespiti

Çizelge 4.2'de görülen DÇD (σ_{tB}) ve DÇ-DEF ($E_{i\text{-}DÇ}$) değerleri, ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen 200 N/s yükleme hızında gerçekleştirilen temel kaya mekaniği deney sonuçlarını yansıtmaktadır. Ancak burada örnekler üzerinde farklı sabit gerilmeler yaratılarak malzeme davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Temel kaya mekaniği deneyleri esnasında belirlenen dolaylı çekme dayanım (DÇD, σ_{tB}) değerleri dikkate alınmış ve bu gerilme değerlerinin sırasıyla 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 katları alınarak uygulanacak sabit gerilme değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sabit gerilme ve buna bağlı sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için izlenen yol aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.2'de ilan edilen deney için kullanılan 200 N/s yükleme hızı, 1 katsayı değeri ile tanımlanmıştır. Araştırma amaçlı gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme türündeki kaya mekaniği deneylerinde 1 katsayısının altında parametrik katsayılar seçilmiştir. Seçilen bu değerlere karşılık gelen sabit gerilme ve yükleme (MPa, kN) değerleri, örnek çapı D=100 mm, t/D=0.5 ve temsilen DÇD değeri 10 MPa olan bir durum için örnek olarak hesaplanmış ve Çizelge 4.42 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.42'de verilen ilk sütunda seçilen oran değerleri, ikinci sütunda ise belirlenen sabit gerilme değerleri görülmektedir. Üçüncü sütunda, ikinci sütunda belirlenen sabit gerilme değerlerine karşılık gelen sabit yük değerleri hesaplanmıştır. Sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük değerine ulaşıncaya kadar olan deneyin ilk sürecinde yükleme koşulu ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hızı 200 N/s uygulanmıştır. Deney için örnek servo kontrollü hidrolik prese yerleştirildikten sonra pres 200 N/s yükleme hızı ile çalıştırılmış ve istenen yük değerine ulaşınca servo kontrollü hidrolik presin yük değerini sabitleme sistemi devreye girmiştir. Deney istenen sabit yük değerinde devam etmiş ve tamamlanmıştır.

Örnek çapı (D) 100 mm ve temsilen DÇD değeri 10 MPa seçilen bir durumda sabit yük (kN) değerlerinin farklı örneklerde 78.50 kN' dan 39.25 kN'e kadar düşürüldüğü Çizelge 4.42'den anlaşılmaktadır. Çizelge 4.42'de sunulan yaklaşım sırası ile YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5 için her birinin farklı DÇD değerleri dikkate alınarak ayrı ayrı kullanılmıştır.

Servo kontrollü hidrolik preste sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneyleri dolaylı çekme gerilmesi yaratılarak tüm model yapay kaya malzemeleri (YKM-1, YKM-2, YKM-3, YKM-4 ve YKM-5) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçları takip eden bölümlerde sunulmuştur.

Çizelge 4.42. Sabit yük kontrollü S-DÇ sünme deneylerinde sabit gerilme ve yük koşullarını belirleme yaklaşımı (Bu çizelge, D = 100 mm, t/D = 0.5 ve DÇD = 10 MPa için temsilen hazırlanmıştır)

Seçilen Oran	Hesaplanan Sabit Gerilme, σ Seçilen Oran x DÇD	Hesaplanan Sabit Yük, F σ=F/A'dan	Uygulanan Sabit Yük Değerine Ulaşıncaya Kadar Başlangıçta Uygulanan Yükleme Hızı
(-)	(MPa)	(kN)	(N/s)
1.00 (ISRM Önerisi 200 N/s için)	1 x 10 MPa = 200	78.50	200
0.9	9	70.65	200
0.8	8	62.80	200
0.7	7	54.95	200
0.6	6	47.10	200
0.5	5	39.25	200

Yukarıda sunulan bölüm 4.6.1.1 ve 4.6.1.2'de ifade edilen sabit yükleme koşulları altında beş farklı dayanıma sahip YKM'ler için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, takip eden başlıklarda sunulmuştur.

4.6.2. 0-20 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-1) ait deneysel sonuçlar

YKM-1 olarak tanımlı beton kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. TSE (12390-2) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.6.2.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

Tek eksenli düşey sabit gerilme altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı S-TEB deneylerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (0.5-1.0 MPa/s) sınırları içerisinden seçilen 0.75 MPa/s koşulunda TEBD deneyleri gerçekleştirilmiştir. YKM-1 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 28.50 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.41) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.43).

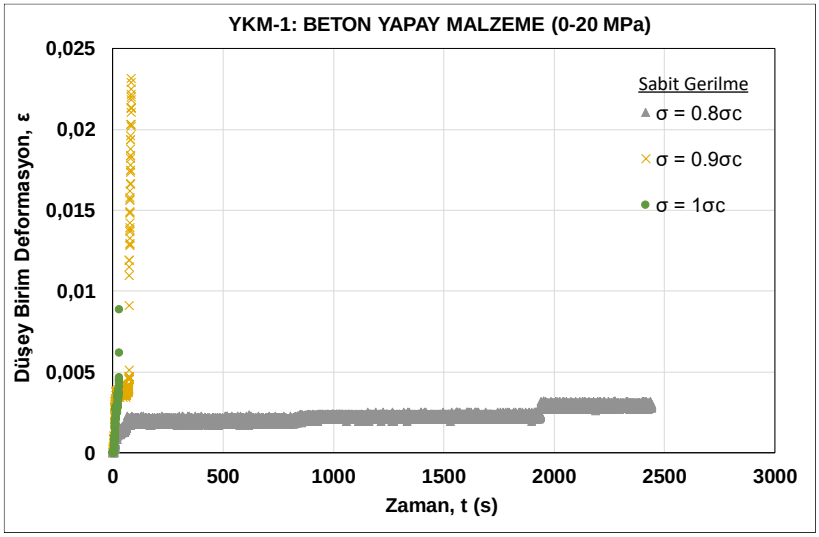
Çizelge 4.43'ün ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.11'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Şekil 4.11'de YKM-1 kaya birimi için S-TEB türü deneylerde gerçekleştirilen farklı sabit yükleme koşullarında elde edilen zaman-birim deformasyon (a), birim deformasyon-gerilme (b) ve zaman-gerilme davranışları (c) görülmektedir. Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.43'te sunulmuştur. Bilindiği gibi kaya malzemelerinin sünme davranışları özellikle zaman-birim deformasyon eğrilerinde üç aşama şeklinde görülmektedir. Bunlardan aşama-1'de kaya malzemesindeki gözenekler ve çatlaklar kapanmakta, aşama-2'de kaya malzemesi elastik sınırlar içerinde davranmakta ve aşama-3'te ise kaya malzemesi elasto-plastik davranış sergileyerek yenilmektedir. YKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örneklerde $1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.43) üç sünme aşaması görülmüş ve yenilme gerçekleşmiştir. Ancak oran $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (Şekil 4.11a,c). Şekil 4.11b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_c$ için gerilme değerinin 22.80 MPa (F=178.98kN, Çizelge 4.43) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Aynı grafikten $0.9\sigma_c$ için ise gerilme değerinin 25.65 MPa (F=201.35kN, Çizelge 4.43) iken gerilmenin bir süre sabit kaldığı ancak pekleşme sonrasında örneğin kırıldığı görülmektedir. Diğer örnekte ($1\sigma_c$) pekleşme sürecinin yaşanmadığı ve örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

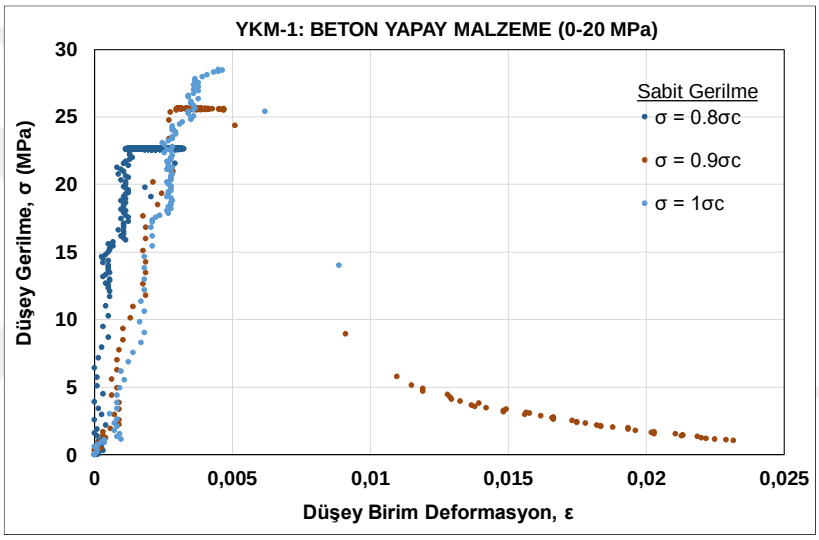
Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (Şekil 4.11) dikkate alınarak Çizelge 4.43 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.43. YKM-1 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (YKM-1 için σ_c=28.50 MPa)

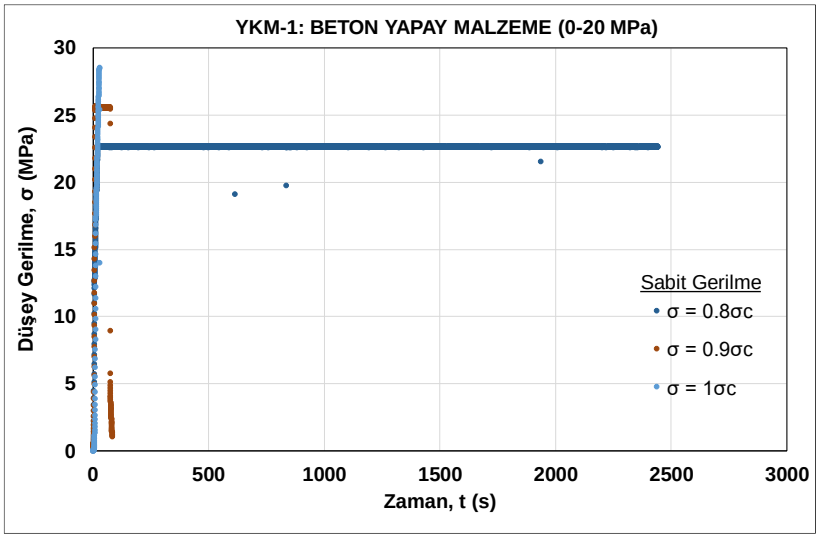
Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	28.50	223.73	6.6	$10.313\ 10^{-5}$	0.681	26.8	$36.609\ 10^{-4}$	27.679
0.9	25.65	201.35	15.4	$37.471\ 10^{-4}$	25.616	71.8	$40.073\ 10^{-4}$	25.579
0.8	22.80	178.98	61.8	$18.448\ 10^{-4}$	22.639	2442.8	$28.185\ 10^{-4}$	22.639
0.7	19.95	156.61	-	-	-	-	-	-
0.6	17.10	134.24	-	-	-	-	-	-
0.5	14.25	111.86	-	-	-	-	-	-



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

Şekil 4.11. YKM-1 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

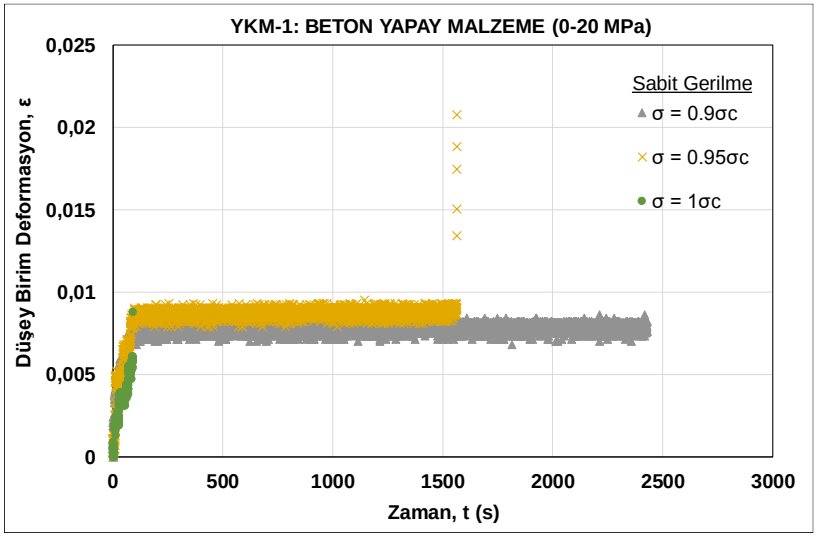
4.6.2.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

Brazilian dolaylı çekme gerilmesi altında gerçekleştirilen araştırma amaçlı S-DÇ deneylerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen yükleme hız (200 N/s) değerinde DÇD deneyleri gerçekleştirilmiştir. YKM-1 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 2.58 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.42) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.44).

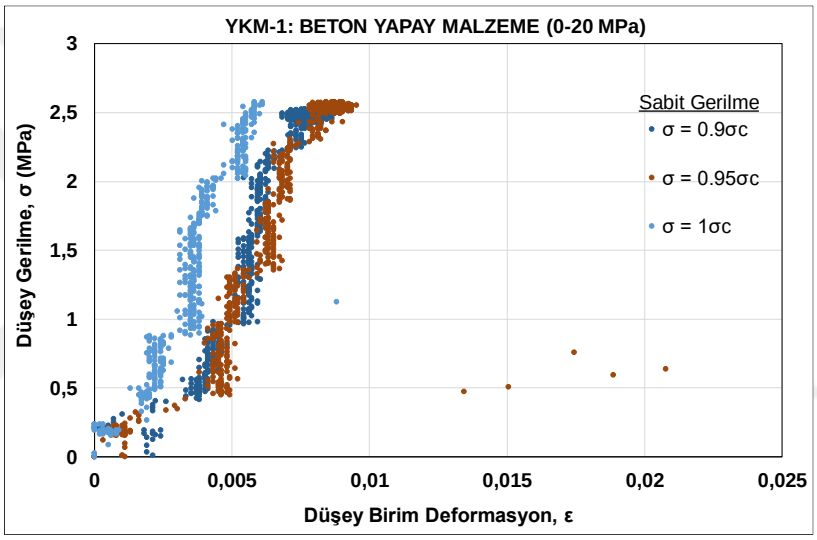
Çizelge 4.44'ün ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.12'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Şekil 4.12'de YKM-1 kaya birimi için S-DÇ türü deneylerde gerçekleştirilen farklı sabit yükleme koşullarında elde edilen zaman-birim deformasyon (a), birim deformasyon-gerilme (b) ve zaman-gerilme davranışları (c) sunulmuştur. Çizelge 4.44'te grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. Zaman-birim deformasyon eğrilerinde kaya malzemelerinin sünme davranışları birbirini takip eden üç aşama şeklinde görülmektedir. Sabit yük altındaki kaya malzemesindeki gözeneklerin ve çatlakların kapanması Aşama-1'de, kaya malzemesinin elastik sınırlar içerinde davranması aşama-2'de ve kaya malzemesi elasto-plastik davranış sergileyerek yenilmesi ise aşama-3'de ortaya çıkmaktadır. YKM-1 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.44) açısından $1\sigma_{tB}$ ve $0.95\sigma_{tB}$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.9\sigma_{tB}$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (Şekil 4.12a,c). Şekil 4.56b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.9\sigma_{tB}$ için gerilme değerinin 2.32 MPa (F=18.23kN, Çizelge 4.44) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Aynı grafikten $0.95\sigma_{tB}$ için ise gerilme değerinin 2.45 MPa (F=19.24kN, Çizelge 4.44) iken bir müddet sabit kaldığı ancak pekleşme sonrasında örneğin kırıldığı görülmektedir.

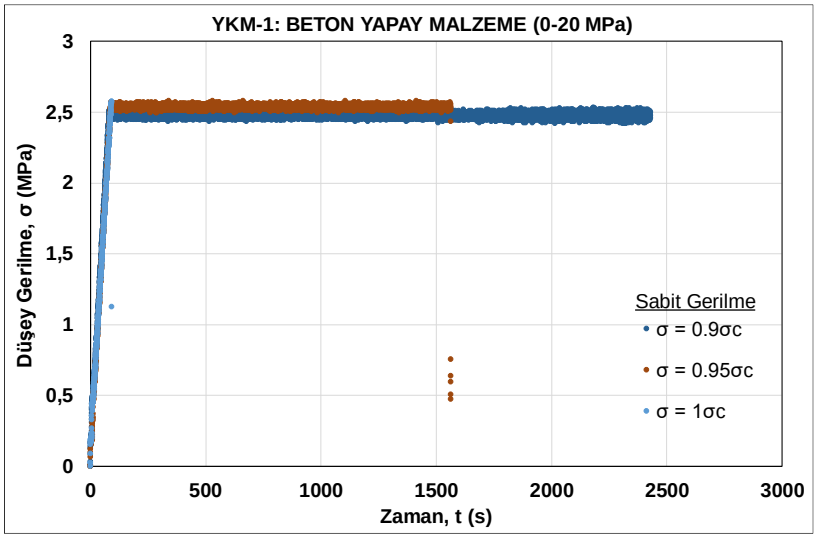
Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (Şekil 4.12) dikkate alınarak Çizelge 4.44 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

Şekil 4.12. YKM-1 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

Çizelge 4.44. YKM-1 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (YKM-1 için σ_{tB}=2.58 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}DÇ}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}DÇ}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}DÇ}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}DÇ}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}DÇ}''$ (MPa)
1	2.58	20.25	8.0	$17.032\ 10^{-4}$	0.411	91.4	$61.116\ 10^{-4}$	2.575
0.95	2.45	19.24	80.2	$78.258\ 10^{-4}$	2.289	1563	$90.297\ 10^{-4}$	2.434
0.9	2.32	18.23	73.8	$75.362\ 10^{-4}$	2.252	2429	$82.396\ 10^{-4}$	2.459
0.8	2.06	16.20	-	-	-	-	-	-
0.7	1.81	14.18	-	-	-	-	-	-
0.6	1.55	12.15	-	-	-	-	-	-

4.6.3. 20-40 MPa aralığında yer alan yapay beton kaya birimine (YKM-2) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada YKM-2 olarak tanımlanan beton yapay kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. TSE (12390-2) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.6.3.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-2 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 50.08 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.41) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.45).

Çizelge 4.45'ün ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak Şekil 4.57'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.45'te sunulmuştur. YKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.45) iki örnekte üç sünme aşaması görülmüş ve örnek kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK13/Şekil 41a,c). EK13/Şekil 41b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_c$ için gerilme değerinin 40.06 MPa (F=314.50kN, Çizelge 45) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Aynı grafikten $0.9\sigma_c$ için ise gerilme değerinin 45.07 MPa (F=353.82kN, Çizelge 4.45) iken bir süre sabit kaldığı ancak pekleşme sonrasında bu örneğin de kırıldığı görülmektedir. Diğer örnekte ($1\sigma_c$) pekleşme süreçlerinin görülmediği ve örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK13/Şekil 41) dikkate alınarak Çizelge 4.45 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.45. YKM-2 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler (YKM-2 için σ_c=50.08 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	50.08	393.13	7.8	51.62 10^{-6}	0.624	58.4	44.913 10-4	49.257
0.9	45.07	353.82	12.4	17.976 10-4	12.495	83.0	55.984 10-4	44.808
0.8	40.06	314.50	54.8	35.312 10-4	39.865	2618.2	36.869 10-4	39.842
0.7	35.06	275.19	-	-	-	-	-	-
0.65	30.05	235.88	-	-	-	-	-	-
0.6	25.04	196.56	-	-	-	-	-	-
0.5	20.03	157.25	-	-	-	-	-	-

4.6.3.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-2 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 4.98 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.42) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.46).

Çizelge 4.46'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK13/Şekil 42'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.46'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. YKM-2 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.46) açısından $1\sigma_{tB}$ ve $0.9\sigma_{tB}$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_{tB}$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK13/Şekil 42a,c). EK13/Şekil 42b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_{tB}$ için gerilme değerinin 3.98 MPa (F=31.27kN, Çizelge 4.46) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Buna karşın $0.9\sigma_{tB}$ oranında sabit gerilmenin 4.48 MPa (F=35.18kN, Çizelge 4.46) olduğu durumda örnekte, pekleşme süreci görülmüş ancak örnek kırılmıştır. Diğer örnekte ($1\sigma_{tB}$) pekleşme süreci görülmemiş ve örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK13/Şekil 42) dikkate alınarak Çizelge 4.46 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.46. YKM-2 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (YKM-2 için σ_{tB}=4.98 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	4.98	39.09	6	41.057 10^{-4}	0.323	164.6	88.123 10^{-4}	4.980
0.9	4.48	35.18	5.4	32.054 10^{-4}	0.273	143.6	71.121 10^{-4}	4.393
0.8	3.98	31.27	132	68.246 10^{-4}	3.939	2421.4	73.264 10^{-4}	3.899
0.7	3.49	27.37	-	-	-	-	-	-
0.6	2.99	23.46	-	-	-	-	-	-
0.5	2.49	19.55	-	-	-	-	-	-

4.6.4. 40-60 MPa aralığında yer alan yapay beton kaya birimine (YKM-3) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada YKM-3 olarak tanımlanan yapay beton kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. TSE (12390-2) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $2.0 \leq L/D \leq 2.5$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.6.4.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-3 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 66.82 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.41) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.47).

Çizelge 4.47'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri

gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK14/Şekil 43'te sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.47'de sunulmuştur. YKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.47) iki örnekte üç sünme aşaması yaşanmış ve örnekler kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK14/Şekil 43a,c). EK14/Şekil 43b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_c$ için gerilme değerinin 53.46 MPa (F=419.63kN, Çizelge 4.47) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer iki örnekte ($1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$) pekleşme süreçleri yaşanmadan örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK14/Şekil 43)dikkate alınarak Çizelge 4.47 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.47. YKM-3 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (YKM-3 için σ_c=66.82 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	66.82	524.54	3.8	$5{,}176\ 10^{-5}$	5.094	71.2	$52.280\ 10^{-4}$	66.824
0.9	60.14	472.08	5.2	$15.572\ 10^{-5}$	0.449	63.8	$69.034\ 10^{-4}$	59.438
0.8	53.46	419.63	58.2	$42.338\ 10^{-4}$	52.738	2443	$53.181\ 10^{-4}$	52.716
0.7	46.77	367.18	-	-	-	-	-	-
0.6	40.09	314.72	-	-	-	-	-	-
0.5	33.41	262.27	-	-	-	-	-	-

4.6.4.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-3 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 5.88 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.42) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.48).

Çizelge 4.48'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK14/Şekil 44'te sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.48'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. YKM-3 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde örnekler, seçilen oran (Çizelge 4.48) açısından $1\sigma_{tB}$ ve $0.9\sigma_{tB}$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını yaşamış ve kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_{tB}$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK14/Şekil 44a,c). EK14/Şekil 44b'de görülen görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_{tB}$ için gerilme değeri 4.70 MPa (F=36.93kN, Çizelge 4.48) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Diğer örneklerde ($1\sigma_{tB}$ ve $0.9\sigma_{tB}$) pekleşme süreçlerinin görülmediği örneklerin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK14/Şekil 44) dikkate alınarak Çizelge 4.48 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.48. YKM-3 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler (YKM-3 için σ_{tB}=5.88 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	5.88	46.16	6.4	$50.191\ 10^{-4}$	0.526	198.8	$72.275\ 10^{-4}$	5.879
0.9	5.29	41.54	5.2	$35.134\ 10^{-4}$	0.345	167	$69.263\ 10^{-4}$	4.873
0.8	4.70	36.93	200	$88.424\ 10^{-4}$	4.714	2675.4	$90.434\ 10^{-4}$	4.689
0.7	4.12	32.31	-	-	-	-	-	-
0.6	3.53	27.69	-	-	-	-	-	-
0.5	2.94	23.08	-	-	-	-	-	-

4.6.5. 60-80 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada YKM-4 olarak tanımlanan beton yapay kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian)

yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. TSE (12390-2) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.6.5.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-4 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 86.69 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.41) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.49).

Çizelge 4.49'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK15/Şekil 45'te sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.49'de sunulmuştur. YKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$ ve $0.9\sigma_c$ olarak seçilen oranlarda (Çizelge 4.49) iki örnekte üç sünme aşaması görülmüş ve yenilme gerçekleşmiştir. Ancak oran $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve yenilmemiştir (EK15/Şekil 45a,c). EK15/Şekil 45b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_c$ için hedeflenen gerilme değeri 69.35 MPa (F=544.41kN, Çizelge 4.49) olduğunda yükün örnek üzerinde sabit kaldığı örneğin yenilmediği görülmüştür. Bununla birlikte $0.9\sigma_c$ oranında deneye tabi tutulan örnekte üzerindeki hedeflenen sabit gerilme 78.02 MPa (F=612.46kN, Çizelge 4.49) seviyesinde iken pekleşmenin sürdüğü ancak daha sonra malzemenin yine de kırıldığı gözlenmiştir. Diğer örnekte ($1\sigma_c$) pekleşme süreci yaşanmadan örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK15/Şekil 45) dikkate alınarak Çizelge 4.49 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.49. YKM-4 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (YKM-4 için σ_c=86.69 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	86.69	680.52	9.4	25.946 10^{-4}	17.157	100.0	82.507 10^{-4}	86.686
0.9	78.02	612.46	8.0	19.626 10^{-4}	14.896	100.2	74.889 10^{-4}	77.567
0.8	69.35	544.41	75.6	45.739 10^{-4}	62.349	2428.6	46.253 10^{-4}	69.349
0.7	60.68	476.36	-	-	-	-	-	-
0.6	52.01	408.31	-	-	-	-	-	-
0.5	43.35	340.26	-	-	-	-	-	-

4.6.5.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-4 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 4.93 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.42) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.50).

Çizelge 4.50'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK15/Şekil 46'da sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.50'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. YKM-4 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde seçilen oran (Çizelge 4.50) açısından $1\sigma_{tB}$ ve $0.9\sigma_{tB}$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını görmüş ve kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_{tB}$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK15/Şekil 46a,c). EK15/Şekil 46b görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_{tB}$ için gerilme değerinin 3.94 MPa (F=30.96kN, Çizelge 4.50) iken sabit kaldığı örneğin kırılmadığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte oran $0.9\sigma_c$ iken sabit gerilme 4.44 MPa (F=34.83kN, Çizelge 4.50) olduğu durumda bir miktar malzemede pekleşmenin

olduğu ancak daha sonra kırıldığı görülmektedir (EK15/Şekil 46b). Diğer örnekte (1 σ_{tB}) pekleşme sürecinin görülmediği örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK15/Şekil 46) dikkate alınarak Çizelge 4.50 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.50. YKM-4 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler (YKM-4 için σ_{tB}=4.93 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	4.93	38.70	6.2	17.104 10^{-4}	0.442	159.4	60.368 10^{-4}	4.930
0.9	4.44	34.83	9.0	20.092 10^{-4}	0.349	133.6	41.189 10^{-4}	3.956
0.8	3.94	30.96	74.2	36.058 10^{-4}	2.194	2423.8	34.054 10^{-4}	3.909
0.7	3.45	27.09	-	-	-	-	-	-
0.6	2.96	23.22	-	-	-	-	-	-
0.5	2.47	19.35	-	-	-	-	-	-

4.6.6. 80-100 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-5) ait deneysel sonuçlar

Bu çalışmada YKM-5 olarak tanımlanan beton yapay kaya birimi üzerinde yaratılan düşey gerilme altında tek eksenli basma yönünde ve dolaylı çekme (Brazilian) yönünde olmak üzere iki farklı sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. TSE (12390-2) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda deney örnekleri hazırlanmıştır.

Tek eksenli basma yönünde sünme deneyleri (S-TEB) için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $2.5 \leq L/D \leq 3.0$) ve dolaylı çekme yönünde sünme (S-DÇ) deneyleri için hazırlanan 5 adet örnek (D = 100 mm, $t/D \geq 0.5$) servo kontrollü hidrolik pres ile farklı sabit yükleme değerlerinde bir seri sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerine maruz bırakılmıştır. Her iki deneye ait bulgular aşağıda sunulmuştur.

4.6.6.1. Tek eksenli basma yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-5 için belirlenen ortalama TEBD değeri σ_c = 79.49 MPa olmuştur. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.41) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.51).

Çizelge 4.51'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-TEB deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK16/Şekil 47'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler Çizelge 4.51'de sunulmuştur. YKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde $1\sigma_c$ olarak seçilen oranda (Çizelge 4.51) deneye tabi tutulan bir örnekte üç sünme aşaması görülmüş ve yenilme gerçekleşmiştir. Ancak oran $0.9\sigma_c$ ve $0.8\sigma_c$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve yenilmemiştir (EK16/Şekil 47a,c). EK16/Şekil 47b görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.9\sigma_c$ ve $0.8\sigma_c$ için hedeflenen gerilme değerlerinin sırası ile 71.54 MPa (F=561.60kN, Çizelge 4.51) ve 63.59 MPa (F=499.20kN, Çizelge 4.51) olduğunda yükün örnek üzerinde sabit kaldığı örneğin yenilmediği görülmüştür. Diğer örnekte ($1\sigma_c$) pekleşme sürecinin olmadığı ve örneğin yenildiği anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK16/Şekil 47) dikkate alınarak Çizelge 4.51 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.51. YKM-5 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-TEB deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerler (YKM-5 için σ_c=79.49 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	79.49	624.00	5.6	16.012 10^{-4}	12.429	90.8	70.764 10-4	79.494
0.9	71.54	561.60	75.2	47.913 10^{-4}	67.137	2431.4	47.913 10-4	71.397
0.8	63.59	499.20	55.6	41.016 10^{-4}	56.208	2653.4	49.322 10-4	62.958
0.7	55.64	436.80	-	-	-	-	-	-
0.6	47.69	374.40	-	-	-	-	-	-
0.5	39.75	312.00	-	-	-	-	-	-

4.6.6.2. Dolaylı (Brazilian) çekme yönünde farklı sabit yükleme koşullarında YKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneyleri

YKM-5 için belirlenen ortalama DÇD değeri σ_{tB} = 4.82 MPa olarak belirlenmiştir. Sabit yükleme değerlerinin belirlenmesi için geliştirilen yaklaşım (Çizelge 4.42) dikkate alınarak sünme deneylerinde uygulanacak sabit yük (kN) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.52).

Çizelge 4.52'nin ilk üç sütununda belirtilen koşullar altında servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla sabit-gerilme-kontrollü-sünme için S-DÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında pres üzerinden düşey gerilme ve düşey birim deformasyon değerleri 0.02 saniye aralıklarında otomatik olarak kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veri tabanı kullanılarak EK16/Şekil 48'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.52'de grafikler üzerinden belirlenen önemli bazı değerler verilmiştir. YKM-5 için gerçekleştirilen sünme deneylerinde seçilen oran (Çizelge 4.52) $1\sigma_{tB}$ ve $0.9\sigma_{tB}$ iken kaya malzemesi üç sünme aşamasını görmüş ve kırılmıştır. Ancak oran $0.8\sigma_{tB}$ koşulunda ise kaya malzemesi aşama-3'e geçememiş ve kırılmamıştır (EK16/Şekil 48a,c). EK16/Şekil 48b'de görülen birim deformasyon-gerilme davranışında $0.8\sigma_{tB}$ için hedeflenen gerilme değeri 3.86 MPa (F=30.27kN, Çizelge 4.52) iken gerilmenin sabit kaldığı, pekleşmenin devam ettiği ancak örneğin yenilmediği anlaşılmaktadır. $0.9\sigma_{tB}$ oran koşulunda ise örnek üzerinde 4.34 MPa (F=34.05kN, Çizelge 4.52) seviyesinde sabit gerilme ile örneğin pekleşme sürecini yaşadığı ancak daha sonra kırıldığı görülmektedir. Diğer örnekte ($1\sigma_{tB}$) pekleşme sürecinin görülmediği ve örneğin kırıldığı anlaşılmaktadır.

Deneysel çalışmalar ile ortaya konan grafikler (EK16/Şekil 48) dikkate alınarak Çizelge 4.52 hazırlanmıştır. Ancak bu veri tabanına dayalı değerlendirmeler tartışma bölümünde verilecektir.

Çizelge 4.52. YKM-5 için farklı sabit yükleme koşullarında gerçekleştirilen S-DÇ deneylerinden belirlenen bazı mekanik değerlerler (YKM-5 için σ_{tB}=4.82 MPa)

Seçilen Oran	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 1-2 Sınırı			Sünme Davranışı Aşama 2-3 Sınırı		
			Zaman	Birim Def.	Gerilme	Zaman	Birim Def.	Gerilme
(-)	σ (MPa)	F (kN)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)	$t_{S\text{-}TEB}''$ (s)	$\varepsilon_{S\text{-}TEB}''$ (-)	$\sigma_{S\text{-}TEB}''$ (MPa)
1	4.82	37.84	7.2	16.046 10^{-4}	0.349	145.0	42.122 10^{-4}	4.344
0.9	4.34	34.05	104.0	48.178 10^{-4}	3.171	1245.8	52.193 10^{-4}	2.754
0.8	3.86	30.27	102.0	43.277 10^{-4}	2.830	2516.2	47.303 10^{-4}	3.630
0.7	3.37	26.49	-	-	-	-	-	-
0.6	2.89	22.70	-	-	-	-	-	-
0.5	2.41	18.92	-	-	-	-	-	-

4.7. Genel Değerlendirme

Bu deneysel tez çalışmasının hedefi, farklı yükleme hızlarında (kN/dk) ve farklı sabit yük (kN) değerlerinde kaya malzemelerinin davranışlarının ortaya konması, sonrasında ise farklı dayanım değerlerindeki bu kaya malzemeleri için pekleşmeye dayalı kritik eşik dayanım değerlerinin belirlenmesi olmuştur. Bu amaç doğrultusunda öncelikle farklı dayanımlara sahip model kaya malzemeleri hazırlanmış, ikinci olarak temel kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiş daha sonra araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri yapılmıştır. Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri ise kendi içerisinde farklı yükleme hızlarında (kN/dk) ve farklı sabit yük değerlerinde (kN) olmak üzere iki alt başlıkta gerçekleştirilmiştir.

Deneysel ve parametrik bir çalışma planı içerisinde öncelikle model kaya malzemelerinin hazırlanması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda beş farklı dayanıma sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yine beş farklı dayanıma sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) hazırlanmıştır. Model kaya malzemelerinin kendi içlerinde sistematik olarak artan dayanım değerlerine sahip olması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda 0-20 MPa (DKM-1 ve YKM-1), 20-40 MPa (DKM-2 ve YKM-2), 40-60 MPa (DKM-3 ve YKM-3), 60-80 MPa (DKM-4 ve YKM-4) ve 80-100 MPa (DKM-5 ve YKM-5) dayanım aralıklarına sahip olduğuna inanılan model kaya malzemeleri hazırlanmıştır. Planlanan bu dayanım dağılımının gerçekten bu şekilde olup olmadığını teyidi için öncelikle temel kaya mekaniği deneylerinin yapılmasına karar erilmiştir.

Temel kaya mekaniği çalışmaları kapsamında doğal kaya malzemesi (DKM) ve yapay kaya malzemesi (YKM) için hazırlanan örnekler üzerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen rutin laboratuvar kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırası ile; tek eksenli basma dayanımı deneyi (TEBD, σ_c, MPa), dolaylı çekme dayanımı (TEBD, σ_{tB}, MPa), tek eksenli basma koşulunda deformabilite deneyi (Ei, MPa), dolaylı çekme koşulunda deformabilite deneyi (Ei, MPa), yoğunluk ve gözeneklilik deneyi (γ, kN/m^3; %), nokta yükleme indeks dayanımı deneyi ($I_{s(50)}$, MPa), suda dağılma dayanımı deneyi (I_{d2}, %) ve Schmidt sertlik belirleme deneyi (N) olmuştur. Temel kaya mekaniği deneylerinden σ_c, σ_{tB}, Ei deneyleri servo kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Diğer deneyler için ilgili deney ekipmanları kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tüm temel kaya mekaniği deney sonuçları (DKM-1, …, DKM-5 ve YKM-1, …, YKM-5) değerlendirildiğinde genel olarak en düşük dayanıma sahip olduğu varsayılan DKM-1 ve YKM-1 (0-20 MPa) için elde edilen deney sonuçlarının küme içerisindeki en düşük dayanımlara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşın en yüksek dayanıma sahip olduğu varsayılan DKM-5 ve YKM-5 (80-100 MPa) için elde edilen deney sonuçlarının ise küme içerisindeki en yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bu tez çalışmasının ana hedefi olan araştırma amaçlı kaya mekaniği deneylerinde kullanılacak model örneklerin 0-100 MPa aralığında yaklaşık 20'şer MPa farklar ile sistematik olarak zayıftan sağlama doğru bir dağılım gösterdiği teyit edilmiştir.

Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri iki alt başlıkta gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırası ile farklı yükleme hızlarında (kN/dk) ve farklı sabit yük değerlerinde (kN) gerçekleştirilen deneyler olmuştur. Bu çerçevede tek eksenli basma (TEB) koşulunda ve dolaylı çekme (DÇ) koşulunda tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c), dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) ve defomabilite (E) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde servo kontrollü hidrolik pres kullanılmıştır. Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri sonucunda elde edilen grafiksel değerlendirmeler yukarıda sunulan bölümlerde detaylarıyla verilmiştir. Bu deneyler için hazırlanan grafiklerin tasnifi aşağıda sunulan Çizelge 4.53 ve 4.54'te verilmiştir.

Çizelge 4.53'te belirtilen deneyler için toplam 170 adet model örnek deneylere maruz bırakılmış ve 0.02 s aralıklar ile servo kontrollü hidrolik presten yaklaşık 1435840 adet veri toplanmıştır. TEB ve DÇ deney koşulunda gerçekleştirilen farklı yükleme hızlarında (kN/dk) deneye tabi tutulan herbir model kaya malzemesinde (örneğin DKM-1) düşey birim deformasyon (ε) - gerilme (σ) davranışlarının genel olarak yenilme öncesinde ve sonrasında ε-σ eğimlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca tüm model kaya

malzemeleri dikkate alındığında test edilen kaya malzemesinin dayanım değerinin artmasıyla (örneğin DKM-1'den DKM-5'e kadar) ε-σ grafik eğrilerinde yenilme öncesi ve sonrası için ε-σ eğimlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu tür deneylere ait sonuçlardan ayrıca zaman (t) – düşey birim deformasyon (ε) grafikleri hazırlanmıştır. Yükleme hız değerleri (kN/dk) azaldıkça test sürelerinin uzadığı izlenmiştir. Herbir t-ε grafiğinde sünme davranışını tanımlayan üç sünme aşamasının oluştuğu görülmüştür. Genel olarak tüm deney sonuçları dikkate alındığında test edilen model malzemenin dayanım değerleri arttıkça (örneğin DKM-1'den DKM-5'e kadar) test süresinin azaldığı daha kısa sürede üçüncü sünme aşamasına geçildiği izlenmiştir. Grup1 kapsamında yapılan tüm deney sonuçlarından doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM)'nin göstermiş olduğu ε-σ ve t-ε davranış biçimlerinin benzer olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneylerde, örneğin DKM-1'den DKM-5'e kadar veya YKM-1'den YKM-5'e kadar elde edilen deney sonuçlarındaki dayanım değerlerindeki zayıftan sağlama doğru sıralanış, temel kaya mekaniği deneylerinden belirlenen sıralanışa uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.54'te ifade edilen deneyler için toplam 75 adet model örnek kullanılarak 0.02 s aralıklar ile servo kontrollü hidrolik presten yaklaşık 818507 adet veri toplanmıştır. TEB ve DÇ deney koşulunda gerçekleştirilen sabit yük (kN) altında deneye tabi tutulan herbir model kaya malzemesi için (örneğin DKM-1) sırasıyla zaman (t) – düşey birim deformasyon (ε), düşey birim deformasyon (ε) – gerilme (σ) ve zaman (t) - gerilme (σ) grafikleri hazırlanmıştır. t-ε grafikleri incelendiğinde sünme davranışlarının üç aşamasının da oluştuğu görülmüştür. Örnek numuneye uygulanan sabit yük (kN) değeri artıkça numunenin t-ε davranışında daha kısa sürede üçüncü sünme aşamasına geçildiği ve örneğin kırıldığı görülmüştür. Tüm model numuneler dikkate alındığında dayanım değerleri arttıkça (örneğin DKM-1'den DKM-5'e kadar) üçüncü sünme aşamasına geçiş sürelerinin de kısaldığı görülmüştür. İkinci grafik türü olan ε-σ grafikleri incelendiğinde herbir dayanım aralığı için (örneğin DKM-1) uygulanan sabit yük değeri azaldıkça ε-σ eğimlerinin azaldığı dikkat çekmiştir. Tüm model numuneler göz önüne alındığında bu eğimlerin kullanılan numune dayanımına (örneğin DKM-1'den DKM-5'e kadar) bağlı olarak arttığı anlaşılmıştır. Son grafik türü t-σ grafikleri incelendiğinde her bir dayanım aralığında (örneğin DKM-1) sabit yük değerine kısa bir sürede ulaşıncaya kadar gerilmelerin sıfır başlangıç noktasından artmaya başladığı hedeflenen sabit yük değerine ulaşıldıktan sonra uzun bir zaman aralığında gerilme değerlerinin sabit kaldığı görülmektedir. Bu tür davranış grafikleri için bütün model numuneler göz önüne

alındığında, uygulanan sabit yük (kN) değerinin artmasıyla numune üzerinde uygulanan sabit gerilmenin daha kısa süre etkili olduğu ve daha kısa sürede numunenin yenildiği izlenmiştir. Grup2 kapsamında yapılan tüm deney sonuçlarından doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM)'nin genel olarak göstermiş olduğu t-ε, ε-σ ve, t-σ davranış biçimlerinin benzer olduğu belirlenmiştir. Grup2 deneylerinde, DKM-1'den DKM-5'e kadar veya YKM-1'den YKM-5'e kadar elde edilen dayanım değerlerinin zayıftan sağlama doğru sıralanışı ile temel kaya mekaniği deneylerinden belirlenen sıralanışın örtüştüğü anlaşılmıştır.

Çizelge 4. 53. Gerilme-hız-kontrollü (Grup1) deney koşulunda gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı hazırlanan grafiklerin dağılımı

		Model Malzeme	Dayanım Aralığı (MPa)	TEB Koşulundaki Deneyler		DÇ Koşulundaki Deneyler	
				ε-σ grafiği	t-ε grafiği	ε-σ grafiği	t-ε grafiği
Gerilme-Hız Kontrollü Deneyler Grup1	Doğal Kaya Malzemesi DKM	DKM-1	0-20	✓	✓	✓	✓
		DKM-2	20-40	✓	✓	✓	✓
		DKM-3	40-60	✓	✓	✓	✓
		DKM-4	60-80	✓	✓	✓	✓
		DKM-5	80-100	✓	✓	✓	✓
	Yapay Kaya Malzemesi YKM	YKM-1	0-20	✓	✓	✓	✓
		YKM-2	20-40	✓	✓	✓	✓
		YKM-3	40-60	✓	✓	✓	✓
		YKM-4	60-80	✓	✓	✓	✓
		YKM-5	80-100	✓	✓	✓	✓

Çizelge 4. 54. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme (Grup2) deney koşulunda gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı hazırlanan grafiklerin dağılımı

		Model Malzeme	Dayanım Aralığı (MPa)	TEB Koşulundaki Deneyler			DÇ Koşulundaki Deneyler		
				t-ε grafiği	ε-σ grafiği	t-σ grafiği	t-ε grafiği	ε-σ grafiği	t-σ grafiği
Sabit-Gerilme-Kontrollü-Sünme Deneyleri Grup2	Doğal Kaya Malzemesi DKM	DKM-1	0-20	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		DKM-2	20-40	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		DKM-3	40-60	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		DKM-4	60-80	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		DKM-5	80-100	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Yapay Kaya Malzemesi YKM	YKM-1	0-20	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		YKM-2	20-40	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		YKM-3	40-60	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		YKM-4	60-80	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		YKM-5	80-100	✓	✓	✓	✓	✓	✓

5. TARTIŞMA

TÜBİTAK tarafından 1002 Hızlı Destek programı kapsamında 122M079 nolu proje ile desteklenen bu tezin temel amacı, kaya malzemesi üzerinde gelişen pekleşme (hardening) davranışının belirlenmesi ve sonuç olarak kaya malzemesinin kritik gerilme etkisinde oluşan ve yenilmenin söz konusu olmadığı pekleşme sınırını belirlemek olmuştur. Kaya malzemesinin bu davranışının belirlenmesi için literatürde iki farklı deney sistemi önerilmektedir (Vardar, 1977 ve Rüsch, 1960). Bunlar deformasyon kontrollü deneyler (strain rate) ve sünme (creep) deneyleridir.

Bu tez çalışması kapsamında homojen malzeme dokusuna sahip yapay beton malzeme (YKM) ve doğal kaya malzemesi (DKM) model olarak seçilmiştir. Parametrik bir çalışma niteliğinde olan bu tezde beş farklı dayanıma sahip yapay model beton malzemesi tanımlanmıştır. Bunlar sırasıyla YKM-1 (0-20 MPa), YKM-2 (20-40 MPa), YKM-3 (40-60 MPa), YKM-4 (60-80 MPa) ve YKM-5 (80-100 MPa) olmuştur. Benzer şekilde farklı dayanımda ve olabildiğince homojen olduğu varsayılan beş farklı doğal kaya malzemesi model olarak dikkate alınmıştır. Bunlar sırasıyla DKM-1 (0-20 MPa, tüf kaya birimi), DKM-2 (20-40 MPa, andezit kaya birimi), DKM-3 (40-60 MPa, traverten kaya birimi), DKM-4 (60-80 MPa, mermer kaya birimi) ve DKM-5 (80-100 MPa, bazalt kaya birimi) olarak tanımlanmıştır. Yukarıda tanımlanan bu yapay ve doğal kaya malzemelerinden hazırlanan örnekler üzerinde servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled, Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep, Grup2) deneyleri planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Kullanılan servo kontrollü pres 90 ton kapasiteli olup istenilen yükleme hızının ayarlanmasına (loading rate), istenilen yükleme ve boşaltma hız ayarına (loading-unloading rate), istenilen periyodik yükleme ve boşatma senaryolarına (loading-unloading cycle), istenilen yük değerinde yükün sabit tutulabilmesine (creep) olanak tanıyabilmektedir. Aynı zamanda 0.02 s aralıklarında düşey gerilme ve düşey deformasyon değerlerini kayıt altına alabilmektedir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular, Bölüm 4'te detayları ile sunulmuştur.

Bu çalışmada kritik eşik olarak ifade edilen değerler sırası ile $\sigma_c(t)$, $E_{i\text{-}TEB}(t)$, $\sigma_{tB}(t)$, $E_{i\text{-}DÇ}(t)$ olarak Eşitlik 3.1-3.4 (Bölüm 3)'de tanımlanmıştır. Tez çalışmaları daha önce belirtildiği üzere beş farklı dayanım aralığında gerçekleştirilmiştir (0-20MPa, 20-40MPa, 40-60MPa, 60-80MPa ve 80-100MPa). Ayrıca kritik pekleşme eşik değerini gösteren $\sigma_c(t)$ ve $\sigma_{tB}(t)$ yardımıyla Mohr analizleri yapılarak $c(t)$ ve $\phi(t)$ (Eşitlik 3.5 ve 369, Bölüm

3) değerleri her bir dayanım aralığında belirlenmiş, tasarıma olan etkisinin anlaşılması için elde edilen sonuçlar örnek bir vaka üzerinde sayısal analizlerde kullanılmıştır.

Bu bölüm altında 6 alt başlık sunulacaktır. Bunlar sırası ile; (1) TEB koşulunda kritik eşik pekleşme $\sigma_c(t)$ değerinin belirlenmesi, (2) DÇ koşulunda kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi $\sigma_{tB}(t)$, (3) TEB koşulunda pekleşme davranışına dayalı kritik eşik $E_{i\text{-}TEB}(t)$ ve normal $E_{d\text{-}TEB}$ değerlerinin belirlenmesi, (4) DÇ koşulunda pekleşme davranışına dayalı kritik eşik $E_{i\text{-}DÇ}(t)$, (5) TEB ve DÇ koşullarına dayalı kritik eşik pekleşme c(t) ve $\phi(t)$ değerlerinin belirlenmesi ve (6) ayrıca sayısal analizler olmuştur.

5.1. Tek Eksenli Basma (TEB) Koşulunda Kritik Eşik Pekleşme σc(t) Değerinin Belirlenmesi

Bu bölümde tek eksenli basma (TEB) koşulunda gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled, Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep, Grup2) olarak tanımlanan iki farklı deneyden elde edilen sonuçlar verilecektir.

5.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1)

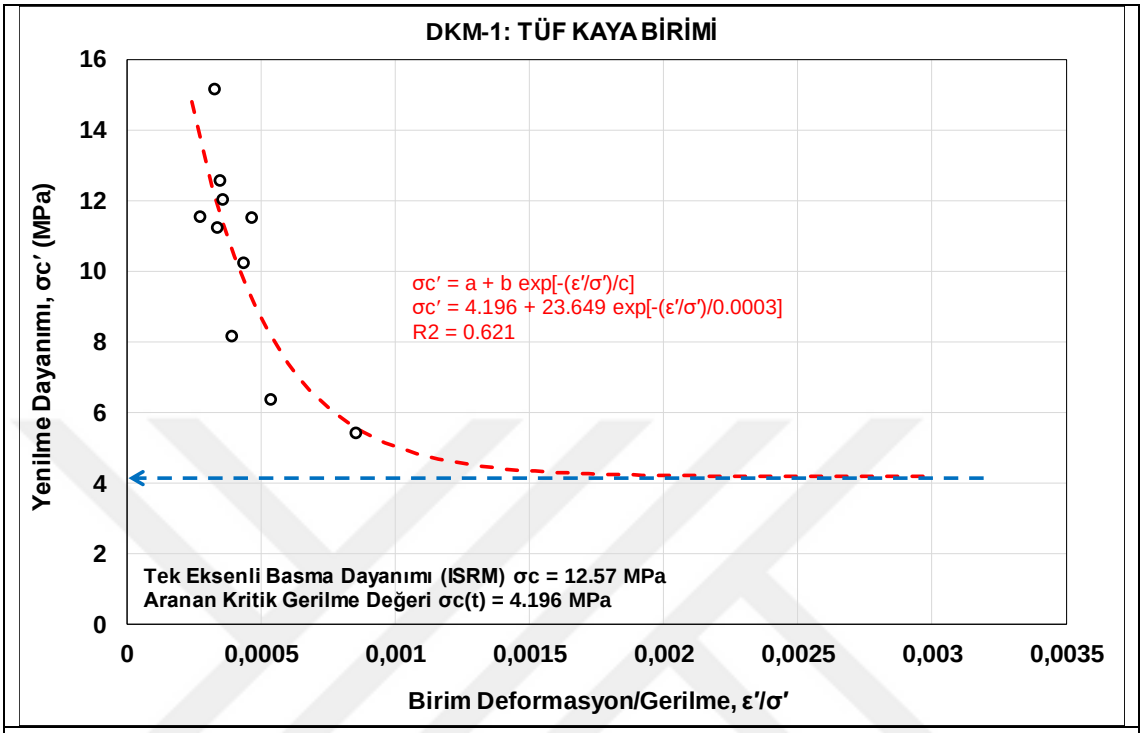
5.1.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.3 alt başlığında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan birim deformasyon (ε′)- gerilme (σ′) eğrilerinin en üst noktaları bir başka ifade ile yenilme noktaları işaretlenerek kayıt altına alınmıştır. Ayrıca her bir deneye ait ε′-σ′ eğrisinin elastik sınırları içerisinde kalan doğrusal eğrinin eğim değerleri bir başka ifade ile E_i' ($\Delta\sigma'/\Delta\varepsilon'$, MPa) elastik modül değerleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra E_i' değerinin tersi $1/E_i'$ ($\Delta\varepsilon'/\Delta\sigma'$) dikkate alınmıştır. Her bir deney için birim düşey gerilme (σ′) etkisinde oluşan birim deformasyon (ε′) değerleri elde edilmiştir. Böylelikle gerilmeye dayalı birim deformasyon hız (srain rate) değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler (ε′/σ′) ile her bir deneyden belirlenen yenilme değerleri (σ_c') arasında yeni grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_c(t)$) tespit edilmiştir.

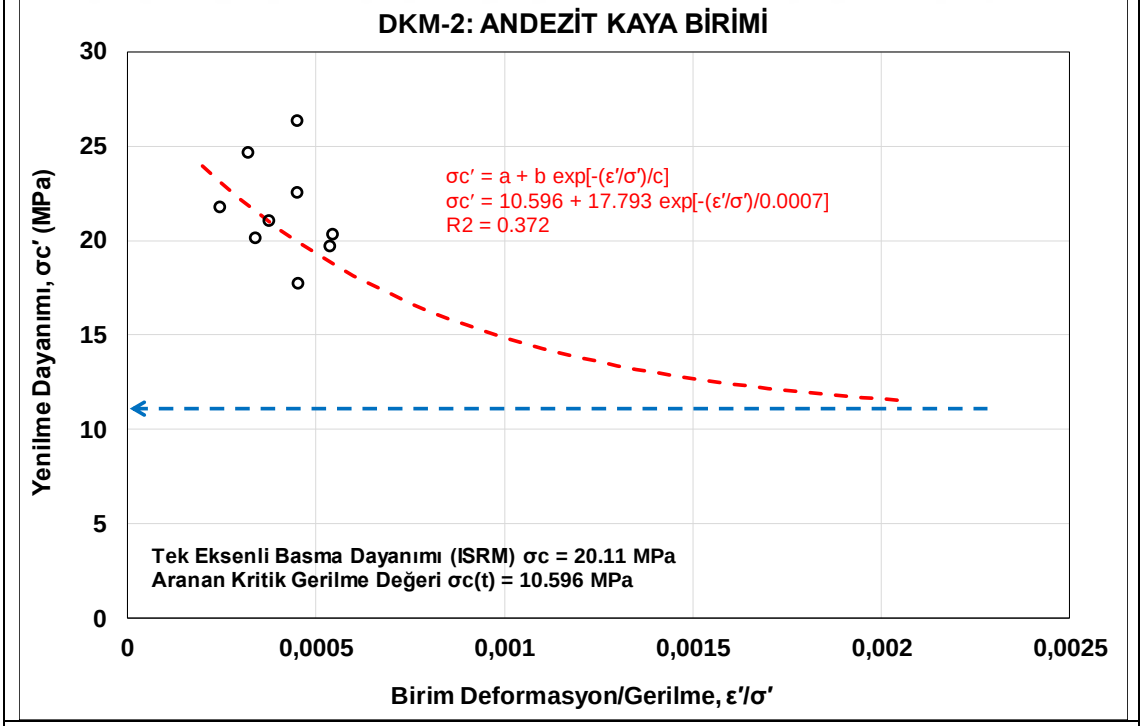
Çizelge 5.1. DKM/ Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.3)

Model Kaya Malzemesi	Dayanım Aralığı	Deney Tanımı, Yükleme hızı (kN/dk)	Yenilme Dayanımı $(\sigma_c)'$ (MPa)	Elastik Modül $(E_i)'$ (MPa)	$1/(E_i)'$ (ε'/σ')	Grafik
DKM-1 (Tüf)	0-20	4	11.52	2152.297	$46.462\ 10^{-5}$	Şekil 5.1 (a)
		7	8.16	2557.635	$39.099\ 10^{-5}$	
		14	6.37	1861.538	$53.719\ 10^{-5}$	
		34	11.23	2981.250	$33.543\ 10^{-5}$	
		68	12.02	2795.031	$35.778\ 10^{-5}$	
		100	12.57	2876.100	$34.769\ 10^{-5}$	
		136	11.54	3662.337	$27.305\ 10^{-5}$	
		170	15.17	3070.568	$32.567\ 10^{-5}$	
		204	10.23	2293.668	$43.598\ 10^{-5}$	
DKM-2 (Andezit)	20-40	4	20.32	1831.718	$54.594\ 10^{-5}$	Şekil 5.1 (b)
		7	22.51	2220.297	$45.039\ 10^{-5}$	
		14	26.33	2223.256	$44.979\ 10^{-5}$	
		34	21.75	4061.798	$24.619\ 10^{-5}$	
		68	19.67	1856.811	$53.856\ 10^{-5}$	
		100	20.11	2941.463	$33.997\ 10^{-5}$	
		136	21.05	2650.412	$37.730\ 10^{-5}$	
		170	17.71	2206.061	$45.329\ 10^{-5}$	
		204	24.64	3110.119	$32.153\ 10^{-5}$	
DKM-3 (Traverten)	40-60	4	60.33	20950.413	$4.773\ 10^{-5}$	Şekil 5.1 (c)
		7	41.95	6781.843	$14.745\ 10^{-5}$	
		14	55.69	11614.872	$8.609\ 10^{-5}$	
		34	38.12	9682.836	$10.327\ 10^{-5}$	
		68	41.81	11748.148	$8.512\ 10^{-5}$	
		100	49.89	20136.986	$4.966\ 10^{-5}$	
		136	60.23	19900.000	$5.025\ 10^{-5}$	
		170	76.24	24269.126	$4.120\ 10^{-5}$	
		204	49.39	12285.714	$8.139\ 10^{-5}$	
DKM-4 (Mermer)	60-80	4	50.11	14547.62	$6.874\ 10^{-5}$	Şekil 5.1 (d)
		7	58.41	13300.68	$7.518\ 10^{-5}$	
		14	61.24	11307.21	$8.844\ 10^{-5}$	
		34	60.09	13907.14	$7.191\ 10^{-5}$	
		68	49.17	21057.69	$4.749\ 10^{-5}$	
		100	56.90	25823.13	$3.873\ 10^{-5}$	
		136	65.06	30285.71	$3.302\ 10^{-5}$	
		170	77.79	40100.31	$2.494\ 10^{-5}$	
		204	51.45	12812.5	$7.805\ 10^{-5}$	
DKM-5 (Bazalt)	80-100	4	62.09	6185.143	$16.168\ 10^{-5}$	Şekil 5.1 (e)
		7	52.63	3925.781	$25.473\ 10^{-5}$	
		7	78.99	17530.864	$5.704\ 10^{-5}$	
		14	60.10	8202.765	$12.191\ 10^{-5}$	
		34	70.54	8166.667	12.24510^{-5}	
		68	65.46	10328.639	$9.682\ 10^{-5}$	
		100	66.89	16200.000	$6.173\ 10^{-5}$	
		100	132.72	23115.207	$4.326\ 10^{-5}$	
		136	162.41	19372.549	$5.162\ 10^{-5}$	
		170	114.11	18024.194	$5.548\ 10^{-5}$	
		204	142.58	37624.060	$2.658\ 10^{-5}$	

Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak DKM için her bir dayanım aralığından elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.1 hazırlanmıştır.

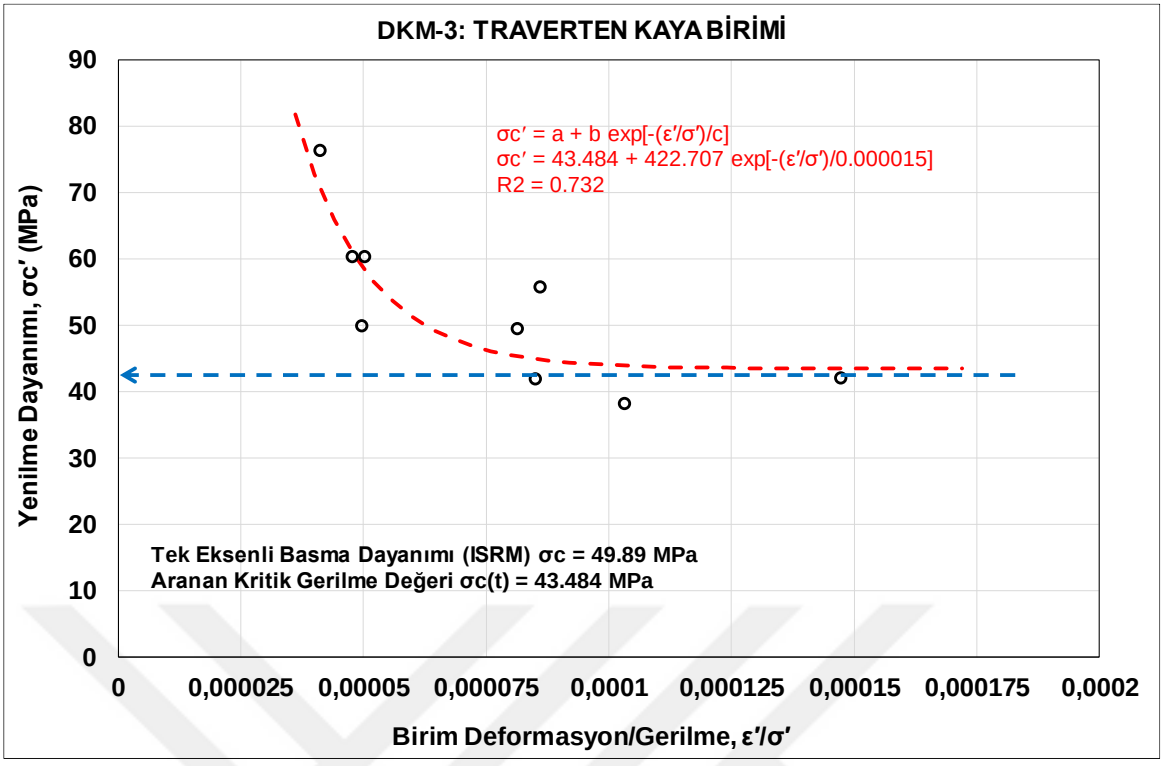


a) DKM-1 Tüf kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

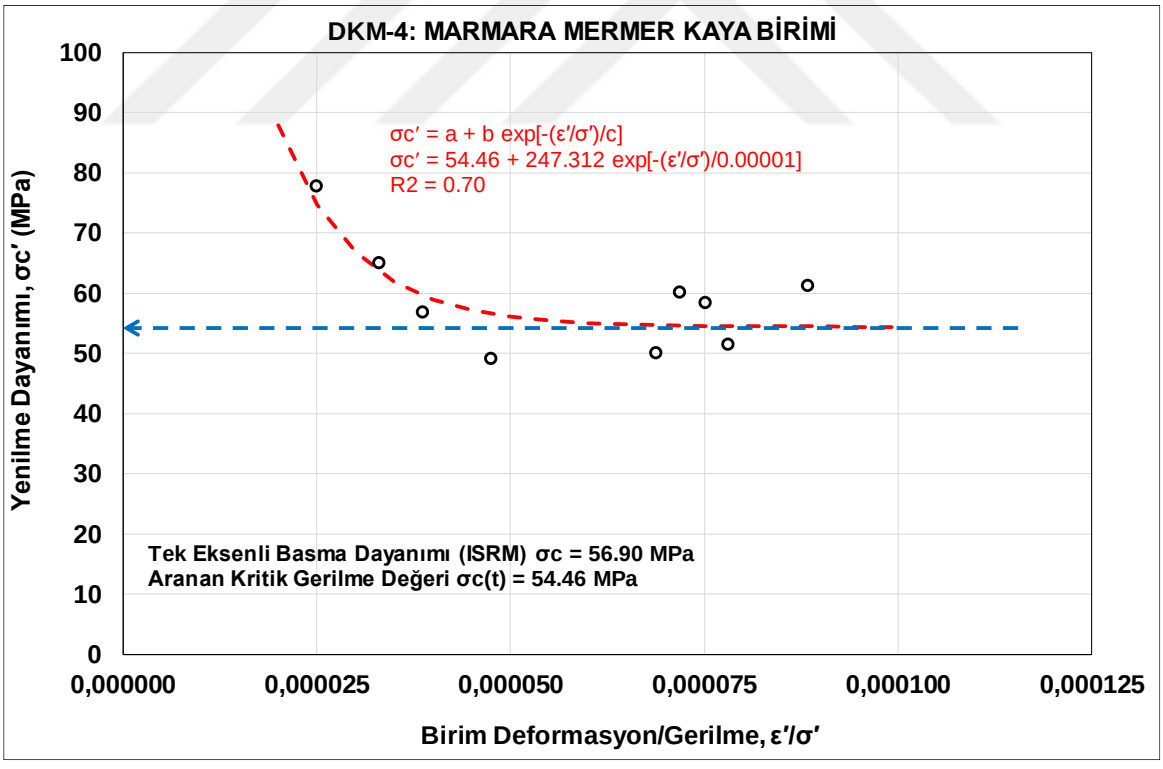


b) DKM-2 Andezit kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.1 (devam)

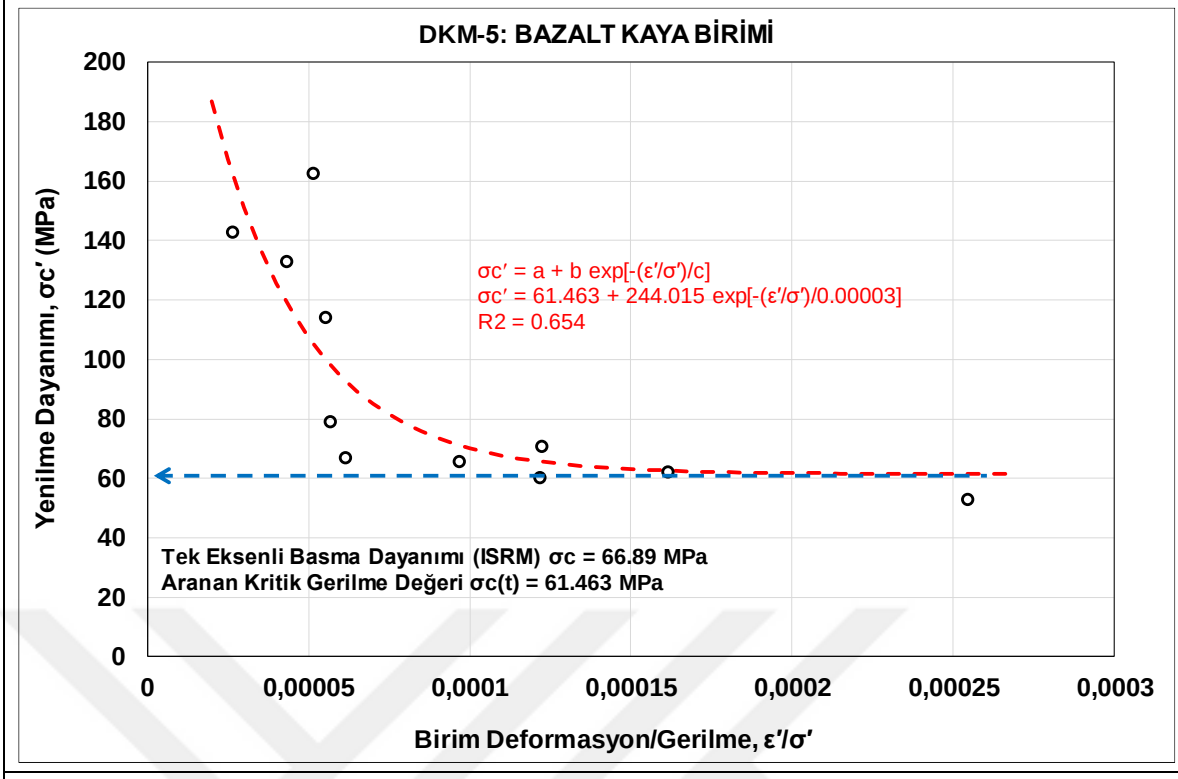


c) DKM-3 Traverten kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) DKM-4 Mermer kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.1 (devam)



e) DKM-5 Bazalt kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.1. Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) için ε′/σ′ oranı ile σ_c' arasında belirlenen davranışlar ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_c(t)$) değerleri.

Yukarıda sunulan grafiklerden ε′/σ′ oranı ile σ_c' arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda ayrıca verilmiştir.

$$\sigma_c' = a + b * \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / c] \qquad (5.1)$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, ε′/σ′ birim deformasyon gerilme oranı $(1/(E_i)')$ ve σ_c' ise farklı yükleme hızlarında oluşan yenilme dayanımlarını tanımlamaktadır. Şekil 5.1'de gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nokta kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_c(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_c(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar yenilmeden üzerindeki gerilmeyi taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$\sigma_c' = \sigma_c(t)$ (5.2a)

$\sigma_c' > \sigma_c(t)$ (5.2b)

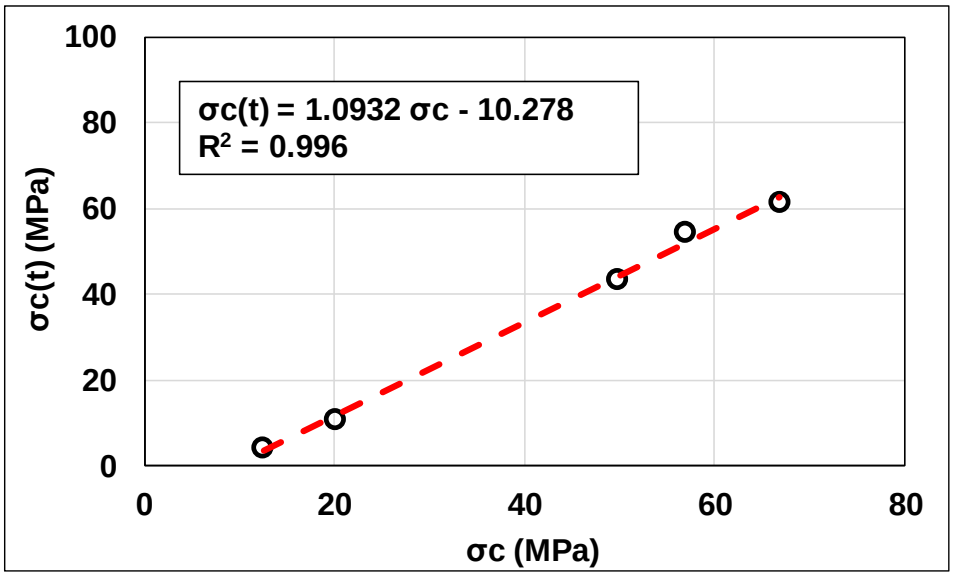
$\sigma_c' < \sigma_c(t)$ (5.2c)

Eşitlik 5.2a'da verilen koşulda gerilme altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki gerilmeyi kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.2b'de belirtilen koşulda malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de zaman içerisinde malzeme yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.2c'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, pekleşme gözlenmez ve yenilmesi söz konusu değildir, üzerindeki gerilmeyi taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

Şekil 5.1'de sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.1) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_c(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_c (0.5-1 MPa/s) yenilme değerleri topluca Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu çizelge verileri ile hazırlanan grafik ise Şekil 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(DKM)	(MPa)	σ_c (MPa)	$\sigma_c(t)$ (MPa)
DKM-1	0-20	12.57	4.196
DKM-2	20-40	20.11	10.596
DKM-3	40-60	49.89	43.484
DKM-4	60-80	56.9	54.46
DKM-5	80-100	66.89	61.463



Şekil 5.2. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen ISRM-σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri arasındaki ilişki

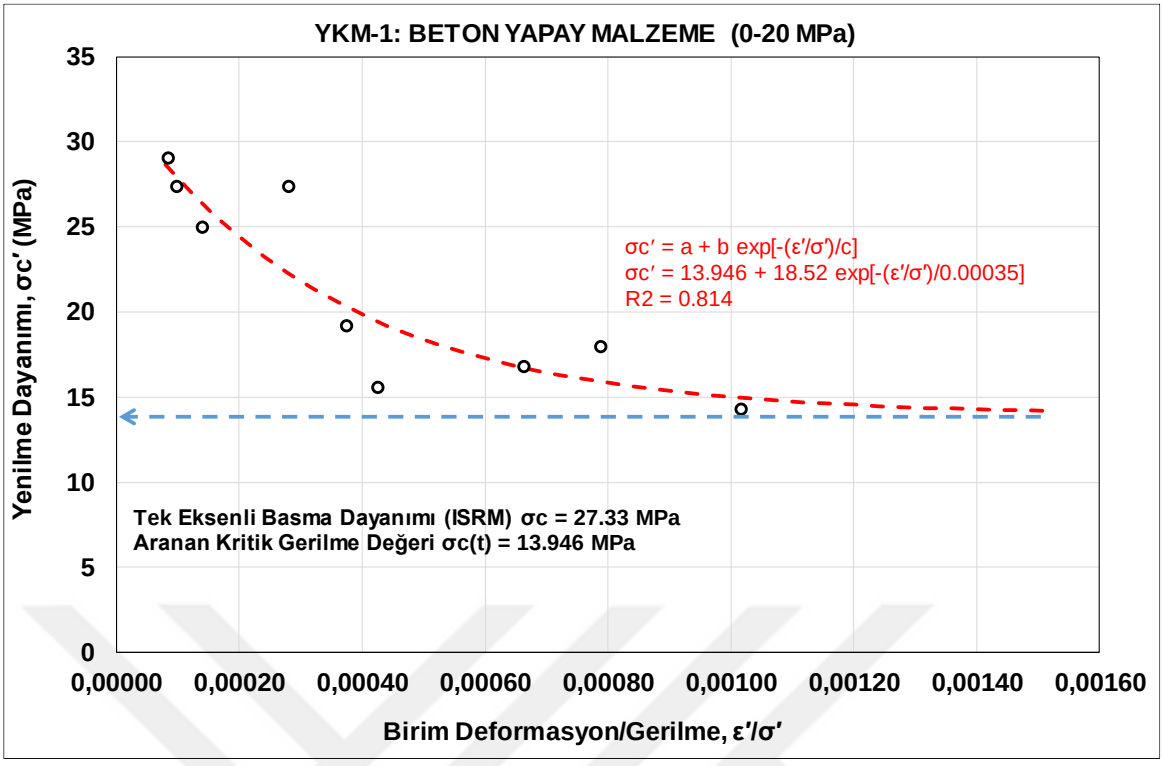
5.1.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) koşulda gerçekleştirilen deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.4 alt başlığı altında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan birim deformasyon (ε′)- gerilme (σ′) eğrilerinin en üst noktaları bir başka ifade ile yenilme noktaları işaretlenerek kayıt altına alınmıştır. Ayrıca her bir deneye ait ε′-σ′ eğrisinin elastik sınırları içerisinde kalan doğrusal eğrinin eğim değerleri bir başka ifade ile E_i' ($\Delta\sigma'/\Delta\varepsilon'$, MPa) elastik modül değerleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra E_i' değerinin tersi $1/E_i'$ ($\Delta\varepsilon'/\Delta\sigma'$) dikkate alınmıştır. Her bir deney için birim düşey gerilme (σ′) etkisinde oluşan birim birim deformasyon (ε′) değerleri elde edilmiştir. Böylelikle gerilmeye dayalı birim deformasyon hız (strain rate) değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler (ε′/σ′) ile her bir deneyden belirlenen yenilme değerleri (σ_c') arasında yeni grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_c(t)$) tespit edilmiştir.

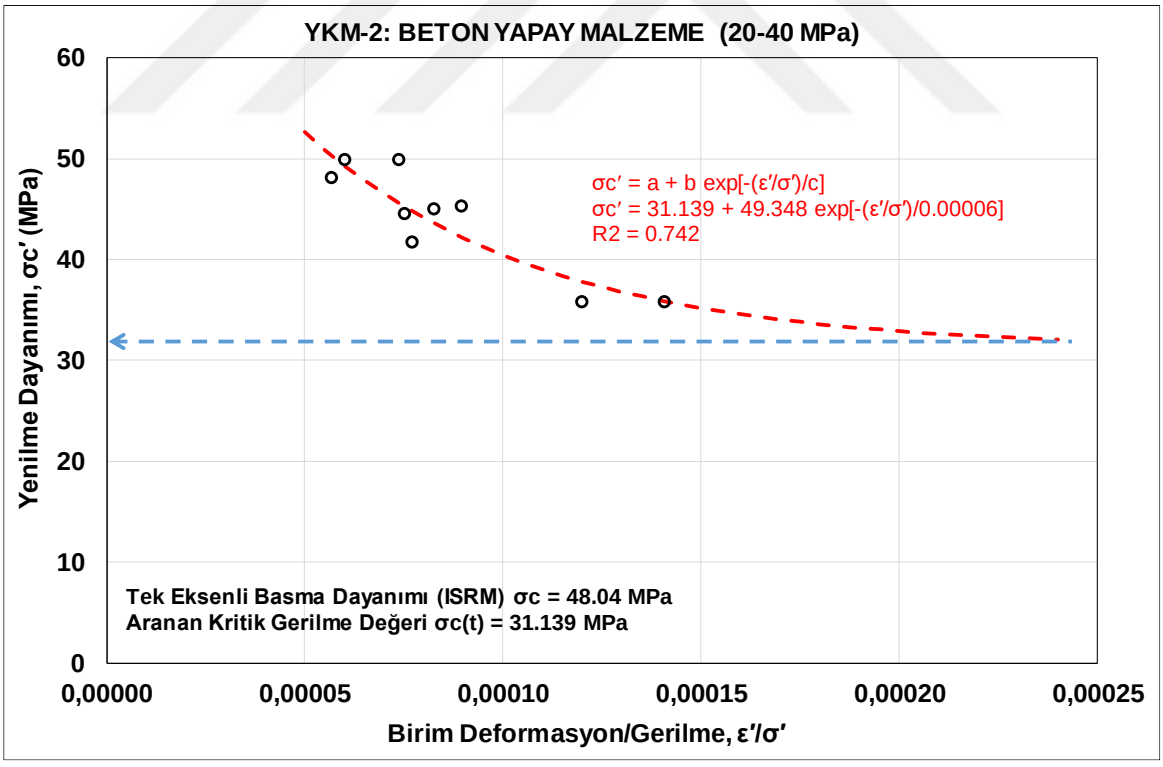
Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak yapay kaya malzemesi (YKM) için her bir dayanım aralığında elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.3'te sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.3 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.3. YKM / Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.4)

Model Kaya Malzemesi	Dayanım Aralığı	Deney Tanımı, Yükleme hızı (kN/dk)	Yenilme Dayanımı $(\sigma_c)'$ (MPa)	Elastik Modül $(E_i)'$ (MPa)	$1/(E_i)'$ (ε'/σ')	Grafik
YKM-1	0-20	14	17.93	1268.04	$78.862\ 10^{-5}$	Şekil 5.3 (a)
		25	16.77	1506.36	$66.385\ 10^{-5}$	
		50	19.16	2662.64	$37.557\ 10^{-5}$	
		120	15.54	2348.78	$42.575\ 10^{-5}$	
		240	14.25	983.54	$101.674\ 10^{-5}$	
		353	27.33	3563.49	$28.062\ 10^{-5}$	
		480	27.37	10040.39	$9.959\ 10^{-5}$	
		600	29.04	11738.16	$8.519\ 10^{-5}$	
		707	24.94	7126.23	$14.033\ 10^{-5}$	
YKM-2	20-40	14	35.73	8336.901	$11.995\ 10^{-5}$	Şekil 5.3 (b)
		25	45.25	11146.068	$8.972\ 10^{-5}$	
		50	49.83	16628.827	$6.014\ 10^{-5}$	
		120	41.69	12955.560	$7.719\ 10^{-5}$	
		240	35.73	7104.303	$14.076\ 10^{-5}$	
		353	48.04	17632.561	$5.671\ 10^{-5}$	
		480	44.94	12078.935	$8.279\ 10^{-5}$	
		600	44.47	13269.998	$7.536\ 10^{-5}$	
		707	49.91	13550.319	$7.379\ 10^{-5}$	
YKM-3	40-60	14	62.41	3060.700	$32.672\ 10^{-5}$	Şekil 5.3 (c)
		25	62.23	2321.931	$43.068\ 10^{-5}$	
		50	59.00	2428.291	$41.181\ 10^{-5}$	
		120	64.82	20318.582	$4.922\ 10^{-5}$	
		240	65.84	16620.044	$6.017\ 10^{-5}$	
		353	64.89	6858.920	$14.579\ 10^{-5}$	
		480	44.38	5050.704	$19.799\ 10^{-5}$	
		600	55.65	5632.335	$17.755\ 10^{-5}$	
		707	56.00	6056.072	$16.512\ 10^{-5}$	
YKM-4	60-80	14	84.86	11570.0	$8.643\ 10^{-5}$	Şekil 5.3 (d)
		25	75.81	9642.857	$10.370\ 10^{-5}$	
		50	61.98	9642.857	$10.370\ 10^{-5}$	
		120	38.40	4117.808	$24.285\ 10^{-5}$	
		240	85.00	6333.333	$15.789\ 10^{-5}$	
		353	84.60	15241.379	$6.561\ 10^{-5}$	
		480	92.35	11812.5	$8.466\ 10^{-5}$	
		600	88.36	12320.0	$8.117\ 10^{-5}$	
		707	86.69	10725.0	$9.324\ 10^{-5}$	
YKM-5	80-100	14	81.74	8071.79	$12.389\ 10^{-5}$	Şekil 5.3 (e)
		25	92.26	12946.91	$7.724\ 10^{-5}$	
		50	89.58	11726.40	$8.528\ 10^{-5}$	
		120	91.34	10992.44	$9.097\ 10^{-5}$	
		240	88.12	7650.73	$13.071\ 10^{-5}$	
		353	80.01	8690.88	$11.506\ 10^{-5}$	
		480	100.12	11811.54	$8.466\ 10^{-5}$	
		600	87.37	9298.43	$10.754\ 10^{-5}$	
		707	94.65	10274.88	$9.732\ 10^{-5}$	

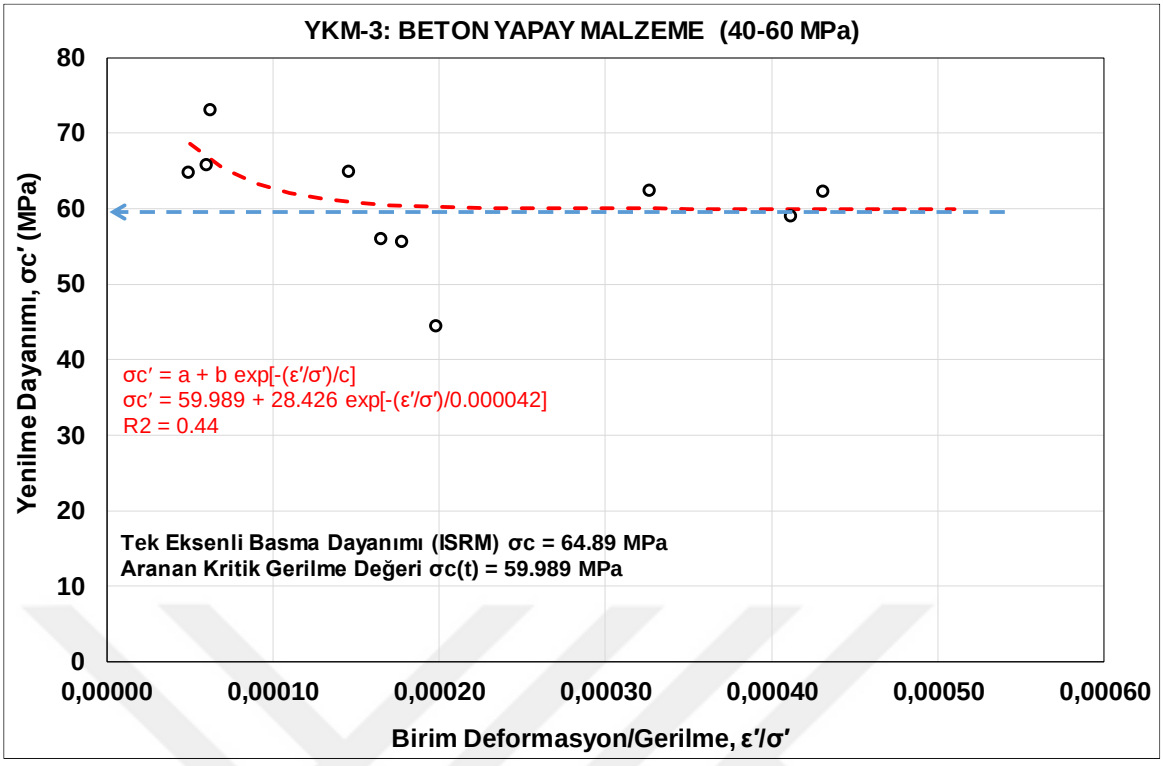


a) YKM-1 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

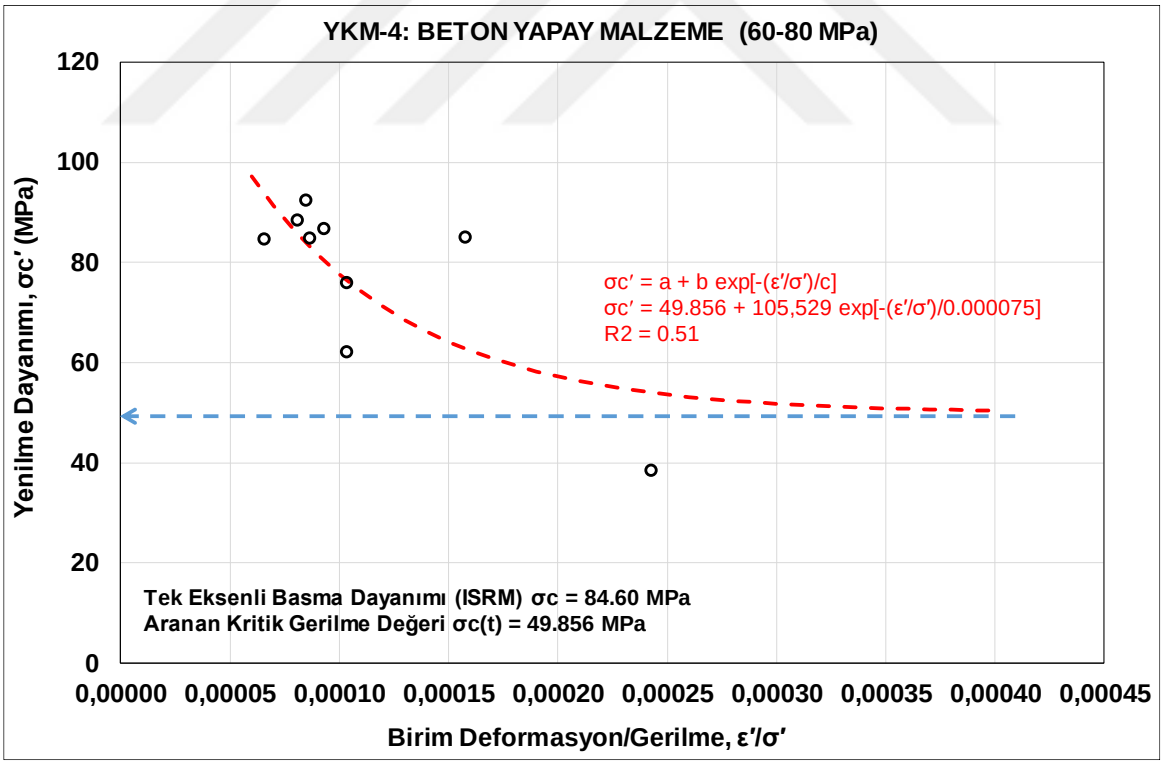


b) YKM-2 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.3 (devam)

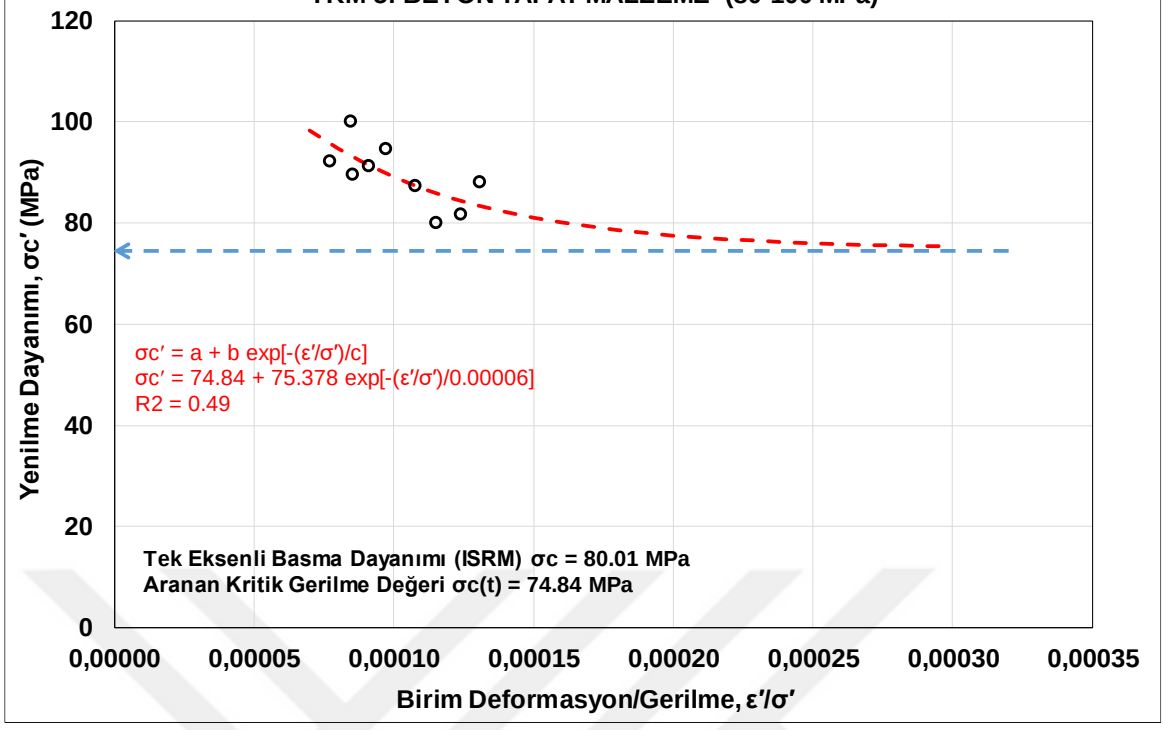


c) YKM-3 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) YKM-4 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.3 (devam)



e) YKM-5 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.3. Farklı dayanımlara sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) için ε′/σ′ oranı ile σ_c' arasında belirlenen davranışlar ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_c(t)$) değerleri.

Yukarıda sunulan grafiklerden ε′/σ′ oranı ile σ_c' arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_c' = a + b * \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / c] \qquad (5.3)$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, ε′/σ′ birim deformasyon gerilme oranı ($1/(E_i)'$) ve σ_c' ise farklı yükleme hızlarında oluşan yenilme dayanımlarını tanımlamaktadır. Şekil 5.3'te gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nota kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_c(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_c(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar yenilmeden üzerindeki gerilmeyi taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

(5.4a)

$\sigma_c' = \sigma_c(t)$

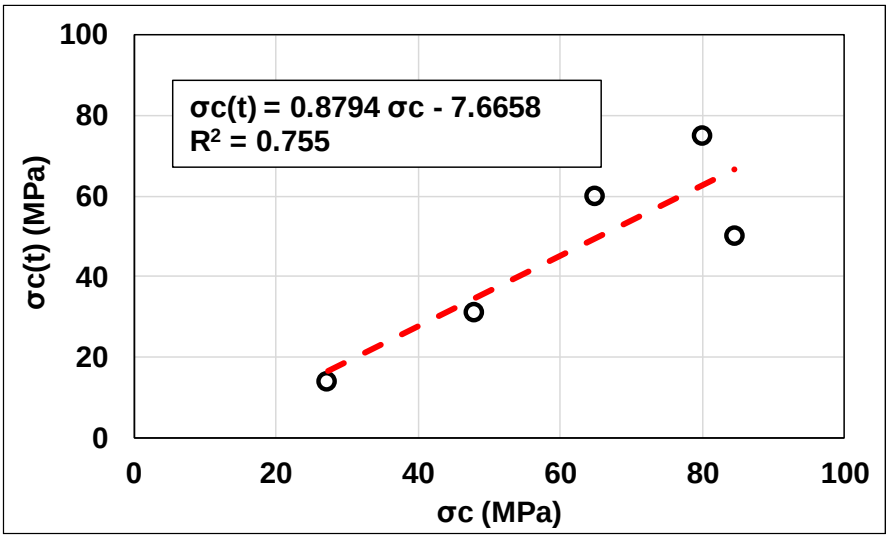
$\sigma_c' > \sigma_c(t)$ (5.4b)

$\sigma_c' < \sigma_c(t)$ (5.4c)

Eşitlik 5.4a'da verilen koşulda gerilme altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki gerilmeyi kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.4b'de belirtilen koşulda malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de zaman içerisinde yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.4c'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, pekleşme davranışı görülmez malzemede yenilme söz konusu değildir, üzerindeki gerilmeyi taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

Çizelge 5.4. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(YKM)	(MPa)	σ_c (MPa)	$\sigma_c(t)$ (MPa)
YKM-1	0-20	27.33	13.946
YKM-2	20-40	48.04	31.139
YKM-3	40-60	64.89	59.989
YKM-4	60-80	84.60	49.856
YKM-5	80-100	80.01	74.840



Şekil 5.4. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen ISRM-σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri arasındaki ilişki

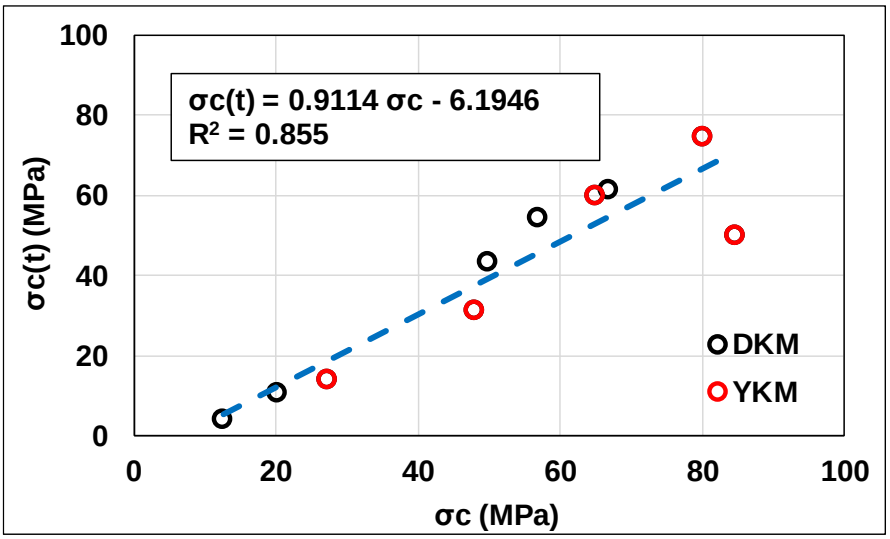
Şekil 5.3'te sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.3) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_c(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_c (0.5-1 MPa/s) değerleri topluca Çizelge 5.4'de verilmiştir. Bu çizelge verileri ile hazırlanan grafik Şekil 5.4'te sunulmuştur.

