T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYA TUZUNA AİT KISA VE UZUN DÖNEMLİ MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Hakan ÖZŞEN
DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konya, 2009

T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYA TUZUNA AİT KISA VE UZUN DÖNEMLİ MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Hakan ÖZŞEN

DOKTORA TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Konya, 2009

ÖZET

Doktora Tezi

KAYA TUZUNA AİT KISA VE UZUN DÖNEMLİ MEKANİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Hakan ÖZŞEN
Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman : Prof.Dr. Cem ŞENSÖĞÜT
İkinci Danışman: Yrd.Doç.Dr. İhsan ÖZKAN
2009, 315 Sayfa
Jüri: Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT
Prof. Dr. M.Kemal GÖKAY
Doç. Dr. Yaşar EREN
Yrd. Doç. Dr. İhsan ÖZKAN
Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN

Oda-topuk madenciliği bir yeraltı maden işletme yöntemidir. Bu yöntem, yeraltı kaya tuzu madenciliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu maden işletmeleri oda-topuk madenciliğine en iyi örneklerdir. Ancak kaya tuzuna ait mekanik özellikler yeterince çalışılmadığı için uygun topuk boyutları tecrübe ile belirlenebilmektedir. Bununla birlikte kalın tuz oluşumunun gözlendiği Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir tuz sahaları ülkemiz için Sultanhanı tuz domlarından sonra en önemli depolama sahaları olarak görülmektedir. Bu iki tuz sahası için tasarım çalışmalarında kullanılmak üzere gerekli veri tabanının hazırlanması amacıyla her iki sahadan ayrı ayrı yaklaşık 30'ar kaya tuzu bloğu Selçuk Üniversitesi-Maden Mühendisliği Bölüm laboratuarına nakil edilmiş, bloklardan temin edilen numuneler üzerinde tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, tek eksenli deformabilite, üç eksenli basınç dayanımı, nokta

yükleme indeks dayanımı, Schmidt sertlik deneyi, yoğunluk-gözeneklilik belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uzun dönemli sünme deneyleri için kritik boyut belirleme deneyleri gerçekleştirilmiş ve en uygun numune boyutunun (Boy/Çap, H/D) 2, çap değerinin (D) ise 93 mm olması gerektiği belirlenmiştir. Sünme deneylerinde Nevşehir-Gülşehir numuneleri üzerinde sırasıyla 80, 100, 120, 130, 140 ve 160 kN'luk sabit yükler uygulanırken, Çankırı numuneleri üzerinde 80, 90, 95, 100 ve 115 kN'luk sabit yükler uygulanmıştır. Sünme deneylerinin en kısa süreli olanları yaklaşık 1 saat sürerken 2 yıldır halen devam eden deneyler söz konusudur. Sünme deneyleri yardımıyla sünme davranışını modelleyen bir matematiksel eşitlik geliştirilmiş ve buna bağlı tasarım verileri belirlenmiştir. Matemetiksel model yardımıyla herhangi bir sabit yük değeri için sanal sünme davranışı deney yapmadan belirlenebilecektir. Matematiksel modelden Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda yenilme oluşmaması için en uygun sabit sünme yükünün $P \leq 69,1$ kN ($\sigma_s \leq 10,2$ MPa), Çankırı kaya tuzu için $P \leq 62,5$ kN ($\sigma_s \leq 9,2$ MPa) olması gerektiği belirlenmiştir. Bu sabit yük değerlerinde 1. ve 2. sünme aşamaları oluşacak ancak hiç bir zaman 3. sünme aşaması oluşmayacaktır. Bu koşul uzun dönemli güvenli tasarım verisi olarak kabul edilmiştir. Her iki kaya tuzu sahası için belirlenen bu değerler ($\sigma_s \leq 10,2$ MPa ve $\sigma_s \leq 9,2$ MPa) PHASE^2 sonlu elemanlar yazılımında kullanılmış ve topuk tasarımı yapılmıştır. Sayısal çözümleme sonuçlarına göre Çankırı maden ocağında güvenli topuk yüksekliği ve genişliği oranı (H/W) 1,5'den büyük olmamalıdır. Halen kullanılan H/W oranı 0,786 olduğu dikkate alınırsa güvenlik katsayısının yaklaşık 2 olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya tuzu, kaya mekaniği, sünme davranışı, matematiksel sünme modeli

ABSTRACT

PhD Thesis

DETERMINING SHORT AND LONG TERM MECHANICAL PROPERTIES AND MATHEMATICAL MODELLING OF ROCK SALT

Hakan ÖZŞEN

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mining Engineering

Supervisor : Prof.Dr. Cem ŞENSÖĞÜT

Co-Supervisor: Assist.Prof.Dr. İhsan ÖZKAN

2009, 315 Pages

Jury: Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT

Prof. Dr. M.Kemal GÖKAY

Assoc. Prof. Dr. Yaşar EREN

Assist. Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Assist. Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN

Room and pillar mining is an underground mining method which is being used widely in underground rock salt mining. Çankırı and Nevşehir-Gülşehir rock salt mines are the best examples of room and pillar mining. Because there are insufficient studies on mechanic properties of rack salt, the suitable pillar dimensions can be determined by experience. Besides of this, Çankırı and Nevşehir-Gülşehir salt areas, in which thick salt formations are seen, are the most important storage areas after the Sultanhanı salt domes. For the purpose of preparing a database which will be used in the design studies, salt blocks were transported from these two salt areas as 30 blocks were prepared from these blocks and subjected to the uniaxial compressive strength, indirect tensile strength, strain-stress test, three-axial compressive strength, point load strength test, Schmidt hardness test and density- porosity determination tests. Also, critical size determination tests were conducted for long period creep tests and

the most suitable sample size (Height/Diameter, H/D) and diameter (D) were determined as 2 and 93 mm respectively. Samples with H/D ratio equals to 2 and Diameter (D) equals to 93 mm were formed to be used in creep tests. In the experiments, Nevşehir-Gülşehir samples were subjected to the constant loads which are 80, 100, 120, 130, 140 and 160 kN respectively while load with 80, 90, 95, 100 and 115 kN were applied to the Çankırı samples. In addition to the experiments that ended in 1 hour, there are experiments which are still being conducted for 2 years. A mathematical equality was developed by using the database formed from the creep tests and design parameters were determined in relation to this equality. It will be possible to determine any virtual creep behavior without conducting an experiment by the aid of this mathematical model. From the mathematical model in concern, it was determined that the most suitable constant creep load for Nevşehir-Gülşehir should be P≤69.1 kN ($\sigma_s \leq$ 10,1 MPa) and P≤62.56kN ($\sigma_s \leq$ 9,2 MPa) for Çankırı rock salt. First and second creep phases would be formed in these constant load values however the third creep phase will never be observed. This condition is taken as the confidence design data. These determined values for two rock salt areas ($\sigma_s \leq$ 10,1 MPa and $\sigma_s \leq$ 9,2 MPa) are used in the PHASE^2 program to conduct numerical analysis studies to conduct pillar design for the room-pillar mining method. According to the numerical analyses, the confidential ratio of hell height to the width (H/W) should not be bigger than 1.5 for the Çankırı mine. Currently, this H/W ratio is used as 0,786 in that mine and the confidence coefficient for this value is calculated as 2.

Key Words: Rock salt, rock mechanics, creep test, mathematical creep model

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın her safhasında beni destekleyip yönlendiren, teşvik eden, daima en iyinin ve doğrunun olması için çalışan ve benim yetişmem için emeğini esirgemeyen danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT ve Yrd. Doç. Dr. İhsan ÖZKAN'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Tez izleme komite üyesi olarak fikirleriyle daima bana yol gösteren Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. M.Kemal GÖKAY ve Jeoloji Mühendisliği Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Yaşar EREN'e, ayrıca bu çalışmada bilgilerini esirgemeyerek bana yol gösteren Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN ve Yrd. Doç. Dr. Melih GENİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezde kullanmış olduğum ekipmanların alımı için yapmış olduğu maddi destekten dolayı Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim (BAP-06101013).

Yoğun çalışmalarım esnasında bana yardımlarını esirgemeyen ve her konuda anlayışla destek olan tüm Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü üyelerine teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında ve hayatımın her anında yardımlarını ve anlayışını esirgemeyen, bana sabırla destek olan biricik eşim Dr. Seral ÖZŞEN ve 2008 yılında aramıza katılan sevgili kızım Zeynep'e ve bu günlere gelmemi borçlu olduğum babam Hüseyin ÖZŞEN ve annem Aysel ÖZŞEN'e, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
KISALTMALAR xii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiii
ÇİZELGELER LİSTESİ xx
1. GİRİŞ 1
1.1. Problemin Tanımı 1
1.2. Çalışmanın Amacı 2
1.3. Çalışmanın İçeriği 2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Genel 4
2.2. Tuz Hakkında Genel Bilgi 4
2.3. Tuzun Yataklanması 6
2.3.1. Bariyer-havza teorisi (Bar-basin theory) 6
2.3.2. Halka teorisi (Ring theory) 8
2.3.3. Fraksiyonel sedimantasyon teorisi (Fractional sedimentation theory) 9
2.3.4. Evresel sedimantasyon teorisi (Cyclic sedimantation theory) 9
2.4. Tuzun Doğada Bulunuş Şekilleri 10
2.4.1. Deniz tuzları 11
2.4.2. Göl tuzları 11
2.4.3. Kaynak tuzları 12
2.4.4. Kaya tuzları 12
2.4.4.1. Kaya tuzu oluşumları ve duraylılıığı 13
2.4.4.2. Kaya tuzunun bileşimi 14
2.5. Dünyadaki Mevcut Tuz Madenciliği 16
2.5.1. Rezervler 17
2.5.2. Üretim 18

2.5.3. Tuzun üretim yöntemleri..... 19
2.5.3.1. Buharlaştırma yöntemi ile üretim..... 20
2.5.3.2. Çözelti madenciliği ile üretim..... 20
2.5.3.3. Yeraltı madencilik yöntemleriyle üretim..... 24
2.6. Tuzun Tüketim Alanları..... 35
2.7. Kaya Tuzunun Mekanik Özellikleri..... 36
2.7.1. Kaya tuzunun kısa dönemli mekanik özellikleri..... 36
2.7.1.1. Tek eksenli basınç dayanımı..... 37
2.7.1.1.1. Şekil etkisi üzerinde yapılan çalışmalar..... 38
2.7.1.1.2. Boyut etkisi üzerinde yapılan çalışmalar..... 41
2.7.1.2. Üç eksenli basınç dayanımı..... 50
2.7.1.3. Çekme Dayanımı..... 52
2.7.1.4. Elastik Parametreler..... 52
2.7.2 Kaya tuzunun uzun dönemli mekanik özellikleri..... 54
2.7.2.1 Sünme davranışı..... 56
2.7.2.1.1. Sünmenin analitik ifadesi..... 59
2.7.2.1.2. Sünme deneylerinde karşılaşılan farklılıkların nedenleri..... 64
2.7.2.2. Kaya tuzunun mekanik davranışında sıcaklığın etkisi..... 66
2.7.2.3. Kaya tuzu mekaniğinde tabaka düzlemlerinin önemi..... 68
2.7.2.4. Kaya tuzunda geçirgenlik ve çatlaklılık..... 70
2.8. Yeraltı Boşluklarının Mühendislik Hizmetlerinde Kullanımı..... 74
2.8.1. Yeraltında doğalgazın depolanmasının önemi..... 76
2.8.2. Yeraltı tuz oluşumlarında doğalgazın depolanması..... 79
2.8.2.1. Hidrokarbonların tuz domunda depolanması..... 81
2.8.2.2. Türkiye'de doğalgaz depolama çalışmaları..... 82
3. ÇALIŞMAYA KONU OLAN MADEN SAHALARI..... 85
3.1. Genel..... 85
3.2. Türkiye Kaya Tuzu Potansiyeli..... 85
3.3. Çankırı Kaya Tuzu Madeni..... 87
3.3.1. Maden ocağının yeri..... 87
3.3.2. Çankırı kaya tuzu bölgesinin jeolojisi..... 88
3.3.3. Yapısal jeoloji..... 91

3.3.4. Maden yatağının özellikleri..... 91
3.3.5. İşletme üretim bilgileri..... 91
3.4. Nevşehir-Tuzköy Kaya Tuzu Madeni..... 93
3.4.1. Maden ocağının yeri..... 93
3.4.2. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bölgesinin jeolojisi..... 94
3.4.3. Yapısal jeoloji..... 95
3.4.4. Maden yatağının özellikleri..... 96
3.4.5. Maden işletme bilgileri..... 97
4. DENEY DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI..... 101
4.1. Giriş..... 101
4.2. Deney Düzeneğinin Geliştirilmesinde Dikkate Alınan Literatür İncelemesi..... 101
4.3. Deneme Amaçlı Deney Düzeneğinin Hazırlanması..... 105
4.4. Nihai Deney Düzeneği..... 110
5. NUMUNELERİN TEMİNİ VE HAZIRLANMASI..... 116
5.1. Genel..... 116
5.2. Numune Bloklarının Temini..... 116
5.3. Numunelerin Hazırlanması..... 118
5.4. Kaya Mekaniği Deneylerinde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması..... 121
5.4.1. Yoğunluk-gözeneklilik belirleme deneyi numunelerinin hazırlanması..... 121
5.4.2. Suda dağılma dayanımı indeks deneyi numunelerinin hazırlanması.. 121
5.4.3. Kaya sertliği deneyi numunelerinin hazırlanması..... 122
5.4.4. Tek eksenli basınç dayanımı belirleme deneyi numunelerinin hazırlanması..... 122
5.4.5. Dolaylı çekme (Brazilian) deneyi numunelerinin hazırlanması..... 124
5.4.6. Nokta yükleme indeks deneyi numunelerinin hazırlanması..... 125
5.4.7. Tek eksenli deformabilite deneyi numunelerinin hazırlanması..... 127
5.4.8. Üç eksenli basınç dayanımı deneyi numunelerinin hazırlanması..... 128
5.4.9. Periyodik yük artırma-boşaltma deney numunelerinin hazırlanması 129
5.5. Sünme Deneyi için Boyut Belirleme Deneylerinde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması..... 130

6. KAYA MEKANİĞİ DENEYLERİ..... 134
6.1. Genel..... 134
6.2. Çankırı Kaya Tuzu Örnekleri Üzerinde Gerçekleştirilen Kaya Mekaniği Deneyleri..... 134
6.2.1. Yoğunluk, Gözeneklilik, Su İçeriği ve Boşluk Hacmi Belirleme Deneyi..... 134
6.2.2. Nokta Yükleme İndeks Deneyi..... 135
6.2.3. Suda Dağılma Dayanımı Deneyi..... 138
6.2.4. Schmidt Sertlik Deneyi..... 142
6.2.5. Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi..... 143
6.2.6. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi..... 144
6.2.7. Tek Eksenli Deformabilite Deneyi..... 146
6.2.8. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi..... 147
6.2.9. Periyodik Yükleme ve Yük Boşaltma Deneyi..... 150
6.3. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzu Örnekleri Üzerinde Gerçekleştirilen Kaya Mekaniği Deneyleri..... 152
6.3.1. Yoğunluk, Gözeneklilik ve Porozite Belirleme Deneyi..... 152
6.3.2. Nokta Yükleme Dayanım Deneyi..... 153
6.3.3. Suda Dağılma Dayanımı Deneyi..... 154
6.3.4. Schmidt Sertliği Belirleme Deneyi..... 155
6.3.5. Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian) Deneyi..... 156
6.3.6. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi..... 158
6.3.7. Tek Eksenli Deformabilite Deneyi..... 159
6.3.8. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi..... 160
6.3.9. Periyodik Yükleme ve Yük Boşaltma Deneyi..... 163
7. BOYUT BELİRLEME ÇALIŞMALARI..... 166
7.1. Genel..... 166
7.2. Numune Hazırlama İşlemleri..... 166
7.3. Deneysel Çalışma Prosedürü..... 168
7.4. Boy-Çap Oranı (H/D) Etkisi..... 169
7.5. Çap (D) Etkisi..... 175
7.6. Tuz Kristal Boyut (ρ) Etkisi..... 181

7.7. Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı Kaya Tuzu Numuneleri için Şekil Faktörü 186
7.8. Sünme Deneyleri için Standart Numune Boyutunun Belirlenmesi..... 189
8. SÜNME DENEYLERİ..... 192
8.1. Genel 192
8.2. Çankırı Kaya Tuzu ile Gerçekleştirilen Sünme Deneyleri..... 192
8.2.1. C80-1 Numunesi..... 193
8.2.2. C95-1 Numunesi..... 195
8.2.3. C100-1 Numunesi..... 197
8.2.4. C110-1 Numunesi..... 199
8.2.5. C115-1 Numunesi..... 201
8.2.6. Çankırı kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarının karşılaştırılması..... 203
8.3. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzu ile Gerçekleştirilen Sünme Deneyleri….. 205
8.3.1. N80-1 Numunesi..... 206
8.3.2. N100-1 Numunesi..... 208
8.3.3. N120-2 Numunesi..... 210
8.3.4. N130-1 Numunesi..... 212
8.3.5. N140-1 Numunesi..... 214
8.3.6. N160-1 Numunesi..... 216
8.3.7. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarının karşılaştırılması..... 218
9. SÜNME DAVRANIŞINA AİT MATEMATİKSEL MODELİN GELİŞTİRİLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ..... 220
9.1. Genel..... 220
9.2. Matematiksel Model Çalışmaları..... 220
9.2.1. Matematiksel modelin geliştirilmesi..... 221
9.2.2. Matematiksel modelin Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerindeki performansı..... 227
9.2.3. Matematiksel modelin Çankırı kaya tuzu üzerindeki performansı…. 232
9.3 Matematiksel Model Yardımıyla Belirlenen İstatistiksel Katsayılar ve Bu Katsayılara ait İlişkiler..... 236

9.3.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait istatistiksel katsayıların değerlendirilmesi..... 237
9.3.2. Çankırı kaya tuzuna ait istatistiksel katsayıların değerlendirilmesi… 240
9.4. Sünme Davranışında 1., 2. ve 3. Sünme Aşamalarının Belirlenmesi……. 244
9.4.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait hız ve ivme analizi..... 245
9.4.2. Çankırı kaya tuzuna ait hız ve ivme analizi..... 249
9.5 Matematiksel Model Yardımıyla Belirlenen Tasarım Parametreleri…….. 252
9.5.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait tasarım parametreleri..... 252
9.5.2. Çankırı kaya tuzuna ait tasarım parametreleri..... 264
10. SAYISAL ÇÖZÜMLEME..... 274
10.1. Genel..... 274
10.2. Sayısal Çözümleme için PC Paket Program Seçimi..... 275
10.3. Sayısal Çözümleme için Malzeme Özelliklerinin Tespiti..... 277
10.4. Sayısal Çözümleme için Model Oluşturma ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi..... 279
10.5. Model Üzerinde Sayısal Çözümleme Çalışmaları..... 281
10.6 Parametrik Çalışmalar..... 284
10.6.1. Çankırı kaya tuzu madeninde orijinal durum için yapılan sayısal çözümleme çalışmaları..... 284
10.6.2. Değişik topuk boyutlarına bağlı sayısal çözümleme çalışmaları….. 290
11. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 295
11.1. Sonuçlar..... 295
11.2. Öneriler..... 302
KAYNAKLAR..... 303

KISALTMALAR

a : İvme
B_v : Numune bulk hacmi
c : Kohezyon
D : Karot çapı
DÇD : Dolaylı çekme dayanımı
E_t : Tanjant elastisite modülü
E_{ort} : Ortalama elastisite modülü
E_s : Sekant elastisite modülü
H : Karot yüksekliği, topuk yüksekliği
K : Düzeltme faktörü
m : Eğim
P_h : Yatay arazi gerilmeleri
P_v : Düşey arazi gerilmeleri
Pv : Gözenek hacmi
Q : Aktivasyon enerjisi
R : Gaz sabiti
SO : Sapma oranı
T : Ortam sıcaklığı
t : Zaman
TEBD : Tek eksenli basınç dayanımı
ÜEBD : Üç eksenli basınç dayanımı
v : Hız
W : Topuk veya açıklık genişliği
W_d : Kuru ağırlık
W_s : Yaş ağırlık
ε_d : Düşey birim deformasyon
ε_y : Yatay birim deformasyon
$\varepsilon_{d\ 1\text{-}2}$: 1. sünme aşamasından 2. sünme aşamasına geçişte düşey birim deformasyon
$\varepsilon_{d\ 2\text{-}3}$: 2. sünme aşamasından 3. sünme aşamasına geçişte düşey birim deformasyon
σ_c : Tek eksenli basınç dayanımı
σ_s : Sünme dayanımı
σ_t : Çekme dayanımı
σ_1 : En büyük asal gerilme
σ_3 : En küçük asal gerilme
σ_{C_G} : Şekil etkisi haricinde oluşan gerçek tek eksenli basınç dayanımı
$\sigma_{C_{OranEtkisi}}$: Şekil etkisinde oluşan tek eksenli basınç dayanımı
ρ : Kristal tane boyutu
ϕ : İçsel sürtünme açısı
γ : Yoğunluk
τ : Makaslama dayanımı
υ_t : Tanjant Poisson oranı
υ_{ort} : Ortalama Poisson oranı
υ_s : Sekant Poisson oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Bariyer-havza tuz yataklanma modeli (Van den Broek, 1989)..... 7
Şekil 2.2 Tuz formasyonlarının üç ayrı şeklinin şematik gösterimi ve üst katmanların durumları (Van den Broek, 1989) 13
Şekil 2.3 Sondajlarla çözelti madenciliğinin (a) direkt (b) ters dolaşım ile üretim yöntemi ve yapay mağaraların gelişimi (Ersoy ve Yünsel, 2001)..... 23
Şekil 2.4 Kare topuk yöntemi uygulanan Tenecco trona madeni plan görünüşü (Wyoming ABD) (Jeremic, 1994)..... 25
Şekil 2.5 Westvaco-ABD trona ocağında uygulanan dikdörtgen topuk yöntemi (Jeremic, 1994)..... 26
Şekil 2.6 Westvaco-ABD trona ocağında uygulanan elmas şekilli topuk yöntemi (Jeremic, 1994)..... 26
Şekil 2.7 Saskatchewan potas madeninde uygulanan V-şekilli oda-topuk yöntemi (Jeremic, 1994)..... 27
Şekil 2.8 Dört odalı uzun topuk madenciliğine bir örnek (Saskatchewan-Kanada) (Jeremic, 1994)..... 28
Şekil 2.9 Kaya tuzunda uygulanan uzunayak madenciliği (a) kesit görünüş (Soligorsk madeni, Rusya) (b) plan görünüş (Westvaco madeni-ABD) (Jeremic, 1994)..... 29
Şekil 2.10 Güney Ontario (Kanada) Goderich kaya tuzu madeninde uygulanan kare topuk yöntemi (Jeremic, 1994)..... 30
Şekil 2.11 Şerit topuk yöntemi ile kaya tuzu madenciliği (Kanada Güney Ontario-Goderich kaya tuzu madeni) (Jeremic, 1994)..... 31
Şekil 2.12 Köşeli oda yöntemi üretim evreleri (Almanya-Borth kaya tuzu madeni) (Jeremic, 1994)..... 32
Şekil 2.13 Trapez oda yöntemi uygulanan Romanya-Dez (200 m derinlikteki) kaya tuzu madeni (Jeremic, 1994)..... 32
Şekil 2.14 Kanada'daki New Brunswick Denison Potacan potas madeninde uygulanan uzun oda yöntemi (Jeremic, 1994)..... 33
Şekil 2.15 Çok katlı oda-topuk yöntemi (Tusanj kaya tuzu madeni-Eski Yugoslavya) (Jeremic, 1994)..... 34
Şekil 2.16 Farklı kaya tuzları için TEBD ile boy/çap oranı arasındaki ilişki (Zhigalkin ve ark., 2005)..... 40
Şekil 2.17 Numune çapı oranı ile TEBD değeri arasındaki ilişki (Hoek ve Brown, 1980)……..... 42
Şekil 2.18 Kaya tuzu ve kömür numunelerinin TEBD değerleri ile numune boyutu arasındaki ilişki (Jeremic, 1994)..... 43
Şekil 2.19 Kübik halit ve karnalit numunelerinde kenar genişliğine (W) göre TEBD değerleri (Jeremic, 1994)..... 44
Şekil 2.20 Farklı maden yatakları için kübik kaya tuzu numunelerinde kenar genişliğine göre TEBD değişimi (Jeremic, 1994) 45
Şekil 2.21 Çankırı kaya tuzu için numune kritik boyutunun belirlenmesi (Özkan ve Düzyol, 2004) 46

Şekil 2.22 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için numune kritik boyutunun belirlenmesi (Özkan ve ark, 2006)..... 47
Şekil 2.23 TEBD ile çap (D)/ortalama kristal tane boyutu (ρ) arasındaki ilişki (Lux, 1984)..... 47
Şekil 2.24 Bazı araştırmacılar tarafından tek eksenli basınç dayanımı değerinin porozite ile ilişkilendirilmesi..... 48
Şekil 2.25 Değişik kaynaklarından elde edilen tuz örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri (Fuenkajorn, 2005)..... 49
Şekil 2.26 $2,1x10^{-5}sn^{-1}$ sabit birim deformasyon oranında gerçekleştirilen üç eksenli sünme deneyleri sapma gerilmesi (σ_1-σ_3)-eksenel birim deformasyon grafiği (Price ve Farmer, 1980)..... 51
Şekil 2.27 Değişik kaynaklarından elde edilen tuz örneklerinin elastik modül değerleri (Fuenkajorn, 2005)..... 53
Şekil 2.28 Değişik kaynaklarından elde edilen tuz örneklerinin Poisson oranı değerleri (Fuenkajorn, 2005)..... 54
Şekil 2.29 Kaya tuzunda gerçekleştirilmiş mühendislik yapılarına etki eden parametreler (Hunsche ve Hampel, 1999)..... 56
Şekil 2.30 Sünme deformasyonunun zamanın fonksiyonu olarak modeli (Jeremic, 1994)..... 57
Şekil 2.31 Değişik kaya tuzu örneklerinin sabit yük altındaki sünme eğrileri (Dreyer, 1973)..... 65
Şekil 2.32 Sapma gerilmesi (σ_1-σ_3) 6, 8 ,10 ve 12 MPa için değişik sıcaklıklarda sünme eğrileri (Vouille ve ark., 1984)..... 67
Şekil 2.33 Sertleştirilmiş ve normal kaya tuzu örneklerindeki sünme eğrilerinin karşılaştırılması (Dreyer, 1973)..... 68
Şekil 2.34 Tabaka eğim açısının basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Jeremic, 1994)..... 70
Şekil 2.35 Yeraltında Doğal Gaz Depolama Olanakları-A tuz çözelti açıklıkları, B yeraltı madenleri, C petrol ve gaz sahaları, akiferler, D sığ derinlikte yeraltı açıklıkları..... 74
Şekil 3.1 Türkiye'de mevcut tuz kaynakları (www.turkiyetuz.com, 2008) 86
Şekil 3.2 Çankırı kaya tuzu ocakları yerbulduru haritası..... 88
Şekil 3.3 Çankırı kaya tuzu bölgesi stratigrafik dikme kesiti (ölçeksiz) 90
Şekil 3.4 Çankırı yeraltı kaya tuzu ocağında üretimde kullanılan bir iş makinesi. 93
Şekil 3.5 Nevşehir-Gülşehir-Tuzköy tuzlasının yerbulduru haritası..... 94
Şekil 3.6 Oda topuk yöntemiyle işletilen kaya tuzu yeraltı madeninden bir görünüm..... 98
Şekil 3.7 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu yeraltı ocağındaki topuklarda meydana gelen arazi gerilmeleri ve killi bantların etkisiyle tabakaların ayrılması..... 99
Şekil 3.8 Açıkocak ve ocak tabanında ortaya çıkan eski yeraltı maden galerisi.... 100
Şekil 3.9 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu açık ocağından bir görünüm ve ocak tabanında açığa çıkan eski yeraltı maden galerileri..... 100
Şekil 4.1 Almanya'da faaliyet gösteren TU-Clausthal araştırma merkezinde kullanılan ölü yük ağırlık sistemi (Özarslan ve ark., 2007)..... 103
Şekil 4.2 Almanya'da faaliyet gösteren TU-Clausthal araştırma merkezinde kullanılan bilgisayar kontrollü hidrolik deney sistemi..... 104

Şekil 4.3 Azot gazı ile çalışan sünme deney düzeneği (Pfeifle ve ark., 1998)..... 105
Şekil 4.4 Geliştirilen prototip sünme deney düzeneği..... 107
Şekil 4.5 Geliştirilen prototipte gerçekleştirilen ilk deney sonucu..... 109
Şekil 4.6 Kilitleme sistemi geliştirildikten sonra prototipte yapılan sorunsuz deney sonucu..... 109
Şekil 4.7 Sünme deneylerinde kullanılan nihai deney düzeneği..... 112
Şekil 4.8 Sünme deney laboratuarı..... 113
Şekil 4.9 Sünme deney laboratuarında kullanılan split klima..... 114
Şekil 4.10 Sünme deney laboratuarında kullanılan dijital nem ve sıcaklık ölçer..... 114
Şekil 4.11 Nihai tasarımlı hidrolik presten ölçülen tipik bir sünme davranışı..... 115
Şekil 5.1a Çankırı kaya tuzu ocağından laboratuara getirilen kaya tuzu blokları..... 117
Şekil 5.1b Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu ocağından laboratuara getirilen kaya tuzu blokları..... 117
Şekil 5.2 Blok düzeltme makinesi..... 119
Şekil 5.3 Kaya tuzunda su olmadan karot almaya olanak sağlayan karotiyer ucu tasarımı..... 120
Şekil 5.4 Tasarıma uygun olarak imal edilen karotiyer ucu..... 120
Şekil 5.5 Suda dağılma deneyi için hazırlanan tipik iki deney seti..... 122
Şekil 5.6 Tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan silindirik karot numuneler..... 123
Şekil 5.7 Dolaylı çekme deneyi için hazırlanan numuneler..... 124
Şekil 5.8 Sünme deneyi için boyut belirleme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan Çankırı kaya tuzu örnekleri……..... 130
Şekil 5.9 Sünme deneyi için boyut belirleme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu örnekleri..... 131
Şekil 6.1 Çankırı kaya tuzunun değişik tuz derişimli su ortamlarında suda dağılma dayanım davranışı..... 141
Şekil 6.2 Çankırı kaya tuzu numunelerine ait tipik bir gerilme-birim deformasyon davranışı..... 147
Şekil 6.3 Çankırı kaya tuzuna ait normal gerilme (σ)-makaslama gerilmesi (τ) davranışı..... 148
Şekil 6.4 Çankırı kaya tuzuna ait tipik bir en küçük asal gerilme (σ_3)-en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı..... 149
Şekil 6.5 Periyodik yükleme-boşaltma sonucunda 2 nolu numune için Çankırı kaya tuzunda belirlenen birim deformasyon-gerilme davranışı..... 150
Şekil 6.6 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunun değişik tuz derişimli su ortamlarında belirlenen suda dağılma dayanımı davranışı..... 155
Şekil 6.7 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait normal gerilme (σ)-makaslama gerilmesi davranışı (τ)..... 161
Şekil 6.8 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait tipik bir en küçük asal gerilme (σ_3)-en büyük asal gerilme (σ_1)davranışı..... 163
Şekil 6.9 Periyodik yükleme-boşaltma sonucunda Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda belirlenen birim deformasyon-gerilme davranışı..... 164
Şekil 7.1 Deney numunelerinin şematik gösterimi..... 167

Şekil 7.2 Boyut belirleme çalışmaları için hazırlanan numuneler Nevşehir-Gülşehir (a), Çankırı (b)..... 167
Şekil 7.3 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki değişim..... 170
Şekil 7.4 Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki değişim..... 170
Şekil 7.5 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki ilişki..... 172
Şekil 7.6 Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki ilişki..... 173
Şekil 7.7 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değeri ile TEBD değerleri arasındaki davranış..... 176
Şekil 7.8 Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değeri ile TEBD değerleri arasındaki davranış..... 176
Şekil 7.9 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değerleri ile TEBD değerleri arasındaki ilişki..... 177
Şekil 7.10 Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için çap tane boyu oranı (D/ρ) ile TEBD değerleri arasındaki ilişki..... 178
Şekil 7.11 Nevşehir-Gülşehir (a) ve Çankırı (b) kaya tuzu kristallerine ait mikroskop görüntüleri..... 182
Şekil 7.12 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda yapılan elek analizi eğrisi..... 183
Şekil 7.13 Çankırı kaya tuzunda yapılan elek analizi eğrisi..... 184
Şekil 7.14 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numunelerinde çap/tane boyu (D/ρ) oranına bağlı olarak TEBD değişimleri..... 185
Şekil 7.15 Çankırı karot kaya tuzu numunelerinde çap/tane boyu oranına (D/ρ) bağlı olarak TEBD değişimleri..... 185
Şekil 7.16 Nevşehir-Gülşehir karot numuneleri için düzeltme faktörü..... 187
Şekil 7.17 Çankırı karot numuneleri için düzeltme faktörü..... 187
Şekil 7.18 Daha önceki çalışmalar ve bu çalışma ile belirlenen değişik K faktörleri ile Yükseklik/Çap (H/D) oranı ilişkisi..... 188
Şekil 7.19 Belirlenen kriterlere göre oluşturulan tipik bir kaya tuzu karot numunesi..... 191
Şekil 7.20 Sünme deneyleri için hazırlanan 93 mm çaplı tipik silindirik kaya tuzu numuneleri..... 191
Şekil 8.1 C80-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 194
Şekil 8.2 C80-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 194
Şekil 8.3 C80-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 195
Şekil 8.4 C95-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 196
Şekil 8.5 C95-1 numunesinin zaman düşey birim deformasyon davranışı..... 196
Şekil 8.6 C95-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon grafiği..... 197
Şekil 8.7 C100-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 198
Şekil 8.8 C100-1 numunesinin düşey birim deformasyon-zaman grafiği..... 198
Şekil 8.9 C100-1 numunesinin yatay birim deformasyon-zaman grafiği..... 199
Şekil 8.10 C110-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 200
Şekil 8.11 C110-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 200
Şekil 8.12 C110-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 201
Şekil 8.13 C115-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 202

Şekil 8.14 C115-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 202
Şekil 8.15 C115-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 203
Şekil 8.16 Çankırı kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen düşey birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları..... 204
Şekil 8.17 Çankırı kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen yatay birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları..... 204
Şekil 8.18 N80-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 206
Şekil 8.19 N80-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 207
Şekil 8.20 N80-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 207
Şekil 8.21 N100-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 208
Şekil 8.22 N100-1 numunesinin zaman düşey birim deformasyon davranışı..... 209
Şekil 8.23 N100-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 209
Şekil 8.24 N100-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 210
Şekil 8.25 N120-2 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 211
Şekil 8.26 N120-2 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 211
Şekil 8.27 N130-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 212
Şekil 8.28 N130-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 213
Şekil 8.29 N130-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 213
Şekil 8.30 N140-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 214
Şekil 8.31 N140-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 215
Şekil 8.32 N140-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 215
Şekil 8.33 N160-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü..... 216
Şekil 8.34 N160-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı..... 217
Şekil 8.35 N160-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı..... 217
Şekil 8.36 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen düşey birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları..... 218
Şekil 8.37 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen yatay birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları..... 219
Şekil 9.1 Sünme davranışının aşamalarını şematize eden tipik şekil..... 223
Şekil 9.2 Sünme davranışı ve sünme aşamaları..... 224
Şekil 9.3 N100 numunesine ait laboratuar ve matematiksel model sonuçları..... 229
Şekil 9.4 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel model verileri..... 229
Şekil 9.5 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen birinci sünme aşaması..... 230
Şekil 9.6 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen ikinci sünme aşaması..... 231
Şekil 9.7 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen üçüncü sünme aşaması..... 231
Şekil 9.8 C100-1 numunesine ait laboratuar ve matematiksel model sonuçları..... 234
Şekil 9.9 Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel model verileri..... 234
Şekil 9.10 Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen birinci sünme aşaması..... 235
Şekil 9.11 Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen ikinci sünme aşaması..... 235

Şekil 9.12 Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen üçüncü sünme aşaması.....236
Şekil 9.13 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel A katsayısının değişimi..... 237
Şekil 9.14 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel B katsayısının değişimi..... 238
Şekil 9.15 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel C katsayısının değişimi..... 238
Şekil 9.16 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel Q katsayısının değişimi..... 239
Şekil 9.17 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel t_{max} katsayısının değişimi..... 239
Şekil 9.18 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel A katsayısının değişimi.....241
Şekil 9.19 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel B katsayısının değişimi.....241
Şekil 9.20 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel C katsayısının değişimi.....242
Şekil 9.21 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel Q katsayısının değişimi.....242
Şekil 9.22 σ_s/σ_c oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel t_{max} katsayısının değişimi.....243
Şekil 9.23 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu N130-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme hızı davranışı..... 245
Şekil 9.24 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu N130-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme ivmesi davranışı..... 246
Şekil 9.25 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu N130-1 numunesine ait hız ve ivme grafiklerinden belirlenen 1., 2. ve 3. sünme aşamaları.....248
Şekil 9.26 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numunelerine ait 1., 2. ve 3. sünme aşamaları..... 248
Şekil 9.27 Çankırı kaya tuzu C100-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme hızı davranışı..... 249
Şekil 9.28 Çankırı kaya tuzu C100-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme ivmesi davranışı.....250
Şekil 9.29 Çankırı kaya tuzu N100-1 numunesine ait hız ve ivme grafiklerinden belirlenen 1., 2. ve 3. sünme aşamaları..... 251
Şekil 9.30 Çankırı kaya tuzu numunelerine ait 1., 2. ve 3. sünme aşamaları..... 252
Şekil 9.31 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerindeki ikinci sünme davranışı.....253
Şekil 9.32 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerinde 1. ve 2. sünme aşamasına ait başlangıç ve bitiş noktaları……..... 254
Şekil 9.33 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için aşamalar arasında geçiş hattı..... 255
Şekil 9.34 Sünme gerilmesi (σ_S) değerinin zamana bağlı değişimi..... 256
Şekil 9.35 Sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile ikinci sünme esnasında ortaya çıkan doğrusal davranışa ait (m) değerleri arasındaki ilişki..... 258
Şekil 9.36 Sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile düşey birim deformasyon (ε_d) değerlerinin sünme aşama hattı için değerlerndirilmesi..... 260

Şekil 9.37 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu içn tasarım önerisi..... 263
Şekil 9.38 Çankırı kaya tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerindeki 2. sünme davranışı..... 264
Şekil 9.39 Çankırı kaya tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerinde 1. ve 2. sünme aşamasına geçişe ait sınır hattı..... 265
Şekil 9.40 Çankırı kaya tuzu için aşamalar arasında geçiş hattı..... 267
Şekil 9.41 Sünme gerilmesi (σ_S) değerinin zamana bağlı değişimi..... 268
Şekil 9.42 Çankırı kaya tuzuna ait sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile ikinci sünme esnasında ortaya çıkan doğrusal davranışa ait eğim (m) değerleri arasındaki ilişki..... 269
Şekil 9.43 Sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile düşey birim deformasyon (ε_d) değerlerinin sünme aşama hattı için değerlerndirilmesi..... 270
Şekil 9.44 Çankırı kaya tuzu içn tasarım önerisi..... 273
Şekil 10.1 Arazi kontrolünde kullanılan sayısal yöntemlerin sınıflandırılması (Yazıcı ve Nasuf, 1993)..... 276
Şekil 10.2 Çankırı yöresinin genel stratigrafisi..... 278
Şekil 10.3 Sayısal çözümlemelerde kullanılan kaya tuzu birimlerine ait malzeme özellikleri..... 279
Şekil 10.4 Sayısal çözümleme için geliştirilen model ve sınır koşulları..... 280
Şekil 10.5 Sayısal çözümleme için geliştirilen modele ait genel mesh yapısı..... 282
Şekil 10.6 Sayısal çözümleme için geliştirilen modele ait yakın mesh yapısı..... 282
Şekil 10.7 Sayısal çözümleme için geliştirilen model yardımıyla belirlenen genel deformasyon davranışı..... 283
Şekil 10.8 Yeraltı topuk ve açıklıkları çevresinde oluşan yerdeğişimi dağılımları..283
Şekil 10.9 İngiltere'deki bir kaya tuzu madenindeki açıklık tavanında yapılan deformasyon ölçümleri (Swift ve Reddish, 2005)..... 284
Şekil 10.10a En büyük asal gerilme (σ_1) değerleri için elde edilen model..... 286
Şekil 10.10b En büyük asal gerilme (σ_1) değerlerinin tek topuktaki davranışı…..... 286
Şekil 10.11a En küçük asal gerilme (σ_3) değerleri için elde edilen model..... 287
Şekil 10.11b En küçük asal gerilme (σ_3) değerlerinin tek topuktaki davranışı..... 287
Şekil 10.12a σ_1/σ_c oranı için elde edilen analiz sonuçları..... 288
Şekil 10.12b σ_1/σ_c oranının tek topuktaki davranışı..... 288
Şekil 10.13a σ_1/σ_s oranı değerleri için elde edilen analiz sonuçları..... 289
Şekil 10.13b σ_1/σ_s oranının tek topuktaki davranışı..... 290
Şekil 10.14 Topuk boyutuna bağlı sayısal çözümlemelerde dikkate alınan A, B ve C noktalarını gösteren temsili şekil..... 291
Şekil 10.15 A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı..... 291
Şekil 10.16 A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen en büyük asal gerilme (σ_3) davranışı..... 292
Şekil 10.17 A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen σ_1/σ_c davranışı..... 293
Şekil 10.18 A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen σ_1/σ_s davranışı..... 294

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 2.1 Kaya tuzu oluşumlarında bulunan en önemli materyaller ve formülleri..... 15
Çizelge 2.2 Türkiye kaya tuzu rezervleri (DPT, 2001)…..... 18
Çizelge 2.3 Dünya tuz üretimi (milyon ton) (DPT,2001)..... 19
Çizelge 2.4 1997 Yılı sektörel tuz kullanımı (DPT, 2001)..... 35
Çizelge 2.5 Kaya tuzu sünme davranışı üzerinde temel teşkil eden bazı çalışmalar ve bu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar..... 60
Çizelge 2.6 Bazı araştırmacılar tarafından elde edilen sünme davranışına ait denklemler..... 63
Çizelge 2.7 Yeraltı depolama sınıflandırması, potansiyel fayda ve zorlukları (Carnody ve Sterling, 1993)..... 77
Çizelge 2.8 Dünyada işletilmekte olan yeraltı doğalgaz depolama tesisleri (Sedlacek, 2001)..... 78
Çizelge 2.9 Bazı ülkelerin yıllık doğalgaz tüketimleri ve yeraltı stok miktarları (Sunu ve Çelik, 2002)..... 79
Çizelge 2.10 Tuz Gölü'nde yapılması planlanan doğalgaz depolama tesisi teknik verileri (BOTAŞ, 2005)..... 83
Çizelge 3.1 Türkiye kaya tuzu rezervleri (DPT, 2001)..... 87
Çizelge 3.2 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu kimyasal bileşimi (Ünüçok, 1985)..... 96
Çizelge 3.3 Tekel A.Ş. tarafından işletildiği yıllardaki üretim miktarları (Ünüçok, 1985) 97
Çizelge 5.1 Çankırı kaya tuzundan elde edilen tek eksenli basınç dayanımı numuneleri..... 123
Çizelge 5.2 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan elde edilen tek eksenli basınç dayanımı numuneleri..... 124
Çizelge 5.3 Çankırı kaya tuzu için hazırlanan dolaylı çekme numuneleri..... 125
Çizelge 5.4 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan dolaylı çekme numuneleri..... 125
Çizelge 5.5 Çankırı kaya tuzuna ait nokta yükleme deney numuneleri..... 126
Çizelge 5.6 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait nokta yükleme deney numuneleri..... 127
Çizelge 5.7 Çankırı kaya tuzundan elde edilen tek eksenli deformabilite numuneleri..... 127
Çizelge 5.8 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan elde edilen tek eksenli deformabilite numuneleri..... 128
Çizelge 5.9 Çankırı kaya tuzu için hazırlanan üç eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan numuneler..... 128
Çizelge 5.10 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan üç eksenli basınç dayanımı deneyi numuneleri..... 129
Çizelge 5.11 Çankırı kaya tuzu için hazırlanan periyodik yük artırma-boşaltma dayanımı deneyi numuneleri..... 129
Çizelge 5.12 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan periyodik yük artırma-boşaltma dayanımı deneyi numuneleri..... 129

Çizelge 5.13 Çankırı kaya tuzu bloklarından elde edilen karot adet ve boyutları... 131
Çizelge 5.14 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bloklarından elde edilen karotların özellikleri..... 132
Çizelge 5.15 Çankırı kaya tuzu bloklarından hazırlanan numune adetleri ve boyutları..... 132
Çizelge 5.16 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bloklarından hazırlanan numune adetleri ve boyutları..... 133
Çizelge 6.1 Çankırı kaya tuzuna ait yoğunluk, gözeneklilik, su içeriği ve boşluk hacmi değerleri..... 135
Çizelge 6.2 Çankırı kaya tuzuna ait tabakalara dik olarak gerçekleştirilen nokta yükleme deneyi sonuçları..... 137
Çizelge 6.3 Çankırı kaya tuzuna ait tabakalara paralel olarak gerçekleştirilen nokta yükleme deneyi sonuçları..... 138
Çizelge 6.4 Çankırı kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı deneyi sonuçları..... 140
Çizelge 6.5 Suda dağılma dayanım sınıflaması (Gamble, 1971, ISRM, 1981)..... 140
Çizelge 6.6 Çankırı kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı sınıflama sonuçları..... 141
Çizelge 6.7 Çankırı kaya tuzuna ait Schmidt sertlik deneyi sonuçları..... 142
Çizelge 6.8 Schmidt sertliği değerlerine göre kaya sertliği sınıflaması (ISRM,1978)..... 143
Çizelge 6.9 Çankırı kaya tuzuna ait dolaylı çekme dayanımı (DÇD) (Brazilian) deney sonuçları..... 144
Çizelge 6.10 Çankırı kaya tuzuna ait tek eksenli basınç dayanımı sonuçları..... 145
Çizelge 6.11 Her bir çap değeri için elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değeri sonuçları..... 145
Çizelge 6.12 Elastik modülü ve Poisson oranları değerleri..... 146
Çizelge 6.13 Çankırı kaya tuzuna ait üç eksenli basınç dayanımı (ÜEBD) deneyi sonuçları..... 148
Çizelge 6.14 Çankırı kaya tuzuna ait çeşitli yükleme seviyelerinde elde edilen elastik modül ve Poisson oranı değerleri..... 151
Çizelge 6.15 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait yoğunluk ve porozite belirleme deney sonuçları..... 152
Çizelge 6.16 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait nokta yükleme dayanım deneyi sonuçları..... 153
Çizelge 6.17 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı deney sonuçları..... 154
Çizelge 6.18 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı sınıflama sonuçları..... 154
Çizelge 6.19 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait arazide ve laboratuarda ölçülen Schmidt sertlik deneyi sonuçları..... 156
Çizelge 6.20 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait 52-54 mm çaplı numunelerde yapılan dolaylı çekme dayanımı (DÇD) deneyi sonuçları..... 157
Çizelge 6.21 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait 93 mm çaplı numunelerde yapılan dolaylı çekme dayanımı (DÇD) deneyi sonuçları..... 157
Çizelge 6.22 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları..... 158

Çizelge 6.23 Her bir numune çapı (D) için elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değerleri..... 159
Çizelge 6.24 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait elastik modül ve Poisson oranı değerleri..... 160
Çizelge 6.25 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait üç eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları..... 161
Çizelge 6.26 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait çeşitli yükleme seviyelerinde elde edilen elastik modül ve Poisson oranı değerleri..... 165
Çizelge 7.1 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bloklarından elde edilen karotların boyut özellikleri..... 168
Çizelge 7.2 Çankırı kaya tuzu bloklarından elde edilen karotların boyut özellikleri..... 168
Çizelge 7.3 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numunelerinde Boy (H)/Çap (D) oranına bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri..... 171
Çizelge 7.4 Çankırı karot kaya tuzu numunelerinde Boy (H)/Çap (D) oranına bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri..... 172
Çizelge 7.5 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için belirlenen sapma oranları..... 174
Çizelge 7.6 Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için belirlenen sapma oranları... 174
Çizelge 7.7 Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numunelerinde Çap değerine bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri..... 179
Çizelge 7.8 Çankırı karot kaya tuzu numunelerinde çap değerine bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri..... 179
Çizelge 7.9 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu karot numuneleri için belirlenen sapma oranları (SO)..... 180
Çizelge 7.10 Çankırı kaya tuzu karot numuneleri için belirlenen sapma oranları (SO)..... 181
Çizelge 7.11 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda yapılan elek analizi sonuçları..... 183
Çizelge 7.12 Çankırı kaya tuzunda yapılan elek analizi sonuçları..... 183
Çizelge 7.13 Son yıllarda yapılan uluslar arası yayınlarda sünme deneylerinde kullanılan çap (D) değerleri ve boy/çap (H/D) oranları..... 190
Çizelge 8.1 Çankırı kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deneylerinde kullanılan numune sayıları, boyutları ve sabit yük değerleri..... 193
Çizelge 8.2 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deneylerinde kullanılan numune sayıları, boyutları ve sabit yük değerleri..... 205
Çizelge 9.1 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait Eşitlik 9.9'un istatistiksel performans sonuçları..... 228
Çizelge 9.2 Çankırı kaya tuzuna ait Eşitlik 9.9'un istatistiksel performans sonuçları..... 233
Çizelge 9.3 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait belirlenen sabit hız değerleri….. 246
Çizelge 9.4 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait belirlenen ivmenin sıfır olduğu zaman aralıkları..... 247
Çizelge 9.5 Çankırı kaya tuzuna ait belirlenen sabit hız değerleri..... 249

Çizelge 9.6 Çankırı kaya tuzuna ait belirlenen ivmenin sıfır olduğu zaman aralıkları..... 250
Çizelge 9.7 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için parametrik analiz verisi..... 257
Çizelge 9.8 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için tasarım amaçlı belirlenen parametrik değerler..... 261
Çizelge 9.9 Çankırı kaya tuzu için parametrik analiz verisi..... 266
Çizelge 9.10 Çankırı kaya tuzu için tasarım amaçlı belirlenen parametrik değerler..... 271
Çizelge 10.1 Arazi kontrolünde kullanılan bazı sayısal çözümleme programları... 276
Çizelge 10.2 Sayısal çözümlemede dikkate alınan parametreler..... 285

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

Çağdaş yaşam tarzı, insanoğlunun vazgeçemediği bir tutku olmuştur. Zamana bağlı olarak hızla teknoloji gelişirken nüfus da artmaktadır. Dünya üzerinde modern yaşamın sürdürülebilmesinde enerji önemli bir etken olmaktadır. Doğal enerji kaynakları; kömür, petrol, doğalgaz ve nükleer enerji günümüzde ekonomik olarak endüstriyel boyutta kullanılan kaynaklardır. Son zamanlarda çevre dostu olarak doğalgaz daha çok tercih edilir olmuştur. Günümüzde petrol uçak, gemi, otomobil gibi araçların hareketinde kullanılmaktadır. Nükleer enerji ise elektrik enerjisinin üretilmesinde oldukça yoğun olarak tercih edilmektedir. Dünya üzerinde pek çok ülke tarafından sözü edilen enerji kaynaklarının kullanılmasına rağmen maalesef bu enerji kaynakları dünyanın her yanında ya yoktur ya da zengin değildir. Bu nedenle pek çok ülke bu enerji kaynaklarına sahip olmasa da petrol ve doğalgazı depolamaktadırlar. Kullandıkları nükleer yakıt atıklarını rastgele bir yere koyamadıkları için güvenli bir yerde depolamaktadırlar.

Ülkemizde önemli linyit yatakları olmasına rağmen son 20 yıllık süreçte hükümet politikalarına bağlı olarak doğalgaz kullanımı hızla artmıştır. 2008 yılı itibarı ile kullanılan yıllık doğal gaz miktarı 39 milyar m^3 civarında olup artma eğilimindedir. Mersin-Akkuyu'da nükleer santralin kurulumu için ihale yapılmış olup yakın bir tarihte elektrik üretimine bu santralden başlanacaktır. Bütün bu gelişmelere rağmen maalesef doğalgaz ve radyoaktif atık depolanması için henüz hayata geçirilmiş bir proje bulunmamaktadır. Bununla birlikte kaya tuzu maden ocaklarında uygulanan oda-topuk yönteminde kullanılan topuk boyutlarının seçimi tamamen deneme-yanılma yaklaşımı ile yapılmaktadır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Büyük ölçekte petrol, doğalgaz ve tehlikeli radyoaktif atıklarının depolanması için geçirimsiz ve süreksizlik düzlemi içermeyen kaya kütlelerine gereksinim duyulmaktadır. Bu tür kaya kütleleri içerisinde kaya tuzu tercih edilen bir birimdir. Ülkemizde de önemli kaya tuzu oluşumları mevcuttur. Bunlardan Çankırı, Nevşehir-Gülşehir, Yozgat-Sekili tuzlaları kalın tabakalı bir yapı sergilerken Aksaray-Sultanhanı'ndaki Tuz Gölü civarında ise tuz domu şeklinde bir oluşum söz konusudur. BOTAŞ, Sultanhanı'ndaki kaya tuzu domlarında oluşturulacak 12 adet yeraltı açıklığında yaklaşık 1,6 milyar m^3 doğal gaz depolamayı planlamaktadır. Ancak ikinci planda Çankırı, Nevşehir-Gülşehir ve Yozgat-Sekili kalın kaya tuzu tabakaları düşünülmektedir. Bu doktora tez çalışmasının birinci amacı Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait kısa dönemli kaya mekaniği özelliklerini ve uzun dönemli sünme davranışını belirlemektir. Hazırlanan veri tabanına bağlı olarak sünme davranışını açıklayan matematiksel bir modelin geliştirilmesi ve buna bağlı olarak tasarım verilerini belirlemek bu çalışmanın ikinci amacını oluşturmaktadır. Ayrıca her iki maden sahasında uygulanan oda-topuk üretim yönteminde kullanılmakta olan topuk boyutlarının tasarlanması ve maden yönetimlerinin dikkatine sunulması üçüncü amaç olmuştur.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Bu doktora tez çalışmasında; problemin tanımı, çalışmanın amacı ve içeriği Bölüm 1'de sunulurken gerçekleştirilen detaylı bir kaynak araştırması Bölüm 2'de verilmiştir. Numunelerin temin edildiği maden sahaları Bölüm 3'de, kaya mekaniği deneyleri için numunelerin hazırlanması Bölüm 4'de, sünme deneylerinde kullanılacak deney düzeneğinin geliştirilmesi ise Bölüm 5'de sunulmuştur. Bölüm 6'da kısa dönemli kaya mekaniği deneyleri verilirken, Bölüm 7'de sünme deneylerinde kullanılacak en uygun numune boyutunun belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Bölüm 8'de sünme deneyleri, Bölüm 9'da ise sünme

davranışını açıklayan matematiksel modelin geliştirilmesi ve tasarım verilerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar sunulmuştur. Tasarım verilerinin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen sayısal çözümleme çalışmaları Bölüm 10'da anlatılmış olup Bölüm 11'de bu doktora tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Genel

Bu bölümde ilk olarak tuz hakkında genel bilgilere değinilmiştir. Ardından tuzun yataklanması, tuzun doğada bulunuş şekilleri ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Dünya'daki mevcut tuz üretim yöntemleri incelenerek tuz üretim yöntemleri hakkında geniş bilgilere yer verilmiş ve tuzun tüketim alanları sunulmuştur. Kaya tuzu mekaniği kısa ve uzun dönemli olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiş, kaya tuzu mekanik özelliklerini etkileyen parametrelere değinilmiş ve kaya tuzunda yapılmış olan çalışmalara yer verilmiştir. Son olarak da yeraltı kaya tuzu oluşumlarının mühendislik hizmetlerinde kullanımı ve depolama hakkında yapılmış olan çalışmalar incelenerek, bu çalışmalardan derlenen bilgilere geniş ölçekte yer verilmiştir.

2.2. Tuz Hakkında Genel Bilgi

Tuz doğada su içerisinde çözünmüş halde denizlerde, tuzlu göllerde, tuzlu su kaynaklarında, katı olarak ise kaya tuzu şeklinde bulunmaktadır. Dünyamızın en büyük tuz kaynağı denizlerdir. Kapalı denizlerde tuzluluk derecesi fazla olmasına rağmen okyanuslar ve açık denizlerde seviye hemen hemen aynıdır. Yeraltından madencilik yöntemleri ile elde edilen tuz kaynağı kaya tuzudur. Ülkemizde de birçok yörede kaya tuzu yatakları mevcuttur. Kaya tuzları deniz tuzlarının aksine bileşimlerine giren materyallerin oranına bağlı olarak büyük değişiklikler gösterirler. Saflık oranları her oluşum yatağı için farklı olabilir. Özellikle bileşime giren kil, kaya tuzuna gri, koyu gri, siyah renkleri verebilirken nadiren de doğada beyaz veya şeffaf olarak bulunabilmektedir. Ülkemizde kaya tuzu madenleri % 5-10 arasında

şeffaf beyaz olarak bulunmakla beraber genelde gri ve bir kısmı da siyaha yakın renklerdedir (Ergin, 1988).

Yüksek basınç altında plastik özellik gösteren tuzun sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı 2,1-2,55 gr/cm^3 arasında değişir. Su içinde 25^oC'de yaklaşık 360 gr/lt gibi yüksek çözünme özelliğine sahiptir. Erime noktası 800^oC, kaynama noktası ise 1412^oC'dir. Doğadan üretildiği şekliyle rengi gri, sarı, kırmızı hatta mavi ve yeşil olabilir. Saf haldeyken renksizdir.

Genellikle dere, nehir, göl, deniz sularının eriyik halinde içerdiği maddeler $CaSO_3$, $CaSO_4$, K_2SO_4, Na_2SO_4, $MgSO_4$, KCl ve $NaCl_4$'dür. Bunlardan akarsular çokça $CaCO_3$ ve az miktarda NaCl ihtiva etmelerine karşın deniz sularında yaşayan hayvanlar tarafından kullanıldığından az olarak $CaCO_3$ ve çok miktarda NaCl bulunur. NaCl, deniz ve göl sularında canlılarca pek kullanılmadığı için miktarı gittikçe artar ve buharlaşma sonucu tuz tabakaları olarak çökelir. Bu durum kara için akıntısız göllerde, setlerle denizden ayrılan kıyı göllerinde, sığ yerlerde kurak iklimin hâkim olduğu bölgelerde gerçekleşir. İlk defa çökelen anhidrit, jips ve kaya tuzudur. Bunlardan sonra kolay eriyen potasyum ve magnezyum tuzları teşekkül ederler. Denizden setlerle ayrılan bir kıyı gölünde böyle teşekkül eden bir tuz tabakası üzerine dalgalar tesiriyle ikinci bir deniz akıntısı geldiği zaman, ince bir kil tabakası tuzun üzerini kaplar (Üşenmez, 1985).

Genel anlamda kaya tuzunun da içinde ele alınabileceği evaporitler, tabii suların, özellikle deniz sularının buharlaşmasından sonra geride bıraktığı çökellerdir. Kaya tuzunun yanında jips, anhidrit, potasyum nitrat, sodyum sülfat, boraks gibi tuz yatakları da evaporitler olarak ifade edilmektedir. Bunlar karalardan tuz elemanları ile beslenen kapalı veya kısmen kapalı denizel ve karasal olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Temur, 1998). Çökelme sırasıyla kalsiyum karbonat, kalsiyum sülfat, sodyum ve potasyum kloridler ve sodyum ve potasyumun diğer bileşenleri ve son olarak da magnezyum bileşenleri şeklindedir (Üşenmez, 1985). Bunlar ısı tesiri neticesinde veya sadece içerik değişmesi sonucunda oluşan sedimentlerdir. Bunlara lagün sedimentleri de denilmektedir (Baykal, 1977).

Evaporitik tuz yataklarından, kaya tuzu, potas tuzu, trona gibi tuz cevherlerinin madenciliğinde ve oluşturulan büyük boyutlu açıklıklarda duraylı yapısal özellikler

göstermesinden dolayı hidrokarbonlar, radyoaktif, kimyasal maddeler ve basınçlı havanın yeraltı depolamasında yararlanılabilmektedir (Jeremic, 1994).

2.3. Tuzun Yataklanması

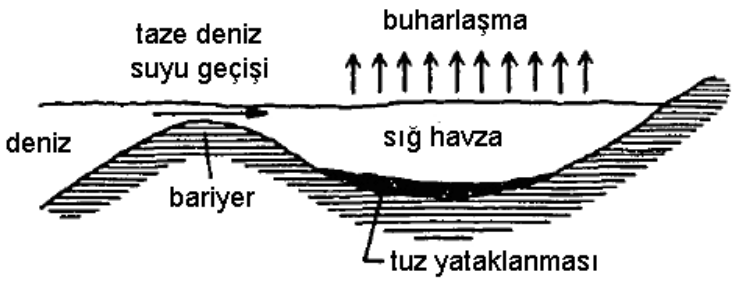
Alman filozof Kant tuzların orijininin açıklanması konusunda geliştirdiği teorisinde, birçok mineralin sığ denizlerdeki suyun buharlaşmasından geriye kalan ürünler olduğunu ileri sürmüştür. Daha sonraları XIX. yüzyılın ortalarından günümüze kadar tuzların orijini konusunda birçok hipotez öne sürülmüştür.

Bunlardan başlıcaları:

1. Bariyer-havza teorisi (Bar-basin theory)
2. Halka teorisi (Ring theory)
3. Fraksiyonel sedimantasyon teorisi (Fractional sedimentation theory)
4. Evresel sedimantasyon teorisi (Cyclic sedimentation theory)

2.3.1. Bariyer-havza teorisi (Bar-basin theory)

Tuz yatakları deniz suyunun buharlaşması sonucu oluşmuşlardır. Tuz yataklanması işlemi en basit anlatımla bariyer-havza teorisi (bar-basin theory) ile açıklanabilir (Hanna, 1959, Thiadens, 1968, Raup, 1970, Pannekoek ve Van Straaten, 1982). Modele göre sığ bir havza deniz suyu ile doludur. Havza ile deniz havzayı ayıran bir bariyerin üzerindeki bir kanal ile birbirine bağlıdır. Havzanın sıcak iklim ve yüksek su buharlaşma oranına sahip olması gerekmektedir. Havzadaki buharlaşan suyun kaybı tuz içeren taze deniz suyu ile tamamlanır. Havzadaki suyun buharlaşması sonucu havzaya net bir şekilde tuz transferi devam eder ve böylece havza suyu daha yoğun bir hal alır. Sonuçta tuz çökelerek havza tuz ile dolar (Şekil 2.1) (Van den Broek, 1989).



Şekil 2.1. Bariyer-havza tuz yataklanma modeli (Van den Broek, 1989)

Sığ havza modeli nispeten basit bir modeldir ve yataklanma mekanizmasını açıklar. Bu teori, bazı tuz formasyonlarının neden 1000 m veya daha fazla olduğunu açıklayamaz. Olası bir açıklama tuz yataklanması esnasında havza tabanındaki çökelmelerin yavaş olmasıdır (Schmalz, 1969). Alternatif bir açıklama katmanlaşmadır. Bu durumda tuzlu su katmanlarının derinliğinin arttıkça yoğunluğu artmaktadır. Bu şartlar altında Schmalz (1969) tuzun derin havzalarda da yataklanabileceğini belirtmektedir.

Bariyer-havza teorisini 1877 yılında Karl Ochsemus ortaya atmıştır. Suyun buharlaşma oranı tipik sıcak iklimdeki orandadır. Bu şartlar altında bu havzadaki su tuz çözeltisi bakımından konsantre hale gelir ve suyun yoğunluğu 1,070 gr/cm^3 olduğu anda sudaki flora ve fauna yaşamı sona erer. Bu anda çevre alandaki bitki örtüsü etkilenmemiştir (Jeremic, 1994).

Bariyer-havza teorisine göre (Şekil 2.1) tuz yataklanmasının dört evresi aşağıda sunulmuştur. Buna göre;

i) İlk olarak mineral konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak kalsiyum karbonat ve demir oksit sedimantasyonu meydana gelir. Yoğunluk 1,129 gr/cm^3'e eriştiğinde jips oluşumu başlar. Bu evrede çevre bitki örtüsü etkilenmemiştir.

ii) Ardından havzaya taze deniz suyu akışı tuzlu su yoğunluğunda artışa neden olur. Yoğunluk 1,218 gr/cm^3'e ulaştığında halit ve jips oluşumu başlar ve bu işlem havzanın kimyasal sedimentlerle dolmasına neden olur. Bu aşamada çevredeki bitki örtüsü yaşamı sona erer ve havza içine taşınmaya başlar. Bu da iyodun halitçe zengin tuz yataklarının bir bileşeni olmasıyla sonuçlanır.

iii) Üçüncü evrede halit tuz katmanlarının oluşmasından sonra anhidrit ve jips çökelmesi başlar ve sedimantasyon işlemine bağlı olarak havza çok sığ bir hal alır. Ters akışa bağlı olarak artık çözeltiler bariyerin üzerinden atılabilir. Bu, bazı tuz oluşumlarında potasyum ve magnezyum tuzlarının var olmayışını açıklayabilir.

iv) Son olarak diğer jeolojik faktörler sonucunda havza tamamen okyanustan ayrılabilir ve buna bağlı olarak içeri ve dışarı akış durabilir. Bu aşamada artık solüsyonlar var olabilir ve çözünürlüğü yüksek olan potasyum ve magnezyum tuzları depolanabilir. Etraftaki kaya kütlelerinden erozyonla havzaya taşınan kil, silt ve kum sedimentleri, evaporitleri atmosferik etkiler nedeniyle çözünmekten korurlar (Jeremic, 1994).

2.3.2. Halka teorisi (Ring theory)

Bu teoriye göre yeni deniz kaynakları öncelikle dış bir havzaya ardından da iç havzalara geçerler. Mineral çözeltilerdeki kimyasal değişiklikler bu çözeltilerin göreceli çözünürlüklerine bağlı olarak meydana gelir. Bu şartlar altında jips dış halkada (havzada) oluşmalıdır. İç halkaya akan yeni deniz suyu akışları havzaya sert tuzları getirmektedir. Yalnız tuzun çözünürlüğünün değişik derecelerine bağlı olarak mineral yataklanma sınırları meydana gelir. En çok çözünen tuzlar sedimantasyon işleminin en sonunda yer alırlar.

Varsayıma göre karbonat katmanları öncelikle yataklanırlar. Ardından jips ve son olarak da tuz yataklanması gerçekleşmektedir. Tuz yataklanması ilk olarak jips katmanı ve kaya tuzu, ardından anhidrit ve kaya tuzu, sonrasında kaya tuzu ve polihalit son olarak da yüksek çözünürlüklü tuzlar ve potasyum-magnezyum sıralanması şeklinde olmaktadır (Jeremic, 1994).

2.3.3. Fraksiyonel sedimantasyon teorisi (Fractional sedimentation theory)

Bu teori genelde evaporit yataklarının analizinde kullanılan modern bir teoridir. Kaya tuzu oluşumlarının sığ içdenizde hafif meyilli bir yüzey üzerinde kapalı bir havza ortamında oluştuğu varsayılmaktadır.

Deniz suyundaki mineral konsantrasyonuna bağlı olarak evaporitlerin çökelmesi özel bir sıraya bağlıdır. Örneğin deniz ilerlemelerinde eğer deniz düşük oranda mineral konsantrasyonuna sahipse $CaCO_3$-Mg çökelmesi meydana gelmektedir. Deniz geri çekiliminde eğer deniz suyu yüksek mineral konsantrasyona sahipse NaCl-KCl yatakları oluşabilmektedir. Orta dereceli mineral konsantrasyonundaki deniz suyunda ise $CaSO_4$ çökelebilmektedir.

Su akımlarına bağlı olarak kıta masiflerinde bozuşmalar meydana gelmesi olasıdır. Örneğin yüksek yoğunluklu mineral konsantrasyonlu bir kütle okyanus tabanında daha düşük mineral konsantrasyonlu bir kütle ile yer değiştirebilir.

Son ilerleme aşaması içdenize kil ve silika taşınması ile kendini belli eder. Bu aşamada evaporitlerin üzeri çamur, kiltaşı, silttaşı, kumtaşı ve diğer bazı yataklanmalar ile örtülebilir. Fraksiyonel sedimantasyon teorisi büyük ve kalın evaporit yataklanmaların orijininin açıklanmasında en kapsamlı varsayımdır (Jeremic, 1994).

2.3.4. Evresel sedimantasyon teorisi (Cyclic sedimantation theory)

Evresel sedimantasyon düşüncesi tuz yataklarının orijininin açıklanmasında en yaygın hipotezdir. Hipotezin evreleri:

Alt klastik evre: Evaporit yataklanmasında esas olarak demirli klastik sedimentleri ve kalkerli kumtaşlarını içeren temel evredir.

Alt evaporitik evre: Anhidrit çökelir, ilave olarak tuzlu su, halit ve son olarak silvit (KCl) konsantrasyonu artar.

Alt-Orta klastik evre (Deniz ilerlemesi): Alt evaporit evre yataklanma evresi biter ardından çamur ve kiltaşı sedimantasyonu başlar.

Orta evaporitik evre (Deniz gerilemesi): Sınırlı deniz şartları altında tuzlu su konsantrasyonu yükselir ve alt orta halit ara fasiyesleri yeniden çökelir. Havzadaki suyun tuzluluğundaki artış deniz akımları tarafından engellenir. Yeni oluşan tuzlu su konsantrasyonu üst-orta halit ara fasiyeslerinin çökelmesi ile sonuçlanır.

Üst-Orta klastik evre (Deniz ilerlemesi): Halit ara fasiyeslerinin yataklanması sona erer çünkü havza çamur ve kiltaşlarının sedimantasyonu için açıktır.

Üst evaporitik evre (Deniz ilerlemesi): Bu evre evaporitik ve klastik sedimantasyonunun sona ermesine işaret eder.

Hemen hemen tüm evaporit yataklanmalarında suda çözünebilen evaporit minerallerinin yüksek reaktivitesi ve evaporit yataklarının sünek bozuşmaya karşı yüksek hassasiyetinden dolayı sonradan yataklanma değişimlerine rastlanır.

Başlıca nedenler:

1. Mekanik bozuşma,
2. Su çözünürlüğü ile eskiden oluşmuş bozuşma,
3. Su çözünürlüğü ile yenice oluşan bozuşma,
4. Kimyasal bozuşma (Jeremic, 1994).

Eby (1956) ve Borchert ve Muir (1964) dünyadaki tuz yataklarının dağılımı ve yaşları hakkında bilgiler sunmuşlardır. Sibirya, Etiyopya ve İran'daki bazı tuz yatakları yaklaşık yarım milyar yıl veya daha fazla yaşlıdır. Ancak birçok yataklar daha gençtir. Bir diğer önemli tuz yatağı Güneydoğu ABD'de bulunan Gulf Kıyıları'ndaki tuz yataklarıdır. Bu tuzlar yaklaşık 150-200 milyon yıl yaşındadır. Tuz yataklanması günümüzde de halen devam etmektedir. Buna en güzel örnek Ölü Denizdir (Zak, 1978).

2.4. Tuzun Doğada Bulunuş Şekilleri

Doğada tuz çözelti halinde ve katı halde bulunmaktadır. Çözelti halindeki tuzlar deniz, göl ve akarsularda bulunurken katı haldeki kaya tuzları yeraltında belli

bir gövdeye yani hacme sahiptirler. Tuzun doğada bulunuş şekilleri takip eden alt başlıklarda sunulmuştur.

2.4.1. Deniz tuzları

Deniz tuzu rezervi sonsuz olmasına rağmen üretim, havuzlama tesislerinin kapasitesine ve iklim koşullarına bağlıdır. Ülkemizde deniz tuzlası olarak Ayvalık ve Çamaltı tuzlaları işletilmekte olup, bölge ikliminin son derece uygun olması nedeniyle gerekli yatırımların yapılması durumunda Çamaltı tuzlasının kapasitesi 1.000.000 ton/yıl'a ulaşma olanağına sahiptir. Ancak, şu andaki fiili üretim miktarları ortalama 500.000 ton/yıl dolaylarında gerçekleşmektedir. Yurdumuzun üç tarafının denizlerle çevrili olması, deniz tuzlası işletmeciliği açısından son derece şanslı olduğumuzu göstermektedir. Buradan da, deniz tuzlalarının sonsuza giden rezervi ile bu konuda rakipsiz olduğu açıkça anlaşılmaktadır (Yalçın ve Ertem, 1997). Dünyada en yüksek tuzluluk derecesi 270 kg/m^3 ile Ölü Deniz'e en az tuzluluk derecesi ise 6 kg/m^3 ile Hazar Denizi'ne aittir (Ergin, 1988).

2.4.2. Göl tuzları

Tuz gölleri, eski deniz yatakları olabileceği gibi birçoğu geniş yer çöküntülerinde civardaki kaya tuzlarından geçerek bu çukurlarda toplanan tuzlu sulardan meydana gelmişlerdir. Bu göllerden birçoğunda sadece kış aylarında göl görünümü vardır. Yaz aylarında yüksek bir yoğunluk kazanan göl suları buharlaşarak deniz sularının toplanma havuzları gibi bir tuz tavası görünümüne kavuşurlar. Bazı tuz göllerinde ise tuz tabakası üzerinde sadece birkaç santimetrelik su tabakası bulunur. Bu kil tabakası tuzun aniden erimesini önlemiş olur ve kilin üzerine yeniden tuz tabakaları teşekkül eder. Böylece her yıl oluşan tuz tabakalarını tanımak mümkün olur. Bu olayı Tuz gölü veya Hazar Denizi'ndeki Karaboğaz'da (Acı Derya) görmek mümkündür. Karaboğaz'dan suyun aktığı göle kara içinden hiçbir su akmaz sadece

Karaboğaz'dan tuzlu deniz suyu girer. Bundan sonra gölde buharlaşma başlar, zira bölge çok kurak ve sıcaktır. Buharlaşma sonunda tuz teşekkül eder. Kabaran dalgaların sürüklediği suların göle tekrar gelmesi ve kuvvetli buharlaşmanın tekrarı nedeniyle tuz tabakaları yükselir. Hazar denizinden Karaboğaz'a giren birçok balıklar da tuzluluk sebebiyle ölürler. Su tamamen buharlaşınca içindeki bütün tuzlar çökelir. Su değişik eriyikte tuzlar ihtiva ederse en güç eriyen en önce çökelir. Fakat bu durum kesin olmayıp, eriyikteki tuzların cinsine, miktarına, sıcaklık derecesine göre çökelme sırası değişebilir. Mesela $MgSO_4$ çok, $CaSO_4$ az ise önce $MgSO_4$ çökelir. $CaSO_4$ ise az olmasına ve güçlükle erimesine rağmen yavaş çökelir. İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Tuz gölü tuzluluk derecesi % 33,20'dir (Acar, 1974). Tuz gölünde üretim bölgedeki Yavşan, Kaldırım ve Kayacık tuzlarından yapılmaktadır (Yalçın ve Ertem, 1997).

2.4.3. Kaynak tuzları

Tuz içeren akarsular, kuyu suları ve doğal su kaynakları karalarda tuz içeren diğer kaynaklardır. Çözünmüş su içeren bu yeraltı su kaynaklarının tuz kaynağı genel olarak kaya tuzlarıdır. Yeraltı suları bir kaya tuzu tabakası içerisinden geçerken bu tuz tabakasını eriterek bir kısmını bünyesine almaktadır. Bu sulardaki tuzluluk oranı suyun tuz tabakasına ne kadar süre temas ettiği ile ilgilidir (Ergin, 1988).

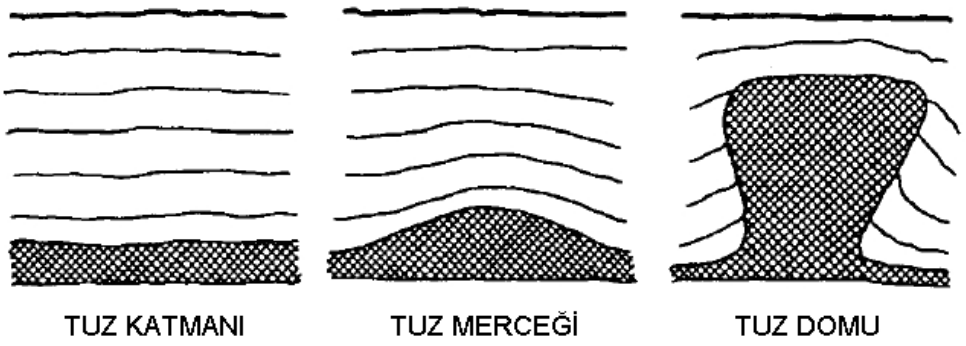
2.4.4. Kaya tuzları

Kaya tuzlarının oluşumu, bileşimi ve mühendislik özellikleri aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

2.4.4.1. Kaya tuzu oluşumları ve duraylılığı

Kaya tuzu, tuzlu suların buharlaşması sonucu oluşmuş evaporitik bir kayaçtır (Dreyer, 1972). Dünya'da doğal jeolojik katı tuz yatakları arasında en yaygın olanı kaya tuzu olup ana bileşeni halittir (Hunsche ve Schulze, 1994).

Bir tuz yatağı jeolojik periyotlar sonucunda sedimentler altına gömülür. Bu sedimentler genelde nispeten daha hafif olan tuzdan daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Tuz son derece viskoz bir malzemedir. Prensip olarak ağır sedimentler üzerindeki hafif viskoz malzeme duraylı olmayacaktır. Birçok durumda orijinal tuz tabakaları zamanla deforme olmuş ve sedimanter katmanlar üzerinde kırılmışlardır. Bu da tuz domlarının oluşmasına neden olmuştur. Birçok durumda ise deformasyon kırılma olmadan gerçekleşmiş ve buralarda oluşan tuz katmanlarının kalınlıkları artarak tuz merceklerini oluşturmuşlardır. Şekil 2.2'de tuz formasyonlarının üç şekli görünmektedir, bunlar katman, mercek ve domdur. Tuzda deformasyon olayına halokinez denilmektedir (Richter-Bernburg ve Schott, 1959).



Şekil 2.2. Tuz formasyonlarının üç ayrı şeklinin şematik gösterimi ve üst katmanların durumları (Van den Broek, 1989)

Tuz merceği veya domları her zaman oluşmaz. Halokinez gerçekleşmeden önce asıl tuz katmanının ve üstündeki sedimentin belirli bir kalınlığa (tuz katmanı için

yaklaşık 300 m, üzerindeki sedimanter tabaka için de yaklaşık 1000 m) ulaşması gerektiği gözlemlenmiştir (Trusheim, 1957 ve 1960).

Tuz domu oluşumu sırasında tabaka içinde yükselen tuz, akan yeraltı suyu ile temas edebilir. Tuzun çözünürlüğü çok yüksektir ve bu temas tuzun çözünmesi ve ardından domdan uzağa taşınmasına neden olur. Ancak özellikle kalsiyum sülfat gibi tuzdaki bazı kirlilikler düşük çözünürlüğe sahiptir ve çözünmeyerek kalırlar. Bu da bazı tuz domlarındaki anhidrit ve jips içeren üst katmanların nedenini açıklamaktadır.

Halokinez olayının varlığı, tuz formasyonlarının duraysız olduğuna bir işarettir. Jeolojik zaman ölçeğinde duraylı formasyon bulunmamaktadır. Ancak önemli olan pratikteki deformasyon oluşum hızıdır. Örselenmemiş bir tuz katmanında deformasyon hızları çok küçüktür. Bu durum, tuz mercekleri ve domları için de geçerlidir. En büyük deformasyon hızları tuz domlarının veya merceklerinin gelişimi aşamasında oluşmaktadır. Bu aşamadan sonra deformasyon hızları çok küçüktür. Bu konuda yapılmış olan bir çalışmaya göre Almanya'daki tuz formasyonlarının gelişme aşamasındaki en yüksek deformasyon hızı 0,25 mm/yıl olarak bulunmuştur.

Bu durumda örneğin yüksek seviyeli nükleer atıkların depolandıktan sonra bir milyon yıldan fazla toksik kaldığı göz önünde bulundurulur ve bu süreçte oluşacak yüzlerce metrelik deformasyonlar dikkate alınırsa kısa süreçte yavaş olarak gözlenen deformasyon hızları göz ardı edilmemelidir (Van den Broek, 1989).

2.4.4.2. Kaya tuzunun bileşimi

Sınırlandırılmış bir havzada bulunan deniz suyunun buharlaşması bazı tuzların başarılı bir şekilde çökelmesine neden olur (Lotze, 1957, Jendersie, 1969, Borchert ve Muir, 1964, Füchtbauer ve Muller, 1970, Braitsch, 1971). İlk çökelen tuzlar karbonatlar (kalsit, dolomit) ve jipstir. Deniz suyundaki farklı elementlerin konsantrasyonları bugünkü deniz suyundaki konsantrasyonlarının 10 katı olduğunda sodyum klorat (halit) çökelmeye başlar. Halit çökelmesi iki fazda gerçekleşir:

Faz A: 10 ila 60 değerleri arasındaki bir konsantrasyon faktörü için (deniz suyunun gerçek hacmine göre) halit çökelmesi kalsiyum sülfat (jips, yada anhidrit, ya

da polihalit formundaki kalsiyum sülfat) çökelmesi ile aynı anda gerçekleşir. Bu fazda halitin büyük kısmı çökelir.

Faz B: 60'ın üzerindeki konsantrasyon faktörü için halitin kalan kısmı ile birlikte magnezyum tuzları (kieserit, biskofit), potasyum klorit (silvit) ve/veya magnezyum-potasyum çifti tuzları (varnalit, kainit) da çökelir.

Çökelme işlemini birçok faktör etkiler ve bu etkenler her tuz yatağı için farklılık gösterebilir ve sıcaklık, basınç, deniz suyu bileşimi olarak sıralanabilir. Son faktör evrensel bir sabit değil, söz konusu bölgeye ve jeolojik periyoda dayalı bir faktördür.

Bahsedilen tuzlar, kaya tuzunda mevcut olan maddelerin tam bir listesini oluşturmamaktadırlar. Lotze'ye (1957) göre az miktarda hematit, kuvars ve kil mineralleri de bulunabilir. Genellikle buharlaşan deniz suyunda katı halde bulunan bu materyaller, oluşmakta olan kaya tuzunda sınırlı bir şekilde bulunabilirler. Aynı durum deniz suyu için de geçerlidir, düşük miktarlarda tuzlu su içinde sınırlandırılmış bir halde bulunurlar. Özetle, kaya tuzu oluşumlarında bulunan en önemli mineraller Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Kaya tuzu oluşumlarında bulunan en önemli mineraller ve formülleri

Mineral	Formül
Halit	$NaCl$
Kalsit	$CaCO_3$
Dolomit	$CaCO_3.Mg\ CO_3$
Jips	$CaSO_4.2H_2O$
Anhidrit	$CaSO_4$
Polihalit	$K_2SO_4.MgSO_4.2CaSO_4.2H_2O$
Kieserit	$MgSO_4.2H_2O$
Biskofit	$MgCl_2.6H_2O$
Silvit	KC1
Karnalit	$KCl.MgCl_2.6H_20$
Kainit	KC1. $MgSO_4.3H_2O$
Hematit	Fe_2O_3
Kuvars	SiO_2
Tuzlu sular	H_2O + çözünmemiş tuzlar
Kil mineralleri	

Deniz suyu bileşiminin analizi, kaya tuzundaki halit konsantrasyonu hakkında büyük oranda bir fikir verir. Günümüzdeki deniz suyunun tümüyle buharlaşması sonucu oluşacak tuzun ağırlığının % 70'i halitten oluşur. Fakat deniz suyunun bileşimi zamanla değişmektedir. Örneğin 200-250 milyon yıl önce Permiyen döneminde Kuzeybatı Avrupa deniz suyunun tamamen buharlaşması sonucu halit konsantrasyonu % 84 idi (Van den Broek, 1982, Ruchin, 1958). Fakat bu halit konsantrasyonları halitin kaya tuzundaki konsantrasyonunun sadece kaba bir tahminidir. Çoğu durumda buharlaşma döngüsü tam olarak tamamlanmamıştır. Bu da halit konsantrasyonunun ağırlık olarak genellikle % 70 ya da % 84'den yüksek olacağı anlamına gelir ki bu rakamlar halit konsantrasyonunun alt sınırlarıdır. Tam bir buharlaşma döngüsünde bile kaya tuzunda halit konsantrasyonunun oldukça yüksek olduğu bölgeler olacaktır. A fazı esnasında en önemli çökelen tuz halittir. Literatürde ağırlık olarak % 99 halit konsantrasyonlarından bahsedilmektedir (Lotze, 1957, Erdhardt, 1980, Lorenz ve ark., 1981). Çoğu kaya tuzu oluşumları % 90 ila % 99 konsantrasyonlarında halit içermektedir. Tuz domlarının yataklanmış tuzlara göre daha yüksek konsantrasyonlarda halit içerdiği gözlemlenmiştir (Lorenz ve ark., 1981).

Kirliliklerin konsantrasyonu ağırlık olarak genellikle % 1-10 olmaktadır. Oldukça saf kaya tuzlarında en önemli kirlilikler genellikle anhidrit ve kildir. Özellikle anhidrit çoğu tuz oluşumunda en önemli kirlilik olarak var olmaktadır. Diğer kirliliklerin varlığı için basit kurallar verilememekle birlikte bu kirliliklerin varlığı ve konsantrasyonu ele alınan tuz yatağının oluşumu esnasında ve oluşumu sonrasındaki özel koşullara bağlı olduğu ifade edilmektedir (Van den Broek, 1989).

2.5. Dünyadaki Mevcut Tuz Madenciliği

Dünya tuz rezervi, üretimi ve kaya tuzu madencilik yöntemleri aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

2.5.1. Rezervler

Dünyanın en büyük tuz kaynağı denizlerdir. Bunu, katı halde bulunan kaya tuzu yatakları ve bazı göller ile yeraltı suları içinde erimiş haldeki tuz eriyikleri takip etmektedir.

Tuz gölü olarak, ABD'deki Great Salt Lake ve Filistin'deki Lut Gölü dünyanın en büyük tuz göllerindendir. En derin yeraltı tuz yataklarına ise Kuzey Almanya ve Kuzey Amerika'da rastlanmaktadır. Tuz domlarının rezervleri ise çok fazladır. Dünya tuz rezervleri sonsuz denecek kadar yüksek bir seviyededir (DPT, 2001).

Türkiye, tuz potansiyeli açısından oldukça zengin ülkeler arasındadır. Bu potansiyeli, deniz tuzlaları, göl tuzlaları, kaya tuzlaları ve kaynak tuzlaları oluşturmaktadır.

Deniz tuzu rezervi sonsuz olmasına rağmen üretim, havuzlama tesislerinin kapasitesine ve iklim koşullarına bağlıdır. Ülkemizde deniz tuzlası olarak, Ayvalık ve Çamaltı Tuzlaları işletilmekte olup bölge iklimi uygun ve tuz oluşumu için avantaja sahiptir. Son yıllarda sağlanan kapasite artışı ile üretim kapasitesi 600.000 ton/yıl'a yükselmiştir. Yurdumuzun üç tarafının denizlerle çevrili olması deniz tuzlası olarak yararlanabilecek birçok yerin bulunabileceğini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum deniz tuzlası işletmeciliği açısından yurdumuzun oldukça iyi durumda olduğunu göstermektedir (DPT, 2001).

Göl tuzlaları, Tuz Gölü çevresinde bulunan Yavşan, Kaldırım ve Kayacık Tuzlalarıdır. Kesin rezervi ortaya koyacak veriler olmamasına rağmen, eldeki jeolojik veriler Tuz Gölü'nün çok büyük bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Gölün tüm alanı 1665 km^2'dir. Gölün sürekli su altında kalan doğu kesimi ile önemsiz derecede tuz çökelen yerler çıkarılırsa yaklaşık 1200 km^2'lik bir alan tuz bölgesidir. Gölde oluşan tuz tabakasının kalınlığı 3-20 cm arasında yıllık değişmekte olup ortalama 8 cm'dir. Bu durumda yoğunluk 2,2 gr/cm^3 alınırsa göldeki yüzey rezervi yaklaşık 211.200.000 ton NaCl olarak bulunabilir (Yalçın ve Ertem, 1997). Tuz Gölü çok büyük bir potansiyel olup gerçek rezerv belirtilenin çok üstündedir (DPT, 2001).

Ülkemiz, jeolojik yapısı nedeniyle büyük tuz yataklarına sahiptir. Özellikle jeolojik olarak III. zamanın Eosen, Oligosen ve Miyosen devirlerinde içdenizlerde

kuraklık nedeniyle geniş çökelmeler meydana gelmiştir. İç Anadolu'da Çankırı'dan başlayarak Çorum, Yozgat, Sivas, Erzincan, Erzurum ve Kars üzerinden İran'a bağlanan tuz yataklarında 30'u aşkın kaya ve kaynak tuzlaları yer almaktadır. Ayrıca, Adana havzası ve Siirt yöresinde de geniş yeraltı tuz oluşumları mevcuttur. Türkiye'de kaya tuzu rezervlerinin tam olarak belirlenmesi amacıyla TEKEL ile M.T.A. arasında protokol imzalanarak 1977 yılında çalışmalara başlanılmıştır. Bu çalışmalar Çankırı, Sekili, Gülşehir, Tuzluca yeraltı kaya tuzu sahalarında yapılmıştır (Çizelge 2.2).

Tuzun yayılımı tespit edilerek, rezervini ortaya çıkaran bu çalışmalarda yörede jeolojik haritalama, jeofizik ve sondaj çalışmaları yürütülmüş, kaya tuzu rezervinin jeokimyası ve kalitesi de yorumlanmıştır.

Çizelge 2.2. Türkiye kaya tuzu rezervleri (DPT, 2001)

Tuzla Adı	Yeri	Rezerv (milyon ton)		
		Görünür	Muhtemel	Mümkün
Sekili	Yozgat	107	359	300
Çankırı	Çankırı	821	358	
Gülşehir	Nevşehir	75	96	959
Tepesidelik	Kırşehir	-	-	20
Tuzluca	Kars	-	-	100
Kağızman	Kars	-	-	60
Oltu	Erzurum	-	-	30

Sondaj yapılarak üç boyutu ile belirlenen görünür rezerv toplamı 1 milyar ton'u geçmektedir. Muhtemel ve mümkün rezervler de göz önüne alındığında kaya tuzu olarak Türkiye'nin çok büyük bir potansiyele sahip olduğu rahatlıkla söylenebilir.

2.5.2. Üretim

Son senelerde Dünya tuz üretiminde artış çok az denebilecek seviyededir. Üretim 190 milyon ton civarındadır. ABD 34 milyon ton üretimi ile sürekli olarak

birinci sırada yer almakta, Çin 18 milyon ton üretimle ikinci sırada bulunmakta ve Almanya 15 milyon ton üretimle Rusya'yı geride bırakarak üçüncü sıraya çıkmış bulunmaktadır. Türkiye 2 milyon tona yaklaşan 1990 yılı üretimi ile 18. sırada yer alırken, 1990 yılı sonrasında mevcut stoklar nedeniyle üretimini kısmak zorunda kalmış, buna rağmen yaklaşık 1,5 milyon tonluk üretimle 17. sırada yer almıştır. Ülkeler ve kıtalar bazında dünya tuz üretimi aşağıdaki Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Dünya tuz üretimi (milyon ton) (DPT, 2001)

Ülkeler	1996	1997	1998
A.B.D	42	41	42
Çin	29	29	30
Almanya	11	16	15
Kanada	11	13	13
Hindistan	10	10	9
Avustralya	9	9	9
Fransa	7	7	7
Meksika	8	8	8
İngiltere	7	7	7
Polonya	4	4	4
İtalya	4	4	4
Brezilya	5	6	6
İspanya	4	4	4
Ukrayna	3	3	2
Türkiye	2	2	2
Diğerleri	45	38	35
Toplam	201	201	197

2.5.3. Tuzun üretim yöntemleri

Tuz üretimi üç ana başlıkta toplanabilir. Bunlar buharlaştırma, çözelti madenciliği ve klasik madencilik yöntemleri olarak sıralanabilir. Üretim yöntemleri sırasıyla takip eden alt başlıklarda sunulmaktadır.

2.5.3.1. Buharlaştırma yöntemi ile üretim

Deniz, göl ve diğer doğal tuzlu suların güneş altında buharlaştırılması sonucu tuzun yeniden kristalleştirilmesi yöntemidir. Bu yöntemin uygulanabilmesi o bölgenin iklim koşullarına bağlıdır. En yaygın üretim yöntemi rüzgâr ve güneş gibi tabii faktörlerin tesiriyle tuzlu deniz suyunun, buharlaşmasını, dolayısıyla tuzun çökelmesini sağlayan tarımsal yöntemdir. Öncelikle deniz suyu tam manasıyla tuza doymuş bir eriyik olmadığından, tabii faktörlerden başka ayırıcı maddelerin kullanılması ekonomik yönden pahalı bir yöntemdir.

2.5.3.2. Çözelti madenciliği ile üretim

Yer kabuğu içerisindeki tuz yataklarının çözelti madenciliği ile işletilmesidir. Açık ve yeraltı işletmeciliği yöntemleri her tür rezerve uygulanamamaktadır. Aşağıda belirtilen maden rezervleri teknik ve ekonomik açıdan işletme şartlarına uygun olmamaktadır (McKee, 1980):

1. Düşük tenörlü cevherler,
2. Derinde bulunanlar,
3. Damarları ince olanlar,
4. Katmanlar şeklinde bulunanlar,
5. Dikey veya belli bir eğimdeki damarlar,
6. Üstlerinde su tabakası bulunan madenler.

Yukarıda özetlenen nedenlerden dolayı klasik madencilik yöntemleriyle değerlendirilemeyen rezervler için çözelti madenciliği tekniklerine gereksinim vardır. Bu açıdan çözelti madenciliği özellikle son yıllarda oldukça önem kazanmış bir madencilik yöntemidir.

Çözelti madenciliği, düşük tenörlü veya bulundukları yer dolayısıyla ulaşılamayan ve bu nedenlerle de açık ve yeraltı madencilik yöntemlerinin

uygulanamadığı madenlerin değerlendirilmesinde kullanılması ekonomik ve çevresel açıdan uygun olan bir yöntem olarak tanımlanır. Çözelti madenciliğinin uygulanması çeşitli adımları ve mühendislik disiplinlerini içermektedir (Okutan ve Öner, 1987).

Evaporit tipi yataklarda baskın olmak üzere, çeşitli oksitli cevherlerin ve hatta diğer tip maden yataklarının işletilmesi yanında bu yöntem, yeri ve hacmi kesinlikle belirlenen kaya tuzu yataklarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yatırım maliyetlerinin düşüklüğü, çevresel risklerin daha az oluşu, bu yöntemin en çekici yönlerini oluşturmaktadır. Yöntem, temelde, yeryüzünden açılan bir sondaj kuyusu ile cevher yatağına ulaşarak, cevher karakteristiğine uygun bir çözücü yardımıyla liçleme yapılması ve cevherin çözelti halinde yeryüzüne pompalanması esasına dayanmaktadır. Yapılan geliştirme çalışmaları ve saha deneyimleri ile uygulamalarda yaklaşım farklılıkları görülebilmektedir (DPT, 2006).

Uygulamada tek ve çoklu kuyularla üretim yapılabilmektedir. Çoklu kuyularla, çözündürme yüzeylerinin ve dolayısıyla işletme verimliliğinin arttırılması hedeflenmekte, böylece tek bir üretim ünitesinden daha çok ürün alınması mümkün olabilmektedir. Ancak iki veya daha çok kuyudan oluşan sistemlerde kuyuların bir şekilde birbirleriyle irtibatlanması gerekmektedir. Bunun için kullanılan yöntemler, "çatlatma" ve "yön kontrollü sondajla birleştirme"dir. Çatlatma, ucuz olmasına karşın birleşme profili üzerindeki kontrolün azlığı nedeniyle katkısı düşük bir yöntemdir. Buna karşılık, yönlü sondaj daha etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir (DPT, 2006).

Sondaj teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, mafsallı tijler kullanılmak suretiyle, dik sondajlarla cevhere ulaşıldıktan sonra, monitörden kontrol ederek, sondajı cevher damarında istenilen yönde saptırabilmek mümkün hale gelmiştir. Ayrıca tijlerdeki yivler ile daha geniş ve uzak mesafelere kadar çözücüleri gönderme ve sismik tekniklerle de oluşan boşlukları monitörde izleme imkânı doğmuştur. Bu gelişmeler çözelti madenciliğinde verimi ve yöntemin uygulanabilirliğini önemli oranda arttırmıştır (DPT, 2006).

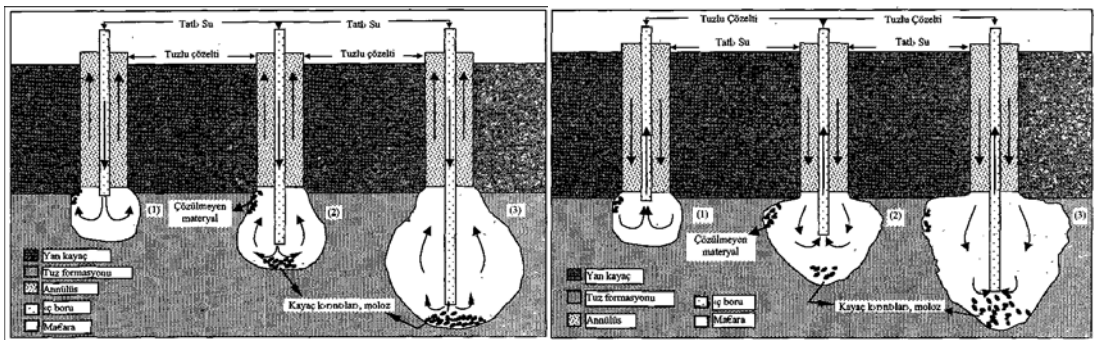
Çözelti madenciliğinin avantajları; klasik madencilik yöntemleriyle değerlendirilemeyen düşük tenörlü ve düşük tonajlı rezervlerin değerlendirilmesine ve yüksek tenörlü olup da bulunduğu yer nedeniyle ulaşılması zor cevherlerin işletilmesine olanak vermesi, konvansiyonel madenciliğe göre daha az maliyete sahip

olması, çevresel risklerinin az olması, klasik madenciliğin uygulandığı yerlerde, klasik yöntemle alınamayan cevherlerin üretilmesine olanak sağlaması gibi hususlardır. Bu avantajları nedeniyle, bugün birçok yatakta çözelti madenciliği klasik madenciliğe alternatif olarak düşünülmektedir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olup, uzun dönemde en ekonomik üretim yöntemidir (DPT, 2006).

Çözelti madenciliği prosesi ayrıca "Sondaj kuyuları madenciliği" olarak ifade edilebilir. Sülfür madenciliğinde kullanılan "Frash Prosesi" sondaj madenciliğinin önemli bir örneğidir. Bu prosesin uygulama tarihi 1900 yıllarına kadar gitmektedir. Sondaj kuyu madenciliğinin değişken bir sistem olarak bu prosesin yerine geçmesi, Frash Prosesle sülfür üretiminin uzun yıllar başarılı olmasının bir göstergesidir. Sondaj kuyuları ile çözelti madenciliği üretim prosesi, yeraltı mekanik madenciliğe alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Çünkü, mekanik madencilik oldukça pahalı bir yöntemdir. Ancak, çözelti madenciliğinin ilk uygulamaları geçerli ve uygun bir proses üretememiştir. Diğer yandan, çözelti madenciliği devamlı olarak gelişmiş ve günümüzde bu yönteme karşı olan ilgi her geçen gün artmıştır. Sentetik soda yüz yılı aşkın bir süredir tüm dünyada tuzdan elde edilmektedir. Tuz ise yeraltından çözelti madenciliği ile üretilmektedir. Soda eldesinde amonyak katalizör olarak, kireçtaşı hammadde, kok ve kömür yakıt olarak kullanılmaktadır. Çözelti madenciliği dünyada birçok işletmede özellikle Amerika Birleşik Devletleri' nde (Wyoming Bölgesinde) kullanılmaktadır (Ersoy ve Yünsel, 2001).

Çözelti madenciliği prosesinde yeraltındaki hammadde yatağına kadar sondaj kuyuları açılır. Sondaj kuyuları tuz tavanına kadar (genellikle 400 m. derinlikte) açılmaktadır. Kuyu işlemi tamamlandıktan sonra kuyunun göçmesini önlemek, kuyuya gönderilen tatlı suyun ve kuyudan yeryüzüne gelen tuz çözeltisinin formasyona kaçmasını önlemek için tuz tavanına kadar muhafaza boruları (casing) indirilmektedir. Koruma borularının çapı kuyu çapına yakın olup kuyu çeperinde bulunmaktadır. Bundan sonra çimentolama işlemi uygulanmaktadır. Çimento kuyu başlığından pompalanarak kuyu yüzeyi ile muhafaza borusu arasına girmesi sağlanmaktadır. Yaklaşık olarak 72 saat çimentonun donması beklenmektedir. Kuyunun tabanında (kuyu boşluğunda) 10-15 m bir çimento kalmaktadır. Bu çimento sondaj ile delinerek tuz tabanına kadar (genelde 600 m civarı derinlikte) ilerleme yapılmaktadır. Kuyu, muhafaza boruları ve çimentolama işlemleri tamamlandıktan

sonra, yeraltındaki tuz tabakalarını tatlı su ile çözdürerek üretime geçilmektedir. Kuyu boşluğuna serbest iç boru (tubing) tuz tabanından 1-2 m yukarıda kalacak şekilde yerleştirilmektedir. Tuzun çözdürülmesi ve yeryüzüne alınması işlemi, çözelti madenciliğinin iki farklı metodu ile yapılmaktadır. Bunlar direkt ve ters dolaşım yöntemleridir. Direkt dolaşımda (Şekil 2.3a) tatlı su iç borudan pompalanarak, tuzlu su annülüsten, yani muhafaza borusu ile iç boru arasından yeryüzündeki tanklara ve depolara alınmaktadır. Ters dolaşımda ise tatlı su annülüsten pompalanmakta olup, tuzlu su çözeltisi iç borudan alınmaktadır (Şekil 2.3b). Çalışma alanında, üretimin ilk başlangıcında direkt dolaşım yöntemi, üretimin ileri aşamalarında ise ters dolaşım yöntemi uygulanmaktadır. Direkt dolaşımın en önemli avantajı basit bir sistem oluşudur (Ersoy ve Yünsel, 2001).



(a) (b)

Şekil 2.3. Sondajlarla çözelti madenciliğinin (a) direkt (b) ters dolaşım ile üretim yöntemi ve yapay mağaraların gelişimi (Ersoy ve Yünsel, 2001)

Bu kuyulara casing (koruma boruları) ve iç boru yerleştirilir. Annülüsten (koruma boruları ile iç boru arasından) veya sulu bir seviyeden (yeraltı su seviyesi altından) hammaddeye tatlı su verilir ve hammaddenin çözülmesi sağlanır. Hammadde çözeltisi iç borudan pompalarla yeryüzüne taşınır. Bu işlem yatakta bir kuyudan veya daha fazla sondaj kuyusunun birbirleri ile yönlü ve seri olarak irtibatlandırılması ile üretim yapılabilir (Ersoy ve Yünsel, 2001).

2.5.3.3. Yeraltı madencilik yöntemleriyle üretim

Yerkabuğu içerisinde tabakalaşmış tuz yatakları, kömür üretiminde uygulanan yöntemlerle işletilmektedir. Bu tip üretimde en yaygın yöntem oda-topuk yöntemi olmaktadır. İkinci üretim yöntemi toprak altından çıkartılan blok halindeki kaya tuzunun gerektiğinde aşındırılıp öğütülmesi ile elde edilen yöntemdir. Bu tuz çoğu zaman saf değildir genellikle sanayide ve tarımda kullanılır. Bu usulde tuz elde edilmesi "Kaya Tuzu" maden ocaklarında uygulanır.

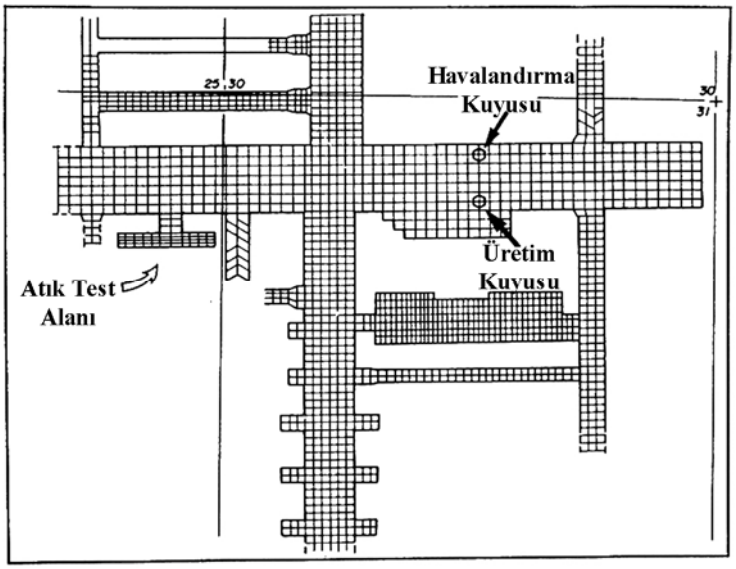
İnce ve orta kalın tuz yataklarında madencilik, tüm evaporit tipi yataklanmalar, jips, trona, kaya tuzu ve potası kapsamaktadır. Burada uygulanan madencilik yöntemleri 1-3,5 m kalınlığındaki yatay kömür yataklanmalarında kullanılan yöntemlere benzemektedirler. Beş metrenin altındaki düzlemsel yataklanmalardaki tam cephe madencilik çalışmalarında diğer oda-topuk yöntemlerine nazaran yüksek dereceli duraylılık ve madencilik geometrileri önemli olmaktadır. Burada önemli olan uygun madencilik düzenlemesi ve yeraltındaki gerilmelerin topuklara olabildiğince eşit dağılımının sağlanmasının bir arada oluşturulabilmesidir. Kalın tuz damarlarında ise en uygun madencilik yöntemi, yine oda-topuk madenciliğidir. Bu sayede büyük odalar oluşturulmasına olanak sağlayacak duraylılık elde edilebilmektedir. Temel olarak oda-topuk madenciliği büyük ve orta ölçekli alan oluşturmaya, aynı zamanda tek katlı veya çok katlı çalışmaya olanak sağlayan bir yöntemdir. Kalın tuz damarlarında uygulanan oda-topuk yöntemi kömür ve sert kayaçlarda kullanılan oda-topuk madenciliğiyle çok az benzerlik göstermektedir. Her iki yataklanma tipinde de önemli olan faktör madencilik geometrisinin uygun olarak belirlenebilmesidir. Bu geometri değişik türlerde olabilir. Örneğin oluşturulacak olan oda boyutları 8 m'den 35 m'ye veya oda şekli dikdörtgenden paralelkenar oda şekline kadar değişiklikler gösterebilir. Bu yöntemler aşağıda örnekleriyle sunulmuştur.

İnce ve orta damarlı tuz yataklarında uygulanan oda-topuk yöntemleri:

i. Köşeli topuk madenciliği: Bu yöntemde yataklanmanın şekline bağlı olarak köşeli topuk bırakılarak oluşturulan bir madencilik metodudur. Bu yöntemde bırakılan topuklar kazanılamaz veya geri dönüm esnasında bir kısmı veya

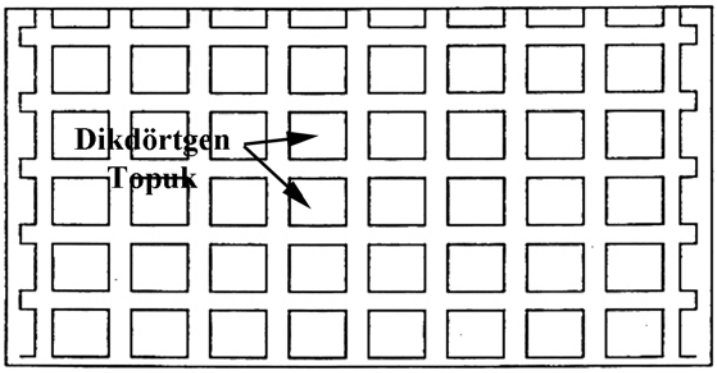
tamamı kazanılabilir. Bu yöntemde planlama kazı metotları ve ekipmanlarından etkilenmektedir. Delme-patlatma veya sürekli madencilik yöntemleri (road header veya continuous miners) kullanılabilir. Köşeli topuk madenciliği aşağıdaki gibi alt birimlere ayrılmaktadır.

a. Kare topuklu yöntem: Özellikle iki kayaç arasında sıkışmış halde bulunan, 2,5 m kalınlığa kadar olan düzlemsel yataklanmalarda uygulanmaktadır. Örnek olarak Drumbo jips ocağı (Güney Ontario, Kanada), Teneco trona ocağı (Şekil 2.4) (Wyoming, ABD) ve Almanya potas madenleri gösterilebilir.



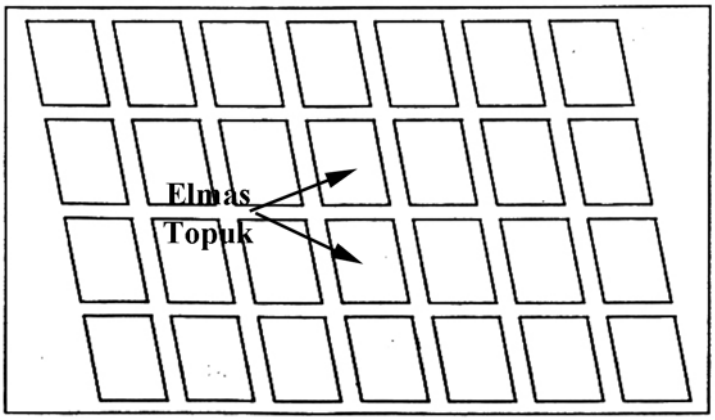
Şekil 2.4. Kare topuk yöntemi uygulanan Tenecco trona madeni plan görünüşü (Wyoming ABD) (Jeremic, 1994)

b. Dikdörtgen topuklu yöntem: Yine bu yöntem kare topuklu yöntemde olduğu gibi düzlemsel yataklanmalarda uygulanmakta fakat bu yöntemde delme-patlatma işlemleri limitli bir şekilde uygulanabilmektedir. Örnekleri Caledonia jips ocağı (Güney Ontario, Kanada), Westvaco trona ocağı (Şekil 2.5) (Wyoming, ABD)'de mevcuttur.



Şekil 2.5. Westvaco-ABD trona ocağında uygulanan dikdörtgen topuk yöntemi (Jeremic, 1994)

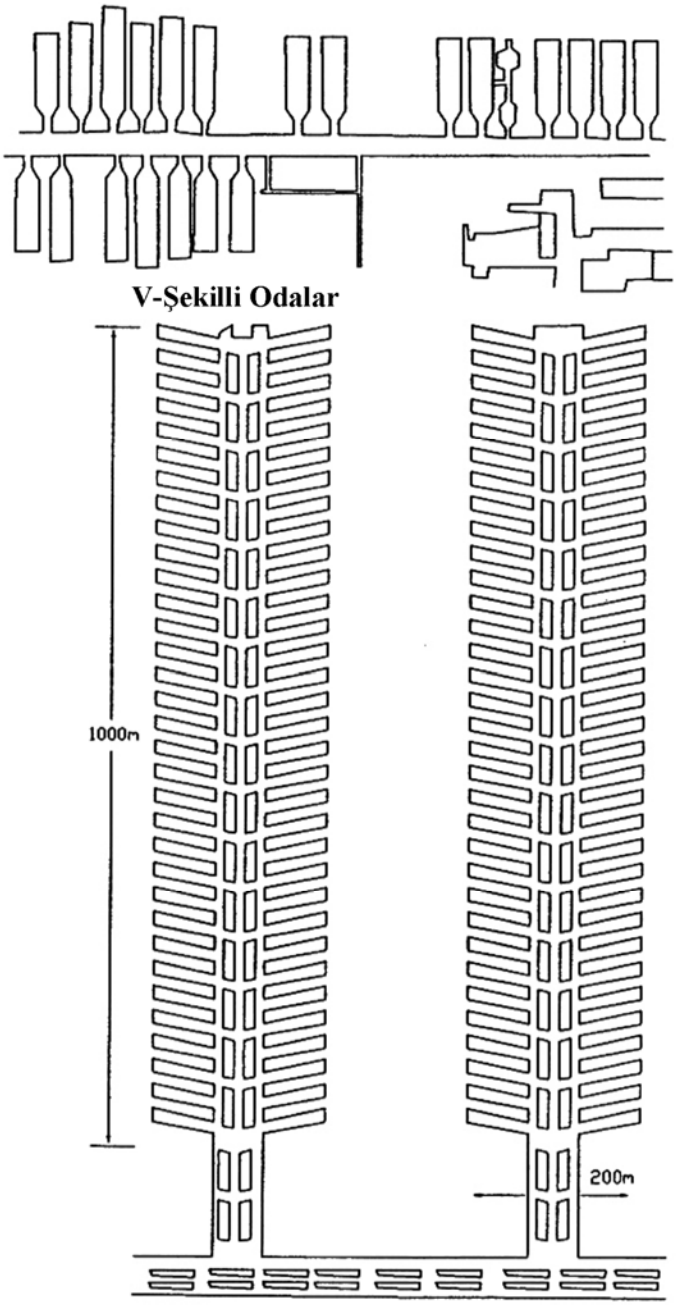
c. Elmas şeklinde topuklu yöntem: Bu yöntem kare ve dikdörtgen topuklu yöntemin bir diğer şeklidir. Örnekleri Westvaco trona ocağı (Şekil 2.6) (Wyoming, ABD) ve Drumbo jips ocağıdır (Güney Ontario, Kanada).



Şekil 2.6. Westvaco-ABD trona ocağında uygulanan elmas şekilli topuk yöntemi (Jeremic, 1994)

d. V-şekilli oda-topuk yöntemi: Bu yönteme balık kılçığı şekilli oda-topuk yöntemi de denilebilir. Bu yöntem çok derin ve çok sığ tuz madenlerinde

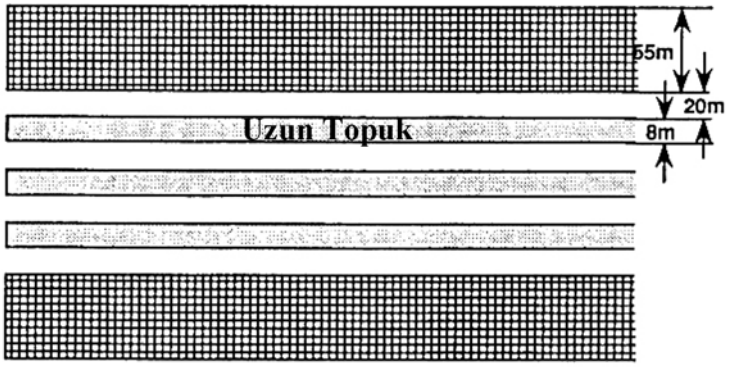
uygun olmaktadır. Topuğa gelen yükün çok fazla olduğu derin tuz ocaklarında arazi gerilmelerinin çok yüksek olduğu veya dayanımın zayıf olduğu yüzeye yakın ocaklarda kullanılan bir madencilik yöntemidir. Örneği Saskatchewan potas madenidir (Şekil 2.7) (Güney Ontario, Kanada).



Şekil 2.7. Saskatchewan potas madeninde uygulanan V-şekilli oda-topuk yöntemi (Jeremic, 1994)

ii. Uzun topuklu madencilik: Saskatchewan (Kanada)'da (Şekil 2.8) geliştirilmiş bir oda-topuk madenciliği yöntemidir. Zemin stabilitesini etkilemeden potas cevherinin üretimini maksimuma çıkarmak amacıyla geliştirilmiştir. Uzun topuklu madencilik uygulamaları aşağıda belirtildiği gibi 5 ayrı ana başlıkta toplanabilir. Bunlar;

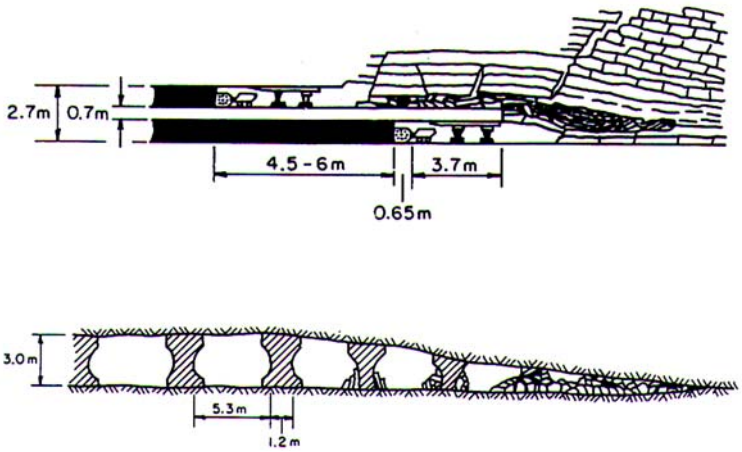
a. Düzenli oda-topuk yöntemi,
b. Tek odalı dayanımlı topuk yöntemi,
c. Çift odalı zayıf topuk yöntemi,
d. Üç odalı zayıf topuk yöntemi ve
e. Dört odalı zayıf topuk yöntemidir.



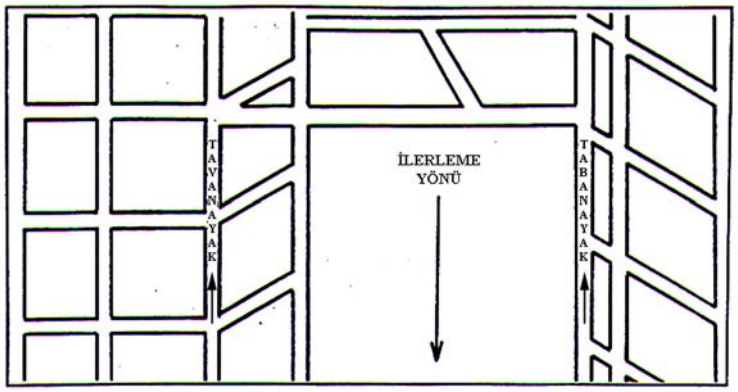
Şekil 2.8. Dört odalı uzun topuk madenciliğine bir örnek (Saskatchewan- Kanada) (Jeremic, 1994)

iii. Uzunayak madenciliği: Kaya tuzunda ilk olarak Avrupa'da kullanılmaya başlanan bir yöntemdir. Özellikle Fransa, İspanya ve Rusya'da uygulanmıştır. Uzunayak kömür madenciliğinde kullanılan donanımlar kaya tuzunun değişik tabaka davranışı ve zemin özelliklerine göre yeniden tasarlanmış ve yeraltı kaya tuzu ocaklarında kullanılmaya başlanmıştır. Önceleri kömür madenciliğinde kullanılan alt kesme yöntemiyle başlanmış sonralar patlatma yöntemi de uygulanmaya başlamıştır. Yükleme ise el ile veya mekanize şekillerde yapılmaktadır. Mekanize ayaklarda çıkan tuz, anında işleme tabi tutulmak üzere nakledilmektedir. 35^{o} eğime kadar olan tabakalarda

uygulanabilmektedir. Uygulamanın yapıldığı damar kalınlığı ince veya orta kalın yataklanma sınıfına giren 1 ile 3,5 m arasında değişmektedir. Uzunayak madenciliği yöntemini uygulayan madenler Fransa'daki Mines de Potasse d' Alsace potas madeni, İspanya Pamplona'daki Potasas de Navara potas madeni, Rusya'daki Soligorsk madeni (Şekil 2.9a) ve ABD Wyoming'deki Westvaco trona madenidir (Şekil 2.9b). tuz madenlerinde uzun ayak üretim yöntemi günümüzde ancak sınırlı uygulama alanı bulmaktadır.



(a)

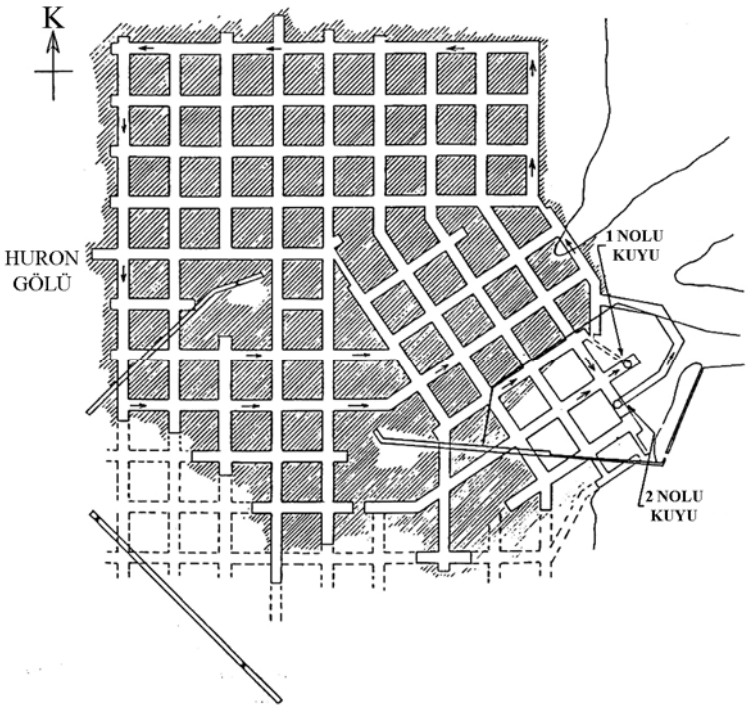


(b)

Şekil 2.9. Kaya tuzunda uygulanan uzunayak madenciliği (a) kesit görünüş (Soligorsk madeni, Rusya) (b) plan görünüş (Westvaco madeni-ABD) (Jeremic, 1994)

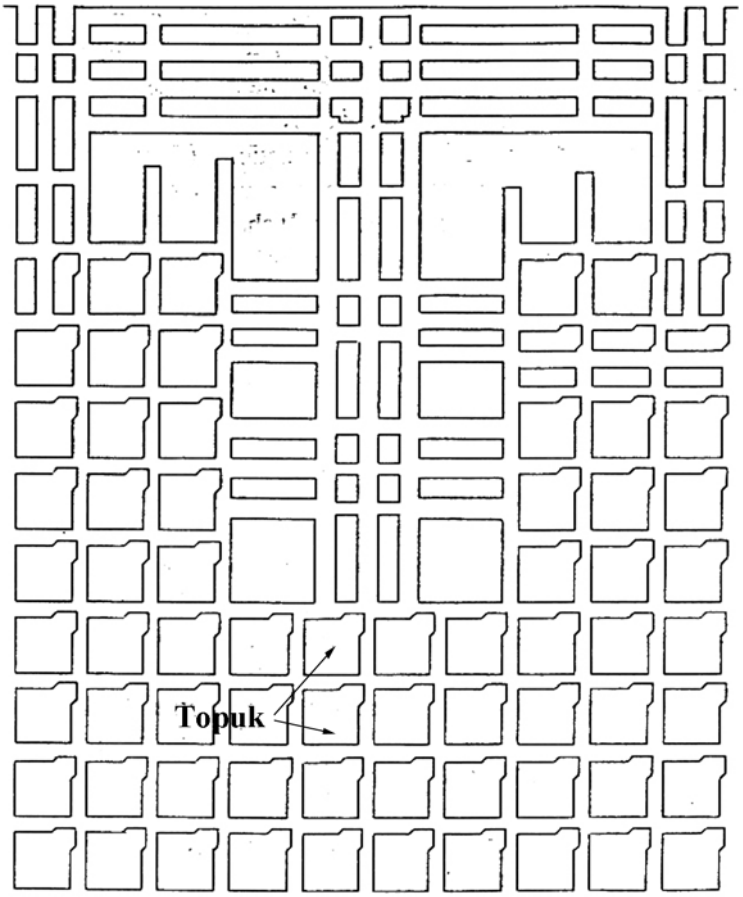
Kalın damarlı tuz yataklarında uygulanan oda-topuk yöntemleri:

i. Kare topuk yöntemi: Bu metot hem ince ve orta kalın hem de kalın tuz yataklanmalarında uygulanabilen bir yöntemdir. Örnek olarak Kanada Güney Ontario'daki Goderich kaya tuzu madeni (Şekil 2.10) gösterilebilir.



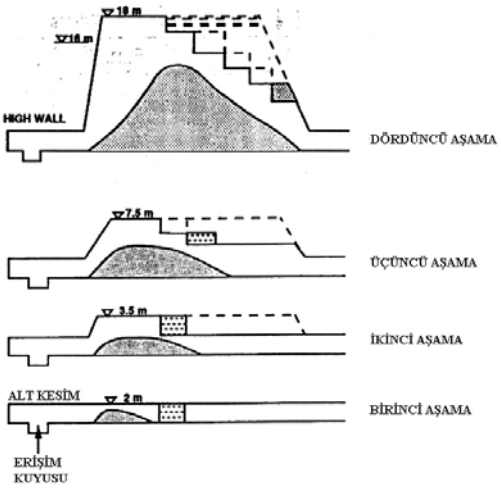
Şekil 2.10. Güney Ontario (Kanada) Goderich kaya tuzu madeninde uygulanan kare topuk yöntemi (Jeremic, 1994)

ii. Şerit topuk yöntemi: Bu yöntem kalın damarlı tuz ocaklarında kullanıldığı gibi aynı zamanda orta kalınlıktaki tuz ocaklarında da kullanılabilir. Bu metot daha iyi zemin kontrolü teknolojilerinin gelişerek sürekli mekanize kazıya geçilmesinin ardından kare topuk yöntemi yerine kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem de yine Kanada Güney Ontario'daki Goderich kaya tuzu madeninde (Şekil 2.11) uygulanmaktadır.



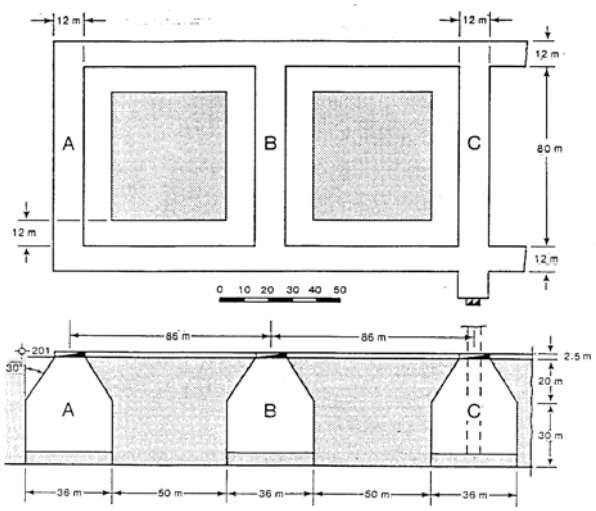
Şekil 2.11. Şerit topuk yöntemi ile kaya tuzu madenciliği (Kanada Güney Ontario-Goderich kaya tuzu madeni) (Jeremic, 1994)

iii. Köşeli oda yöntemi: Değişik ölçü, boyut ve köşeli şekli olan oda ve topuklardan meydana gelen bir sistemle çalışmaktadır. Bu yöntem Almanya'daki Borth kaya tuzu ocağında uygulama alanı bulmuştur. Üç evrede gerçekleştirilmektedir. Bunlar alt kesim, üst kesim ve arka göçertme evreleridir (Şekil 2.12).



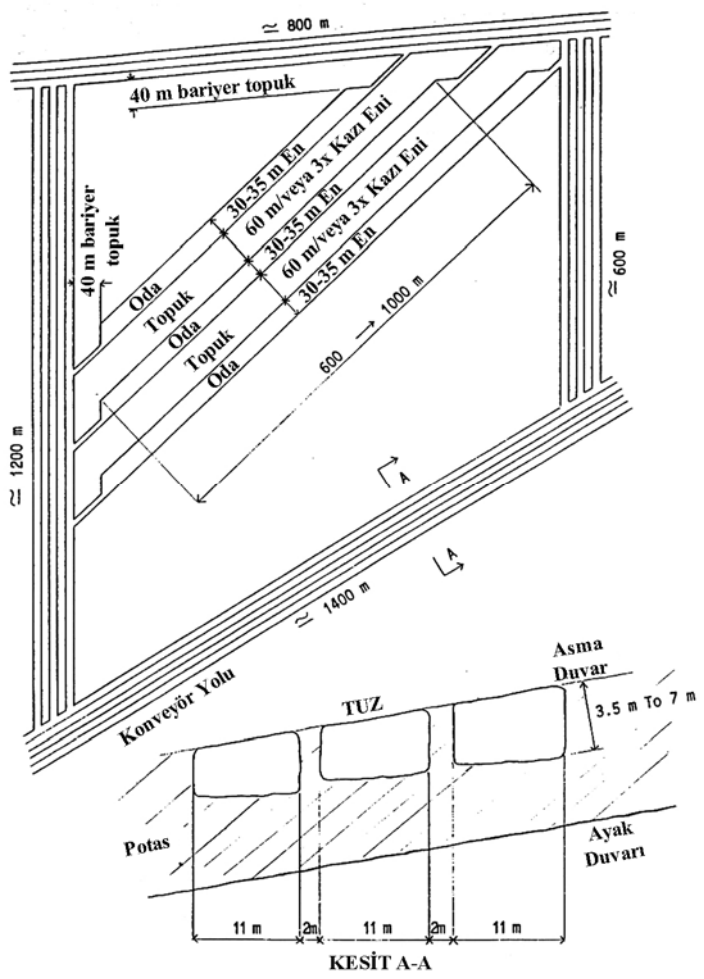
Şekil 2.12. Köşeli oda yöntemi üretim evreleri (Almanya-Borth kaya tuzu madeni) (Jeremic, 1994)

iv. Trapez oda yöntemi: Romanya'da geliştirilmiş ve uygulanmış bir yöntemdir (Şekil 2.13). Bu yöntemde öncelikle en üst noktadan tabana kadar bir kör kuyu yardımı ile inilerek ardından sağa ve sola odalar açılması yoluyla üretim esasına dayanır. En alt noktadan ise bir nakliyat bacası ile çıkarılan malzeme yeryüzüne nakledilir.



Şekil 2.13. Trapez oda yöntemi uygulanan Romanya-Dez (200 m derinlikteki) kaya tuzu madeni (Jeremic, 1994)

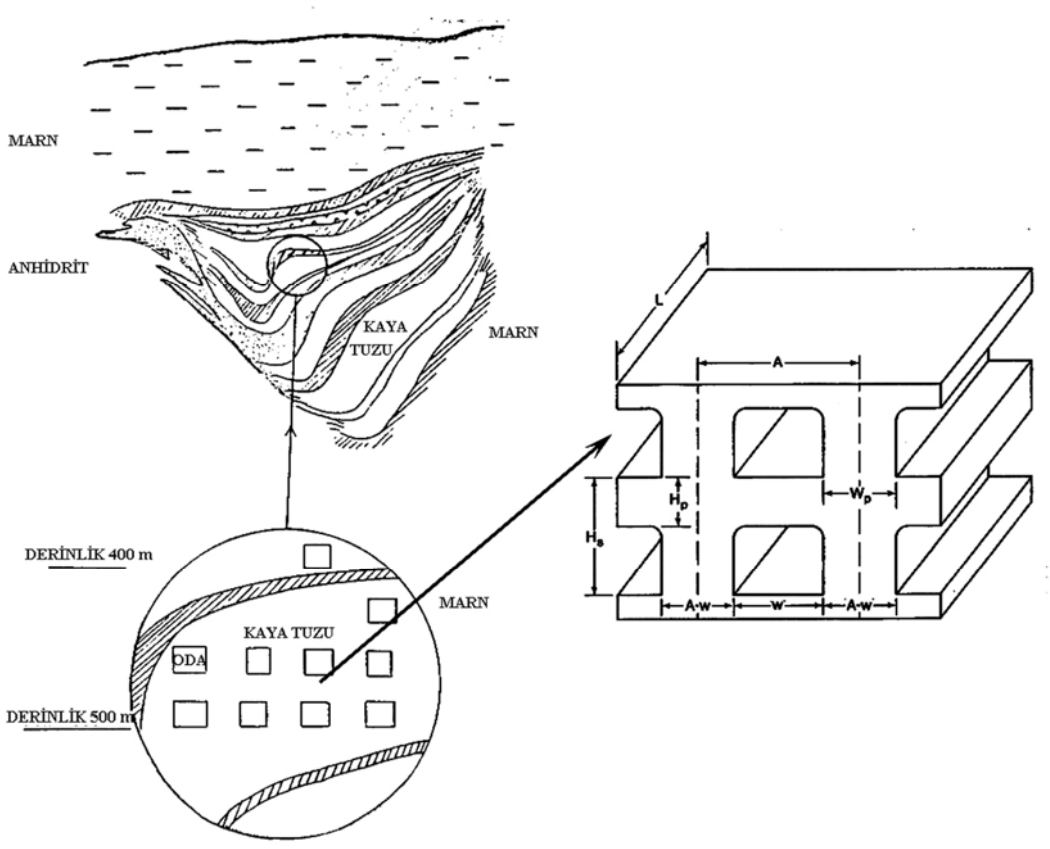
v. Uzun oda yöntemi: Bu yöntem Kanada'daki New Brunswick Denison Potacan potas madeninde uygulanmaktadır (Şekil 2.14). İhraç panosuna üç ayrı girişten girilmektedir. Panoların boyu ve şekli yataklanmanın şekline ve boyutlarına göre ayarlanmaktadır. Üç ayrı giriş verilmesinin nedeni ise bacalar üzerine gelen yükün tabakalar üzerine dağıtılmak istenmesidir.



Şekil 2.14. Kanada'daki New Brunswick Denison Potacan potas madeninde uygulanan uzun oda yöntemi (Jeremic, 1994)

vi. Çok katlı oda yöntemi: Bu yöntem kazı yöntemi olarak diğer metotlarla aynı olmasına rağmen genel madencilik planında değişiklikler arz eder. Bu sistem iki katlı veya çok katlı olabilmektedir. Bu yöntem üç ayrı şekilde kullanılmaktadır. Bunlar:

a. Büyük bloklar halindeki kaya tuzu domlarında (Polonya kaya tuzu madenleri ve bazı Avrupa ülkelerindeki kaya tuzu madenleri),
b. Kıvrımlı kaya tuzu yataklanmalarında (Tusanj kaya tuzu madeni-eski Yugoslavya) (Şekil 2.15),
c. Çeşitli potas madenlerinde (Saskatchevan PCS-Cory potas madeni-Kanada)



Şekil 2.15. Çok katlı oda-topuk yöntemi (Tusanj kaya tuzu madeni-Eski Yugoslavya) (Jeremic, 1994)

2.6. Tuzun Tüketim Alanları

Tuz, kimya sanayisinde, muhtelif gıda sanayisinde, tekstil boyama sektöründe ve diğer bazı sanayi sektörlerinde yıkanmış veya rafine tuz olarak kullanım alanı bulmakta ve bazı alanlarda ham tuz olarak kullanılmaktadır. Yılda kişi başına kullanılması gereken tuz miktarı yaklaşık 7 kg'dır. İnsan bu miktardaki tuzu çeşitli yollardan almaktadır. Genel olarak Türkiye'de yılda büyük baş hayvanların 4 kg, küçükbaş hayvanların 2 kg tuz tüketimi vardır. Yollarda kar ve buza karşı kullanılan tek madde tuz olup, Türkiye'de buzlanma için kullanılan tuz miktarı 50-70 bin ton civarındadır. Çizelge 2.4'de 1997 yılı Türkiye tuz kullanım alanları ve miktarları verilmiştir.

Çizelge 2.4. 1997 Yılı sektörel tuz kullanımı (DPT, 2001)

Tüketim Sektörü	Tüketim Miktarı (bin ton)
Kimya Sanayi	415
Ekmek ve Unlu Mamuller	219
Dericilik Sanayi	214
Tüketim Tuzu (Yıkama tuz için)	151
Tekstil Sanayi	144
Hayvancılık	137
Tüketim Tuzu (Rafine tuz için)	114
Sabun Deterjan Sanayi	98
Zeytincilik	84
Diğer Gıda Sanayi	70
Süt Ürünleri Sanayi	68
Karayolları Kar ve Buz Mücadelesi	55
Su Yumuşatma	55
Maden Metalürji Sanayi	43
Yem Sanayi (Kanatlı Hayvan)	33
Kağıt Sanayi	26
Diğer Sanayi Dalları	15
Margarin Sanayi	7
Et Ürünleri Sanayi	3
TOPLAM	1951

2.7. Kaya Tuzunun Mekanik Özellikleri

Kaya tuzu için standart laboratuar deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri genelde 10-40 MPa arasında değişmektedir. Çekme dayanımı ise genelde 1,5 MPa'dan küçüktür. Kaya tuzu birimleri için çekme dayanımlarının nispeten düşük olması nedeniyle, açıklıklar çevresinde yenilme bölgelerinin önlenmesi veya sınırlandırılması için, çekme bölgelerinin oluşumu mümkün olduğunca sınırlandırılmalıdır (Langer, 1986).

Kaya tuzunun mekanik özellikleri incelendiğinde, etkin olan pek çok parametrenin var olduğu görülmektedir. Bunlar sırasıyla; tek eksenli basınç dayanımı (σ_c), çekme dayanımı (σ_t), en büyük ve en küçük asal gerilme değerleri (σ_1 ve σ_3), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ, ^{o}), Mohr zarfı, elastisite (deformasyon) modülü (E), Poisson oranı (υ) olarak sıralanabilir. Bu parametreler haricinde kaya tuzunun önemli bir malzeme davranışının sünme (creep) davranışı olduğu bilinmektedir (Özkan ve ark., 2006). Bu parametreler içinde kaya tuzunun uzun dönemli davranışını etkileyen en önemli parametrenin sünme davranışı olduğu görülmektedir (Langer, 1986). Bu mekanik özelliklerin belirlenmesinde belirlenmiş olan tek eksenli basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite veya deformasyon parametreleri kısa dönemli mekanik deneyler olarak adlandırılırken sünme deneyleri ise uzun dönemli deneyler sınıfındadır.

2.7.1. Kaya tuzunun kısa dönemli mekanik özellikleri

Kömür gibi özel bir kaya birimi olan kaya tuzu üzerinde ISRM (1981, 2007) tarafından önerilen kaya mekaniği deneyleri, kısa dönemli mekanik deneyler olarak adlandırılmaktadır. Bu deneylerden araştırmacılar tarafından en çok önemsenen deneyler aşağıda sunulmuştur.

2.7.1.1. Tek eksenli basınç dayanımı

Kaya tuzunda dayanımın belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntem tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneyidir. Bu deneyde silindir veya küp şeklindeki kaya tuzu numunesi tek eksenli basınca maruz bırakılır. Tek eksenli basınç dayanımı; numune şekli, numune boyutu, porozite, nem, mineral bileşimi gibi bazı değişken faktörlerin etkisi altındadır. Kaya tuzunu etkileyen parametrelerden en önemlisi numune şekli ve boyutudur. Bu iki parametre tüm kaya birimleri için kaya mekaniği araştırmacılarını oldukça meşgul etmiştir. Aşağıda numune şekli ve boyutu üzerine yapılan çalışmaların genel bir değerlendirmesi ve de kaya tuzu üzerine sınırlı sayıda yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Çoğu kaya mühendisliği tasarımları kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesini gerekli kılar. Kaya mekaniği çalışmalarında mekanik kaya dayanımı özelliğinin elde edilmesi için tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneyleri oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tasarımcılar, birçok tasarımda TEBD değerlerinin oldukça önemli bir girdi parametresi olduğunu varsaymaktadırlar. ISRM (1978) ve ASTM (1986), laboratuarda gerçekleştirilecek TEBD deneyleri için metotlar yayınlamıştır. Yeraltı madenciliğinde kaya malzemesi ve kütlesinin dayanımının sınıflandırılması, kaya topuklarının dayanımının tahmini gibi tipik uygulamalarda TEBD deney sonuçları kullanılmaktadır.

Kaya mekaniğinde şekil etkisi, TEBD değerleri üzerinde önemli bir parametre olmasına rağmen bu etki ile ilgili olarak literatürde oldukça sınırlı bilgi yayınlanmıştır (Hoek ve Brown, 1980; Bieniawski, 1984; Hawkins, 1998; Thuro ve ark., 2001). Küp numuneler doğal kaya materyali için kullanılırken kaya malzemeleri için daha çok silindirik numuneler kullanılmaktadır (Hawkins, 1998). Ölçek etkisi şekil ve boyut kategorilerine ayrılabilir. Şekil olarak literatürde karot ve prizma gibi geometrik formlar kastedilmektedir. Bu geometrik formların farklı boyutları da kullanılabilir. Karot numuneleri için çap, prizma numuneler için genişlik, boyut olarak tanımlanmıştır.

TEBD deneyi ayrıca tuz madenleri ve tuzda açılan boşluklar için yapılan tasarım çalışmalarında kaya tuzu dayanımının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat kaya tuzu sünek bir materyaldir ve tuz yataklarının farklı

formlarına göre farklı tane boylarından oluşmaktadır. Bunun için özel laboratuar şartları gereklidir. Deney prosedürleri genellikle oda sıcaklığında, kuasi-statik olarak bilinen kısa bir yükleme ile gerçekleştirilmektedir. Kuasi-statik deneylerde yükleme, zamana bağlı gerilme oranı ya da birim deformasyon oranına bağlı olarak kontrol edilebilir. Deneylerin özel koşullar altında gerçekleştirilmesine rağmen, kaya tuzunun TEBD değeri; numunenin şekli, boyutu, porozite, nem, mineral bileşimi, tane boyutu, sıcaklık ve bunun gibi bir seri değişken faktöre dayalıdır. Farklı tipte ve yapıda mineral bileşimi nedeniyle çeşitli tuz yatakları arasında dayanım farklılıkları olabilir (Jeremic, 1994). Bunun yanında, numunelerdeki anhidrit, kil benzeri kirlilikler özellikle tuz yataklarının dayanım parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir (Liang ve ark., 2006). Lux (1984)'a göre tane boyutu da TEBD üzerinde etkisi olan bir diğer önemli etkendir. Sonuç olarak, tuz madenlerinde ve havzalarında duraylılık analizi yapan tasarım mühendisleri gerçek TEBD değerlerini ve sünme davranış sonuçlarını kullanmak zorundadır. Şekil ve boyut etkisi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur. Şekil ve boyut etkisi birleştirilmiş olarak ölçek etkisi şeklinde de açıklanabilmektedir.

2.7.1.1.1. Şekil etkisi üzerinde yapılan çalışmalar

Silindir numuneler için TEBD değerleri üzerinde şekil etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Hawkins, 1998; John, 1972). Değişik tipteki kayalar üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre, numune taban alanı sabit tutulup, Boy/Çap (H/D) oranı artırıldığında, TEBD değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Obert ve ark. (1946), silindirik numuneler için H/D oranının TEBD değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. John (1972) yaptığı çalışmada, karotların H/D oranının kuru kumtaşı üzerinde iki ya da daha fazla iken, elde edilen dayanım değerlerinin aynı olduğunu göstermiştir. Hawkins (1998) de, bu oranın daha küçük olduğu durumlarda dayanımda dikkate değer bir artışın olduğunu gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra araştırmacı Hawkins (1998), farklı geometrik formlardan elde edilen TEBD değerlerinin aynı olmadığını da vurgulamıştır. Bu şekil etkisine göre, ISRM (1978) ve ASTM (1986) tarafından iki düzeltme faktörü yöntemi önerilmiştir. ASTM

(1986) H/D oranının 2,0-2,5 olması gerektiğini önerirken, ISRM (1978) ise H/D için 2,5 ve 3,0 oranlarını önermiştir (Hawkins, 1998). Diğer taraftan, numuneleri her zaman bu önerilen değerlere göre hazırlamak mümkün olmayabilir. Bundan dolayı, karot numuneler için ASTM (1986) tarafından Eşitlik 2.1 önerilmiştir;

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = 0,88 + 0,24\frac{D}{H} \qquad (2.1)$$

Burada K düzeltme faktörü, D çap, H ise numunenin yüksekliğidir.

Kaya tuzu materyalleri ile yapılan çalışmalarda genellikle TEBD deneyleri için yüksekliğin çapa oranı (H/D) 2 ya da daha fazla olan silindirik numuneler olarak hazırlanırlar. Düzgün küp ve prizma numuneleri araştırmacılar tarafından karot numunelerden daha az tercih edilmektedir. TEBD üzerinde şekil etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Rusya'daki Upper Kama potas yataklarından elde edilen karot numuneleri üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Farklı boy/çap (H/D) oranındaki karot numunelerinin farklı TEBD değerlerine sahip oldukları gösterilmiştir. Yükseklik/çap oranı arttıkça TEBD değerlerinin düştüğü görülmüştür. Araştırmacılar, TEBD değerleri ve yükseklik/çap (H/D) oranı arasındaki ilişkiyi Eşitlik 2.2 ve 2.3'de görüldüğü gibi iki parçaya ayırıp ayrı ayrı düzeltme faktörleri geliştirilmiştir (Anon, 2004).

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = 0,65 + 0,70\frac{D}{H} \qquad 0 < D/H \leq 0,5 \qquad (2.2)$$

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = (2\frac{D}{H})^{0,5} \qquad D/H \geq 0,5 \qquad (2.3)$$

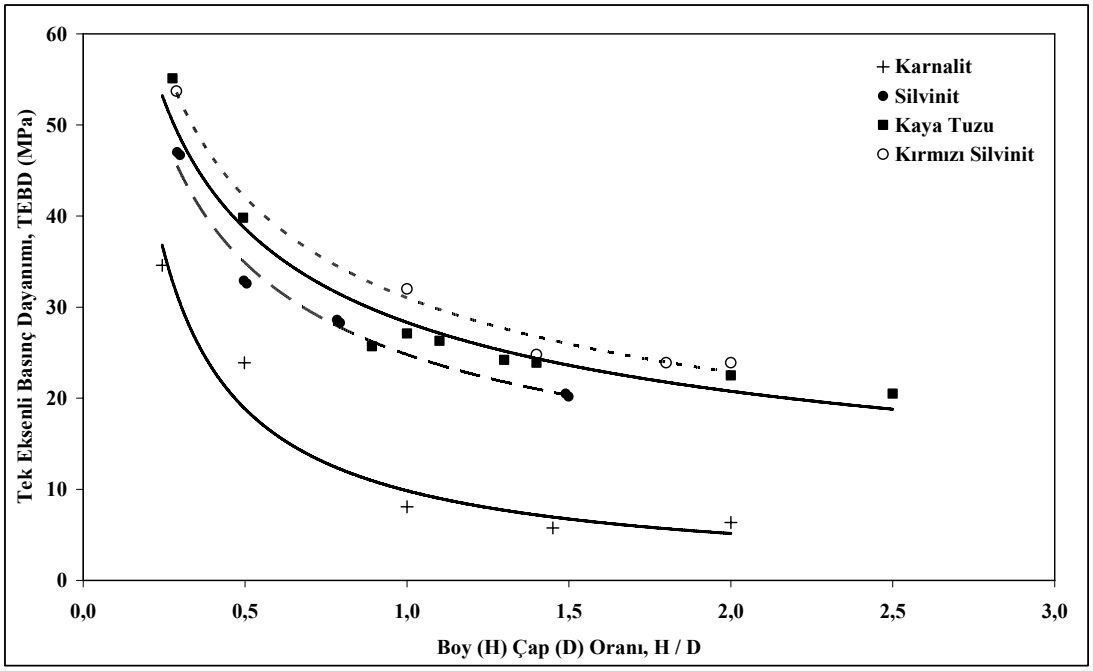
Aynı maden yatağına ek olarak Zhigalkin ve ark. (2005) TEBD deneyleri ile kaya tuzu karotları (kaya tuzu, karnalit, silvinit) üzerinde şekil etkisini incelemişlerdir. Karot numunelerinin boy/çap (H/D) oranları 0,3 ile 2,5 arasında seçilmiştir. Şekil 2.16'da numunelerin şekline dayalı olarak TEBD değerleri görülmektedir. Tüm kaya tuzları için, H/D oranı arttıkça TEBD değerlerinin düşüğü gözlemlenmektedir. Deney sonuçları TEBD değerlerinin H/D≥1,5-2,0'de yaklaşık

sabitleştiğini göstermektedir. Zhigalkin ve ark. (2005), kırmızı silvinit ve karnalit için K şekil faktörünü, çap (D) ve boy (H) oranına dayalı olarak Eşitlik 2.4 ve 2.5'teki ifadelerle tanımlamışlardır.

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = 0,775 + 0,45\frac{D}{H} \qquad \text{silvinit için} \qquad (2.4)$$

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = 0,52 + 0,96\frac{D}{H} \qquad \text{karnalit için} \qquad (2.5)$$

Eşitlik 2.4 ve 2.5 (Zhigalkin, 2005), ASTM (1986) tarafından önerilen Eşitlik 2.1 ile benzeşmektedir.



Şekil 2.16. Farklı tuz örnekleri için TEBD ile boy/çap oranı arasındaki ilişki (Zhigalkin ve ark., 2005)

2.7.1.1.2. Boyut etkisi üzerinde yapılan çalışmalar

Kritik boyut, numune büyüklüğüne bağlı kalmaksızın TEBD'nın yaklaşık sabit kaldığı bir büyüklük olarak tanımlanmaktadır. Araştırmacılar boyut etkisinin belirlenmesinde numune boyunu (H) sabit tutarak sadece numune çapını (D) değiştirmektedirler. TEBD deneyinde kritik boyut dikkate alınmazsa, laboratuar sonuçlarının yerinde dayanım değerlerinin tahmininde kullanılması güvenilir ve yeterli doğrulukta olmayabilir. Örneğin, kaya topuk tasarımında TEBD değerleri yaygın olarak kullanılır fakat tasarımcı boyut etkisinden bağımsız olarak gerçek TEBD değerlerini dikkate almalıdır (Bieniawski, 1984).

Kaya mekaniği literatürü, numune boyutunun kaya dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili çelişkili yorumlar içeren çalışmalar içermektedir. Hodgson ve Cook (1970), Obert ve ark. (1946), numune boyutundaki değişimin kaya dayanımını etkilemediğini bildirmişlerdir. Diğer taraftan Mogi (1962), Bieniawski (1972), Pratt ve ark. (1972), Protodiakonov ve Koifman (1963), Hoskins ve Horino (1969) gibi araştırmacılar da, artan numune boyutuyla ciddi dayanım düşüşlerinin gerçekleştiğini bulmuşlardır.

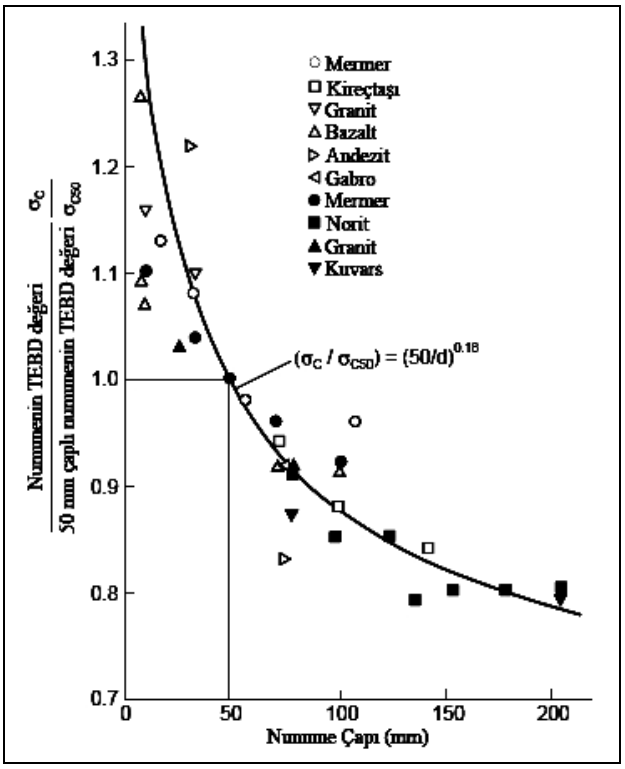
Hoek ve Brown (1980) numune çapının kaya dayanımı üzerindeki etkisini gözden geçirmişlerdir (Şekil 2.17). Özellikle sık dokulu ve eklemsiz sağlam kayaçlar (granit, bazalt, gabro vb.) için literatürden alınan dayanım değerleri boyutsuz olarak çizilmiştir. Şekil 2.17'den de görüldüğü gibi numune çapı düştükçe dayanım artmıştır. Araştırmacılar, farklı çaptaki numunelerden elde edilen sonuçları 50 mm çaplı numune sonuçlarına uyarlamak için Eşitlik 2.6'yı geliştirmişlerdir (Hoek ve Brown, 1980).

$$\sigma_{c(50)} = \frac{\sigma_c}{(50/D)^{0,18}} \tag{2.6}$$

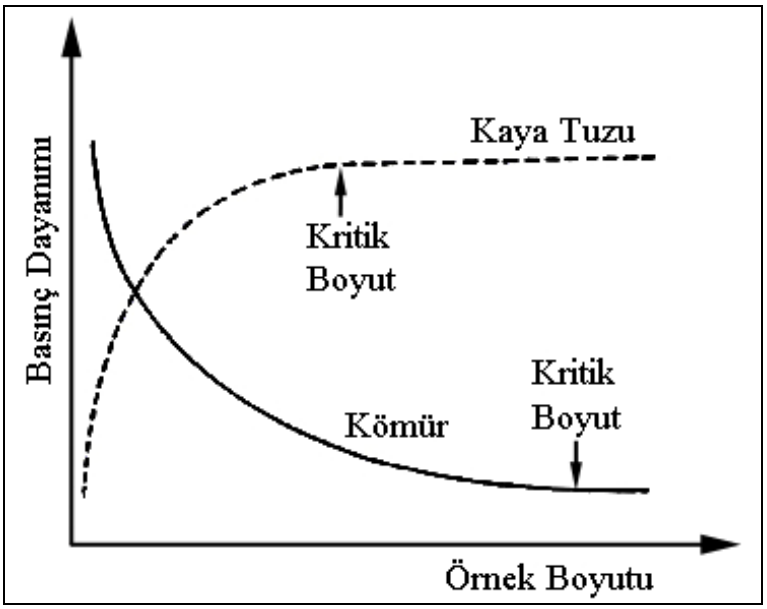
Burada $\sigma_{c(50)}$, 50 mm çaplı numunenin hesaplanan TEBD değeri, σ_c herhangi bir çapa sahip numunenin TEBD değeri, D ise deneye tabi tutulan numunenin mm cinsinden çapıdır.

Gevrek kayaçlarda, artan boyutla bir başka deyişle artan çapla dayanımın azalması genellikle boyut etkisinden kaynaklanmaktadır. Fakat kaya tuzu (Şekil

2.18) gibi sünek kayalarda boyut etkisi genellikle farklıdır (Jeremic 1994). Jeremic (1994) tarafından ortaya konulan durum Zhigalkin ve ark. (2005) tarafından da desteklenmektedir. Kaya tuzu numunelerinin boyutu arttıkça, TEBD değerleri belli bir eşik seviyesine kadar artmaktadır (Zhigalkin ve ark., 2005).



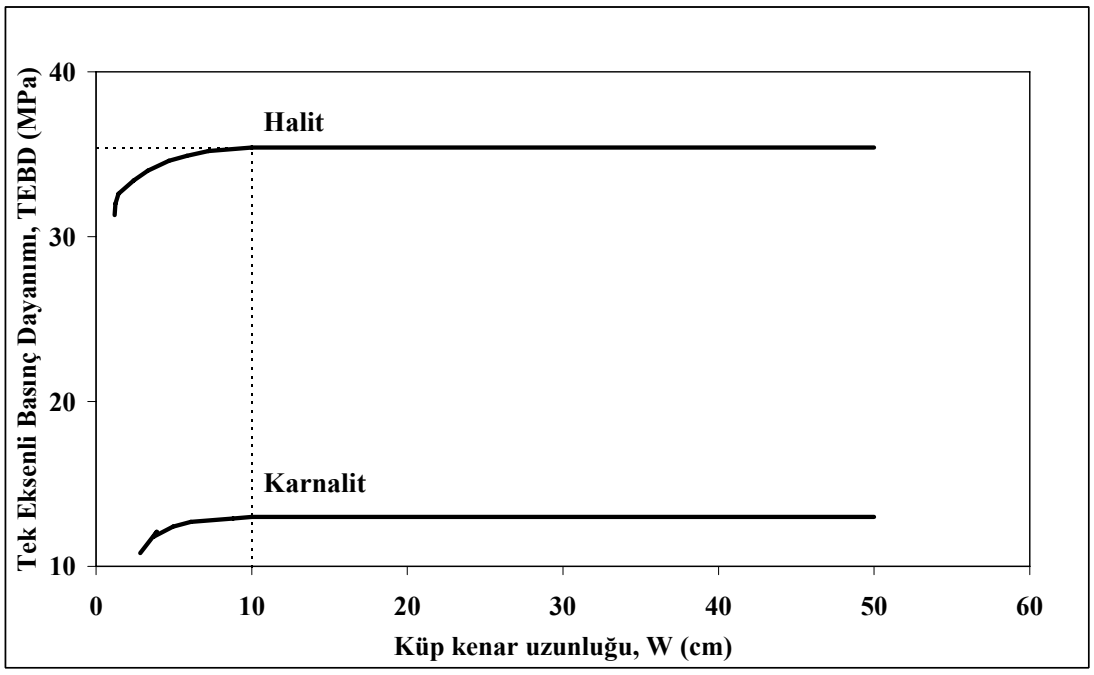
Şekil 2.17 Numune çapı oranı ile TEBD değeri arasındaki ilişki (Hoek ve Brown, 1980)



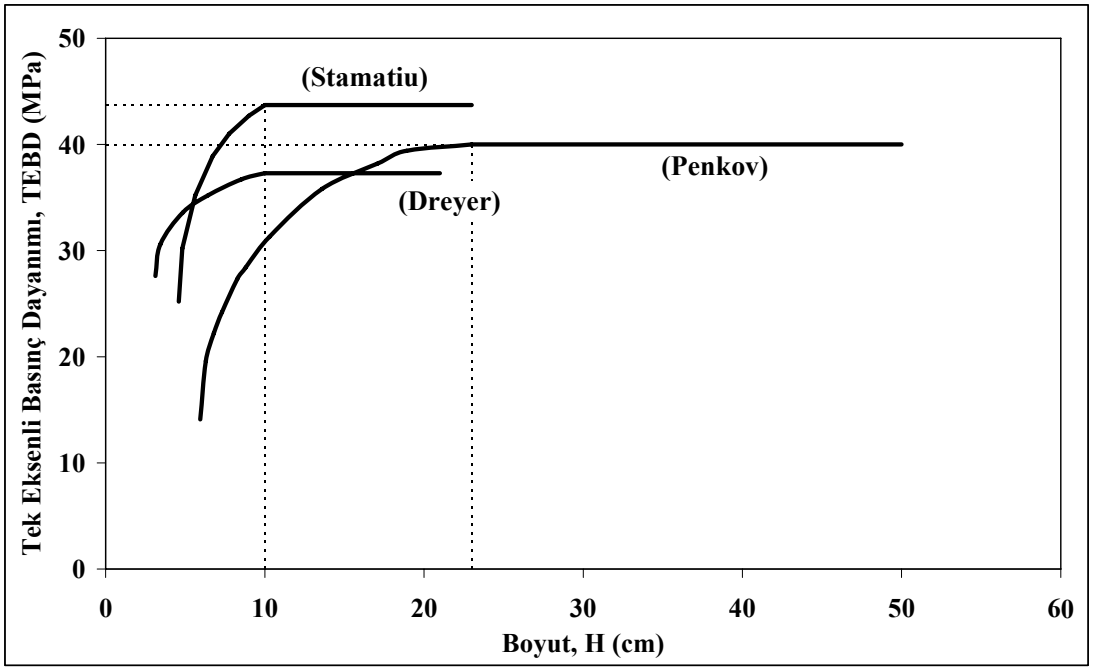
Şekil 2.18. Kaya tuzu ve kömür numunelerinin TEBD değerleri ile numune boyutu arasındaki ilişki (Jeremic, 1994)

Tuz minerallerinin dayanım değerleri fiziksel özellikler ve kimyasal bileşimlerine bağlı olarak geniş bir yelpazede yer almaktadırlar. Fairhurst (1979) Brezilya Sergipe kaya tuzu madeninde yapmış olduğu çalışmada tek eksenli basınç dayanımı değerlerini silvinit için 42,3 MPa, halit için 37,3 MPa, karnalit için 19,7 MPa olarak belirlemiştir. Jeremic (1994), Almanya kaya tuzu madenlerinden elde edilen küp şeklindeki halit ve karnalit numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Her iki tipteki kaya tuzları için elde edilen deney sonuçlarına dayalı olarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, karnalitin halite göre üç kat daha düşük bir dayanım değerine sahip olduğu, fakat boyut etkisi altında aynı fonksiyonel ilişkiyi gösterdiği görülmüştür (Şekil 2.19). Araştırmacı bunun yanı sıra, çeşitli yataklar için deney sonuçlarını toplamıştır. Analizlere göre, küp numunelerin genişliği (W) arttıkça başlangıçta dayanımın arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.20). Şekildeki diyagramlardan da anlaşılabileceği gibi kaya tuzu belli bir örnek boyutundan sonra yaklaşık sabit bir dayanım göstermektedir. Dayanım artışında boyut etkisinin limit noktası 10 ile 25 cm küp kenar uzunlukları arasındadır. Değişik tip ve yapıdaki mineral bileşimindeki çeşitliliğe bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımı değeri sadece farklı yataklarda değil aynı yatakta bile yaşlı veya

genç olmasına bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Tuz malzemelerinin TEBD ve dolayısıyla boyut etkisi üzerinde malzemenin yaklaşık tane boyutu da önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 2.19. Kübik halit ve karnalit numunelerinde kenar genişliğine (W) göre TEBD değerleri (Jeremic, 1994)

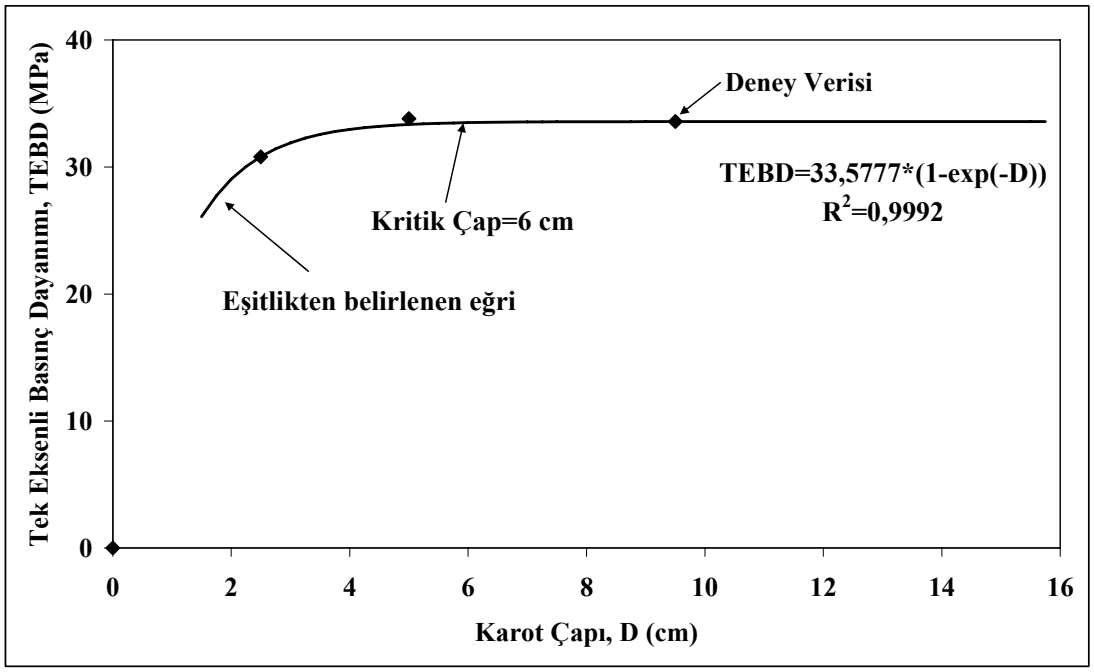


Şekil 2.20. Farklı maden yatakları için kübik kaya tuzu numunelerinde kenar genişliğine göre TEBD değişimi (Jeremic, 1994)

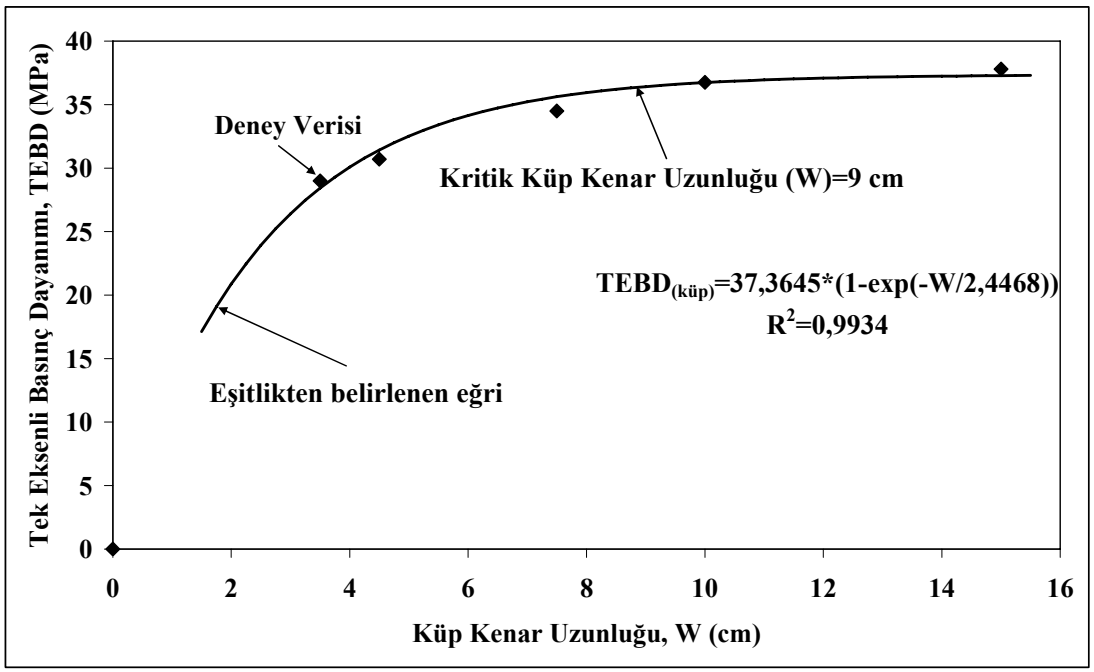
Özkan ve Düzyol (2004) ile Özkan ve ark. (2006) farklı çapta hazırladıkları silindirik ve küp kaya tuzu numuneleri üzerinde TEBD deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar göstermiştir ki, numunelerden elde edilen TEBD değerleri belli bir kritik boyuta ulaşılana kadar artmış ve bu noktadan itibaren yaklaşık sabit bir karakterde devam etmektedir (Şekil 2.21 ve 2.22).

Lux (1984)'a göre, tane boyutu da kaya tuzu karot numunelerinin TEBD değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Araştırmacı karot numuneler için tane boyutunun TEBD üzerindeki etkisini belirlemek için bir çalışma yapmış ve yaptığı çalışmanın sonuçlarını grafiksel olarak sunmuştur (Şekil 2.23). Çapın (D) tane boyutuna (ρ) oranı arttıkça TEBD değerlerinin arttığını gözlemlemiştir. Lux (1984) kaya tuzu için basit bir kristal tane boyutu sınıflaması ortaya atmıştır. Bu sınıflamaya göre <1 mm, 1-10 mm ve >10 mm olan tane boyutları sırasıyla ince, orta ve iri taneli olarak adlandırılmaktadır. Araştırmacı ayrıca tane boyutunun (ρ) en az 15 katı olan bir çap (ya da kenar) değerinden sonra kaya tuzu numunesinin TEBD değerinin yaklaşık olarak sabit kaldığını bildirmiştir. Lux (1984)'un yaklaşımı, Zhigalkin ve

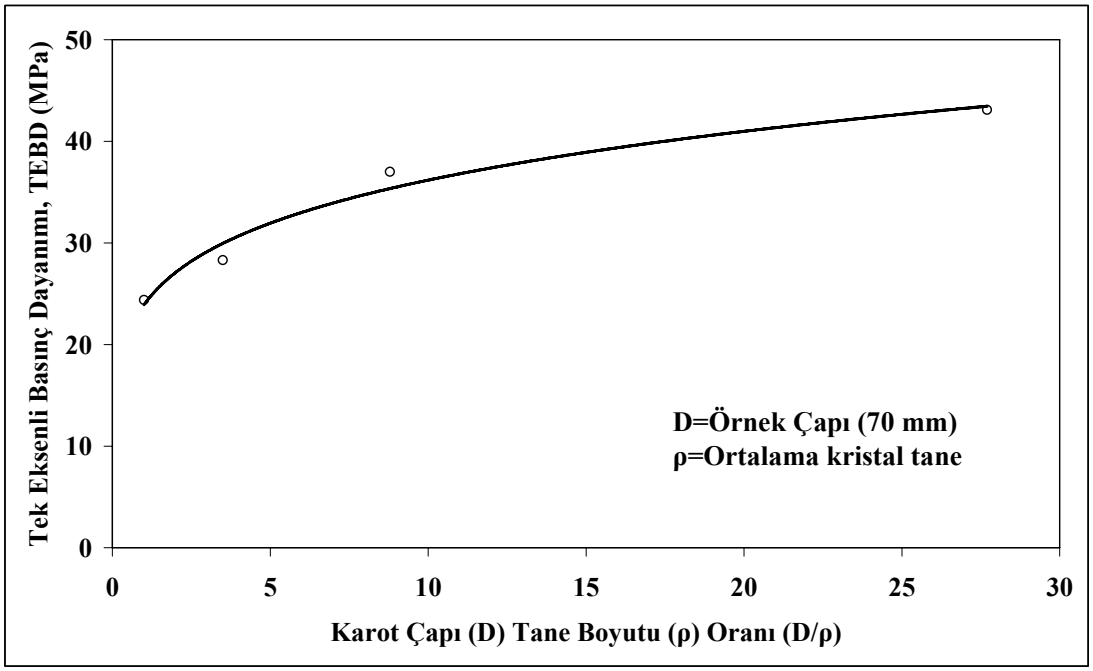
ark. (2005) tarafından desteklenmiştir. Fakat Zhigalkin ve ark. (2005), silvinitte sabit bir TEBD değeri gözlemlemek için çapın (D) tane boyutunun (ρ) en az 20 katı olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bazı araştırmacılar da numune çapının (D) tercihen 50 mm'den küçük olmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, NX tipi karotların (D=54 mm) literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak tercih edildiğinden bahsedilmiştir (Pells, 1993). Ek olarak ISRM (1978) ve ASTM (1986), karot çapının (D) kayaç içindeki tane boyutundan (ρ) 6 ila 10 kat fazla olması gerektiğini önermişlerdir.



Şekil 2.21. Çankırı kaya tuzu için numune kritik boyutunun belirlenmesi (Özkan ve Düzyol, 2004)

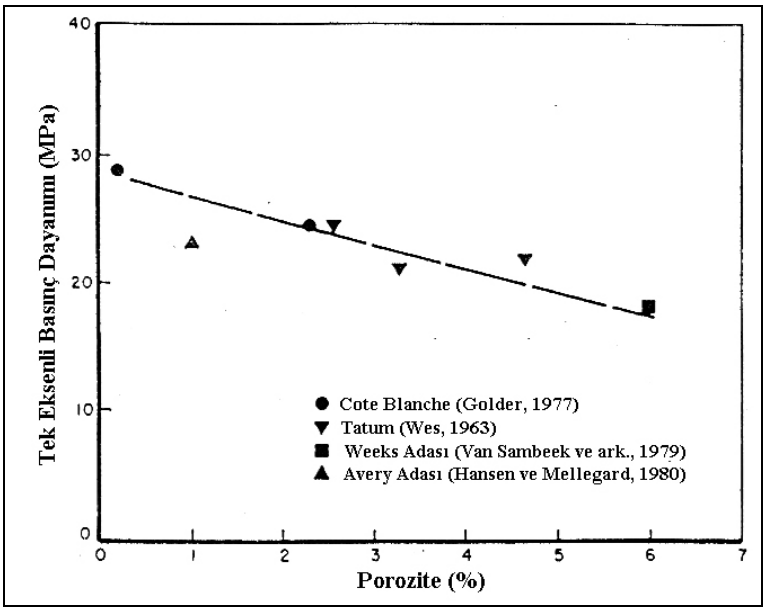


Şekil 2.22. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için numune kritik boyutunun belirlenmesi (Özkan ve ark, 2006)



Şekil 2.23. TEBD ile çap (D)/ortalama kristal tane boyutu (ρ) arasındaki ilişki (Lux, 1984)

Ayrıca kaya tuzunda tek eksenli basınç dayanımının porozite arttıkça azaldığı belirlenmiştir (Şekil 2.17). Yüksek porozitenin madenlerde bazı kaya tuzlarının ciddi bir şekilde gevrek olmasının nedeni olabileceği vurgulanmaktadır. Gevrekliğin diğer bir nedeni ise yeniden kristallenen tuzda değişik kristal yapısının oluşması olarak söylenebilir (Kelsall ve Nelson, 1983).

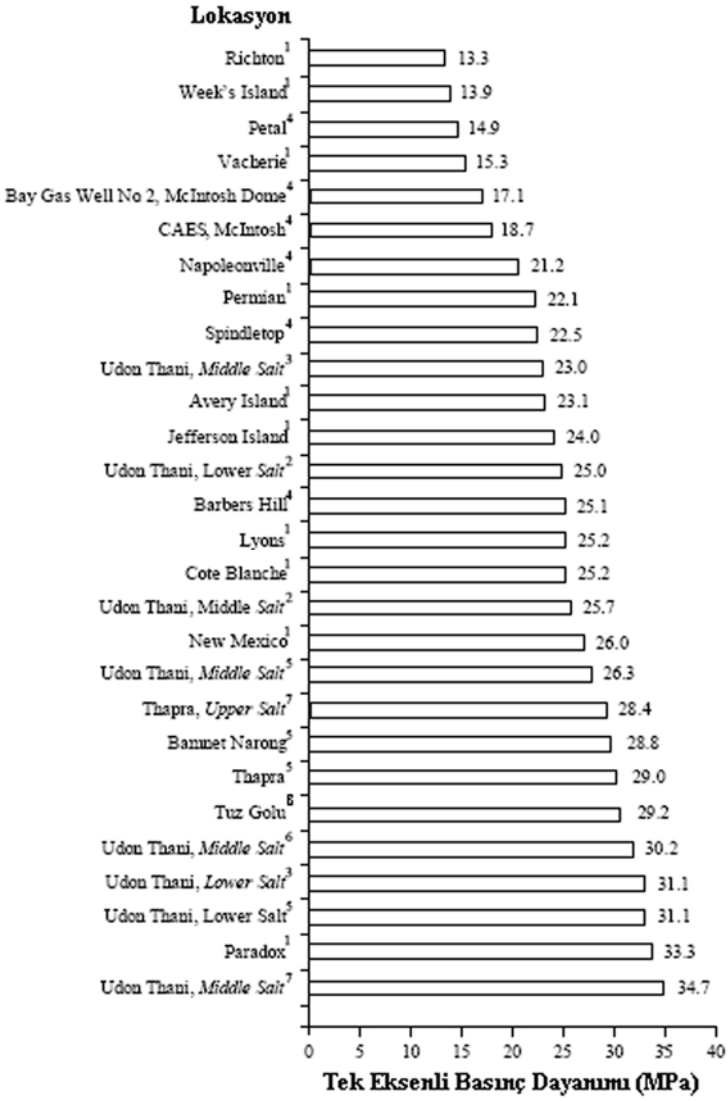


Şekil 2.24. Bazı araştırmacılar tarafından tek eksenli basınç dayanımı değerinin porozite ile ilişkilendirilmesi (Jeremic, 1994)

Şekil 2.25'de değişik tuz kaynaklarından elde edilen tuz örnekleri için tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırmalı değerleri grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 2.25'den de görüleceği üzere Fuenkajorn (2005) tarafından Tuz Gölü'nden elde edilen örneğin tek eksenli basınç dayanımı değeri 29,2 MPa ile dayanım değeri yüksek olan örnekler arasındadır. Aynı şekilde en düşük basınç dayanımı Hansen ve ark. (1984) tarafından belirlenen Richton kaya tuzu örneğinde 13,3 MPa olarak tespit edilirken en yüksek basınç dayanımı değeri Jandakaew (2003) tarafından Udon Thani orta tabaka kaya tuzunda 34,7 MPa olarak belirlenmiştir.

Petrografik yapılara dayanan çalışmalar ile elde edilen tuz karakterizasyonu ile dayanımın değişkenliği arasında bir korelasyon olmadığı görülmüştür. Ancak tek

eksenli basınç dayanımının yataklanmış tuzda tuz domuna göre ortalama % 20 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde çekme dayanımı da yataklanmış tuzda tuz domundan % 10 daha yüksektir (Fuenkajorn, 2005).



Hansen ve ark., 1984[1], Boontongloan, 2000[2], Wetchasat, 2002[3], DeVries ve ark., 2002[4], Fuenkajorn ve Jandakaew, 2003[5], Phueakphum, 2003[6], Jandakaew, 2003[7], Fuenkajorn, 2005[8]

Şekil 2.25. Değişik kaynaklarından elde edilen tuz örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri (Fuenkajorn, 2005)

2.7.1.2. Üç eksenli basınç dayanımı

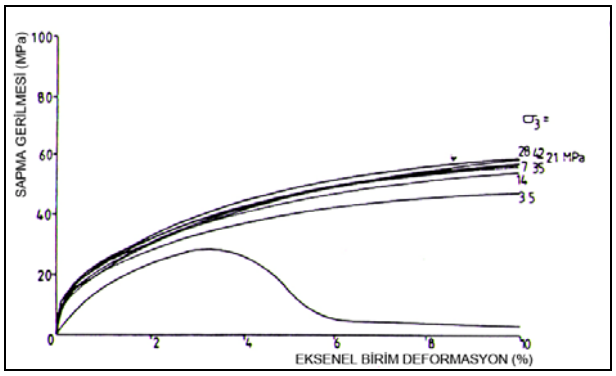
Deney sonuçları, oda sıcaklığında kısa süreli yüklemeler ile gerçekleştirilen kuasi-statik olarak adlandırılan üç eksenli basınç deneyleri ve petrografik çalışmalar sonucunda elde edilmektedir. Deneyler değişik sabit eksenel basınç farklarının kaya tuzu numunelerine uygulanması yoluyla gerçekleştirilir. Hansen ve Senseny (1983), yapmış oldukları çalışmada doğal kaya tuzunun deformasyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla ABD'deki farklı bölgelerden elde ettikleri on ayrı kaya tuzu numunesi üzerinde gerilme-birim deformasyon değerleri elde etmişlerdir. Bu numuneler üzerinde üç eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmişler ve sonuçta nihai dayanım ve sünme davranışının artan basınçla arttığını belirlemişlerdir. Ancak bu etkinin orantılı olmadığını gözlemlemişlerdir. Örneğin 1,7 MPa'lık bir yanal basınç nihai dayanımı % 65 artırmıştır. 20,7 MPa'lık bir yanal basınç ise nihai dayanımı % 53 oranında artırmıştır. Aynı zamanda sünme malzeme davranışı da artan yanal basınç ile artış göstermiştir.

Kaya tuzunun diğer bir karakteristik özelliği sünme dayanımının gerçekte sıfır olmasıdır. Başlangıçta çok küçük birim deformasyon ve gerilmelerde dahi deformasyon doğrusal elastik değildir, yani zamana bağlı deformasyon mevcuttur. Başlangıçtaki konkav artan eğrinin artan eğilimi muhtemelen çatlak oluşumu ve tanecikler arası kapanımdan dolayıdır. % 0,1'lik birim deformasyonlarda deformasyon yaklaşık doğrusaldır, yani yarı elastik ve yarı zamana bağlıdır. Ancak elastik veya deformasyon özelliklerin gerçek ölçümü sadece yükleme boşaltma deneyleri ile yapılabilir. Zamana bağlı olan yükleme boşaltma döngülerinde, maksimum dayanımın % 90'ından daha düşük sabit uygulanan yüklerde, örneklerde iyileşme veya sünme oluşmamıştır. Nihai dayanım değerleri gerilme-birim deformasyon eğrilerinden elde edilmiş ve bu veriler yardımıyla Mohr diyagramları oluşturulmuştur. Sonuç olarak nihai makaslama gerilmeleri en yüksek basınç dayanımında yaklaşık 30 MPa'a yükselmiştir. Elde edilen tek eksenli basınç dayanımı ve dolaylı çekme dayanımı değerleri ile Eşitlik 2.7 ve 2.8'deki yenilme kriteri oluşturulmuştur:

1. Lineer Mohr-Coulomb yenilme zarfı: $\tau = S_0 + \sigma \tan\phi$ (2.7)
2. Parabolik Mohr yenilme zarfı: $\tau^2 = 4B(\sigma + \sigma_0)$ (2.8)

Üç eksenli basınç dayanımı deneyi ile belirlenen kohezyon (C, S_o) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) parametreleri ayrıca tek eksenli basınç dayanım ve dolaylı çekme dayanımı deneyleri ile de belirlenebilmektedir. Sonuç olarak makaslama dayanımı değerlerinin gerilme arttıkça arttığı bulunmuştur. En yüksek normal gerilme değerlerinde makaslama dayanımının genellikle yaklaşık 30 MPa değerlerinde olduğu görülmüştür (Jeremic, 1994).

Üç eksenli basınç dayanımı konusunda yaptıkları bir çalışmada Price ve Farmer (1980) 75 mm çaplı ve 150 mm boyundaki kaya tuzu örneklerinde $2{,}1x10^{-5}sn^{-1}$ sabit birim deformasyon oranında üç eksenli sünme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler; yüksek derecede eksenel ve yanal basınç uygulanabilmesi için tasarlanan bir hücre içinde en düşük 0 MPa ve en yüksek 42 MPa basınçlarında gerçekleştirmişlerdir. Örneklerdeki genleşme miktarını oluşturdukları sistemde yer değiştiren yağ hacmi ile belirlemişlerdir. Sonuçları ise Şekil 2.26'da görüldüğü gibi sapma gerilmesine karşı eksenel birim deformasyon grafikleri ile sunmuşlardır. Grafikten de görüldüğü üzere birim deformasyonda birincil sünme aşamasından ikincil sünme aşamasına tamamen geçişin 3,5 MPa ve üzeri basınçlarda gerçekleştiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.26. $2{,}1x10^{-5}sn^{-1}$ sabit birim deformasyon oranında gerçekleştirilen üç eksenli sünme deneyleri sapma gerilmesi (σ_1-σ_3)-eksenel birim deformasyon grafiği (Price ve Farmer, 1980)

2.7.1.3. Çekme Dayanımı

Tuz numunelerinin çekme dayanımı, genellikle dolaylı çekme dayanımını belirleyen Brazilian çekme dayanımı deneyi ile elde edilir. Bu yöntem, dolaylı bir deney metodudur ve silindir şeklindeki bir kaya tuzu numunesinin çap ekseni doğrultusunda yük uygulanır. Yükleme oranı 0,005 ve 0,007 MPa/saniye aralığındadır. Bu oranda çatlak oluşumu ve yayılımı kolaylıkla gözlemlenebilir. Brazilian deneyi ile dolaylı olarak elde edilen çekme dayanımı değeri direkt çekme deneyi ile elde edilen değerden bir miktar farklıdır, bu farklılık deney prosedürü ve tuzun doğasından kaynaklanmaktadır (Jeremic, 1994).

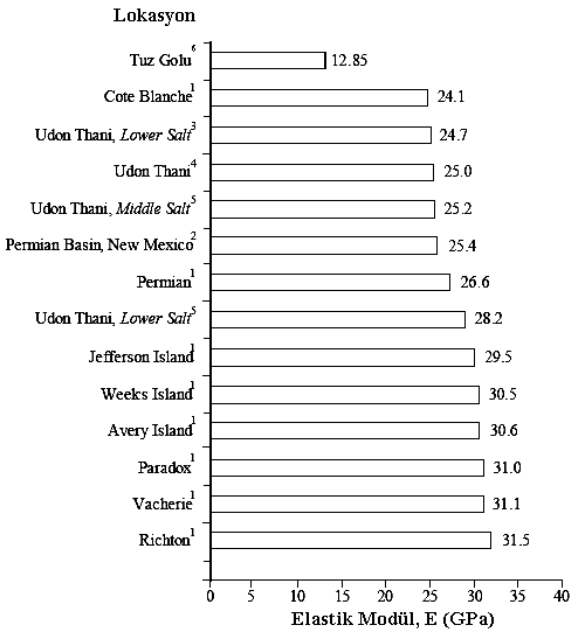
Kelsall ve Nelson (1983) kaya tuzu üzerinde yaptıkları çalışmada çekme dayanımı değeri olarak 0,2 MPa'dan 3 MPa üzerine kadar değişen değerler elde etmişlerdir. Tek eksenli basınç dayanımı değerlerini ortalama 23 MPa olarak tespit etmişler ve bu değerlerin az bir aralıkta değiştiğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında tuzda tek eksenli basınç dayanımının çekme dayanımına oranının tipik olarak 20'den fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında bu oran gevrek kayaçlarda tipik olarak 10'dur. Sonuç olarak tuzların gevrek kayaçlara oranla düşük çekme dayanımına sahip olmasının nedeni tuzun mekanik davranışının petrografik yapı ve cevher yapısına bağlı olarak çok büyük farklılıklar gösterebilmesidir.

2.7.1.4. Elastik Parametreler

Hansen ve ark. (1984) on ayrı doğal kaya tuzu numunesi üzerinde yapmış oldukları çalışmada elastisite modülü değerlerinin önemli oranda değişmediğini tespit etmişlerdir. Elastik parametreler, kuasi-statik üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden elde edilmiştir. Uygulanan yükleme-boşaltma deneylerinden Young modülü ve Poisson oranı belirlenmiştir. Gerilmedeki artış, Young modülünü artırma ve Poisson oranını düşürme eğilimi göstermiştir ancak bu eğilim, tam anlamıyla belirlenememiştir. Dolayısıyla herhangi bir gerilme etkisi göz ardı edilmiş ve Young modülü ile Poisson oranının ortalama değerleri hesaplanmıştır. Elastik modül

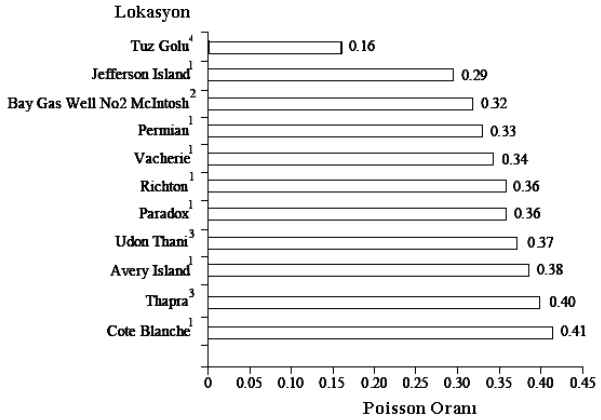
değerlerinin ortalaması 30 GPa olmak üzere 26,6-31,5 GPa arasında değişmektedir. Benzer şekilde Poisson oranı, ortalama 0,35 olmak üzere 0,29-0,38 aralığında değişmektedir. Elastik parametrelerin petrografik çeşitliliğe dayalı olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak elastik parametreler, farklı sahalar için çok ciddi boyutta değişiklik göstermemiştir. Dayanım değeri özellikle düşük gerilmelerde büyük değişimler sergilemiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre petrografik içerikten daha çok tuzun içsel yapısının dayanımı etkilediği tespit edilmiştir (Hansen ve ark., 1984).

Şekil 2.27 ve 2.28'de farklı araştırmacıların tuz örneklerinden elde ettikleri elastik modül ve Poisson oranı değerleri sırasıyla grafiksel olarak gösterilmiştir. Elastik modül değerlerinde en düşük değer Fuenkajorn (2005) tarafından Tuz Gölü örneğinde 12,85 GPa ve en yüksek değer Hansen ve ark. (1984) tarafından Richton kaya tuzu örneğinde 31,5 GPa değerinde bulunmuştur. Yine değişik kaya tuzu örnekleri üzerinde yapılan deneyler sonucu belirlenen Poisson oranlarında ise en düşük değer Fuenkajorn (2005) tarafından 0,16 olarak bulunurken en yüksek Poisson oranı Hansen ve ark. (1984) tarafından Cote Blanche örneğinde 0,41 olarak elde edilmiştir.



(Hansen ve ark., 1984[1], Fuenkajorn ve Daeman, 1988[2]; Wetchasat, 2002[3]; Fuenkajorn ve Jandakaew, 2003[4], Jankakaew, 2003[5], Fuenkajorn, 2005[6])

Şekil 2.27. Değişik kaynaklarından elde edilen tuz örneklerinin elastik modül değerleri (Fuenkajorn, 2005)



(Hansen ve ark.,1984[1], Fuenkajorn ve Daeman, 1988[2], Wetchasat, 2002[3], Fuenkajorn ve Jandakaew, 2003[4], Jankakaew, 2003[5], Fuenkajorn, 2005[6])

Şekil 2.28. Değişik kaynaklarından elde edilen tuz örneklerinin Poisson oranı değerleri (Fuenkajorn, 2005)

2.7.2 Kaya tuzunun uzun dönemli mekanik özellikleri

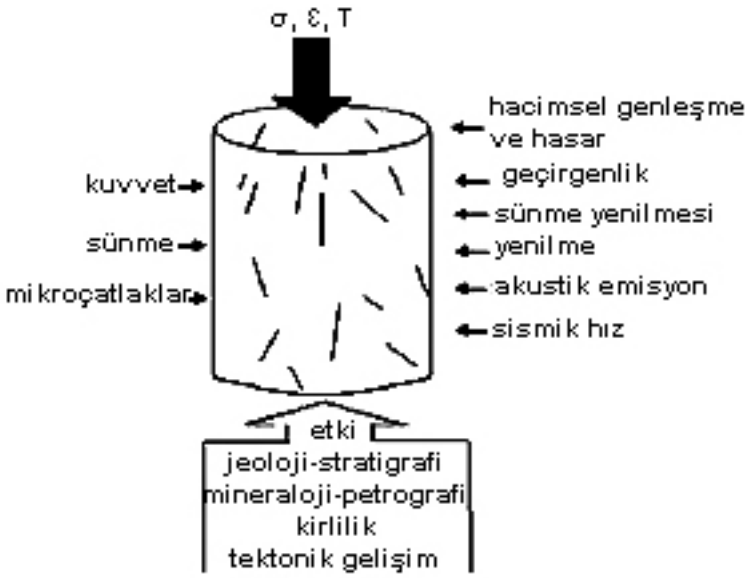
Kaya tuzu sünme davranışı özelliklerinin karmaşıklığı ve çeşitliliği zamana bağlı deformasyonlar ile gözlenmektedir. Bu özellikler maden tasarımı ve arazi kontrolünde çok büyük öneme sahiptir. Kaya tuzunda sünme davranışının mekanizması ve çözümlemeli açıklaması tam olarak anlaşılamamıştır (Jeremic, 1994).

Kaya tuzu alanında yapılan araştırmalar incelendiğinde, son yıllarda kaya tuzunun mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmaların ağırlıklı olarak nükleer atık deposu, madencilik, hidrokarbonların depolanması ve kaya tuzundaki petrol kuyularının sünme davranışı konularında yoğunlaştığı görülmektedir. Günümüzde, dünyada kaya tuzu mekaniği araştırmaları, çoğu mühendislik uygulamalarında oldukça önemli hale gelmiş ve kaya tuzu mekaniği, mekanik biliminin bir dalı olmuştur (Yang, 2000).

Yeraltında tuz yataklarında açılan boşlukların tasarımı yapılırken uzun süre şeklini ve sağlamlığını temin edecek şekilde tasarlanmalıdır. Kaya tuzu için standart laboratuar deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri genelde 10-40 MPa arasında değişmektedir. Çekme dayanımı ise genelde 1,5 MPa'dan

küçüktür. Langer (1984)'e göre, kaya tuzu birimleri için çekme dayanımları nispeten düşüktür. Bu nedenle açıklıklar çevresinde yenilme bölgelerinin önlenmesi veya sınırlandırılması gerekmektedir ve çekme bölgelerinin oluşumu, mümkün olduğunca sınırlandırılmalıdır. Bu tasarım ve parametreler, Türk standartlarının "Tuz yataklarında çözme suretiyle oluşturulan boşluklarda depolama için fonksiyonel kurallar" bölümünde standarda bağlanmıştır (TSE, 2001). Tuz formasyonunun zamanla hareketinden kaynaklanan hacim kaybı (daralma), boşluk duvarında ve tabanındaki şekil bozukluğunun dağılımı, boşluğun çevreleyen kayaçlar üzerinde sebep olduğu gerilmenin dağılımı, mühendislik tasarımında dikkate alınması ve hesaplanması gereken temel mekanik olaylardır (Özkan ve Düzyol, 2004). Tuz domları veya tuz yataklarındaki maden ve boşlukların atık depolanması için olası kullanımı, tuz üzerindeki yoğun araştırmaları beraberinde getirmiştir. Bunlar mekanik davranış ve geçirgenlik analizleridir (Hardy ve Langer, 1993, Aubertin ve Hardy, 1996).

Yeraltında kaya tuzunda açılacak bir boşluğun kısa ve uzun dönemde davranışının tahminine yönelik analizlerde, Hunsche ve Hampel (1999)'e göre Şekil 2.29'da sunulan parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunlar sırasıyla; açıklığın zamana bağlı konverjansı, kuvvet değişimleri, sıcaklık değişimleri, hacimsel genleşme (dilatancy) ve iyileşme (healing), yenilme (failure) ve sünme (creep) gelişimi ve geçirgenliğin değişimidir (Özkan ve Düzyol, 2004). Tuz formasyonlarının depolamalarda tercih edilmesinin nedenlerinden en önemlisi bakir kaya tuzunun pratikte geçirimsiz sayılabileceği ve oluşan çatlakların iyileşebilme (kapanabilme) potansiyelinin olmasıdır. Sünme deformasyonu süreksizliklerin kapanmasıyla sonuçlanabilir. Bu nedenle yerinde ve laboratuar deneylerinde, yeraltı boşluklarındaki güvenlik analizleri genelde sünme deformasyonunun araştırılması ve açıklanması üzerinde yoğunlaşmıştır (Cristescu ve Hunsche, 1998).

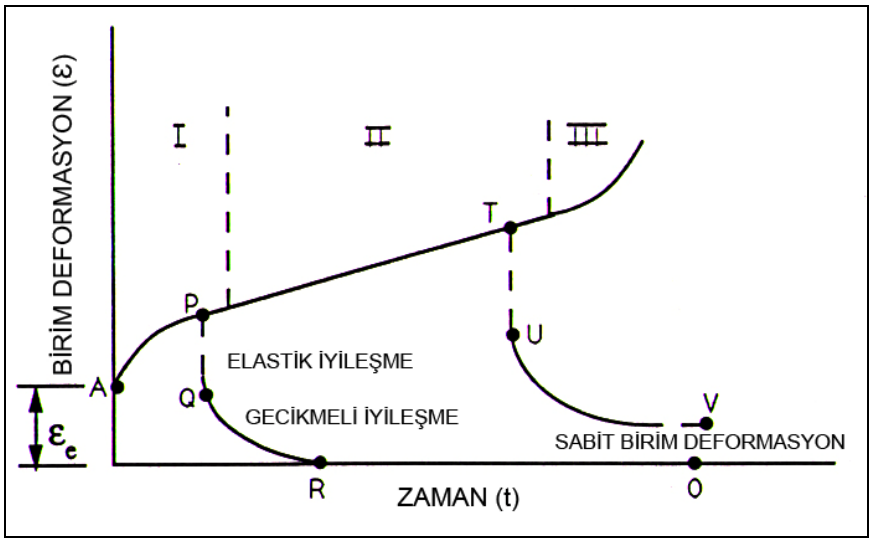


Şekil 2.29. Kaya tuzunda gerçekleştirilmiş mühendislik yapılarına etki eden parametreler (Hunsche ve Hampel, 1999)

2.7.2.1 Sünme davranışı

Genel anlamda sünme, sabit yük altında zamana bağlı deformasyon olarak tanımlanır. Kaya tuzunun sahip olduğu mekanik özellikler arasında gösterdiği sünme (creep) davranışının önemi büyüktür. Sünme genel anlamda katı malzemelerin sabit gerilme altında zamana bağlı olarak deformasyona uğraması şeklinde açıklanmaktadır (Langer, 1986). Sabit gerilme altında zamana bağlı sünme davranışı için genelleştirilmiş birim deformasyon-zaman grafiği Şekil 2.30'da verilmiştir. Şekil 2.30'da gösterildiği gibi zamana bağlı sünme davranışı başlıca üç aşamada incelenmektedir (Yüzer ve Vardar, 1986, Hunsche ve Schulze, 1994, Wittke, 1996, Menzel ve Minkley, 1999). Madde üzerine sabit bir yük uygulandığında ani bir elastik birim deformasyon ε_e meydana gelmektedir. Elastik birim deformasyon, şekilde gösterilen birinci bölgede birincil veya başka bir deyişle geçici tabir edilen bir birim deformasyonla devam eder. Hemen hemen sabit bir eğimde devam eden ikinci bölge ikincil veya diğer bir deyişle sabit sünme aşaması olarak adlandırılır.

Üçüncül veya diğer bir deyişle hızlanan ve son sünme aşaması ani bir yenilmeye işaret eder.



Şekil 2.30. Sünme deformasyonunun zamanın fonksiyonu olarak modeli (Jeremic, 1994)

Bu aşamalar birincil, ikincil ve üçüncül sünme olarak adlandırılmaktadır. Ortamda etkili olan sabit gerilmenin artması veya azalmasıyla sünme eğrisi de değişim göstermektedir (Yüzer ve Vardar, 1986, Wittke, 1996).

Birincil aşamada birim deformasyon sertleşmesi (Strain hardening) ile yumuşaması (Strain softening) bir denge içinde bulunmamaktadır. Bu aşamada genelde sünme hızı azalmaktadır ve bu durumda ağırlıklı olarak birim deformasyon sertleşmesinin payı vardır (Menzel ve Minkley, 1999). Bu aşama geçiş aşaması olarak da adlandırılmaktadır. Sünme hızının sabit bir değere yaklaşmasıyla ikinci aşama başlamaktadır. Bu aşamada birim deformasyon sertleşmesiyle yumuşaması dinamik denge halindedir ve sabit gerilme altında sünme hızı yaklaşık olarak sabit bir değer almaktadır (Menzel ve Minkley, 1999). Üçüncül sünme aşamasına geçiş ile kaya tuzunun yenilme öncesi deformasyon durumuna ulaştığı bilinmektedir (Yüzer ve Vardar, 1986). Dolayısıyla ikincil sünmeden üçüncül sünme aşamasına geçiş bir çeşit kaya tuzunun uzun süreli dayanımının aşılması ve duraysız çatlak ilerlemesinin

başlangıcını simgelemektedir (Langer, 1986). Bu aşamada kaya tuzunda oluşan hasarların (çatlak vb.), tuzun uzun süreli geçirimsizliğinin muhafazası açısından çok önemli olan yeniden kristalleşme ve iyileşme özelliğinden daha hızlı gelişmesi nedeniyle kalıcı olduğu kabul edilmektedir (Menzel ve Minkley, 1999). Kaya tuzunda sünme davranışı ve diğer etkenler sayesinde açıklık çevresinde tuz kütlesinde olabilen çatlakların, belirli sınırlar dahilinde kendiliğinden iyileşmesi de söz konusu olmaktadır. Böylece yeraltı açıklıkları çevresinde oluşan deformasyonlar sonucunda geçirgenliği artmış olan bölgelerde geçirgenliğin zamanla yeniden bakir durumdaki değerlere yaklaşması olanaklı olmaktadır (Langer, 1986). Üçüncül aşamanın devamında sünme oranı hızla artmakta ve sonunda kaya tuzu numunesi yenilmektedir (Yüzer ve Vardar, 1986).

Tuz yatakları içerisinde yer alan tuz birimlerinde oluşturulan yeraltı açıklık çevresinin uzun süreli deformasyon davranışlarının incelenmesinde, genelde ikincil sünme aşamasının hakim olduğu görülmektedir (Hunsche ve Schulze, 1994). Kaya tuzları ile ilgili deneysel laboratuar çalışmaları ve yeraltında gerçek ortam koşulları altındaki yerinde araştırma çalışmalarından faydalanılarak sünme davranışı matematiksel bağıntılar ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda çalışmaların önemli bir kısmı en önemli ve en uzun aşamayı temsil eden ikincil sünme aşaması üzerinde yoğunlaşmaktadır (Hunsche ve Schulze, 1994). Geliştirilen matematiksel bağıntılar ile ikincil sünme hızı (ε_s), etkili gerilme (σ) ve ortam sıcaklığının (T) işlevi şeklinde açıklanmaktadır.

Kaya tuzunun sabit yük altında zamana bağlı deformasyonu, viskoelastik bir olay olarak karakterize edilir. Bu koşullar altında birim deformasyon ölçütleri tasarım amaçları için dayanım ölçütlerinden daha önemlidir. Çünkü yenilme sabit uygulanan yük altında genelde sünmenin üçüncü aşamasında gerçekleşmektedir. Viskoelastik kayaçlarda uygun güvenlik faktörü ile oluşturulması, planlanan topuğun boyutları uzun dönemli birim deformasyonların tahmini sonucunda belirlenebilir (Jeremic, 1994).

Laboratuar çalışmaları, P noktasında uygulanan yükün sünmenin birinci aşamada kaldırılmasının birim deformasyonu Q noktasına getireceğini, ardından da asimptot olarak R noktasında sıfıra indiğini göstermiştir. PQ aralığı elastik birim deformasyona eşittir. Eğer yükün kaldırılması ikinci sünme aşamasındaki T

noktasına isabet ederse, birinci sünme aşamasındaki gibi birim deformasyon sıfıra inmeyerek V noktasına inecek ve ardından sabit bir karakterde devam edecektir (Jeremic, 1994).

2.7.2.1.1. Sünmenin analitik ifadesi

Kaya tuzu, ortam koşulları altında etkili gerilmelere, sıcaklığa ve zamana bağlı doğrusal olmayan deformasyon davranışı göstermektedir. Bu zamana bağlı gerilme-birim deformasyon davranışı oldukça karmaşıktır (Hardy, 1982, Langer, 1986, Hunsche ve Schulze, 1994, Menzel ve Minkley, 1999, Lux, 2002). Bundan dolayı gerçek malzeme modellerinin oluşturulması ve gerilme-birim deformasyon değişimlerinin analitik olarak çözümlenmesinde, çok yoğun araştırmalara rağmen önemli sorunlarla karşılaşılmaktadır. Hatta benzer kaya tuzu birimleri bile içerdikleri mineral bileşenlerinin oranları, konumları, yabancı madde (kil, anhidrit vb.) içerikleri ve ortam koşullarına (gerilme, sıcaklık, nem vb.) bağlı olarak birbirinden oldukça farklı davranış özellikleri gösterebilmektedir (Hunsche ve Schulze, 1994). Bu nedenle katı tuz mekaniğinde kapalı çözümlerin uygulanması güçtür ve sorunların çözümünde yeraltında yerinde gerçekleştirilen uzun süreli gözlemler ile ölçümler ve standart laboratuar deneyleri sonuçlarına bağlı olarak geliştirilen, gerçeğe yakın malzeme davranışı yaklaşımlarından faydalanılmaktadır (Natau, 1997). Yine gerçek gözlemler ve deney verilerinden yararlanılarak, gelişmiş sayısal çözümleme yöntemleri aracılığıyla ortam koşulları benzetilmeye ve çözümlemelerde kullanılmak üzere gerçeğe yakın malzeme davranış modelleri elde edilmeye çalışılmaktadır (Özarslan ve Gerçek, 2002). Kaya tuzundaki sünme davranışı konusunda yapılan bazı temel çalışmalar ve bu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar Çizelge 2.5'de sunulmuştur.

Çizelge 2.5. Kaya tuzu sünme davranışı üzerinde temel teşkil eden bazı çalışmalar ve bu çalışmaları gerçekleştiren araştırmacılar

Araştırmacı	**Çalışma Konusu**
Stocke ve Horchert (1936)	2,5-29 MPa arasında değişen asal gerilmelerle iki saatlik sünme (creep) deneyleri ve ilk sınırlandırılmamış basınç deneyini gerçekleştirmişlerdir.
Le Comte (1965)	Tek bir kristalin 3,45-27,6 MPa gerilemeler altındaki davranışını ve sıcaklığın çok kristalli tuzlardaki sünme üzerindeki etkisini oda sıcaklığından 198^{o}C'ye kadar geniş bir aralıkta inceleyen ilk araştırmacı olmuştur.
Heard (1972)	Çeşitli yükleme koşullarında 200 MPa altında çok kristalli tuzu anlamayı pekiştiren ilk önemli deneyleri yapmıştır.
Dreyer (1972)	Tuz madenciliğinde özellikle topukların davranışı için kaya tuzlarındaki gerilmeler üzerindeki deneysel çalışmaları gerçekleştirmiştir.
Wawersik ve Hannum (1980) ve Hansen ve Mellegard (1980)	ABD WIPP (Waste Isolation Pilot Project) programı için 3,45-41,4 MPa arasındaki gerilmeler ve oda sıcaklığından 400^{o}C'ye kadarki sıcaklıklarda oldukça fazla sayıda gerilme-birim deformasyon ve sünme verilerinden oluşan bir veri tabanı hazırlamışlar ve analizler yapmışlardır.
Lux ve Heusermann (1983)	Asse tuz madeninde üç eksenli sünme çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Haupt (1991) yapmış olduğu sünme çalışmalarında sünme davranışının belirlenmesi için yük artırma-yük boşaltma deneylerinin kullanılmasını önermişlerdir.
Stormont ve Daemen (1990)	Tek eksenli ve üç eksenli basınç dayanımı deneyleriyle birlikte kaya tuzunun geçirgenliğini çalışmışlardır.
Hunsche (1993)	Kaya tuzunun zamana bağlı özellikleri üzerinde nemin etkisini incelemiştir.
Munson (1997)	Yeraltında kaya tuzunda açılacak bir boşluğun geometrisi ve kapanım şartları için gerekli parametreleri ve sünme davranışını incelemiş ve bir model geliştirmiştir.
Weidinger ve ark (1997)	Yeraltında kaya tuzunda depolama amaçlı açılacak bir boşluğun güvenlik parametrelerini ve kaya tuzunun sünme davranışını incelemişlerdir.
Leite (1998) ve Assis (1990)	Kalın duvarlı kaya tuzu silindirlerinde sünme davranışını ve kuvvet yayılımını araştırmışlardır.
Hunsche ve Hampel (1999)	Kaya tuzunun sünme davranışını tanımlamak amacıyla 30-250^{o}C'de, 1,7-40 MPa gerilmeler altında tek eksenli ve üç eksenli basınç dayanımı deneyleri yapmış ve bir model geliştirmişlerdir.

Çizelge 2.5 devam ediyor

Araştırmacı	Çalışma Konusu
Kwon ve Wilson (1999)	Kaya tuzunun zamana bağlı özelliklerini ve etkili parametreleri inceleyerek yeraltı WIPP (Waste Isolation Pilot Project)'de kaya tuzunun davranışını incelemişlerdir.
Yang ve ark (1999)	Tek eksenli ve üç eksenli deneyleri vasıtasıyla basıncın kaya tuzunun zamana bağlı gerilme-birim deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini ve sünme davranışını incelemişlerdir.
Flimonov ve ark (2001)	Kaya tuzunun üç eksenli basınç altındaki gerilmeleri değiştirerek farklı yükleme koşullarında hafıza etkisini incelemişlerdir.
Slizowski ve ark (2003)	Kaya tuzunun yapısal karakteristiğini araştırmışlardır. Araştırmacılar kaya tuzu ve tuzlu çamur taşı arasında bir karşılaştırma yaparak tuzlu çamur taşlarının da radyoaktif atıklar için uygun ana kaya olabileceklerini söylemişlerdir.

Hansen ve Carter (1981) birçok analitik ifadeyi inceleyerek kaya tuzunun sünme davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuşlardır. Kelsall ve Nelson (1983) tarafından belirtildiği gibi sünme birim deformasyonu, oldukça faklı tipleri ve büyüklüklerine işaret eden birçok farklı ifade kullanılmıştır. Birincil ve ikincil sünmeyi en iyi şekilde temsil eden ifade Eşitlik 2.9'da verilmiştir.

$$\varepsilon = e_t[1 - \exp(-rt)] + \varepsilon_s t \tag{2.9}$$

Burada;

ε : Toplam sünme birim deformasyonu
e_t ve r : Uygun deneysel parametreler
t : Zaman
ε_s : İkincil sünme oranı

Sünme oranındaki zamana bağlı düşüşü tahmin eden birinci terim, birincil sünmeyi temsil eder. Sabit sünme oranını tahmin eden (sabit gerilim ve sıcaklık altında) ikinci terim de ikincil sünmeyi ifade eder. İkincil sünme oranı Eşitlik 2.10'da tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_s = A\sigma^n \exp[-Q/RT] \quad (2.10)$$

Burada;

A, Q ve n: Uygun deneysel parametreler
σ : Normal gerilme
T : Mutlak sıcaklık (^oK)
R : Gaz sabiti (Joule/mol x K)

Diğer bazı araştırmacılar tarafından geliştirilen denklemler Çizelge 2.6'da sunulmuştur. Yang ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada bir takım tek eksenli ve üç eksenli sünme test sonuçlarına dayanarak kaya tuzundaki zamana bağlı gerilme-birim deformasyon davranışı üzerindeki yanal ve eksenel basınç etkisini incelemişlerdir. Birincil sünme aşamasından ikincil sünme aşamasına geçişi modellerken üstsel bir fonksiyon önermişler ve bu modelin sünme birim-deformasyonuna iyi uyduğunu görmüşlerdir. Birim deformasyon etkilerini detaylı bir şekilde araştıran yazarlar, geliştirdikleri fonksiyonları kullanarak hesapladıkları değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, birincil sünmeden ikincil sünmeye geçişte zamana bağlı sünme birim deformasyonunu modelleyen Eşitlik 2.11'de verilen üstsel formülü bulmuşlardır:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{SS} + A \times \exp[(t_0 - t)/\beta] \quad (2.11)$$

burada $\dot{\varepsilon}$, toplam sünme birim deformasyon oranı, $\dot{\varepsilon}_{ss}$ ise ikincil sünme aşaması oranı, t_0 referans zamanı, A ve β da materyal sabitleridir.

İkincil sünme aşamasındaki zamana bağımlı birim deformasyon oranı sapma gerilmesi arttıkça artmakta fakat yanal basınç arttıkça düşmektedir. İkincil sünme aşamasındaki birim deformasyon oranı ve yanal basınç arasındaki ilişki Eşitlik 2.12'de verilmiştir:

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = B \times \exp(-np) \quad (2.12)$$

burada B ve n sabitlerdir. İkincil sünme aşamasındaki birim deformasyon oranı ile sapma gerilimi arasındaki ilişki Eşitlik 2.13'deki üstsel fonksiyon şeklindedir:

$$\dot{\varepsilon}_{SS,n} = C \times q^m \quad (2.13)$$

buradaki C ve m iki ayrı sabit olarak alınmıştır. Bu iki formül birleştirilerek ikincil sünme aşamasındaki birim deformasyon oranı ile yanal basınç ve sapma gerilmesi arasındaki ilişkiyi Eşitlik 2.14'de verilen şekilde bulmuşlardır:

$$\dot{\varepsilon}_{SS} = C \times \exp(-n_{ort}p) \times q^m \quad (2.14)$$

Çizelge 2.6. Bazı araştırmacılar tarafından elde edilen sünme davranışına ait denklemler

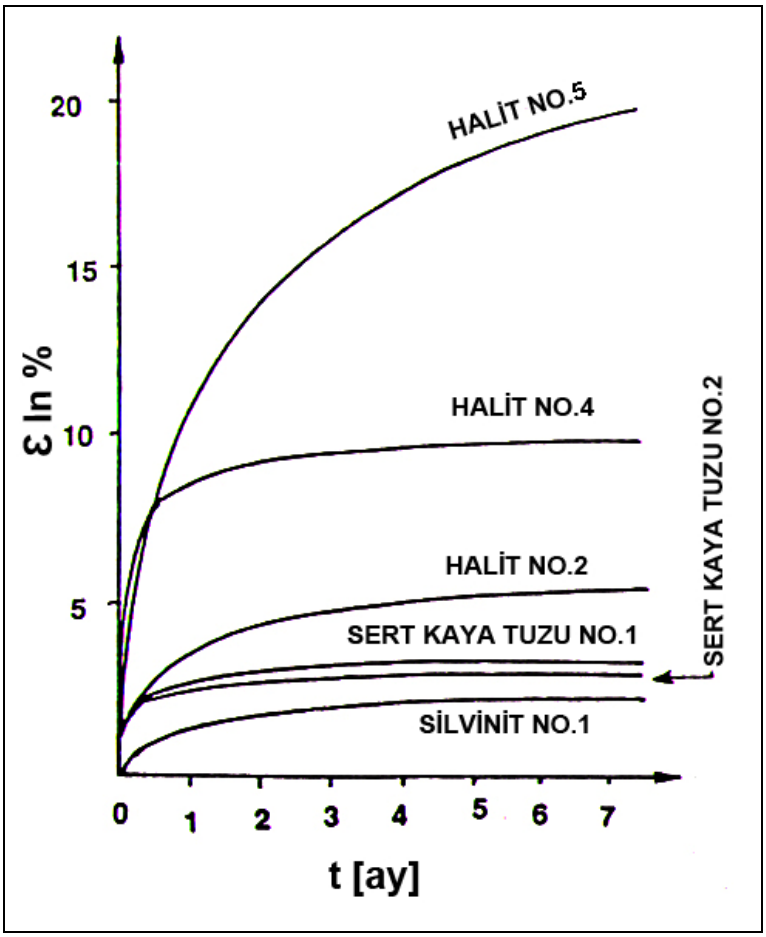
Denklem	Araştırmacı
$e = B\log t$	Philips, 1905
$e = A + B\log t + Ct$	Weaver, 1936
$\dot{e} = Bt^{-n}$	Cottrell, 1952
$\dot{\varepsilon} = C\exp(-Q_{eff}/RT)\sin(B\sigma)$	Weertman, 1957
$\dot{\varepsilon} = A\exp(Q_{eff}/RT)\sigma^{n}$	Weertman, 1957
$\varepsilon = 1{,}3x10^{-37}T^{9,5}\sigma^{3,0}t^{0,3}$	Lomenick, 1968
$\dot{\varepsilon}_s = A\exp(-Q/RT)\sigma^{N}$	Wallner ve ark., 1979
$\varepsilon = e_t\left[1-e^{-n}\right]+\dot{\varepsilon}_s t$	Hansen ve Carter, 1980
$\dot{\varepsilon} = A\sigma^{n}\exp[-Q/RT]$	Hansen ve Carter, 1980
$\dot{\varepsilon} = C\exp[-Q_{eff}/RT]\sinh(B\sigma)$	Carter, 1981
$\dot{e}_{ss} = 7{,}6.10^{-4}\exp\left(-15{,}9/RT10^{-3}\right)\sigma^{4,5}$	Carter, 1981
$\varepsilon_1 = nD\int_{-\infty}^{t}(t-T)^{m}\sigma(T)^{n-1}\frac{d\sigma}{dT}dT$	Horseman ve Passaris, 1981
$\dot{\varepsilon}_{ss} = B\sigma^{r}\exp(-Q/RT)$	Senseny, 1981
$\dot{\varepsilon} \approx \exp\left(-Q_{c/}RT\right)$	Eekelen, Hulsebos ve Urai, 1981
$\dot{\varepsilon}^{I} = k_T\left(1-\frac{W(t)}{H(\sigma)}\right)\{\frac{\partial F}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial\sigma}+\frac{\partial F}{\partial\tau}\frac{\partial\tau}{\partial\tau}\}$	Jin ve Cristescu, 1998
$\varepsilon_e^{c} = (\frac{\dot{\varepsilon}}{b})(\frac{\sigma_e}{\sigma_c})t^{b}$	Leite ve ark., 1998
$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{SS} + A\times\exp[(t_0-t)/\beta]$ $\dot{\varepsilon}_{SS} = B\times\exp(-np)$ $\dot{\varepsilon}_{SS,n} = C\times q^{m}$ $\dot{\varepsilon}_{SS} = C\times\exp(-n_{ort}p)\times q^{m}$ $\dot{\varepsilon}_{ss} = 8{,}67x10^{-17}\exp(-0{,}441p)q^{6,772}$	Yang ve ark., 1999
$\dot{\varepsilon}^{vp} = \eta_s(T)\left(\sigma^{eq}\right)^{n}\frac{\partial\sigma^{eq}}{\partial\sigma}$	Cosenza ve Ghoreychi, 1999
$\dot{\varepsilon} = 10^{-6}\frac{\sigma^{\beta-1}}{K^{\beta}}\frac{d}{dt}\int_{-\infty}^{t}\frac{d\sigma}{d\tau}(t-\tau)^{\alpha}dt$	Berest ve ark., 1999
$\dot{V}_{creep}/V = -B(T_a)(P_R-P_C)^{n}$	
$\dot{\varepsilon}^{cr} = \partial\left(\frac{q+\delta(p-p_0)}{k}\right)^{N}\gamma^{cr-\frac{N}{M}}$	Grgic ve ark., 2003
$\varepsilon_d = A\left[1-e^{-t/86400}\right]\left[1+\left(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{B}\right)^{C}\right]+\varepsilon_e$	Özkan ve Düzyol, 2004
$\varepsilon_{ss} = \left(\alpha-\alpha_g+\beta/F\right)x\Delta T+\dot{\varepsilon}xt$	Ma ve Daemen, 2006

2.7.2.1.2. Sünme deneylerinde karşılaşılan farklılıkların nedenleri

Tuzların sünme özellikleri, büyük ölçüde yumuşak veya sert yan minerallerden çok fazla etkilenmektedir. Tuz yataklarındaki benzer tipteki kaya tuzlarının değişik sünme davranışı göstermesinin nedeni budur (Jeremic, 1994).