5.1.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1)

Yukarıda beş farklı dayanıma sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yine beş farklı dayanıma sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerilme-hız-kontrollü deneyler ile belirlenen pekleşme davranışları değerlendirilmiştir. Aynı deney koşullarında gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.2 ve 5.4 verileri birleştirilerek Çizelge 5.5 ve aşağıda sunulan grafik hazırlanmıştır (Şekil 5.5).

Çizelge 5.5. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(MPa)	(DKM ve YKM)	σ_c (MPa)	$\sigma_c(t)$ (MPa)
0-20	DKM-1	12.57	4.196
	YKM-1	27.33	13.946
20-40	DKM-2	20.11	10.596
	YKM-2	48.04	31.139
40-60	DKM-3	49.89	43.484
	YKM-3	64.89	59.989
60-80	DKM-4	56.9	54.46
	YKM-4	84.6	49.856
80-100	DKM-5	66.89	61.463
	YKM-5	80.01	74.84



Şekil 5.5. DKM ve YKM için toplam on farklı kaya birimine ait ISRM-σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.5'te görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda 0.5-1 MPa/s yükleme hızı altında gerçekleştirilen deney sonuçlarının (σ_c), kritik pekleşme eşiğini belirten $\sigma_c(t)$ değerinden büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.5'te belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.5'de verilmiştir.

$$\sigma_c(t) = 0.9114\ \sigma_c - 6.1946 \qquad (5.5)$$

5.1.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

5.1.2.1. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) koşulunda gerçekleştirilen deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.5 alt başlığında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan zaman (t″) - birim deformasyon (ε″), zaman (t″) - gerilme (σ″) ve birim deformasyon (ε″) - gerilme (σ″) eğrileri dikkate alınmıştır. Özellikle birim deformasyon (ε″) - gerilme (σ″) eğrilerinde görülen sünme davranışının üç aşamasındaki geçiş noktaları belirlenmiştir. Sünme davranışının aşama 1'den aşama-2'ye geçiş noktasındaki sırası ile zaman (t″), birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri kayıt altına alınmıştır. Benzer şekilde

sünme davranışının aşama-2'den aşama-3 geçiş noktasına ait zaman (t″), birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri grafik üzerinden belirlenerek kayıt edilmiştir. Aynı zamanda aşama 3'ün içinde özlenen yenilme anına ait zaman (t″), birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen zaman (t″) ve örnekler üzerine uygulanan sabit gerilme (σ″) değerleri yardımıyla ilgili grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_c(t)$) tespit edilmiştir.

Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak DKM için her bir dayanım aralığında aşama 3'te elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.6'da sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.6 hazırlanmıştır.

Şekil 5.6'da sunulan grafiklerden t″ ile σ″ arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda ayrıca verilmiştir.

$$\sigma'' = a + b * \text{Exp}[- t'' / c] \tag{5.6}$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, t″ zaman ve σ″ ise sünme deneyindeki (Grup2) uygulanan sabit gerilme değerini belirtmektedir.

Şekil 5.6'da gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nota kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_c(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_c(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar yenilmeden üzerindeki gerilmeyi taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$$\sigma'' = \sigma_c(t) \tag{5.7a}$$

$$\sigma'' > \sigma_c(t) \tag{5.7b}$$

$$\sigma'' < \sigma_c(t) \tag{5.7c}$$

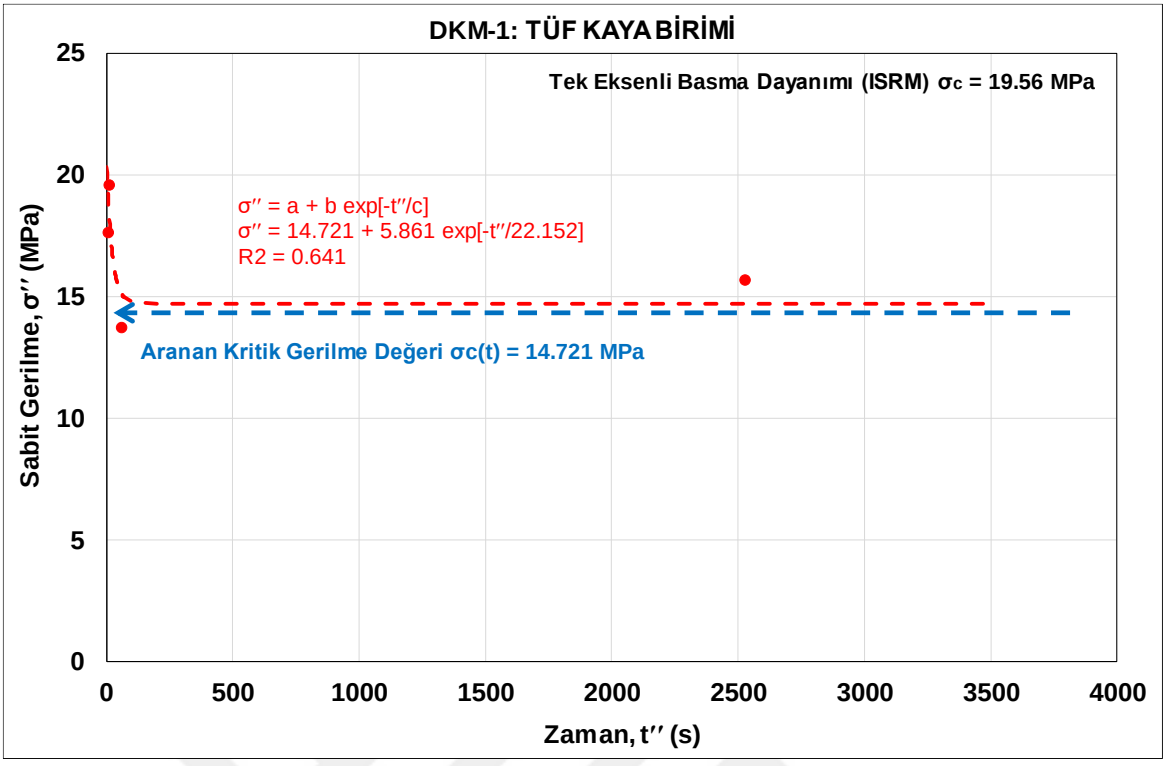
Eşitlik 5.7a'da verilen koşulda gerilme altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki gerilmeyi kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.7b'de belirtilen koşulda malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.7c'de belirtilen koşul altında malzeme

sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, yenilmesi söz konusu değildir, üzerindeki gerilmeyi taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

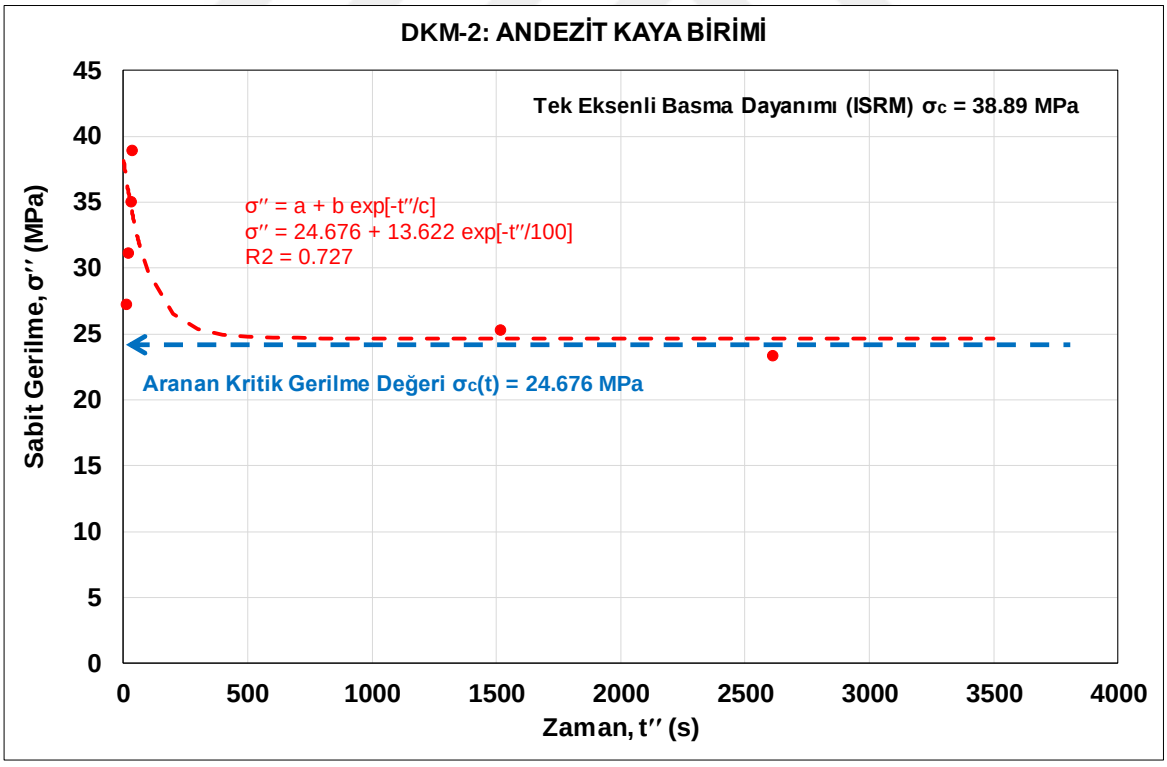
Şekil 5.6'da sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.6) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_c(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_c (0.5-1 MPa/s) değerleri topluca Çizelge 5.7'de verilmiştir. Sünme deneylerinde sabit gerilme değeri örnek kaya üzerinde oluşturuncaya kadarki geçen sürede yükleme hızı 0.75 MPa/s seçilmiştir. Bu çizelge verileri ile hazırlanan grafik Şekil 5.7'de sunulmuştur.

Çizelge 5.6. DKM / Grup2'ye ait sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.5), sünme davranışı aşama 3'ün bitiş sınırı

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Dayanım Aralığı	Deney Tanımı Sabit Gerilme Oranı	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 3 içerisinde Yenilme Sınırı			Grafik
			σ″ (MPa)	F″ (kN)	Zaman t″ (s)	Birim Deformasyon ε″ (-)	Mevcut Gerilme σ″ (MPa)	
DKM-1 (Tüf)	0-20	1 (σ_c)	19.56	44.77	13.4	544.08 10^{-5}	19.559	Şekil 5.6 (a)
		0.9	17.60	40.30	8.2	187.09 10^{-5}	11.491	
		0.8	15.65	35.82	2528	412.55 10^{-5}	15.366	
		0.7	13.69	31.34	61.4	256.89 10^{-5}	13.334	
		0.6	11.74	26.86	-	-	-	
		0.5	9.78	22.39	-	-	-	
DKM-2 (Andezit)	20-40	1 (σ_c)	38.89	89.02	37.4	969.38 10^{-5}	38.881	Şekil 5.6 (b)
		0.9	35.00	80.12	31.8	782.71 10^{-5}	29.759	
		0.8	31.11	71.22	21.8	1052.3 10^{-5}	21.858	
		0.7	27.22	62.32	13.4	708.33 10^{-5}	18.906	
		0.65	25.28	57.86	1519.4	1079.5 10^{-5}	25.282	
		0.6	23.33	53.41	2611.6	725.96 10^{-5}	22.408	
		0.5	19.45	44.51	-	-	-	
DKM-3 (Traverten)	40-60	1 (σ_c)	60.29	138.01	70.4	370.12 10^{-5}	60.295	Şekil 5.6 (c)
		0.9	54.26	124.21	64.2	468.41 10^{-5}	53.434	
		0.8	48.23	110.41	22.6	409.59 10^{-5}	27.332	
		0.75	45.22	103.51	43.2	410.44 10^{-5}	44.844	
		0.7	42.20	96.61	2539.6	414.68 10^{-5}	42.229	
		0.6	36.17	82.80	-	-	-	
		0.5	30.15	69.00	-	-	-	
DKM-4 (Mermer)	60-80	1 (σ_c)	70.76	161.97	90.6	513.49 10^{-5}	72.309	Şekil 5.6(d)
		0.9	63.68	145.78	48.6	672.27 10^{-5}	42.048	
		0.8	56.61	129.58	74.8	393.91 10^{-5}	57.755	
		0.75	53.07	121.48	69.4	520.64 10^{-5}	53.864	
		0.7	49.53	113.38	920.6	587.28 10^{-5}	50.598	
		0.7	49.53	117.62	57.4	519.11 10^{-5}	53.586	
		0.6	42.46	97.18	3002.4	194.60 10^{-5}	43.395	
		0.5	35.38	80.99	2726.8	257.09 10^{-5}	36.179	
DKM-5 (Bazalt)	80-100	1 (σ_c)	98.73	226.00	114.4	589.66 10^{-5}	98.729	Şekil 5.6 (e)
		0.9	88.86	203.40	95	526.23 10^{-5}	83.248	
		0.8	78.98	180.80	502.8	30908 10^{-5}	15.141	
		0.7	69.11	158.20	2546.4	415.88 10^{-5}	68.901	
		0.6	59.24	135.60	-	-	-	
		0.5	49.37	113.00	-	-	-	

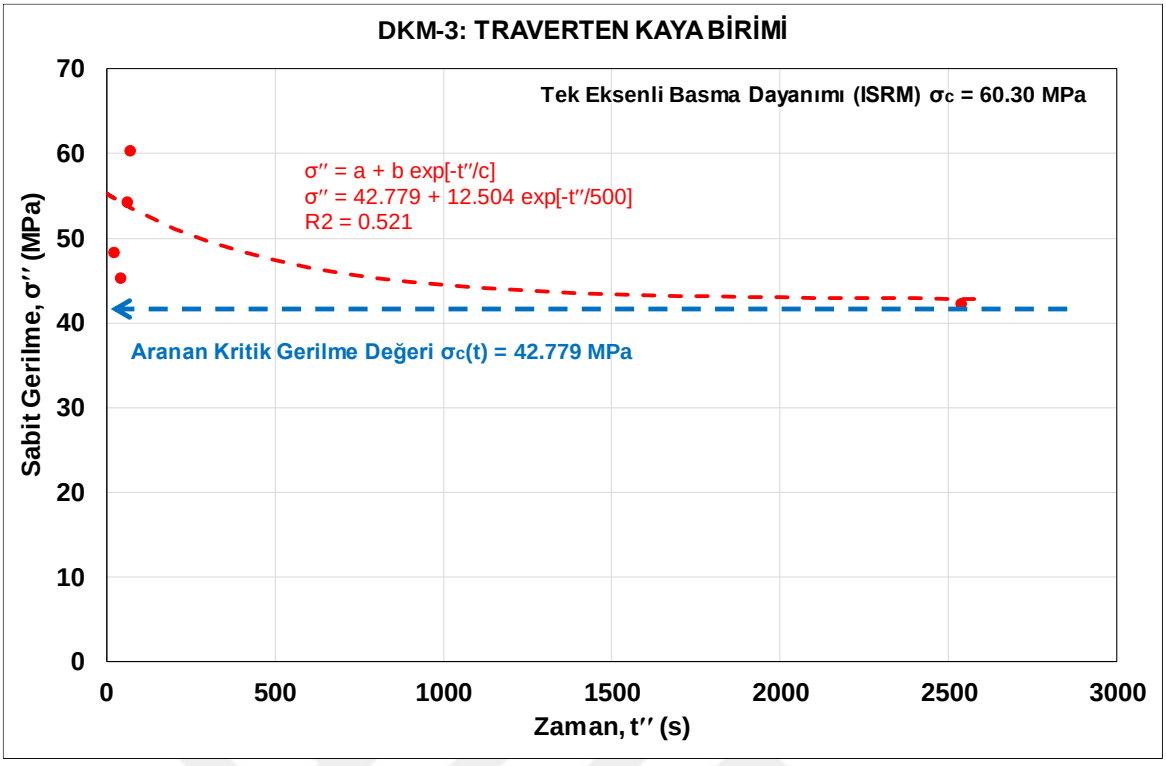


a) DKM-1 Tüf kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

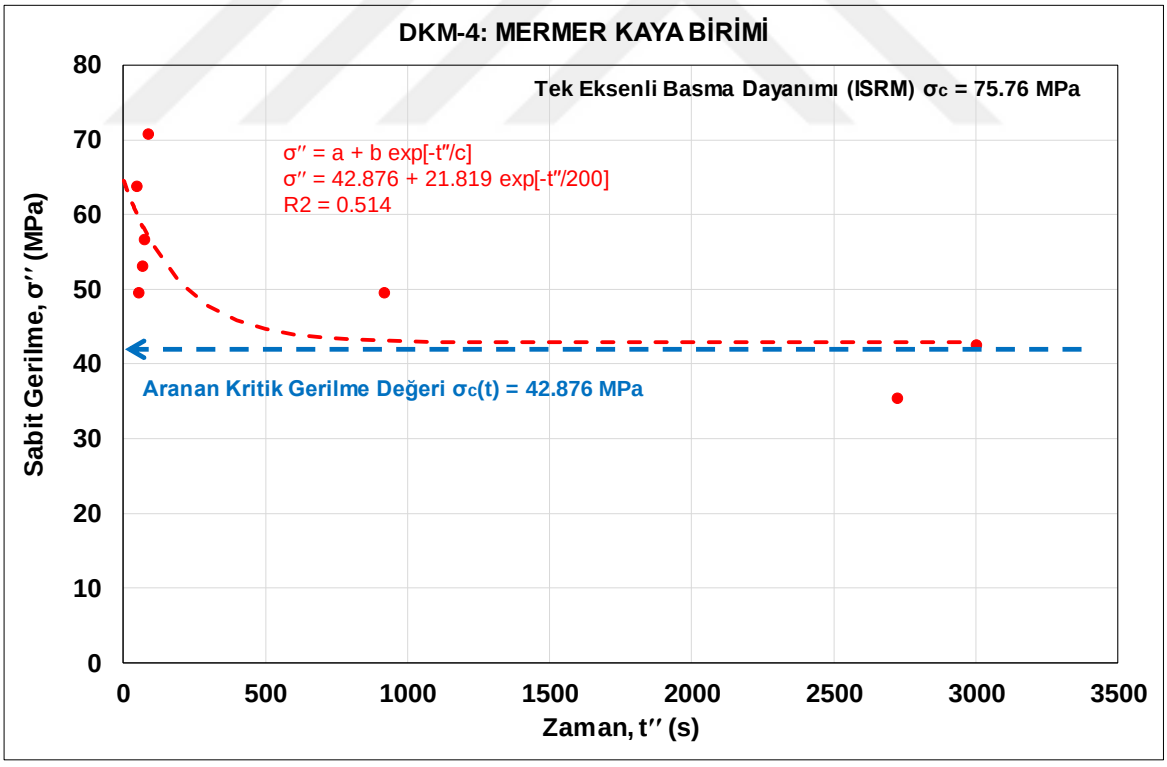


b) DKM-2 Andezit kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.6 (devam)

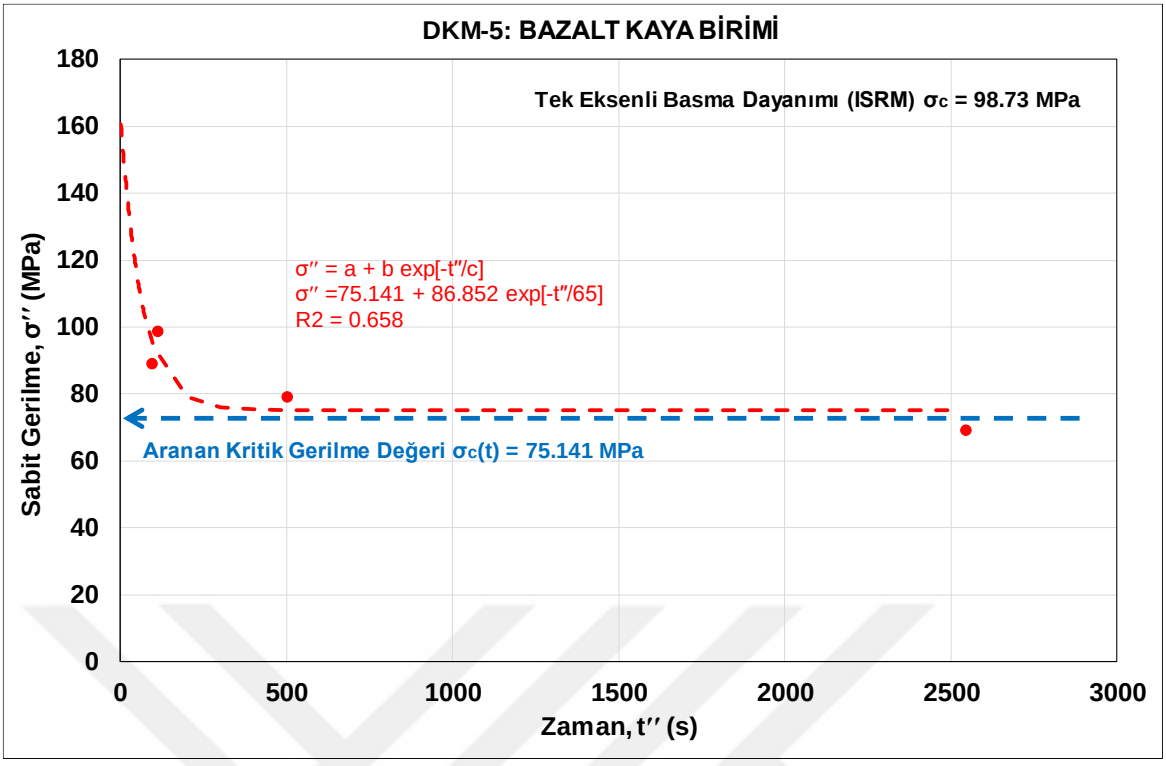


c) DKM-3 Traverten kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) DKM-4 Mermer kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.6 (devam)

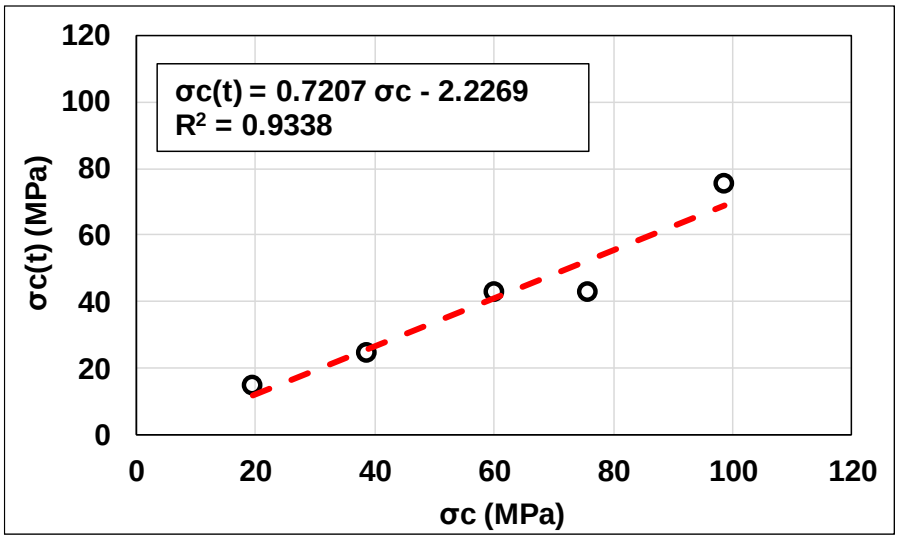


e) DKM-5 Bazalt kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.6. Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) için üçüncü sünme aşamasına ait zaman (t'') - sabit gerilme (σ'') davranışları (Aşama 3'de gözlenen yenilme) ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_c(t)$) değerleri.

Çizelge 5.7. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(DKM)	(MPa)	σ_c (MPa)	$\sigma_c(t)$ (MPa)
DKM-1	0-20	19.56	14.721
DKM-2	20-40	38.89	24.676
DKM-3	40-60	60.3	42.779
DKM-4	60-80	75.76	42.876
DKM-5	80-100	98.73	75.141



Şekil 5.7. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen ISRM-σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri arasındaki ilişki (Grup2)

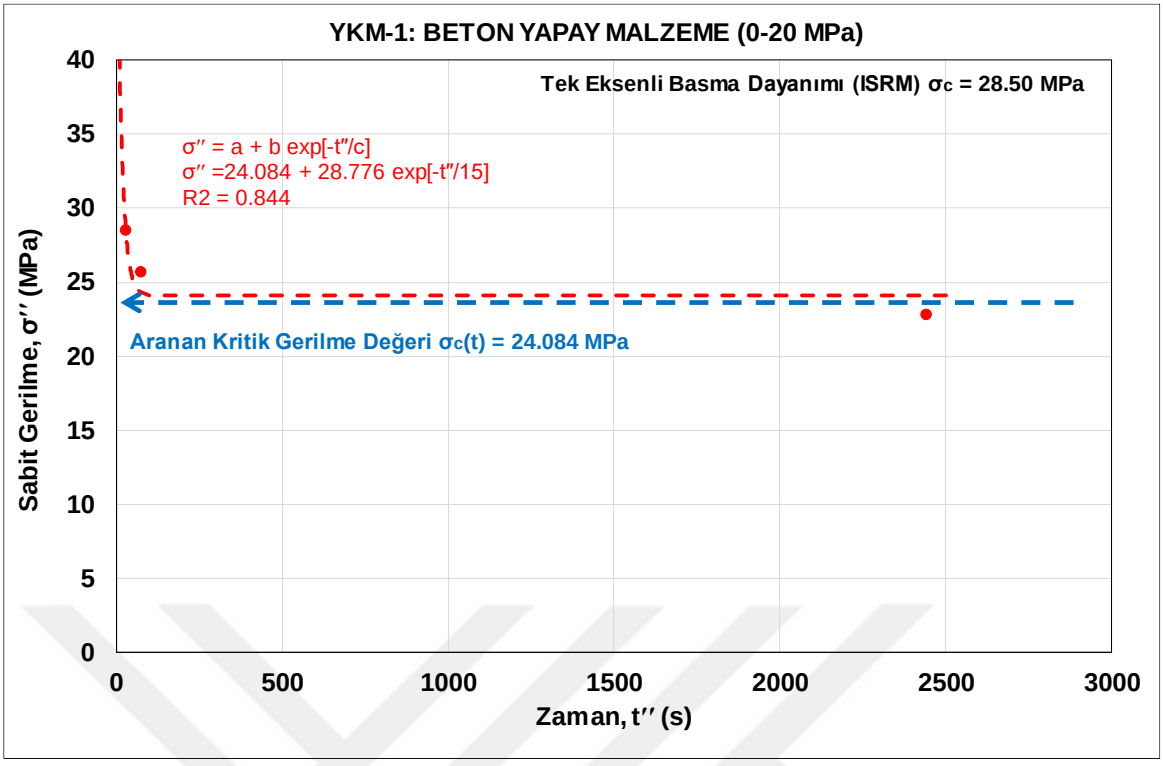
5.1.2.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) koşulunda gerçekleştirilen deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.6 alt başlığında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan zaman (t′′) - birim deformasyon (ε′′), zaman (t′′) - gerilme (σ′′) ve birim deformasyon (ε′′) - gerilme (σ′′) eğrileri dikkate alınmıştır. Özellikle birim deformasyon (ε′′) - gerilme (σ′′) eğrilerinde görülen sünme davranışının üç aşamasındaki geçiş noktaları belirlenmiştir. Sünme davranışının aşama 1'den aşama-2'ye geçiş noktasındaki sırası ile zaman (t′′), birim deformasyon (ε′′), sabit gerilme (σ′′) değerleri kayıt altına alınmıştır. Benzer şekilde sünme davranışının aşama-2'den aşama-3 geçiş noktasına ait zaman (t′′), birim deformasyon (ε′′), sabit gerilme (σ′′) değerleri grafik üzerinden belirlenerek kayıt edilmiştir. Aynı zamanda aşama 3'ün içinde özlenen yenilme anına ait zaman (t′′), birim deformasyon (ε′′), sabit gerilme (σ′′) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen zaman (t′′) ve örnekler üzerine uygulanan sabit gerilme (σ′′) değerleri yardımıyla ilgili grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_c(t)$) tespit edilmiştir.

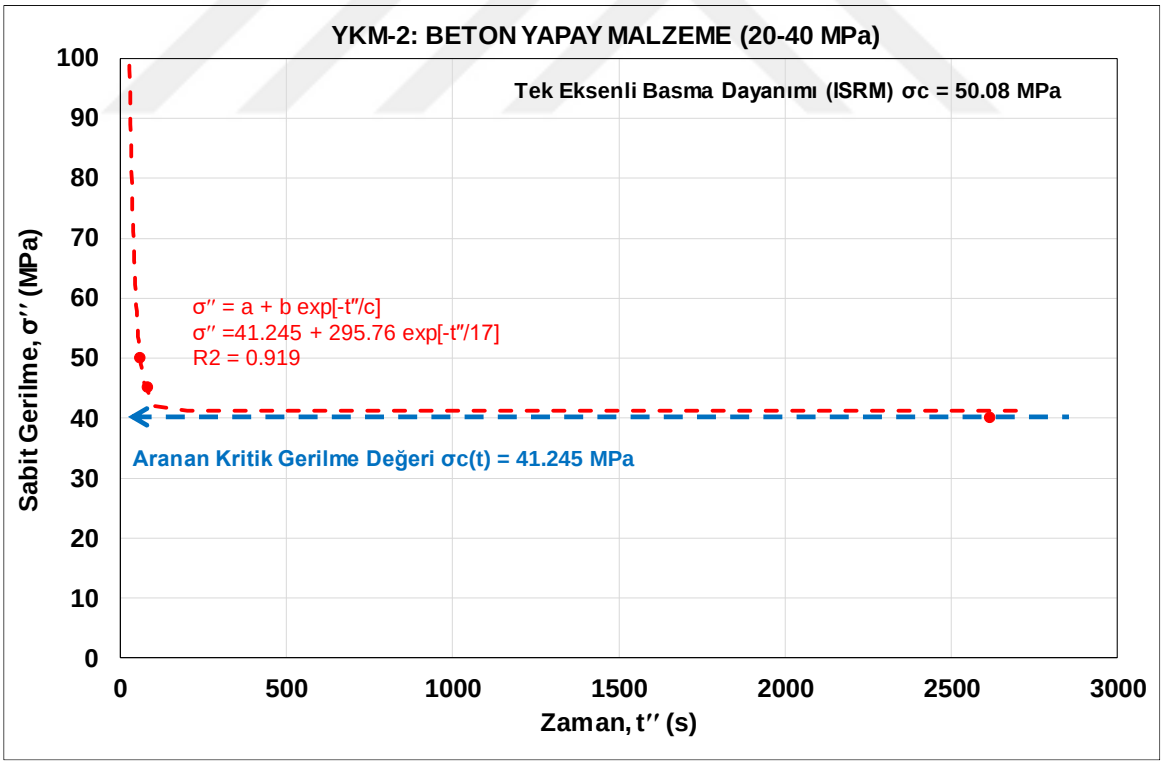
Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak DKM için her bir dayanım aralığı için elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.8'de sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.8 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.8. YKM / Grup2'ye ait sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.6), sünme davranışı aşama 3'ün bitiş sınırı

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Dayanım Aralığı	Deney Tanımı Sabit Gerilme Oranı	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 3 içerisinde Yenilme Sınırı			Grafik
			σ″ (MPa)	F″ (kN)	Zaman	Birim Deformasyon	Mevcut Gerilme	
					t″ (s)	ε″ (-)	σ″ (MPa)	
YKM-1	0-20	1 (σ_c)	28.50	223.73	28	448.6 10^{-5}	28.503	Şekil 5.8 (a)
		0.9	25.65	201.35	73.4	452.8 10^{-5}	25.594	
		0.8	22.80	178.98	2442.8	281.9 10^{-5}	22.639	
		0.7	19.95	156.61	-	-	-	
		0.6	17.10	134.24	-	-	-	
		0.5	14.25	111.86	-	-	-	
YKM-2	20-40	1 (σ_c)	50.08	393.13	59.6	536.9 10^{-5}	50.077	Şekil 5.8 (b)
		0.9	45.07	353.82	82.6	534.2 10^{-5}	44.816	
		0.8	40.06	314.50	2618.2	368.7 10^{-5}	39.842	
		0.7	35.05	275.19	-	-	-	
		0.6	30.05	235.88	-	-	-	
		0.5	25.04	196.56	-	-	-	
YKM-3	40-60	1 (σ_c)	66.82	524.54	71.2	522.8 10^{-5}	66.824	Şekil 5.8(c)
		0.9	60.14	472.08	64.8	695.5 10^{-5}	60.098	
		0.8	53.46	419.63	2443.0	531.8 10^{-5}	52.716	
		0.7	46.77	367.18	-	-	-	
		0.6	40.09	314.72	-	-	-	
		0.5	33.41	262.27	-	-	-	
YKM-4	60-80	1 (σ_c)	86.69	680.52	100.0	825.1 10^{-5}	86.686	Şekil 5.8(d)
		0.9	78.02	612.46	100.2	748.9 10^{-5}	77.567	
		0.8	69.35	544.41	2428.6	462.5 10^{-5}	69.349	
		0.7	60.68	476.36	-	-	-	
		0.6	52.01	408.31	-	-	-	
		0.5	43.35	340.26	-	-	-	
YKM-5	80-100	1 (σ_c)	79.49	624.00	90.8	707.6 10^{-5}	79.494	Şekil 5.8 (e)
		0.9	71.54	561.60	2431.4	479.1 10^{-5}	71.397	
		0.8	63.59	499.20	2653.4	493.2 10^{-5}	62.958	
		0.7	55.64	436.80				
		0.6	47.69	374.40				
		0.5	39.75	312.00				

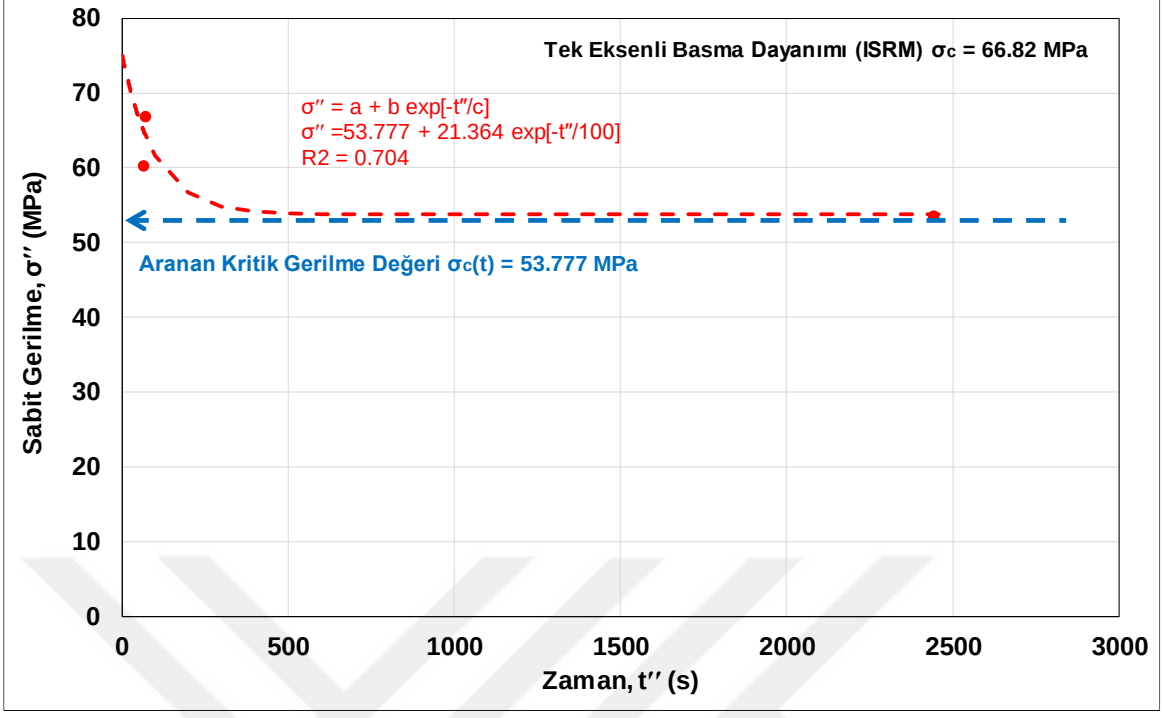


a) YKM-1 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

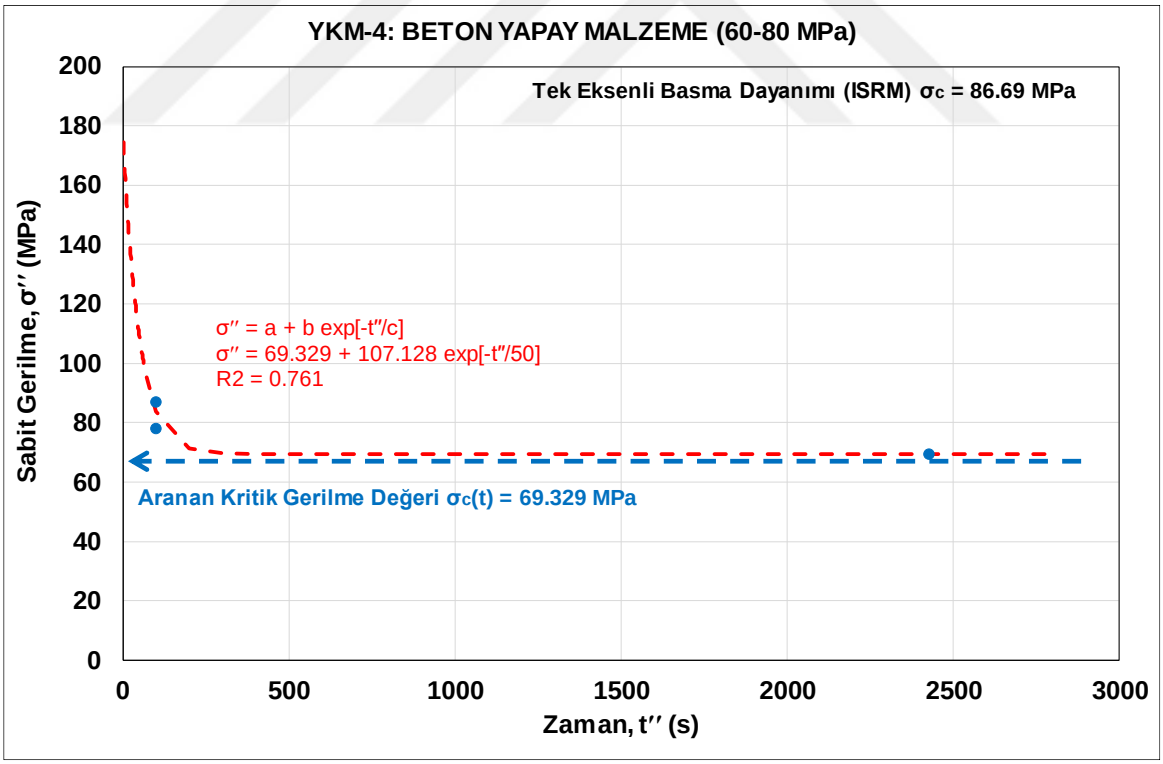


b) YKM-2 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.8 (devam)

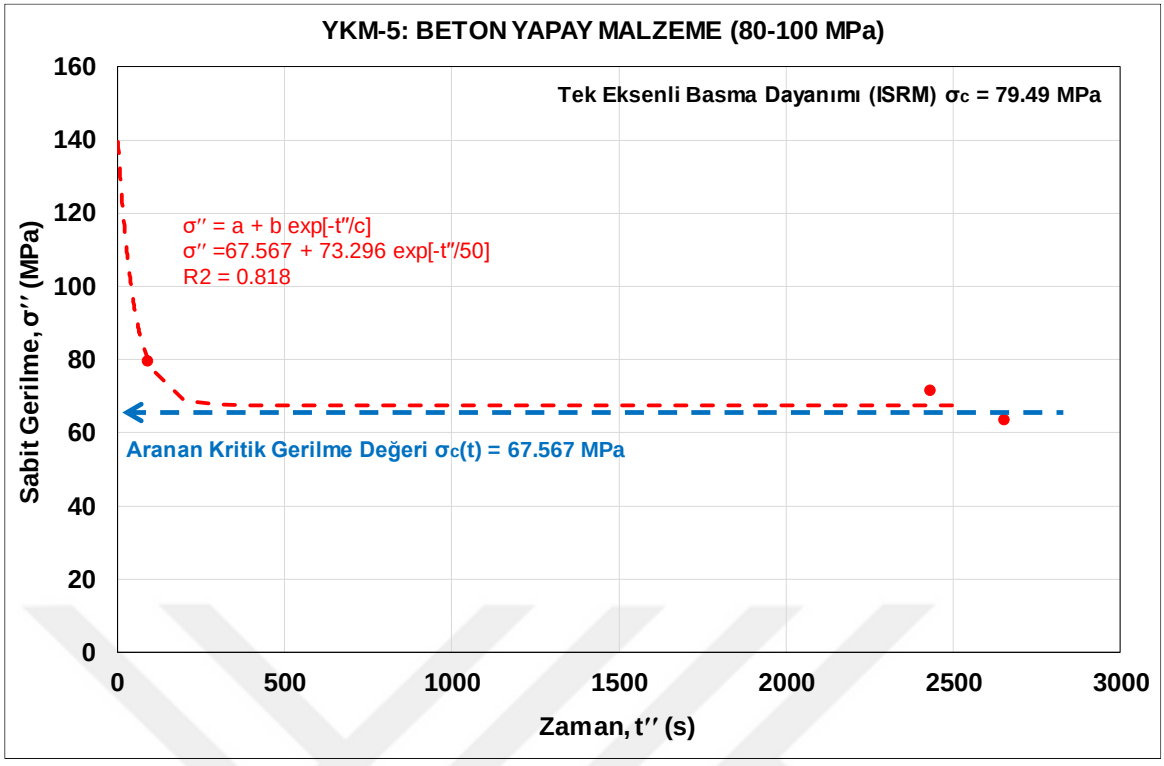


c) YKM-3 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) YKM-4 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.8 (devam)



e) YKM-5 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.8. Farklı dayanımlara sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) için üçüncü sünme aşamasına ait zaman (t″) - sabit gerilme (σ″) davranışları (Aşama 3'de gözlenen yenilme) ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_c(t)$) değerleri.

Yukarıda sunulan grafiklerden t″ oranı ile σ″ arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda ayrıca verilmiştir.

$$\sigma'' = a + b * \text{Exp}\,[- t'' / c] \qquad (5.8)$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, t″ zaman ve σ″ ise sünme deneyindeki (Grup2) uygulanan sabit gerilme değerini belirtmektedir.

Şekil 5.8'de gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nokta kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_c(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_c(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar yenilmeden üzerindeki gerilmeyi taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$$\sigma'' = \sigma_c(t) \quad (5.9a)$$

$$\sigma'' > \sigma_c(t) \quad (5.9c)$$

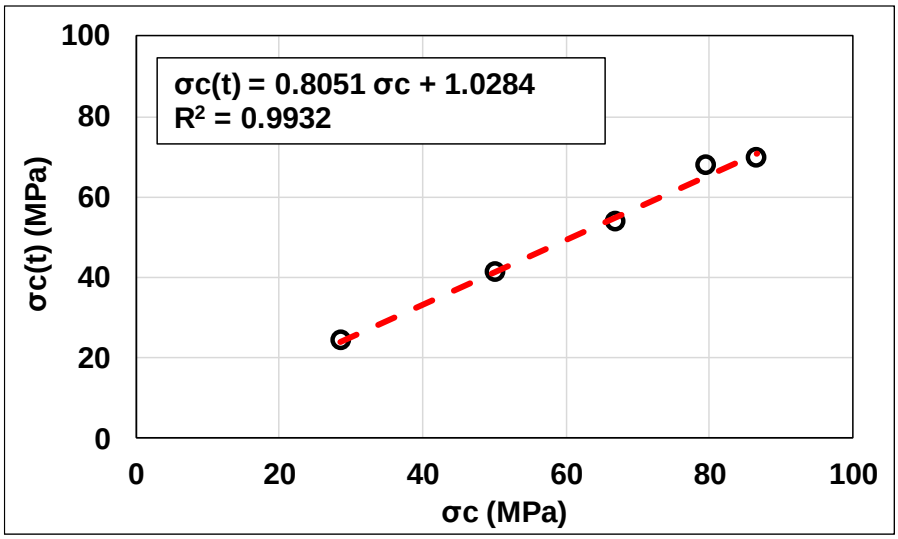
$$\sigma'' < \sigma_c(t) \quad (5.9b)$$

Eşitlik 5.9a'da verilen koşulda gerilme altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki gerilmeyi kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.9b'de belirtilen koşulda malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.9c'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, yenilmesi söz konusu değildir, üzerindeki gerilmeyi taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

Şekil 5.8'da sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.8) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_c(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_c (0.5-1 MPa/s) değerleri topluca Çizelge 5.9'da verilmiştir. Sünme deneylerinde sabit gerilme değeri örnek kaya üzerinde oluşturuncaya kadarki geçen sürede yükleme hızı 0.75 MPa/s seçilmiştir. Bu çizelge verileri ile hazırlanan grafik Şekil 5.9'da sunulmuştur.

Çizelge 5.9. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(DKM)	(MPa)	σ_c (MPa)	$\sigma_c(t)$ (MPa)
YKM-1	0-20	28.50	24.084
YKM-2	20-40	50.08	41.245
YKM-3	40-60	66.82	53.777
YKM-4	60-80	86.69	69.329
YKM-5	80-100	79.49	67.567



Şekil 5.9. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen ISRM-σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri arasındaki ilişki (Grup2)

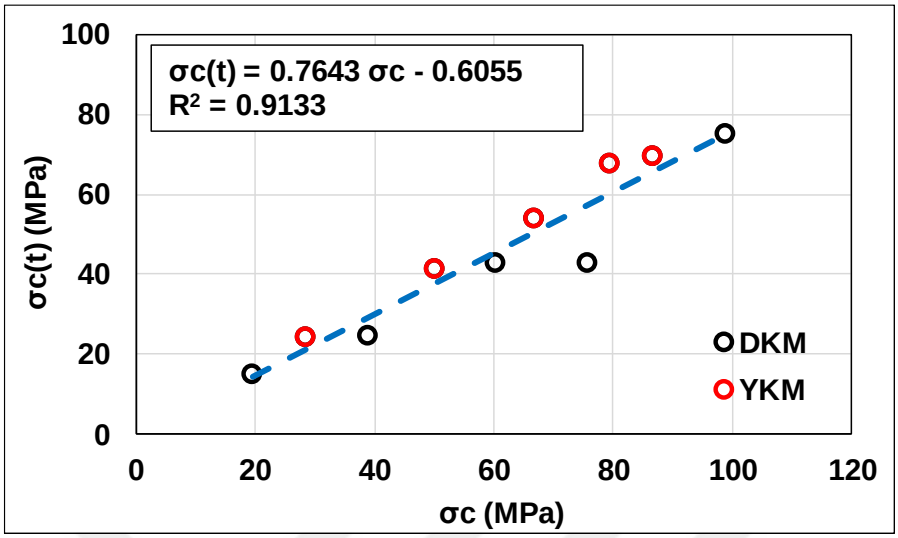
5.1.2.3. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Yukarıda beş farklı dayanıma sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yine beş farklı dayanıma sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneyler ile belirlenen pekleşme davranışları değerlendirilmiştir. Aynı deney koşullarında gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.7 ve 5.9 verileri birleştirilerek Çizelge 5.10 ve aşağıda sunulan grafik hazırlanmıştır (Şekil 5.10).

Çizelge 5.10. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen σ_c ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda belirlenen kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Öngörülen Tanımlı Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(MPa)	(DKM ve YKM)	σ_c (MPa)	$\sigma_c(t)$ (MPa)
0-20	DKM-1	19.56	14.721
	YKM-1	28.5	24.084
20-40	DKM-2	38.89	24.676
	YKM-2	50.08	41.245
40-60	DKM-3	60.30	42.779
	YKM-3	66.82	53.777
60-80	DKM-4	75.76	42.876
	YKM-4	86.69	69.329

80-100	DKM-5	98.73	75.141
	YKM-5	79.49	67.567



Şekil 5.10. DKM ve YKM için toplam on farklı kaya birimine ait ISRM-σ_c ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda belirlenen kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda 0.5-1 MPa/s yükleme hızı altında gerçekleştirilen deney sonuçlarının (σ_c), kritik pekleşme eşiğini belirten $\sigma_c(t)$ değerinden büyük olduğu anlaşılmaktadır. Kritik pekleşme eşiğini belirmeye yönelik sünme deneylerinde hedeflenen sabit gerilme değerine ulaşıncaya kadarki zaman diliminde yükleme hızı 0.75 MPa/s alınmıştır (ISRM, 2007). Şekil 5.10'da belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.10'da verilmiştir.

$$\sigma_c(t) = 0.7643\ \sigma_c - 0.6055 \qquad (5.10)$$

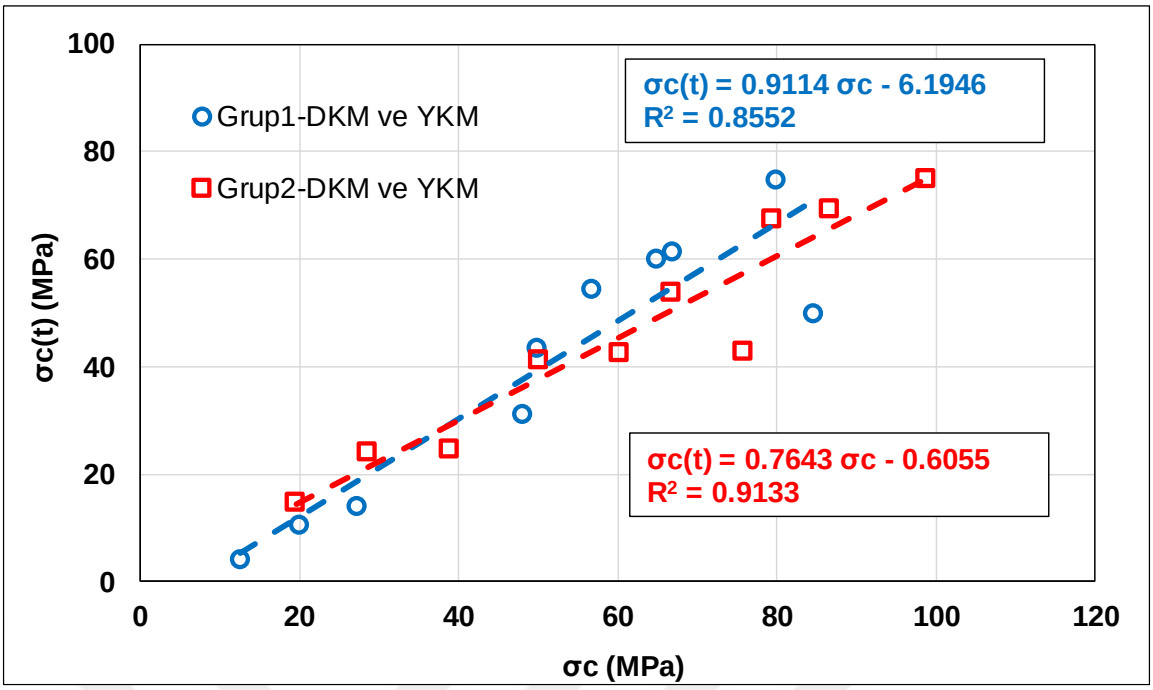
5.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel değerlendirmesi

Bölüm 5.1.1 ve Bölüm 5.1.2'de doğal ve yapay kaya malzemeler için gerilme-hız-kontrollü deney (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel bir değerlendirmesi bu bölümde verilmiştir.

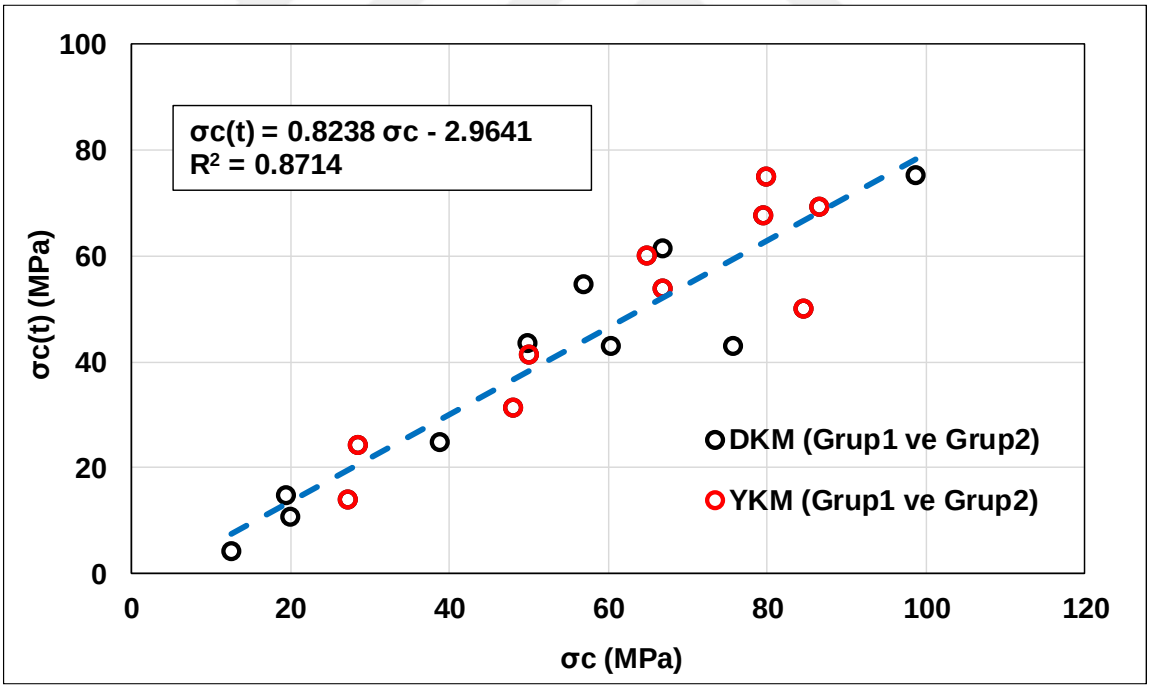
Çizelge 5.11. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen σ_c ve farlı iki deney koşulundan (Grup1 ve Grup2) belirlenen kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Deney Koşulu	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Grup1 Deneyleri		Grup2 Deneyleri	
		σ_c	$\sigma_c(t)$	σ_c	$\sigma_c(t)$
	DKM ve YKM	MPa	MPa	MPa	MPa
Grup1 Deneyler (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu)	DKM-1	12.57	4.196	-	-
	DKM-2	20.11	10.596	-	-
	DKM-3	49.89	43.484	-	-
	DKM-4	56.90	54.460	-	-
	DKM-5	66.89	61.463	-	-
	YKM-1	27.33	13.946	-	-
	YKM-2	48.04	31.139	-	-
	YKM-3	64.89	59.989	-	-
	YKM-4	84.60	49.856	-	-
	YKM-5	80.01	74.840	-	-
Grup2 Deneyler (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu)	DKM-1	-	-	19.56	14.721
	DKM-2	-	-	38.89	24.676
	DKM-3	-	-	60.30	42.779
	DKM-4	-	-	75.76	42.876
	DKM-5	-	-	98.73	75.141
	YKM-1	-	-	28.50	24.084
	YKM-2	-	-	50.08	41.245
	YKM-3	-	-	66.82	53.777
	YKM-4	-	-	86.69	69.329
	YKM-5	-	-	79.49	67.567

Aynı amaca yönelik iki farklı deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.5 ve 5.10 verileri birleştirilerek Çizelge 5.11 ve Şekil 5.11 hazırlanmıştır.



Şekil 5.11. Tek eksenli basma (TEB) koşulunda Grup1 ve Grup2 deneylerinden elde edilen kritik pekleşme davranışı



Şekil 5.12. Tek eksenli basma (TEB) koşulunda Grup1 ve Grup2 deneylerinden elde edilen genelleştirilmiş kritik pekleşme davranışı

Şekil 5.11'de aynı amaca yönelik iki farklı deney sonuçlarının (Grup1 ve Grup2) her birinin kendi içerisindeki istatistiksel başarısının yüksek olduğu deney sonuçlarının da dar bir koridorda yoğunlaştığı görülmektedir. Kritik pekleşme değerinin belirlenmesi

için tüm deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile genelleştirilmiş Şekil 5.12'de sunulan grafik elde edilmiştir.

Şekil 5.12'de görüldüğü üzere standart deney sonuçlarının (σ_c), kritik pekleşme eşiğini belirten $\sigma_c(t)$ değerinden büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.12'de genelleştirilerek belirtilen yaklaşım ayrıca Eşitlik 5.11'de verilmiştir. Bu eşitlik, bu tez çalışması sonunda pekleşmeye dayalı kritik basma dayanım değerinin belirlenmesine yönelik önerilen genelleştirilmiş bir yaklaşım niteliği taşımaktadır.

$$\sigma_c(t) = 0.8238\ \sigma_c - 2.9641 \quad (R^2=0.87) \tag{5.11}$$

Tek eksenli basma koşulu altında gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarına (Grup1 ve Grup2) göre, örneğin bir yeraltı topuk tasarımında ISRM (1981, 2007) öngörüsü doğrultusunda belirlenen tek eksenli basma dayanımı (σ_c) değeri eğer arazi gerilme (σ) değerlerinden büyük ise ($\sigma_c > \sigma$) mühendis topuğun güvenli olduğunu düşünecektir. Eğer arazi gerilme değeri σ_c değerine eşit veya büyükse ise ($\sigma \geq \sigma_c$) topuğun yenileceğini, duraylılığını yitireceğini düşünerek önlem almaya çalışacaktır. Ancak bu çalışma sonunda ortaya konan yaklaşıma göre topuk malzemesi üzerindeki gerilme $\sigma \geq \sigma_c$ koşulunda topuk hemen yenilirken aslında $\sigma_c(t) \leq \sigma \leq \sigma_c$ koşulunda bile pekleşme sonucunda topuk malzemesi yenilmektedir duraylılık bozulmaktadır. Mühendisler bu süreçte güvende olduklarını düşünürken aslında duraysızlık problemi ile yüz yüze kalmaya ramak kalarak çalışmalarını yürütmektedirler. Bu can ve mal kayıplarına neden olabilecek önemli bir sorun olacaktır. Örnekte verilen topuğun en güvenli olduğu durum $\sigma \leq \sigma_c(t)$ olacaktır.

Örneğin 700 m (H) derinde bulunan bir yeraltı kömür madeninde kömür topuk malzemesinin ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda tek eksenli basma dayanımı σ_c değerinin 20 MPa olduğu kabul edilsin. Şekil 5.12'de belirtilen ve Eşitlik 5.11'de ifade edilen yaklaşıma göre bu çalışma ile tasarım mühendislerine önerilen kritik eşik pekleşme $\sigma_c(t)$ değeri 13.5 MPa olacaktır. 700 m (H) derinde bulunan topuk üzerine düşen düşey gerilme yaklaşık σ = 17.5 MPa ($\sigma = H\gamma$, örtü tabaka yoğunluğu γ=25 kN/m^2 alınmıştır) olacaktır. Tasarım çalışmalarında topuk dayanımının σ_c = 20 MPa olduğu düşünülürse sahada oluşan gerilme değeri σ = 17.5 MPa < σ_c = 20 MPa olduğu için topuk yenilmez duraylıdır hükmü verilecektir. Ancak $\sigma_c(t)$ = 13.5 MPa < σ = 17.5 MPa < σ_c = 20 MPa koşulunda bile malzeme hemen yenilmese de pekleşme davranışı sergileyecek ve yine de yenilecektir. Bu durum üretimde aksamalara veya can ve mal kayıplarına sebebiyet

verecektir. Sonuç olarak tasarım çalışmasında $\sigma_c(t)$=13.5 MPa dikkate alınırsa bu değerin üzerinde olan arazi gerilmesi (σ = 17.5 MPa), topuk malzemesinde pekleşme sürecini başlatacak ancak kritik eşikte pekleşen topuk malzemesi yenilmeyecektir. Buna benzer örnekler, yeraltı maden galerileri, tüneller, büyük yeraltı boşlukları, yeraltı depoları, yerüstü şevler gibi kaya mühendislik çalışmalarının tümünde ifade edilebilir.

5.2. Dolaylı Çekme (DÇ) Koşulunda Kritik Eşik Pekleşme $\sigma_{tB}(t)$ Değerinin Belirlenmesi

Bu bölümde gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled, Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep, Grup2) olarak tanımlanan iki farklı deneyden elde edilen dolaylı çekme dayanımı (DÇD) sonuçları sunulacaktır.

5.2.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1)

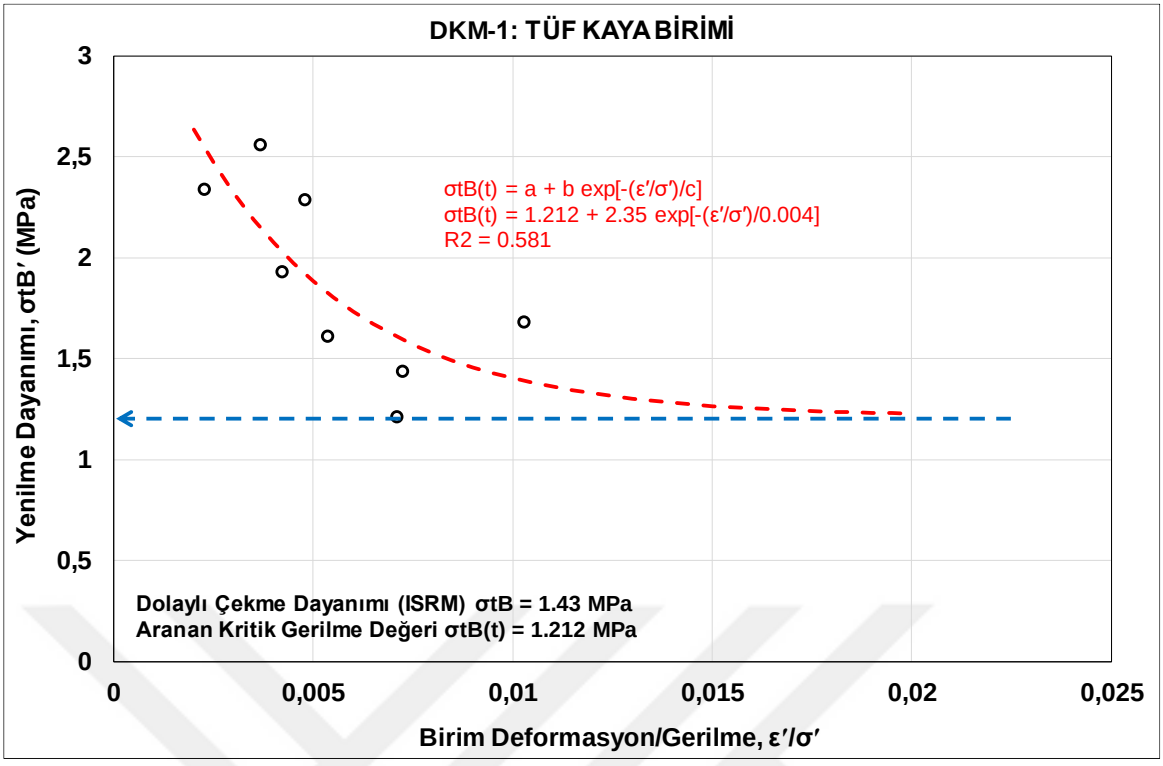
5.2.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarından hazırlanan grafikler ayrıntılı bir şekilde Bölüm 4'te 4.3 alt başlığında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan birim deformasyon (ε')- gerilme (σ') eğrilerinin en üst noktaları bir başka ifade ile yenilme noktaları işaretlenerek kayıt altına alınmıştır. Ayrıca her bir deneye ait ε'-σ' eğrisinin elastik sınırları içerisinde kalan doğrusal eğrinin eğim değerleri bir başka ifade ile E_i' ($\Delta\sigma'/\Delta\varepsilon'$, MPa) elastik modül değerleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra E_i' değerinin tersi $1/E_i'$ ($\Delta\varepsilon'/\Delta\sigma'$) dikkate alınmıştır. Her bir deney için birim düşey gerilme (σ') etkisinde oluşan birim deformasyon (ε') değerleri elde edilmiştir. Böylelikle gerilmeye dayalı birim deformasyon hız (srain rate) değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler (ε'/σ') ile her bir deneyden belirlenen yenilme değerleri (σ_{tB}') arasında yeni grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_{tB}(t)$) tespit edilmiştir.

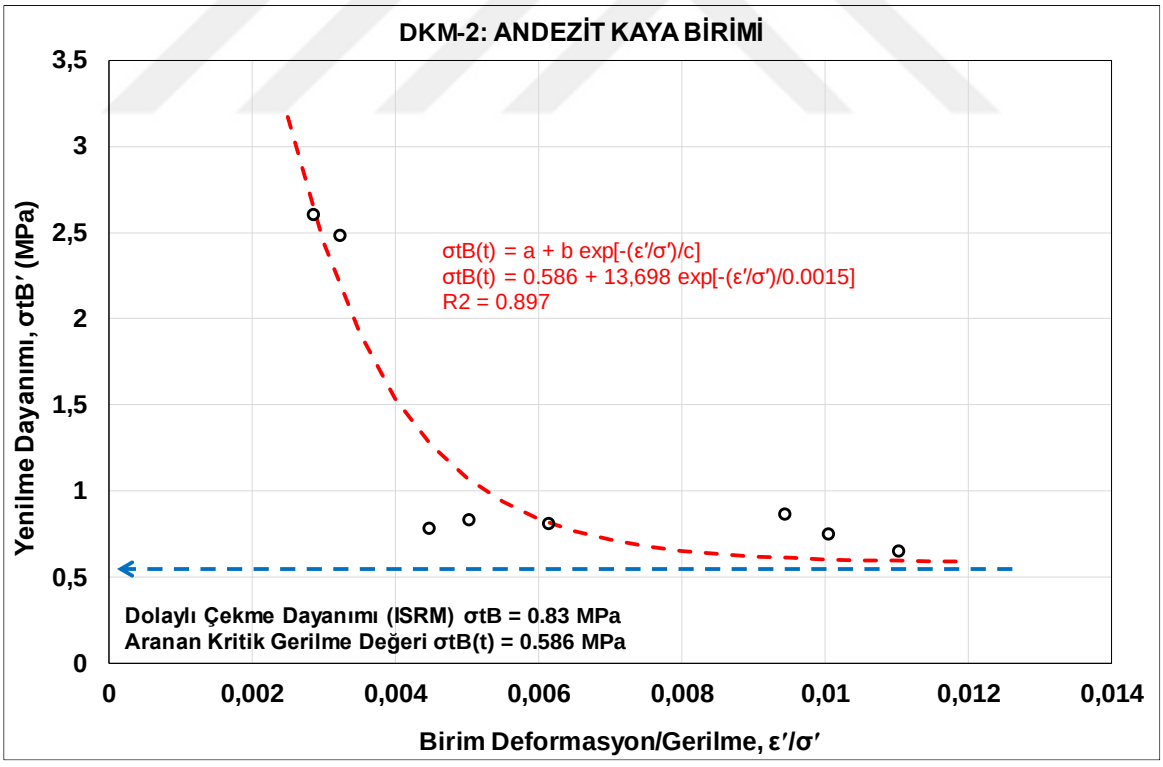
Çalışma ve değerlendirme yöntemi genel olarak yukarıda tanımlanmıştır. DKM için her bir dayanım aralığında elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.12'de sunulmuştur. Bu çizelgede verilen verilere dayalı olarak Şekil 5.13'te sunulan grafik hazırlanmıştır.

Çizelge 5.12. DKM/ Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.3).

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Deney Tanımı, Yükleme hızı (kN/dk)	Çekme Yenilme Dayanımı (σ_{tB})′ (MPa)	Elastik Modül (E_i)′ (MPa)	1/(E_i)′ (ε′/σ′)	Grafik
DKM-1 (Tüf)	0-20	0.9	2.34	438.261	228.2 10^{-5}	Şekil 5.13 (a)
		1.8	1.21	140.601	711.2 10^{-5}	
		4.5	2.29	207.821	481.2 10^{-5}	
		8	1.93	236.869	422.2 10^{-5}	
		12	1.43	138.019	724.5 10^{-5}	
		16	1.61	185.939	537.8 10^{-5}	
		20	2.56	271.657	368.1 10^{-5}	
		24	1.68	97.143	1029.4 10^{-5}	
DKM-2 (Andezit)	20-40	0.9	0.81	162.773	614.4 10^{-5}	Şekil 5.13 (b)
		1.8	2.60	349.848	285.8 10^{-5}	
		4.5	0.65	90.596	1103.8 10^{-5}	
		8	2.48	309.396	323.2 10^{-5}	
		12	0.83	198.431	504.0 10^{-5}	
		16	0.86	105.917	944.1 10^{-5}	
		20	0.75	99.401	1006.0 10^{-5}	
		24	0.78	223.226	448.0 10^{-5}	
DKM-3 (Traverten)	40-60	0.9	5.28	508.421	196.7 10^{-5}	Şekil 5.13 (c)
		1.8	5.41	543.859	183.9 10^{-5}	
		4.5	4.89	409.756	244.0 10^{-5}	
		8	4.39	401.194	249.3 10^{-5}	
		12	6.84	968.421	103.3 10^{-5}	
		16	4.47	558.487	179.1 10^{-5}	
		20	5.15	458.857	217.9 10^{-5}	
		24	6.64	784.962	127.4 10^{-5}	
DKM-4 (Mermer)	60-80	0.9	3.12	216.735	461.4 10^{-5}	Şekil 5.13 (d)
		1.8	4.14	424.8	235.4 10^{-5}	
		4.5	3.35	333.828	299.6 10^{-5}	
		8	4.33	424.8	235.4 10^{-5}	
		12	3.22	303.429	329.6 10^{-5}	
		16	4.79	531.0	188.3 10^{-5}	
		20	4.23	386.459	258.8 10^{-5}	
		24	4.11	390.038	256.4 10^{-5}	
DKM-5 (Bazalt)	80-100	0.9	13.46	2006.734	49.8 10^{-5}	Şekil 5.13 (e)
		1.8	18.26	2494.021	40.1 10^{-5}	
		4.5	15.53	5471.698	18.3 10^{-5}	
		8	14.49	3451.705	29.0 10^{-5}	
		12	17.01	3479.452	28.7 10^{-5}	
		16	18.79	5466.029	18.3 10^{-5}	
		20	17.61	5135.270	19.5 10^{-5}	
		24	19.59	3759.459	26.6 10^{-5}	

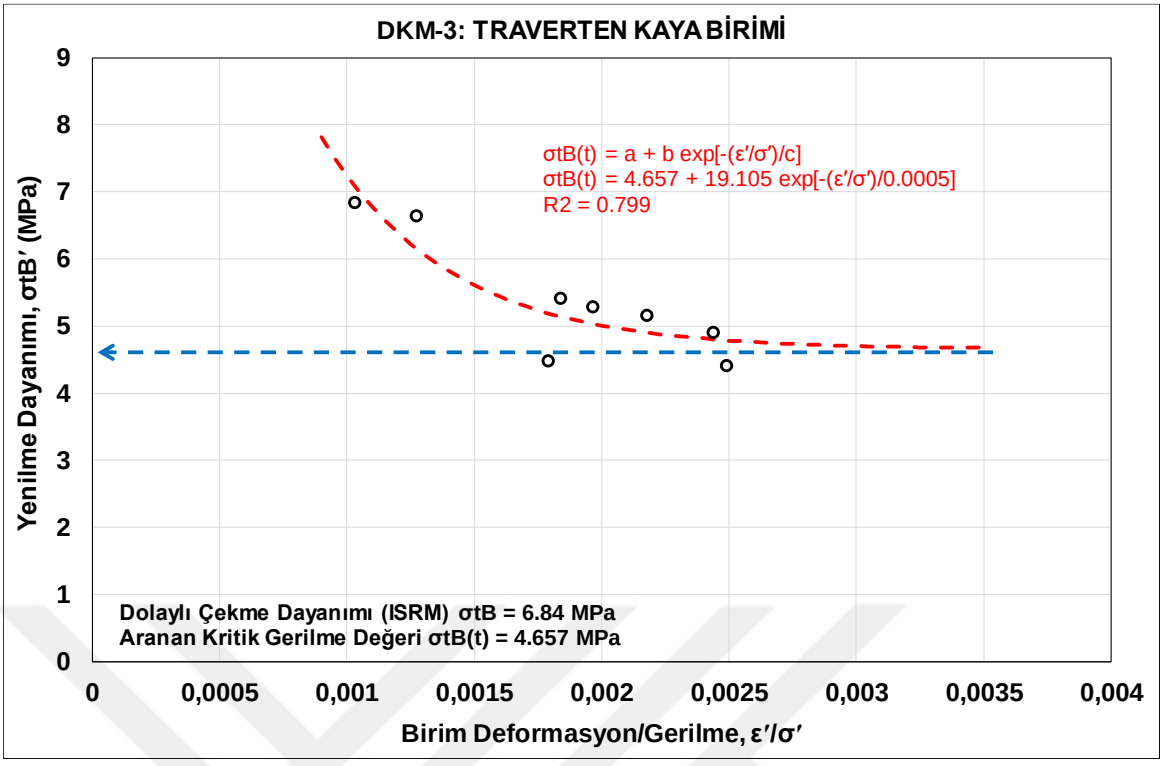


a) DKM-1 Tüf kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

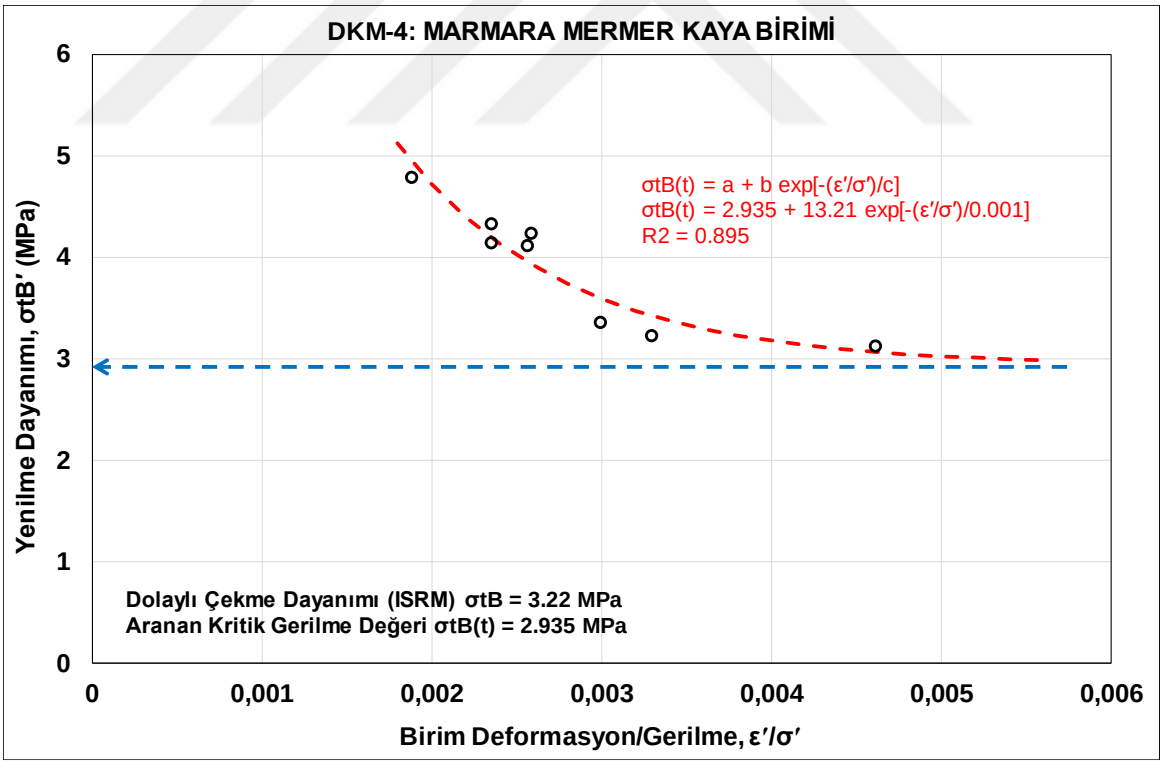


b) DKM-2 Andezit kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.13 (devam)

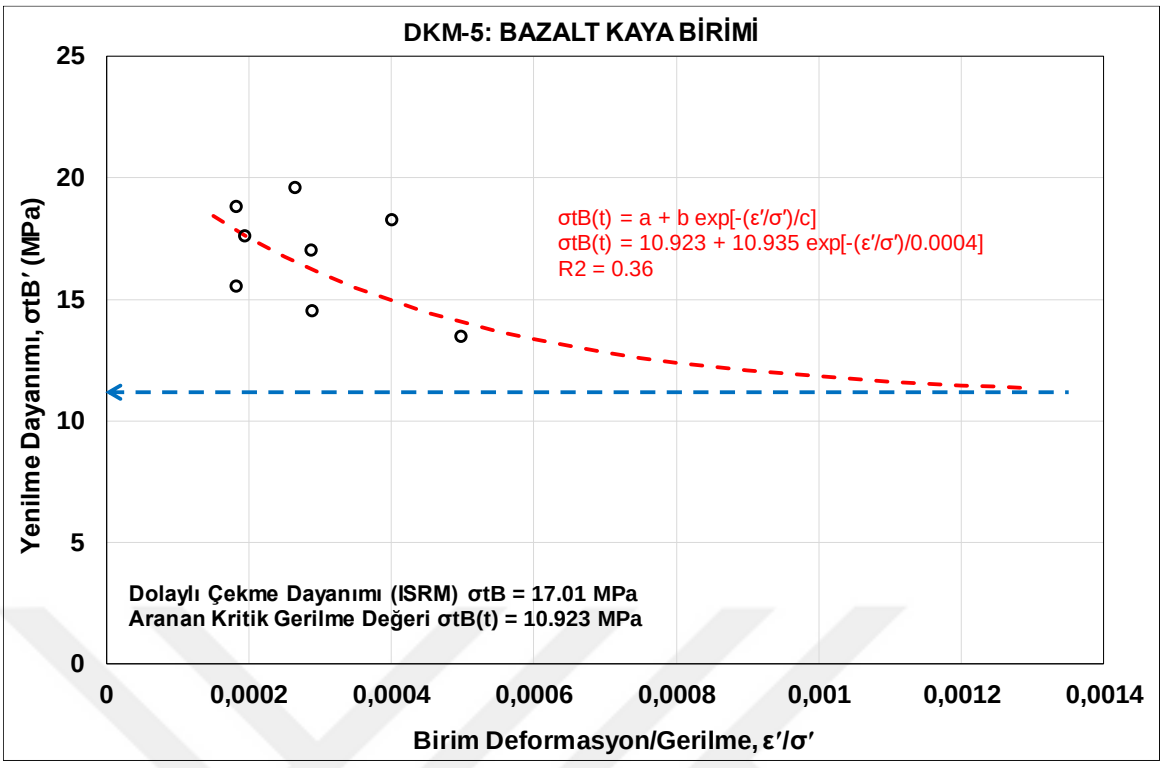


c) DKM-3 Traverten kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) DKM-4 Mermer kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.13 (devam)



e) DKM-5 Bazalt kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.13. Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) için ε′/σ′ oranı ile σ_{tB}' arasında belirlenen davranışlar ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_{tB}(t)$) değerleri.

Yukarıda sunulan grafiklerden ε′/σ′ oranı ile σ_{tB}' arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda sunulmuştur.

$$\sigma_{tB}' = a + b * Exp\,[(-\varepsilon'/\sigma') / c] \qquad (5.12)$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, ε′/σ′ birim deformasyon gerilme oranı ($1/(E_i)'$) ve σ_{tB}' ise farklı dolaylı çekme yükleme hızlarında oluşan çekme yenilme dayanımlarını tanımlamaktadır. Şekil 5.13'te gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nota kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_{tB}(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_{tB}(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar çekmeye karşı yenilmeden üzerindeki çekme gerilmesini taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$$\sigma_{tB}' = \sigma_{tB}(t) \quad (5.13a)$$

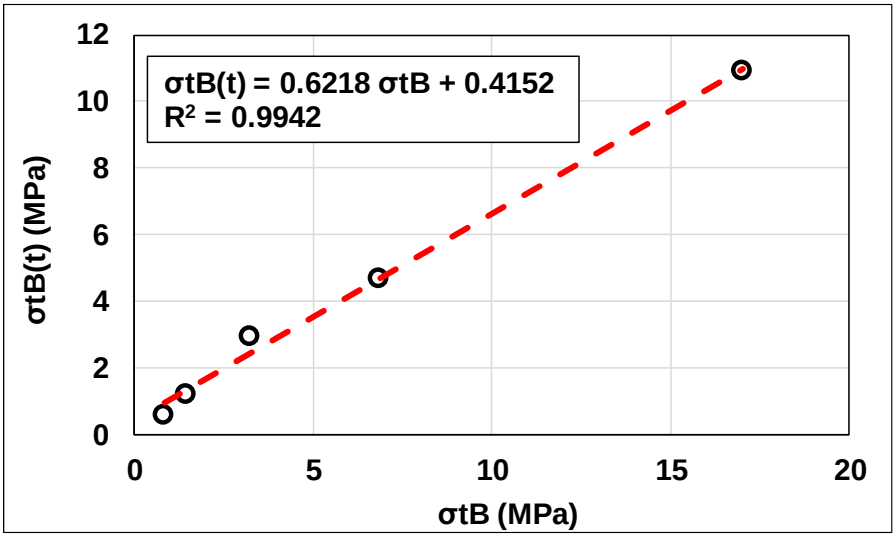
$$\sigma_{tB}' > \sigma_{tB}(t) \quad (5.13b)$$

$$\sigma_{tB}' < \sigma_{tB}(t) \quad (5.13c)$$

Eşitlik 5.13a'da verilen koşulda dolaylı çekme gerilmesi altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki çekme gerilmesini kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.13b'de belirtilen koşulda malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de zaman içerisinde yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.13c'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, pekleşme gözlenmez ve çekme yenilmesi söz konusu değildir, üzerindeki çekme gerilmesini taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

Çizelge 5.13. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (200N/s) Doğrultusunda Belirlenen Çekme Dayanımı	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(DKM)	(MPa)	σ_{tB} (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)
DKM-1	0-20	1.43	1.212
DKM-2	20-40	0.83	0.586
DKM-3	40-60	6.84	4.657
DKM-4	60-80	3.22	2.935
DKM-5	80-100	17.01	10.923



Şekil 5.14. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen ISRM-σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.13'te sunulan grafikler yardımıyla geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.12) elde edilen kritik pekleşme çekme dayanımı $\sigma_{tB}(t)$ ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_{tB} (200 N/s, 12kN/dk, Çizelge 5.12) yenilme değerleri topluca Çizelge 5.13'te verilmiştir. Bu çizelge verileri ile Şekil 5.14'te sunulan grafik hazırlanmıştır.

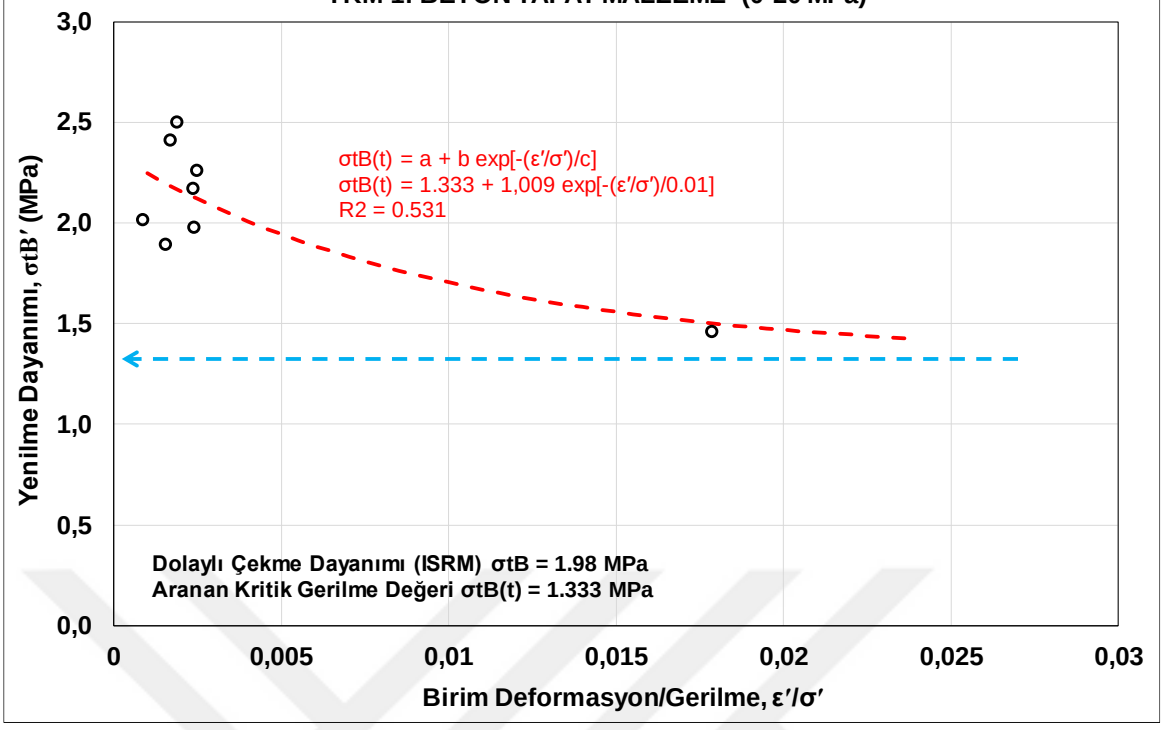
5.2.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) koşulda gerçekleştirilen deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.4 alt başlığı altında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan birim deformasyon (ε')- gerilme (σ') eğrilerinin en üst noktaları bir başka ifade ile yenilme noktaları işaretlenerek kayıt altına alınmıştır. Ayrıca her bir deneye ait ε'-σ' eğrisinin elastik sınırları içerisinde kalan doğrusal eğrinin eğim değerleri bir başka ifade ile E_i' ($\Delta\sigma'/\Delta\varepsilon'$, MPa) elastik modül değerleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra E_i' değerinin tersi $1/E_i'$ ($\Delta\varepsilon'/\Delta\sigma'$) dikkate alınmıştır. Her bir deney için birim düşey gerilme (σ') etkisinde oluşan birim birim deformasyon (ε') değerleri elde edilmiştir. Böylelikle gerilmeye dayalı birim deformasyon hız (srain rate) değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler (ε'/σ') ile her bir deneyden belirlenen yenilme değerleri (σ_{tB}') arasında yeni grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_{tB}(t)$) tespit edilmiştir.