Kelsall ve Nelson (1983), eşit gerilme ve sıcaklık koşullarında ABD'deki farklı kaya tuzu yataklarında zamana bağımlı birim deformasyon oranındaki farklılığın büyüklük olarak 2 kata kadar olabileceğini belirtmişlerdir. Ortalama sünme oranlarının bölgeler arasında oldukça fazla değişmesine karşın bir bütün olarak veriler aynı geniş bant içinde yer almakta olduğunu belirlemişlerdir. Bu da bütün bölgelerin sünme oranında büyük bir değişim sergileyip sergilemedikleri sorusunu ortaya çıkarmaktadır ki bu soru da sadece ek deneyler ile yanıtlanabilir. Bölgelerdeki sünme oranının ve tek bir bölge içindeki sünme oranının farklılığının nedeni net değildir. Muhtemelen bu farklılık örneklerin doğasında var olan farklılığı yansıtmaktadır. Aynı zamanda test tekniğindeki farklılıklar da etkili olabilir. Fakat yapı ya da kirliliklerin doğası veya derecesi gibi faktörler arasında herhangi bir korelasyon saptanmamıştır.

Diğer bir araştırmacı Dreyer (1973), değişik kaya tuzu tiplerinde sabit eksenel yük altında gerçekleştirdiği sünme deneylerinden elde ettiği sonuçlara göre yaşlı kaya tuzlarının birim deformasyon sertleşmesi veya pekleşmesi (strain hardening) ve yüksek anhidrit içeriğine bağlı olarak daha yüksek dayanıma sahip olduklarını tespit etmiştir. Değişik kaya tuzu örneklerinin sabit yük altındaki sünme davranışları Şekil 2.31'de görülmektedir. Sert yan mineraller ve büyük kristalli yapıların daha az bulunması Şekil 2.32'deki 5 nolu örnekte görüldüğü gibi daha yüksek miktarda bir sünek yapıya neden olmaktadır. Bu örnek birkaç yıl sonra muhtemelen 20 MPa sabit yükte asimptot birim deformasyon değerine ulaşacaktır. 1 ve 2 nolu sert kaya tuzu ve 1 nolu silvinit örneklerinde sünme yaklaşık 7,5 ay sonunda sabitleşmektedir.



Şekil 2.31. Değişik kaya tuzu örneklerinin sabit yük altındaki sünme eğrileri (Dreyer, 1973)

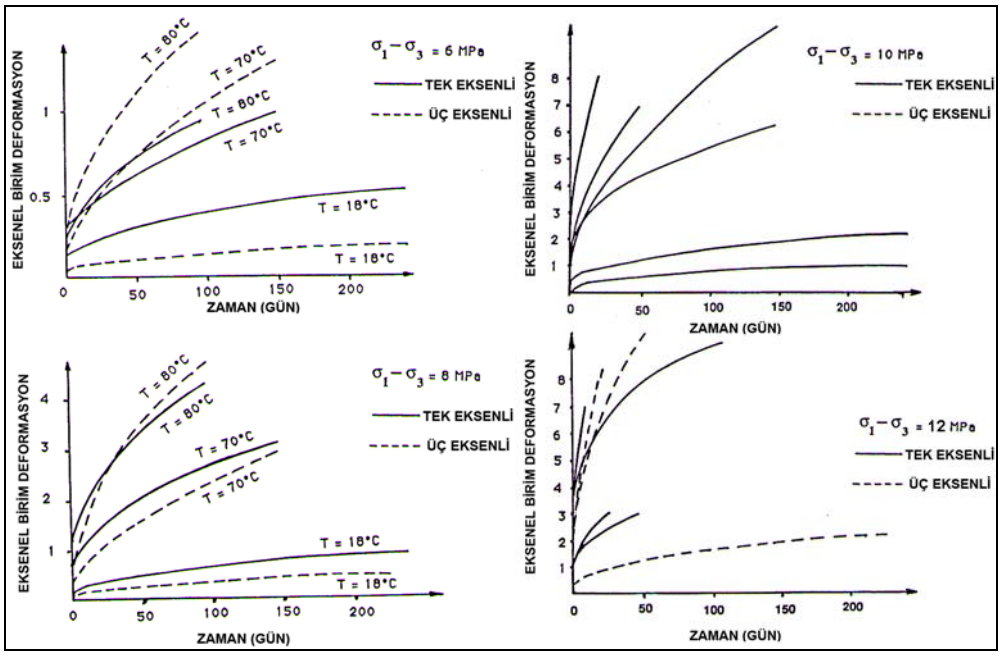
Sünme verilerindeki büyük farklılıklar ve bu verilerden çıkarılan kurallar, sünmenin uzun zamanlı tahmini söz konusu olduğunda oldukça önem kazanır. Günlerce ve haftalarca süren sünme deneyleri bazen yüzyıllar boyunca gerçekleşecek olan deformasyon davranışını tahmin etmede kullanılır. Uzun dönemli tahminleri doğrulamak için mevcutta gerçekleştirilmekte olan bu deneyler daha uzun sürelerde yapılmalıdır. Bunun yanında laboratuar ortamındaki koşulların arazi koşullarını yansıtması önemlidir. Bugüne kadar laboratuar deneyleri, analizleri ve ölçümler ile yeraltı açıklıklarındaki kapanımın tahmini konusunda bazı karşılaştırmalar yapılmıştır. Laboratuar deneylerinin sonuçları ile arazi koşullarında elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizi, arazideki tuz yapısının davranışının tahmininde yararlı sonuçlar sağlayabilecektir.

2.7.2.2. Kaya tuzunun mekanik davranışında sıcaklığın etkisi

Kaya tuzunda tehlikeli radyoaktif atıklar için açılması muhtemel yeraltı depolarındaki kaya tuzunun mekanik davranışının simüle edilebilmesi için Hansen ve Senseny (1983) 25-200^{o}C sıcaklık, 5-50 MPa eksenel gerilme, 0-20 MPa yanal gerilme şartlarında birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Gözlenen tuz deformasyonları esas olarak gerilme ve zamanın bir fonksiyonudur.

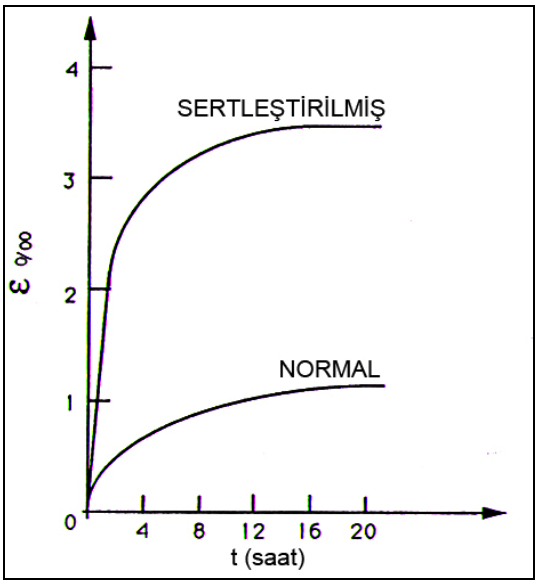
Vouille (1984) Tersanne kaya tuzu üzerinde 18-80^{o}C sıcaklık, 0-20 MPa basınç ve 6, 8, 10 ve 12 MPa sapma gerilmesi (σ_1-σ_3) altında sünme deneyleri gerçekleştirmiş (Şekil 2.32) ve aşağıdaki sonuçları elde etmiştir:

1. Sünme oranı zamanla düşmektedir ve başlangıç değeri gerçekte sonsuzdur,
2. Belirli bir sıcaklık ve basınç altında sünme birim deformasyonları ve sünme oranları sapma gerilmesi ile artmaktadır,
3. Tek eksenli veya üç eksenli belirli bir basınç altında sünme birim deformasyonları ve sünme oranları sıcaklıkla artmaktadır,
4. Basıncın etkisi daha karmaşıktır, örneğin belirli bir basınç altında 18^{o}C'deki tek eksenli basınç dayanımı testlerindeki sünme birim deformasyonları ve sünme oranları üç eksenli basınç dayanımı testlerindekinden daha büyükken, 70^{o}C'de bunun tam tersi meydana gelmektedir; 80^{o}C'de ise sapma gerilmesine bağlı olmaktadır.



Şekil 2.32. Sapma gerilmesi (σ_1-σ_3) 6, 8 ,10 ve 12 MPa için değişik sıcaklıklarda sünme eğrileri (Vouille, 1984).

Dreyer (1973), 4x4x10 cm boyutlarındaki ısıl işlemle sertleştirilmiş ve normal küp şekilli kaya tuzu örneklerinde 10 MPa sabit yükte sünme deneyleri gerçekleştirmiştir. Örnekler iri taneli, % 8 anhidrit ve % 1,5 magnezyum sülfat (kieserit-$MgSO_4(H_2O)$) ve kil içermektedir. Kaya tuzu kristalleri gevşek kenetli ve örneklerde belirli klivaj ve kayma yüzeyleri görülmektedir. Şekil 2.33'den görülen eğriler, ısıl işlemle sertleştirilmiş örneklerdeki deformasyonun 12 saatten sonra durma eğilimine girdiğini göstermektedir. Ancak normal örneklerde ise 18 saatten sonra bile deformasyonun devam ettiği tespit edilmiştir. Sertleştirilmiş örneklerdeki % 3,7'lik limit sünme birim deformasyonu normal örneklerdeki birim deformasyonun yaklaşık 5-6 katı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.33. Sertleştirilmiş ve normal kaya tuzu örneklerindeki sünme eğrilerinin karşılaştırılması (Dreyer, 1973)

Sertleştirilmiş örneğin yüksek sünme birim deformasyonunun nedeni, difüzyon olayı ile tüm kusurlu kristallerin eriyip yeni kristallerin oluşumuna neden olan rekristalizasyon ile ilişkilidir.

Sıcaklığın sünme davranışı ve özellikleri üzerindeki etkisi oldukça önemlidir ve sıcaklık parametresi, madenlerin projelendirilmesi, zemin kontrolü ve özellikle kimyasal ve nükleer atık deposu olarak kullanılması planlanan derin kaya tuzu kazılarında ihmal edilmemelidir (Jeremic, 1994).

2.7.2.3. Kaya tuzu mekaniğinde tabaka düzlemlerinin önemi

Evaporitik katmanlardaki tabaka düzlemlerinin etkileri katmanlardaki kohezif dayanım ve deformasyona karşı direncin farklılığıdır. Evaporit yataklarındaki tabaka düzlemleri madencilik çalışmalarının gidişatı ile tabaka kontrol mekanizmalarını belirlemektedir.

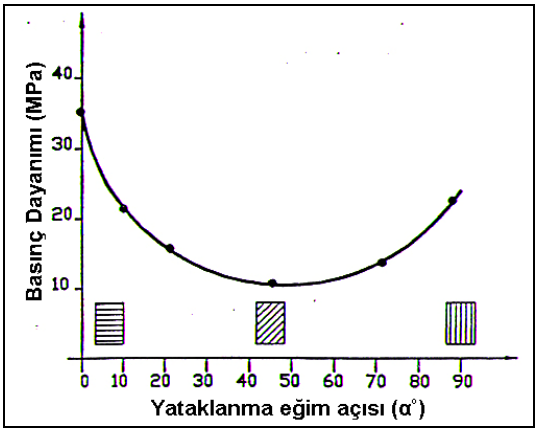
Herhangi bir madencilik faaliyeti uygulaması yapılmamış bir sedimanter yapı kendi içerisinde farklı kimyasal bileşim ve yüzeysel özellikler içerir. Örneğin jeolojik yapıda, kaya tuzu katmanları gibi aynı tabaka özelliğindeki yapıların tekrar etmesi yanında çeşitli yataklanmaların bir arada olduğu madencilik çalışmalarında tabakalanma daha fazla önem kazanmaktadır. Ancak evaporit yataklarının çok yaygın bulunması nedeniyle, çeşitli yatakların bir arada üretimi dünyada çok fazla tercih edilmemektedir.

Tüm tuz yataklanmalarındaki dayanımlar mineral oluşumlarına bağlı olarak değişiklikler, gösterirler. Sedimanter katmanlara dik gelen dayanımlardaki bu değişiklikler madencilik çalışmalarında özellikle zayıf yataklanmalarda duraylılık çalışmalarını etkilemektedir. Bu durumda maden açıklığının tabanında koruyucu katmanlar bırakmak gerekmektedir. Ayrıca yeraltı gerilme ölçümleri yapıldığında gerilim dağılımı iyi belirlenmelidir. Bu durum madencilik çalışmaları başladıktan sonra belirlenebileceği gibi madencilik öncesi sondaj çalışmalarından da belirlenebilir. Sedimanter katmanların zamana bağlı deformasyonu, çok büyük oranda tüm katmanların sünme özelliklerine bağımlıdır. Bu, genelde bazı katmanların deformasyonlar sonucu ocak boşluğu içine akmasıyla sonuçlanmaktadır. Tek mineralli yataklanmalarda anizotropik davranış minimumdur (Jeremic, 1994).

Yatay evaporit yataklarında sedimanter katmanlara paralel tabakalanma mineral bileşimindeki yavaş değişim nedeniyle çok fazla önem arz etmemektedir. Ancak, dikey ve düzenli dizilmiş sedimanter oluşumlarda tabakalanma önemli olmaktadır. Dikey tuz yataklarında, ortama gelen yükler sonucu iki ana olay görülmektedir. Bunlar ayrılma kuvvetlerine bağlı dilatasyon ve burkulma kuvvetlerine bağlı oluşan çatlaklanmadır. Orojenik hareketler sonucu yeraltındaki maden açıklıklarında dikey sedimanter tabakalarda meydana gelen tabakalanmada farklı bir durum söz konusudur. Bu durum için sedimantasyon yüzeyleri arasındaki çekme gerilmesi ile eğilme direnci basınç gerilmesinden daha önemli faktörlerdir.

Orojenik hareketler sonucunda yataklanmış sedimanter tabakalar, yataydan dike kadar birçok eğime sahip olabilirler. Bugüne kadar birçok kayaçta tabakaların eğimi ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişkiler hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Ortak sonuç, tek eksenli basınç dayanımı ile tabaka eğim açısı arasında fonksiyonel bir bağıntı olduğudur (Trchaninov, 1979). Çalışmalar göstermiştir ki

kaya tuzu dayanımı, tabaka eğim açısı yataydan 45°'ye doğru artarken düşmekte, bu açıdan sonra dayanım yükselmeye başlayarak 90°'de maksimum değerine ulaşmaktadır (Şekil 2.34). Ayrıca kaya tuzunun dayanımının tabakalanmaya dik gelen yüklerden paralel gelen yüklere göre yaklaşık % 50 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Minimum kaya tuzu dayanımının 45°'de meydana geldiği ve bu değerin maksimum dayanımın yaklaşık % 55'i olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.34. Tabaka eğim açısının basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Jeremic, 1994)

2.7.2.4. Kaya tuzunda geçirgenlik ve çatlaklılık

Kaya tuzu yataklarının sahip olduğu olumlu özellikler arasında, gazlara ve sıvılara karşı geçirimsizliği ile nispeten kolay madencilik yöntemleriyle oluşturulan büyük boyutlu açıklıklarda bile oldukça duraylı kalabilmeleri sayılabilir. Kaya tuzunun ortalama geçirgenlik değerinin yaklaşık 10^{-14}m/s olarak kabul edilebileceği ve bundan dolayı da pratik olarak geçirimsiz sayılabileceği ifade edilmektedir (Wittke, 1996). Kaya tuzu, sular içindeki erimiş madde ve bilhassa tuzların kimyasal reaksiyonları (buharlaşma ve çökelme) sonucunda teşekkül ederler. Bu nedenle kaya tuzu yapıları depolama boşlukları olarak kullanılmaktadır ve radyoaktif atık maddelerin uzun dönemli depolanması için incelenmektedir.

Kaya tuzunda yapılan madencilik çalışmaları esnasında yapılan gözlemlerden, permabilite hakkında daha fazla bilgi edinilebilir. Sıkışmış gaz ceplerinin varlığı kaya tuzunda geçirimsiz bölgelerin var olabileceği anlamını taşımaktadır (Baar, 1977 ve Lorenz ve ark., 1981). Öte yandan tuz madenlerinde sızıntı ve damlamaların varlığı bilinmektedir ve bu da geçirgenliğin olduğunu gösterebilir (Lorenz ve ark., 1981). Bununla birlikte tuz madeninde yapılan testler sonucunda ortalama 0,3 milidarcy değerinde olmak üzere petrole karşı 0-6 milidarcy geçirgenliğin olduğu bulunmuştur (Aufricht ve Howard, 1961) (Permeabilite birimi Darcy'dir. 1 cm/sn hızla 1 atm/cm basınç farkı altında geçen 1 santipoiz (cP) viskozitedeki akışkan miktarı 1 Darcy'dir. Rezervuarların çoğunda permeabilite 1 Darcy'den az olduğu için milidarcy (md) kullanılır. Ortalama rezervuar permeabilitesi 5 ile 500 md arasında değişir).

Laboratuar ölçümlerinden elde edilen permabilite değerleri ise büyüklük olarak oldukça farklılık arz etmektedir (0.0001-795 millidarcy) (Aufricht ve Howard, 1961). Fakat bu değerlerin geçerliliği sorgulanabilir, çünkü karotlar çıkarıldıkları zaman bulundukları yerdeki üç eksenli gerilim alanından alındığında gerilimin azalmasına bağlı olarak taneler arası gevşeme nedeniyle deformasyona maruz kalırlar ve bu nedenle kaya tuzu karotlarındaki standart permabilite testleri kullanışlı olmayabilir. Yerinde testler bir dereceye kadar daha iyi sonuçlar vermektedir (Baar, 1977).

Schulze ve ark. (2001) çalışmalarında kaya tuzunun nakil özellikleri üzerinde deneyler gerçekleştirmişler ve dilatant olmayan deformasyondan, dilatant deformasyona geçiş koşullarını tanımlamışlardır. Dilatasyon sınırındaki gerilimin durumunu belirlemek için klasik hacimsel birim deformasyon ölçümlerinin yanı sıra, ultrasonik dalga hızları (V_p, V_s) ve permabilite ölçümlerini de gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, Cristescu ve Hunsche'nin (1998) tanımladıkları dilatasyon sınırı denklemini desteklemektedir. Dilatant gerilim ortamında yapılan yükleme, çatlakların oluşması ve yayılmasına ve zorlama ile hasarın artmasına neden olmaktadır. Porozitenin gelişimi, ultrasonik ve permabilite ölçümleri ile sürekli olarak takip edilmiştir. Porozite ve permabilite birkaç parametre ile kontrol edilmiştir. Bu parametrelerden en önemlileri asal gerilme ve yükleme geometrisidir. Gözenek basıncının yalnızca hasar görmüş ve dilatasyona maruz kalmış kaya tuzunun mekanik özelliklerini etkilediğini belirlemişlerdir.

Schulze ve ark. (2001) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar, Cristescu ve Hunsche'nin (1998) bulguları ile uyuşmakta ve dilatant olmayan deformasyondan dilatant deformasyona geçişin, dilatasyon sınırı ile belirlendiğini doğrulamaktadır. Kombine bir şekilde yapılan ultrasonik dalga hızı ve permabilite ölçümlerinin, birim deformasyon ile meydana gelen dilatasyon için kuvvetli belirleyiciler olduğunu belirlemişlerdir.

Sonuç olarak yazarlar permabilite ve çatlak yoğunluğundan belirlenen porozite arasındaki ilişkinin oldukça karmaşık olabileceğini vurgulamış, hem permabilite hem de porozitenin gerilimin durumuna duyarlı olduğu dolayısıyla dilatasyon sınırına göre diferansiyel gerilmeye ve minimum asal gerilmeye dayalı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bunun yanında, permabilite ve porozite, belirli bir gerilme ortamında yükleme sırasında biriken birim deformasyona da dayalıdır. Elde edilen önemli bir diğer sonuç da, çatlak düzenleri ve permabilitenin yük geometrisine dayalı olarak anizotropik biçimde gelişmesidir. Kaya tuzunun litolojik karakteristikleri, özellikle anhidrit veya polihalit gibi sert parçacıkların dağılımı, permabilite-porozite ilişkisinde bir miktar etkiye sahiptir (Schulze ve ark., 2001).

Silberschmidt (2000), yeraltı ocakları ve yeraltı atık depolarında izolasyon özelliklerinin analizlerinden elde edilen sonuçların kullanım yollarını incelemiştir. Atık depolamada yeraltı tuz formasyonlarında açılan tuz madenlerinin kullanımı dolayısıyla izolasyon özelliklerinin kesin analizinin önemli olduğunu vurgulamış, izolasyonun azalmasında en önemli etkilerden birinin madencilik işlemleri sonucu oluşan ve gelişen çatlaklar olduğunu belirtmiştir. Yerinde ve laboratuar ortamında gerçekleştirdiği deneylerde, kayaların sünme davranışı karşısında tüm çatlakların kapanmadığı sonucuna varılmıştır. Yapılan gözlemlerde ocağın yaşı, madencilik yöntemi benzeri birçok parametre dikkate alınmış, çatlak gözlem ve karakterizasyonu esnasında birçok yöntem kullanılmıştır. Bunlar, optik mikroskopi, elektrometrik yöntem, filtrasyon yöntemi, nükleer manyetik rezonans ve mekanik testlerdir. Numuneler 80 mm çaplı ve boy çap oranı 1'e eşit olan karot ve 60 mm kenarlı küp kaya tuzu, silvinit ve karnalit numuneleridir. Yüklemeyi 500 MPa kapasiteli ve yükleme hızı 1 MPa/sn olan bir hidrolik pres yardımıyla yapmıştır. Sünme deneylerinde sabit yükleme özelliği olan manivelalı presler kullanılmış ve bu deneylerde çatlaklanma sadece optik metot yardımıyla izlenebilmiştir. Sonuç olarak

deneysel çalışmalar sünme deformasyonları ile tüm çatlakların iyileşmediğini göstermiştir. Mikro çatlakların oluşumu ve gelişimi masif yapının mekanik davranış ve permabilitesini etkilemektedir. Madencilik işlemleri, kaya kütlesindeki gerilme durumunun değişmesine neden olmakta ve oluşan bu yeni gerilme dağılımı açılan boşluk etrafında gerilme zonları oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilme zonları ise kolaylıkla çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Daha küçük ölçekli malzemeler için geliştirilen çatlak modelleri, kayaçlar için kullanılamamakta ve çatlaklılık oluşturulan modellerde yok sayılmaktadır. Ancak yeraltında oluşturulması planlanan yapının, mekanik davranış ve permabilitesini etkilediğini vurgulayan araştırmacı yeraltı madenleri ve depolarındaki çatlaklılığın, oluşturulacak modellerde mutlaka göze alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Berest ve ark. (2001) yeraltı tuz oluşumlarında, oluşturulduktan sonra terk edilen boşluklarda tuzlu suyun denge basıncını ölçmek için 18 ay boyunca bir takım mekanik testler uygulamışlardır. Böylesi bir denge basıncı, tuz kütlesi sünme davranışı gösterdiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu denge, boşluğun daralmasına yol açan tuz kütlesindeki sünmenin tuzlu suyun boşluk duvarlarından sızmasını dengelediğinde oluşmaktadır. Çalışmalarında farklı basınç seviyeleri uygulamışlar ve basıncın zamanla artıp-artmadığını incelemişlerdir. Gözlemledikleri denge basıncı, jeostatik basınçtan oldukça düşüktür. Bu da gözlemlenen tuz formasyonunda herhangi bir çatlak riskinin azalmasına neden olmaktadır. Çalışmalarında ayrıca tuzlu su sızma oranını 1,4 m^3/yıl gibi oldukça düşük bir değerde bulmuşlar ve boşlukta başlangıçta bulunan tuzlu su miktarının 50 yüzyıl sonra yok olacağını ileri sürmüşlerdir. Uyguladıkları test ile terkedilmiş boşluk analizlerinde, tuz formasyonundaki sızmanın dikkate alınması gerektiğini doğrulamışlardır. Terkedilmiş bir boşlukta tuzun geçirgenliği yüksek basınçların oluşmasını engelleyebilir. Bu da çatlak oluşumunu ve yüzey sularına sıvı sızıntısını engelleyebilir.

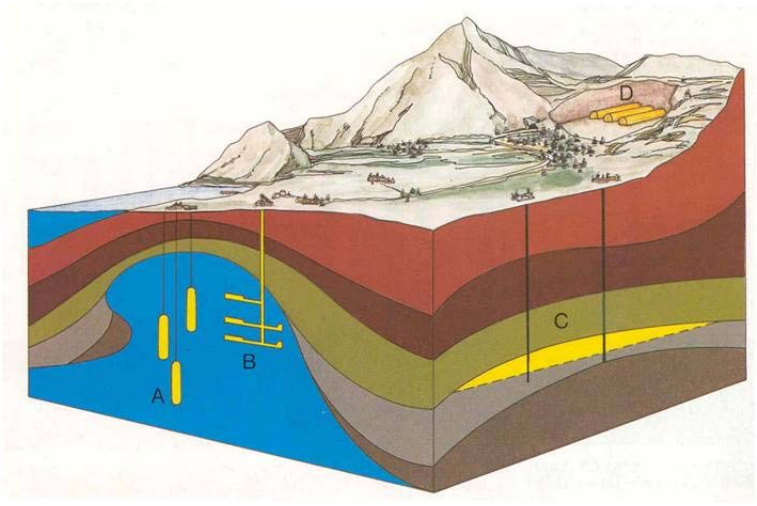
Lorenz ve ark. (1981) haliti plastik olarak deforme etmek ve kristal arayüzlerinde geçiş yollarını kapamak için basıncın yeterli olduğunda, permabilitenin efektif olarak sıfır olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuç ayrıca Baar (1977) ve Hofcrichter (1976) tarafından da paylaşılmıştır. Sızıntı ve damlamalar ya da depolanan benzinin azalması ile varlığı anlaşılan permabilite, madencilik aktiviteleri

nedeniyle kaya tuzunda oluşan değişimlere bağlanabilir. Kaya tuzundaki permabilite ayrıca anhidrit gibi geçirgen kirlilikler ile de oluşabilir (Lorenz ve ark., 1981). Genel olarak ifade edilirse, yeterli yük basıncı altında yerinde kaya tuzu geçirimsizdir.

2.8. Yeraltı Boşluklarının Mühendislik Hizmetlerinde Kullanımı

Yeraltı, birçok mühendislik hizmetlerinde kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları yeraltı kömür ve metal madenciliği başta olmak üzere, petrol ve doğalgazın yeraltında depolanması, yeraltı hidroelektrik ve nükleer güç santralleri, basınçlı hava depolanması, nükleer artıkların yeraltında depolanması, stratejik askeri yeraltı üsleri, korunmaya yönelik yeraltı boşluk ve sığınakları, yeraltında inşa edilen ev, çarşı, depo ve büro benzeri konutlar, karayolu-demiryolu tünelleri, metro tünel ve istasyonları, su ve kanalizasyon tünelleridir.

Bu mühendislik hizmetlerinin en önemlilerinden olan yeraltı depolamada kullanılan boşluklar sırasıyla; çözelti madenciliği ile tuz domlarında oluşturulan boşluklar, yeraltı boşluk ve mağaraları, akiferler ve madenciliğin bitiminden sonra kullanıldığı boşluklardır (Şekil 2.35). Bunlar içinde en çok kullanılan, tuz domlarında oluşturulan boşlukların doğalgaz depolanması için kullanılmasıdır.



Şekil 2.35. Yeraltında Doğal Gaz Depolama Olanakları-A tuz çözelti açıklıkları, B yeraltı madenleri, C petrol ve gaz sahaları, akiferler, D sığ derinlikte yeraltı açıklıkları

Carnody ve Sterling (1993) yeraltı depolarının üstünlüklerini aşağıdaki gibi yedi başlık altında toplamışlardır.

1. Depreme karşı olan üstünlükleri: Yeraltı yapıları deprem hareketlerine karşı yerüstü yapılarına kıyasla doğasından kaynaklanan bazı avantajlara sahiptir. Öncelikle bu yapılar depreme karşı önemli miktarda kaya yükünü karşılayacak şekilde güvenlik faktörleri ile inşa edildiğinden deprem yükleri bu yapıları yerüstündeki yapılar kadar etkilememektedir. Ayrıca yerüstündeki deprem sonucu oluşan yer hareketleri ve titreşimlerinden kaynaklanan yüzey dalgalarının miktarı, yeraltına göre daha fazla olacağından yerüstü yapılarına oranla emniyetlidir.
2. Hava koşullarına karşı üstünlükleri: Yeraltı yapıları fırtına, tayfun, hortum, şimşek, dolu, sel vb. doğal afetlerden etkilenmezler. Fakat yerüstü bağlantılarına dikkat edilmesi zorunludur. Ayrıca bu yapılarda yeraltı su seviyesi düşüşlerine karşı önlemler alınmalıdır.
3. Yangına karşı üstünlükleri: Yeraltı yapıları yangına sebep olabilecek dış kaynaklara karşı doğal bir korumaya sahiptir. Zemin ve kaya yapısı yanmaz özellikte olup aynı zamanda mükemmel bir ısıl yalıtım sağlar. Burada yeraltı yapılarının giriş çıkış terminallerinin olduğu noktalara dikkat edilmelidir.
4. Termal üstünlükleri: Dünyanın birçok bölgesinde yeryüzünden itibaren 500 metreden daha az derinlikteki yeraltı boşluklarında gözlenen sıcaklıklar yerüstünde görülen büyük mevsimsel sıcaklık farklarına karşı makul düzeydedir. Yeraltı yapıları, bu özelliği nedeniyle enerji depolamasında önemli avantajlara sahiptir. Örneğin ABD'de Minneapolis kentinde yapılan bir araştırma yerüstü sıcaklıklarının yaz aylarında maksimum 40^{o}C, kış aylarında minimum -30^{o}C'ye ulaşmasına rağmen yeraltında ısı değerlerinin 0^{o}C ila 15^{o}C arasında değiştiğini göstermiştir.
5. Mekân üstünlüğü: Yeraltı yapıları, jeoteknik koşullar uygun olduğunda özellikle yerleşim yerleri ve yakınlarında mevcut yerüstü tesislerinin altlarına yapılabilir. Bu bölgelerde ilave yerüstü yapı ve tesisleri yer kıtlığı nedeniyle çok zor veya imkânsızdır.

6. Patlatma, infilak, sabotaj vb. olaylara karşı üstünlüğü: Yeraltı yapıları çeşitli sebeplerle yakınında oluşabilecek infilak, patlama vb. olumsuzluklara karşı, yerüstü yapılarına göre kıyaslanamayacak üstünlüklere sahiptirler.
7. İş kazaları ve güvenlikle ilgili üstünlükler: Yeraltı yapıları çeşitli nedenlerle oluşabilecek iş kazalarına karşı daha güvenlidirler. Yeraltına giriş mekânının kısıtlılığı nedeniyle güvenlikleri üst düzeydedir.

Ayrıca araştırmacılar yeraltı depolamanın potansiyel fayda ve zorluklarını,

- Fiziksel ve temel özellikler,
- Maliyetler ve
- Toplumsal özellikler

ana başlıkları altında sınıflandırarak Çizelge 2.7'yi oluşturmuşlardır.

2.8.1. Yeraltında doğalgazın depolanmasının önemi

İnsanlığın en önemli ve vazgeçilmez gereksinimlerinden birisi enerjidir. Bugün kişi başına enerji tüketimi, kalkınmışlığın ölçüsü olarak kullanılmaktadır ve enerji, ekonomik-sosyal kalkınma için temel girdilerden birisi durumundadır. Enerji kaynaklarının başında ise fosil yakıtlar gelmektedir. Petrol, kömür ve doğal gaz fosil yakıt denilince akla ilk gelen enerji kaynaklarıdır. Ülkelerin kalkınmasında vazgeçilmez girdi olan enerjinin üretilmesinde, fosil yakıtlar en önemli kaynakların başında gelmektedir.

Bary (2002)'ye göre dünyada önümüzdeki yıllarda enerji harcamaları fosil yakıtlar olarak adlandırılan özellikle petrol, kömür ve doğalgaz gibi enerji kalemlerinde artacak, hidroelektrik enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları bakımından harcamalar nispeten daha düşük oranda artarken, nükleer enerji kalemindeki harcamalar ise azalacaktır. En büyük artış ise doğalgazda olacaktır.

Dünyanın 2004 yılı enerji tüketiminde, petrol % 37'lik pay ile ilk sırayı alırken, kömür % 27 ile ikinci, doğal gaz ise %24'lük pay ile üçüncü sırada yer almaktadır. Ülkemizin 2004 yılında birincil enerji tüketimindeki; petrolün payı % 39, doğalgazın payı % 23, kömürün payı ise %26'dır. Türkiye'nin ispatlanmış petrol ve doğalgaz kaynakları çok sınırlıdır.

Çizelge 2.7. Yeraltı depolama sınıflandırması, potansiyel fayda ve zorlukları (Carnody ve Sterling, 1993)

Ana Konular	Özellikler	Potansiyel Faydalar	Potansiyel Zorluklar
Fiziksel ve Temel Özellikler	Konumsal	Yakınlık Yüzey alanından tasarruf Hazırlık kolaylığı Statü	Elverişsiz jeoloji Belirsiz jeoloji
	Yalıtım	İklimsel Termal Yangın Deprem Kötü hava koşulları Koruma Gürültü Titreşim Patlama Nükleer serpinti Endüstriyel Kazalar Güvenlik Sınırlı erişim Korumalı alanlar Emniyetli depolama Zehirli atıklar Zehirli işlemler	İklimsel Termal Su taşkını İletişim İnsan Yangın güvenliği Personel güvenliği Psikolojik etkiler
	Korunma	Estetik Görsel etki İç tasarım Çevresel etkiler Doğal görünüm Ekoloji	Estetik Görsel etki Binalar Çevresel Çevresel bozulma Drenaj Kirlilik
	Yerleşim	Topografik serbestlik 3 boyutlu tasarım	Tahkimat Limitli boyutlandırma Limitli erişim Uyumluluk Atıkların uzaklaştırılması
	Kurumsal		İzinler Bina izinleri Yatırım belirsizliği
Maliyetler	İlk Maliyetler	Arazi maliyeti tasarrufu İnşaat maliyeti tasarrufu Yerüstü yapıları olmaması Hava şartlarından bağımsız olması Ölçek sınırlaması olmaması Kazılan malzemenin veya minerallerin satışı	Sınırlı çalışma koşulları Zemin desteği Limitli erişim Kazı, taşıma ve satış Maliyet belirsizliği Beklenmeyen jeolojik, kontrat ve kurumsal gecikmeler
	İşletme Maliyetleri	Bakım masrafları Sigorta tasarrufu Enerji tasarrufu	Ekipman ve malzeme maliyetleri Personel giderleri Havalandırma ve ışıklandırma Bakım ve onarım
Toplumsal Özellikler		Etkin arazi kullanımı Etkin taşıma ve dolaşım Enerjinin korunumu Çevre/Estetik Felaketlere hazır olma Ulusal güvenlik Daha az yapı bozunumu	Çevresel bozunma Kalıcı değişiklikler Enerji

Ülkemiz 2005 sonu itibariyle 38,3 milyon ton üretilebilir ham petrol ve 6,6 milyar m^3 üretilebilir doğalgaz rezervine sahiptir (Seyment ve ark., 2006). Özellikle sanayi, ısınma ve motorlu taşıtlarda kullanılan doğalgaz dünya ülkeleri için olduğu gibi ülkemiz için de ekonomiyi etkileyen çok önemli parametrelerden birisidir. Doğalgazın önemli bir yer teşkil ettiği fosil yakıtlar, ülkelerin ekonomik göstergelerini etkilemekte ve fiyatlarındaki değişimler enflasyon, kalkınma hızı, istihdam vb. birçok alanda kendini hissettirmektedir.

Fosil yakıtlara olan talebin sürekli arttığı ve gelişmişliğin kişi başına kullanılan enerji ile bağdaştırıldığı günümüzde, doğalgaz depolama tesislerinin bölgesel ve sektörel talebi karşılayacak ve güvenli stok seviyelerini idame ettirecek kapasitede kurulması gereği ön plana çıkmaktadır. Doğalgaz depolama, müşterilerin gereksiniminin çok yoğun olduğu zamanlarda belirli bir noktaya kadar bu ihtiyacı karşılamak amacıyla yapılır (Seyment ve ark., 2006). Gelişmiş ülkelerde yeraltı doğalgaz depolama tesisleri çok yaygın olarak kullanılmakta (Çizelge 2.8) ve yıllık tüketimlerinin önemli bir kısmını depolamakta (Çizelge 2.9), böylece dünya çapında oluşabilecek krizlerden en az düzeyde etkilenmektedirler.

Çizelge 2.8. Dünyada işletilmekte olan yeraltı doğalgaz depolama tesisleri (Sedlacek, 2001)

Ülke	Tesis Adedi
ABD	393
BDT	46
Almanya	42
Kanada	37
Fransa	15
İtalya	9
Avusturya	5
Polonya	4
Romanya	4
Çek Cumhuriyeti	4
Macaristan	4
Diğer Ülkeler	10
Toplam	573

Çizelge 2.9. Bazı ülkelerin yıllık doğalgaz tüketimleri ve yeraltı stok miktarları (Sunu ve Çelik, 2002)

Ülke	Tüketim (milyar m^3)	Yeraltı depo kapasitesi (milyar m^3)	Oran (%)
Fransa	34	10,5	31
İtalya	51	12,9	25
Almanya	70	8,5	12
İspanya	7	0,5	7
İngiltere	66	3,6	5
Belçika	12	0,5	4
Türkiye	30	0	0
Hollanda	48	0	0

2.8.2. Yeraltı tuz oluşumlarında doğalgazın depolanması

Yeraltında depolama çalışmaları için en elverişli kayaçlar kaya tuzu - anhidrit - şeyl - killi şeyl - siltli şeyl - karbonatlı çamurtaşı - silisli şist şeklinde sıralanabilir (Downey, 1984). Bunların arasında kaya tuzu, üç ana özelliğinden dolayı hidrokarbon depolanmasında en elverişli kayaç olarak bilinir. Bunların ilki kaya tuzundaki yakın izotropik gerilimden dolayı suyla parçalanmaya dirençli olmasıdır. Örneğin minimum asal gerilmesi (σ_3) killi şiste göre daha yüksek olan kaya tuzu, suyla parçalanmaya daha yüksek sıvı basınçlarında maruz kalacaktır (Hildenbrand ve Urai, 2003). İkinci özelliği geçirgenlik ve porozitesinin çok düşük olmasıdır (Casas ve Lowenstein, 1989). Kaya tuzunda gözlenen düşük geçirgenliğin en önemli nedeni halit minerallerindeki sünek davranıştır (Wallner ve ark., 1998). Üçüncü özelliği de kaya tuzunun plastik deformasyonunun sünek davranış göstermesi ve bundan dolayı genleşme olmamasıdır (Ingram ve Urai, 1999).

Yeraltı tuz domlarının depolama amaçlı kullanımı dört ana başlıkta ifade edilebilir (Jeremic, 1994).

Bunlar:

- Hidrokarbonların depolanması,
- Radyoaktif atıkların depolanması,
- Kimyasal atıkların depolanması,
- Basınçlı havanın depolanması.

Tuz domları ve kalın tuz yatakları gibi jeolojik kaya tuzu oluşumları, doğal gaz için çok uygun depolama ortamlarıdır. Bundan dolayı birçok ülkede doğalgaz depolaması için tuz çözelti açıklıkları seçilmiştir. Yeraltında doğalgaz depolama ortamları için özellikle tuz domları veya kalın tabakalı tuz yatakları gibi kaya tuzu formasyonları uygun olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak, tuz formasyonlarının gazlara karşı geçirimsiz ve çatlaklara karşı zamanla kendiliğinden iyileşme özelliklerine sahip oldukları kabul edilmektedir. Buna ilaveten, uygun boyutlandırılmış geniş yeraltı tuz açıklıkları yapay tahkimatlara gereksinim duyulmadan, duraylılıklarını uzun süreler boyunca koruyabilmektedirler. Tuz çözelti açıklıkları tek başına 500 bin m^3'den fazla boşluk hacmi kapasitelerine sahip olabilmektedir. Bundan başka, çözme işleminin kontrollü gelişmesiyle, özel boyutlara ve şekle sahip tuz açıklıklarının oluşturulması olanaklıdır. Bundan dolayı, uygun özelliklere sahip geniş yeraltı tuz çözelti açıklıkları, bu tür tesislerin yüksek dağıtım kapasiteleri nedeniyle, özellikle mevsimsel ve/veya anlık gaz beslenme taleplerinin karşılanması için uygundur. Toplam ihtiyaç duyulan gaz depolama kapasitesine bağlı olarak, aynı bölgede birkaç tuz çözelti açıklığı birlikte işletilebilmektedir (Özarslan ve Gerçek, 2002).

Aynı zamanda kaya tuzu radyoaktif atıkların kalıcı depolanmasında da kullanılmaktadır. Burada amaç radyoaktif ve diğer toksik maddelerin biyosferden uzak tutulmasıdır. Kaya tuzu iki ayrı özelliğinden dolayı tehlikeli radyoaktif ve katı atık maddelerinin depolanmasında jeolojik bir ortam sağlamaktadır. Birinci özelliği yeraltında su akışını engelleyici özellikte olması, bu yüzden toksik maddelerin çözülmesi ve yayılması engellenmektedir. İkincisi ise kaya tuzundaki oda veya boşlukların zamanla kapanma eğiliminde olması bu yüzden atıkların biyosferden yalıtılmasıdır (Van den Broek, 2001).

Yeraltında tuz yataklarında açılan boşlukların tasarımı yapılırken, uzun süre şeklini ve sağlamlığını temin edecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu tasarım ve parametreleri, Türk Standartları'nın "Tuz yataklarında çözme suretiyle oluşturulan boşluklarda depolama için fonksiyonel kurallar" bölümünde ülkemizdeki çalışmalar için bir standarda bağlanmıştır (TSE, 2001). Tuz formasyonunun zamanla hareketinden kaynaklanan hacim kaybı (daralma), boşluk duvarında ve tabanındaki şekil bozukluğunun dağılımı, boşluğu çevreleyen kayaçlar üzerinde sebep olduğu

gerilmenin dağılımı dikkate alınması ve hesaplanması gereken temel mekanik olaylardır.

Standart laboratuar deney verileri ile gerçeğe yakın sayısal çözümleme modelleri aracılığıyla, tuz çözelti açıklığında sünme davranışının da etkisiyle kapanma sonucu meydana gelecek boşluk hacmi kaybı, açıklık çevresinde oluşması beklenen deformasyon büyüklükleri ve dağılımı, açıklık çevresinde etkili olan ikincil gerilme dağılımı ve olası yenilme bölgeleri tasarım aşamasında ortaya konulmalıdır (CEN, 1998).

Kaya tuzunun yeraltı açıklıkları çevresinde göstereceği mekanik davranışının gerçeğe yakın olarak modellenebilmesi için, zamana bağımlı viskoelastik ve/veya viskoplastik malzeme modellerine dayalı sayısal çözümleme yöntemlerine gereksinim duyulmaktadır (Hardy, 1982, Langer, 1986, Lux, 2002). Bu malzeme modellerinin temel girdilerini teşkil eden parametrelerin gerek yerinde gerekse laboratuarda belirlenmesinin güç olması nedeniyle, bu tür tesislerin ön tasarım aşamasında elastik ve elasto-plastik malzeme modellerine dayalı sayısal ve matematiksel çözümleme yöntemleri önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu çözümlemeler yardımıyla, doğal gaz depolama amaçlı tuz çözelti açıklıklarının duraylılığı ve güvenliği üzerinde etkili olan çeşitli parametrelerin, farklı işletme ve etkileşim koşulları altında, incelenmesi olanaklı olmaktadır ve deponun ön tasarımı için önemli bilgiler sağlamaktadır (Hardy, 1982). Ön tasarım aşamasından sonra ise mutlaka kaya tuzunun zamana bağlı malzeme davranışını da göz önünde bulunduran gelişmiş sayısal çözümleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Özarslan ve Gerçek, 2002)

2.8.2.1. Hidrokarbonların tuz domunda depolanması

Ticari olarak değerlendirilen tuz yataklarında, kaya tuzu seviyelerinin kalınlığı 1-3000 m. arasında değişmektedir. Genellikle şeyl, dolomit, jips, anhidrit ve nadiren potasyum tuzları ile beraber bulunur. İşletme bakımından en verimli yataklar tuz domlarıdır (Temur, 1998).

Hidrokarbonların depolanması ham petrol, petrol ürünleri ve doğalgazı kapsamaktadır. Günümüzde milyarlarca metreküp hidrokarbonun güvenli ve ekonomik olarak tuzdaki yeraltı boşluklarında depolanması mümkündür. Depo oluşturulacak boşlukların duraylı olması ve yüksek basınçlara dayanabilecek kapasitede olması zorunludur.

İnşa aşamasında öncelikle yeryüzünden bir veya bazı durumlarda birkaç kuyu açılması gerekmektedir. Delme tekniği tamamen aynen petrol ve doğalgaz endüstrisinde kullanılan standartlardadır. Tuz formasyonunda yapılan delme işlemi esnasında doygun kil-tuz solüsyonu veya çok doygun NaCl solüsyonu kullanılmaktadır. İşlem sırasında öncelikle tatlı su veya az tuz içerikli su (örneğin deniz suyu), liçing yapılacak olan boşluk alanına pompalar yardımıyla gönderilmektedir. Su boşluk duvarlarındaki tuzu çözmekte ve daha çok veya az doygun hale gelmektedir. Ardından tatlı su gönderilerek içerideki tuzlu su konsantrasyonu drene edilmektedir. Eritmenin sınırlandırılması için boşluk duvarının dış katmanı sudan daha az yoğunluklu bir madde tarafından kaplanabilmesi için boşluğun üst kısmından boşluk içine pompalanır.

2.8.2.2. Türkiye'de doğalgaz depolama çalışmaları

Türkiye'de doğalgaz depolama çalışmaları BOTAŞ tarafından yürütülmektedir. BOTAŞ ülkemizin mevsimsel, günlük ve saatlik doğalgaz taleplerini düzenlemek ve önümüzdeki yıllarda ortaya çıkacak olan doğalgaz gereksinimine çözüm getirmek amacıyla doğalgaz yeraltı depoları yapmayı planlamaktadır. Bu çalışmalar kapsamında, Kayseri-Konya-Seydişehir doğalgaz boru hattına 19 km. uzaklıkta olan Tuz Gölü havzasındaki tuz domlarının doğalgazı yeraltında depolama amacıyla kullanılacaktır. BOTAŞ'ın yürüttüğü proje, 1 milyar m^3 gaz depolayabilecek kapasitede 12 adet deponun yapılması ve bunlardan altısının 2010 yılında, tamamının ise 2013 yılında kullanıma alınmasını kapsamaktadır. Ayrıca çözelti madenciliğinde kullanılması planlanan 1120 m^3/saat olan tatlı su ihtiyacının 160 km mesafedeki Hirfanlı Barajı'ndan sağlanması planlanmaktadır. Eritme işleminde oluşan tuzlu su ise (560 m^3/saat) eritme ünitesindeki yaklaşık 1200 m^3 kapasiteli bir havuzda

toplanacak olup, Tuz Gölü'ne 39 km'lik bir boru hattı ile taşınacaktır. Topografyanın uygun olması sebebiyle akış pompa kullanılmadan sağlanacaktır. Göl içinde homojen bir dağılım yaratmak için tuzlu su deşarjı, iletim hattının sonunda yer alacak difüzörler yoluyla yapılacaktır. Difüzör, yaklaşık 18 m uzunlukta olacak ve üzerinde çapraz olarak yerleştirilmiş 6 adet çıkış noktası bulunacaktır (BOTAŞ, 2005).

BOTAŞ tarafından projelendirilen çalışmaya ait teknik verilerinin Çizelge 2.10'da verildiği doğalgaz depolama tesislerinin dört aşamada gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Bu aşamalar:

1. Genel danışmanlık hizmetleri.
2. Çevresel izleme hizmeti,
3. Tatlı ve tuzlu su boru hattı yapımı ve
4. Depolama sistemi yeraltı hizmetleri ve yerüstü tesislerinin inşasıdır.

Çizelge 2.10. Tuz Gölü'nde yapılması planlanan doğalgaz depolama tesisi teknik verileri (BOTAŞ, 2005)

Konum	Tuz Gölü'nün Güneyi, Sultanhanı-Aksaray
Depolama Tipi	Dom Tipi
Açılan Kuyu Adedi	2 (UGS-1 ve UGS-2)
Açılacak Kuyu Adedi	10
Tuza Giriş Derinliği	UGS-1: 583 m, UGS-2: 635 m
Tuz Domu Derinliği	> 750 m.
Tuz Kütlesinin Ebadı	Yükseklik: 15 km, Genişlik: 2,5 km
Depolamaya Uygun Tuz Alanı	Yaklaşık 30 km^2
Su Temini (Eritme İşlemi İçin)	Yeraltı suyu (5+1 kuyu) ve/veya Hirfanlı Barajı (160 km mesafede)
Toplam Su İhtiyacı	1120 m^3 saat (Toplam: 60 milyon m^3)
Tuzlu Su Deşarj Alanı	Tuz Gölü'ne 39 km boru hattı ile
Kayseri-Konya Doğalgaz Boru Hattına mesafe (İşletmede)	19 km.
Bir kaverna hacmi	500.000 m^3
Çalışma Gaz Hacmi (10 kaverna için)	960 milyon m^3
Yastık Gaz Hacmi (10 kaverna için)	518 milyon m^3
Toplam Gaz Hacmi (Çalışma+Yastık)	1,478 milyar m^3
En Yüksek (Toplam) Çekiş Debisi (10 kaverna için)	40 milyon m^3/gün
En Yüksek Enjeksiyon Debisi	30 milyon m^3/gün
En Yüksek Kaverna Basıncı	Yaklaşık 220 bar
En Düşük Kaverna Basıncı	80 bar
Kuyu Açma+Eritme İnşaat Süresi	17 ay

Sonuç olarak doğalgazın yükselişi devam eden çevreci bir enerji kaynağı olması nedeniyle tüketimi Avrupa ülkelerinde son 25 yılda hız kazanmıştır. Doğalgazın bilinen dünya rezervi tüm dünyanın 60 yıllık ihtiyacını karşılayacak miktardadır. Bu nedenle de uzun süre önemini koruyacaktır. Doğalgazda toplam dünya rezervlerinin % 71'i Kuzey Denizi, Rusya, Hazar Bölgesi, ve Orta Doğu ülkelerinde bulunmaktadır. Ülkemizde ise 2010 yılına kadar olan doğalgaz talebi, iç kaynaklar ve imzalanan ithalat antlaşmaları ile güvence altına alınmıştır. Ancak özellikle kış aylarında ani olabilecek arz-talebin karşılanması için doğalgaz depolarına gereksinim vardır. Doğalgaz deposu yapılacak alanın öncelikle jeofizik yöntemlerle üç boyutlu görüntüsü elde edilmeli ve ona göre inşa edilmelidir. Yapılacak doğalgaz taşıma amaçlı boru hatlarının geçeceği bölgelerin depremselliği göz önüne muhakkak alınmalıdır.

3. ÇALIŞMAYA KONU OLAN MADEN SAHALARI

3.1. Genel

Kaya tuzu oluşumları açısından zengin sayılabilecek ülkemizde belirlenmiş toplam yedi adet kaya tuzu oluşumu mevcuttur. Bunlardan en önemli iki oluşum Çankırı ve Nevşehir illerinde bulunmaktadır. Bu bölümde tez çalışmasına konu teşkil eden Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu madenleri hakkında bilgilere yer verilmiştir. Ayrıca ülkemiz kaya tuzu yatakları hakkında özet bir bilgi sunulmuştur.

3.2. Türkiye Kaya Tuzu Potansiyeli

Ülkemiz, jeolojik yapısı nedeniyle büyük tuz yataklarına sahiptir. Özellikle jeolojik olarak III. zamanın Eosen, Oligosen ve Miyosen devirlerinde içdenizlerde kuraklık nedeniyle geniş çökelmeler meydana gelmiştir. İç Anadolu'da Çankırı'dan başlayarak Çorum, Yozgat, Sivas, Erzincan, Erzurum ve Kars üzerinden İran'a bağlanan tuz yataklarında 30'u aşkın kaya ve kaynak tuzlaları yer almaktadır (Şekil 3.1). Ayrıca, Adana havzası ve Siirt yöresinde de geniş yeraltı tuz oluşumları mevcuttur. Türkiye'de kaya tuzu rezervlerinin tam olarak belirlenmesi amacıyla TEKEL A.Ş. ile M.T.A. arasında protokol imzalanarak 1977 yılında çalışmalara başlanılmıştır. Bu çalışmalar Çankırı, Sekili, Gülşehir, Tuzluca yeraltı kaya tuzu sahalarında yapılmıştır (Çizelge 3.1). Tuzun yayılımı tespit edilerek, rezervini ortaya çıkaran bu çalışmalarda yörede jeolojik haritalama, jeofizik ve sondaj çalışmaları yürütülmüş, kaya tuzu rezervinin jeokimyası ve kalitesi de yorumlanmıştır.



Şekil 3.1. Türkiye'de mevcut tuz kaynakları (www.turkiyetuz.com, 2008)

Çizelge 3.1. Türkiye kaya tuzu rezervleri (DPT, 2001)

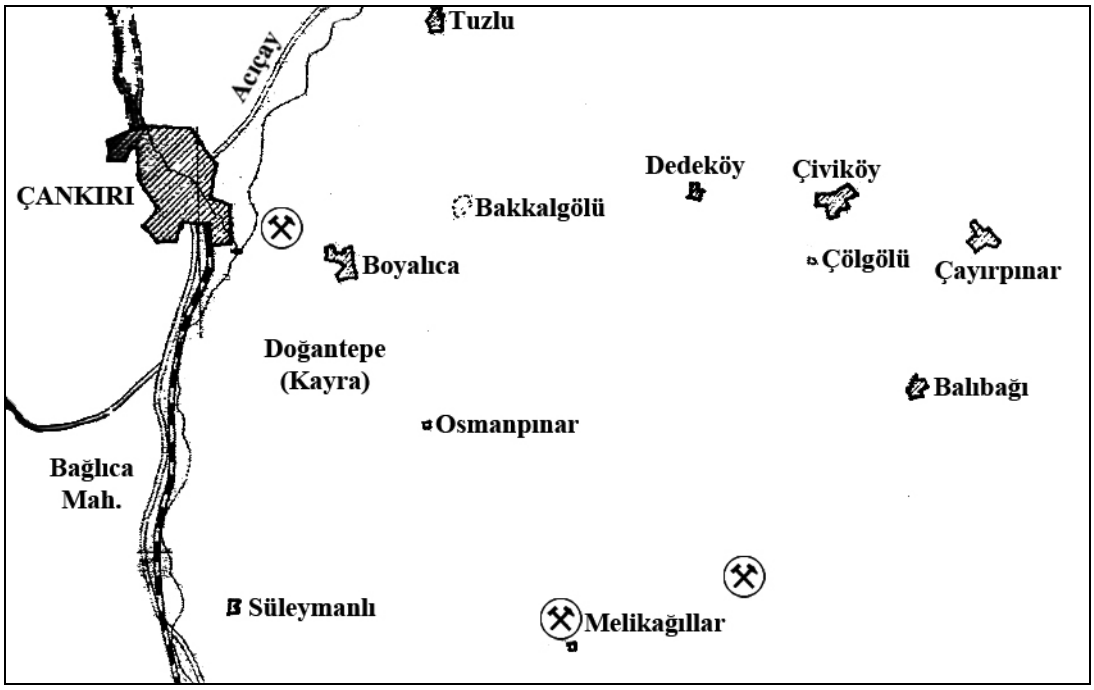
Tuzla Adı	Yeri	Rezerv (milyon ton)		
		Görünür	Muhtemel	Mümkün
Sekili	Yozgat	107	359	300
Çankırı	Çankırı	821	358	
Gülşehir	Nevşehir	75	96	959
Tepesidelik	Kırşehir	-	-	20
Tuzluca	Kars	-	-	100
Kağızman	Kars	-	-	60
Oltu	Erzurum	-	-	30

Sondaj yapılarak üç boyutu ile belirlenen görünür rezerv toplamı 1 milyar ton'u geçmektedir. Muhtemel ve mümkün rezervler de göz önüne alındığında kaya tuzu olarak Türkiye'nin çok büyük bir potansiyele sahip olduğu rahatlıkla söylenebilir.

3.3. Çankırı Kaya Tuzu Madeni

3.3.1. Maden ocağının yeri

Çankırı kaya tuzu yeraltı ocakları, Çankırı ili doğusunda il merkezine 25 km mesafede Balıbağı Köyü mevkisinde bulunmaktadır. Balıbağı, Çiviköy ve Ovacık köylerine giden asfalt yola 5 km mesafededir (Şekil 3.2). Sahada faaliyet gösteren birçok özel madencilik işletmesi mevcuttur. İçlerinden en büyük olanı bu tez çalışması için numunelerin temin edildiği Çankırı İli'ndeki maden işletmesidir. Bu işletme, 1995 yılına kadar TEKEL A.Ş. tarafından işletilen ancak daha sonra özelleştirilen bir yeraltı ocağıdır.



Şekil 3.2. Çankırı kaya tuzu ocakları yerbulduru haritası

3.3.2. Çankırı kaya tuzu bölgesinin jeolojisi

Çankırı kaya tuzu bölgesi Olige-miosen yaşlı jipsli seri biriminde bulunmaktadır. Bölgenin alttan itibaren litostratigrafi birimleri;

- İncik formasyonu
- Evaporitik zon
- Bayındır formasyonu
- Kızılırmak formasyonu
- Bozkır formasyonu
- Seki çakılları
- Alüvyon'dur.

Bölgede karşılaşılan bu oluşumlara ait jeolojik bilgiler ve kaya tuzu bölgesi stratigrafik dikme kesiti aşağıda verilmiştir (Şekil 3.3) (MTA, 1980).

i. İncik formasyonu: Tuzlu zonun tabanını oluşturan bu zonun kalınlığı 600 m olup üste doğru kaya tuzu, kil, marn, jipsli evaporitik zon biçimine geçmektedir. Tabakalanma belirgin olup tektonizma sonucunda dar kıvrımlar, kırıklar ve ters dönmeler gözlenmektedir.

ii. Evaporitik zon: Açık gri renkli bu zonun kalınlığı 400 metreden fazladır. Tuzlu serinin üst düzeylerinde Bayındır formasyonunun yeşil gri jipsli killi marnları ve silttaşı görülmekte sonra sürekli masif tuza girilmektedir. Evaporitik zon içinde kaya tuzu az miktarda beyaz sarı renkli jipsler ve killi marnlarla beraberdir. Genel olarak örtülü olup mostra verdiği yerlerde tabakalanma belirgindir. Evaporitik zon içindeki kaya tuzu Çankırı çevresinde pek çok yerde doğal mostra vermektedir.

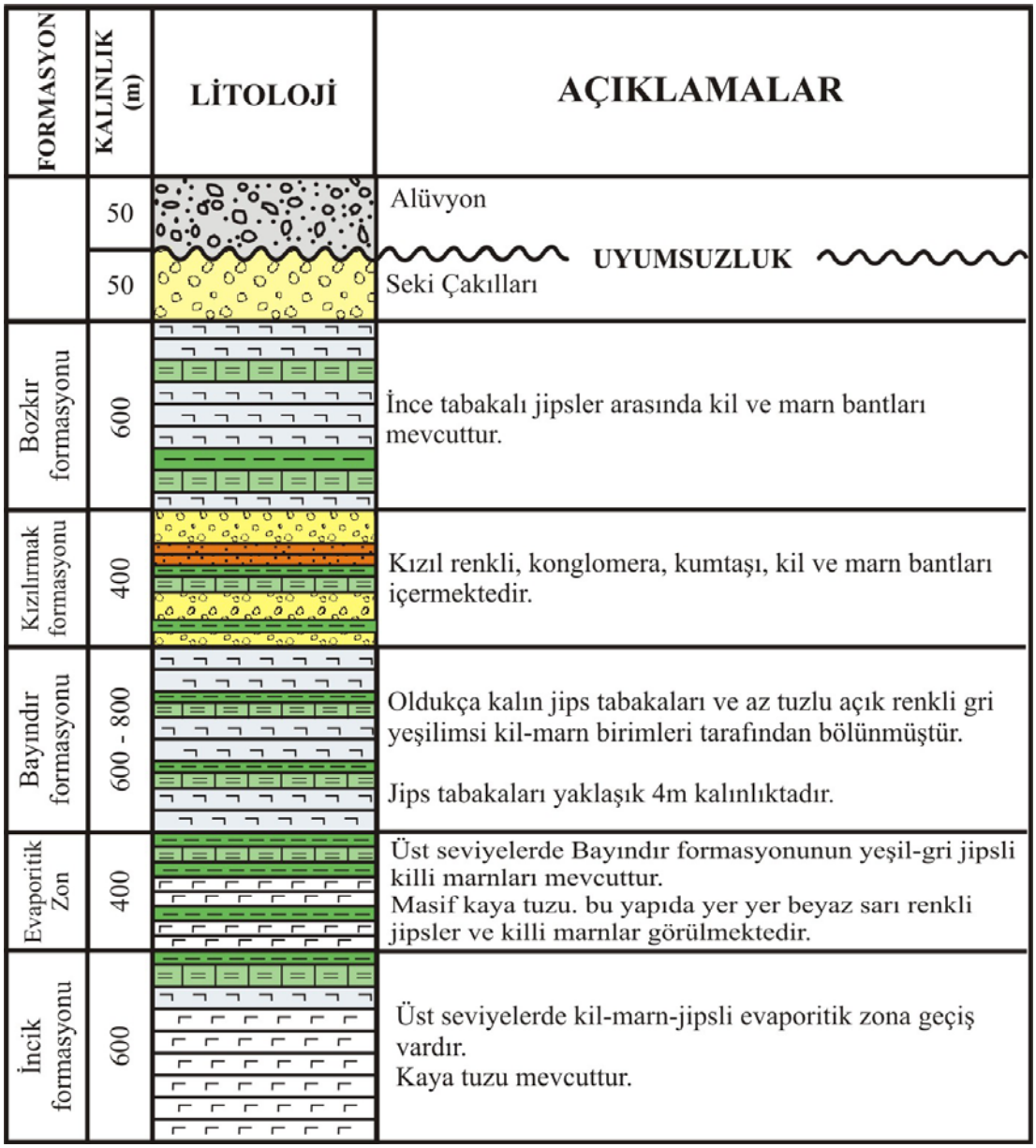
iii. Bayındır formasyonu: Formasyonun alt düzeyleri az tuzlu, açık renkli gri yeşilimsi kil marnlardan ve oldukça kalın jips katlarının ardalanmasından oluşmuştur. Jips katları 4 metreye kadar kalın olabilir. Bu formasyonun kalınlığı 600-800 metredir.

iv. Kızılırmak formasyonu: Altta Bayındır formasyonu üzerine diskordon olarak oturan bu formasyon oldukça kalın ve kızıl renkli konglomera, kumtaşı, kil ve marn düzeylerinden oluşmakta olup 400 metre kalınlığındadır.

v. Bozkır formasyonu: Altta bulunan Kızılırmak formasyonu üzerine konkordan olarak gelen bu formasyonda egemen olan jipsler ince tabakalar halinde olup, arada bant biçiminde kil ve marn düzeyleri bulunmaktadır. Gri beyaz renkli olan bu formasyonun kalınlığı 600 metre civarındadır.

vi. Seki çakılları: Kuvaternere ait sekiler yaşlı formasyonların çakıllarını içerirler. Çakıllar çimentosuz veya gevşek çimentolu olup kalınlığı 50 metre civarındadır.

vii. Alüvyon: Kuvaternere ait akarsu yataklarında bulunan alüvyon, çakıl ve kilden ibarettir. Yer yer değişen kalınlığı 0-50 metre arasındadır.



Şekil 3.3. Çankırı kaya tuzu bölgesi stratigrafik dikme kesiti (ölçeksiz)

3.3.3. Yapısal jeoloji

Çankırı bölgesi genç jeolojik devirlerde bir kırılma tektoniğine uğramış ve bunun sonucunda birçok bloklara bölünmüştür. Balıbağı çevresi yüksek bir blok olarak kalırken, Boyalıca köyünün batısında bir çukur meydana gelmiştir. Çankırı çevresinde tektonizma tabaka serilerine bağlı olarak doğu-batı doğrultusunda gelişmiştir.

3.3.4. Maden yatağının özellikleri

Evaporitik zon içinde mostra veren kaya tuzu az miktarda beyaz, sarı renkli jipsler ve killi marnlarla beraberdir. Görünür rezervi 812 milyon ton'dur. Genel olarak örtülü olup mostra verdiği yerlerde tabakalanma belirgindir. Bu oluşum içinde yer alan yeraltı kaya tuzu işletmesinde açılan galerilerde tabaka yatımları, katmanlar ve ters dönmeler gözlenmektedir. Bölgede fazlasıyla tektonik deformasyona uğramış kıvrımlar oluşmuştur. MTA tarafından yapılan çalışmalarda (MTA, 1980), tuzun derinliği ve yayılımı anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu sondaj verilerinden ortalama 20 m kalınlığında ekonomik çözelti madenciliği ve klasik galeri madenciliğiyle üretilebilir tuz tespit edilmiştir. Kalınlığı tam belirlenmeyen masif halde olan bu tuz kütlesi, yataya yakın bir tabakalanma göstermiştir. Bilinen tuz yatağının altında olan ve yayılımı ve kalınlığı tam belirlenemeyen ikinci bir kaya tuzu oluşumunun varlığı tespit edilmiştir.

3.3.5. İşletme üretim bilgileri

Çankırı yeraltı kaya tuzu madeni 771,21 kotunda olup 150 metrelik yaklaşık 25 m^2 kesitli ve % 5 eğimli bir desandre ile madene inilmektedir. İşletmede oda topuk yöntemi ile üretim yapılmaktadır, galeri kesit alanları 60-90 m^2'dir. Galeri yüksekliği

6,5-8 m genişliği 10-12 m olarak tesis edilmekte ve topuk kesiti yaklaşık 10x10 m olarak bırakılmaktadır. 10x10 m kesitinde topuklar bırakılarak delme-patlatma ile gevşetilen tuz kazılarak alınmaktadır.

Üretimine halen devam eden işletmede tuz oluşumunun en üst kotlarında üretim yapıldığından dolayı tavan basıncının yüksek olmadığı belirtilmiştir (MTA, 1980). MTA (1980) tarafından yapılan jeoteknik analizlerde, kaya tuzunun tek eksenli basınç dayanımının ortalama 25 MPa ve RMR değerinin ise 86 puanın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Üretim delme-patlatma, kazı, nakliye şeklinde yapılmaktadır. Delik delme işlemleri, işletme bünyesinde bulunan 40 mm çapında ve 140 cm derinliğinde delikler açabilen elektrik motorlu burgularla yapılmaktadır. Kullanılan elektrikli burgular ile rotary delme yapılmaktadır.

Patlatma işlemleri için V-Cut adı verilen orta çekme kullanılmaktadır. Bu orta çekme ile arın içine doğru ikinci bir serbest yüzey elde edilerek, üretim amaçlı tarama deliklerinin verimi artırılmaktadır. Elde edilen ürün blok şeklinde olup büyüklükleri yaklaşık 1x1x1 m boyutundadır. Üretim amaçlı tarama delikleri gecikmeli kapsüllerle sıralı olarak ateşlenerek kaya tuzu üretimi gerçekleşmektedir. Ateşleme işlemleri için 30 milisaniye aralıklı 16 kademe, elektrikli gecikmeli kapsüller kullanılmaktadır. Ocak içindeki kazı aynasına, her ateşleme için 100 dolayında delik ve buna bağlı olarak 100 adet ateşleme kapsülü seri bağlanarak uygun seçilmiş ateşleme manyetosu ile ateşleme yapılmaktadır. Üretim amaçlı atımlar, ürünün satışına uygun olarak programlanmaktadır. Üretilen kaya tuzu blokları kullanım yerlerine kamyonlar ile nakil edilmektedir. Yeraltı maden ocağının içerisine rahatlıkla 20-30 tonluk kamyonlar ve iş makineleri girebilmektedir (Şekil 3.4). Maden ocağında doğal havalandırma ile ocak içi için gerekli temiz hava temin edilmektedir.

Kaya tuzu galerisi içindeki sızıntı şeklindeki su gelirleri, su toplama kuyuları ile toplanarak motopompalar ile dışarı atılmakta olup yeraltı suyu işletmede herhangi bir sorun çıkarmamaktadır. İşletmede galerilerde 12 ay süreyle üretim yapılabilmektedir (MTA, 1980).

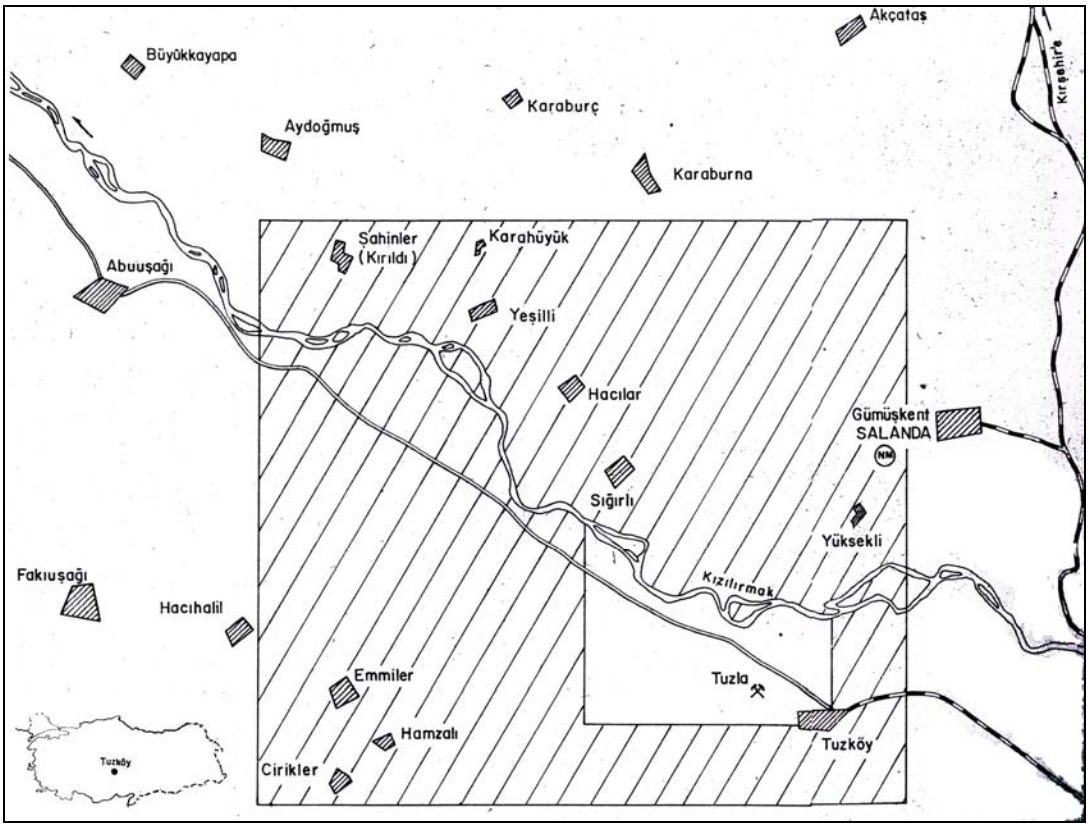


Şekil 3.4. Çankırı yeraltı kaya tuzu ocağında üretimde kullanılan bir iş makinesi

3.4. Nevşehir-Tuzköy Kaya Tuzu Madeni

3.4.1. Maden ocağının yeri

Nevşehir, Gülşehir, Tuzköy kaya tuzlası maden ocağı Aksaray K32-b3 paftasında yer almaktadır (Şekil 3.5). İşletme Nevşehir'e 33 km Gülşehir'e 14 km uzaklıkta olup bu merkezlere asfalt yolla bağlıdır. Tuzköy'e ise 2 km'lik devamlı açık kalabilen stabilize yol ile bağlanmış olup bu yollarla bütün mevsimlerde ulaşım sağlanabilmektedir. İşletmenin eski adı Hacıbektaş tuzlası olup yeni adı Nevşehir-Gülşehir-Tuzköy tuzlasıdır. Gülşehir tuzlası İç Anadolu'ddaki Tepesidelik, Sekili ve Çankırı kaya tuzlaları ile aynı coğrafik alan içerisinde yer almaktadır. Mevcut sahada TEKEL A.Ş. tarafından yeraltı madenciliği yapmış ve 1987 yılında madencilik faaliyetlerini durdurmuştur. 2003 yılında ise özelleştirme çerçevesinde özelleştirilmiş olan sahada açık ocak madenciliği yapılmaktadır. TEKEL A.Ş. tarafından gerçekleştirilen yeraltı maden ocağı açık olup şu an için üretim yapılmamaktadır.



Şekil 3.5. Nevşehir-Gülşehir-Tuzköy tuzlasının yerbulduru haritası

3.4.2. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bölgesinin jeolojisi

İç Anadolu Bölgesi'nde Lütesiyenin sonlarına doğru büyük bir depresyon göze çarpmaktadır. Gerek Pondid, gerekse Toros kuşağının kıvrımlanması sonucu İç Anadolu'da molas tipi karasal çökellerin depolandığı dağ içi havzalar oluşmuştur. Dağiçi havzaların zaman zaman kırıntılı, çökelmenin kıt olduğu, tuzlu bataklık veya playa tipi ortamlarda ise tuz ve jips gibi evaporitler durulmuştur.

Üst Oligosen'de İran üzerinden İç Anadolu'ya doğru sığ bir deniz kolunun ilerlediği, Alt Miyosen'de ise denizel koşulların oldukça egemen olduğu bilinmektedir. Denizel Alt Miyosen, Sivas ve Kayseri yörelerinin yanı sıra Bala yakınına kadar izlenebilmektedir (Kleinsorge ve Winken, 1965).

İç Anadolu'da kurak iklim Lütesyen'den Pliyosen'e kadar pek çok evaporit oluşumu vardır. Sıcak ve kurak koşullarda tuz ve jips ya geniş lagünlerde ya da kıyı gerisindeki üst kesimlerdeki playa tipi ortamlarda durulmuşlardır. Yatak denizel bir oluşum değildir (Ünüçok, 1985).

3.4.3. Yapısal jeoloji

Nevşehir ve civarı, Hersiniyen ve Alp orojenezleri etkisinde kalmıştır. Tektonik etkinlik nedeniyle yörede kıvrımlar ve faylar oluşmuştur. En önemli fay, Hırkadağı güneyinde, Civelek-Gümüşkent arasında 20 km uzunluğundaki kırık hattıdır. Diğer belirgin faylardan biride, Keçiağlat Tepe'den Kuzey-Güney doğrultulu uzanan, doğrultu atımlı sol yönlü faydır. Kızılöz Formasyonu, Hırkadağı ile Yiren Dağı arasında bir çökelme havzası senklinali oluşturmaktadır (MTA, 2008).

Kaya tuzu yatağını etkileyen en önemli yapı antiklinallerdir. Kızılırmak'ın güneyinde gözlenen antiklinal NW-SE yönlüdür. Antiklinal NW'ya ve SE'ya dalımlıdır. Antiklinal simetrik kıvrımlardan meydana gelmiştir. Antiklinalin kanatlarında yüksek eğim gözlendiği halde kaya tuzu işletmesinde 80^{o}'lik S eğim mevcuttur. Bunun sebebi de kaya tuzunun kendine özgü diapir kıvrım yapmış olmasıdır. Antiklinal kanatları, faylarla tektonizmaya uğradığından antiklinal ekseni düzgün gözlenememiştir. Bundan başka Kızılırmak fayı dolayısıyla ırmağa yakın yerde kıvrımlar gözlenmiştir. Pliyosen birimlerinde de NE'ye çok az eğimler gözlenmiştir.

Alandaki fayların Pliyosenden sonra da hatta Kuvaternerde dahi etkili olduğu tespit edilmiş, az da olsa küçük vadilerde gözlenmesi bunu kanıtlamıştır. Alanın kuzeyinde granit kristalin şist-mermer bir düşey fayla yükselmiştir. Fay gidişi N50W'dir. Bu alan dışında aynı fayla Eosenin birimleri ile granit yan yana gelmiştir. Alanın diğer önemli bir fayı, Kızılırmak vadisinden gelen faydır. Bu fayın etkisiyle Kızılırmağın güneyindeki alan yükselmiş, bunun neticesinde kaya tuzlası da yükselmiştir. Fayın yönü Kırşehir masifini çıkaran düşey faya uygun olup N45W'dir. Yine bu faya bağlı olarak Kızılırmağın güneyinde iki önemli fay daha oluşmuştur. Bu fayların yönleri aşağı yukarı Kızılırmak fayına uygundur. Bu faylar işletmenin 2

km batısında birleşirler. Bunlar kaya tuzu işletmesinin yaklaşık 1 km yakınında bulunurlar.

Alanda pek heyelandan söz edilemez ise de yakın bir zamanda heyelan gözlenebilir izlenimini vermektedir. Bazı yerlerde az da olsa kayma lokal olarak gözlenmeye başlamıştır (Ünüçok, 1985).

3.4.4. Maden yatağının özellikleri

Gülşehir kaya tuzlasında çökelme halitten meydana geldiği için klorürlü sulu bir playada çökeldiği kabul edilir. Gülşehir kaya tuzlasında gözlenen tuz katmanları arasında 2-3 cm'yi bulan killi ve kırıntılar bulunmaktadır, bu katmanlar zaman zaman beyaz, gri, koyu gri renklerde görülmesi tuzun saflığı ile orantılıdır. Gri renkler, kil ve yabancı maddelerden ileri gelmektedir. Tuz ne kadar saf olursa o denli beyaz renkli olmaktadır. Yapılan sondajlarda zaman zaman büyük kalınlıkta kil bantları bulunmakta bu killer hemen hemen tuzlu kil olarak nitelendirilmektedir.

Aynı zamanda tuzla birlikte anhidrite de rastlanmaktadır. Ancak tabaka yüzeyleri arasında anhidritlerin fazlaca toplandığı gözlenmektedir.

Gülşehir kaya tuzu yatağının ortalama bileşimi Çizelge 3.2'de sunulmuştur:

Çizelge 3.2. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu kimyasal bileşimi (Ünüçok, 1985)

Kimyasal Bileşim	%
Na	35,00
Cl	55,77
SO_4	1,59
Suda erimeyen madde	5,96
Br (ppm)	13,80

Gülşehir'deki kaya tuzu varlığı yalnız işletme ile sınırlanmamıştır. İşletmenin dışında da tuz oluşumu devam etmektedir (Ünüçok, 1985).

3.4.5. Maden işletme bilgileri

Kaya tuzu sahasında 8 adet sondaj verileri ve üçgenler yöntemi kullanılarak rezerv hesapları yapılmıştır. Sondaj sırasında alınan karotlar üzerinde kaya tuzunun özgül ağırlığının yaklaşık olarak 2,1 gr/cm³ olduğu belirlenmiştir ve yine karot örnekleri göz önünde bulundurularak kaya tuzunun tenörü % 93,13 olarak belirlenmiş ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde Gülşehir-Tuzköy'de yaklaşık; 75.046.649 ton görünür, 96.384.456 ton muhtemel, 959.411.250 ton mümkün rezerv bulunmaktadır.

Tuzköy kaya tuzlası TEKEL A.Ş. tarafından 1987 yılına kadar oda topuk yöntemiyle işletilmiştir. Oda topuk yöntemiyle yapılan üretimde topuklar yaklaşık 8-10 m arasında bırakılarak çalışmalar yapılmıştır (Şekil 3.6). İşletmede yapılan gözlemlerde arazi gerilmeleri nedeniyle tabakaların tabaka yüzeylerinden ayrıldığı bazen de eğildiği görülmüştür (Şekil 3.7). Bu durumun oluşumunda sığ derinliten dolayı oluşan su gelirinin etkisi de bulunmaktadır. Ayrıca kaya tuzu tabakalanması içerisinde yer alan killi bantlar (özellikle dik eğimli olanlar) önemli zayıflık düzlemleri oluşturmaktadır. Ocakta 1,5-2 metrelik burgularla açılan deliklere özel hazırlanmış rulo içinde barut konularak fitiller vasıtasıyla patlatma yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan üretimin çoğu ufalanmakta, bu arada çıkan büyük parçalar da insan gücünün daha kolay taşıyabileceği küçüklüğe getirilerek kırılıp vagonlara yüklenmektedir. 1000 kg kapasiteli vagonlar insan gücü ile itilerek asansöre boşaltılıp yeryüzüne taşınmaktadır.

Yeraltı maden ocağı TEKEL A.Ş. tarafından işletilirken üretim, yıllara göre aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.3);

Çizelge 3.3. TEKEL A.Ş. tarafından işletildiği yıllardaki üretim miktarları (Ünüçok, 1985)

Üretim Yılı	Üretim miktarı (ton/yıl)
1978	14.460,230
1979	13.800,450
1980	13.273,840
1981	11.148,000
1982	6.988,680
1983	6.708,000

1982 yılında Bulgaristan ile yapılan kaya tuzu anlaşmasına göre 8354 ton tuzun 3553 tonu Gülşehir-Tuzköy tuzlasından ihraç edilmiştir (Ünüçok, 1985).



Şekil 3.6. Oda topuk yöntemiyle işletilen kaya tuzu yeraltı madeninden bir görünüm

1987 yılına kadar devam eden üretim aynı yıl durdurulmuş ve 2003 yılına kadar herhangi bir üretim yapılmamıştır. 2003 yılında özel bir madencilik firması tarafından sahada dekapaj yapılmış ve kaya tuzuna ulaşılmıştır. Bir süre açık ocak madenciliği ile üretilen tuz eski maden galerilerine ulaşılınca yeraltı işletmesine geçilmesi düşünülmüştür (Şekil 3.8 ve 3.9). Ancak kapanışından bu zamana kadar geçen sürede galerilere dolan yeraltı suları problem oluşturmuştur. Bu tuzlu çözelti yeryüzünde yapılan tuz havuzları yeryüzünde yapılan tuz havuzlarına alınarak doğal yol ile kristalize hale getirilmiş ve pazarlanmıştır.



Şekil 3.7. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu yeraltı ocağındaki topuklarda meydana gelen arazi gerilmeleri ve killi bantların etkisiyle tabakaların ayrılması



Şekil 3.8. Açıkocak ve ocak tabanında ortaya çıkan eski yeraltı maden galerisi



Şekil 3.9. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu açık ocağından bir görünüm ve ocak tabanında açığa çıkan eski yeraltı maden galerileri

4. DENEY DÜZENEĞİNİN HAZIRLANMASI

4.1. Giriş

Bu bölümde sünme deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilen sabit yükleme yapmaya olanak sağlayan azot gazı üniteli deney düzeneği hakkında bilgiler verilmiştir. Bu kapsamda öncelikle geliştirme aşamalarından bahsedilmiş ve deneme amaçlı ilk geliştirilen deney düzeneği hakkında bilgiler verilmiş ardından nihai deney düzeneği tanıtılmıştır.

4.2. Deney Düzeneğinin Geliştirilmesinde Dikkate Alınan Literatür İncelemesi

Sünme (creep) deneyleri, sünek özelliğe sahip malzemelerin mekanik davranışını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu deney yaygın olarak beton malzemeler için kullanılmaktadır. Beton malzemesinden yapılan özel büyük projelerde mutlaka kullanılan beton malzemesinin sünme davranışı belirlenmelidir. Tüneller, barajlar, viyadükler, asma köprüler ve gökdelenler bu tür projelere örnek verilebilir.

İstanbul ilinin trafik probleminin çözümü için planlanan ve uygulanan MARMARAY projesinin en önemli parçası, İstanbul Boğazı içerisinde kalan tüp tünel projesidir. Bu çalışmada dışarıda inşa edilen beton tüpler, özel batırma teknikleri ile suyun dibine indirilmektedir. Yaklaşık 50 m derinliğe sahip boğazın dip kısmına açılan özel çukurlara konan beton tüplerin üzeri ise deniz dibi malzemesi ile doldurulacaktır. Bu proje, ülkemizin olduğu gibi dünyanın da en önemli projesi olarak yerini almaktadır. Tünelin parçalarını oluşturan beton tüpler, tonlarca su yüküne ve su akıntılarına maruz kalmakla birlikte muhtemel depreme de dayanıklı olması istenmektedir. Beton tüplerin yapımında kullanılan beton malzemesinin kalitesi çok büyük önem arzetmektedir. Bu malzemenin zamana bağlı olarak oldukça uzun süreler hiçbir olumsuzluğa fırsat vermeden hizmet vermesi beklenecektir.

Beton malzemesinin bu özelliğinin ölçülebilmesinde ise tek deney sistematiği sünme (creep) deneyidir. Projede bu tür deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi- İnşaat Fakültesi – İnşaat Mühendisliği – Yapı Laboratuarında kurulan sünme deney düzeneği ile belirlenmektedir.

Taranan makalelerde (Bölüm 2) deney düzenekleri ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmemektedir. Ancak MARMARAY projesi için hazırlanan sünme deney düzenek yapısının dünyanın diğer projelerindekilere benzer olduğu bu deney düzeneğini kuran UTEST firması yetkililerince beyan edilmiştir. İTÜ-İnşaat Mühendisliği Bölümü- Yapı Laboratuarında kullanılan sünme deney düzeneği tamamen hidrolik ve elektrik sistemi ile çalışmaktadır. Beton numune üzerine gelen yük hidrolik olarak sağlanmaktadır. Hidrolik yükün uygulanmasında ve sabit tutulmasında elektrohidrolik sistemi kullanılmaktadır. Ayrıca deney esnasında beton malzemesindeki yatay ve düşey deformasyon değerleri elektronik mesafe ölçerler ile (LVDT) ölçülmekte ve veri toplama ünitesine (data logger) aktarılmaktadır. Deneyler yaklaşık 20-30 gün sürmektedir. Elektrik kesintisine ve arızalarına karşılık bir jeneratör devreyi beslemek için hazır bekletilmektedir.

Silindirik veya küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen sünme deneylerinin sürelerinin 20-30 gün olmasına karşılık, kaya tuzu numunelerine ait deneylerde bu süre 1,5-2 yıla kadar çıkabilmektedir. Bu durumda bir deney numunesinde yaşanacak elektrik kesintisi muhtemelen bir çok kez olabilecektir. Bu ise deneylerin doğruluğuna etki edecektir. Bu problemin aşımı için deney düzeneklerinde elektrik sisteminin kullanılmaması en akılcı yol olarak görülmüştür. Tek eksenli olarak uygulanacak olan sabit yük, önceleri ölü yük sistemi ile sağlanmıştır. Bu tip deney düzeneğine tipik bir örnek Şekil 4.1'de görülmektedir. Ölü ağırlıklı sistemde, Şekil 4.1'de görüldüğü üzere numune üzerindeki yük, bir kola bağlı ağırlık yardımıyla uygulanmaktadır. Bu sistemde yük uygulayacak ağırlık miktarı arttıkça, ağırlığı kontrol eden kol uzunluğu da artmakta ve bu durumda deney ünitesinin hacmi büyümektedir. Deney düzeneği büyük laboratuarlar gerektirse de en güvenilir deney düzeneği olarak kabul görmektedir.



Şekil 4.1. Almanya'da faaliyet gösteren TU-Clausthal araştırma merkezinde kullanılan ölü yük ağırlık sistemi (Özarslan ve ark., 2007)

Ölü ağırlıklı sünme deney düzeneğinin çok büyük yerler kapsamasında ortaya çıkan olumsuzluğu ortadan kaldırmak için hidrolik sistemden faydalanmanın yolu araştırılmıştır. Hidrolik sistemlerin kullanılmasında son 50-60 yıl içerisinde yapılan gelişmeler, sünme deney düzeneğinin yenilenmesinde önemli bir katkı oluşturmuştur. Hidrolik sistemin yanısıra yükün sabit tutulmasında ve deformasyonların ölçülmesinde elektrik sisteminden yararlanılan yeni deney düzenekleri geliştirilmiştir (Şekil 4.2).

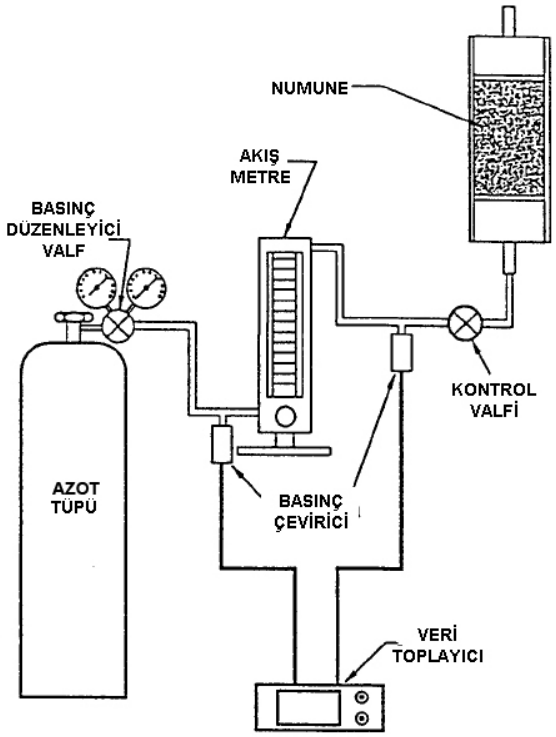


Şekil 4.2. Almanya'da faaliyet gösteren TU-Clausthal araştırma merkezinde kullanılan bilgisayar kontrollü hidrolik deney sistemi (Özarslan vd., 2007)

Bu sistemin iki temel probleme sahip olduğu literatür çalışmalarından anlaşılmaktadır. Bunlardan birincisi hidrolik sistemdeki kaçaklar, ikincisi ise elektrik kesinti ya da arızalarıdır. Hidrolik sistemdeki kaçaklar sabit yükün azalmasına neden olurken, elektrik kesintisi ya da arızası ise hidrolik yükü sabitleyen elektirik mekanizmasının görevini yapamamasına yani yükün azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca elektrik kesinti ya da arızası, veri toplama ünitesini ve elektronik deformasyon ölçerlerin okuma yapmalarını kesintiye uğratmaktadır. Bu ciddi problemin çözümünde üstün malzeme ve kalifiye tasarım ve işçiliğe gereksinim vardır. Ayrıca elektrik problemi için güçlü jeneratöre ihityaç vardır. Bu da maliyetleri artırmakta ve kompleks sistemin kontrolünü zorlaştırmaktadır.

Bilgisayar kontrollü hidrolik-elektrik sistem içeren sünme deney düzeneklerinde (Şekil 4.2), sabit yüklemeyi sağlayan hidrolik yağı yerine akümülatör işlevi gören azot gazı kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 4.3). Bu, sistemin hem temiz olmasını hem de kontrolünü sağlamıştır. Bugün otomobil lastik tekerleklerinin şişirilmesinde yoğun bir şekilde kullanılan azot gazı sıcaklık değişimlerinden

etkilenmemektedir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi numune üzerindeki sabit yük azot gazı ile sağlanabilmektedir.



Şekil 4.3. Azot gazı ile çalışan sünme deney düzeneği (Pfeifle ve ark., 1998)

4.3. Deneme Amaçlı Deney Düzeneğinin Hazırlanması

Sünme deneyinde en önemli nokta numune üzerine uygulanacak yükün veya gerilmenin sürekli olarak sabit bir şekilde uygulanabilmesidir. Bu günümüzde numune üzerine ölü yük olarak tabir edilen yükün direkt olarak numune üstüne uygulanması yoluyla bilgisayar kontrollü olarak sağlanabilmekte veya akümülatör gazı sistemi olarak adlandırılan azot gazının oluşturduğu sabit gaz basıncının numune üzerine uygulanması yöntemi ile de sağlanabilmektedir (Şekil 4.4 ve 4.5).

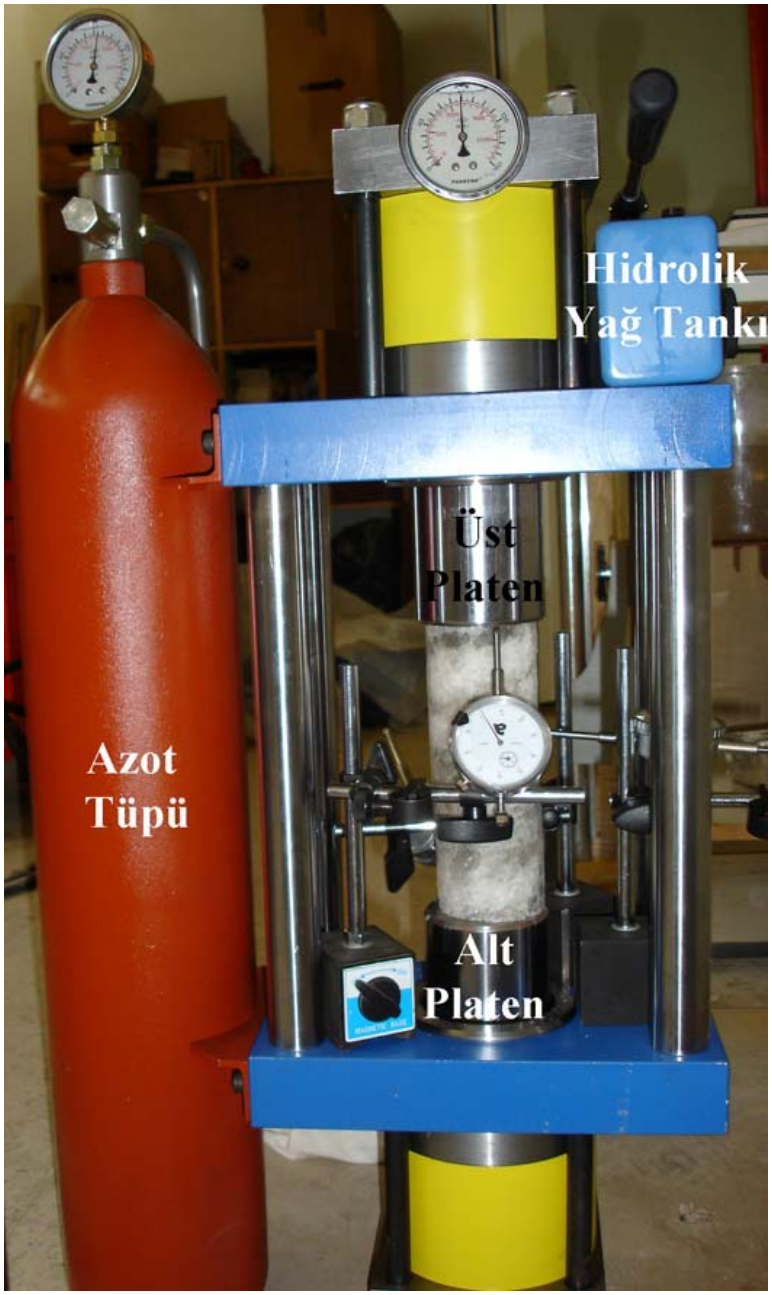
Almanya Karlsruhe Üniversitesi Kaya ve Zemin Mekaniği Enstitüsü'ndeki sistemlerden yararlanılarak sünme deneylerinde numune üzerine uygulanması gerekli

olan sabit yükün sağlanabilmesinin akümülatör gazı sistemi ile donatılmış bir hidrolik pres vasıtasıyla sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Akümülatör gazı olarak azot kullanılmasında karar kılınmıştır. Sayın Özarslan'ın Almanya'da gerçekleştirmiş olduğu çalışmalardan faydalanılarak Almanya'daki laboratuarda kullanılan ekipmanlar incelenmiş ve deney cihazının çalışma sistematiği teknik olarak kâğıda aktarılmıştır (Özarslan, 2006). Bu tür deney düzenekleri çok sık kullanılmadığı için piyasada seri olarak üretilmemekte ancak sipariş edilerek yaptırılmaktadır.

Hazırlanan teknik prosedürü hayata geçirebilecek bir teknik destek arayışına geçilmiştir. Bunun için Ankara'da faaliyet gösteren OSTİM'deki birçok firmayla birebir görüşmeler yapılmıştır. Bunların birçoğu teknik olarak maliyetin çok yüksek olacağını belirterek bu işi yapmaktan kaçınmıştır. Bunlardan sadece UTEST firması isteğimize cevap verebileceğini belirtmiştir. Bu firmanın teklifi bu doktora tez çalışması için SÜ-BAP tarafından verilen mali desteğin çok üzerinde olması ve sistemde tamamen hidrolik ve elektronik aksanların olması nedeni ile iptal etmek durumunda kalınmıştır. Bunun üzerine Konya sanayiinde bu işi yapabilecek firmalar aranmaya başlanmıştır. Azot gazı ile çalışan birçok ekipmanın imalatını gerçekleştiren Faz Elektrik ve Makine Sanayi Ticaret Ltd. Şti. ile işbirliği yapılarak çalışmalara başlanmıştır. Şirket ile yapılan karşılıklı görüşmeler neticesinde öncelikle bir adet deneme amaçlı deney düzeneği geliştirilerek ilk denemelerin gerçekleştirilmesi ve bu denemelerde görülen eksikliklerin belirlenerek nihai tasarımın belirlenmesine karar verilmiştir.

Azot gazının ekipmanlarda kullanımı konusunda uzman olan firma yetkilisi ile yapılan karşılıklı fikir alışverişi ile geliştirilen prototipte (Şekil 4.4) iki ayrı basınç sistemi mevcuttur. Bunlar hidrolik ve azot gaz sistemleridir. Öncelikle sabit yük ayarlaması için azot tüpü içerisine harici bir kaynaktan istenilen basıncı sağlayacak miktarda azot gazı basılmaktadır. Bu azot gaz basıncı aynı zamanda deney düzeneğinden beklenen sabit yük değerine eşit olmaktadır. Sistem istenilen basınca ulaşınca azot gazı tüpüne azot gazı transferi kesilmektedir. Böylece azot gaz basıncı deneye hazır hale getirilmektedir. Azot gazı Şekil 4.4'den görüldüğü üzere presin alt başlıklarını kontrol etmektedir. Numune iki başlık arasına yerleştirildikten sonra hidrolik yağ sistemi ile üst başlık numune üzerine baskı uygulamaktadır. Hidrolik

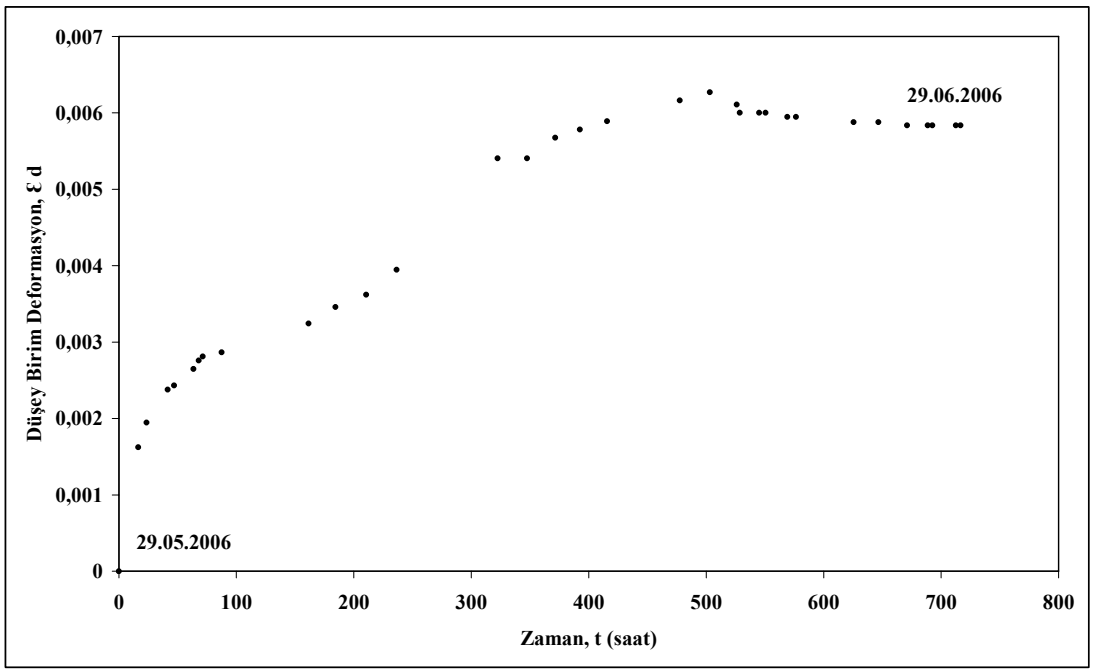
yağ basıncı ile azot gazı basıncı dengelendiğinde sistem deneye hazır hale gelmektedir. Geliştirilen bu deney düzeneğinde hidrolik sistem sadece deney düzeneğinin deneye hazırlanmasında kullanılmaktadır.



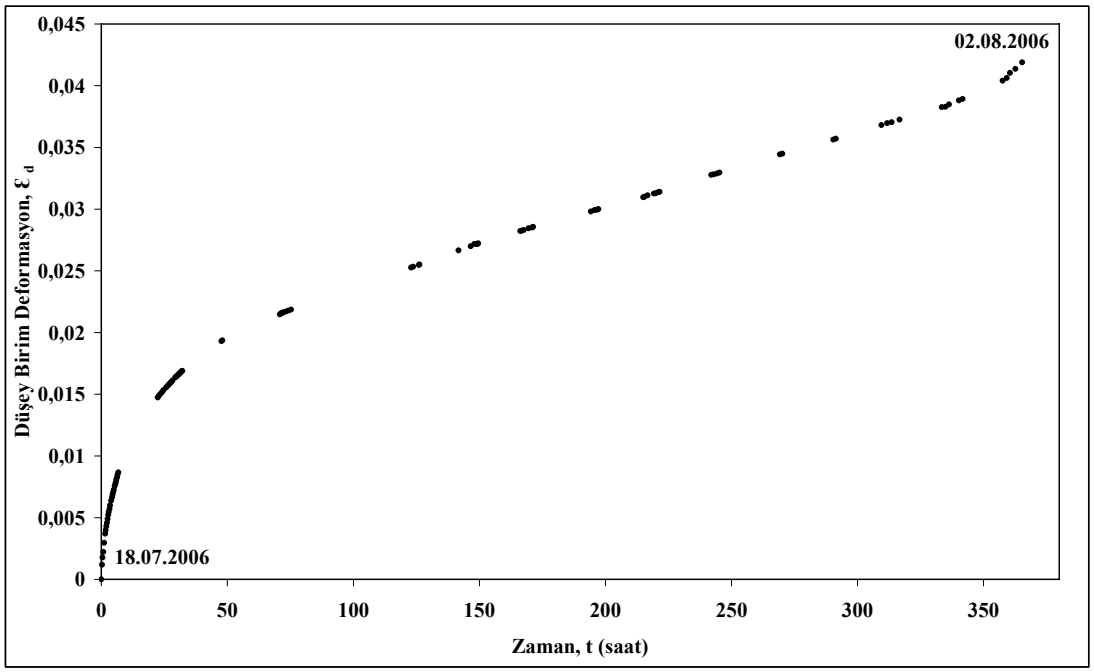
Şekil 4.4. Geliştirilen prototip sünme deney düzeneği

Oluşturulan prototipte numune üzerine uygulanabilecek en yüksek yük yaklaşık 6 ton olacak şekilde planlandı. Deneyde kullanılan numune çapı 67,25 mm ve boyu 185 mm'dir.

Azot gazı sistemi ile hidrolik sistemin birbirini dengelemesi esas alınarak hazırlanan deney düzeneğinde yapılan ilk denemelerde, azot gazı sistemi ile hidrolik sistem dengede kalamayarak deneyin sağlıklı bir şekilde devam etmesini engellemiştir. Elde edilen deformasyon değerleri grafiksel olarak incelenmiş ve bir problem olduğu görülmüştür (Şekil 4.5). Şekil 4.5'den görüldüğü üzere numune üzerindeki yükün sabit kalmadığı ve böylece beklenen davranış şeklinin yakalanamadığı görülmüştür. Yükün sabit kalamamasının nedeninin hidrolik sistemdeki basınç düşüşü olduğu belirlenmiştir. Buna çözüm olarak hidrolik sistemin deney başladıktan sonra devreden çıkarılması düşünülerek bir kilit sistemi geliştirilmiştir. Numune iki başlık arasına yerleştirildikten sonra hidrolik sistem yardımıyla numune istenilen basınç sağlanıncaya kadar sıkıştırılmaktadır. Hidrolik sistemde istenilen basınç değerine ulaşılınca alt başlığa hükmeden azot gazı basıncı ile aynı değer okunabilmektedir. Bu işlemin ardından üst başlık kilitlenerek hidrolik basınç sıfırlanmakta sonuç olarak da azot gazı sistemi devreye girmektedir. Sonuçta numune üzerindeki yükün istenilen değerde sabit kalması sağlanmaktadır. Bu sayede deney başladıktan sonra geçerli olan tek basınç azot gazı sistemi tarafından sağlanmış ve karmaşanın ortadan kaldırılacağına inanılmıştır. Deney cihazının son durumu üzerinde hazırlanan numune (çap 67 mm ve boy 185 mm) 6 ton sabit yük ve yaklaşık 17 MPa sabit gerilme altında deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen veriler yardımıyla hzırlanan grafikler ile sistemin doğru çalıştığı tespit edilmiştir (Şekil 4.6). 2 adet numune üzerinde gerçekleştirilen denemeler sonucunda elde edilen grafikler incelenerek geliştirilen sistemin doğru çalıştığı kanısına varılarak nihai sistemin tasarımına geçilmiştir.



Şekil 4.5. Geliştirilen prototipte gerçekleştirilen ilk deney sonucu



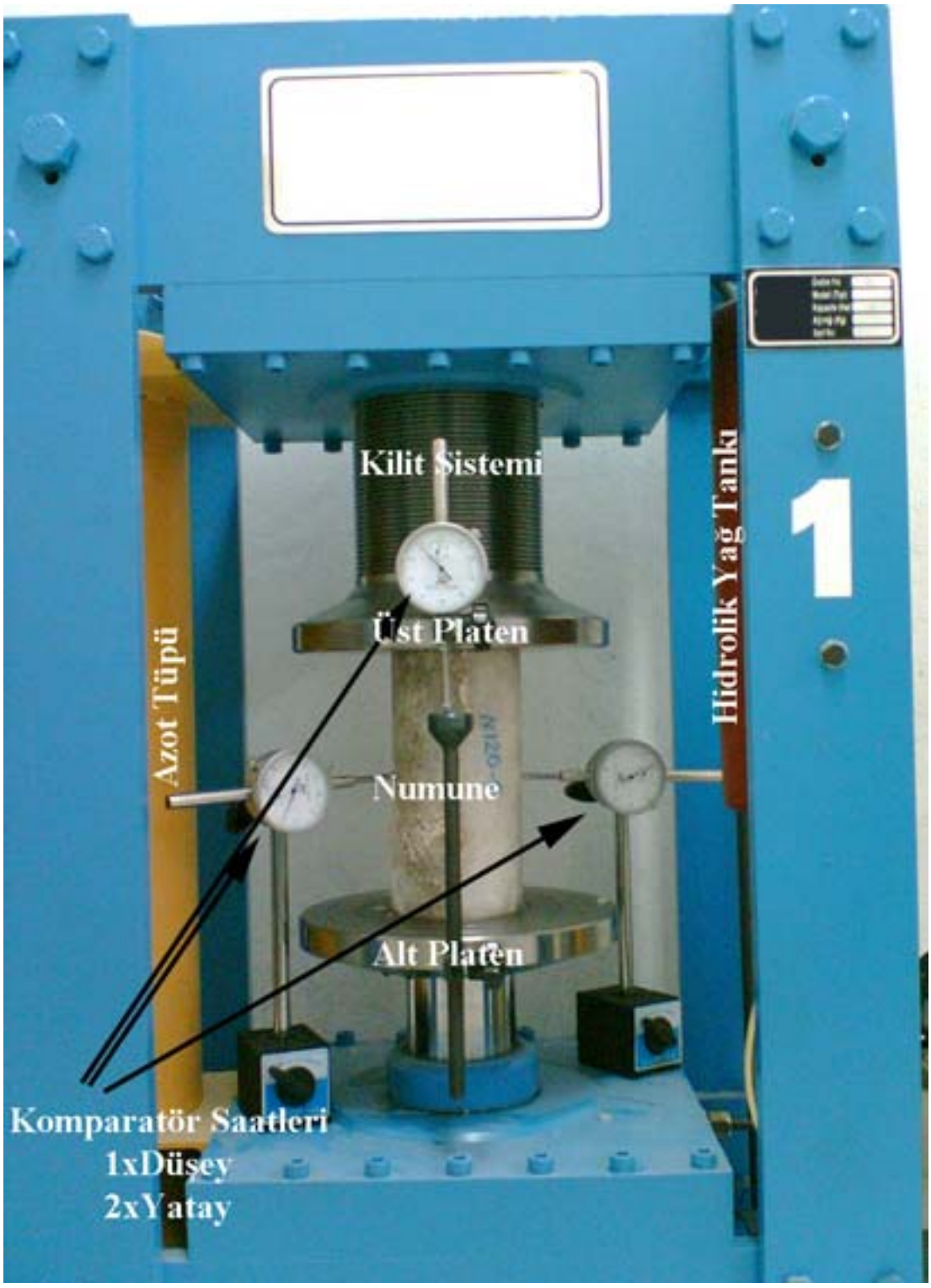
Şekil 4.6. Kilitleme sistemi geliştirildikten sonra prototipte yapılan sorunsuz deney sonucu

4.4. Nihai Deney Düzeneği

Deneme amaçlı sünme deney düzeneğinden elde edilen tecrübeler sonucunda nihai düzeneğin geliştirilmesi çalışmalarına başlanmıştır. İlk önce hidrolik presin en yüksek kapasitesinin belirlenmesine yönelik çalışmalar başlatılmıştır. Bunun için Bölüm 7'de belirtildiği gibi boyut analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Farklı çap ve boyutlarda hazırlanan karot numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler neticesinde en uygun boy/çap oranının (D/H) 1,5'den büyük olduğu ve çap değerinin ise bu çalışmaya temel olan kaya tuzları için 100 mm olduğu anlaşılmıştır. Bu boy-çap oranına sahip numuneye ait tek eksenli basınç dayanım değerlerinin Nevşehir için 26,5 MPa, Çankırı için ise 18,4 MPa olduğu belirlenmiştir. Boyut analizi çalışmaları neticesinde hidrolik preste denenecek numune boyutunun çap değerinin 100 mm, boy değerinin ise 200 mm olmasına karar verilmiştir. Bu boyutlardaki numuneler için en yüksek basınç dayanımının da 30 MPa olduğu dikkate alınarak hidrolik pres tasarımına geçilmiştir. Tasarımda bu preslerin ileride başka sünek numunelerin sünme deneylerinde de kullanılması düşünülmüştür. Yukarıda belirtilen noktaların ışığında 6 ton olan prototip deney düzeneği maksimum yük kapasitesi nihai deney düzeneğinde 30 tona çıkarılmıştır. Hidrolik presin imalat tasarımında aslında en yüksek yük kapasitesi yaklaşık 45 ton olarak alınmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda en yüksek yük değeri 30 ton kabul edilmiştir. Başlıklar arası mesafe 55 cm'ye yükseltilmiş ve başlık çapları da artırılarak 20 cm'ye çıkarılmıştır. Şekil 4.7'de nihai deney düzeneğinin tipik bir fotoğrafı görülmektedir. Sünme deneylerinin gerçekleştirilmesi için özel ortama ihtiyaç bulunmaktadır. Bunun için SÜ-Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuarında özel bir oda düzenlenmiştir. Şekil 4.8'de ise deney düzeneklerinden meydana gelen sünme deney laboratuarı görülmektedir.

Geliştirilen deney düzeneğinde alt başlık altındaki haznede hidrolik yağ-azot gazı sistemi mevcuttur. Öncelikle istenilen basınca kadar hidrolik sistem vasıtasıyla azot gazı sistemi geriye itilerek istenilen basınçta sıkıştırılmaktadır. Sistem hazır hale getirildikten sonra iki başlık arasına numune koyulmakta ve sonrasında hidrolik yağ devreden çıkarılarak azot gazı sistemi devreye sokulmaktadır. Numune iki başlık arasında istenilen basınçta sıkıştıktan sonra sabit yük altında 1/100 mm

hassasiyetindeki bir adet düşey ve iki adet yatay komparatör saatlerinden deformasyon ölçümlerine başlanmaktadır (Şekil 4.7). Ancak numune üzerindeki yük değeri sıfırdan istenilen basınç değerini yaratacak yük değerine çıkıncaya kadarki süreçte deformasyon okumaları alınmamıştır. Bu süreç yaklaşık 10 dk olmaktadır. Ölçümler periyodik bir şekilde deformasyonun oluşma hızına bağlı olarak alınmakta aynı anda ortam sıcaklığı ve nemi de kontrol edilerek kayıt altına alınmaktadır. Deney laboratuarının sıcaklık ve nem kontrolü bir adet split klima ile sağlanmaktadır (Şekil 4.9). Ayrıca oda içerisindeki nem ve sıcaklık Şekil 4.10'de görülen dijital ölçer ile takip edilmektedir. Hazırlanan laboratuarda ölçülen tipik bir deney sonucu Şekil 4.11'de görülmektedir. Şekil 4.11 ve 4.6 sonuçlarının benzer olduğu görülmektedir. Sünme deney laboratuarında gerçekleştirilen ilk deney sonuçları 2007 Haziran tarihinde Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Müh. Bölümü öğretim üyesi Dr. Ahmet Özarslan tarafından Almanya'da görev yapan TU-Clausthal Kaya Mekaniği Laboratuarı sorumlusu Dr.Ing. Düsterloh'a gösterilmiş ve sonuçların teorik olarak beklenildiği gibi olduğu teyidi alınmıştır.



Şekil 4.7. Sünme deneylerinde kullanılan nihai deney düzeneği



(a) Sünme deney laboratuarında bulunan 1, 2 ve 3 nolu hidrolik presler



(b) Sünme deney laboratuarında bulunan 4, 5 ve 6 nolu hidrolik presler

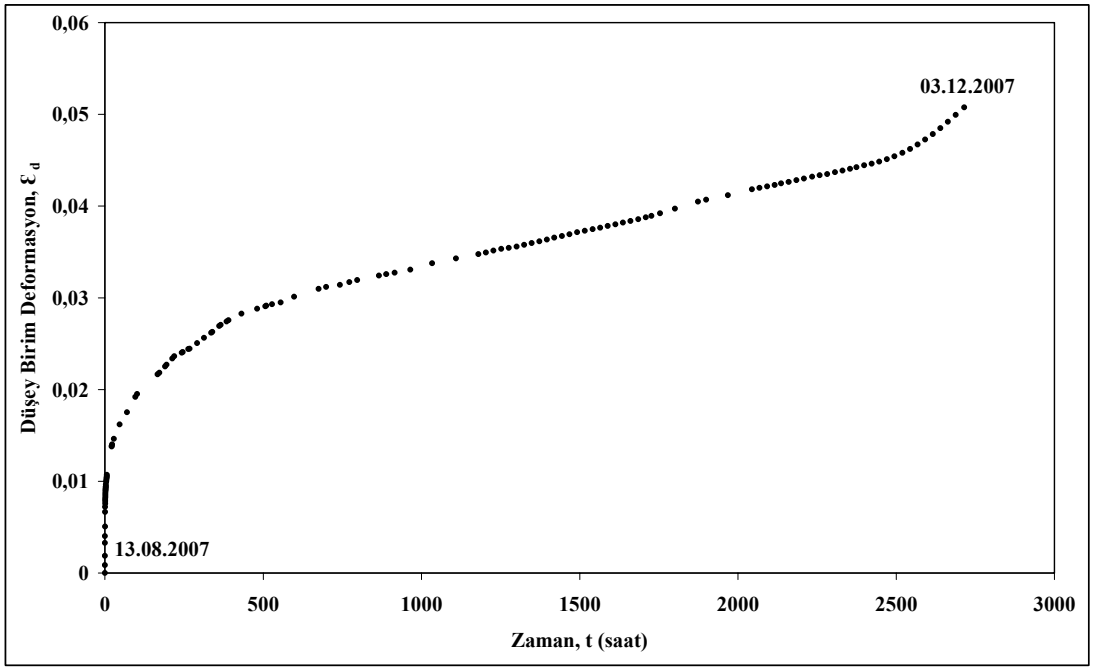
Şekil 4.8. Sünme deney laboratuarı



Şekil 4.9. Sünme deney laboratuarında kullanılan split klima



Şekil 4.10 Sünme deney laboratuarında kullanılan dijital nem ve sıcaklık ölçer



Şekil 4.11. Nihai tasarımlı hidrolik presten ölçülen tipik bir sünme davranışı

5. NUMUNELERİN TEMİNİ VE HAZIRLANMASI

5.1. Genel

Bu bölümde tüm kaya mekaniği deneylerinin gerçekleştirileceği numunelerin temini, deneye hazırlanması ve hazırlanan numunelerin özellikleri hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Öncelikle ISRM (1981) tarafından önerilen kaya mekaniği çalışmaları temel alınarak gerçekleştirilecek deneylerde kullanılacak numuneler hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Daha sonra, uzun dönemli sünme (creep) deneyleri için kullanılacak numune boyutlarının elde edilmesi nedeniyle boyutlarının belirlenmesi için yapılan numune hazırlama çalışmalarından bahsedilmiştir.

5.2. Numune Bloklarının Temini

Deneylerde kullanılmak için gerekli olan kaya tuz blokları Ülkemizin önemli iki farklı kaya tuzu oluşumundan elde edilmiştir. Bunlar ayrıntılarıyla Bölüm 3'de verilen Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuz yataklarıdır. Çankırı tuzlasından yaklaşık 2000 kg ağırlığındaki 30 adet kaya tuzu bloğu araziden temin edilerek Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuarı'na getirilmiştir (Şekil 5.1a). Yine aynı şekilde Nevşehir-Gülşehir tuzlasından elde edilen yaklaşık 2500 kg ağırlığındaki 40 adet kaya tuzu bloğu Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuarı'na nakil edilmiştir (Şekil 5.1b). Bu bloklar kısa ve uzun dönemli kaya mekaniği deneylerinde kullanılacak olan karot numunelerinin elde edilmesi amacıyla uygun bir ortamlarda saklanmıştır.



Şekil 5.1.a Çankırı kaya tuzu ocağından laboratuara getirilen kaya tuzu blokları



Şekil 5.1b Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu ocağından laboratuara getirilen kaya tuzu blokları

5.3. Numunelerin Hazırlanması

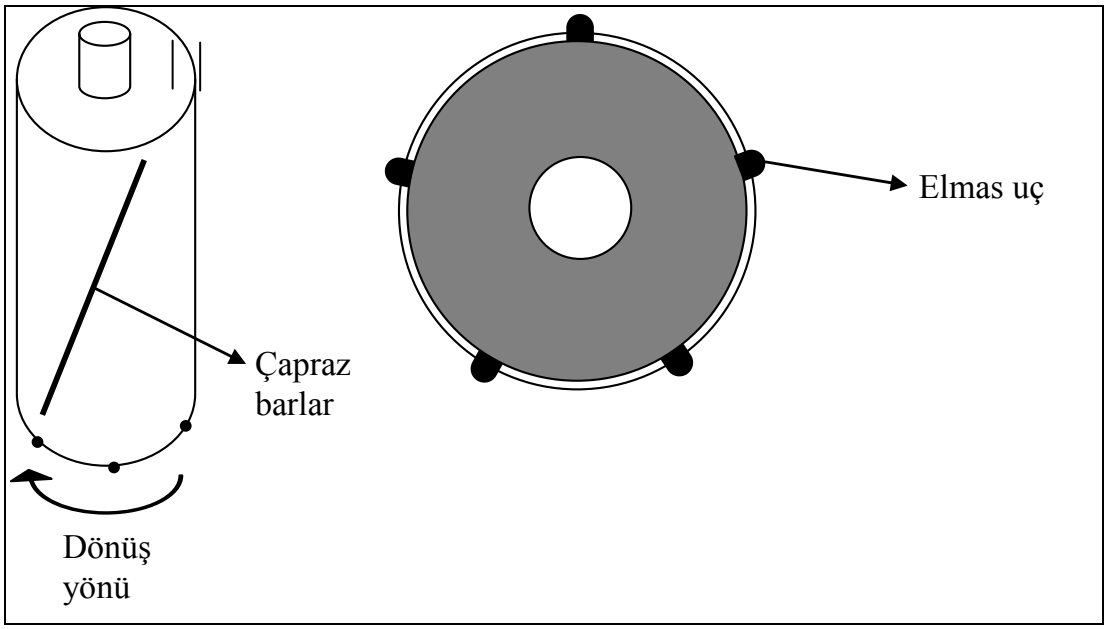
Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuarına getirilen yaklaşık 70 adet bloğunun önce blok kesme makinesi yardımıyla bir kenarının düzlenmesi gerekmiştir. Karot alma makinasında karot alma çalışmaları için bu düzenlemeye ihtiyaç duyulmuştur. Blok kesme çalışmalarından önce normalde olduğu gibi su kullanılmış ancak ciddi erimelerin olduğu görülmüştür. Bunun üzerine su kullanımı sınırlandırılmış fakat bu önlemin yeterli olmadığı bilakis yetersiz suyun kaya tuzu tozlarını yıkayamadığı ve böylece çamur etkisi ile bloğun hasarlanmasına yani düzgün yüzeyin elde edilememesine neden olmuştur. Blok düzeltme çalışmalarında suyun kullanılmamasına karar verilmiş ancak bu kez de ciddi bir toz problemi gündeme gelmiştir. Bu probleme karşın istenen şekilde blokların düzeltilebildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak blok kesme makinasının üzeri naylon bir örtü ile örtülerek tozun laboratuara dağılması önlenmeye çalışılmıştır. Yaklaşık 70 blok Şekil 5.2'deki gibi düzeltilmiştir.

Maden Mühendisliği laboratuarında standart bir karot alma makinesi kullanılarak temin edilen kaya tuzu bloklarından karot alma çalışmalarına başlanması planlanmıştır. Ancak kaya tuzunun erime açısından suya dayanımının çok düşük olması nedeniyle karot alımı esnasında taş kesme çalışmalarında olduğu gibi alınan kaya tuzu karotlarının yüzeylerinde erimelerin olduğu görülmüştür. Bundan dolayı çalışmalara su olmadan devam edilmesine karar verilmiştir. Bu durumda da karot numunesi kesilirken çıkan kırıntı ve tozların atılamamasından kaynaklanan ısınma ve toz birikimi sonucunda karot ucunun sıkışması gündeme gelmiştir. Sonuç olarak karot numunesinin kesiminin tamamlanamaması, karot numunesi alınsa bile numunenin iki-üç parça olması veya sık sık karot makinesi arızası ile karşı karşıya kalınmıştır. Karşılaşılan problemin aşılması için çalışmalar devam ederken Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd.Doç.Dr. Ahmet Özarslan'ın, Almanya Clausthal Teknik Üniversitesi'ne yapmış olduğu teknik ziyarette, benzer problemle orada da karşılaşıldığının kendisine anlatıldığını ve bu problemin karotiyer gövdesine tozları atabilen bir bar yerleştirilmesi ile aşılabildiğinin ifade edildiğini ve bunu oradaki karot alma çalışmalarında da ayrıca gözlemlediğini belirtmiştir (Özarslan, 2007). Bu bilgi

dikkate alınarak problemin aşılması amacıyla Şekil 5.3-5.5'de şematik olarak gösterilen karot kesici uçları tasarlanarak Konya Sanayisinde yaptırılmıştır. Hazırlanan özel karot uçları ile kaya tuzundan su olmadan karot alma işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu sistem kısaca karot kesicinin ucuna simetrik olarak yerleştirilen beş adet elmas ucun kaya tuzu bloğu içinde ilerlerken karot tüpünün etrafına çapraz şekilde yerleştirilen barlar sayesinde tozun dışarı atılması esasına dayanmaktadır. Bu sayede kesilen ortamdaki toz dışarıya başarıyla atılabilmekte böylece karot alma makinasındaki ısınma ve sıkışma problemi ortadan kalkmıştır. Karşılaşılan problemin çözümünden sonra bütün karotlar bu hazırlanan özel uçlar (42 mm, 54 mm, 93 mm) ile su kullanılmadan alınmaya çalışılmıştır. Ancak karot alma makinesindeki ısınma ve sıkışma probleminin tamamen aşılmasına rağmen toz probleminin, bir miktar azalmayla birlikte tamamen yok edilemediği görülmüştür. Bu durum laboratuarda bulunan diğer cihazların zarar görmesine ve orada çalışanların sağlıklarına etki edeceği endişesini doğurmuştur.



Şekil 5.2. Blok düzeltme makinesi



Şekil 5.3. Kaya tuzunda su olmadan karot almaya olanak sağlayan karotiyer ucu tasarımı



Şekil 5.4. Tasarıma uygun olarak imal edilen karotiyer ucu

5.4. Kaya Mekaniği Deneylerinde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması

Elde edilen kaya tuzu bloklarından kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirmek üzere ISRM (1981) standartları dikkate alınarak numuneler hazırlanmıştır. Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzlası numuneleri üzerinde Schmidt sertliği, yoğunluk, suda dağılma, nokta yükleme, dolaylı çekme, tek eksenli basınç, tek eksenli deformabilite, üç eksenli basınç ve yük artırma-boşaltma deneylerinin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu deney numunelerine ait hazırlık çalışmaları sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

5.4.1. Yoğunluk-gözeneklilik belirleme deneyi numunelerinin hazırlanması

Suda kolayca eriyen bir yapıya sahip olan kaya tuzu için, Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir örneklerinin tümünde yoğunluk ve gözeneklilik belirleme deneylerinde geometrik yaklaşım kullanılmıştır. Bu deneyde kullanılmak üzere bir boyutu 25 mm olan küp numunelerden 10 adet hazırlanmıştır. Benzer şekilde Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu örneklerinde Bouyancy metodu ile Bulk hacminin hesaplanması düşünülmüş ve bu kapsamda 10 adet düzensiz numune hazırlanmıştır.

5.4.2. Suda dağılma dayanımı indeks deneyi numunelerinin hazırlanması

Suda dağılma dayanımı deneyi numunelerinin hazırlanmasında, Çankırı kaya tuzu numunesi için 19 set deney numunesi, Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numunesi için 10 set deney numunesi ISRM (1981) standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Her bir set için ağırlıkları 40-60 gr arasında ve toplam ağırlığı 450-550 gr'ı geçmeyen 10 adet kaya tuzu numunesi kullanılmıştır. Her bir numunenin köşeleri deney öncesinde yuvarlatılarak ISRM (1981)'nin önerdiği küre şekline getirilmişlerdir (Şekil 5.5). Hazırlanan bu numunelerden Çankırı numunesinde 19 set

deney numunesinin 11 seti ve Nevşehir-Gülşehir numunesinin ise 4 seti 20^{o}C oda sıcaklığında su ile diğer setlerin ise yine oda sıcaklığında ancak farklı seviyelerde derişik hale getirilmiş tuzlu su ortamında deneye tabi tutulmaları planlamıştır.



Şekil 5.5. Suda dağılma dayanımı deneyi için hazırlanan tipik iki deney seti

5.4.3. Kaya sertliği deneyi numunelerinin hazırlanması

Çankırı kaya tuzu madeninden elde edilen bloklar üzerinde gerçekleştirilen Schmidt sertlik belirleme deneylerinde yaklaşık 80x80x80 cm boyutlarında 49 adet blok numune kullanılmıştır.

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerinde sertlik belirleme deneyi arazi ve laboratuar olmak üzere iki türde yapılmış ve arazide yapılan deneylerde 9 adet topuk üzerinde Schmidt sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Laboratuarda yapılan sertlik belirleme deneyi için ise ayrıca 20 adet kaya tuzu bloğu kullanılmıştır.

5.4.4. Tek eksenli basınç dayanımı belirleme deneyi numunelerinin hazırlanması

Tek eksenli basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi amacıyla ISRM (1981) standartlarına uygun olacak şekilde boy/çap (H/D) oranları 2,13 ile 2,94

arasında değişen silindirik karot numuneler hazırlanmıştır (Şekil 5.6). Bu amaçla Çankırı kaya tuzundan (Çizelge 5.1) 8 adet, Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan (Çizelge 5.2) ise 11 adet olacak şekilde toplamda 16 adet silindirik numune hazırlanmıştır.



Şekil 5.6. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan tipik silindirik karot numuneler

Çizelge 5.1. Çankırı kaya tuzundan elde edilen tek eksenli basınç dayanımı numuneleri

Numune No	Şekil	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Boy/Çap (H/D) oranı
1	Silindir	49,0	129,0	2,63
2	Silindir	51,0	128,0	2,51
3	Silindir	55,0	130,0	2,36
4	Silindir	54,0	132,0	2,44
5	Silindir	54,0	131,0	2,42
6	Silindir	66,0	177,0	2,68
7	Silindir	64,0	159,0	2,48
8	Silindir	62,0	167,0	2,69

Çizelge 5.2. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan elde edilen tek eksenli basınç dayanımı numuneleri

Numune No	Şekil	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Boy/Çap (H/D) oranı
1	Silindir	42,00	105,00	2,50
2	Silindir	51.35	141,25	2,75
3	Silindir	51.01	149,15	2,92
4	Silindir	50.50	150,25	2,98
5	Silindir	51.35	121,40	2,36
6	Silindir	51.20	125,35	2,45
7	Silindir	51,08	127,70	2,50
8	Silindir	93.00	253,50	2,73
9	Silindir	93.50	199,50	2,13
10	Silindir	91.50	245,00	2,68
11	Silindir	92,25	230,62	2,50

5.4.5. Dolaylı çekme (Brazilian) deneyi numunelerinin hazırlanması

Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyinde kullanılmak üzere kaya tuzu numuneleri ISRM (1981) standartlarına göre boy/çap (H/D) oranı 1/2 olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 5.7). Hazırlanan numunelerin Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numuneleri için boyutları Çizelge 5.3 ve 5.4'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.7. Dolaylı çekme deneyi için hazırlanan tipik numuneler

Çizelge 5.3. Çankırı kaya tuzu için hazırlanan dolaylı çekme dayanımı deney numuneleri

Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)
1	54,8	28,0
2	55,2	28,4
3	54,8	28,3
4	52,8	27,4
5	52,5	27,0
6	53,3	27,6
7	53,1	27,1

Çizelge 5.4. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan dolaylı çekme deney dayanımı numuneleri

Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)
1	52,5	26,8	18	51,3	26,8
2	53,0	26,0	19	51,3	25,9
3	49,0	26,9	20	93,9	47,1
4	51,2	26,9	21	93,7	50,5
5	51,2	26,6	22	93,2	46,2
6	50,4	26,7	23	93,6	51,5
7	50,7	26,3	24	93,6	47,3
8	50,9	26,4	25	92,9	46,4
9	51,2	26,2	26	92,9	47,3
10	51,2	27,0	27	93,6	48,0
11	51,0	26,0	28	91,4	46,6
12	51,8	26,6	29	90,0	47,6
13	51,2	26,5	30	93,1	46,9
14	51,9	26,1	31	93,6	48,8
15	51,5	26,6	32	88,0	46,6
16	50,9	26,6	33	92,9	46,4
17	51,5	26,6			

5.4.6. Nokta yükleme indeks deneyi numunelerinin hazırlanması

ISRM (1981) tarafından önerilen nokta yükleme indeks deneyi numunelerinin hazırlanmasında Çankırı kaya tuzu için çapsal ve eksenel deneyler için karot şekilli

ve Nevşehir- Gülşehir kaya tuzu için arazide düzensiz şekilli parçalar halinde numuneler elde edilerek nokta yükleme deneylerinin gerçekleştirilmesi için hazırlanmıştır. Çankırı kaya tuzu numunesi (Çizelge 5.5) için tabakalara dik (d) ve paralel (p) olmak üzere iki ayrı tipte 44 adet karot numunesi hazırlanmıştır. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna (Çizelge 5.6) ait nokta yükleme dayanım deneyi için ise 195 adet şekilsiz numune, parça deneyi için gerekli olan boyutlara (0,3L<D<L) getirilerek deneylere tabi tutulmak üzere hazırlanmıştır.

Çizelge 5.5. Çankırı kaya tuzuna ait nokta yükleme dayanımı deney numuneleri

Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)
d1	31,0	42,5	p1	20,8	28,5
d2	29,6	32,0	p2	19,5	26,0
d3	19,6	22,5	p3	32,1	41,5
d4	29,2	31,0	p4	32,7	47,0
d5	25,9	32,0	p5	29,3	34,0
d6	19,7	30,5	p6	29,0	32,5
d7	33,9	38,0	p7	37,1	47,0
d8	41,0	52,0	p8	19,1	25,5
d9	37,7	42,5	p9	23,6	31,5
d10	20,4	31,0	p10	26,0	38,0
d11	39,7	49,5	p11	28,9	37,0
d12	37,2	43,5	p12	35,6	42,0
d13	28,0	32,5	p13	35,0	53,0
d14	37,0	45,0	p14	22,3	36,0
d15	30,5	41,0	p15	48,0	57,0
d16	26,0	29,0	p16	34,5	38,5
d17	41,5	55,0	p17	50,5	62,0
d18	30,0	42,0	p18	51,0	68,5
d19	27,5	33,5	p19	44,0	53,0
d20	27,0	36,0	p20	41,0	61,0
			p21	37,0	42,0
			p22	48,0	53,0
			p23	26,5	36,5
			p24	34,0	47,0

d: Tabakalara dik - p: Tabakalara paralel

Çizelge 5.6. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait nokta yükleme dayanımı deney numuneleri

Numune No	Ortalama Çap (D) (mm)
1	40,15
2	40,07
3	33,69
4	37,85
5	33,26
6	38,72
7	34,54
8	35,02
9	34,11
10	38,85
11	37,35

5.4.7. Tek eksenli deformabilite deneyi numunelerinin hazırlanması

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerinde olduğu gibi ISRM (1981) standartlarına uygun olacak şekilde boy/çap (H/D) oranları 2,13 ile 2,94 arasında değişen silindirik numuneler hazırlanmıştır (Şekil 5.8). Bu amaçla Çankırı kaya tuzundan 8 adet olmak üzere Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan ise 3 adet olacak şekilde toplamda 11 adet karot numune hazırlanmıştır (Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8).

Çizelge 5.7. Çankırı kaya tuzundan hazırlanan tek eksenli deformabilite numuneleri

Numune No	Numune Şekli	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Boy/Çap (H/D)
1	Silindir	49,0	129,0	2,63
2	Silindir	51,0	128,0	2,51
3	Silindir	55,0	130,0	2,36
4	Silindir	54,0	132,0	2,44
5	Silindir	54,0	131,0	2,42
6	Silindir	66,0	177,0	2,68
7	Silindir	64,0	159,0	2,48
8	Silindir	62,0	167,0	2,69

Çizelge 5.8. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan hazırlanan tek eksenli deformabilite numuneleri

Numune No	Numune Şekli	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Boy/Çap (H/D)
1	Silindir	93,0	253,5	2,73
2	Silindir	93,5	199,5	2,13
3	Silindir	91,5	245,0	2,68

5.4.8. Üç eksenli basınç dayanımı deneyi numunelerinin hazırlanması

Üç eksenli basınç dayanımı deneyi numunelerinin hazırlanmasında, deneyde kullanılacak olan Hoek hücresinin (Şekil 5.8) boyutlarına göre çapı 52 mm ve boy/çap (H/D) oranı yine 2,5-3 olacak şekilde ISRM (1981) standartlarına uygun Çankırı kaya tuzundan 6 adet ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan ise 9 adet silindirik deney numunesi hazırlanmıştır. Numunelere ait bilgiler Çizelge 5.9 ve 5.10'da sunulmuştur.

Çizelge 5.9. Çankırı kaya tuzu için hazırlanan üç eksenli basınç dayanımı deneyi için hazırlanan numuneler

Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)
1	52	129
2	52	132
3	54	132
4	54	129
5	53	130
6	53	128

Çizelge 5.10. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan üç eksenli basınç dayanımı deneyi numuneleri

Numune No	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)
1	52	132
2	52	132
3	52	132
4	52	133
5	52	132
6	52	132
7	52	133
8	52	133
9	52	132

5.4.9. Periyodik yük artırma-boşaltma deney numunelerinin hazırlanması

Periyodik yükleme-yük boşaltma deneyi numunelerinin hazırlanmasında, tek eksenli basınç ve tek eksenli deformabilite deney numunelerinde olduğu gibi ISRM (1981) standartlarına uygun, boy/çap (H/D) oranı 2,5-3 arasında olacak şekilde silindirik numuneler hazırlanmıştır. Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir numunelerine ait bilgiler Çizelge 5.11 ve 5.12'de sunulmuştur.

Çizelge 5.11. Çankırı kaya tuzu için hazırlanan periyodik yük artırma-boşaltma dayanımı deneyi numuneleri

Numune No	Numune Tipi	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Boy/Çap (H/D)
1	Silindir	68,0	174,0	2,56
2	Silindir	66,0	181,0	2,74

Çizelge 5.12. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan periyodik yük artırma-boşaltma dayanımı deneyi numuneleri

Numune No	Numune Tipi	Çap (D) (mm)	Boy (H) (mm)	Boy/Çap (H/D)
1	Silindir	93	232	2,5
2	Silindir	93	251	2,7

5.5. Sünme Deneyi için Boyut Belirleme Deneylerinde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması

Sünek malzemeler üzerinde sabit etkin gerilmelerin malzeme davranışını nasıl etkilediğinin belirlenmesi kaya mekaniği uzmanlarını oldukça meşgul etmiştir. Bölüm 2'de değinildiği üzere araştırmacılar genellikle numune çapını (D) 100 mm boyunu (H) ise 200 mm seçmişlerdir. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları Bölüm 6'da sunulmuştur. Sonuçların çapa bağlı olarak farklılık göstermesi sonucunda bu çalışmada Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda boyut etkisinin araştırılması planlanmıştır. Bunun için aşağıda verilen çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çankırı kaya tuzu madeninden elde edilen bloklardan boyut belirleme çalışmaları kapsamında değişik boy (H) ve çaplarda (D) 54 adet karot numunesi hazırlanmıştır. Numune çapları 42 mm, 54 mm ve 93 mm olmak üzere üç ayrı tipte belirlenmiştir. Aslında 100 mm çaplı karotiyer ucu ile 93 mm çaplı karot alınabilmesinden dolayı son çap 93 mm seçilmiştir. Boyut etkisinin araştırılması amacıyla tüm çaplarda değişik boy/çap (H/D) oranlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu oranlar sırasıyla 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 olmak üzere beş ayrı tiptedir. Çankırı örneklerine (Şekil 5.8) ait tüm özellikler Çizelge 5.13'te sunulmuştur.



Şekil 5.8. Sünme deneyi için boyut belirleme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan Çankırı kaya tuzu örnekleri

Çizelge 5.13. Çankırı kaya tuzu bloklarından elde edilen karot adet ve boyutları

H/D oranı	Şekil	D = 42 mm		D = 54 mm		D = 93 mm	
		H (mm)	Adet	H (mm)	Adet	H (mm)	Adet
0,5	Karot	21,0	3	27,0	5	46.5	3
1,0	Karot	42,0	4	54,0	5	93.0	5
1,5	Karot	63,0	2	81,0	6	139.5	5
2,0	Karot	84,0	2	108,0	2	186.0	3
2,5	Karot	105,0	2	145,8	3	251.1	3
3,0	Karot		-		-	279,0	1

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu madeninden elde edilen bloklardan ise boyut (H) belirleme çalışmaları kapsamında değişik boy (H) ve çaplarda (D) 45 adet karot numunesi hazırlanmıştır. Numune çapları Çankırı örneğinde olduğu gibi yine 42 mm, 54 mm ve 93 mm olmak üzere üç ayrı tipte belirlenmiştir. Boyut etkisinin araştırılması amacıyla tüm çaplarda değişik boy/çap (H/D) oranlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu oranlar sırasıyla 0,5, 1, 1,5, 2 ve 2,7 olarak beş ayrı tiptedir. Nevşehir-Gülşehir örneklerine (Şekil 5.9) ait tüm özellikler Çizelge 5.14'de sunulmuştur.



Şekil 5.9. Sünme deneyi için boyut belirleme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu örnekleri

Çizelge 5.14. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bloklarından elde edilen karotların özellikleri

H/D oranı	Şekil	D = 42 mm		D = 54 mm		D = 93 mm	
		H (mm)	Adet	H (mm)	Adet	H (mm)	Adet
0.5	Karot	21.0	3	27,0	3	46.5	3
1.0	Karot	42.0	3	54,0	3	93.0	3
1.5	Karot	63.0	3	81,0	3	139.5	3
2.0	Karot	84.0	3	108,0	3	186.0	3
2.7	Karot	113.4	3	145,8	3	251.1	3

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan numune hazırlama çalışmaları sonucunda her iki maden sahası için hazırlanan numune şekilleri, boyutları ve adetleri topluca Çizelge 5.15 ve 5.16'da sunulmuştur.

Çizelge 5.15. Çankırı kaya tuzu bloklarından hazırlanan numune adetleri ve boyutları

Deney Adı	Numune Şekli	Numune Boyutları	Numune Sayısı
1.Schmidt sertliği	Blok	-	49
2.Yoğunluk	Küp	25 mm	10
3.Suda dağılma	Yuvarlatılmış	40-60 gr	
	Normal su		110
	% 25'lik çözelti		20
	% 50'lik çözelti		20
	% 75'lik çözelti		20
	% 100'lük çözelti		20
4.Nokta yükleme	Silindirik	0,3L<D<L	44
5.Dolaylı çekme	Silindirik	L/D=2 (50 mm)	7
6.Tek eksenli basınç	Silindirik	L/D=2,5-3	8
7.Tek eksenli deformabilite	Silindirik	L/D=2,5-3	8
8.Üç eksenli basınç	Silindirik	L/D=2,5-3	6
9.Yük artırma-boşaltma	Silindirik	D=66-68 mm	2

Çizelge 5.16. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bloklarından hazırlanan numune adetleri ve boyutları

Deney Adı	Numune Şekli	Numune Boyutları	Numune Sayısı
1.Schmidt sertliği	Blok	-	20
	Arazide topuk	-	9
2.Yoğunluk	Düzensiz	-	10
3.Suda dağılma	Yuvarlatılmış	40-60 gr	
	Normal su		40
	% 33'lük çözelti		20
	% 66'lık çözelti		20
	% 100'lük çözelti		20
4.Nokta yükleme	Düzensiz	0,3L<D<L	195
5. Dolaylı çekme	Silindirik	L/D=2 (50 mm)	20
		L/D=2 (93 mm)	14
6.Tek eksenli basınç	Silindirik	L/D=2,5-3	11
7.Tek eksenli deformabilite	Silindirik	L/D=2,5-3	3
8.Üç eksenli basınç			
9. Yük artırma boşaltma	Silindirik	L/D=2,5-3	2
	Silindirik	L/D=2,5-3	9

6. KAYA MEKANİĞİ DENEYLERİ

6.1. Genel

Bu bölümde, Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir'den temin edilen kaya tuzu bloklarından elde edilen kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen kaya mekaniği deneyleri ve sonuçlarından bahsedilecektir. Deneysel çalışmalar için hazırlanan numuneler, ISRM (1981) tarafından önerilen standartlar göz önüne alınarak kaya mekaniği deneylerine tabi tutulmuşlardır.

6.2. Çankırı Kaya Tuzu Örnekleri Üzerinde Gerçekleştirilen Kaya Mekaniği Deneyleri

Deneyler ISRM (1981) standartlarına uygun olarak yapılmış olup Çankırı numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler sırasıyla; yoğunluk, gözeneklilik, su içeriği, boşluk hacmi belirleme, nokta yükleme, suda dağılma, Schmidt sertliği, dolaylı çekme, tek eksenli basınç dayanımı, tek eksenli deformabilite, üç eksenli basınç dayanımı ve periyodik yükleme boşaltma deneyidir. Bu deneyler ile elde edilen sonuçlar aşağıda sunulan başlıklarda verilmiştir.

6.2.1. Yoğunluk, Gözeneklilik, Su İçeriği ve Boşluk Hacmi Belirleme Deneyi

Kaya tuzunun yoğunluk, gözeneklilik, su içeriği ve boşluk hacminin belirlenmesi amacıyla yapılan bu deneyde kaya tuzunun normal çeşme suyunda kolayca çözünebilmesi önemli bir problem yaratmıştır. Deneysel çalışmada doygun tuz çözeltisinin kullanılmasına karar verilmiştir. Yoğunluk belirleme deneyi için susuz kesim ile hazırlanan numuneler Caliper metoduna göre önce doğal ağırlıkları

alınmış ve 105^{o}C'lik fırında altı saat bekletildikten sonra çıkarılan numuneler 0,01 gr hassasiyetli tartı ile tartılarak kuru ağırlıkları alınmıştır. Bu işlemi takiben hazırlanmış olan numuneler, tuza % 100 doyurulmuş tuzlu-su çözeltisinde 3-4 saat bekletildikten sonra çıkarılan numuneler tekrar tartılarak suya doygun ağırlıkları kayıt edilmiştir. Daha sonra ise suya doygun kaya tuzu numunelerinin su içindeki tartımları alınarak elde edilen veriler yardımıyla su içeriği, boşluk hacmi, yoğunluk ve gözeneklilik değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

Sonuç olarak ortalama su içeriği % 0,256, ortalama boşluk hacmi 0,43 cm^3, ortalama yoğunluk 2,17 gr/cm^3 ve ortalama porozite ise % 2,15 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.1. Çankırı kaya tuzuna ait yoğunluk, gözeneklilik, su içeriği ve boşluk hacmi değerleri

Numune No	Numune Hacmi V (cm^3)	Doğal Ağırlık G_w (gr)	Kuru Ağırlık W_d(gr)	Yaş Ağırlık W_s(gr)	Su İçeriği (%)	Gözenek Hacmi (cm^3) (Pv)	Yoğunluk (d) (gr/cm^3)	Porozite (n) (%)
1	19,5	40,98	40,85	41,36	0,317	0,51	2,095	2,615
2	22	54,15	54,08	54,48	0,129	0,40	2,458	1,818
3	20	45,93	45,72	46,23	0,457	0,51	2,286	2,550
4	21	43,15	43,04	43,35	0,254	0,31	2,049	1,476
5	21	42,27	42,13	42,88	0,331	0,75	2,006	3,571
6	17	34,53	34,38	34,76	0,145	0,28	2,028	1,647
7	20	49,78	49,69	49,93	0,180	0,24	2,485	1,200
8	21	42,63	42,50	43,05	0,304	0,55	2,023	2,619
9	19	41,32	41,24	41,96	0,193	0,72	2,170	3,789
10	21	44,48	44,37	44,42	0,247	0,05	2,113	0,238
Ortalama					0,256	0,43	2,17	2,15
St.Sapma					±0,1	±0,2	±0,2	±1,09

6.2.2. Nokta Yükleme İndeks Deneyi

Bu deneyde belli bir geometrik şekle sahip olmayan ancak ISRM (1981) tarafından önerilen boyutlara sahip parça numuneler kullanılmış olup yükleme, numunelerdeki tabakalara paralel ve dik olmak üzere ayrı ayrı yapılmıştır. Bu sayede

numunelerin anizotropik özelliklerinin de belirlenmesi hedeflenmiştir. Numuneler nokta yükleme deney aleti başlıkları arasına, tabaka düzlemlerine dik ve paralel gelecek şekilde yerleştirilmiş ve yenilme yükleri not edilmiştir. Deney ISRM (1981) standartlarına göre, tabaka düzlemlerine dik olarak 20 adet, paralel olarak 24 adet toplamda ise 44 adet numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerden kaya tuzu numunesinin nokta yükleme dayanım indeksi dayanımı değerleri hesaplanarak sonuçlar Çizelge 6.2 ve 6.3'de verilmiştir.

Sonuç olarak ortalama $Is_{(50)}$ değeri tabakalara dik olarak gerçekleştirilen deneylerde 1,752 MPa, tabakalara paralel olarak gerçekleştirilen deneylerde ise 1,583 MPa olarak bulunmuştur. Kaya mekaniği tasarım çalışmalarında belirlenen eksenel ve çapsal nokta yükleme dayanım indeksi değerlerinin ortalaması alınarak kullanılmaktadır. Çankırı kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda belirlenen nihai nokta yükleme indeks dayanımı, buna göre 1,668 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca tabakalara dik olan deneylerin tabakalara paralel olan deneylere oranı da Eşitlik 6.1'den 1,1 olarak elde edilmiştir.

$$Ia_{(50)} = \frac{Is_{(50)_{dik}}}{Is_{(50)_{paralel}}} \tag{6.1}$$

Burada; $Ia_{(50)}$ anizotropi indeksi, $Is_{(50)dik}$ tabakalara dik yönde kuvvet uygulanması ile elde edilen nokta yükleme indeks dayanımı ve $Is_{(50)paralel}$ tabakalara paralel yönde etki ettirilen yükün neticesinde elde edilen nokta yükleme indeks dayanımıdır.

Eşitlik 6.1 yardımıyla hesaplanan 1,107 değeri Çankırı kaya tuzuna ait anizotropi indeksini tanımlamaktadır. Kaya birimlerinin anizotropik değeri 1'den büyük genelde 4'ten küçüktür. Eğer değer 1 olursa bu malzemenin izotropik olduğunu göstermektedir. Buna göre Çankırı kaya tuzunun anizotropi indeks değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu da, farklı yönlerden gelen gerilmelere karşı kaya tuzunun hemen hemen aynı davranışı sergileyebileceğinin bir göstergesi olmaktadır.

Çizelge 6.2. Çankırı kaya tuzuna ait tabakalara dik olarak gerçekleştirilen nokta yükleme deneyi sonuçları

Numune No	Çap (D) (mm)	Kırılma Anı Çap (D') (mm)	Kırılma Yükü (kN)	I_s (MPa)	F Düzeltme Katsayısı	$I_{s(50)}$ (MPa)
D1	31,0	28,0	2,10	2,679	0,770	2,064
D2	29,0	26,8	1,60	2,228	0,755	1,683
D3	19,6	17,1	1,10	3,762	0,617	2,321
D4	29,2	27,7	1,50	1,962	0,766	1,503
D5	25,9	23,4	1,35	2,465	0,711	1,752
D6	19,7	17,7	1,30	4,173	0,626	2,612
D7	33,9	31,4	1,40	1,424	0,811	1,155
D8	41,0	38,9	2,50	1,648	0,894	1,473
D9	37,7	35,7	2,15	1,692	0,859	1,453
D10	20,3	18,3	0,80	2,389	0,636	1,520
D11	39,7	37,7	1,95	1,376	0,880	1,211
D12	37,2	34,2	1,80	1,539	0,843	1,297
D13	28,0	25,5	1,59	2,445	0,739	1,806
D14	37,0	35,0	2,10	1,714	0,852	1,460
D15	30,5	28,0	2,28	2,908	0,770	2,240
D16	26,0	23,0	1,94	3,667	0,705	2,586
D17	41,5	39,0	2,34	1,538	0,894	1,376
D18	30,0	27,5	1,78	2,354	0,764	1,799
D19	27,5	26,0	1,54	2,278	0,745	1,697
D20	27,0	25,0	1,74	2,781	0,732	2,038
Ortalama						1,752
St.Sapma						±0,43

Çizelge 6.3. Çankırı kaya tuzuna ait tabakalara paralel olarak gerçekleştirilen nokta yükleme deneyi sonuçları

Numune No	Çap (D) (mm)	Kırılma Anı Çap (D') (mm)	Kırılma Yükü (kN)	I_s (MPa)	F Düzeltme Katsayısı	$I_{s(50)}$ (MPa)
P1	20,8	18,8	0,85	2,405	0,644	1,549
P2	19,5	17,5	0,60	1,959	0,623	1,220
P3	32,1	29,5	1,20	1,374	0,789	1,085
P4	32,7	30,7	1,15	1,220	0,803	0,980
P5	29,3	26,3	2,95	4,265	0,749	3,194
P6	29,0	25,5	1,55	2,384	0,739	1,761
P7	37,1	32,1	1,85	1,795	0,819	1,471
P8	19,1	17,0	0,95	3,268	0,616	2,014
P9	23,6	20,6	0,90	2,121	0,671	1,423
P10	26,0	23,9	0,90	1,569	0,718	1,127
P11	28,9	20,9	1,25	2,862	0,675	1,933
P12	35,6	32,6	2,35	2,211	0,825	1,824
P13	35,0	31,0	1,65	1,717	0,806	1,385
P14	22,3	17,3	1,20	4,009	0,620	2,487
P15	48,0	46,0	2,38	1,125	0,963	1,083
P16	34,5	31,5	2,30	2,318	0,812	8,883
P17	50,5	47,5	2,95	1,307	0,977	1,278
P18	51,0	48,0	2,55	1,107	0,982	1,087
P19	44,0	41,5	2,68	1,556	0,920	1,431
P20	41,0	37,5	2,12	1,508	0,879	1,324
P21	37,0	34,5	2,29	1,924	0,846	1,628
P22	48,0	45,0	2,69	1,328	0,954	1,267
P23	26,5	24,0	1,70	2,951	0,710	2,121
P24	34,0	32,0	1,80	1,758	0,818	1,438
Ortalama						1,583
St.Sapma						±0,51

6.2.3. Suda Dağılma Dayanımı Deneyi

Suda dağılma dayanımı deneyi için ISRM (1981) tarafından önerilen küresel şekilli numuneler hazırlanmıştır. Her bir numune ağırlığı 40-60 gr arasında olurken 10 adet numune bir araya gelerek bir deney setini oluşturmaktadır (450-550 gr). Hazırlanan 19 set deney numunesi ile suda dağılma dayanımı deneyi iki bölümde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak oda sıcaklığında musluk suyu kullanılmış ardından ikinci bölümde musluk suyu yerine % 25, 50, 75 ve 100 gibi farklı derişimlere sahip

tuzlu su kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler öncelikle 105^{o}C'de 6 saat kurutulup 0,01 gr hassasiyetli tartı ile tartılarak A (gr) değeri belirlenmiştir. Takibinde suda dağılma dayanım cihazı ile birinci tur deney gerçekleştirilmiş ve yine aynı şartlara sahip fırında kurutulmuş ve tartılmıştır (B, gr). İkinci tur suda dağılma dayanım deneyi gerçekleştirildikten sonra fırında 105^{o}C'de 6 saat kurutulan numuneler tekrar tartılmış (C, gr) ve neticede boş kapların darası ayrıca tartılarak (D, gr) deney tamamlanmıştır. Deneysel veriler yardımıyla her bir deney seti için I_{d1} ve I_{d2} değerleri hesaplanarak belirlenmiş ve ardından ortalama suda dağılma dayanım indeks değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.4).

Sonuç olarak sırasıyla musluk suyu (%0) ve % 25, 50, 75 ve 100'lük çözeltilerde yapılan suda dağılma dayanımı deneylerinde elde edilen ortalama indeks değerleri ile sınıflama sonuçları Çizelge 6.5'teki değerler esas alınarak Çizelge 6.6'da verilmiştir. ISRM (1981) tarafından önerilen bu deney için her ne kadar deney 2 tur gerçekleştirilse de tasarım çalışmalarında I_{d2} değeri göz önüne alınmaktadır. Ancak I_{d2}<10 % durumunda ISRM (1981) I_{d1}'in dikkate alınmasını önermektedir. Bu çalışmada normal çeşme suyu ile elde edilen I_{d2} sonuçlarının ortalaması % 8 çıkmakla birlikte % 25, 50, 75 ve 100 derişimli su sonuçları ile karşılaştırmada kolaylık olsun diye Çizelge 6.6'da tüm deneylere ait I_{d2} sonuçları verilmiş ve sınıflandırılmıştır.

Çizelge 6.4. Çankırı kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı deneyi sonuçları

Numune No	A (gr)	B (gr)	C (gr)	D (gr)	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	Çözelti Derişimi (%)
1	1562,55	1258,80	1100,93	1068,60	38,50	6,55	0
2	1615,15	1238,95	1105,99	1068,60	31,17	6,84	0
3	1581,20	1287,30	1147,25	1068,60	42,67	15,34	0
4	1602,65	1274,05	1123,39	1068,60	38,47	10,26	0
5	1581,95	1250,35	1095,92	1068,60	35,41	5,32	0
6	1597,35	1240,75	1093,60	1068,60	32,56	4,73	0
7	1566,25	1243,50	1105,10	1068,60	35,15	7,33	0
8	1565,50	1234,75	1102,06	1068,60	33,44	6,73	0
9	1567,65	1252,95	1104,16	1068,60	36,49	7,13	0
10	1562,05	1252,35	1101,50	1068,60	37,24	6,67	0
11	1536,95	1262,20	1130,11	1068,60	41,34	13,13	0
12	1527,0	1326,90	1203,30	1068,60	56,00	29,00	25
13	1534,90	1334,10	1208,80	1068,60	56,00	30,00	25
14	1563,00	1464,90	1367,50	1068,60	80,00	60,00	50
15	1529,00	1442,50	1356,30	1068,60	81,00	62,00	50
16	1577,10	1542,80	1509,30	1068,60	93,00	86,00	75
17	1556,10	1523,10	1491,50	1068,60	93,00	86,00	75
18	1588,80	1578,80	1574,30	1068,60	98,00	97,00	100
19	1617,60	1606,10	1602,30	1068,60	97,00	97,00	100

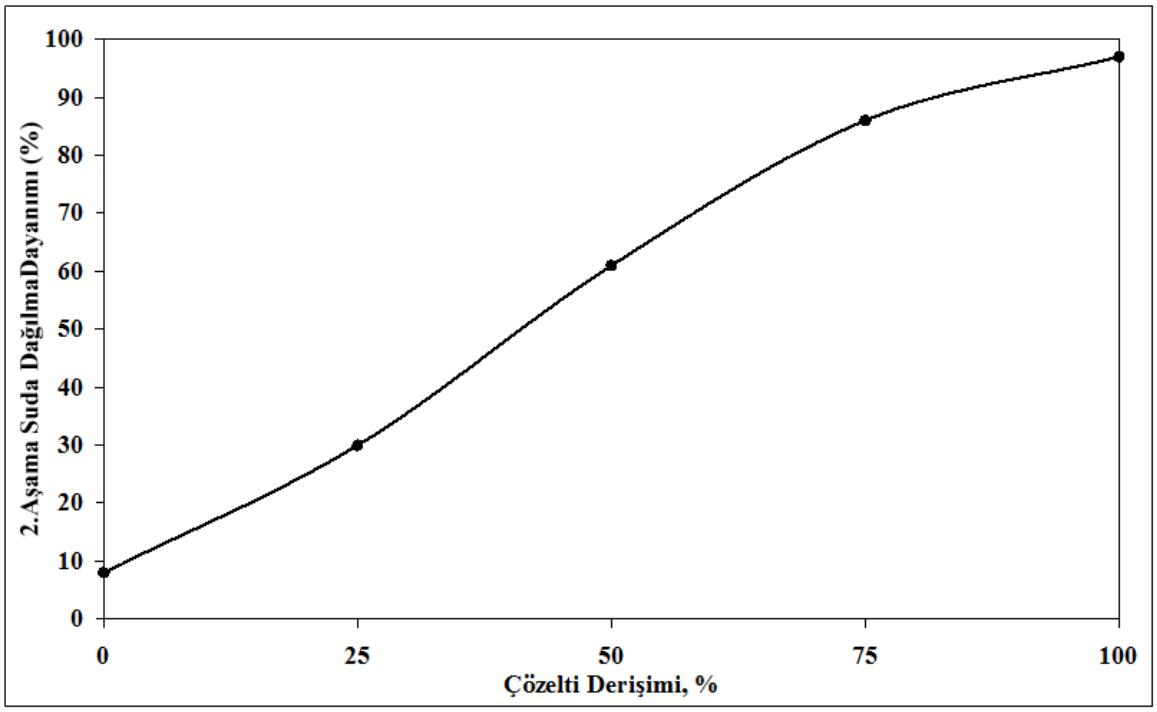
Çizelge 6.5. Suda dağılma dayanım sınıflaması (Gamble, 1971, ISRM, 1981)

İndeks Değeri (%)	Dağılma Dayanım Sınıflaması
0-30	Çok Düşük
30-60	Düşük
60-85	Orta Derecede
85-95	Orta-Yüksek
95-98	Yüksek
98-100	Çok Yüksek

Çizelge 6.6. Çankırı kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı sınıflama sonuçları

Numune No	Çözelti Derişimi (%)	I_{d2} (%)	Dayanım Sınıflaması
18-19	100	97	Yüksek
16-17	75	86	Orta-Yüksek
14-15	50	61	Orta
12-13	25	30	Düşük
1-11	0	8	Çok Düşük

Çizelge 6.6'da görüldüğü gibi deney suyunun tuz içeriği arttıkça kaya tuzu numunesindeki parçalanma ve erime miktarı düşmektedir. Bu yorumun yapılmasını kolaylaştıracak bir grafik Şekil 6.1'de sunulmuştur. Sunulan grafikten görüldüğü üzere % 75 derişim değerinden sonra kaya tuzundaki erime ve parçalanma hemen hemen hiç görülmemektedir. Bu sonuç kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilecek çözelti madenciliği için önemli bir tasarım verisi olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.1. Çankırı kaya tuzunun değişik tuz derişimli su ortamlarında sergilediği suda dağılma dayanım davranışı

6.2.4. Schmidt Sertlik Deneyi

Kaya malzemelerinin yüzey sertlikleri ISRM (1981) tarafından önerilen iki farklı deney cihazı ile gerçekleştirilmektedir. Bunlar Schmidt çekici ve Shore Sclerescope olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışmada Schnmidt (1951) tarafından geliştirilen Schmidt çekici kullanılmıştır. Deneyler kaya mekaniği laboratuarına getirilen kaya tuzu blokları üzerinde yapılmıştır. Sertlik değerleri ölçülürken numunenin anizotropik özelliğini belirlemek amacıyla, tabaka düzlemlerine paralel ve dik olarak ölçümler yapılmış ve analizlerde yine tabaka düzlemlerinin durumu dikkate alınmıştır. Her bir bloktan en az 100'er adet değer alınmış ve ISRM (1978)'e göre en yüksek % 50 verinin matematiksel ortalaması alınmıştır. Deneysel verilerden ede edilen Schmidt sertlik deneyi değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Çankırı kaya tuzuna ait Schmidt sertlik deneyi sonuçları

Blok No	Deney Adedi	Tabakalara Dik	Tabakalara Paralel
1	100	26,0	31,0
2	100	27,0	31,0
3	100	26,5	34,0
4	100	27,0	32,0
5	100	24,5	32,0
6	100	31,0	34,0
7	100	27,0	31,0
8	100	29,0	30,0
9	100	29,0	30,0
10	100	25,5	30,0
Ortalama		27,25	31,50
St.Sapma		1,92	1,51

Sonuç olarak tabakalara dik uygulamalar için Schmidt sertlik değeri 27,25±1,92 olarak belirlenirken tabakalara paralel uygulamalar için ise 31,50±1,51 olarak hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında tabakalanma durumuna göre gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçların ortalaması ise 29,38±1,71'dir. Ayrıca Schmidt sertlik deneyleri yardımıyla anizotropik değerin kaya tuzu için 1,155

olduğu tespit edilmiştir. Schmidt sertliği ISRM (1978)'e göre Çizelge 6.8'den az sert olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.8. Schmidt sertliği değerlerine göre kaya sertliği sınıflaması (ISRM,1978)

Schmidt Çekci Değeri	Sertlik Sınıflaması
0-10	Yumuşak
10-20	Az Yumuşak
20-40	Az Sert
40-50	Sert
50-60	Oldukça Sert
>60	Çok Sert

6.2.5. Dolaylı Çekme Dayanımı Deneyi

ISRM (1981) standartlarına uygun olarak hazırlanan 7 adet numune 300 tonluk hidrolik pres vasıtasıyla deneylere tabi tutulmuştur. ISRM (1981) tarafından önerilen 200 N/sn'lik yük artışına uygun yapılan deneyler esnasında numunelerin yenilmesi sağlanarak kırılma anındaki yük değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımıyla hesaplanan çekme dayanım değerleri Çizelge 6.9'da sunulmuştur.

Sonuç olarak dolaylı çekme dayanımı değeri 1,33±0,22 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuç malzemenin çekmeye karşı dayanımının az olduğunu sergilemektedir.

Çizelge 6.9. Çankırı kaya tuzuna ait dolaylı çekme dayanımı (DÇD) (Brazilian) deney sonuçları

Numune No	Kalınlık, L (mm)	Çap, D (mm)	Yenilme Yükü (kN)	Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD (σ_t,MPa)
1	28,0	54,8	2,85	1,18
2	28,4	55,2	3,25	1,32
3	28,3	54,8	4,25	1,74
4	27,4	52,8	2,75	1,21
5	27,0	52,5	3,40	1,53
6	27,6	53,3	2,75	1,19
7	27,1	53,1	2,60	1,15
Ortalama				1,33
St. Sapma				0,22

6.2.6. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Çankırı kaya tuzu için hazırlanan silindir şeklindeki karot numuneler, ISRM (1981) standartlarına uygun olarak Boy/Çap (H/D) oranları 2,5-3 arasında olacak şekilde hazırlanmıştır. Çapları 42-91 mm arasında muhtelif boyutlarında hazırlanan silindirik numuneler 300 tonluk preste 0,5-1 MPa/sn yükleme hızında yükleme yapılarak basınç dayanımları belirlenmiş ve sonuçları Çizelge 6.10'da sunulmuştur.

Çizelge 6.10. Çankırı kaya tuzuna ait tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları

Numune No	Numune Çapı, D (mm)	Numune Boyu, H (mm)	Alan (m^2)	Yenilme Yükü (kN)	Yenilme dayanımı, TEBD (σ_c,MPa)
1	42	95	0,001385	24,78	18,30
2	42	94	0,001385	21,59	15,97
3	50	129	0,001963	42,66	21,73
4	51	128	0,002043	49,73	24,34
5	55	130	0,002376	41,15	17,32
6	54	132	0,002290	53,53	19,01
7	54	131	0,002290	41,38	18,07
8	52	132	0,002123	37,17	16,81
9	52	130	0,002123	40,44	18,17
10	52	130	0,002123	67,98	30,67
11	65	178	0,003318	43,03	12,97
12	65	159	0,003318	60,99	18,38
13	62	167	0,003019	46,31	15,34
14	91	218	0,006504	127,96	19,34
15	91	228	0,006504	124,13	18,51
16	91	230	0,006504	172,37	25,80

Sonuç olarak Çankırı kaya tuzu için hazırlanan tüm silindirik karot numunelerden elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değerleri her bir numune çapı (D) için ayrı ayrı olarak Çizelge 6.11'de sunulmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere boyut etkisinin tek eksenli basınç dayanımı üzerinde oldukça etkin olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda detaylı bir boyut etkisinin belirlenmesine yönelik bir çalışma yapılmasına karar verilmiş ve bu konu ile ilgili çalışmalar ve analiz sonuçları Bölüm 7'de ayrıntılı olarak analiz edilerek incelenmiştir.

Çizelge 6.11. Her bir çap değeri için elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değeri sonuçları

Çap, D (mm)	Ortalama TEBD değeri (σ_c, MPa)
42	17,135±1,648
50-54	20,765±4,727
62-65	15,563±2,712
91	21,217±3,991

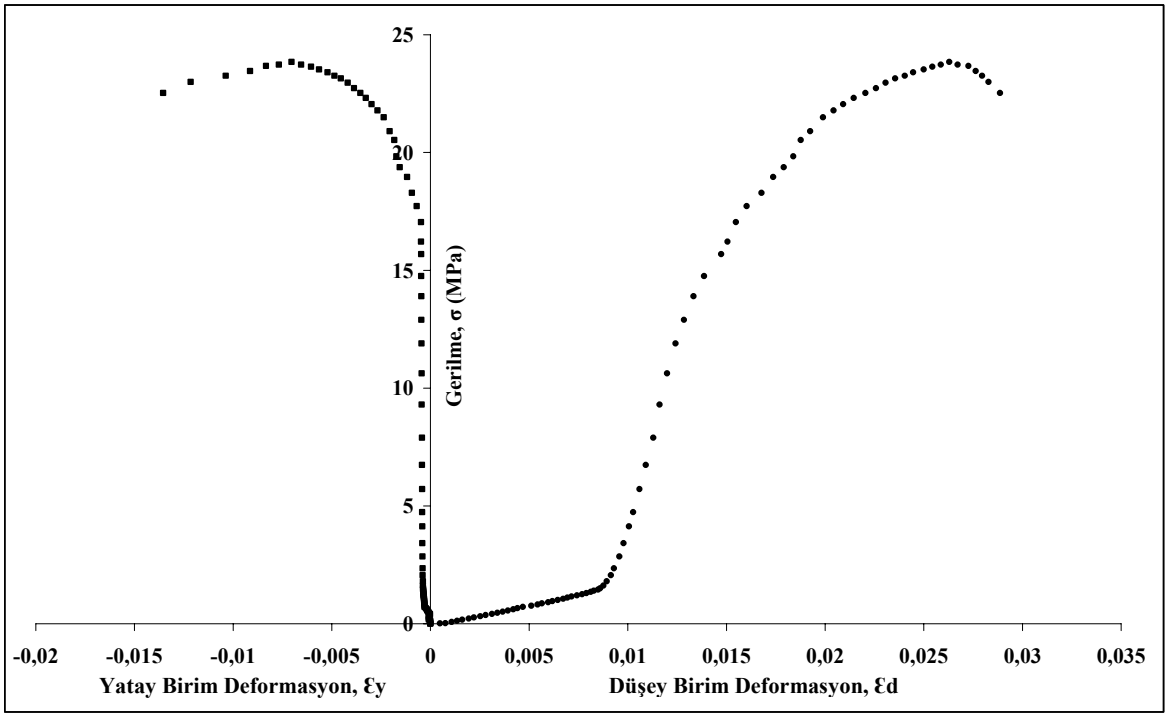
6.2.7. Tek Eksenli Deformabilite Deneyi

Bu deney ile tek eksenli yükleme şartları altında gerilme-birim deformasyon davranışının belirlenmesi hedeflenmiştir. Deney sonuçları yardımıyla gerilme-birim deformasyon eğrileri çizilmiş ve bu eğriler yardımıyla elastisite modülü ve Poisson oranları belirlenmiştir. Çeşitli çaplarda (D) hazırlanmış olan 8 adet silindirik numune, 300 tonluk hidrolik pres altında deformabilite deneyine tabi tutulmuştur. Yatay deformasyon ölçümleri için 2 adet, düşey deformasyonlar için 1 adet 0,01 mm hassasiyetli komparatör saatleri kullanılmıştır. Zamana bağlı yük okumaları ve deformasyon okumaları yapılarak kaya tuzuna ait gerilme-birim deformasyon eğrileri yardımıyla elastisite modülü ve Poisson oranları hesaplanmıştır. Hesaplamalar için hazırlanan tipik bir gerilme-birim deformasyon grafiği Şekil 6.2'de sunulmuştur. Deneysel veriler yardımıyla hazırlanan grafikler kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Elastisite modülü ve Poisson oranları değerleri

Numune No	Çap, D (mm)	E_t (GPa)	ν_t	E_{ort} (GPa)	ν_{ort}	E_s (GPa)	ν_s
1	49	1,73	0,16	2,00	0,50	2,40	0,31
2	51	1,50	0,37	1,70	0,38	1,80	0,32
3	55	1,47	0,31	1,40	0,29	1,60	0,31
4	54	1,14	0,10	1,14	0,10	1,25	0,10
5	54	1,25	0,34	1,50	0,37	1,83	0,20
6	66	1,70	0,35	1,80	0,32	3,25	0,25
7	64	1,47	0,17	1,47	0,17	1,47	0,16
8	62	1,07	0,19	1,30	0,13	1,33	0,14
Ortalama		1,41	0,24	1,54	0,28	1,87	0,22
St.sapma		0,24	0,10	0,28	0,14	0,67	0,09

Sonuç olarak tanjant elastisite modülü E_t değeri 1,41±0,24 GPa, sekant elastisite modülü (E_s) değeri 1,87±0,67 GPa, ortalama elastisite modülü değeri 1,54±0,28 GPa olurken, tanjant Poisson oranı (ν_t) 0,24±0,1, sekant Poisson oranı (ν_s) 0,22±0,09 ve ortalama Poisson oranı (ν_{ort}) 0,28±0,14 olarak hesaplanmıştır.



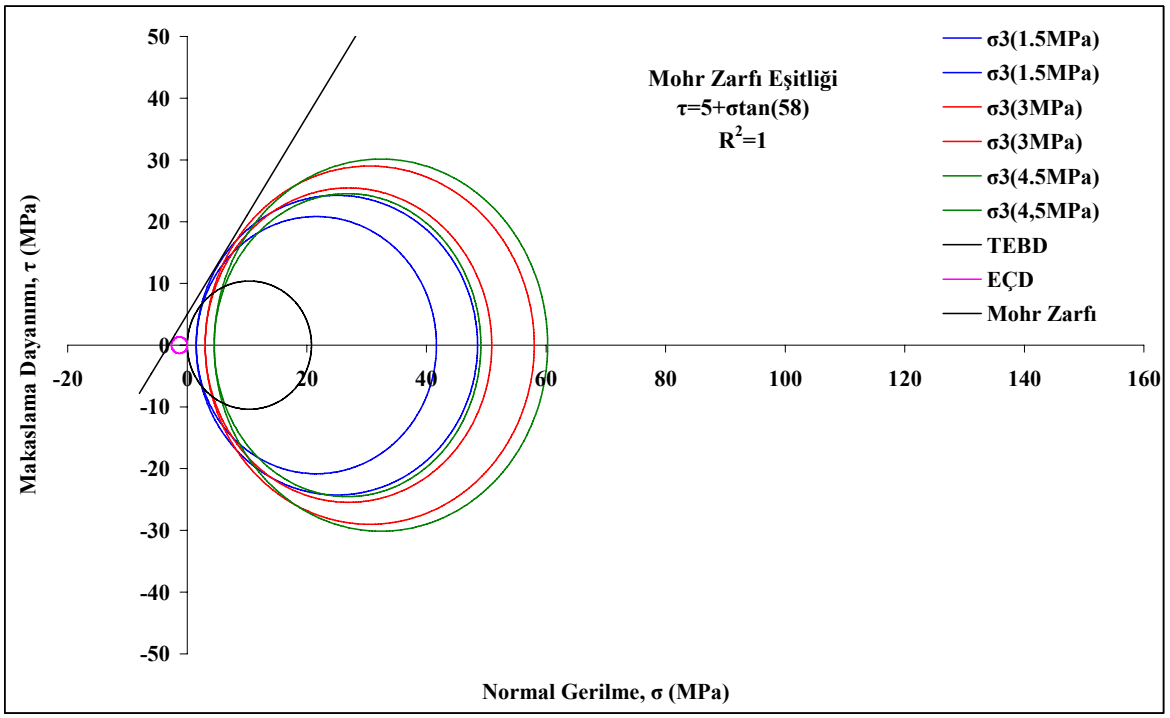
Şekil 6.2. Çankırı kaya tuzu numunelerine ait tipik bir gerilme-birim deformasyon davranışı

6.2.8. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Silindirik kaya numunelerinin düşey basınç dayanımının yan basıncın bir fonksiyonu olarak belirlenmesi amacıyla yapılmakta olan bu deneyde, karot kaya tuzu numuneleri, deneyde kullanılacak olan Hoek hücresine uygun olacak biçimde hazırlanmıştır. Kaya tuzu numunelerine sabit bir yanal basınç uygulanmış ve bu yanal gerilmeler altında düşey yönde eksenel gerilme uygulanarak yenilme anındaki yükler ölçülmüştür. Deneyde kaya tuzu numunelerine 1,5, 3 ve 4,5 MPa yanal gerilme uygulanmış ve sonuçlara bağlı olarak Mohr zarfı ve dayanım zarfı belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 6.13'de sunulurken en direkt çekme, DÇD (Brazilian) ve tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değerleri kullanılarak çizilen normal gerilme (σ)-makaslama dayanımı gerilmesi (τ) davranışı Şekil 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.13. Çankırı kaya tuzuna ait üç eksenli basınç dayanımı (ÜEBD) deneyi sonuçları

Numune No	Çap, D (mm)	Boy, L (mm)	Yanal Basınç (σ_3,MPa)	Üç Eksenli Basınç Dayanımı, ÜEBD (σ_1,MPa)
1	52	129	1,5	41,67
2	52	132	1,5	48,54
3	54	132	3,0	50,92
4	54	129	3,0	58,03
5	53	130	4,5	60,27
6	53	128	4,5	49,09



Şekil 6.3. Çankırı kaya tuzuna ait normal gerilme (σ)-makaslama gerilmesi (τ) davranışı

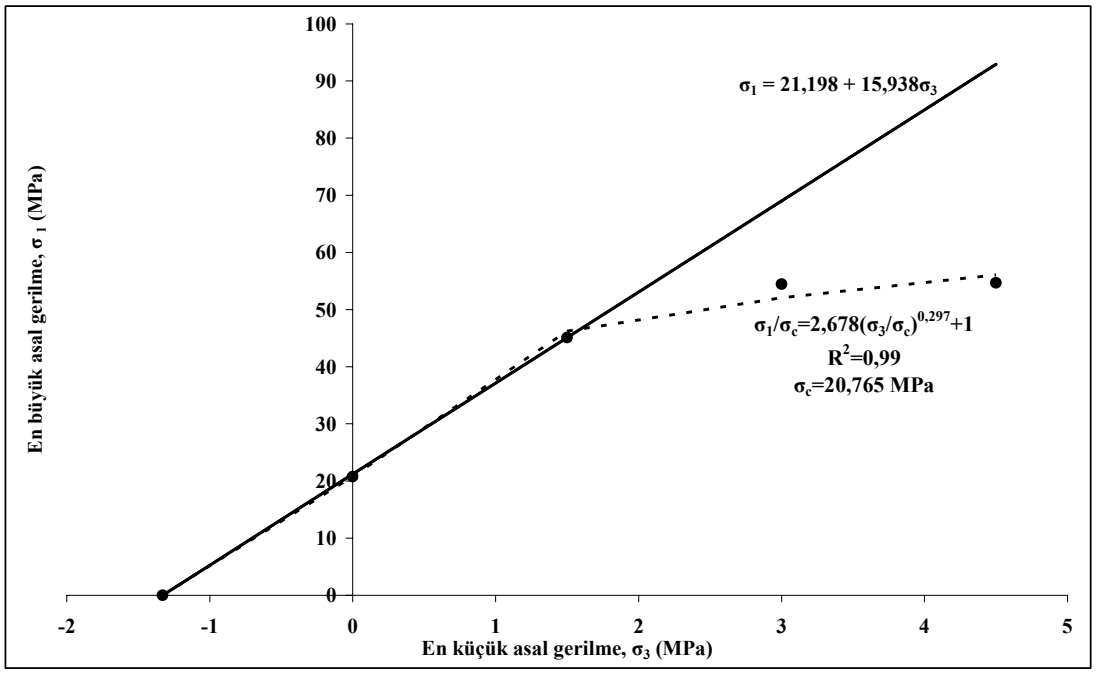
Şekil 6.3'de görüldüğü üzere kohezyon değeri (c) 5 MPa, içsel sürtünme açısı (ϕ) 58 olarak belirlenirken makaslama dayanımı eşitliği (Mohr Zarfı) Eşitlik 6.2'deki gibi belirlenmiştir.

$$\tau = 5 + \sigma \tan(58) \tag{6.2}$$

Ayrıca dayanım zarfı belirleme analizlerinde, yanal gerilme (σ_3) değerinin artması ile en büyük asal gerilme (σ_1) değerindeki artış miktarının doğrusal karakterden doğrusal olmayan bir karaktere doğru gittiği belirlenmiştir. Şekil 6.4'de görüldüğü gibi doğrusal davranış ve doğrusal olmayan davranış için ayrı ayrı dayanım zarfı eşitlikleri türetilmiştir (Eşitlik 6.3 ve 6.4). Eşitlik 6.4'de verilen σ_c değeri elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değeri olan 20,765 MPa'dır. Bu değer, NX boyutundaki ($D \cong 54$ mm) numunelere ait TEBD'na aittir (Çizelge 6.11). Çizelge 6.11'deki diğer TEBD değerlerinin dikkate alınmasının sebebi üç eksenli basınç dayanımı deneylerinin mevcut Hoek hücresine bağlı olarak NX boyutundaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmesidir.

$$\sigma_1 = 21{,}198 + 15{,}938\sigma_3 \tag{6.3}$$

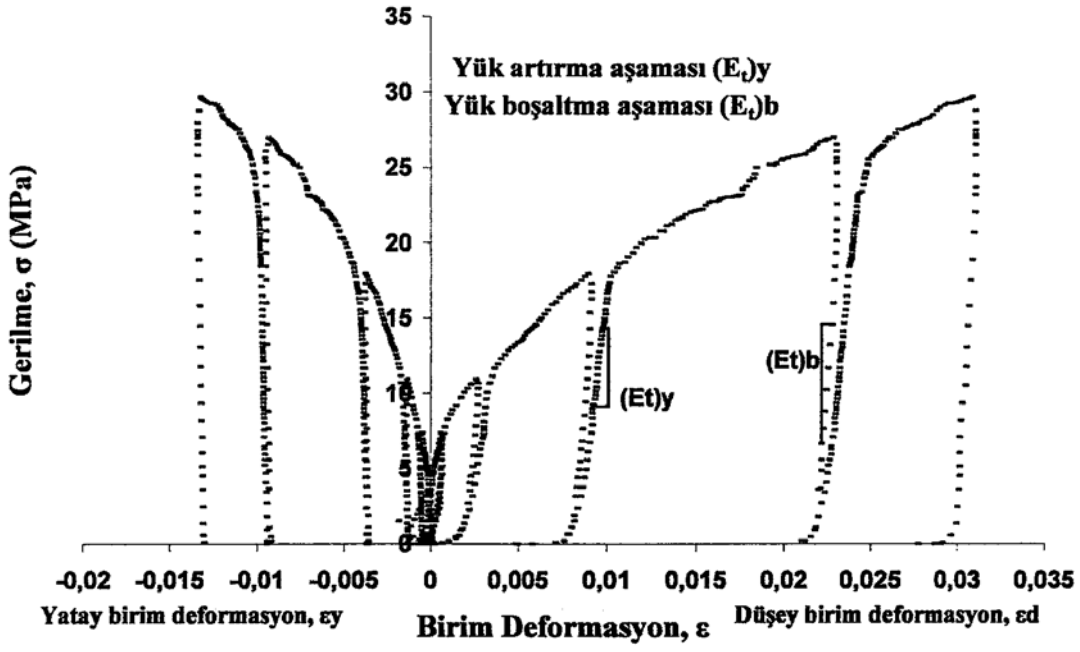
$$\sigma_1 = \sigma_c[2{,}678(\sigma_3/\sigma_c)^{0{,}297} + 1] \tag{6.4}$$



Şekil 6.4. Çankırı kaya tuzuna ait tipik bir en küçük asal gerilme (σ_3)-en büyük asal gerilme (σ_1)davranışı

6.2.9. Periyodik Yükleme ve Yük Boşaltma Deneyi

Bu deneyin yapılmasındaki amaç, dayanım değeri önceden belirlenmiş olan kaya tuzu numunesinin dayanım değeri altındaki farklı gerilme koşullarında davranışının tahminine yönelik bir laboratuar çalışmasıdır. Bu amaçla silindir şeklinde hazırlanmış olan kaya tuzu numuneleri üzerinde, dayanım değerinin altındaki gerilme şartlarında periyodik olarak yükleme ve yük boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında yatay yönde iki ve düşey yönde bir olmak üzere 0,01 mm hassasiyetli toplam üç adet komparatör saati kullanılarak deformasyon değerleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Deneysel veriler yardımıyla hazırlanan grafik Şekil 6.5'da sunulmuştur. Hazırlanan grafik kullanılarak çeşitli yükleme seviyelerinde elde edilen sadece tanjant Elastisite modülü ve Poisson Oranı değerleri Çizelge 6.14'da sunulmuştur.



Şekil 6.5. Periyodik yükleme-boşaltma sonucunda 2 nolu numune için Çankırı kaya tuzunda belirlenen birim deformasyon-gerilme davranışı

Çizelge 6.14'de sunulan değerlerden tanjant elastisite modülü değeri yükleme aşaması arttıkça artmaktadır. Aynı şekilde Poisson oranları da artmaktadır.

Çizelge 6.14. Çankırı kaya tuzuna ait çeşitli yükleme seviyelerinde elde edilen elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri

Numune No	Numune Tipi	Çap, D (mm)	1.Yükleme Aşaması			2.Yükleme Aşaması			3.Yükleme Aşaması			4.Yükleme Aşaması			5.Yükleme Aşaması		
			%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$
1	silindir	68	37	1,07	0,15	68	3,40	0,28	100	6,0	0,25	-	-	-	-	-	-
2	silindir	66	12	0,26	0,10	23	1,87	0,35	34	3,6	0,70	77	4,0	0,80	100	8,8	0,4

* TEBD değerine bağlı yükleme yüzdesi
y: yükleme

6.3. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzu Örnekleri Üzerinde Gerçekleştirilen Kaya Mekaniği Deneyleri

Nevşehir-Gülşehir numuneleri üzerinde ISRM (1981) standartları göz önüne alınarak yapılmış deneyler sırasıyla; yoğunluk, porozite, gözeneklilik belirleme, nokta yükleme, suda dağılma, Schmidt sertliği, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme, tek eksenli deformabilite, üç eksenli basınç dayanımı ve periyodik yükleme boşaltma deneyleridir.

6.3.1. Yoğunluk, Gözeneklilik ve Porozite Belirleme Deneyi

Bu deneyde 10 adet düzensiz numune kullanılmıştır. Hazırlanan düzensiz numuneler daha önceden hazırlanan doymuş tuz çözeltisi içerisinde 24 saat süreyle bekletilmiştir. Hazırlanan çözeltinin yoğunluğu 1,1972gr/cm³ alınmıştır. Doymuş hale gelen numunelerin su içerisindeki ve su dışındaki ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetle ölçülmüştür. Numuneler 105°C sıcaklıkta sabit ağırlığa kadar 24 saat süreyle kurutulup ağırlıkları yeniden ölçülerek aynı işlemler bir kez daha tekrar edilmiş ve bulunan değerler Çizelge 6.15'de sunulmuştur.

Çizelge 6.15. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait yoğunluk ve porozite belirleme deney sonuçları

Numune No	Numune Bulk Hacmi (Bv) cm³	Kuru Yoğunluk (pd) g/cm³	Doymuş Yoğunluk (ps)g/cm³	Gözenek Hacmi (Pv) cm³	Etkili Porozite (n) %
1	33,40	2,02	2,03	0,33	1,00
2	38,79	2,11	2,11	0,25	0,65
3	17,36	2,15	2,19	0,58	3,37
4	26,58	2,23	2,29	1,17	4,40
5	22,27	2,19	2,43	4,34	4,51
6	31,01	2,10	2,13	0,92	2,96
7	29,81	2,12	2,14	0,50	1,68
8	20,23	2,17	2,20	0,42	2,06
9	26,34	2,19	2,22	0,50	1,90
10	21,07	2,02	2,05	0,67	3,17
Ortalama	26,69	2,13	2,18	0,97	2,57
St.Sapma	6,32	0,07	0,11	1,15	1,33

Sonuç olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait ortalama kuru yoğunluk 2,13 gr/cm³ ve doymuş yoğunluk 2,18 gr/cm³ olarak belirlenmiştir.

6.3.2. Nokta Yükleme Dayanım Deneyi

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzlasına ait nokta yükleme dayanım deneyi arazide, 11 adet topuk üzerinde yapılmıştır. Topuklardan alınan şekilsiz numuneler, parça deneyi için gerekli olan boyutlara (0,3L<D<L) getirilmiştir. Gerekli ölçülerde hazırlanan 195 kaya tuzu numunesi üzerinde nokta yükleme dayanımı deneyi yapılmış ve sonuçları Çizelge 6.16'da sunulmuştur.

Çizelge 6.16 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait nokta yükleme dayanım deneyi sonuçları

Numune No	Çap (D) (mm)	Kırılma yükü (kN)	(Is) (MPa)	(I_{s50}) (MPa)
1	40,15	1,17	0,45	0,41
2	40,07	1,15	0,35	0,32
3	33,69	1,00	0,56	0,47
4	37,85	1,40	0,52	0,44
5	33,26	1,03	0,51	0,41
6	38,72	0,94	0,35	0,31
7	34,54	1,72	0,72	0,64
8	35,02	0,93	0,41	0,34
9	34,11	1,67	0,77	0,62
10	38,85	1,06	0,47	0,42
11	37,35	1,46	0,54	0,46
Ortalama	36,69	1,23	0,51	0,44
St.Sapma	2,50	0,27	0,13	0,10

Sonuç olarak yapılan nokta yükleme deneyleri sonucunda kaya tuzuna ait düzeltilmiş nokta yükleme dayanımı 0,44±0,10 MPa olarak bulunmuştur.

6.3.3. Suda Dağılma Dayanımı Deneyi

Suda dağılma dayanımı deneyi iki bölümde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak oda sıcaklığında musluk suyu kullanılmış ardından ikinci bölümde musluk suyu yerine % 33, 66 ve 100 gibi farklı derişimlere sahip tuzlu su kullanılmıştır. Her bir deney seti için Id_1 ve Id_2 değerleri hesaplanarak belirlenmiş ve ardından ortalama suda dağılma dayanım indeks değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.17).

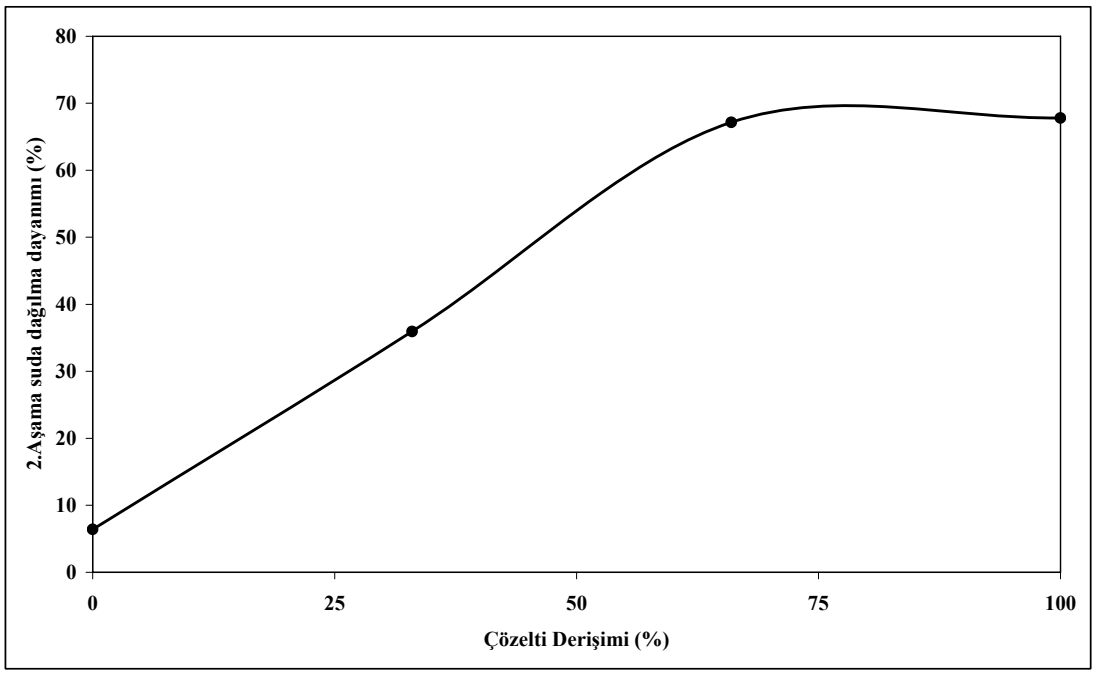
Sonuç olarak sırasıyla musluk suyu ve % 33, 66 ve 100'lük çözeltilerde yapılan suda dağılma dayanımı deneylerinde elde edilen ortalama indeks değerleri ile sınıflama sonuçları Çizelge 6.5'teki değerler esas alınarak Çizelge 6.18'de verilmiştir. Sunulan deney sonuçlarından görüldüğü gibi deney suyunun su içeriği arttıkça numuneye ait suya dayanım değeri artmaktadır (Şekil 6.6).

Çizelge 6.17. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı deney sonuçları

Numune No	A (gr)	B (gr)	C (gr)	D (gr)	Id_1 (%)	Id_2 (%)	Çözelti Derişimi (%)
1	1610,41	1273,11	1108,05	1068,60	37,74	7,28	0
2	1620,44	1271,14	1104,77	1068,60	36,70	6,55	0
3	1570,88	1237,65	1094,19	1068,60	33,65	5,09	0
4	1611,28	1266,53	1104,80	1068,60	36,47	6,67	0
5	1611,60	1386,90	1269,30	1068,60	58,62	36,96	33
6	1607,60	1387,70	1256,70	1068,60	59,20	34,90	33
7	1605,30	1481,70	1412,40	1068,60	76,97	64,06	66
8	1612,20	1514,20	1405,50	1068,60	81,97	70,25	66
9	1610,10	1497,30	1432,60	1068,60	79,17	67,22	100
10	1609,90	1498,90	1438,70	1068,60	79,49	68,37	100

Çizelge 6.18. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait suda dağılma dayanımı sınıflama sonuçları

Çözelti Derişimi (%)	Id_2 (%)	Dayanım Sınıflaması
100	67,80	Orta Derecede
66	67,15	Orta Derecede
33	35,93	Düşük
0	6,40	Çok Düşük



Şekil 6.6. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunun değişik tuz derişimli su ortamlarında belirlenen suda dağılma dayanımı davranışı

6.3.4. Schmidt Sertliği Belirleme Deneyi

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerinde sertlik belirleme deneyi, arazi ve laboratuar olmak üzere iki türde yapılmış olup arazide yapılan deneylerde 9 adet topuk üzerinde yaklaşık 400 adet değeri sertlik ölçülmüştür. Laboratuarda yapılan sertlik belirleme deneyi için de 20 adet kaya tuzu bloğu kullanılmış, Schmidt çekiciyle her bir bloktan alınan 100'er adet ölçümden elde edilen veriler Çizelge 6.19'da sunulmuştur. Değerlendirmeler, ISRM (1978)'e göre ölçülen sertlik değerlerinin en büyük %50'si dikkate alınarak yapılmıştır.

Çizelge 6.19. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait arazide ve laboratuarda ölçülen Schmidt sertlik deneyi sonuçları

Topuk No	Ortalama Schmidt Sertliği	Blok No	Ortalama Schmidt Sertliği	Blok No	Ortalama Schmidt Sertliği
1	34,47	1	30,8	11	35,1
2	29,61	2	30,2	12	32,6
3	34,69	3	30,3	13	31,9
4	30,08	4	31,7	14	31
5	31,36	5	34,5	15	32,7
6	34,53	4	32,2	16	32
7	33,08	7	32,7	17	31,1
8	32,97	8	33,5	18	32,7
9	31,33	9	31,3	19	34,9
		10	35,1	20	31,5
Ortalama	32,5	Ortalama			32,4
St.Sapma	1,83	St.Sapma			1,50

Arazide ve laboratuarda yapılan sertlik belirleme deneyleri sonucu, kaya tuzuna ait Schmidt sertliği değeri yaklaşık olarak 32,4 bulunmuştur. Schmidt sertliği ISRM (1978)'e göre Çizelge 6.8'den az sert olarak belirlenmiştir.

6.3.5. Dolaylı Çekme Dayanımı (Brazilian) Deneyi

ISRM (1981) standartlarına uygun olarak hazırlanan 19 adet yaklaşık 54 mm ve 14 adet yaklaşık 93 mm çapında, boyutları L=D/2 olacak şekilde hazırlanan numuneler hidrolik pres vasıtasıyla yenilmesi sağlanarak kırılma anındaki yük değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 6.20 ve 6.21'de sunulmuştur.

Çizelge 6.20. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait 52-54 mm çaplı numunelerde yapılan dolaylı çekme dayanımı (DÇD) deneyi sonuçları

Numune No	Boy, L (cm)	Çap, D (cm)	Yenilme Yükü (kN)	Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD (σ_t,MPa)
1	31,67	54,78	2,95	1,08
2	32,6	52,61	4,50	1,67
3	32,51	52,74	1,78	0,66
4	31,8	52,62	3,78	1,44
5	32,97	52,66	3,26	1,19
6	32,22	52,5	3,81	1,43
7	32,21	52,95	3,40	1,27
8	32,52	53,65	2,99	1,09
9	32,91	51,97	3,02	1,12
10	31,93	52,69	3,57	1,35
11	31,88	52,26	1,78	0,68
12	31,94	52,42	3,43	1,30
13	31,55	52,67	3,47	1,33
14	32,55	52,7	3,12	1,16
15	32,8	52,45	3,26	1,21
16	30,24	52,76	3,40	1,35
17	31,2	52,78	1,68	0,65
18	32,05	52,52	1,89	0,71
19	31,67	54,78	2,95	1,08
Ortalama			3,06	1,15
St. Sapma			0,79	0,30

Çizelge 6.21. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait 93 mm çaplı numunelerde yapılan dolaylı çekme dayanımı (DÇD) deneyi sonuçları

Numune No	Kalınlık, L (mm)	Çap, D (mm)	Yenilme Yükü (kN)	Dolaylı Çekme Dayanımı, DÇD (σ_t,MPa)
1	47,10	93,90	19,2	2,76
2	50,50	93,70	21,6	2,91
3	46,20	93,20	19,4	2,87
4	51,50	93,60	22,4	2,96
5	47,30	93,60	19,8	2,85
6	46,40	92,90	20,0	2,95
7	47,30	92,90	21,6	3,13
8	48,00	93,60	15,4	2,18
9	46,60	91,40	16,8	2,51
10	47,60	90,00	16,6	2,47
11	46,90	93,10	18,8	2,74
12	48,80	93,60	16,0	2,23
13	46,60	88,00	15,0	2,33
14	46,40	92,90	19,2	2,84
Ortalama			18,70	2,69
St. Sapma			2,30	0,30

Sonuç olarak dolaylı çekme dayanımı değeri, 93 mm çaplı numuneler için 2,69±0,30 MPa, 54 mm çaplı numuneler için ise 1,15±0,30 MPa olarak belirlenmiştir. Burada görülen değer farklılığının boyut etkisi ile oluştuğu düşünülmektedir.

6.3.6. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için hazırlanan silindir şeklinde numuneler ISRM (1981) standartlarına uygun olacak şekilde Boy/Çap (H/D) oranları 2,5-3 arasında değişen numuneler hazırlanmıştır. Çapları 42-92 mm arasında muhtelif boyutlarında hazırlanan silindirik numuneler 300 tonluk preste 0,5-1 MPa/sn yükleme hızında kırılarak basınç dayanımları belirlenmiş ve sonuçları Çizelge 6.22'de sunulmuştur.

Çizelge 6.22. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları

Numune No	Numune Çapı, D (mm)	Numune Boyu, H (mm)	H/D	Alan (m^2)	Yenilme Yükü (kN)	Yenilme Dayanımı, TEBD, (σ_c,MPa)
1	42,00	105,00	2,50	0,00138	28,40	20,50
2	51.35	141,25	2,75	0,00207	61,40	29,66
3	51.01	149,15	2,92	0,00205	60,60	29,62
4	50.50	150,25	2,97	0,00200	49,40	24,68
5	51.35	121,40	2,36	0,00207	60,20	29,08
6	51.20	125,35	2,44	0,00206	45,00	21,87
7	51,08	127,70	2,50	0,00205	55,30	26,99
8	93.00	253,50	2,72	0,00679	236,60	34,85
9	93.50	199,50	2,13	0,00657	203,00	30,89
10	91.50	245,00	2,67	0,00679	203,00	29,90
11	92,25	230,62	2,50	0,00668	185,50	27,77

Sonuç olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için tüm silindirik numunelerden elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değerleri her bir numune çapı için

ayrı ayrı olarak Çizelge 6.23'de sunulmuştur. Çankırı kaya tuzu üzerinde yapılan deneylerde olduğu gibi (Çizelge 6.10 ve 6.11) çapa (D) bağlı olarak TEBD değerleri değişim göstermektedir. Sonuç olarak ayrıntılı bir boyut analizinin yapılmasına karar verilmiş ve buna bağlı çalışmalar, takip eden Bölüm 7'de sunulmuştur.

Çizelge 6.23. Her bir numune çapı (D) için elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değerleri

Çap (mm)	Ortalama TEBD değeri (MPa)
42	20,50±0,00
50,50-51,35	26,98±3,16
91-93	30,85±2,97

6.3.7. Tek Eksenli Deformabilite Deneyi

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda, tek eksenli yükleme şartları altında gerilme-birim deformasyon davranışının belirlenmesi için tek eksenli deformabilite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen ölçümler yardımıyla, grafikler çizilerek bu eğriler yardımıyla elastisite modülü ve Poisson oranları belirlenmiştir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi amacıyla çeşitli çaplarda hazırlanmış olan 3 adet silindirik numune 300 tonluk hidrolik pres altında deformabilite deneyine tabi tutulmuştur. Yatay deformasyon ölçümleri için 2 adet, düşey deformasyonlar için 1 adet 0,01 mm hassasiyetli komparatör saatleri kullanılmıştır. Zamana bağlı yük okumaları ve deformasyon okumaları yapılarak kaya tuzuna ait gerilme-birim deformasyon eğrileri yardımıyla elastisite modülü, Poisson oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.24'de verilmiştir.

Çizelge 6.24. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri

Numune No	Çap, D (mm)	E_t (GPa)	ν_t	E_s (GPa)	ν_s	E_{ort} (GPa)	ν_{ort}
1	93	2,85	0,05	3,08	0,15	2,40	0,066
2	93	2,67	0,08	1,31	0,19	2,62	0,220
3	93	1,93	0,06	1,28	0,14	1,85	0,043
Ortalama		2,48	0,06	1,89	0,16	2,29	0,11
St. Sapma		0,49	0,015	1,03	0,026	0,40	0,096

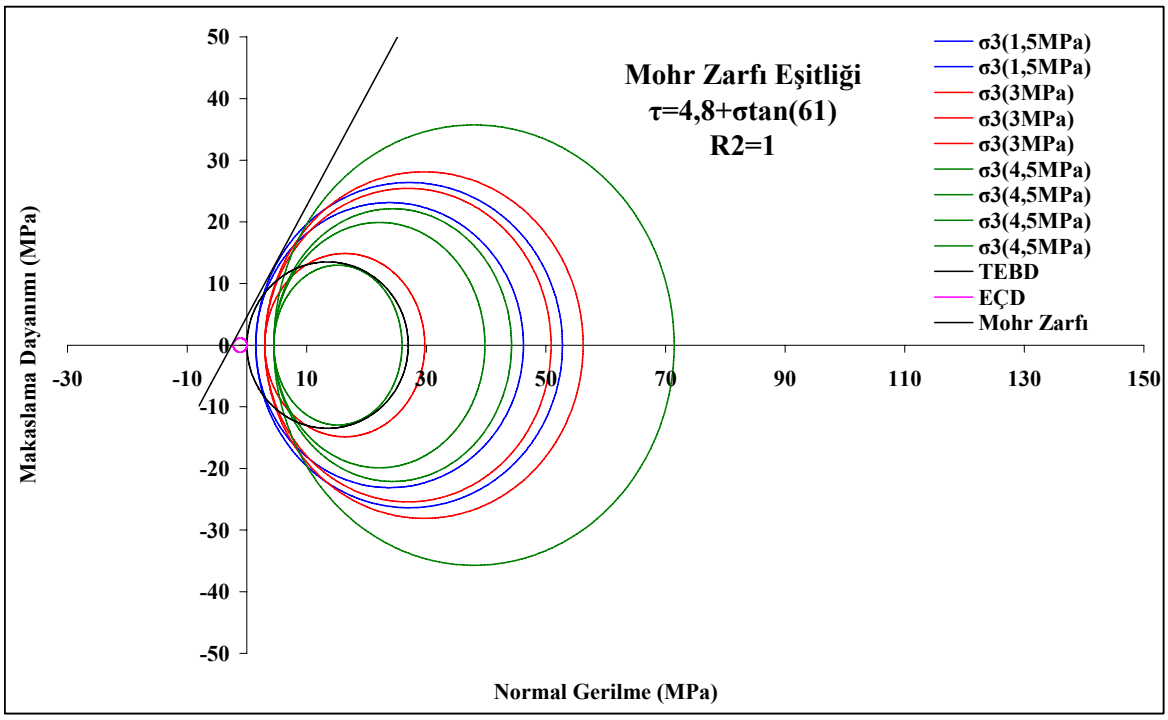
Sonuç olarak tanjant elastisite modülü E_t değeri 2,48±0,49 GPa, sekant elastisite modülü (E_s) değeri 1,89±1,03 GPa, ortalama elastisite modülü değeri 2,29±0,40 GPa olurken, tanjant Poisson oranı (ν_t) 0,06±0,015, sekant Poisson oranı (ν_s) 0,16±0,026 ve ortalama Poisson oranı (ν_{ort}) 0,11±0,096 olarak hesaplanmıştır.

6.3.8. Üç Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde kullanılacak olan Hoek hücresine uygun olacak biçimde 9 adet karot numunesi hazırlanmıştır. Kaya tuzu numunelerine, sabit bir yanal basınç uygulanmış ve bu yanal gerilmeler altında, düşey yönde eksenel gerilme uygulanarak yenilme anındaki yükler ölçülmüştür. Deneyde kaya tuzu numunelerine 1,5, 3 ve 4,5 MPa yanal gerilme uygulanmış ve sonuçlara bağlı olarak Mohr zarfı ve dayanım zarfı belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 6.25'de sunulurken dolaylı çekme dayanımı (DÇD, Brazilian) ve tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değerleri kullanılarak çizilen normal gerilme (σ)-makaslama gerilmesi (τ) davranışı Şekil 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.25. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait üç eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçları

Numune No	Çap, D (mm)	Boy, L (mm)	Yanal Basınç (σ_3,MPa)	Üç Eksenli Basınç Dayanımı ÜEBD (σ_1,MPa)
1	52,85	132,8	1,5	46,24
2	52,86	132,81	1,5	52,77
3	52,88	132,83	3	56,21
4	52,61	132,74	3	29,74
5	52,76	132,84	3	50,86
6	52,67	132,76	4,5	71,44
7	52,51	132,81	4,5	44,24
8	52,73	132,57	4,5	39,80
9	52,76	133,51	4,5	25,93



Şekil 6.7. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait normal gerilme (σ)-makaslama gerilmesi (τ) davranışı

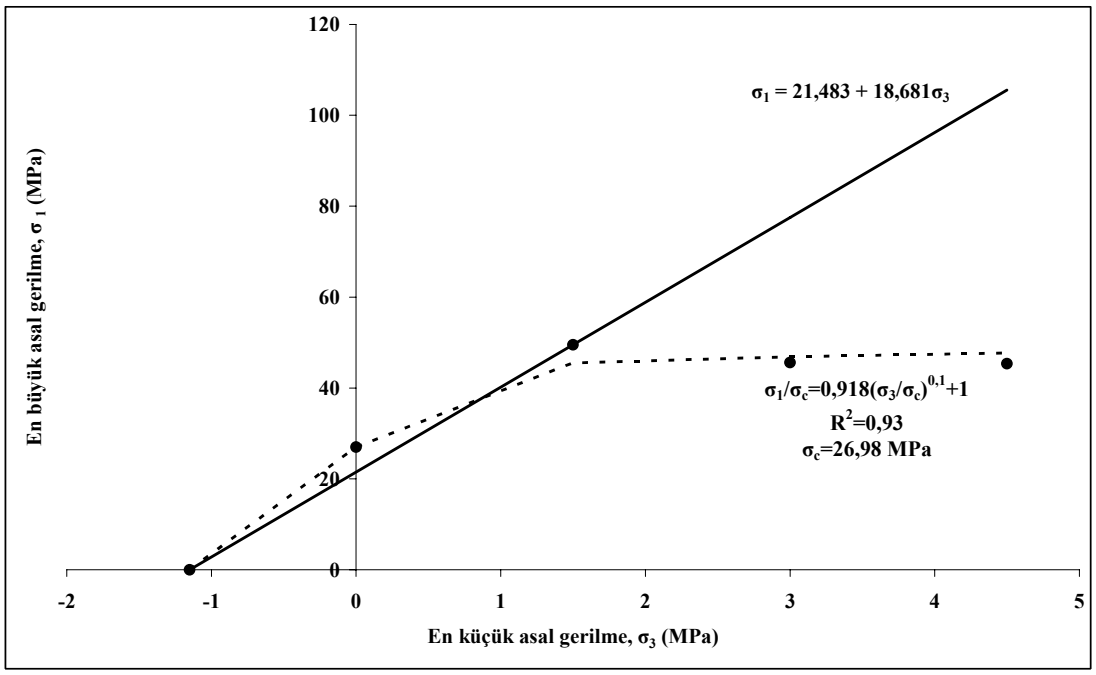
Şekil 6.7'de görüldüğü üzere kohezyon değeri (c) 4,8 MPa, içsel sürtünme açısı (ϕ) 61 olarak belirlenirken makaslama dayanım eşitliği (Mohr Zarfı) Eşitlik 6.6'deki gibi belirlenmiştir.

$$\tau = 4{,}8 + \sigma \tan(61) \tag{6.6}$$

Ayrıca dayanım zarfı belirleme analizlerinde, yanal gerilme (σ_3) değerinin artması ile en büyük asal gerilme (σ_1) değerindeki artış miktarının doğrusal karakterden doğrusal olmayan bir karaktere doğru gittiği belirlenmiştir. Şekil 6.8'de görüldüğü gibi doğrusal davranış ve doğrusal olmayan davranış için ayrı ayrı dayanım zarfı eşitlikleri türetilmiştir (Eşitlik 6.7 ve 6.8). Eşitlik 6.8'de verilen σ_c değeri elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değeri olan 26,98 MPa'dır. Hoek hücresi NX boyutunda olduğu için Çizelge 6.22 ve 6.23'den NX boyutlu ($D \cong 54$ mm) karot numunesine ait TEBD değeri dikkate alınmıştır.

$$\sigma_1 = 21{,}483 + 18{,}681\sigma_3 \tag{6.7}$$

$$\sigma_1 = \sigma_c[0{,}918(\sigma_3 / \sigma_c)^{0{,}1} + 1] \tag{6.8}$$

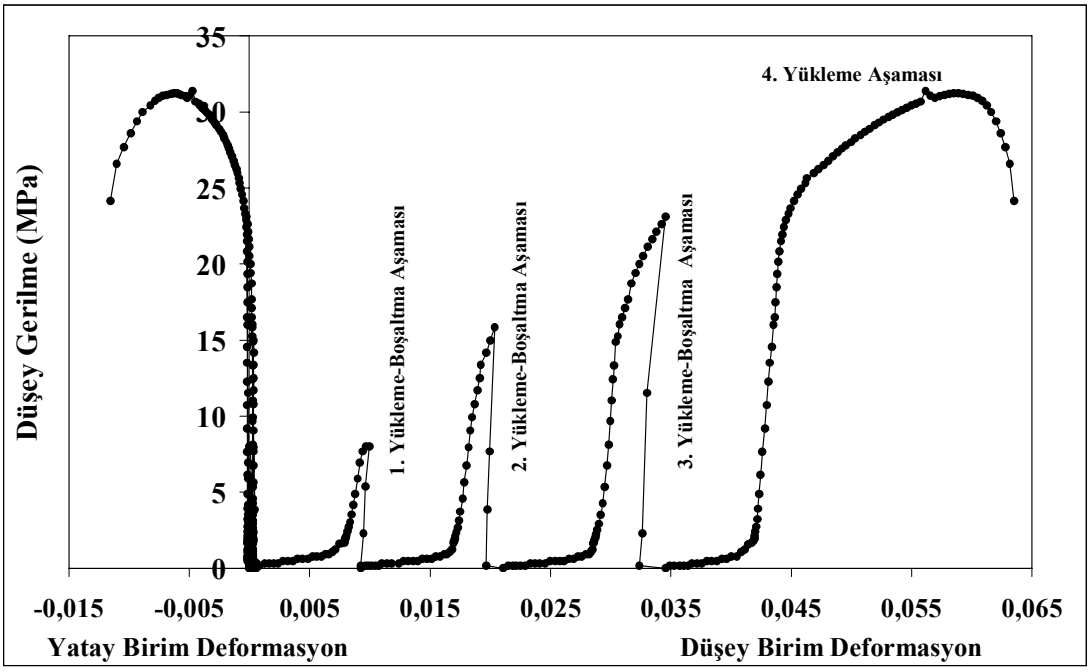


Şekil 6.8. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait tipik bir en küçük asal gerilme (σ_3)-en büyük asal gerilme (σ_1)davranışı

6.3.9. Periyodik Yükleme ve Yük Boşaltma Deneyi

Bu çalışma için hazırlanan 2 adet silindir numune üzerinde yenilme dayanımının sırasıyla, ilk önce % 25'ine kadar yük artırılmış ve sonrasında yük düşürülmüş, daha sonra ise aynı numune üzerinde yük artışı kırılma dayanımının % 50'sine kadar olmuş ve yük boşaltılmıştır. Aynı işlem, kırılma yükünün % 75'i için tekrar edilmiş ve sonuçta en son safhada numune üzerine uygulanan değeri kırılıncaya kadar devam etmiştir. Deneyden elde edilen veriler yardımıyla Şekil 6.9'da görülen gerilme birim deformasyon grafiği elde edilmiştir. Ardından yatay ve düşey birim deformasyon değerleri dikkate alınarak elastisite modülü ve Poisson oranlarının analizinde kullanılmıştır. Dört farklı yükleme seviyesinden elde edilen tanjant elastisite modülü ve Poisson oranları Çizelge 6.26'da sunulmuştur. Çizelge 6.26'dan görüldüğü üzere, numune üzerinde etkin hale getirilen gerilme büyüklüklerine bağlı olarak farklı elastisite modülü ve Poisson oranları elde

edilmiştir. Bu değerlerin artan yük değerleri ile elastisite modülü ve Poisson oranlarında artma eğiliminde olduğu görülmektedir (Çizelge 6.26).