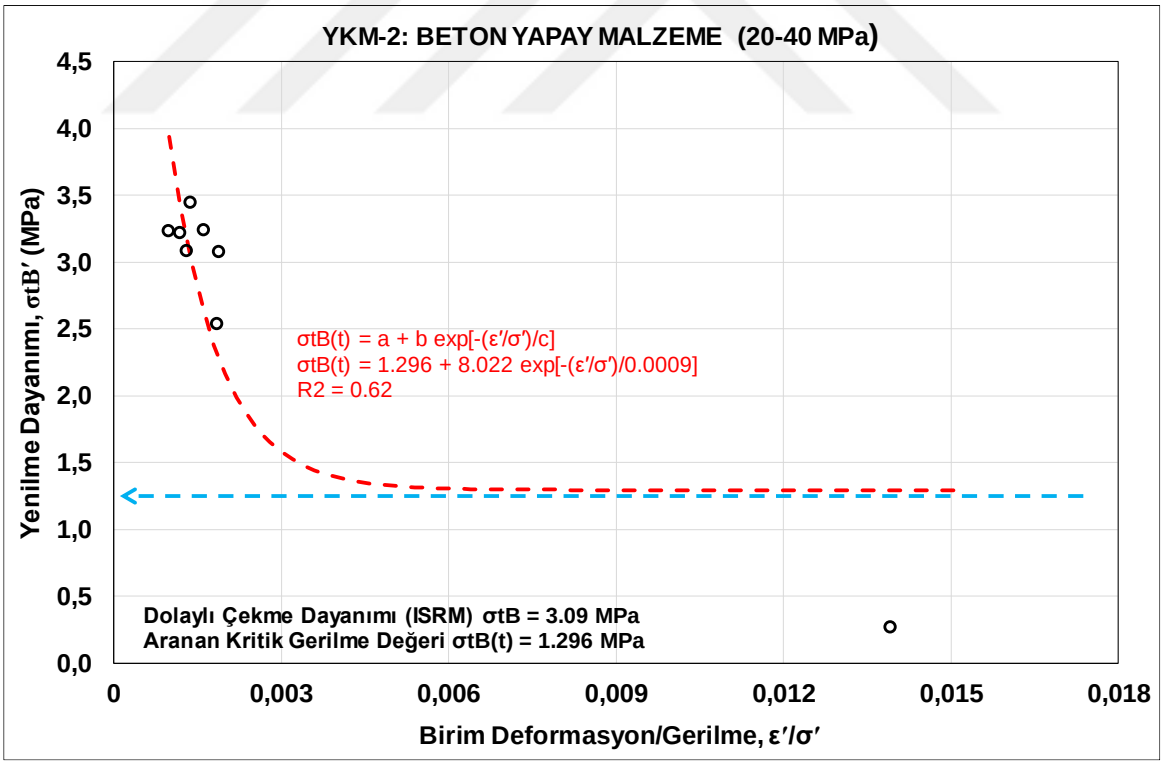
Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak yapay kaya malzemesi (YKM) için her bir dayanım aralığında elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.14'te sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.15 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.14. YKM / Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.4)

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Deney Tanımı, Yükleme hızı (kN/dk)	Çekme Yenilme Dayanımı $(\sigma_{tB})'$ (MPa)	Elastik Modül $(E_i)'$ (MPa)	$1/(E_i)'$ (ε'/σ')	Grafik
YKM-1	0-20	0.9	2.01	1140.957	$87.646\ 10^{-5}$	Şekil 5.15 (a)
		1.8	1.89	638.424	$156.636\ 10^{-5}$	
		4.5	1.46	55.925	$1788.104\ 10^{-5}$	
		8	2.49	528.979	$189.043\ 10^{-5}$	
		12	1.98	414.384	$241.322\ 10^{-5}$	
		16	2.17	418.605	$238.889\ 10^{-5}$	
		20	2.26	400.000	$25\ 10^{-4}$	
		24	2.41	587.607	$170.182\ 10^{-5}$	
YKM-2	20-40	0.9	2.54	541.406	$184.7\ 10^{-5}$	Şekil 5.15 (b)
		1.8	3.23	1007.937	$99.2\ 10^{-5}$	
		4.5	3.22	841.837	$118.8\ 10^{-5}$	
		8	3.24	616.995	$162.1\ 10^{-5}$	
		12	3.09	762.092	$131.2\ 10^{-5}$	
		16	3.45	722.973	$138.3\ 10^{-5}$	
		20	3.08	529.435	$188.9\ 10^{-5}$	
		24	0.27	71.837	$1392.0\ 10^{-5}$	
YKM-3	40-60	0.9	2.99	517.390	$193.3\ 10^{-5}$	Şekil 5.15 (c)
		1.8	3.22	477.056	$209.6\ 10^{-5}$	
		4.5	3.37	500.718	$199.7\ 10^{-5}$	
		8	4.83	1135.563	$88.1\ 10^{-5}$	
		12	4.13	834.830	$119.8\ 10^{-5}$	
		16	4.43	850.000	$117.6\ 10^{-5}$	
		20	3.99	885.152	$112.9\ 10^{-5}$	
		24	3.02	570.202	$175.4\ 10^{-5}$	
YKM-4	60-80	0.9	0.75	86.957	$115.0\ 10^{-5}$	Şekil 5.15 (d)
		1.8	2.69	381.874	$261.9\ 10^{-5}$	
		4.5	5.61	1486.517	$67.3\ 10^{-5}$	
		8	5.96	1554.217	$64.3\ 10^{-5}$	
		12	5.46	1915.385	$52.2\ 10^{-5}$	
		16	4.61	794.728	$125.8\ 10^{-5}$	
		20	5.43	856.589	$116.7\ 10^{-5}$	
		24	6.10	1718.104	$58.2\ 10^{-5}$	
YKM-5	80-100	0.9	5.29	2797.27	$35.7\ 10^{-5}$	Şekil 5.15 (e)
		1.8	5.06	1093.03	$91.5\ 10^{-5}$	
		4.5	5.92	2513.74	$39.8\ 10^{-5}$	
		8	4.94	880.15	$113.6\ 10^{-5}$	
		12	4.99	907.97	$110.1\ 10^{-5}$	
		16	2.43	902.12	$110.8\ 10^{-5}$	
		20	6.34	1615.22	$61.9\ 10^{-5}$	
		24	6.39	2088.24	$47.9\ 10^{-5}$	

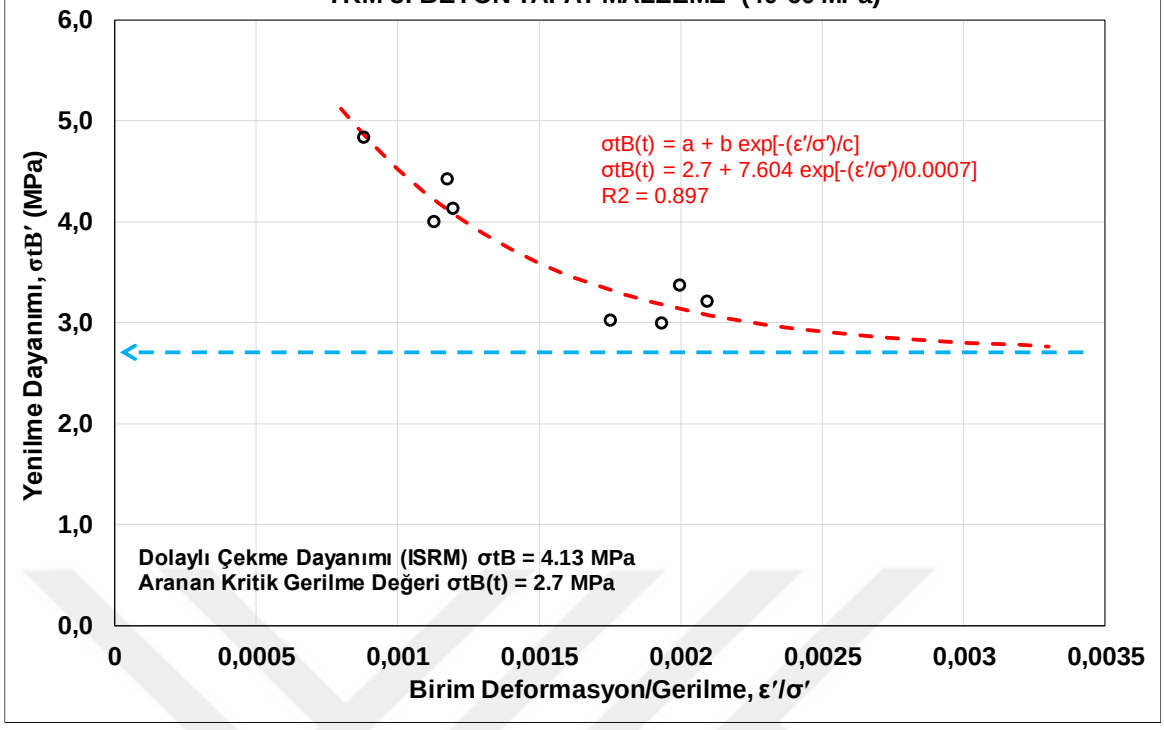


a) YKM-1 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

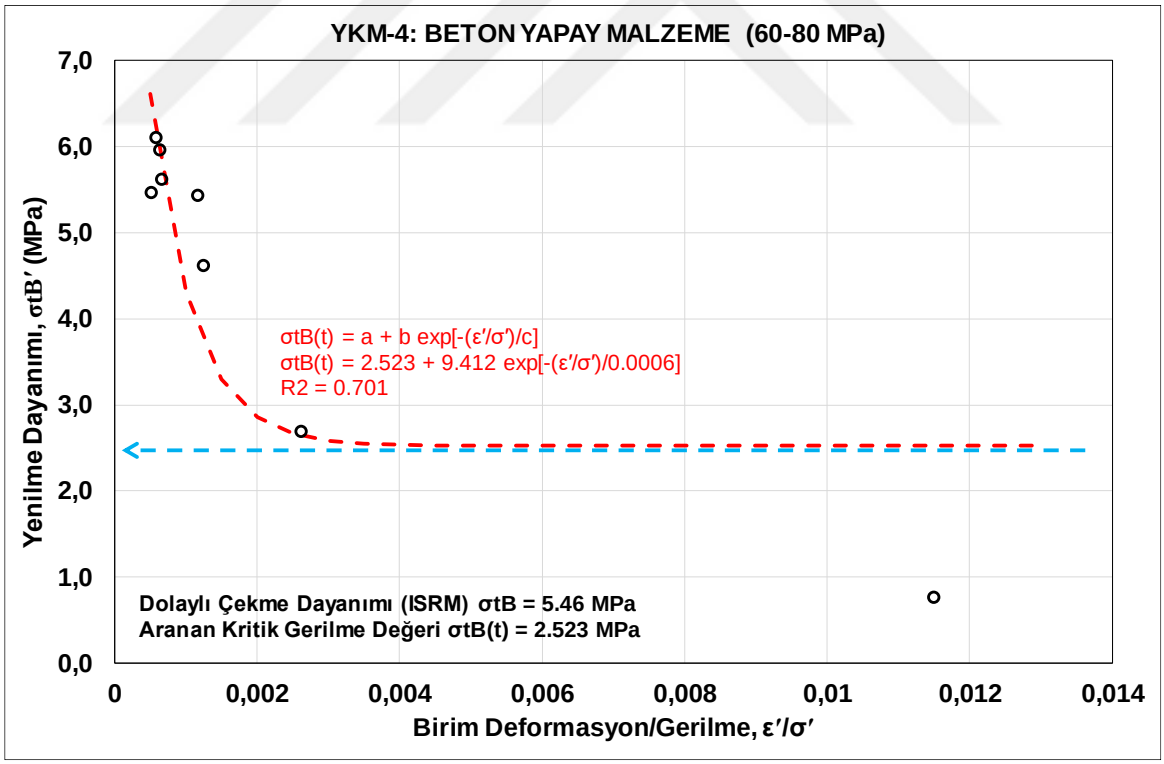


b) YKM-2 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.15 (devam)

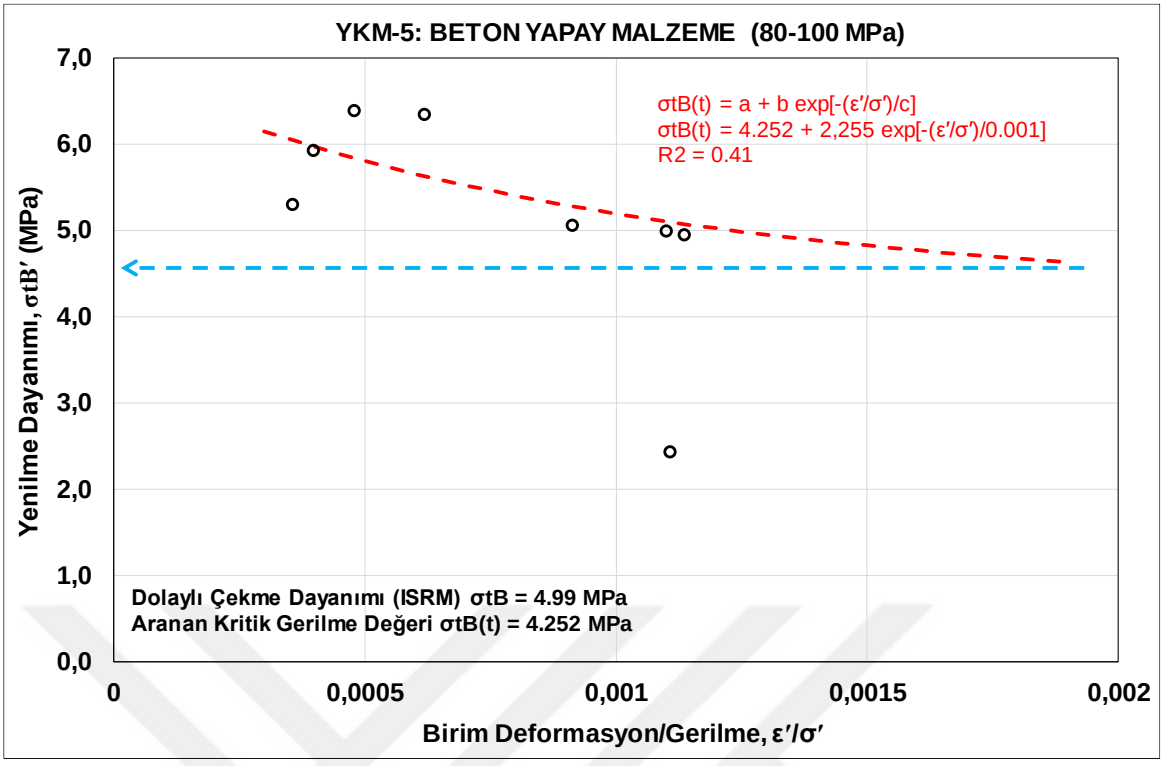


c) YKM-3 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) YKM-4 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.15 (devam)



e) YKM-5 Yapay kaya malzemesi beton kaya birimi için gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü deney (Grup 1) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.15. Farklı dayanımlara sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) için ε′/σ′ oranı ile σ_{tB}' arasında belirlenen davranışlar ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_c(t)$) değerleri.

Yukarıda sunulan grafiklerden ε′/σ′ oranı ile σ_{tB}' arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_{tB}' = a + b * Exp\,[(-\varepsilon'/\sigma') / c] \qquad (5.14)$$

Eşitlikte geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, ε′/σ′ birim deformasyon gerilme oranı $(1/(E_i)')$ ve σ_{tB}' ise farklı yükleme hızlarında oluşan yenilme dayanımlarını tanımlamaktadır. Şekil 5.15'te gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nota kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_{tB}(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_{tB}(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar yenilmeden üzerindeki gerilmeyi taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$$\sigma_{tB}' = \sigma_{tB}(t) \quad (5.15a)$$

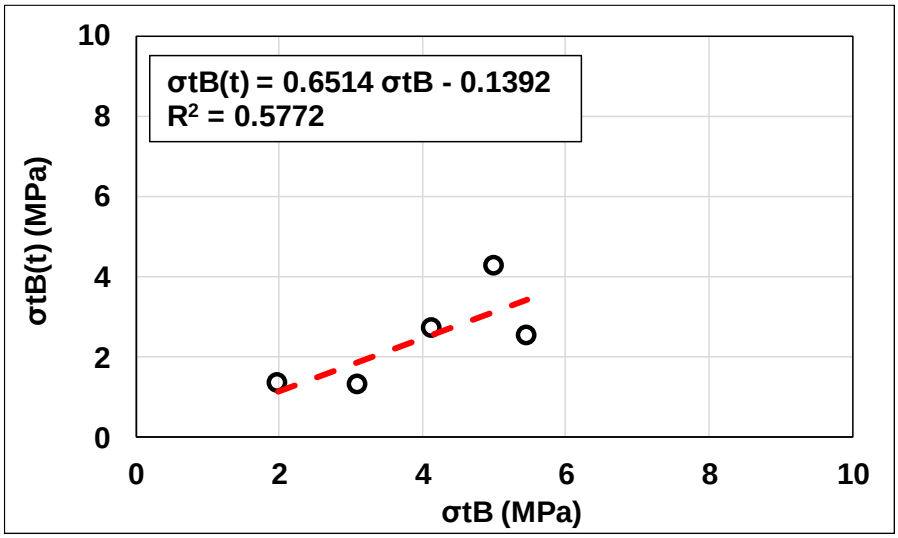
$$\sigma_{tB}' > \sigma_{tB}(t) \quad (5.15b)$$

$$\sigma_{tB}' < \sigma_{tB}(t) \quad (5.15c)$$

Eşitlik 5.15a'da verilen koşulda dolaylı çekme gerilmesi altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki gerilmeyi kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.15b'de belirtilen koşulda ise malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de zaman içerisinde yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.15c'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, pekleşme davranışı görülmez malzemede çekme yenilmesi söz konusu değildir, üzerindeki çekme gerilmesini taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

Çizelge 5.15. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri

Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Çekme Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(YKM)	(MPa)	σ_{tB} (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)
YKM-1	0-20	1.98	1.333
YKM-2	20-40	3.09	1.296
YKM-3	40-60	4.13	2.700
YKM-4	60-80	5.46	2.523
YKM-5	80-100	4.99	4.252



Şekil 5.16. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen ISRM-σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri arasındaki ilişki

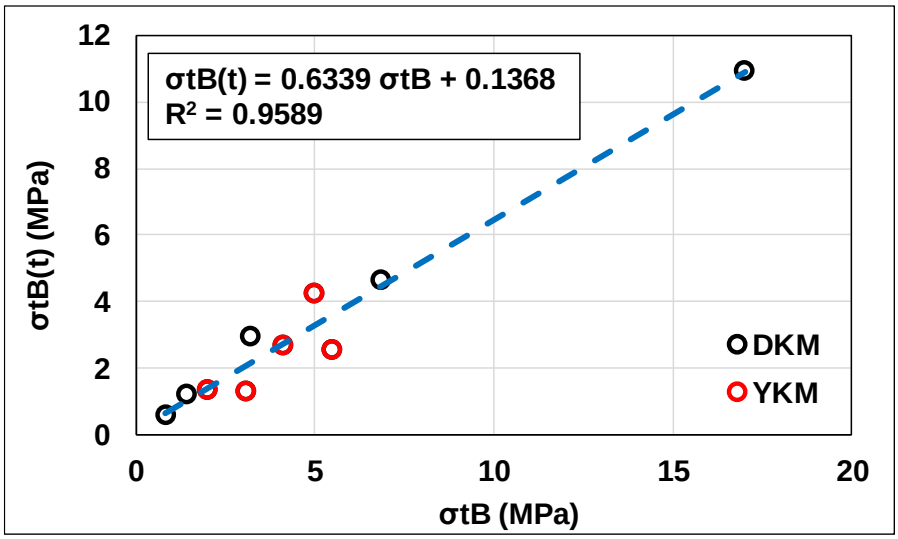
Şekil 5.15'te sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.14) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_{tB}(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_{tB} (200N/s, 12kN/dk, Çizelge 5.14) değerleri topluca Çizelge 5.15'te verilmiştir. Bu çizelge verileri ile hazırlanan grafik Şekil 5.16'da sunulmuştur.

5.2.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1)

Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerilme-hız-kontrollü deneyler ile belirlenen pekleşme davranışları değerlendirilmiştir. Aynı deney koşullarında gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.13 ve 5.15 verileri birleştirilerek Çizelge 5.16 ve Şekil 5.17 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.16. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen σ_c ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_c(t)$ değerleri

Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Çekme Dayanımı	Kritik Pekleşme Dayanımı
(MPa)	(DKM ve YKM)	σ_{tB} (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)
0-20	DKM-1	1.43	1.212
	YKM-1	1.98	1.333
20-40	DKM-2	0.83	0.586
	YKM-2	3.09	1.296
40-60	DKM-3	6.84	4.657
	YKM-3	4.13	2.700
60-80	DKM-4	3.22	2.935
	YKM-4	5.46	2.523
80-100	DKM-5	17.01	10.923
	YKM-5	4.99	4.252



Şekil 5.17. DKM ve YKM için toplam on farklı kaya birimine ait ISRM-σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.17'de görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda 200N/s yükleme hız koşulunda gerçekleştirilen deney sonuçlarının (σ_{tB}), kritik pekleşme eşiğini belirten $\sigma_{tB}(t)$ değerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.17'de belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.16'da verilmiştir.

$$\sigma_{tB}(t) = 0.6339\ \sigma_{tB} + 0.1368 \qquad (5.16)$$

5.2.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

5.2.2.1. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

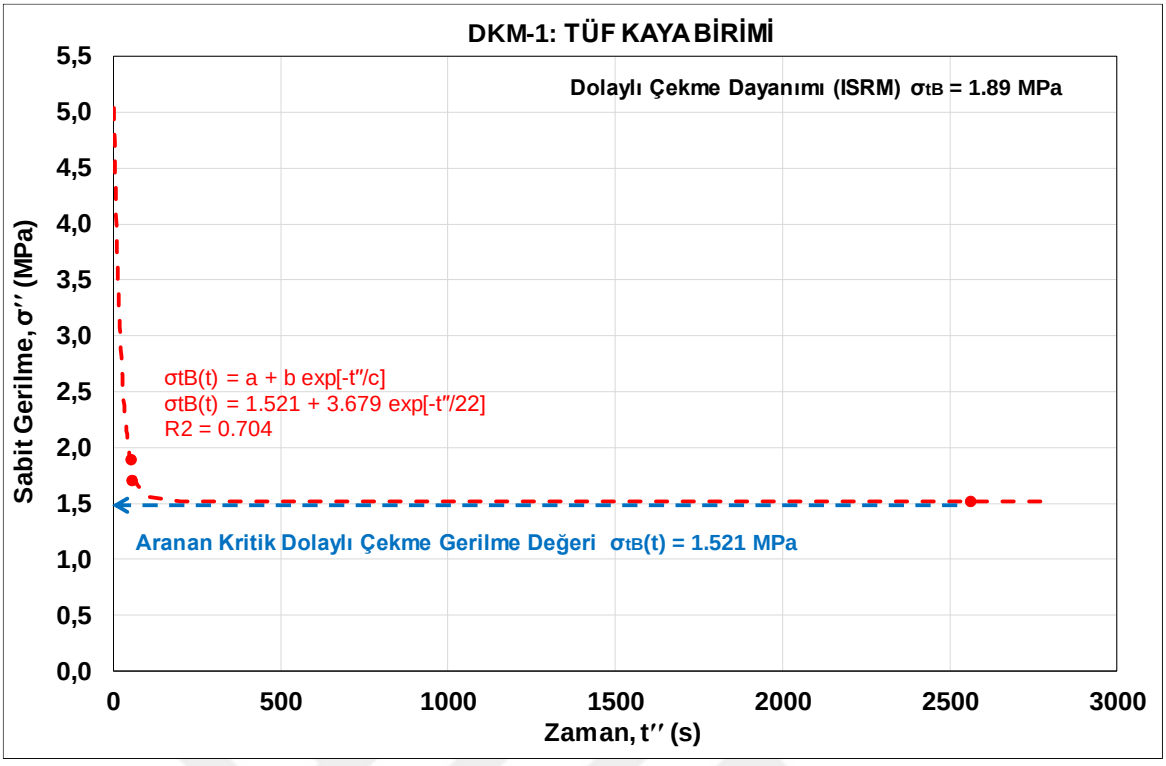
Sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) koşulunda gerçekleştirilen dolaylı çekme deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.5 alt başlığında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan zaman (t″) – dolaylı çekme birim deformasyon (ε″), zaman (t″) – dolaylı çekme gerilmesi (σ″) ve dolaylı çekme birim deformasyon (ε″) – dolaylı çekme gerilmesi (σ″) eğrileri dikkate alınmıştır. Özellikle dolaylı çekme birim deformasyon (ε″) – dolaylı çekme gerilmesi (σ″) eğrileri üzerinde sünme davranışının üç aşamasına ait geçiş noktaları belirlenmiştir. Sünme davranışının aşama-1'den aşama-2'ye geçiş noktasındaki sırası ile zaman (t″), dolaylı

çekme birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri kayıt altına alınmıştır. Benzer şekilde sünme davranışının aşama-2'den aşama-3 geçiş noktasına ait zaman (t″), dolaylı çekme birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri grafik üzerinden belirlenerek kayıt edilmiştir. Aynı zamanda aşama 3'ün içinde gözlenen yenilme anına ait zaman (t″), dolaylı çekme birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen zaman (t″) ve örnekler üzerine uygulanan sabit gerilme (σ″) değerleri yardımıyla ilgili grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik çekme için pekleşme değerleri ($\sigma_{tB}(t)$) tespit edilmiştir.

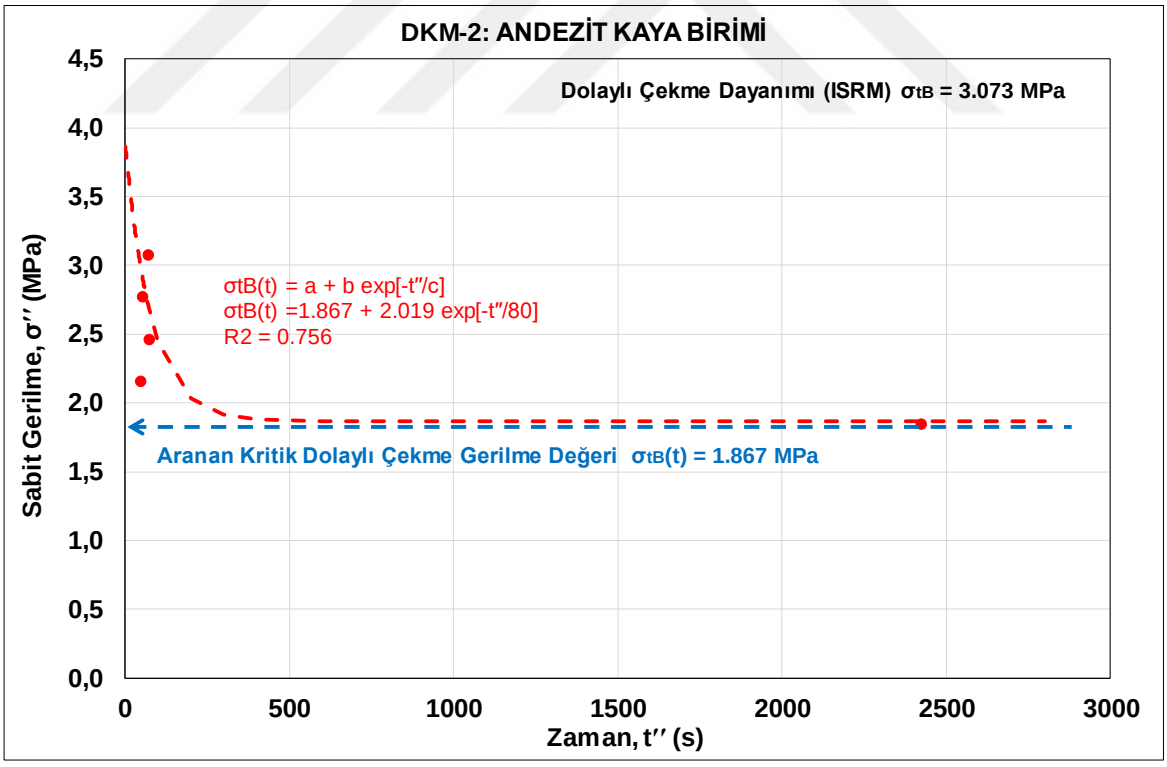
Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak DKM için her bir dayanım aralığından elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.17'de sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.18'de sunulan grafikler hazırlanmıştır.

Çizelge 5.17. DKM / Grup2'ye ait sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.5), sünme davranışı aşama 3'ün bitiş sınırı

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Deney Tanımı Sabit Gerilme Oranı	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 3 içerisinde Yenilme Sınırı			Grafik
			σ″ (MPa)	F″ (kN)	Zaman t″ (s)	Birim Deformasyon ε″ (-)	Mevcut Gerilme σ″ (MPa)	
DKM-1 (Tüf)	0-20	1 (σ_{tB})	1.89	4.33	55.4	801.8 10^{-5}	1.8932	Şekil 5.18 (a)
		0.9	1.70	3.89	57.0	2232 10^{-5}	0.611	
		0.8	1.51	3.46	2565.2	1012 10^{-5}	1.471	
		0.7	1.32	3.03	-	-	-	
		0.6	1.13	2.60	-	-	-	
		0.5	0.95	2.16	-	-	-	
DKM-2 (Andezit)	20-40	1 (σ_{tB})	3.07	7.03	70.6	692.7 10^{-5}	3.073	Şekil 5.18 (b)
		0.9	2.77	6.32	53.8	671.6 10^{-5}	2.317	
		0.8	2.46	5.62	73.4	351.4 10^{-5}	2.350	
		0.7	2.15	4.92	50.0	788.2 10^{-5}	1.718	
		0.6	1.84	4.22	2425	447.9 10^{-5}	1.737	
		0.5	1.54	3.51	70.6	692.7 10^{-5}	3.073	
DKM-3 (Traverten)	40-60	1 (σ_{tB})	5.38	12.32	175.4	469.5 10^{-5}	5.378	Şekil 5.18 (c)
		0.9	4.84	11.08	246.2	777.3 10^{-5}	4.941	
		0.8	4.30	9.85	186.4	565.4 10^{-5}	4.106	
		0.7	4.04	9.24	2421.8	170.6 10^{-5}	3.598	
		0.6	3.77	8.62	-	-	-	
		0.5	3.23	7.39	-	-	-	
DKM-4 (Mermer)	60-80	1 (σ_{c})	3.58	8.19	122.2	969.9 10^{-5}	3.580	Şekil 5.18 (d)
		0.9	3.22	7.38	2420.4	372.8 10^{-5}	3.298	
		0.8	2.86	6.56	2478	660.9 10^{-5}	2.879	
		0.7	2.51	5.74	-	-	-	
		0.6	2.15	4.92	-	-	-	
		0.5	1.79	4.10	-	-	-	
DKM-5 (Bazalt)	80-100	1 (σ_{tB})	10.10	23.12	323.6	340.8 10^{-5}	10.096	Şekil 5.18 (e)
		0.9	9.09	20.81	2538.4	53.27 10^{-5}	10.047	
		0.8	8.08	18.50	2848.6	362.8 10^{-5}	7.773	
		0.7	7.07	16.18	-	-	-	
		0.6	6.06	13.87	-	-	-	
		0.5	5.05	11.56	-	-	-	

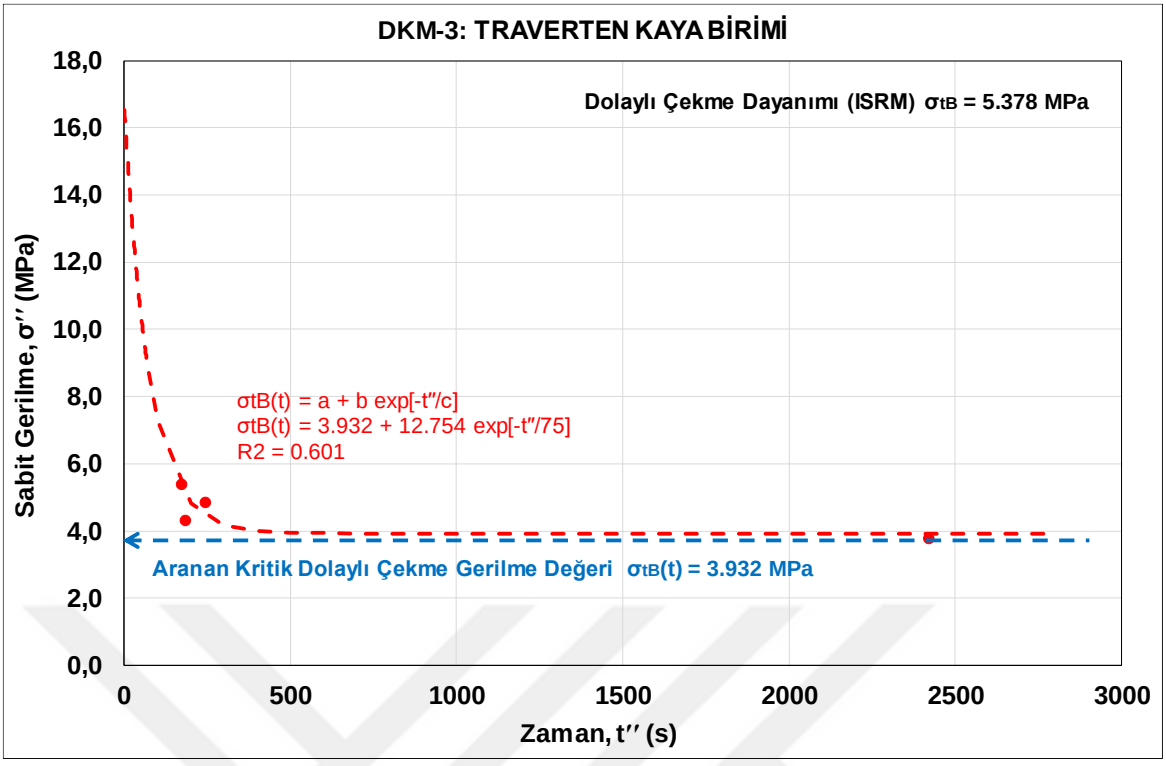


a) DKM-1 Tüf kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

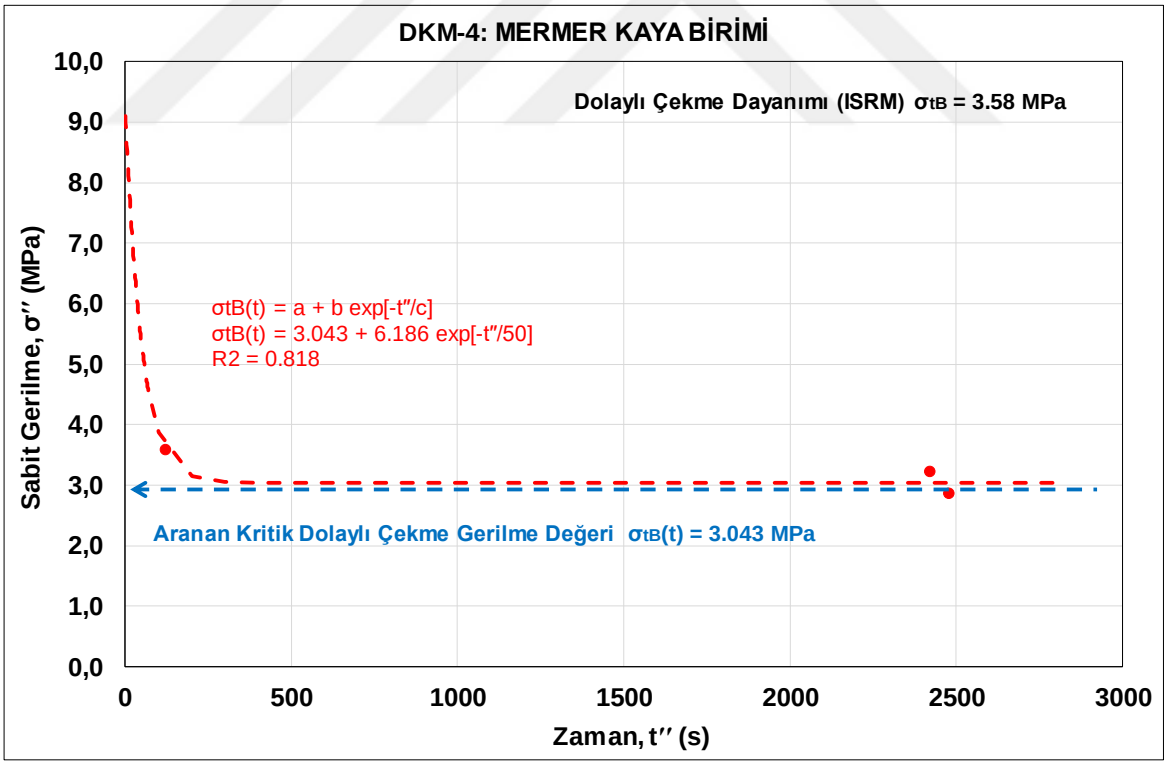


b) DKM-2 Andezit kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.18 (devam)

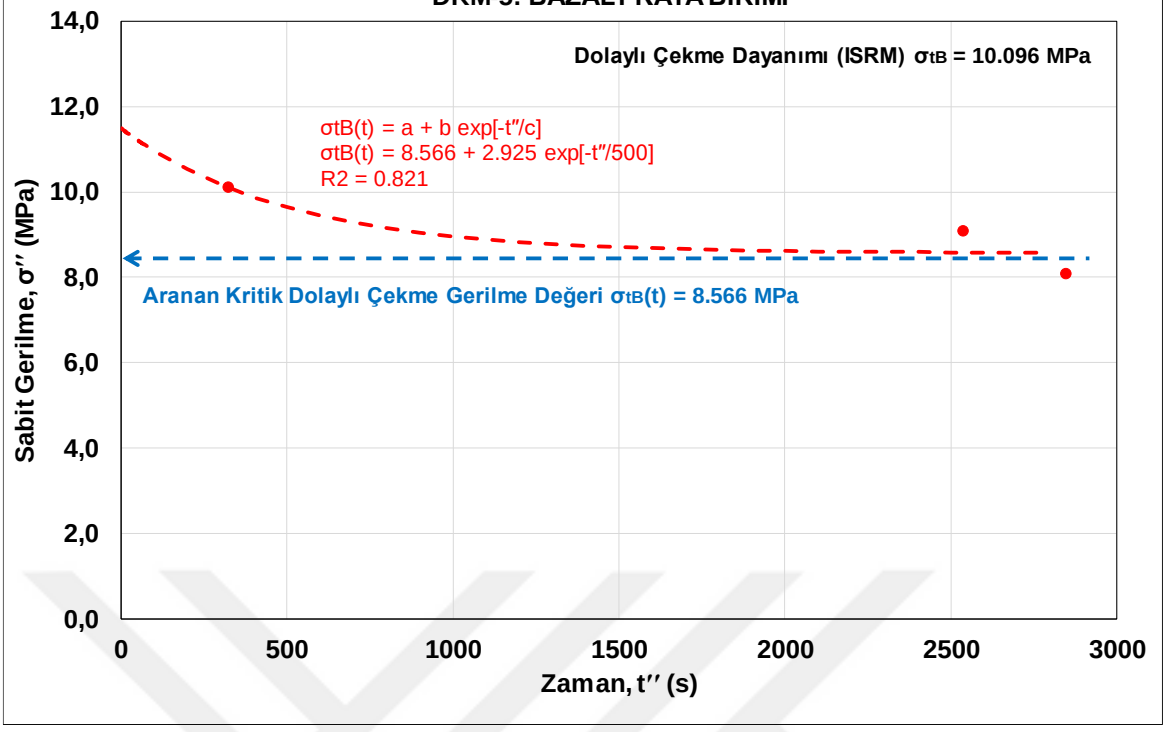


c) DKM-3 Traverten kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) DKM-4 Mermer kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.18 (devam)



e) DKM-5 Bazalt kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.18. Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) için üçüncü sünme aşamasına ait zaman (t″) - sabit gerilme (σ″) davranışları (Aşama 3'de gözlenen yenilme) ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_{tB}(t)$) değerleri.

SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile yukarıda sunulan grafiklerden t″ ile σ″ arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda ayrıca verilmiştir.

$$\sigma'' = a + b * Exp\,[- t'' / c] \qquad (5.17)$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, t″ zaman ve σ″ ise sünme deneyindeki (Grup2) uygulanan sabit gerilme değerini belirtmektedir.

Şekil 5.18'de gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nota kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_{tB}(t)$). Kritik pekleşme değeri ($\sigma_{tB}(t)$) aslında bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan malzemenin sonsuza kadar çekme gerilmesinden dolayı yenilmeden üzerindeki çekme

gerilmesini taşıyabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$$\sigma'' = \sigma_{tB}(t) \quad (5.18a)$$

$$\sigma'' > \sigma_{tB}(t) \quad (5.18b)$$

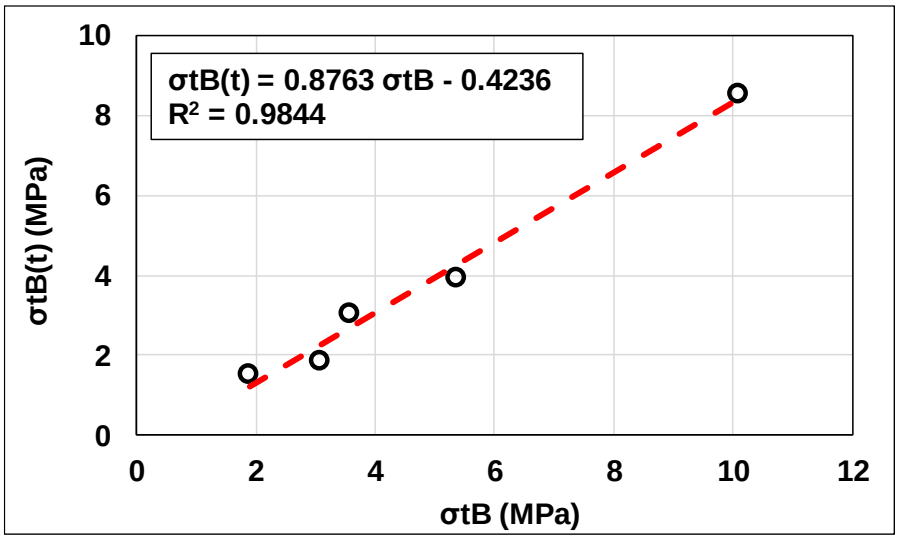
$$\sigma'' < \sigma_{tB}(t) \quad (5.18c)$$

Eşitlik 5.18a'da verilen koşulda çekme gerilmesi altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki çekme gerilmesini kritik eşikte duraylı bir şekilde taşır. Eşitlik 5.18c'de belirtilen koşulda malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de yenilir, zamana bağlı duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.18b'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, çekme gerilmesine bağlı yenilme söz konusu değildir, üzerindeki gerilmeyi taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisindedir.

Şekil 5.18'de sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.17) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_{tB}(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_{tB} (200kN/s, 12kN/dk, Çizelge 5.17) değerleri topluca Çizelge 5.18'de verilmiştir. Sünme deneylerinde sabit gerilme değeri örnek kaya üzerinde oluşturuncaya kadarki geçen sürede yükleme hızı 200N/s seçilmiştir çizelge verileri ile hazırlanan grafik Şekil 5.19'da sunulmuştur.

Çizelge 5.18. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Çekme Dayanımı	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(DKM)	(MPa)	σ_{tB} (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)
DKM-1	0-20	1.89	1.521
DKM-2	20-40	3.073	1.867
DKM-3	40-60	5.378	3.932
DKM-4	60-80	3.58	3.043
DKM-5	80-100	10.096	8.566



Şekil 5.19. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM için belirlenen ISRM-σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri arasındaki ilişki (Grup2)

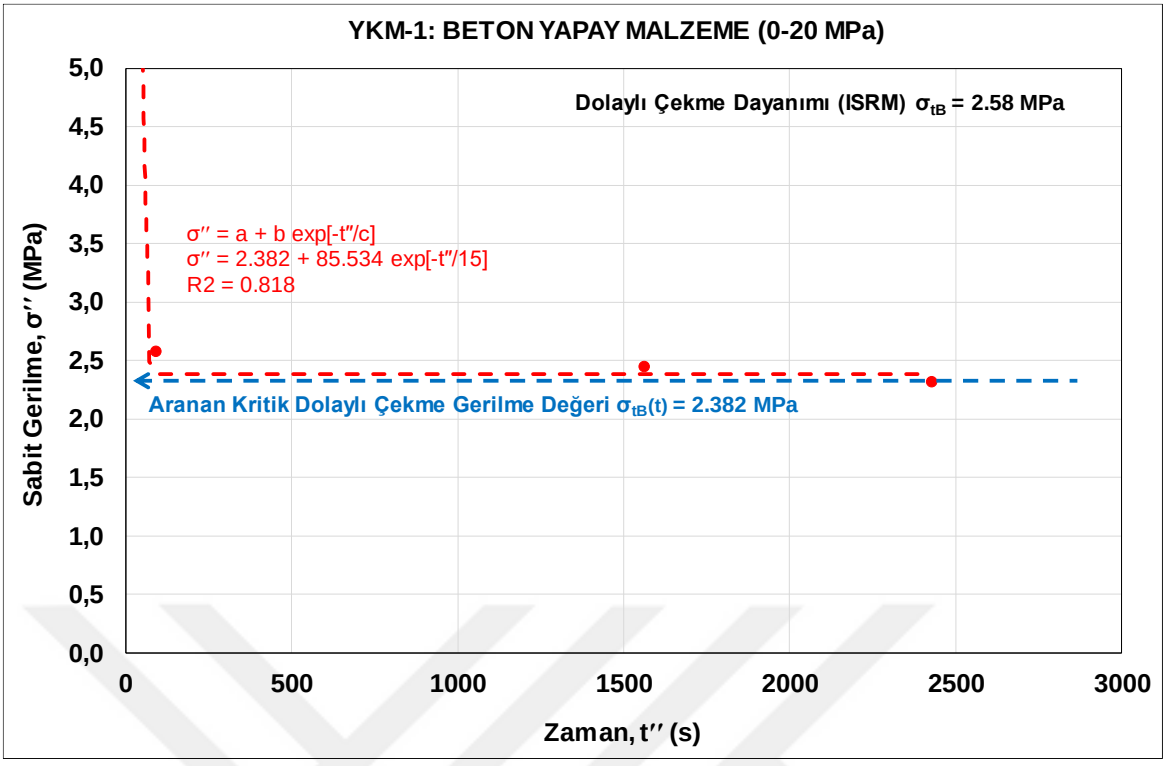
5.2.2.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep) koşulunda gerçekleştirilen dolaylı çekme deney sonuçlarından hazırlanan grafiksel sunumlar Bölüm 4'te 4.6 alt başlığında sunulmuştur. Sunulan bu grafiksel sonuçlardan zaman (t″) – dolaylı çekme birim deformasyon (ε″), zaman (t″)- dolaylı çekme gerilmesi (σ″) ve dolaylı çekme birim deformasyon (ε″) - dolaylı çekme gerilmesi (σ″) eğrileri dikkate alınmıştır. Özellikle dolaylı çekme birim deformasyon (ε″)- dolaylı çekme gerilme (σ″) eğrilerinde görülen sünme davranışının üç aşamasındaki geçiş noktaları belirlenmiştir. Sünme davranışının aşama 1'den aşama-2'ye geçiş noktasındaki sırası ile zaman (t″), birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri kayıt altına alınmıştır. Benzer şekilde sünme davranışının aşama-2'den aşama-3 geçiş noktasına ait zaman (t″), birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri grafik üzerinden belirlenerek kayıt edilmiştir. Bununla birlikte aşama 3'ün içinde özlenen yenilme anına ait zaman (t″), dolaylı çekme birim deformasyon (ε″), sabit gerilme (σ″) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen zaman (t″) ve örnekler üzerine uygulanan çekme yönündeki sabit gerilme (σ″) değerleri yardımıyla ilgili grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerden her bir dayanım aralığına ait kritik eşik pekleşme değerleri ($\sigma_{tB}(t)$) tespit edilmiştir.

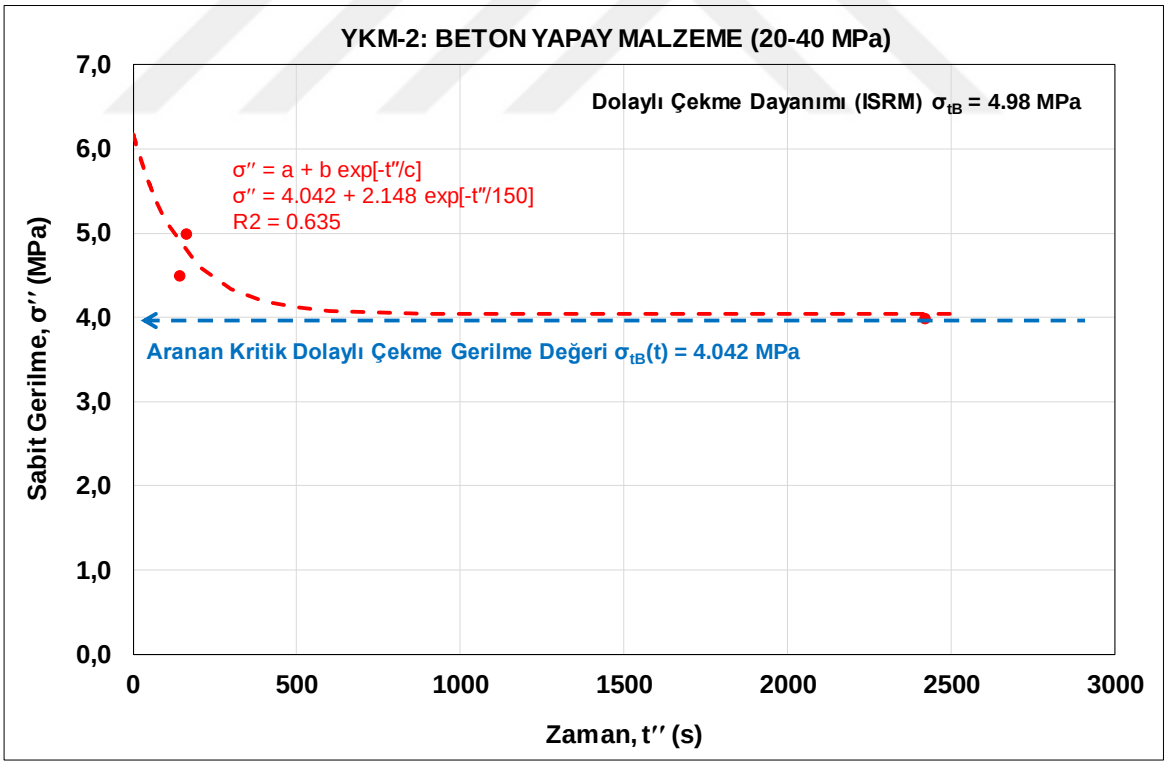
Yukarıda genel olarak tanımlanmaya çalışılan ifadelere yönelik olarak DKM için her bir dayanım aralığı için elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.19'da sunulmuştur. Bu çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.20 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.19. YKM / Grup2'ye ait sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney sonuçları (Bölüm 4, alt başlık 4.6), sünme davranışı aşama 3'ün bitiş sınırı

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Deney Tanımı Sabit Gerilme Oranı	Uygulanan Sabit Gerilme	Uygulanan Sabit Yük	Sünme Davranışı Aşama 3 içerisinde Yenilme Sınırı			Grafik
			σ'' (MPa)	F'' (kN)	Zaman	Birim Deformasyon	Mevcut Gerilme	
					t'' (s)	ε'' (-)	σ'' (MPa)	
YKM-1	0-20	1 (σ_{tB})	2.58	20.25	91.4	611.2 10^{-5}	2.575	Şekil 5.20 (a)
		0.95	2.45	19.24	1563.0	902.9 10^{-5}	2.434	
		0.9	2.32	18.23	2429.0	823.9 10^{-5}	2.459	
		0.8	2.06	16.20	-	-	-	
		0.7	1.81	14.18	-	-	-	
		0.6	1.55	12.15	-	-	-	
		0.5	1.29	10.13	-	-	-	
YKM-2	20-40	1 (σ_{tB})	4.98	39.09	164.6	881.2 10^{-5}	4.980	Şekil 5.20 (b)
		0.9	4.48	35.18	143.6	711.2 10^{-5}	4.393	
		0.8	3.98	31.27	2421.4	732.6 10^{-5}	3.898	
		0.7	3.49	27.37	-	-	-	
		0.6	2.99	23.46	-	-	-	
		0.5	2.49	19.55	-	-	-	
YKM-3	40-60	1 (σ_{tB})	5.88	46.16	198.8	722.8 10^{-5}	5.879	Şekil 5.20 (c)
		0.9	5.29	41.54	169.0	712.7 10^{-5}	4.921	
		0.8	4.70	36.93	2675.4	904.3 10^{-5}	4.689	
		0.7	4.12	32.31	-	-	-	
		0.6	3.53	27.69	-	-	-	
		0.5	2.94	23.08	-	-	-	
YKM-4	60-80	1 (σ_{tB})	4.93	38.70	159.4	603.7 10^{-5}	4.930	Şekil 5.20 (d)
		0.9	4.44	34.83	134.4	431.9 10^{-5}	3.972	
		0.8	3.94	30.96	2423.8	340.5 10^{-5}	3.909	
		0.7	3.45	27.09	-	-	-	
		0.6	2.96	23.22	-	-	-	
		0.5	2.47	19.35	-	-	-	
YKM-5	80-100	1 (σ_{tB})	4.82	37.84	161.2	501.4 10^{-5}	4.818	Şekil 5.20 (e)
		0.9	4.34	34.05	1245.6	552.0 10^{-5}	4.294	
		0.8	3.86	30.27	2516.2	473.0 10^{-5}	3.630	
		0.7	3.37	26.49	-	-	-	
		0.6	2.89	22.70	-	-	-	
		0.5	2.41	18.92	-	-	-	

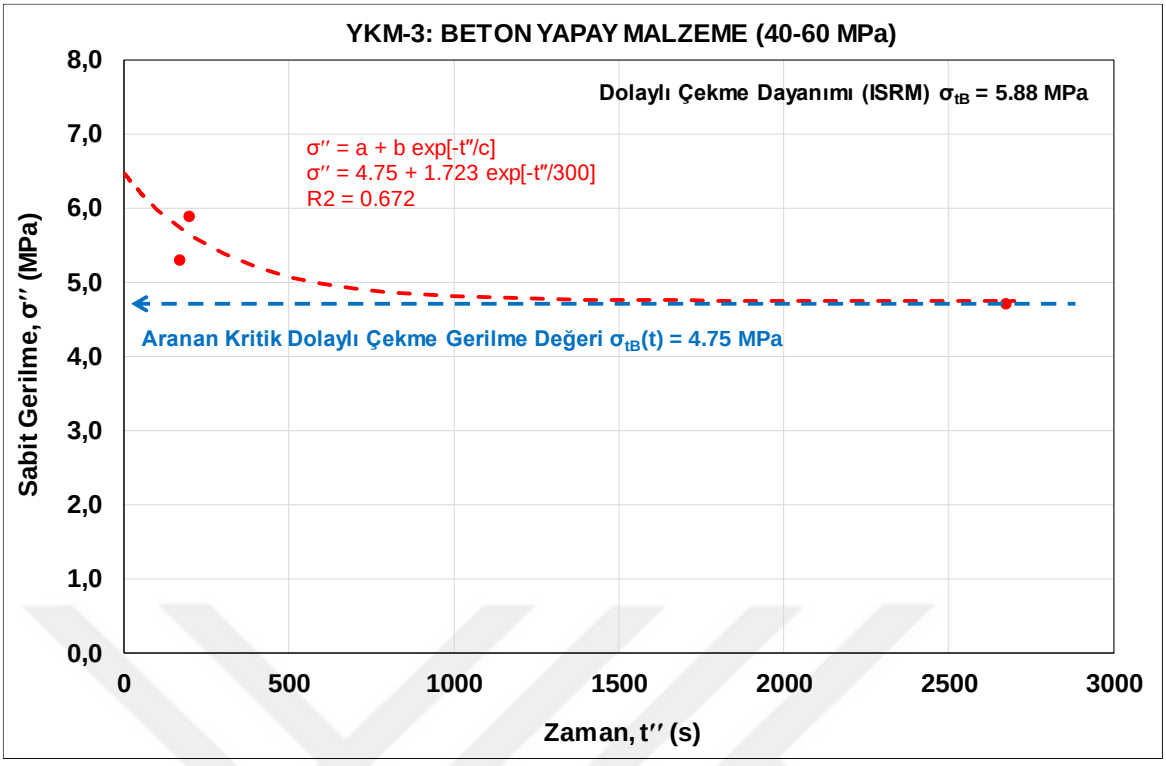


a) YKM-1 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

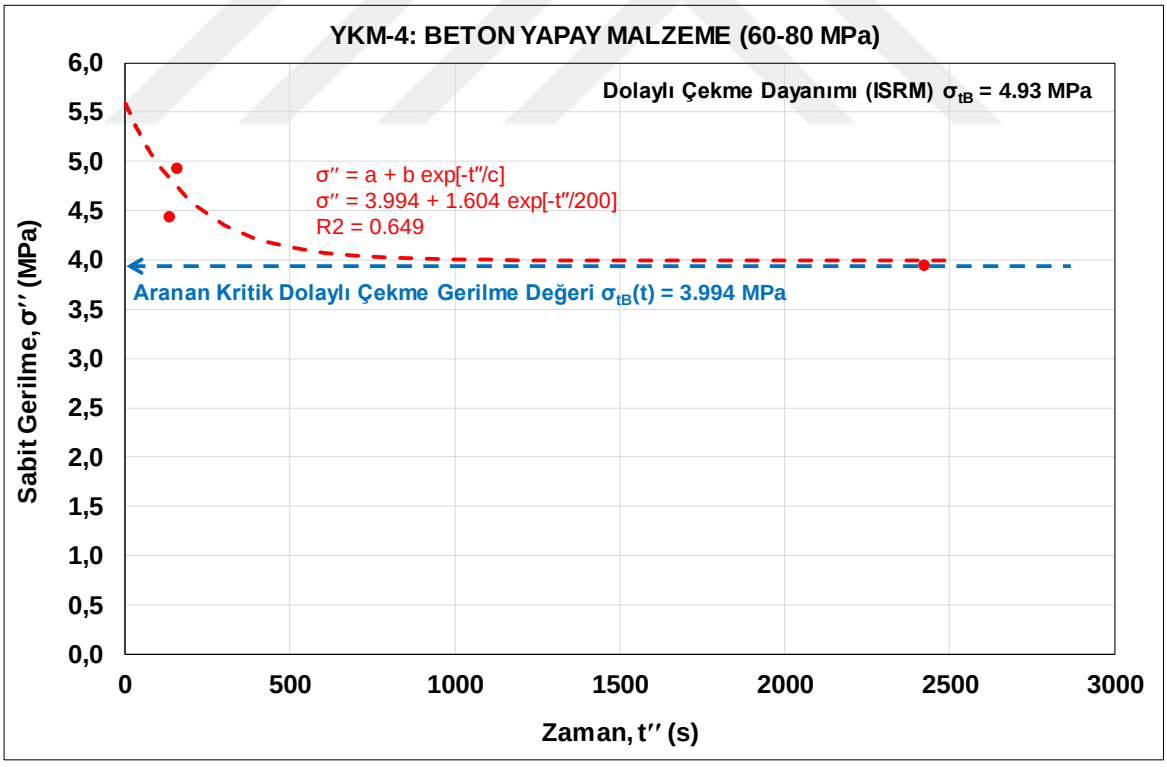


b) YKM-2 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.20 (devam)

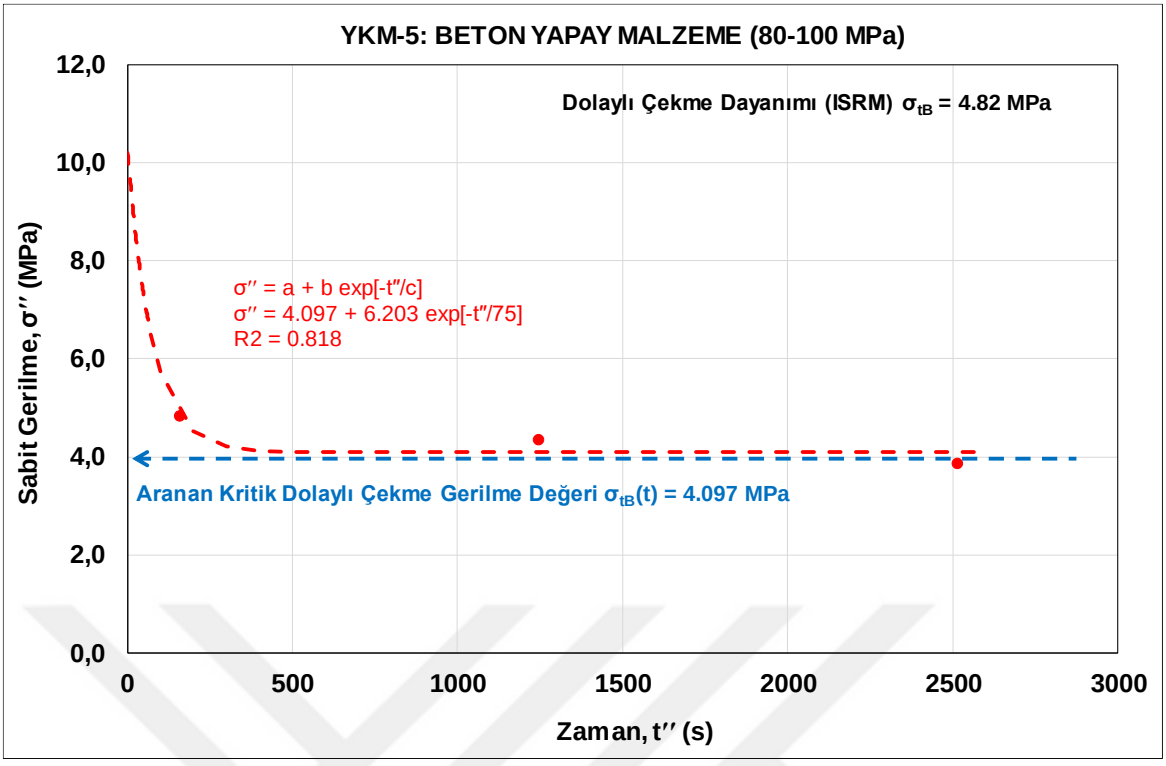


c) YKM-3 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi



d) YKM-4 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.20 (devam)



e) YKM-5 beton yapay kaya birimi için gerçekleştirilen sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney (Grup 2) sonuçları ve kritik eşik pekleşme değerinin belirlenmesi

Şekil 5.20. Farklı dayanımlara sahip yapay kaya malzemeleri (YKM) için üçüncü sünme aşamasına ait zaman (t″) - sabit gerilme (σ″) davranışları (Aşama 3'de gözlenen yenilme) ve kritik pekleşme dayanım ($\sigma_{tB}(t)$) değerleri.

Yukarıda sunulan Şekil 5.20'de verilen grafiklerden t″ ile σ″ arasındaki davranışı tanımlayan en iyi eğriler SPSS V.28 (IBM SPSS Statistics, 2023) istatistik programı ile belirlenmiştir. Tüm farklı dayanım aralıkları için deney sonuçları ile en iyi örtüşen matematiksel modelin genelleştirilmiş biçimi aşağıda verilmiştir.

$$\sigma'' = a + b * \text{Exp}\,[- t'' / c] \qquad (5.19)$$

Burada matematiksel modelde geçen "a", "b" ve "c" sabitleri istatiksel katsayıları, t″ zaman ve σ″ ise sünme deneyindeki (Grup2) uygulanan sabit gerilme değerini belirtmektedir.

Şekil 5.20'de gösterilen eğrinin x eksenine asimptot (paralel) olduğu ve y ekseninde değişmediği sabit kaldığı nota kritik pekleşme değerini belirtmektedir ($\sigma_{tB}(t)$). Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan kritik pekleşme değeri ($\sigma_{tB}(t)$) aslında malzemenin sonsuza kadar yenilmeden üzerindeki çekme gerilmesini karşılayabileceği kritik bir değeri tanımlamaktadır. Aşağıdaki sınır koşulları yazılabilir.

$$\sigma'' = \sigma_{tB}(t) \quad (5.20a)$$

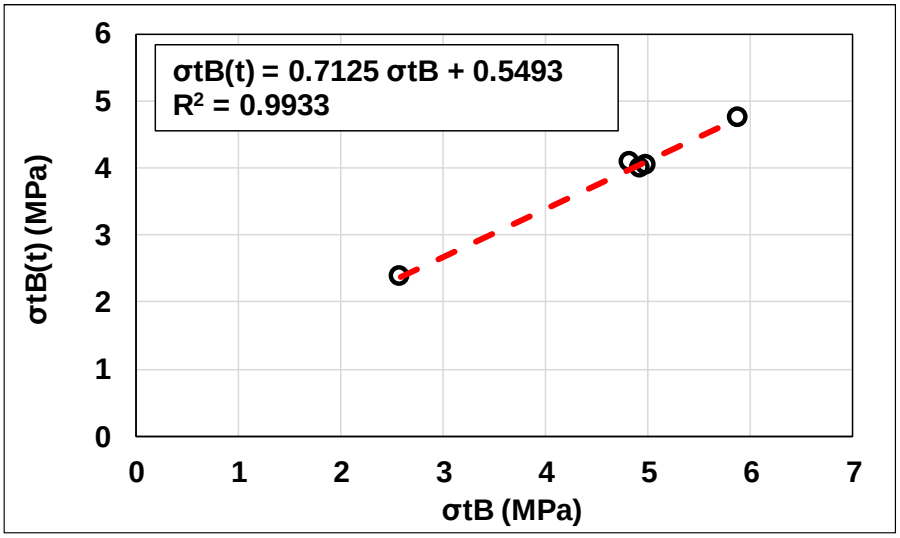
$$\sigma'' > \sigma_{tB}(t) \quad (5.20b)$$

$$\sigma'' < \sigma_{tB}(t) \quad (5.20c)$$

Eşitlik 5.20a'da verilen durumda çekme gerilmesi altında malzeme sonsuza kadar kritik eşikte kalır, yenilmez ve üzerindeki gerilmeyi kritik eşikte duraylı bir şekilde taşıyacaktır. Eşitlik 5.20b'de belirtilen koşulda ise malzeme kritik eşiğin üzerinde olduğu için pekleşme gözlense de çekme gerilmesinin etkisinde yenilir, duraylılık söz konusu değildir. Eşitlik 5.20c'de belirtilen koşul altında malzeme sonsuza kadar kritik eşiğin altında kalır, yenilmesi söz konusu değildir, üzerindeki çekme gerilmesini taşır ve her zaman duraylı elastik sınırlar içerisinde kalır.

Çizelge 5.20. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Çekme Dayanım	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(DKM)	(MPa)	σ_{tB} (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)
YKM-1	0-20	2.58	2.382
YKM-2	20-40	4.98	4.042
YKM-3	40-60	5.88	4.750
YKM-4	60-80	4.93	3.994
YKM-5	80-100	4.82	4.097



Şekil 5.21. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda YKM için belirlenen ISRM-σ_{tB} ve kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri arasındaki ilişki (Grup2)

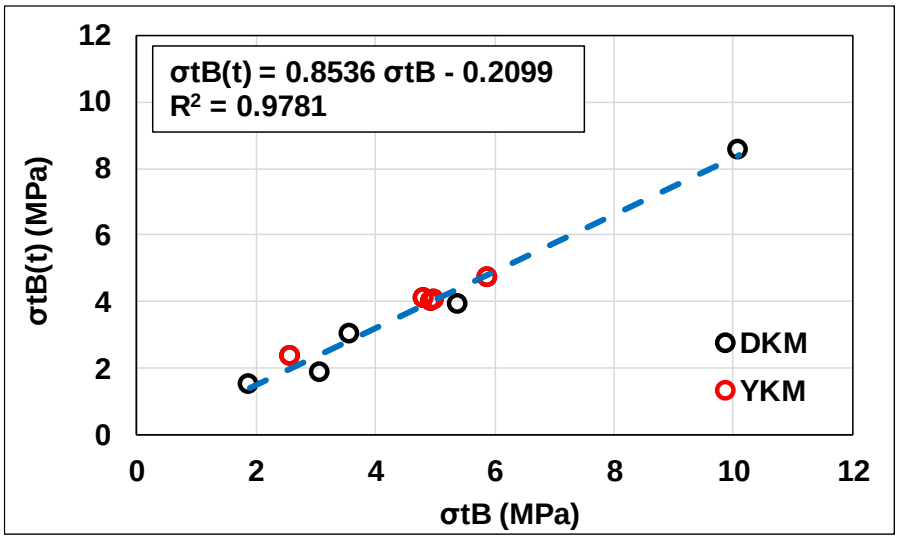
Şekil 5.20'de sunulan grafikler ve geliştirilen eşitliklerden (Eşitlik 5.19) elde edilen kritik pekleşme dayanımı ($\sigma_{tB}(t)$) ve ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen σ_{tB} (200N/s, 12kN/dk, Çizelge 5.19) değerleri topluca Çizelge 5.20'de verilmiştir. Sünme deneylerinde sabit gerilme değeri örnek kaya üzerinde oluşturuncaya kadarki geçen sürede yükleme hızı 200N/s seçilmiştir. Bu çizelge verileri ile hazırlanan grafik Şekil 5.21'de sunulmuştur.

5.2.2.3. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Bu bölümde (5.2.2) sunulan beş farklı dayanıma sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneyler ile belirlenen pekleşme davranışları değerlendirilmiştir. Aynı deney koşullarında gerçekleştirilen DKM ve YKM dolaylı çekme deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.18 ve 5.20 verileri birleştirilerek Çizelge 5.21 ve aşağıda sunulan grafik hazırlanmıştır (Şekil 5.22).

Çizelge 5.21. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen σ_{tB} ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda belirlenen kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri

Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Çekme Dayanımı	Kritik Pekleşmeye Dayalı Dayanım
(MPa)	(DKM ve YKM)	σ_{tB} (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)
0-20	DKM-1	1.89	1.521
	YKM-1	2.58	2.382
20-40	DKM-2	3.073	1.867
	YKM-2	4.98	4.042
40-60	DKM-3	5.378	3.932
	YKM-3	5.88	4.75
60-80	DKM-4	3.58	3.043
	YKM-4	4.93	3.994
80-100	DKM-5	10.096	8.566
	YKM-5	4.82	4.097



Şekil 5.22. DKM ve YKM için toplam on farklı kaya birimine ait ISRM-σ_{tB} ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda belirlenen kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.22'de görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda 200N/s yükleme hızı altında gerçekleştirilen deney sonuçlarının (σ_{tB}), kritik pekleşme eşiğini belirten $\sigma_{tB}(t)$ değerinden büyük olduğu anlaşılmaktadır. Kritik pekleşme eşiğini belirmeye yönelik sünme deneylerinde hedeflenen sabit gerilme değerine ulaşıncaya kadarki zaman diliminde yükleme hızı 200N/s alınmıştır (ISRM, 2007). Şekil 5.22'de belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.21'de verilmiştir.

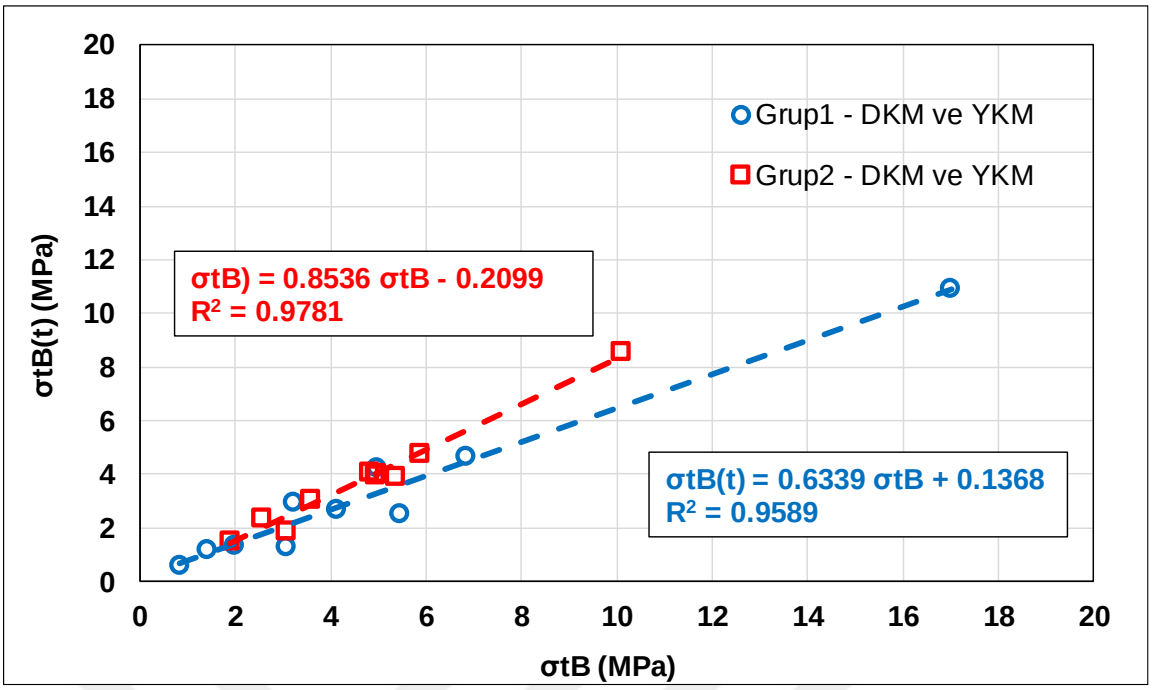
$$\sigma_{tB}(t) = 0.8536\ \sigma_{tB} - 0.2099 \qquad (5.21)$$

5.2.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel değerlendirmesi

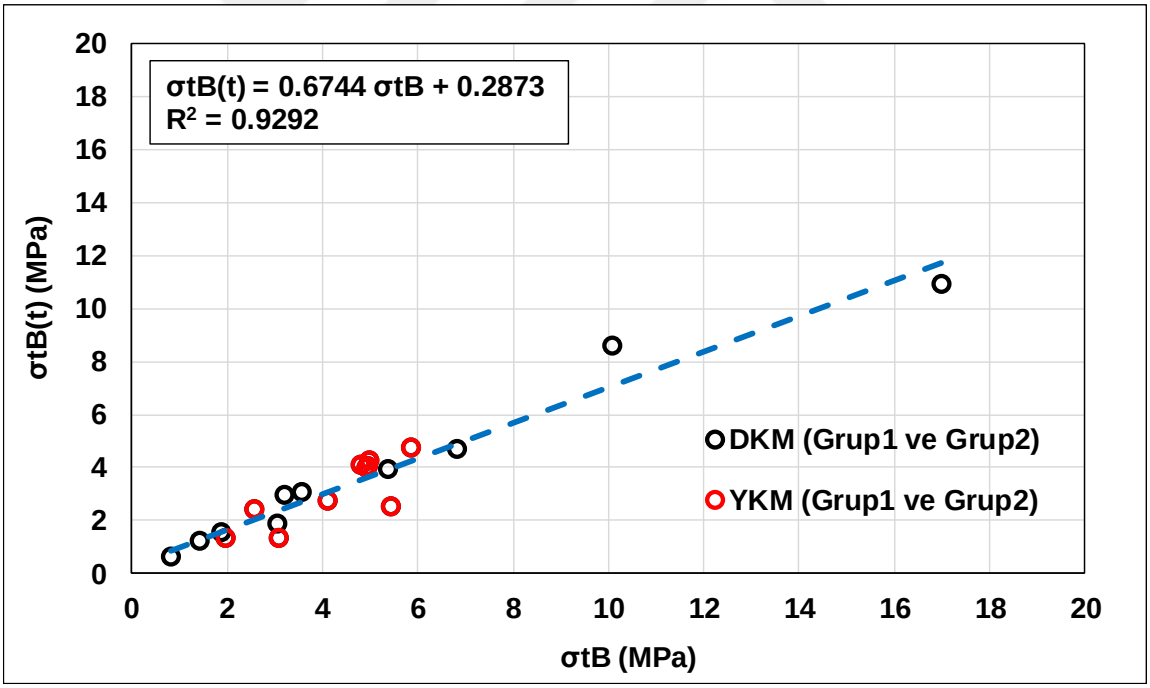
Bölüm 5.2.1 ve Bölüm 5.2.2'de doğal ve yapay kaya malzemeler için gerilme-hız-kontrollü deney (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarının genel bir değerlendirmesi bu bölümde verilmiştir.

Çizelge 5.22. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen σ_{tB} ve farklı iki deney koşulundan (Grup1 ve Grup2) belirlenen kritik pekleşme dayanım $\sigma_{tB}(t)$ değerleri

Deney Koşulu	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Grup1 Deneyleri		Grup2 Deneyleri	
		σ_{tB}	$\sigma_{tB}(t)$	σ_{tB}	$\sigma_{tB}(t)$
	DKM ve YKM	MPa	MPa	MPa	MPa
Grup1 Deneyler (Gerilme-hız-kontrollü deney koşulu)	DKM-1	1.43	1.212	-	-
	DKM-2	0.83	0.586	-	-
	DKM-3	6.84	4.657	-	-
	DKM-4	3.22	2.935	-	-
	DKM-5	17.01	10.923	-	-
	YKM-1	1.98	1.333	-	-
	YKM-2	3.09	1.296	-	-
	YKM-3	4.13	2.7	-	-
	YKM-4	5.46	2.523	-	-
	YKM-5	4.99	4.252	-	-
Grup2 Deneyler (Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulu)	DKM-1	-	-	1.89	1.521
	DKM-2	-	-	3.073	1.867
	DKM-3	-	-	5.378	3.932
	DKM-4	-	-	3.58	3.043
	DKM-5	-	-	10.096	8.566
	YKM-1	-	-	2.58	2.382
	YKM-2	-	-	4.98	4.042
	YKM-3	-	-	5.88	4.75
	YKM-4	-	-	4.93	3.994
	YKM-5	-	-	4.82	4.097



Şekil 5.23. Dolaylı çekme (DÇ) koşulunda Grup1 ve Grup2 deneylerinden elde edilen kritik pekleşme davranışı



Şekil 5.24. Dolaylı çekme (DÇ) koşulunda Grup1 ve Grup2 tüm deney sonuçlarına dayalı genelleştirilmiş kritik pekleşme davranışı

Bu çalışmada aynı amaca yönelik olarak iki farklı deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM dolaylı çekme deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.16 ve 5.21 verileri birleştirilerek Çizelge 5.22 ve Şekil 5.23 ile Şekil 5.24 hazırlanmıştır.

Şekil 5.23'te aynı amaca yönelik iki farklı deney sonuçlarının (Grup1 ve Grup2) her birinin kendi içerisindeki istatistiksel başarısının yüksek olduğu deney sonuçlarının da dar bir koridorda yoğunlaştığı görülmektedir. Kritik pekleşme değerinin belirlenmesi için tüm deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile genelleştirilmiş Şekil 5.24'te sunulan grafik elde edilmiştir.

Şekil 5.24'te görüldüğü üzere standart deney sonuçlarının (σ_{tB}), kritik pekleşme eşiğini belirten $\sigma_{tB}(t)$ değerinden büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.24'te genelleştirilerek belirtilen yaklaşım ayrıca Eşitlik 5.22'de verilmiştir. Bu eşitlik, bu çalışma sonunda pekleşmeye dayalı kritik çekme dayanım değerinin belirlenmesine yönelik önerilen genelleştirilmiş bir yaklaşım niteliği taşımaktadır.

$$\sigma_{tB}(t) = 0.6744\ \sigma_{tB} + 0.2873 \quad (R2=0.92) \tag{5.22}$$

Dolaylı çekme koşulu altında gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarına (Grup1 ve Grup2) göre, örneğin bir yeraltı açıklık tasarımında ISRM (1981, 2007) öngörüsü doğrultusunda belirlenen dolaylı çekme dayanımı (σ_{tB}) değeri eğer arazide çekme yönünde oluşan gerilme (σ) değerlerinden büyük ise ($\sigma_{tB} > \sigma$) mühendis açıklığın güvenli olduğunu varsayacaktır. Eğer arazi gerilme değeri σ_{tB} değerine eşit veya büyükse ise ($\sigma \geq \sigma_{tB}$) bu durumda mühendis açıklığın çekme gerilmesi altında yenileceğini, duraylılığını yitireceğini düşünerek önlem almaya alışacaktır. Ancak bu çalışma sonunda ortaya konan yaklaşıma göre açıklık etrafındaki kaya malzemesi üzerindeki çekme gerilmesi $\sigma \geq \sigma_{tB}$ koşulunda iken açıklıkta duraysızlık hemen görülürken aslında $\sigma_{tB}(t) \leq \sigma \leq \sigma_{tB}$ koşulunda bile pekleşme sonucunda açıklık etrafındaki kaya malzemesinde yenilme muhakkak olacak ve duraylılık bozulacaktır. Mühendisler bu süreçte güvende olduklarını düşünürken aslında duraysızlık problemi ile karşılaşacaklardır. Bu sonuç yeraltı maden ocağında can ve mal kayıplarına neden olabilecek önemli bir sorun olacaktır. Örnekte verilen açıklığın en güvenli olduğu durum aslında $\sigma \leq \sigma_{tB}(t)$ koşulu olacaktır.

Örneğin 700 m (H) derinde bulunan bir yeraltı kömür madeninde mevcut galeri açıklığı üzerinde bulunan tavan tabakalarının sarktığını ve böylece tabakaların bükülen dış kısımlarında çekme gerilmelerinin 4 MPa'a ulaştığını varsayalım. Tavan tabaka kaya malzemesinin ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilen dolaylı çekme dayanımı deneyine göre σ_{tB} değerinin ise 5 MPa olduğu kabul edilsin. Şekil 5.24'te belirtilen ve Eşitlik 5.22'de ifade edilen yaklaşıma göre bu çalışma ile tasarım mühendislerine önerilen kritik eşik pekleşme $\sigma_{tB}(t)$ değeri 3.66 MPa olacaktır. Tasarım

çalışmalarında tavan tabaka kaya malzemesinin çekme dayanımının σ_{tB} = 5 MPa olduğu düşünülürse galeri tavanında oluşan çekme gerilme değeri σ = 4 MPa < σ_{tB} = 5 MPa olduğu için tavan tabakaları yenilmez duraylıdır hükmü mühendis tarafından verilecektir. Ancak $\sigma_{tB}(t)$ = 3.66 MPa < σ = 4 MPa < σ_c = 5 MPa koşulunda bile malzeme hemen yenilmese de pekleşme davranışı sergileyecek ve zaman içinde yine de yenilecektir. Bu durum üretimde aksamalara veya can ve mal kayıplarına sebebiyet verecektir. Sonuç olarak tasarım çalışmalarında $\sigma_{tB}(t)$=3.66 MPa dikkate alınırsa bu değerin üzerinde olan arazi çekme gerilmesi (σ = 4 MPa), açıklık tavanında yer alan tabaka malzemesinde pekleşme sürecini başlatacak ancak kritik eşikte pekleşen tavan tabaka malzemesi yenilmeyecektir. Buna benzer örnekler, yeraltı maden topukları, galerileri, tüneller, büyük yeraltı boşlukları, yeraltı depoları, yerüstü şevler gibi kaya mühendislik çalışmalarının tümünde verilebilir.

5.3. TEB koşulunda pekleşme davranışına dayalı kritik eşik $E_i(t)$ değerlerinin belirlenmesi

Bu bölümde gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled, Grup1) deney olarak tanımlanan deneylerden elde edilen yenilme öncesi ve yenilme sonrası elastik modül (E_i ve E_d) sonuçları ve bunlara bağlı elde edilen pekleşmeye dayalı kritik eşik $E_i(t)$ sonuçları sunulacaktır. İkinci deney tipi olan sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep, Grup2) deneylerinden yenilme öncesi ve yenilme sonrası elastik modül (E_i ve E_d) değerleri ve bunlara bağlı pekleşmeye dayalı kritik eşik $E_i(t)$ değerleri örnekler üzerinde sabit tek bir gerilme değeri etkin olduğundan hesaplanamamıştır.

5.3.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1)

5.3.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı olarak hazırlanan $\varepsilon'/\sigma' - \sigma_c'$ davranış grafikleri ayrıntılı bir şekilde Bölüm 5'te 5.1 alt başlığında sunulmuştur. Bu grafiklerin içerisinde pekleşmeye dayalı aranan kritik

gerilme değerinin ($\sigma_c(t)$) hesaplamalarında kullanılacak eşitlikler sunulmuştur. Bu eşitlikler aşağıdaki çizelgede topluca bir araya getirilmiştir.

Çizelge 5.23. DKM/ Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 5, alt başlık 5.1).

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Geliştirilen Matematiksel Model $\sigma_c' = a + b * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / c]$ (Eşitlik 5.1)				Grafik
		İstatiksel Katsayı "a"	İstatiksel Katsayı "b"	İstatiksel Katsayı "c"	R^2	
DKM-1 (Tüf)	0-20	4.196	23.649	0.0003	0.621	Şekil 5.1 (a)
DKM-2 (Andezit)	20-40	10.596	17.793	0.0007	0.372	Şekil 5.1 (b)
DKM-3 (Traverten)	40-60	43.484	422.707	0.000015	0.732	Şekil 5.1 (c)
DKM-4 (Mermer)	60-80	54.46	247.312	0.00001	0.700	Şekil 5.1 (d)
DKM-5 (Bazalt)	80-100	61.643	244.015	0.00003	0.654	Şekil 5.1 (e)

Bu tez çalışması ile ortaya konan bu eşitlik (5.1) incelendiğinde aslında eşitliğin ikinci kısmında {b * Exp [(-ε′/σ′) / c]} yer alan exponansiyel ifadede bulunan (ε′/σ′) büyüdükçe ikinci kısım sıfıra yaklaşmaktadır. Sonuç olarak eşitlik sonsuzda sadece $\sigma_c' = a$ olmaktadır. Bu koşul altında belirlenen bu değer, pekleşmeye dayalı aranan kritik gerilme değeri olacaktır ($\sigma_c(t) = \sigma_c' = a$).

Eşitlik 5.1'de geçen (ε′/σ′) ifadesi bölüm 5.1'de anlatıldığı gibi deney sonuçlarından hesaplanan elastik modül (E_i, MPa) değerinin ($1/E_i'$) alınarak belirlenmiş değerler olmuştur. Buradaki amaç servo kontrollü hidrolik preste farklı yükleme hızlarında oluşan her bir 1 MPa'lık gerilme artış etkisinde kaya malzemesinde oluşan birim deformasyon değişimlerini incelemek olmuştur. Bu amaçla yapılan değerlendirmeler sonuç vermiş detayları bölüm 5.1'de verilmiştir.

Bu başlık altında pekleşmeye dayalı kritik elastik modül ($E_i(t)$) değerini bulmak için Eşitlik 5.1 kullanılmıştır. Eşitlikte belirli bir (ε′/σ′) değerinde eşitliğin ($\sigma_c(t) = \sigma_c' = a$) şekline geldiği daha önce belirtilmiştir. Eşitliğin sol tarafına ($\sigma_c(t) = \sigma_c' = a$) değeri yazılarak eşitliğin sağ tarafındaki (ε′/σ′) değeri matematiksel olarak çözülebilecektir. Ancak bu durumda sadeleştirme sürecinde eşitliğin sol tarafı sıfır değerine ulaştığı için denklem çözümsüz bir hal almıştır. Ortaya çıkan çözümsüzlüğü aşmak için eşitliğin sol tarafına ($\sigma_c(t) \geq \sigma_c' = a$) ifadesi konmuştur. Bunun için Eşitlik 5.1'de belirlenen istatiksel katsayı "a" değeri 0.0001 ile toplanarak eşitliği sol tarafına yazılmıştır. Böylece eşitliğin

çözümü mümkün olmuştur. Yukarıda verilen açıklamalar doğrultusunda Çizelge 5.23'te verilen DKM-1 için çözümleme aşamaları aşağıdaki Çizelge 5.24'te verilmiştir.

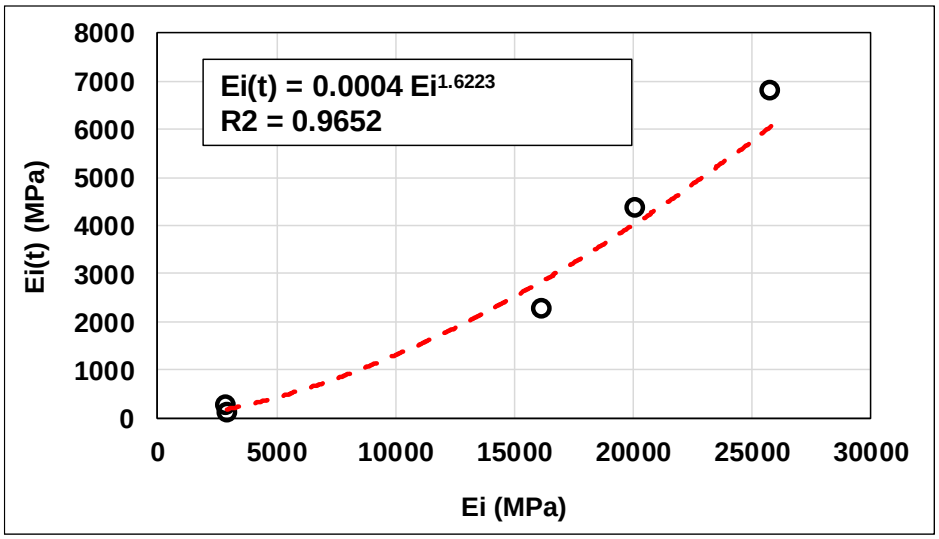
Aşağıda Çizelge 5.24'te verilen 10 aşamada gerçekleştirilen matematiksel çözümleme çalışmaları benzer şekilde DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 için de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.25'te sunulmuştur. Çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.25'te sunulan grafik hazırlanmıştır.

Çizelge 5.24. $E_i(t)$ değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen işlem aşamaları

İşlem Aşaması	Eşitlik	Açıklama
Aşama-0	$\sigma_c' = a + b * \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / c]$	Eşitlik 5.1
Aşama-1	$\sigma_c' = 4.196 + 23.649 * \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / 0.0003]$	İstatistiksel katsayılar ile Eşitlik 5.1, Çizelge 5.23
Aşama-2	$(4.196+0.0001) = 4.196 + 23.649 * \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / 0.0003]$	Eşitliğin sol tarafının düzenlenmesi
Aşama-3	$(4.1961 - 4.196) / 23.649 = \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / 0.0003]$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-4	$0.00000423 = \text{Exp}\,[(-\varepsilon'/\sigma') / 0.0003]$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-5	$\ln (0.00000423) = \ln (e)\,[(-\varepsilon'/\sigma') / 0.0003]$	Ln (e) =1 Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-6	$-12.3733086 = (-\varepsilon'/\sigma') / 0.0003$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-7	$-0.00371199 = (-\varepsilon'/\sigma')$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-8	$0.00371199 = (\varepsilon'/\sigma')$	Her tarafın "-" değerleri sadeleştirilir.
Aşama-9	$[1/0.00371199] = [1/(\varepsilon'/\sigma')]$	Her iki tarafın tersi alınırsa aranan Ei(t) bulunur
Aşama-10	$269.397277 = Ei(t)$	

Çizelge 5.25. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için belirlenen kritik pekleşmeye dayalı oluşan elastik modül ($E_i(t)$) değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	Kritik Pekleşme ile oluşan Elastik Modül
(DKM)	(MPa)	E_i (MPa)	$E_i(t)$ (MPa)
DKM-1	0-20	2876.10	269.39
DKM-2	20-40	2941.46	118.17
DKM-3	40-60	20136.99	4369.57
DKM-4	60-80	25823.13	6793.02
DKM-5	80-100	16200.00	2266.41



Şekil 5.25. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için belirlenen E_i – $E_i(t)$ davranışı

5.3.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Bölüm 5.1 başlığı altında gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı olarak hazırlanan ε'/σ' – σ_c' grafikleri sunulmuştur. Bu grafiklerin içerisinde pekleşmeye dayalı aranan kritik gerilme değerinin ($\sigma_c(t)$) belirlenmesinde kullanılacak eşitlikler sunulmuştur. SPSS programı yardımıyla belirlenen bu eşitlikler topluca aşağıdaki çizelgede tekrar verilmiştir.

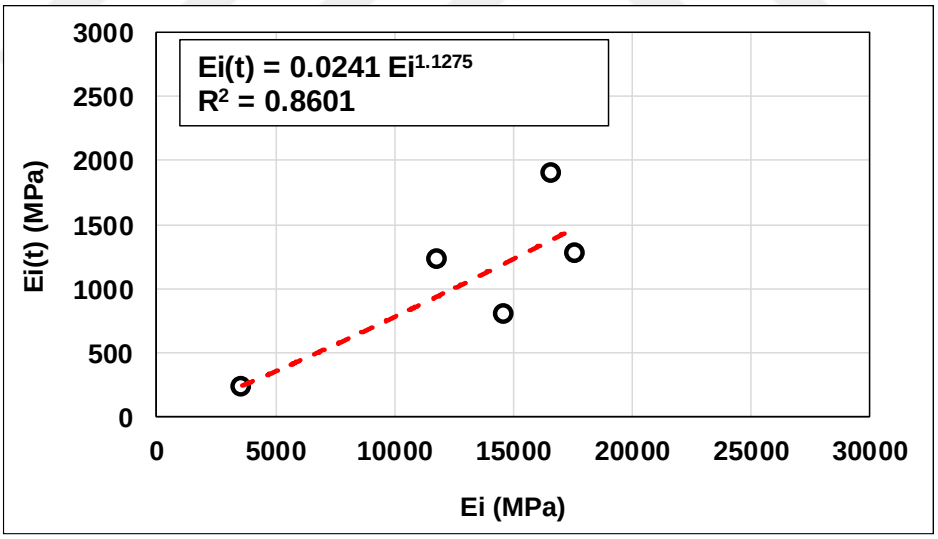
Çizelge 5.26. DKM/ Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 5, alt başlık 5.1)

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Geliştirilen Matematiksel Model $\sigma_c' = a + b * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / c]$ (Eşitlik 5.3)				Grafik
		İstatiksel Katsayı "a"	İstatiksel Katsayı "b"	İstatiksel Katsayı "c"	R^2	
YKM-1	0-20	13.946	18.52	0.00035	0.814	Şekil 5.3 (a)
YKM-2	20-40	31.139	49.348	0.00006	0.742	Şekil 5.3 (b)
YKM-3	40-60	59.989	28.426	0.000042	0.44	Şekil 5.3 (c)
YKM-4	60-80	49.856	105.529	0.000075	0.51	Şekil 5.3 (d)
YKM-5	80-100	74.84	75.378	0.00006	0.49	Şekil 5.3 (e)

Bu başlık altında pekleşmeye dayalı kritik elastik modül ($E_i(t)$) değerini bulmak için Eşitlik 5.3 ve Çizelge 5.26 verileri kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Çizelge 5.24'te sunulan matematiksel işlemler bu bölüm içinde yapılmıştır. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için hesaplanan $E_i(t)$ sonuçları ve grafiksel değerlendirmesi Çizelge 5.27 ve Şekil 5.26'da sunulmuştur.

Çizelge 5.27. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için belirlenen kritik pekleşmeye dayalı oluşan elastik modül ($E_i(t)$) değerleri

Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	Kritik Pekleşme ile oluşan Elastik Modül
(YKM)	(MPa)	E_i (MPa)	$E_i(t)$ (MPa)
YKM-1	0-20	3563.49	235.56
YKM-2	20-40	17632.56	1271.37
YKM-3	40-60	6858.92	1896.02
YKM-4	60-80	14644.48	798.29
YKM-5	80-100	8690.88	1231.57



Şekil 5.26. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için belirlenen E_i – $E_i(t)$ davranışı

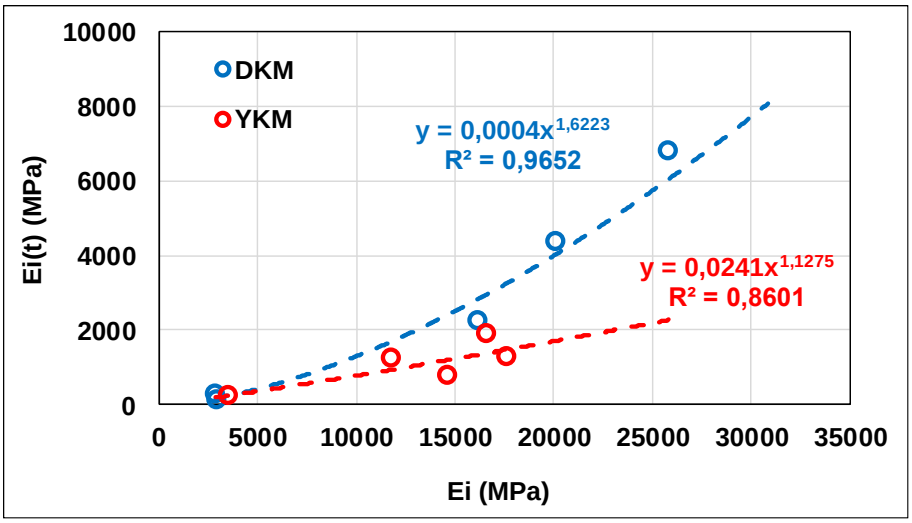
5.3.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1)

Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerilme-hız-kontrollü deneyler ile belirlenen pekleşme

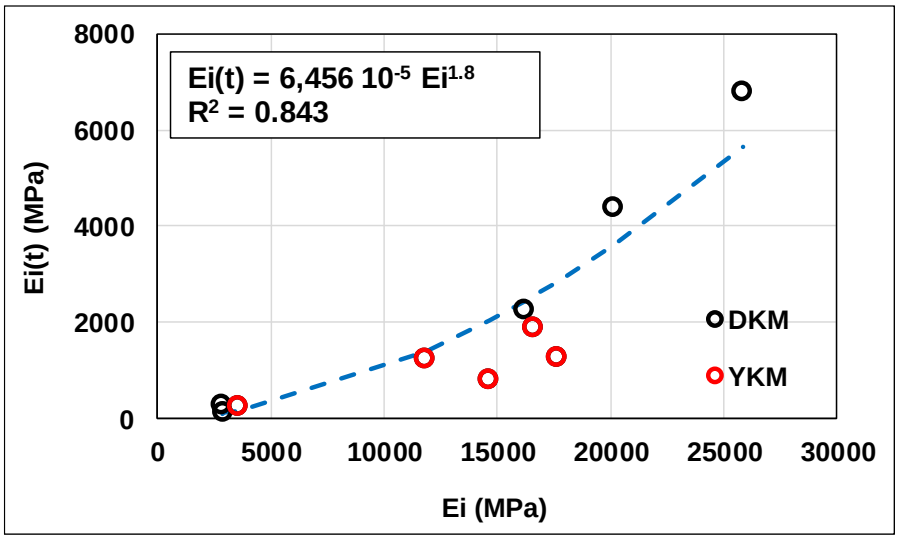
davranışlarına dayalı elastik modül değerleri değerlendirilmiştir. Aynı deney koşullarında gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.25 ve 5.27 verileri birleştirilerek Çizelge 5.28 ve Şekil 5.27 ile Şekil 5.28 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.28. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen E_i ve kritik pekleşmeye dayalı $E_i(t)$ değerleri

Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Elastik Modül	Kritik Pekleşmeye dayalı Elastik Modül
(MPa)	(DKM ve YKM)	E_i (MPa)	$E_i(t)$ (MPa)
0-20	DKM-1	2876.10	269.39
	YKM-1	3563.49	235.56
20-40	DKM-2	2941.46	118.17
	YKM-2	17632.56	1271.37
40-60	DKM-3	20136.99	4369.57
	YKM-3	6858.92	1896.02
60-80	DKM-4	25823.13	6793.02
	YKM-4	14644.48	798.29
80-100	DKM-5	16200.00	2266.41
	YKM-5	8690.88	1231.57



Şekil 5.27. DKM ve YKM için ISRM-E_i ve kritik pekleşmeye dayalı $E_i(t)$ değerleri arasındaki ilişki



Şekil 5.28. DKM ve YKM için toplam on farklı kaya birimine ait ISRM-E_i ve kritik pekleşmeye dayalı $E_i(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.28'de görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda 0.5-1 MPa/s yükleme hız koşulunda gerçekleştirilen elastik modül deney sonuçlarının (E_i), kritik pekleşme eşiğini belirten $E_i(t)$ değerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.28'de belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.23'te verilmiştir.

$$E_i(t) = 0.00006456\ E_i^{1.8} \qquad (R^2=0.843) \qquad (5.23)$$

Burada sabit değerler istatistiksel katsayılardır. Yenilme öncesi ε-σ davranışının eğimi olan elastik modül (E_i) değerinin bilinmesi durumunda Eşitlik 5.23 yardımıyla pekleşmeye dayalı kritik eşik elastik modül $E_i(t)$ belirlenebilir. Kaya malzemesi bu eşik elastik modül (Ei(t)) değerinde sonsuza kadar yenilmeden dayanabilen bir durumda olacaktır.

Basma koşulu altında gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarına (Grup1) göre, örneğin bir yeraltı topuk tasarımında ISRM (1981, 2007) öngörüsü doğrultusunda laboratuvarda belirlenen elastik modül (E_i) değeri eğer arazideki maden topuğunda basma yönünde mevcut arazi gerilmesine dayalı oluşan elastik modül (E) değerinden büyük ise ($E_i > E$) mühendis topuğun güvenli olduğunu varsayacaktır. Eğer topukta oluşan elastik modül değeri (E), laboratuvarda bulunan E_i değerine eşit veya büyükse ise ($E \geq E_i$) bu durumda ise mühendis, topuğun yenileceğini ve duraylılığını yitireceğini düşünerek önlem almaya alışacaktır. Ancak bu araştırma sonunda ortaya konan yaklaşıma göre topuk malzemesi üzerinde oluşan elastik modül $E \geq E_i$ koşulunda iken topuk hemen

yenilirken aslında $E_i(t) \leq E \leq E_i$ koşulunda bile pekleşme sonucunda topuk malzemesinin yenilmesi muhakkak olacak ve duraylılık bozulacaktır. Mühendisler bu süreçte güvende olduklarını düşünürken aslında duraysızlık problemi ile yüz yüze kalacaktır. Sonuç olarak yeraltı maden ocağında can ve mal kayıpları yaşanabilecektir. Örnekte verilen topuğun en güvenli olduğu durum ise aslında $E \leq E_i(t)$ koşulu olacaktır.

Örneğin 700 m (H) derinde bulunan bir yeraltı kömür madeninde kömür topuk malzemesinin ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda laboratuvarda tek eksenli deformabilite deneyi sonunda E_i değerinin 20000 MPa olduğu kabul edilsin. Şekil 5.28'de belirtilen ve Eşitlik 5.23'te ifade edilen yaklaşıma göre bu çalışma ile tasarım mühendislerine önerilen kritik eşik pekleşme $E_i(t)$ değeri 3563 MPa olacaktır. 700 m (H) derinde bulunan topuk üzerine oluşan düşey gerilmeye dayalı olarak oluşan elastik modül değerinin yaklaşık E = 10000 MPa olduğu varsayılsın. Tasarım çalışmalarında topuk için E_i değerinin 20000 MPa olduğu düşünülürse sahada oluşan elastik durum için değerlendirme E = 10000 MPa < E_i = 20000 MPa şeklinde olacak ve bu durumda topuk yenilmez duraylıdır hükmü verilecektir. Ancak $E_i(t)$ = 3563 MPa < E = 10000 MPa < E_i = 20000 MPa koşulunda bile malzeme hemen yenilmese de pekleşme davranışı sergileyecek ve yine de zaman içerisinde yenilecektir. Sonuç olarak tasarım çalışmalarında $E_i(t)$=3563 MPa dikkate alınırsa bu değerin üzerinde söz konusu olacak arazi gerilmelerine dayalı topuğun elastik modül değerinde (E) bile topuk malzemesi pekleşme sürecini yaşayacak ve durumun farkında olan mühendislerin önlem almasına zaman açısından fırsat verecektir. Aksi takdirde tasarımda E_i = 20000 MPa değeri dikkate alınırsa topuk malzemesinde pekleşmeye dayalı yenilme ortaya çıkınca mühendisler büyük bir süpriz ile karşılaştıklarını sanacaklardır. Sonuç olarak üretimde aksamalar yanında can ve mal kayıpları oluşabilecektir. Buna benzer örnekler, yeraltı maden galerileri, tüneller, büyük yeraltı boşlukları, yeraltı depoları, yerüstü şevler gibi kaya mühendislik çalışmalarının tümünde ifade edilebilir.

5.3.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalarda örnekler üzerine uygulanan gerilme değerleri sabit olduğu için bir başka ifade ile sünme deneyleri olduğu için elastik modül değerinin yenilme öncesi ve sonrasında belirlenmesi mümkün olmamıştır.

5.4. DÇ koşulunda pekleşme davranışına dayalı kritik eşik $E_i(t)$ değerlerinin belirlenmesi

Bu bölümde gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled, Grup1) deney olarak tanımlanan deneylerden elde edilen yenilme öncesi elastik modül (E_i) sonuçları ile bunlara bağlı elde edilen pekleşmeye dayalı kritik eşik $E_i(t)$ sonuçları verilmiştir. Bu tür deneylerde yenilme sonrası elastik modül değerleri (Ed) belirlenememiştir. Bunun yanında bu araştırmada ikinci deney tipi olan sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep, Grup2) deneylerinden benzer sonuçlar (E_i, Ei(t)) örnekler üzerinde sabit tek bir dolaylı çekme gerilme değeri etkin olduğundan belirlenememiştir.

5.4.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1)

5.4.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı olarak hazırlanan $\varepsilon'/\sigma' - \sigma_{tB}'$ davranış grafikleri ayrıntılı bir şekilde Bölüm 5'te 5.2 alt başlığında sunulmuştur. Bu grafiklerin içerisinde pekleşmeye dayalı aranan kritik gerilme değerinin ($\sigma_{tB}(t)$) hesaplamalarında kullanılacak eşitlikler sunulmuştur. Bu eşitlikler aşağıdaki çizelgede topluca bir araya getirilmiştir.

Çizelge 5.29. DKM/ Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 5, alt başlık 5.2)

Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Geliştirilen Matematiksel Model $\sigma_{tB}' = a + b * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / c]$ (Eşitlik 5.12)				Grafik
		İstatiksel Katsayı "a"	İstatiksel Katsayı "b"	İstatiksel Katsayı "c"	R^2	
DKM-1 (Tüf)	0-20	1.212	2.35	0.004	0.581	Şekil 5.13 (a)
DKM-2 (Andezit)	20-40	0.586	13.698	0.0015	0.897	Şekil 5.13 (b)
DKM-3 (Traverten)	40-60	4.657	19.105	0.0005	0.799	Şekil 5.13 (c)
DKM-4 (Mermer)	60-80	2.935	13.21	0.001	0.895	Şekil 5.13 (d)
DKM-5 (Bazalt)	80-100	10.923	10.935	0.0004	0.36	Şekil 5.13 (e)

Bu tez çalışması ile ortaya konan bu eşitlik (Eşitlik 5.12) incelendiğinde aslında eşitliğin ikinci kısmında {b * Exp [(-ε′/σ′) / c]} yer alan exponansiyel ifadede bulunan (ε′/σ′) büyüdükçe ikinci kısım sıfıra yakınsamaktadır. Sonuç olarak eşitlik sonsuzda sadece $\sigma_{tB}' = a$ olmaktadır. Bu durumda belirlenen bu değer, aslında pekleşmeye dayalı aranan kritik çekme gerilme değeri olacaktır ($\sigma_{tB}(t) = \sigma_{tB}' = a$).

Eşitlik 5.12'de geçen (ε′/σ′) ifadesi bölüm 5.2'de anlatıldığı gibi dolaylı çekme deney sonuçlarından hesaplanan elastik modül (E_i', MPa) değerinin tersi alınarak ($1/E_i'$) belirlenen değer olmuştur. Servo kontrollü hidrolik preste farklı yükleme hızlarında oluşan her bir 1 MPa'lık dolaylı çekme gerilmesindeki artış etkisinde kalan kaya malzemesinde oluşan çekme birim deformasyon davranışlarını incelemek için elastik modül değerlerinin tersi ($1/E_i' = \varepsilon'/\sigma'$) dikkate alınmıştır. Bu amaçla yapılan değerlendirme detayları bölüm 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.30. $E_i(t)$ değerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen işlem aşamaları

İşlem Aşaması	Eşitlik	Açıklama
Aşama-0	$\sigma_{tB}' = a + b * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / c]$	Eşitlik 5.12
Aşama-1	$\sigma_{tB}' = 1.212 + 2.35 * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / 0.004]$	İstatistiksel katsayılar ile Eşitlik 5.1, Çizelge 5.23
Aşama-2	$(1.212+0.0001) = 1.212 + 2.35 * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / 0.004]$	Eşitliğin sol tarafının düzenlenmesi
Aşama-3	$(1.2121 – 1.212) /2.35 = Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / 0.004]$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-4	$0.0000425 = Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / 0.004]$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-5	$\ln (0.00004255) = \ln (e) [(-\varepsilon'/\sigma') / 0.004]$	Ln (e) =1 Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-6	$-10.0648307 = (-\varepsilon'/\sigma') / 0.004$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-7	$-0.04025932 = (-\varepsilon'/\sigma')$	Eşitlikte sadeleştirme
Aşama-8	$0.04025932 = (\varepsilon'/\sigma')$	Her tarafın "-" değerleri sadeleştirilir.
Aşama-9	$[1/0.04025932] = [1/(\varepsilon'/\sigma')]$	Her iki tarafın tersi alınırsa aranan Ei(t) bulunur
Aşama-10	$24.83896723 = Ei(t)$	

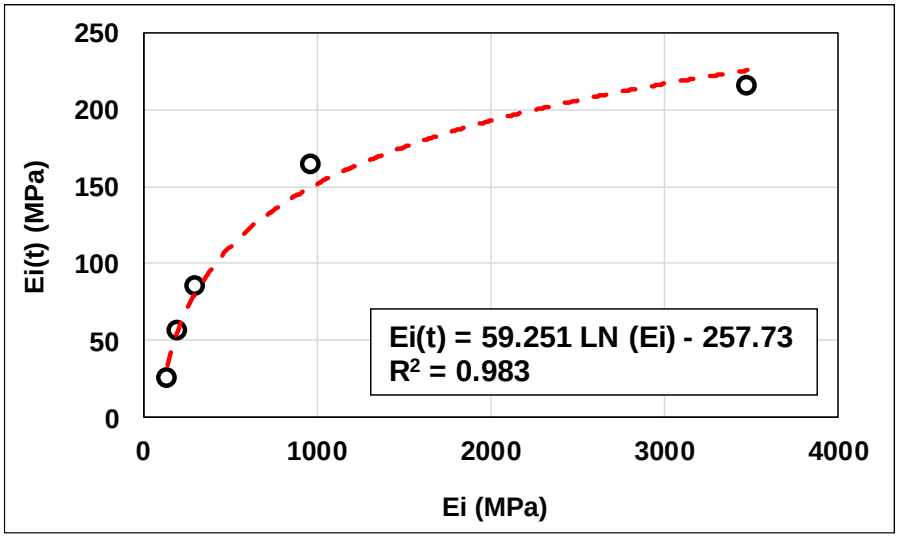
Bu başlık altında pekleşmeye dayalı kritik elastik modül ($E_i(t)$) değerini bulmak için Eşitlik 5.12 kullanılmıştır. Eşitlikte belirli bir (ε'/σ') değerinde eşitliğin ($\sigma_{tB}(t) = \sigma_{tB}' = a$) şekline geldiği daha önce belirtilmiştir. Eşitliğin sol tarafına ($\sigma_{tB}(t) = \sigma_{tB}' = a$) değeri yazılarak eşitliğin sağ tarafındaki (ε'/σ') değeri matematiksel olarak çözülebilecektir. Ancak bu durumda sadeleştirme sürecinde eşitliğin sol tarafı sıfır değerine ulaştığı için

denklem çözümsüz bir hal almıştır. Ortaya çıkan çözümsüzlüğü aşmak için eşitliğin sol tarafına ($\sigma_{tB}(t) \geq \sigma_{tB}' = a$) ifadesi konmuştur. Bunun için Eşitlik 5.12'de belirlenen istatiksel katsayı "a" değerine 0.0001 eklenerek eşitliği sol tarafına yazılmıştır. Böylece eşitliğin çözümü mümkün olmuştur. Yukarıda anlatılan açıklamalar tipik bir örnek çözüm için DKM-1 örneğine ait eşitlik üzerinde uyulanmış ve Çizelge 5.30 hazırlanmıştır.

Çizelge 5.30'da belirtilen 10 aşamada gerçekleştirilen matematiksel çözümleme çalışmaları benzer şekilde DKM-2, DKM-3, DKM-4 ve DKM-5 için de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.31'de sunulmuştur. Çizelgede sunulan verilere dayalı olarak Şekil 5.29'da sunulan grafik hazırlanmıştır.

Çizelge 5.31. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için belirlenen kritik pekleşmeye dayalı oluşan elastik modül ($E_i(t)$) değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (200 N/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	Kritik Pekleşme ile oluşan Elastik Modül
(DKM)	(MPa)	E_i (MPa)	$E_i(t)$ (MPa)
DKM-1	0-20	138.02	24.84
DKM-2	20-40	198.43	56.67
DKM-3	40-60	968.42	164.47
DKM-4	60-80	303.43	84.81
DKM-5	80-100	3479.45	215.47



Şekil 5.29. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için belirlenen E_i – $E_i(t)$ davranışı

5.4.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Bölüm 5.2 başlığı altında gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı olarak hazırlanan ε'/σ' – σ_{tB}' grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerin içerisinde ayrıca pekleşmeye dayalı aranan kritik çekme gerilme değerinin ($\sigma_{tB}(t)$) hesaplamalarında kullanılacak eşitlikler sunulmuştur. SPSS programı yardımıyla belirlenen bu eşitlikler topluca aşağıdaki Çizelge 5.32'de tekrar verilmiştir.

Çizelge 5.32. DKM/ Grup1'ait gerilme-hız-kontrollü deney sonuçları (Bölüm 5, alt başlık 5.2)

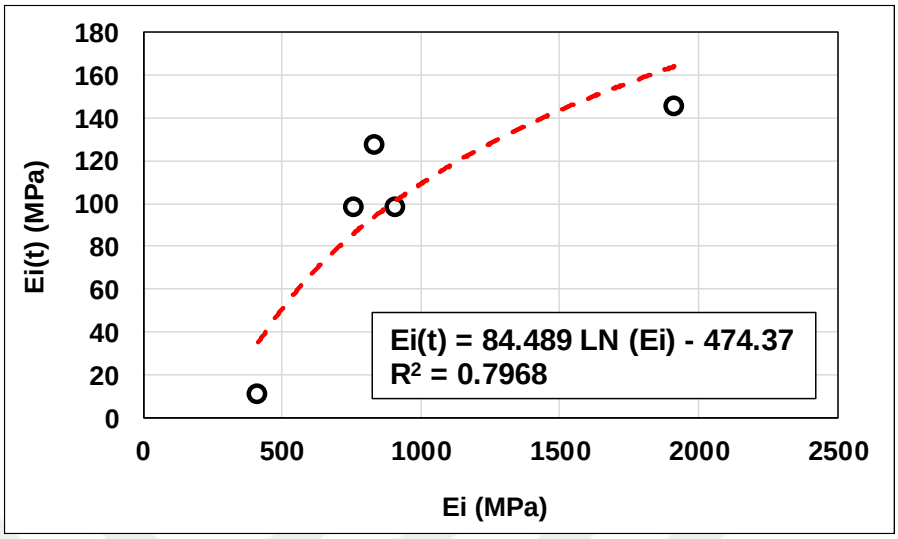
Model Kaya Malzemesi	Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Geliştirilen Matematiksel Model $\sigma_{tB}' = a + b * Exp [(-\varepsilon'/\sigma') / c]$ (Eşitlik 5.14)				Grafik
		İstatiksel Katsayı "a"	İstatiksel Katsayı "b"	İstatiksel Katsayı "c"	R^2	
YKM-1	0-20	1.333	1.009	0.01	0.531	Şekil 5.15 (a)
YKM-2	20-40	1.296	8.022	0.0009	0.62	Şekil 5.15 (b)
YKM-3	40-60	2.7	7.604	0.0007	0.897	Şekil 5.15 (c)
YKM-4	60-80	2.523	9.412	0.0006	0.701	Şekil 5.15 (d)
YKM-5	80-100	4.252	2.255	0.001	0.41	Şekil 5.15 (e)

Çizelge 5.33. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için belirlenen kritik pekleşmeye dayalı oluşan elastik modül ($E_i(t)$) değerleri

Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	Kritik Pekleşme ile oluşan Elastik Modül
(YKM)	(MPa)	E_i (MPa)	$E_i(t)$ (MPa)
YKM-1	0-20	414.38	10.85
YKM-2	20-40	762.09	98.39
YKM-3	40-60	834.83	127.11
YKM-4	60-80	1915.38	145.53
YKM-5	80-100	907.97	98.54

Bu başlık altında pekleşmeye dayalı kritik elastik modül ($E_i(t)$) değerini bulmak için Eşitlik 5.14 ve Çizelge 5.32 verileri kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Çizelge 5.30'da sunulan matematiksel işlemler benzer şekilde bu bölüm için de yapılmıştır.

Yapay kaya malzemeleri (YKM) için hesaplanan $E_i(t)$ sonuçları ve grafiksel değerlendirmesi Çizelge 5.33 ve Şekil 5.30'da sunulmuştur.



Şekil 5.30. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için belirlenen E_i – $E_i(t)$ davranışı

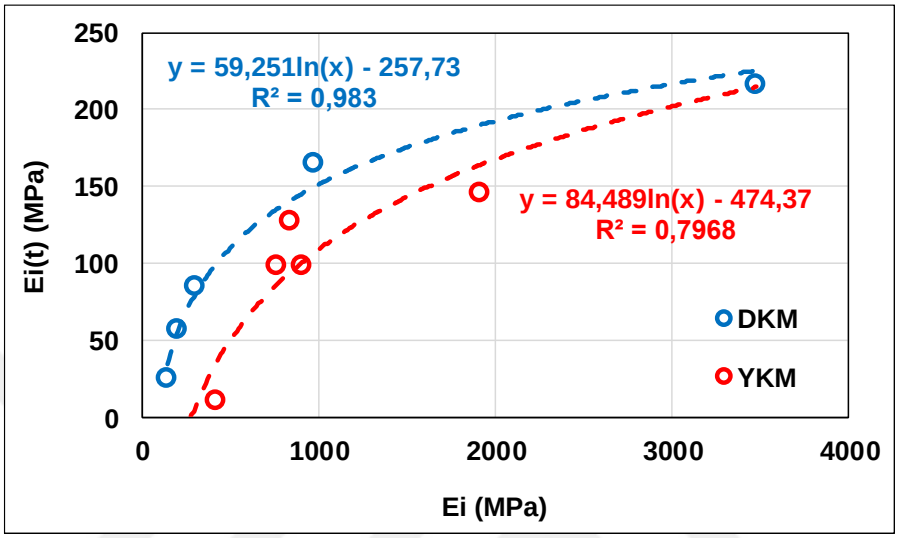
5.4.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1)

Çizelge 5.34. ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda DKM ve YKM için belirlenen E_i ve kritik pekleşmeye dayalı $E_i(t)$ değerleri

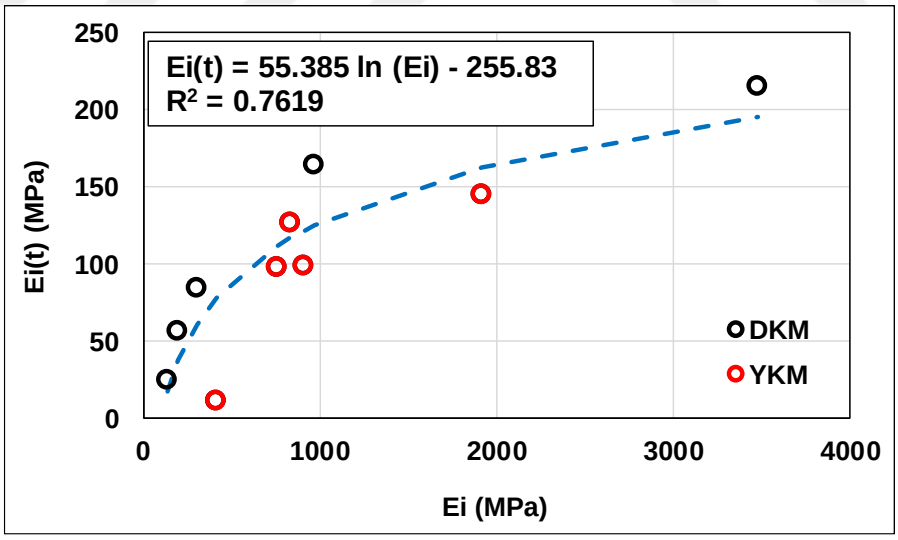
Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Belirlenen Elastik Modül	Kritik Pekleşmeye dayalı Elastik Modül
(MPa)	(DKM ve YKM)	E_i (MPa)	$E_i(t)$ (MPa)
0-20	DKM-1	138.02	24.84
	YKM-1	414.38	10.85
20-40	DKM-2	198.43	56.37
	YKM-2	762.09	98.39
40-60	DKM-3	968.42	164.47
	YKM-3	834.83	127.11
60-80	DKM-4	303.43	84.81
	YKM-4	1915.38	145.53
80-100	DKM-5	3479.45	215.47
	YKM-5	907.97	98.54

Farklı dayanımlara sahip doğal kaya malzemeleri (DKM) ve yapay kaya malzemeleri (YKM) üzerinde gerilme-hız-kontrollü deneyler ile belirlenen pekleşme

davranışlarına dayalı elastik modül değerleri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Aynı deney koşullarında gerçekleştirilen her iki örnek grubu DKM ve YKM deney sonuçlarının hep birlikte değerlendirilmesi için Çizelge 5.31 ve 5.33 verileri birleştirilerek Çizelge 5.34 ve Şekil 5.31 hazırlanmıştır. Daha sonra DKM ve YKM verileri birleştirilerek Ei - Ei(t) davranışı genelleştirilmiştir (Şekil 5.32).



Şekil 5.31. DKM ve YKM için ISRM-E_i ve kritik pekleşmeye dayalı $E_i(t)$ değerleri arasındaki ilişki



Şekil 5.32. DKM ve YKM için toplam on farklı kaya birimine ait ISRM-E_i ve kritik pekleşmeye dayalı $E_i(t)$ değerleri arasındaki ilişki

Şekil 5.32'de görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda 200N/s yükleme hız koşulunda gerçekleştirilen elastik modül deney sonuçlarının (E_i), kritik

pekleşme eşiğini belirten $E_i(t)$ değerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.32'de belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.24'te verilmiştir.

$$E_i(t) = 55.385 \text{ LN } (E_i) - 255.83 \qquad (R^2=0.762) \qquad (5.24)$$

Burada sabit katsayılar istatistiksel analizler yardımıyla bulunan değerlerdir. ISRM (2007) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilen dolaylı çekme deneyinde yenilme öncesi E_i elastik modül değerinin bilinmesi durumunda Eşitlik 5.24 yardımıyla pekleşmeye dayalı kritik eşik elastik modül $E_i(t)$ değeri hesaplanabilir. Kaya malzemesi bu eşik elastik modül (Ei(t)) değerinde sonsuza kadar yenilmeden dayanabilen bir durumda olacaktır.

Dolaylı çekme koşulu altında gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarına (Grup1) göre, örneğin bir yeraltı açıklık tasarımında ISRM (1981, 2007) öngörüsü doğrultusunda gerçekleştirilen dolaylı çekme dayanımı deneyinden belirlenen elastik modül (E_i) değeri eğer arazide çekme yönünde oluşan gerilmelere bağlı oluşan elastik modül (E) değerlerinden büyük ise ($E_i > E$) mühendis yeraltı açıklığının güvenli olduğunu varsayacaktır. Eğer arazi gerilme değeri E_i değerine eşit veya büyükse ise ($E \geq E_i$) bu durumda mühendis açıklığın çekme gerilmesi altında yenileceğini, duraylılığını yitireceğini düşünecek ve önlem almaya çalışacaktır. Ancak bu çalışma sonunda ortaya konan yaklaşıma göre açıklık etrafındaki kaya malzemesi üzerindeki çekme gerilmesine dayalı elastik modül $E \geq E_i$ koşulunda iken topukta duraysızlık hemen gözlenirken aslında $E_i(t) \leq E \leq E_i$ koşulunda bile pekleşme sonucunda açıklık etrafındaki kaya malzemesinde yenilme muhakkak olacak ve duraylılık bozulacaktır. Mühendisler bu süreçte güvende olduklarını düşünürken aslında duraysızlık problemi ile karşılaşacaklardır. Bu sonuç yeraltı maden ocağında can ve mal kayıplarına neden olabilecek önemli bir sorun olacaktır. Örnekte verilen açıklığın en güvenli olduğu durum aslında $E \leq E_i(t)$ koşulu olacaktır.

Örneğin 700 m (H) derinde bulunan bir yeraltı kömür madeninde mevcut galeri açıklığı üzerinde bulunan tavan tabakalarının sarktığını ve böylece tabakaların bükülen dış kısımlarında çekme gerilmelerine dayalı elastik modül değerinin (E) 500 MPa olduğu kabul edilsin. Burada karşılaşılan kaya biriminin ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda laboratuvarda gerçekleştirilen dolaylı çekme gerilmesi altında oluşan elastik modül değerinin ise (E_i) 1000 MPa olduğu varsayılsın. Şekil 5.32'de belirtilen ve Eşitlik 5.24'te ifade edilen yaklaşıma göre bu çalışma ile tasarım mühendislerine önerilen

çekme gerilmesine dayalı kritik eşik pekleşme $E_i(t)$ değeri 126.76 MPa olacaktır. Tasarım çalışmalarında tavan tabaka kaya malzemesi için E_i değerinin 1000 MPa olduğu düşünülürse sahada oluşan elastik durum için değerlendirme E = 500 MPa < E_i = 1000 MPa şeklinde olacak ve bu durumda açıklık duraylıdır hükmü verilecektir. Ancak $E_i(t)$ = 126.76 MPa < E = 500 MPa < E_i = 1000 MPa koşulunda bile malzeme hemen yenilmese de pekleşme davranışı sergileyecek ve yine de zaman içerisinde yenilecektir. Sonuç olarak tasarım çalışmalarında $E_i(t)$=126.76 MPa dikkate alınırsa bu değerin üzerinde söz konusu olacak arazi gerilmelerine dayalı açıklık tavanındaki tabakaların elastik modül değerinde (E) bile açıklık tavan tabaka malzemesi pekleşme sürecini yaşayacak ve durumun farkında olan mühendislerin önlem almasına zaman açısından fırsat verecektir. Aksi takdirde tasarımda E_i = 1000 MPa değeri dikkate alınırsa topuk malzemesinde pekleşmeye dayalı yenilme ortaya çıkınca mühendisler büyük bir sürpriz ile karşılaştıklarını sanacaklardır. Sonuç olarak üretimde aksamalar yanında can ve mal kayıpları oluşabilecektir. Buna benzer örnekler, yeraltı maden galerileri, tüneller, büyük yeraltı boşlukları, yeraltı depoları, yerüstü şevler gibi kaya mühendislik çalışmalarının tümünde ifade edilebilir.

5.4.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalarda örnekler üzerine uygulanan gerilme değerleri sabit olduğu için yenilme öncesi ve sonrasında elastik modül değerinin (E_i ve E_d) belirlenmesi mümkün olmamıştır.

5.5. TEB koşulunda yenilme sonrası elastik modül E_d değerinin belirlenmesi

Bu tez çalışmasında gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled, Grup1) deney olarak tanımlanan deneylerden elde edilen yenilme öncesi ve yenilme sonrası elastik modül (E_i ve E_d) sonuçları belirlenmiştir. Yenilme öncesi elastik modül değerleri ile yenilme sonrası elastik modül sonuçları arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu araştırmada kullanılan ikinci deney türü olan sabit-gerilme-kontrollü-sünme (constant-stress-controlled-creep, Grup2) deneylerinden benzer şekilde E_i ve E_d verileri elde edilememiştir. Bu ikinci tür deneylerde (sünme) örnekler üzerinde sabit basma gerilme değeri uygulanmıştır. Bu bölümde dikkate alınan deneysel veriler, sadece ISRM (2007)

tarafından önerilen 0.5-1 MPa/s yükleme hız sınır aralığından seçilen 0.75 MPa/s yükleme hız koşulunda gerçekleştirilen deney sonuçlarıdır.

5.5.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1)

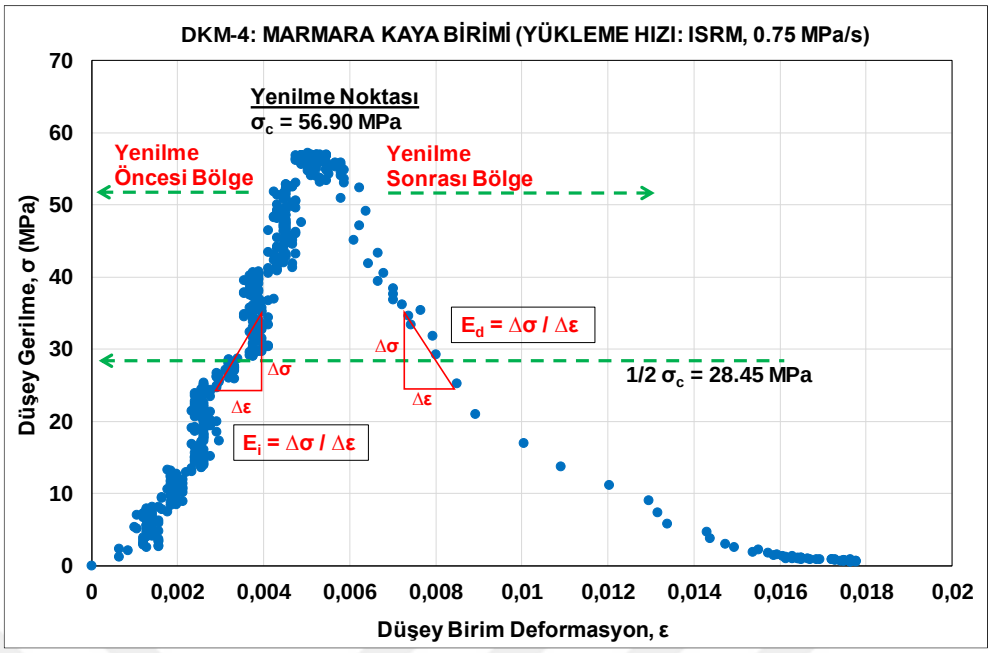
5.5.1.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı olarak hazırlanan $\varepsilon' - \sigma'$ grafikleri yardımıyla yenilme öncesi ve sonrasına ait elastik modül değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmaya ait tipik bir örnek DKM-4 mermer model kaya birimi için Şekil 5.33'te sunulmuştur. Benzer şekilde yapılan çalışmalar ile tek eksenli basma (TEB) koşulu altında ISRM (2007) tarafından önerilen yükleme hızı 0.5-1 MPa/s aralığından seçilen 0.75 MPa/s için gerçekleştirilen deformabilite deney sonuçları burada dikkate alınmıştır. Elastik modül değerlerinin grafik üzerinden belirlenmesinde teğetsel (tanjant) elastik modül yöntemi dikkate alınmıştır. DKM örnekleri için gerçekleştirilen deformabilite deney sonuçlarından elde edilen yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerleri Çizelge 5.35'te sunulmuştur. Ayrıca bu çizelge verileri ile Şekil 5.34'te sunulan grafik hazırlanmıştır.

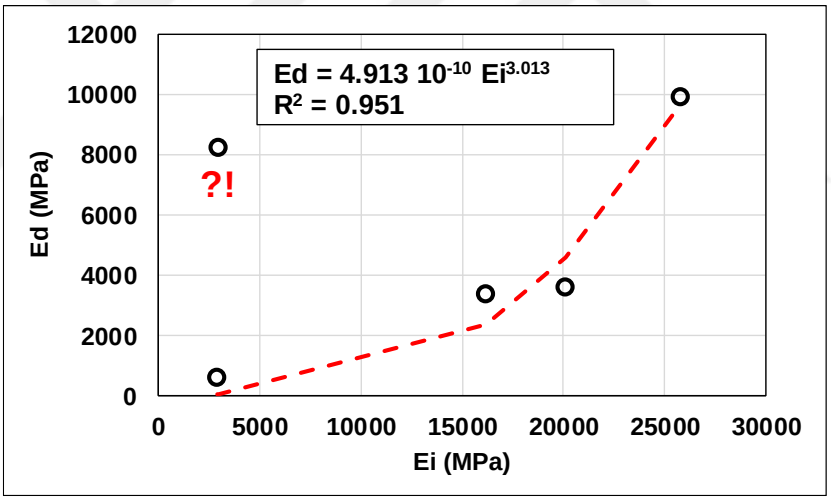
Yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerleri (E_i ve E_d) arasında üçüncü dereceden parabolik bir davranış olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.34). Ancak bu davranışa DMK-2 kaya biriminin uyum sağlamadığı anlaşılmıştır (Şekil 5.34 ve Çizelge 5.35). Bu kaya birimine ait deneyin tekrarlanmasına karar verilmiştir. İstatistiksel model, bu değerin ihmal edilmesi ile $R^2 = 0.95$ mertebesinde ortaya çıkmıştır.

Çizelge 5.35. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için belirlenen E_i ve E_d elastik modül değerleri

Doğal Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme Sonrasında Belirlenen Elastik Modül
(DKM)	(MPa)	E_i (MPa)	E_d (MPa)
DKM-1	0-20	2876.1	594.75
DKM-2	20-40	2941.46	8223.53
DKM-3	40-60	20137.0	3594.34
DKM-4	60-80	25823.1	9894.15
DKM-5	80-100	16200.0	3345.72



Şekil 5.33. TEB koşulunda belirlenen yenilme öncesi ve sonrası elastik modül (E_i ve E_d) değerlerinin belirlenmesine ait tipik bir grafik

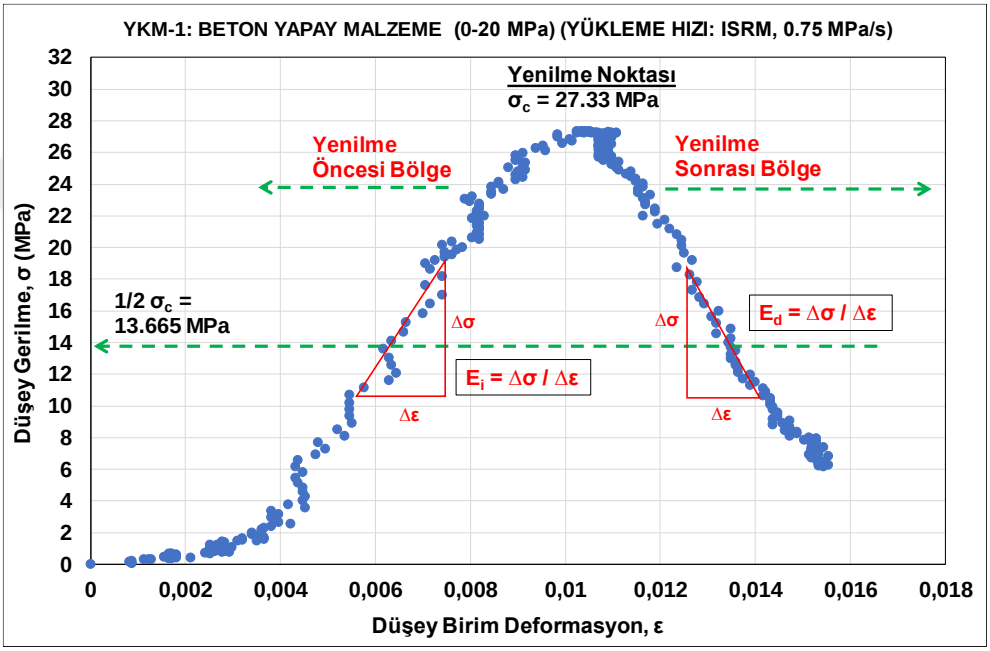


Şekil 5.34. Doğal kaya malzemeleri (DKM) için belirlenen E_i – E_d davranışı (Değerlendirmede "?!" işaretli veri dikkate alınmamıştır)

5.5.1.2. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirme (Grup1)

Yapay kaya malzemeleri (YKM) için Grup1 ve gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) deney olarak tanımlanan deney sonuçlarına dayalı olarak elde edilen ε′ – σ′ grafikleri yenilme öncesi ve sonrası elastik modül (E_i ve E_d) değerlerinin belirlenmesinde

kullanılmıştır. Bu çalışmaya ait tipik bir örnek YKM-1 beton yapay model için Şekil 5.35'te sunulmuştur. Bu bölümde verilen değerlendirmede, tek eksenli basma (TEB) koşulu altında ISRM (2007) tarafından önerilen yükleme hızı 0.5-1 MPa/s aralığından seçilen 0.75 MPa/s için gerçekleştirilen deformabilite deney sonuçları dikkate alınmıştır. Elastik modül değerlerinin grafik üzerinden belirlenmesinde teğetsel (tanjant) elastik modül yöntemi kullanılmıştır. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için elde edilen deney sonuçları Çizelge 5.36'da verilmiştir. Bununla birlikte çizelgede sunulan veriler yardımıyla Şekil 5.36'da sunulan grafik hazırlanmıştır.

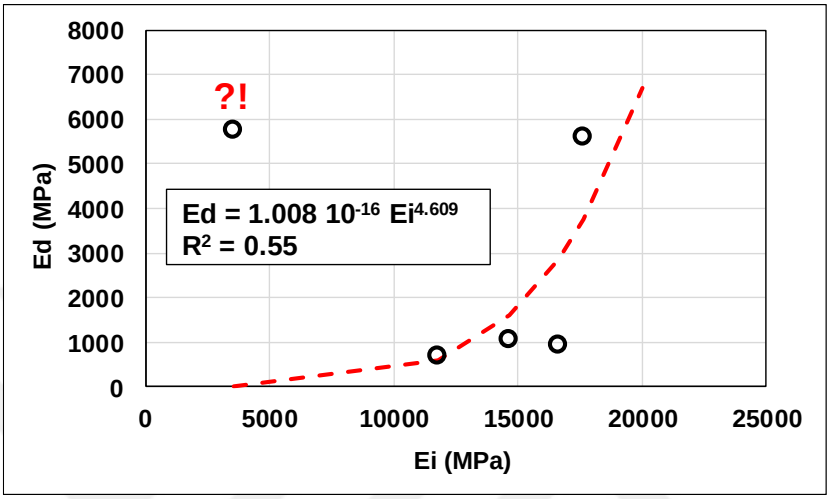


Şekil 5.35. TEB koşulunda belirlenen yenilme öncesi ve sonrası elastik modül (E_i ve E_d) değerlerinin belirlenmesine ait tipik bir grafik

Çizelge 5.36. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için belirlenen E_i ve E_d elastik modül değerleri

Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme Sonrasında Belirlenen Elastik Modül
(DKM)	(MPa)	E_i (MPa)	E_d (MPa)
YKM-1	0-20	3563.49	5751.52
YKM-2	20-40	17632.56	5593.76
YKM-3	40-60	16620.04	927.26
YKM-4	60-80	14644.48	1063.36
YKM-5	80-100	11811.54	689.64

Yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerleri (E_i ve E_d) arasında dördüncü dereceden parabolik bir davranış olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.36). Ancak bu davranışa YMK-1 yapay kaya biriminin uyum sağlamadığı anlaşılmıştır (Şekil 5.36 ve Çizelge 5.36). Bu kaya birimine ait deneyin tekrarlanmasına karar verilmiştir. İstatistiksel modelin başarısı, bu değerin ihmal edilmesi ile $R^2 = 0.55$ mertebesinde belirlenmiştir.



Şekil 5.36. Yapay kaya malzemeleri (YKM) için belirlenen E_i – E_d davranışı (Değerlendirmede "?!" işaretli veri dikkate alınmamıştır.)

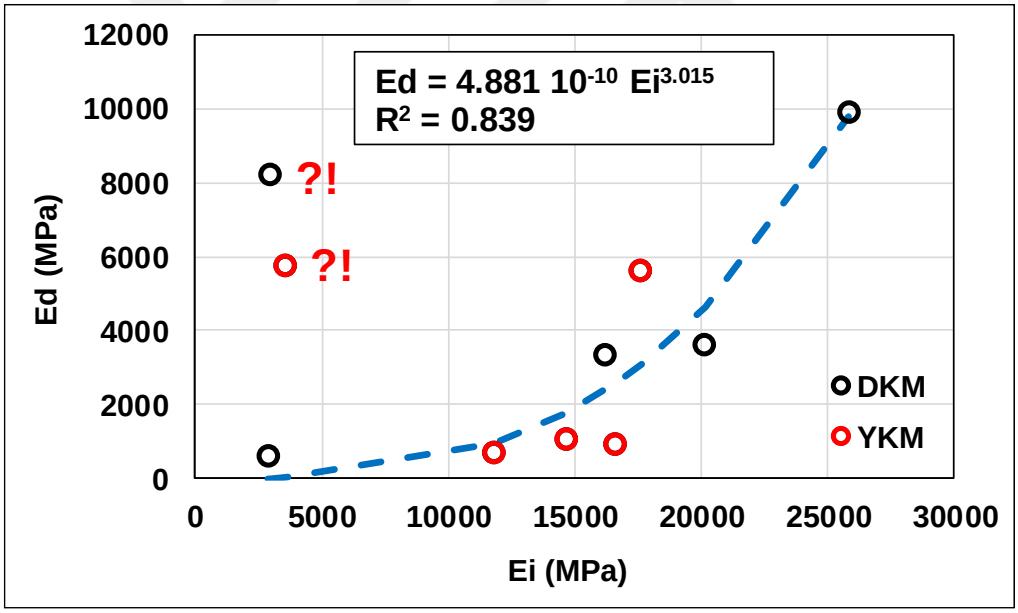
5.5.1.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup1)

Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için Grup1 ve gerilme-hız-kontrollü (stress-rate-controlled) deney olarak tanımlanan deney sonuçları ile $\varepsilon' - \sigma'$ davranışlarına ait grafiklerin hazırlanması ve yenilme öncesi ile yenilme sonrası elastik modül (Ei ve Ed) değerlerinin belirlenme yöntemi yukarıda sunulan iki bölümde verilmiştir (bölüm 5.5.1.1 ve bölüm 5.5.1.2). Tipik birer örnek olarak verilen Şekil 5.33 ve Şekil 5.35'te sunulan grafiklerdeki gibi yenilme öncesi ve sonrası teğetsel (tanjant) elastik modül (E_i ve E_d) değerleri tüm birimler için belirlenmiştir (Çizelge 5.35 ve Çizelge 5.36).

Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için elde edilen deney sonuçları topluca Çizelge 5.37'de grafiksel sunumu ise Şekil 5.37'de verilmiştir.

Çizelge 5.37 DKM ve YKM için belirlenen E_i ve E_d elastik modül değerleri

Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme öncesinde Belirlenen Elastik Modül	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme Sonrasında Belirlenen Elastik Modül
(MPa)	(DKM ve YKM)	E_i (MPa)	E_d (MPa)
0-20	DKM-1	2876.10	594.75
	YKM-1	3563.49	5751.52
20-40	DKM-2	2941.46	8223.53
	YKM-2	17632.56	5593.76
40-60	DKM-3	20136.99	3594.34
	YKM-3	16620.04	927.26
60-80	DKM-4	25823.13	9894.15
	YKM-4	14644.48	1063.36
80-100	DKM-5	16200.0	3345.72
	YKM-5	11811.54	689.64



Şekil 5.37. DKM ve YKM için belirlenen E_i - E_d arasındaki ilişki (Değerlendirmede "?!" işaretli veriler dikkate alınmamıştır)

Yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerleri (E_i ve E_d) arasında üçüncü dereceden parabolik bir davranış olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.37). Ancak bu davranışa DKM-2 ve YMK-1 yapay kaya biriminin uyum sağlamadığı anlaşılmıştır (Şekil 5.37 ve Çizelge 5.37). Bu her iki kaya birimine ait veri göz ardı edilmiştir. İstatistiksel modelin başarısı, bu iki değerin ihmal edilmesi ile $R^2 = 0.84$ mertebesinde belirlenmiştir.

Şekil 5.37'de görüldüğü üzere ISRM (2007) önerileri doğrultusunda sadece 0.5-1 MPa/s aralığından seçilen 0.75 MPa/s yükleme hız koşulunda gerçekleştirilen deformabilite deney sonuçlarından belirlenen yenilme öncesi elastik modül (E_i) değerlerinin, yenilme sonrası elastik modül (E_d) değerlerinden genel olarak daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.37'de belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.25'te verilmiştir.

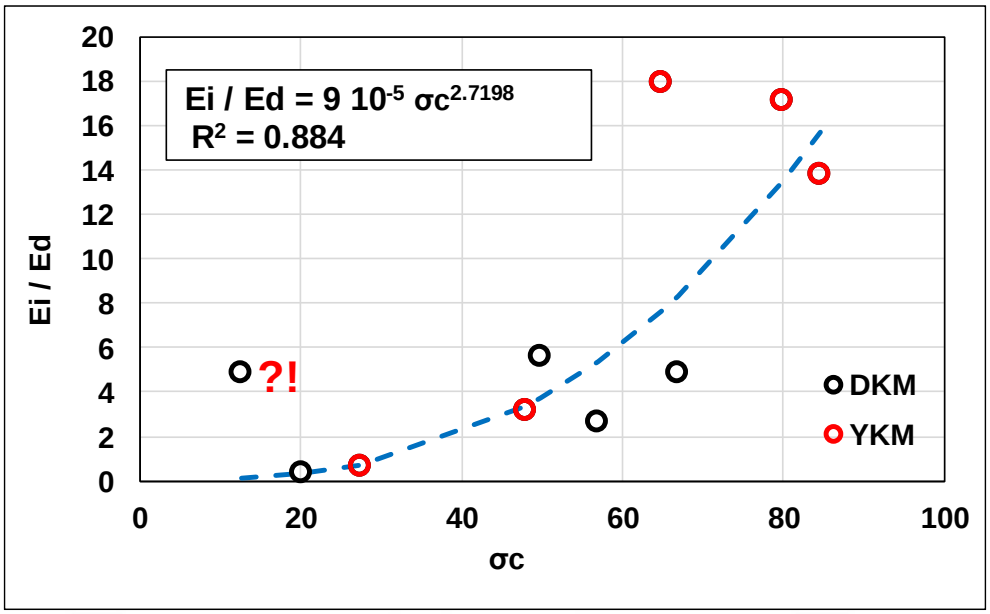
$$E_d = 4.881\ 10^{-10}\ E_i^{3.015} \qquad (R^2=0.839) \qquad (5.25)$$

Burada sabit katsayılar istatistiksel analizler yardımıyla bulunan değerlerdir. ISRM (2007) önerileri doğrultusunda tek eksenli basma (TEB) ile gerçekleştirilen deformabilite deney sonuçlarından yenilme öncesi E_i elastik modül değerinin bilinmesi durumunda Eşitlik 5.25 yardımıyla yenilme sonrası elastik modül E_d değeri hesaplanabilir.

Bu çalışmada ayrıca yenilme sonrası elastik modül değerinin belirlenmesi için Çizelge 5.34 ve Şekil 5.38'de verilen grafik hazırlanmıştır. Yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerleri (E_i ve E_d) arasında ikinci dereceden parabolik bir davranış olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.38). Ancak bu davranışa DKM-1 doğal kaya biriminin uyum sağlamadığı anlaşılmıştır (Şekil 5.38 ve Çizelge 5.38). Bu birime ait deneyin tekrarlanmasına karar verilmiştir. Bu değerin ihmal edilmesi ile σ_c - E_i/E_d arasındaki ilişkinin başarısı, istatistiksel analiz yardımıyla R^2=0.88 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.38. DKM ve YKM için belirlenen E_i / E_d elastik modül değerlerinin oranı ve tek eksenli basma dayanımı değerleri

Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD)	ISRM (1981, 2007) Önerileri (0.5-1 MPa/s) Doğrultusunda Yenilme Öncesi ve Sonrasında Belirlenen Elastik Modül Oranı (Çizelge 5.37'den)
(MPa)	(DKM ve YKM)	σ_c (MPa)	E_i / Ed
0-20	DKM-1	12.57	4.84
	YKM-1	27.33	0.62
20-40	DKM-2	20.11	0.36
	YKM-2	48.04	3.15
40-60	DKM-3	49.89	5.60
	YKM-3	64.89	17.92
60-80	DKM-4	56.9	2.61
	YKM-4	84.6	13.77
80-100	DKM-5	66.89	4.84
	YKM-5	80.01	17.13



Şekil 5.38. DKM ve YKM için belirlenen E_i/E_d - σ_c arasındaki ilişki (Değerlendirmede "?!" işaretli veri dikkate alınmamıştır)

Şekil 5.38'de görüldüğü gibi deformabilite deney sonuçlarından belirlenen yenilme öncesi ve sonrası elastik modül değerlerinin oranı (E_i/E_d), tek eksenli basma dayanımı (σ_c) değerlerinin büyümesi ile artmaktadır. Şekil 5.38'de belirtilen yaklaşım Eşitlik 5.26'de verilmiştir.

$$E_i / E_d = 9\ 10^{-5}\ \sigma_c^{2.7198} \quad (R^2=0.884) \qquad (5.26)$$

Eşitlik 5.26'da görülen sabit katsayılar istatistiksel analizler yardımıyla bulunan değerlerdir. Yenilme öncesi ve sonrası için belirlenen elastik modül değerlerinin oranı (E_i/E_d) bu eşitlik yardımıyla hesaplanabilecektir.

5.5.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

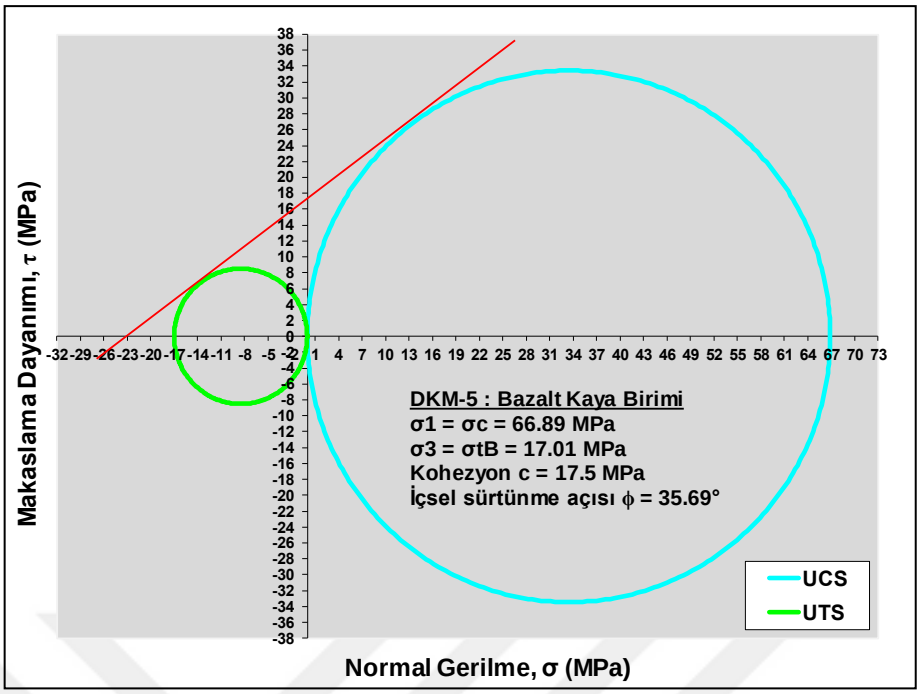
Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalarda örnekler üzerine uygulanan gerilme değerleri sabit olduğu için yenilme öncesi ve sonrasında elastik modül değerinin (E_i ve E_d) belirlenmesi mümkün olmamıştır.

5.6. TEB ve DÇ koşullarına dayalı kritik eşik pekleşme c(t) ve ϕ(t) değerlerinin belirlenmesi

Yukarıda sunulan bölüm 5.1 ve bölüm 5.2'de sırası ile doğal ve yapay kaya malzemeler (DKM, YKM) için gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmuştur. Bu deney sonuçları ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda yapılan deneyleri, bunların haricinde farklı yükleme hızlarında (Grup1 deneyleri) ve ayrıca farklı sabit gerilme altındaki sünme koşulunda (Grup2 deneyleri) gerçekleştirilen deneyleri kapsamaktadır. İlgili bölümlerde değinildiği üzere sırası ile σ_c, σ_{tB}, $\sigma_c(t)$, $\sigma_{tB}(t)$ sembolleri ile ifade edilen değerler DKM ve YKM kaya malzemeleri için belirlenmiştir. Bu bölümde bu değerlere dayalı olarak belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açıları hakkında yapılan analiz sonuçları sunulacaktır.

5.6.1. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı değerlendirmeler (Grup1)

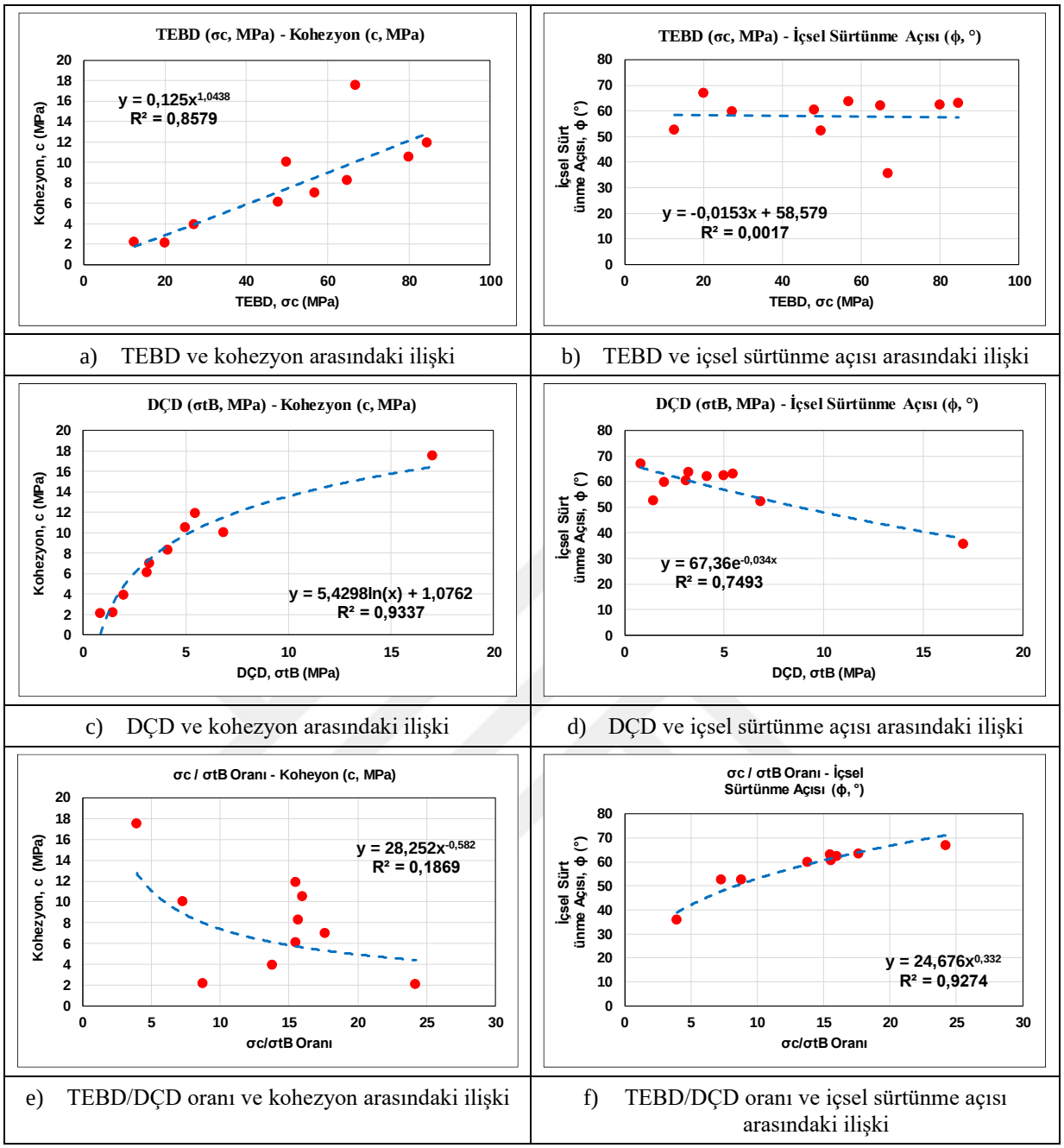
Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) üzerinde ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda Grup1 kapsamında gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c) ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) deneylerinden elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.39'da sunulmuştur. Elde edilen bu deneysel sonuçlar yardımıyla Mohr-Coulomb tarafından ortaya konan yaklaşım ile her bir örnek tipi (DKM-1, …., YKM-1, …) için analizler yapılmıştır. Bu analizlere ait tipik bir örnek Şekil 5.39'da verilmiştir. Bu analizler sonucunda kohezyon (c) ve içsel sürtünme açıları (ϕ) belirlenmiştir. Çizelge 5.39'da ayrıca belirlenen c ve ϕ değerleri de verilmiştir. Bu çizelgede ifade edilen veriler yardımıyla aşağıda sunulan grafiksel sunumlar hazırlanmıştır (Şekil 5.40). Şekil 5.40b ve Şekil 5.40e'de verilen grafiklerde istatistiksel ilişki oldukça düşükken diğer grafiklerde (Şekil 5.40a, c, d, f) ilişkinin oldukça güçlü olduğu görülmektedir.



Şekil 5.39. Kohezyon ve içsel sürtünme açılarının belirlenmesine ait tipik bir grafik (DKM-5, Grup1)

Çizelge 5.39. Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen c ve Φ değerleri (Grup1)

Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda			
		Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD)	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (DÇD)	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı
(DKM, YKM)	(MPa)	σ_c (MPa)	σ_{tB} (MPa)	c (MPa)	Φ (°)
DKM-1	0-20	12.57	1.43	2.15	52.39
DKM-2	20-40	20.11	0.83	2.1	66.89
DKM-3	40-60	49.89	6.84	10.0	52.37
DKM-4	60-80	56.9	3.22	7.0	63.49
DKM-5	80-100	66.89	17.01	17.5	35.69
YKM-1	0-20	27.33	1.98	3.9	59.76
YKM-2	20-40	48.04	3.09	6.1	60.43
YKM-3	40-60	64.89	4.13	8.25	61.86
YKM-4	60-80	84.6	5.46	11.85	62.89
YKM-5	80-100	80.01	4.99	10.5	62.22



a) TEBD ve kohezyon arasındaki ilişki

b) TEBD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

c) DÇD ve kohezyon arasındaki ilişki

d) DÇD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

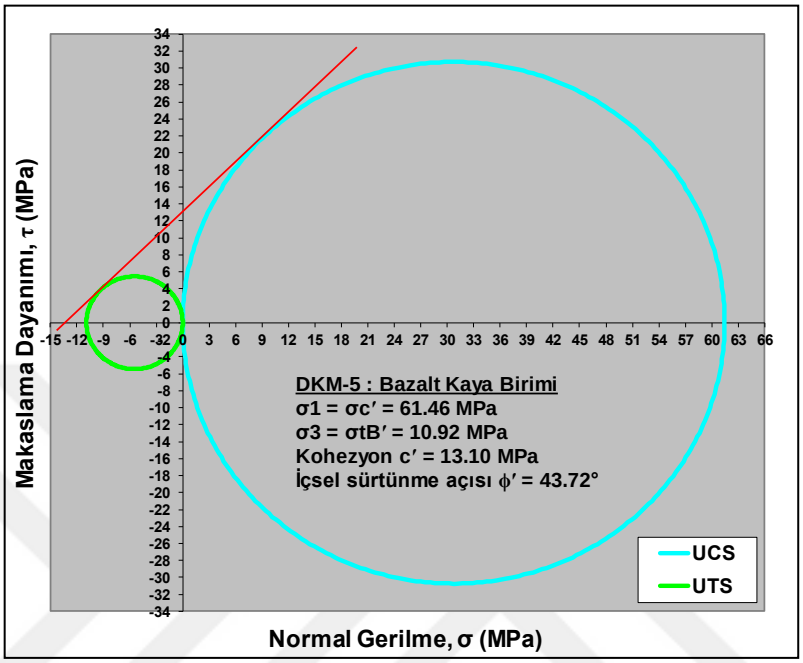
e) TEBD/DÇD oranı ve kohezyon arasındaki ilişki

f) TEBD/DÇD oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

Şekil 5.40. Grup1 kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerlerinin TEBD ve DÇD değerleri ile olan çeşitli ilişkisi

Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) üzerinde farklı yükleme hızlarında gerilme-hız-kontrollü deney koşullarında (Grup1) gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c') ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}') deneylerinden elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.40'da sunulmuştur. Mohr-Coulomb tarafından ortaya konan yaklaşım ile elde edilen deneysel sonuçlar yardımıyla her bir örnek tipi (DKM-1, …., YKM-1, …) için kohezyon (c′) ve içsel sürtünme açıları (ϕ′) belirlenmiştir. Bu analizlere ait tipik bir örnek Şekil 5.41'de gösterilmiştir. DKM ve YKM birimlerine

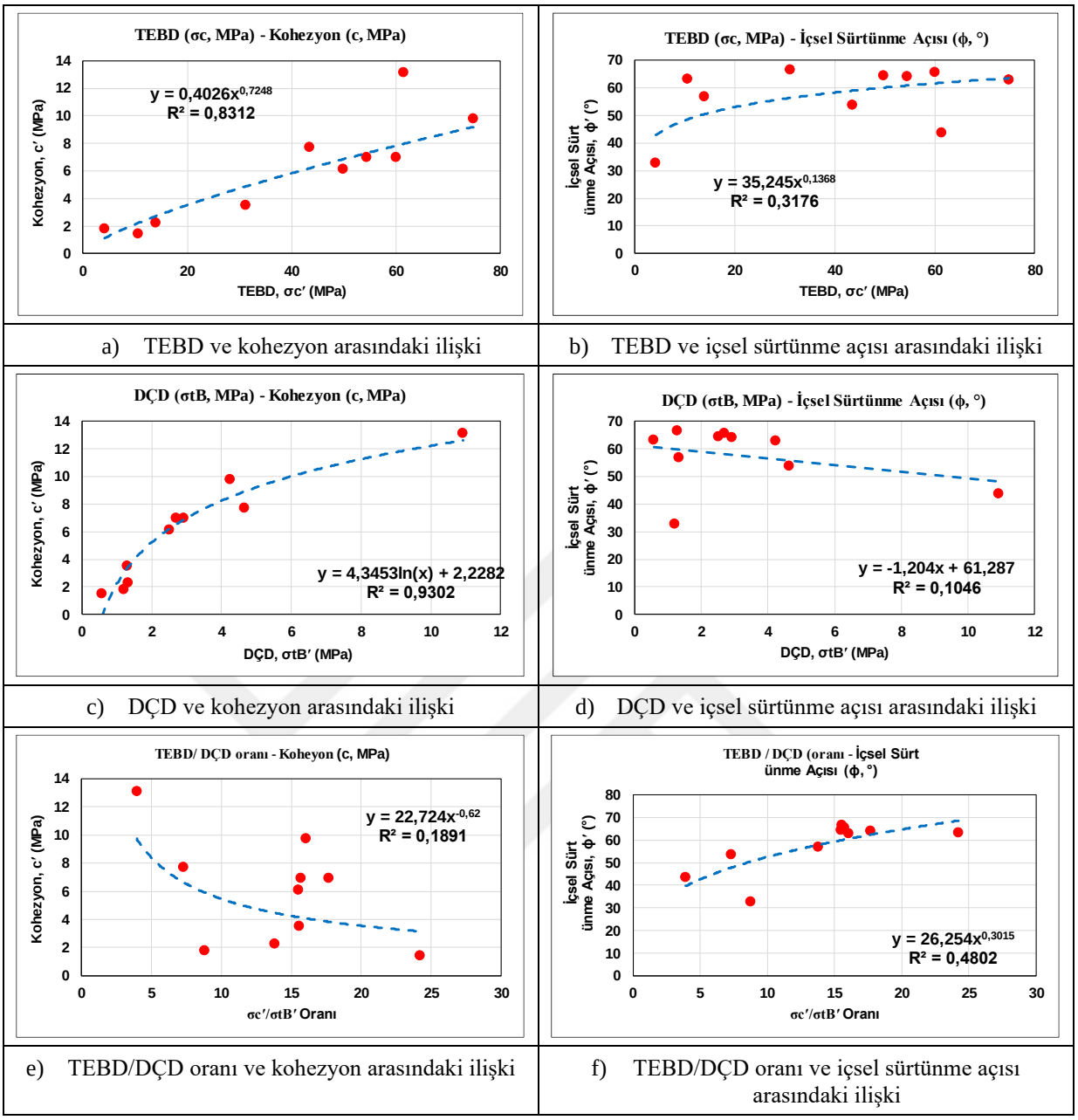
ait belirlenen bu c′ ve ϕ′ değerleri Çizelge 5.40'ta ayrıca verilmiştir. Bu çizelgede ifade edilen veriler yardımıyla Şekil 5.42'de sunulan grafikler hazırlanmıştır. Şekil 5.42a ve Şekil 5.42c'de sunulan grafiklerde istatistiksel ilişki oldukça güçlü iken diğer grafiklerde (Şekil 5.42b, d, e, f) ilişkinin zayıf olduğu görülmektedir.



Şekil 5.41. Pekleşmeye dayalı kohezyon ve içsel sürtünme açılarının belirlenmesine ait tipik bir grafik (DKM-5, Grup1)

Çizelge 5.40. Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen c′ ve Φ′ değerleri (Grup1)

Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Gerilme-hız-kontrollü deney koşullarında			
		Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD)	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (DÇD)	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı
(DKM, YKM)	(MPa)	σ_c' (MPa)	σ_{tB}' (MPa)	c′ (MPa)	Φ′ (°)
DKM-1	0-20	4.19	1.21	1.80	32.58
DKM-2	20-40	10.59	0.59	1.45	63.19
DKM-3	40-60	43.48	4.66	7.70	53.68
DKM-4	60-80	54.46	2.94	6.95	64.17
DKM-5	80-100	61.46	10.92	13.1	43.72
YKM-1	0-20	13.95	1.33	2.25	56.87
YKM-2	20-40	31.14	1.29	3.50	66.56
YKM-3	40-60	59.99	2.70	6.95	65.69
YKM-4	60-80	49.86	2.52	6.10	64.43
YKM-5	80-100	74.84	4.25	9.75	62.95



a) TEBD ve kohezyon arasındaki ilişki

b) TEBD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

c) DÇD ve kohezyon arasındaki ilişki

d) DÇD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

e) TEBD/DÇD oranı ve kohezyon arasındaki ilişki

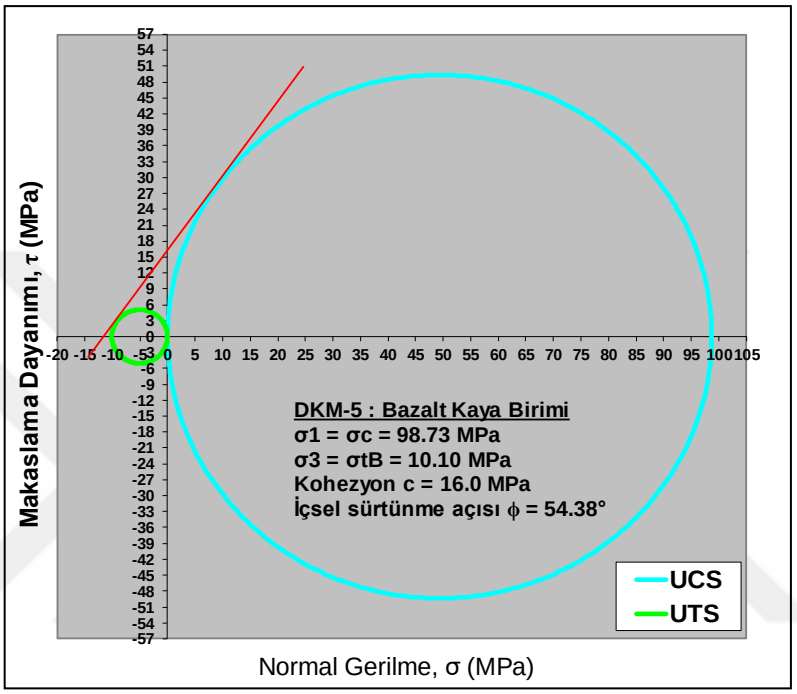
f) TEBD/DÇD oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

Şekil 5.42. Grup1 kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için pekleşmeye dayalı belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerlerinin pekleşmeye dayalı TEBD ve DÇD değerleri ile olan çeşitli ilişkisi

5.6.2. Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda gerçekleştirilen DKM ve YKM deney sonuçlarına dayalı genel değerlendirme (Grup2)

Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) üzerinde ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda Grup2 kapsamında gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c) ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) deneylerinden elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 5.41'de sunulmuştur. Elde edilen bu deneysel sonuçlar yardımıyla Mohr-Coulomb tarafından ortaya konan yaklaşım ile her bir örnek tipi (DKM-

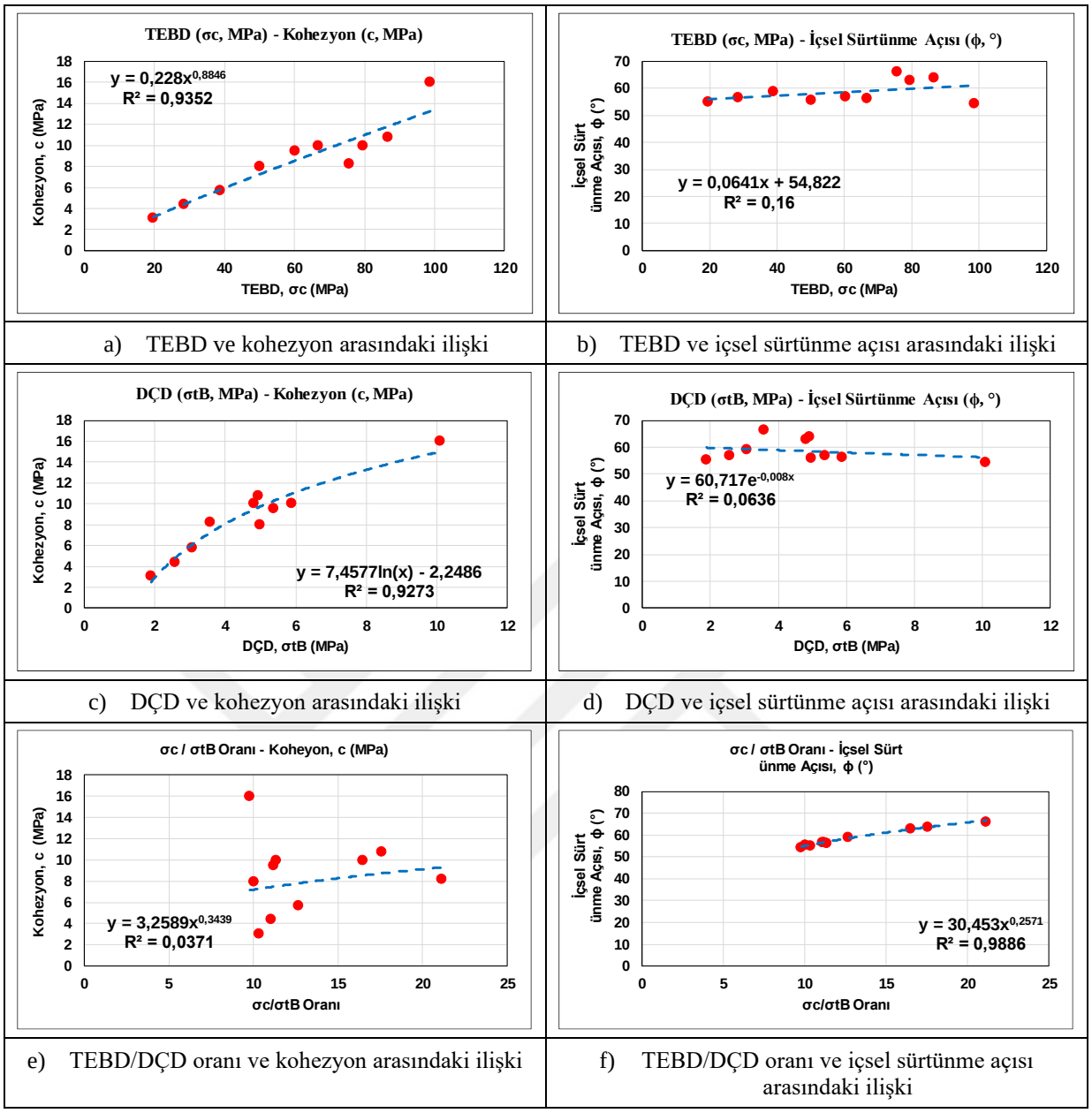
1, …., YKM-1, …) için analizler yapılmıştır (Şekil 5.43). Bu analizler sonucunda kohezyon (c) ile içsel sürtünme açıları (ϕ) belirlenmiş ve Çizelge 5.41'de verilmiştir. Bu çizelgede ifade edilen veriler yardımıyla ayrıca aşağıda sunulan grafiksel sunumlar hazırlanmıştır (Şekil 5.44). Şekil 5.44a, Şekil 5.44c ve Şekil 5.44f'de verilen grafiklerde istatistiksel ilişki oldukça güçlü iken diğer grafiklerde (Şekil 5.44b, d, e) ilişkinin oldukça iyi olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.43. Grup2 kapsamında kohezyon ve içsel sürtünme açılarının belirlenmesine ait tipik bir grafik (DKM-5, Grup2)

Çizelge 5.41. Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen c ve Φ değerleri (Grup2)

Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda			
		Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD)	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (DÇD)	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı
(DKM, YKM)	(MPa)	σ_c (MPa)	σ_{tB} (MPa)	c (MPa)	Φ (°)
DKM-1	0-20	19.56	1.89	3.10	55.08
DKM-2	20-40	38.89	3.07	5.75	58.90
DKM-3	40-60	60.30	5.38	9.5	56.81
DKM-4	60-80	75.76	3.58	8.25	66.28
DKM-5	80-100	98.73	10.09	16.0	54.38
YKM-1	0-20	28.50	2.58	4.4	56.75
YKM-2	20-40	50.08	4.98	8.0	55.71
YKM-3	40-60	66.82	5.88	10.0	56.31
YKM-4	60-80	86.69	4.93	10.8	63.81
YKM-5	80-100	79.49	4.82	10.0	62.99



a) TEBD ve kohezyon arasındaki ilişki

b) TEBD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

c) DÇD ve kohezyon arasındaki ilişki

d) DÇD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

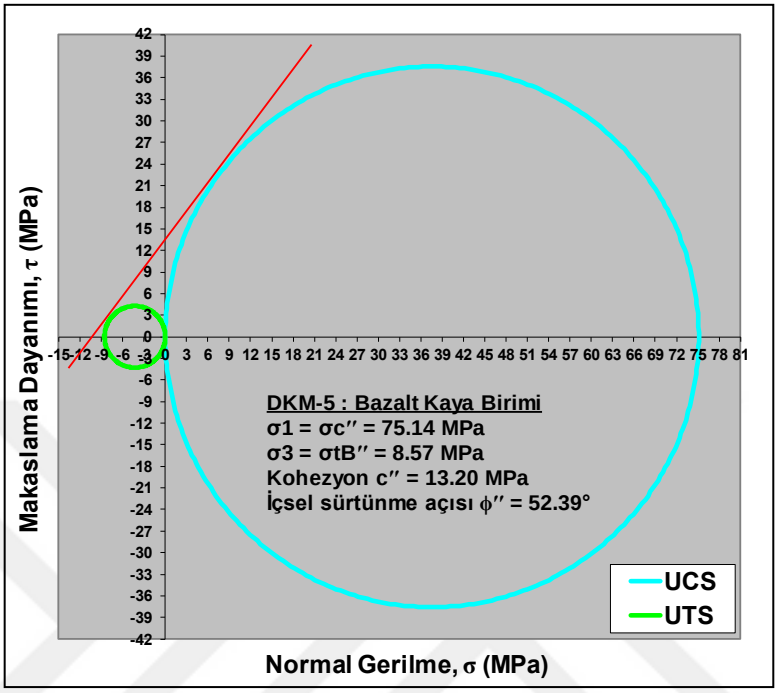
e) TEBD/DÇD oranı ve kohezyon arasındaki ilişki

f) TEBD/DÇD oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

Şekil 5.44. Grup2 kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerlerinin TEBD ve DÇD değerleri ile olan çeşitli ilişkisi

Bu başlık altında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) üzerinde sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşullarında (Grup2) gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c'') ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}'') deneylerinden elde edilen sonuçlar ayrıca toplu olarak Çizelge 5.42'de sunulmuştur. Mohr-Coulomb tarafından ortaya konan yaklaşım ile elde edilen deneysel sonuçlar yardımıyla her bir örnek tipi (DKM-1, …., YKM-1, …) için kohezyon (c'') ve içsel sürtünme açıları (ϕ'') belirlenmiştir. Bu analizlere ait tipik bir örnek Şekil 5.45'te verilmiştir. Belirlenen bu c'' ve ϕ'' değerleri Çizelge 5.42'de gösterilmiştir. Bu çizelgede ifade edilen veriler

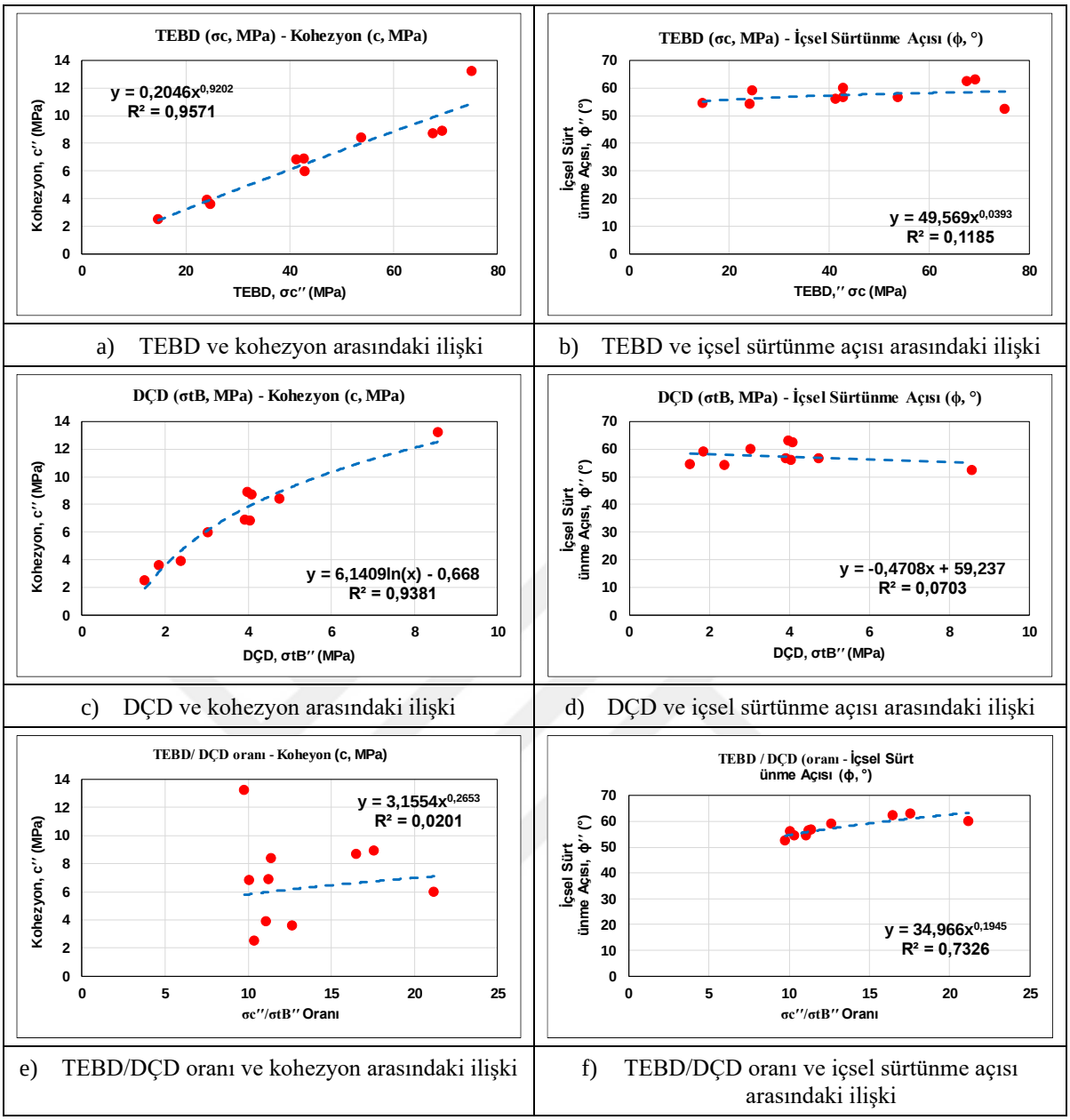
kullanılarak Şekil 5.46'da sunulan grafikler hazırlanmıştır. Şekil 5.46a, Şekil 5.46c ve Şekil 5.46f'de sunulan grafiklerde istatistiksel ilişkinin oldukça güçlü olduğu görülürken diğer grafiklerden Şekil 5.46b, d, e'de ise ilişkinin zayıf olduğu görülmektedir.



Şekil 5.45. Pekleşmeye dayalı kohezyon ve içsel sürtünme açılarının belirlenmesine ait tipik bir grafik (DKM-5, Grup2)

Çizelge 5.42. Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen c″ ve Φ″ değerleri (Grup2)

Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	Sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşullarında			
		Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD)	Brazilian Dolaylı Çekme Dayanımı (DÇD)	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı
(DKM, YKM)	(MPa)	σ_c'' (MPa)	σ_{tB}'' (MPa)	c″ (MPa)	Φ″ (°)
DKM-1	0-20	14.72	1.52	2.50	54.40
DKM-2	20-40	24.68	1.87	3.60	59.11
DKM-3	40-60	42.78	3.93	6.85	56.50
DKM-4	60-80	42.88	3.04	5.95	59.98
DKM-5	80-100	75.14	8.57	13.20	52.39
YKM-1	0-20	24.08	2.38	3.90	54.28
YKM-2	20-40	41.25	4.04	6.80	55.97
YKM-3	40-60	53.78	4.75	8.40	56.55
YKM-4	60-80	69.33	3.99	8.90	62.94
YKM-5	80-100	67.57	4.09	8.70	62.27



a) TEBD ve kohezyon arasındaki ilişki

b) TEBD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

c) DÇD ve kohezyon arasındaki ilişki

d) DÇD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

e) TEBD/DÇD oranı ve kohezyon arasındaki ilişki

f) TEBD/DÇD oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

Şekil 5.46. Grup2 kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için pekleşmeye dayalı belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerlerinin pekleşmeye dayalı TEBD ve DÇD değerleri ile olan çeşitli ilişkisi

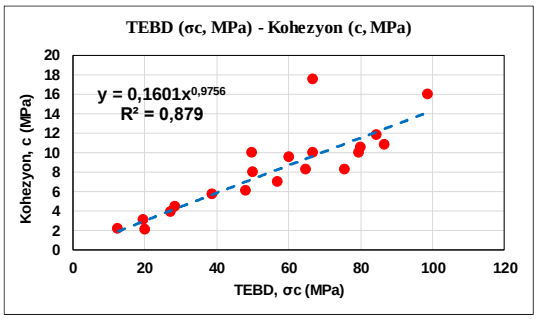
5.6.3. Gerilme-hız-kontrollü deney koşulunda (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarının genel değerlendirmesi

Bölüm 5.6.1 ve bölüm 5.6.2'de doğal ve yapay kaya malzemeler için gerilme-hız-kontrollü deney (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme deney koşulunda (Grup2) gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı kohezyon ve içsel sürtünme açısına ait genel bir değerlendirme bu bölümde verilmiştir.

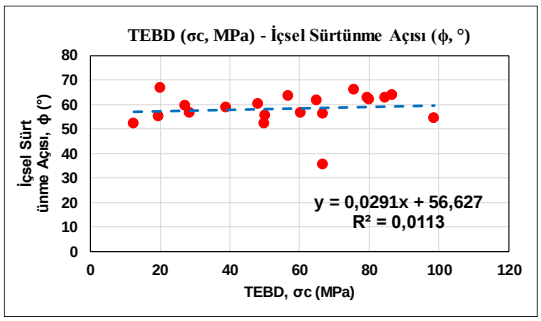
Her iki farklı deney yaklaşıma (Grup1 ve Grup2) ait belirlenen kohezyon (c, c′) ve içsel sürtünme açı (ϕ, ϕ′) değerleri daha önce Çizelge 5.39, 5.40, 5.41 ve 5.42'de verilmiştir. Burada sunulacak grafiksel değerlendirme için bu çizelgelerdeki veriler birleştirilerek topluca Çizelge 5.43'te hazırlanmıştır. Bu çizelgede sunulan veriler yardımıyla öncelikle Şekil 5.47 ve Şekil 5.48 hazırlanmıştır. Daha sonra bu çalışmanın asıl hedefi olan pekleşmeye dayalı kohezyon ve içsel sürtünmeyi belirlemeye yönelik olan Şekil 5.49 ve Şekil 5.50 hazırlamıştır.