Şekil 6.9. Periyodik yükleme-boşaltma sonucunda Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda belirlenen birim deformasyon-gerilme davranışı

Çizelge 6.26. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait çeşitli yükleme seviyelerinde elde edilen elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri

Numune No	Numune Tipi	Çap, D (mm)	1.Yükleme Aşaması			2.Yükleme Aşaması			3.Yükleme Aşaması			4.Yükleme Aşaması		
			%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$	%*	$(E_t)y$	$(\nu_t)y$
1	silindir	93	25	4,48	0,011	50	6,22	0,032	75	13,59	0,167	100	9,67	0,039
2	silindir	93	25	1,47	0,36	50	2,40	0,35	75	2,90	0,48	100	6,92	0,34

7. BOYUT BELİRLEME ÇALIŞMALARI

7.1. Genel

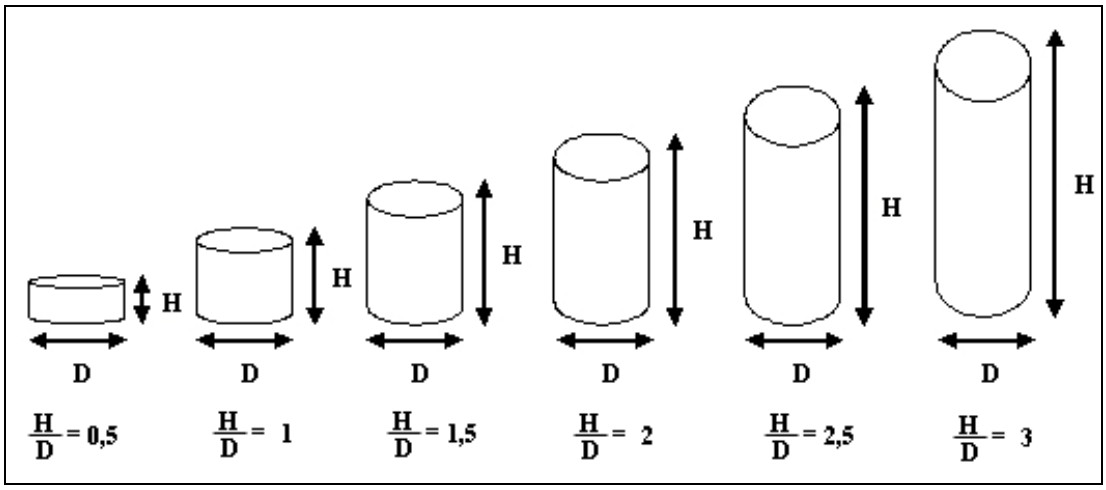
Kaya mühendislik yapılarının tasarım çalışmalarında, tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) önemli bir parametredir. TEBD değerlerinin belirlenmesinde Bölüm 2'de belirtildiği gibi çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak numune boyut ve şeklinin dayanım üzerinde önemli etkisinin olduğu vurgulanmıştır. Kaya tuzu ve kömür gibi kayaçların, tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) üzerinde şeklin aynı biçimde önemli bir etkisi mevcuttur. Teorik olarak sünme deneyleri tek eksenli basınç dayanım deneyine benzemektedir. Tek farkı etki eden yükün veya gerilmenin sabit tutulmasıdır. Sünme deneyi sonucunda belirlenen sünme davranışı numune şekline göre farklılık gösterecektir. Boyut analizinin bu tez çalışmasında bizzat sünme deneyleri ile yapılması düşünülmüşse de sünme deneylerinin uzun zaman alması bu yöntemin seçiminin gerçekçi olmadığını göstermiştir. Bunun yerine daha kısa süreçte tamamlanan TEBD ile şekil etkisinin belirlenmesi çalışmalarının, Bölüm 2'de sunulan kaynak araştırması bilgilerinin de göz önünde tutularak yapılması planlanmıştır. Bu bölümde, Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzları üzerinde gerçekleştirilen şekil ve boyut etkisinin yenilme olayı üzerindeki etkisinin incelenmesi için gerçekleştirilen TEBD deneylerin sonuçlarına ve yorumlanmasına yer verilmiştir. Şekil ve boyut etkisi birleştirilmiş olarak ölçek etkisi şeklinde de ifade edilebilmektedir.

7.2. Numune Hazırlama İşlemleri

Bu çalışmada kullanılan kaya tuzu numuneleri, Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir'den kaya mekaniği laboratuarına nakil edilen kaya tuzu bloklarından hazırlanmıştır. Boyut etkisi çalışmalarında amaç numune boy/çap (H/D) oranı ve numune çapının (D) kaya tuzunun TEBD değerleri üzerindeki etkisini incelemektir. Bu hedefe ulaşmak için, laboratuar ortamında Çankırı kaya tuzu madeninden alınan

bloklar kullanılarak toplam 54 ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu madeninden alınan blok numuneler kullanılarak da toplam 45 adet karot kaya tuzu numunesi hazırlanmıştır.

Boyut etkisini incelemek için boy/çap (H/D) oranı 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 ve 3 olacak şekilde 42 mm, 54 mm ve 93 mm çaplarında (D) karot numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin şematik olarak görünümü ve boyutları Şekil 7.1'de görülmektedir. Hazırlanan kaya tuzu numunelerinin genel bir görünümü de Şekil 7.2'de verilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan numunelerin boyutları Çizelge 7.1 ve 7.2'de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Deney numunelerinin şematik gösterimi



(a) (b)

Şekil 7.2. Boyut belirleme çalışmaları için hazırlanan numuneler Nevşehir-Gülşehir (a), Çankırı (b)

Çizelge 7.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu bloklarından elde edilen karotların boyut özellikleri

H/D oranı	Şekil	D = 42 mm		D = 54 mm		D = 93 mm	
		H (mm)	Adet	H (mm)	Adet	H (mm)	Adet
0,5	Karot	21,0	3	27,0	3	46,5	3
1,0	Karot	42,0	3	54,0	3	93,0	3
1,5	Karot	63,0	3	81,0	3	139,5	3
2,0	Karot	84,0	3	108,0	3	186,0	3
2,7	Karot	113,4	3	145,8	3	251,1	3

Çizelge 7.2. Çankırı kaya tuzu bloklarından elde edilen karotların boyut özellikleri

H/D oranı	Şekil	D = 42 mm		D = 54 mm		D = 93 mm	
		H (mm)	Adet	H (mm)	Adet	H (mm)	Adet
0,5	Karot	21,0	3	27,0	5	46,5	3
1,0	Karot	42,0	4	54,0	5	93,0	5
1,5	Karot	63,0	2	81,0	6	139,5	5
2,0	Karot	84,0	2	108,0	2	186,0	3
2,5	Karot	105,0	2	145,8	3	251,1	3
3,0	Karot		-		-	279,0	1

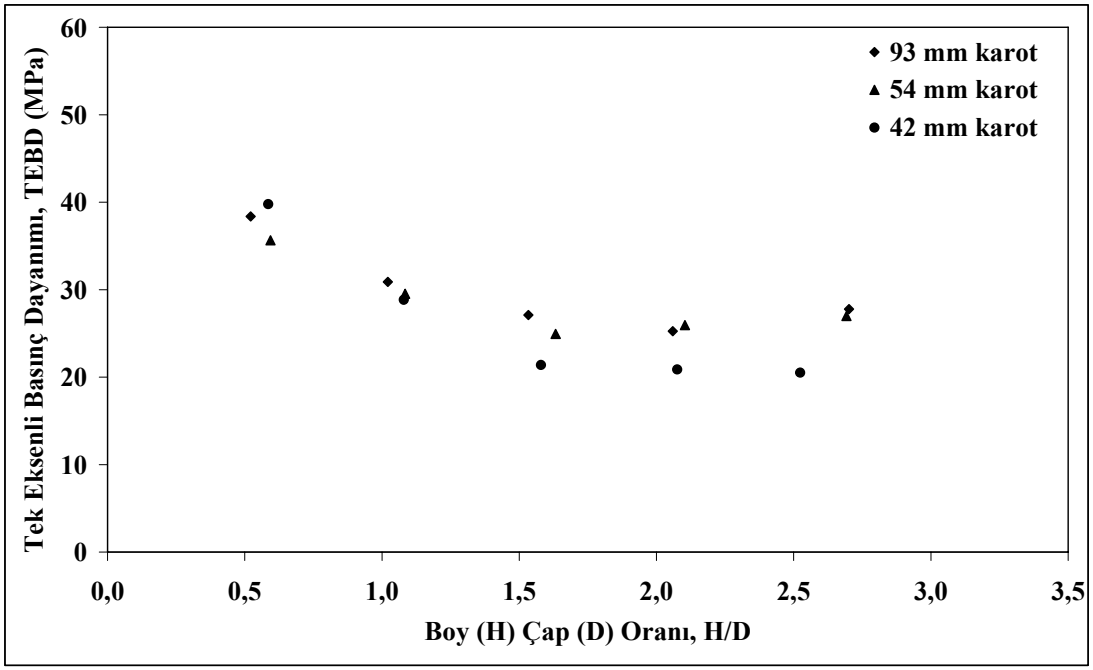
7.3. Deneysel Çalışma Prosedürü

3000 kN yükleme kapasitesi ve servo kontrolü olan bir hidrolik pres kullanılarak laboratuar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kayaç birimlerinin TEBD değerlerini belirlemek için yapılan laboratuar deneyleri, ISRM (1978) yöntemine uyumlu bir şekilde yapılmıştır. Numune üzerine yapılan yükleme, standart çelik başlıklar kullanılarak, ISRM (1978)'nin önerdiği üzere 0.5-1.0 MPa/s'lik bir gerilme artışı altında uygulanmıştır.

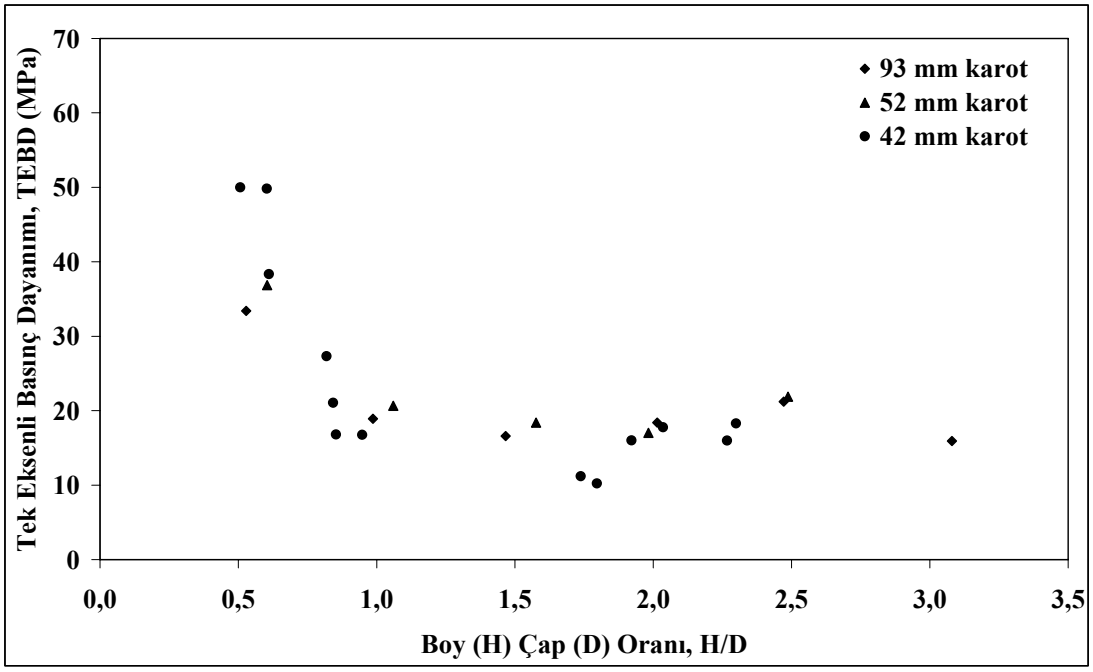
7.4. Boy-Çap Oranı (H/D) Etkisi

Tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) üzerinde boy/çap (H/D) etkisini incelemek için karot numuneler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu karot numuneleri için boy/çap oranı (H/D) Nevşehir-Gülşehir numunelerinde 0,5 ila 2,7 arasında değişirken, Çankırı numuneleri için yükseklik/çap oranı (H/D) 0,5 ila 3 arasında seçilmiştir (Çizelge 7.1 ve 7.2).

TEBD deney sonuçları kullanılarak bir veritabanı hazırlanmıştır. İlk çalışma olarak, grafikler halinde hazırlanan deney sonuçları dikkate alınarak veri tabanı üzerinde grafiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Nevşehir-Gülşehir karot numuneleri için H/D oranına bağlı deney sonuçları Şekil 7.3'de görülmektedir. Çankırı karot numunelerinde H/D oranına dayalı olarak TEBD değerlerinin değişimi ise Şekil 7.4'de verilmiştir. Şekil 7.3 ve 7.4'den görülebileceği gibi, boyun çapa oranı (H/D) arttıkça karot numuneler için TEBD değerleri düşmüştür. Karot numuneler için H/D oranlarının 1,5 ile 2 arasında olan kritik bir değerinden sonra TEBD değerleri önemli bir değişim göstermemiş, başka bir deyişle hemen hemen sabit bir değerde kalmıştır. Grafiksel değerlendirmelere göre, 54 ve 93 mm çaplı karot numuneler şekil etkisi bakımından benzer davranışlar göstermişlerdir (Şekil 7.3 ve7.4). Öte yandan 42 mm çaplı karot numunelerinde ise H/D≥ 1.5 değer aralığında sürekli azalan bir davranış sergilediği görülmektedir (Şekil 7.3 ve 7.4).



Şekil 7.3. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki değişim



Şekil 7.4. Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki değişim

Grafiksel değerlendirmelerden görülmektedir ki (Şekil 7.3 ve 7.4) her iki numune için kritik H/D oranları 1,5-2 civarındadır. Fakat bu grafiksel değerlendirmeler sonucu elde edilen sonuçlardan kesin değerler belirlenememektedir. Bu nedenle, deney sonuçlarına dayalı istatistiksel analizler aracılığıyla matematiksel eşitlikleri bulmak için SPSS V.13 programı kullanılmıştır. Karot numunelerin lineer olmayan davranışı her iki kaya tuzu numunesi için aynı tip eşitlikle tanımlanabilmiştir;

$$\sigma_C = C_1 + C_2\left[H / D\right]^{-C_3} \tag{7.7}$$

Burada C_1, C_2 ve C_3 kaya tuzu maddesine dayalı istatistiksel sabitler, σ_c ise numunenin dayanım değeridir.

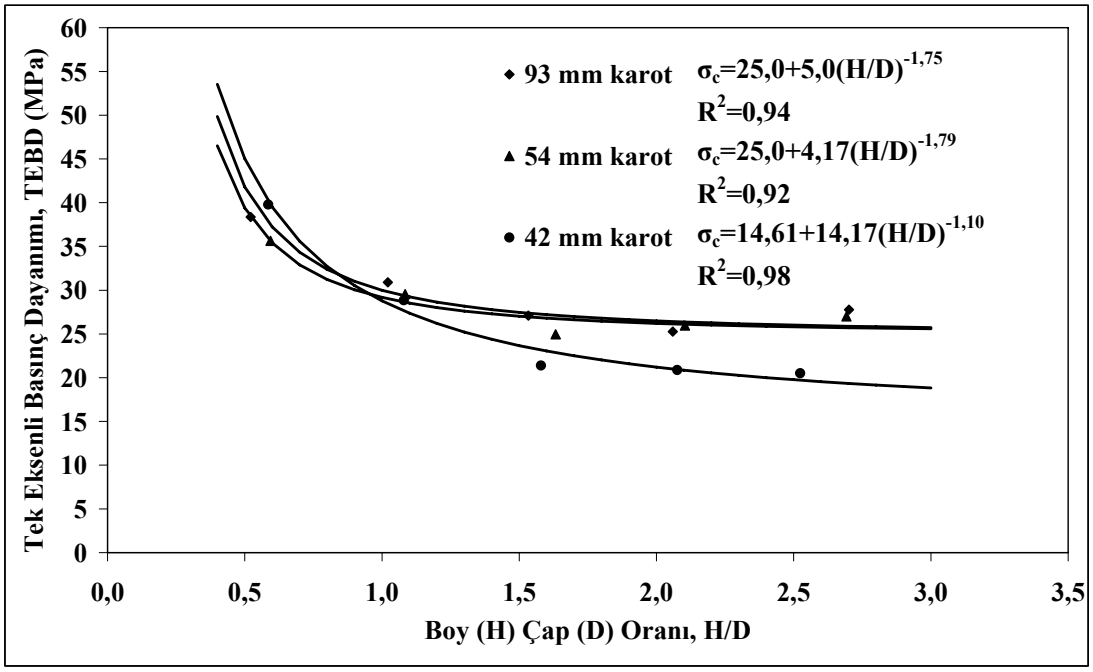
Belirlenen bu eşitliklerin SPSS V.13 kullanılarak bulunan sabit değerleri ve regresyon katsayıları Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı numuneleri için ayrı ayrı Çizelge 7.3 ve 7.4'de verilmiştir. Eşitlikler, Şekil 7.3 ve 7.4'de görülen deneysel veriler kullanılarak elde edilmiştir ve eşitliklerden elde edilen eğriler ise orijinal deney sonuçları ile birlikte Şekil 7.5 ve 7.6'de sunulmuştur. İstatistiksel ilişkilerin yüksek olmasına rağmen (R^2=0.92-0.98), 42 mm'lik numunenin TEBD değişimi azalan bir şekilde devam etmektedir. 54 mm ve 93 mm'lik numunelerde ise TEBD değerleri belli bir sabit değerden sonra Şekil 7.5 ve 7.6'da görüldüğü gibi hem Nevşehir-Gülşehir hem de Çankırı numunelerinde x ekseni boyunca yaklaşık sabit kalmaktadır.

Çizelge 7.3. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numunelerinde Boy (H)/Çap (D) oranına bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri

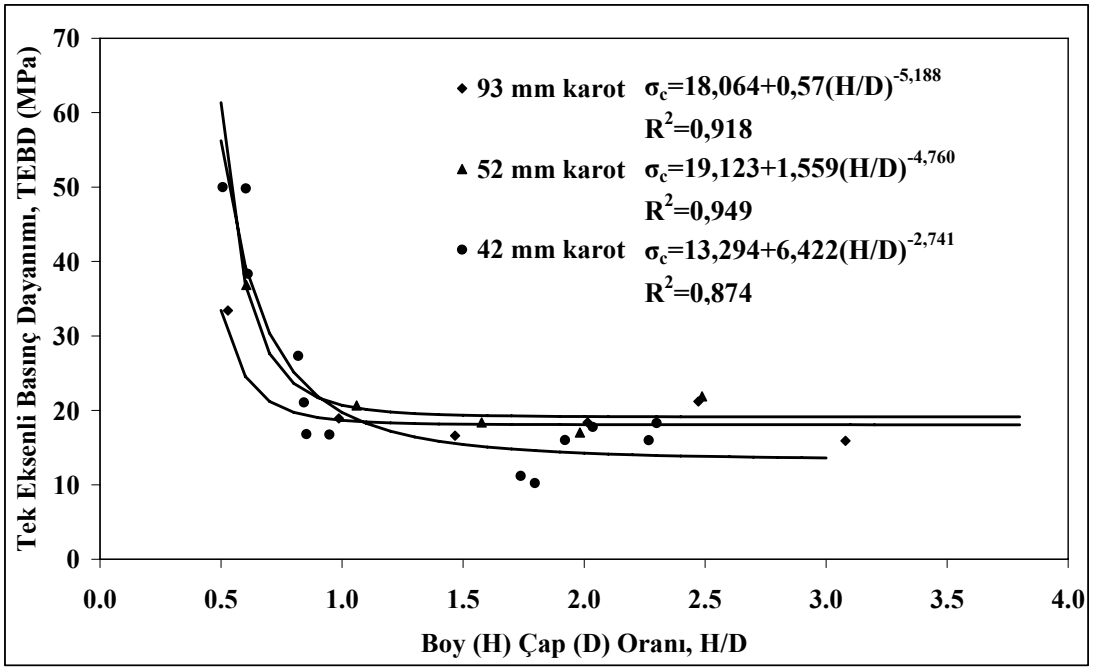
Çap D (mm)	C_1	C_2	C_3	R^2
93	25	5	-1,75	0,94
54	25	4,17	-1,79	0,92
42	14,61	14,17	-1,10	0,98

Çizelge 7.4. Çankırı karot kaya tuzu numunelerinde Boy (H)/Çap (D) oranına bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri

Çap D (mm)	C_1	C_2	C_3	R^2
93	18,06	0,57	-5,19	0,92
54	19,12	1,56	-4,76	0,95
42	13,29	6,42	-2,74	0,87



Şekil 7.5. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki ilişki



Şekil 7.6. Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için Boy (H)/Çap (D) oranı ile TEBD değerleri arasındaki ilişki

SPSS V.13 kullanılarak elde edilen eşitlik sabitleri (C_1, C_2, C_3) incelendiğinde Eşitlik 7.7 aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$C_1 = \sigma_{C_G} \tag{7.8}$$

$$C_2 = [H/D]^{-C_3} = \sigma_{C_{OranEtkisi}} \tag{7.9}$$

Burada σ_{C_G} gerçek TEBD değeri, $\sigma_{C_{OranEtkisi}}$ ise sadece şekil etkisinde oluşan TEBD değerini ifade etmektedir. Böylelikle Eşitlik 7.8 ve 7.9 şu şekilde genelleştirilebilir;

$$\sigma_C = \sigma_{C_G} + \sigma_{C_{OranEtkisi}} \tag{7.10}$$

Burada σ_c, şekil etkisi sonucu oluşan nihai laboratuar TEBD değeridir. Şekil 7.5 ve 7.6'da sunulan grafiklerde belirtilen model eğrilerin x eksenine tam asimptot olduğu nokta esasen gerçek TEBD (σ_{C_G}) değerini verecektir. Bu noktanın tespiti için Eşitlik 7.11 kullanılmıştır. Böylece şekil etkisi nedeniyle oluşan TEBD değerinin gerçek değerden sapma oranı matematiksel olarak bulunabilecektir;

$$SO = 1 - \frac{\sigma_C}{\sigma_{C_G}} \quad \text{veya} \quad SO = \frac{\sigma_{C_{OranEtkisi}}}{\sigma_{C_G}} \tag{7.11}$$

Burada, SO sapma oranı, σ_c laboratuar çalışmasından bulunan tek eksenli basınç dayanımı (MPa) ve σ_{C_G} ise modelden bulunan tek eksenli basınç dayanımı (MPa)'dır.

Sapma oranları (SO), H/D oranlarına bağlı olarak Eşitlik 7.11 ile Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı numuneleri için ayrı ayrı hesaplanmış ve sırasıyla Çizelge 7.5 ve 7.6'da sunulmuştur. Çizelge 7.5 ve 7.6'dan da görüldüğü gibi, H/D oranları arttıkça sapma oranı düşmektedir. H/D oranları sonsuz olduğunda sapma oranı sıfır olacaktır. Fakat bu çalışmada, SO≤0,1 olduğu durum için sapma oranı sıfır kabul edilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 7.5 ve 7.6'daki eğrilerin dönüm noktaları Nevşehir-Gülşehir karot numuneler için 1,5 Çankırı numuneleri için 1,0 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.5. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için belirlenen sapma oranları

H/D	D=54mm SO	D=93mm SO
0,5	0,58	0,67
1	0,17	0,20
1,5	**0,08**	**0,10**
2	0,05	0,06
2,5	0,03	0,04
3	0,02	0,03

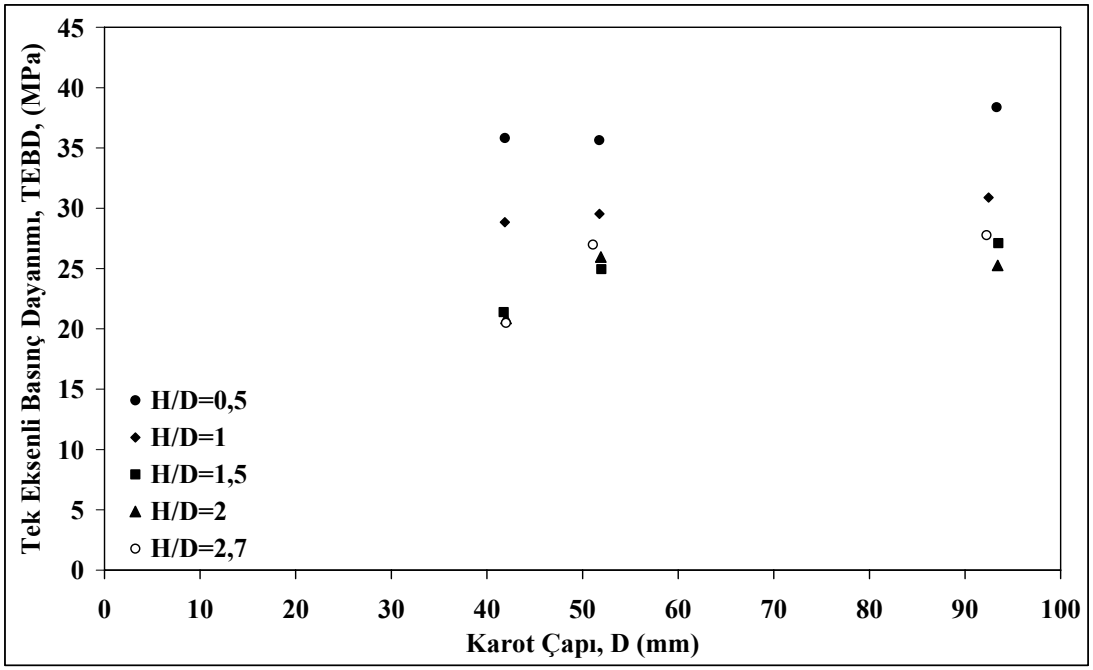
Çizelge 7.6. Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için belirlenen sapma oranları

H/D	D=54mm SO	D=93mm SO
0,5	2,21	1,15
1	**0,08**	**0,03**
1,5	0,01	0,004
2	0,003	0,0009
2,5	0,001	0,0009
3	0,0004	0,0001

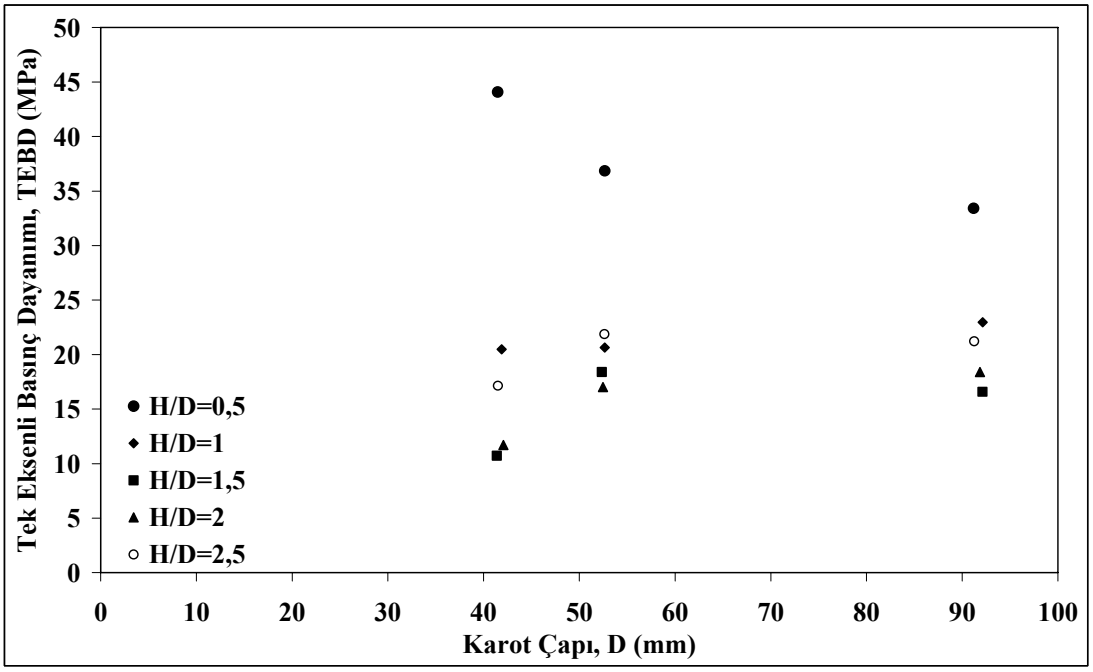
7.5. Çap (D) Etkisi

Laboratuar ortamında deneyi gerçekleştirilen numunelerin büyüklüğüne göre TEBD değerlerindeki farklılık, literatürde boyut etkisi olarak adlandırılmaktadır. Numune boyutu etkisini incelemek için Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu karot numuneleri üzerinde TEBD deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Boyut etkisini belirlemek için TEBD deneylerinden elde edilen veri tabanı kullanılarak parametrik analizler yapılmıştır. Söz konusu etki, karot numunelerde çap (D) baz alınarak analiz edilmiştir. Karot numuneler için TEBD değerlerinin davranışı Şekil 7.7 ve 7.8'de görülmektedir. Şekil 7.7 ve 7.8'den de görülebileceği gibi, kaya tuzu numunelerinde H/D 0,5 ve 1 olduğunda, karot numunelerin çapı arttıkça TEBD değerleri doğrusal davranış sergilemektedir. Öte yandan, diğer H/D oranları için, belli bir kritik çap değerine ulaşılana kadar numune çapı arttıkça TEBD değerleri artmaktadır. Değerlendirilen eğriler göstermektedir ki, H/D 1,5, 2, 2,5 ve 2,7 için belli bir kritik değerden sonra TEBD değeri numune çapına bağlı kalmaksızın belli bir değerde sabit kalmaktadır. Başka bir ifade ile H/D≥ 1,5 olan kritik bir boy/çap oranı (H/D) ve yaklaşık 50-60 mm'lik bir kritik çap (D) değerinden sonra karot numunelerinin TEBD değerleri, ciddi bir değişim göstermemekte ve hemen hemen belli kritik bir değerde sabit kalmaktadır.



Şekil 7.7. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değeri ile TEBD değerleri arasındaki davranış

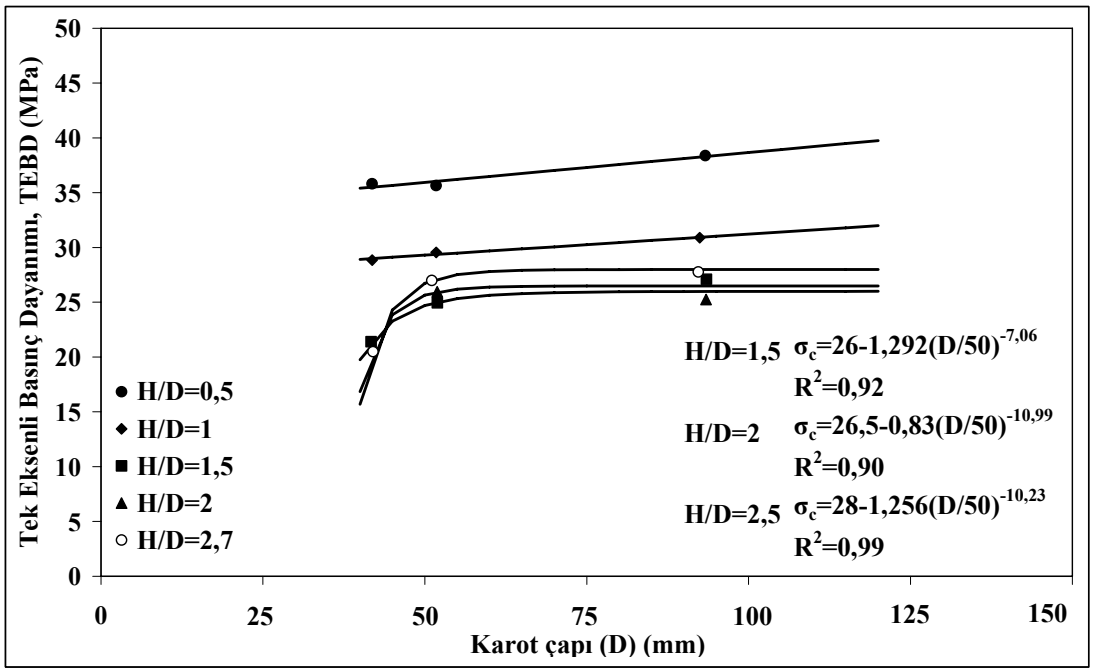


Şekil 7.8. Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değeri ile TEBD değerleri arasındaki davranış

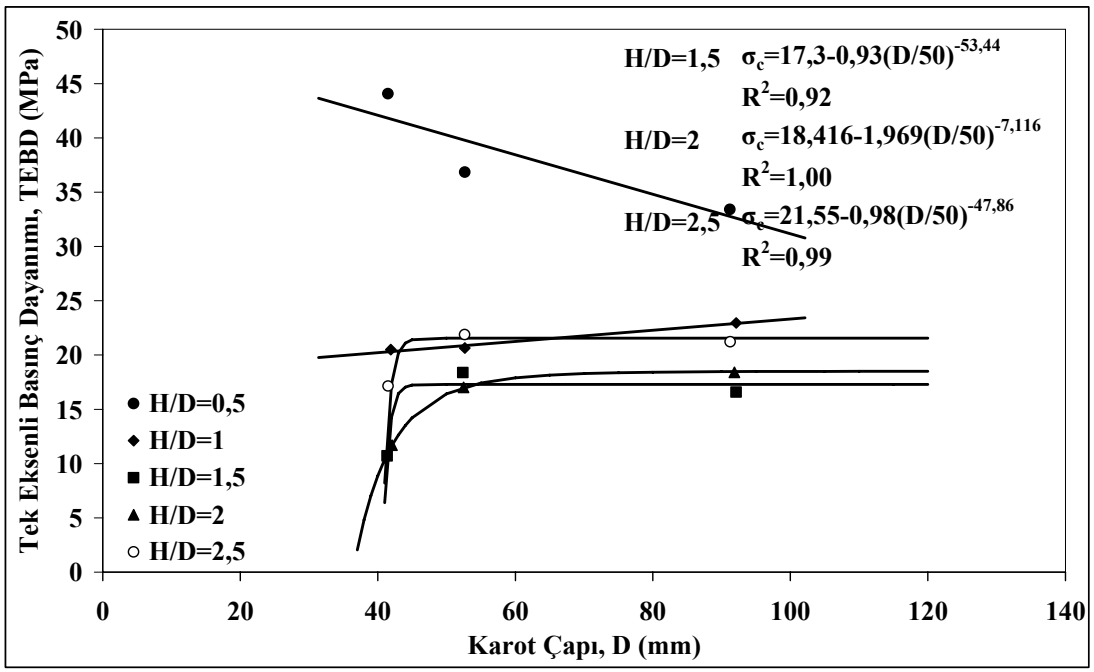
Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu için kritik çap değerleri 50-60 mm civarındadır. Fakat kritik noktanın tam olarak belirlenmesinde, grafiksel değerlendirmeler yeterli olamamaktadır. Bu nedenle deney sonuçlarına bağlı olarak matematiksel eşitlikleri bulmak için SPSS V.13 programı kullanılmıştır. H/D=0,5 ve 1 olduğunda doğrusal bir davranış bulunmuştur (Şekil 7.9 ve 7.10). Bir diğer ifade ile kritik boyut, net olarak belirlenememiş ve bu oranlar için söz konusu olan eğriler analizlerde kullanılmamıştır. Bu etki kısmen numunenin başlıklar arasında sıkışma etkisinden kaynaklanabilmektedir. H/D=1,5, 2, 2,5 ve 2,7 için doğrusal olmayan davranışlar aynı tip eşitlik ile tanımlanabilmiştir (Şekil 7.9 ve 7.10);

$$\sigma_C = C_1 - C_2\left[D/50\right]^{C_3} \tag{7.12}$$

burada C_1, C_2 ve C_3 materyale bağlı istatistiksel sabitler, σ_c de numunenin dayanım değeridir.



Şekil 7.9. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değerleri ile TEBD değerleri arasındaki ilişki



Şekil 7.10. Çankırı karot kaya tuzu numuneleri için çap (D) değerleri ile TEBD değerleri arasındaki ilişki

Şekil 7.9 ve 7.10'da görülen eşitliklerdeki sabitler ve regresyon parametreleri SPSS V.13 ile bulunmuş ve Çizelge 7.7 ve 7.8'de verilmiştir. İstatistiksel ilişkilerin yüksek bulunmasına karşın (R^2=0.90-0.99), H/D=0,5 ve 1 olan numunedeki TEBD değerleri doğrusal bir davranışta olduğu görülmektedir. H/D=1,5, 2, 2,5 ve 2,7 olan numuneler için ise TEBD değerleri sabit bir değerden sonra değişim göstermemektedir (Şekil 7.9 ve 7.10).

Çizelge 7.7 ve 7.8'de C_1 olarak adlandırılan sabit değerler Nevşehir-Gülşehir numuneleri için 26 ve 28 MPa, Çankırı numuneleri için de 20-22 MPa olarak belirlenmiştir. C_1 sabiti, boyut etkisinden bağımsız gerçek TEBD değeri olarak düşünülebilir. Şekil 7.9 ve 10'da görüldüğü gibi karot numunelerde H/D=0,5 ve 1 olan numuneler hariç, TEBD değerleri belli bir değerden sonra x eksenine yaklaşık paralel hale gelmekte ve y ekseninde herhangi bir değişim göstermemektedir. Başka bir ifade ile Eşitlik 7.12'nin ikinci kısmındaki ifade boyut etkisi nedeniyle oluşan TEBD değerlerini ifade etmektedir. Numune çap değerini (mm) ifade eden D sonsuz olursa Eşitlik 7.14 sıfır olacak, bu durumda da Eşitlik 7.12 C_1'e yani σ_{C_G}'ye eşit

olacaktır. Dolayısıyla gerçek TEBD ve boyut etkisine dayalı TEBD değerleri şu şekilde yazılabilir:

$$C_1 = \sigma_{C_G} \tag{7.13}$$

$$C_2\left[D/50\right]^{C_3} = \sigma_{C_{BoyutEtkisi}} \tag{7.14}$$

Burada σ_{C_G} boyut etkisinin görülmediği gerçek TEBD, $\sigma_{C_{BoyutEtkisi}}$ ise sadece boyut etkisiyle oluşan TEBD değerini ifade etmektedir. Böylelikle Eşitlik 7.13 ve 7.14 şu şekilde genelleştirilebilir;

$$\sigma_C = \sigma_{C_G} + \sigma_{C_{BoyutEtkisi}} \tag{7.15}$$

Burada σ_c boyut etkisiyle oluşan nihai laboratuar TEBD değeridir.

Çizelge 7.7. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numunelerinde Çap değerine bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri

H/D	C_1	C_2	C_3	R^2
0,5		Lineer davranış		0,94
1		Lineer davranış		0,97
1,5	26	1,292	-7,06	0,92
2	26,5	0,83	-10,99	0,90
2,7	28	1,256	-10,23	0,99

Çizelge 7.8. Çankırı karot kaya tuzu numunelerinde çap değerine bağlı geliştirilen TEBD eşitliklerinde kullanılan C_1, C_2 ve C_3 sabitleri

H/D	C_1	C_2	C_3	R^2
0,5		Lineer davranış		0,94
1		Lineer davranış		0,97
1,5	17,3	0,93	-53,44	0,92
2	18,416	1,969	-7,116	1,00
2,5	21,55	0,98	-47,86	0,99

Kritik D değerleri, geliştirilen eşitlikler kullanılarak doğru bir şekilde hesaplanabilir. Eğrilerin dönüm noktaları olan kritik değerler, geliştirilen matematiksel model kullanılarak bulunabilir. Boyut etkisi nedeniyle oluşan TEBD değerinin gerçek değerden sapma oranı Eşitlik 7.16 yardımıyla bulunabilir;

$$SO = \frac{\sigma_C}{\sigma_{C_G}} - 1 \quad \text{veya} \quad SO = \frac{\sigma_{C_{BoyutEtkisi}}}{\sigma_{C_G}} \tag{7.16}$$

Sapma oranları (SO), D oranlarına bağlı olarak Eşitlik 7.16 ile hesaplanmış ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için Çizelge 7.9 ve Çankırı kaya tuzu için de Çizelge 7.10'da sunulmuştur. Çizelge 7.9 ve 7.10'dan da görüldüğü gibi, çap (D) değerleri arttıkça sapma oranı düşmektedir. D değeri sonsuz olduğunda sapma oranı sıfır olacaktır. Fakat bu çalışmada, şekil etkisi için yapılan analizde olduğu gibi SO≤0,1 olduğunda sapma oranı sıfır kabul edilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 7.9 ve 7.10'daki eğrilerin dönüm noktaları karot numuneler için 50 mm olarak bulunmuştur. Hesaplamalarda H/D=0,5 ve 1 oranlarına sahip karot numunelerin eğrileri hem Nevşehir-Gülşehir hem de Çankırı numunelerinde x eksenine paralel olmadığı için (Şekil 7.9 ve 7.10) bu numunelere ait sonuçlar dikkate alınmamıştır.

Çizelge 7.9. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu karot numuneleri için belirlenen sapma oranları (SO)

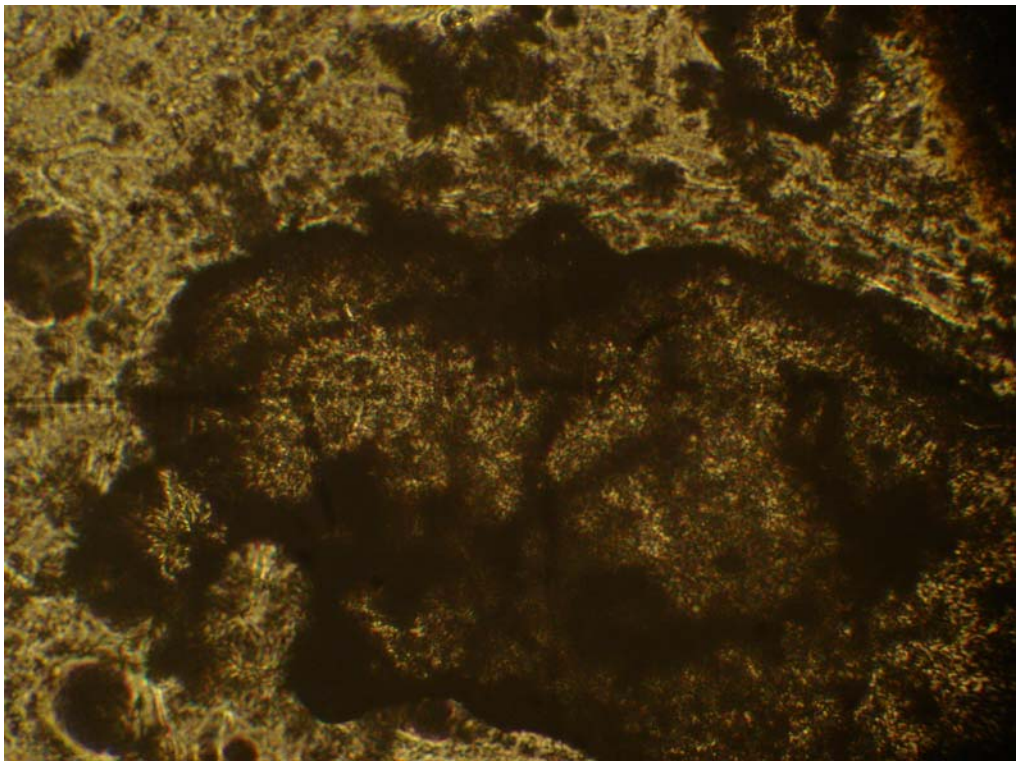
D (mm)	H/D=1,5 SO	H/D=2,0 SO	H/D=2,7 SO
40	0,24	0,36	0,44
50	**0,05**	**0,03**	**0,04**
75	0,00	0,00	0,00
100	0,00	0,00	0,00
125	0,00	0,00	0,00
150	0,00	0,00	0,00

Çizelge 7.10. Çankırı kaya tuzu karot numuneleri için belirlenen sapma oranları (SO)

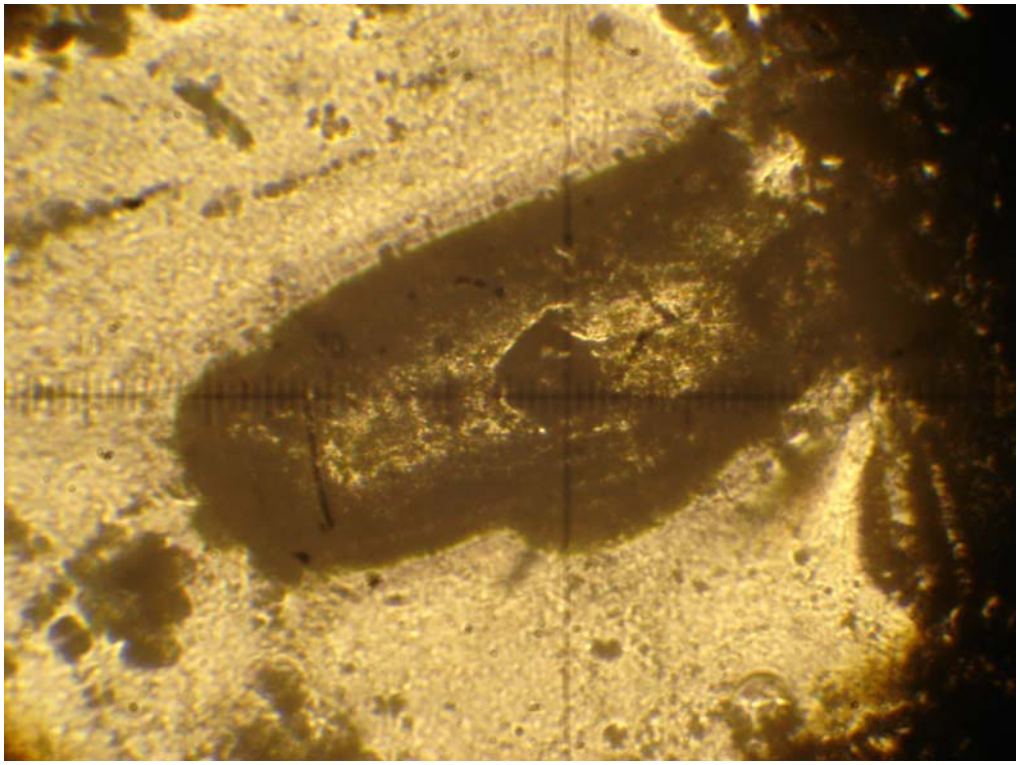
D (mm)	H/D=1,5 SO	H/D=2,0 SO	H/D=2,5 SO
40	2,35	0,52	2,01
50	**0,00**	**0,11**	**0,00**
75	0,00	0,00	0,00
100	0,00	0,00	0,00
125	0,00	0,00	0,00
150	0,00	0,00	0,00

7.6. Tuz Kristal Boyut (ρ) Etkisi

Bu tez çalışmasına konu olan iki farklı kaya tuzu örneklerinin hafif çekiç darbeleri ile parçalanarak kristallerine ayrılabildiği gözlenmiştir. Bundan dolayı Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu bloklarından alınan birer parça kaya tuzu (2-3 kg), laboratuarda bulunan çeneli kırıcının ağzı uygun açıklıkta iken kırıcıdan bir kez geçirilerek kristallerine ayrılmıştır. Bundan sonra elek analizi yapılmıştır. Elde edilen elek analizi sonuçları Çizelge 7.11 ve 7.12'de sunulmuştur. Bu sonuçlar dikkate alınarak çizilen eğrilerden hem Nevşehir-Gülşehir hem de Çankırı kaya tuzunda ortalama tane boyutunun (ρ) yaklaşık 3,35-6,35 mm aralığında olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 7.11'de görüldüğü üzere tane boyutunun (ρ) 3,35 mm'den az olanlar (% 24) istemeden fazla kırılan malzeme 6,35 mm'den büyük olanlar (% 7,51) ise istenen kristal boyutuna indirilemeyenler olarak kabul edilmiştir. Tane boyutunun (ρ) 3,35 ila 6,35 mm arasında olan % 68,4'lük kısmında ise malzemenin kristal boyutunda parçalandığı kabul edilmiştir. Aynı düşünce ile Şekil 7.12 ve Çizelge 7.12 incelenmiş ve kristal boyutunun 3,35-6,35 mm aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ortalama tane boyutu (ρ) her iki kaya tuzu oluşumu için 5 mm olarak kabul edilmiştir. Ayrıca tane boyutu belirlemek amacıyla mikroskobik analiz yapılmış ve bu analizden de tane boyutunun 5 mm civarında olduğu teyit edilmiştir. Tane boyutunun mikroskobik görüntüsü Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu numuneleri için sırasıyla Şekil 7.11a ve 7.11b'de sunulmuştur.



(a)



(b)

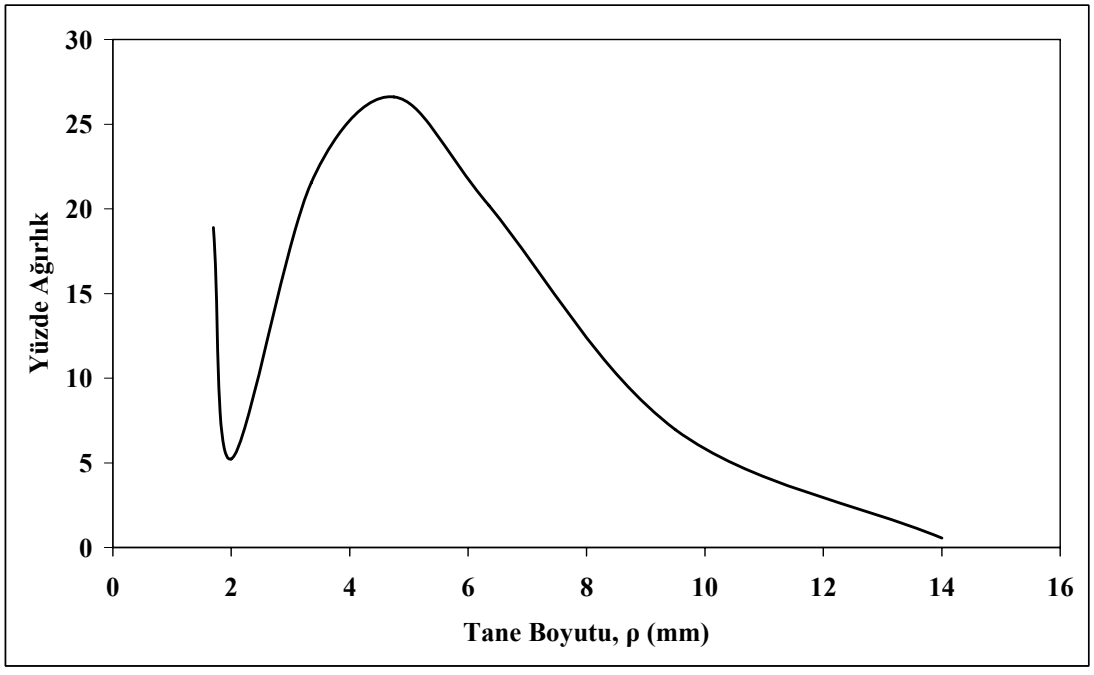
Şekil 7.11. Nevşehir Gülşehir (a) ve Çankırı kaya tuzu kristallerine ait mikroskop görüntüleri

Çizelge 7.11. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda yapılan elek analizi sonuçları

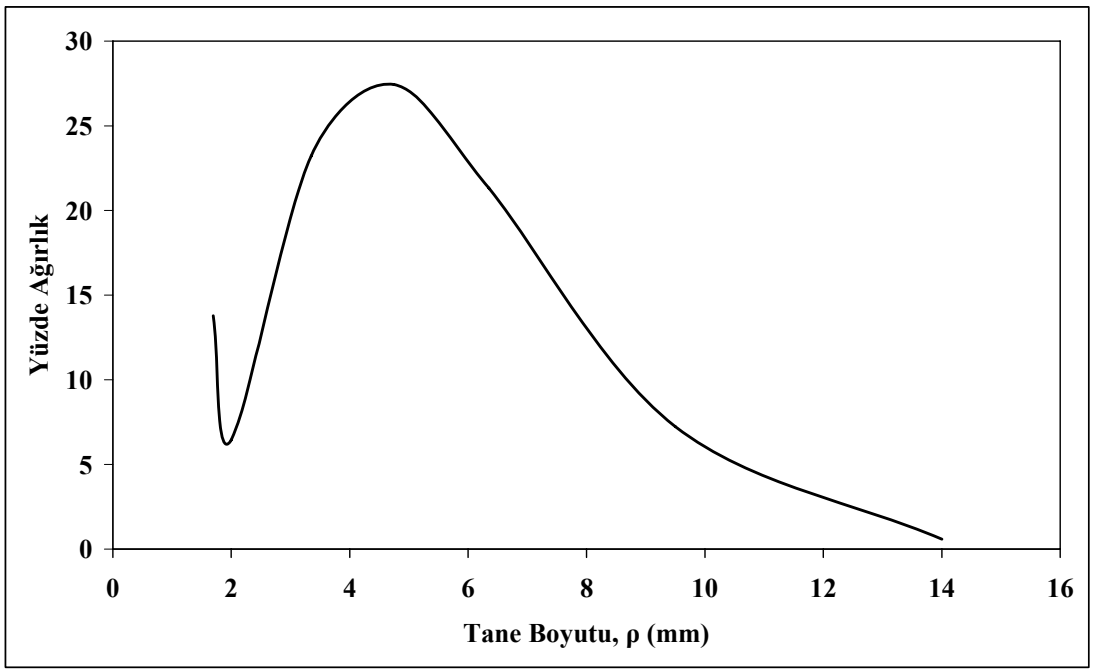
Elek açıklığı (mm)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (%)	Kümülatif elek üstü (%)
14	10,1	0,56	100
9,5	125,6	6,96	99,44
6,35	364,8	20,21	92,48
4,75	480,3	26,61	72,27
3,35	388,6	21,53	45,66
2	94,3	5,23	24,13
1,7	341,0	18,90	18,90
Toplam	1804,7	100	

Çizelge 7.12. Çankırı kaya tuzunda yapılan elek analizi sonuçları

Elek açıklığı (mm)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (%)	Kümülatif elek üstü (%)
14	17,32	0,58	100
9,5	215,93	7,23	99,42
6,35	636,77	21,32	92,19
4,75	819,55	27,44	70,87
3,35	693,51	23,22	43,43
2	192,04	6,43	20,21
1,7	411,57	13,78	13,78
Toplam	2986,69	100	

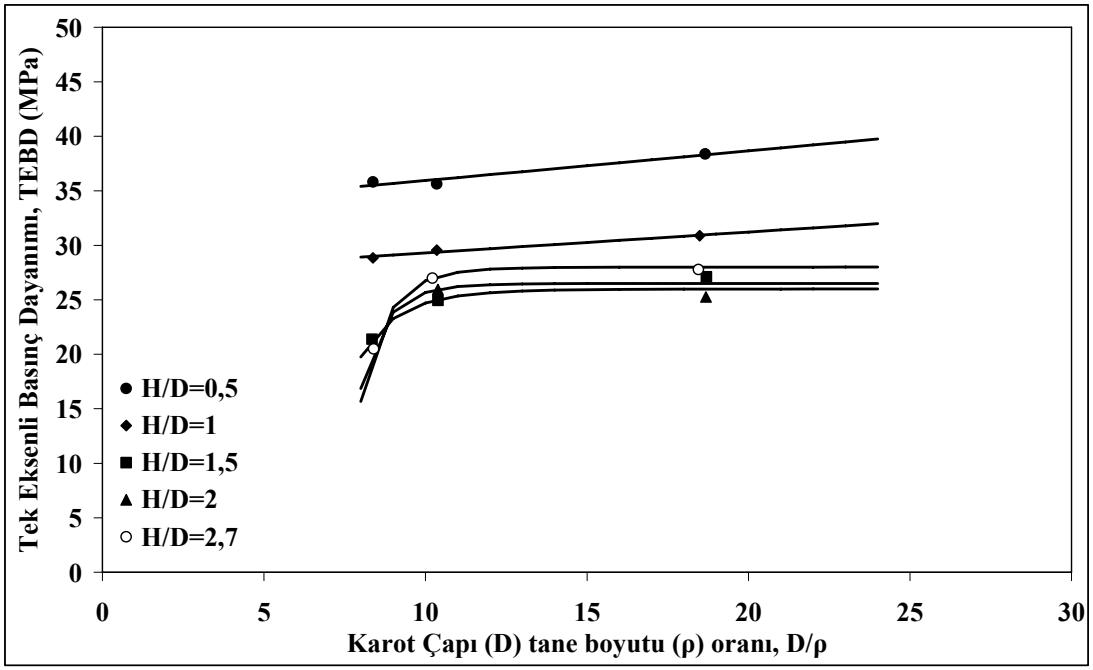


Şekil 7.12. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda yapılan elek analizi eğrisi

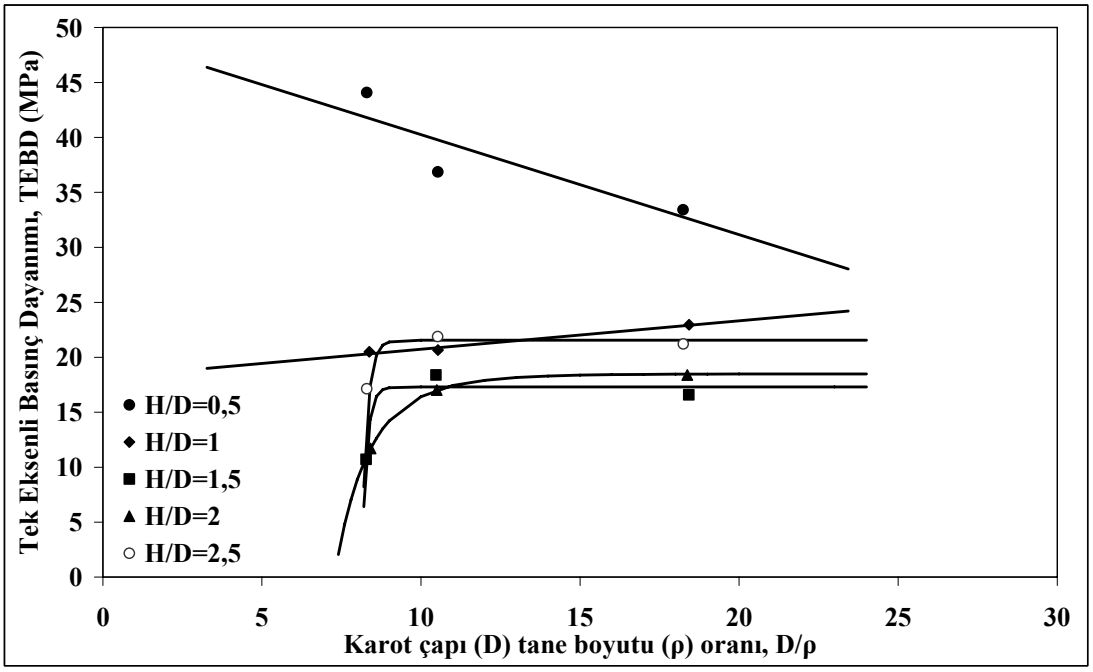


Şekil 7.13. Çankırı kaya tuzunda yapılan elek analizi eğrisi

Karot numuneler için gerçekleştirilen boyut analizlerde kritik boyut (çap, D) 50 mm olarak hesaplanmıştır (Çizelge 7.9 ve 7.10, Şekil 7.12 ve 7.13). Numune çapının (D) tane boyutuna (ρ) oranını belirlemek için tüm numuneler dikkate alınarak grafikler hazırlanmıştır. Şekil 7.14 ve 7.15'de görüldüğü gibi H/D=0,5 ve 1 olan numuneler hariç diğer eğriler yaklaşık D/ρ oranı 10 değerinden sonra sabit bir davranış sergilemişlerdir. H/D=0,5 ve 1 olan numunelerde ise doğrusal davranıştan dolayı herhangi bir dönüm noktası gözlemlenememiştir.



Şekil 7.14. Nevşehir-Gülşehir karot kaya tuzu numunelerinde çap/tane boyu (D/ρ) oranına bağlı olarak TEBD değişimleri



Şekil 7.15. Çankırı karot kaya tuzu numunelerinde çap/tane boyu oranına (D/ρ) bağlı olarak TEBD değişimleri

7.7. Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı Kaya Tuzu Numuneleri için Şekil Faktörü

Grafiksel değerlendirmeler ve istatistiksel analizler sonucunda, karot numuneler için doğrusal ve doğrusal olmayan iki ana dayanım davranışı gözlemlenmiştir. Karot numuneler için kritik H/D oranı ve kritik çap (D) değeri sırasıyla 1,5 ve 50 mm olarak bulunmuştur. Fakat bu durum çap (D) 42 mm'lik karot numunelerde gözlemlenememiştir. TEBD değerlerinin bu davranışının tane boyutunun ortalama 5 mm olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatür taramasında numune boyutunun tane boyutuna oranı Lux (1984) tarafından 15, Zhigalkin (2005) tarafından da 20 olarak önerilmiştir. Buradaki farklılığın, farklı maden yataklanmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Oran etkisi ile ilgili daha önceki çalışmalarda sunulduğu gibi, numuneleri her zaman önerilen boyutlara göre hazırlamak mümkün olmadığı için TEBD değerleri için düzeltme faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu için K düzeltme faktörü, istatistiksel analizlerle Eşitlik 7.17 ve 7.18'deki gibi belirlenmiştir (Şekil 7.16 ve 7.17). Bu eşitliklerde görüldüğü gibi, daha önceki çalışmalar dikkate alınarak, tüm TEBD değerleri D/H=0,5 olacak şekilde normalize edilmiştir.

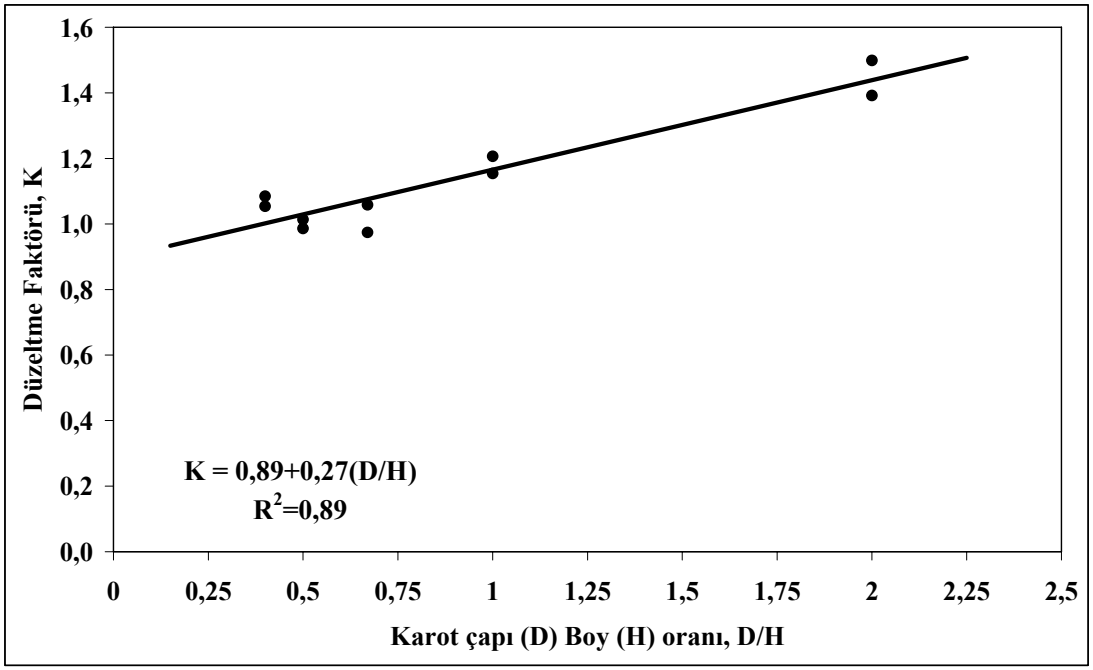
Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için;

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = 0,89 + 0,27\frac{D}{H} \qquad D \geq 50 \text{ mm} \qquad (7.17)$$

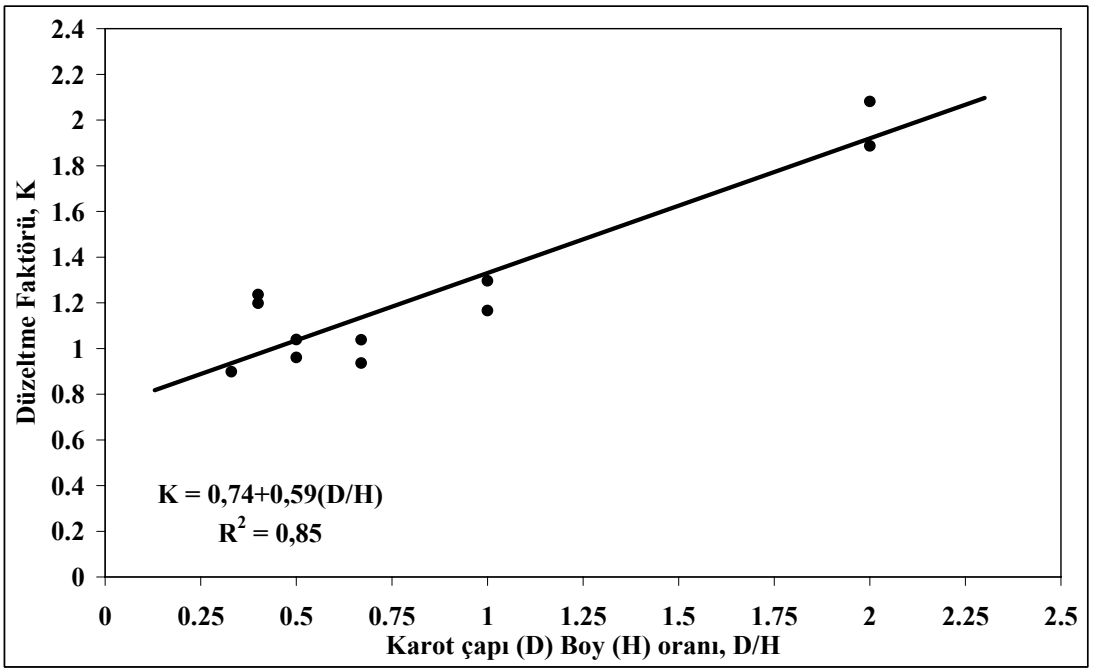
Çankırı kaya tuzu için;

$$K = \frac{(TEBD)_{D/H\neq 0,5}}{(TEBD)_{D/H=0,5}} = 0,74 + 0,59\frac{D}{H} \qquad D \geq 50 \text{ mm} \qquad (7.18)$$

Burada K düzeltme faktörü, D karot numuneler için çap (mm) ve H ise boydur (mm).



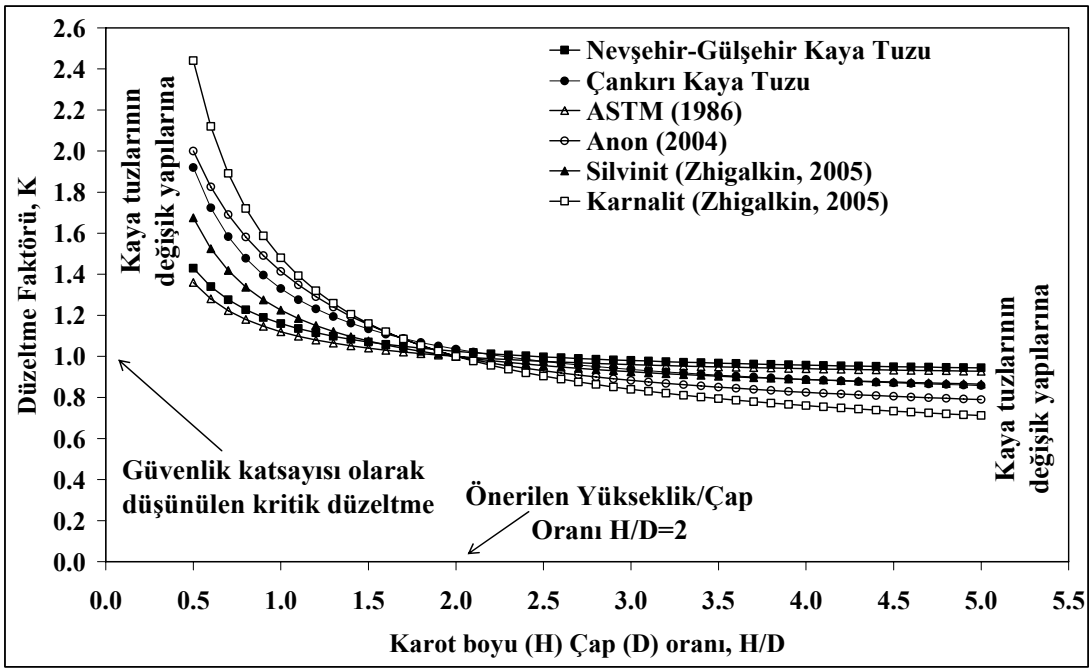
Şekil 7.16. Nevşehir-Gülşehir karot numuneleri için düzeltme faktörü



Şekil 7.17. Çankırı karot numuneleri için düzeltme faktörü

Sonuç olarak, uygulayıcı mühendisler her iki kaya tuzu sahasından olanakları ölçüsünde gerçekleştirecekleri herhangi bir H/D oranına sahip numuneye ait TEBD değerlerinden Şekil 7.15 ve 7.16'da sunulan K düzeltme faktörü ile istediği H/D oranındaki TEBD değerine geçiş yapabilecektir.

Karot numuneler için bu çalışmada bulunan K düzeltme faktörü ile önceki çalışmalarda bulunan K düzeltme faktörü değerleri Şekil 7.18'de karşılaştırılmıştır. Bu grafikten görüldüğü gibi, bu çalışmada her iki kaya tuzu sahası için bulunan K düzeltme faktörü, önceki çalışmalarda bulunan değer sınırları arasındadır. Tüm çalışmalardaki değerlerin farklılığının kaya tuzu numunelerindeki yapısal farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.18. Daha önceki çalışmalar ve bu çalışma ile belirlenen değişik K faktörleri ile Yükseklik/Çap oranı (H/D) ilişkisi

7.8. Sünme Deneyleri için Standart Numune Boyutunun Belirlenmesi

Elde edilen sonuçlar, kaya tuzu numunesinde şekil ve boyutun TEBD değerlerinin belirlenmesinde oldukça önemli bir rol oynadığını doğrulamıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu numune hazırlanmasında aşağıda belirtilen noktalara dikkat edilmesinin gerekli olduğu belirlenmiştir;

(i) Karot numuneler için kritik H/D oranı 1,5'den büyük olmalı,

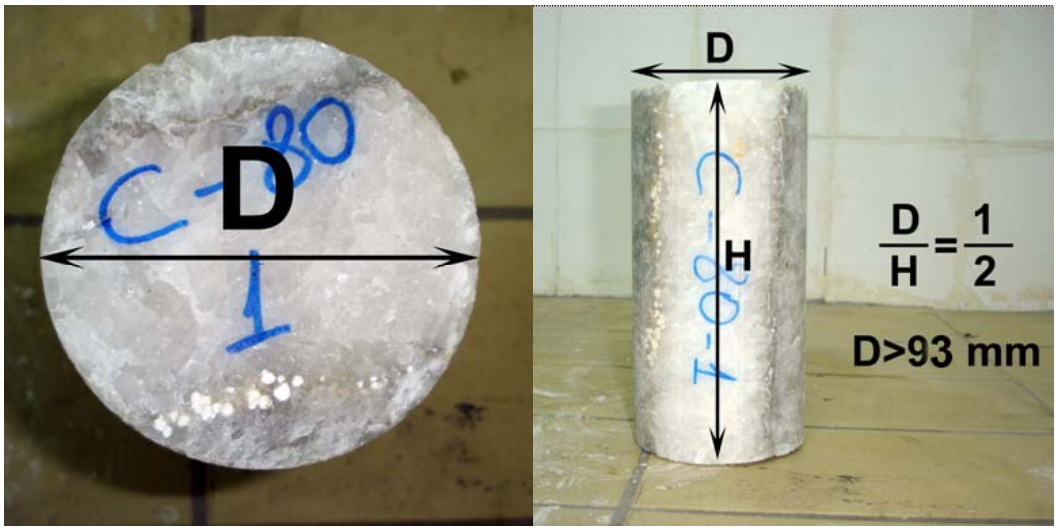
(ii) Karot numuneler için kritik çap (D) 50 mm'den büyük olmalı,

(iii) Karot numuneler için kritik çap/tane boyutu oranı (D/ρ) ise en az 10 olmalıdır.

Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzuna ait kritik boyut belirlendikten sonra bu konuda özellikle son yıllarda yapılan uluslararası yayınlar incelenmiştir. Bu konuda dikkat çeken yayınlar incelenerek sünme deneylerinde kullandıkları numune boyutları derlenerek Çizelge 7.13 oluşturulmuştur. Çizelgeden görüldüğü üzere numune Boy/Çap (H/D) oranı genelde 2 seçilmiş, çap ise 90 mm alınmıştır. Bu tez çalışmasının sonuçları ve sünme deneyleri için laboratuar olanakları dikkate alınarak numune çapı 93 mm ve Boy/Çap (H/D) oranının ise 2 olmasına karar verilmiştir (Şekil 7.19 ve 7.20).

Çizelge 7.13. Son yıllarda yapılan uluslar arası yayınlarda sünme deneylerinde kullanılan çap (D) değerleri ve boy/çap (H/D) oranları

	Çalışmayı yapan	Çalışmanın adı	Yayın yılı	Çap (mm)	Boy/Çap oranı
1	W. Lianga, C. Yang, Y. Zhao, M.B. Dusseault, J. Liu	Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock	2007	90	2,0
2	L. Ma, J.J.K. Daemen	An experimental study on creep of welded tuff	2006	45-61	2,0
3	A. Brara, J.R. Klepaczko	Experimental characterization of concrete in dynamic tension	2006	74	1,3
4	J.H. Ter Heege, J.H.P. De Bresser, C.J. Spiers	Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain	2005	50	2,4
5	Pierre Berest, Pierre Antoine Blum, Jean Pierre Charpentier, Hakim Gharbi, Frederic Vales	Very slow creep tests on rock samples	2005	70	2,2
6	Ahmad Fahimifar, Hamed Soroush	Effect of time on the stress–strain behaviour of a single rock joint	2005	75	2,0
7	M. Gasc-Barbier, S. Chanchole, P. Berest	Creep behavior of Bure clayey rock	2004	36	2,0
8	K. S´ lizowski, J. Janeczek, K. Przewlocki	Suitability of salt-mudstones as a host rock in salt domes for radioactive-waste storage	2003	100	2,0
9	Robert Corthe´sy, Maria Helena Leite, Denis E. Gill, Bernard Gaudin	Stress measurements in soft rocks	2003	152	1,3
10	R.H.C. Wong, P. Lin, C.A. Tang, K.T. Chau	Creeping damage around an opening in rock-like material containing non-persistent joints	2002	100	2,0
11	A. F. Fossum and J. T. Fredrich	Salt Mechanics Primer for Near-Salt and Sub-Salt Deepwater Gulf of Mexico Field Developments	2002	100	2,0
12	V. G. Silberschmidt, V. V. Silberschmidt	Analysis of Cracking in Rock Salt	2000	80	1
13	T. Popp and H. Kern	Monitoring the State of Microfracturing in Rock Salt During Deformation Combined Measurements of Permeability and P- and S-Wave Velocities	2000	98	2
14	Chunhe Yanga, J.J.K. Daemen, Jian-Hua Yin	Experimental investigation of creep behavior of salt rock	1999	100	2
15	Ph. Cosenza, M. Ghoreychi, B. Bazargan-Sabet, G. de Marsily	In situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage	1999	50-60	2
16	T. Popp and H. Kern	Ultrasonic Wave Velocities, Gas Permeability and Porosity in Natural and Granular Rock Salt	1998	98	2
17	O. Moustachi, J. F. Thimus	P-Wave Attenuation in Creeping Rock and System Identification	1997	63	2
18	Istvan J.A.; Evans L.J.; Weber J.H.; Devine C.	Rock mechanıcs for gas storage ın bedded salt caverns	1997	100	2
19	C. De Las Cuevas	Pore structure characterization in rock salt	1997	76	1,3



Şekil 7.19. Belirlenen kriterlere göre oluşturulan tipik bir kaya tuzu karot numunesi



Şekil 7.20. Sünme deneyleri için hazırlanan 93 mm çaplı tipik silindirik kaya tuzu numuneleri

8. SÜNME DENEYLERİ

8.1. Genel

Bu bölümde SÜ-Maden Mühendisliği Bölümü'nde kurulan sünme deneyi laboratuarında gerçekleştirilen sünme deneylerinden elde edilen bulgular sunulacaktır. Deneyler, Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir olmak üzere iki farklı bölgeye ait kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sünme deneyleri için kullanılan kaya tuzu örneklerinin yükseklik/çap oranı (H/D), 7. Bölümde belirtildiği gibi 2 olarak alınmıştır. Numune çapı ise 93 mm olarak seçilmiştir. Bu boyutta hazırlanan numuneler için Çankırı numuneleri "C" harfi ile Nevşehir-Gülşehir numuneleri ise "N" harfi ile kodlanmıştır. Harfin ardından gelen rakamlar ise numunenin kaç kN sabit yükle yüklendiğini ifade etmektedir. Çankırı numuneleri sırasıyla 80, 95, 100, 110 ve 115 kN yüklerinde, Nevşehir numuneleri ise sırasıyla 80, 100, 120, 130, 140 ve 160 kN yüklerinde sünme deneylerine tabi tutulmuşlardır.

8.2. Çankırı Kaya Tuzu ile Gerçekleştirilen Sünme Deneyleri

Çankırı bölgesine ait kaya tuzu bloklarından numune boyu (H) ve çap (D) oranı 2 olan 5 adet numune hazırlanmıştır. Genel olarak numune çapı (D) 93 mm iken numune boyu 186 mm olmuştur. Hazırlanan numuneler, farklı sabit yük değerlerinde deneylere tabi tutulmuşlardır. Bu yük değerlerinin belirlenmesinde tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değeri kullanılmıştır. Ancak boyut ve şekil etkisi dikkate alınarak hazırlanan ve Bölüm 7'de sunulan Şekil 7.10 yardımıyla elde edilen Çizelge 7.8'den görüldüğü üzere tek eksenli basınç dayanımı değeri (σ_c) H/D oranı 2 ve D=93 mm olan numuneler için 18,4 MPa olarak alınmıştır. Bu değer Bölüm 7'de sunulan boyut belirleme çalışmaları kapsamında yapılan sayısal analizlerden elde edilen Çankırı numuneleri için nihai TEBD değeridir. Sonuç olarak deneylerde kullanılan sabit yük değerleri, tek eksenli basınç dayanımı değerinin % 64, 76, 80, 88 ve 92'si alınarak

belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan numune adetleri, boyutları ve sabit yük değerleri Çizelge 8.1'de sunulmuştur. Çizelgede sunulan her bir sabit yüklemeye ait sünme deneyi aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı başlıklar halinde verilmiştir.

Çizelge 8.1. Çankırı kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deneylerinde kullanılan numune sayıları, boyutları ve sabit yük değerleri

Numune Adı	Çap (D) (mm)	Yükseklik (H) (mm)	TEBD σ_c (MPa)	Sabit Gerilme Yüzdesi (%)	Sabit Gerilme (σ_s) (MPa)	Sabit Yük (kN)
C-80-1	93,7	189,1	18,4	64	11,8	80
C-95-1	93,4	187,4	18,4	76	13,9	95
C-100-1	94,0	188,7	18,4	80	14,7	100
C-110-1	93,3	185,8	18,4	88	16,2	110
C-115-1	93,7	187,3	18,4	92	16,9	115

8.2.1. C80-1 Numunesi

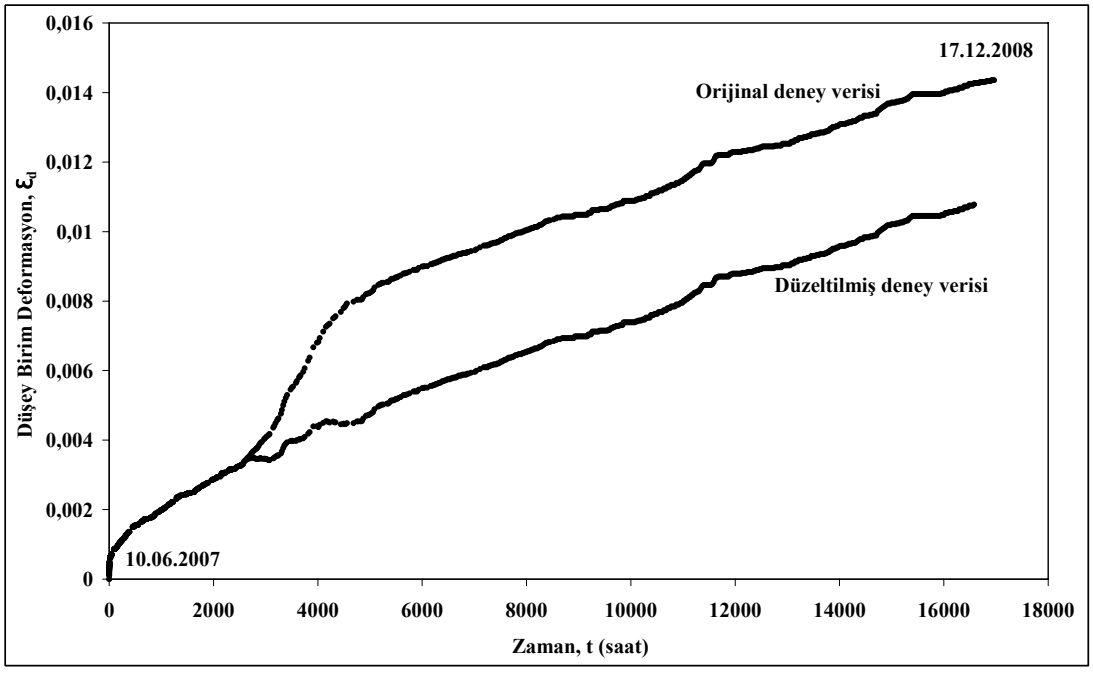
Boy/çap(H/D) oranı 2 olan C80-1 numunesi 189,1 mm boyunda ve 93,7 mm çapındadır. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.1'de görülmektedir. 10.01.2007 tarihinde 80 kN yük ile 11,8 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 708 gündür halen devam etmektedir. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 64'üne tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu Aralık 2008 tarihi itibarı ile % 1,4354839, yatay birim deformasyonu ise % 0,126 değerindedir. Şekil 8.2 ve 8.3'den görüldüğü üzere birinci ve ikinci sünme aşamaları elde edilmiş olup ikinci sünme aşaması halen devam etmektedir. Toplam düşey deformasyondan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,00377 mm/gün olarak belirlenirken toplam yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,000166 mm/gün'dür.

Şekil 8.2'de sunulan sünme davranışında yaklaşık 3000. saatte klima arızası nedeniyle deney ortamında oluşan nem ve sıcaklık artışı nedeni ile sünme eğrisinde 3. aşamaya geçilmiş gibi bir davranış görülmüş ancak daha sonra deney ortamı klima ile kontrol altına alınmıştır. Klima arızasının giderilmesinin ardından sünme eğrisi

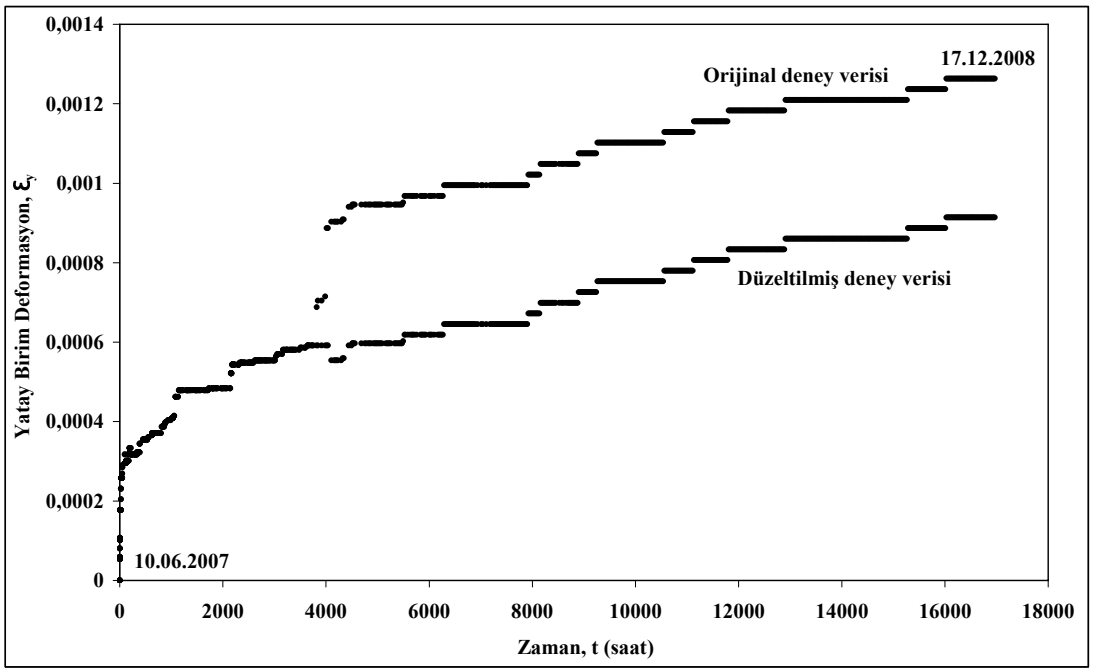
tekrar 2. aşama sünme davranışı sergilemeye başlamıştır. Bundan dolayı nem ve sıcaklık etkisi ile oluşan farklılığın göz ardı edilmesine karar verilerek sünme eğrisi Şekil 8.2'de görüldüğü biçimde düzeltilmiştir. Aynı işlem yatay birim deformasyon için de gerçekleştirilmiş ve Şekil 8.3'de gösterilmiştir. Deneyde karşılaşılan bu sorun kaya tuzunda sünme malzeme davranışında sıcaklık ve nem etkisinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 8.1. C80-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.2. C80-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



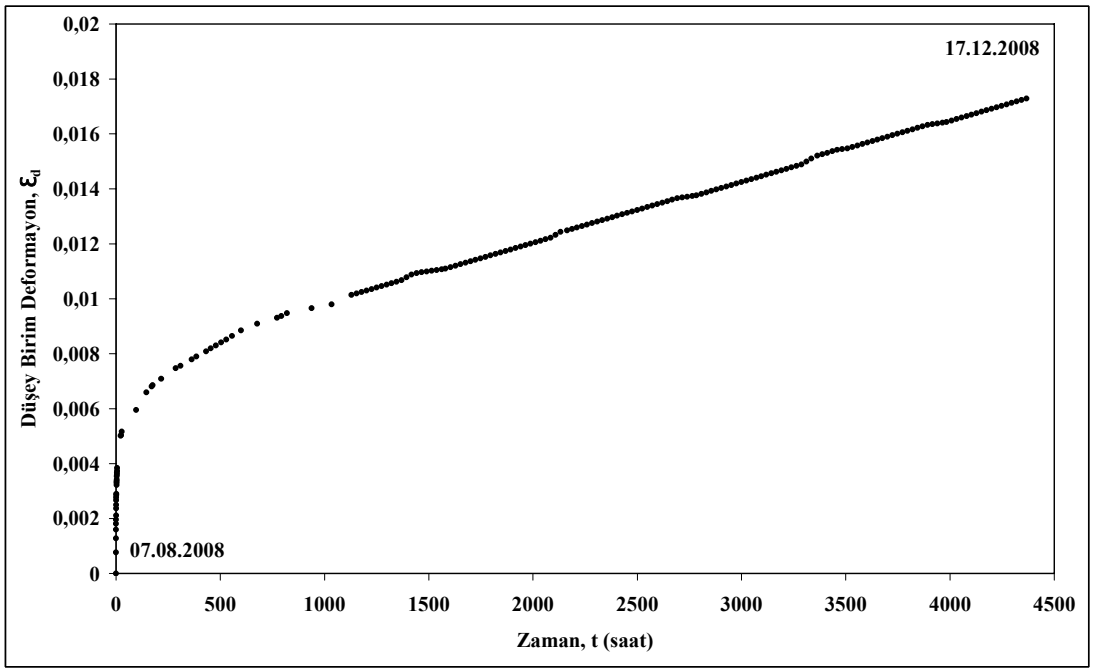
Şekil 8.3. C80-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.2.2. C95-1 Numunesi

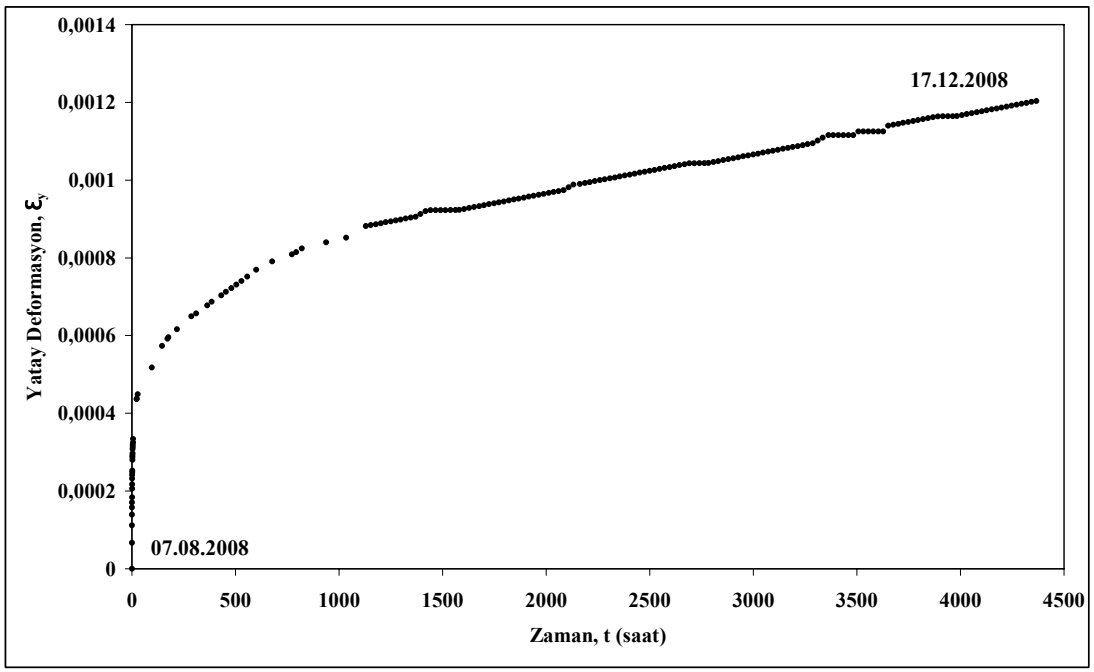
C95-1 numunesi 187,4 mm boyunda ve 93,4 mm çapında olup boy/çap oranı 2'dir. Şekil 8.4'de numuneye ait tipik görüntüler görülmektedir. 07.08.2008 tarihinde 95 kN yük ile 14,7 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 183 gündür halen devam etmektedir. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 76'sına tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu Aralık 2008 tarihi itibarı ile % 1,72 yatay birim deformasyonu ise % 0,12 değerindedir. Şekil 8.5 ve 8.6'dan görüldüğü üzere birinci ve ikinci sünme aşamaları elde edilmiş olup ikinci sünme aşaması halen devam etmektedir. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,0177 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,00061 mm/gün'dür.



Şekil 8.4. C95-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.5. C95-1 numunesinin zaman düşey birim deformasyon davranışı



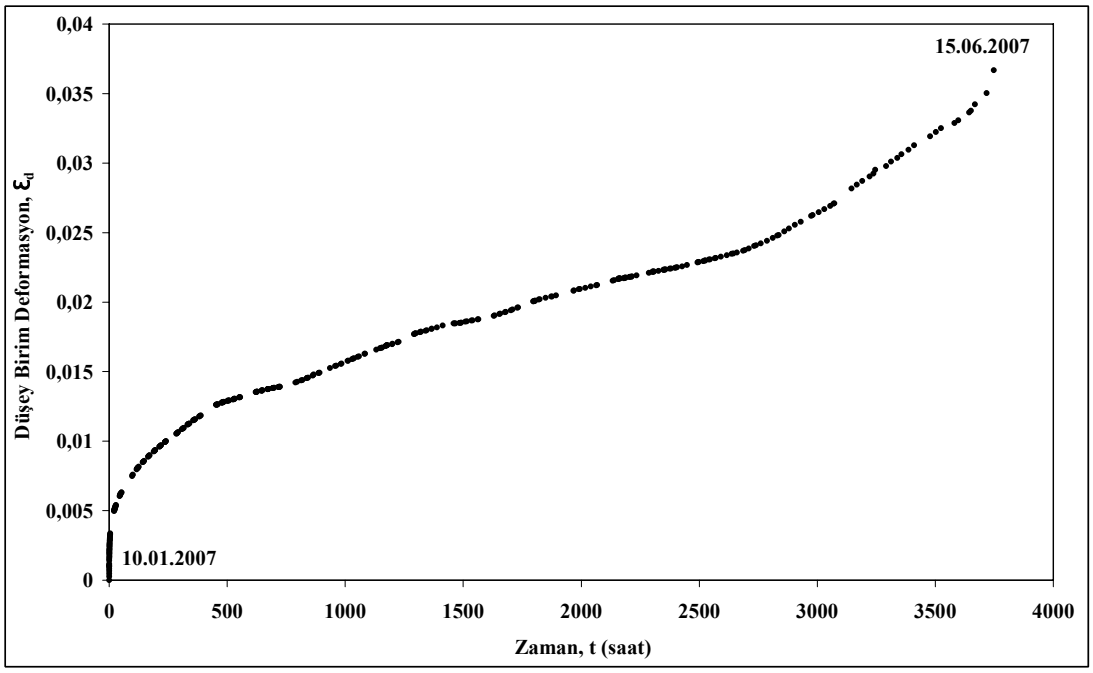
Şekil 8.6. C95-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon grafiği

8.2.3. C100-1 Numunesi

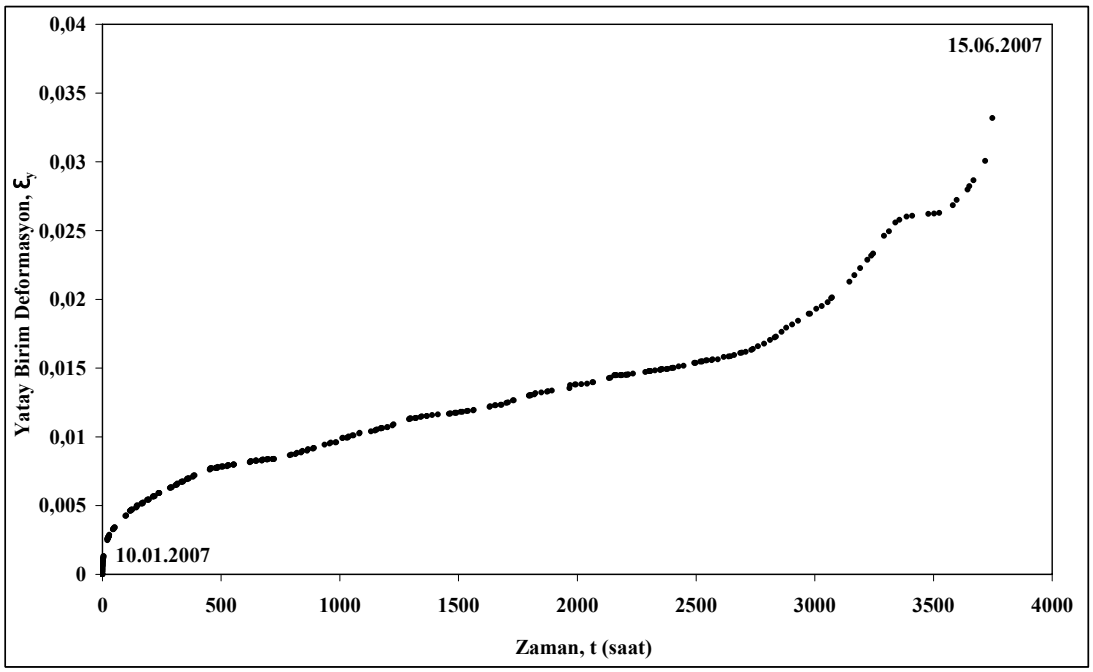
188,7 mm boyunda ve 94,0 mm çapında olan C100-1 numunesinde boy/çap oranı 2'dir. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.7'de görülmektedir. 10.01.2007 tarihinde 100 kN yük ile 14,7 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 157 gün devam ederek 15.06.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 80'ine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 3,6684 yatay birim deformasyonu ise % 3,3188 değerindedir. Şekil 8.8 ve 8.9'dan görüldüğü üzere birinci ikinci ve üçüncü sünme aşamaları elde edilmiş olup üçüncü sünme aşamasının sonunda numune yenilmeye maruz kalarak deney sonlanmıştır. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,0437 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,0196 mm/gün'dür.



Şekil 8.7. C100-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.8. C100-1 numunesinin düşey birim deformasyon-zaman grafiği



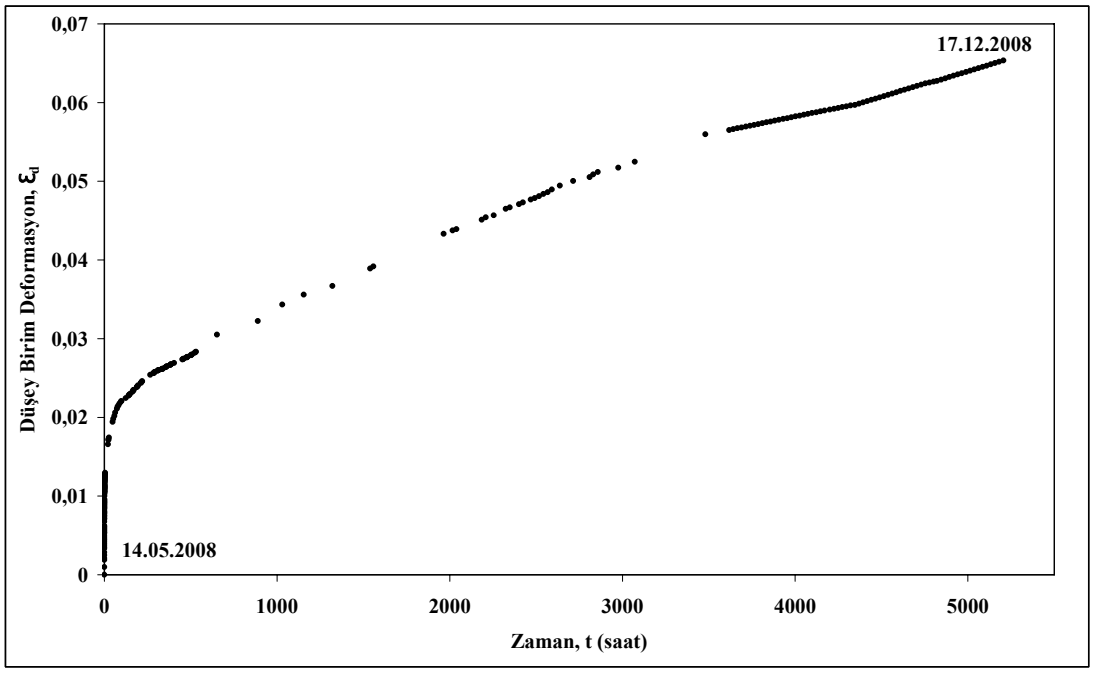
Şekil 8.9. C100-1 numunesinin yatay birim deformasyon-zaman grafiği

8.2.4. C110-1 Numunesi

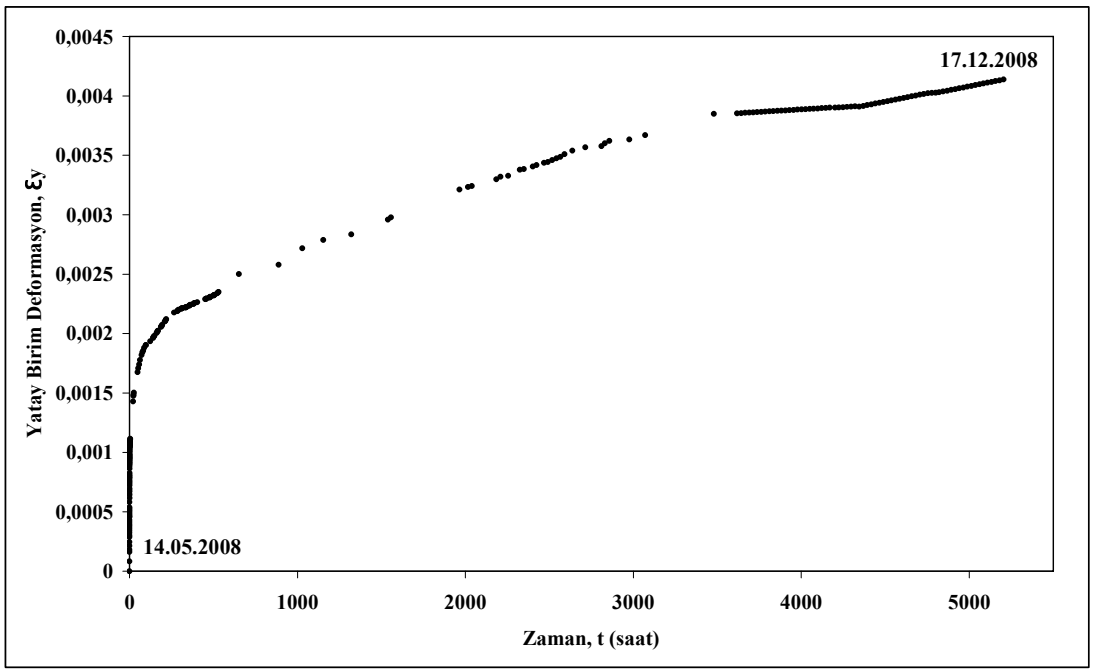
C110-1 numunesi 185,8 mm boyunda ve 93,3 mm çapında olup boy/çap oranı 2'dir. Şekil 8.10'de numuneye ait tipik görüntüler görülmektedir. 14.05.2008 tarihinde 110 kN yük ile 16,2 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 218 gündür halen devam etmektedir. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 88'ine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 6,53, yatay birim deformasyonu ise % 0,41 değerindedir. Şekil 8.11 ve 8.12'den görüldüğü üzere birinci ve ikinci sünme aşamaları elde edilmiş olup ikinci sünme aşaması halen devam etmektedir. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,0557 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,00176 mm/gün'dür.



Şekil 8.10. C110-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.11. C110-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



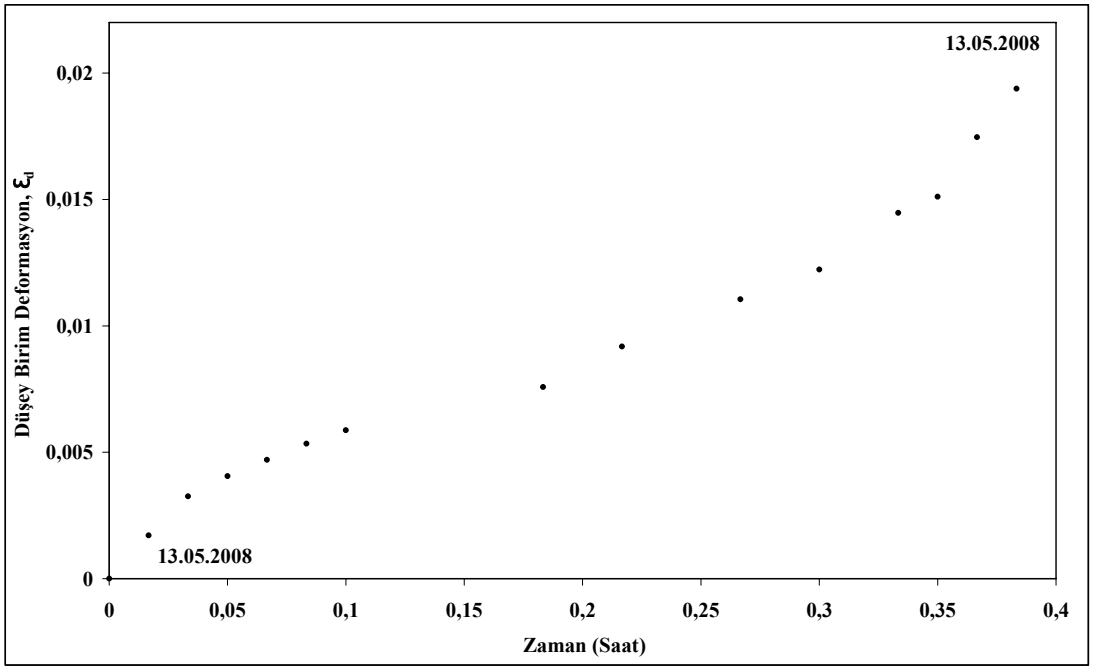
Şekil 8.12. C110-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.2.5. C115-1 Numunesi

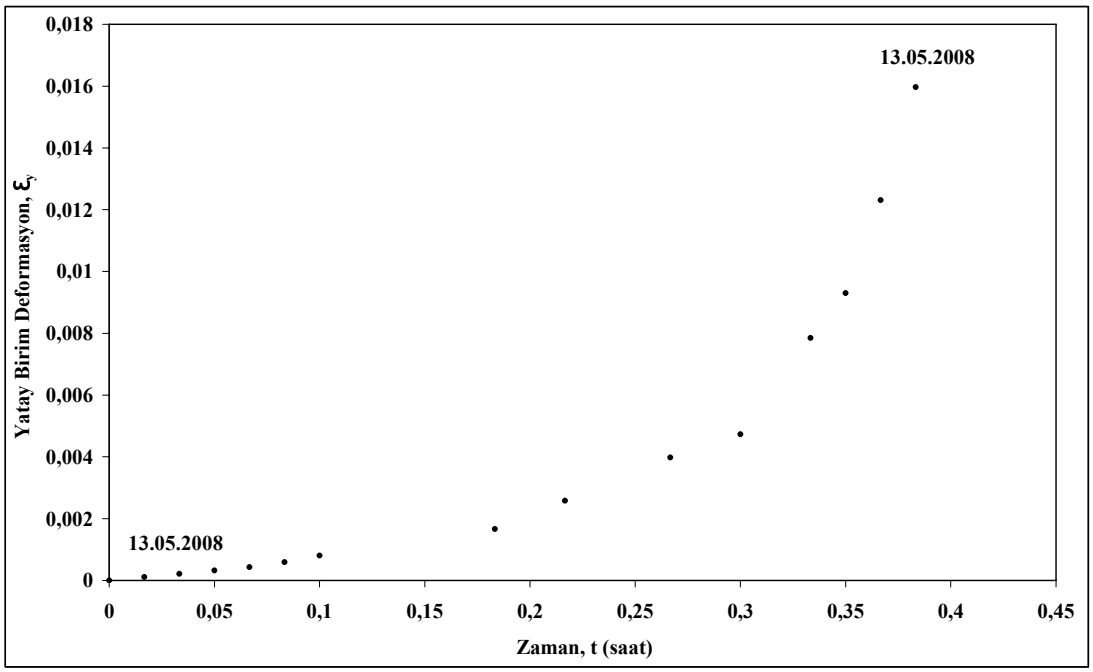
Boy/çap (H/D) oranı 2 olan C115-1 numunesi 187,3 mm boyunda ve 93,7 mm çapındadır. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.13'de görülmektedir. 13.05.2008 tarihinde 115 kN yük ile 16,9 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 23 dakika devam ederek numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 92'sine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 1,9516, yatay birim deformasyonu ise % 1,5967 değerindedir. Şekil 8.14 ve 8.15'den görüldüğü üzere birinci, ikinci ve üçüncü sünme aşamaları elde edilmiş olup üçüncü sünme aşamasının sonunda numune yenilmeye maruz kalarak deney sonlanmıştır. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 3,7872 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 1,5480 mm/gün'dür.