Çizelge 5.43 Doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için belirlenen c ve Φ değerleri (Grup1 ve Grup2)

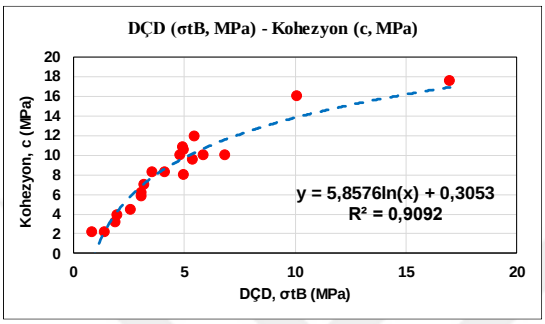
Grup Adı	Doğal ve Yapay Kaya Malzemesi	Öngörülen Tanımlı Basma Dayanım Aralığı	ISRM (1981, 2007) Önerileri Doğrultusunda Grup1 ve Grup2				Gerilme-hız-kontrollü deney (Grup1) ve Sabit-Gerilme-Kontrollü-Sünme Deney (Grup2) Koşullarında Pekleşmeye Bağlı			
			TEBD	DÇD	Kohez.	İçsel Sürt. Açısı	TEBD [σ_c' ve σ_c'' ye bağlı]	DÇD [σ_{tB}' ve σ_{tB}'' ye bağlı]	Kohez [c′ ve c″ ye bağlı]	İçsel Sürt. Açısı [Φ′ ve Φ″ ye bağlı]
			σ_c (MPa)	σ_{tB} (MPa)	c (MPa)	Φ (°)	$\sigma_c(t)$ (MPa)	$\sigma_{tB}(t)$ (MPa)	c(t) (MPa)	Φ(t) (°)
Grup 1	DKM-1	0-20	12.57	1.43	2.15	52.39	4.19	1.21	1.80	32.58
	DKM-2	20-40	20.11	0.83	2.1	66.89	10.59	0.59	1.45	63.19
	DKM-3	40-60	49.89	6.84	10.0	52.37	43.48	4.66	7.70	53.68
	DKM-4	60-80	56.9	3.22	7.0	63.49	54.46	2.94	6.95	64.17
	DKM-5	80-100	66.89	17.01	17.5	35.69	61.46	10.92	13.1	43.72
	YKM-1	0-20	27.33	1.98	3.9	59.76	13.95	1.33	2.25	56.87
	YKM-2	20-40	48.04	3.09	6.1	60.43	31.14	1.29	3.50	66.56
	YKM-3	40-60	64.89	4.13	8.25	61.86	59.99	2.70	6.95	65.69
	YKM-4	60-80	84.6	5.46	11.85	62.89	49.86	2.52	6.10	64.43
	YKM-5	80-100	80.01	4.99	10.5	62.22	74.84	4.25	9.75	62.95
Grup 2	DKM-1	0-20	19.56	1.89	3.10	55.08	14.72	1.52	2.50	54.40
	DKM-2	20-40	38.89	3.07	5.75	58.90	24.68	1.87	3.60	59.11
	DKM-3	40-60	60.30	5.38	9.5	56.81	42.78	3.93	6.85	56.50
	DKM-4	60-80	75.76	3.58	8.25	66.28	42.88	3.04	5.95	59.98
	DKM-5	80-100	98.73	10.09	16.0	54.38	75.14	8.57	13.20	52.39
	YKM-1	0-20	28.50	2.58	4.4	56.75	24.08	2.38	3.90	54.28
	YKM-2	20-40	50.08	4.98	8.0	55.71	41.25	4.04	6.80	55.97
	YKM-3	40-60	66.82	5.88	10.0	56.31	53.78	4.75	8.40	56.55
	YKM-4	60-80	86.69	4.93	10.8	63.81	69.33	3.99	8.90	62.94
	YKM-5	80-100	79.49	4.82	10.0	62.99	67.57	4.09	8.70	62.27



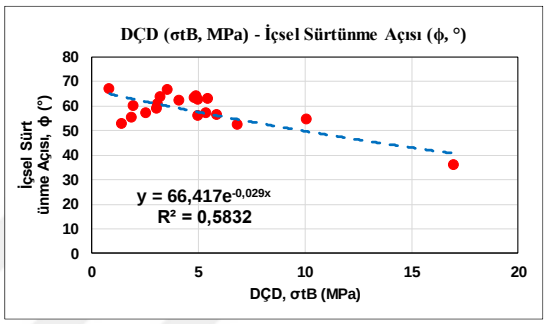
a) TEBD ve kohezyon arasındaki ilişki



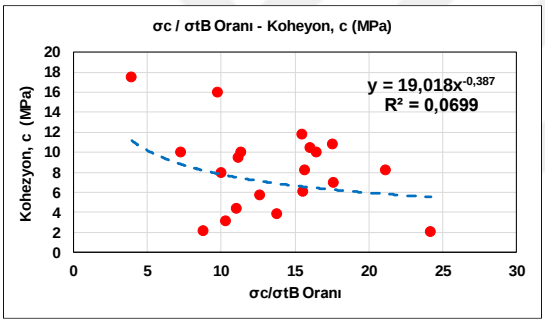
b) TEBD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki



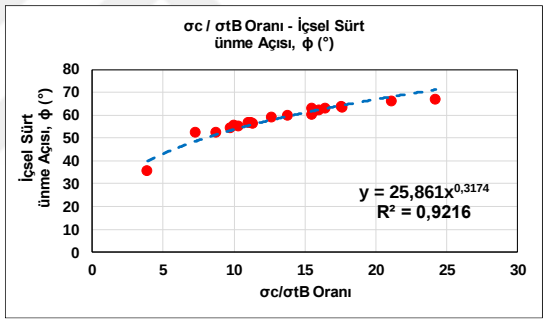
c) DÇD ve kohezyon arasındaki ilişki



d) DÇD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki



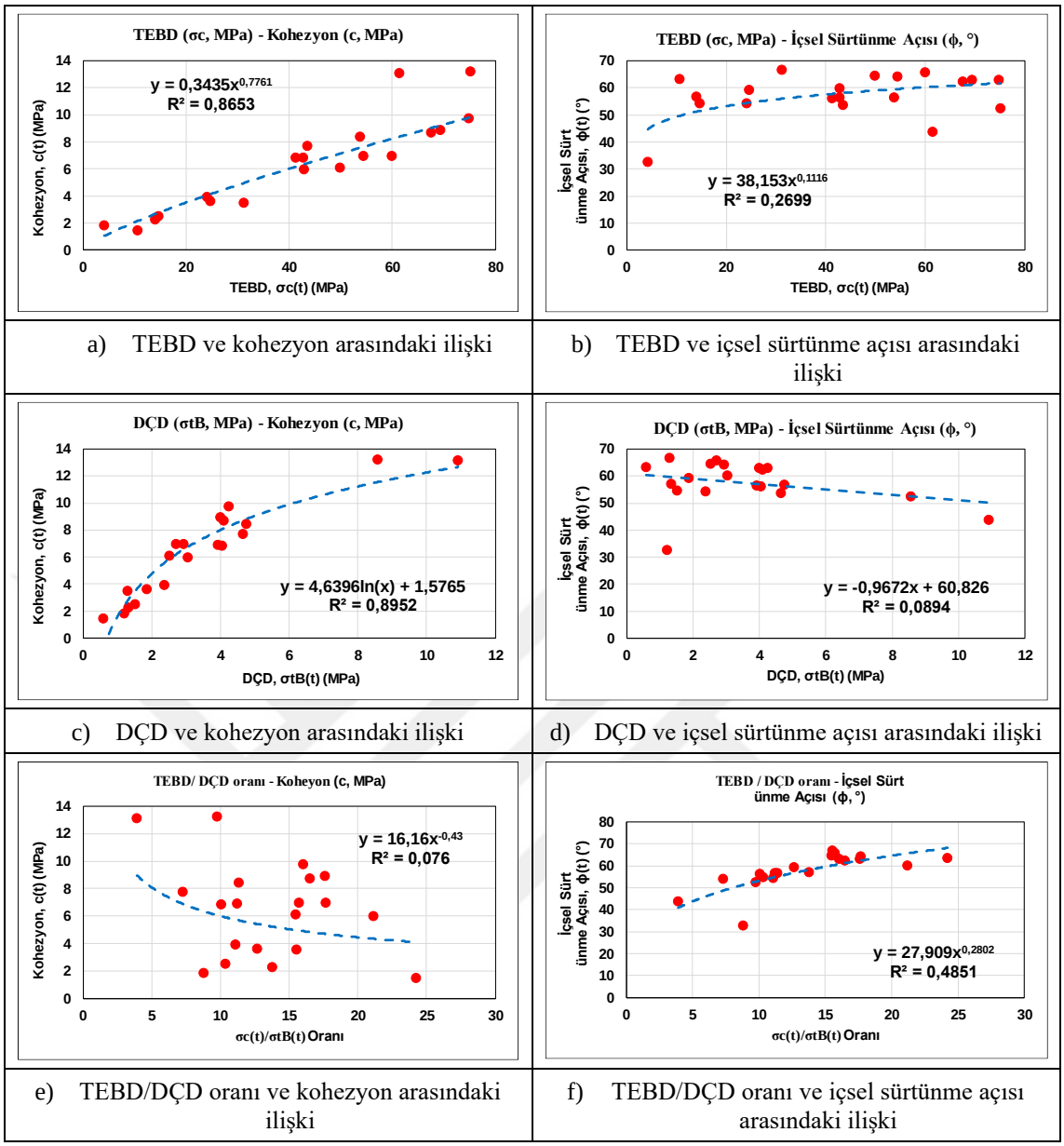
e) TEBD/DÇD oranı ve kohezyon arasındaki ilişki



f) TEBD/DÇD oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

Şekil 5.47. Grup1 ve Grup2 kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için ISRM (1981, 2007) önerileri doğrultusunda belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerlerinin TEBD ve DÇD değerleri ile olan çeşitli ilişkisi

Şekil 5.47'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere belirlenen istatistik ilişki Şekil 5.47b ve Şekil 5.47e'de zayıf diğerlerinde ise oldukça güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Pekleşmeye dayalı hazırlanan Şekil 5.48'de sunulan grafiklerden görüldüğü üzere ise belirlenen istatistik ilişki Şekil 5.48a, Şekil 5.48c ve Şekil 5.48f'de güçlü diğerlerinde ise zayıf olduğu görülmektedir.



a) TEBD ve kohezyon arasındaki ilişki

b) TEBD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

c) DÇD ve kohezyon arasındaki ilişki

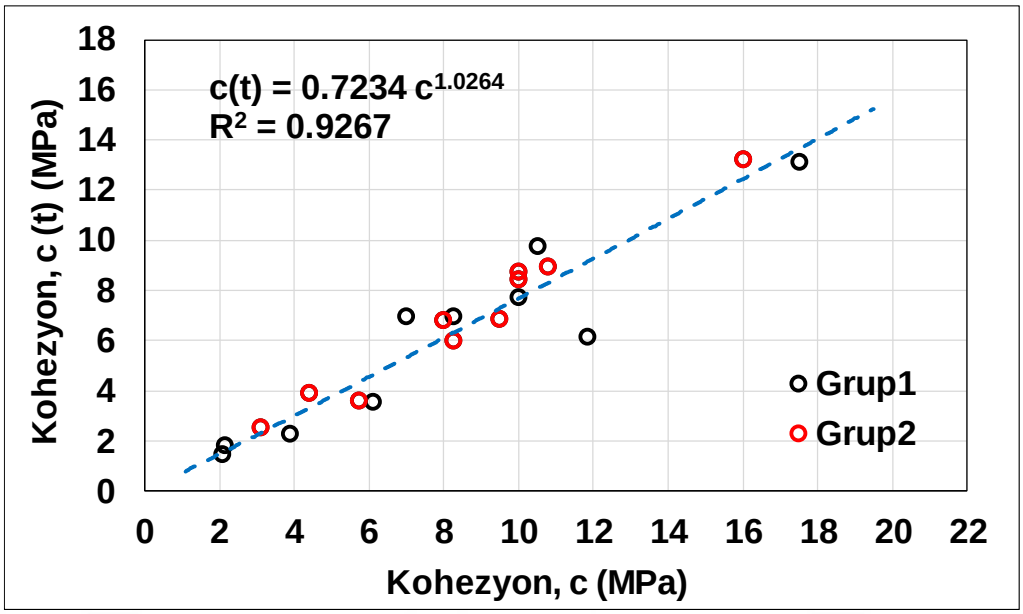
d) DÇD ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

e) TEBD/DÇD oranı ve kohezyon arasındaki ilişki

f) TEBD/DÇD oranı ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki

Şekil 5.48. Grup1 ve Grup2 kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri (DKM, YKM) için pekleşmeye dayalı belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açı değerlerinin pekleşmeye dayalı TEBD ve DÇD değerleri ile olan çeşitli ilişkisi

Şekil 5.49'da (ISRM 1981, 2007) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c) ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) deney sonuçlarıyla belirlenen kohezyon (c) ile pekleşmeye dayalı belirlenen kohezyon (c(t)) değerleri arasındaki güçlü istatistiksel ilişki sunulmuştur. Şekil 5.49'da sunulan grafikten $c > c(t)$ olduğu anlaşılmaktadır. Aşağıda ayrıca sunulan Eşitlik 5.27'de istatistiksel katsayılar ve örtüşen matematiksel eğrinin R^2 değeri sunulmuştur.



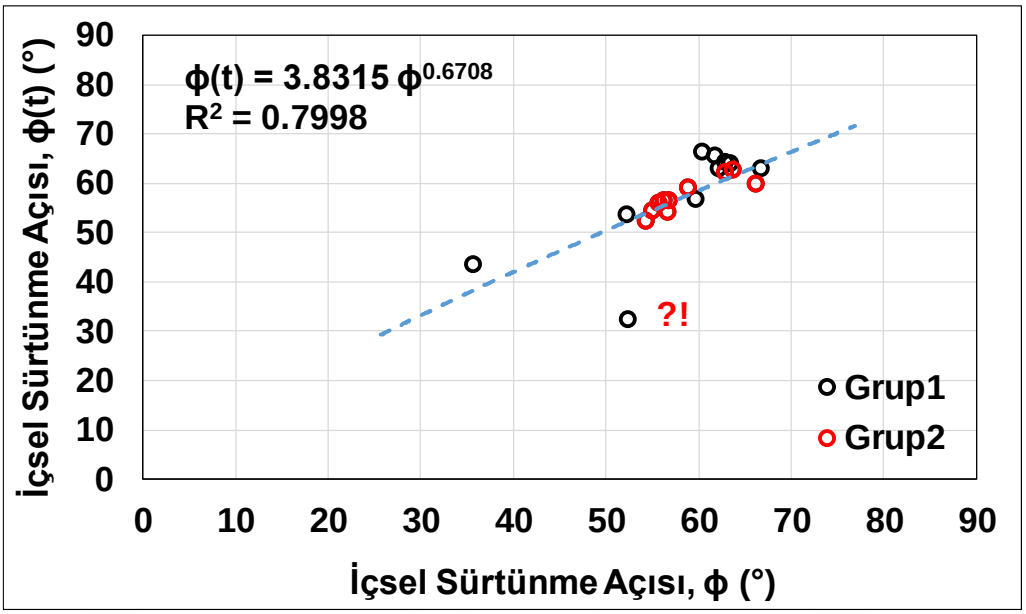
Şekil 5.49. Orijinal kohezyon (c) ve pekleşmeye dayalı kohezyon (c(t)) arasındaki ilişki

$$c(t) = 0.7234\ c^{1.0264} \qquad (R^2 = 0.92) \tag{5.27}$$

Benzer şekilde (ISRM 1981, 2007) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD, σ_c) ve Brazilian dolaylı çekme dayanımı (DÇD, σ_{tB}) deney sonuçlarıyla ortaya konan içsel sürtünme açısı (ϕ) ile pekleşmeye dayalı deneylerden belirlenen içsel sürtünme açısı ($\phi(t)$) arasındaki istatistiksel ilişki Şekil 5.50'de verilmiştir. Şekil 5.50'de sunulan grafikten $\phi > \phi(t)$ olduğu görülmektedir. Eşitlik 5.28'de belirlenen eşitliğin istatistiksel sabitleri ve eğrinin R^2 değeri sunulmuştur. Ancak burada Grup1 deneyleri arasında yer alan DKM-1 doğal kaya birimine ait içsel sürtünme açıları (Şekil 5.50 ve Çizelge 5.43) diğer verilerin bulunduğu veri hattı üzerinde yer almamıştır. İstatistiksel değerlendirmede bu veri göz ardı edilmiştir.

$$\phi(t) = 3.8315\ \phi^{0.6708} \qquad (R^2 = 0.79) \tag{5.28}$$

Bu çalışmanın ana hedeflerinden olan pekleşmeye dayalı kohezyon (c(t)) ve içsel sürtünme açıları ($\phi(t)$), tasarım çalışmalarında kullanılmak üzere Eşitlik 5.27 ve Eşitlik 5.28 yardımıyla belirlenebilecektir.



Şekil 5.50. İçsel sürtünme açısı ve pekleşmeye dayalı içsel sürtünme açısı arasındaki ilişki (Grafik üzerindeki "?!" işaretli veri dikkate alınmamıştır)

5.7. Örnek bir uygulama

ISRM (1981, 2007) ve ASTM (E139) gibi kuruluşların önerileri doğrultusunda uzun zaman etkisinden bağımsız gerçekleştirilen deney sonuçlarının tasarım çalışmalarında direkt kullanımlarının yanıltıcı olabileceği en doğru yaklaşımın, pekleşmeye dayalı kritik eşik dayanım değerlerinin kullanılması olacağı savı, bu tez çalışmasında tanımlanan problem ve ortaya konan amaç olmuştur.

Belirtilen hedef doğrultusunda seçilen doğal ve yapay kaya malzemeleri üzerinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bir seri kaya mekaniği deneyleri sonrasında yapılan analizlere dayalı ulaşılan eşitlikler topluca Çizelge 5.44'te tekrar sunulmuştur. Bu sunulan eşitlikler yardımıyla aranan kritik eşik dayanım değerleri belirlenebilecektir. Malzeme bu eşik dayanım değerlerinin üstündeki bir gerilme durumunda bile yenilecektir (bu gerilme durumu malzemenin standart yenilme değerinin altında bile olsa). Malzeme zamana dayalı olarak pekleşme sürecini yaşayacak ve uzun dönemde yenilecektir. Bu durumu açıklamak amacıyla bu bölümde örnek bir uygulama verilmiştir.

Çizelge 5.44. Pekleşmeye dayalı kritik eşik dayanım değerlerinin belirlenmesi için önerilen eşitlikler

Dayanım Parametresi	Birim	Önerilen Eşitlik	Sınırları	R^2	Eşitlik No
Tek eksenli basma dayanımı	MPa	$\sigma_c(t) = 0.8238\ \sigma_c - 2.9641$	1) $\sigma_c > \sigma$ *Duraylı* 2) $\sigma_c < \sigma$ *Duraysız* 3) $\sigma_c(t) < \sigma < \sigma_c$ *Kaya malzemesi pekleşir ancak yine de yenilir* 4) $\sigma_c(t) > \sigma$ *Kaya malzemesi pekleşmez ve yenilmez*	0.87	5.11
Dolaylı çekme dayanımı	MPa	$\sigma_{tB}(t) = 0.6744\ \sigma_{tB} + 0.2873$	1) $\sigma_{tB} > \sigma$ *Duraylı* 2) $\sigma_{tB} < \sigma$ *Duraysız* 3) $\sigma_{tB}(t) < \sigma < \sigma_c$ *Kaya malzemesi pekleşir ancak yine de yenilir* 4) $\sigma_{tB}(t) > \sigma$ *Kaya malzemesi pekleşmez ve yenilmez*	0.92	5.22
TEB koşulunda elastik modül	MPa	$E_i(t) = 6.456\ 10^{-5}\ E_i^{1.8}$	1) $E_{i\text{-}TEB} > E$ *Duraylı* 2) $E_{i\text{-}TEB} < E$ *Duraysız* 3) $E_{i\text{-}TEB}(t) < E < E_{i\text{-}TEB}$ *Kaya malzemesi pekleşir ancak yine de yenilir* 4) $E_{i\text{-}TEB}(t) > E$ *Kaya malzemesi pekleşmez ve yenilmez*	0.84	5.23
DÇ koşulunda elastik modül	MPa	$E_i(t) = 55.385\ LN\ (E_i) - 255.83$	1) $E_{i\text{-}DÇ} > E$ *Duraylı* 2) $E_{i\text{-}DÇ} < E$ *Duraysız* *3)* $E_{i\text{-}DÇ}(t) < E < E_{i\text{-}TEB}$ *Kaya malzemesi pekleşir ancak yine de yenilir* 4) $E_{i\text{-}DÇ}(t) > E$ *Kaya malzemesi pekleşmez ve yenilmez*	0.76	5.24
Kohezyon	MPa	$c(t) = 0.7234\ c^{1.0264}$	1) $c_i > c$ *Duraylı* 2) $c_i < c$ *Duraysız* 3) $c_i(t) < c < c_i$ *Kaya malzemesi pekleşir ancak yine de yenilir* 4) $c_i(t) > c$ *Kaya malzemesi pekleşmez ve yenilmez*	0.92	5.27
İçsel sürtünme açısı	(°)	$\phi(t) = 3.8315\ \phi^{0.6708}$	1) $\phi_i > c$ *Duraylı* 2) $\phi_i < c$ *Duraysız* 3) $\phi_i(t) < \phi < \phi_i$ *Kaya malzemesi pekleşir ancak yine de yenilir* 4) $\phi(t) > \phi$ *Kaya malzemesi pekleşmez ve yenilmez*	0.79	5.28
Yenilme sonrası elastik modül	MPa	$E_d = 4.881\ 10^{-10}\ E_i^{3.015}$		0.84	5.25
Yenilme öncesi ve sonrası elastik modül oranı	-	$E_i / E_d = 9\ 10^{-5}\ \sigma_c^{2.7198}$		0.88	5.26

5.7.1. Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde yapılan deneysel kaya mekaniği çalışmaları

Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde Kızıltaş (2019) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, ISRM (2007) tarafından önerilen bazı kaya mekaniği deney sonuçlarına ulaşılmıştır. Kaya tuzuna ait belirlenen dayanım özellikleri aşağıdaki Çizelge 5.45'te verilmiştir. Ayrıca oda-topuk madenciliği yapılan yer altı kaya tuz madeninde söz konusu olan bazı saha koşulları Çizelge 5.46'da sunulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında Kars-Kağızman kaya tuzuna ait sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma dört aşamada oluşmuştur. İlk aşamada tek eksenli basma dayanımı (UCS) üzerinde boyut etkisi araştırılmıştır. İkinci aşamada boyut etkisinin H/D≥2 durumunda görülmediği ve tek eksenli basma dayanımının 20 MPa olduğu tespit edilmiştir. Üçüncü aşamada uzun dönemli sünme deneyleri için H/D=2 koşulunda karot örnekleri (D=93 mm) hazırlanmıştır. Dördüncü aşamada sünme deneylerinde sabit yük değerleri, boyut etkisinin görülmediği UCS (20 MPa) değerinin %47, %59, %71, %82, %94, %97'ine karşılık gelen sırası ile 64kN, 80kN, 96kN, 112kN, 128kN, 132 kN alınmıştır. Sünme deneylerinin gerçekleştirildiği son aşamada, düşey ve yatay yöndeki deformasyonlar, 0.01 mm ölçüm hassasiyetine sahip komparator saatleri ile üç yıl boyunca ölçülmüştür. Normal oda sıcaklığı ve farklı sabit yükleme koşulları altında, zamana bağlı düşey ve yatay birim deformasyon davranışları belirlenmiştir. Sabit yük değerlerinde uzun dönemli sünme deneylerinden elde edilen sadece düşey birim deformasyon sonuçları Şekil 5.51a'da görülmektedir. Sunulan grafikten görüldüğü üzere sünme deneylerinde uygulanan sabit yük değeri azaldıkça birim deformasyon değerleri zaman içinde sabitleşmektedir (K-64-1). Buna karşılık K-132-1 örneğinde olduğu gibi 132 kN sabit yük değerinde malzemenin hızla deformasyona uğradığı anlaşılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen veri tabanı yardımıyla sünme modelinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle literatürde yaygın olarak ifade edilen sünme eşitliklerini dikkate alınmıştır. Literatürde 1905-2016 yılları arasında geliştirilen ve yaygın olarak görülen yirmialtı adet sünme eşitliği Özkan ve diğ., (2022) tarafından derlenmiş ve yayınlarında listelemişlerdir. Bu eşitliklerin hepsinde zaman parametresi yeralmış ayrıca sıcaklık, sabit gerilme, gaz sabiti, aktivasyon enerjisi gibi parametreler eşitliklerde kullanılmıştır. Eşitliklerin geliştirilmesinde deneysel veri tabanları istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Bu yüzden eşitliklerin hepsinde istatistiksel katsayılar yer almıştır.

Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarına dayalı sünme davranışlarının modellenmesi için Aydan (2016) tarafından önerilen yaklaşım Eşitlik 5.29 dikkate alınmıştır. Önerilen modelin (Aydan, 2016) uygulanması için SPSS(2023) kullanılmıştır.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + A(1-e^{-t/\tau 1}) + B(e^{t/\tau 2}- 1) \quad (5.29)$$

Eşitlikte verilen t zamandır. A, B, ε0, τ1, τ2 ise istatistiksel sabittir. ε0 ilk oluşan birim deformasyon olup A, B, τ1 ve τ2 sünme deneyinde uygulanan sabit gerilme seviyesine bağlı birer katsayıdır. Aydan (2016) tarafından geliştirilen visko-plastik model, sünme davranışındaki geçici, sabit ve üçüncü sünme davranışlarını içermektedir. Model, üç alt parçanın toplamından oluşmaktadır. İlk parça, geri kazanabilen elastik (visko-elastik) özellik taşıyan birim deformasyonu (ε0), ikinci (A(1-e-t/τ1)) ve üçüncü (B(et/τ2-1)) parça ise sabit gerilme değerine dayalı birim deformasyonu temsil etmektedir. Modelin, Jeremic (1994) ve Wang ve diğ. (2019) tarafından verilen genel sünme modeli ile uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 2.4, bkz. Bölüm 2).

İstatistiksel analizlerde zamana bağlı düşey birim deformasyon verileri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen istatistiksel analiz sonuçları topluca Çizelge 5.45'te, grafiksel sunumlar ise Şekil 5.51b'de verilmiştir.

Geri kazanılabilen birim deformasyon (ε0) değerlerinin 0.002-0.022 aralığında olduğu, örnek üzerindeki sabit gerilme değerlerinin artması ile ε0 değerinin arttığı Çizelge 5.45'ten görülmektedir. Benzer şekilde A ve B istatistik sabit değerlerinin sabit gerilme değerinin artması ile arttığı görülmektedir. Ancak zamana dayalı τ1 ve τ2 sabitlerinde belirli bir ilişkinin olmadığı belirlenmiştir (Çizelge 5.45).

Aydan (2016) tarafından önerilen matematiksel modelin istatistiksel başarısının yüksek R^2 (R^2>0.9) değerlerinde olduğu görülmektedir (Çizelge 5.45). Eşitlik 5.29'da görüldüğü üzere model zaman haricinde kaya tuzuna ait mekanik özellikleri (σ_c, E gibi) ve örnek üzerinde oluşturulan sabit gerilme (σ_s) değerini içermemektedir. Aydan (2016) tarafından önerilen eşitliğin sadece zaman (t) ve birim deformasyon (ε) deneysel verisi olan sünme sonuçlarının modellenmesinde oldukça başarılı olduğu bu çalışma ile belirlenmiştir.

Çizelge 5.45. Kars-Kağızman kaya tuzuna ait bazı kaya mekaniği deney sonuçları (Kızıltaş, 2019)

Deney İsmi	Sembol	Birim	Sayısal Değer	Özel Durum
Yoğunluk	γ	kN/m^3	20.734	
Nokta Yükleme Dayanım İndeksi	$I_{S(50)}$	MPa	1.508	
Anizotropi İndeksi	I_a	-	2.24	
Schmidt Sertlik Belirleme	N	-	20.4	
Tek Eksenli Basma Dayanımı	σ_c σ_c	MPa MPa	23.46 25.93	H/D ≥2, D≥50mm H/W≥2, W ≥50mm
Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian)	σ_{tB}	MPa	0.91	D≥50mm, t=D/2
Elastik Modül	E_i	MPa	1350	H/D ≥2, D≥50mm
Kohezyon	c	MPa	2.85	Tek Eksenli Basma ve Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian) Deney Sonuçları Yardımıyla
İçsel Sürtünme Açısı	ϕ	(°)	58	

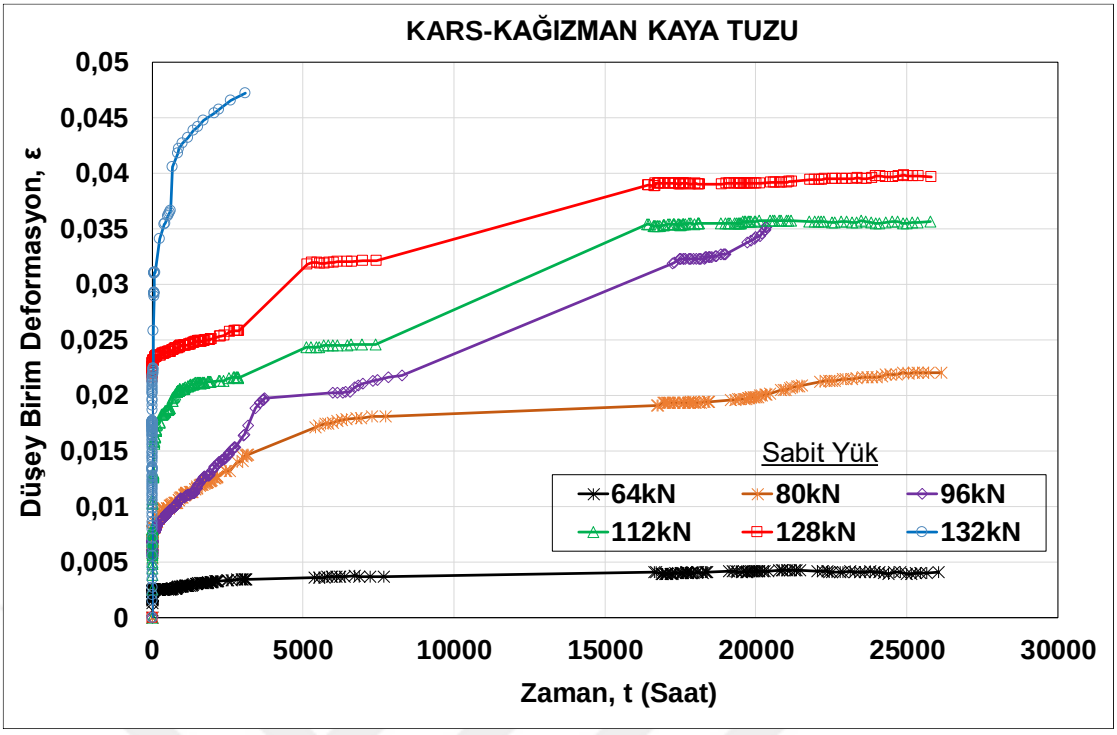
Sünme Davranışı	K-64-1	$\varepsilon_c = 0.002 + 0.002(1-e^{-t/2000}) + 0.0001\,(e^{t/20000}- 1)$	R^2=0.919
	K-80-1	$\varepsilon_c = 0.007 + 0.009\,(1-e^{-t/2246}) + 0.004\,(e^{t/30000}- 1)$	R^2=0.982
	K-96-1	$\varepsilon_c = 0.007 + 0.011\,(1-e^{-t/2692}) + 0.018\,(e^{t/30000}- 1)$	R^2=0.992
	K-112-1	$\varepsilon_c = 0.006 + 0.014\,(1-e^{-t/66.998}) + 0.069\,(e^{t/100000}- 1)$	R^2=0.975
	K-128-2	$\varepsilon_c = 0.022 + 0.022\,(1-e^{-t/10000}) + 0.0001(e^{t/20000}- 1)$	R^2=0.954
	K-132-1	$\varepsilon_c = 0.010 + 0.023\,(1-e^{-t/34.20}) + 0.175\,(e^{t/30000}- 1)$	R^2=0.932

Çizelge 5.46. Kars-Kağızman yer altı kaya tuzu madenine ait bazı saha bilgileri (Kızıltaş, 2019)

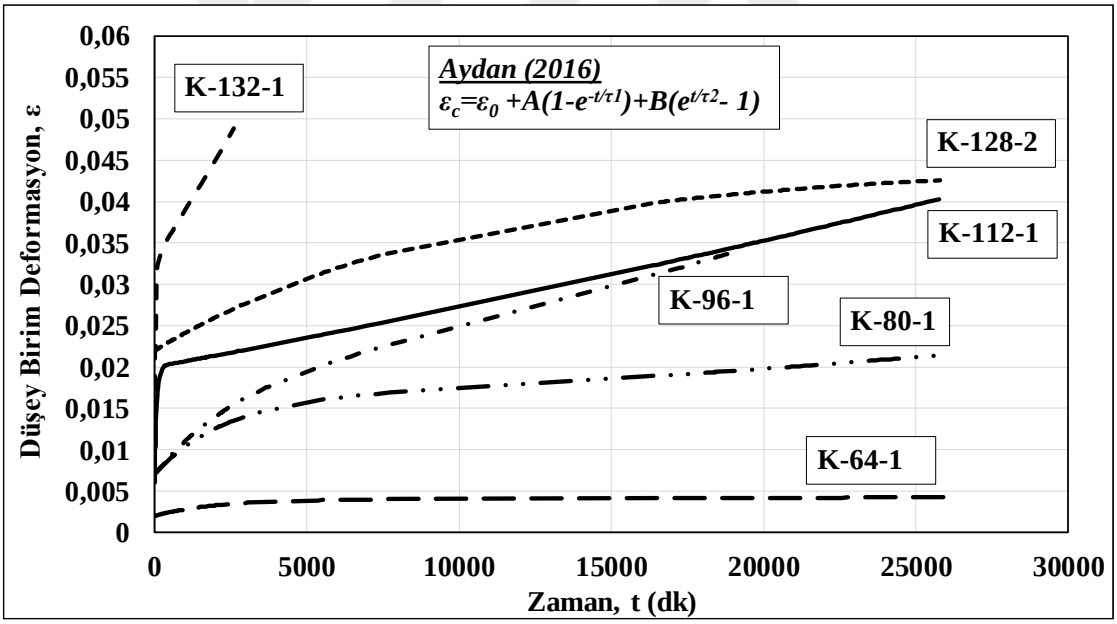
Parametre	Sembol ve Birim	Sayısal Değer
Derinlik	H (m)	72 (Vadi oluşum öncesi orijinal yükseklik H=251.5m)
Topuk Boyutu	Küp, W1=W2=W3 (m)	10
Düşey Arazi Gerilmesi	σ_z (MPa)	5.215
Asal Gerilme	σ1 (MPa) σ3 (MPa)	5.215 1.49
Gerilme Oranı	k (-)	3.5
Jeolojik Dayanım Indeksi	GSI (-)	55

Bu doktora tez çalışması ile ortaya konan yaklaşımlar (Çizelge 5.44) kullanılarak hesaplanan görgül (amprik) eşik pekleşme dayanım değerleri Çizelge 5.47'de verilmiştir.

Bu tez kapsamında doğal ve yapay kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen sünme deneylerine ait değerlendirmelere benzer bir değerlendirme, kaya tuzu için de yapılmıştır. Çizelge 5.48'de sunulan veriler Şekil 5.51a'da sunulan grafiklerden üretilmiştir. Elde edilen Çizelge 5.48 verileriyle hazırlanan grafik Şekil 5.52'de sunulmuştur. Sonuç olarak kaya tuzuna ait sınır eşik tek eksenli basma dayanım değerinin $\sigma_c(t)$ = 16.438 MPa olduğu hazırlanan Şekil 5.52'deki grafikten belirlenmiştir. Bu değerin Çizelge 5.47'de verilen eşitlikten hesaplanan $\sigma_c(t)$ = 16.36 MPa değeri ile yakın olduğu görülmüştür.



a) Kars-Kağızman kaya tuzuna ait zamana bağlı sünme deney sonuçları



b) Eşitlik 5.29'da verilen matematiksel model yardımıyla belirlenen tüm deneylere ait düşey birim deformasyon sünme davranışı (Özkan ve diğ. 2022)

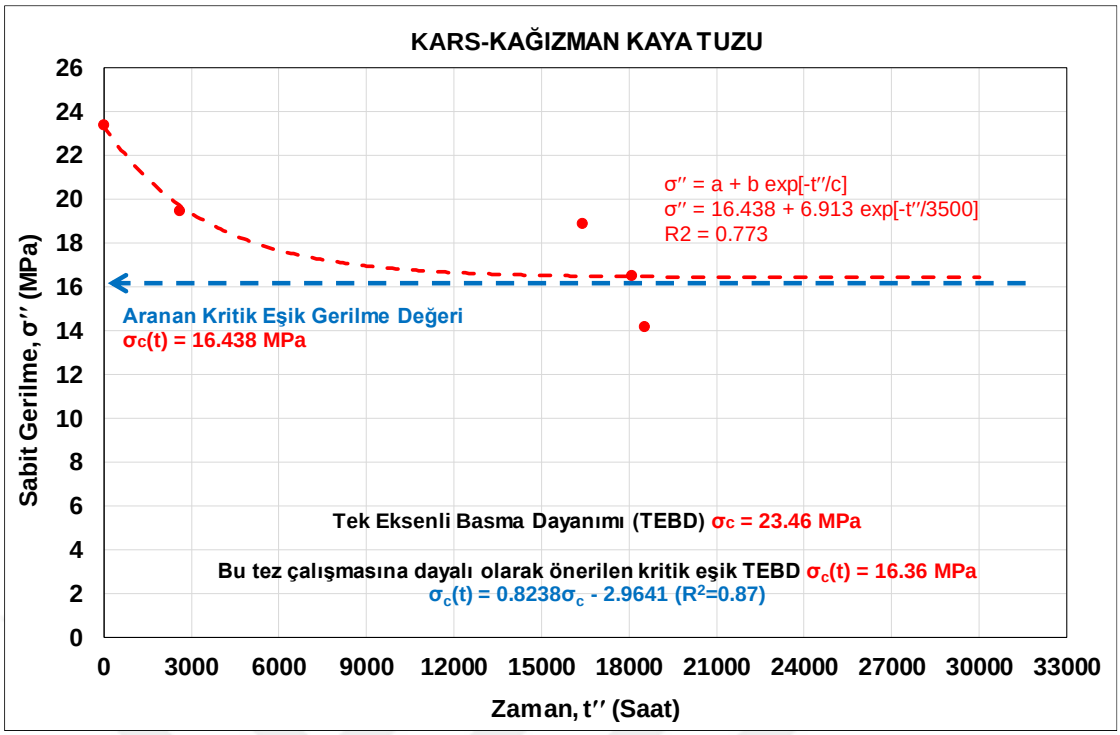
Şekil 5.51. Kars-Kağızman kaya tuzuna sünme deney sonuçları

Çizelge 5.47. Kars-Kağızman kaya tuzuna ait bazı mekanik deney sonuçlarına dayalı belirlenen kritik eşik dayanım değerleri

Dayanım Parametresi	Birim	Önerilen Eşitlik (Çizelge 5.44'ten)	Kaya Tuzuna ait Kaya Mekaniği Değerleri (Kızıltaş, 2019)	Bu Tez Çalışması ile Önerilen Eşik Mekanik Değerler
Tek eksenli basma dayanımı	MPa	$\sigma_c(t) = 0.8238\ \sigma_c - 2.9641$	23.46	16.36
Dolaylı çekme dayanımı	MPa	$\sigma_{tB}(t) = 0.6744\ \sigma_{tB} + 0.2873$	0.91	0.901
TEB koşulunda elastik modül	MPa	$E_i(t) = 6.456\ 10^{-5}\ E_i^{1.8}$	1350	27.833
DÇ koşulunda elastik modül	MPa	$E_i(t) = 55.385\ LN\ (E_i) - 255.83$	-	-
Kohezyon	MPa	$c(t) = 0.7234\ c^{1.0264}$	2.85	2.119
İçsel sürtünme açısı	(°)	$\phi(t) = 3.8315\ \phi^{0.6708}$	58	58.38
Yenilme sonrası elastik modül	MPa	$E_d = 4.881\ 10^{-10}\ E_i^{3.015}$	-	1.338 (E_i=1350MPa)
Yenilme öncesi ve sonrası elastik modül oranı	-	$E_i / E_d = 9\ 10^{-5}\ \sigma_c^{2.7198}$	-	0.48 (σ_{ci}=23.46MPa)

Çizelge 5.48. Kars-Kağızman kaya tuzuna ait sünme deneylerinden belirlenen yenilme sınır değerleri

TEBD σ_c (MPa)	Sabit Yükün Belirlenmesi için Katsayı	Sabit Sünme Gerilmesi σ''(MPa)	Sabit Sünme Yükü F (kN)	Zaman t (Saat)	Düşey Birim Deformasyon ε
23.46	1	23.46	159	0.05	0,036161386
23.46	0.83	19.47	132	2601.98	0,046599431
23.46	0.805	18.89	128	16416.58	0,038937149
23.46	0.704	16.52	112	18098.93	0,035529125
23.46	0.605	14.19	96	18530.17	0,0325
23.46	0.5	11.73	80	Sünme örneğinde yenilme oluşmamıştır.	
23.46	0.4	9.38	64	Sünme örneğinde yenilme oluşmamıştır.	
23.46	0.3	7.04	48	-	-



Şekil 5.52. Kars-Kağızman kaya tuzuna ait sünme deneylerinden tespit edilen yenilme sınır değerleri ve sınır kritik dayanım eşik değeri

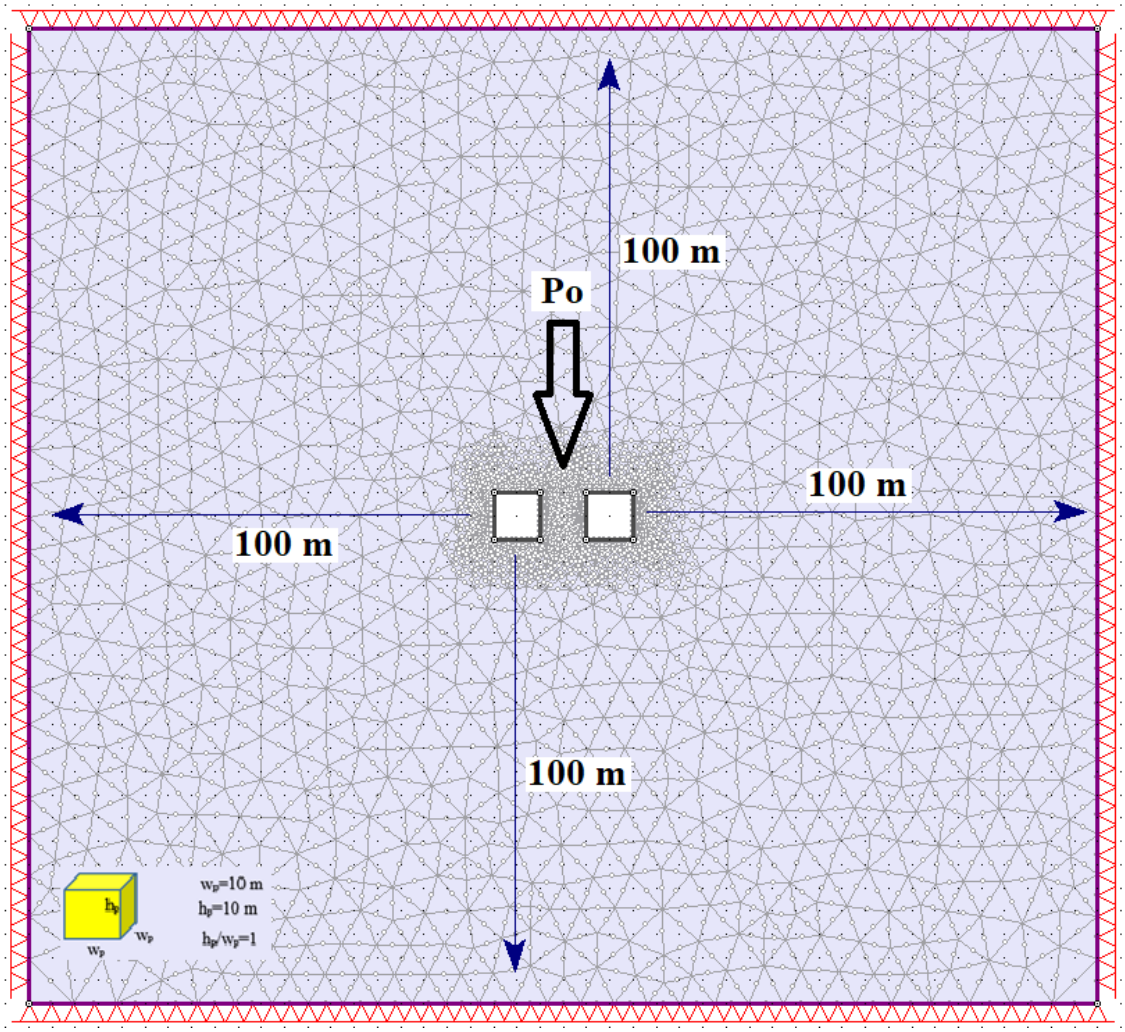
5.7.2. Kars-Kağızman kaya tuzu üzerinde yapılan sayısal analiz çalışmaları

Bu tez çalışmasında Rocscience tarafından 2011 yılında geliştirilen iki boyutlu Phase2 (v8.0) programı kullanılmıştır (Registered to: Selcuk University 3191A). Sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak çalışan Phase^2 V8.0 programı, yeraltı ve yerüstü zemin ve kayalarda açılan açıklıklarda gerilme ve deformasyon çözümlemeleri için kullanılmaktadır. Program mühendislik projelerinde oldukça sık kullanılan ve kullanımı kolay olan bir programdır (Geniş ve Derin, 2016). Bir veya daha fazla yeraltı kazı açıklığının analizinde sonuçlar verebilmektedir. Hoek-Brown (H-B), Mohr-Coulomb (M-C), Drucker-Prager ve Cam – Clay yenilme ölçütleri ile elastik ve elastoplastik malzemede sayısal analiz yapılabilmektedir. Bu tez çalışması için elasto-plastik malzeme davranışları için Mohr-Coulomb (M-C) yenilme ölçütü kullanılmıştır. Düşey ve yatay birincil gerilmelerin birbirine eşit olduğu varsayılmıştır ($P_v=P_{h1}=P_{h2}$, $k=[P_{h1} / P_v] = [P_{h2} / P_v] = 1$)

Kağızman yeraltı kaya tuz madeni için ISRM (2007) tarafından önerilen kaya mekaniği sonuçları ve bu tez çalışması sonucunda ortaya konan kritik eşik dayanım değerleri temel alınarak mevcut topuklarda ve galeri tavan – tabanlarında farklı birincil

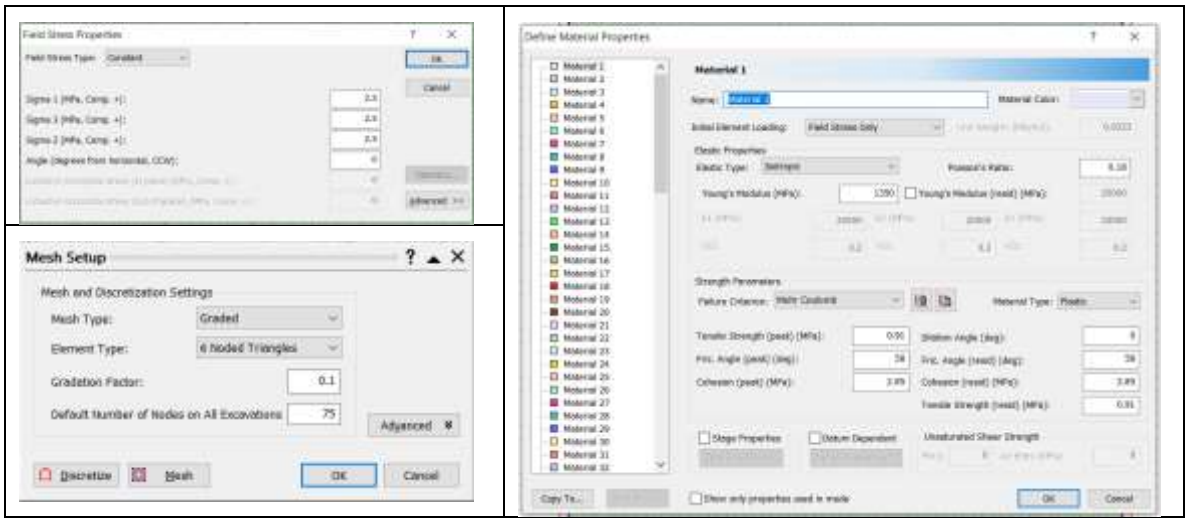
gerilmelerin (Po) etkisi ile oluşan gerilme ve deformasyon değişimleri iki boyutlu sayısal çözümlemeler yardımıyla belirlenmiştir. Sayısal analizler için hazırlanan iki boyutlu katı modelde kullanılan malzeme özellikleri yukarıda Çizelge 5.45 ve Çizelge 5.47'de sunulmuştur. Hazırlanan iki boyutlu katı model Şekil 5.53'te gösterilmiştir. Katı modelde tek topuk tasarlanmıştır. Topuğun iki kenarındaki açıklıklardan itibaren 100'er metre mesafe konmuş böylece arazi gerilmelerinin değişmediği sınırlara ulaşılmıştır. Burada hazırlanan maden topuğu üzerine etki eden düşey arazi gerilmesi ($P_o=\sigma_v$) sırası ile 2.5MPa, 5MPa, 7.5MPa, 10MPa, 12.5MPa, 15MPa, 17.5MPa, 20MPa, 22.5MPa ve 25MPa alınmıştır. Her bir P_o arazi gerilmesi için analiz sonuçları programdan alınmıştır. Hazırlanan iki boyutlu katı model içinde malzemenin aynı olduğu varsayılmıştır. Böylece Çizelge 5.45 verisi (Orjjinal standart dayanım-OSD) için ve ayrıca geometrisi aynı ancak malzeme özellikleri Çizelge 5.47 (Kritik eşik dayanımı-KED) olan iki temel model hazırlanmıştır. Daha sonra her iki model için ayrı ayrı P_o değerleri 2.5MPa-25MPa arasında değiştirilmiştir. Sonuç olarak OSD için 10 adet, KED için 10 adet olmak üzere toplamda 20 adet Phase^2 program dosyası hazırlanmıştır.

Phase^2 V8.0'de sayısal analizlerde kullanılan kaya malzeme özellikleri ve başlangıç birincil gerilme veri girişi ile mesh oluşturma ara yüzleri Şekil 5.54'te sunulmuştur.

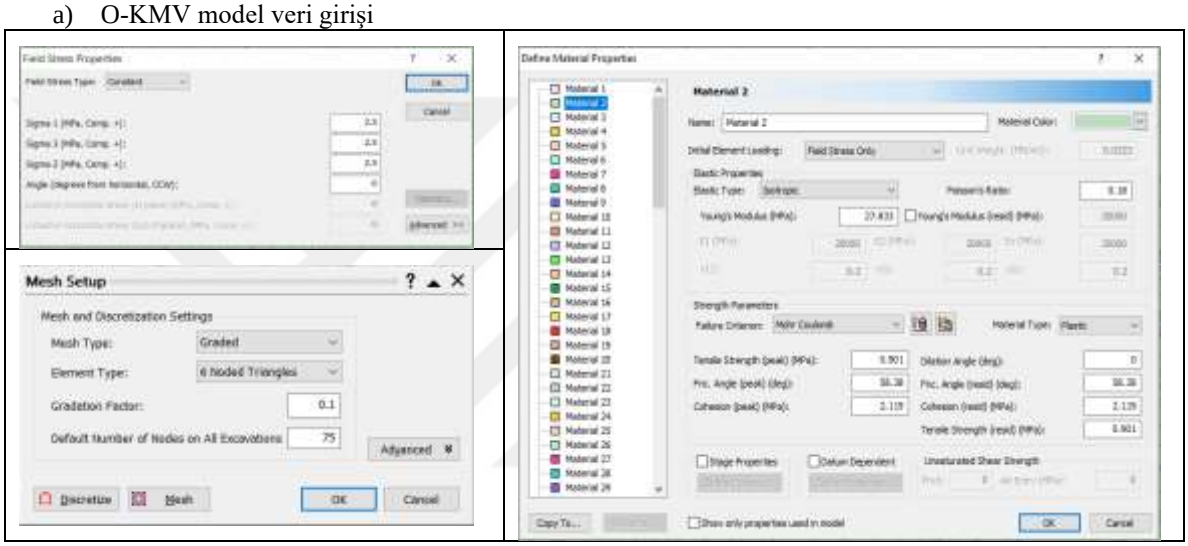


Şekil 5.53. Sayısal analizlerde kullanılan iki boyutlu katı model

Yukarıda belirtildiği şekilde hazırlanan analiz dosyaları sırası ile çözümlenmiştir. Değerlendirme çalışmalarında aşağıda sunulan tipik gösterimdeki gibi topuğu düşey kesen VL1, VL2 ve VL3 ölçüm hatları oluşturulmuştur. Ayrıca topuğu yatay kesen HL1, HL2 ve HL3 izleme hatları oluşturulmuştur (Şekil 5.55). Bütün analiz dosyalarında bu ölçüm hatları üzerindeki sabit koordinat noktalarından sırası ile toplam deformasyon (U, mm), en büyük asal gerilme (σ1, MPa), kaya malzemesindeki çekme ve makaslama çatlaklarına ait sayı (#), yenilen eleman sayısı (%), emniyet katsayısı (SF, σ1/σc ve σ1/σc(t)) değerleri alınmıştır. Daha sonra P_o değişimini incelemek amacıyla ilgili grafikler hazırlanmıştır. Burada tipik bir örnek olarak sadece P_o=12.5 MPa için elde edilen sonuçlar verilmiş diğer P_o değerlerine karşılık elen çıktılar EK-17'de sunulmuştur.

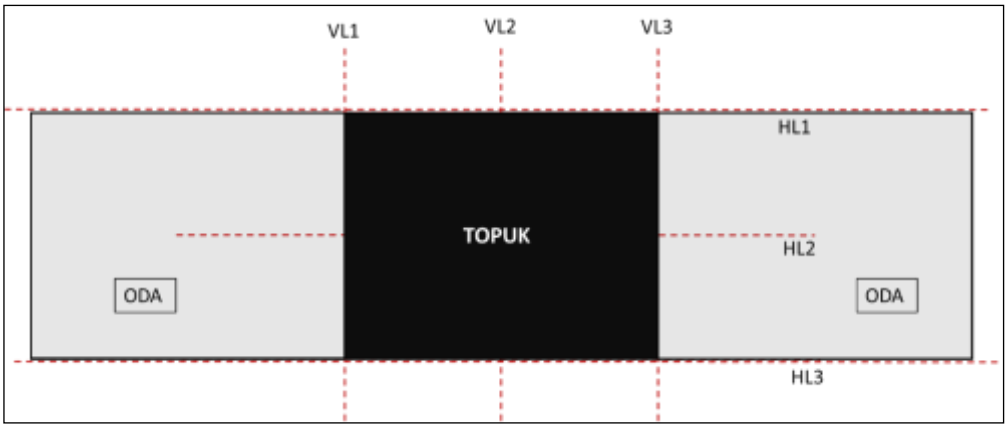


a) O-KMV model veri girişi



b) KE-KMV model veri girişi

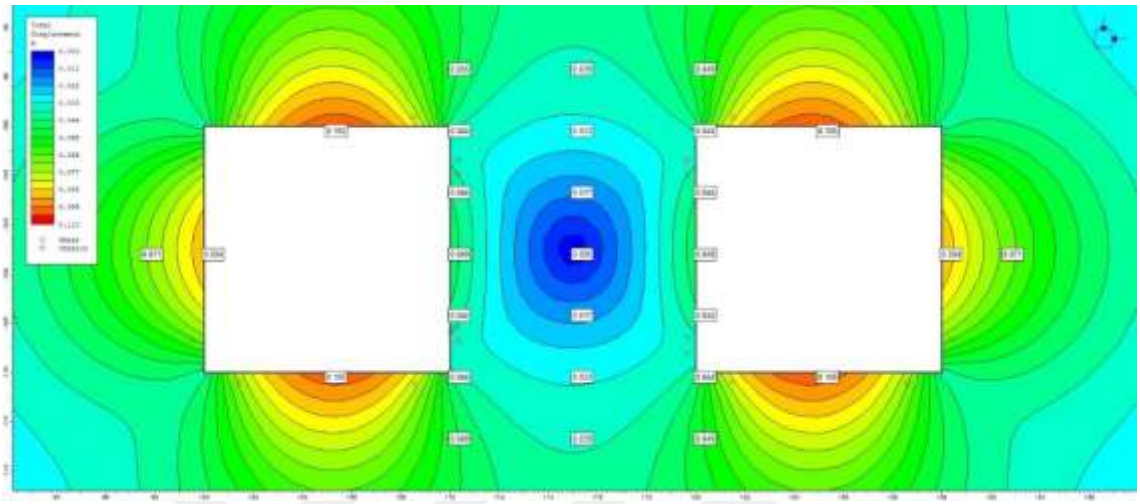
Şekil 5.54. Sayısal analizlerde kullanılan kaya malzeme özellikleri ve başlangıç birincil gerilme veri girişi ile ve mesh oluşturma ara yüzleri.



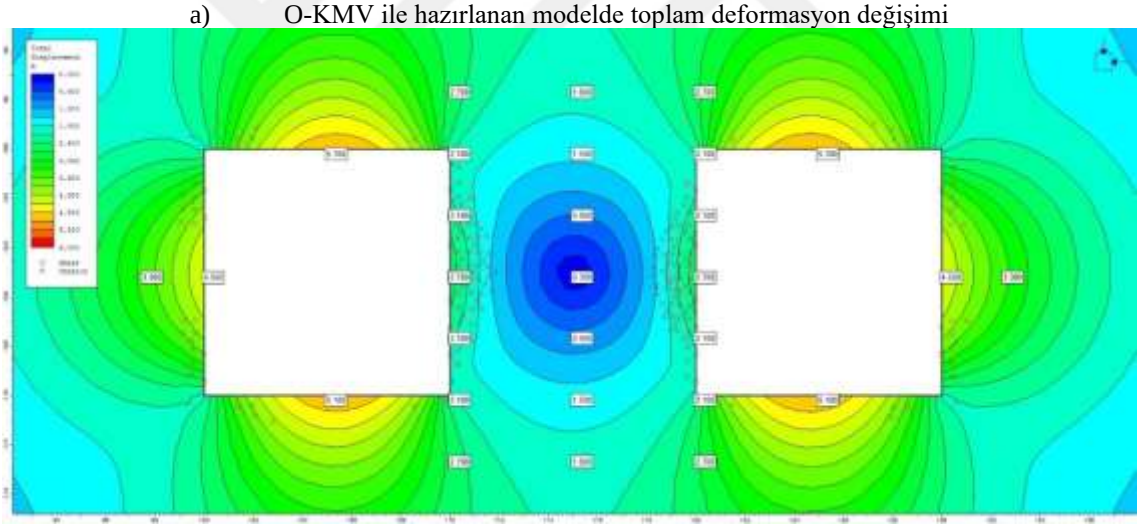
Şekil 5.55. Sayısal analiz çıktılarında veri üretilen düşey ve yatay hatların tipik bir sunumu

Düşey arazi gerilmesi P_o=12.5 MPa için topuk ve bitişiğindeki açıklık etrafında oluşan toplam deformasyon değişimleri Şekil 5.56'da sunulmuştur. Şekil üzerindeki

ölçüm hatlarının tanımı Şekil 5.55'te gösterilmiştir. Topuk üzerinde ve açıklıklar civarında toplam deformasyon değerlerinin O-KMV (Orijinal Kaya Mekaniği Verisi)'ye nazaran KE-KMV (Kritik Eşik-Kaya Mekaniği Verisi) ile hazırlanan modelde daha yüksek olduğu görülmektedir.



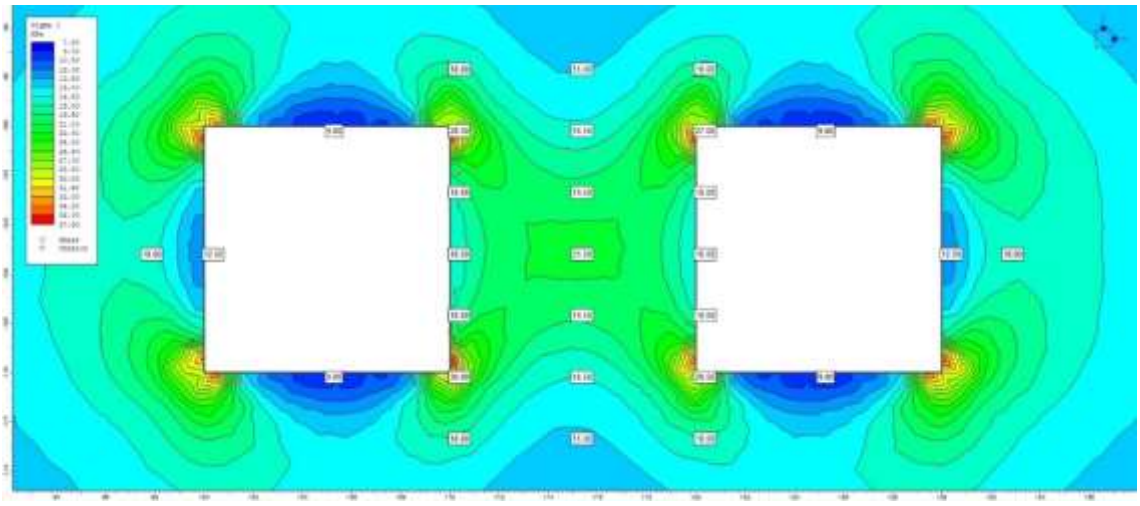
a) O-KMV ile hazırlanan modelde toplam deformasyon değişimi



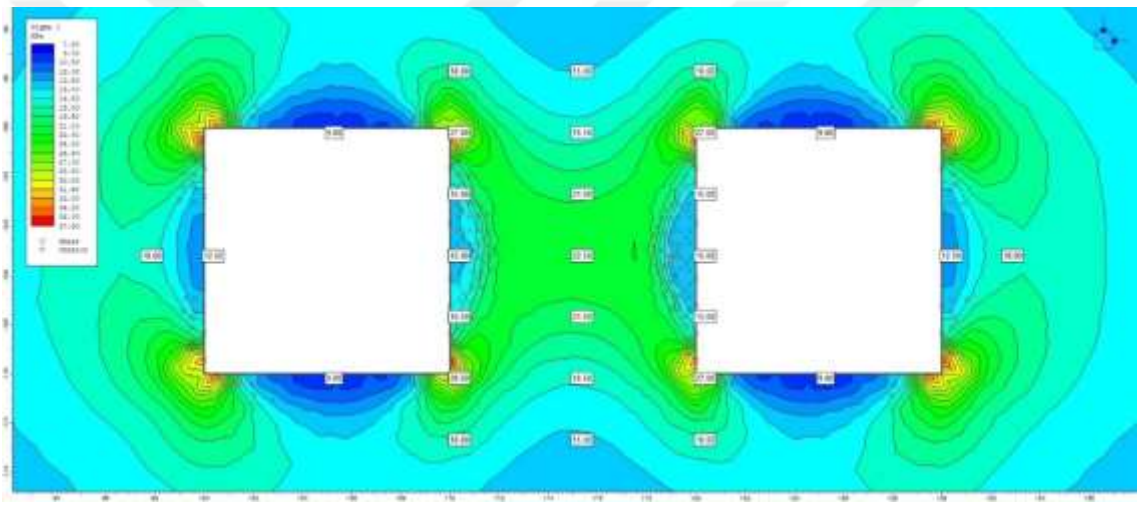
b) KE-KMV ile hazırlanan modelde toplam deformasyon değişimi

Şekil 5.56. Düşey arazi gerilmesi (P_o) 12.5 MPa için O-KMV ve KE-KMV modellerine ait toplam deformasyon sonuçları

Aynı düşey arazi gerilmesi P_o=12.5 MPa koşulunda topuk etrafında oluşan birincil asal gerilme (σ1) değişimleri Şekil 5.57'de sunulmuştur. Şekil 5.55'te gösterilen ölçüm hatlarına ait sonuçlar incelendiğinde topuk üzerinde ve açıklıklar civarında oluşan birincil asal gerilme (σ1) değerlerinin KE-KMV (Kritik Eşik-Kaya Mekaniği Verisi) ile hazırlanan modelde daha yüksek olduğu görülmektedir.



a) O-KMV ile hazırlanan modelde birincil asal gerilme (σ1) değişimi



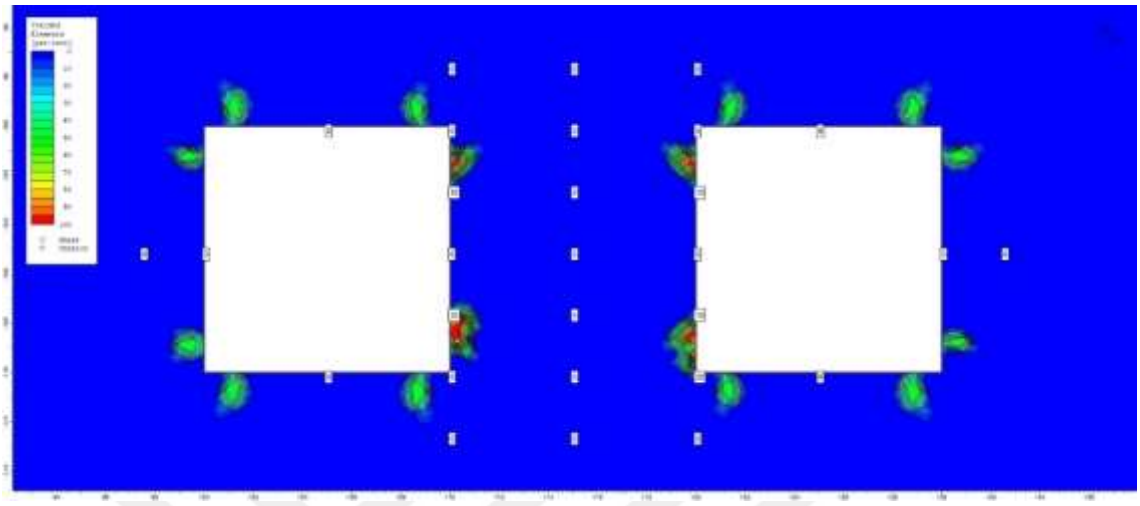
b) KE-KMV ile hazırlanan modelde birincil asal gerilme (σ1) değişimi

Şekil 5.56. Düşey arazi gerilmesi (P_o) 12.5 MPa için O-KMV ve KE-KMV modellerine ait birincil asal gerilme (σ1) sonuçları

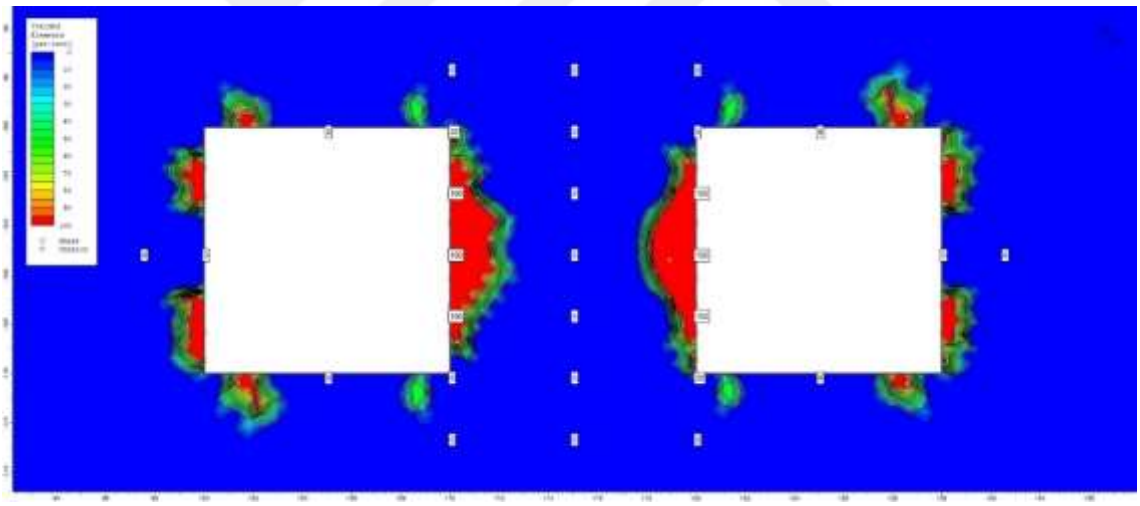
Modelde oluşturulan düşey arazi gerilmesi P_o=12.5 MPa için topuk etrafında oluşan yenilen eleman sayılarının değişimleri Şekil 5.58'de sunulmuştur. Ölçüm hatlarına ait sonuçlar incelendiğinde topuk üzerinde ve açıklıklar civarında oluşan yenilen eleman değerlerinin O-KMV (Orijinal Kaya Mekaniği Verisi) ile hazırlanan modelde daha az olduğu görülmektedir.

Düşey arazi gerilmesi P_o=12.5 MPa için topuk ve bitişiğindeki açıklık etrafında oluşan emniyet katsayı değişimleri Şekil 5.59'de sunulmuştur. Şekil üzerindeki ölçüm hatlarının tanımı Şekil 5.55'te gösterilmiştir. Topuk üzerinde ve açıklıklar civarında emniyet katsayısı SF değerlerinin O-KMV (Orijinal Kaya Mekaniği Verisi)'ye nazaran

KE-KMV (Kritik Eşik-Kaya Mekaniği Verisi) ile hazırlanan modelde daha yüksek olduğu görülmektedir. Sayısal analizlerde emniyet katsayısı O-KMV için $SF=\sigma_1/\sigma_c$ (σ_c = 23.46MPa) ve KE-KMV için $SF=\sigma_1/\sigma_c(t)$ ($\sigma_c(t)$ = 16.36MPa) alınmıştır.

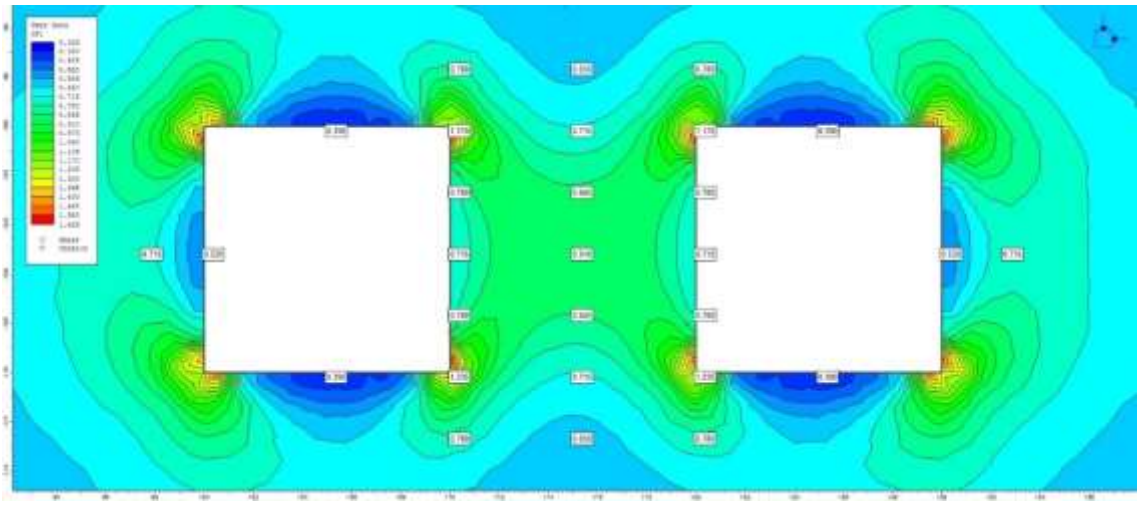


a) O-KMV ile hazırlanan modelde yenilen eleman değişimi

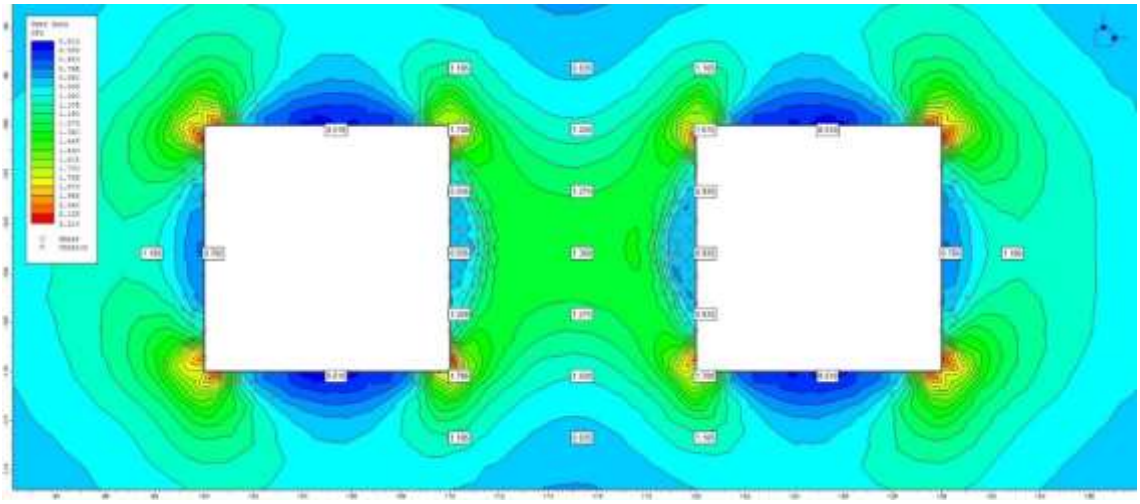


b) KE-KMV ile hazırlanan modelde yenilen eleman değişimi

Şekil 5.58. Düşey arazi gerilmesi (P_o) 12.5 MPa için O-KMV ve KE-KMV modellerine ait yenilen eleman sonuçları



a) O-KMV ile hazırlanan modelde emniyet katsayısı SF değişimi, SF=σ_1/σ_c (σ_c = 23.46MPa)



b) KE-KMV ile hazırlanan modelde emniyet katsayısı SF değişimi, SF=$\sigma_1/\sigma_c(t)$ ($\sigma_c(t)$ = 16.36MPa)

Şekil 5.59. Düşey arazi gerilmesi (P_o) 12.5 MPa için O-KMV ve KE-KMV modellerine ait emniyet katsayısı SF değişimi sonuçları

Po=12.5 MPa düşey arazi gerilme durumunda elde edilen sayısal analiz sonuçları yukarda tipik örnek olarak verilmiştir. O-KMV ve KE-KMV modelleri için diğer Po değerlerine ait sonuçlar topluca EK17'de sunulmuştur. Tüm bu sayısal analiz sonuçlarından VL2 ölçüm hattına ait veriler topluca aşağıdaki Çizelge 5.49 ve 5.50 de verilmiştir.

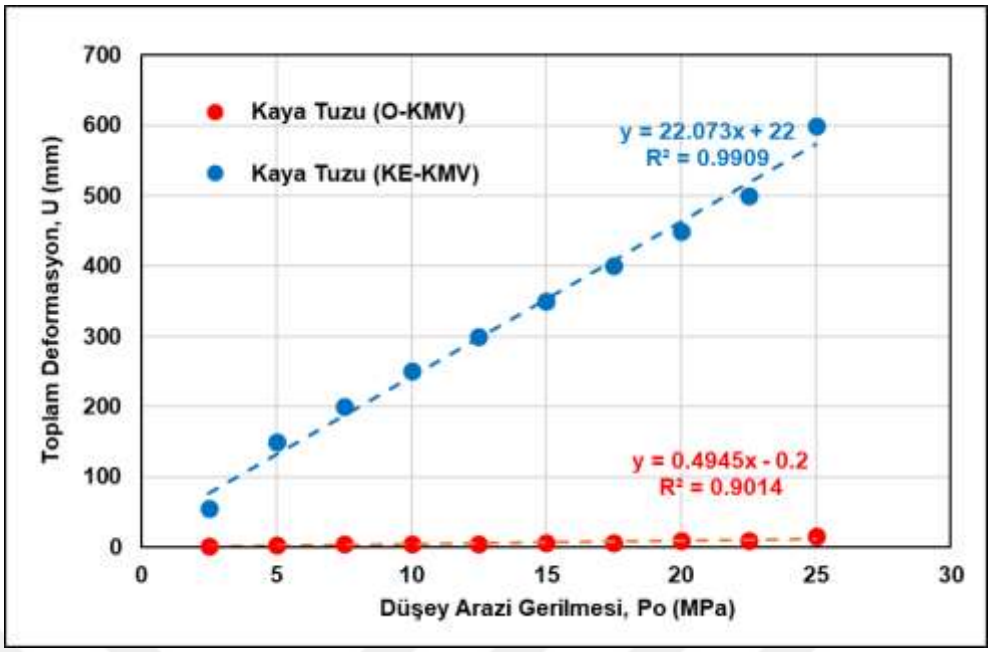
Çizelge 5.49. O-KMV modellerine ait sayısal analiz sonuçları

Po	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF (σ1/σc)
(MPa)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)
2.5	2	4.3	0	0	0.180
5	2.5	8.2	0	0	0.375
7.5	4	13.05	13	0	0.560
10	4.5	16.5	13	0	0.750
12.5	5	21	23	0	0.910
15	7	26	110	0	1.125
17.5	7	30	157	0	1.275
20	9	35	224	0	1.490
22.5	10	40	273	0	1.755
25	15	45	312	0	1.950

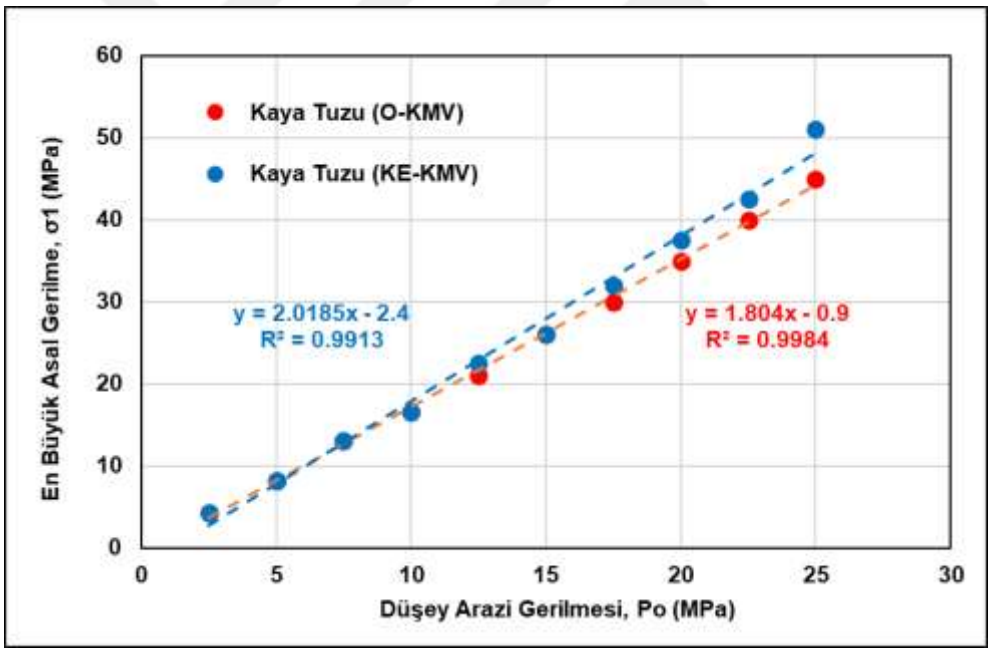
Çizelge 5.50. KE-KMV modellerine ait sayısal analiz sonuçları

Po	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF (σ1/σc(t))
(MPa)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)
2.5	55	4.3	0	0	0.260
5	150	8.2	2	0	0.520
7.5	200	13.05	13	0	0.755
10	250	16.5	31	0	1.020
12.5	300	22.5	140	0	1.360
15	350	26	223	0	1.600
17.5	400	32	288	0	1.950
20	450	37.5	326	0	2.250
22.5	500	42.5	360	0	2.550
25	600	51	385	0	3.200

Yukarda sunulan çizelge verileri kullanılarak her iki modele ait (O-KMV ve KE-KMV) düşey arazi gerilmesi (Po) - toplam deformasyon (u) grafiği Şekil 5.60, düşey arazi gerilmesi (Po) -en büyük asal gerilme (σ_1) değişimi Şekil 5.61, düşey arazi gerilmesi (Po) -yenilen eleman sayısı (#) değişimi Şekil 5.62 ve düşey arazi gerilmesi (Po) - emniyet katsayısı (SF) Şekil 5.63'de sırasıyla sunulmuştur.



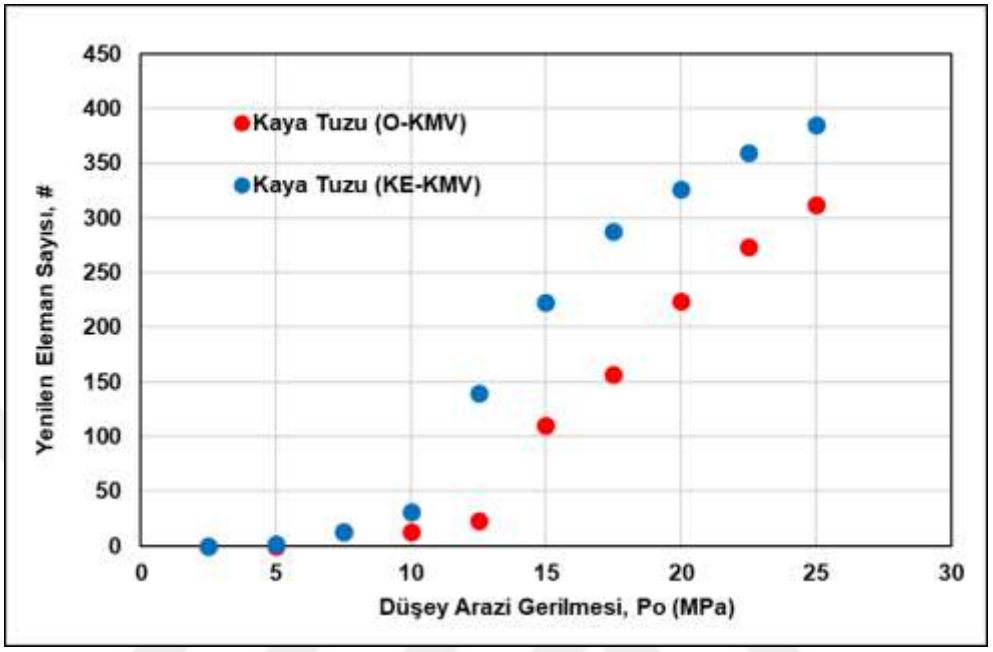
Şekil 5.60. Düşey arazi gerilmesi (Po) - toplam deformasyon (u) grafiği



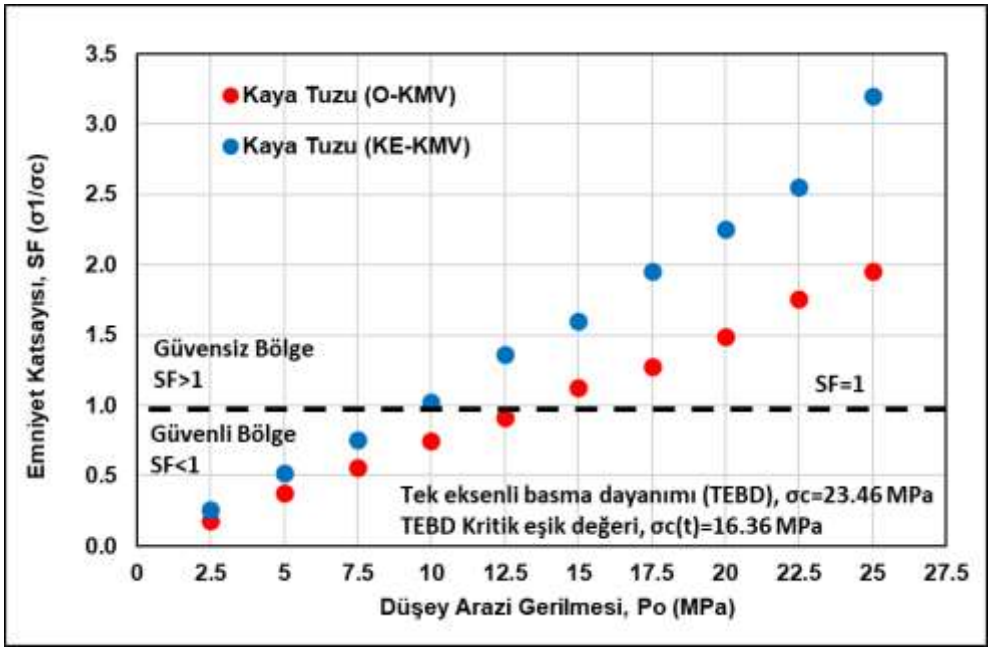
Şekil 5.61. Düşey arazi gerilmesi (Po) -en büyük asal gerilme (σ_1) değişimi grafiği

Şekil 5.60 düşey arazi gerilmesi (Po) - toplam deformasyon (u) grafiğinden görüldüğü üzere KE-KMV'de toplam deformasyon O-KMV'ye göre oldukça fazladır. Düşey arazi gerilmesi arttıkça her iki modele ait toplam deformasyon farkı artmaktadır. Örneğin Po=15 MPa için aradaki deformasyon farkı 343 mm olmaktadır (Çizelge 5.49 ve 5.50). Şekil 5.61'de düşey arazi gerilmesi (Po) - en büyük asal gerilme (σ_1) değişimi

grafiğinden en büyük asal gerilmelerin KE-KMV'de bir miktar büyük olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin Po=20 MPa için bu değerler sırasıyla 35 MPa (O-KMV) ve 37.5 MPa (KE-KMV) olmuştur (Çizelge 5.49 ve 5.50).



Şekil 5.62. Düşey arazi gerilmesi (Po) -yenilen eleman sayısı (#) değişimi grafiği



Şekil 5.63. Düşey arazi gerilmesi (Po) -emniyet katsayısı (SF) değişimi grafiği

Şekil 5.62 düşey arazi gerilmesi (Po) - yenilen eleman sayısı (#) değişimi grafiğinden KE-KMV'de yenilen eleman sayısının O-KMV'ye göre daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Şekil 5.62'den Po=15 MPa için yenilen eleman sayıları O-KMV için 110 adet, KE-KMV için 223 adet olduğu Çizelge 5.49 ve 5.50'den görülmektedir.

Şekil 5.63'te sunulan düşey arazi gerilmesi (Po) - emniyet katsayısı (SF) grafiğinden O-KMV ile KE-KMV için belirlenen emniyet katsayıları arasında önemli bir fark olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu grafiğin hazırlanmasında her iki modele (O-KMV ve KE-KMV) ait elde edilen en büyük asal gerilme değerleri (σ_1) O-KMV için σ_c= 23.46 MPa değerine bölünürken, KE-KMV için ise $\sigma_c(t)$= 16.36 MPa değerine bölünmüştür. Böylelikle emniyet katsayısı (SF) değerleri elde edilmiştir. Ancak burada SF≤ 1 durumu duraylılığı tanımlarken SF>1 duraysızlığı tanımlamaktadır. Bu çerçevede Şekil 5.63 değerlendirildiğinde örneğin Po=12.5 MPa için O-KMV durumunda ortaya çıkan SF=0.91 iken KE-KMV durumunda ortaya çıkan SF değerinin 1.36 olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka ifade ile bu ortam O-KMV'ye göre güvenli iken KE-KMV'ye göre güvensiz olarak değerlendirilebilir. Bu tez çalışmasında ortaya konan problemin çözümü ile farklı dayanıma sahip kaya malzemelerinin kritik eşik dayanım değerlerinin belirlenmesine yönelik eşitlikler önerilmiştir.

Örnek uygulama için seçilen kaya tuzuna ait ISRM (2007) önerilerine göre ulaşılan kaya mekaniği sonuçları yukarıda Çizelge 5.45'te sunulurken bu tez çalışmasıyla ortaya konan kritik eşik dayanım değerleri Çizelge 5.47'de verilmiştir. Çizelge 5.45 verilerine dayalı olarak O-KMV sayısal modeli ve Çizelge 5.47 verilerine dayalı olarak KE-KMV sayısal modeli hazırlanmış takibinde sayısal analiz sonuçları yukarda tartışılmıştır. Saha mühendisi O-KMV sayısal analiz sonuçlarına göre SF=0.91 olduğu için maden ocağında topuklarda bir problem olmadığını düşünerek üretime devam ederken aslında göz ardı ettiği kritik eşik değerleri sonucunda bu topuklarda emniyetsiz bir durum ortaya çıkacaktır (SF=1.36). Sonuç olarak ciddi can ve mal kayıplarıyla karşı karşıya kalınabilecektir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tez çalışması sonucunda ulaşılan sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışmalara yön verebilecek öneriler takip eden bölümde sunulmuştur.

6.1 Sonuçlar

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalara dayalı bu tez çalışmasından çıkan sonuçlar dört alt başlıkta toplanmıştır. Bunlar sırası ile kaynak araştırmasına dayalı sonuçlar, deneysel bulgulara dayalı sonuçlar, sayısal analiz sonuçları ve genel değerlendirme sonuçları olmuştur.

1. Kaynak araştırmasına dayalı sonuçlar

Yeraltı kaya mühendislik çalışmalarında oluşturulan boşlukların görgül ve sayısal tahkimat analizlerinde kaya malzeme ve kütle özellikleri ile birincil arazi gerilmelerinin büyüklükleri ve yönlerinin belirlenmesi büyük bir önem oluşturmaktadır. ISRM ve ASTM gibi uluslararası kuruluşların önerileri doğrultusunda laboratuvar ve sahada kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmektedir. Tasarım analizlerine sıklıkla girdi parametresi olarak kullanılan fiziko-mekanik kaya malzeme özellikleri; tek eksenli basma dayanımı (σc), Brazilian çekme dayanımı (σtB), elastik deformabilite (E, υ), direkt makaslama dayanımı (τ), üç eksenli basma dayanımı ($\sigma 1$, $\sigma 3$), kohezyon ve içsel sürtünme açısı (c, ϕ), yoğunluk (γ), nokta yükleme dayanımı (Is(50)) deneyleri ile belirlenmektedir. Ayrıca tasarım analizlerinde ihtiyaç duyulan kaya kütle özellikleri, laboratuvar bulguları ve yaygınca kullanılan RMR, Q, GSI, M-RMR gibi kaya kütle sınıflama sistemleri yardımıyla belirlenebilmektedir. Bunlar yerinde tek eksenli basma dayanımı (σcm), yerinde elastik modül (Em) değeri, yerinde kohezyon (cm) ve içsel sürtünme açıları (ϕm)'dır. Bu tasarım girdi parametrelerinde zaman etkisi yeterince dikkate alınmamaktadır. Sabit bir gerilme altında kalan bir kaya malzemesinde gözlenen pekleşme ve yumuşama sonucunda zamana dayalı olarak kaya malzemesinin yenildiği laboratuvar deneyleri yanında sahada yapılan ölçüm ve gözlemlerden anlaşılmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından ortaya konun bu değerlendirmeler ışığında bu çalışmanın amacı, laboratuvar ortamında seçilen model doğal (mermer) ve yapay (beton) kayalar

üzerinde farklı gerilmeler altında ortaya çıkan zamana dayalı pekleşme davranışların belirlenmesi, değerlendirilmesi ve genel bir yaklaşımın geliştirilmesi olmuştur.