Şekil 8.13. C115-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



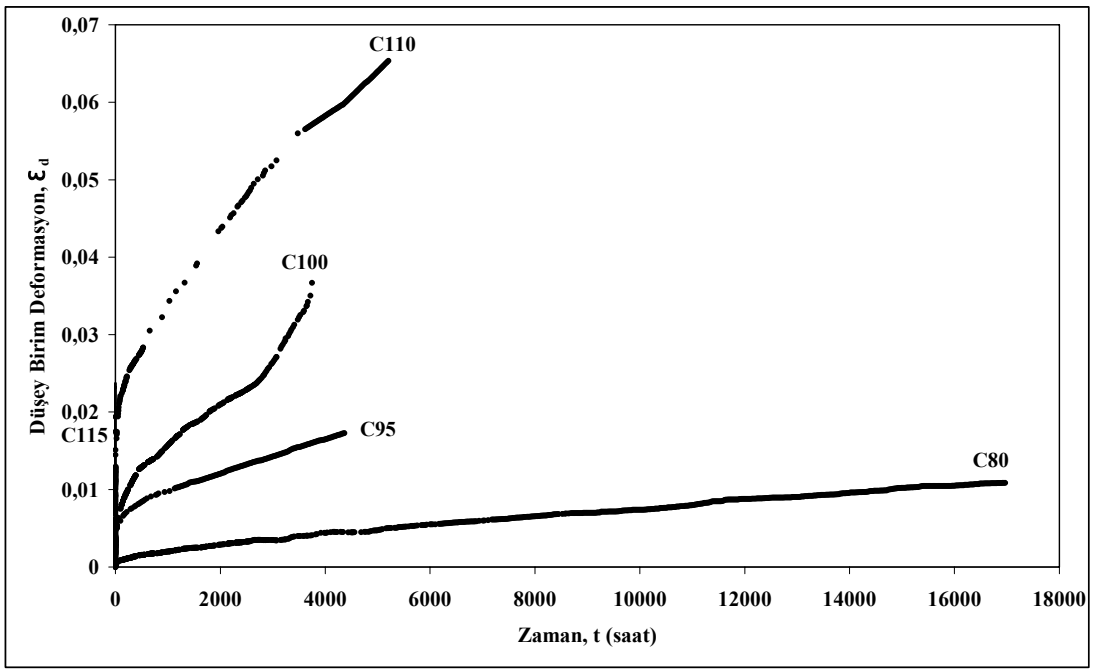
Şekil 8.14. C115-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



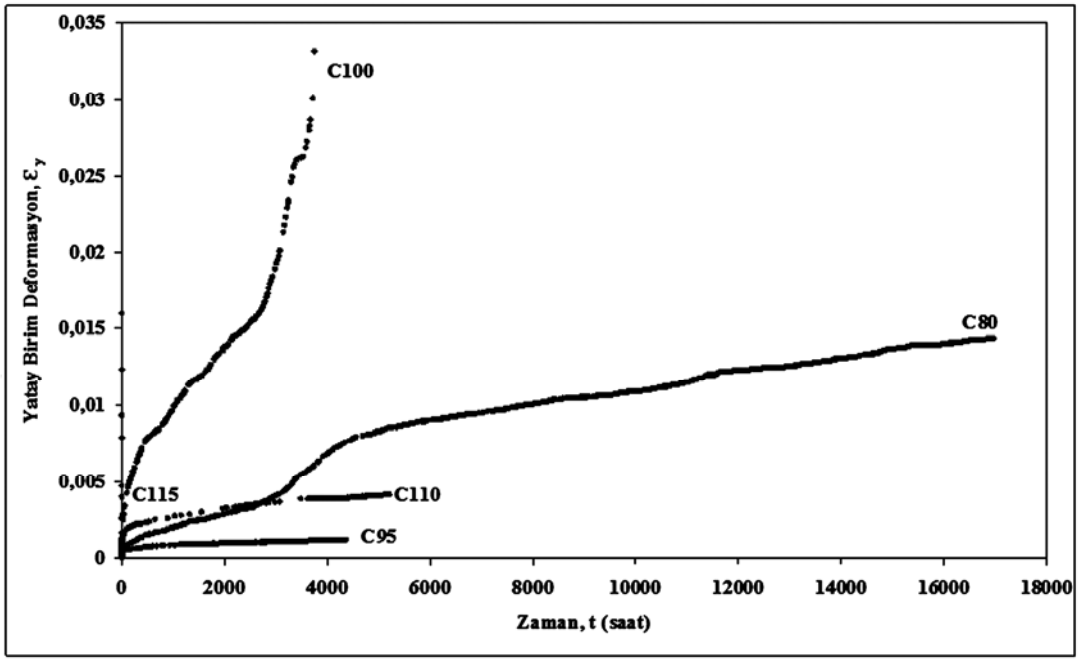
Şekil 8.15. C115-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.2.6. Çankırı kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarının karşılaştırılması

Yukarıdaki bölümlerde sunulan deneylerin hepsinin birleştirilerek hazırlanan grafikler Şekil 8.16 ve 8.17'de görülmektedir. Şekil 8.16'da farklı sabit yükler altındaki düşey birim deformasyon davranışları Şekil 8.17'de ise yatay birim deformasyon davranışları verilmiştir. Düşey ve yatay birim deformasyonlarının numune üzerine etkiyen sabit gerilme (σ_s) değerinin artmasıyla arttığı ve eğimlern dikleştiği ve ayrıca 3. sünme aşama safhasına geçilerek numunelerin parçalandığı görülmektedir.



Şekil 8.16. Çankırı kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen düşey birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları



Şekil 8.17. Çankırı kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen yatay birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları

8.3. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzu ile Gerçekleştirilen Sünme Deneyleri

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu madeninden temin edilen kaya bloklarından numune boyu (H) ve çap (D) oranı 2 olan 6 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numune çapları (D) genel olarak 93 mm olurken boyları (H) 186 mm civarında olmuştur. H/D oranı 2 olan numunelere ait tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) 26,5 MPa değeri dikkate alınarak sabit yükleme değeri belirlenmiştir. H/D oranının 2 alınmasının sebebi Bölüm 7'de sunulan deneysel sonuçlara göre bu orandaki numunelerin gerçek tek eksenli basınç dayanımı değerini vermesidir (Bölüm 7, Şekil 7.9, Çizelge 7.7). Sünme deneylerinde kullanılan sabit yük değerleri, tek eksenli basınç dayanımı değerinin % 44, 55, 67, 72, 78 ve 89'u alınarak belirlenmiştir. Çankırı kaya tuzu numunelerinde olduğu gibi tek eksenli basınç dayanım değerlerinin (σ_c=26,5 MPa) % 50'sinin çok altına inilmemiştir. Deneylerde kullanılan numune adetleri, boyutları ve sabit yük değerleri aşağıdaki Çizelge 8.2'de sunulmuştur. Çizelgede sunulan her bir sabit yük altındaki sünme deney sonuçları aşağıda sunulan başlıklarda anlatılmıştır.

Çizelge 8.2. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deneylerinde kullanılan numune sayıları, boyutları ve sabit yük değerleri

Numune Adı	Çap (D) (mm)	Yükseklik (H) (mm)	TEBD σ_c (MPa)	Sabit Gerilme Yüzdesi (%)	Sabit Gerilme (σ_s) (MPa)	Sabit Yük (kN)
N-80-1	93,8	186,9	26,5	44	11,8	80
N-100-1	93,8	187,8	26,5	55	14,7	100
N-120-2	94,3	189,6	26,5	67	17,7	120
N-130-1	94,1	188,6	26,5	72	19,1	130
N-140-1	94,4	187,4	26,5	78	20,6	140
N-160-1	94,6	188,7	26,5	89	23,6	160

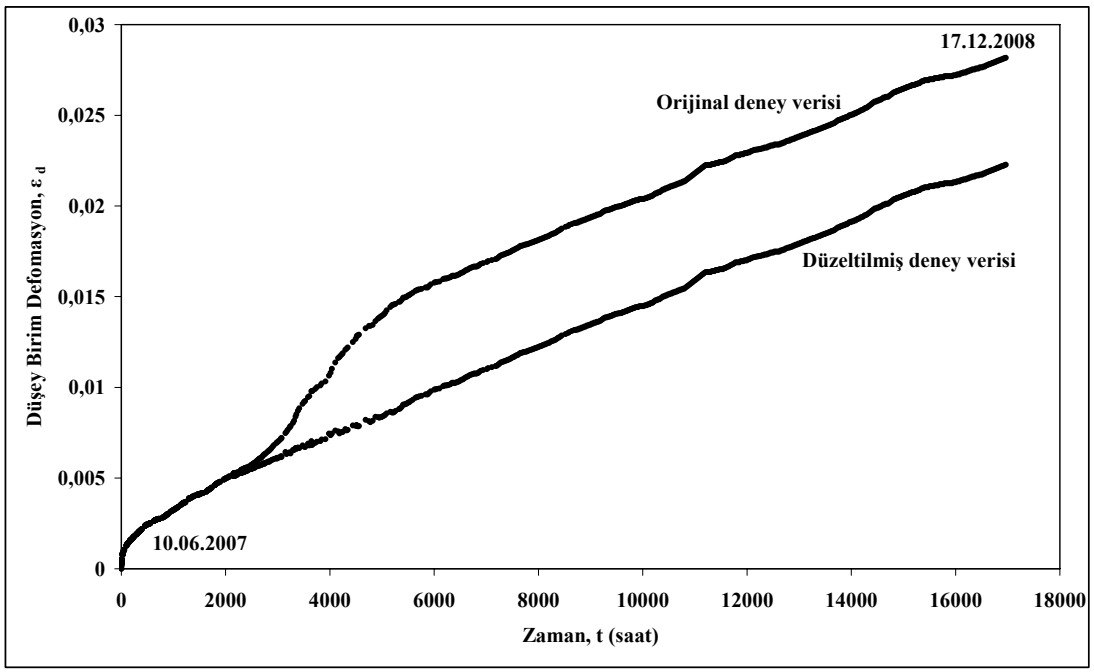
8.3.1. N80-1 Numunesi

N80-1 numunesi 186,9 mm boyunda ve 93,8 mm çapında olup boy/çap oranı 2'dir. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.18'de görülmektedir. 10.01.2007 tarihinde 80 kN yük ile 11,8 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 708 gündür devam etmektedir. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 44'üne tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 2,81 yatay birim deformasyonu ise % 0,22 değerindedir. Şekil 8.19 ve 8.20'den görüldüğü üzere birinci ve ikinci sünme aşamaları elde edilmiş olup ikinci sünme aşaması halen devam etmektedir. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,0074 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,000286 mm/gün'dür.

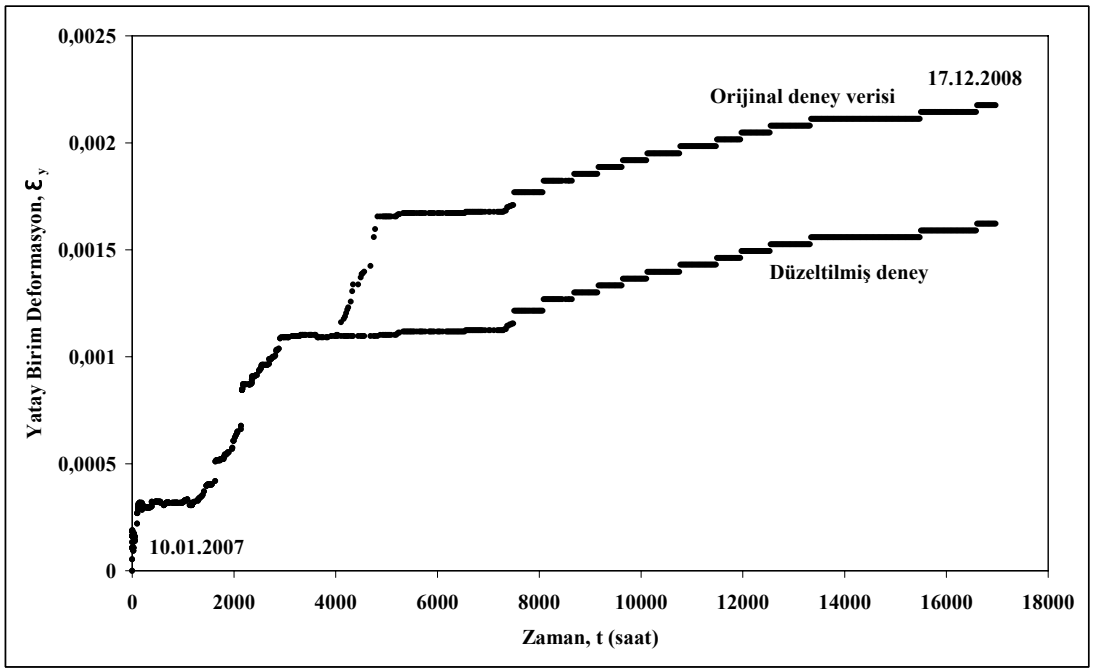
Bölüm 8.2.1'de ifade edildiği gibi sünme davranışı, klima arızası sonucu nem ve sıcaklıktaki değişim nedeniyle 3000. saatten sonra 3.sünme aşamasına geçmiş gibi gelişmiş ancak klima arızası giderildikten sonra ortam nem ve sıcaklığı kontrol altına alınınca 2. sünme aşamasına ait doğrusal davranış sergilemeye başlamıştır. Bundan dolayı Şekil 8.19 ve 8.20'de olduğu gibi 3000. saatten sonraki deney ölçümleri düzeltilmiştir.



Şekil 8.18. N80-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.19. N80-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



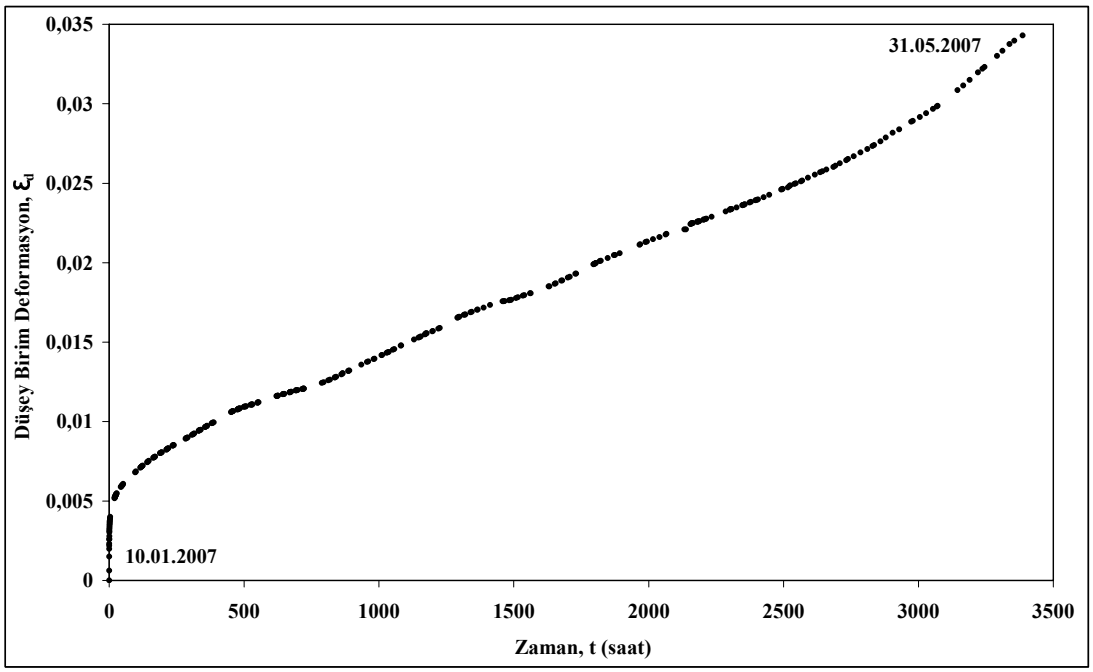
Şekil 8.20. N80-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.3.2. N100-1 Numunesi

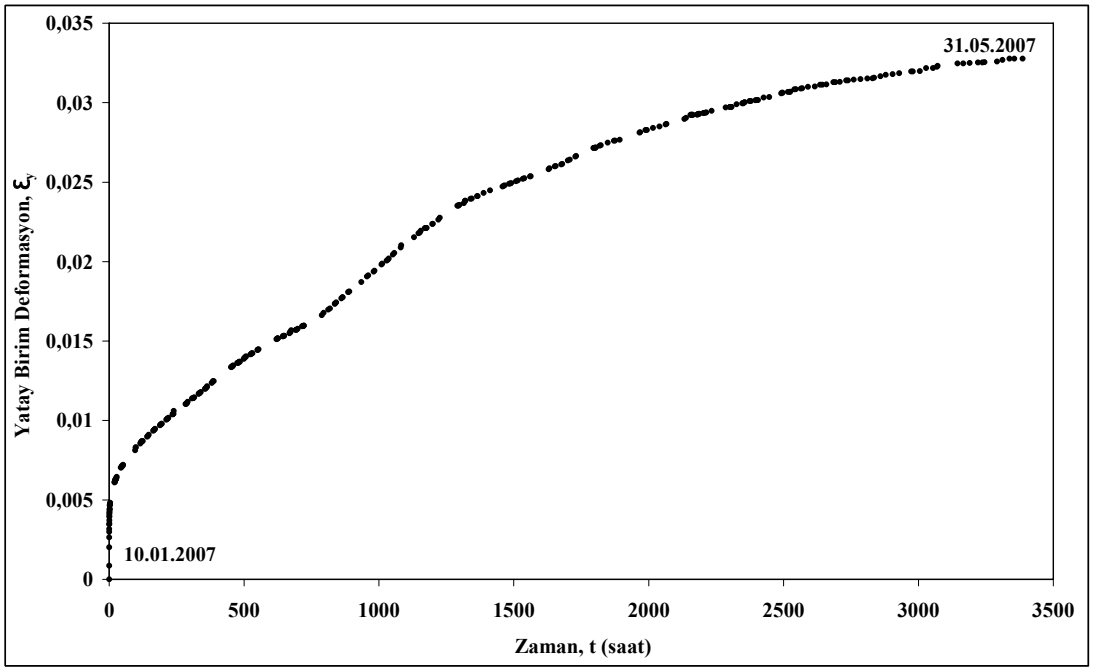
187,8 mm boyunda ve 93,8 mm çapında olan N100-1 numunesinde boy/çap oranı 2'dir. Şekil 8.21'de numuneye ait tipik görüntüler görülmektedir. 10.01.2007 tarihinde 100 kN yük ile 14,7 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 142 gün devam ederek 31.05.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 55'ine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 3,43 yatay birim deformasyonu ise % 3,27 değerindedir. Şekil 8.22 ve 23'den görüldüğü üzere birinci ikinci ve üçüncü sünme aşamaları elde edilmiş olup üçüncü sünme aşamasının sonunda numune yenilmeye maruz kalarak deney sonlanmıştır. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,045 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,0215 mm/gün'dür.



Şekil 8.21. N100-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.22. N100-1 numunesinin zaman düşey birim deformasyon davranışı



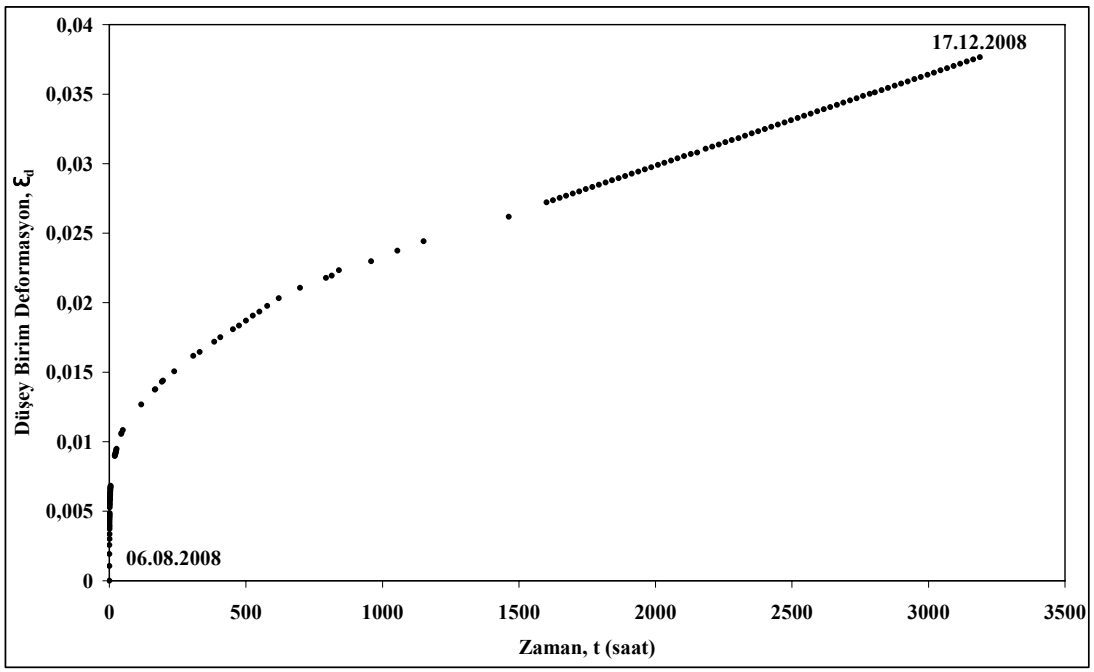
Şekil 8.23. N100-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.3.3. N120-2 Numunesi

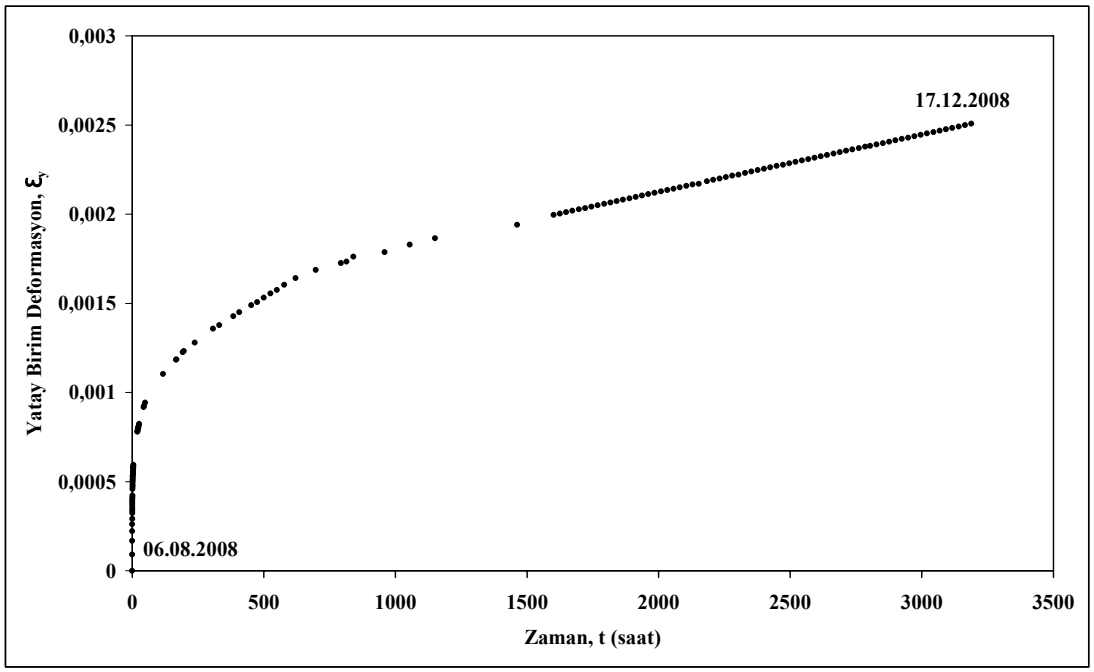
N120-2 numunesi 189,6 mm boyunda ve 94,3 mm çapında olup boy/çap oranı 2'dir. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.24'de görülmektedir. 06.08.2008 tarihinde 120 kN yük ile 17,7 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 134 gündür halen devam etmektedir. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 67'sine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 3,77, yatay birim deformasyonu ise % 0,25 değerindedir. Şekil 8.25 ve 8.26'dan görüldüğü üzere birinci ve ikinci sünme aşamaları elde edilmiş olup ikinci sünme aşaması halen devam etmektedir. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,0533 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,00174 mm/gün'dür.



Şekil 8.24. N120-2 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.25. N120-2 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



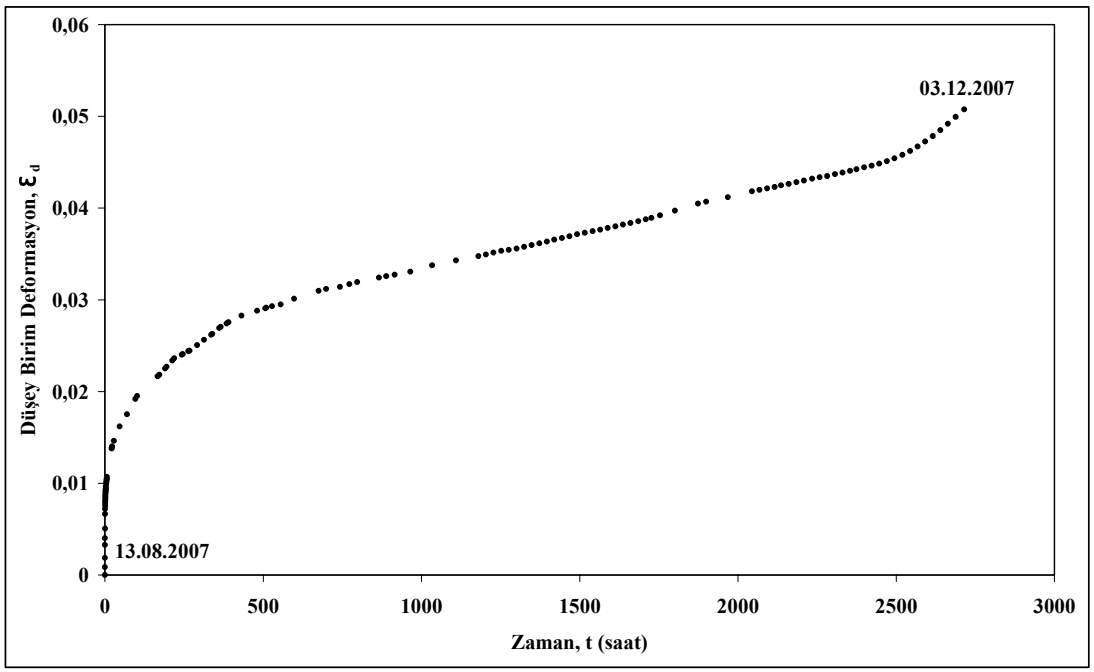
Şekil 8.26. N120-2 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.3.4. N130-1 Numunesi

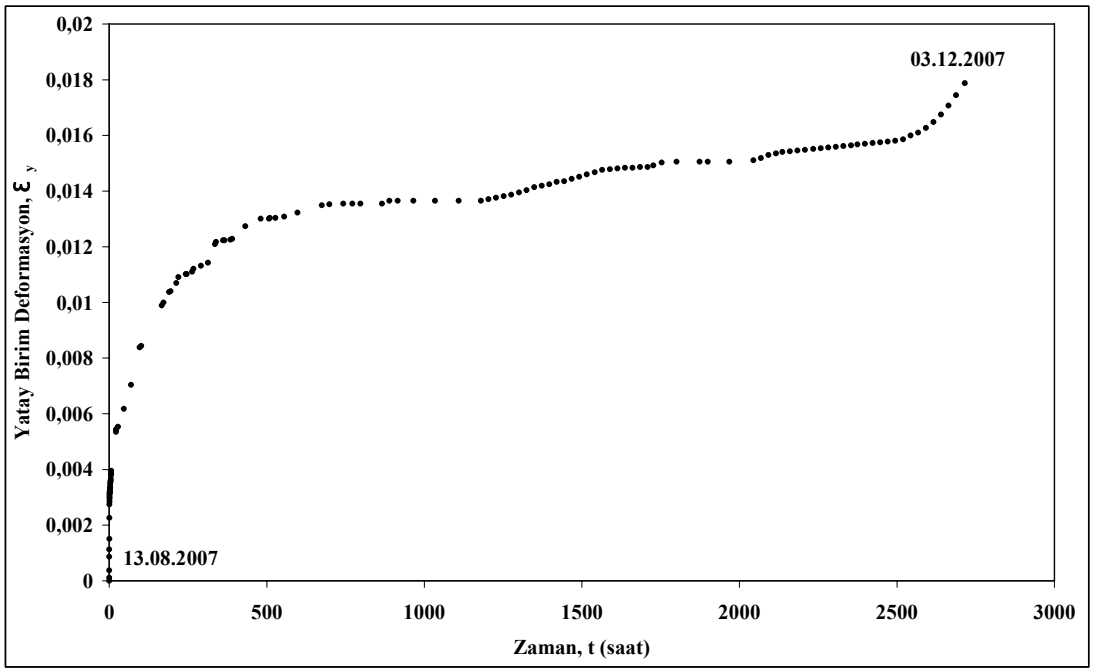
188,6 mm boyunda ve 94,1 mm çapında olan N130-1 numunesinde boy/çap (H/D) oranı 2'dir. Şekil 8.27'de numuneye ait tipik görüntüler görülmektedir. 13.08.2007 tarihinde 130 kN yük ile 19,138 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 114 gün devam ederek 03.12.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 72'sine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 5,07 yatay birim deformasyonu ise %1,79 değerindedir. Şekil 8.28 ve 8.29'dan görüldüğü üzere birinci ikinci ve üçüncü sünme aşamaları elde edilmiş olup üçüncü sünme aşamasının sonunda numune yenilmeye maruz kalarak deney sonlanmıştır. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,0828 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,0146 mm/gün'dür.



Şekil 8.27. N130-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.28. N130-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



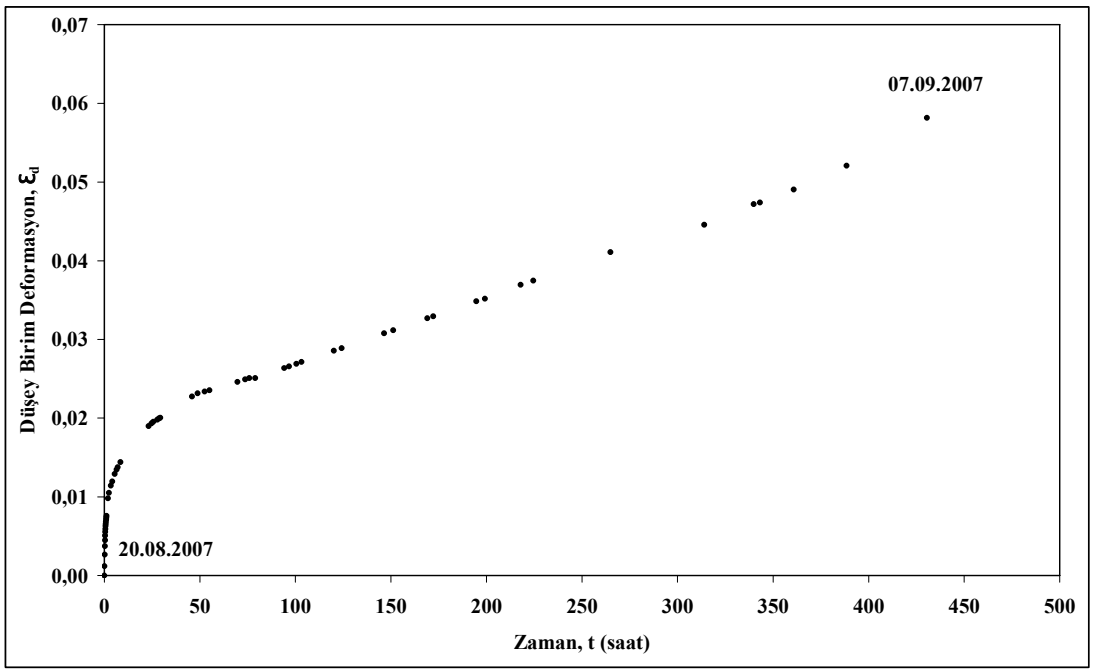
Şekil 8.29. N130-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.3.5. N140-1 Numunesi

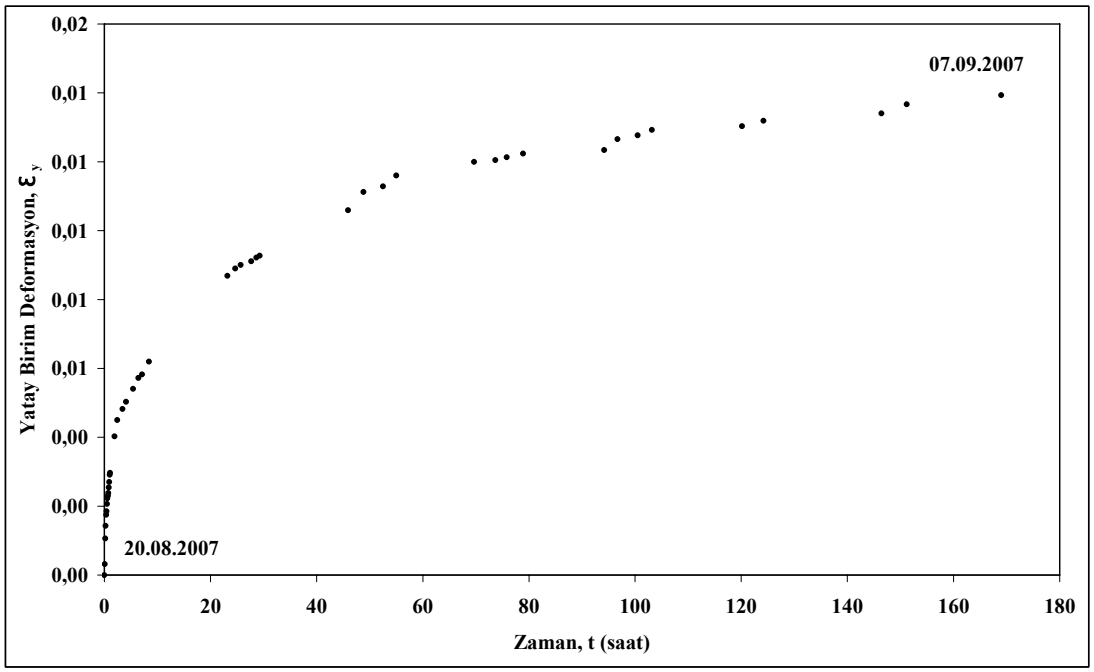
N140-1 numunesi 187,4 mm boyunda ve 94,4 mm çapında olup boy/çap oranı 2'dir. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.30'da görülmektedir. 20.08.2007 tarihinde 140 kN yük ile 20,6 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 19 gün devam ederek 07.09.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 78'ine tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 5,82 yatay birim deformasyonu ise % 3,61 değerindedir. Şekil 8.31 ve 32'den görüldüğü üzere birinci ikinci ve üçüncü sünme aşamaları elde edilmiş olup üçüncü sünme aşamasının sonunda numune yenilmeye maruz kalarak deney sonlanmıştır. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 0,541 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,179 mm/gün'dür.



Şekil 8.30. N140-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



Şekil 8.31. N140-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



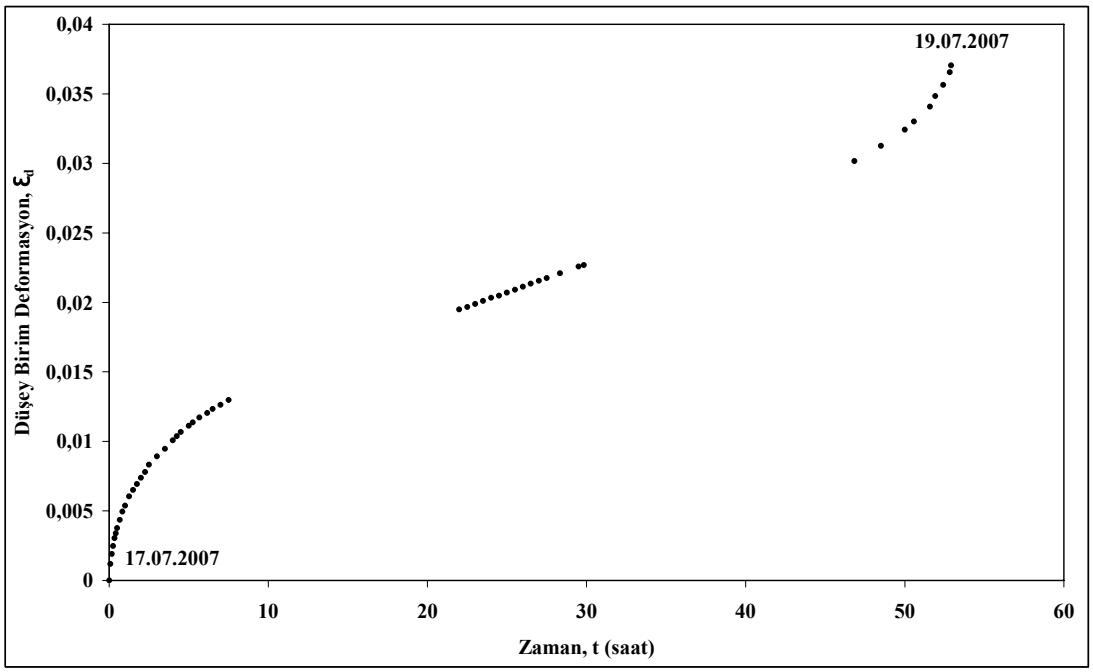
Şekil 8.32. N140-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.3.6. N160-1 Numunesi

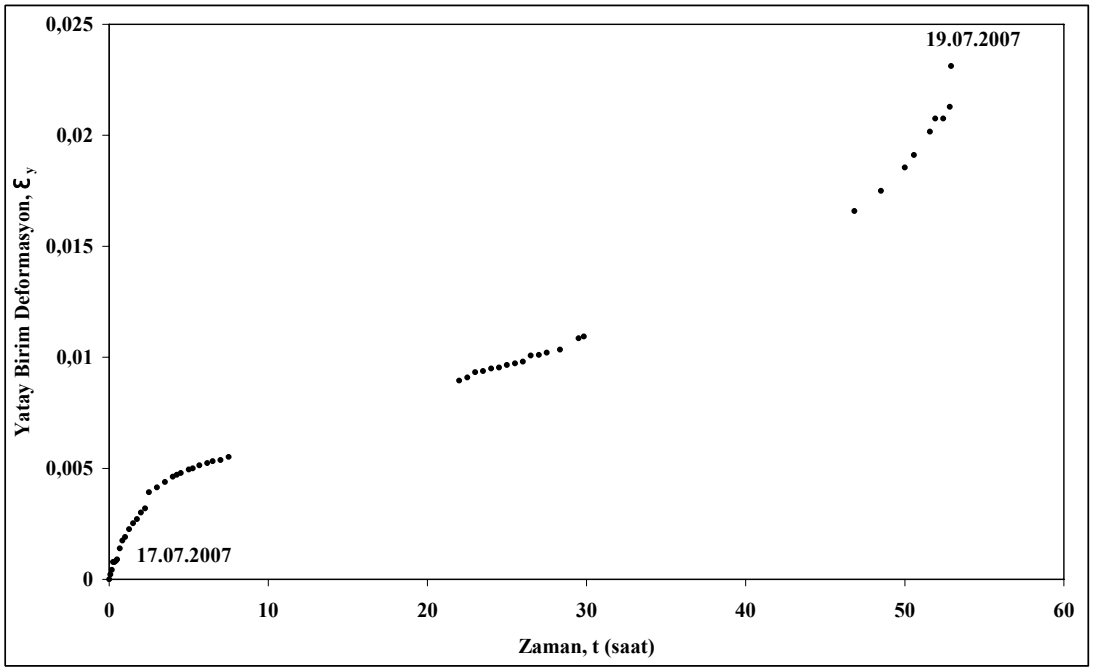
Boy/çap (H/D) oranı 2 olan N160-1 numunesi 188,7 mm boyunda ve 94,6 mm çapındadır. Numuneye ait tipik görüntüler Şekil 8.33'de görülmektedir. 17.07.2007 tarihinde 160 kN yük ile 23,6 MPa sabit basınçta yüklenmiş olup sünme deneyi 3 gün devam ederek 19.07.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. Numune üzerine uygulanan sabit yük yenilme basıncının yaklaşık % 89'una tekabül etmektedir. Düşey birim deformasyonu % 3,70 yatay birim deformasyonu ise % 2,31 değerindedir. Şekil 8.34 ve 35'den görüldüğü üzere birinci ikinci ve üçüncü sünme aşamaları elde edilmiş olup üçüncü sünme aşamasının sonunda numune yenilmeye maruz kalarak deney sonlanmıştır. Düşey deformasyonlardan elde edilen sünme hızı yaklaşık olarak 2,296 mm/gün olarak belirlenirken yatay deformasyon için bu değer yaklaşık 0,717 mm/gün'dür.



Şekil 8.33. N160-1 numunesinin üstten ve yandan görünümü



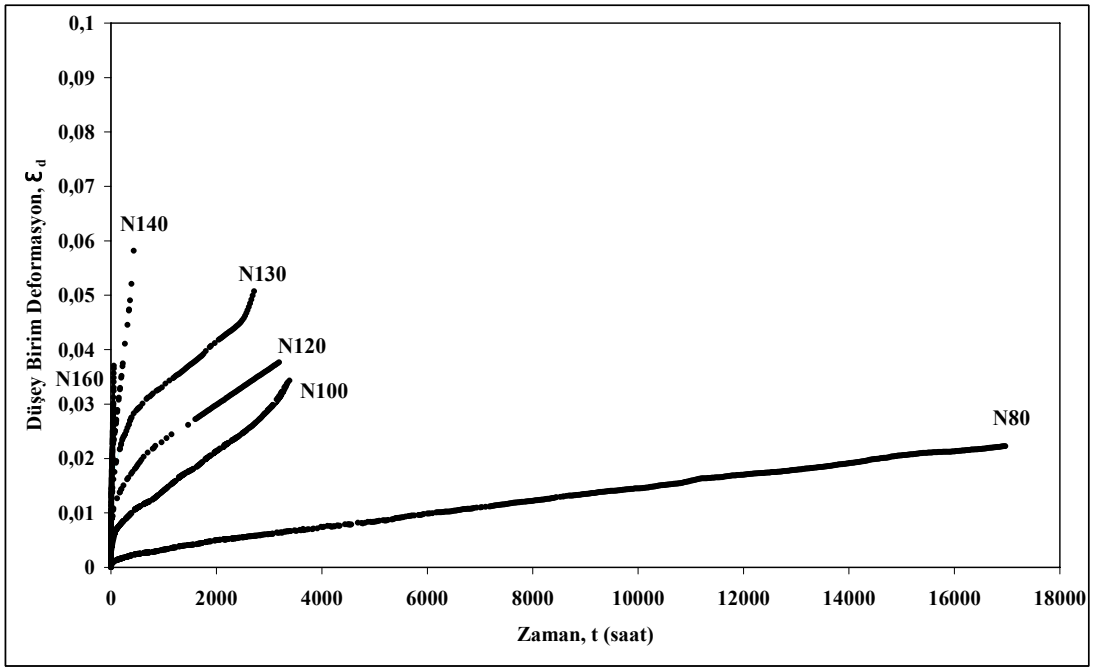
Şekil 8.34. N160-1 numunesinin zaman-düşey birim deformasyon davranışı



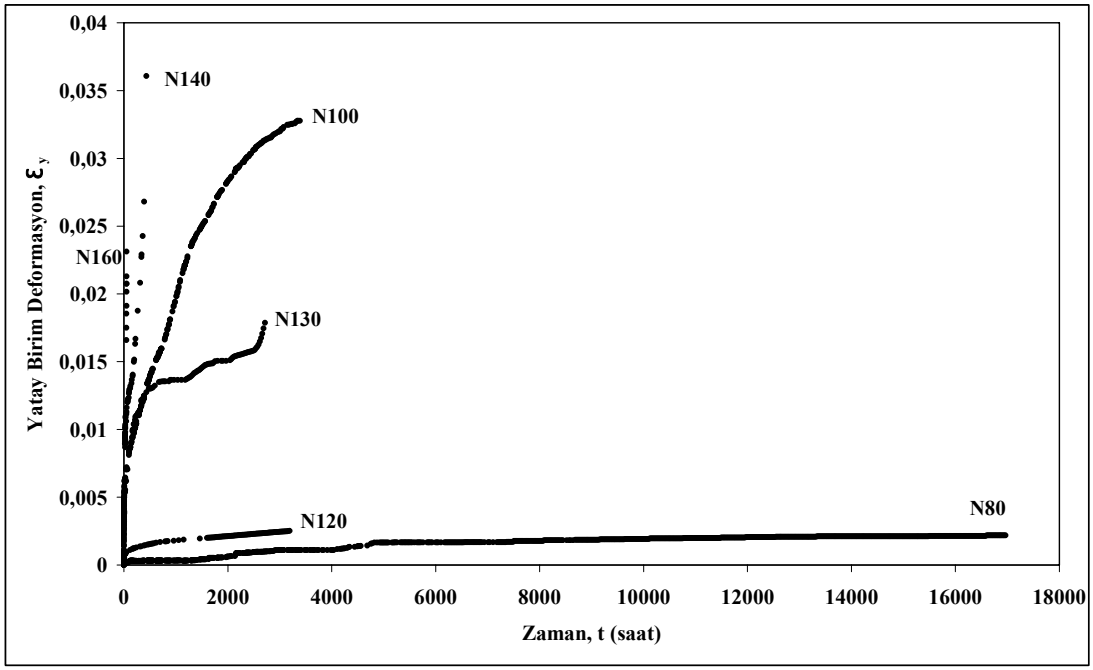
Şekil 8.35. N160-1 numunesinin zaman-yatay birim deformasyon davranışı

8.3.7. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerinde gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarının karşılaştırılması

Yukarıdaki bölümlerde sunulan deneylerin hepsinin birleştirilerek hazırlanan grafikler Şekil 8.36 ve 8.37'de görülmektedir. Şekil 8.36'da farklı sabit yükler altındaki düşey birim deformasyon davranışları Şekil 8.37'de ise yatay birim deformasyon davranışları verilmiştir. Sunulan grafiklerden görüldüğü üzere, numune üzerine etkiyen sabit gerilme (σ_s) değeri arttıkça sünme davranışının eğimi artmakta, 3.sünme aşamasına daha erken geçilmekte ve numune parçalanmaktadır.



Şekil 8.36. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen düşey birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları



Şekil 8.37. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numuneleri üzerinde gerçekleştirilen yatay birim deformasyon bazında tüm sünme davranışları

9. SÜNME DAVRANIŞINA AİT MATEMATİKSEL MODELİN GELİŞTİRİLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

9.1. Genel

Bu bölümde Nevşehir-Gülşehir ve Çankırı kaya tuzu numuneleri ile laboratuarda gerçekleştirilen sünme deneyleri matematiksel olarak modellenmiş ardından bu model yardımıyla istatistiki değerlendirmeler yapılmıştır. Her iki kaya tuzu için oluşturulan modelin performansı incelenerek tasarım aşamasında uygulanabilecek bazı parametreler elde edilmiştir.

9.2. Matematiksel Model Çalışmaları

Kaynak araştırmasının sunulduğu Bölüm 2'de değinilen sünme davranışına ait matematiksel ifadeler dikkate alınarak (Çizelge 2.6) bir değerlendirme yapılmıştır. Literatürde sunulan eşitliklerde sünmenin 3. aşamasının ifade edilmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte belirlenen katsayıların çalışılan bölgelere ait olduğu görülmüştür. Bazı eşitliklerin ise çok özel mühendislik değerleri (gaz sabiti-R, ortam sıcaklığı-T ve aktivasyon enerjisi-Q) içerdiği tespit edilmiştir. Literatür bilgisi ve bu tez çalışması için laboratuarda gerçekleştirilen deney sonuçlarından sünme davranışında karşılaşılan üç aşamanın matematiksel olarak modellenmesinin gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Zamana bağlı tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) deneyi yardımıyla kaya tuzuna ait sünme deneyi davranışına ait matematiksel model (Düzyol, 2004) ve ayrıca maden galerilerindeki zamana bağlı deformasyon davranışına ait geliştirilen matematiksel model (Özkan, 1995, Ünal ve ark., 2001) dikkate alınarak bu tez çalışması sonucunda belirlenen sünme davranışı için bir model geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar aşağıdaki başlıklarda sunulmuştur.

9.2.1. Matematiksel modelin geliştirilmesi

Sünme davranışının oluşumunun açıklanmasında iki temel parametre söz konusudur. Bunlar, sabit yüke bağlı sabit gerilme (σ_s) ve ortam sıcaklığıdır (T). Bu iki parametrenin etkisi ise zamana bağlı olarak değişim göstermekte ve sünme davranışını tanımlayan üç temel parametre ortaya çıkmaktadır. Yukarıda bahsedilen parametreler genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\varepsilon = f(t) + f(\sigma) + f(T) \tag{9.1}$$

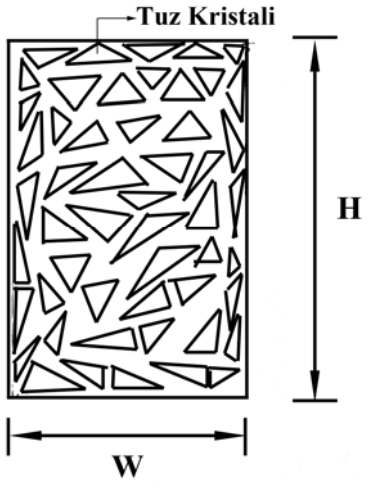
Burada;

ε : düşey yada yatay birim deformasyon
$f(t)$: zamana bağlı fonksiyon
$f(\sigma)$: sabit yüke bağlı oluşan sabit gerilme fonksiyonu
$f(T)$: deney ortamına bağlı sıcaklık fonksiyonu

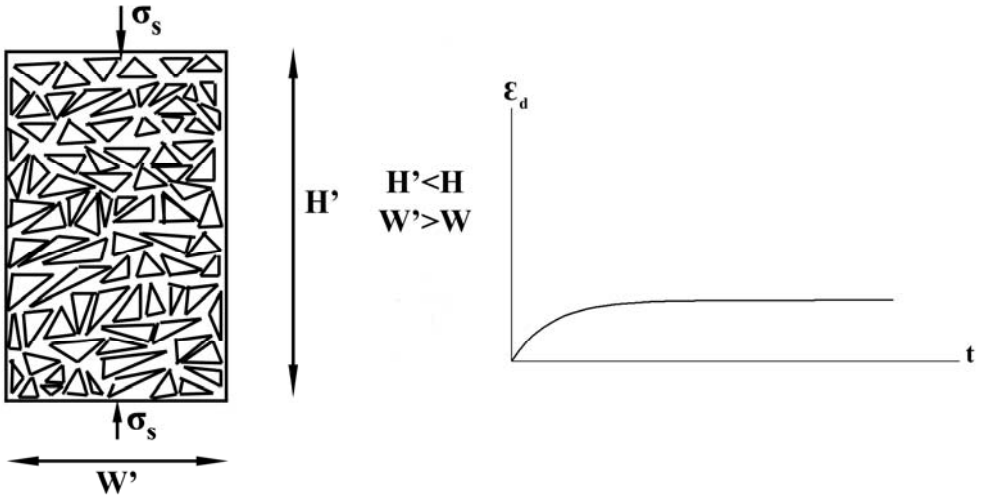
Bu doktora tez çalışmasında zamana bağlı hem düşey hem yatay birim deformasyon değerleri kayıt edilmesine rağmen matematiksel model çalışmalarında sadece düşeyde gerçekleşen düşey birim deformasyon değerleri dikkate alınmış ve ε_d ile ifade edilmiştir. Ayrıca sabit yüke bağlı olarak oluşan sabit gerilme σ_s, zaman ise t sembolü ile gösterilmiştir.

Sünme davranışının gelişimi birbirini takip eden üç farklı davranıştan oluşmaktadır. Bu davranış şematik olarak aşağıdaki şekil üzerinde gösterilmiştir (Şekil 9.1). Şekil 9.1a'da orijinal numune ve boyutları görülmektedir. Sunulan Şekil 9.1b'de görüldüğü gibi tek eksenli sabit gerilmeye (σ_s) maruz kalan numunede gözenekler ilk önce kapanarak tuz kristalleri birbirlerine iyice yaklaşmaktadır. Bu duruma ait davranış grafiksel olarak Şekil 9.1b'de görülmektedir. Numunedeki gözeneklerin kapanmasından sonra sabit yüke bağlı olarak numunedeki tuz kristalleri Şekil 9.1c'deki gibi birbirini kalıcı olmayan deformasyona maruz bırakmaktadır. Bu esnada üzerindeki yük kaldırıldığında numuneler eski boyutlarına gelebilmektedir. Bu durum Şekil 9.1c'de zaman-düşey birim deformasyona ait doğrusal davranış ile karakterize edilmiştir. Numunedeki tuz kristal tanelerinin birbirlerine iyice yaklaşmasının (Şekil 9.1c) ardından sabit gerilme neticesinde kristal taneleri birbiri

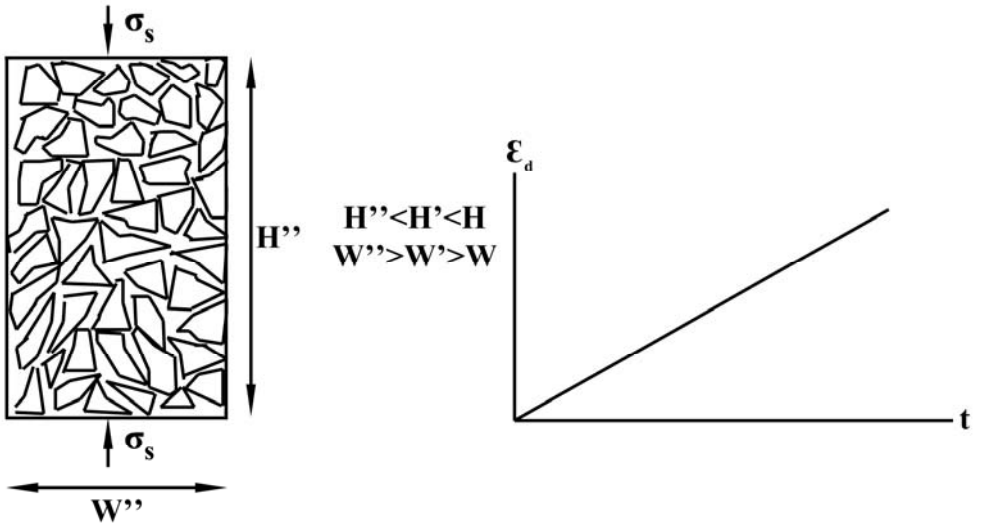
üzerinde kalıcı deformasyon oluşturarak Şekil 9.1d'de görüldüğü gibi numunenin parçalanmasına neden olmaktadır. Parçalanma sürecini karakterize eden zaman-düşey birim deformasyon davranışı, Şekil 9.1d'de olduğu gibi başlangıçta etkisiz iken kırılma anında doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir.



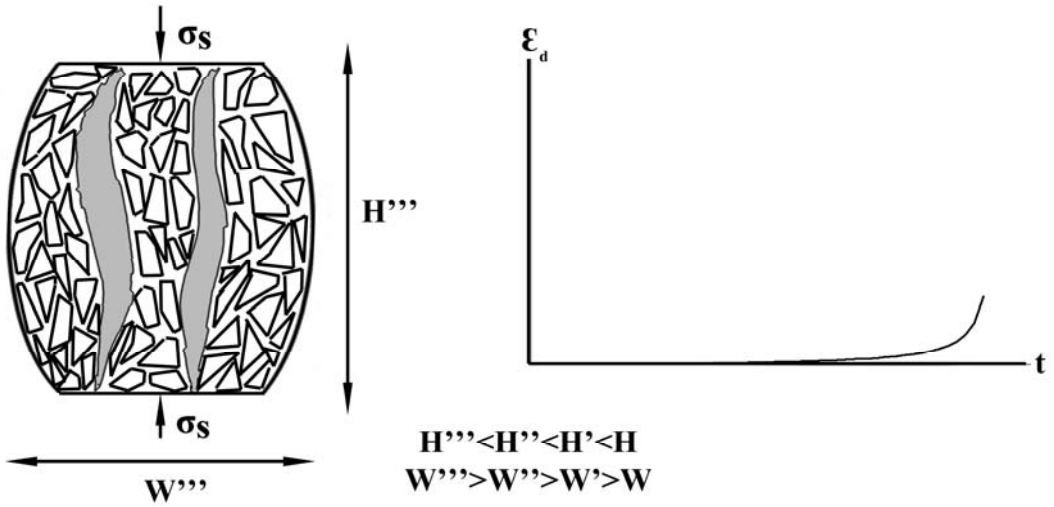
9.1a. Sünme deneyine tabi tutulacak orijinal numune ve boyutları



9.1b. Sünme deneyinin başlangıcı esnasında gözeneklerin kapanması ve sünme davranışı



9.1c. Gözeneklerin kapanmasının ardından tuz kristallerinin birbirine yaklaşması ve sünme davranışı

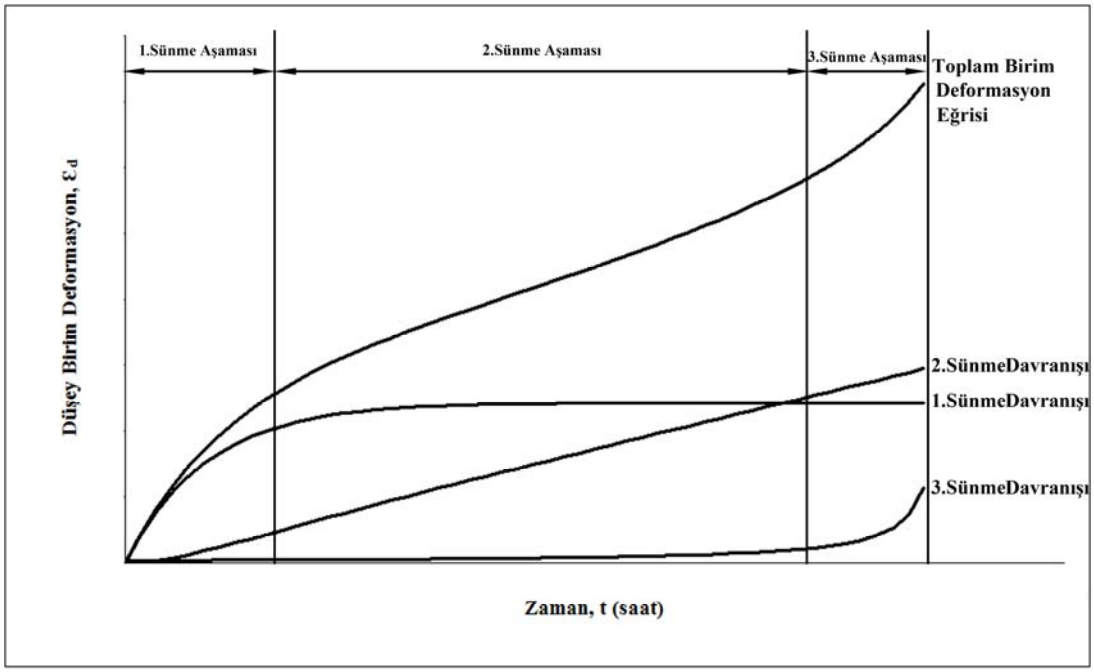


9.1d. Sünme deneyinin son aşamasında birbirine yaklaşan ve kalıcı deformasyon sonucu numunenin parçalanması ve sünme davranışı

Şekil 9.1. Sünme davranışının aşamalarını şematize eden tipik şekil

Şekil 9.1'de şematize edilen sünme davranışı, aslında gözeneklerin kapanması (Şekil 9.1b), tuz kristallerinin iyice birbirine yaklaşması, kenetlenmesi ve birbiri

üzerinden kayması (Şekil 9.1c) ve parçalanma süreci (Şekil 9.1d) için tanımlanan üç temel davranışın toplamından oluşmaktadır. Aslında bu üç davranış sırasıyla sünme davranışının birinci, ikinci ve üçüncü aşamalarını temsil etmektedir. Bu durum için Şekil 9.2 hazırlanmıştır.



Şekil 9.2. Sünme davranışı ve sünme aşamaları

Yukarıda sunulan Şekil 9.2, bu tez çalışmasına konu olan kaya tuzları için geliştirilecek matematiksel modelin temel taşını oluşturacaktır. Bu temel dayanaktan yararlanılarak matematiksel model geliştirilmeye çalışılmıştır.

Şekil 9.1.b'de ve Şekil 9.2'de gösterilen 1. sünme davranışı deney başlangıcında gerçekleşmekte olup bunun sürecini tamamlaması bir başka deyişle zaman eksenine tamamen asimptot olması süreci numune üzerine konulan sabit gerilme (σ_s) büyüklüğüne ve zamana (t) bağlı olacaktır. Birinci sünme aşamasına ait davranış tipik olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilecektir.

$$\varepsilon_{d_1} = \sigma_s \left[1 - e^{-t}\right] \tag{9.2}$$

Burada ε_{d1} birinci sünme aşamasında oluşacak düşey birim deformasyonu, σ_s (MPa) sabit gerilme değerini, t (saat) zamanı tanımlarken $[1\text{-}e^{-t}]$ fonksiyonel olarak 0-1 arasında değişmekte ve davranış olarak Şekil 9.1b'deki grafiksel durumu yansıtmaktadır. Bu eğrinin dönüş noktasını ise σ_s belirleyecektir. Bu değer (MPa) birim içerdiği ve Eşitlik 9.2'de ifade edilen sabit gerilmenin tek eksenli basınç dayanımına oranı (σ_s/σ_c) birimsiz yükleme seviyesini ifade edeceği için Eşitlik 9.2'nin yeniden aşağıdaki gibi yazılması daha doğru olacaktır.

$$\varepsilon_{d_1} = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[1 - e^{-t}\right] \tag{9.3}$$

Şekil 9.1c ve Şekil 9.2'de belirtildiği gibi sünmenin ikinci aşaması doğrusal davranışta olmalıdır. Bu davranışın oluşumunda sabit gerilme (σ_s), birinci aşamada olduğu gibi etkendir. Aynı zamanda birinci sünme aşamasını tanımlayan zamana bağlı fonksiyon $[1\text{-}e^{-t}]$ ikinci sünme aşamasını tanımlayan doğrusal davranışın eğimine etki edecektir. Bir başka deyişle σ_s/σ_c oranı 1'e yakın olması durumunda 0-1 arasında değişen $[1\text{-}e^{-t}]$ fonksiyonu çok erken 1'e yaklaşacaktır ve böylece ikinci sünme aşaması eğiminin daha dik olması gerekecektir. Özet olarak birinci sünme aşamasını yansıtan Eşitlik 9.3 ikinci sünme aşamasını tamamıyla etkileyecek ancak tam açıklayamayacaktır. İkinci sünme aşamasının doğrusal tarzda açıklanması için yeni parametrelere gereksinim duyulacaktır. Bölüm 2, Çizelge 2.6'da sunulan matematiksel modeller incelenirse büyük bir çoğunluğunun ikinci aşama sünme davranışının açıklanmasında aktivasyon enerjisi (Q, kcal/mol), gaz sabiti (R, kcal/mol.K) ve ortam sıcaklığı (T, Kelvin-K) parametrelerini dikkate aldıkları ve hatta bu parametreleri $e^{-Q/RT}$ ifadesi ile tanımladıkları görülmektedir. Bu tez çalışmasında bu büyüklüklerden faydalanılması düşünülmüştür. Aslında buradaki $e^{-Q/RT}$ ifadesi sabit bir değer olup her bir deney için belli bir sayısal değerdir. Sonuç olarak doğrusal davranışı sağlayacak zamanın eşitlikte doğrudan çarpan olarak yerini alması ile ikinci aşama sünme davranışı için (ε_{d2}) aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\varepsilon_{d_2} = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[1 - e^{-t}\right]\left[e^{-Q/RT}\right]t \tag{9.4}$$

Şekil 9.1d ve Şekil 9.2'de görülen 3. aşama sünme davranışı artan doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Bu fonksiyonel durum, sabit gerilmenin etkisiyle birbirine yaklaşan tuz kristalleri ve kalıcı deformasyon sonucu parçalanmayı ifade etmelidir. Ancak parçalanma sürecine giren malzeme üzerinde gerilmenin hiçbir etkisinin kalmamış olması ve sadece zamana bağlı gerilme boşalması yani parçalanma söz konusu olmalıdır. Sadece zamanın etkisi altında ancak Şekil 9.1d ve Şekil 9.2'deki fonksiyonel davranışı verecek eşitlik aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_{d_3} = \frac{1}{t_{max} - t} \tag{9.5}$$

Burada ε_{d3} üçüncü aşama sünme davranışı sonucu oluşacak düşey birim deformasyonu, t_{max} fonksiyonel davranışı verecek sabit bir değer, t ise deneysel çalışmada belirlenen zamandır (saat).

Eşitlik 9.3, 9.4 ve 9.5'de sunulan modellerin toplamı Şekil 9.2'de sunulan toplam sünme davranışını verecektir. Bu durumu yansıtan eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$\varepsilon_d = \varepsilon_{d1} + \varepsilon_{d2} + \varepsilon_{d3} \tag{9.6}$$

Eşitlik 9.6'da Eşitlik 9.3, 9.4 ve 9.5 yerine konulursa;

$$\varepsilon_d = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}[1 - e^{-t}] + \frac{\sigma_s}{\sigma_c}[1 - e^{-t}][e^{-Q/RT}]t + \frac{1}{t_{max} - t} \tag{9.7}$$

Yukarıda sunulan eşitlik ortak paranteze alınarak sadeleştirilirse;

$$\varepsilon_d = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}[1 - e^{-t}][1 + e^{-Q/RT}] + \frac{1}{t_{max} - t} \tag{9.8}$$

eşitliği elde edilebilir.

Eşitlik 9.8'de ifade edilen σ_s (MPa), σ_c (MPa), t (saat), R (kcal/mol.K) ve T (K) deney için ölçülerek yerine yazılabilirken aktivasyon enerjisi (Q, kcal/mol) ve t_{max} değeri sünme deneylerinden belirlenememiştir. Aktivasyon enerjisi değerinin belirlenebilmesi için farklı sıcaklıkta deneylere ihtiyaç vardır. Bundan dolayı bu değerlerin belirlenebilmesi için önerilen model (Eşitlik 9.8), istatistiksel paket program MATLAB v.7.0'da test edilmiş ancak elde edilen korelasyon katsayısı (r^2) değerlerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Eşitlik 9.8 temel model kabul edilerek birçok defa MATLAB v.7.0'da model denemesi yapılmıştır. Sonuçta bütün deney

sonuçlarına en uygun cevabı veren tek eksenli gerilme durumu ve oda sıcaklığında geçerli olan modelin son şeklinin aşağıdaki eşitlikteki gibi olduğu belirlenmiştir.

$$\varepsilon_d = A\frac{\sigma_s}{\sigma_c}[1-e^{-t/B}][C+e^{-Q/RT}]+\frac{1}{t_{max}-t} \quad (9.9)$$

Eşitlik 9.9'da A, B, C, Q ve t_{max} istatistiksel sabit olarak ifade edilebilir. Burada Q sıcaklık etkisini yansıtan bir gösterge olup bu değer deneysel çalışmalar ile ölçülememiş ancak istatistiksel analiz programı MATLAB v.7.0 yardımıyla bulunabilmiştir.

9.2.2. Matematiksel modelin Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu üzerindeki performansı

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunu temsilen hazırlanan numuneler üzerinde sırasıyla 80, 100, 120, 130, 140 ve 160 kN'luk sabit yük uygulaması ile sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuar deneylerinden elde edilen sünme davranışı sonuçları ayrıntıları ile sunulduğu Bölüm 8'deki veriler kullanılarak Eşitlik 9.9, MATLAB v.7.0'da denenmiştir. Eşitlik 9.9'da kullanılan girdi parametreleri ve elde edilen istatistiksel sonuçlar Çizelge 9.1'de sunulmuştur.

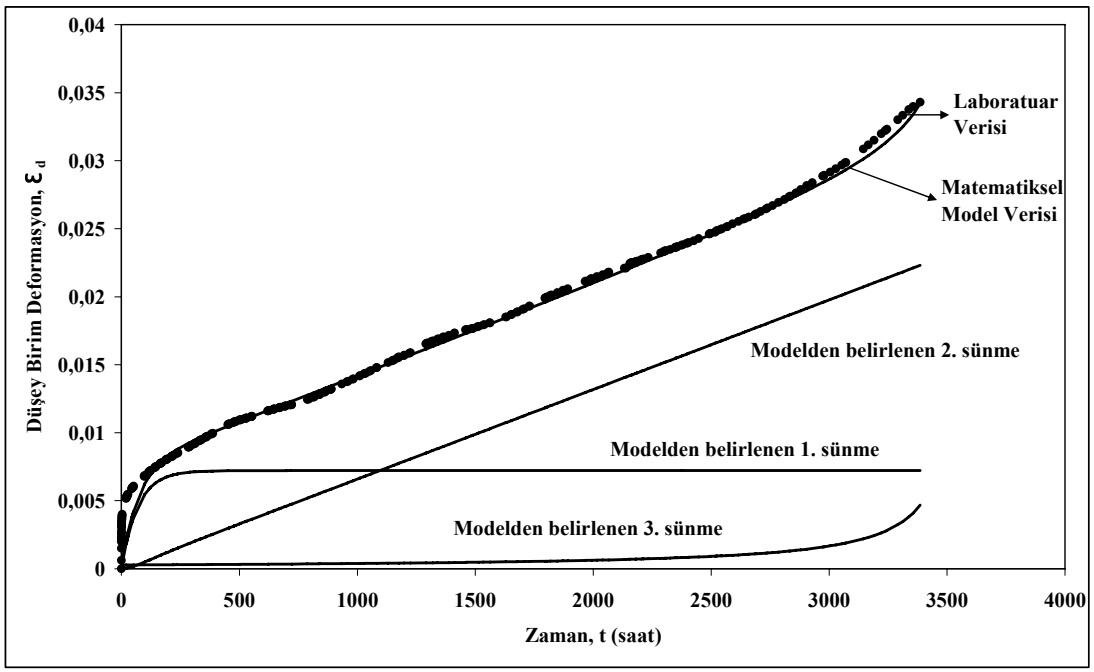
Çizelge 9.1'de sunulan girdi parametrelerinden gaz sabiti için tüm deneylerde evrensel gaz sabiti olan 8,31 kcal/mol.K değeri kullanılırken ortam sıcaklığı olarak sünme deneylerinin gerçekleştirildiği odanın sıcaklığı olan 25˚C (298K) kullanılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi sünme deneyleri uzun bir süreçte tamamlandığı için oda ortamının sıcaklığı ve nem içeriğinin sabit tutulabilmesi için split tip klima kullanılmıştır.

İstatistiksel analiz sonucunda belirlenen A katsayısı 0,0001491-0,0124968 aralığında, B katsayısı ise 3,197-259,6 aralığında, C katsayısı 0,9623-41,98 aralığında, Q katsayısı ise dar bir aralık olan 9876-10730 aralığında ve t_{max} katsayısı ise 90-26380 aralığında değişmektedir (Çizelge 9.1).

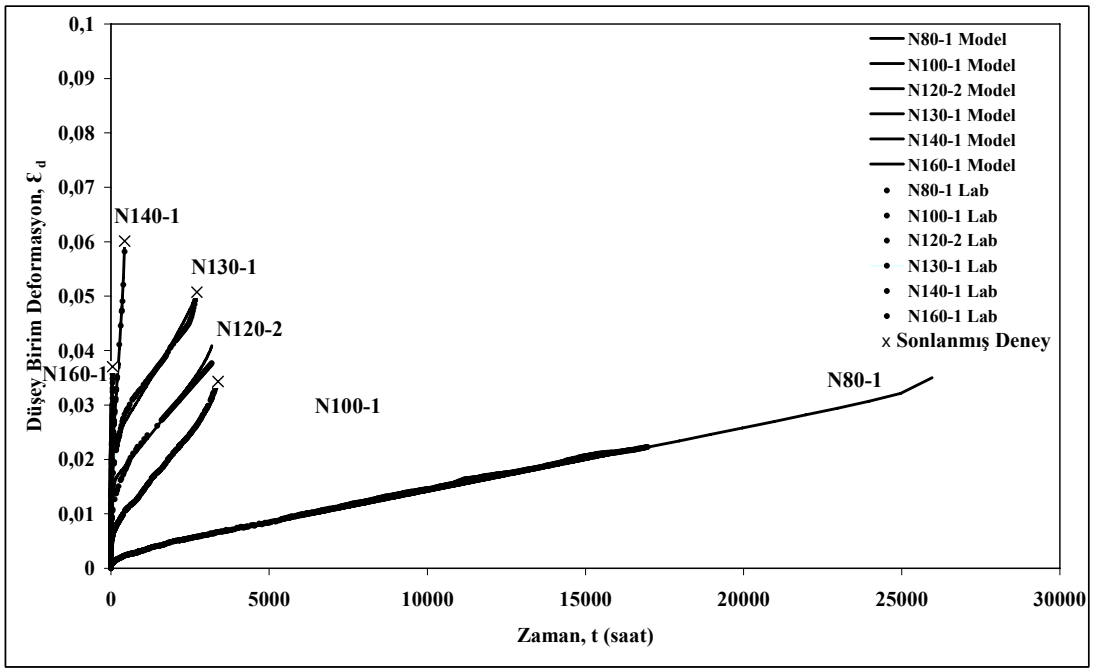
Çizelge 9.1'de görüldüğü üzere istatistiksel başarı değerleri (r^2) 0,98 civarındadır. Yukarıdaki çizelgede sunulan sonuçlara ait tipik bir örnek Şekil 9.3'de sunulmuştur. Ayrıca tüm deney sonuçları ile matematiksel modelden bulunan sünme eğrileri topluca Şekil 9.4'de görülmektedir.

Çizelge 9.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait Eşitlik 9.9'un istatistiksel performans sonuçları

Numune Adı	İstatistiksel Analizlerde Kullanılan Girdi Parametreleri					İstatistiksel Analiz Sonuçları					
	Sabit Yük (kN)	Sabit Gerilme (MPa)	Sabit Gerilme/ TEBD Oranı (σ_s/σ_c)	Gaz Sabiti (R) (kcal/mol.K)	Ortam Sıcaklığı (K)	A	B	C	Q	t_{max}	r^2
N80-1	80	11,777	0,44	8,31	298	0,0001491	259,6	37,09	10000	26380	0,98
N100-1	100	14,721	0,55	8,31	298	0,0006783	70,0	19,33	9996	3600	0,99
N120-2	120	17,665	0,67	8,31	298	0,0005911	35,0	38,72	9989	3500	0,99
N130-1	130	19,138	0,72	8,31	298	0,0007397	19,5	41,98	9986	3100	0,96
N140-1	140	20,609	0,78	8,31	298	0,0051861	3,197	4,116	9876	520	0,97
N160-1	160	23,554	0,89	8,31	298	0,0124968	3,29	0,9623	10730	90	0,99



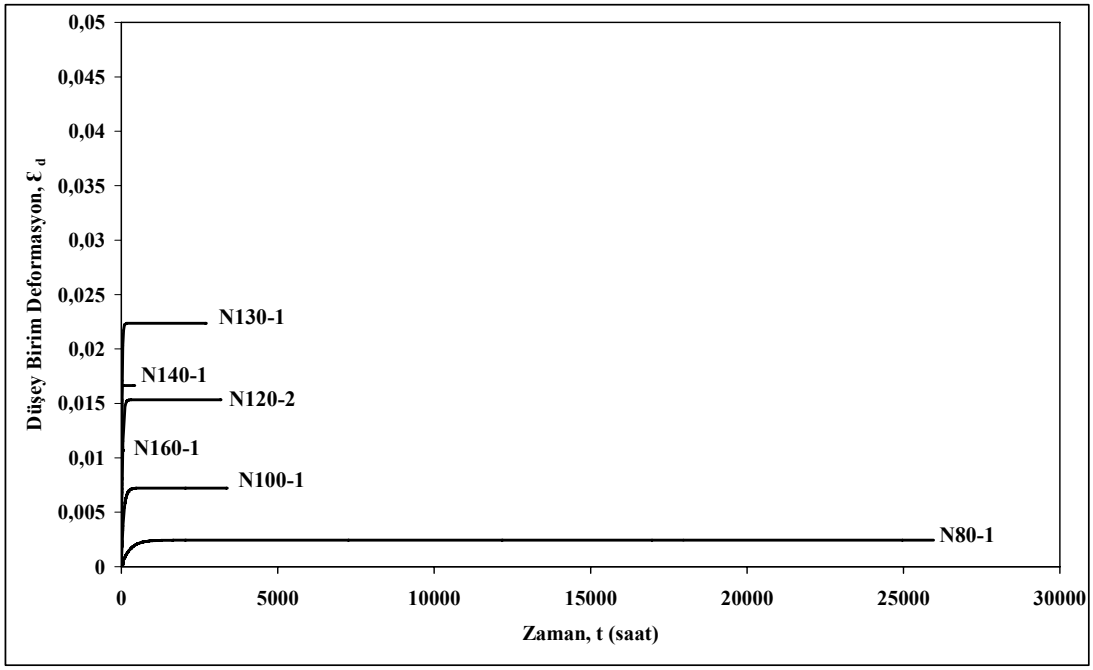
Şekil 9.3. N100-1 numunesine ait laboratuar ve matematiksel model sonuçları



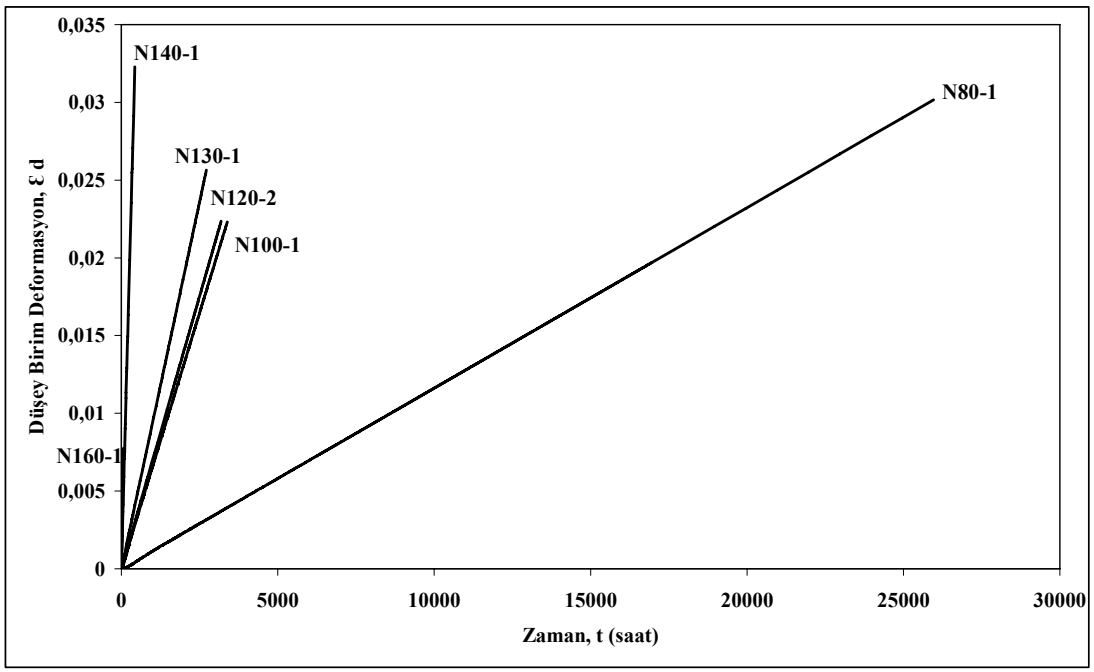
Şekil 9.4. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait laboratuar ve matematiksel model verileri

Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu oluşumu için tipik bir örnek olarak sunulan N100-1 numunesi için laboratuardan alınan ölçü sonuçları ile matematiksel modelden bulunan sünme davranışı, başarı ile birbirleriyle örtüştüğü Şekil 9.3'den izlenebilmektedir. Ayrıca Şekil 9.3'de matematiksel modelden belirlenen sünme davranışının parçalarını oluşturan 1., 2. ve 3. aşama sünme davranışları da gösterilmiştir. Üç farklı davranış sergileyen 1., 2. ve 3. sünme davranışlarının toplamı, toplam düşey birim deformasyonu yani sünme davranışını vermektedir. Matematiksel modelden belirlenen bu durum, matematiksel modelin geliştirilmesine temel teşkil eden Şekil 9.2'e benzer olması modelin beklenen duruma cevap verdiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

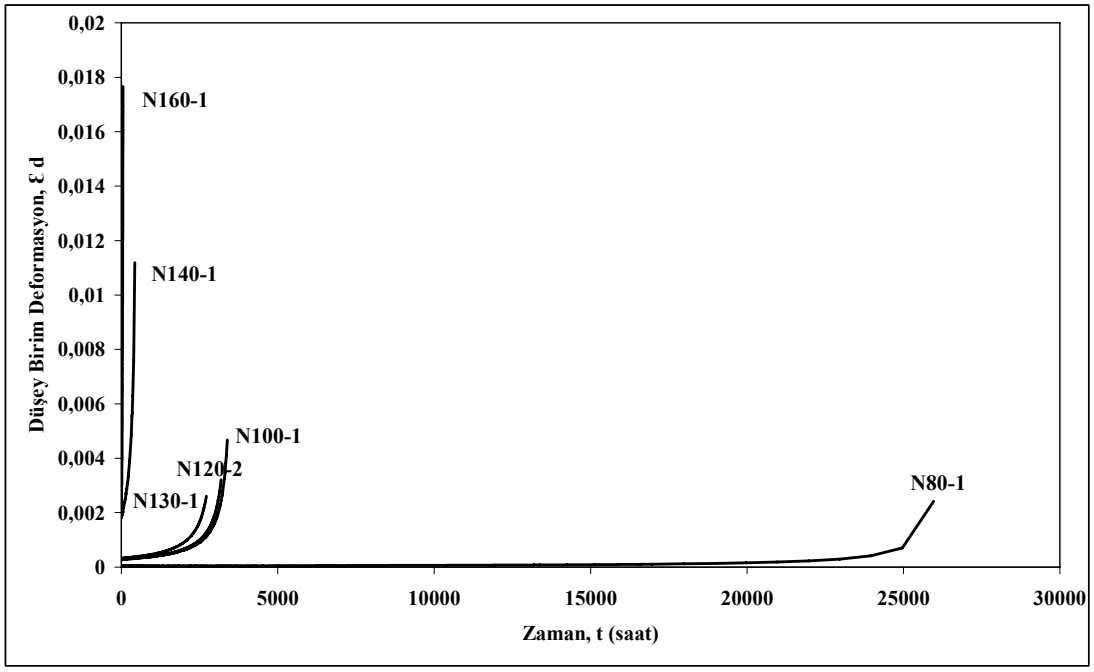
Şekil 9.4'de tüm deney sonuçlarına ait laboratuar verisi ve modelden belirlenen sadece toplam sünme eğrileri topluca sunulmuştur. Ancak Şekil 9.5, 9.6 ve 9.7'de sırasıyla tüm deneylere ait 1. sünme aşamasına ait eğriler, 2. sünme aşamasına ait doğrusal eğriler ve 3. sünme aşamasına ait doğrusal olmayan eğriler topluca sunulmuştur. Şekil 9.5, 9.6 ve 9.7'de görüldüğü gibi 1., 2. ve 3. sünme aşama eğrileri numune üzerine etki eden sabit yüke bağlı olarak sırayla konumlanmışlardır.



Şekil 9.5. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen birinci sünme aşaması



Şekil 9.6. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen ikinci sünme aşaması



Şekil 9.7. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen üçüncü sünme aşaması

9.2.3. Matematiksel modelin Çankırı kaya tuzu üzerindeki performansı

Çankırı kaya tuzuna ait sünme deneyleri ve sonuçları Bölüm 8'de sunulmuştur. Laboratuar deneyleri ile belirlenen sünme ölçüm değerleri Eşitlik 9.9'da sunulan matematiksel model için MATLAB v.7.0'da denenmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonuçları topluca Çizelge 9.2'de sunulmuştur. Çizelgeden görüldüğü üzere istatistiksel başarı değeri olan r^2 değeri 0,98 civarındadır.

İstatistiksel analiz sonucunda belirlenen A katsayısı 0,00004614-0,0038 aralığında, B katsayısı ise 9,969-753 aralığında, C katsayısı 28,73-74,17 aralığında, Q katsayısı ise dar bir aralık olan 9576-10890 aralığında ve t_{max} katsayısı ise 5,687-24540 aralığında değişmektedir (Çizelge 9.1).

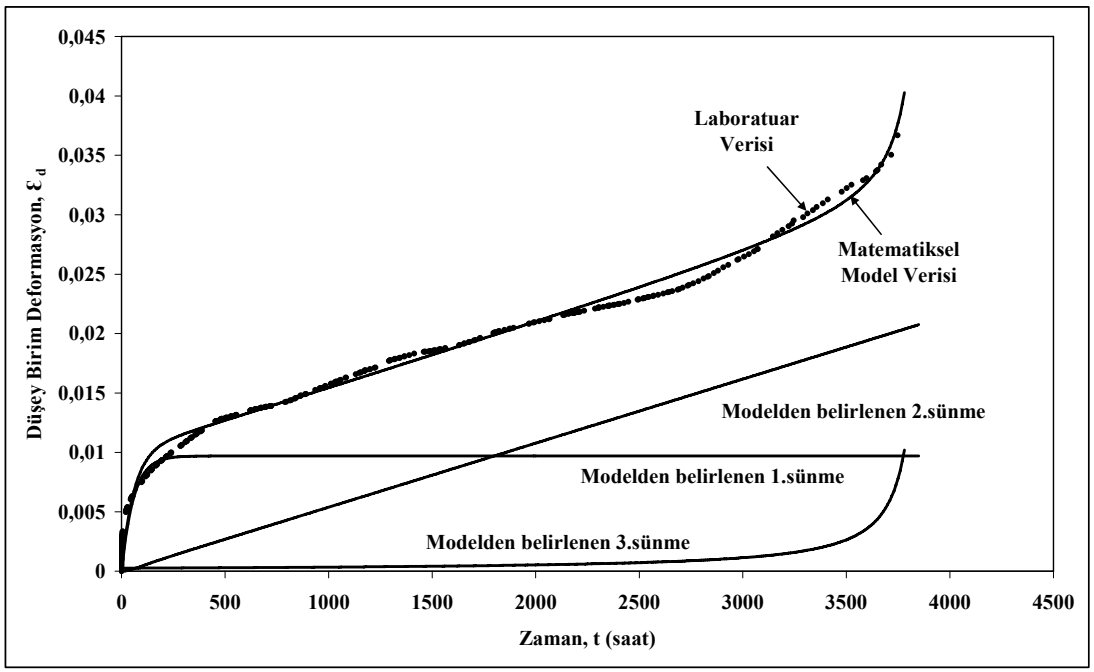
Çizelge 9.2'de sunulan sonuçlara tipik bir örnek Şekil 9.8'de sunulurken Çankırı kaya tuzuna ait gerçekleştirilen tüm deneysel sonuçlar ve model sonuçları topluca Şekil 9.9'da görülmektedir.

Çankırı kaya tuzu için gerçekleştirilen deneylerden tipik olarak sunulan C100-1 numunesine ait sonuçların görüldüğü Şekil 9.8'de laboratuar ölçüm sonuçları, bu ölçüm sonuçlarına uyan modelden bulunan eğri vede modelden bulunan 1., 2. ve 3. sünme aşamalarına ait eğriler sunulmuştur. Laboratuar sonuçları ile matematiksel modelden bulunan eğrinin birbiri ile başarıyla örtüştüğü görülmektedir. Ayrıca matematiksel modelden belirlenen sünme davranışının 1., 2. ve 3. aşamalarına ait eğrilerin Şekil 9.2'de sunulan model eğrilere benzediği görülmektedir.

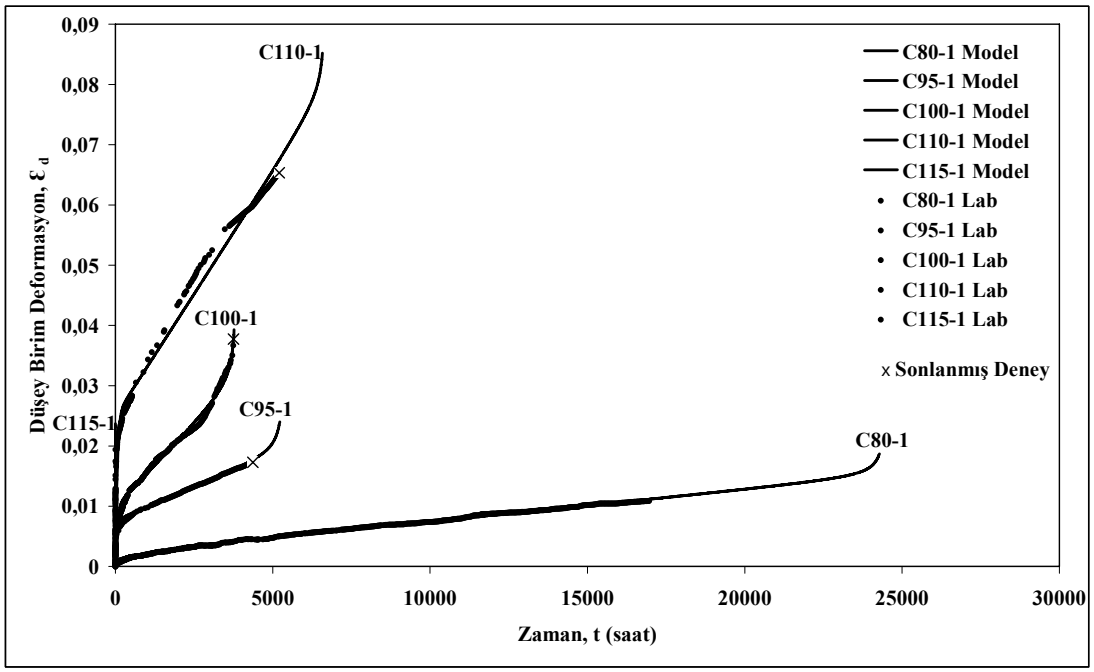
Şekil 9.9'da Çankırı Kaya Tuz sahası için gerçekleştirilen tüm numunelere ait veriler ve modelden belirlenen eğriler topluca görülmektedir. Her bir deney verisi ile matematiksel modelden belirlenen eğrilerin başarı ile birbirleriyle örtüştüğü anlaşılmaktadır. Çankırı kaya tuz sahası için gerçekleştirilen deneylere ait matematiksel modelden belirlenen 1., 2. ve 3. sünme eğrileri de ayrıca Şekil 9.10, 9.11 ve 9.12'de sunulmuştur. Bu grafiklerde numune üzerine uygulanan sabit yükün artmasına bağlı olarak eğrilerin belirli bir sistematik içinde konumlandığı görülmektedir. Bu durum, doktora tez çalışmasıyla geliştirilen modelin, anlamlı olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 9.2. Çankırı kaya tuzuna ait Eşitlik 9.9'un performans sonuçları

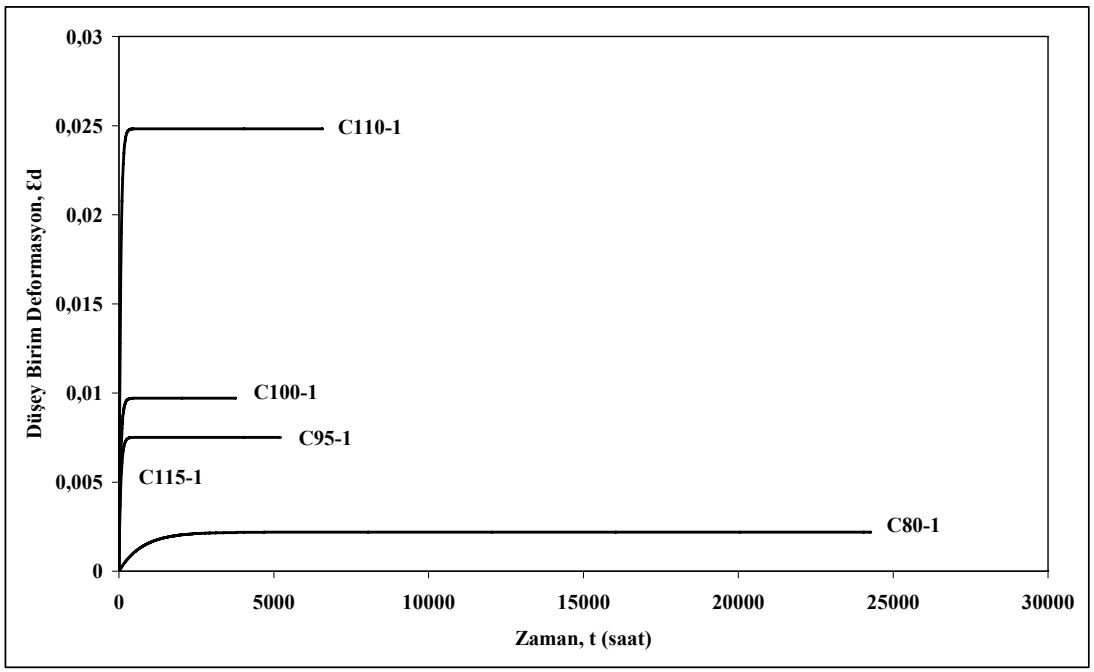
Numune Adı	İstatistiksel Analizlerde Kullanılan Girdi Parametreleri					İstatistiksel Analiz Sonuçları					
	Sabit Yük (kN)	Sabit Gerilme (MPa)	Sabit Gerilme/ TEBD Oranı (σ_s/σ_c)	Gaz Sabiti (R) (kcal/mol.K)	Ortam Sıcaklığı (K)	A	B	C	Q	t_{max}	R^2
C80	80	11,777	0,64	8,31	298	4,61398E-05	753	74,17	9998	24540	0,95
N95	95	13,985	0,76	8,31	298	0,000134518	60,01	73,2	9615	5403	0,99
C100	100	14,721	0,8	8,31	298	0,000358541	57,53	33,8	9845	3878	0,99
C110	110	16,193	0,88	8,31	298	0,000745232	55,26	37,87	10890	6717	0,99
C115	115	16,929	0,92	8,31	298	0,003798011	9,969	28,73	9576	5,687	0,97



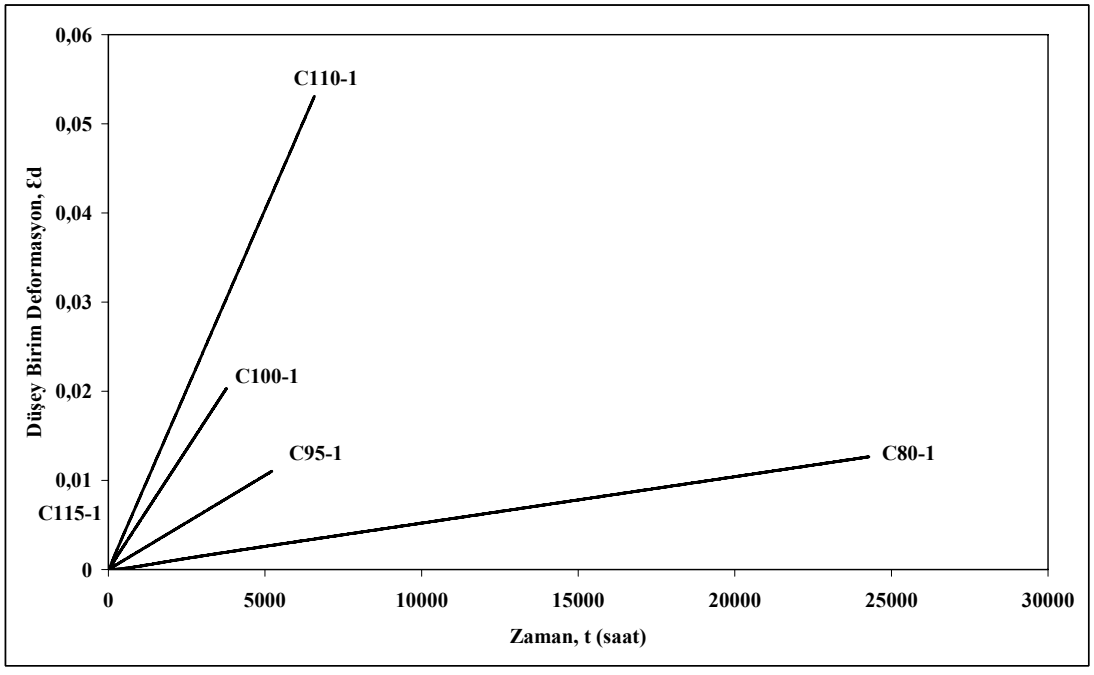
Şekil 9.8. C100-1 numunesine ait laboratuar ve matematiksel model sonuçları



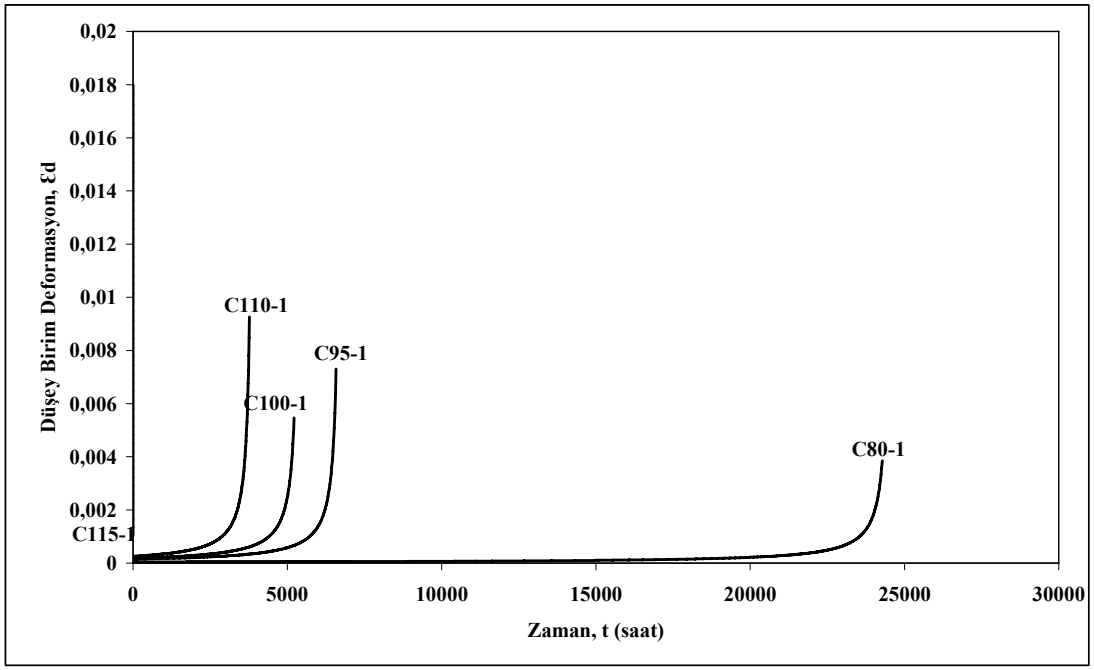
Şekil 9.9. Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel model verileri



Şekil 9.10. Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen birinci sünme aşamaları



Şekil 9.11. Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen ikinci sünme aşamaları



Şekil 9.12. Çankırı kaya tuzuna ait matematiksel modelden elde edilen üçüncü sünme aşamaları

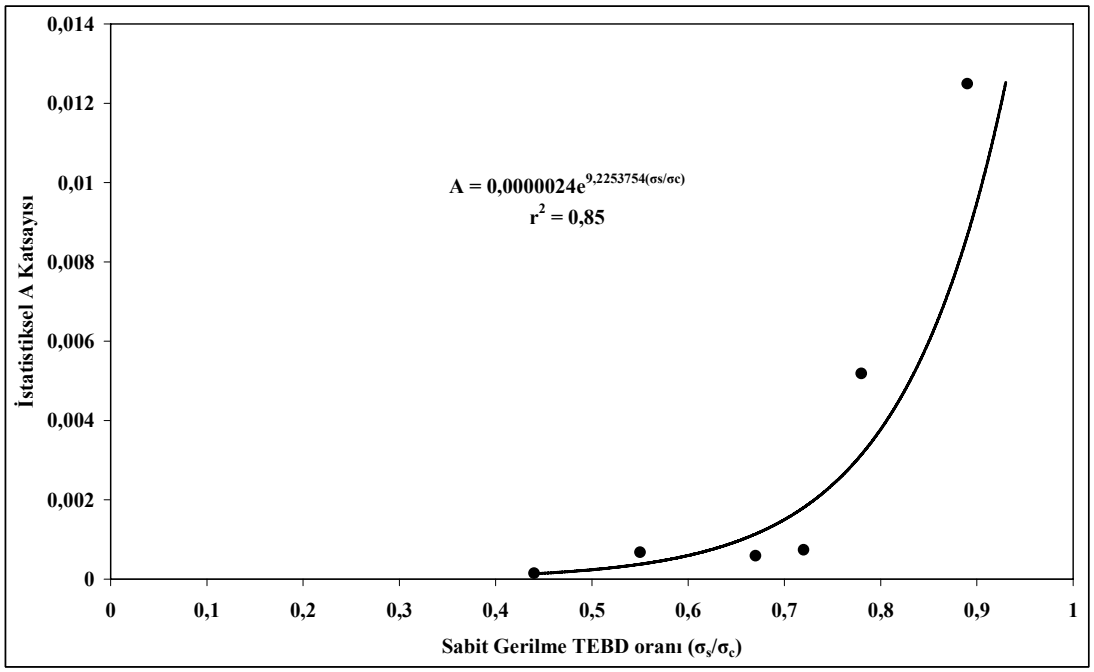
9.3 Matematiksel Model Yardımıyla Belirlenen İstatistiksel Katsayılar ve Bu Katsayılara ait İlişkiler

Eşitlik 9.9'da ifade edilen matematiksel modelin MATLAB v.7.0 paket programı ile yapılan istatistiksel analiz sonucunda A, B, C, Q ve t_{max} olmak üzere beş farklı katsayının varlığı belirlenmiştir. Bu katsayıların sabit sünme gerilmesi (σ_s) ile ilişkilerinin araştırılması amacıyla yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

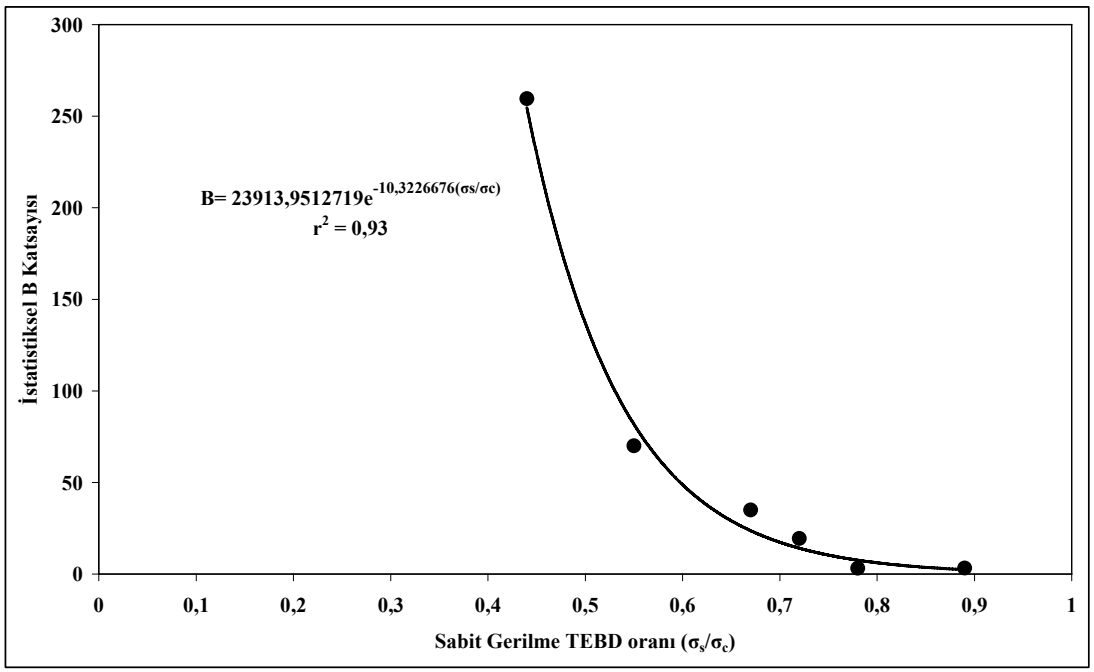
9.3.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait istatistiksel katsayıların değerlendirilmesi

Eşitlik 9.9 yardımıyla test edilen Nevşehir-Gülşehir kaya tuzlarına ait belirlenen istatistiksel katsayıların değerlendirilmesi aşağıda ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

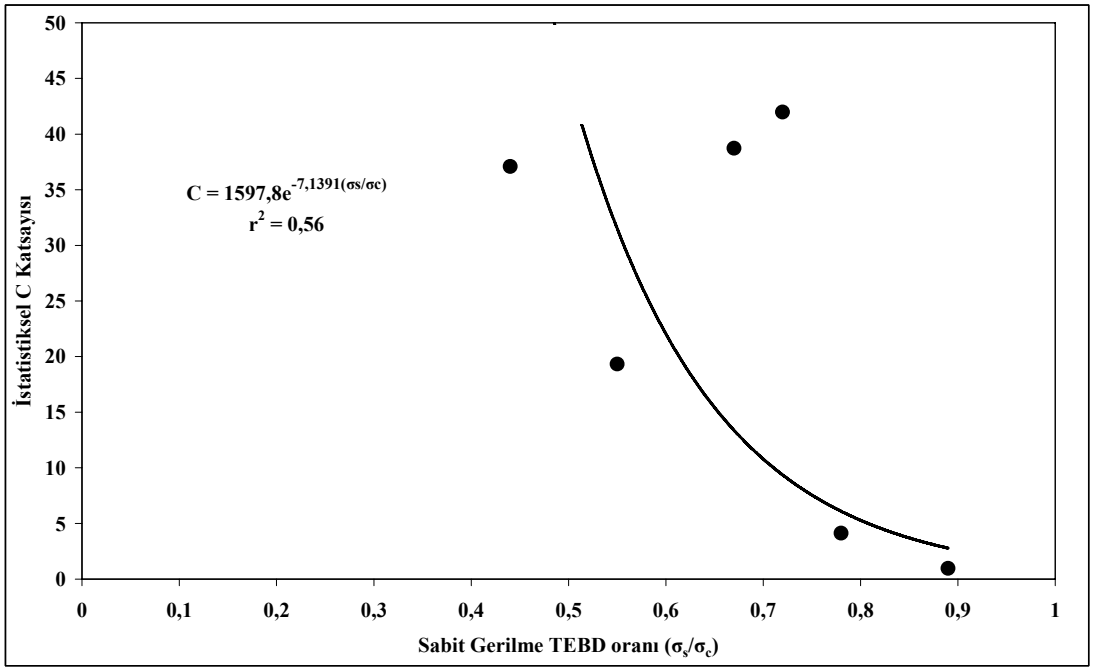
Bölüm 9.2.2 ve Çizelge 9.1'de sunulan istatistiksel analiz sonuçlarından elde edilen r^2 değerlerinin 1'e yakın olması Eşitlik 9.9'da sunulan matematiksel modelin başarılı olduğunun göstergesidir. MATLAB v.7.0 yardımıyla belirlenen A, B, C, Q ve t_{max} istatistiksel sabitlerin, sabit yüke bağlı sabit gerilme (σ_S) değerinin tek eksenli basınç dayanımına-TEBD (σ_c) oranı (σ_S/σ_c) arasındaki ilişkileri belirlenmeye çalışılmıştır. σ_S/σ_c oranının artışı ya da azalışı ile A, B, C, Q ve t_{max} sabitlerinin nasıl değiştiği Şekil 9.13-9.17'de görülmektedir.