2. Deneysel bulgulara dayalı sonuçlar

Literatür araştırmasına dayalı olarak bu tez çalışmasında ortaya konan problemin çözümü için laboratuvar ortamında bir seri kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada zamanın etkisini incelemek üzere 0-20 MPa, 20-40 MPa, 40-60 MPa, 60-80 MPa, 80-100 MPa dayanım aralıklarında 5 adet model doğal (mermer) kaya malzemesi (DKM) ve yine aynı dayanım aralıklarında kalan 5 adet model yapay (beton) kaya malzemesi (YKM) belirlenmiştir. Hazırlanan örnekler üzerinde üç farklı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

a) Temel kaya mekaniği deneyleri

Temel kaya mekaniği deneyleri kapsamında DKM ve YKM model kaya malzemeleri deneylere maruz bırakılarak aşağıda sunulan genel sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Tek eksenli gerilme altında tek eksenli basma dayanımı (TEBD) deney sonuçları

σ_c = 12.57 MPa (DKM-1)	σ_c = 27.33 MPa (YKM-1)
σ_c = 20.11 MPa (DKM-2)	σ_c = 48.04 MPa (YKM-2)
σ_c = 49.89 MPa (DKM-3)	σ_c = 64.89 MPa (YKM-3)
σ_c = 56.90 MPa (DKM-4)	σ_c = 84.60 MPa (YKM-4)
σ_c = 132.72 MPa (DKM-5)	σ_c = 80.01 MPa (YKM-5)

2. Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme dayanımı (Brazilian DÇD) deneyleri

σ_{tB} = 1.43 MPa (DKM-1)	σ_{tB} = 1.98 MPa (YKM-1)
σ_{tB} = 0.83 MPa (DKM-2)	σ_{tB} = 3.09 MPa (YKM-2)
σ_{tB} = 6.84 MPa (DKM-3)	σ_{tB} = 4.13 MPa (YKM-3)
σ_{tB} = 3.22 MPa (DKM-4)	σ_{tB} = 5.46 MPa (YKM-4)
σ_{tB} = 17.01 MPa (DKM-5)	σ_{tB} = 4.99 MPa (YKM-5)

3. Tek eksenli gerilme altında basma-deformabilite (TEB-DEF) deneyleri

Yenilme öncesi	Yenilme sonrası
$E_{i\text{-}TEB}$ = 2876.10 MPa (DKM-1)	$E_{i\text{-}TEB}$ = 3563.49 MPa (YKM-1)
$E_{i\text{-}TEB}$ = 2941.46 MPa (DKM-2)	$E_{i\text{-}TEB}$ = 17632.56 MPa (YKM-2)
$E_{i\text{-}TEB}$ = 20136.99 MPa (DKM-3)	$E_{i\text{-}TEB}$ = 6858.92 MPa (YKM-3)
$E_{i\text{-}TEB}$ = 25823.1 MPa (DKM-4)	$E_{i\text{-}TEB}$ = 14644.48 MPa (YKM-4)
$E_{i\text{-}TEB}$ = 23115.21 MPa (DKM-5)	$E_{i\text{-}TEB}$ = 8690.88 MPa (YKM-5)
Yenilme öncesi	Yenilme sonrası
$E_{d\text{-}TEB}$ = 594.75 MPa (DKM-1)	$E_{d\text{-}TEB}$ = 5721.752 MPa (YKM-1)
$E_{d\text{-}TEB}$ = 8223.53 MPa (DKM-2)	$E_{d\text{-}TEB}$ = 5593.76 MPa (YKM-2)
$E_{d\text{-}TEB}$ = 3594.34 MPa (DKM-3)	$E_{d\text{-}TEB}$ = 1256.72 MPa (YKM-3)
$E_{d\text{-}TEB}$ = 9894.15 MPa (DKM-4)	$E_{d\text{-}TEB}$ = 1063.36 MPa (YKM-4)

$E_{d\text{-}TEB}$ = 2666.67 MPa (DKM-5) $E_{d\text{-}TEB}$ = 814.14 MPa (YKM-5)

4. Tek eksenli gerilme altında dolaylı çekme-deformabilite deneyleri

Yenilme öncesi	Yenilme öncesi
$E_{i\text{-}DÇ}$ = 138.02 MPa (DKM-1)	$E_{i\text{-}DÇ}$ = 414.38 MPa (DKM-1)
$E_{i\text{-}DÇ}$ = 198.43 MPa (DKM-2)	$E_{i\text{-}DÇ}$ = 762.09 MPa (DKM-2)
$E_{i\text{-}DÇ}$ = 968.42 MPa (DKM-3)	$E_{i\text{-}DÇ}$ = 834.83 MPa (DKM-3)
$E_{i\text{-}DÇ}$ = 303.43 MPa (DKM-4)	$E_{i\text{-}DÇ}$ = 1915.39 MPa (DKM-4)
$E_{i\text{-}DÇ}$ = 3479.45 MPa (DKM-5)	$E_{i\text{-}DÇ}$ = 907.97 MPa (DKM-5)

5. Yoğunluk (Y, γ) - Gözeneklilik (G) - Nem içeriği (N) belirleme deneyleri

γ = 10.08 kN/m^3	G = 22.06 %	N = 33.53 %	DKM-1
γ = 22.30 kN/m^3	G = 5.32 %	N = 8.52 %	DKM-2
γ = 25.00 kN/m^3	G = 1.66 %	N = 2.60 %	DKM-3
γ = 27.10 kN/m^3	G = 0.20 %	N = 0.32 %	DKM-4
γ = 27.20 kN/m^3	G = 2.09 %	N = 3.26 %	DKM-5
γ = 22.30 kN/m^3	G = 55.19 %	N = 15.34 %	YKM-1
γ = 23.40 kN/m^3	G = 43.70 %	N = 12.07 %	YKM-2
γ = 23.70 kN/m^3	G = 43.15 %	N = 12.03 %	YKM-3
γ = 23.60 kN/m^3	G = 22.48 %	N = 6.21 %	YKM-4
γ = 23.70 kN/m^3	G = 21.50 %	N = 6.02 %	YKM-5

6. Nokta yükleme dayanımı deneyleri

$I_{s(50)}$= 1.49 MPa (DKM-1)	$I_{s(50)}$= 1.36 MPa (YKM-1),
$I_{s(50)}$ = 2.25 MPa (DKM-2)	$I_{s(50)}$ = 1.95 MPa (YKM-2),
$I_{s(50)}$= 3.22 MPa (DKM-3)	$I_{s(50)}$= 2.94 MPa (YKM-3),
$I_{s(50)}$= 4.07 MPa (DKM-4)	$I_{s(50)}$= 3.82 MPa (YKM-4),
$I_{s(50)}$= 11.69 MPa (DKM-5)	$I_{s(50)}$= 3.65 MPa (YKM-5)

7. Suda dağılma dayanımı deneyleri

I_{d2}= 96.65 % (DKM-1)	I_{d2}= 99.12 % (YKM-1)
I_{d2} = 98.44 % (DKM-2)	I_{d2} = 99.45 % (YKM-2)
I_{d2}= 99.48 % (DKM-3)	I_{d2}= 99.53 % (YKM-3)
I_{d2}= 99.65 % (DKM-4)	I_{d2}= 99.13 % (YKM-4)
I_{d2}= 99.60 % (DKM-5)	I_{d2}= 99.22 % (YKM-5)

8. Schmidt sertlik belirleme deneyleri

N= 42.00 (DKM-1)	N= 31.53 (YKM-1)
N = 40.15 (DKM-2)	N = 35.47 (YKM-2)
N = 51.87 (DKM-3)	N = 37.10 (YKM-3)
N= 52.63 (DKM-4)	N= 40.63 (YKM-4)
N= 57.30 (DKM-5)	N= 42.00 (YKM-5)

b) Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri kapsamında gerilme-hız-kontrollü (Grup1) deneyler

1. Bu bölümdeki ilk çalışmalarda DKM ve YKM model kaya malzemeleri için yükleme hızları belirlenmiştir.

- 54 mm çaplı DKM doğal model kaya malzemelerine yönelik TEBD, TEB-DEF türü deneyler için yükleme hız değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 4 kN/dk ile 204 kN/dk arasında 9 farklı yükleme hızında oluşturulmuştur. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise yükleme hızı 100 kN/dk olmuştur.
- 100 mm çaplı YKM yapay model kaya malzemelerine yönelik TEBD, TEB-DEF türü deneyler için yükleme hız değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 14 kN/dk ile 707 kN/dk arasında 9 farklı yükleme hızında oluşturulmuştur. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise yükleme hızı 353 kN/dk olmuştur.
- 54 mm çaplı DKM doğal model kaya malzemelerine yönelik DÇD, DÇ-DEF türü deneyler için yükleme hız değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 0.9 kN/dk ile 24 kN/dk arasında 8 farklı yükleme hızı olarak belirlenmiştir. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise yükleme hızı 12 kN/dk olarak tespit edilmiştir.
- 100 mm çaplı YKM yapay model kaya malzemelerine yönelik DÇD, DÇ-DEF türü deneyler için yükleme hız değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 0.9 kN/dk ile 24 kN/dk arasında 8 farklı yükleme hızı olarak belirlenmiştir. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise yükleme hızı 12 kN/dk olarak tespit edilmiştir.

2. Düşey birim deformasyon-gerilme davranışları
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan TEBD, TEB-DEF türü deneylerde yükleme hızının artması ile düşey birim deformasyon-gerilme davranışlarına ait eğimlerin yenilme öncesi ve sonrasında daha dik olduğu ayrıca yenilme noktalarının daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar YKM model kaya malzemelerinde de görülmüştür.
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan DÇD, DÇ-DEF türü deneylerde yükleme hızının artması ile düşey birim deformasyon-gerilme davranışlarına ait eğimlerin yenilme öncesinde daha dik olduğu ayrıca yenilme noktalarının daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. YKM model kaya malzemelerinde de benzer sonuçların olduğu görülmüştür.

3. Zaman-düşey birim deformasyon davranışları
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan TEBD, TEB-DEF türü deneylerde yükleme hızının artması ile zaman-düşey birim deformasyon davranışlarında daha kısa zamanda malzemenin yenilme aşamasına geçtiği ve daha yüksek dayanım değerleri gösterdiği anlaşılmıştır. Yükleme hızlarının azalması ile dayanım değerlerinin düştüğü buna karşılık birim deformasyon değerlerinin oldukça yavaş arttığı anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar ile YKM model kaya malzemeleri için de karşılaşılmıştır.
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan DÇD, DÇ-DEF türü deneylerde yükleme hızının artması ile zaman-düşey birim deformasyon davranışlarında daha kısa zamanda malzemenin yenilme aşamasına geçtiği ve daha yüksek dayanım değerleri gösterdiği anlaşılmıştır. Yükleme hızlarının azalması ile dayanım değerlerinin düştüğü buna karşılık birim deformasyon değerlerinin oldukça yavaş arttığı anlaşılmıştır. YKM model kaya malzemeleri için de benzer sonuçlar ile karşılaşılmıştır.

c) Araştırma amaçlı kaya mekaniği deneyleri kapsamında sabit-gerilme-kontrollü-sünme (Grup2) deneyleri
    1. Bu bölümdeki ilk çalışmalarda DKM ve YKM model kaya malzemeleri için sünme deneylerine yönelik sabit yük değerleri belirlenmiştir.
        - 54 mm çaplı DKM doğal model kaya malzemelerine yönelik S-TEB türü deneyler için sabit yük değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 114.45 kN ile 228.91 kN arasında 6 farklı sabit yük değerinde oluşturulmuştur. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise sabit yük değeri 228.91 kN olmuştur.
        - 100 mm çaplı YKM yapay model kaya malzemelerine yönelik S-TEB türü deneyler için sabit yük değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 392.50 kN ile 785 kN arasında 6 farklı sabit yük değerinde oluşturulmuştur. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise sabit yük 785 kN olmuştur.

- 54 mm çaplı DKM doğal model kaya malzemelerine yönelik S-DÇ türü deneyler için sabit yük değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 11.45 kN ile 22.89 kN arasında 6 farklı sabit yük değerinde oluşturulmuştur. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise sabit yük 22.89 kN olmuştur.
- 100 mm çaplı YKM doğal model kaya malzemelerine yönelik S-DÇ türü deneyler için sabit yük değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler 39.25 kN ile 78.50 kN arasında 6 farklı sabit yük değerinde oluşturulmuştur. ISRM (2007) tarafından önerilen standart deney için ise sabit yük değeri 78.50 kN olmuştur.

2. Zaman-düşey birim deformasyon davranışları
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan S-TEB türü deneylerde uygulanan sabit yük değerlerinin artması ile zaman-düşey birim deformasyon davranışlarında daha kısa zamanda malzemenin yenilme aşamasına geçtiği anlaşılmıştır. Sabit yük değerlerinin azalması ile birim deformasyon değerlerinin oldukça yavaş ilerlediği anlaşılmıştır. Benzer sonuçlar, YKM model kaya malzemeleri için de görülmüştür.
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan S-DÇ türü deneylerde uygulanan sabit yük değerlerinin artması ile zaman-düşey birim deformasyon davranışlarında birim deformasyon değerlerinin arttığı bununla birlikte daha kısa zamanda malzemenin yenilme aşamasına geçtiği anlaşılmıştır. Buna karşın sabit yük değerlerinin azalması ile birim deformasyon değerlerinin oldukça yavaş ilerlediği anlaşılmıştır. YKM model kaya malzemeleri için de benzer sonuçlar görülmüştür.
3. Düşey birim deformasyon-gerilme davranışları
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan S-TEB türü deneylerde uygulanan sabit yük değerlerinin artması ile düşey birim deformasyon-gerilme davranışlarının yüksek eğimli olarak arttığı ve daha kısa zamanda yenilme aşamasına geçtiği görülmüştür. Buna karşın sabit yük değerlerinin azalması durumunda birim deformasyon değerlerinin oldukça yavaş ilerlediği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar, YKM model kaya malzemeleri için de görülmüştür.

- DKM model kaya malzemeleri için yapılan S-DÇ türü deneylerde uygulanan sabit yük değerlerinin artması ile düşey birim deformasyon-gerilme davranışlarında yüksek eğimlerin oluştuğu ve daha kısa zamanda yenilme aşamasına geçildiği görülmüştür. Sabit yük değerlerinin azalması durumunda ise birim deformasyon değerlerinin daha yavaş geliştiği anlaşılmıştır. YKM model kaya malzemeleri için de benzer sonuçlar ile karşılaşılmıştır.

4. Zaman-gerilme davranışları
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan S-TEB türü deneylerde uygulanan sabit yük değerlerinin artması ile zaman-gerilme davranışlarında gerilmelerin arttığı daha sonra kısa zaman içerisinde yenilme aşamasına geçildiği tespit edilmiştir. Buna karşın sabit yük değerlerinin azalması durumunda gerilme değerlerinin oldukça yavaş ilerlediği gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar, YKM model kaya malzemeleri için de görülmüştür.
    - DKM model kaya malzemeleri için yapılan S-DÇ türü deneylerde uygulanan sabit yük değerlerinin artması ile zaman-gerilme davranışlarının eğimlerinin arttığı ve daha kısa zamanda yenilmenin görüldüğü anlaşılmıştır. Buna karşın sabit yük değerlerinin azalması durumunda gerilme değerlerinin daha yavaş arttığı anlaşılmıştır. YKM model kaya malzemeleri için de benzer sonuçlar ile karşılaşılmıştır.

3. Sayısal analizlere dayalı sonuçlar

Bu tez çalışmasında ulaşılan kritik eşik dayanım belirleme yönteminin denenmesi amacıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede Kars-Kağızman kaya tuzu örnek uygulama olarak seçilmiştir. Kağızman kaya tuzunun ISRM (2007) önerileri doğrultusundaki veri tabanına O-KMV tanımı yapılmıştır. Aynı kaya malzemesine kritik eşik dayanım değerleri bu tezde önerilen eşitlikler yardımıyla belirlenmiş ve bu şekilde oluşan veri tabanına KE-KMV ismi verilmiştir. Elde edilen iki veri tabanı, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanan Phase2 V.08. sayısal analiz programı yardımıyla test edilmiştir. Bu sayısal analizler için hazırlanan iki boyutlu katı modelde düşey arazi gerilmesi (Po) parametrik olarak 2.5 MPa-25 MPa arasında değiştirilmiştir. Örnek uygulamada topuk boyutları 10mX10mX10m alınmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

a) Düşey arazi gerilmesi (Po) - toplam deformasyon (u) grafiğinden KE-KMV'de toplam deformasyon değerlerinin O-KMV'ye göre oldukça fazla olduğu belirlenmiştir
b) Düşey arazi gerilmesi (Po) - en büyük asal gerilme (σ_1) değişimi grafiğinden en büyük asal gerilmelerin KE-KMV'de bir miktar daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
c) Düşey arazi gerilmesi (Po) - yenilen eleman sayısı (#) değişimi grafiğinden KE-KMV'de yenilen eleman sayısının O-KMV'ye göre daha fazla olduğu anlaşılmıştır.
d) Düşey arazi gerilmesi (Po) - emniyet katsayısı (SF) grafiğinden O-KMV ile KE-KMV için belirlenen emniyet katsayıları arasında önemli bir fark olduğu görülmüştür. O-KMV'ye göre Po ≥12.5 MPa durumunda topukta duraysızlık başlarken KE-KMV'ye göre bu duraysızlık Po≥10 MPa durumunda başlamaktadır.
e) Sayısal analizlerde örnek uygulama için seçilen kaya tuzuna ait ISRM (2007) önerilerine göre ulaşılan kaya mekaniği sonuçları ve bu tez çalışmasıyla ortaya konan kritik eşik dayanım değerleri dikkate alınmış ve iki boyutlu sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre saha mühendisi, O-KMV sayısal analiz sonuçlarını dikkate alarak SF=0.91 (SF≤1 duraylı) olduğu için maden ocağında topuklarda bir problem olmadığını düşünecektir. Ancak üretime devam ederken aslında göz ardı ettiği kritik eşik değerleri sonucunda bu topuklarda emniyetsiz bir durum ortaya çıkacaktır (SF=1.36, SF≤1 duraylı). Sonuç olarak ciddi can ve mal kayıplarıyla karşı karşıya kalınabilecektir.

4. Değerlendirme sonuçları

Bu tez çalışmasında hazırlanan model kaya malzemeleri üzerinde servo kontrollü hidrolik pres yardımıyla gerilme-hız-kontrollü (Grup1) ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme (Grup2) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar;

a) DKM ve YKM model malzemeleri üzerinde öncelikle ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilerek hakem niteliği taşıyan bir veri tabanı hazırlanmıştır.
b) İkinci aşamada Grup1 olarak tanımlanan gerilme-hız-kontrollü deneylerinde pekleşmeye dayalı model kaya malzemesinin dayanım özelliklerinin değişimi, farklı yükleme hız (kN/dk) değerlerinde incelenmiştir. Deneyler sonucunda

yükleme hız değerlerinin azalmasıyla malzemenin yenilme değerlerinin düştüğü buna karşın yenilme sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum kritik pekleşme olarak değerlendirilmiş ve farklı yükleme hızlarına maruz kalan model malzemelerin pekleşmeye dayalı kritik sınır yenilme değerleri belirlenmiştir.

c) Üçüncü aşamada Grup2 olarak tanımlanan sabit-gerilme-kontrollü-sünme deneylerinde pekleşmeye dayalı model kaya malzemesinin dayanım özelliklerinin değişimi, farklı sabit yükleme değerlerinde (kN) araştırılmıştır. Sünme deneyleri sonucunda sabit yük değerlerinin azalmasıyla malzemenin yenilmediği gözlemlenerek, bu durum kritik pekleşme olarak değerlendirilmiştir.

d) Farklı sabit yüklere maruz kalan model malzemelerin (DKM ve YKM) pekleşmeye dayalı kritik sınır yenilme değerleri ortaya konmuştur. Farklı iki deney sonuçları ile belirlenen pekleşmeye dayalı malzeme özelliklerinin birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür. Bu yüzden DKM ve YKM deney sonuçları birleştirilmiştir.

e) Deneysel çalışmalara dayalı olarak belirlenen pekleşmeye bağlı kritik sınır dayanım değerleri, SPSS istatistik programı kullanılarak istatistik analizler ile belirlenmiştir.

f) İstatistiksel analizler yardımıyla pekleşmeye dayalı davranışlar, güçlü R^2 değerleri ile ortaya konmuştur. Bunlar sırası ile aşağıda verilmiştir.

- Tek eksenli basma dayanımı ($\sigma_c(t)$)
  $\sigma_c(t) = 0.8238\ \sigma_c - 2.9641$ (R2= 0.87)

- Dolaylı çekme dayanımı ($\sigma_{tB}(t)$)
  $\sigma_{tB}(t) = 0.6744\ \sigma_{tB} + 0.2873$ (R2=0.92)

- Elastik modül ($E_i(t)$)
  $E_{i\text{-}TEB}(t) = 0.00006456\ E_i^{1.8}$ (R^2=0.84)
  $E_{i\text{-}DÇ}(t) = 55.385\ LN\ (E_i) - 255.83$ (R^2=0.76)

- Kohezyon (c(t))
  $c(t) = 0.7234\ c^{1.0264}$ (R2 = 0.92)

- İçsel sürtünme açı ($\Phi(t)$)
  $\phi(t) = 3.8315\ \phi^{0.6708}$ (R2 = 0.79)

- Ayrıca deneyler esnasında yenilme öncesi elastik modül (E_i) ile yenilme sonrası elastik modül (E_d) değerleri belirlenmiş, her iki büyüklük arasında güçlü bir ilişki belirlenerek iki ayrı matematiksel model ile ifade edilmiştir.

  $E_d = 4.881\ 10^{-10}\ E_i^{3.015}$ $(R^2=0.84)$

  $E_i / E_d = 9\ 10^{-5}\ \sigma_c^{2.7198}$ $(R^2=0.88)$

6.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında elde edilen tecrübeler ışığında gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sıralanabilir.

1. Doğal kaya malzemeleri üzerinde gerçekleştirilen deney sayıları arttırılmalı
2. Doğal kaya malzemeleri için farklı jeolojik kökenlere sahip kayaçlar üzerinde deneyler yapılmalı
3. Bu tez çalışmasında dayanım aralığı 0-100 MPa seçilmiştir. Daha yüksek dayanımlara sahip kayaçlar için deneyler gerçekleştirilmelidir.
4. Hazırlanan model kaya malzemeleri üzerinde farkı yükleme koşulları denebilir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen gerilme-hız-kontrollü ve sabit-gerilme-kontrollü-sünme yükleme formu haricinde yükleme-boşaltma, yükleme-bekletme-boşaltma, yükleme-bekletme-boşaltma-yükleme-bekletme, kısa aralıklı dinamik yükleme-boşaltma gibi farklı yükleme koşulları göz önüne alınabilir,
5. Deney sonuçları bir maden sahasında yapılan gözlem, ölçüm ve inceleme sonuçlarıyla karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Aksoy, K. 2018. Jeoistatistiksel Yöntemler Kullanarak Bir Mermer Yatağındaki Seleksiyonların Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

ASTM, 1986. Standard test method for unconfined compressive strength of intactrock core specimens: D 2938, DOI: 10.1520/D2938-95, ASTM International, 100Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA, 3p.

Atıcı, Ü. 1999. Mermer Kesme Makinalarındaki Kesicilerin Aşınma Mekanizmaları, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aydan, Ö., 2016. Time-Dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering, CRC Press, ISRM Book Series No.2, 246p.

Aydan, Ö., Ito, T., Rassouli, F. 2016. Chapter 11: Tests on Creep Characteristics of Rocks. In Rock Mechanics and Engineering, Vol. 2, (Editor X.T. Feng), CRC Press, 333-364

Barton, N., Lien, R and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. International Journal for Rock Mechanics, vol 6, no. 4, pp. 190-235.

Berest, P., Bergues J. and Brouard B., 1999. Review of static and dynamic compressibility issues relating to deep underground salt caverns. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 36, Issue 8, p.1031-1049.

Bharti, S. ve Deb, D. 2014. Effect of Strain Rate on Strength and Elastic Behaviour of Cement Mortar Samples Under Uniaxial Compression Test, Cement and Concrete Research ,32(5), 817-819.

Bieniawski, Z. T. 1970. Time-dependent behaviour of fractured rock, Rock Mechanics, 2 (3), 123-137.

Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 15, 335-344.

Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.

Bilici, E. 2019. Antalya ili Finike-Turunçova bölgesindeki Limra mermerinin jeolojik özelliklerinin belirlenmesi ve blok verimini arttırıcı yöntemlerin araştırması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Büyüksagiş, I. S. 1998. Dairesel testereli blok kesme makinalarında mermerlerin kesilebilirlik analizleri, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., and Minami, M. 2004. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(1), 3-19.

Carter, N.L., 1981. Creep and Creep Rupture of Rock Salt. Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-224, 59p.

Chong, K., Hoyt, P., Smith, J. ve Paulsen, B. 1980. Effects of strain rate on oil shale fracturing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 35-43.

Chong, K. ve Boresi, A. 1990. Strain rate dependent mechanical properties of new albany reference shale, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 199-205.

Cosenza, P. and Ghoreychi, M., 1999. Effects of very low permeability on the long-term evolution of a storage cavern in rock salt. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, p.527-533.

Cottrell, A.H., 1952. The time laws of creep, J. Mech. Phys. Solids, 1 (1), pp.53-63.

Çıra, S.C. 2014. Mermer aşındırma-cilalama makinası çalışma değişkenleri ve mermer malzeme özelliklerinin yüzey kalitesine etkisinin incelenmesi ve optimizasyonu, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Dündar, S. 2017. Dairesel testereli doğal taş kesme makinelerinin kesme parametrelerinin kayaç özellikleri ile ilişkilendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Eekelen, H. A., Urai, J. L., and Hulsebos, T., 1981. Creep of bischofite. In Proceedings, 1st Conference on the Mechanical Behaviour of Salt Pennsylvania

Engin, İ.C., 2006. Bazı Türk mermerlerinin aşındırıcılı su demeti ile kesilebilirlik özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Farmer, I. W. 1983. Time Dependency, In: Engineering Behaviour of Rocks, Eds: Springer, p. 119-142.

Geniş, M., ve Derin, Z. 2016. Zonguldak-Üzülmez Tünellerinin Çevre Kaya Özelliklerinin Belirlenmesi ve Duraylılığının Değerlendirilmesi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 144-151.

Görgülü, K. 1998. Bazı mermer birimleri için optimum aşındırma-cilalama koşullarının araştırılması ve malzeme özellikleri ile ilişkilendirilmesi,Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Grgic, D., Homand, F. and Hoxha, D., 2003. A short- and long-term rheological model to understand the collapses of iron mines in Lorraine, France. Computers and Geotechnics, 30, 557–570.

Hacımustafaoğlu, R. 1999. Karaburun yarımadası mermerlerinin cinsleri üretimleri ekonomileri ve kapasiteleri, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hardy, H. R., Kim, R. Y., Stefanko, R., & Wang, Y. J. 1969. Creep and microseismic activity in geologic materials. In The 11th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). OnePetro.

Hoek, E. 1990. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 27, No. 3, pp. 227-229). Elsevier BV.

Hoek, E. 1994. Strength of Rock and Rock Masses. ISRM News Journal, 2, 4-16.

Hoek, E., Brown, E. T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the geotechnical engineering division, 106(9), 1013-1035.

Hoek, E., Marinos, P., and Benissi, M. 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57, 151-160.

Hoek, Evert and Marinos, P.. 2000. Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses. Tunnels and Tunnelling International. 32. 45-51.

Horseman, S. and Passaris, E., 1981. Creep Tests for Storage Cavity Closure Prediction. Proc. 1st Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State Univ. p.119-157.

Hudson, J. A. ve Brown, E. T. 1972. Studying time-dependent effects in failed rock, The 14th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).

ISRM, B. E. 1981. Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring, ISRM Commission on Testing Methods. Pergamon, Oxford.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. ISRM Turkish National Group, Ankara.

Jin, J. nad Cristescu, N.D., 1998. An Elastic/Viscoplastic Model for Transient Creep of Rock Salt. International Journal of Plasticity, Vol. 14, Nos. 1-3, pp. 85-107.

Jeremic M.L. 1994. Rock Mechanics in Salt Mining. CRC Press.

Karakaya, E. 2019. Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinden yararlanarak delinebilirlik tahmin modellerinin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karpuz, C., ve Hindistan, M. A. 2012. Kaya Mekaniği İlkeleri ve Uygulamaları. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

Kızıltaş, Z. 2019. Kars- Kağızman kaya tuzunun mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve topuk duraylılık analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kelsall, P.C. and Nelson, J.W., 1983. Geologic and Engineering Characteristics of Gulf Region Salt Domes Applied to Underground Storage and Mining. Proc. of 6th Int. Symp. on Salt, Salt Institute, Virginia, Vol.1, p.519-542.

Kuşcu, M., Demiray, Z. 2015. Mermer Ve Yapıtaşı Olarak Kullanılan Farklı Jeolojik Kökenli Kayaçların Porozite, P-Dalga Hızı Ve Basınç Dayanımı İlişkisinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(2), 16-23 .

Lajtai, E. Z., and Schmidtke, R. H. 1986. Delayed failure in rock loaded in uniaxial compression. Rock mechanics and rock engineering, 19, 11-25.

Lajtai, E. Z., Duncan, E. S., and Carter, B. J. 1991. The effect of strain rate on rock strength. Rock Mechanics and Rock Engineering, 24, 99-109.

Leite, M.H., Gill, D.E. and Corthesy, R., 1998. Experimental and numerical evaluation of stress redistribution in thick-walled rock salt cylinders. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 35, Issue 3, p.367-383.

Li, Y. ve Xia, C. 2000. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37 (3), 467-475.

Liang, W. G., Zhao, Y. S., Xu, S. G. ve Dusseault, M. B. 2011. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48 (1), 161-167.

Liu, S., Wan, Z., Zhang, Y., Lu, S., Ta, X., Wu, Z. 2020. Research on evaluation and control technology of coal pillar stability based on the fracture digitization method. Measurement, 158, 107713.

Lomenick, T.F., 1968. Accelerated Deformation of Rock Salt at Elevated Temperature and Pressure and Its Implications for High Level Radioactive Waste Disposal. PhD Thesis. Univ. of Tennessee, 115p.

Ma, L. and Daemen, J.J.K., 2006. An experimental study on creep of welded tuff. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 43, Issue 2, p. 282-291.

Mahmutoğlu, Y. 1995. Tünel mühendisliğinde kayanın gevşeme modülünün araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Marinos, P. and Hoek, E. 2000. GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on

Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 19-24 November 2000, 1422-1446.

Marinos, V. I. I. I., Marinos, P., and Hoek, E. 2005. The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64, 55-65.

Mesutoğlu, M., and Özkan, İ. 2014. Stress-strain-electrical resistance characterization of rock material under triaxial loading. In Mine Planning and Equipment Selection: Proceedings of the 22nd MPES Conference, Dresden, Germany, 14th–19th October 2013 (pp. 529-539). Springer International Publishing.

Önder, M. 1998. Marmara Bölgesi mermerlerinin mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özçelik, Y. 1999. Mermercilikte Kullanılan Elmas Tel Kesme Makinelerinin Çalışma Koşullarının İncelenmesi,Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özbek, O. 2008. Çankırı Kahverengi Mermerinin Kesilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özdoğan, M. 1991. Ankara Andezitlerinin Laboratuvarda Belirlenen Devinik Esneklik Özellikleri, Bilimsel Madencilik Dergisi, 30(4), 31-38.

Özgül, F. 2010. Sütçüler-Eğirdir Aşağı Gökdere (Isparta) bölgesindeki kireçtaşlarının mermer olarak kullanılabilirliği ve ekonomik önemi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özkan, İ., Altun, M., ve Kızıltaş, Z. 2022. Kars-Kağızman kaya tuz örneklerinin uzun süreli sünme davranışı. KAYAMEK'2022-13. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu/ROCKMEC'2022-13th Regional Rock Mechanics Symposium, 26-28 Mayıs 2022, 8p , Isparta-Türkiye.

Özkan, İ., ve Düzyol, S., 2004. Kaya tuzu üzerinde bazı mühendislik tasarım parametrelerinin belirlenmesi. VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas, s.67-76.

Özkan, İ., Mesutoğlu, M., ve Kızıltaş, Z. 2018. Kars-Kağızman kaya tuzunun tek eksenli basınç altında gerilme-birim deformasyon-elektriksel direnç davranışı.

Özşen, H. 2009. Kaya tuzuna ait kısa ve uzun dönemli mekanik özelliklerin belirlenmesi ve matematiksel modellenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özşen, H., Özkan, İ., Şensöğüt, C. 2014. Measurement and mathematical modelling of the creep behaviour of Tuzköy rock salt, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 66, 128-135.

Özşen, H., Özkan, İ., Mesutoğlu, M. 2019. An approach on modelling of in-situ deformations for unstable coal mine slopes. Bull Eng Geol Environ 78, 3191–3203 (2019).

Peng, S., 1973. Time-dependent aspects of rock behavior as measured by a servocontrolled hydraulic testing machine, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 235-246.

Phillips, F.P., 1905. The slow stretch in indiarubber, glass, and metal wires when subjected to a constant pull, Phil. Mag., Vol.9, p. 513.

Ray, S., Sarkar, M. ve Singh, T. 1999. Effect of cyclic loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone, International journal of rock mechanics and mining sciences , 36 (4), 543-549.

Rüsch, H. 1960. Researches toward a general flexural theory for structural concrete, Journal of the American Concrete Institute, 57 (1), 1-28.

Sano, O., Ito, I. ve Terada, M. 1981. Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86 (B10), 9299-9311.

Senseny, P.E., 1981. Specimen Size and History Effects on Creep of Salt. Proc. 1st Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State Univ. p.369-380.

Sonmez, H. and Ulusay, R. 1999. Modification to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 743-760.

SPSS, IBM Corp., 2023. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 28.0. Armonk, NY: IBM Corp.

TS EN 12390-2, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,

Tutluoğlu, L., Öge, İ. F. ve Karpuz, C. 2015. Relationship Between Pre-failure and Post-failure Mechanical Properties of Rock Material of Different Origin, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48 (1), 121-141.

Tutuş, M. 2007. Çukurova yöresinde bulunan bazı mermerlere ait fiziko-mekanik özelliklerin istatistiksel analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ulusay, R., ve Sönmez, H. 2007. Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası.

Unal, E., Ozkan, I., Cakmakci, G. 2001. Modeling the behavior of longwall coal mine gate roadways subjected to dynamic loading. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(2), 181-197.

Ünlü, T., Reddish, D. J. 1994. Multiple entry pillar stability assessment using the limit equilibrium method. In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts (Vol. 31, No. 5, pp. 429-438). Pergamon.

Vardar, M., 1981. Kayanın Zamana Bağlı Kırılma Davranışlarının Madenlerdeki Kaya Yapılarının Stabilitesine Olan Etkisi, Türkiye VII. Madencilik Kongresi 85 - 100 s,, Ankara.

Wallner, M., Caninenberg, C. and Gonther, H., 1979. Laboratory Tests on Time and Temperature Depended Mechanical Behavior of Rock Salt. Proc. 4th Cong. ISRM, Vol.1, p.313-318.

Wang, R., Li, L., and Simon, R. 2019. A model for describing and predicting the creep strain of rocks from the primary to the tertiary stage. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 123, 104087.

Wasantha, P., Ranjith, P., Zhao, J., Shao, S. ve Permata, G. 2015. Strain rate effect on the mechanical behaviour of sandstones with different grain sizes, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48 (5), 1883-1895.

Weaver, S.H., 1936. Creep curve of steel. Trans American Soc. Mech Eng Vol.58, pp.745-751.

Weertman, J., 1957. Steady State Creep through Dislocation Climb. Journal of Applied Physics, 28, p.363-364.

Wu, H. ve Pollard, D. D. 1993. Effect of strain rate on a set of fractures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30 (7), 869-872.

Yang C., Daemen J.J.K. and Yin J.H., 1999. Experimental Investigation of Creep Behavior of Salt Rock, Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.36, 233-242.

Yang, S., Zhang, N., Feng, X. ve Kan, J., 2018. Experimental Investigation of the Creep Behaviour of Coal by Monitoring Changes of Acoustic Properties, Applied Sciences, 8 (4), 633.

Yavuz, A. B. 1996. Engineering Geology Of Marbles Around Properties, Doctoral dissertation, Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences.

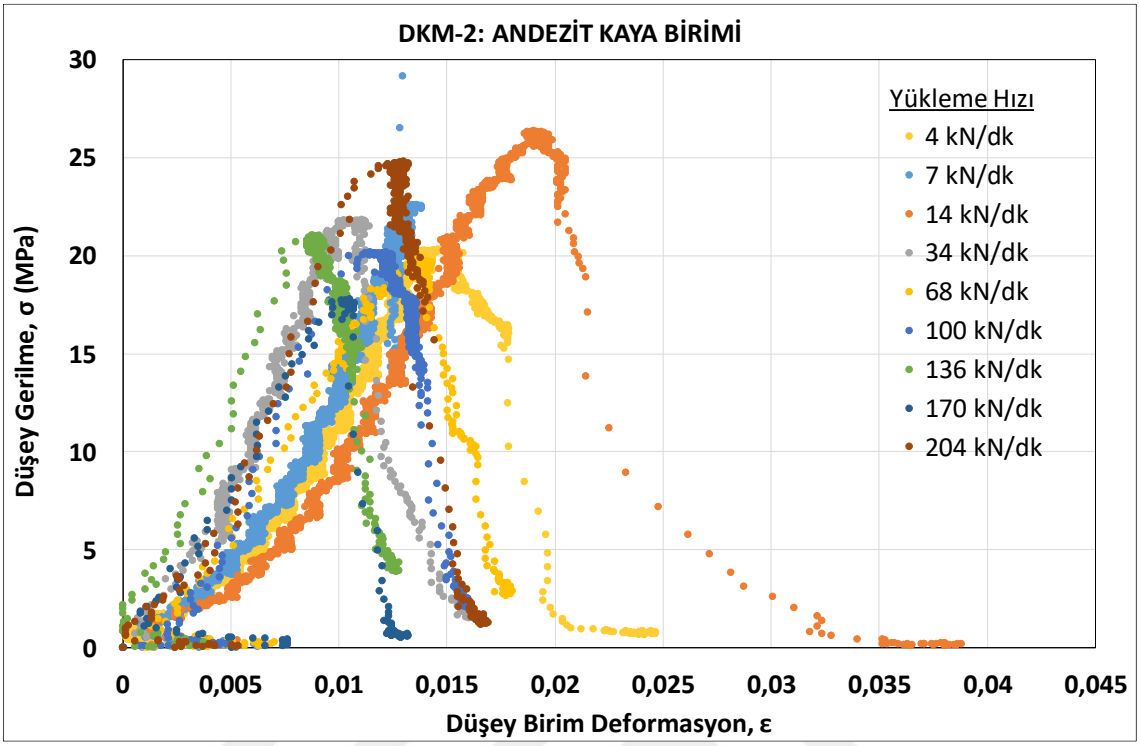
Yavuz, H., Tüfekçi, K., Kayacan, R., ve Cevizci, H. 2014. Kaya Numunelerinin Dinamik Yükler Altında Mekanik Davranışının İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16(1), 96-102.

Yazıcı, İ. 2020. Obaalacami Köyü Alanya (Antalya) Bölgesi Koyu Füme Mermerlerinin Fiziko-Mekanik Özellikleri Ve Tse Standartlarına Göre Değerlendirilmesi,Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Enstitüsü

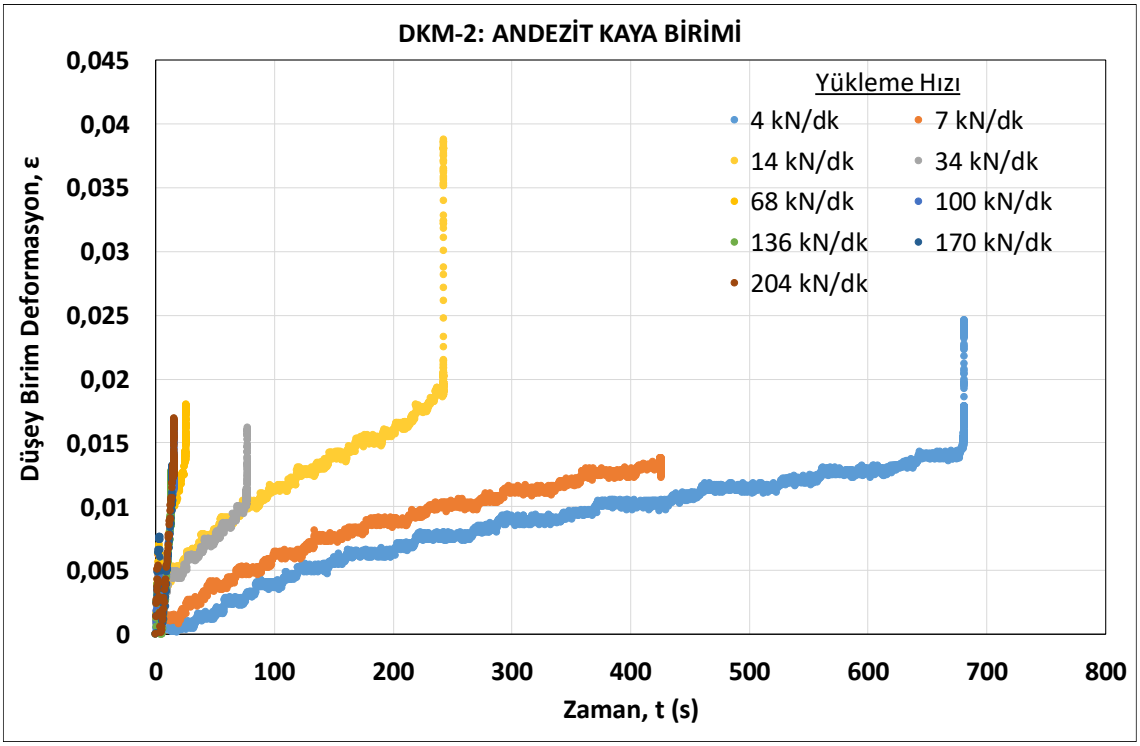
Yazıcı, S., ve Nasuf, E. 1993. Arazi Kontrolünde Sayısal Modelleme. Madencilik Dergisi 32. Cilt, Sayı 3-4.

EKLER

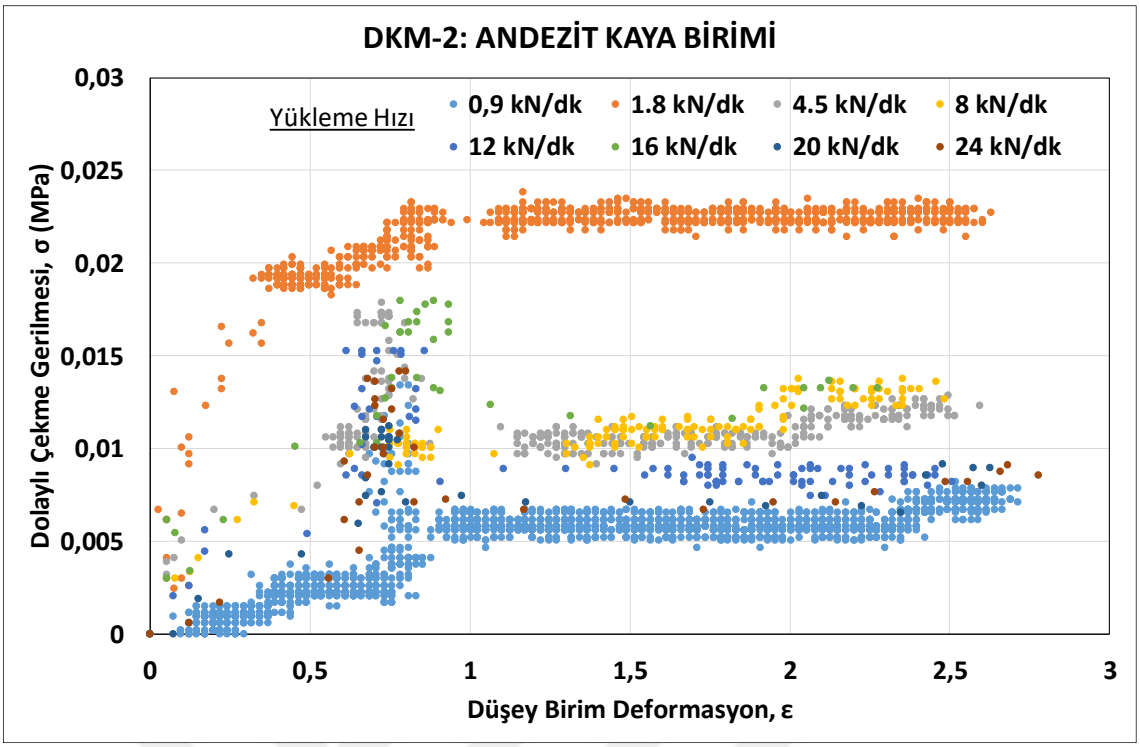
EK1 20-40 MPa aralığında yer alan Konya-Sille andezit kaya birimine (DKM-2) ait deneysel sonuçlar



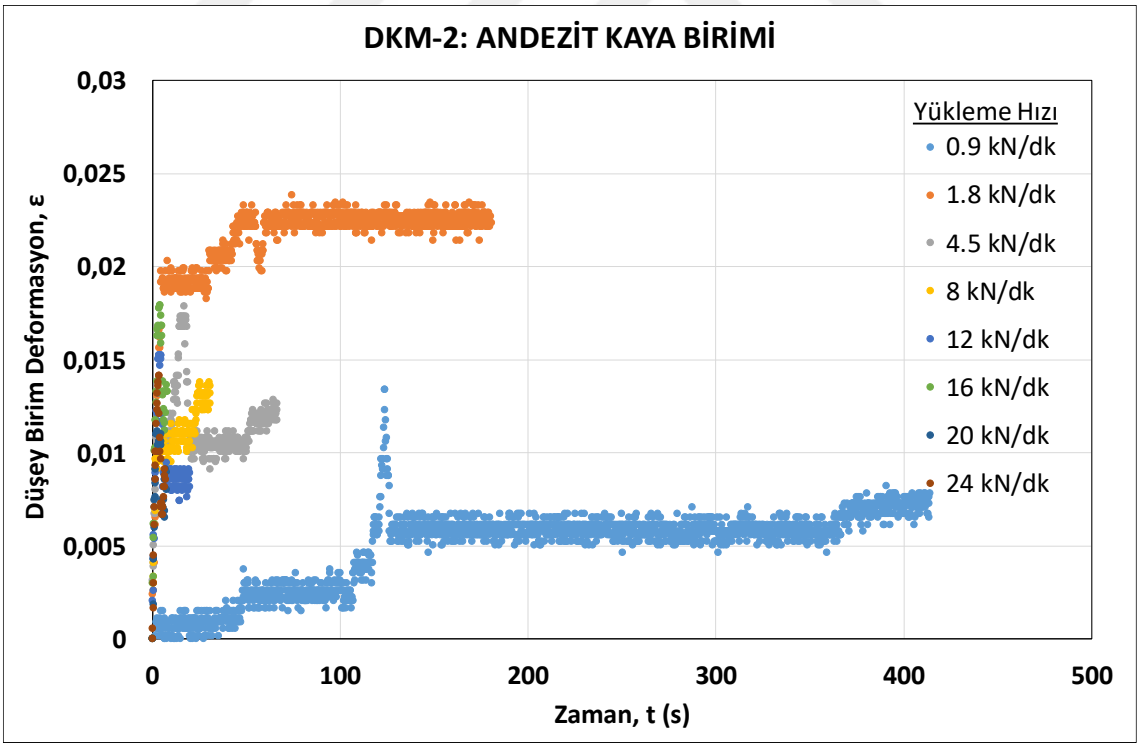
EK1/Şekil 1. DKM-2 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK1/Şekil 2. DKM-2 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

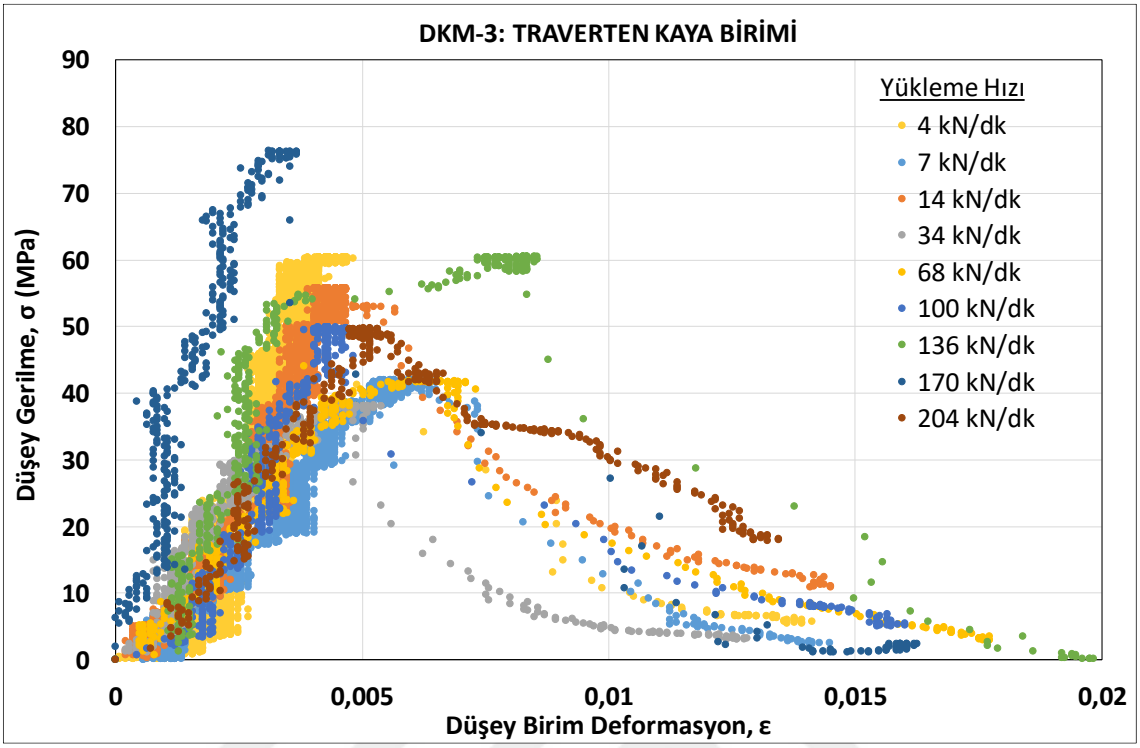


EK1/Şekil 3. DKM-2 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

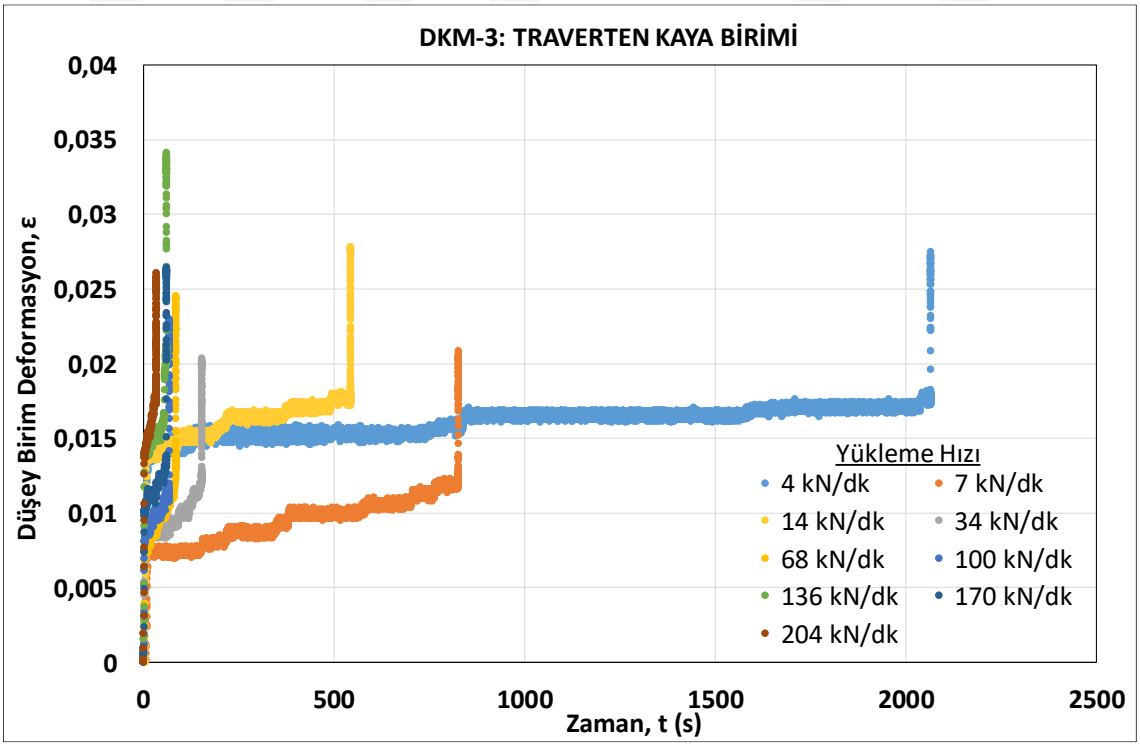


EK1/Şekil 4. DKM-2 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

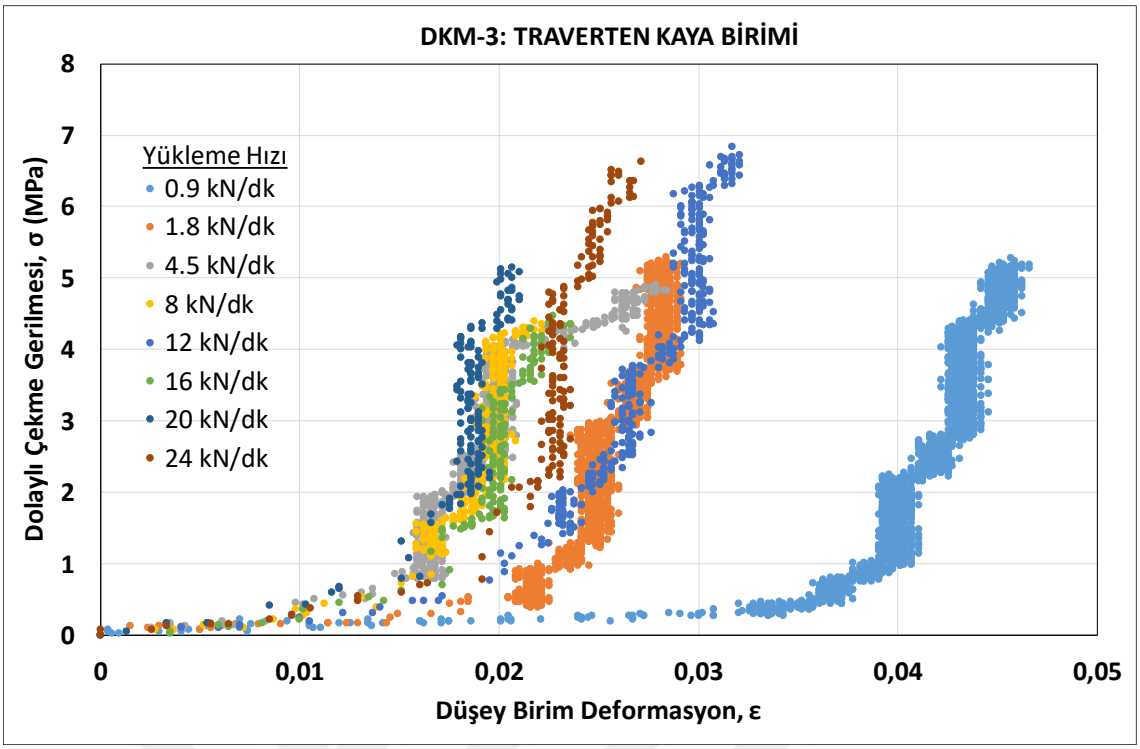
EK2 40-60 MPa aralığında yer alan Karaman traverten kaya birimine (DKM-3) ait deneysel sonuçlar



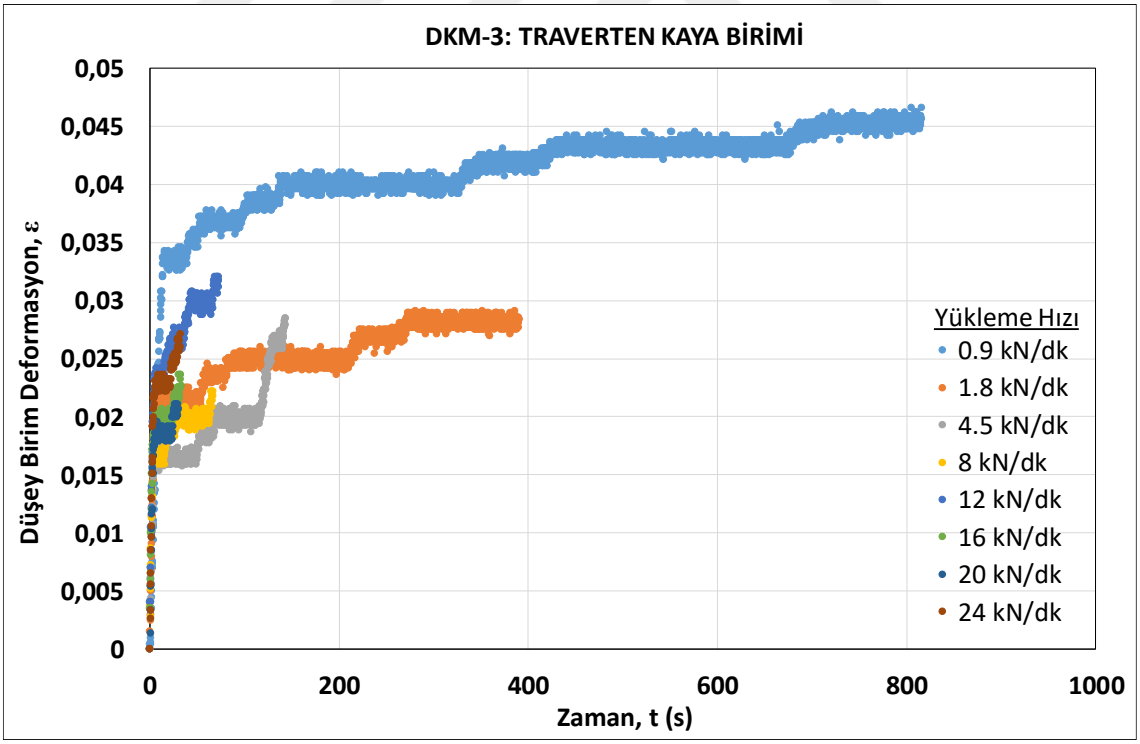
EK2/Şekil 5. DKM-3 kaya birimi için gerilme-birim deformasyon davranışları



EK2/Şekil 6. DKM-3 kaya birimi için zaman-birim deformasyon davranışları

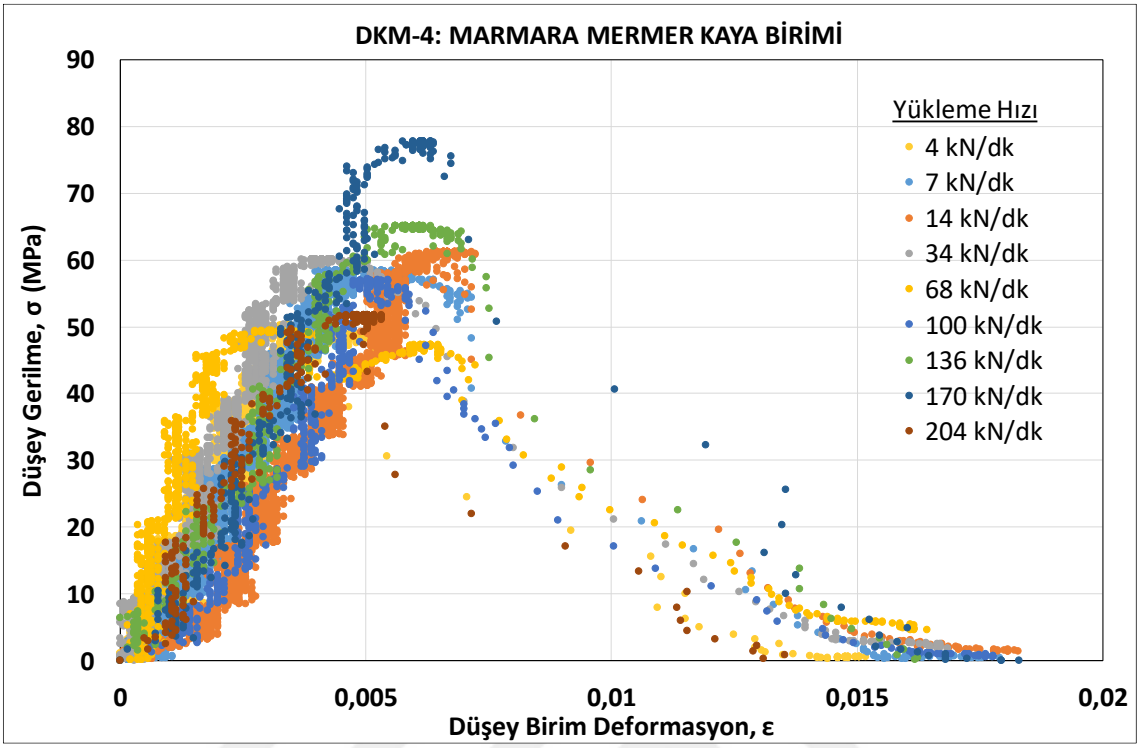


EK2/Şekil 7. DKM-3 kaya birimi için DÇD koşulları altında gerilme-birim deformasyon davranışları

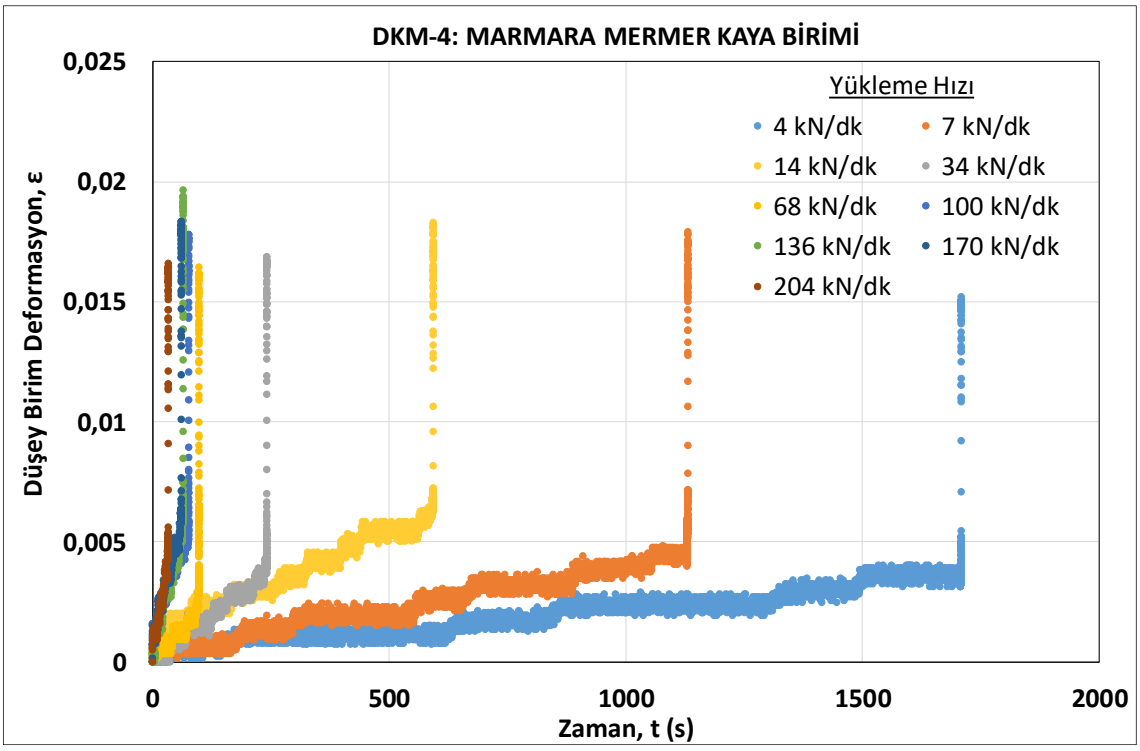


EK2/Şekil 8. DKM-3 kaya birimi için DÇD koşulları altında zaman-birim deformasyon davranışları

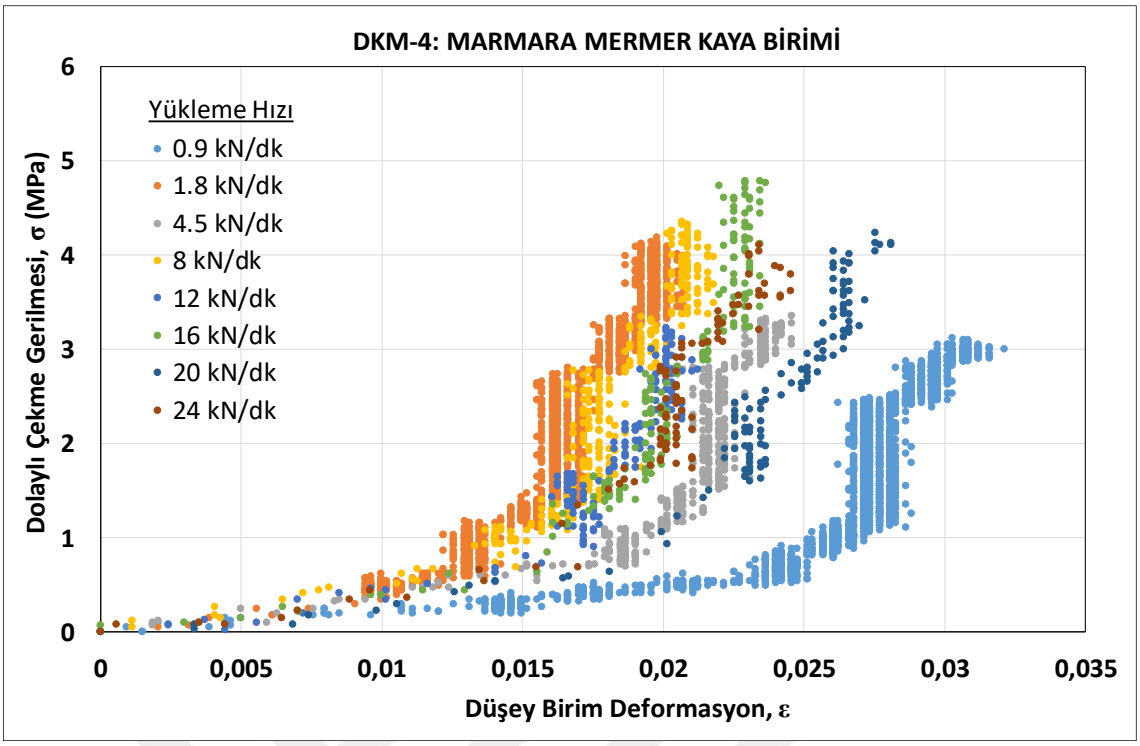
EK3 60-80 MPa aralığında yer alan Marmara Adası mermer kaya birimine (DKM-4) ait deneysel sonuçlar



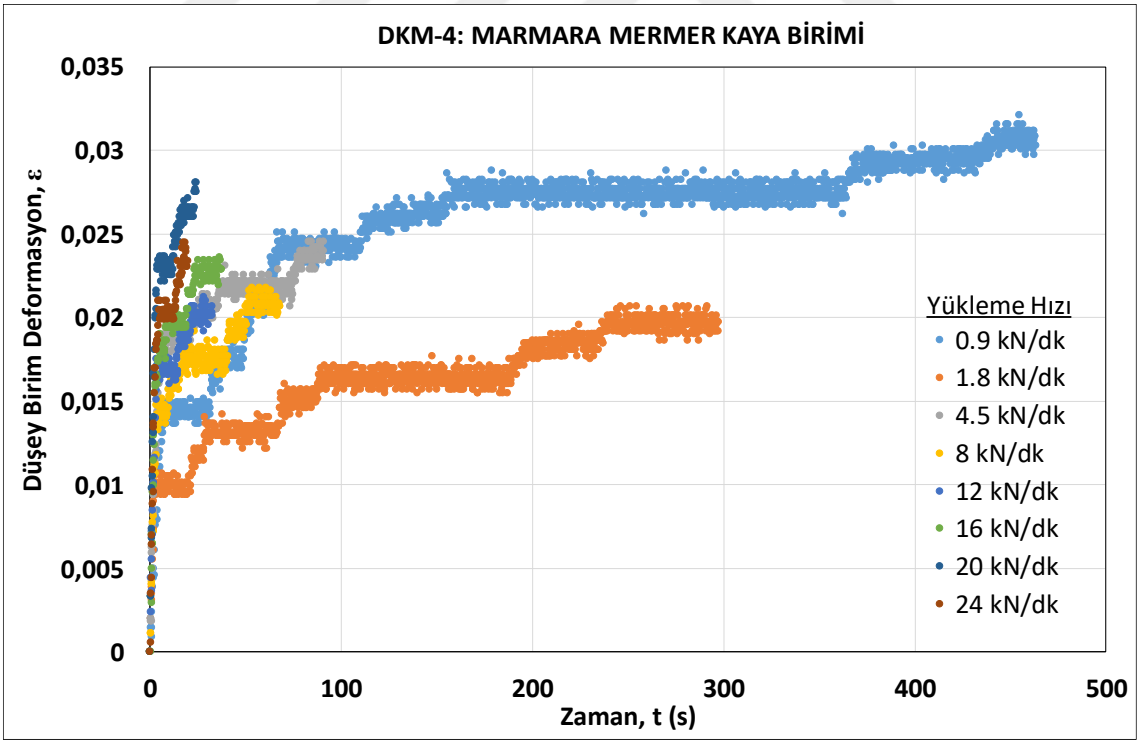
EK3/Şekil 9. DKM-4 Marmara Adası mermer kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK3/Şekil 10. DKM-4 Marmara Adası mermer kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

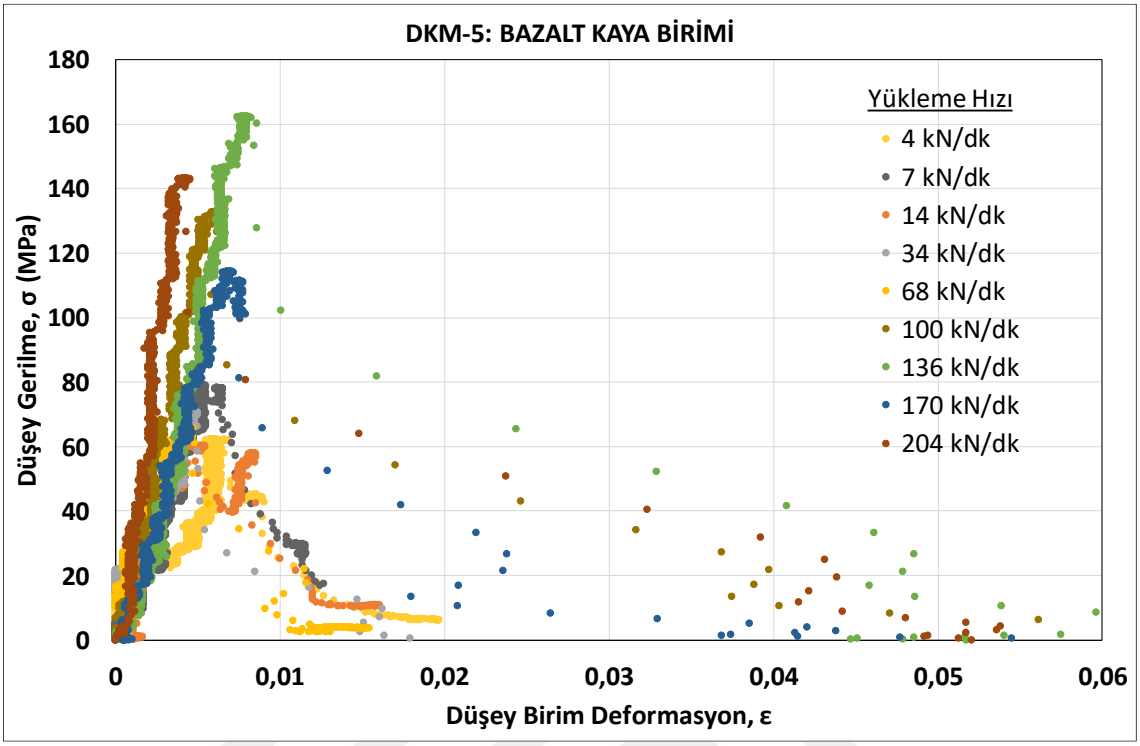


EK3/Şekil 11. DKM-4 Marmara mermer kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

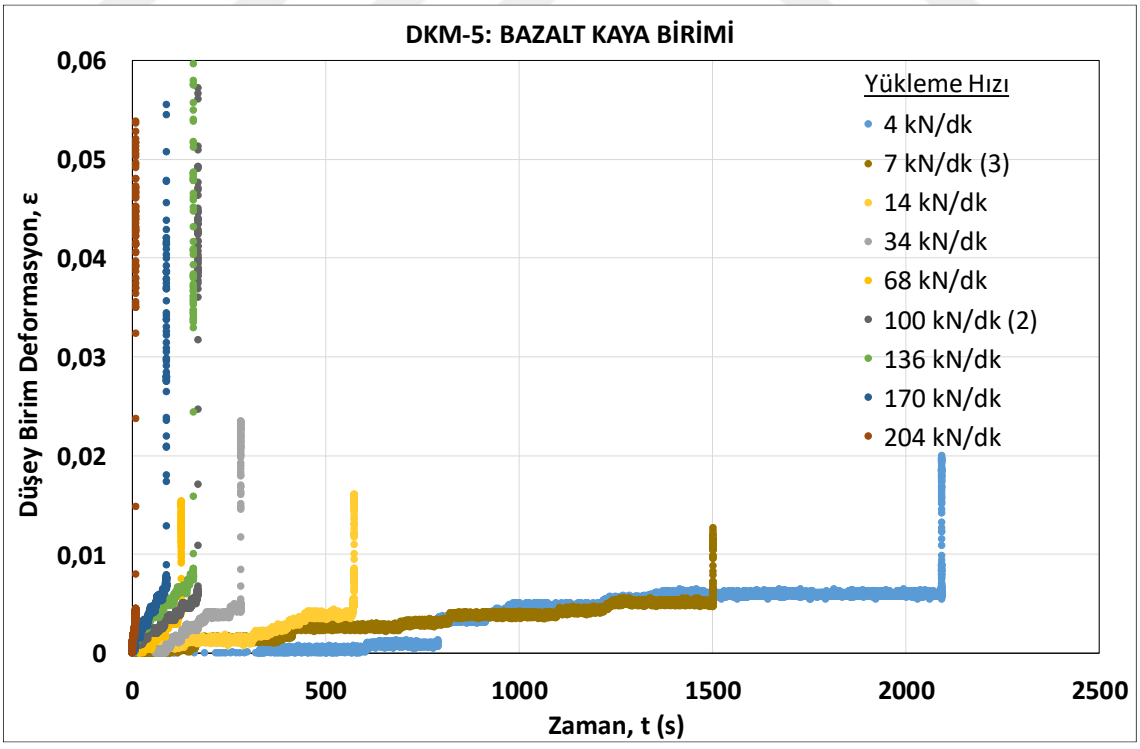


EK3/Şekil 12. DKM-4 Marmara mermer kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

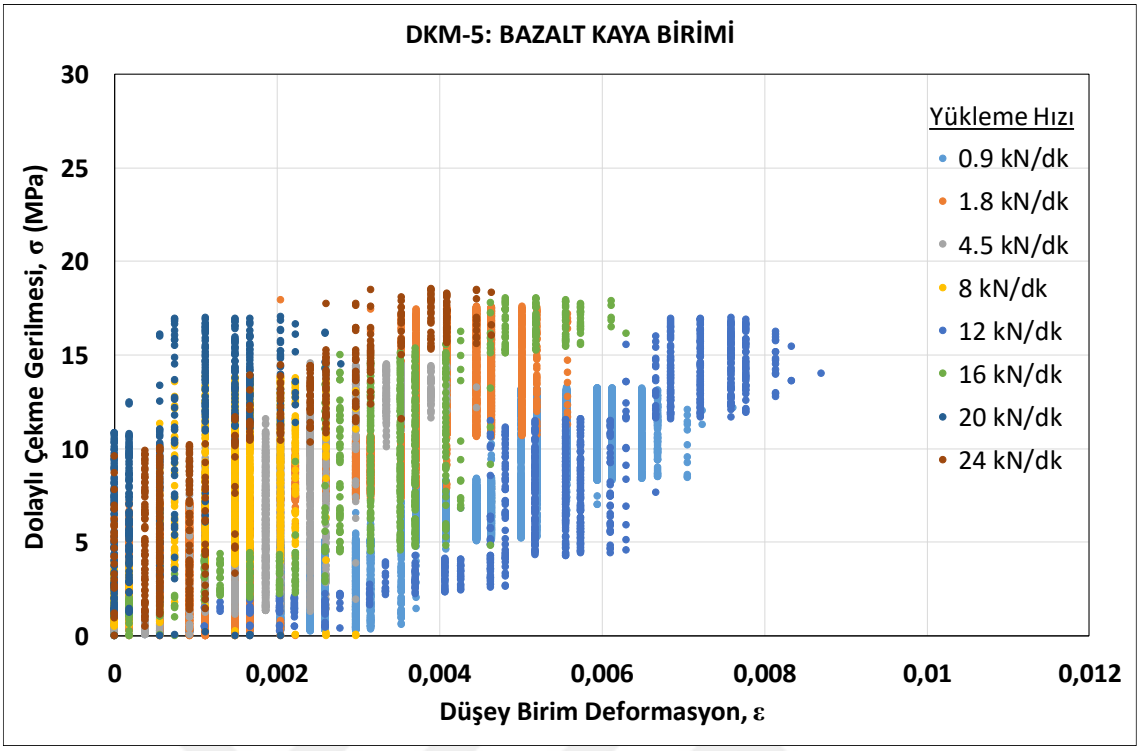
EK4 80-100 MPa aralığında yer alan Kayseri bazalt kaya birimine (DKM-5) ait deneysel sonuçlar



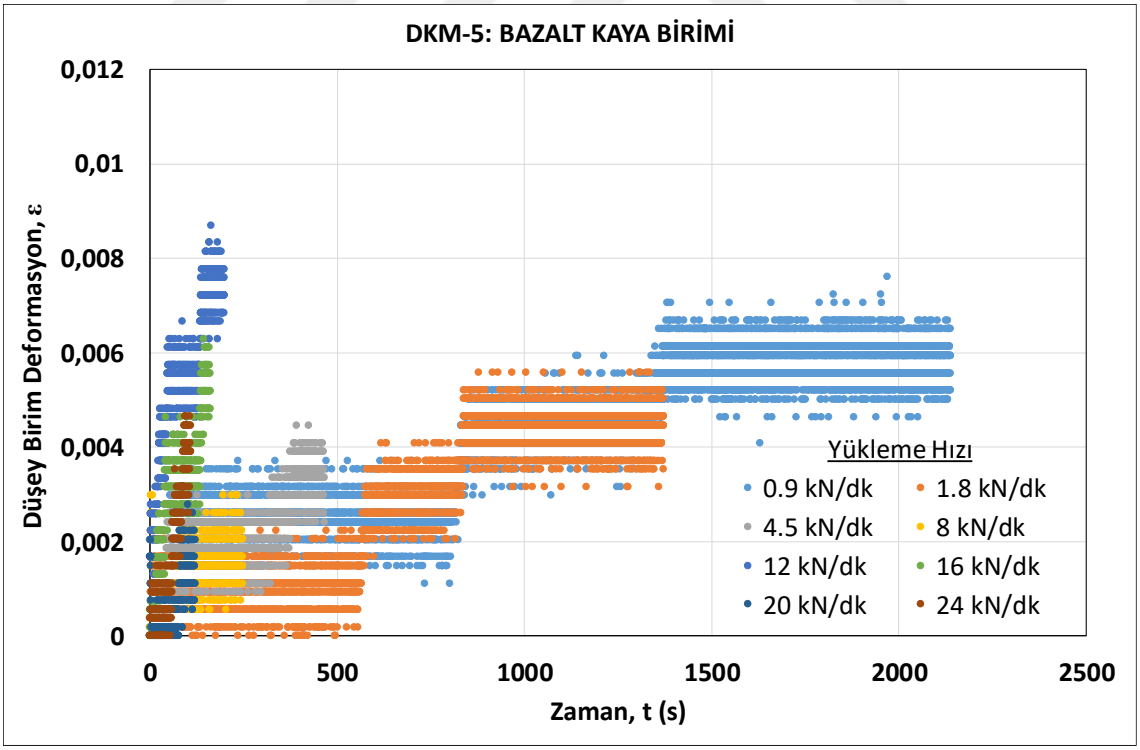
EK4/Şekil 13. DKM-5 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK4/Şekil 14. DKM-5 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

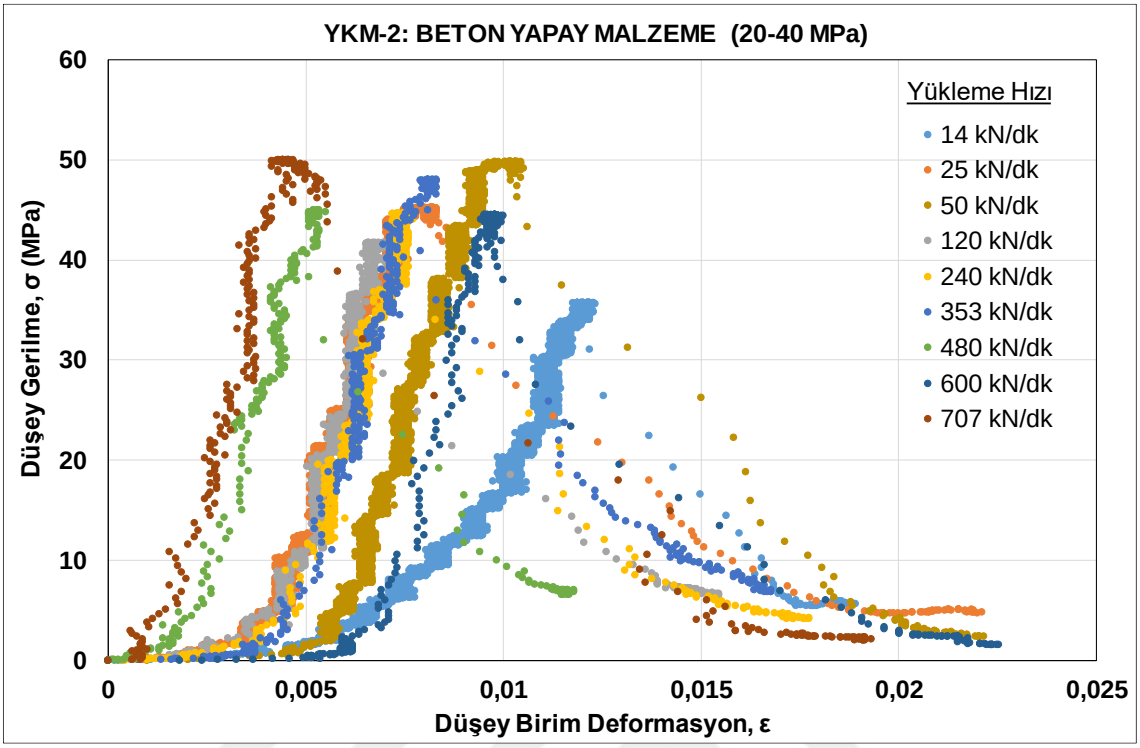


EK4/Şekil 15. DKM-5 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

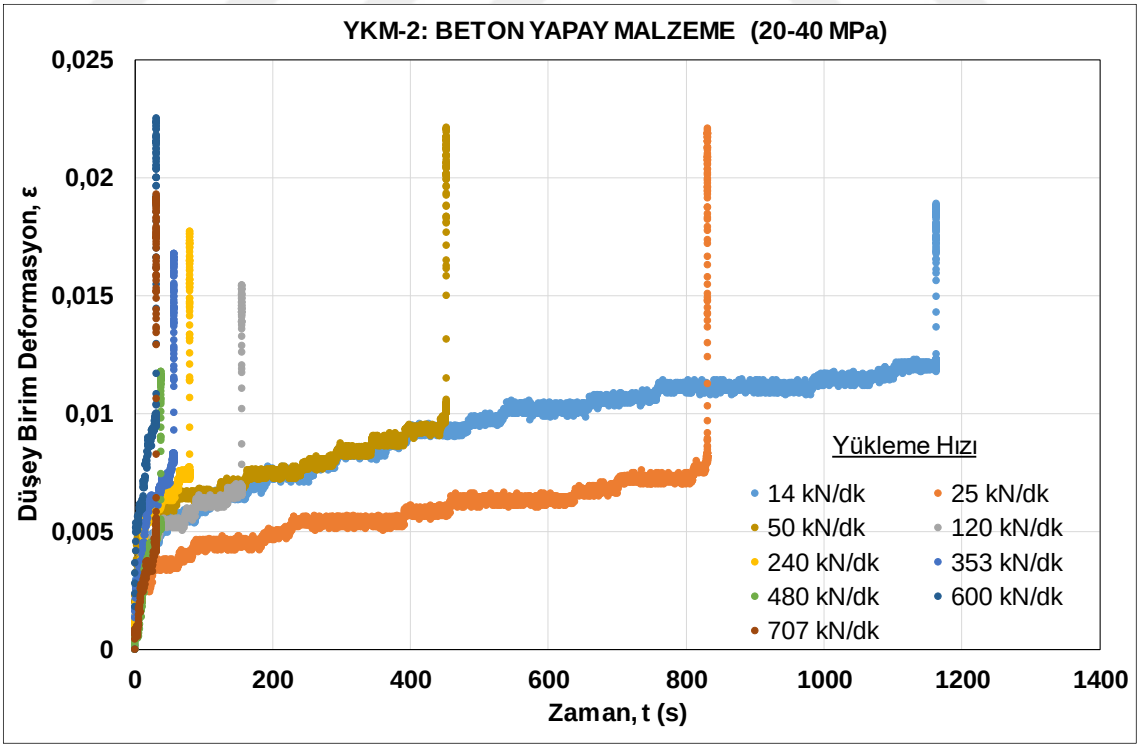


EK4/Şekil 16. DKM-5 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

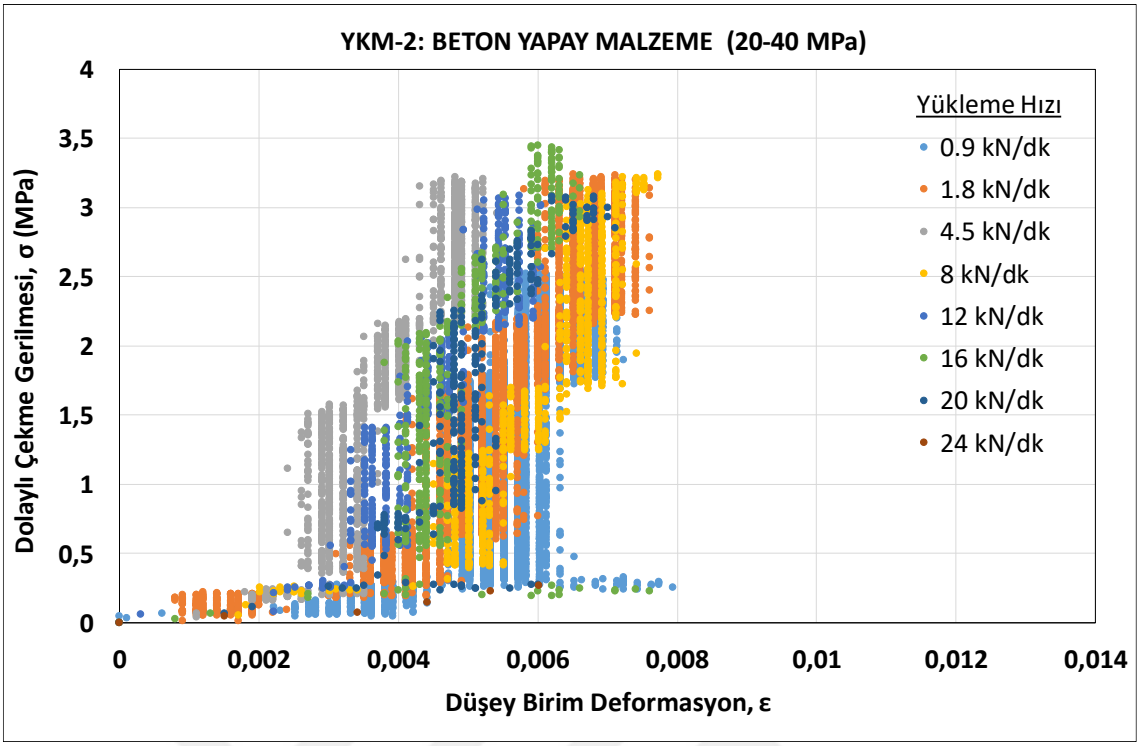
EK5 20-40 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-2) ait deneysel sonuçlar



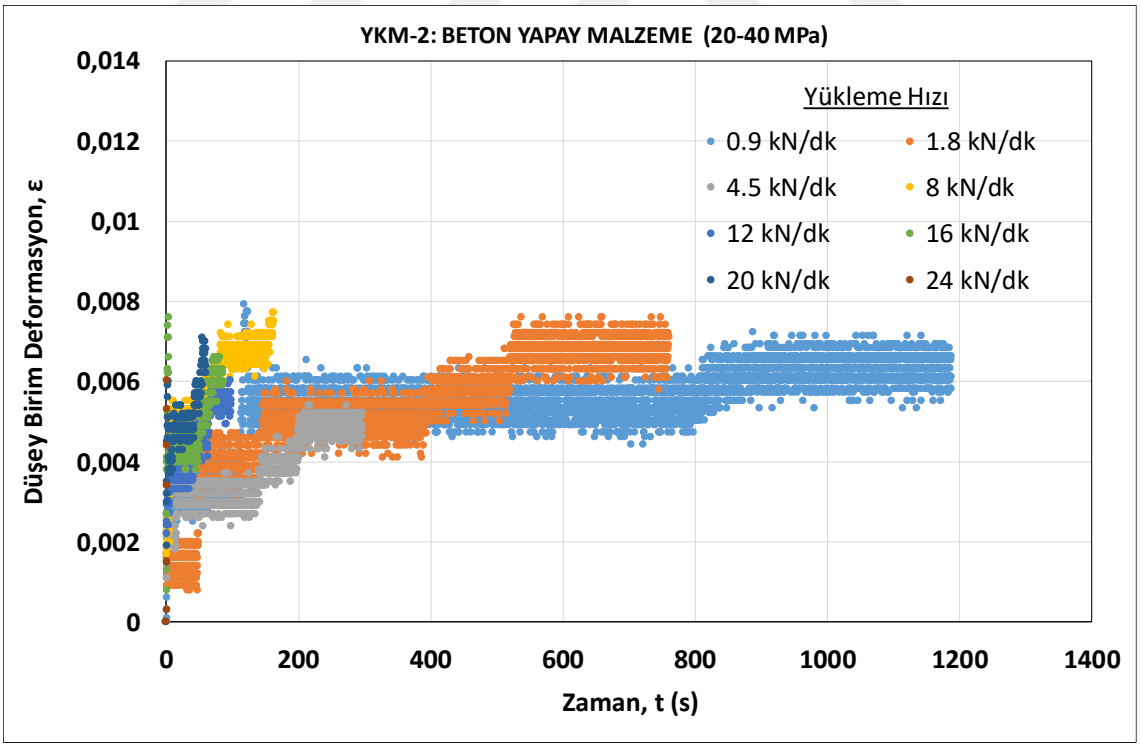
EK5/Şekil 17. YKM-2 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK5/Şekil 18. YKM-2 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

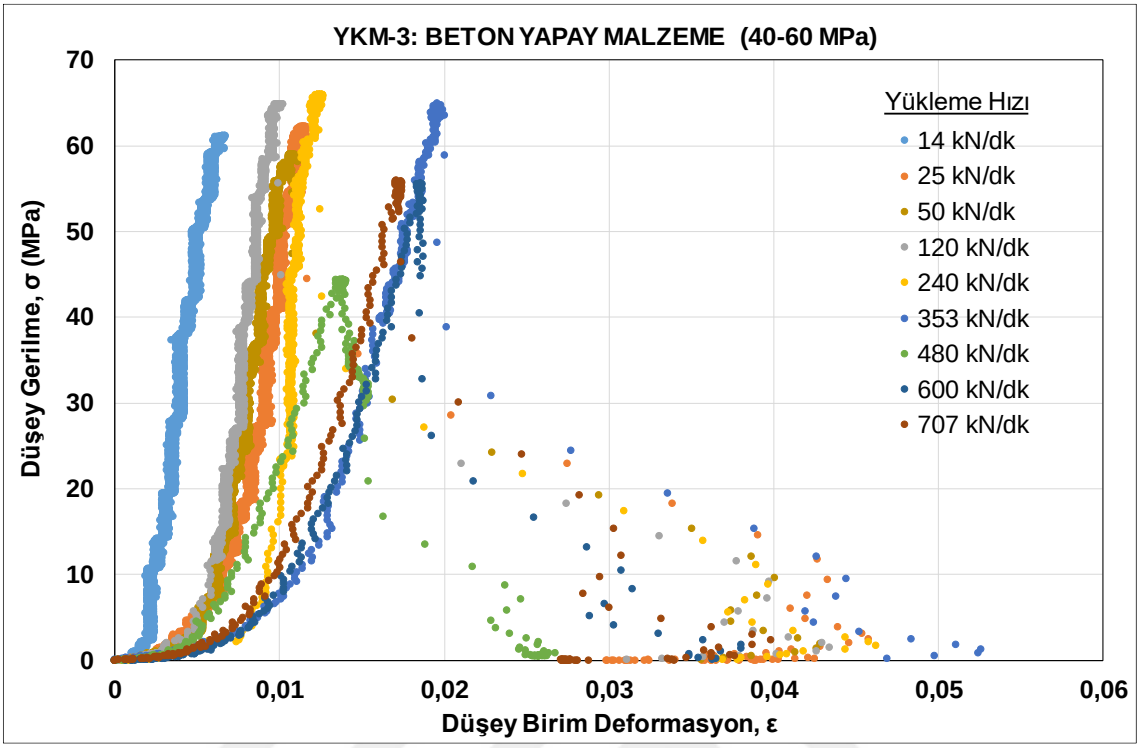


EK5/Şekil 19. YKM-2 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

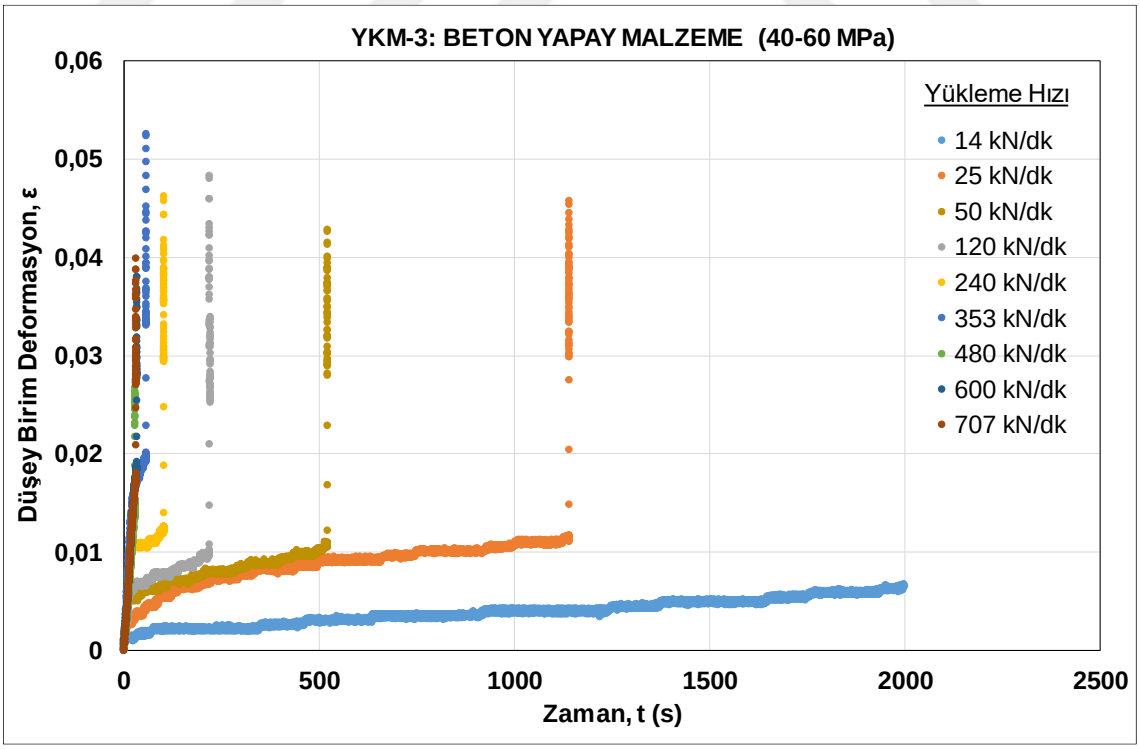


EK5/Şekil 20. YKM-2 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

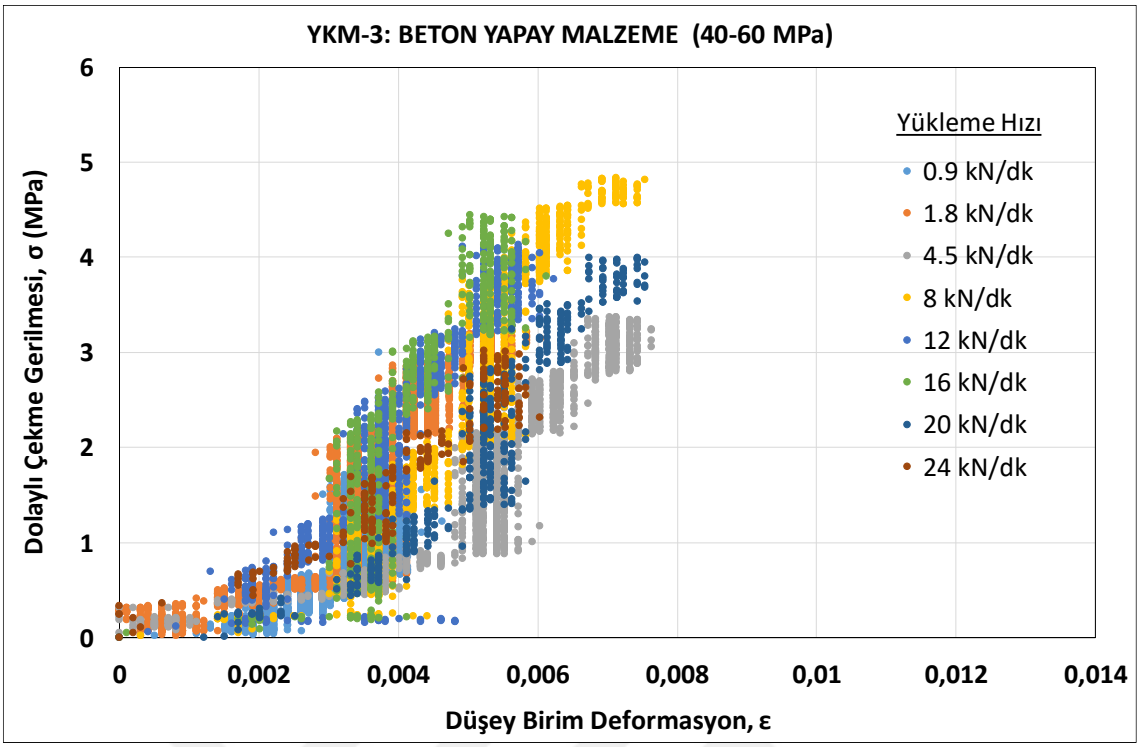
EK6 40-60 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-3) ait deneysel sonuçlar



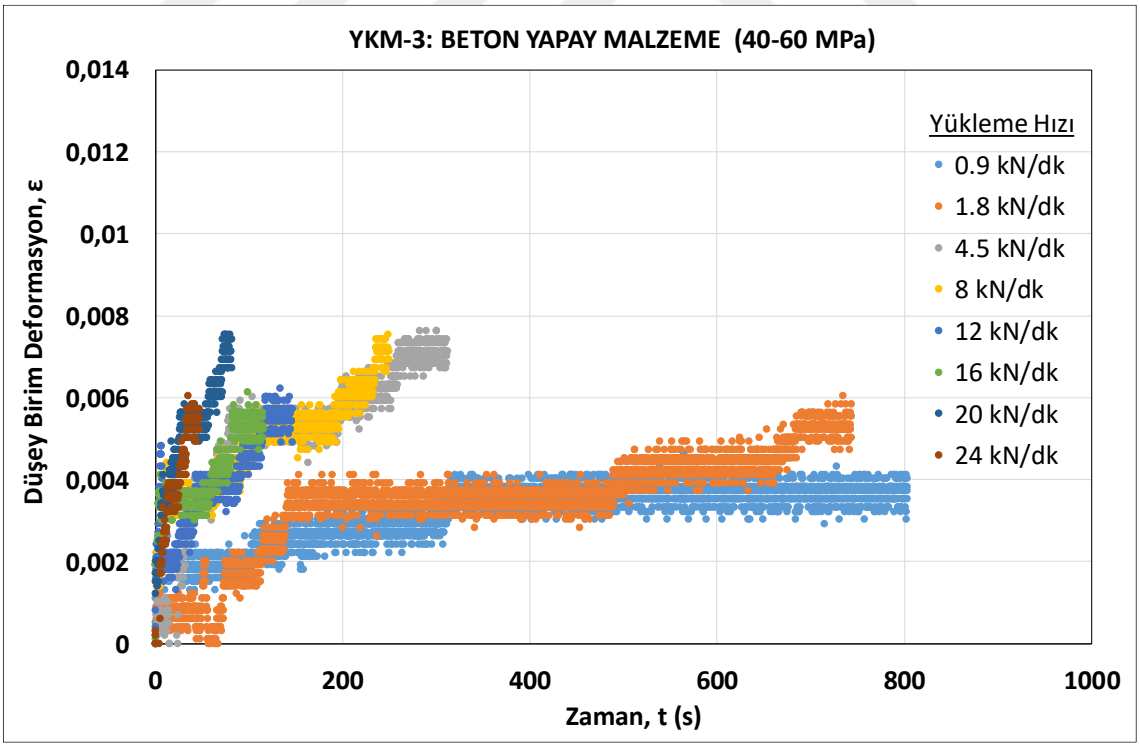
EK6/Şekil 21. YKM-3 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK6/Şekil 22. YKM-3 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

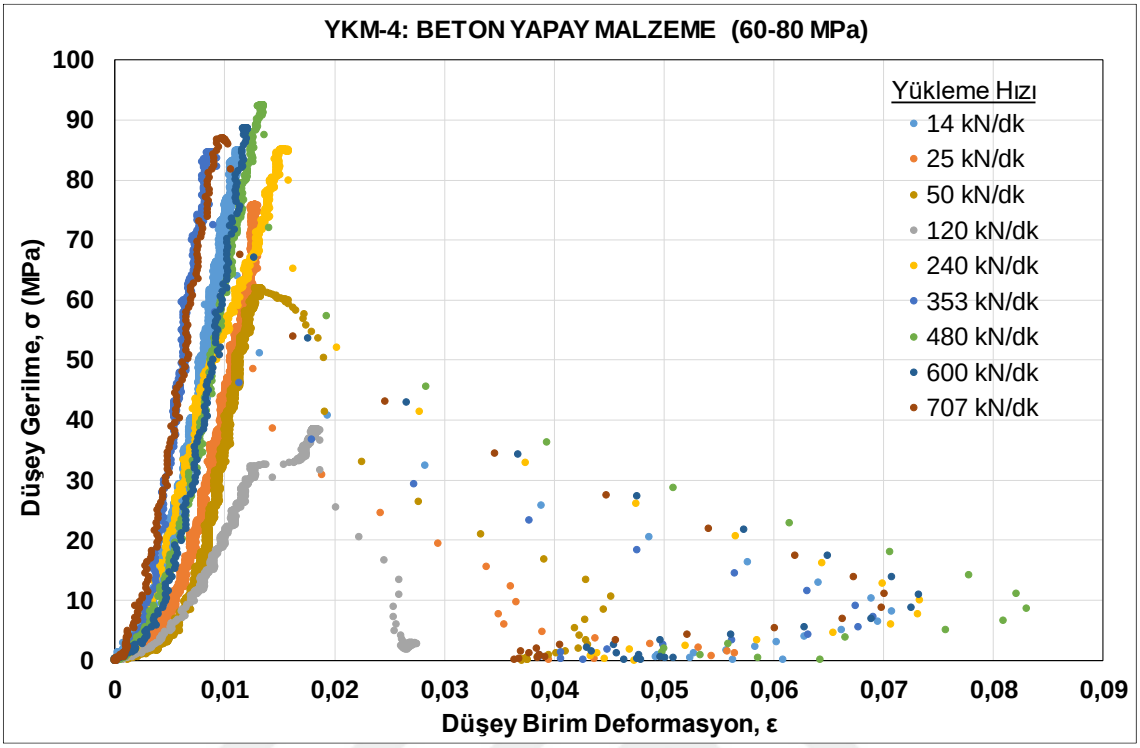


EK6/Şekil 23. YKM-3 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

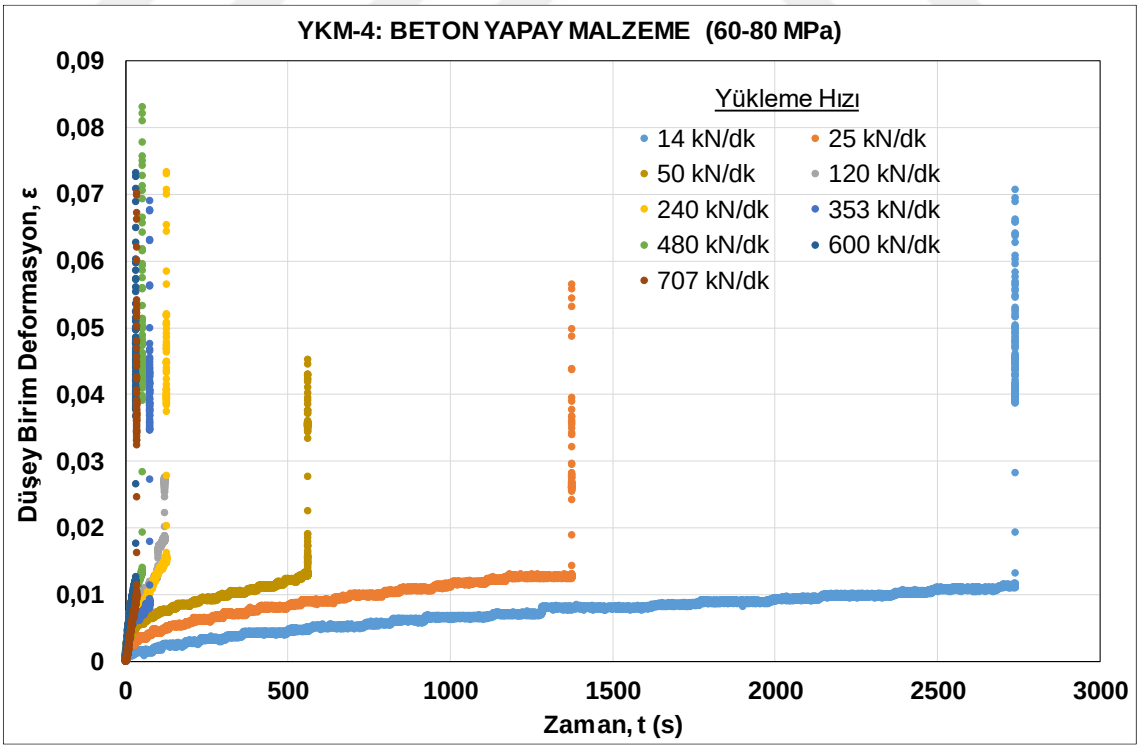


EK6/Şekil 24. YKM-3 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

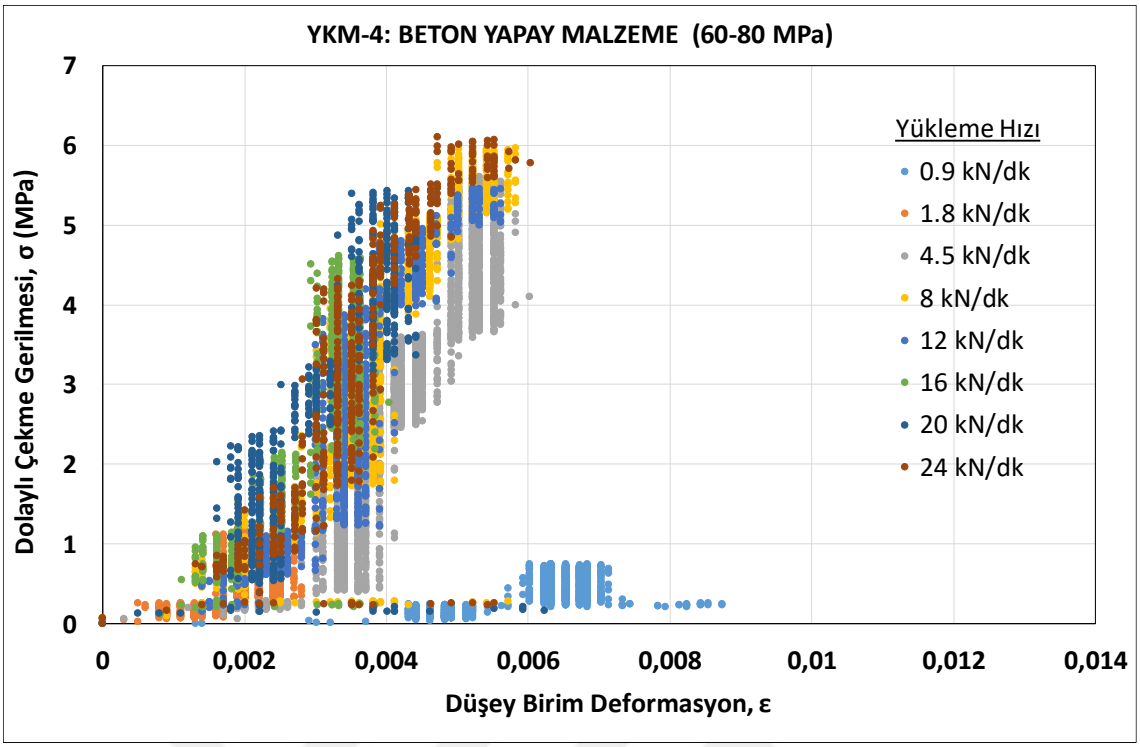
EK7 60-80 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar



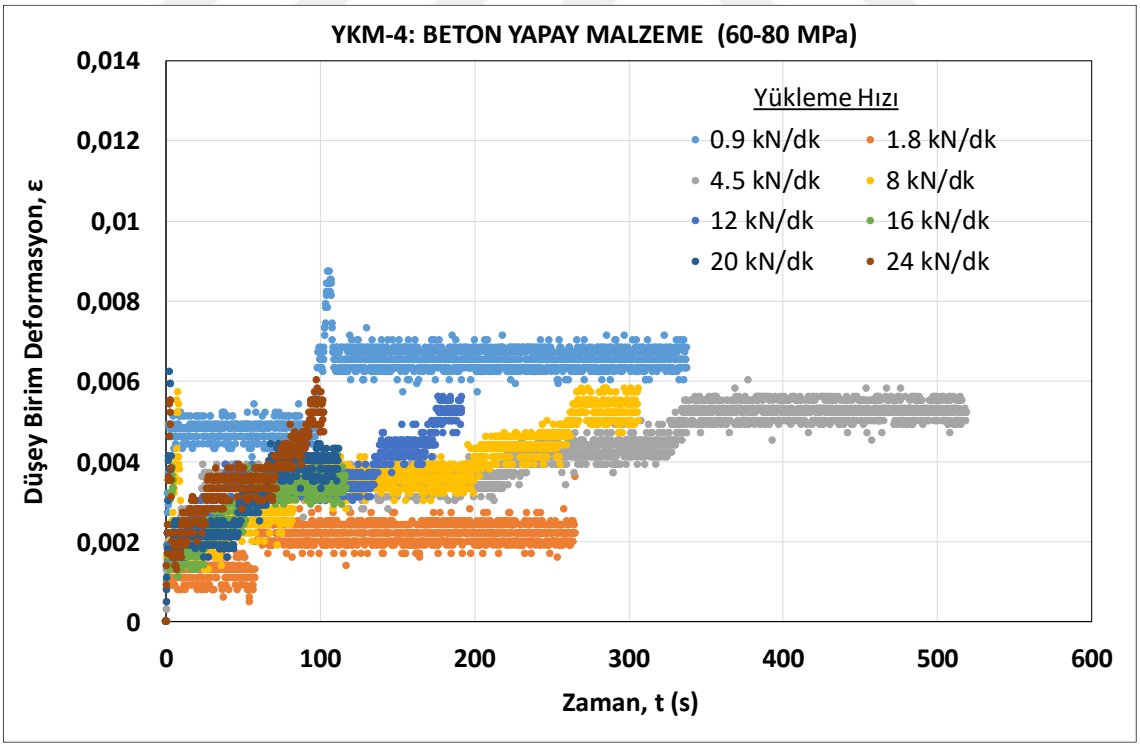
EK7/Şekil 25. YKM-4 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK7/Şekil 26. YKM-4 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

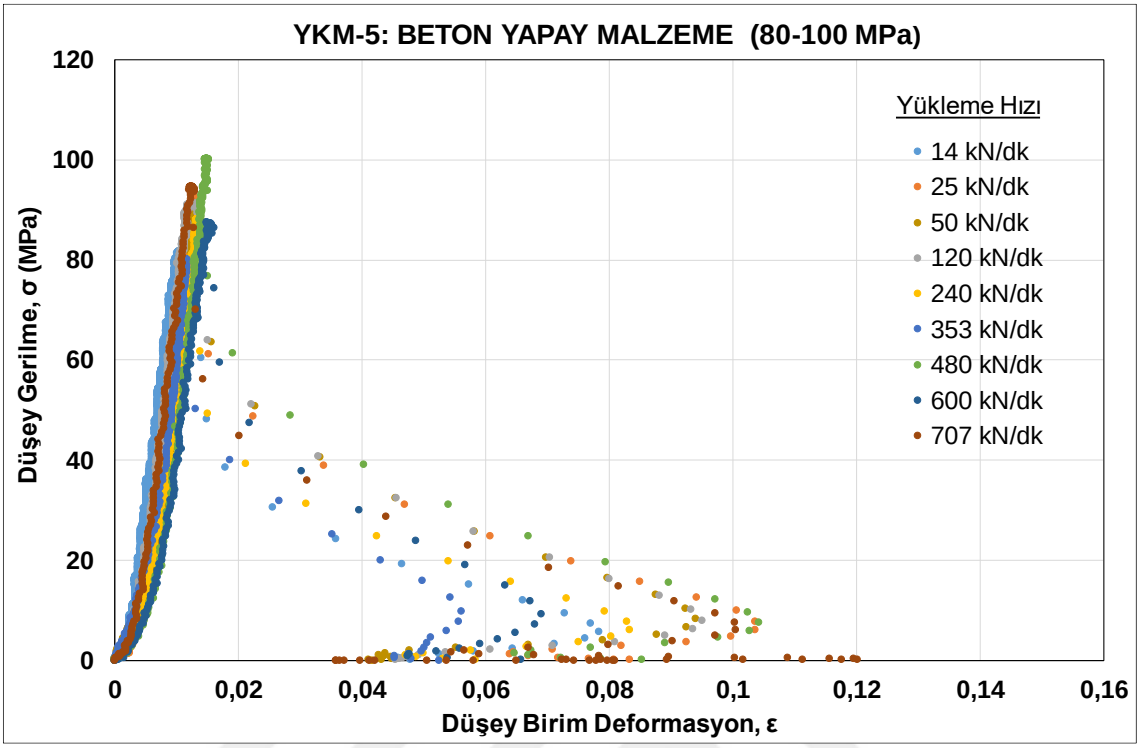


EK7/Şekil 27. YKM-4 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

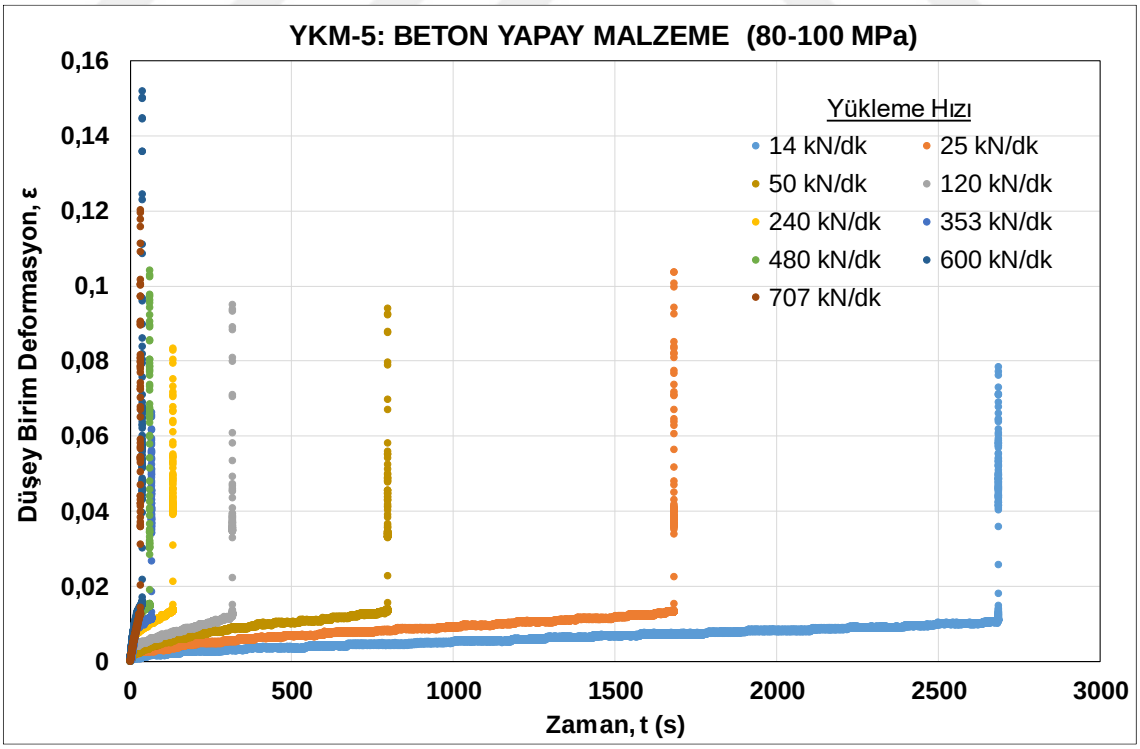


EK7/Şekil 28. YKM-4 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

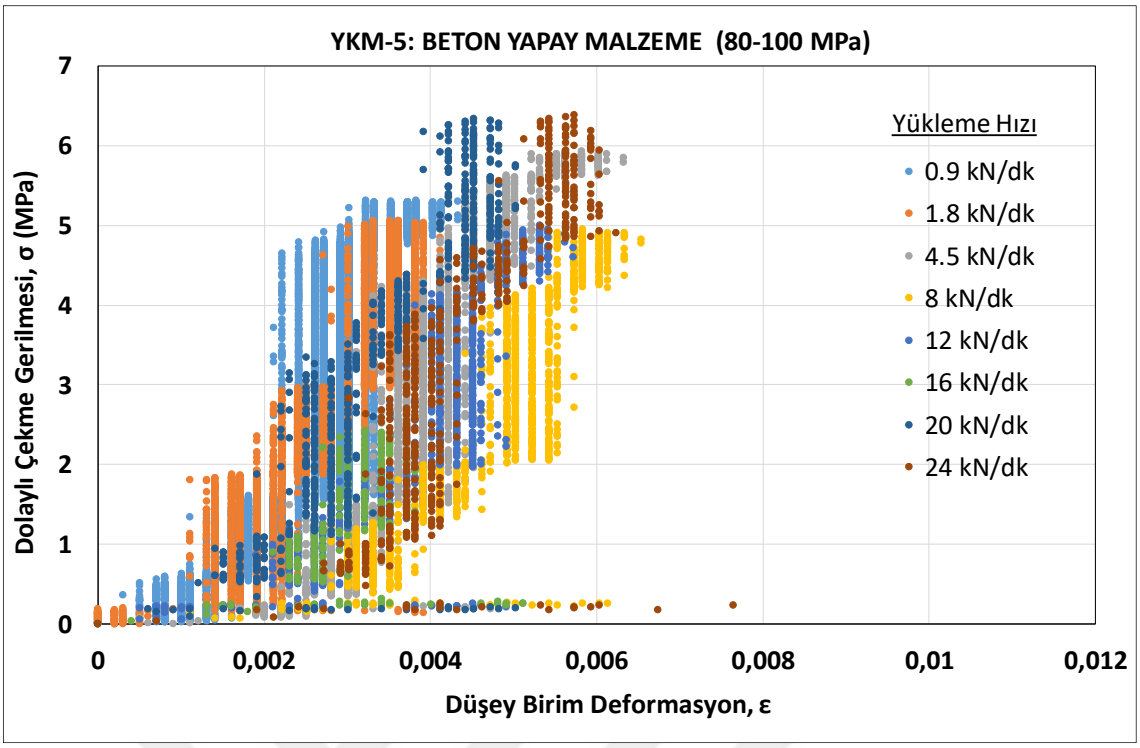
EK8 80-100 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar



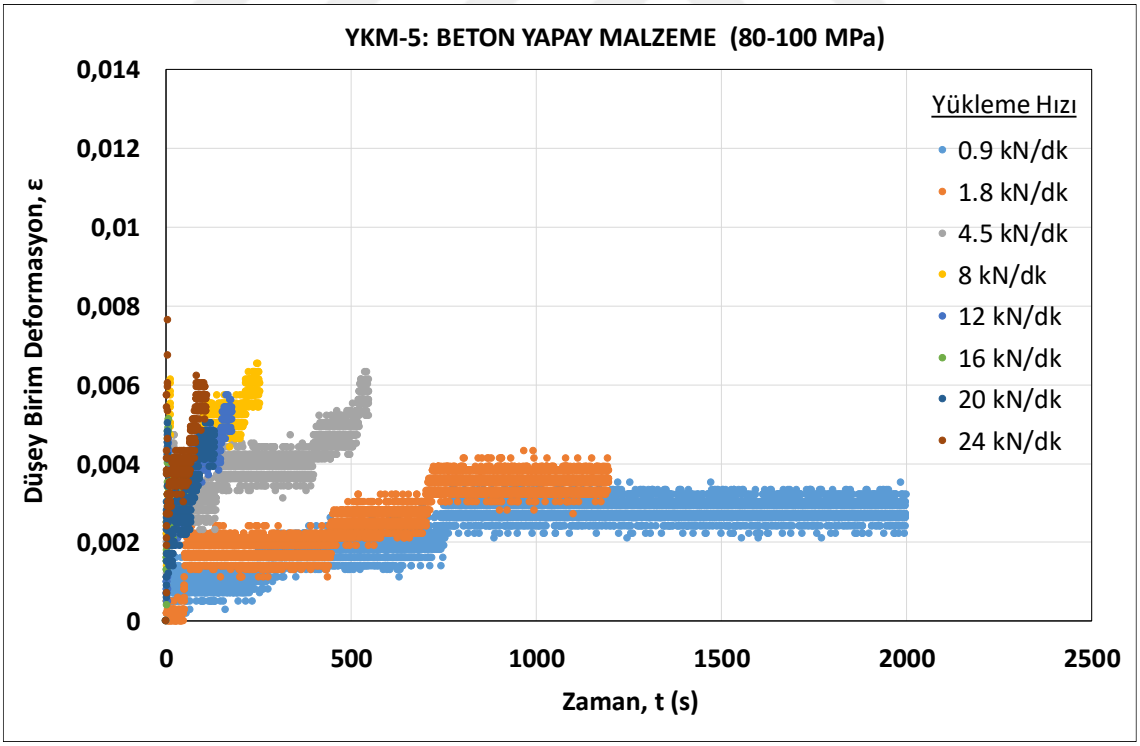
EK8/Şekil 29. YKM-5 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları



EK8/Şekil 30. YKM-5 kaya birimi için TEB koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

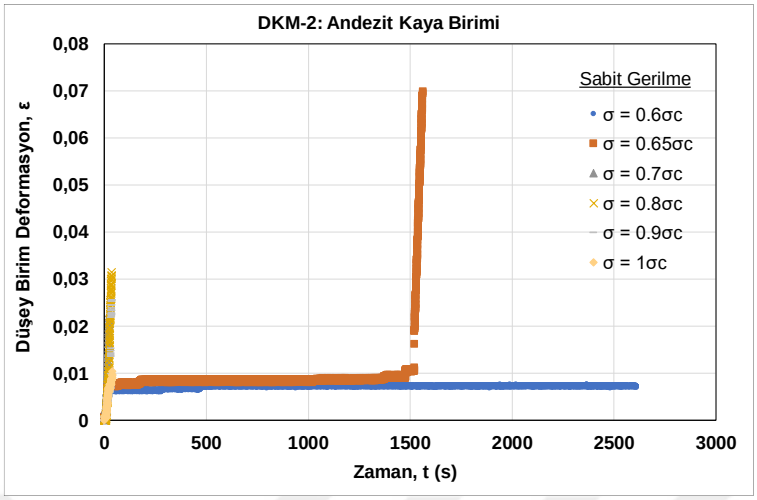


EK8/Şekil 31. YKM-5 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında gerilme-birim deformasyon davranışları

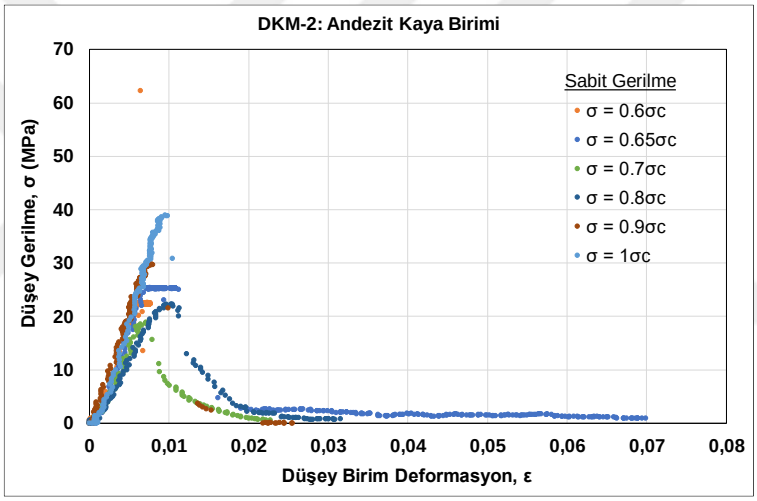


EK8/Şekil 32. YKM-5 kaya birimi için DÇ koşulu altında farklı yükleme hızlarında zaman-birim deformasyon davranışları

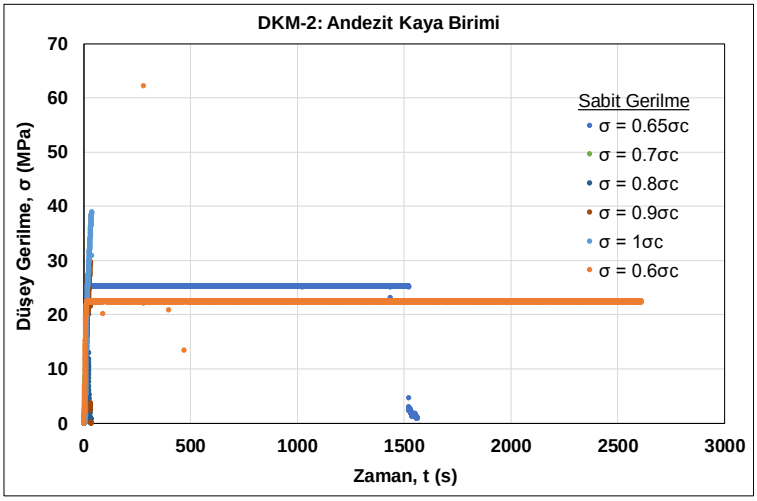
EK9 20-40 MPa aralığında yer alan Sille andezit kaya birimine (DKM-2) ait deneysel sonuçlar



d) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

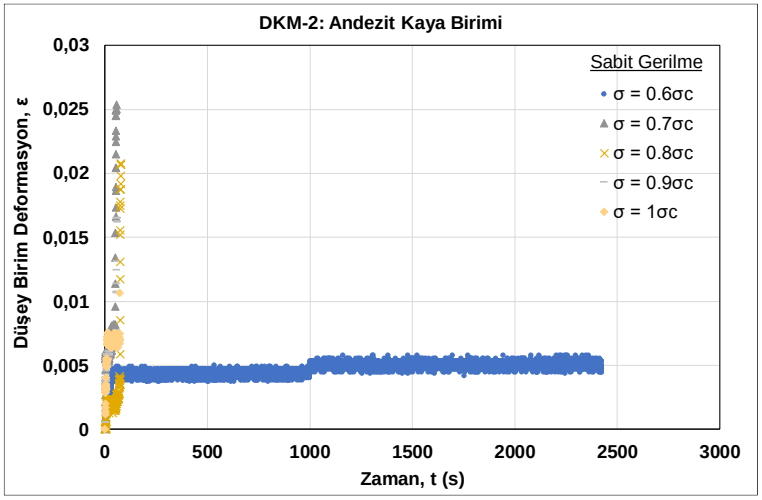


e) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

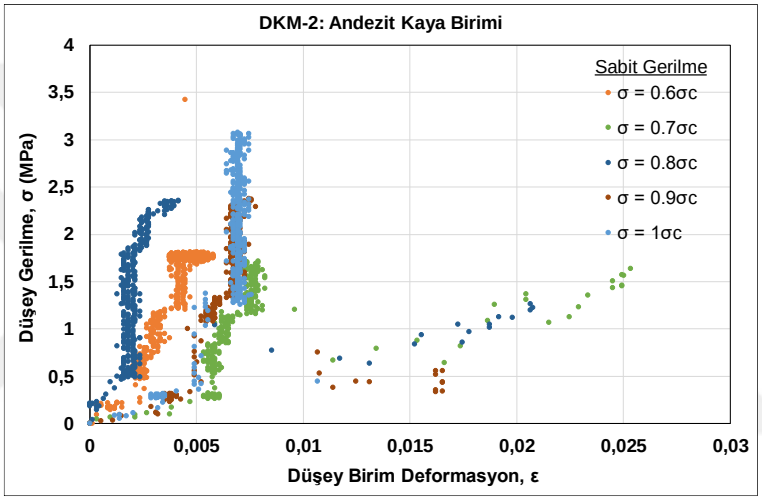


f) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

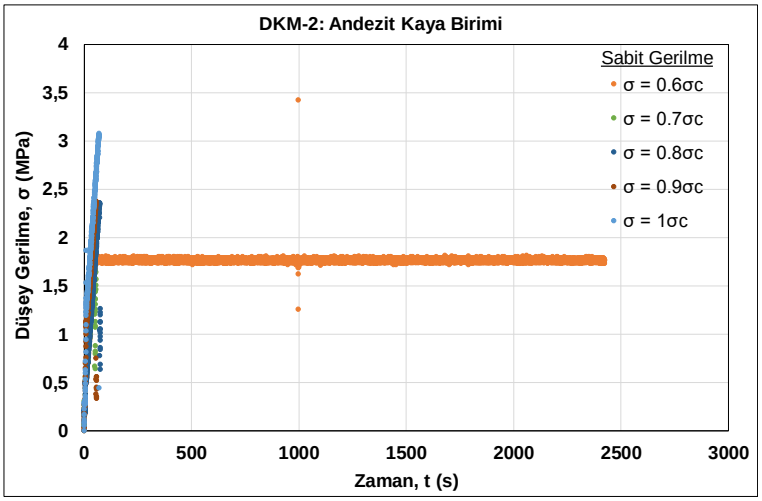
EK9/Şekil 33. DKM-2 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



d) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



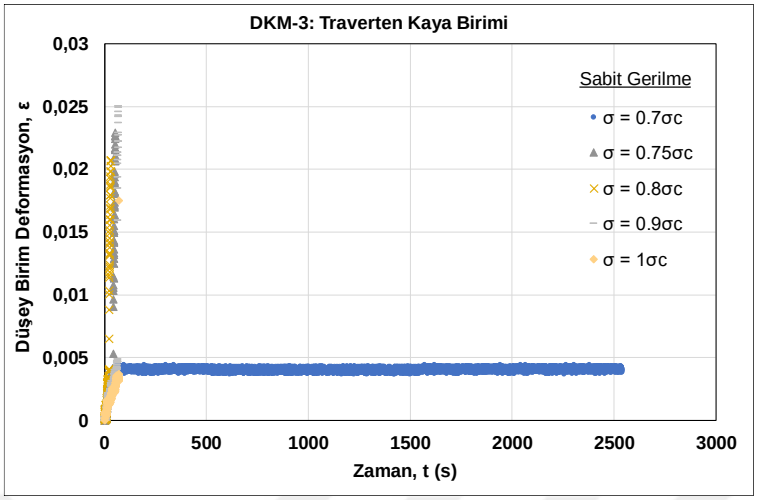
e) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



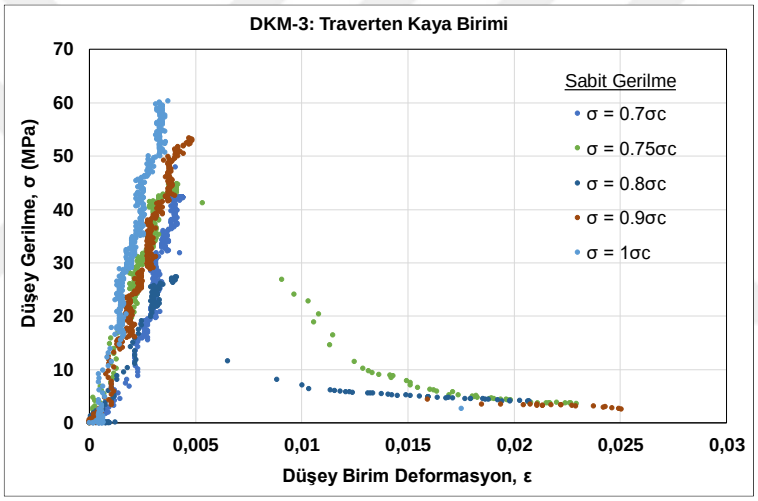
f) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK9/Şekil 34. DKM-2 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

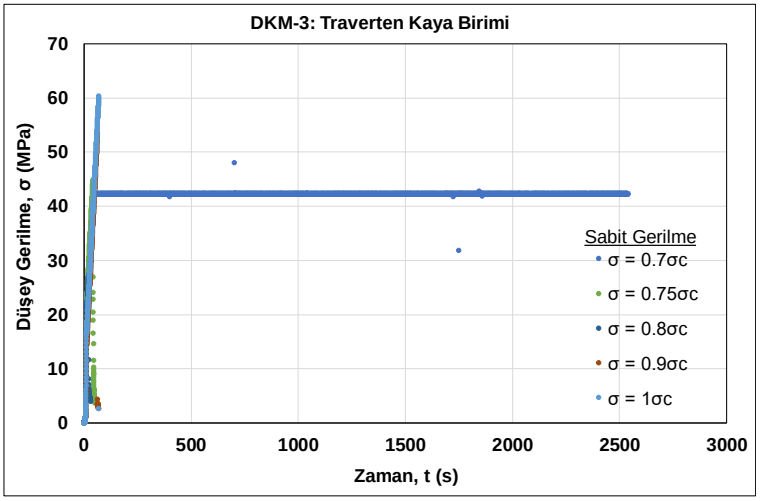
EK10 40-60 MPa aralığında yer alan Karaman traverten kaya birimine (DKM-3) ait deneysel sonuçlar



g) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

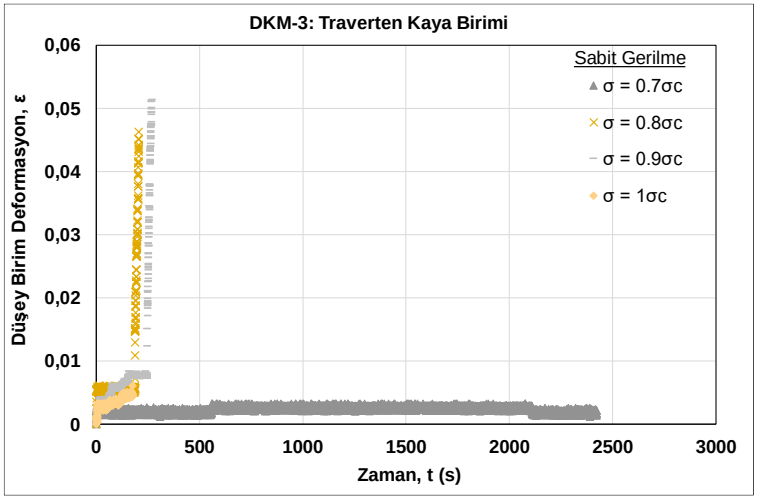


h) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

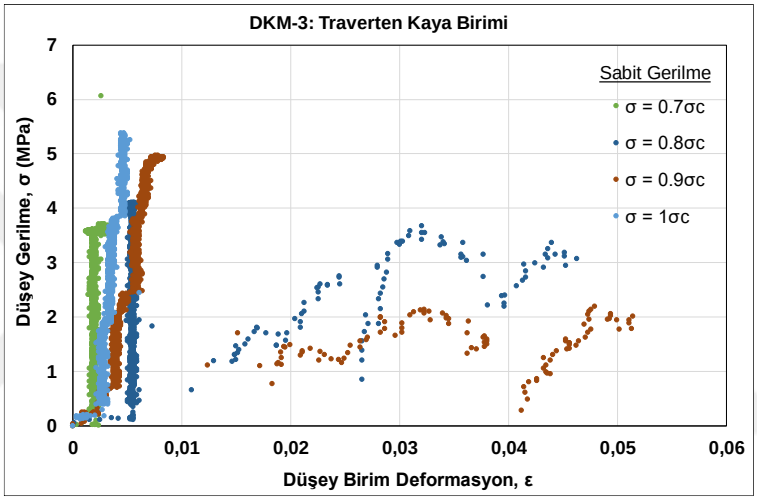


i) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

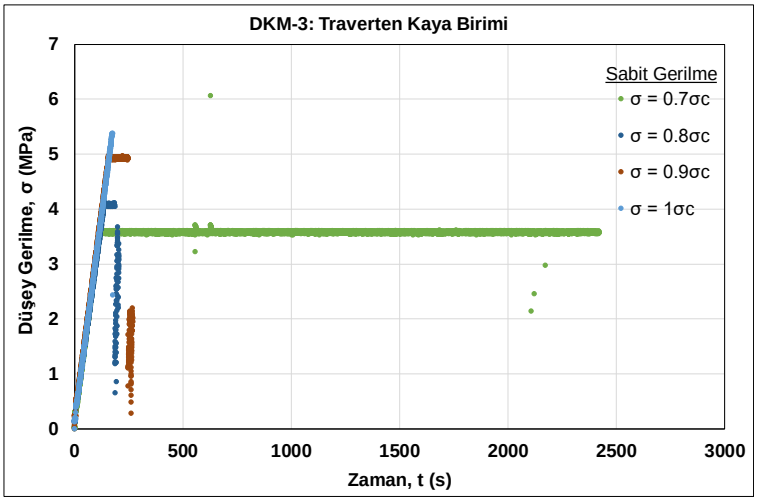
EK10/Şekil 35. DKM-3 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



g) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



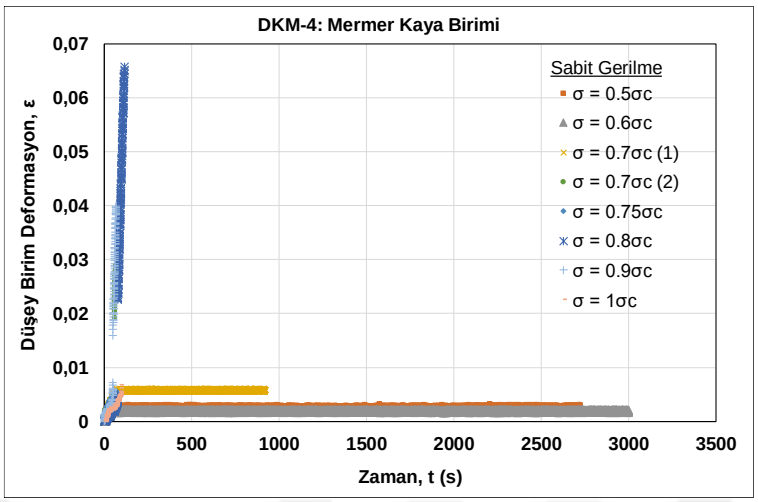
h) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



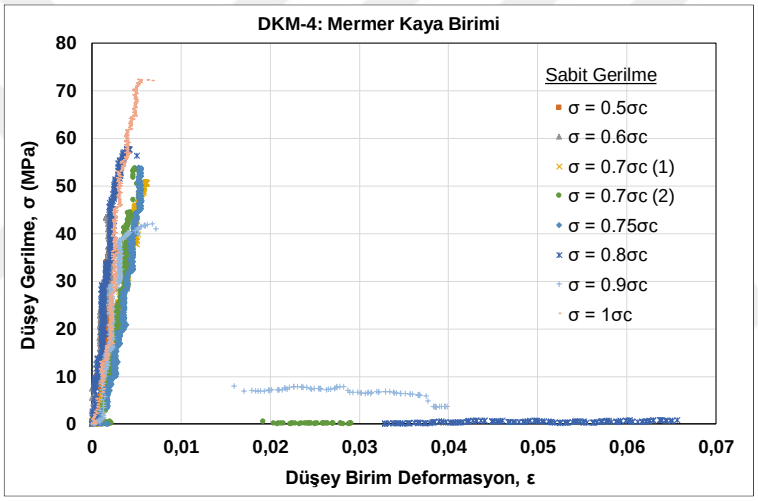
i) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK10/Şekil 36. DKM-3 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

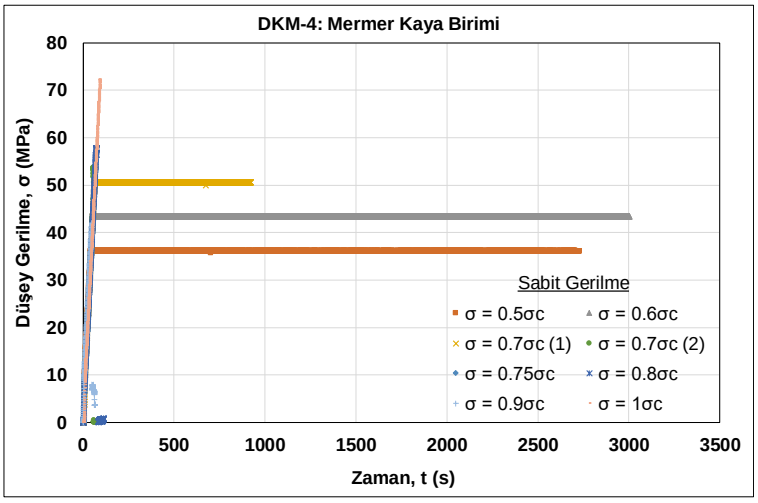
EK11 60-80 MPa aralığında yer alan Marmara mermer kaya birimine (DKM-4) ait deneysel sonuçlar



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

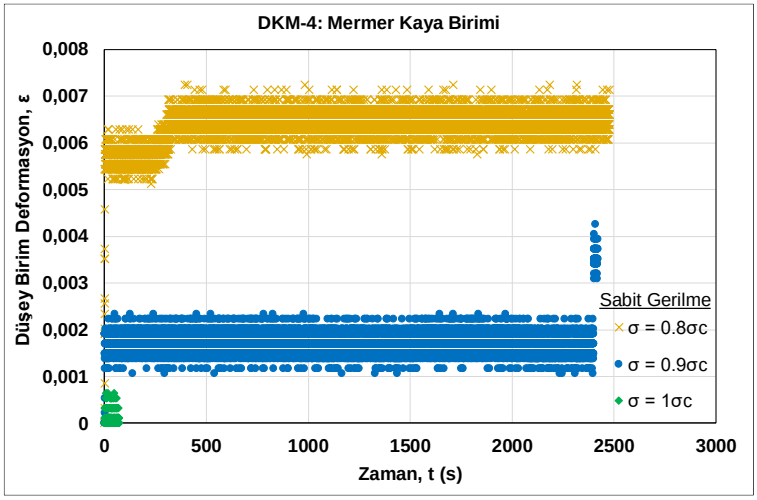


b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

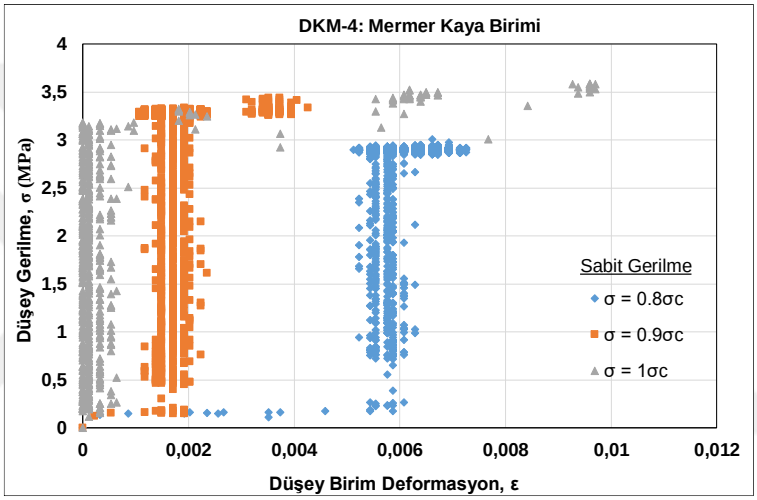


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

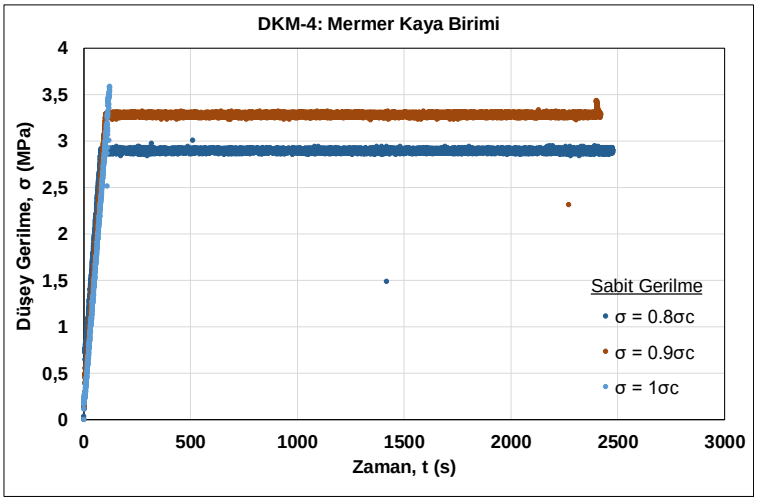
EK11/Şekil 37. DKM-4 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



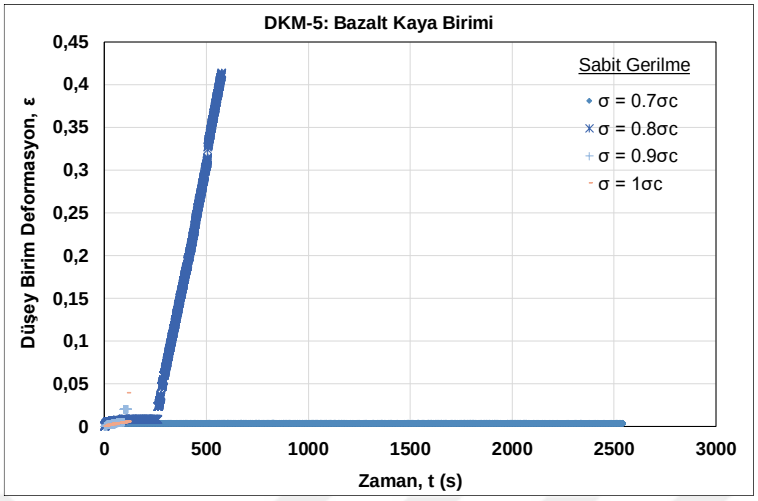
b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



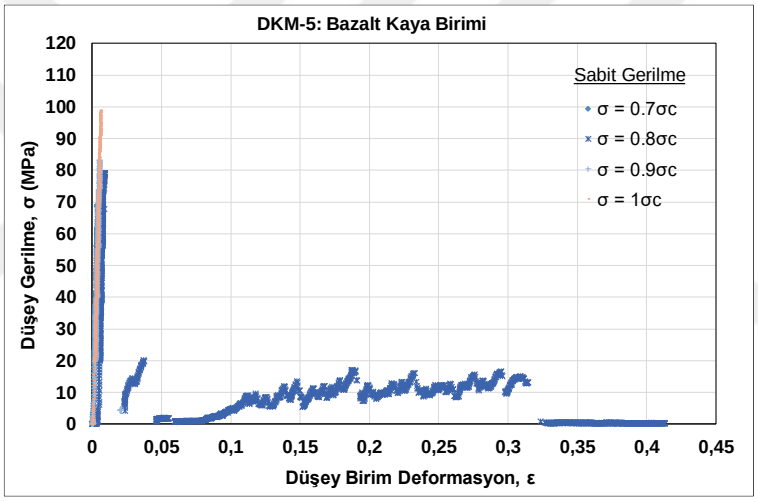
c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK11/Şekil 38. DKM-4 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

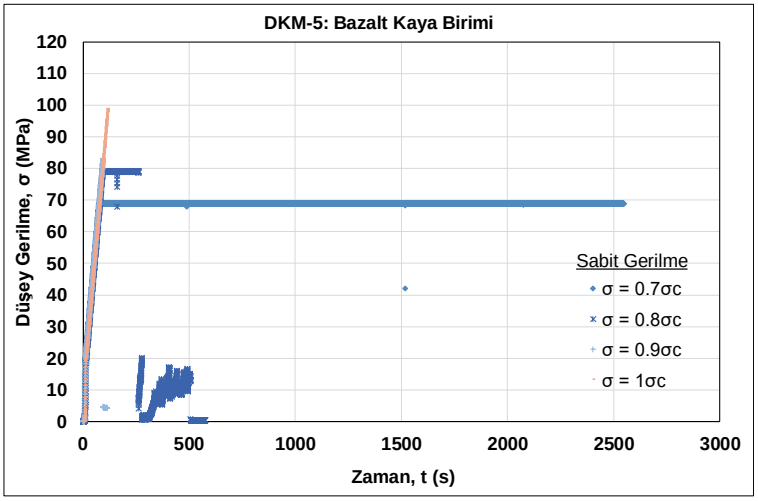
EK12 80-100 MPa aralığında yer alan Kayseri Bazalt kaya birimine (DKM-5) ait deneysel sonuçlar



j) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

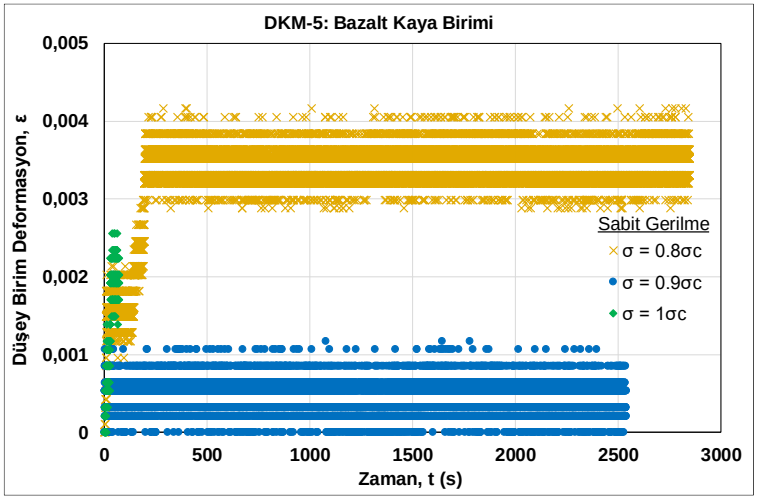


k) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

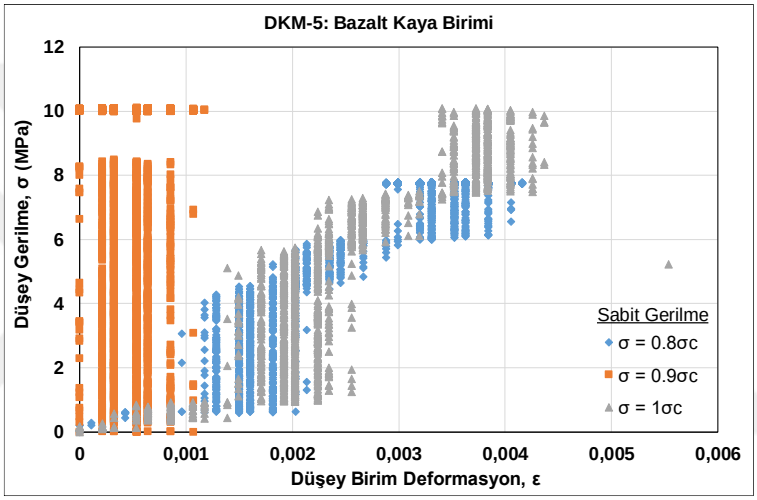


l) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

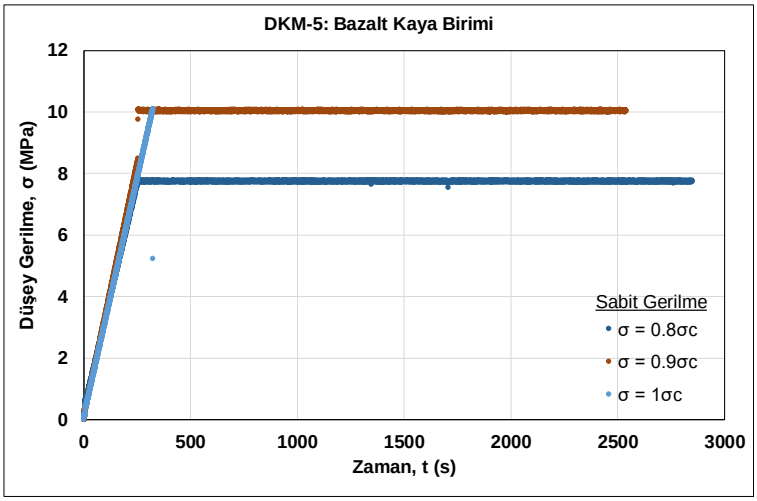
EK12/Şekil 39. DKM-5 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



j) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



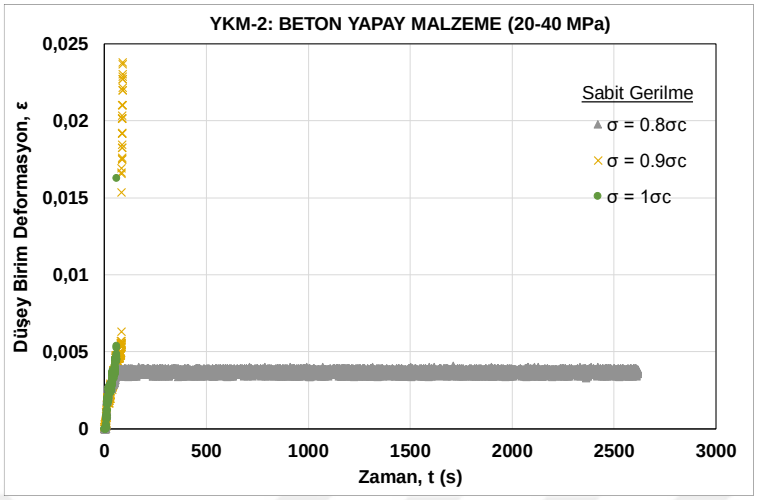
k) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



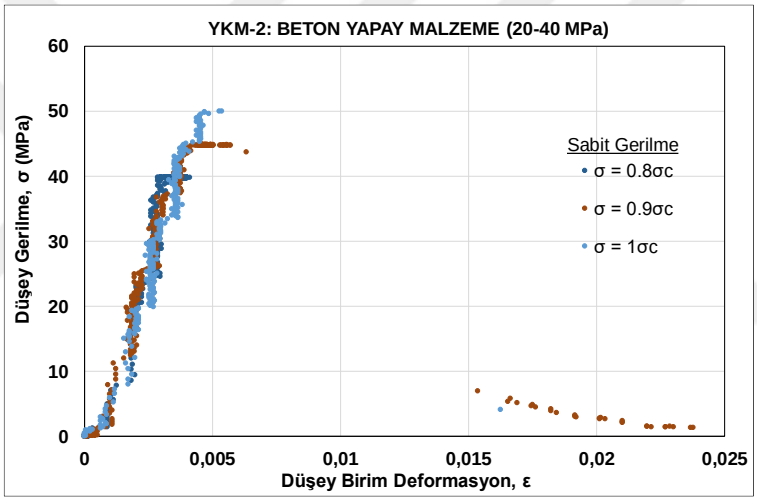
l) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK12/Şekil 40. DKM-5 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

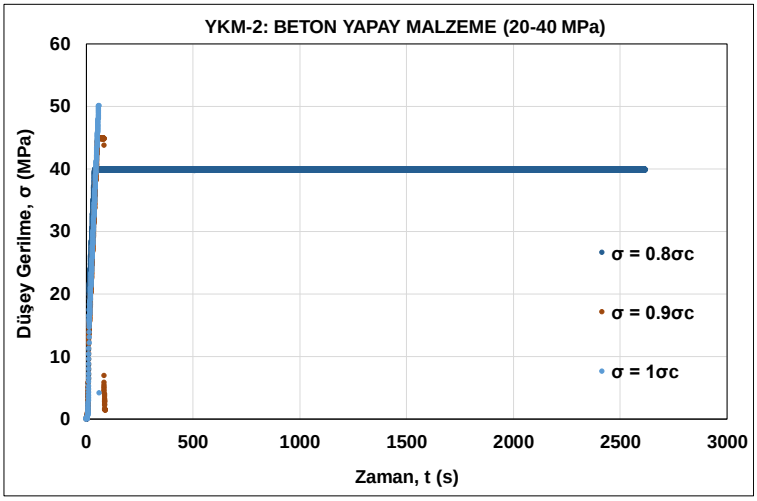
EK13 20-40 MPa aralığında yer alan yapay beton kaya birimine (YKM-2) ait deneysel sonuçlar



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

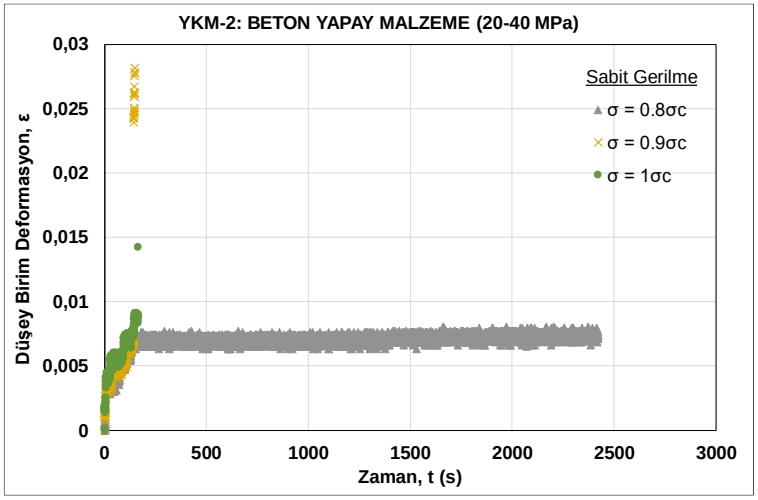


b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

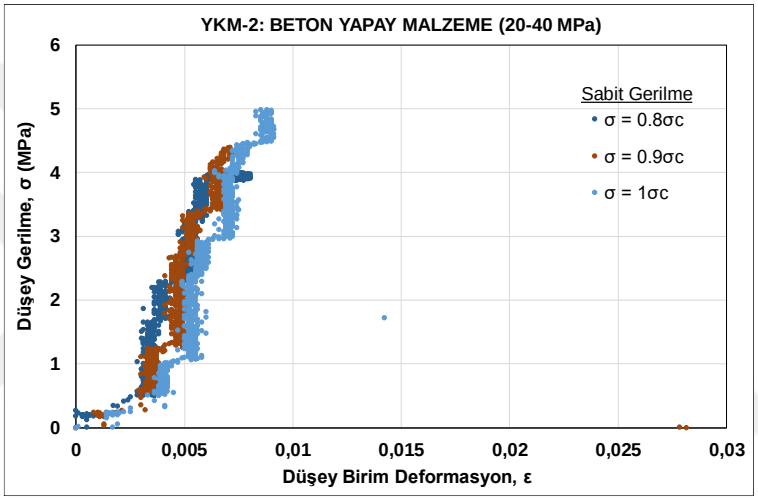


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

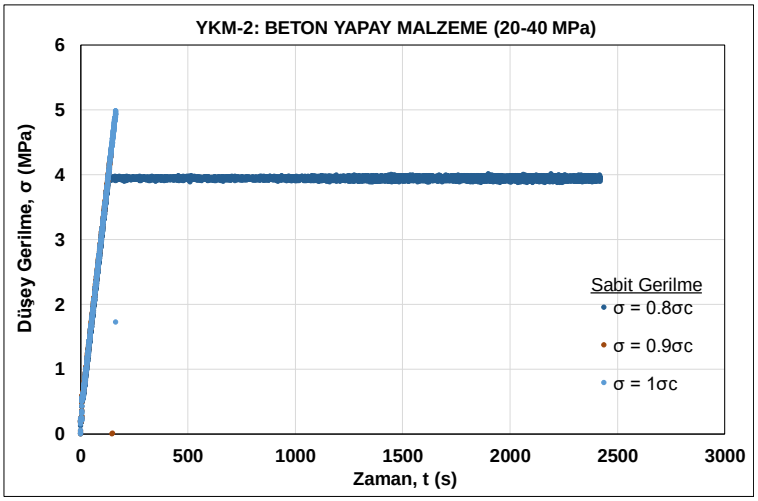
EK13/Şekil 41. YKM-2 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



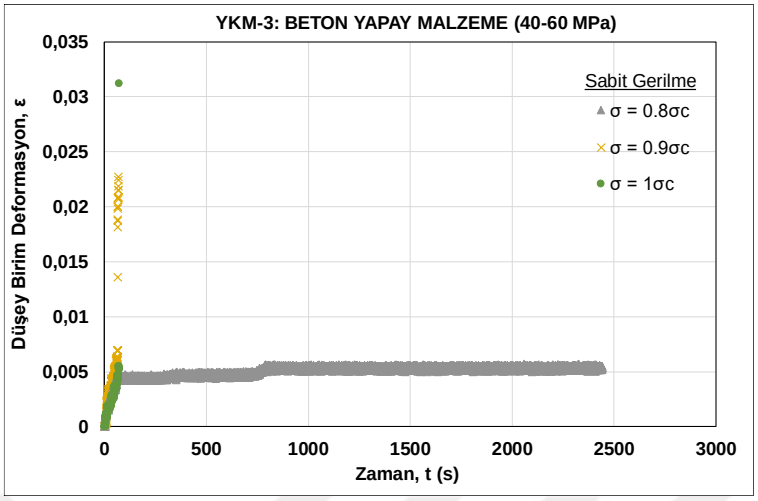
b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



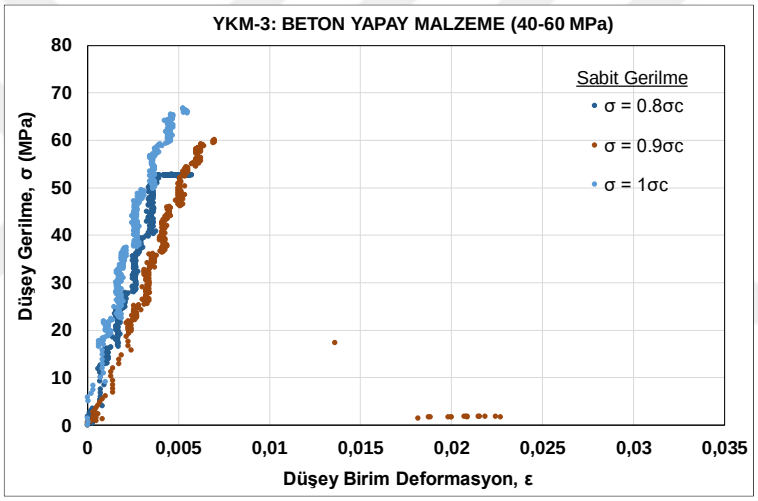
c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK13/Şekil 42. YKM-2 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

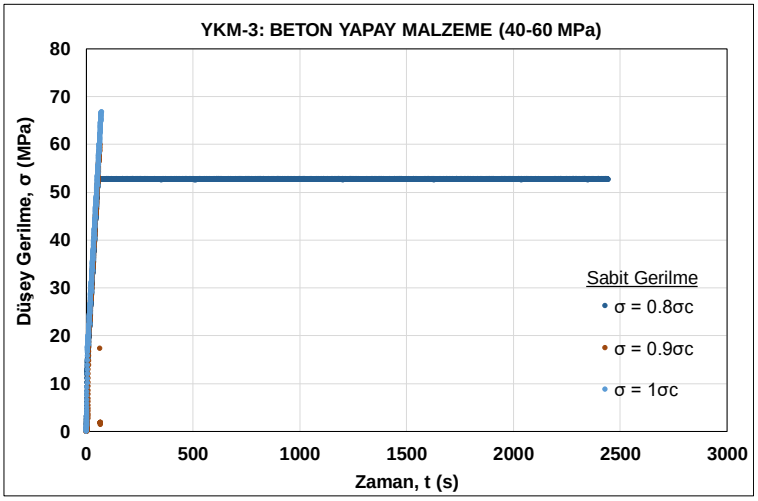
EK14 40-60 MPa aralığında yer alan yapay beton kaya birimine (YKM-3) ait deneysel sonuçlar



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

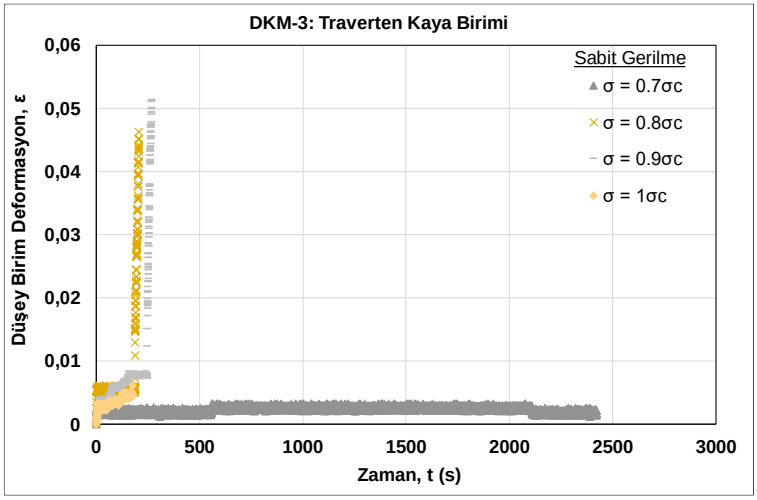


b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

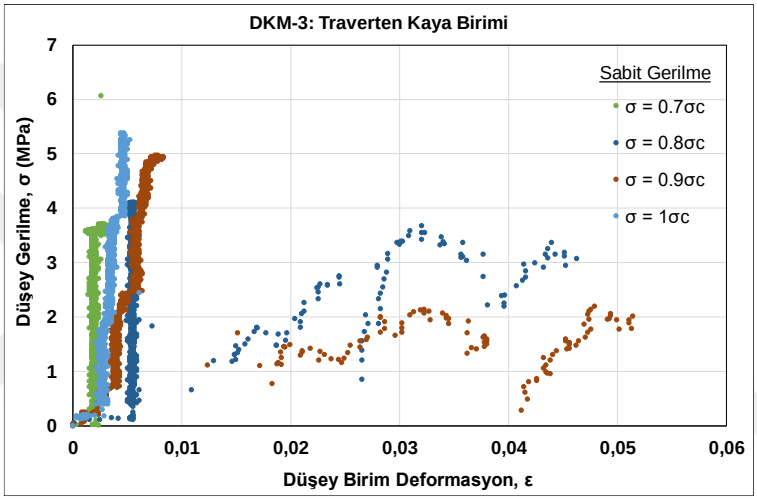


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

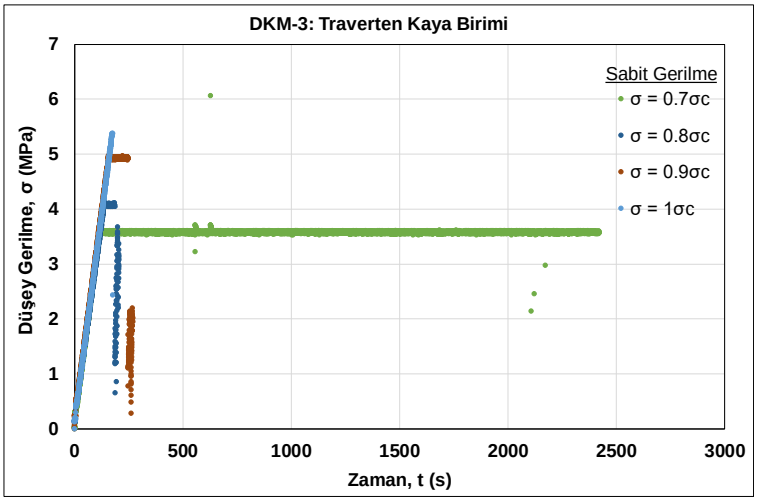
EK14/Şekil 43. YKM-3 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



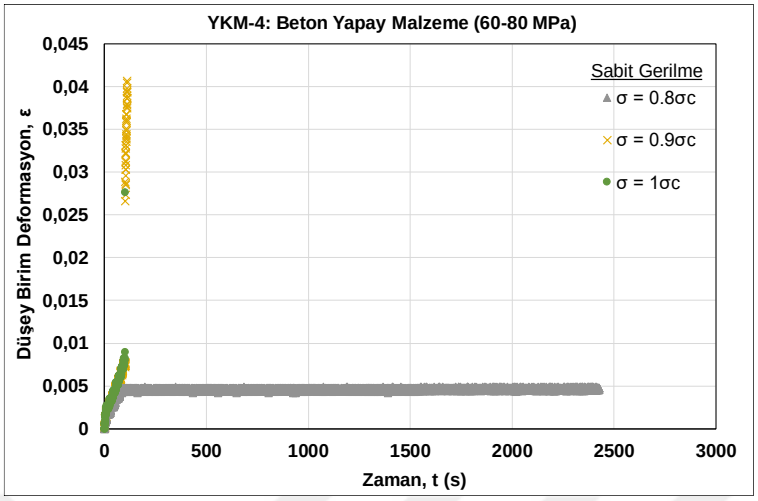
b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



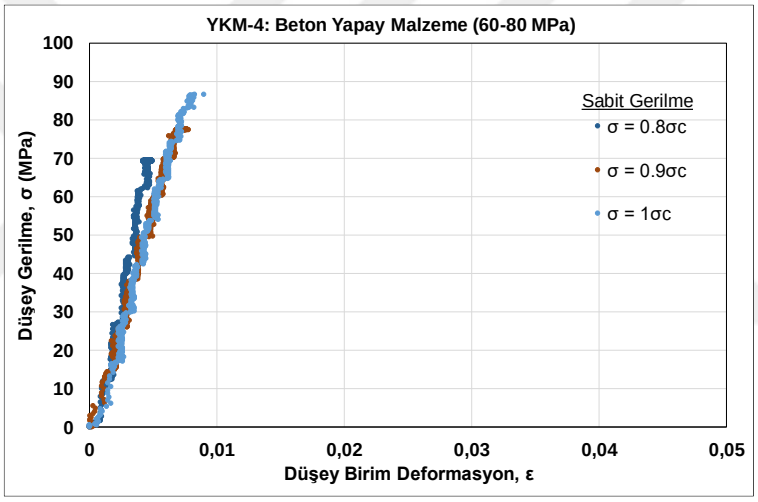
c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK14/Şekil 44. YKM-3 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

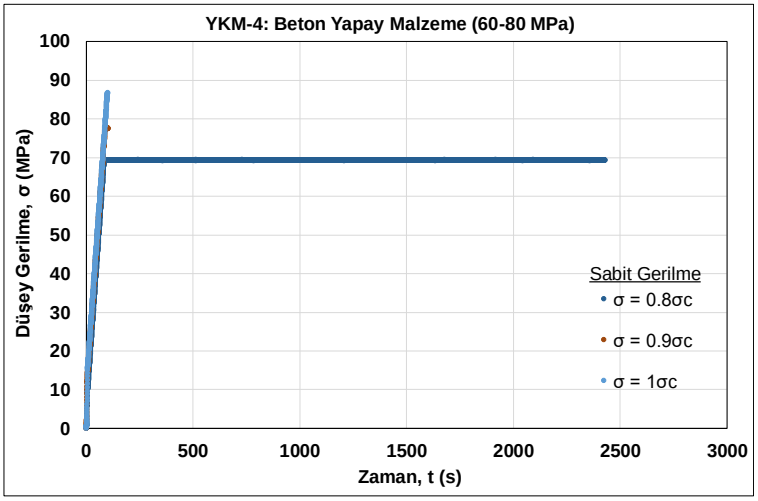
EK15 60-80 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-4) ait deneysel sonuçlar



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

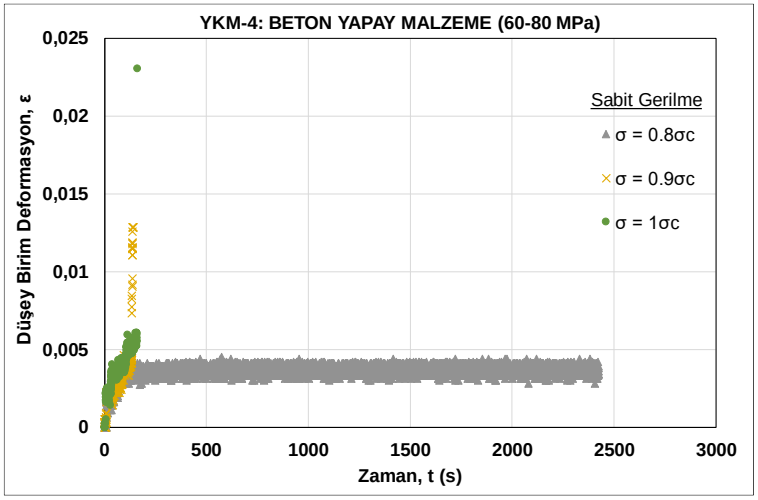


b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

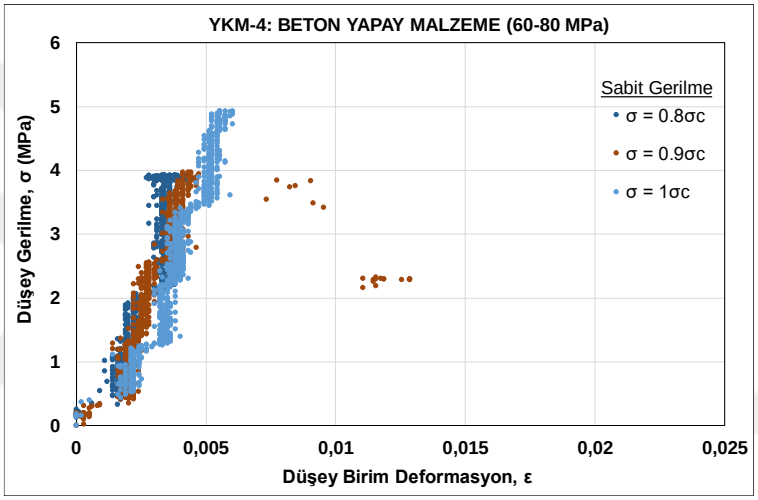


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

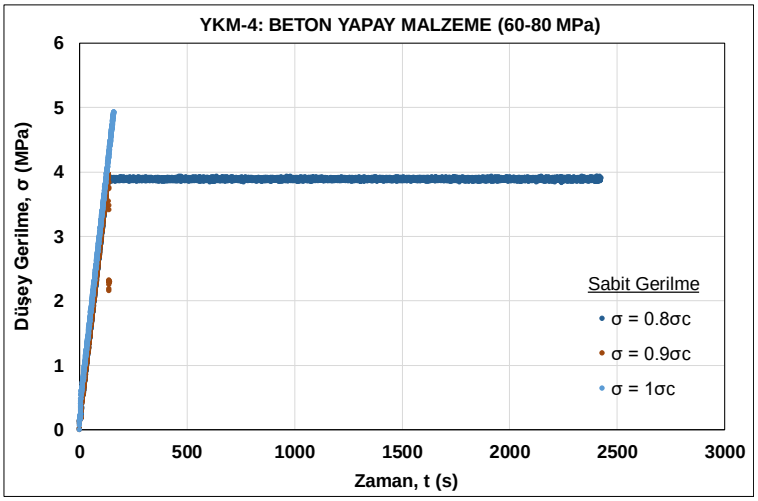
EK15/Şekil 45. YKM-4 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



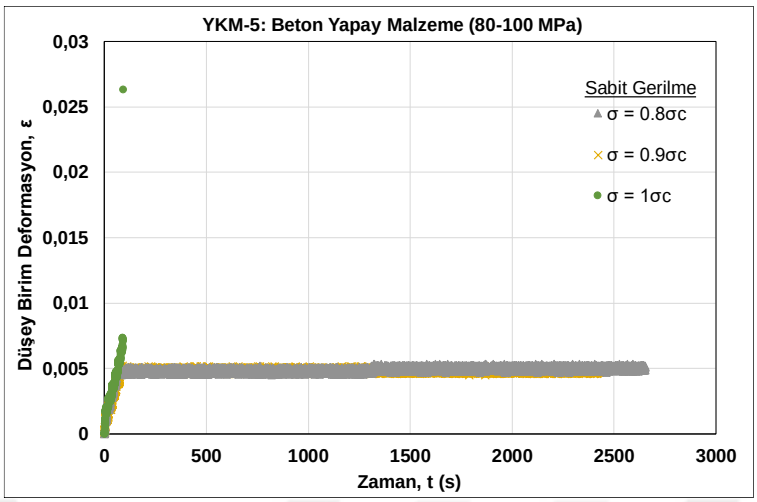
b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları



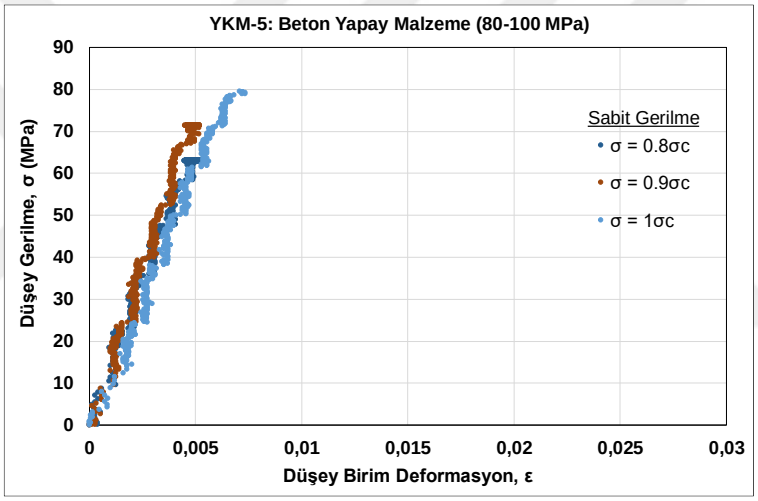
c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

EK15/Şekil 46. YKM-4 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

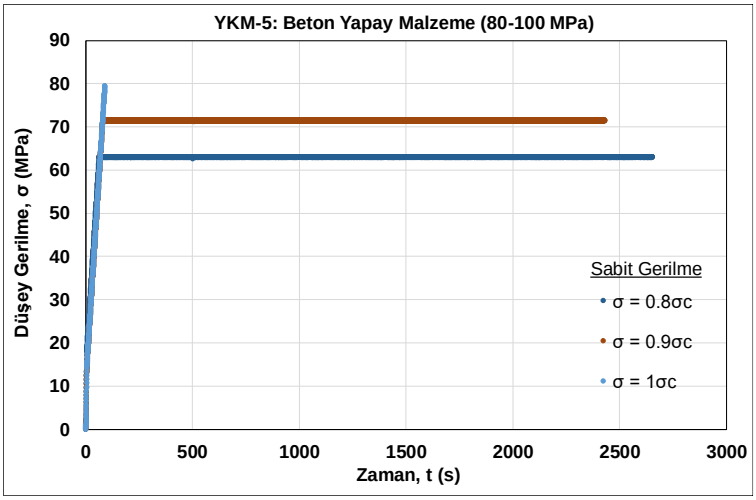
EK16 80-100 MPa aralığında yer alan beton yapay kaya birimine (YKM-5) ait deneysel sonuçlar



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları

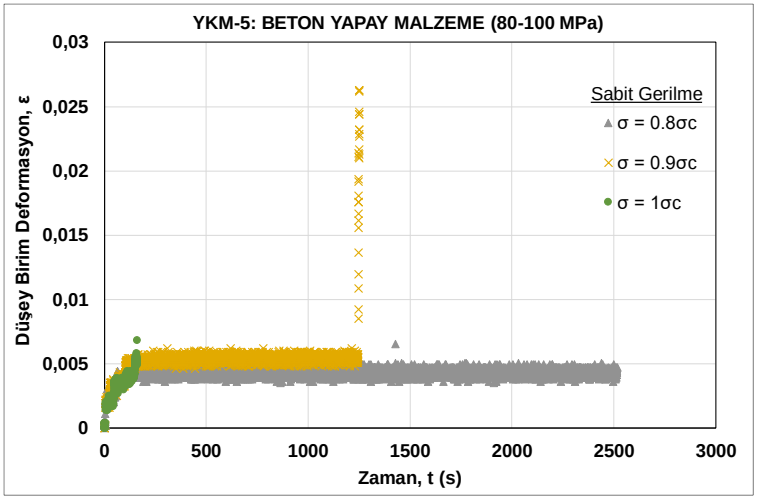


b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

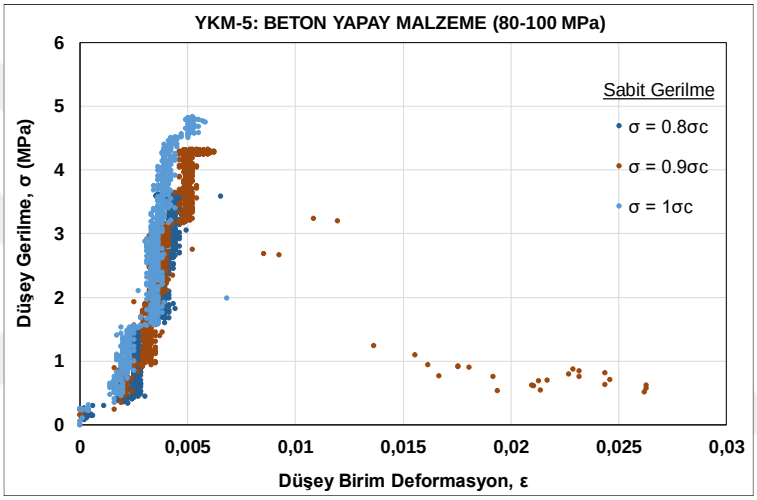


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

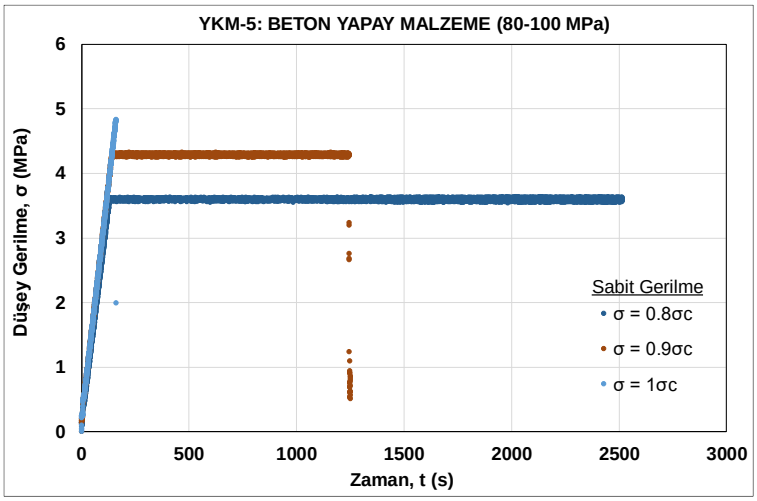
EK16/Şekil 47. YKM-5 kaya birimi için S-TEB koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları



a) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-birim deformasyon davranışları



b) Farklı sabit yükleme koşullarında birim deformasyon-gerilme davranışları

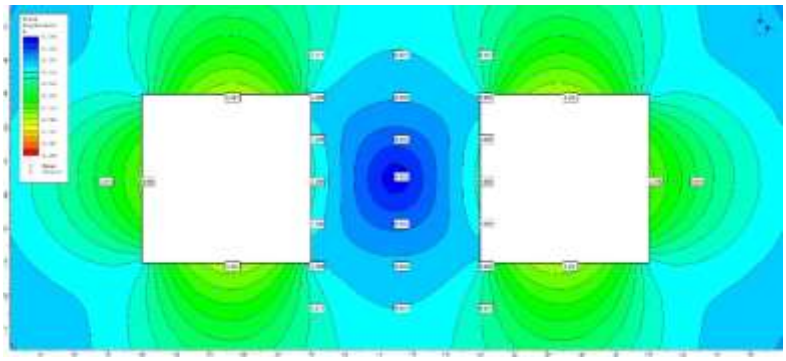


c) Farklı sabit yükleme koşullarında zaman-gerilme davranışları

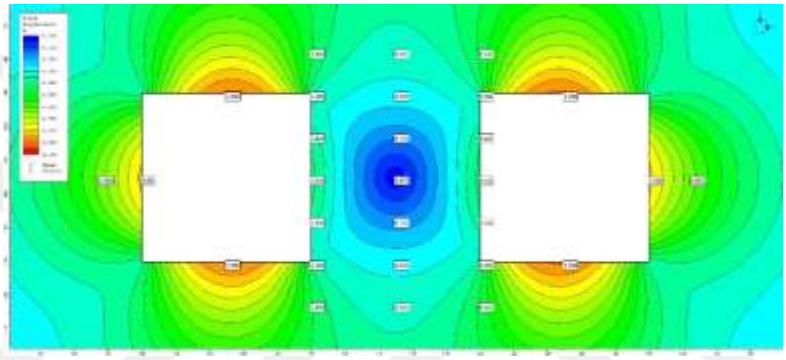
EK16/Şekil 48. YKM-5 kaya birimi için S-DÇ koşulu altında farklı sabit yükleme koşullarında a) zaman-birim deformasyon, b) birim deformasyon-gerilme ve c) zaman-gerilme davranışları

EK17 Kaya tuzu sayısal analiz sonuçları

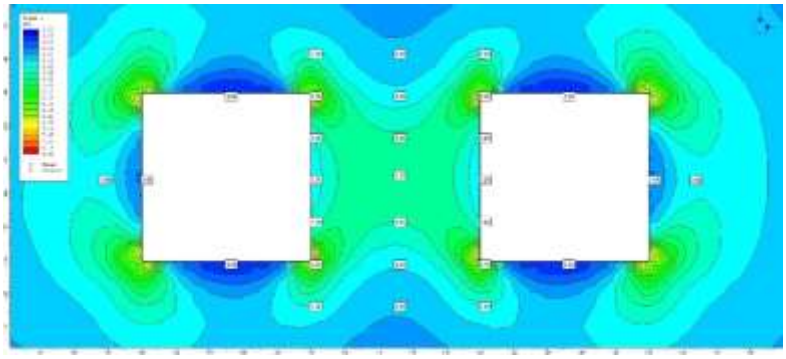
Po=2.5 MPa



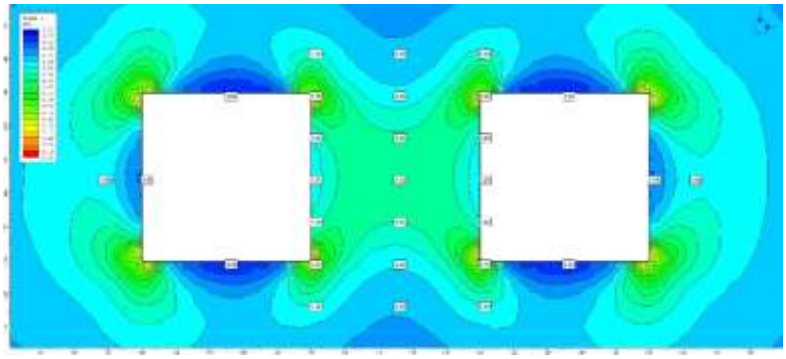
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



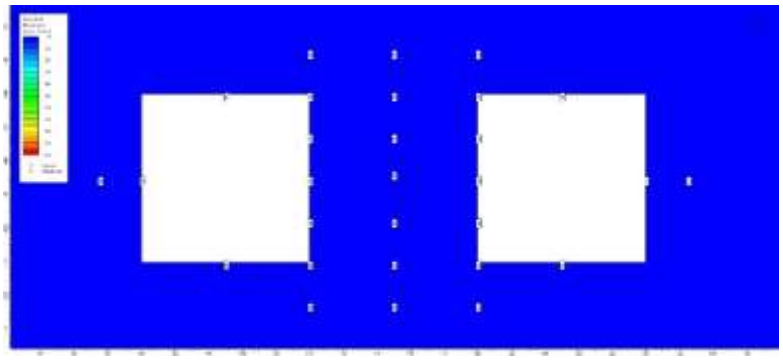
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