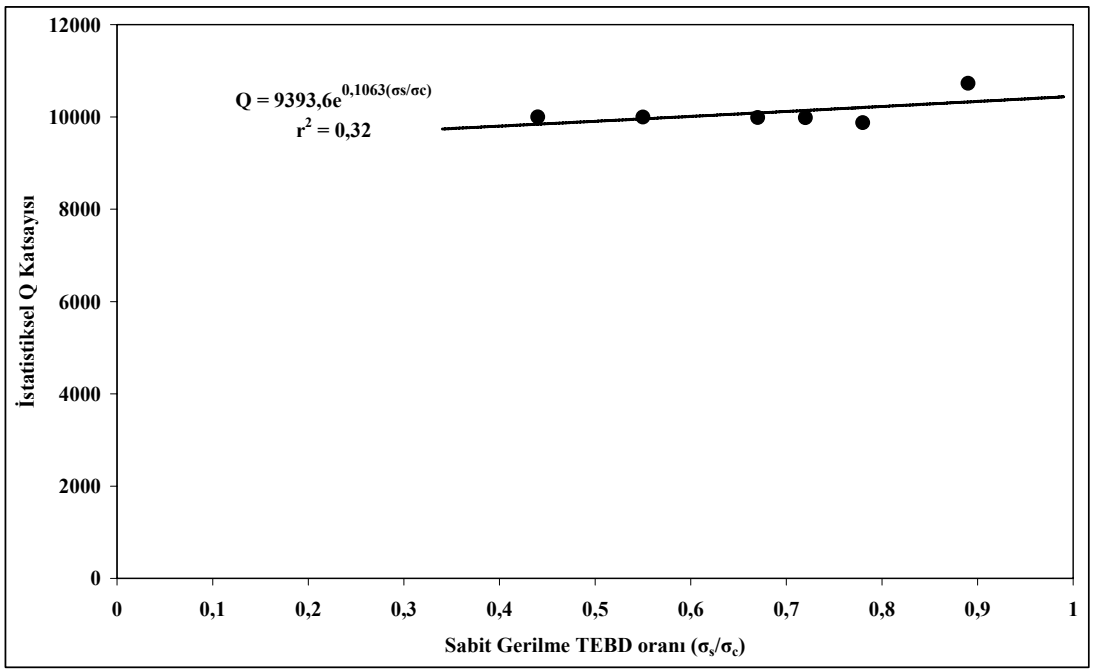
Şekil 9.13. σ_S/σ_c oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel A katsayısının değişimi



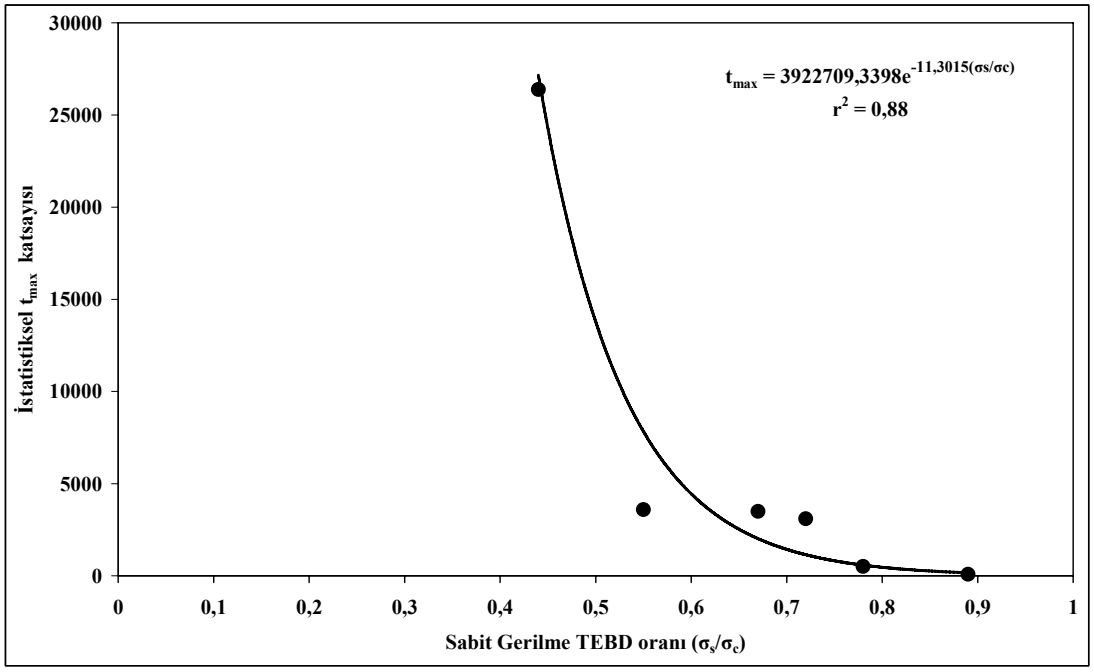
Şekil 9.14. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel B katsayısının değişimi



Şekil 9.15. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel C katsayısının değişimi



Şekil 9.16. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel Q katsayısının değişimi

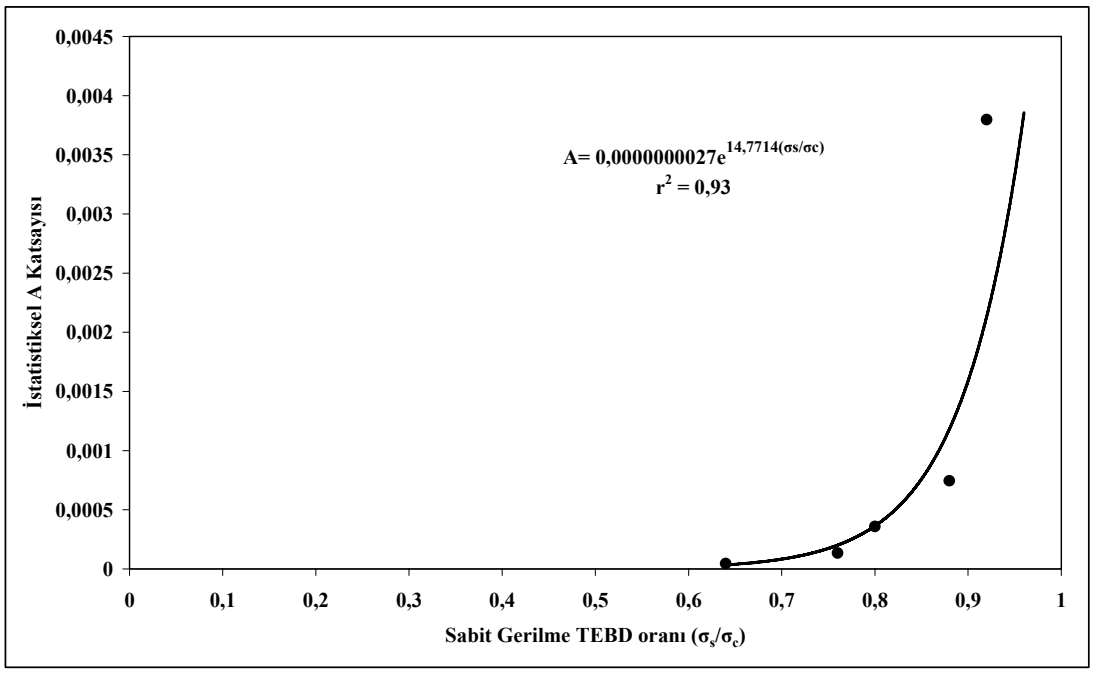


Şekil 9.17. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda istatistiksel t_{max} katsayısının değişimi

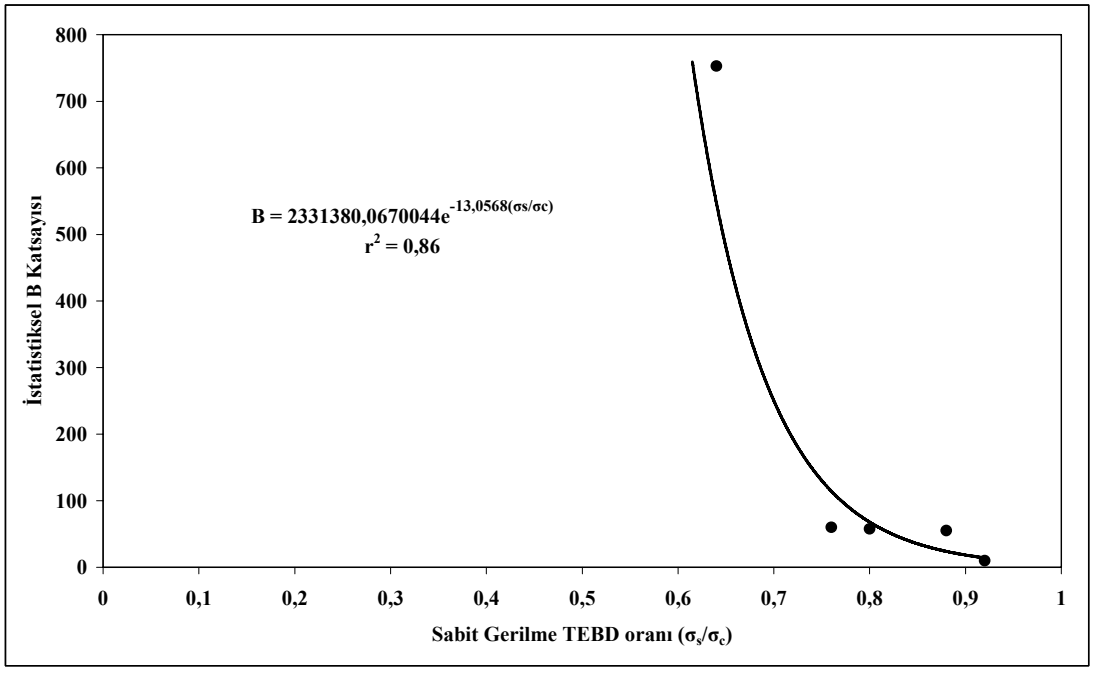
Şekil 9.13, 9.14 ve 9.17'den görüldüğü üzere sabit gerilme (σ_S)'nin tek eksenli basınç dayanımı- TEBD (σ_c) değerine oranı ($\sigma_S/\ \sigma_c$) ile istatistiksel katsayı A, B ve t_{max} arasında oldukça yüksek bir ilişki vardır. Uygulayıcı mühendis, Nevşehir-Gülşehir Kaya tuzu malzemesi için belirleyeceği σ_S/σ_c oranını dikkate alırsa o takdirde Eşitlik 9.9'da sunulan modelde kullanılan A, B ve t_{max} değerlerini kolayca bulabilecektir. Şekil 9.16'da sunulan Q değerlerinin ise istatistiksel başarısı düşük olmasına rağmen çok yakın bir değer aralığında değiştiği görülmektedir (Çizelge 9.1). Literatürde (Bölüm 2, Çizelge 2.6) Q aktivasyon enerjisi (kcal/mol) olarak tanımlanmış olup bu değer her bir maden için sabit olmaktadır. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için Q aktivasyon enerjisi istatistiksel analiz sonuçlarına bağlı olarak ortalama $10096{,}17 \pm 286{,}7$ kcal/mol alınabilir. İstatistiksel başarının düşük olduğu C katsayısı ile ilgili grafiksel analiz Şekil 9.15'de görülmektedir. Buradaki sonuçların kuvvetlendirilmesi için ek sünme deneylerine gereksinim olduğu vurgulanabilir. Sonuç olarak, tasarım mühendisi yapmayı planladığı ya da merak ettiği sünme deneyi için eğer σ_S/σ_c oranını belirlemiş ise o takdirde Şekil 9.13-9.17'den Eşitlik 9.9'da kullanılacak olan A, B, C, Q ve t_{max} değerlerini bulabilir ve Eşitlik 9.9'u kullanarak yapmayı planladığı deneye ait sünme davranışını sanal olarak önceden kestirilebilir.

9.3.2. Çankırı kaya tuzuna ait istatistiksel katsayıların değerlendirilmesi

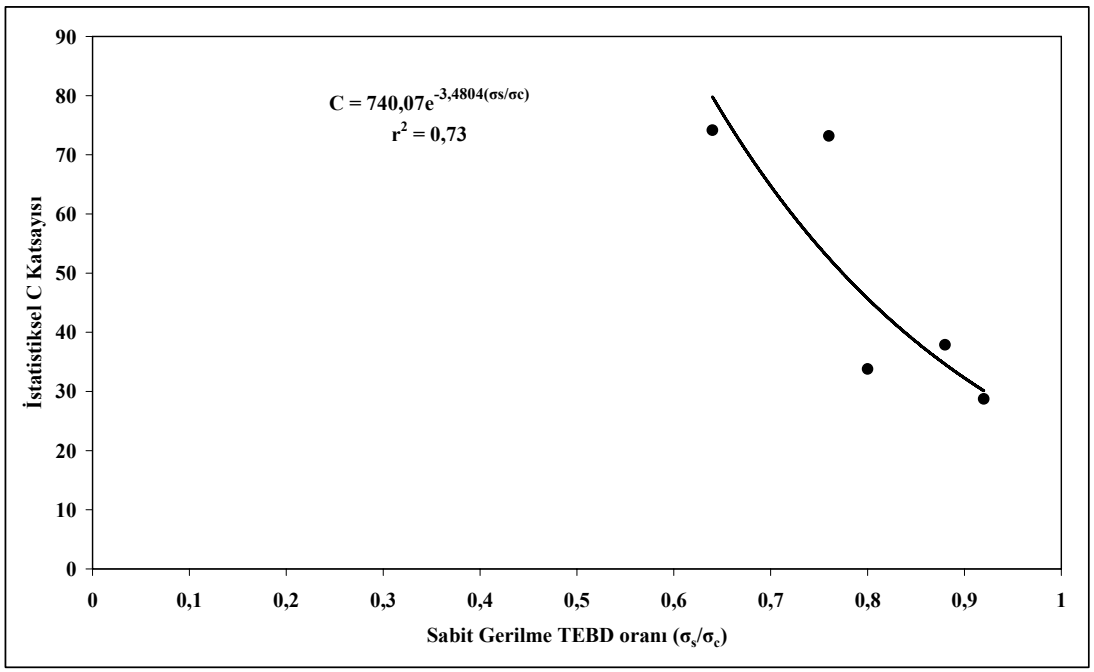
Çankırı kaya tuzu için MATLAB v.7.0 yardımıyla belirlenen A, B, C, Q ve t_{max} istatistiksel sabitlerin (Çizelge 9.2), sabit yüke bağlı sabit gerilme (σ_S) değerinin tek eksenli basınç dayanımına-TEBD (σ_c) oranı ($\sigma_S/\ \sigma_c$) arasında belirlenen ilişkiler Şekil 9.18-9.22'de görülmektedir.



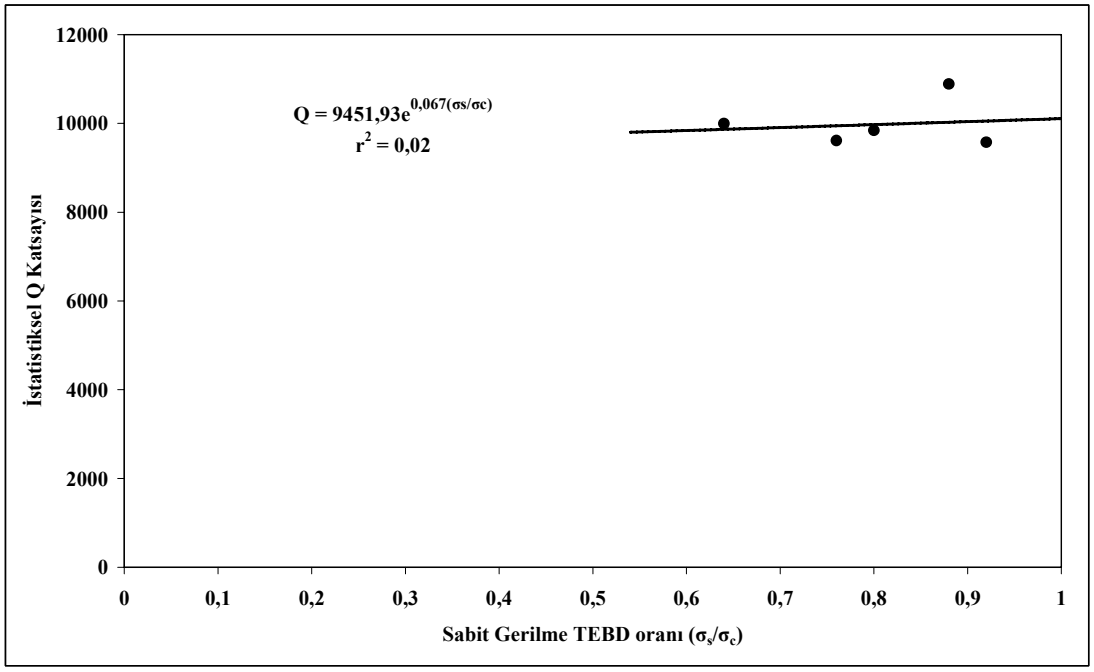
Şekil 9.18. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel A katsayısı değişimi



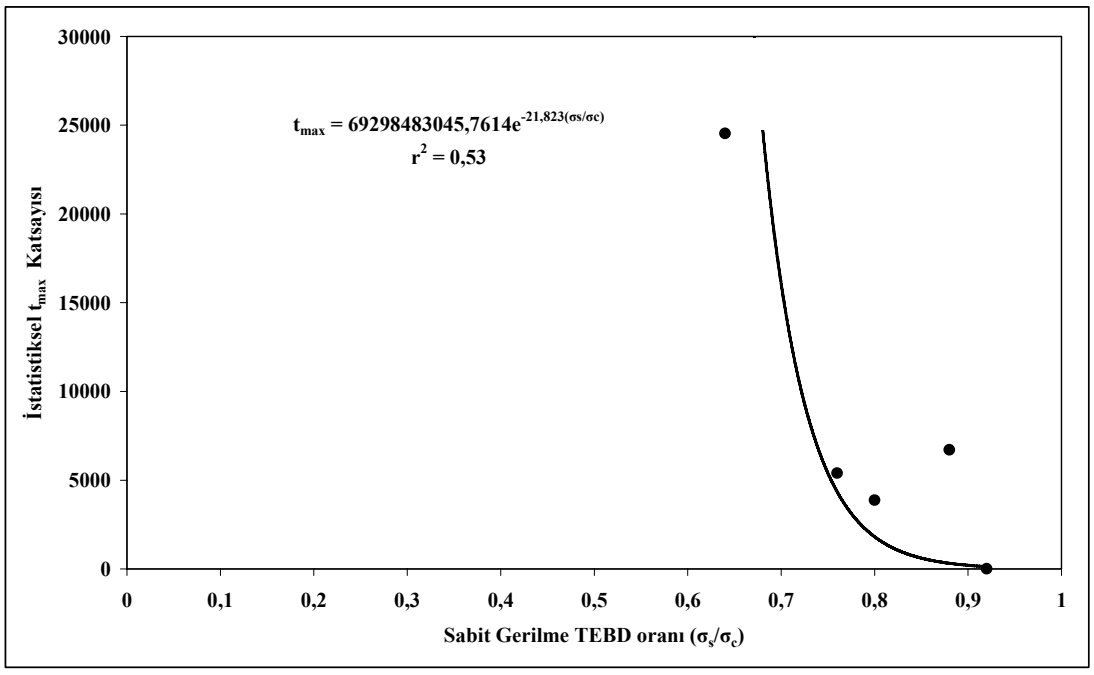
Şekil 9.19. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel B katsayısı değişimi



Şekil 9.20. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel C katsayısının değişimi



Şekil 9.21. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel Q katsayısının değişimi



Şekil 9.22. $\sigma_S/\ \sigma_c$ oranına bağlı olarak Çankırı kaya tuzunda istatistiksel t_{max} katsayısının değişimi

Şekil 9.18, 9.19 ve 9.20'den görüldüğü üzere istatistiksel analizler yardımıyla belirlenen A, B ve C katsayılarının σ_s/σ_c oranı arasında güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Ancak aktivasyon enerjisi (kcal/mol) olarak tanımlanan Q değerleri ile σ_s/σ_c oranı arasında Nevşehir-Gülşehir kaya tuzunda olduğu gibi iyi bir ilişki bulunmazken Q değerlerinin dar bir aralık olan 9576-10890 (Çizelge 9.2) aralığında değiştiği görülmektedir. Q değeri olarak Çankırı tuz havzası için 9948,8±478,12 kcal/mol değeri alınabilir. Deney sayısının artırılması ile t_{max} ile σ_s/σ_c oranı arasındaki r^2=0,53 değerinin daha da artırılması mümkün olabilecektir. Sonuç olarak tasarım mühendisi Çankırı kaya tuzu üzerinde daha önce kendisinin belirleyeceği bir σ_s/σ_c oranı için sabit gerilme altındaki numuneye ait sünme davranışını sanal olarak görmek isterse, önce Şekil 9.18-9.22'den A, B, C, t_{max} değerini belirleyip sonra da Q değeri için 9984,8 değerini alarak Eşitlik 9.9'u kullanabilecektir. Böylelikle tasarım mühendisi deney yapmadan ilgilendiği koşullar altındaki sünme davranışını model olarak oluşturabilecektir.

9.4. Sünme Davranışında 1., 2. ve 3. Sünme Aşamalarının Belirlenmesi

Laboratuar deneyleri yardımıyla oluşturulan veri tabanı kullanılarak elde edilen sünme davranışları (Bölüm 8) ile sünmeye ait 1., 2. ve 3. aşamaların başlangıç noktalarının tespiti oldukça zor yapılabilmekte ve de teknik açıdan güvenilirliği tartışmalı olmaktadır. Bunun için hazırlanan veri tabanı yardımıyla geliştirilen matematiksel model (Eşitlik 9.9) kullanılarak belirlenen sünme davranışı eğrileri (Şekil 9.4 ve 9.9) sünme aşamalarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Ancak direkt sünme davranışı eğrisi üzerinden sünme aşamalarının tam belirlenmesi için sünme davranışının hız (v) ve ivme (a) değerlerine bakılması daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Sünme davranış hızının (v) sabit olmaya başladığı an doğrusal davranış gösteren 2. sünme aşamasının başlangıç noktası, hızın (v) sabit olmaktan çıktığı an ise 2. sünme davranışının bittiği yani 3. sünme davranışına geçildiği nokta olacaktır. Sünme davranışında hızın (v) sabit olduğu bir başka değişle doğrusal davranış gösteren 2. sünme aralığında ise sünme davranış ivmesi (a) sıfır olacaktır. Matematiksel olarak bu noktaların belirlenmesi ile sünme aşamalarının başlangıç ve bitiş noktaları belirlenebilecektir. Bu düşünce doğrultusunda, Eşitlik 9.9'da ifade edilen matemetiksel modelin hız değerini verecek olan zamana bağlı 1. kısmi türevi aşağıda verilmiştir.

$$v = \frac{d\varepsilon}{dt} = A\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[C + e^{-Q/RT}\right]\left[\frac{1}{B}e^{-t/B}\right] + \frac{1}{\left(t_{max} - t\right)^2} \tag{9.10}$$

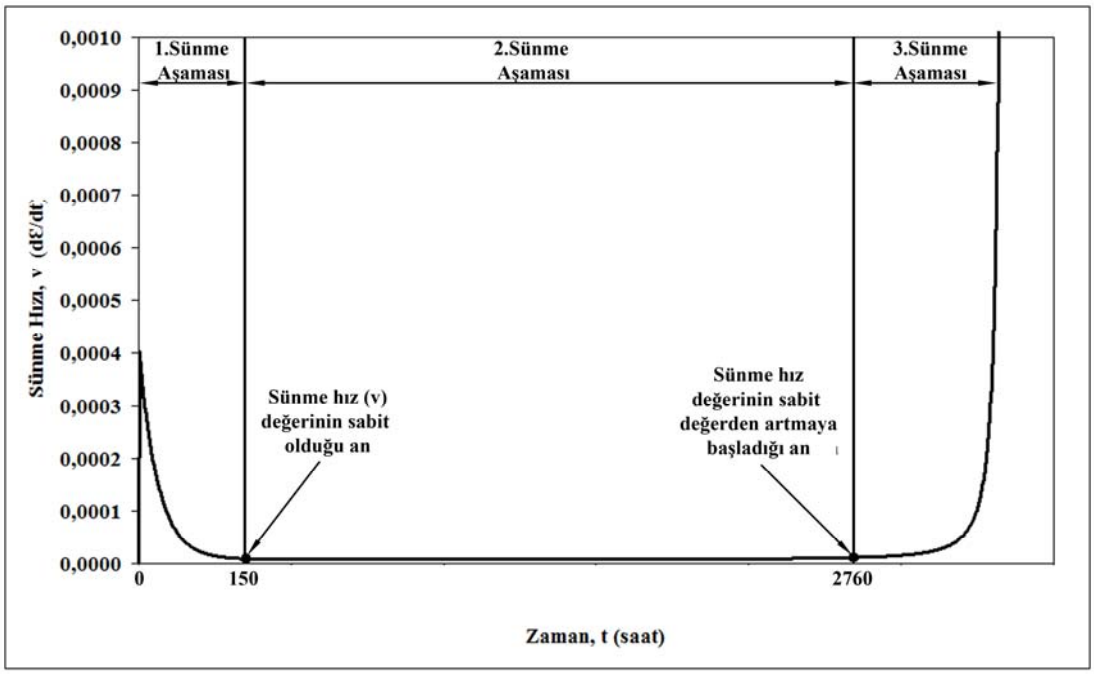
Eşitlik 9.10'da hızın sabit olduğu t zamanlarının belirlenmesi ile 2. sünme aşamasının başlangıç ve bitiş noktaları kolayca belirlenebilecektir. Belirlenen bu değerlerin sağlamasının yapılması amacı ile Eşitlik 9.9'un zamana bağlı ikinci türevi alınarak, bu sefer ivme davranışını verecek matematiksel eşitlik belirlenmiştir. Bu eşitlik yardımıyla ivme (a) değerinin sıfır olduğu zaman aralığı 2. sünme aşamasının başladığı ve bittiği noktaları bize verecektir. Bu ivme eşitliği aşağıda sunulmuştur.

$$a = \frac{A}{B^2}\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[C + e^{-Q/RT}\right]e^{-t/B} + \frac{2\left(t_{max} - t\right)}{\left(t_{max} - t\right)^4} \tag{9.11}$$

Eşitlik 9.10 ve 9.11 ile ifade edilen sünmeye ait hız ve ivme davranışları bu tez çalışmasına konu olan her iki kaya tuzu sahası için ayrı ayrı belirlenmiş ve irdelenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar aşağıdaki alt başlıklarda sunulmuştur.

9.4.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait hız ve ivme analizi

Nevşehir-Gülşehir kaya tuz sahasından temin edilen numuneler için matematiksel modelden belirlenen sünme davranışına ait hız değişiminin görülmesi için Eşitlik 9.10 kullanılmıştır. Elde edilen tipik bir zaman-sünme hız davranışı N130-1 için Şekil 9.23'de sunulmuştur. Örnek olarak verilen grafikten sünme hız değişimi (Şekil 9.23) incelenirse hız değişiminin sabit olduğu zaman aralığının 150-2760 saat aralığı olduğu görülmektedir. Şekil 9.23'de gösterilen bu zaman aralıklarında 2.sünme aşaması gelişirken bunların haricinde ise 1. ve 3. sünme aşamaları oluşmaktadır. Şekil 9.23'den belirlenen zaman (t, saat) değerleri gibi diğer sünme deneylerine ait zaman değerleri belirlenerek Çizelge 9.3 hazırlanmıştır.



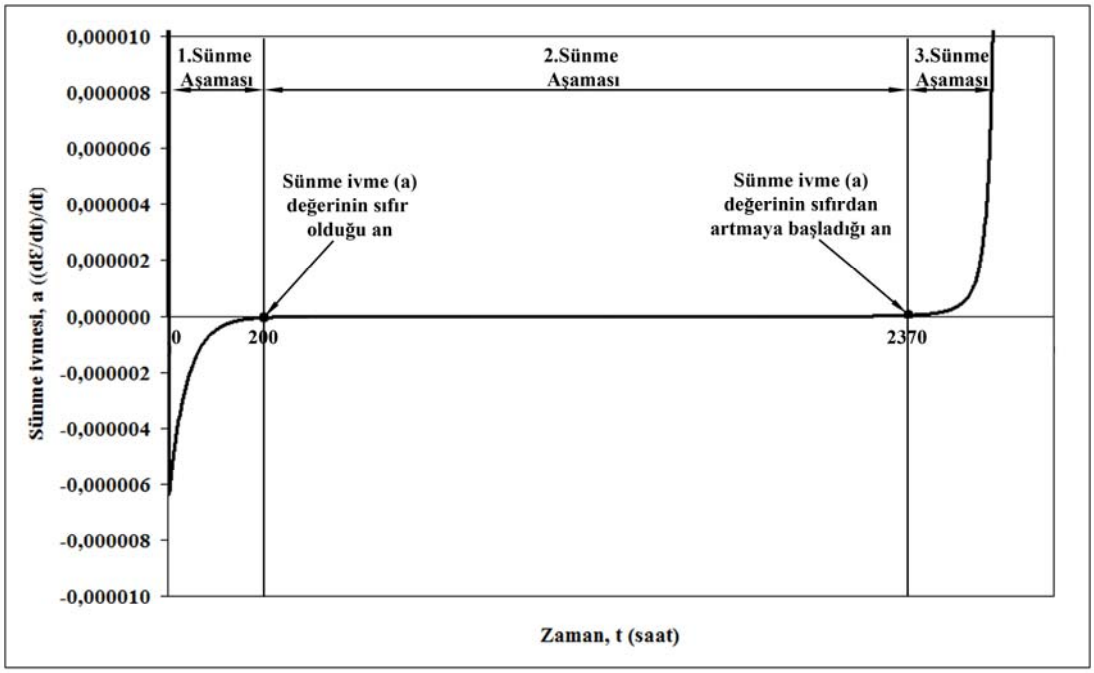
Şekil 9.23. Nevşehir-Gülşehir Kaya tuzu N130-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme hızı davranışı

Çizelge 9.3. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzuna Ait Belirlenen Sabit Hız Değerleri

Numune Adı	Aşama 1-2 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	Hız, v^{*} ($d\varepsilon_d/dt$)	Aşama 2-3 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	Hız, v^{**} ($d\varepsilon_d/dt$)
N80-1	740	$1,8512*10^{-6}$	25460	$2,3153*10^{-6}$
N100-1	260	$9,9346*10^{-6}$	3260	$1,5061*10^{-5}$
N120-2	210	$8,3347*10^{-6}$	3160	$1,5312*10^{-5}$
N130-1	150	$1,0270*10^{-5}$	2760	$1,7842*10^{-5}$
N140-1	30	$7,9861*10^{-5}$	395	$1,3611*10^{-4}$
N160-1	8	$6,1609*10^{-4}$	63	$1,4912*10^{-3}$

***Hızın sabit olmaya başladığı an** ****Hızın sabit değerden ilk sapmaya başladığı an**

Eşitlik 9.11'de ifade edilen ivme (a) denklemi yardımıyla bu kez herbir numunenin sünme ivme (a) davranışı belirlenmiştir. Bu analize tipik bir örnek N130-1 için Şekil 9.24'de sunulmuştur. Sünme ivme (a) grafiğinden görüldüğü üzere hızın (v) sabit olduğu yerde ivme (a) değeri sıfır olmaktadır. İvme (a) değerinin sıfır olduğu zaman aralığında 2. sünme aşamasının olması gerekmektedir. Şekil 9.24'de belirtilen zaman değerleri gibi diğer sünme deneylerine ait ivme analizleri yapılmış ve elde edilen ivme ve zaman değerleri Çizelge 9.4'de sunulmuştur.

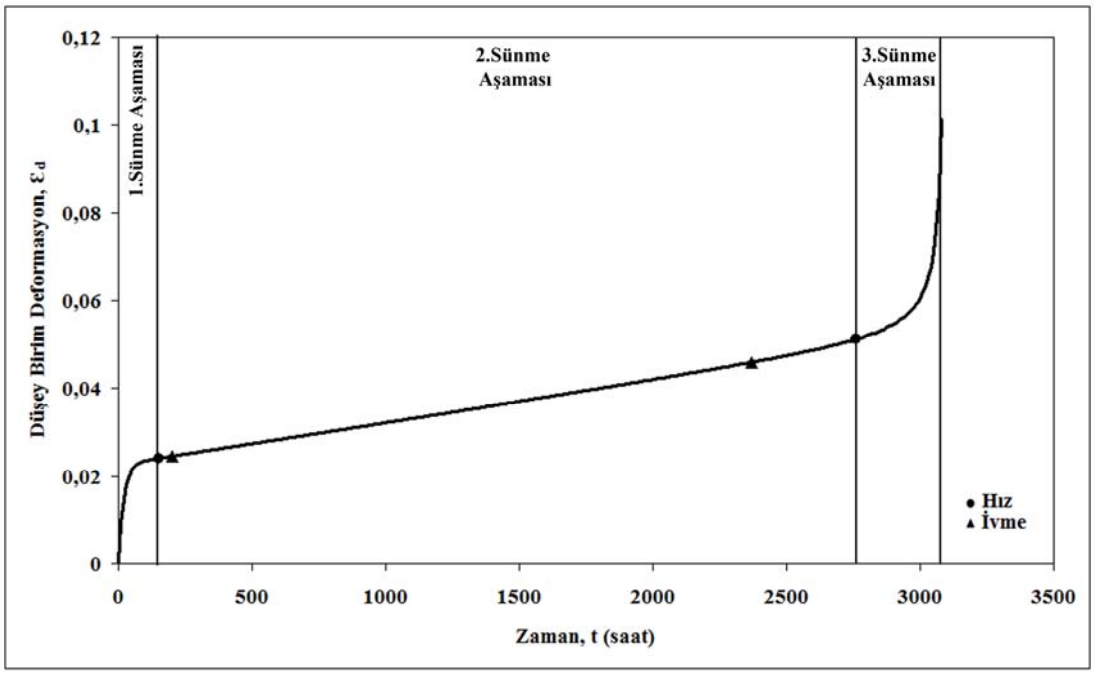


Şekil 9.24. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu N130-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme ivmesi davranışı

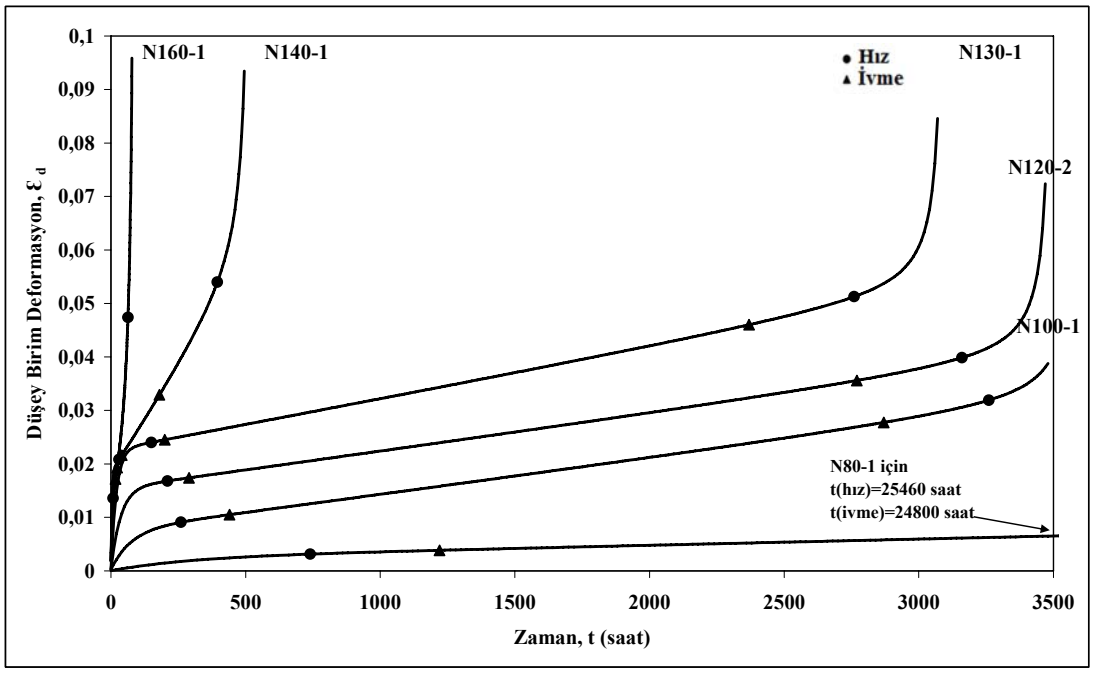
Çizelge 9.4. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzuna Ait Belirlenen ivmenin sıfır olduğu zaman aralıkları

Numune Adı	Aşama 1-2 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	İvme, a ($(d\varepsilon_d/dt)/dt$)	Aşama 2-3 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	İvme, a ($(d\varepsilon_d/dt)/dt$)
N80-1	1220	0	24800	0
N100-1	440	0	2870	0
N120-2	290	0	2770	0
N130-1	200	0	2370	0
N140-1	40	0	180	0
N160-1	16,5	0	22,5	0

Tipik olarak verilen N130-1 numunesi için Şekil 9.23 ve 9.24'den belirlenen zaman (t, saat) değerleri zaman-sünme davranış grafiğinde yerine konularak Şekil 9.25 hazırlanmıştır. Benzer çalışma diğer numuneler içinde yapılarak Şekil 9.26 hazırlanmıştır. Hız ve ivme analizi ile belirlenen değerler yerine konulduğunda hızın (v) sabit olduğu durum ve ivmenin (a) sıfır olduğu durum için belirlenen zaman (t, saat) değerlerinin örtüşmediği gözlemlenmiştir (Şekil 9.25 ve 9.26). Hızın (v) sabit olmaya başladığı an aslında eğrideki dönüşün başladığı, ivmenin sıfır olduğu an ise eğrideki dönüşün tamamlandığı ve doğrusal davranışın tamamen başladığı (Şekil 9.25; 1. ve 2. sünme aşaması geçiş noktası) yorumu yapılmıştır. Aynı şekilde 2. ve 3. sünme davranışlarının geçiş noktasının ivme (a) sıfırdan ilk sapması ile başladığı ve hızın (v) sabit değerden sapması ile tamamen 3. sünme aşamasına geçildiği söz konusudur yorumu yapılmıştır (Şekil 9.25 ve 9.26). Sonuç olarak sünme davranışının 1., 2. ve 3. aşamalarının geçiş noktalarının belirlenmesinde hız analizinden elde edilen sonuçların (Çizelge 9.3) kullanılmasına karar verilmiştir.



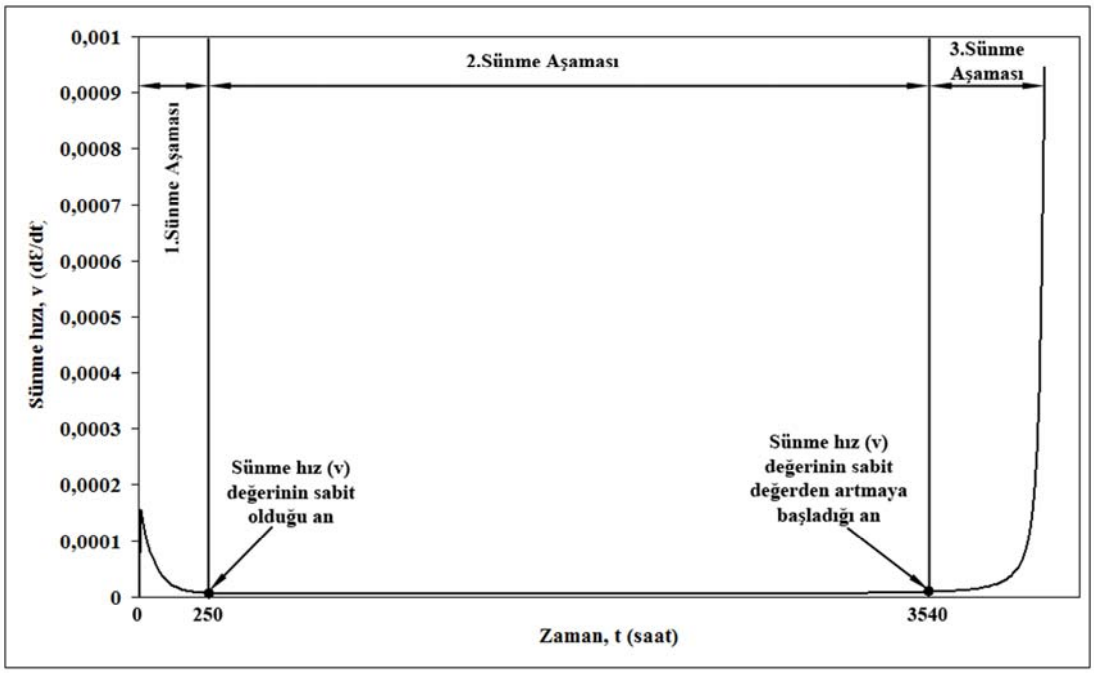
Şekil 9.25. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu N130-1 numunesine ait hız ve ivme grafiklerinden belirlenen 1., 2. ve 3. sünme aşamaları



Şekil 9.26. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numunelerine ait 1., 2.ve 3. sünme aşamaları

9.4.2. Çankırı kaya tuzuna ait hız ve ivme analizi

Çankırı kaya tuz sahasından temin edilen numunelere ait hız değişiminin görülmesi için Nevşehir-Gülşehir'de olduğu gibi Eşitlik 9.10 kullanılmıştır. Tipik bir zaman-sünme hız davranışı C100-1 numunesi için Şekil 9.27'de sunulmuştur. Şekil 9.27'de sunulan grafikten sünme hız değişimi incelenirse hız değişiminin sabit olduğu zaman aralığının 250-3540 saat olduğu görülmektedir. Şekil 9.27'den belirlenen zaman (t, saat) değerleri gibi Çankırı kaya tuzuna ait diğer sünme deneylerinden belirlenen zaman değerleri Çizelge 9.5'de sunulmuştur.



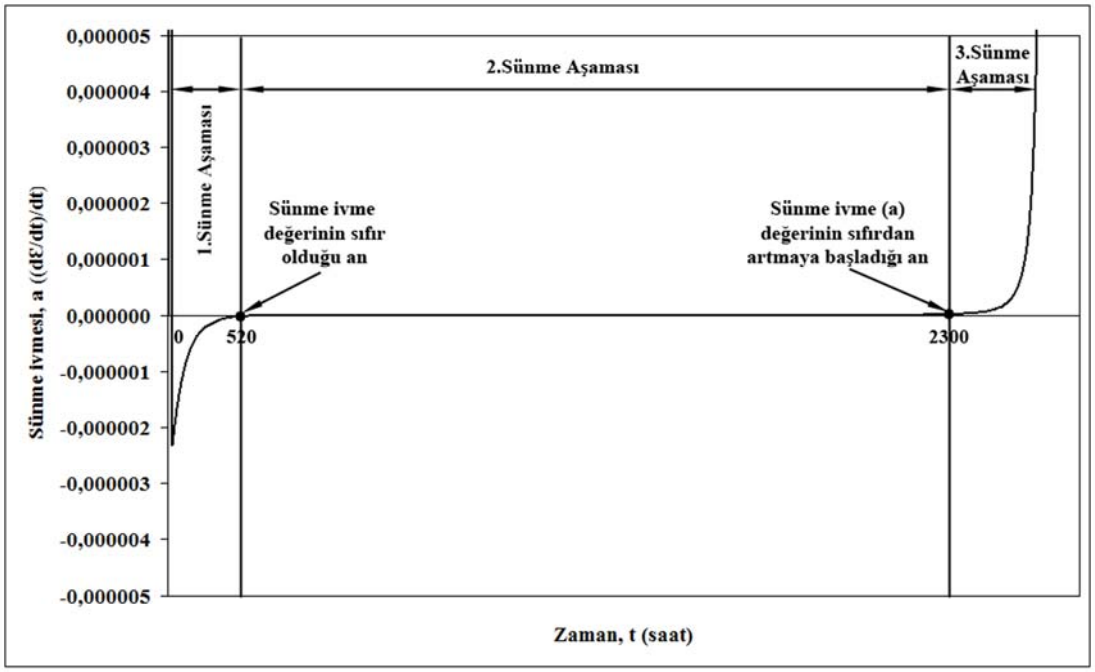
Şekil 9.27. Çankırı kaya tuzu C100-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme hızı davranışı

Çizelge 9.5. Çankırı kaya tuzuna ait belirlenen sabit hız değerleri

Numune Adı	Aşama 1-2 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	Hız, v^{*} ($d\varepsilon_d/dt$)	Aşama 2-3 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	Hız, v^{**} ($d\varepsilon_d/dt$)
C80-1	2200	$7{,}3599*10^{-7}$	22540	$7{,}6855*10^{-7}$
C95-1	440	$2{,}2608*10^{-6}$	4480	$3{,}2620*10^{-6}$
C100-1	250	$8{,}1038*10^{-6}$	3540	$1{,}3892*10^{-5}$
C110-1	360	$8{,}9721*10^{-6}$	6300	$1{,}3556*10^{-5}$
C115-1	0,05	0,0289	0,33	0,0543

*Hızın sabit olmaya başladığı an **Hızın sabit değerden ilk sapmaya başladığı an

Eşitlik 9.11'de ifade edilen ivme (a) denklemi yardımıyla bu kez herbir numunenin sünme ivme (a) davranışı belirlenmiştir. Bu analize tipik bir örnek Şekil 9.28'de C100-1 için sunulmuştur. Hızın (v) sabit olduğu yerde ivme (a) değerinin sıfır olduğu sünme ivme (a) grafiğinden görülmektedir. İvme (a) değerinin sıfır olduğu zaman aralığında 2. sünme aşamasının olması gerekmektedir. Şekil 9.28'de belirtilen zaman değerleri gibi diğer sünme deneylerine ait ivme analizleri yapılmış ve elde edilen ivme ve zaman değerleri topluca Çizelge 9.6'da sunulmuştur.

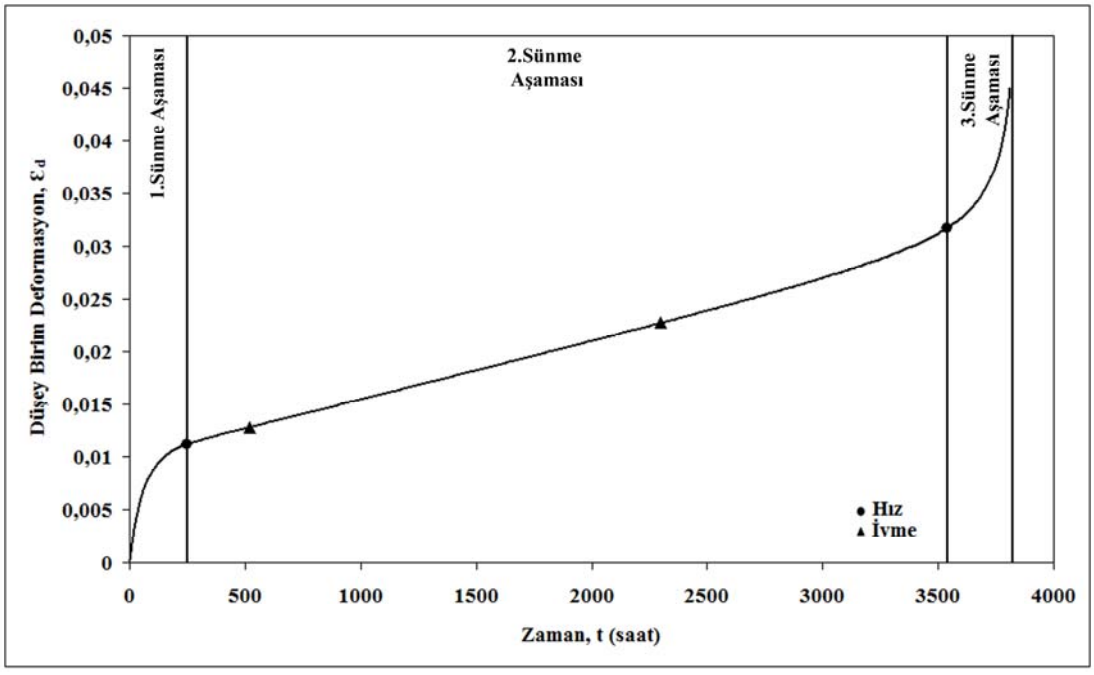


Şekil 9.28. Çankırı kaya tuzu C100-1 numunesine ait tipik bir zaman-sünme ivmesi davranışı

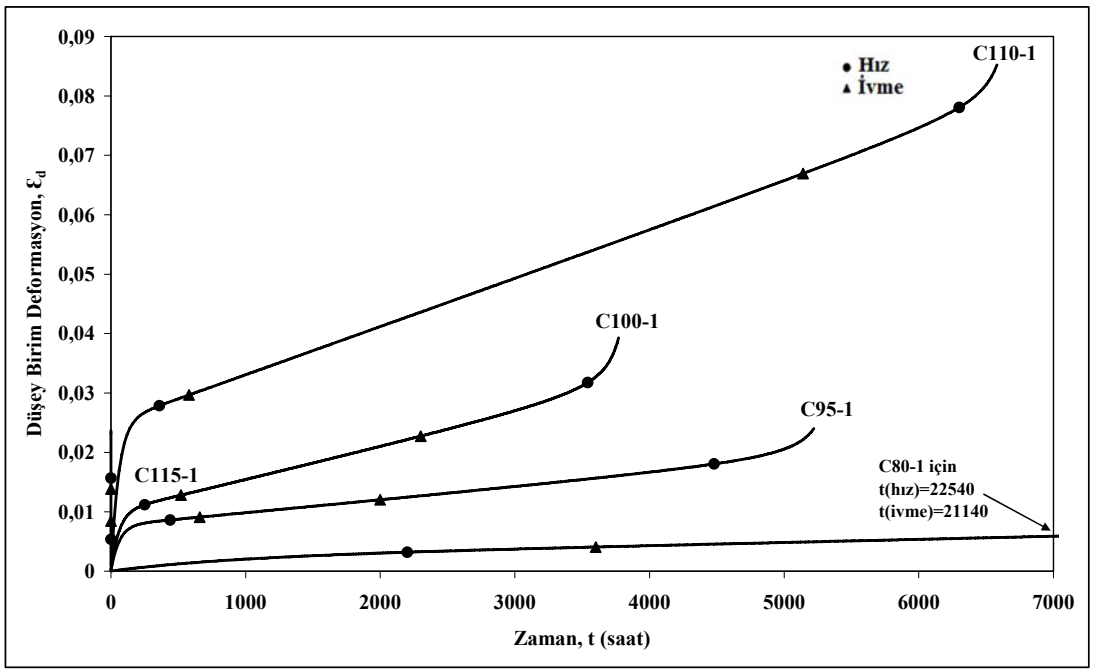
Çizelge 9.6. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait belirlenen ivmenin sıfır olduğu zaman aralıkları

Numune Adı	Aşama 1-2 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	İvme, a ($(d\varepsilon_d/dt)/dt$)	Aşama 2-3 için geçiş noktası Zaman, t (saat)	İvme, a ($(d\varepsilon_d/dt)/dt$)
C80-1	3600	0	21140	0
C95-1	660	0	2000	0
C100-1	520	0	2300	0
C110-1	580	0	5140	0
C115-1	0,1	0	0,3	0

C100-1 numunesi için tipik olarak hazırlanan Şekil 9.27 ve 9.28'den belirlenen zaman (t, saat) değerleri zaman-sünme davranış grafiğinde yerine konularak Şekil 9.29 hazırlanmıştır. Diğer numuneler için de benzer çalışma yapılarak Şekil 9.30 hazırlanmıştır. Şekil 9.30'da sunulan grafikten hızın (v) sabit olduğu durum ve ivmenin (a) sıfır olduğu durum için belirlenen zaman (t, saat) değerlerinin örtüşmediği gözlemlenmiştir (Şekil 9.29). Hızın (v) sabit olmaya başladığı anda aslında eğrideki dönüş başlamakta, ivmenin sıfır olduğu anda ise eğrideki dönüş tamamlanmakta ve böylece doğrusal davranış başlamaktadır (Şekil 9.29; 1. ve 2. sünme aşaması geçiş noktası). Aynı şekilde 2. ve 3. sünme davranışlarının geçiş noktasının ivmenin (a) sıfırdan ilk sapması ile başladığı ve hızın (v) sabit değerden sapması ile tamamen 3. sünme aşamasına geçildiği varsayılmıştır (Şekil 9.29 ve 9.30). Değerlendirme sonucunda sünme davranışının 1., 2. ve 3. aşamalarının geçiş noktalarının belirlenmesinde hız analizinden elde edilen sonuçların (Çizelge 9.5) kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 9.29. Çankırı kaya tuzu C100-1 numunesine ait hız ve ivme grafiklerinden belirlenen 1., 2. ve 3. sünme aşamaları



Şekil 9.30. Çankırı kaya tuzu numunelerine ait 1., 2.ve 3. sünme aşamaları

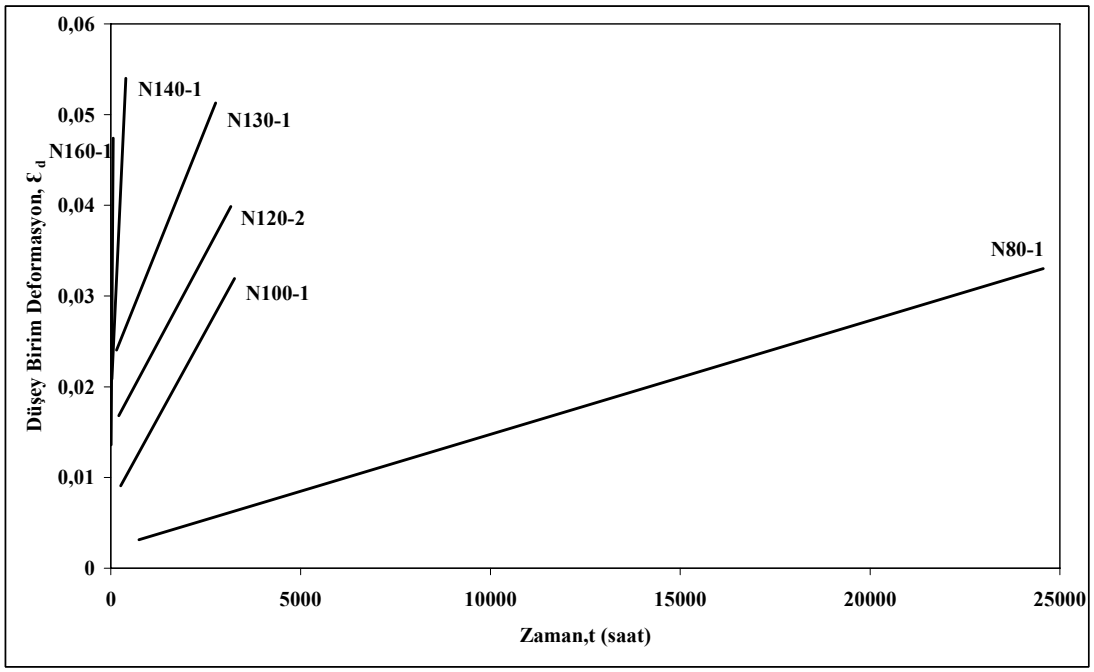
9.5 Matematiksel Model Yardımıyla Belirlenen Tasarım Parametreleri

Oldukça zahmetli ve uzun zaman alıcı sünme deneylerinin gerçekleştirlmesi tasarım mühendisleri için olumsuz bir durum arzetmektedir. Bu doktora tez çalışması yardımıyla belirlenen veri tabanı ve matematiksel model kullanılarak söz konusu olan maden sahalarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışmaları aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

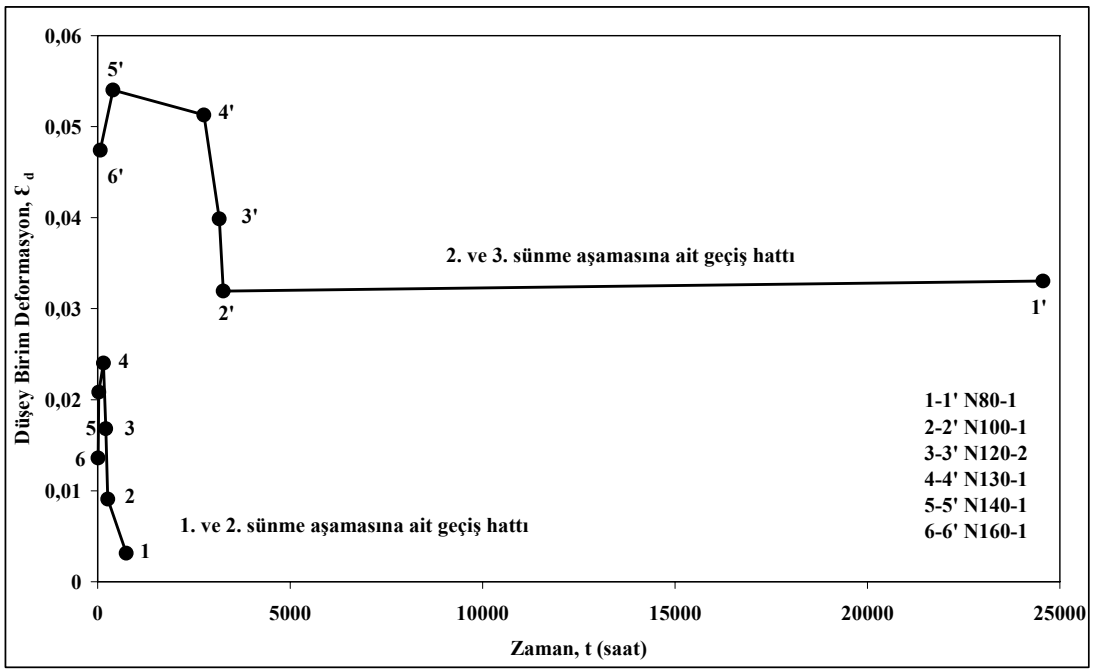
9.5.1. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzuna ait tasarım parametreleri

Matematiksel model (Eşitlik 9.9) yardımıyla geliştirilen Eşitlik 9.10 ve Eşitlik 9.11 ile her bir deney koşulu için gerçekleştirilen hız ve ivme analizleri sonucunda 1., 2. ve 3. sünme aşamalarına ait geçiş noktaları belirlenebilmiştir. Ancak bölüm 9.4.1 ve bölüm 9.4.2'de değinilen nedenden dolayı bu doktora tezinde sadece hız

analizi sonucunda belirlenen zaman (t, saat) değerleri dikkate alınmıştır. Her bir deney numunesi için belirlenen sünme aşamaları arasındaki geçiş noktalarını tanımlayan zaman (t,saat) (Çizelge 9.3) verileri sünme davranış eğrileri üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 9.26). Sünme davranışının 2. aşaması önemsendiği için bu davranışın sadece başlangıç ve bitiş noktaları Şekil 9.31'de işaretlenmiştir. Grafikten görüldüğü üzere sabit gerilme değeri düştükçe 2.sünme aşamasına doğrusal davranışın eğimi azalmaktadır. 2.sünme aşamasının sadece bitiş noktaları ile başlangıç noktaları dikkate alınırsa bunların Şekil 9.32'deki gibi sıralandığı görülmektedir. Yüksek sabit gerilme (σ_s) değerlerinden itibaren sabit gerilme değeri düştükçe parabolik bir davranış ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9.31. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerindeki 2. sünme davranışı



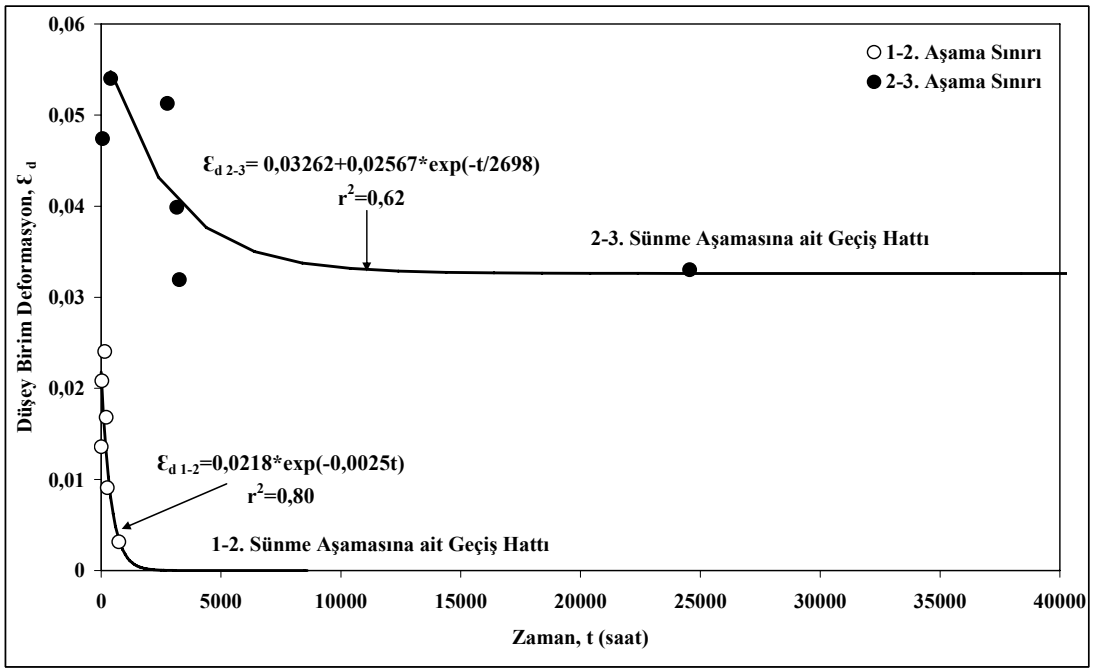
Şekil 9.32. Nevşehir-Gülşehir Kaya Tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerinde 2. sünme aşamasına ait başlangıç ve bitiş noktaları

Şekil 9.32'de ifade edilen sınır hatlarının arasında 2.sünme aşaması gelişmektedir. Bu tez çalışmasında denenen sabit gerilme değerleri dışındaki herhangi bir sabit gerilme değerlerinde de 2. sünme aşamasının bu sınır hatları arasında oluşması beklenmelidir. Bu durumda "Acaba deney yapılmaksızın herhangi bir sabit gerilme koşulu için 2.sünme eğrisi belirlenebilir mi?" sorusuna cevap bulunmaya çalışılmıştır. Deneysel verilerden ve yukarıda değinilen grafiklerden (Şekil 9.31 ve 9.32) aşağıda sunulan Çizelge 9.7 hazırlanmıştır.

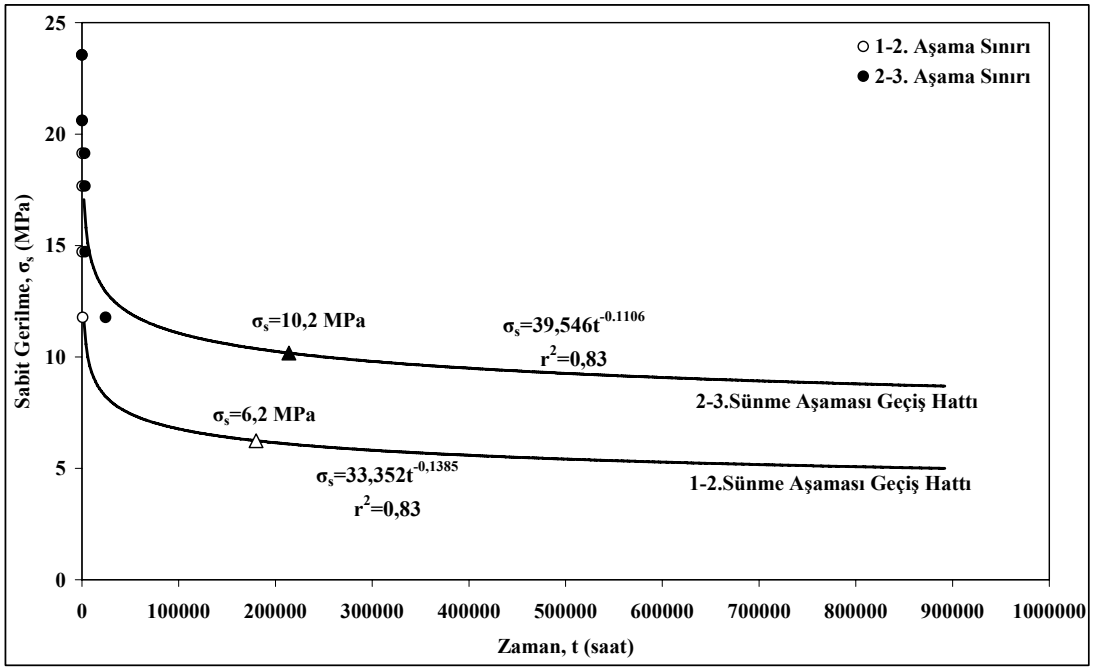
Çizelge 9.7'de sunulan 3 no'lu sütuna karşılık 4 no'lu sütun verisi ve de 7 no'lu sütuna karşılık 8 no'lu sütun verisi kullanılarak Şekil 9.33'deki grafik hazırlanmıştır. Deney verileri kullanılarak 2. ve 3. aşama geçiş hattına ve 1. ve 2. sünme aşama geçiş hattına ait matematiksel eşitlikler bulunarak Şekil 9.33'de gösterilmiştir.

Çizelge 9.7'de belirtilen 3 no'lu sütuna karşılık 2 no'lu sütun verisi yardımıyla Şekil 9.34 hazırlanmıştır. Aynı grafiğe 7 no'lu sütuna karşılık 6 no'lu sütun verisi de eklenmiştir. Böylece 1. ve 2. aşama geçiş hattı ve de 2. ve 3. aşama geçiş hattı için zaman (t)-sabit gerilme (σ_s) eğrileri elde edilmiştir. Şekil 9.34'de görülen deney

verileri kullanılarak elde edilen matematiksel eşitlik ve bunun eğrisi aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Buradan her iki eğrinin zaman eksenine asimptot olduğu anda y-ekseninden belirlenen gerilme değerleri önemli iki tasarım çıktısı olacaktır. Üst eğriden (2. ve 3. sünme aşama geçiş hattı) σ_S=10,2 MPa, alt eğriden (1. ve 2. sünme aşamasına geçiş hattı) σ_s=6,2 MPa okunabilmektedir. Burada ifade edilen σ_S=10,2 MPa sabit gerilme değerinde eğer bir sünme deneyi gerçekleştirilirse bu deney için 1.sünme ve 2.sünme aşaması gerçekleşecek ancak 3.sünme aşamasına hiçbir zaman geçiş olmayacaktır. Bu durumda ikinci aşama doğrusunun eğimi sıfırdan farklı olacaktır. Grafikten belirlenen diğer gerilme σ_S=6,2 MPa sabit gerilmesi altında eğer bir sünme deneyi gerçekleştirilirse bu takdirde 1.sünme aşaması sonrasında oluşacak 2.sünme aşamasının eğimi sıfır olacak ve hiç bir zaman 3. sünme aşamasına geçiş olmayacaktır. O halde bu iki sabit gerilme değerine (σ_S=10,2 MPa, σ_S=6,2 MPa) ait sünme deneyleri için beklenen 2. sünme aşamasını yansıtan doğrusal eğriler nasıl oluşacaktır. Bu sorunun cevabını bulmak amacıyla aşağıda sunulan analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9.33 Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için aşamalar arasında geçiş hattı

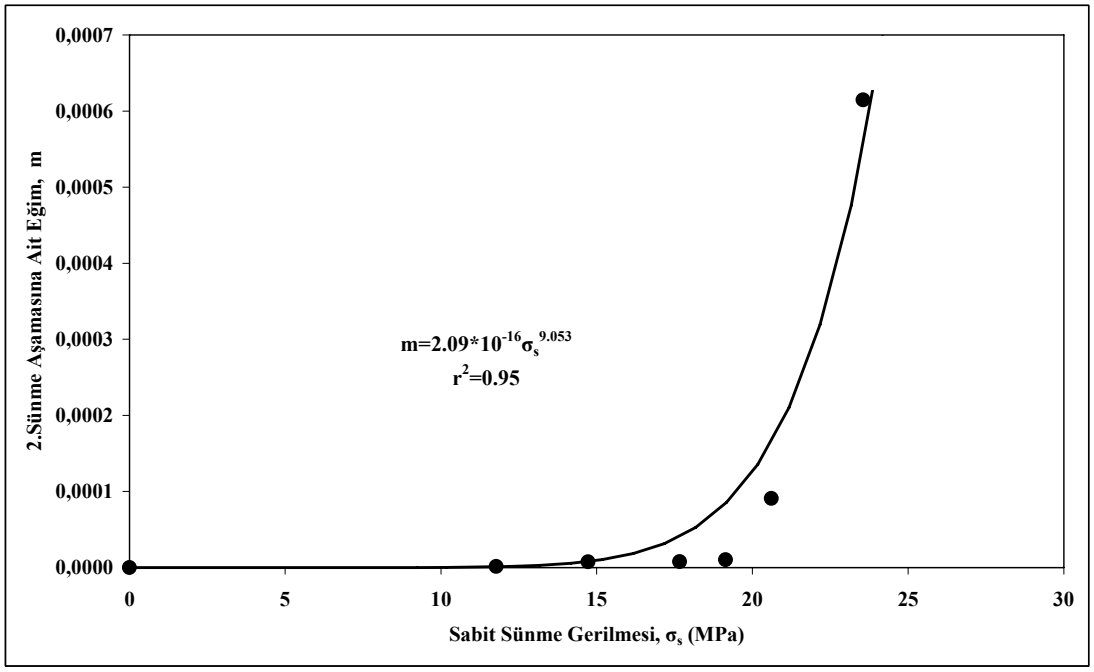


Şekil 9.34. Sünme gerilmesi (σ_S) değerinin zamana bağlı değişimi

Çizelge 9.7. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için parametrik analiz verisi

Numune Adı	1-2. aşama geçiş hattı (Şekil 9.31, Çizelge 9.3)				2-3. aşama geçiş hattı (Şekil 9.31,Çizelge 9.3)				2.Aşamaya ait eğim, m (Şekil 9.31'den)
	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)	t (saat)	$\varepsilon_{d\ 1-2}$	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)	t (saat)	$\varepsilon_{d\ 2-3}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N80-1	26,5	11,777	740	0,003144407	26,5	11,777	25460	0,033033321	0,0000013
N100-1	26,5	14,721	260	0,009097711	26,5	14,721	3260	0,031930639	0,0000076
N120-2	26,5	17,665	210	0,016818623	26,5	17,665	3160	0,039876158	0,0000078
N130-1	26,5	19,138	150	0,024036538	26,5	19,138	2760	0,051283327	0,0000104
N140-1	26,5	20,609	30	0,020836562	26,5	20,609	395	0,054016805	0,0000909
N160-1	26,5	23,554	8	0,013598096	26,5	23,554	63	0,04741267	0,0006148

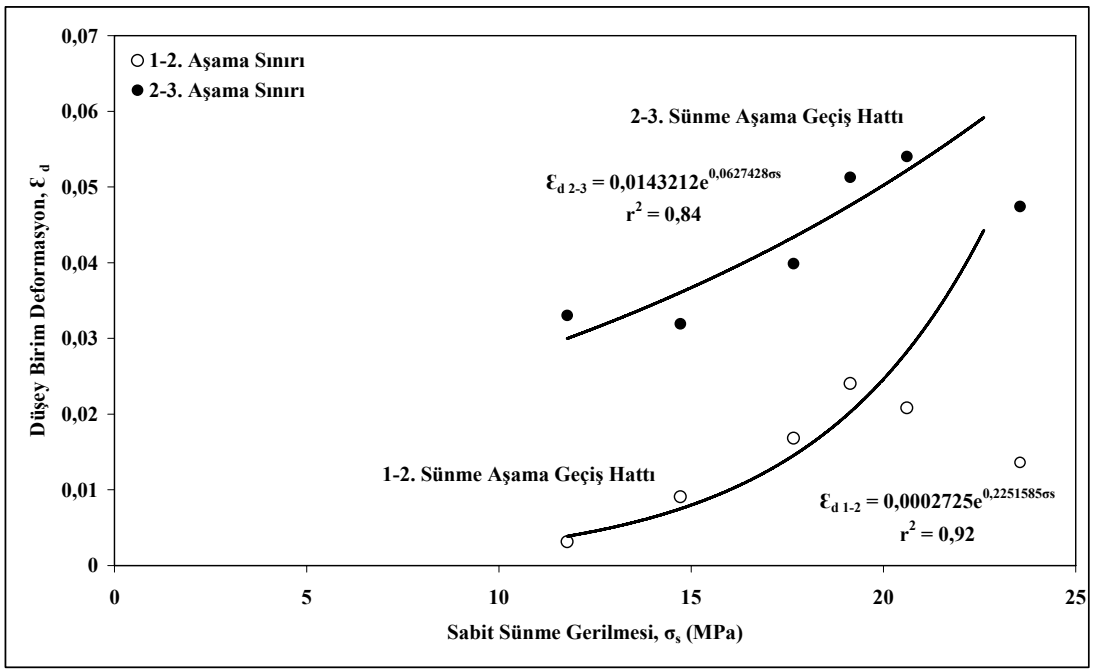
Çizelge 9.7'de sunulan 2. veya 6. sütunda sunulan sünme gerilmesi (σ_S) ile 9. sütunda bulunan eğim (m) kullanılarak Şekil 9.35 hazırlanmıştır. Burada 9. sütunda sunulan eğim değerleri, Şekil 9.31'de görülen 2. aşama için sünme davranışına ait doğruların eğim değerleridir. Şekil 9.35'den görüldüğü üzere, sabit sünme gerilme değeri (σ_s) azaldıkça beklenen sünme davranışının 2. sünme aşamasına ait doğrunun ağimi azalmaktır. Eğer Şekil 9.34'den belirlenen σ_S=10,2 MPa ve σ_S=6,2 MPa değerleri Şekil 9.35'den bulunan eşitlikte kullanılırsa her iki gerilme değeri ile oluşacak sünme davranışının 2. aşamalarına ait eğim değerleri bulunabilecektir. Söz konusu olan iki farklı kritik sünme gerilmesi (σ_S) için Şekil 9.35'den bulunan eğim değerleri sırasıyla σ_S=10,2 MPa için m= 0,000000276530 ve σ_S=6,2 MPa için m=0,000000003308'dir.



Şekil 9.35. Sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile 2.sünme esnasında ortaya çıkan doğrusal davranışa ait eğim (m) değerleri arasındaki ilişki

Şekil 9.34'den belirlenen kritik gerilme (σ_S) değerlerine ait 2.sünme aşamasını tanımlayan eğim değerleri Şekil 9.35'den belirlenmiştir. Ancak belirlenen bu eğim

değerlerine ait doğrular (2. sünme aşaması) Şekil 9.33'e yerleştirilmek istenirse 2. sünme aşamasının başlangıç ve bitiş noktalarını tanımlayan koordinat noktalarının (zaman, düşey birim deformasyon) ayrıca belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Çizelge 9.7'deki 2.sütuna karşılık 4.sütun verilerinden ve 6.sütun değerlerine karşı 8.sütun değerlerinden oluşan bir grafik hazırlanmıştır (Şekil 9.36). Sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile düşey birim deformasyon davranışı, 1. ve 2. sünme aşama geçiş hattı ve 2. ve 3. sünme aşama geçiş hattı için ayrı ayrı matematiksel eşitlik ile ifade edilmiştir. Şekil 9.34'den belirlenen 10,2 MPa ve 6,2 MPa sünme gerilme değerleri için 3. sünme aşaması oluşmayacağından Şekil 9.36'da sunulan 2. ve 3. sünme aşamasına ait geçiş hattı eşitliğinin kullanılmasına gerek yoktur. Şekil 9.36'da sunulan bu eşitlikler kullanılarak σ_S=6,2 MPa ve σ_S=10,2 MPa için başlangıç düşey birim deformasyon değerleri belirlenebilmektedir. Bu belirtilen çalışmanın neticesinde σ_s=10,1 MPa için ve σ_s=6,2 MPa için sırasıyla düşey birim deformasyon (ε_d) değerleri 0,02694186 ve 0,001110819 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Şekil 9.33'de verilerin yerleştirilmesi ve ilgili sünme davranışına ait 2. sünme doğrusunun çizilebilmesi için gerekli olan bilgilerden sadece zaman (t, saat) değerleri belirlenememiştir. Bu aranan değerin belirlenmesinde Şekil 9.33'deki eşitliklerden 1. ve 2. sünme aşamasına ait geçiş hattına ait eşitlik ($\varepsilon_{1\text{-}2}$) kullanılabilir. Bu eşitlikte Şekil 9.36'dan bulunan her iki düşey birim deformasyon değeri (0,001110819 ve 0,002694186) kullanılarak ilgili zaman (t-saat) değerleri 836 ve 1190 saat olarak belirlenebilir.



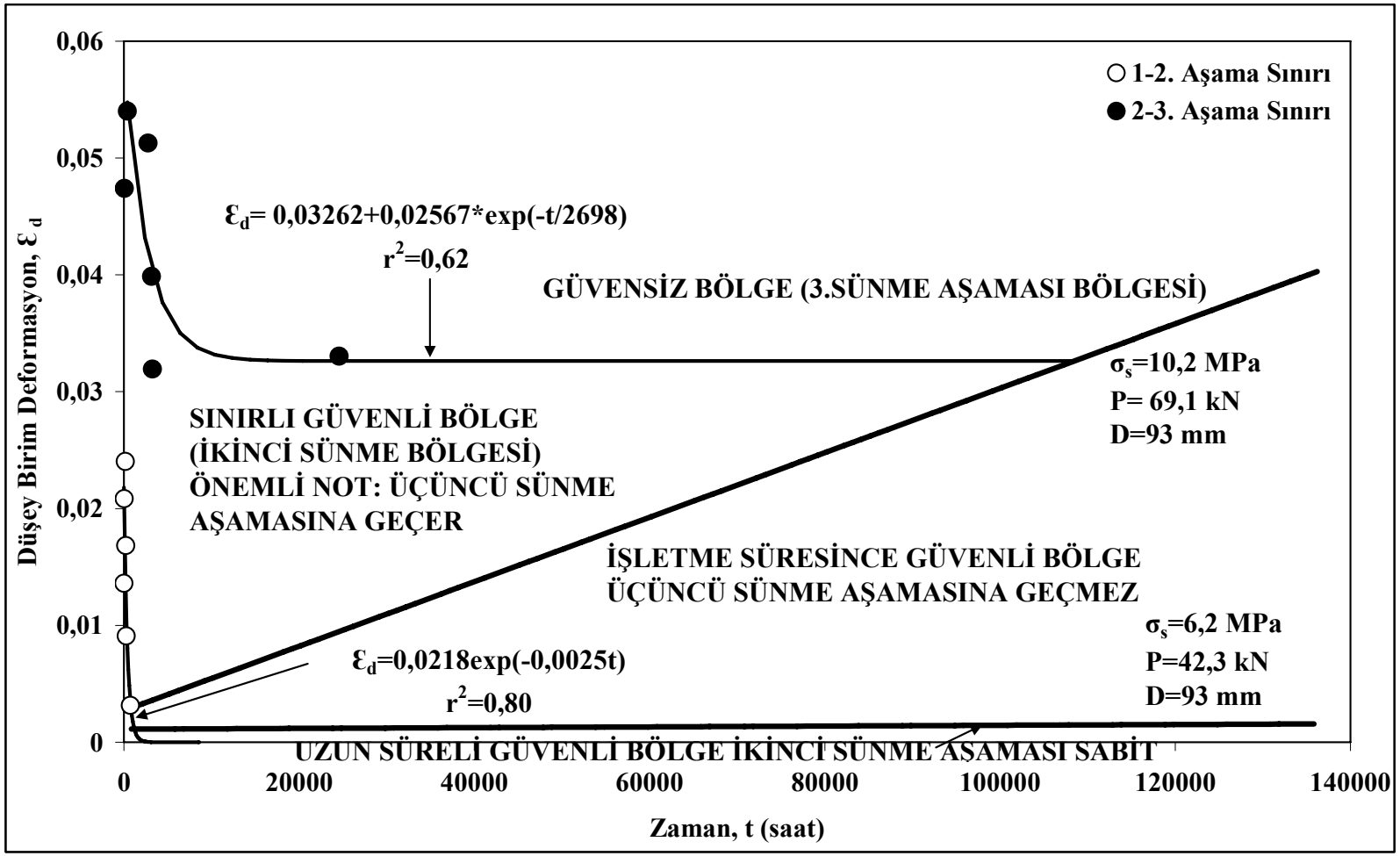
Şekil 9.36. sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile düşey birim deformasyon (ε_d) değerlerinin sünme aşama hattı için değerlendirilmesi

Sonuç olarak Şekil 9.33, 9.34, 9.35 ve 9.36 kullanılarak belirlenen parametrik değerler topluca aşağıdaki Çizelge 9.8'de sunulmuştur.

Çizelge 9.8. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için tasarım amaçlı belirlenen parametrik değerler

İşlem Sıra No	Parametre	Sembol Birim	Sayısal Değer	Sayısal Değer
1	Şekil 9.34'dan kritik sünme gerilmesi	σ_S (MPa)	6,2	10,2
2	Şekil 9.35'den 2. sünme aşama eğimi	m	0,000000003308	0,000000276530
3	Şekil 9.36'dan 1. ve 2. sünme geçiş hattı eşitliğinden düşey birim deformasyon	ε_{d1-2}	0,001110819	0,002694186
4	Şekil 9.33'den 1. ve 2. sünme geçiş hattı eşitliğinden zaman	t (saat)	1190	836
5	2.sünme aşamasına ait doğrusal denklem	$\varepsilon_{d2} = \varepsilon_{d1-2} + mt$	0,001110819+0,000000003308*t $t \geq 1190$	0,002694186+0,000000276530*t $t \geq 836$

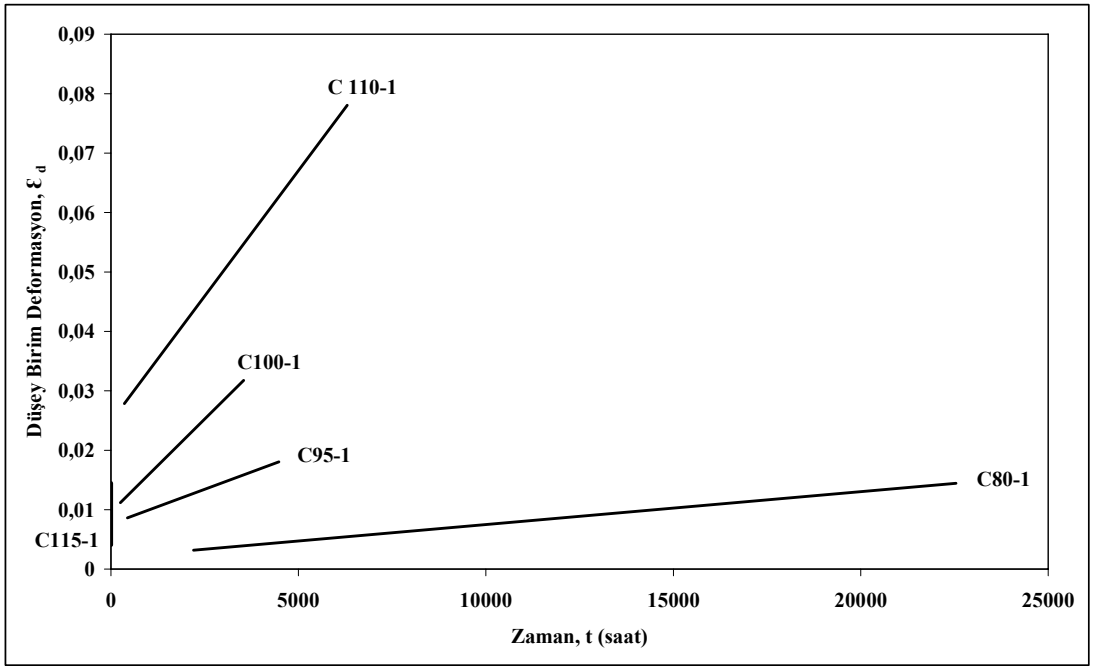
Çizelge 9.8'de topluca sunulan veriler Şekil 9.37'de yerleştirilmiştir. σ_S=10,2 MPa sabit gerilmesine ait sünme davranışının 2. sünme aşaması ile σ_S=6,2 MPa sabit gerilmesine ait 2. sünme aşamasına ait doğrusal davranış Şekil 9.36'da görülmektedir. Sabit gerilme (σ_S) değeri, eğer 10,2 MPa değerinin üzerine çıkarsa 1., 2. ve 3. sünme aşamaları gözlenecektir. Eğer sabit sünme gerilmesi (σ_S) 10,2 MPa'ın altına düşürülürse 1. ve 2. sünme aşamaları gözlenecek ama hiç bir zaman 3. aşama sünme yaşanmayacaktır. Sabit gerilme değeri (σ_S) 6,2 MPa'ın altına düşürülürse o vakit 1. ve 2. sünme aşaması yaşanacak ancak 2. sünme aşamasına ait doğrunun eğimi (m) sıfır olacak ve yine hiçbir zaman 3. aşamaya geçilmeyecektir. Şekil 9.37'de belirlenen bu önemli aralıklar gösterilmiş ve tanımlanmıştır. Sonuç olarak Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu sahası için tasarım mühendisinin, sabit gerilme değeri için $\sigma_S \leq$10,2 MPa koşulunu dikkate alması önerilebilir. Bu değer TEBD (σ_c=26,5 MPa)'ın yaklaşık % 38,4'üne karşılık gelmektedir.



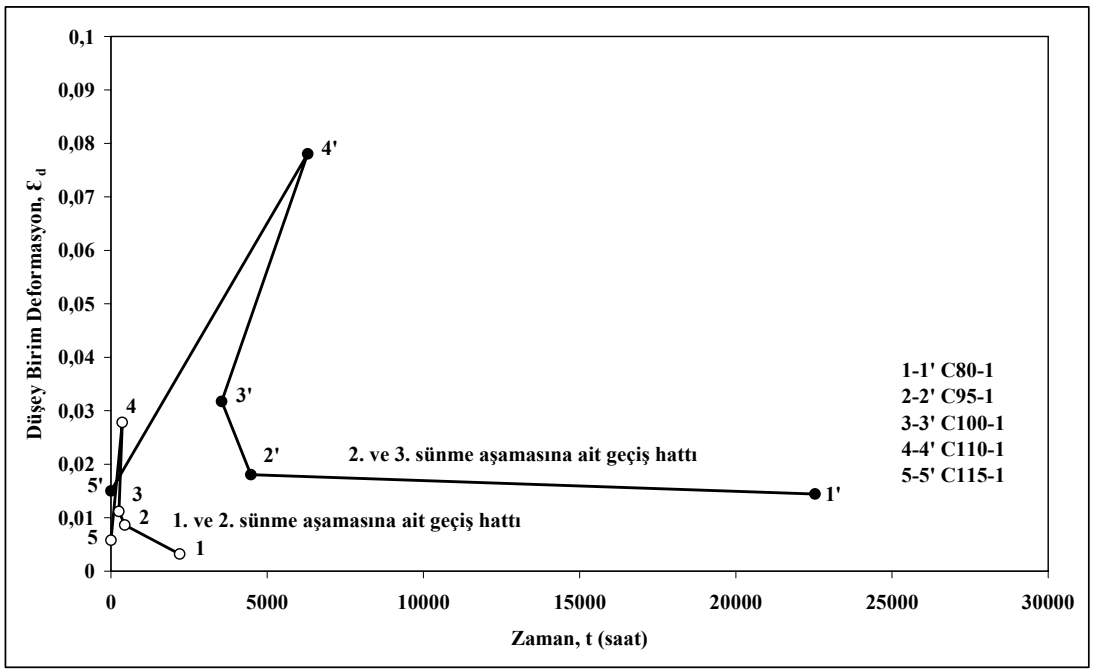
Şekil 9.37. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için tasarım önerisi

9.5.2. Çankırı kaya tuzuna ait tasarım parametreleri

Bölüm 9.5.1'de Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için olduğu gibi Çankırı numunelerinde de hız analizi sonucunda belirlenen zaman (t,saat) değerleri dikkate alınmıştır. Her bir deney numunesi için belirlenen sünme aşamaları arasındaki geçiş noktalarını tanımlayan zaman (t,saat) (Çizelge 9.5) verileri sünme davranış eğrileri üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 9.26). Sünme davranışının 2. aşaması önemsendiği için bu davranışın sadece başlangıç ve bitiş noktaları Şekil 9.38'de işaretlenmiştir. Grafikten görüldüğü üzere sabit gerilme değeri düştükçe 2.sünme aşamasına doğrusal davranışın eğimi azalmaktadır. 2.sünme aşamasının bitiş noktaları ile başlangıç noktaları dikkate alınırsa bunların Şekil 9.39'daki gibi sıralandığı görülmektedir. Yüksek sabit gerilme (σ_s) değerlerinden itibaren sabit gerilme değeri düştükçe parabolik bir davranış ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9.38. Çankırı kaya tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerindeki 2. sünme davranışı



Şekil 9.39. Çankırı kaya tuzuna ait farklı sabit gerilme değerlerinde 1. ve 2. sünme aşamasına geçişe ait sınır hattı

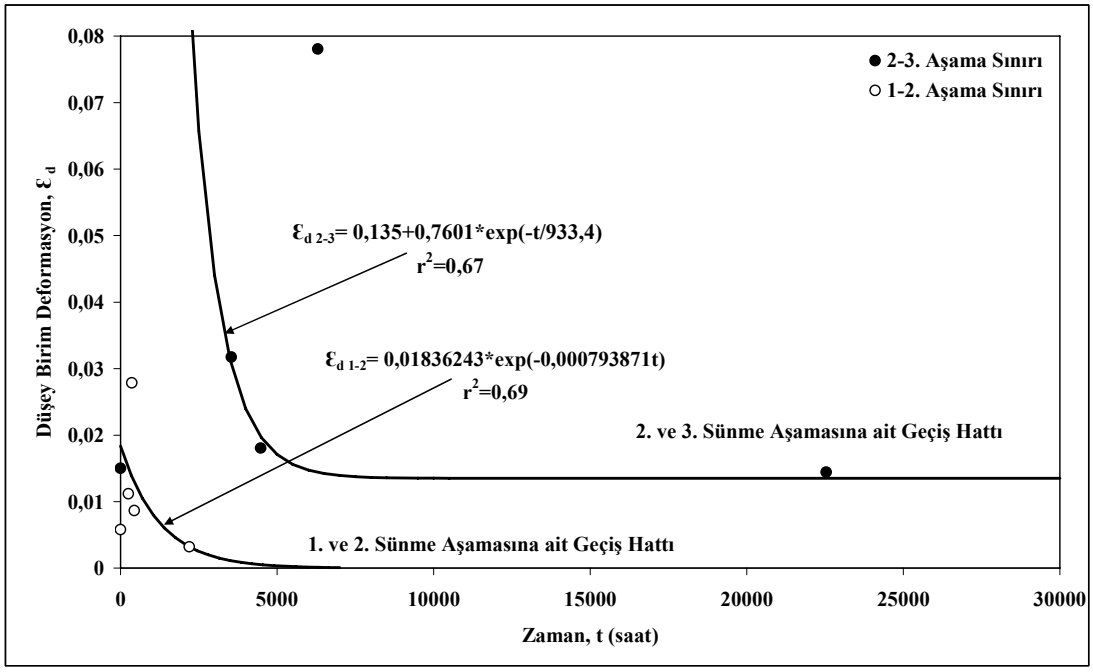
Şekil 9.39'da ifade edilen sınır hatlarının arasında 2. sünme aşaması gelişmektedir. Bu doktora tez çalışmasında denenen sabit gerilme değerleri dışındaki herhangi bir sabit gerilme değerinde de, 2. sünme aşamasının bu sınır hatları arasında oluşması beklenmelidir. Bu durumda "Deneyi yapılmaksızın acaba herhangi bir sabit gerilme koşulu için 2.sünme eğrisi belirlenebilir mi?" sorusuna yanıt bulabilmek amacıyla aşağıda sunulan Çizelge 9.9 hazırlanmıştır.

Şekil 9.40, Çizelge 9.9'da sunulan 3 no'lu sütuna karşılık 4 no'lu sütun verisi ve de 7 no'lu sütuna karşılık 8 no'lu sütun verisi kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 9.40'da deney verileri kullanılarak 2. ve 3. aşama geçiş hattına ve 1. ve 2. sünme aşama geçiş hattına ait matematiksel eşitlikler bulunarak gösterilmiştir.

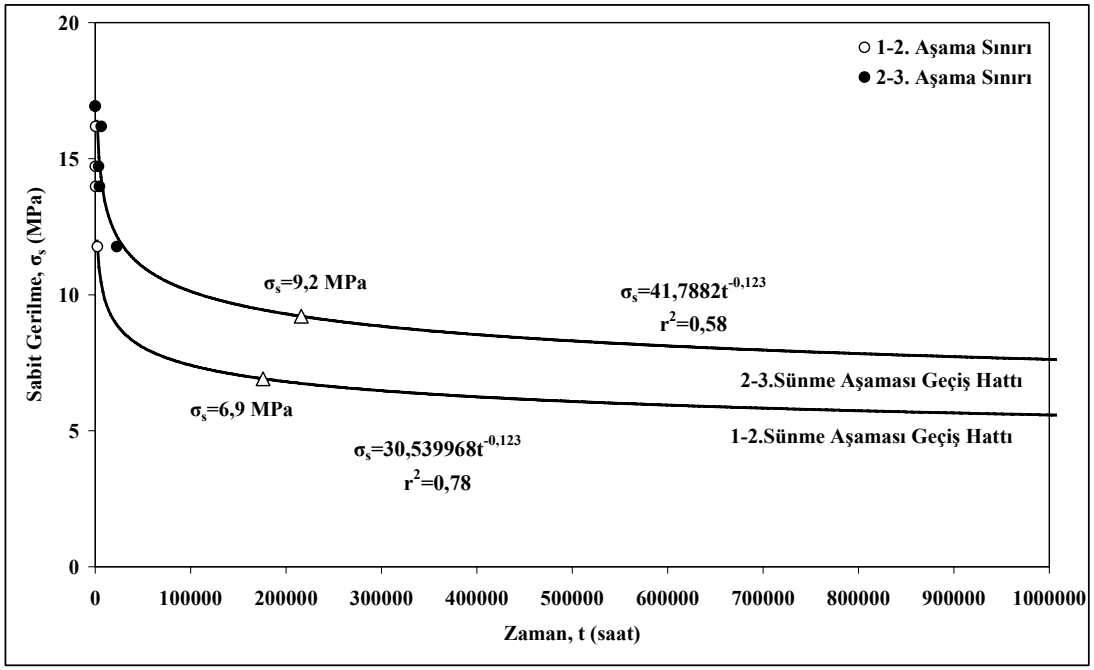
Çizelge 9.9. Çankırı kaya tuzu için parametrik analiz verisi

Numune Adı	1-2. aşama geçiş hattı (Şekil 9.38 ve Çizelge 9.5)				2-3. aşama geçiş hattı (Şekil 9.38 ve Çizelge 9.5)				2.Aşamaya ait eğim, m (Şekil 9.38'den)
	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)	t (saat)	$\varepsilon_{d\ 1-2}$	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)	t (saat)	$\varepsilon_{d\ 2-3}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C80-1	18,416	11,77	2200	0,003202	18,416	11,77	22540	0,014434	0,0000005522
C95-1	18,416	13,98	440	0,008636	18,416	13,98	4480	0,018060	0,0000023328
C100-1	18,416	14,72	250	0,011187	18,416	14,72	3540	0,03174	0,0000062494
C110-1	18,416	16,19	360	0,027849	18,416	16,19	6300	0,078058	0,0000084529
C115-1	18,416	16,93	0,05	0,004057	18,416	16,93	0,33	0,014469	0,0372

Çizelge 9.9'da belirtilen 3 no'lu sütuna karşılık 2 no'lu sütun verisi ve 7 no'lu sütuna karşılık 6 no'lu sütun verisi yardımıyla Şekil 9.41 hazırlanmıştır. Böylece 1. ve 2. aşama geçiş hattı ve de 2. ve 3. aşama geçiş hattı için zaman (t)-sabit gerilme (σ_s) eğrileri elde edilmiştir. Şekil 9.41'de işaretlenen deney verileri kullanılarak elde edilen matematiksel eşitlik ve eğrisi gösterilmiştir. Buradan her iki eğrinin zaman eksenine asimptot olduğu anda y-ekseninden belirlenen gerilme değerleri önemli iki tasarım çıktısı olacaktır. 2. ve 3. sünme aşama geçiş hattı olan üst eğriden σ_S=9,2 MPa, 1. ve 2. sünme aşamasına geçiş hattı olan alt eğriden σ_s=6,9 MPa değerleri okunabilmektedir. Şekil 9.41'den belirlenen σ_S=9,2 MPa sabit gerilme değerinde eğer bir sünme deneyi gerçekleştirilirse bu deney için 1.sünme ve 2.sünme aşaması oluşacak fakat 3.sünme aşamasına hiçbir zaman geçiş olmayacaktır. Grafikten belirlenen diğer gerilme σ_S=6,9 MPa sabit gerilmesi altında eğer bir başka sünme deneyi gerçekleştirilirse bu takdirde 1.sünme aşaması sonrasında oluşacak 2.sünme aşamasının eğimi sıfır olacak ve hiç bir zaman 3. sünme aşamasına geçiş olmayacaktır. Bu durumda belirlenen bu iki sabit gerilme değerine (σ_S=9,2 MPa, σ_S=6,9 MPa) ait sünme deneyleri için 2. sünme aşamasını yansıtan doğrusal eğriler Şekil 9.39'da görülen bu iki sınır aralığında nasıl oluşacak sorusuna cevap aranmalıdır.

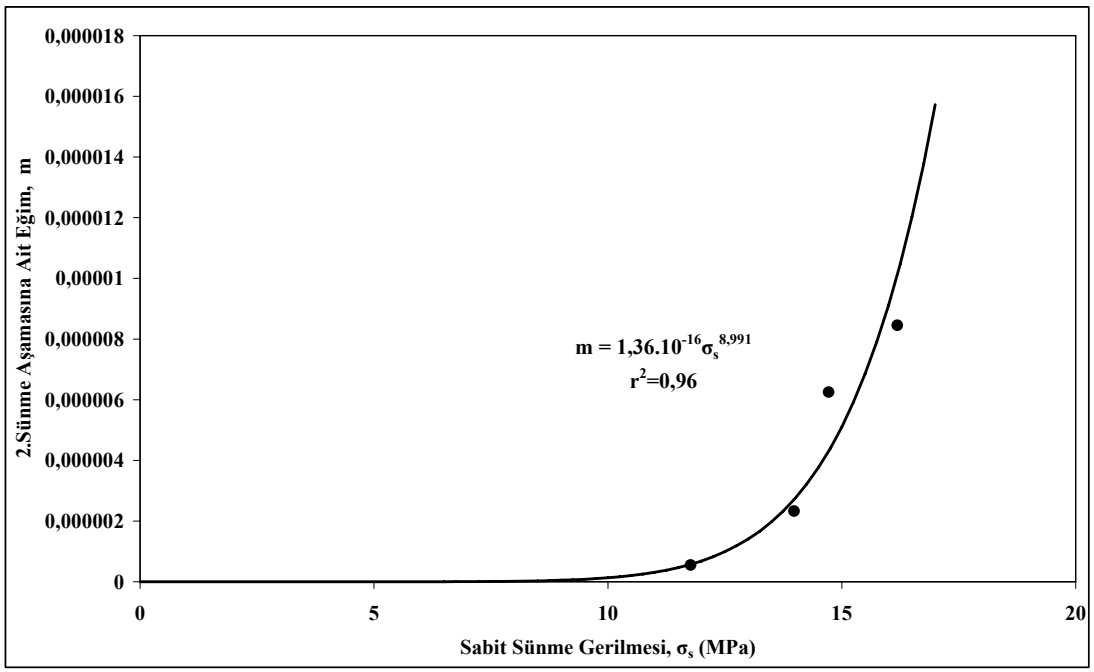


Şekil 9.40 Çankırı kaya tuzu için aşamalar arasında geçiş hattı



Şekil 9.41. Sünme gerilmesi (σ_S) değerinin zamana bağlı değişimi

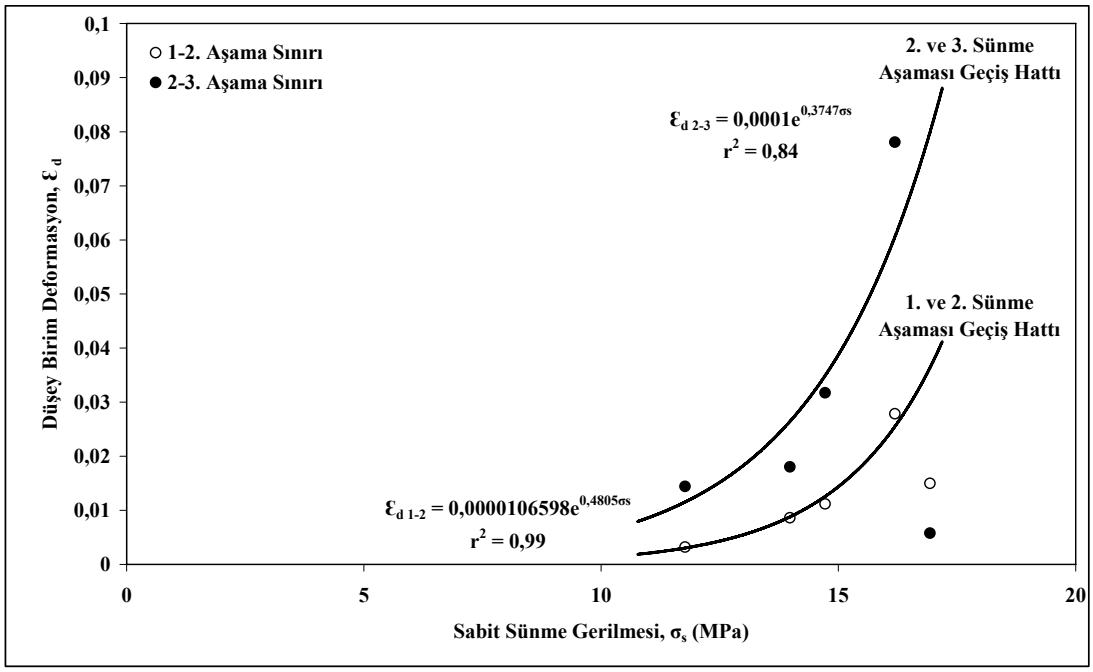
Şekil 9.42, Çizelge 9.9'da sunulan 2. veya 6. sütunda sunulan sünme gerilmesi (σ_S) ile 9. sütunda bulunan eğim (m) kullanılarak hazırlanmıştır. Burada 9. sütunda sunulan eğim değerleri, Şekil 9.38'de görülen 2. aşamaya ait sünme davranışına ait doğruların eğim değerleridir. Sünme gerilme değeri azaldıkça beklenen sünme davranışının 2. sünme aşamasına ait doğrunun eğiminin azaldığı Şekil 9.42'den görülmektedir. Eğer Şekil 9.41'den belirlenen σ_S=9,2 MPa ve σ_S=6,9 MPa değerleri Şekil 9.42'den bulunan eşitlikte kullanılırsa o takdirde her iki gerilme değeri sonucu oluşacak sünme davranışının 2. aşamalarına ait eğim değerleri bulunabilecektir. Söz konusu olan iki farklı kritik sünme gerilmesi (σ_S) için Şekil 9.42'den bulunan eğim değerleri sırasıyla σ_S=9,2 MPa için m= 0,0000000048 ve σ_S=6,9 MPa için m= 0,000000063'dür.



Şekil 9.42. Çankırı kaya tuzunda sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile 2.sünme esnasında ortaya çıkan doğrusal davranışa ait eğim (m) değerleri arasındaki ilişki

Şekil 9.41 yardımıyla belirlenen kritik gerilme (σ_S) değerlerine ait 2.sünme aşamasını tanımlayan eğim değerleri Şekil 9.42'den belirlenmiştir. Ancak belirlenen değerler Şekil 9.40'a yerleştirilmek istenirse 2. sünme aşamasının başlangıç ve bitiş noktalarını tanımlayan koordinat noktalarının (zaman, düşey birim deformasyon) hala bilinmediği görülmektedir. Bunun için Çizelge 9.9'daki 2.sütuna karşılık 4.sütun verilerinden ve 6.sütun değerlerine karşı 8.sütun değerlerinden oluşan Şekil 9.43 hazırlanmıştır. Sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile düşey birim deformasyon davranışı, 1. ve 2. sünme aşama hattı ve 2. ve 3. sünme aşama hattı için ayrı ayrı matematiksel eşitlik ile ifade edilmiş ve Şekil 9.43'de sunulmuştur. Şekil 9.43'de sunulan bu eşitlikler kullanılarak σ_S=6,9 Pa için başlangıç düşey birim deformasyon değeri 1. ve 2. sünme aşama hattından bulunurken σ_S=9,2 MPa için başlangıç düşey birim deformasyon değeri yine aynı hattan belirlenebilmektedir. Söz konusu olan bu iki sünme gerilmesine karşılık gelen başlangıç birim deformasyonlar sırasıyla 0,000886481 ve 0,000294969olarak hesaplanmıştır. Her iki sünme gerilmesine (9,2 MPa ve 6,9 MPa) ait 2. aşamadan 3. aşamaya geçiş olamayacağı için 2. sünme

aşamasına ait doğru sonsuza kadar ilerleyecektir. Sonuç olarak Şekil 9.40'da belirlenen tüm verilerin yerleştirilmesi ile ilgili sünme davranışına ait 2. sünme doğrusunun çizilmesi istenirse zaman (t, saat) değerinin halen belirli olmadığı görülmektedir. Bu aranan zaman değerinin belirlenmesinde Şekil 9.40'da sunulan eşitliklerden 1. ve 2. sünme aşama hattına ait eşitlik kullanılabilir. Bu eşitlikte Şekil 9.43'den bulunan her iki düşey deformasyon değeri (0,000294969 ve 0,000886481) kullanılarak ilgili zaman (t-saat) değerleri sırasıyla 3604 ve 4831 saat olarak belirlenebilir.