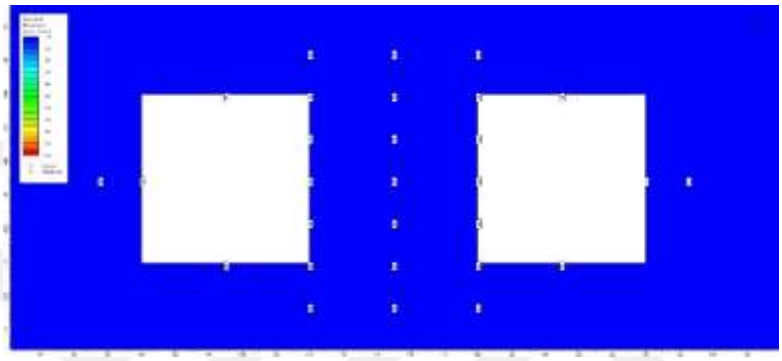
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



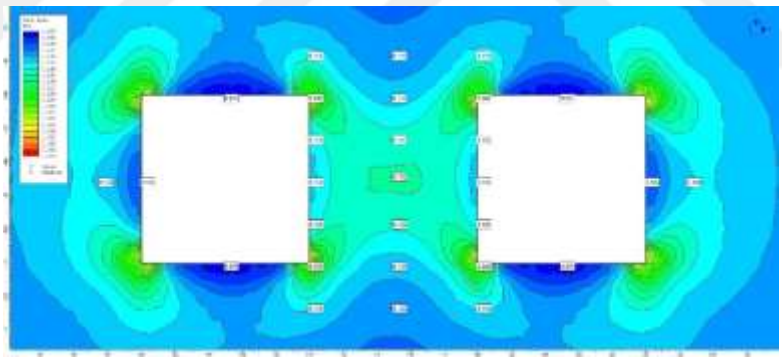
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



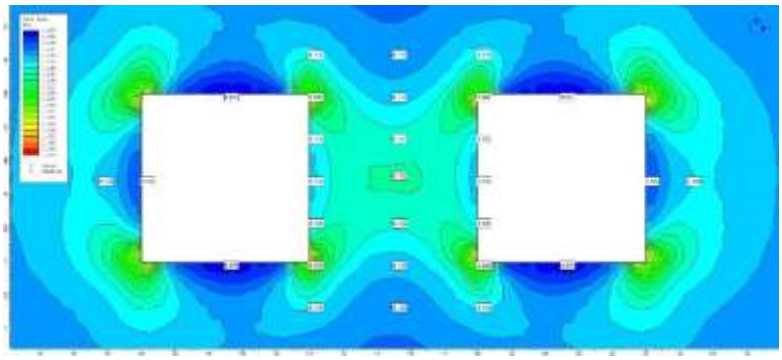
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



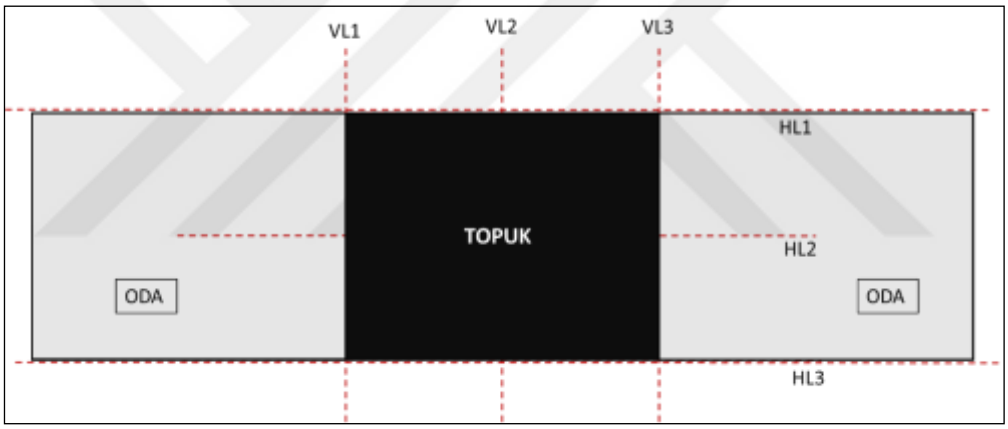
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	120.79	0.0207	2.50	VL2-1	-97.5	7.5	2.9	0	0	0.120	0.180
					VL2-2	-100	6	3.25	0	0	0.150	0.200
					VL2-3	-102.5	4.5	3.95	0	0	0.165	0.240
					VL2-4	-105	0	4.3	0	0	0.180	0.260
					VL2-5	-107.5	4.5	3.95	0	0	0.165	0.240
					VL2-6	-110	6	3.25	0	0	0.135	0.200
					VL2-7	-112.5	7.5	2.9	0	0	0.120	0.180

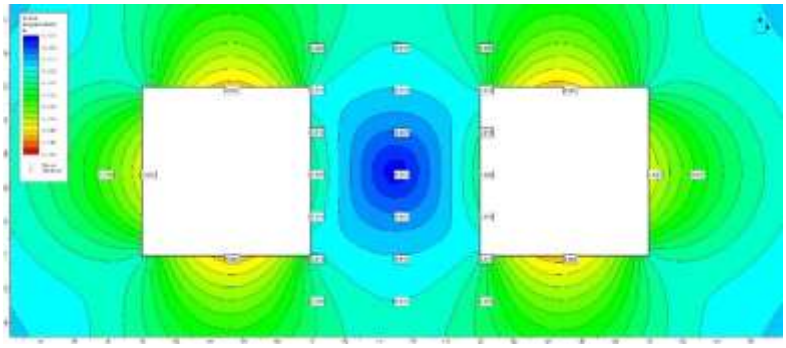
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	120.79	0.0207	2.50	VL2-1	-97.5	385	2.9	0	0	0.120	0.180
					VL2-2	-100	330	3.25	0	0	0.150	0.200
					VL2-3	-102.5	165	3.95	0	0	0.165	0.240
					VL2-4	-105	55	4.3	0	0	0.180	0.260
					VL2-5	-107.5	165	3.95	0	0	0.165	0.240
					VL2-6	-110	330	3.25	0	0	0.135	0.200
					VL2-7	-112.5	385	2.9	0	0	0.120	0.180

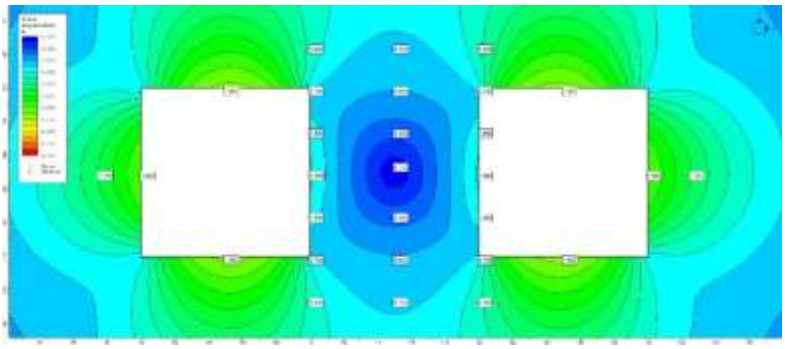


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

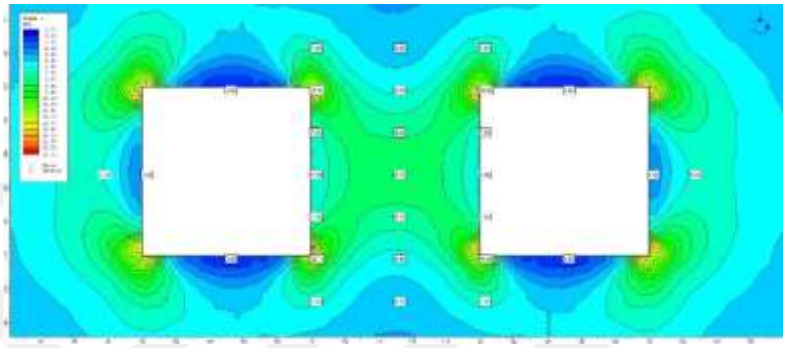
Po=5 MPa



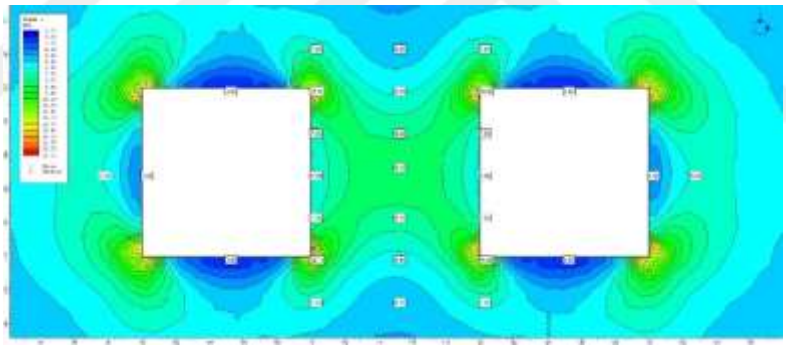
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



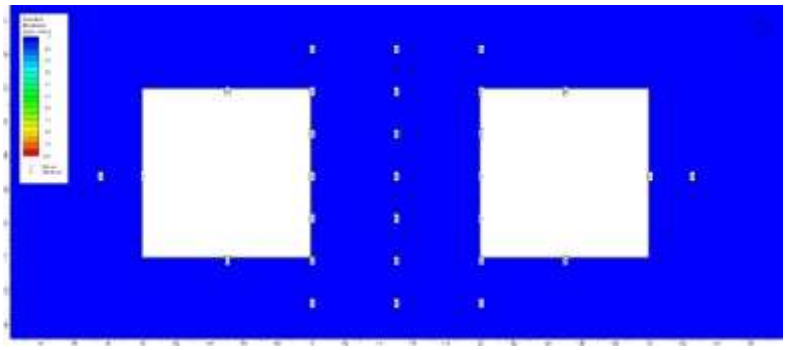
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



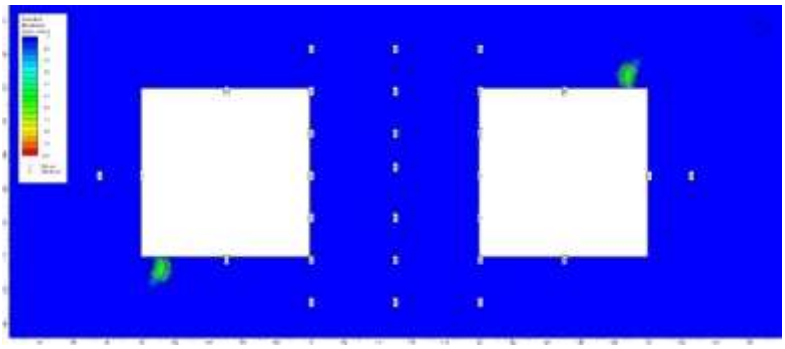
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



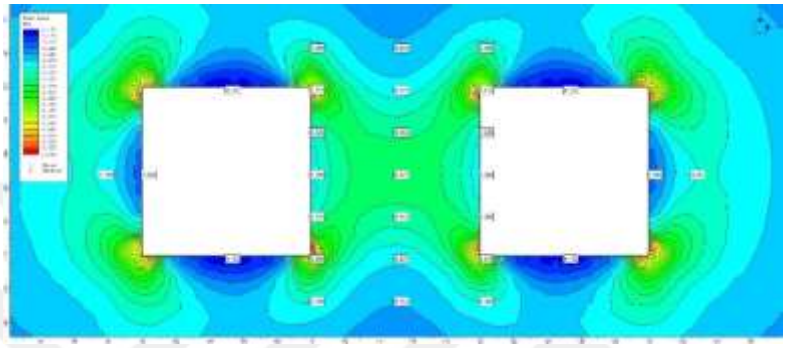
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



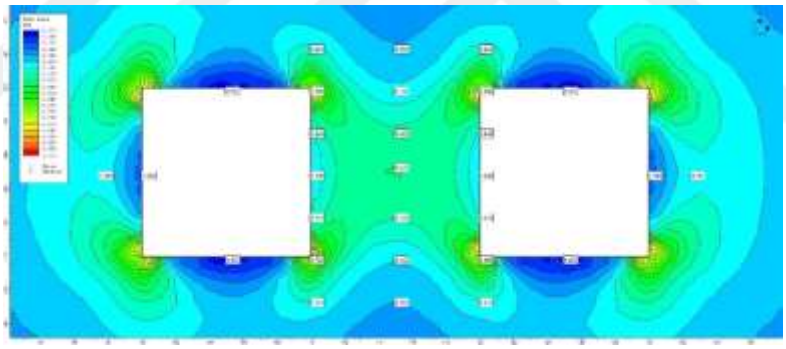
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



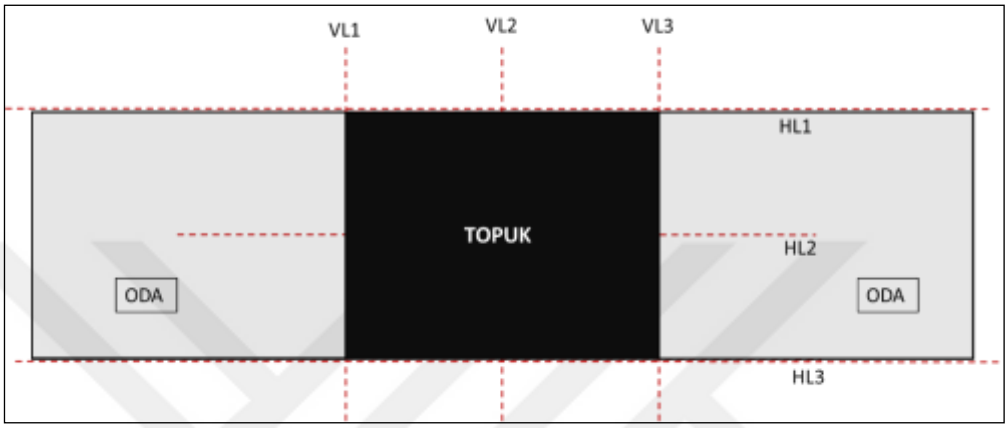
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	U	σ1	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	241.58	0.0207	5.00	VL2-1	-97.5	15	6.25	0	0	0.250	0.360
					VL2-2	-100	12.5	6.9	0	0	0.275	0.400
					VL2-3	-102.5	7.5	8.2	0	0	0.350	0.480
					VL2-4	-105	2.5	8.2	0	0	0.375	0.520
					VL2-5	-107.5	7.5	8.2	0	0	0.350	0.480
					VL2-6	-110	12.5	6.9	0	0	0.275	0.400
					VL2-7	-112.5	15	6.25	0	0	0.250	0.360

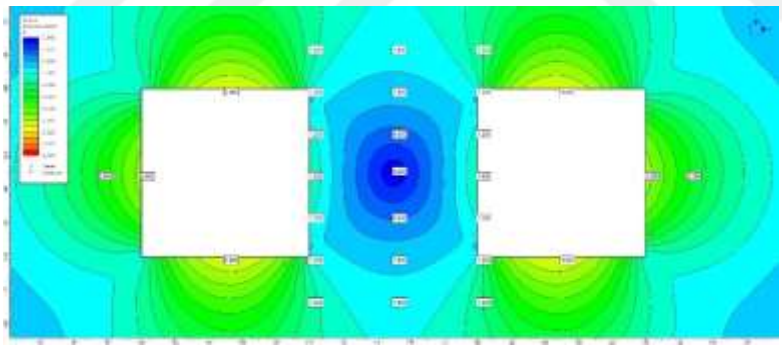
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	U	σ1	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	241.58	0.0207	5.00	VL2-1	-97.5	750	6.25	2	0	0.250	0.360
					VL2-2	-100	600	6.9	2	0	0.275	0.400
					VL2-3	-102.5	300	8.2	2	0	0.350	0.480
					VL2-4	-105	0	8.2	2	0	0.375	0.520
					VL2-5	-107.5	300	8.2	2	0	0.350	0.480
					VL2-6	-110	600	6.9	2	0	0.275	0.400
					VL2-7	-112.5	750	6.25	2	0	0.250	0.360

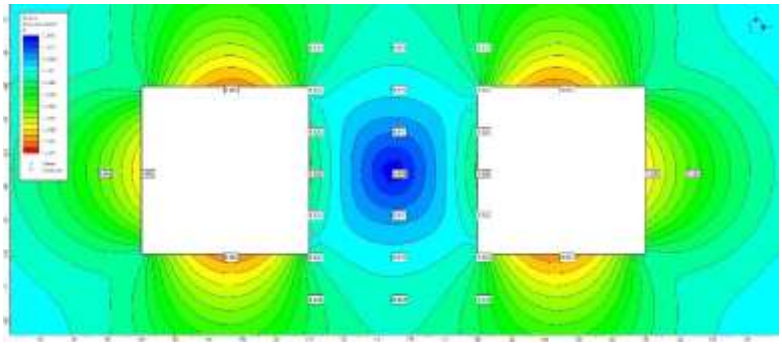


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

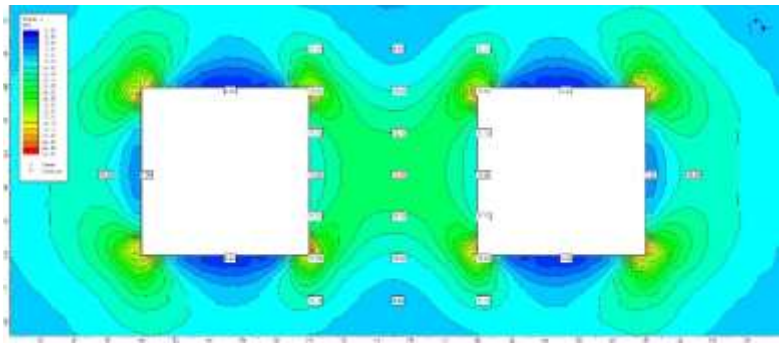
Po=7.5 MPa



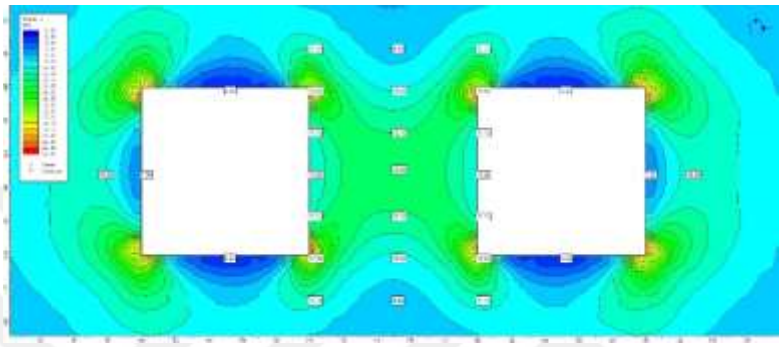
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



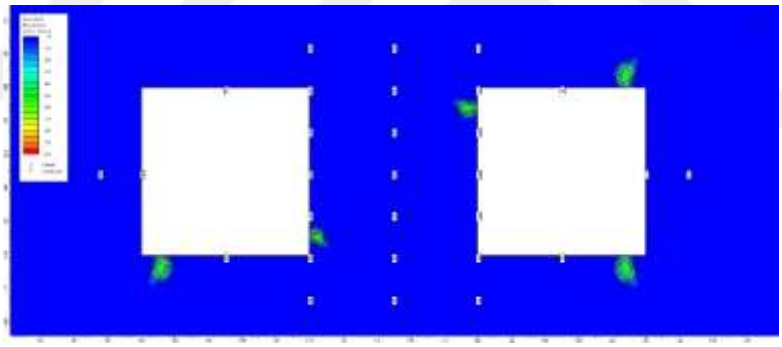
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



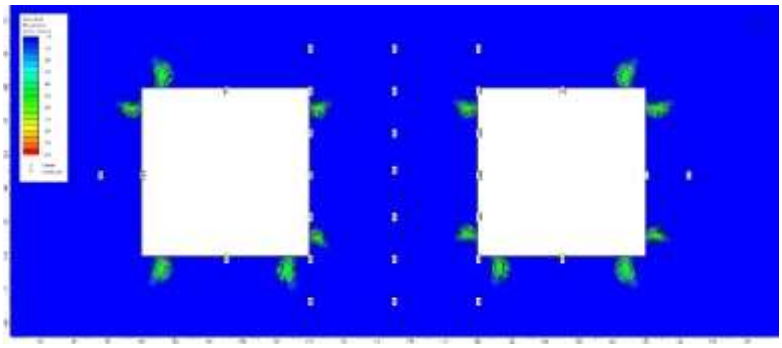
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



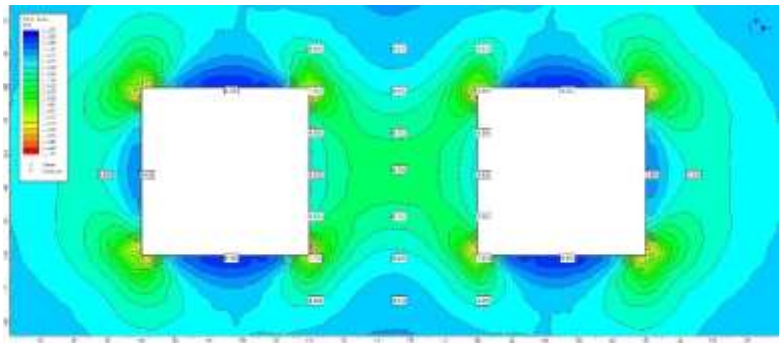
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



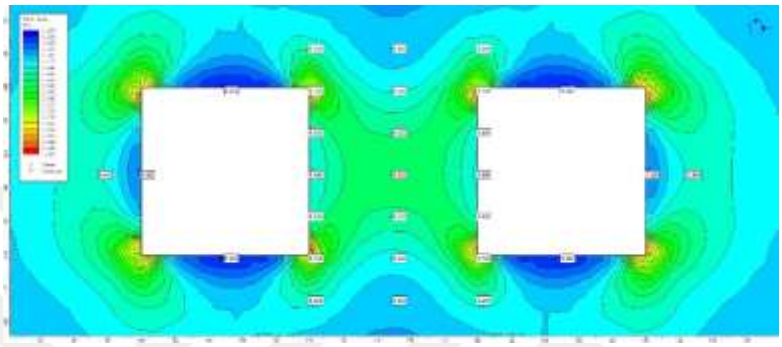
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



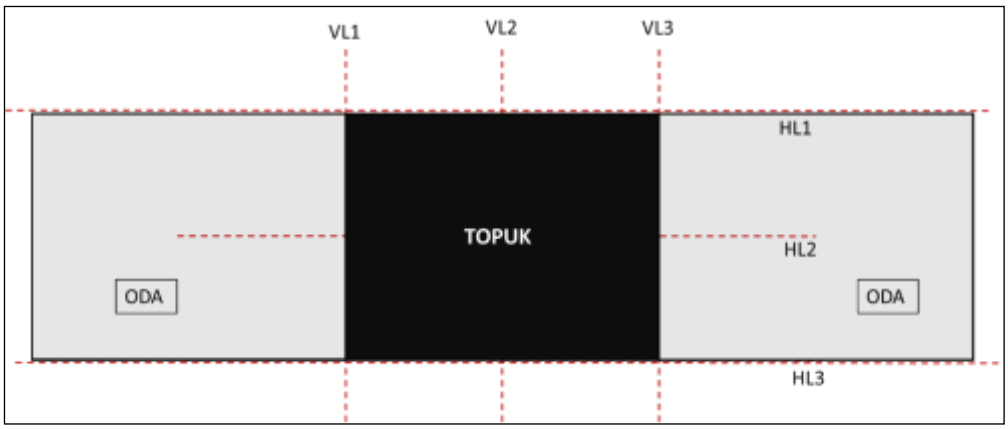
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	U_A	$\sigma 1_A$	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	362.37	0.0207	7.50	VL2-1	-97.5	1000	9.25	13	0	0.360	0.515
					VL2-2	-100	1000	10.2	13	0	0.440	0.635
					VL2-3	-102.5	6000	12.1	13	0	0.520	0.755
					VL2-4	-105	0	13.05	13	0	0.560	0.755
					VL2-5	-107.5	600	12.1	13	0	0.520	0.755
					VL2-6	-110	1000	10.2	13	0	0.440	0.635
					VL2-7	-112.5	1000	9.25	13	0	0.360	0.515

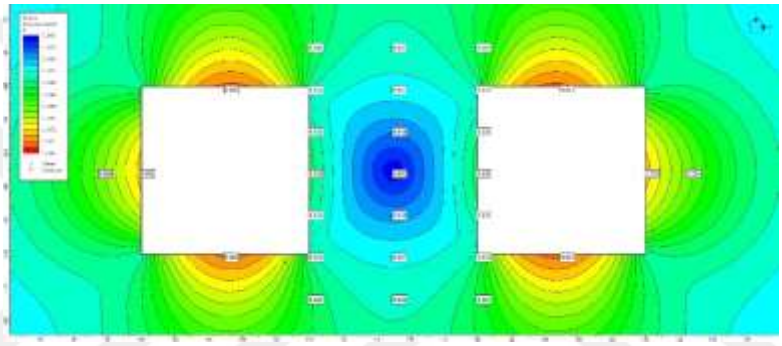
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	U_A	$\sigma 1_A$	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	362.37	0.0207	7.50	VL2-1	-97.5	1000	9.25	13	0	0.360	0.515
					VL2-2	-100	1000	10.2	13	0	0.440	0.635
					VL2-3	-102.5	6000	12.1	13	0	0.520	0.755
					VL2-4	-105	0	13.05	13	0	0.560	0.755
					VL2-5	-107.5	600	12.1	13	0	0.520	0.755
					VL2-6	-110	1000	10.2	13	0	0.440	0.635
					VL2-7	-112.5	1000	9.25	13	0	0.360	0.515

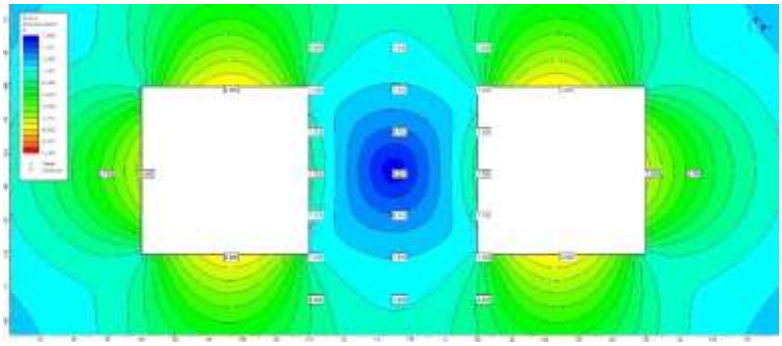


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

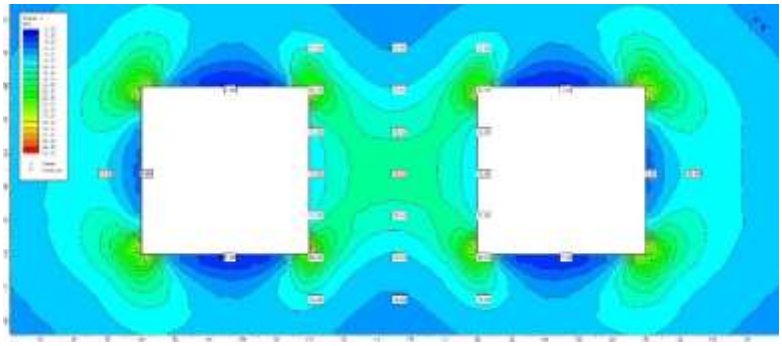
Po=10 MPa



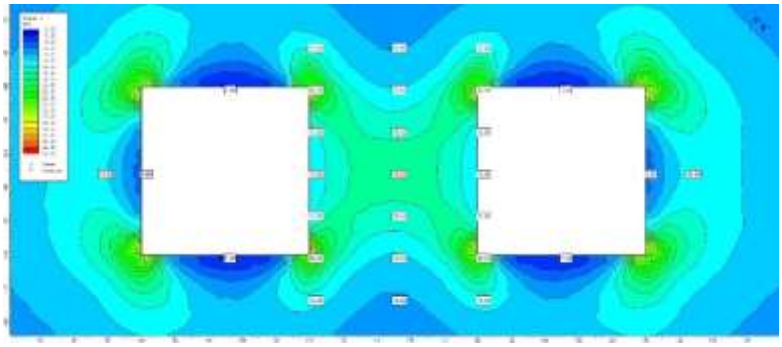
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



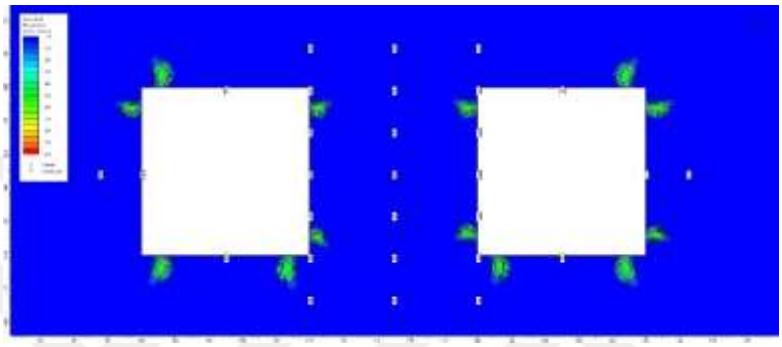
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



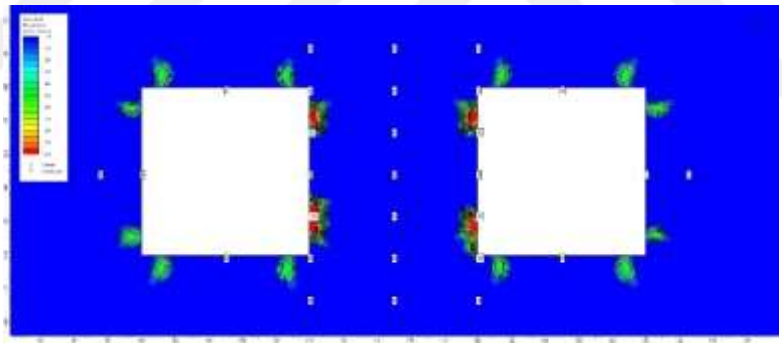
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



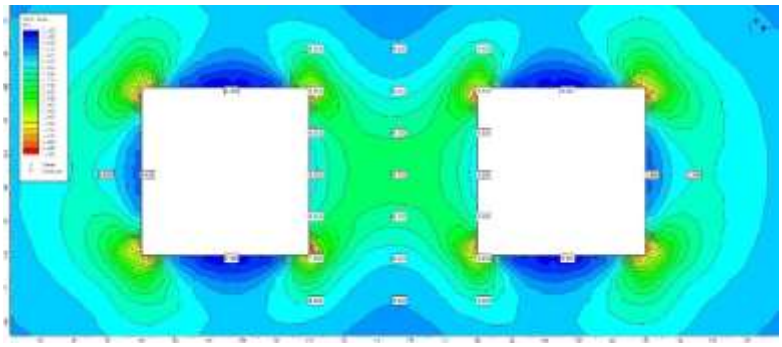
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



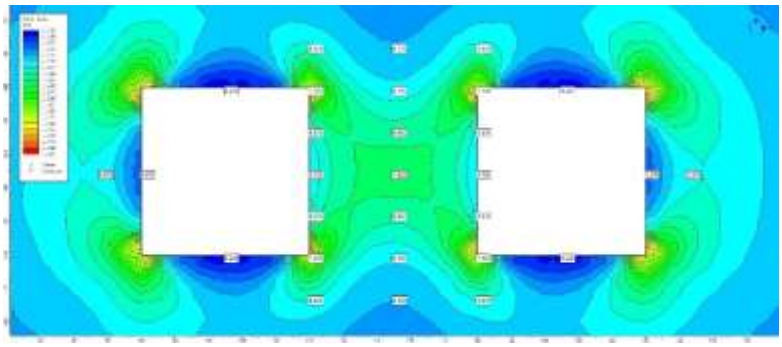
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



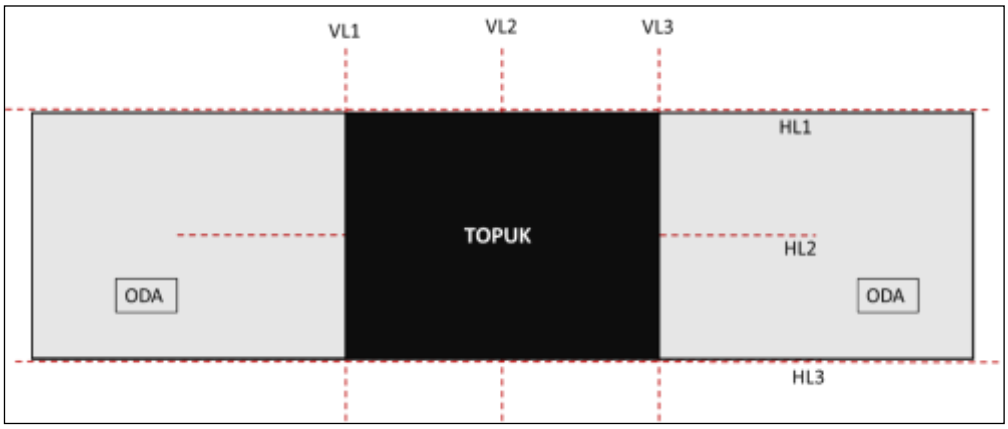
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	483.16	0.0207	10.00	VL2-1	-97.5	31.5	12	13	0	0.500	0.750
					VL2-2	-100	27	13.5	13	0	0.550	0.825
					VL2-3	-102.5	13.5	16.5	13	0	0.700	0.975
					VL2-4	-105	4.5	16.5	13	0	0.750	1.050
					VL2-5	-107.5	13.5	16.5	13	0	0.700	0.975
					VL2-6	-110	27	13.5	13	0	0.550	0.825
					VL2-7	-112.5	31.5	12	13	0	0.500	0.750

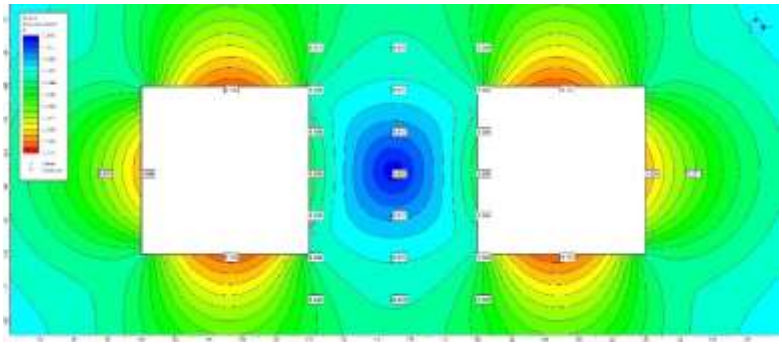
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	483.16	0.0207	10.00	VL2-1	-97.5	1500	12	31	0	0.500	0.720
					VL2-2	-100	1250	13.5	31	0	0.550	0.795
					VL2-3	-102.5	750	16.5	31	0	0.700	0.945
					VL2-4	-105	250	16.5	31	0	0.750	1.020
					VL2-5	-107.5	750	16.5	31	0	0.700	0.945
					VL2-6	-110	1250	13.5	31	0	0.550	0.795
					VL2-7	-112.5	1500	12	31	0	0.500	0.720

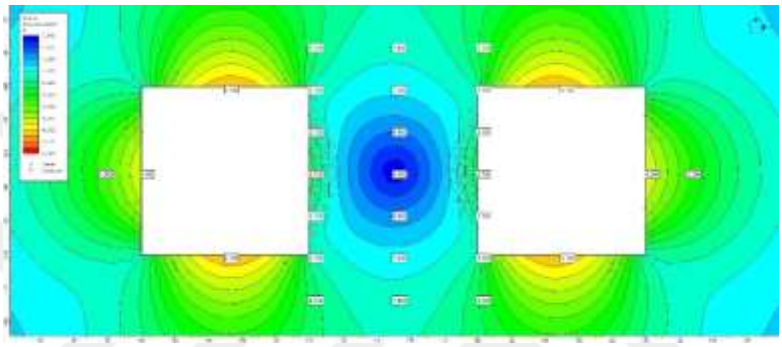


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

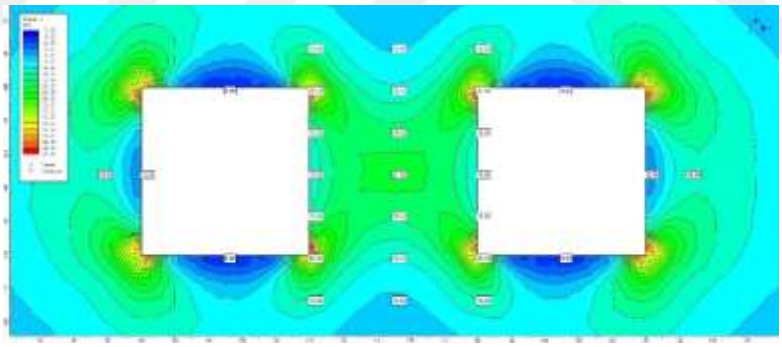
Po=12.5 MPa



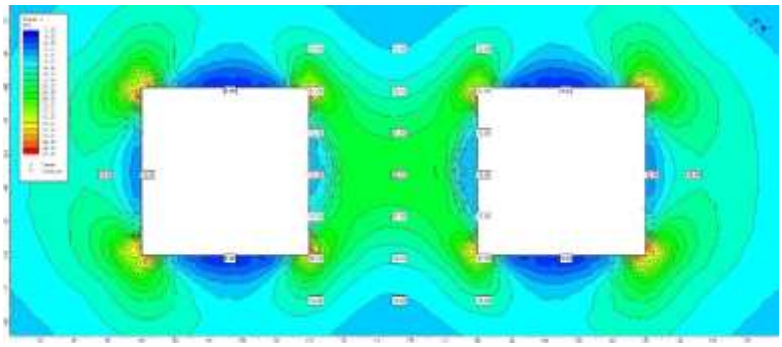
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



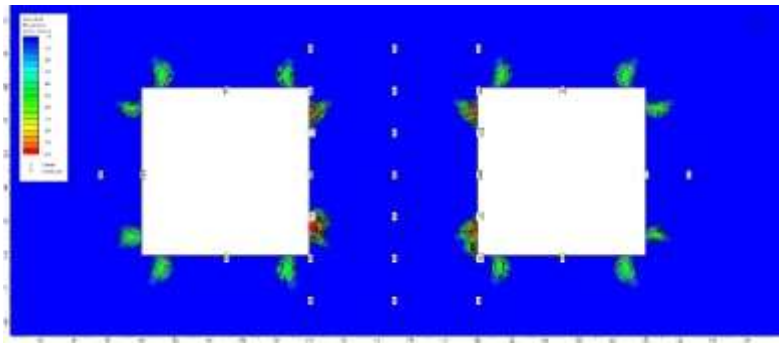
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



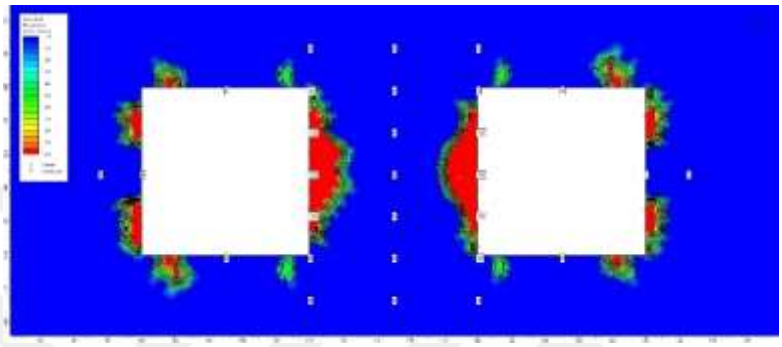
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



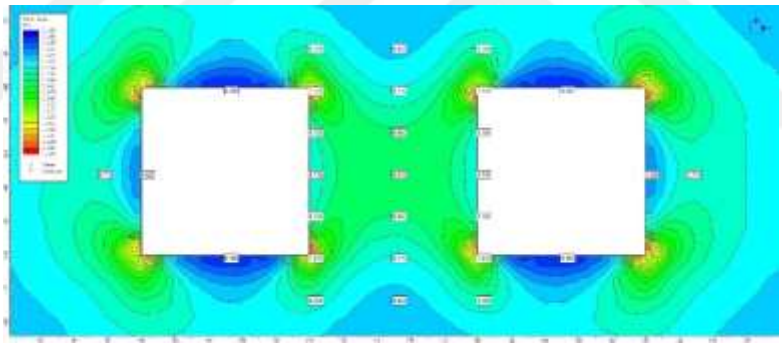
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



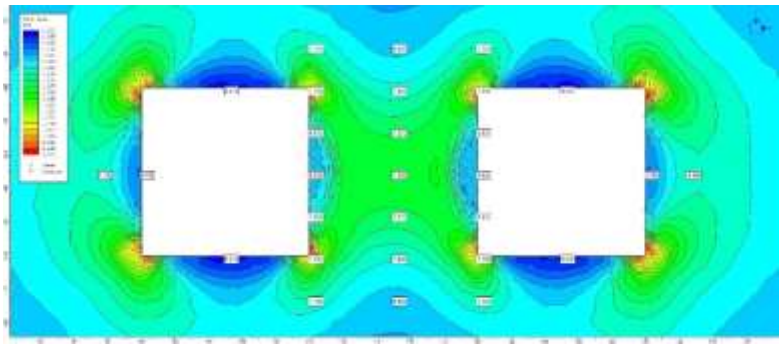
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



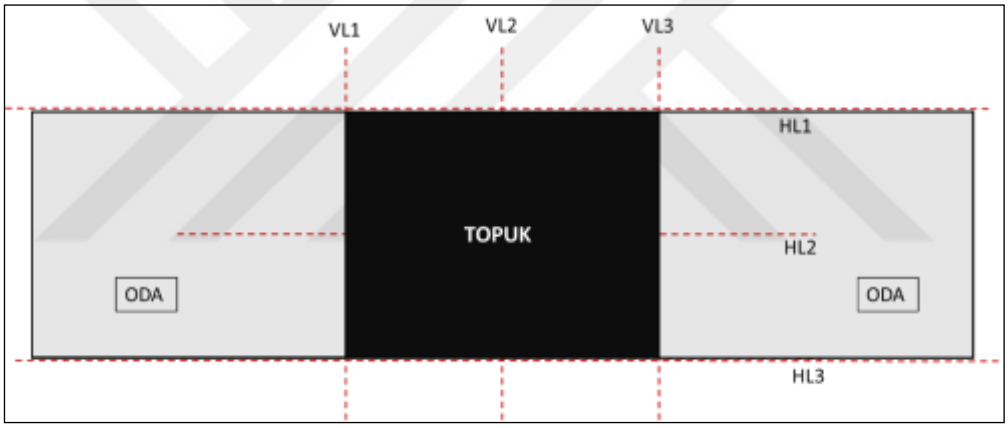
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	603.95	0.0207	12.50	VL2-1	-97.5	39	15	23	0	0.650	0.900
					VL2-2	-100	33	16.5	23	0	0.715	0.990
					VL2-3	-102.5	17	19.5	23	0	0.845	1.260
					VL2-4	-105	5	21	23	0	0.910	1.260
					VL2-5	-107.5	17	19.5	23	0	0.845	1.260
					VL2-6	-110	33	16.5	23	0	0.715	0.990
					VL2-7	-112.5	39	15	23	0	0.650	0.900

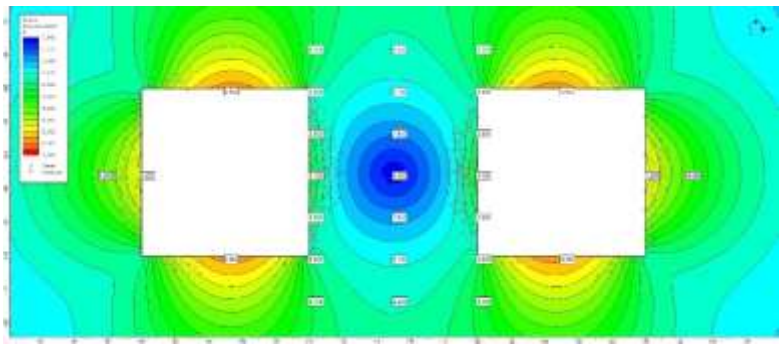
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	603.95	0.0207	12.50	VL2-1	-97.5	1800	15	140	0	0.660	0.935
					VL2-2	-100	1500	16.5	140	0	0.720	1.020
					VL2-3	-102.5	900	21	140	0	0.900	1.275
					VL2-4	-105	300	22.5	140	0	0.900	1.360
					VL2-5	-107.5	900	21	140	0	0.900	1.275
					VL2-6	-110	1500	16.5	140	0	0.720	1.020
					VL2-7	-112.5	1800	15	140	0	0.660	0.935

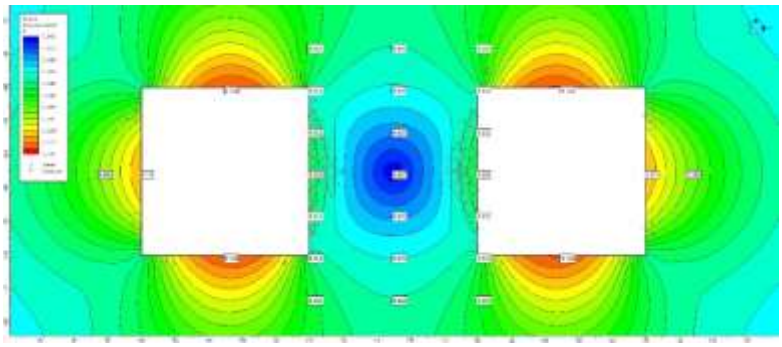


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

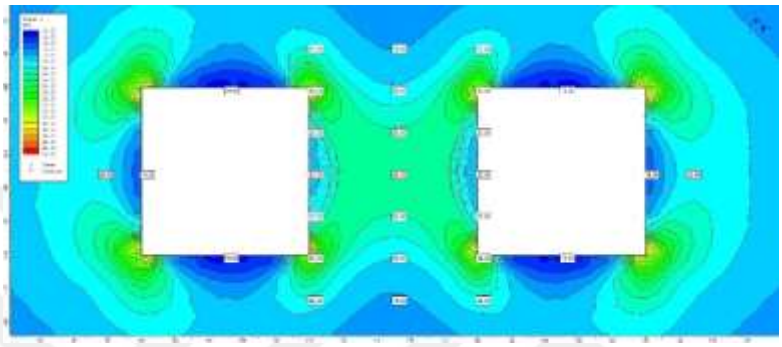
Po=15 MPa



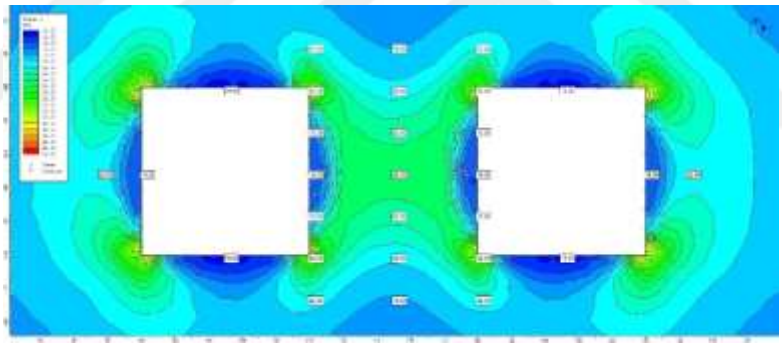
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



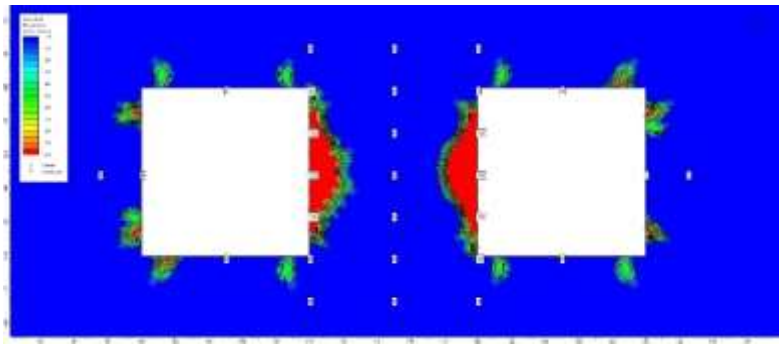
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



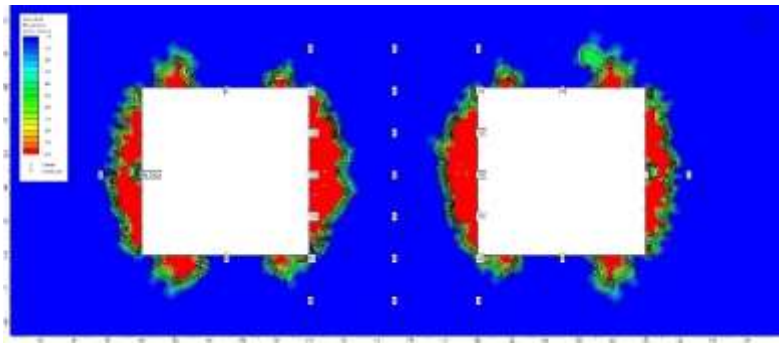
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



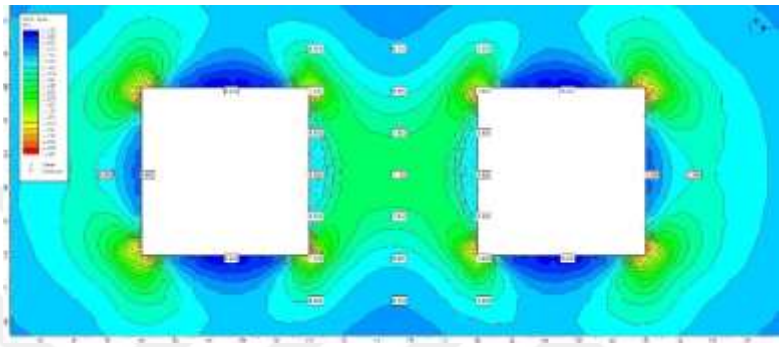
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



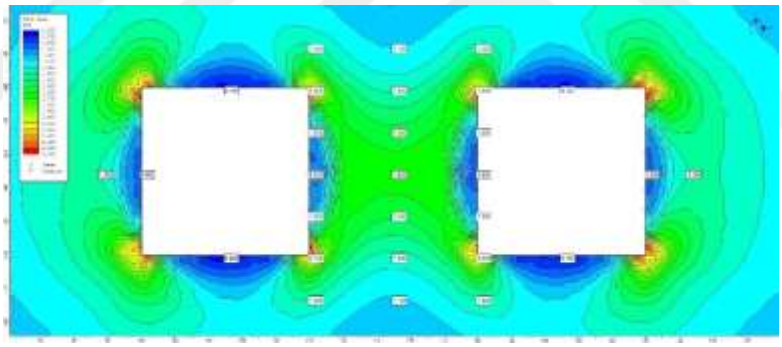
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



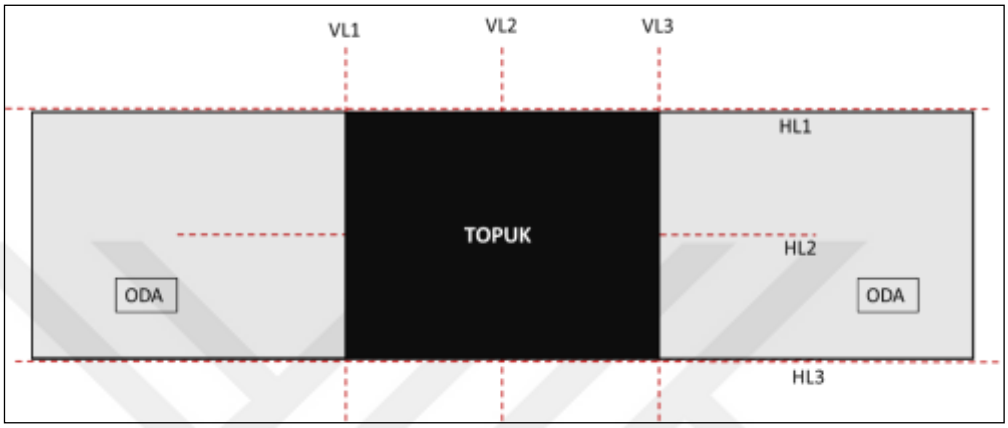
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	724.74	0.0207	15.00	VL2-1	-97.5	46	18	110	0	0.750	1.050
					VL2-2	-100	39	20	110	0	0.900	1.200
					VL2-3	-102.5	26	24	110	0	1.050	1.500
					VL2-4	-105	7	26	110	0	1.125	1.650
					VL2-5	-107.5	26	24	110	0	1.050	1.500
					VL2-6	-110	39	20	110	0	0.825	1.200
					VL2-7	-112.5	46	18	110	0	0.750	1.050

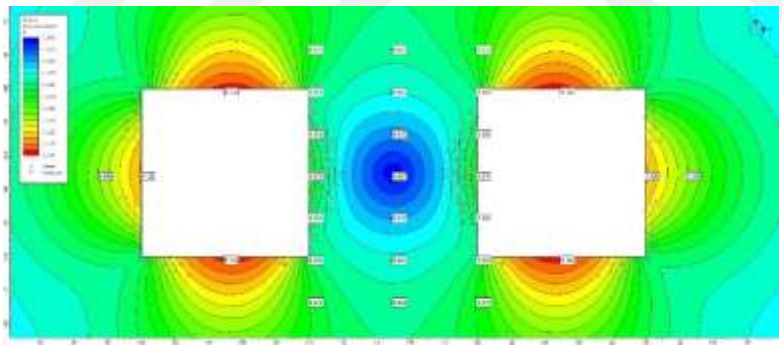
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	724.74	0.0207	15.00	VL2-1	-97.5	2450	18	223	0	0.770	1.100
					VL2-2	-100	2100	20	223	0	0.910	1.300
					VL2-3	-102.5	1050	24	223	0	1.050	1.500
					VL2-4	-105	350	26	223	0	1.120	1.600
					VL2-5	-107.5	1050	24	223	0	1.050	1.500
					VL2-6	-110	2100	20	223	0	0.910	1.300
					VL2-7	-112.5	2450	18	223	0	0.770	1.100

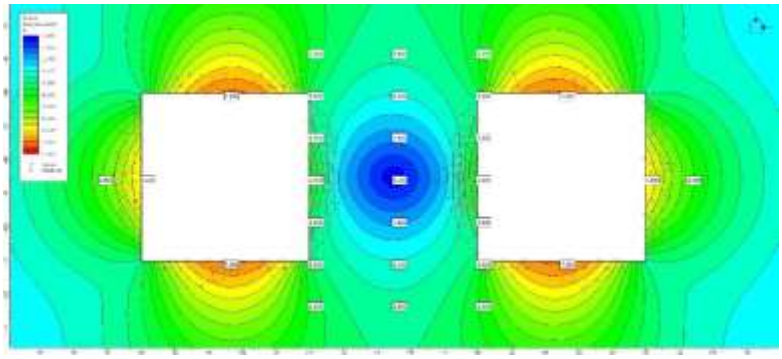


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

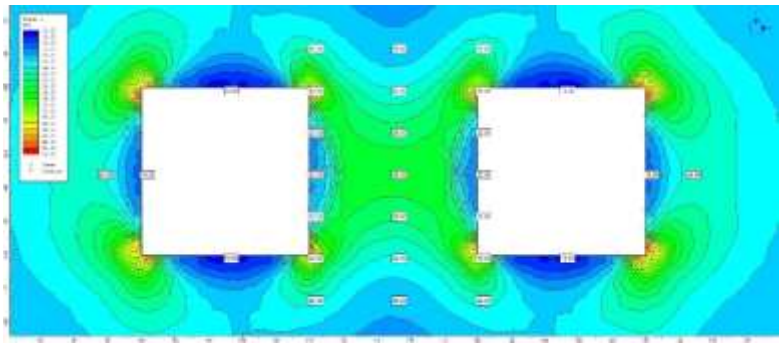
Po=17.5 MPa



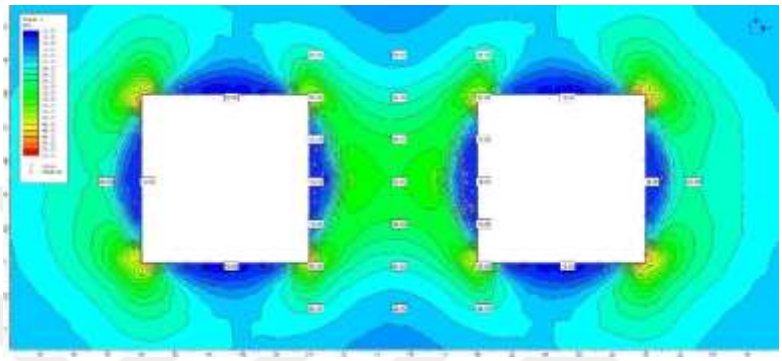
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



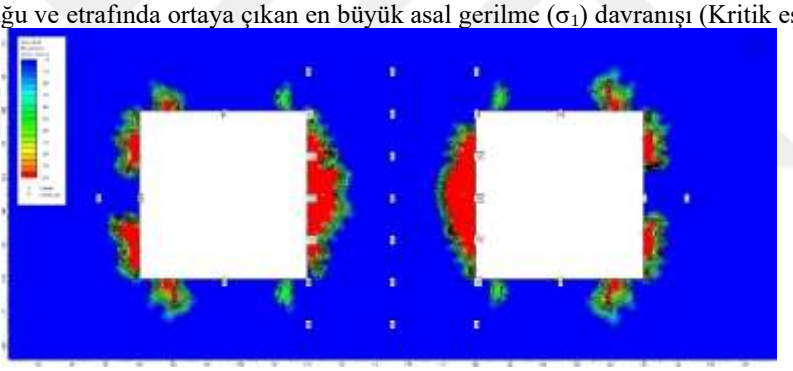
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



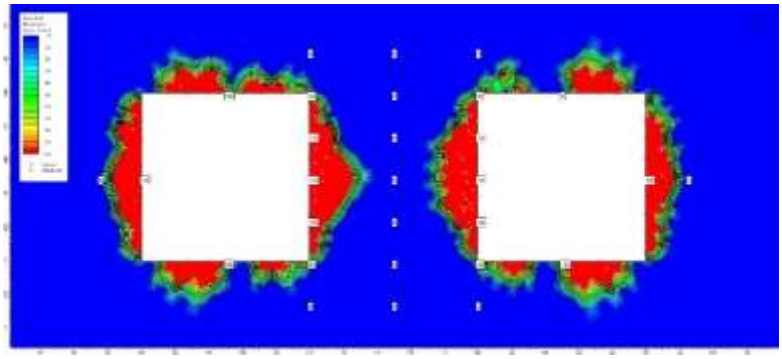
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



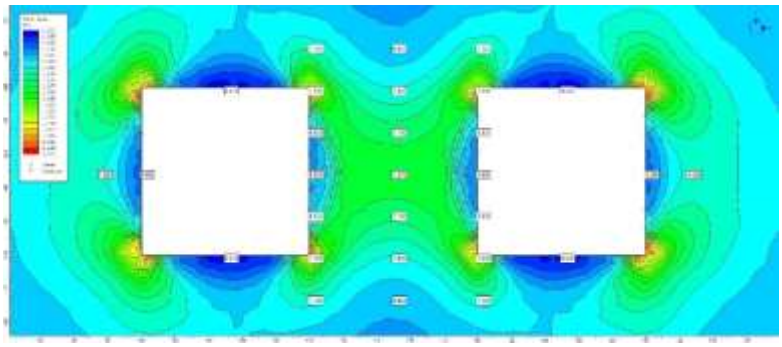
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



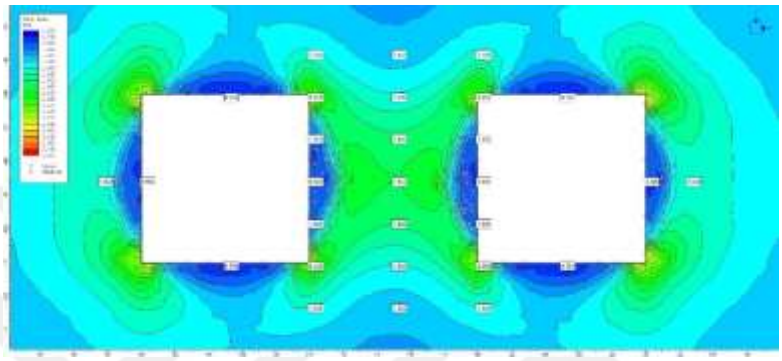
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



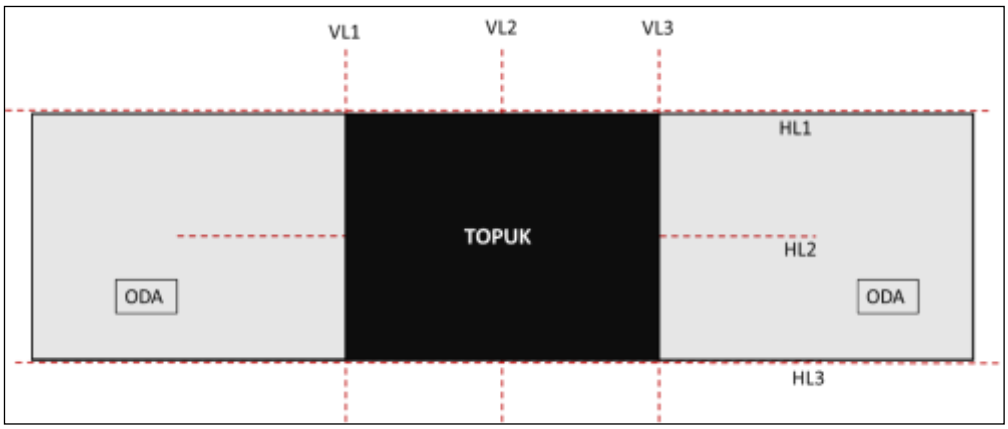
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	845.53	0.0207	17.50	VL2-1	-97.5	52	20	157	0	0.850	1.200
					VL2-2	-100	45	24	157	0	1.020	1.500
					VL2-3	-102.5	30	28	157	0	1.190	1.800
					VL2-4	-105	7	30	157	0	1.275	1.800
					VL2-5	-107.5	30	28	157	0	1.190	1.800
					VL2-6	-110	45	24	157	0	1..020	1.500
					VL2-7	-112.5	52	20	157	0	0.850	1.350

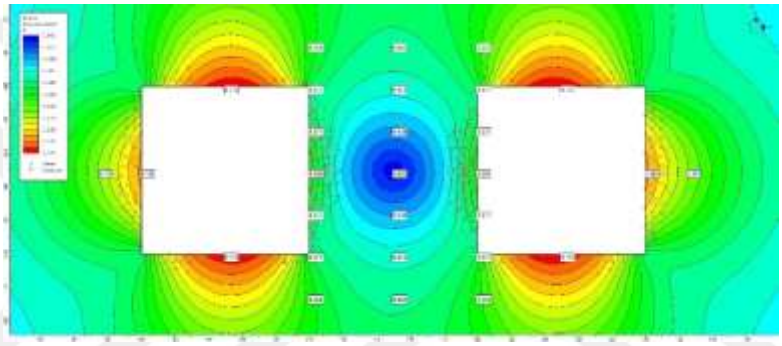
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	845.53	0.0207	17.50	VL2-1	-97.5	2800	20	288	0	0.880	1.350
					VL2-2	-100	2400	24	288	0	1.040	1.500
					VL2-3	-102.5	1600	30	288	0	1.280	1.800
					VL2-4	-105	400	32	288	0	1.360	1.950
					VL2-5	-107.5	1600	30	288	0	1.280	1.800
					VL2-6	-110	2400	24	288	0	1.040	1.500
					VL2-7	-112.5	2800	22	288	0	0.880	1.350

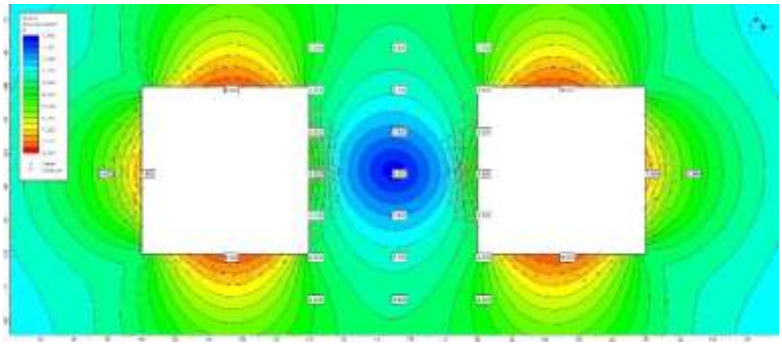


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

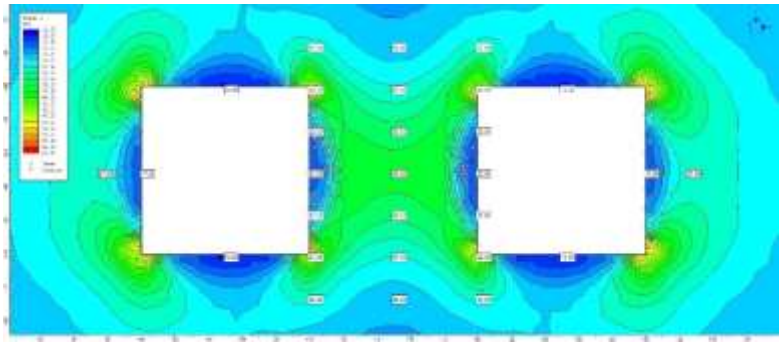
Po=20 MPa



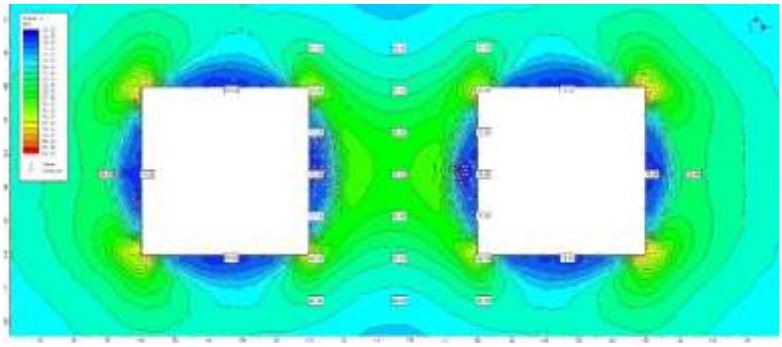
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



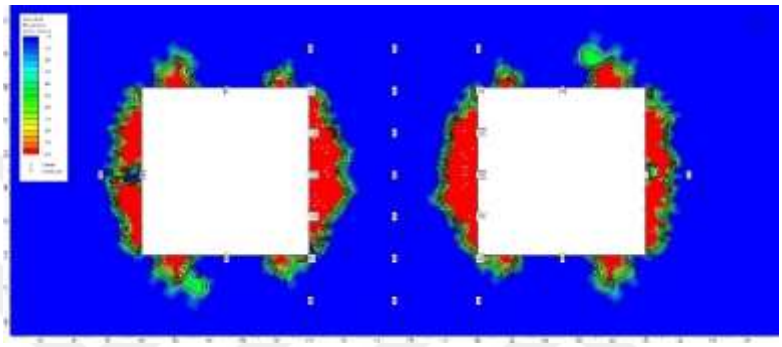
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



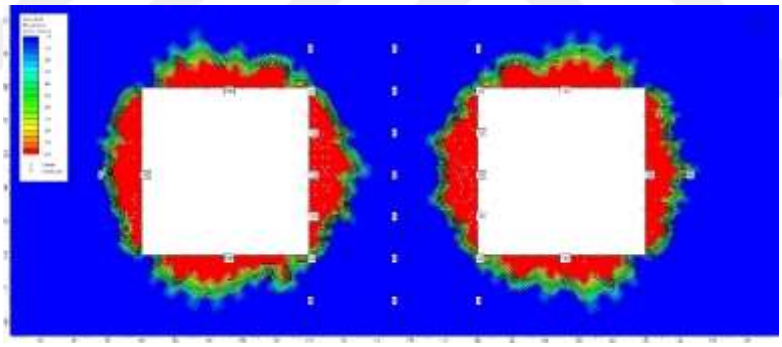
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



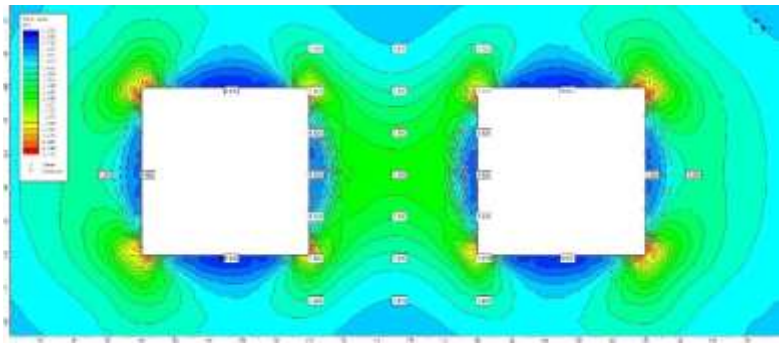
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



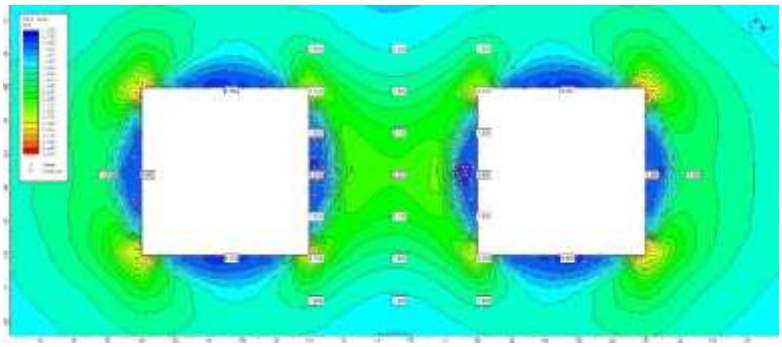
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



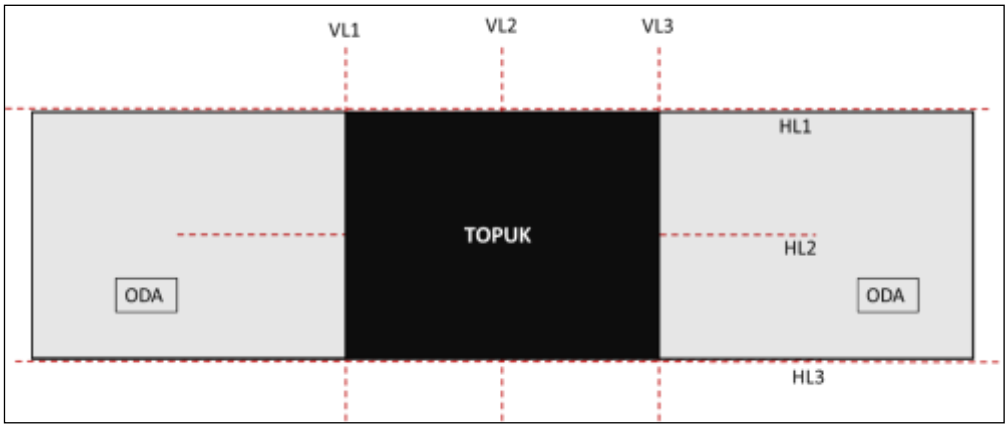
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	966.32	0.0207	20.00	VL2-1	-97.5	68	25	224	0	1.015	1.500
					VL2-2	-100	51	27.5	224	0	1.205	1.650
					VL2-3	-102.5	34	32.5	224	0	1.395	2.100
					VL2-4	-105	9	35	224	0	1.490	2.100
					VL2-5	-107.5	34	32.5	224	0	1.395	2.100
					VL2-6	-110	51	27.5	224	0	1.205	1.650
					VL2-7	-112.5	68	25	224	0	1.015	1.500

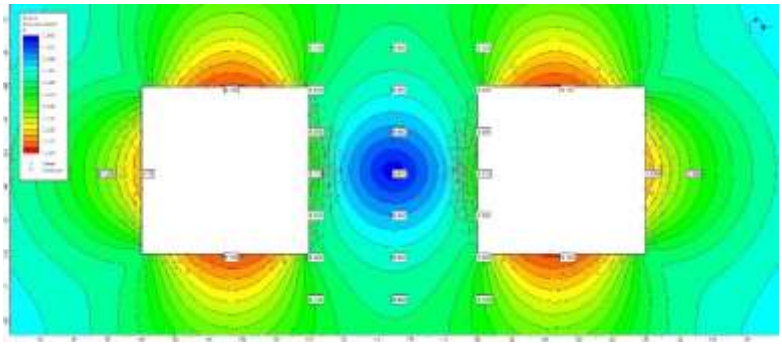
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	966.32	0.0207	20.00	VL2-1	-97.5	3600	25	326	0	1.020	1.500
					VL2-2	-100	2700	27.5	326	0	1.210	1.800
					VL2-3	-102.5	1800	35	326	0	1.495	2.100
					VL2-4	-105	450	37.5	326	0	1.590	2.250
					VL2-5	-107.5	1800	35	326	0	1.495	2.100
					VL2-6	-110	2700	27.5	326	0	1.210	1.800
					VL2-7	-112.5	3600	25	326	0	1.020	1.500

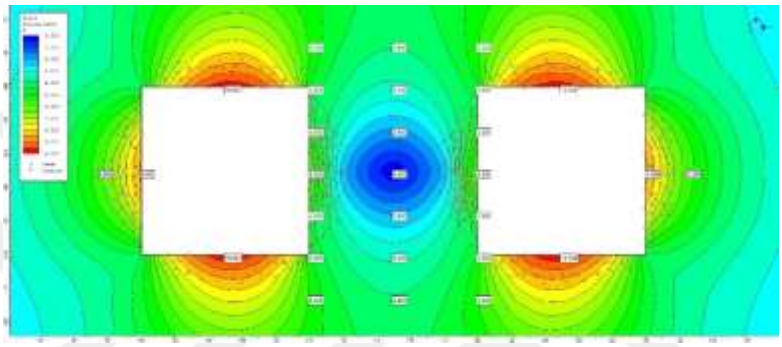


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

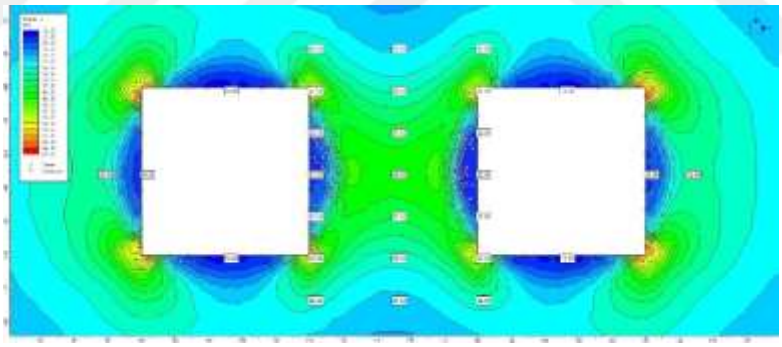
Po=22.5 MPa



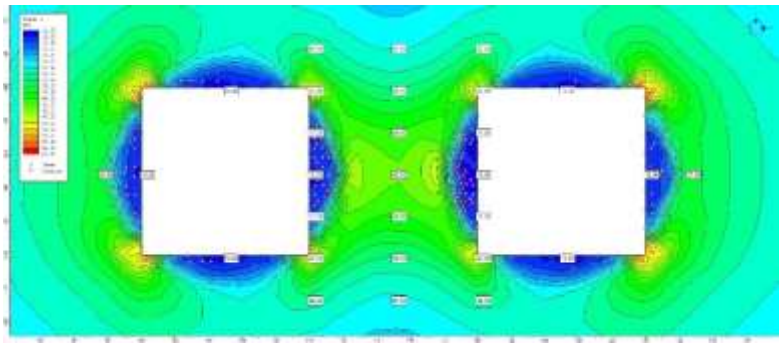
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



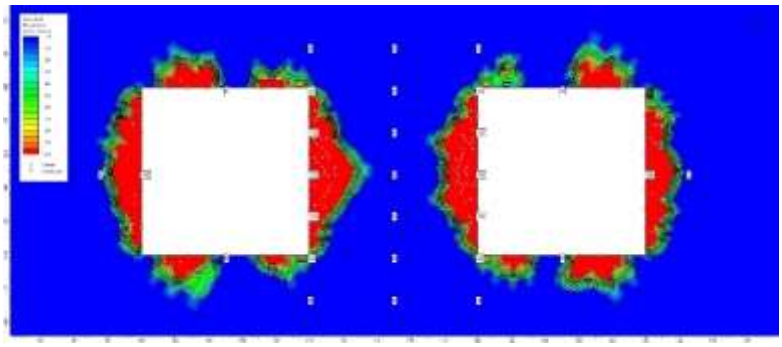
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



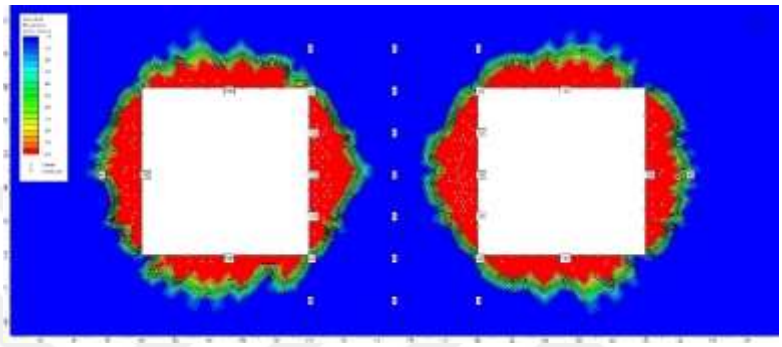
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



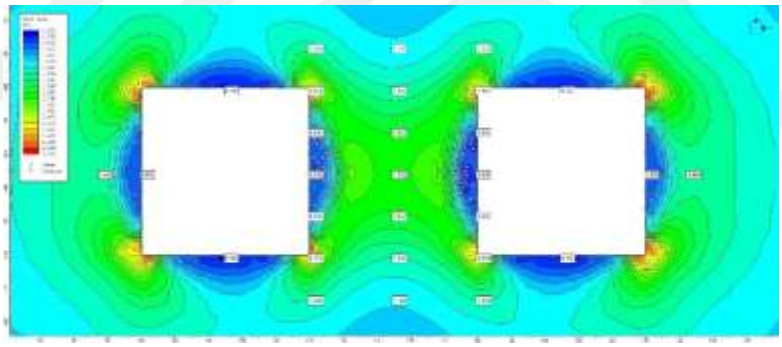
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



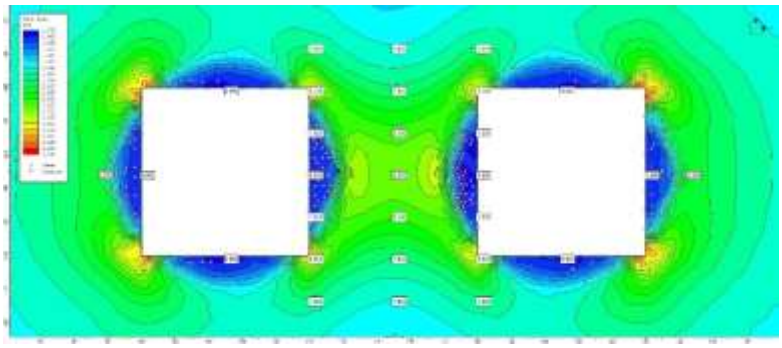
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



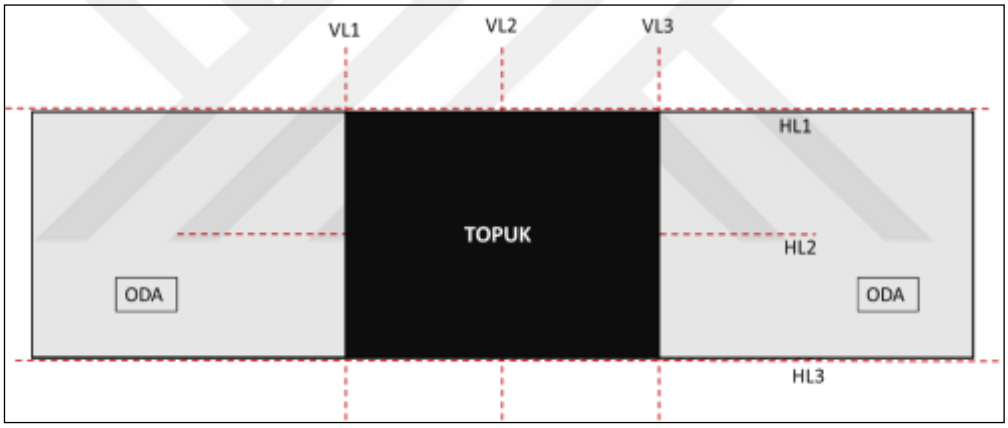
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	1087.11	0.0207	22.50	VL2-1	-97.5	80	27.5	273	0	1.125	1.650
					VL2-2	-100	60	32.5	273	0	1.335	1.950
					VL2-3	-102.5	40	37.5	273	0	1.650	2.400
					VL2-4	-105	10	40	273	0	1.755	2.550
					VL2-5	-107.5	40	37.5	273	0	1.650	2.400
					VL2-6	-110	60	32.5	273	0	1.335	1.950
					VL2-7	-112.5	80	27.5	273	0	1.125	1.650

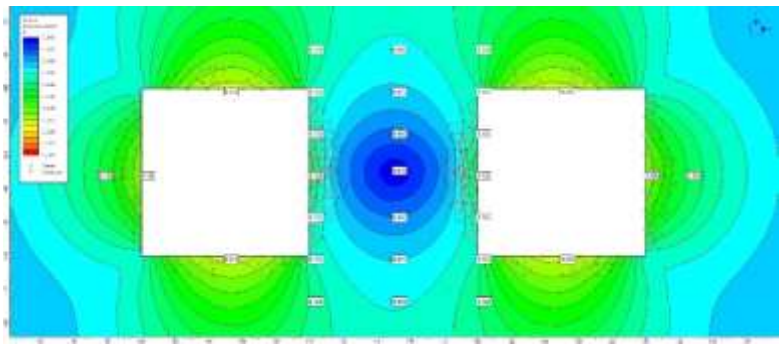
Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	1087.11	0.0207	22.50	VL2-1	-97.5	400	27.5	360	0	1.130	1.650
					VL2-2	-100	3500	32.5	360	0	1.340	1.950
					VL2-3	-102.5	200	40	360	0	1.655	2.400
					VL2-4	-105	500	42.5	360	0	1.865	2.550
					VL2-5	-107.5	2000	40	360	0	1.655	2.400
					VL2-6	-110	3500	32.5	360	0	1.340	1.950
					VL2-7	-112.5	4000	27.5	360	0	1.130	1.650

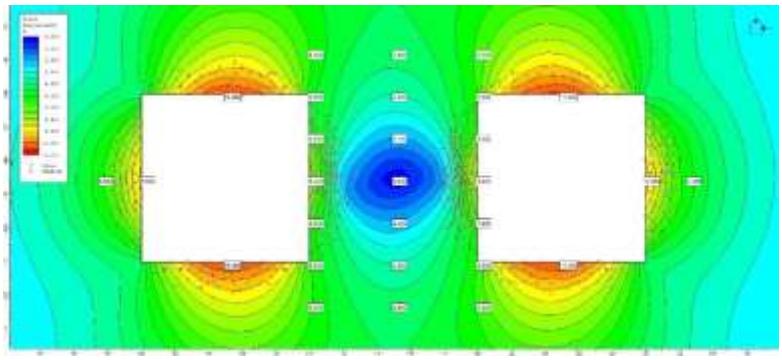


Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri

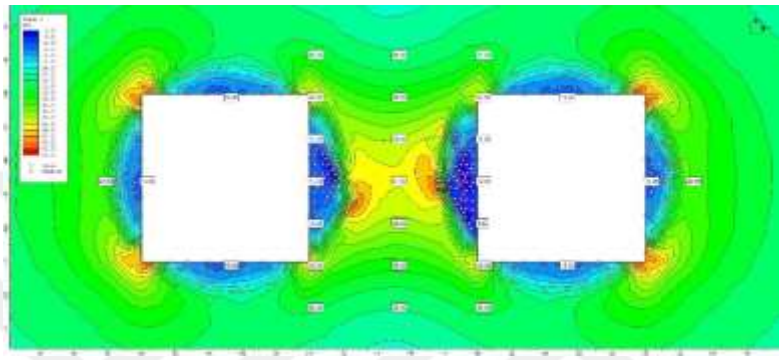
Po=25 MPa



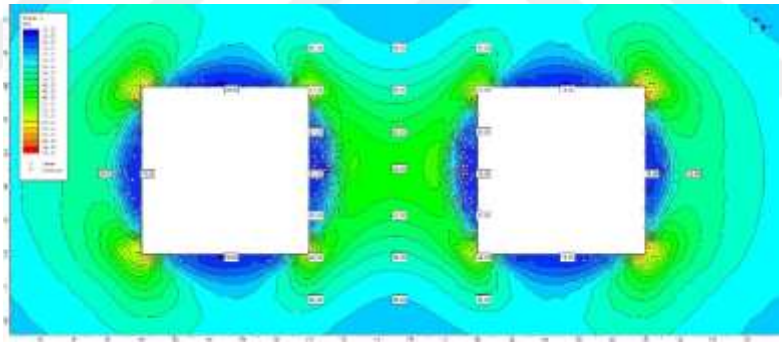
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Orijinal TEBD)



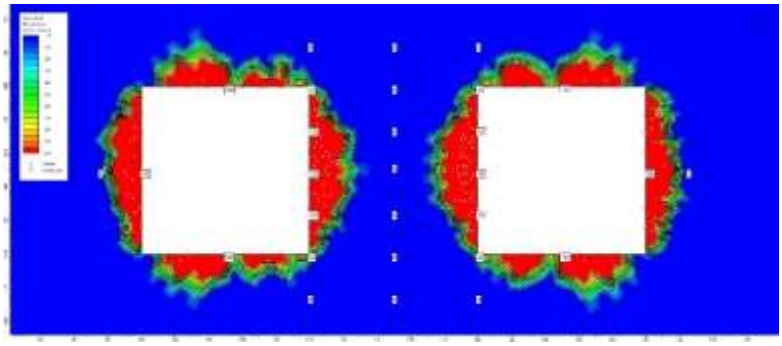
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan toplam deformasyon davranışı (Kritik eşik TEBD)



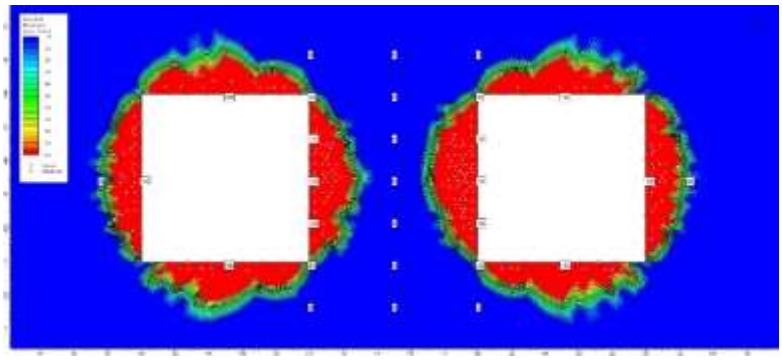
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Orijinal TEBD)



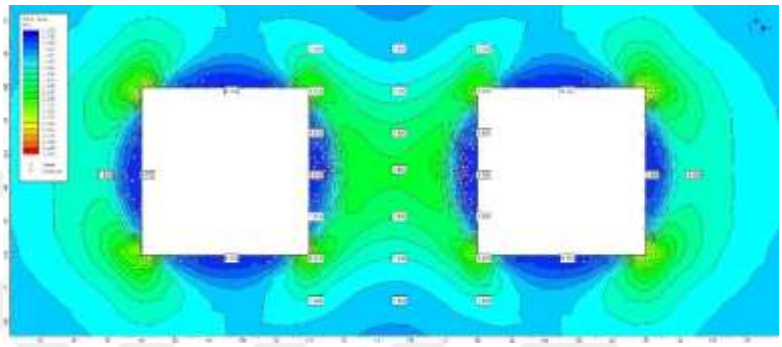
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı (Kritik eşik TEBD)



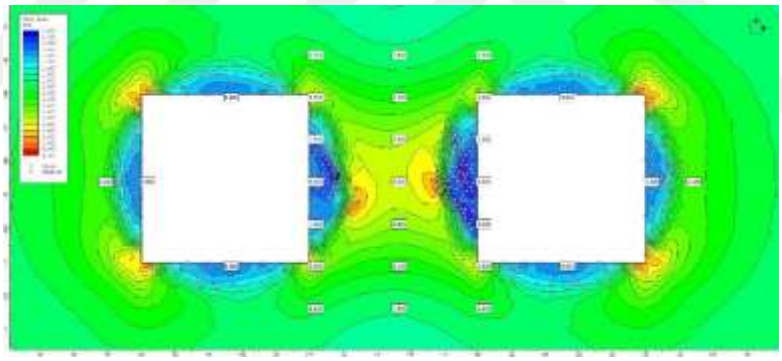
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Orijinal TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan yenilen eleman sayısı (Kritik eşik TEBD)



Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Orijinal TEBD)



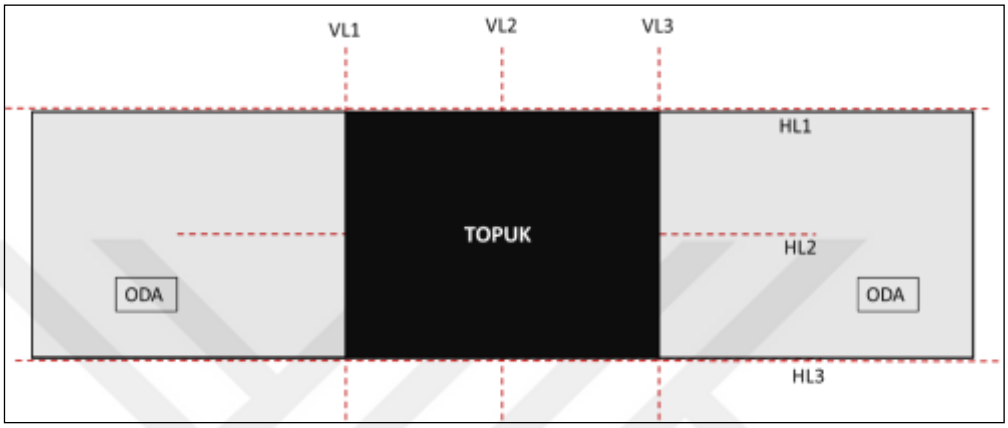
Maden topuğu ve etrafında ortaya çıkan emniyet katsayıları (Kritik eşik TEBD)

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Orijinal TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	UA	σ1A	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	1207.90	0.0207	25.00	VL2-1	-97.5	90	30	312	0	1.350	1.800
					VL2-2	-100	75	36	312	0	1.500	2.200
					VL2-3	-102.5	45	42	312	0	1.800	2.600
					VL2-4	-105	0	45	312	0	1.950	2.800
					VL2-5	-107.5	45	42	312	0	1.800	2.600
					VL2-6	-110	75	36	312	0	1.500	2.200
					VL2-7	-112.5	90	30	312	0	1.350	1.800

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuz malzemesi için maden topuğunda oluşturulan VL2 hattına ait sayısal analiz sonuçları

Kritik eşik TEBD değerine sahip kaya tuzu / Topuk VL2 Hattı												
σc	σc(t)	H	γ	Po	L1	L1	U_A	$\sigma 1_A$	# RMass	Yielded	SF1 (σ1/σc)	SF2 (σ1/σc(t))
(MPa)	(MPa)	(m)	(MN/m3)	(MPa)	Hat	(m)	(mm)	(MPa)	(-)	(%)	(-)	(-)
23.46	16,36	1207.90	0.0207	25.00	VL2-1	-97.5	4800	30	385	0	1.350	1.800
					VL2-2	-100	4200	39	385	0	1.650	2.200
					VL2-3	-102.5	2400	48	385	0	1.950	2.800
					VL2-4	-105	600	51	385	0	2.250	3.200
					VL2-5	-107.5	2400	48	385	0	1.950	2.800
					VL2-6	-110	4200	39	385	0	1.650	2.400
					VL2-7	-112.5	4800	30	385	0	1.350	1.800



Sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan geometri