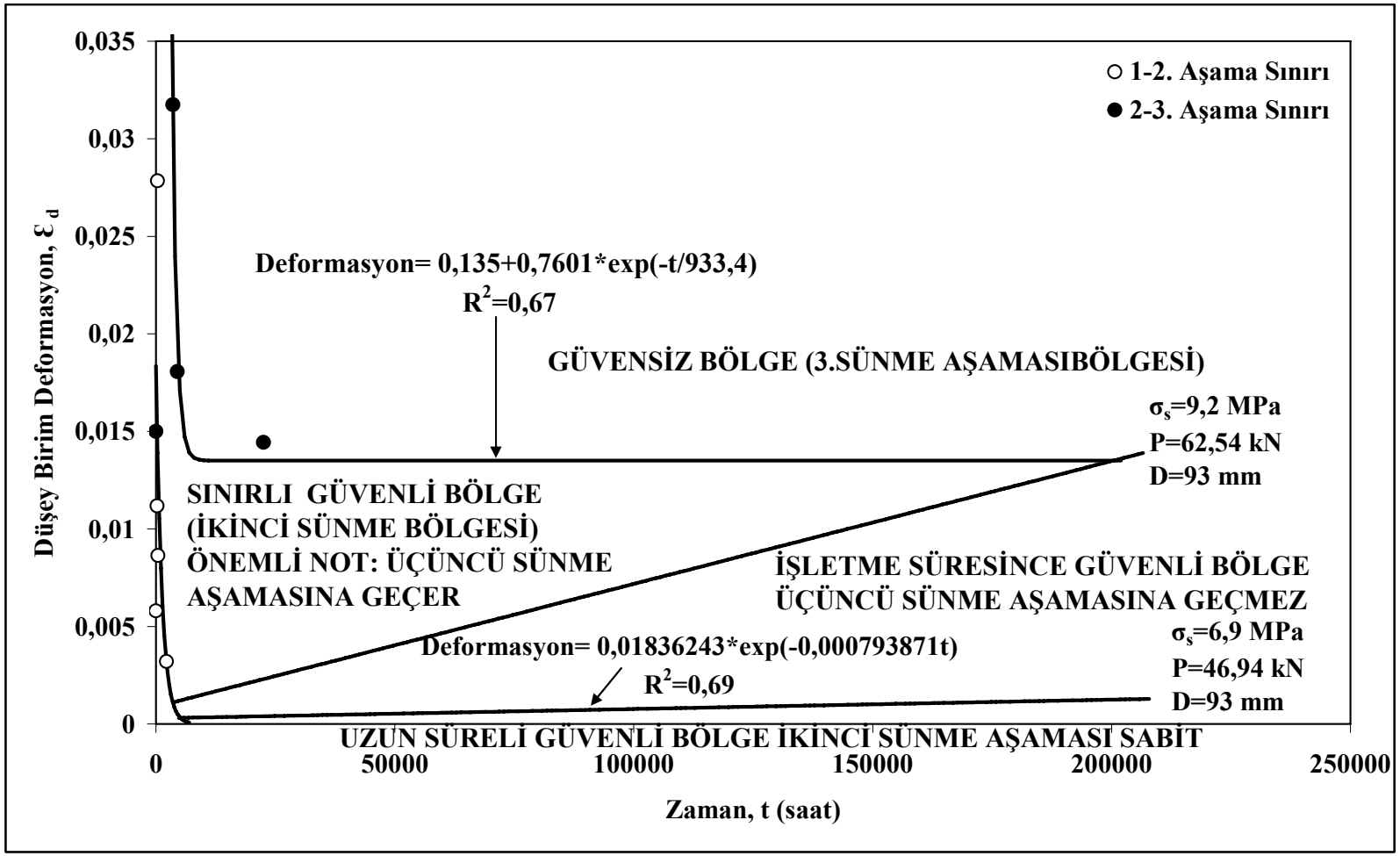
Şekil 9.43. sabit sünme gerilmesi (σ_S) ile düşey birim deformasyon (ε_d) değerlerinin sünme aşama hattı için değerlendirilmesi

Sonuç olarak Şekil 9.40, 9.41, 9.42 ve 9.43 kullanılarak belirlenen parametrik değerler topluca aşağıdaki Çizelge 9.10'da sunulmuştur.

Çizelge 9.10. Çankırı kaya tuzu için tasarım amaçlı belirlenen parametrik değerler

İşlem Sıra No	Parametre	Sembol Birim	Sayısal Değer	Sayısal Değer
1	Şekil 9.41'den kritik sünme gerilmesi	σ_S (MPa)	6,9	9,2
2	Şekil 9.42'den 2. sünme aşama eğimi	m	0,0000000048	0,000000063
3	Şekil 9.43'den 1. ve 2. sünme geçiş hattı eşitliğinden düşey birim deformasyon	ε_{d1-2}	0,000294969	0,000886481
4	Şekil 9.40'dan 1. ve 2. sünme geçiş hattı eşitliğinden zaman	t (saat)	3604	4831
5	2.sünme aşamasına ait doğrusal denklem	$\varepsilon_{d2}=\varepsilon_{d1-2}+mt$	0,000294969+0,0000000048*t t ≥3604	0,000886481+0,000000063*t t ≥4831

Çizelge 9.10'da topluca sunulan veriler Şekil 9.44'de yerleştirilmiştir. σ_S=9,2 MPa sabit gerilmesine ait sünme davranışının 2. sünme aşaması ile σ_S=6,9 MPa sabit gerilmesine ait 2. sünme aşamasına ait doğrusal davranış Şekil 9.44'de görülmektedir. Sabit gerilme (σ_S) değeri eğer 9,2 MPa değerinin üzerine çıkarsa 1., 2. ve 3. sünme aşamaları gözlenecektir. Eğer sabit sünme gerilmesi (σ_S) 9,2 MPa'ın altına düşürülürse 1. ve 2. sünme aşamaları gözlenecek ama hiç bir zaman 3. aşama sünme yaşanmayacaktır. Sabit gerilme değeri (σ_S) 6,9 MPa'ın altına düşürülürse 1. ve 2. sünme aşaması yaşanacak ancak 2. sünme aşamasına ait doğrunun eğimi (m) sıfır olacak ve yine hiçbir zaman 3. aşamaya geçilmeyecektir. Şekil 9.44'de belirlenen önemli aralıklar gösterilmiş ve tanımlanmıştır. Sonuç olarak tasarım mühendisinin, sabit gerilme değeri için $\sigma_S \leq 9{,}2$ MPa koşulunu dikkate alması önerilebilir. Analitik çalışma ile belirlenen bu değer TEBD (σ_c)'nın % 50'sine karşılık gelmektedir.



Şekil 9.44. Çankırı kaya tuzu için tasarım önerisi

10. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

10.1. Genel

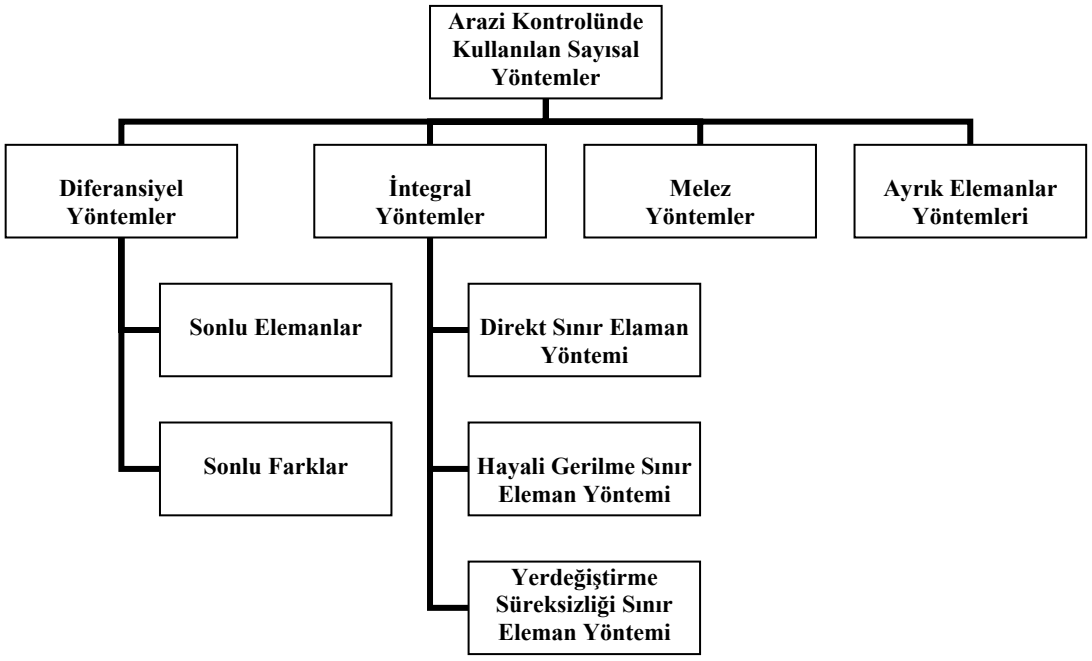
Ülkemizde Aksaray-Sultanhanı yöresindeki yeraltı tuz domları haricinde en önemli kaya tuz yatakları Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir yöresinde mevcut olup bu maden sahalarından Bölüm 3'de belirtildiği gibi klasik oda- topuk madenciliği ile kaya tuzu üretimi yapılmaktadır. Her iki maden sahasında TEKEL tarafından üretim yapılmış olup 1987 yılında Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir maden sahaları özelleştirme kapsamına alınmıştır. Çankırı maden ocağında özelleştirmeden sonra üretime devam etmiştir. Nevşehir-Gülşehir maden ocağı ise hemen özelleştirilmediği için yaklaşık 16 yıl kapalı kalmıştır. Ocak kapalı olduğu sürece yeraltı suyu ile dolmuştur. 2003 yılında yapılan özelleştirme ile başlatılan çalışmalar sırasında su boşaltılmıştır. Yerinde yapılan inceleme ile topuklardaki bozulmanın kaynağının ne kadarının gerilmelerden ne kadarının sulardan meydana geldiği belirlenememiştir. Bundan dolayı sayısal çözümleme sonuçları ile ocaktaki gerçek durumun karşılaştırılmasının mümkün olamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Ancak Çankırı maden ocağında bu tür bir problem olmadığı için sayısal çözümleme çalışmaları sadece bu ocak için gerçekleştirilmiştir.

Sayısal çözümleme çalışmalarının amacı, laboratuarda belirlenen kısa ve uzun süreli kaya mekaniği sonuçları ile arazideki gerilmeler ve buna bağlı deformasyon sonuçların örtüşeceği bir modelin oluşturulması ve sonrasında topukların boyutlandırılmasıdır.

Bu bölümde, sayısal çözümleme için malzeme özelliklerinin tespiti, model oluşturma, ocağa ait model üzerinde sayısal çözümleme çalışmaları ve parametrik çözümler sunulmuştur.

10.2. Sayısal Çözümleme için PC Paket Program Seçimi

Zaman ve ekonomiklik bakımından pahalı deneysel çalışmalar yerine sayısal benzetimler üzerinde çalışmak daha uygundur. Pek çok mühendis ve bilim adamı uğraştıkları bir fiziksel olayı matematiksel olarak formüle etmek ve oluşturdukları matematiksel modeli de sayısal olarak çözmek ister (Kalenderli, 1996). Sayısal yöntemleri kullanırken uygun malzeme parametrelerini ve birincil gerilme durumunu belirlemek için yüksek deneyim gerekmektedir. Bir kez model oluşturulduğu ve uygun fonksiyonlar kurulduğu zaman tasarım üzerindeki değişik parametrelerin etkisini ve değişen jeolojik koşullar altında tasarımın yeterliliğini araştırmak için girdi parametrelerini değiştirmek kolaydır (Norconsult, 2006). Arazide gerçekleştirilen uygulamalarda da sayısal modelleme yöntemleri başarı ile uygulanabilmektedir. Sayısal yöntemler diferansiyel ve integral yöntemler olarak ikiye ayrılır. Diferansiyel yöntemler, sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemi olarak ikiye ayrılırken, integral yöntemler, direkt sınır eleman yöntemi, hayali gerilme sınır eleman yöntemi ve yerdeğiştirme süreksizliği sınır eleman yöntemi olmak üzere üç ayrı bölümde incelenmektedir. Diğer bir ana yöntem olan melez (hibrit) yöntemde ise diferansiyel ve integral yöntem birleştirilmiş ve her ikisinin avantajlarından yararlanılmıştır. Ayrık elemanlar yöntemi gerilme hesaplamasını diferansiyel yönteme dayanarak yaptığı halde içinde birçok yeni kavram içerdiğinden ayrı bir sınıf olarak kabul edilebilir (Yazıcı ve Nasuf, 1993). Sayısal yöntemlerin sınıflandırılması Şekil 10.1'de verilmiştir.



Şekil 10.1. Arazi kontrolünde kullanılan sayısal yöntemlerin sınıflandırılması (Yazıcı ve Nasuf, 1993)

Günümüzde kullanılan sayısal çözümleme yazılımlarına bazı örnekler Çizelge 10.1'de verilmiştir.

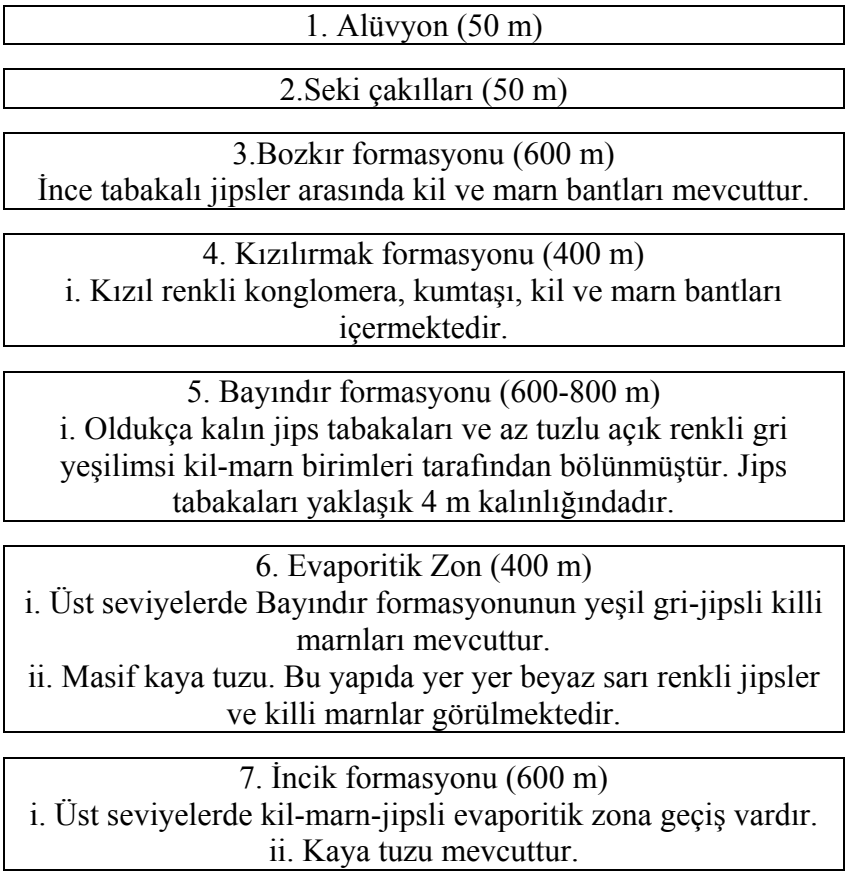
Çizelge 10.1. Arazi kontrolünde kullanılan bazı sayısal çözümleme programları

Program İsmi	Yöntem	Yazan Firma
Visage	Sonlu Eleman	Bharü Engineering, Kanada
Super Sap	Sonlu Eleman	Bharü Engineering, Kanada
Flac2D, 3D	Entegre Sonlu Farklar	Itasca Mineapolis, ABD
Examine2D, 3D	Sınır Eleman	Toronto Üniversitesi, Kanada
ExamineTab	Sınır Eleman	Toronto Üniversitesi, Kanada
3DBEM	Sınır Eleman	Mine Modelling Ltd, Ontario, Kanada
UDEC	Ayrık Elemanlar	Itasca Mineapolis, ABD
3DEC	Ayrık Elemanlar	Itasca Mineapolis, ABD
BEFE	Melez	University of Quennsland, Avustralya
PHASE2D	Melez	Toronto Üniversitesi, Kanada
PFC2D,3D	Ayrık Elemanlar	ITASCA, ABD

Bu programlardan FLAC ve UDEC oldukça pahalı programlar olmakla birlikte önemli projelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Sayısal analizin amacına uygun olarak aynı problemin, uygun mesh ve sınır koşullarının uygulandığı ayrı çözümleme yöntemlerine ait analiz sonuçlarının oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir (Özarslan ve Geniş, 2008). Bu sonuç dikkate alınarak Selçuk Üniversitesi Maden Mühendisliğinde mevcut olan PHASE^2 V.6.0 (Registered to: Selcuk University 3191A) paket programının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu program, Evert Hoek tarafından yönetilen ve Kanada'da faaliyet gösteren RockScience (www.rockscience.com, 2008) firması ve Toronto Üniversitesi (Kanada) tarafından geliştirilmiştir.

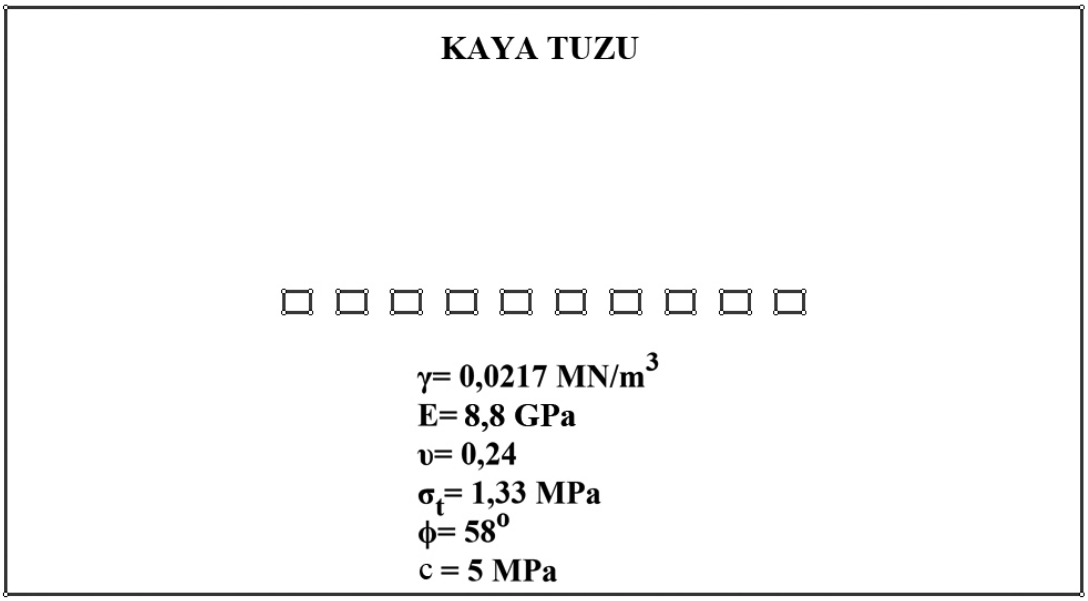
10.3. Sayısal Çözümleme için Malzeme Özelliklerinin Tespiti

Çankırı maden sahasında detaylı bir jeolojik araştırma yapılmamıştır. MTA (1980) tarafından yapılan çalışmaya bağlı olarak hazırlanan sahanın genel stratigrafisi Şekil 10.2'de verilmiştir. Bölgede madencilik yapılan sahada evaporitik zon içerisindeki kaya tuzu üretilmektedir. MTA tarafından yapılan çalışmalar ile evaporitik zon altındaki kil-marn, jips biriminden sonra gelen İncik formasyonu içerisindeki ikinci bir kaya tuzunun varlığı tespit edilmiş (MTA,1980) ancak kesin kalınlığı belirlenememiştir. MTA (1980) çalışmalarına göre, evaporitik zon içerisindeki kaya tuzu, yataya yakın bir tabakalanma göstermiş ancak bölgede tektonik deformasyonlara neden olan kıvrımlar oluşmuştur.



Şekil 10.2. Çankırı yöresinin genel stratigrafisi

MTA (1980) tarafından yapılan çalışmalar (Şekil 10.2) ve sahada yapılan teknik incelemeler ışığında sayısal çözümlemelerde kullanılan kaya birimlerine ilişkin mekanik ve fiziksel özellikler Şekil 10.3'de sunulmuştur. Şekil 10.3'de ifade edilen modelde kaya tuzuna ait mekanik veriler bu tez çalışması sonucunda belirlenmiştir. Kaya tuzuna ait kısa ve uzun dönemli mekanik değerlerin belirlendiği deneysel çalışmalar Bölüm 6'da sunulmuştur.



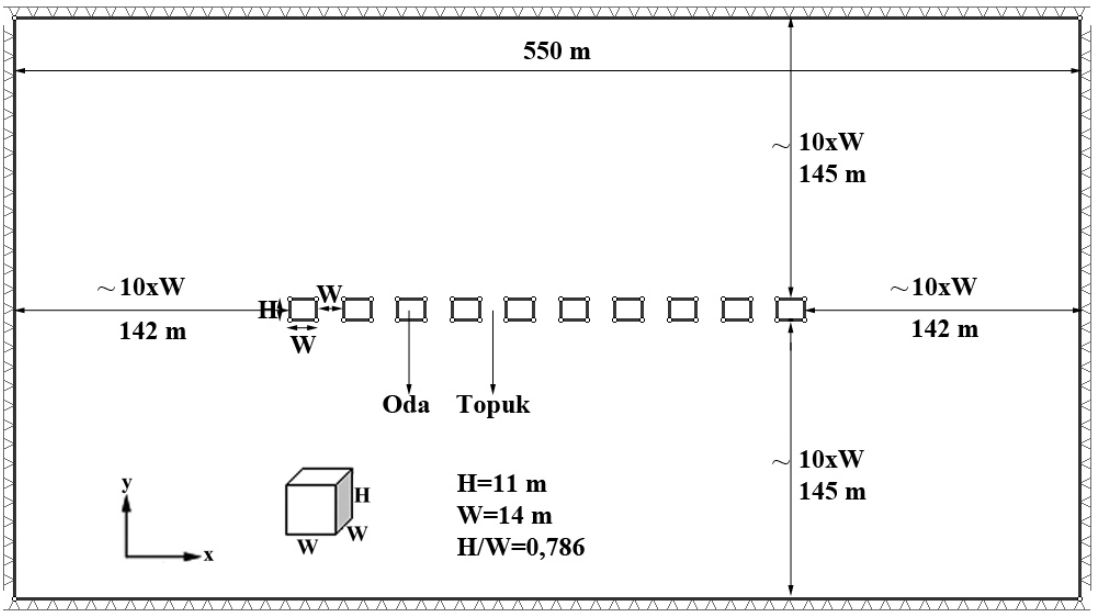
Şekil 10.3. Sayısal çözümlemelerde kullanılan kaya tuzu birimine ait malzeme özellikleri

10.4. Sayısal Çözümleme için Model Oluşturma ve Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Çankırı bölgesinde madencilik yapılan kaya tuzu, evaporitik zon içerisinde olup 400 m kalınlığındaki bu zonun üst seviyelerinde madencilik yapılmaktadır. Bölgede aslında madencilik çalışmalarının Hitit dönemine kadar uzandığı bilinmektedir. Antik dönemlere ait bölgelere günümüzde güvenlik açısından girilmez iken aynı seviyede bakir alanda madencilik çalışmaları yürütülmektedir. Üretim yapılan seviye yeryüzü seviyesinden yaklaşık 150 m altında kalmaktadır. Üretim yöntemi oda-topuk olup oda ve topukların şekli kare-prizmadır. Boyutları ise oda ve topuk genişliği (W) 14 m, yüksekliği ise (H) 11 m'dir. Topuk yüksekliği (H) ve topuk genişliği (W) oranı 0,786'dır.

Sayısal çözümleme çalışmaları için Şekil 10.4'de sunulan genel modelde kaya tuzu içerisinde 10 adet oda-topuk modellenmiştir. Hazırlanan modelde oda genişliği (W) ve topuk genişliği (W) maden ocağındaki gibi 14 m, oda ve topuk yüksekliği (H) ise 11 m olarak tasarlanmıştır.

Şekil 10.4'de sunulan modelde sınır koşulları oluşturulurken oda-topuk sisteminin her iki uç kısmından model topuk genişliğinin (W) yaklaşık 10 katı kadar uzaklıkta birincil arazi gerilme değerlerine ulaşıldığı varsayılmıştır. Şekil 10.4'de görüldüğü gibi model genişliği, x ekseninde toplam 550 m olarak tasarlanmıştır. Hazırlanan modelin sınır noktalarında yatay arazi gerilmelerinin (P_h) ve düşey arazi gerilmelerinin (P_v) birbirine eşit olduğu, yani hidrostatik davranışın olduğu varsayılmıştır. Bundan dolayı modelin sınır noktalarında deformasyon değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiş ve sınır koşulu için x ve y sınırlandırma koşulu olan Restrain x ve y eksenlerinde ▷ sembolü seçilmiştir (Şekil 10.4). Sonuç olarak gravite etkisinin yok sayıldığı modelin düşey ve yatay sınır eksenlerinde düşey ve yatay harekete izin verilmemiştir.

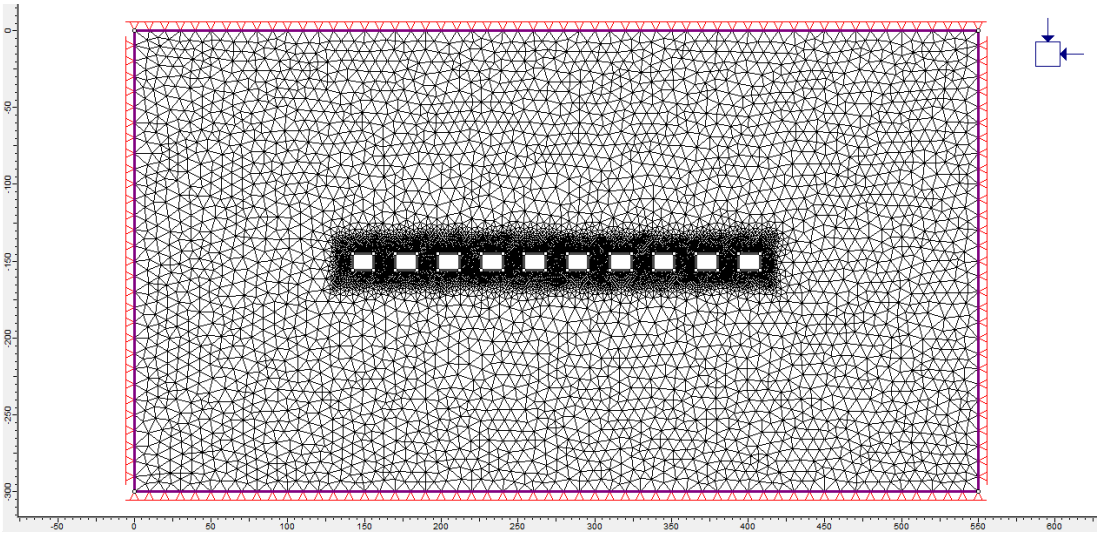


Şekil 10.4. Sayısal çözümleme için geliştirilen model ve sınır koşulları

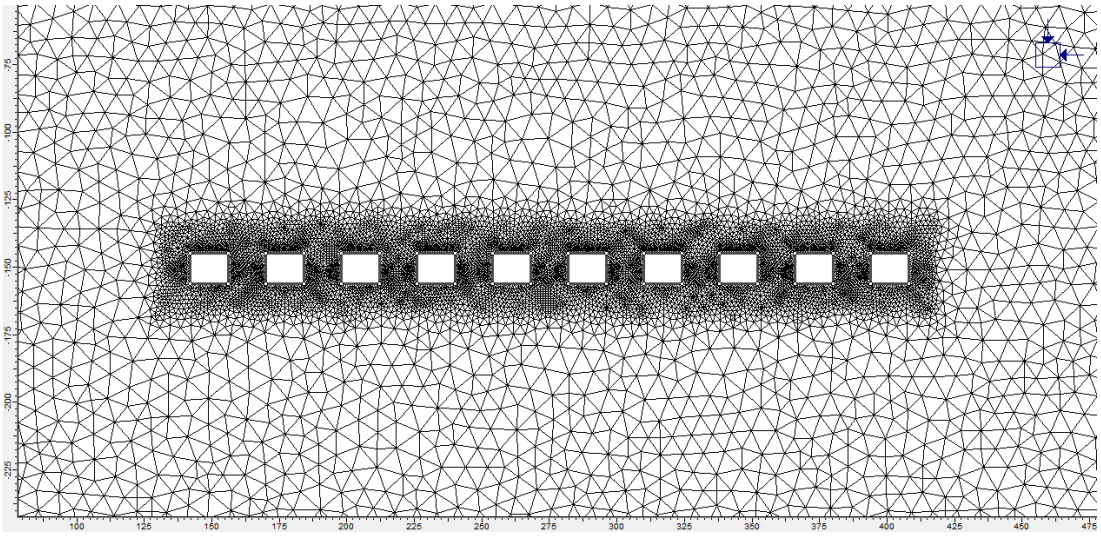
10.5. Model Üzerinde Sayısal Çözümleme Çalışmaları

PHASE^2 tarafından dikkate alınan genel iki boyutlu kesit Şekil 10.5'de görüldüğü gibi mesh'lere ayrılmıştır. Ancak oda topuk sisteminin etrafındaki mesh sisteminin sıklığı müdahale edilerek Şekil 10.6'da görüldüğü gibi artırılmıştır. Bu koşullara sahip model, PHASE^2 yardımıyla analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler ile açıklık ve topuk etrafında oluşan asal ikincil gerilmeler (σ_1, σ_3, σ_z) ortalama dayanım değeri, dayanım faktörü ve toplam deformasyon değerleri belirlenebilmektedir.

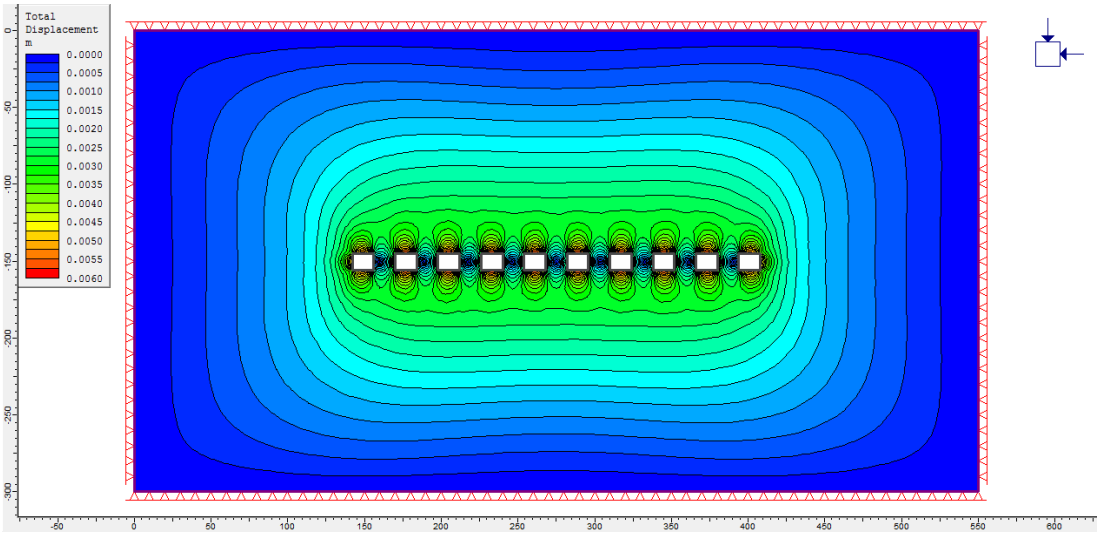
Yerinde yapılan gözlem ve incelemeler ile duraysızlık probleminin gözlenmediği maden ocağını yansıtan modelin sayısal analizine ait genel deformasyon dağılımları Şekil 10.7'de görülmektedir. Simetrik bir yapı sergileyen tek topuk ve iki oda etrafında oluşan deformasyon değerleri ise Şekil 10.8'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre açıklığın tavanının orta kısmında yaklaşık 0,57 cm, topuk üzerinde ise 0,2 cm deformasyon olacağı anlaşılmaktadır. Çankırı kaya tuzu maden ocağında deformasyon ölçümleri yapılamamış ancak kaynak araştırması ile İngiltere'deki benzer bir kaya tuzu madeninde açıklık etrafında 9-10 cm'lik deformasyon değerlerinin ölçüldüğü (Şekil 10.9) ve bu ocakta herhangi bir duraysızlığın oluşmadığı tespit edilmiştir (Swift ve Reddish, 2005). Çankırı maden ocağındaki açıklıklar üzerinde de bir duraysızlık gözlenmediği düşünülürse sayısal analiz sonuçları ile açıklık üzerinde belirlenen 0,57 cm'lik deformasyon değerlerinin beklentiler doğrultusunda arazideki gerçeği yansıttığı kabul edilmiştir.



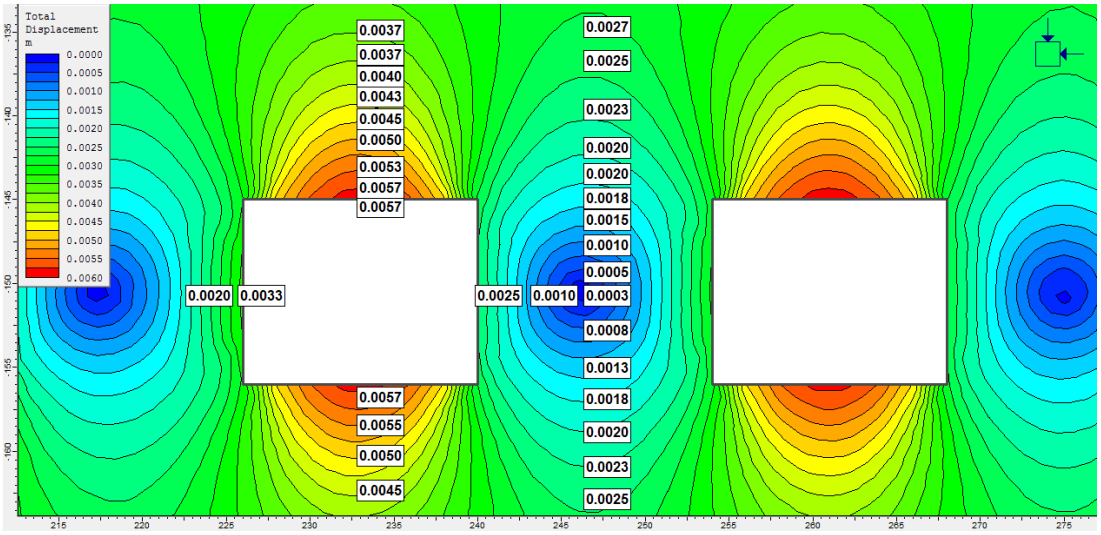
Şekil 10.5. Sayısal çözümleme için geliştirilen modele ait genel mesh yapısı



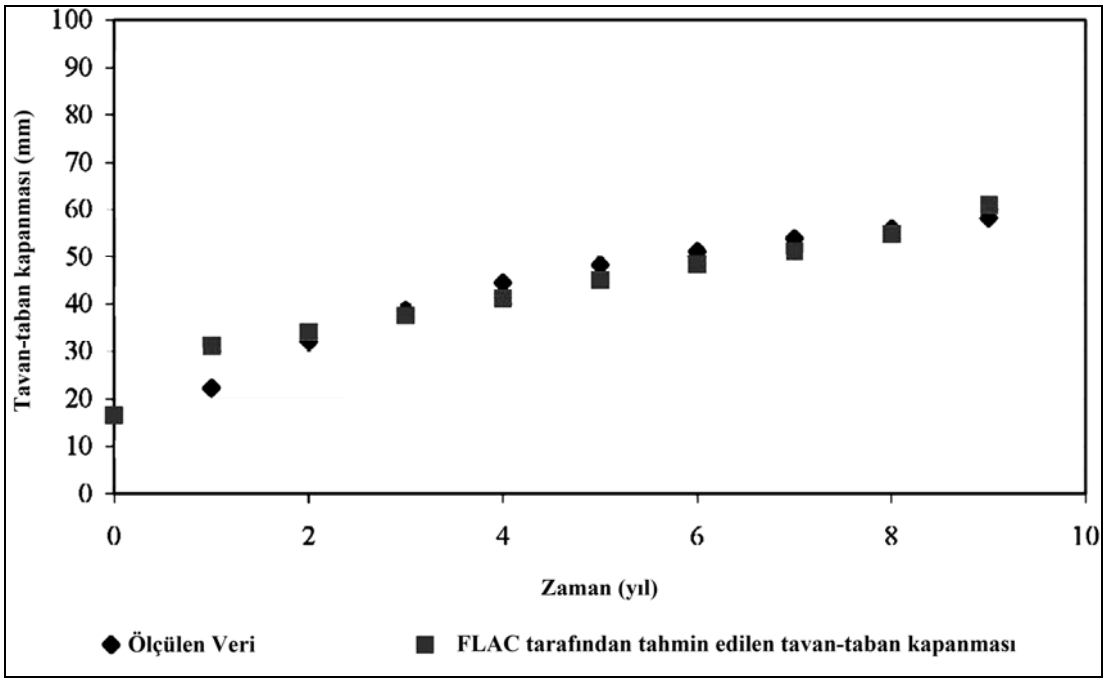
Şekil 10.6. Sayısal çözümleme için geliştirilen modele ait yakın mesh yapısı



Şekil 10.7. Sayısal çözümleme için geliştirilen model yardımıyla belirlenen genel deformasyon davranışı



Şekil 10.8. Yeraltı topuk ve açıklıkları çevresinde oluşan yerdeğişimi dağılımları



Şekil 10.9. İngiltere'deki bir kaya tuzu madenindeki açıklık tavanında yapılan deformasyon ölçümleri (Swift ve Reddish, 2005)

10.6 Parametrik Çalışmalar

Bölüm 10.5'de gerçek arazi koşullarını yansıtan model üzerinde yapılan analiz sonuçlarının beklenen sınırlar içerisinde olması neticesinde bir seri parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, derinlik sabit tutularak önce orijinal boyutlarda (H=11 m, W=14 m, H/W=0,786) sayısal çözümleme yapılmış daha sonra ise topuk boyutları değiştirilerek aynı analizler tekrar edilmiştir. Sayısal çözümleme ve bunlara ait değerlendirme sonuçları aşağıda sunulmuştur.

10.6.1. Çankırı kaya tuzu madeninde orijinal durum için yapılan sayısal çözümleme çalışmaları

Evaporitik zon içerisinde mevcut kaya tuzunda oluşturulan 10 adet açıklığa ait model, günümüzdeki gerçek arazi durumunu yansıtmaktadır (Şekil 10.4).

Model üzerinde gerçekleştirilen sayısal çözümleme sonuçları PHASE^2 programının yeteneği çerçevesinde Çizelge 10.2'de belirtilen parametreler bazında değerlendirilmiştir.

Çizelge 10.2. Sayısal çözümlemede dikkate alınan parametreler

Parametre Tanımı	Sembolik Tanım	Birim
1. En büyük asal gerilme	σ_1	MPa
2. En küçük asal gerilme	σ_3	MPa
3. En büyük asal gerilmenin (σ_1) kaya tuzuna ait kısa süreli tek eksenli basınç dayanımına oranı	σ_1/σ_c	-
4. En büyük asal gerilmenin (σ_1) en uygun sünme davranışına ait sabit yük ile oluşturulan uzun süreli sünme basıncına oranı (σ_s)	σ_1/σ_s	-

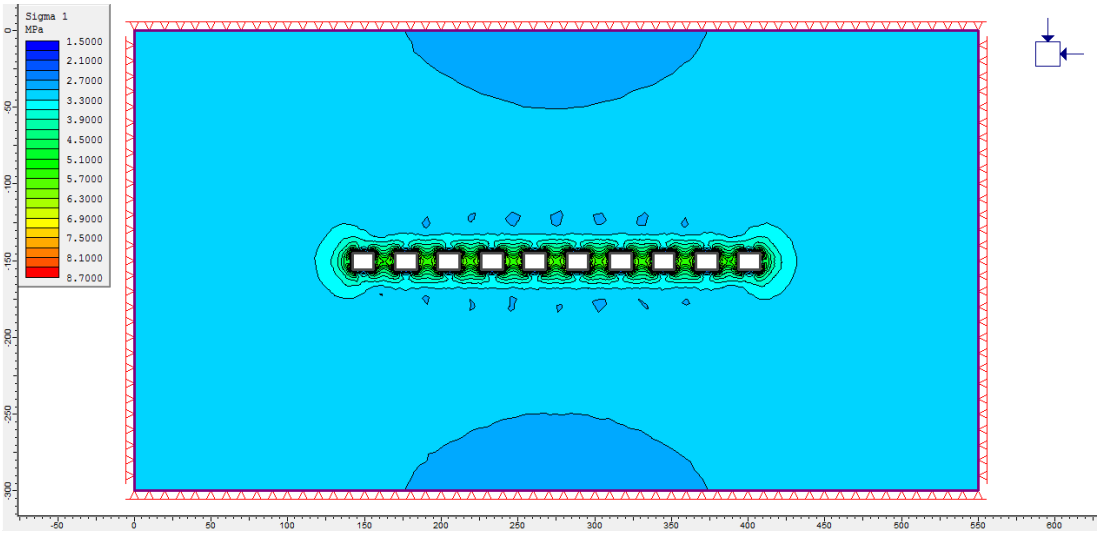
Çizelge 10.2'de sunulan 3. parametredeki kaya tuzuna ait tek eksenli basınç dayanımı, Bölüm 7'de sunulan kısa süreli kaya mekaniği deneyleri yardımıyla belirlenmiş olup bu değer σ_c=18,4 MPa'dır. Aynı çizelgede ifade edilen sünme gerilmesi (σ_s) ise Bölüm 8 ve 9'da verilen sünme deney ve modelleme çalışmaları neticesinde belirlenmiştir. Bu iki bölümden elde edilen sonuçlara göre en uygun sünme gerilme değeri σ_s = 9,2 MPa'dır.

Çankırı kaya tuzu formasyonu içerisindeki fiili madencilik uygulamasını yansıtan modele ait sayısal çözümleme için hazırlanan model sınır koşulları, oda-topuk uygulaması ve mesh uygulaması daha önce sunulan Şekil 10.5 ve 10.6'da görülmektedir. Bu koşullar altında yapılan sayısal çözümlemelerde Çizelge 10.2'deki parametreler göz önüne alınarak PHASE^2 çıktıları elde edilmiş ve bu iki boyutlu gösterimde renk ölçeği kullanılmıştır.

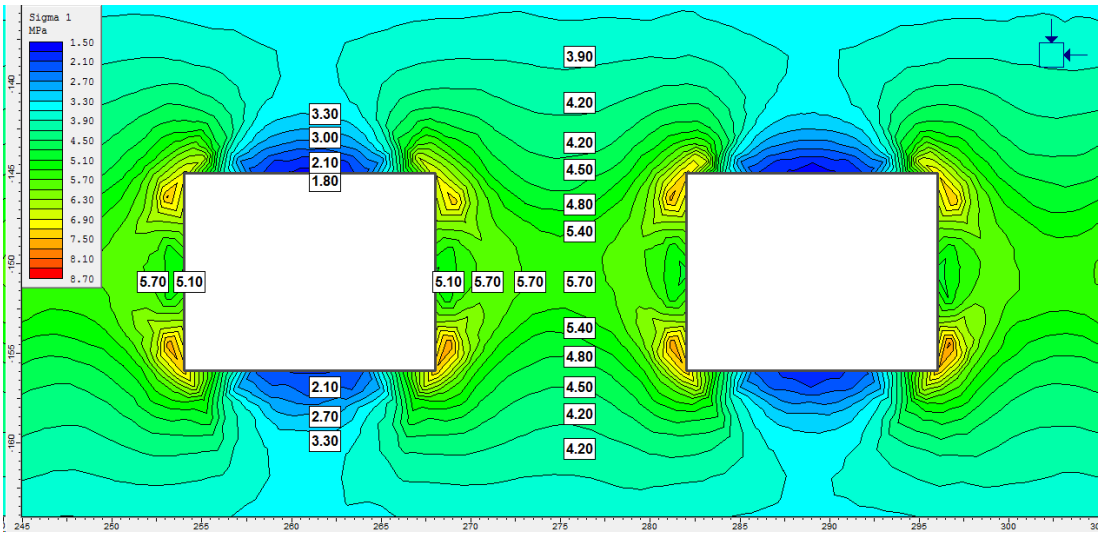
Model için yapılan sayısal çözümleme sonuçları üzerinde değerlendirme yapabilmek için her bir parametrenin iki boyutlu tüm model üzerindeki değişimi ve ayrıca yine iki boyutlu tek topuk ve bu topuk etrafında konumlanan iki oda açıklığı yakın planda ele alınmıştır.

Şekil 10.10a ve 10.10b'de en büyük asal gerilmenin (σ_1) tüm modeldeki değişimi ve tek topuk etrafındaki değişimi görülmektedir. Şekil 10.10b'de görüldüğü

gibi oda açıklığının yan cidar yüzeylerinde yani topuk yüzeylerinde söz konusu olan σ_1 değerleri (σ_1=5,1 MPa) açıklık tavanında oluşan σ_1 (1,8 MPa) gerilme değerinin 2,8 katı, açıklık tabanında oluşan σ_1 (2,1 MPa) değerinin yaklaşık 2,4 katı kadardır. Topuk merkezinde oluşan σ_1 gerilmesi (5,7 MPa) ve topuk üzerinde oluşan σ_1 gerilmesi (4,5 MPa), topuk kenarında oluşan en yüksek σ_1 (5,1 MPa) ile karşılaştırılırsa aralarında sırasıyla 1,3 ve 1,1 oranının olduğu görülmektedir. Sonuç olarak en yüksek asal gerilmenin (σ_1) topuk merkezinde, daha sonra sırasıyla topuk kenarlarında, topuk üzerinde ve oda açıklığı tabanı ve tavanında oluştuğu anlaşılmaktadır.

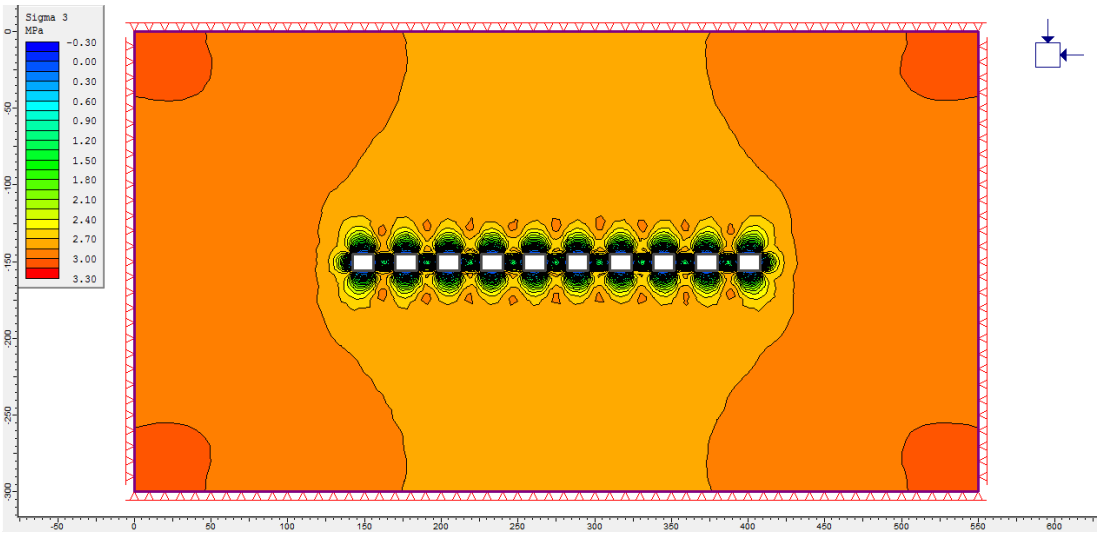


Şekil 10.10a. En büyük asal gerilme (σ_1) değerleri için elde edilen model

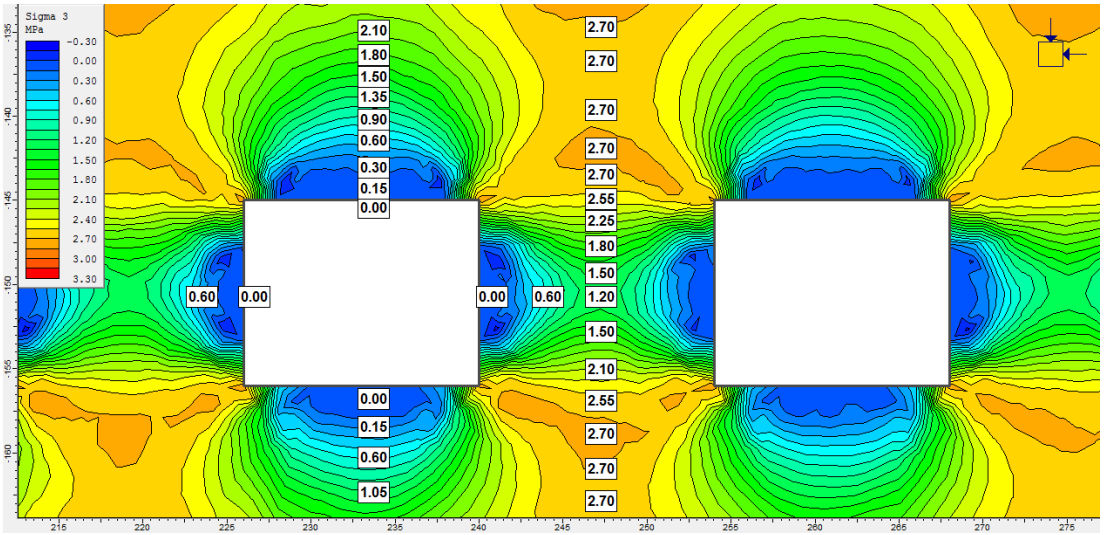


Şekil 10.10b. En büyük asal gerilme (σ_1) değerlerinin tek topuktaki davranışı

Şekil 10.11a ve 10.11b'de en küçük asal gerilmenin (σ_3) tüm modeldeki değişimi ve tek topuk etrafındaki değişimi görülmektedir. Şekil 10.11b'de görüldüğü gibi oda açıklığının yan cidar yüzeylerinde yani topuk yüzeylerinde söz konusu olan σ_3 gerilme değerleri, açıklık tavanında oluşan σ_3 gerilme değeri ve açıklık tabanında oluşan σ_3 gerilme değeri birbirine eşit olup hepsi 0 MPa olmuştur. Topuk üzerinde oluşan σ_3 gerilmesinin (2,5 MPa) topuk merkezinde oluşan σ_3 gerilmesinin (1,2 MPa) 2,1 katı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak en küçük asal gerilmenin (σ_3) topuk üzerinde ve topuk merkezinde oluştuğu anlaşılmaktadır.



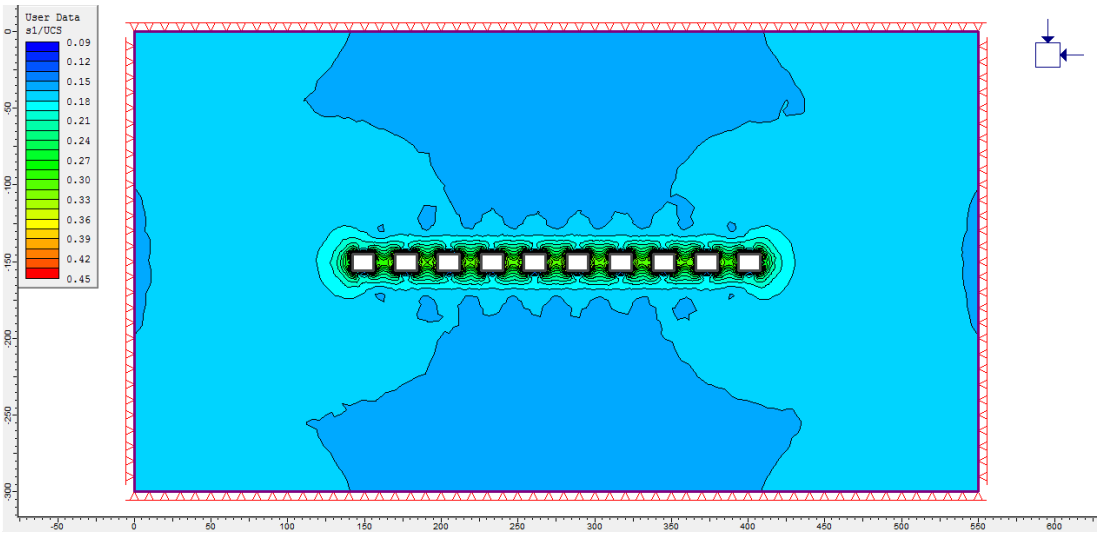
Şekil 10.11a. En küçük asal gerilme (σ_3) değerleri için elde edilen model



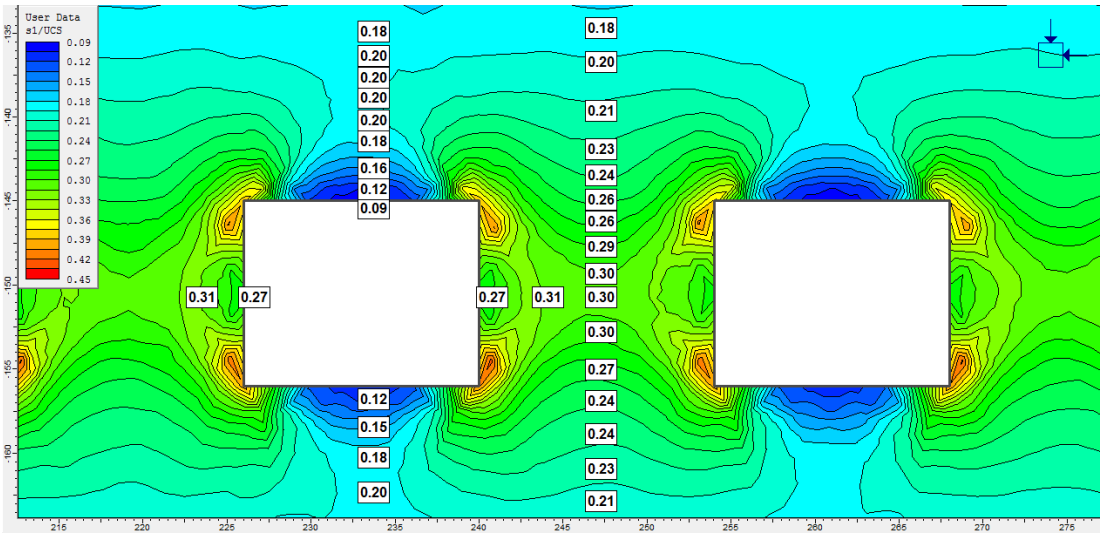
Şekil 10.11b. En küçük asal gerilme (σ_3) değerlerinin tek topuktaki davranışı

Şekil 10.12a ve Şekil 10.12b'de en büyük asal gerilmenin (σ_1) kaya tuzuna ait tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değerine oranlarının (σ_1/σ_c) tüm model ve tek topuk etrafındaki durumu görülmektedir.

Şekil 10.12b incelenirse açıklık etrafındaki değerlerin 0,09-0,27 aralığında değiştiği anlaşılmaktadır. Topuk merkezinde bu oranın 0,30, topuk üzerinde ise 0,26 olduğu görülmektedir. Bu durum açıklık üzerine gelen yüklerin başarıyla topuk üzerine transfer edildiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir.



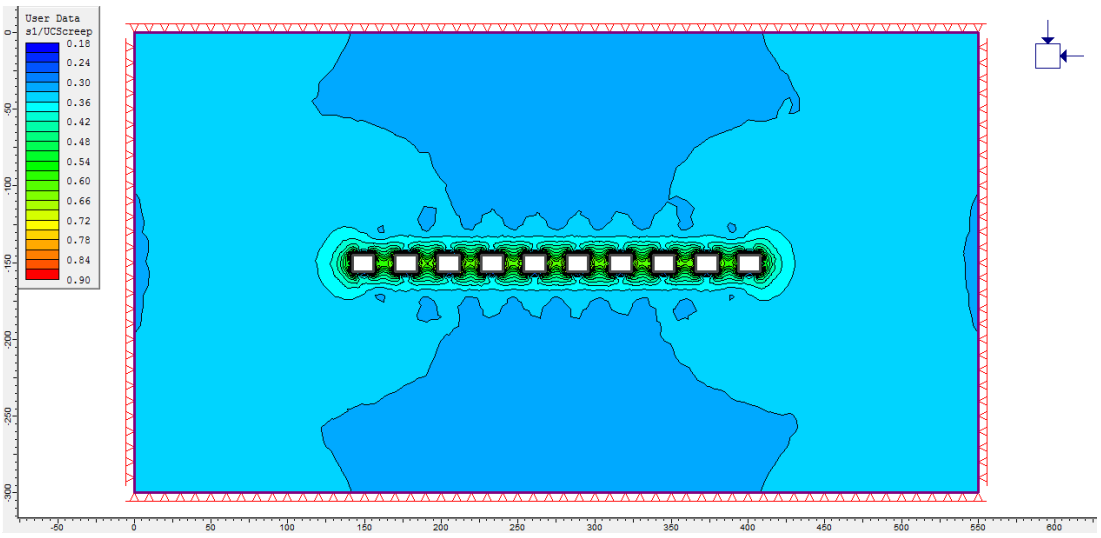
Şekil 10.12a. σ_1/σ_c oranı için elde edilen analiz sonuçları



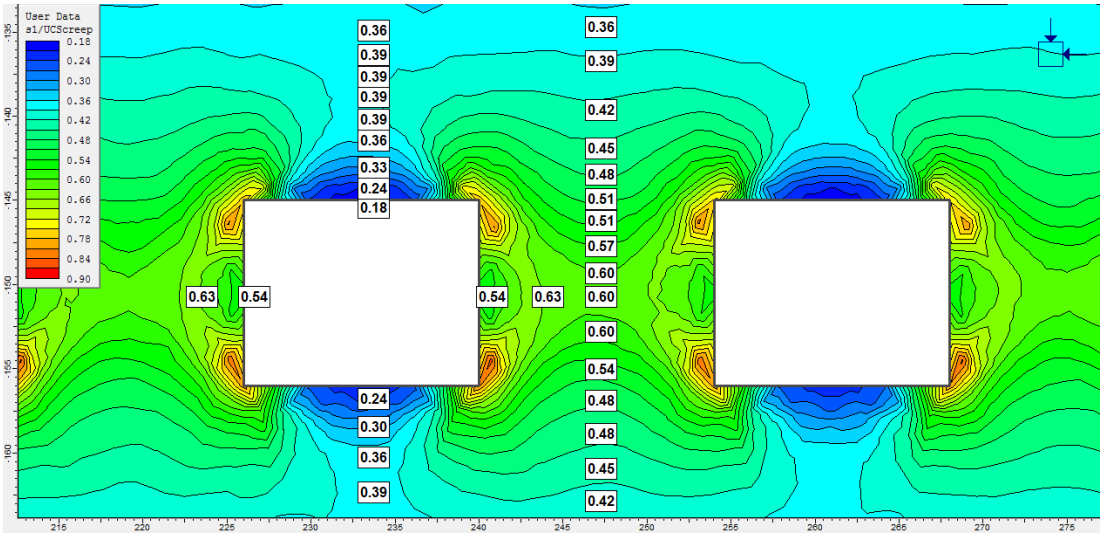
Şekil 10.12b. σ_1/σ_c oranının tek topuktaki davranışı

Kısa süreli kaya mekaniği laboratuar deneyleri ile tek eksenli basınç dayanım değeri (σ_c) 18,4 MPa olarak belirlenirken, uzun süreli sünme deneylerinden malzemenin üçüncü sünme aşamasına geçmeden dayanımını devam ettirebildiği gerilme değerinin (σ_s) 9,2 MPa olduğu tespit edilmiştir. Gerçekçi değerlendirmede uzun süreli yüklere maruz kalan topuk için sünme gerilmesi (σ_s) değerinin dikkate alınması daha akılcı olacaktır.

σ_1/σ_s oranlarının Şekil 10.13b'den görüldüğü üzere açıklık etrafında σ_1/σ_s oranının 0,18-0,54 aralığında değiştiği görülmektedir. Topuk merkezinde bu oran 0,60 iken topuk üstünde 0,51 civarındadır. Topuk merkezi ve açıklık tavanında belirlenen σ_1/σ_s değerleri Şekil 10.12b'deki σ_1/σ_c değerleri ile karşılaştırılırsa σ_1/σ_s oranlarının daha büyük olduğu görülmektedir. Duraylılık analizlerinde mühendislere tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) yerine sünme gerilme değerlerini (σ_s) dikkate almaları önerilebilir.



Şekil 10.13a. σ_1/σ_s oranı değerleri için elde edilen analiz sonuçları

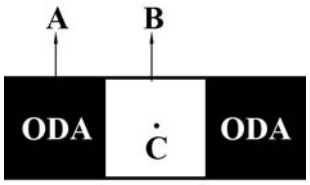


Şekil 10.13b. σ_1/σ_s oranının tek topuktaki davranışı

10.6.2. Değişik topuk boyutlarına bağlı sayısal çözümleme çalışmaları

Farklı büyüklüklere sahip topuk boyutlarına bağlı olarak yapılan bu parametrik analizde oda açıklık boyutları değiştirilmemiş orijinal boyutu korunmuştur. Bu parametrik analiz sadece mevcut maden ocağı şartlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 10.4'de verilen modelde topuk yüksekliğinin (H=11m) topuk genişliğine (W=14m) oranı (H/W) 0,786 iken bu oran sanal olarak 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 ve 2,5 alınarak sırasıyla yeni modeller hazırlanmıştır. Burada oda açıklıkları hepsinde 14 m alınmıştır, topuk yükseklikleri ise 11 m alınmış olup sadece topuk genişlikleri (W) değiştirilmiştir.

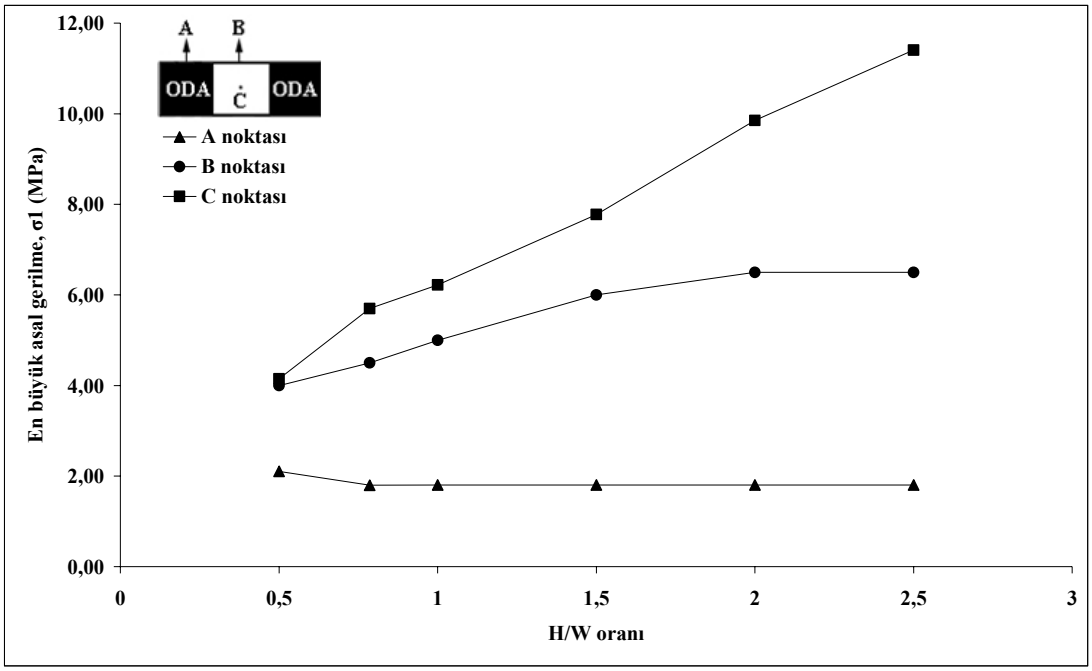
PHASE^2 yardımıyla sayısal çözümlemeye tabi tutulan modelden sadece Şekil 10.14'de gösterilen A, B ve C noktalarındaki sayısal değerler dikkate alınmıştır. Bunlar; en büyük asal gerilme (σ_1), en düşük asal gerilme (σ_3), en büyük asal gerilmenin tek eksenli basınç dayanımına oranı ($\sigma_1/\ \sigma_c$) ve en büyük asal gerilmenin uzun süreli sünme dayanımına oranı ($\sigma_1/\ \sigma_s$) değerleridir. A noktası oda açıklığının tavanı, B noktası topuk üzerini ve C noktası ise topuk merkezini belirtmektedir.



Şekil 10.14. Topuk boyutuna bağlı sayısal çözümlemelerde dikkate alınan A, B ve C noktalarını gösteren temsili şekil

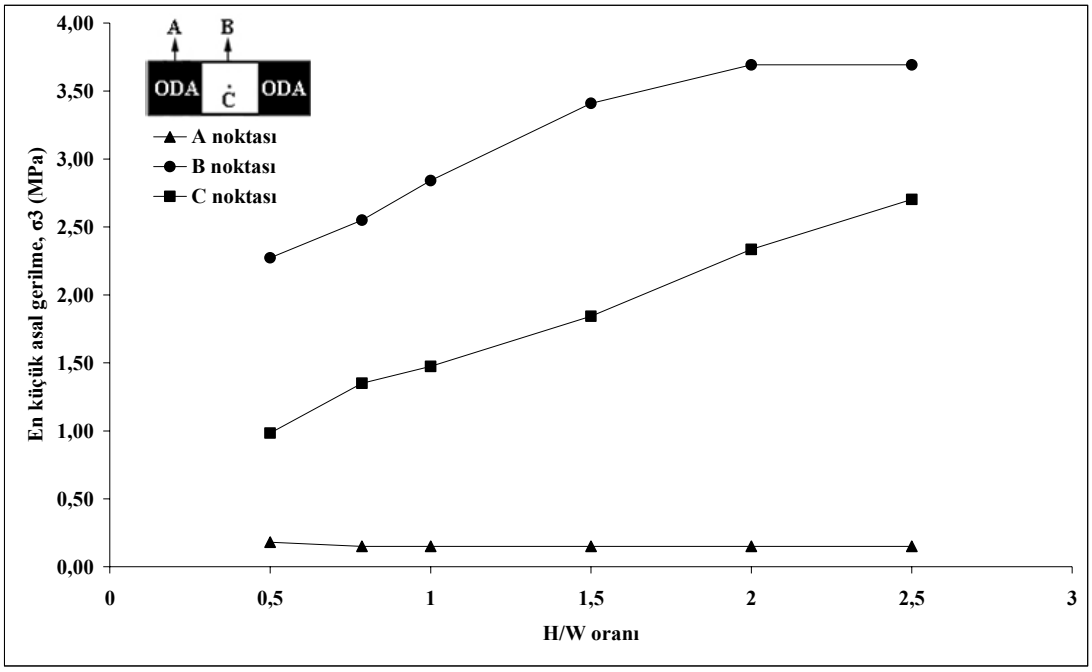
Şekil 10.14'de ifade edilen A,B ve C noktalarına ait değerlendirmeler sırasıyla Şekil 10.15-10.18'de H/W oranları dikkate alınarak grafiksel formda sunulmuştur.

Şekil 10.15'de görüldüğü üzere en büyük asal gerilme (σ_1) değeri, C noktasında H/W oranı arttıkça doğrusal olarak artarken, B noktasında H/W>2 koşulu için değişmemekte ve A noktasında ise σ_1 değeri hemen hemen sabit kalmaktadır. En büyük değişimin gözlendiği topuk merkezini ifade eden C noktasında H/W oranı 0,5 için en düşük değer yaklaşık 4,1 MPa olurken bu oran H/W oranı artışında bağlı olarak artma eğiliminde devam etmekte ve yaklaşık olarak en yüksek σ_1 değeri 11,4 MPa ile sonlanmaktadır.



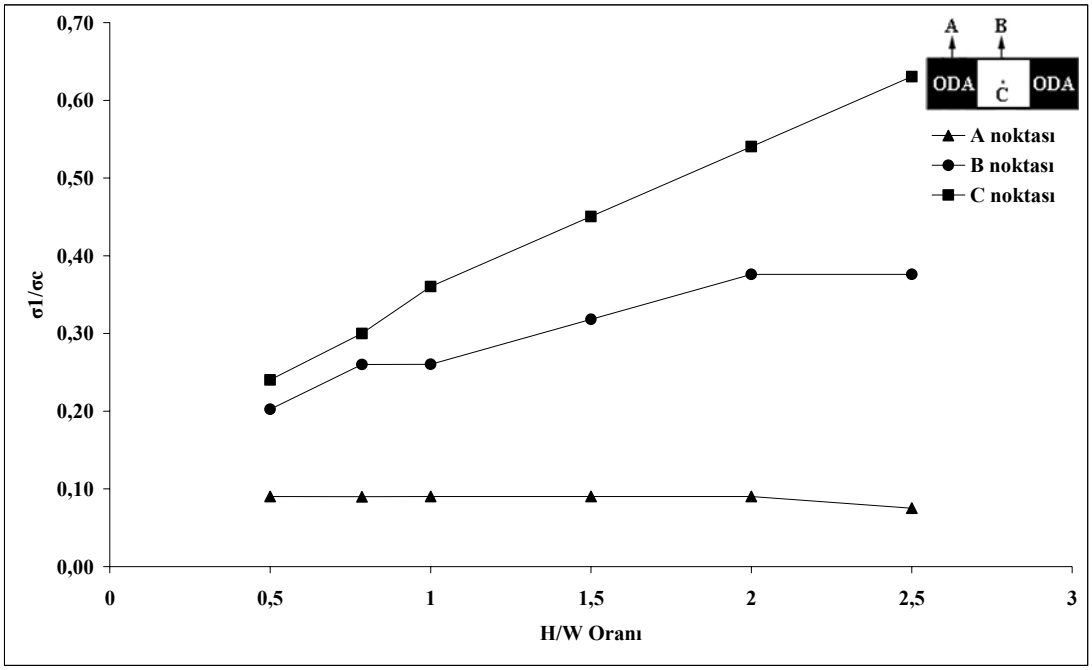
Şekil 10.15. A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen en büyük asal gerilme (σ_1) davranışı

Şekil 10.16'da görüldüğü üzere en düşük asal gerilme (σ_3) değeri, B ve C noktasında H/W oranı arttıkça doğrusal olarak artarken, B noktasında H/W>2 koşulu için sabitleşmektedir. A noktasında ise σ_1 değeri hemen hemen sabit kalmaktadır. En büyük değişimin gözlendiği topuk merkezini ifade eden C noktasında H/W oranı 0,5 için en düşük değer yaklaşık 1,0 MPa olurken bu oran H/W=2,5 için yaklaşık 2,7 MPa olmaktadır.



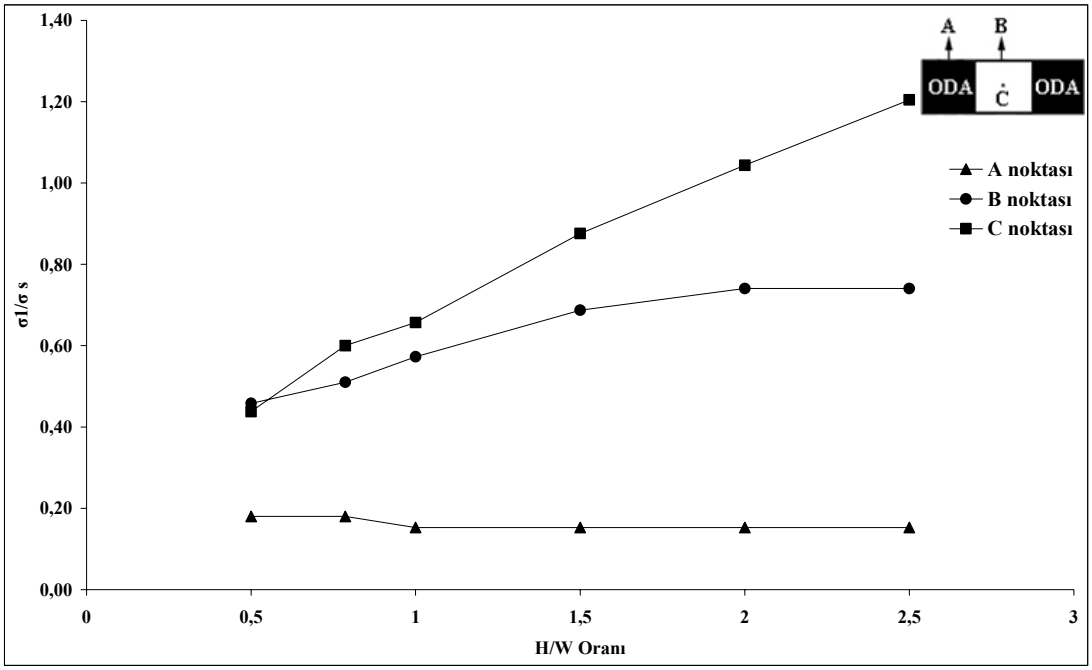
Şekil 10.16. A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen en büyük asal gerilme (σ_3) davranışı

En büyük asal gerilmenin (σ_1) tek eksenli basınç dayanımına (σ_c=18,4 MPa) oranının H/W oranına bağlı olarak değişimi Şekil 10.17'de görülmektedir. Oda açıklığı tavanındaki A noktasında σ_1/σ_C oranı pek değişmezken B ve C noktalarında H/W oranına bağlı olarak doğrusal bir şekilde arttığı anlaşılmaktadır. Artış eğiliminin en fazla gözlendiği topuk merkezini ifade eden C noktasında H/W oranı 0,5 için en düşük değer yaklaşık 0,2 olurken bu oran H/W oranı artışına bağlı olarak artma eğiliminde devam etmekte ve yaklaşık olarak en yüksek σ_1/σ_c değeri 0,6 olmaktadır.



Şekil 10.17. A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen σ_1/σ_c davranışı

En büyük asal gerilmenin (σ_1) uzun süreli sünme dayanımı değerine (σ_s=9,2 MPa) oranı dikkate alınarak elde edilen değerler Şekil 10.18'de grafiksel olarak sunulmuştur. A noktasında σ_1/σ_s oranı hemen hemen sabit kalırken B noktasında H/W>2 koşulu için sabitlenmektedir. σ_1/σ_c değerlerinin analizinden farklı olarak topuk merkezini ifade eden C noktası için H/W oranının yaklaşık 1,85'den büyük olması durumunda σ_1/σ_s >1 olmaktadır. Bu durum duraysızlık olarak düşünülebilir. Mühendislik tasarımında, kısa süreli tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) değeri yerine en uygun sünme gerilme değerinin (σ_s) dikkate alınmasının daha gerçekçi sonuçlar vereceği kanısı oluşmuştur.



Şekil 10.18. A, B ve C noktalarında H/W oranlarının artışına bağlı olarak elde edilen σ_1/σ_s davranışı

11. SONUÇ VE ÖNERİLER

11.1. Sonuçlar

Tez çalışmasına konu olan problem, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de son yıllarda kullanımı söz konusu olan doğalgaz ve nükleer atıkların yeraltında depolanmasıdır. Ülkemiz için bu konuda en iyi seçenek kaya tuzu oluşumlarıdır. Ancak kaya tuzunun mekanik davranışının belirlenmesine yönelik bir çalışmanın yapılmadığı görülmektedir. Kaya tuzu doğal gaz ve nükleer atık depolanmasında gündeme gelirken ayrıca kaya tuzu madenciliğinde kullanılan topuk boyutlarının deneme-yanılma yaklaşımı ile belirlenmesi önemli bir diğer problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kaya tuzu formasyonlarının kısa ve uzun dönemli mekanik davranışlarının belirlenmesi, hazırlanan veri tabanı yardımıyla kaya tuzuna ait sünme davranışını açıklayan bir matematiksel modelin geliştirilmesi ve buna bağlı bir seri tasarım çalışmalarında kullanılacak tasarım verisinin elde edilmesi bu çalışmanın amacını oluşturmuştur. Bu amaç doğrultusunda ülkemizin iki önemli kaya tuzu oluşumunun bulunduğu Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu sahalarına ait bir seri çalışma gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 6 yıl süren bu tez çalışması ön çalışma, mekanik çalışma ve analiz olmak üzere üç temel başlığa ayrılabilir. Bu başlıklar altında ulaşılan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

a. Ön çalışma
   i. Kaya tuzuna ait sünme deneyleri için geliştirilen matematiksel yaklaşımlar incelenmiştir.
   ii. Kısa süreli kaya mekaniği deneyleri için gerekli olan deney cihazları Selçuk Üniversitesi-Maden Mühendisliği Bölümü'nde mevcut olmasına karşın sünme deneylerinde kullanılacak özel hidrolik pres sistemi mevcut değildi. Bunun için özel bir tasarım geliştirilmiş ve Konya sanayi bölgesindeki bir firmaya 6 adet hidrolik pres imal ettirilmiş ve SÜ-Maden

Mühendisliği Bölümü'nde özel bir sünme deney laboratuarı kurulmuştur. Bu laboratuarda, 6 adet özel tasarımlı 30 ton basınç kapasiteli hidrolik pres, ortam sıcaklık ve nemini kontrol edebilen bir klima ve nem-sıcaklık ölçer bulunmaktadır.

iii. Her iki maden sahasından getirilen toplam 60 adet kaya tuzu bloğundan silindir biçiminde karot numuneler hazırlanmıştır. Karot alma çalışmalarında önce su kullanılmış ancak uygun olmayan numuneler elde edilmiştir. Sonra susuz karot alımı yapılmaya çalışılmış fakat çok yoğun kaya tuzu tozu ortaya çıkmıştır. Bu durumun laboratuar çalışmalarını olumsuz etkilemesi sonucunda su yerine gazyağı kullanma önerisi denenmiş ve oldukça başarılı olunmuştur. Bu işlem için karot alma makinesine bir gazyağı tankı ilave edilmiştir. Sonuç olarak bu yöntem kullanılarak kısa ve uzun dönemli kaya mekaniği deneyleri için yaklaşık 25 adet karot numunesi hazırlanmıştır.

b. Kaya tuzuna ait mekanik özelliklerinin belirlenmesi

i. Kısa dönemli kaya mekaniği çalışmaları çerçevesinde; nokta yükleme indeks dayanımı, suda dağılma dayanımı, yoğunluk-gözeneklilik, Schmidt sertlik, tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı, tek eksenli deformabilite ve periyodik yükleme ve yük boşaltma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar;

1. Yoğunluk-gözeneklilik belirleme deneyleri yardımıyla Çankırı kaya tuzuna ait ortalama yoğunluk 2,17 gr/cm^3 ve gözeneklilik % 2,15 iken Nevşehir Gülşehir kaya tuzu için bu değerler sırasıyla 2,18 gr/cm^3 ve % 2,57'dir
2. Yapılan nokta yükleme deneyleri sonucunda Çankırı kaya tuzu için nokta yükleme indeks değeri 1,67 MPa olurken bu değer Nevşehir için 0,44 MPa olmuştur.
3. Suda dağılma dayanımı deneyi sonucunda elde edilen I_{d2} değerleri Çankırı kaya tuzu için % 8,0 ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için % 6,4 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak her iki kaya tuzu numunesi

de suda dağılmaya çok düşük dayanımlı olarak sınıflandırılmıştır. Ancak deney ortamında kullanılan suyun derişimi artırıldığında suda dağılma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

4. Schmidt sertlik deneyi sonuçlarına göre Çankırı kaya tuzu 29,38 değerini alırken, Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu 32,40 değerini almıştır. Sonuç olarak her iki kaya tuzu numunesi de az sert sınıfına girmiştir.
5. Yapılan tek eksenli basınç dayanımı deneyleri sonucunda Çankırı kaya tuzu numunelerinde tek eksenli basınç dayanımı değeri 42 mm çaplı karot örnekleri için 17,14 MPa, 50-54 mm çaplı karot örnekleri için 20,77 MPa, 62-65 mm çaplı karot örnekleri için 15,56 MPa ve 91 mm çaplı karot örnekleri için 21,22 MPa bulunmuştur. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numunelerinde tek eksenli basınç dayanımı değerleri 42 mm çaplı karot örnekleri için 20,50 MPa, 50-52 mm çaplı karot örnekleri için 26,98 MPa ve 91-93 mm çaplı karot örnekleri için 30,85 MPa bulunmuştur. Numune çapının değişimi ile tek eksenli basınç dayanımının değiştiği görülmüştür.
6. Tek eksenli basınç dayanımı yardımıyla boyut analizi yapılmıştır. Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için yükseklik çap oranının (H/D) yaklaşık 1,5'ten büyük olması koşulunda boyut etkisinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca belirlenen oranlarda Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzları için numune çapının 50 mm'den büyük olması ve çapın kristal büyüklüğünün en az 10 katı olması gerektiği belirlenmiştir. Sonuç olarak bu tez çalışmasında kullanılan numunelerin yükseklik çap oranı (H/D) 2 ve çap (D) değeri de 93 mm olarak seçilmiştir.
7. Dolaylı çekme dayanımı değerleri Çankırı kaya tuzu için 1,33 MPa olurken bu değer Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için 1,15 MPa olarak elde edilmiştir.
8. Çankırı ve Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu numunelerinde 1,5, 3 ve 4,5 MPa değerindeki yanal basınçlarla üç eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki kaya tuzu için Mohr zarfı,

doğrusal ve doğrusal olmayan dayanım zarfı eşitlikleri geliştirilmiştir. Mohr zarfı eşitliklerinden sırasıyla Çankırı kaya tuzu için kohezyon (c) 5 MPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 58^o iken Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için kohezyon (c) 4,8 MPa ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 61^o olarak belirlenmiştir.

9. Gerçekleştirilen tek eksenli deformabilite deneyleri sonucunda Çankırı kaya tuzu için tanjant elastik modül değeri (E_t) 1,41 GPa, tanjant Poisson oranı değeri (υ_t) 0,24, ortalama elastik modül değeri (E_{ort}) 1,54 GPa, ortalama Poisson oranı değeri (υ_{ort}) 0,28, sekant elastik modül değeri (E_s) 1,87 GPa, sekant Poisson oranı değeri (υ_s) 0,22 olarak tespit edilmiştir. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için tanjant elastik modül değeri (E_t) 2,48 GPa, tanjant Poisson oranı değeri (υ_t) 0,06, ortalama elastik modül değeri (E_{ort}) 2,29 GPa, ortalama Poisson oranı değeri (υ_{ort}) 0,11, sekant elastik modül değeri (E_s) 1,89 GPa, sekant Poisson oranı değeri (υ_s) 0,16 olarak belirlenmiştir. Ayrıca periyodik yükleme-yük boşaltma deneylerinin son periyodundan Çankırı kaya tuzu için tanjant elastik modül (E_t) 8,8 GPa, Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için 9,7 GPa ve tanjant Poisson oranlarının sırasıyla 0,40 ve 0,34 olduğu belirlenmiştir. Tasarım çalışmalarında periyodik yükleme-yük boşaltma deney sonuçları dikkate alınmıştır.

ii. Uzun dönemli sünme deneyleri her iki kaya tuzu sahası için ayrı ayrı yapılmıştır. Bunlara ait sonuçlar;

1. Çankırı kaya tuzundan hazırlanan 5 adet numune üzerinde ayrı ayrı 80, 95, 100, 110 ve 115 kN'luk sabit yükler uygulanmıştır. Bunlara ait sünme davranışları belirlenmiştir. Her bir deneye ait sonuçlar aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

- 80 kN yük altında deneye tabi tutulan C80-1 numunesi 10.06.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=11,8 MPa) maruz bırakılmış olup halen yaklaşık 750 gündür deney devam etmektedir. 17 Aralık 2008 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,00377 mm/gün'dür.

- 95 kN yük altında deneye tabi tutulan C95-1 numunesi 07.08.2008 tarihinde sabit yüke (σ_s=13,9 MPa) maruz bırakılmış olup halen yaklaşık 230 gündür deney devam etmektedir. 17 Aralık 2008 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0177 mm/gün'dür.
- 100 kN yük altında deneye tabi tutulan C100-1 numunesi 10.01.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=14,7 MPa) maruz bırakılmış olup sünme deneyi 157 gün devam ederek 15.06.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. 15 Haziran 2007 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0437 mm/gün'dür.
- 110 kN yük altında deneye tabi tutulan C110-1 numunesi 14.05.2008 tarihinde sabit yüke (σ_s=16,2 MPa) maruz bırakılmış olup halen yaklaşık 260 gündür deney devam etmektedir. 17 Aralık 2008 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0557 mm/gün'dür.
- 115 kN yük altında deneye tabi tutulan C115-1 numunesi 13.05.2008 tarihinde sabit yüke (σ_s=16,9 MPa) maruz bırakılmış olup sünme deneyi 23 dakika devam ederek 13.05.2008 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. 13 Mayıs 2008 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0645 mm/saat'dir.

2. Nevşehir-Gülşehir kaya tuzundan hazırlanan 6 adet numune üzerinde ayrı ayrı 80, 100, 120, 130, 140 ve 160 kN'luk sabit yükler uygulanmıştır. Bunlara ait sünme davranışları belirlenmiştir. Her bir deneye ait sonuçlar aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

- 80 kN yük altında deneye tabi tutulan N80-1 numunesi 10.06.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=11,8 MPa) maruz bırakılmış olup halen yaklaşık 750 gündür deney devam etmektedir. 17 Aralık 2008 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0074 mm/gün'dür.
- 100 kN yük altında deneye tabi tutulan N100-1 numunesi 10.01.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=16,2 MPa) maruz bırakılmış olup sünme deneyi 142 gün devam ederek 31.05.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. 31 Mayıs 2007 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,045 mm/gün'dür.

- 120 kN yük altında deneye tabi tutulan N120-2 numunesi 06.08.2008 tarihinde sabit yüke (σ_s=17,7 MPa) maruz bırakılmış olup halen yaklaşık 175 gündür deney devam etmektedir. 17 Aralık 2008 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0533 mm/gün'dür.
- 130 kN yük altında deneye tabi tutulan N130-1 numunesi 13.08.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=19,1 MPa) maruz bırakılmış olup sünme deneyi 114 gün devam ederek 03.12.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. 03 Aralık 2007 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,0828 mm/gün'dür.
- 140 kN yük altında deneye tabi tutulan N140-1 numunesi 20.08.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=20,6 MPa) maruz bırakılmış olup sünme deneyi 19 gün devam ederek 07.09.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. 07 Eylül 2007 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 0,541 mm/gün'dür.
- 160 kN yük altında deneye tabi tutulan N160-1 numunesi 17.07.2007 tarihinde sabit yüke (σ_s=23,6 MPa) maruz bırakılmış olup sünme deneyi 3 gün devam ederek 19.07.2007 tarihinde numunenin yenilmesi ile sonlanmıştır. 19 Temmuz 2007 tarihi itibarı ile genel sünme hızı 2,296 mm/gün'dür.

c. Veri tabanına bağlı analiz sonuçları

Sünme davranışının belirlendiği sünme deneylerinden ve kısa süreli deneylerden elde edilen veri tabanı kullanılarak bir seri analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

i. Her iki kaya tuzu için sünme davranışını açıklayan bir model geliştirilmiştir;

$$\varepsilon_d = A\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[1-e^{-t/B}\right]\left[C+e^{-Q/RT}t\right]+\frac{1}{t_{max}-t}$$

ii. Geliştirilen matematiksel model sünme davranışına ait birinci, ikinci ve üçüncü sünme davranışlarını ayrı ayrı verebilmektedir. 1., 2. ve 3. sünme davranışlarına ait eşitlikler aşağıda sırasıyla sunulmuştur. Bu üç eşitliğin toplamı toplam sünme davranışı olan yukarıdaki eşitliği vermektedir.

$$\varepsilon_{d_1} = A\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[1 - e^{-t/B}\right]C$$

$$\varepsilon_{d_2} = A\frac{\sigma_s}{\sigma_c}\left[1 - e^{-t/B}\right]e^{-Q/RT}t$$

$$\varepsilon_{d_3} = \frac{1}{t_{max} - t}$$

iii. Geliştirilen matematiksel modelde geçen A, B, C, Q ve t_{max} katsayıları ile sünme gerilmesinin tek eksenli basınç dayanımına oranı (σ_s/σ_c) arasında önemli istatistiksel ilişkiler belirlenmiştir. Böylece tasarım mühendisi, kendisinin belirleyeceği herhangi bir σ_s/σ_c oranına ait sünme deneyi için geliştirilen matematiksel modelde geçen A, B, C, Q ve t_{max} değerlerini kolayca hesaplayabilir. Sonuç olarak sünme deneyi yapmadan sanal olarak ilgilendiği sabit yük değeri için sünme davranışını belirleyebilir.

iv. Geliştirilen matematiksel yaklaşımdan elde edilen veriler yardımıyla bir seri matematiksel analiz gerçekleştirilmiştir.

Her iki maden sahası için sünme davranışında üçüncü sünme aşamasına hiçbir zaman geçmeyecek en büyük sabit yükün, Çankırı kaya tuzu için 62,54 kN (σ_s=9,2 MPa, D=93 mm), Nevşehir-Gülşehir kaya tuzu için 69,12 kN (σ_s=10,2 MPa, D=93 mm) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu gerilme değerlerinin haricinde tasarımda kullanılabilecek alt sınır değerlerinin ise sırasıyla 46,94 kN (σ_s=6,910 MPa) ve 42,39 kN (σ_s=6,241 MPa) olduğu tespit edilmiştir. Her iki maden sahası için alt ve üst sınır sabit yük değerlerine ait ikinci sünme aşamaları belirlenmiş ve birer abak geliştirilmiştir. Bu abaklar yardımıyla tasarımda seçilmesi gereken en uygun sabit yük değerleri açıkça görülebilmektedir. Sonuç olarak Çankırı için P≤62,5 kN ($\sigma_s \leq$9,2 MPa), Nevşehir-Gülşehir için P≤69,1 kN ($\sigma_s \leq$10,2 MPa) sınır değerlerini tasarım mühendislerinin dikkate alması önerilir. Ayrıca yukarıda belirtilen abaklar kullanılarak ilgilenilen sabit yükün oluşturacağı sünme davranışının birinci, ikinci ve üçüncü sünme davranışları belirlenerek kolayca yorumlanabilir.

v. Kısa ve uzun dönemli hazırlanan veri tabanı ve matematiksel modelden belirlenen en uygun sünme yükleri (Çankırı için P=62,5 kN, σ_s=9,2 MPa; Nevşehir-Gülşehir için P=69,1 kN, σ_s=10,2 MPa) dikkate alınarak Çankırı maden sahasında kullanılan oda-topuk boyutları PHASE^2 paket programı ile sayısal yöntemle analiz edilmiştir. Gerçek maden koşullarında topukların güvenli olduğu tespit edilmiştir. Topuk yükseklikleri sabit tutularak topuk genişliklerinin değiştirilmesi ile elde edilen farklı topuk boyutlarında (H/W=0,5; 0,786; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5) yapılan analizlerde H/W>1,85 olması durumunda topuk duraysızlıklarının oluşabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Sayısal çözümleme çalışmalarından, tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) yerine sünme gerilmesi değerlerinin daha çok önemsenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

11.2. Öneriler

Bu doktora tez çalışmasından elde edilen tecrübe ve sonuçlara bağlı olarak kaya tuzu üzerinde gelecekte yapılacak çalışmalara yön vermesi amacıyla aşağıdaki öneriler verilebilir.

i. Bu tez çalışmasına konu olan maden sahalarının daha detaylı jeolojik incelemesi yapılmalı,
ii. Sünme deneyleri farklı sahalar için de gerçekleştirilmeli,
iii. Geliştirilen matematiksel modelin diğer sahalar için de performansı denenmeli,
iv. Manüel ağırlıklı olan sünme deney düzeneği elektronik sistemlerle desteklenmeli ve
v. Deney düzeneğine üç eksenli ve sıcaklık kontrol üniteleri eklenmelidir.

KAYNAKLAR

Acar, A. 1974. Mineraloji ve Petrografi. Atatürk Üniversitesi Yayın No: 379, 172s.

Anon., 2004, Guides on Flooding Preventation in Mines and Undermined Objects Protection in the Upper Kama Potash Deposits: Saint Petersburg (In Russia).

Assis, A. 1990. A Method for Evaluating Transient Creep, Ph.D. Dissertation, University of Alberta, Canada.

ASTM, 1986, Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens: D 2938, DOI: 10.1520/D2938-95, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA, 3p.

Aubertin, M., Hardy, H. R. 1996. Proc., 4th Conf. on Mechanical Behaviour of Salt, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada. Trans Tech Publ., Clausthal-Zellerfeld.

Aufricht, W.R. and Howard, K.C. 1961. Salt characteristics as they affect storage of hydrocarbons. Journal of Petroleum Technology, 1, 3, p.733.

Baar, C.A. 1977. Applied salt rock mechanics-The in-situ behavior of salt rocks, Elsevier, Amsterdam, 294p.

Bary, A. 2002. Oilfield Review.17 p. Germany.

Baykal, F. 1977. Sedimantoloji ve Sedimanter Kayalar. İstanbul Üniversitesi Yayın No: 2297, 195s., İstanbul.

Berest, P., Blum, P.A., Charpentier, J.P., Gharbi, H., Vales, F. 2005. Very slow creep tests on rock samples, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.42, Issue 4, pp.569-576.

Berest, P., Bergues, J., Brouard, B., Durup, J.G., Guerber, B. 2001. A salt cavern abandonment test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 38, p.357-368.

Berest, P., Bergues J., 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.

Bieniawski, Z.T., 1984, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling: A.A.Balkema/ Rotterdam, Boston, USA, 272p.

Bieniawski, Z.T., 1972, Propagation of brittle fracture in rock. AIME, Basic And Applied Rock Mechanics, Tenth Symposium On Rock Mechanics. AIME, New York, USA, pp.409-427.

Boontongloan, C. 2000. Engineering properties of the evaporitic and clastic rocks of Maha Sarakam Formation, Sakon Nakhon evaporite basin. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Thailand.

Borchert, H., Muir, R.O. 1964. Salt deposits. D.van Nostrand, London.

BOTAŞ. 2005. Tuz Gölü Havzası Doğalgaz Depolama Projesi. 35 s. Ankara.

Braitsch, O. 1971. Salt deposits, Springer, Berlin.

Brara, A., Klepaczko, J.R. 2006. Experimental characterization of concrete in dynamic tension, Mechanics of Materials, Vol.38, Issue 3, pp.253-267

Carnody, J., Sterling, R. 1993. Underground Space Design. John Wiley and Sons. 328p.

Carter, N.L. 1981. Creep and Creep Rupture of Rock Salt. Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-224, 59p.

Casas, E., Lowenstein, T.K. 1989. Diagenesis of saline pan halite: comparison of petrographic features of modern, Quaternary and Permian halites. Journal of Sedimentary Petrology, v. 59, p.724-739.

CEN. 1998. Gas Supply Systems-Underground Gas Storage-Part 3, Functional Recommendations for Storage in Solution-Mined Cavities, European Committee for Standardization EN1918-3, Brussels.

Corthesy, R., Leite, M.H., Gill, D.E., Gaudin, B. 2003. Stress measurements in soft rocks, Engineering Geology, Vol.69, Issues 3-4, pp.381-397.

Cosenza, P., 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.

Cosenza, P., Ghoreychi, M., Bazargan-Sabet, B., de Marsily, G. 1999. In situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.36, Issue 4, pp.509-526.

Cottrell, A.H. 1952. The time laws of creep, J. Mech. Phys. Solids, 1 (1), pp.53-63.

Cristescu, N., Hunsche, U. 1998. Time Effects in Rock Mechanics. Materials, Modeling and Computation, Wiley, Chichester, p.342.

De Las Cuevas, C. 1997. Pore structure characterization in rock salt, Engineering Geology, Vol.47, Issues 1-2, pp.17-30.

DeVries, K.L., Mellegard K.D., and Callahan G.D. 2002. Salt damage criterion proof of concept research, Topical report. U.S. Department of Energy, Pennsylvania.

Downey, M.W. 1984. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations. AAPG Bulletin, v. 68, p.1752-1763.

DPT. 2006. Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu.
DPT. 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri ((Bor Tuzları-Trona-Kaya Tuzu-Sodyum Sülfat-Stronsiyum) Çalışma Grubu Raporu, Cilt II.

Dreyer, W. 1972. The Science of Rock Mechanics, Part I. The Strength Properties of Rock, Trans. Tech. Publication, Clausthal-Zellerfeld.

Dreyer, W. 1973. The Science of Rock Mechanics-Part 1. Clausthal: Trans. Techn. Publ. pp. 150-190.
Düzyol, S. 2004. Kaya Tuzuna ait Mekanik Parametrelerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 190s.

Eby, J.B. 1956. Salt dome interest centers on Gulf Coast. World Oil, 143.

Ergin, Z. 1988. Tuzun Üretim Teknolojisi ve İnsan Sağlığındaki Yeri. Madencilik Dergisi, s.10-30.

Erdhardt, K. 1980. Exploration eines neuen Baufeldes im Grubenbetrieb des Steinsalzbergwerkes Braunschweig-Lüneburg der Kali und Salz AG, Proceedings Fifth Symposium on Salt, Vol. 1, 231, The Northern Ohio Geological society, Inc.

Ersoy, A., Yünsel, T.Y. 2001. 4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, s.118-119, İzmir.

Fahimifar, A., Soroush, H. 2005. A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.20, Issue 4, pp.333-343.

Fairhurst, C.M. 1979. Rock Mechanics Studies of Proposed Underground Mining of Potas in Sergipe, Brasil. Proc. of the 4th Int. Cong. on Rock Mech. Switzerland, Vol.1, p.131-135.

Filimonov Y.L., Lavrov A.V., Shafarenko Y.M., Shkuratnik V.L. 2001. Memory Effects in Rock Salt Under Triaxial Stress State and Their Use for Stres Meassurement in a Rock Mass, Rock Mech. Rock Engng., vol.34, 275-291.

Fossum, A.F., Fredrich, J.T. 2002. Salt Mechanics Primer for Near-Salt and Sub-Salt Deepwater Gulf of Mexico Field Developments, SANDIA REPORT SAND2002–2063, Albuquerque, New Mexico, Livermore, California, 67p.

Fuenkajorn, K. 2005. Tuz Golu Underground Gas Storage Facility Finite Element Analysis. Final Report. International Gas Consulting Inc.Houston, Texas. Geomechanics Research Unit Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand.

Fuenkajorn, K. and Jandakaew, M. 2003. Compressed-air energy storage in salt dome at Borabu district, Thailand. Geotechnical Aspects, Proceedings of the 38th Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, University of Reno, Nevada, March 19-21, pp. 377-391.

Fuenkajorn, K. and Daemen, J. J. K. 1988. Borehole Closure in Salt. Technical Report NUREC/CR-5243, prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Füchtbauer, H., Muller, G. 1970. Sedimente und Sedimentgesteine, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Gamble, J.C. 1971. Durability – Plasticity Classification of Shales and Other Agrillaceous Rocks, PhD Thesis, University of Illinois.

Gasc-Barbier, M., Chanchole, S., Berest, P. 2004. Creep behavior of Bure clayey rock, Applied Clay Science, Vol.26, Issues 1-4, pp.449-458.

Grgic, D., Homand, F., 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.

Hanna, M.A. 1959. Salt domes: favorite home for oil. Oil and Gas Journal, 57, 138.

Hansen, F.D., Senseny, P.E. 1983. Petrofabrics of deformed salt. Potas'83. Potas Technology, Toronto, p.347-354.

Hansen, F.D., Carter, N.L. 1981. Creep of Avery Island Rock Salt. The Mechanical Behavior of Salt, Proc.1st Conf., Pennsylvania.

Hansen, F.D., Carter, N.L. 1980. Creep of Rock Salt at Elevated Temperature. The State of the Art in Rock Mechanics, 21st Symp. on Rock Mec., Univ. of Missouri, 217-227.

Hansen, F.D., Mellegard, K.D. and Senseny, P.E. 1984. Elasticity and strength of ten natural rock salts. Mechanical Behavior of Salt I, Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State University.

Hansen F.D., Mellegard K.D., 1980. Creep of 50-mm Diameter Specimens of Some Salt from Aver Island, Louisiana.

Hardy, H.R. 1982. Rock Mechanics Aspects of the Design of Salt Caverns fort he Storage of Natural Gas. The Pennsylvania State University Dept. Of Mineral Engineering, Internal Report, p.1-162.

Hardy, H.R., Langer, M. 1993. The mechanical behaviour of salt, Proc. 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publ., Clausthal-Zellerfeld.

Hawkins, A.B., 1998, Aspects of Rock Strength: Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol.57, No.1, pp.17-30.

Heard H.C. 1972. Steady-state Flow in Polycrystalline Halite at Pressure of 2 Kilobars, Flow and Fracture of Rock, August., Washington, 191-209.

Hildenbrand, A., Urai, J.L. 2003. Investigation of the morphology of pore space in mudstones first results. Marine and Petroleum Geology, v. 20, p.1185-1200.

Hodgson, K and Cook, N.G.W., 1970, The effects of size and stress gradient on the strength of rock: Proc 2nd Congress Int. Soc. Rock Mech., Belgrad, Vol.2, pp.3-5.

Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, Underground excavations in rock, The Institution of Mining and Metallurgy, Chapman & Hall, London, UK, 527p.

Hofcrichter, E. 1976. Zur Frage der Porositat und Permeabilitat von Salzgesteinen, Erdoel-Erdgas Zeitschrift, 9,2, p.77.

Horseman, S., 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.

Hoskins J.R. and Horino F.G., 1969, Influence of spherical head size and specimen diameters on the uniaxial compressive strength of rocks: U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, 16p.

Hunsche, U and Hampel, A. 1999. Rock Salt-The Mechanical Properties of the Host Rock Material for a Radioactive Waste Repository. Engineering Geology, 52, p.238-255.

Hunsche, U. and Schulze, O. 1994. Das Kriechverhalten von Steinsalz. Kali und Steinsalz, 11, p.238-255.

Hunsche U. 1993. Effect of Humidity and Confining Pressure on Creep of Rock Salt, 3rd Conference of Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 237-247.

Ingram, G. M., Urai, J.L. 1999. Top-seal leakage through faults and fractures: the role of mudrock properties, in A. C. Alpin, Muds and mudstones. Physical and Fluid

Flow Properties, Geological Society of London, Special Publication, v. 158, p.125-135.

ISRM, 2007, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006: ISRM Turkish National Group, eds. R.Ulusay & J.A. Hudson Ankara, 628p.

ISRM 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, International Society for Rock Mechanics, 211p.

ISRM, 1978, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16p.

Istvan J.A., Evans L.J., Weber J.H., Devine C. 1997. Rock mechanics for gas storage in bedded salt caverns, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 34, Issues 3-4, pp.142.e1-142.e12.

Jandakaew, M. 2003. Experimental Assessment of Stress Path Effects on Rock Salt Deformation, M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

Jendersie, H. 1969. Kali und Steinsalzbergbau (Band II) , Deutscher Verlag für Grundstoffenindustrie, Leipzig.

Jeremic, M.L. 1994. Rock Mechanics in Salt Mining. A.A. Balkema, 532p., Rotterdam, Netherlands.

Jin, J., 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.

John , M. 1972. The influence of length to diameter ratio on rock properties in uniaxial compression: a contribution to standardization in rock mechanics testing: Report South Africa CSIR No ME1083/5.

Kalenderli, Ö. 1996. Sonlu Elemanlar Yöntemi. İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi, İstanbul, 228s.

Kelsall, P.C., 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.

Kleinsorge,H., Winken, R. 1965. Beitrage zu den Prageu der Gliederuug des Tertias in Zentralanotolien, Geol Jb., 83, s.209-220, Hannover.

Kwon S., Wilson J.W. 1999. Deformation Mechanism of the Underground Excavations at the WIPP Site, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.32, 101-122.

Langer, M. 1986. Hohlraumbau im Salzgebirge Teil B. Planumg und Bau von Salzkavernen Taschenbuch für den Tunnelbau, Essen, Glückauf, p.125-200.

Langer, M. 1984. The rheological behavior of rock salt, Proc. of 1st Conf. on Mech. Behavior of Salt, Pennsylvania State Univ., Clausthal: Trans. Techn. Publ., pp.201-230.

Le Comte 1965. Creep in Rock Salt. J. Geology, Vol. 73, 43-51.

Leite M.H. 1998. Experimental and Numerical Evaluation of Stress Redistribution in Thick-walled Rock Salt Cylinders, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 55, No.3, 367-383.

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.

Liang, W.; Yang, C.; Zhao, Y.; Dusseault M.B.; and Liub, J., 2007, Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock: International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.44, No:3, pp.400-411.

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.

Lorenz, J., Haas Jr., J.L., Clynne, M.A., Potter, R.W. and Schafer, C.M.1981. Physical properties data for rock salt. National Bureau of Standards Monograph 167, Washington, D.C.

Lotze, F. 1957. Steinsalz und Kalisalze (I.Teil, Zweite Auflage), Borntraeger, Berlin.

Lux, K.H. 2002. Kavernanbau. TU Clausthal Institut für Deponietechnik und Geomechanik.

Lux, K.H., 1984, Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrung im Salzkavernenbau: Enke Verlag, Stuttgart, 360 p.

Lux K.H., Heusermann S. 1983. Creep Tests on Rock Salt with Changing Load as a Basis for Verification of Theoretic Material Laws, Proc. 6th International Symp. on Salt Eds. B.C. Schreiber and Harner.H.L. The Salt Institute, Alexandria, USA, Vol. 1, 417-435.

Ma, L., 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.

McKee, C.R. 1980. Fundamentals of In Situ Recovery I, II, Lectures Notes. Univ. of Wyoming, Laramie, USA.

Menzel, W., Minkley, W. 1999. Rock Mechanics Models in Salt Mining. Prof. of the Int. Cong. Mining for Tomorrow's World, Dusseldorf, p.243-246.

Mogi, K., 2007, Experimental rock mechanics: Tailor and Francis Group, London, UK, 361p.

Mogi, K., 1962, The influence of the dimensions of specimens on the fracture strength of rocks: comparison between the strength of rock specimens and that of the earth's crust: Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol.40, pp. 175–185.

Moustachi, O., Thimus, J.F. 1997. P-Wave Attenuation in Creeping Rock and System Identification, Rock Mech. Rock Engng. Vol.30, Issue 4, pp.169-180.

MTA, 2008. http://www.mta.gov.tr.

MTA, 1980. Tekel Çankırı Kaya Tuzu Madeni Raporu.

Munson D.E. 1997. Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.34, no.2, 233-247.

Natau, O. 1997. Geotechnische Nach Weise zur Stansicherheit. Untertagedeponien im Salzgestein. Felsbau, 15, p.446-472.

Norconsult, 2008, Analytical and Numerical Modelling, Norconsult Engineering and Management Consultants, 2p.

Obert, L.; Windes, S. L.; and Duvall, W. I., 1946, Standardized tests for determining the physical properties of mine rock: U.S. Bureau of Mines, Report 3891, 67p.

Okutan H., Öner, G. 1987. Çözelti Madenciliği-Bilgisayar Paket Programı ile Maliyet ve Duyarlılık Analizi. 10. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi.

Özarslan, A., Gerçek, H. 2002. Doğalgaz depolama amaçlı tuz çözelti açıklıklarının tasarımında bazı önemli hususlar. Kayamek'2002-VI.Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Konya, s.267-274.

Özarslan, A. ve Geniş, M. 2008. Kişisel görüşme, Zonguldak.

Özarslan, A. 2007. Kişisel görüşme, Zonguldak.

Özarslan, A. 2006. Kişisel görüşme, Konya.

Özkan, İ., Güneş, H., Özarslan, A., Geniş, M. 2006. Nevşehir-Gülşehir kaya tuz madeninde kaya tuzuna ait mühendislik özelliklerinin belirlenmesi. Kayamek'2006, VIII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İstanbul, s.329-338.

Özkan, İ., Düzyol, S. 2004. Kaya tuzu üzerinde bazı mühendislik tasarım parametrelerinin belirlenmesi. VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas, s.67-76.
Özkan, İ. 1995. Modified rock mass rating (M-RMR) system and roof behavior model, Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara, 370s.

Pannekoek, A.J. and Van Straaten, L.M.J.U. (ed.). 1982. Algemene Geologie (third edition). Wolters-Noordhoff, Groningen.

Pells, P.J.N., 1993, Uniaxial Strength Testing, Comprehensive. Rock Engineering Vol. 3 Rock Testing and Site Characterization (ed. J.A. Hudson), Elsevier, Exeter.

Pfeifle, T.W., Brodsky, N.S., Munson, D.E. 1998. Experimental Determination of the Relationship between permeability and microfracture-induced damage in bedded salt, 12th International Conference on Computational Methods in Water Resources, Heraklion (Greece), 15-19 Jun 1998.

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.

Phueakphum, D. 2003. Compressed-Air Energy Storage in Rock Salt of The Maha Sarakham Formation. M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

Popp, T., Kern, H. 2000. Monitoring the state of microfracturing in rock salt during deformation by combined measurements of permeability and P- and S- wave velocities, Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, Vol.25, Issue 2, pp.149-154.

Popp, T., Kern, H., 1998. Ultrasonic wave velocities, gas permeability and porosity in natural and granular rock salt, Physics and Chemistry of The Earth, Volume 23, Issue 3, pp.373-378.

Pratt H.R.; Black A.D.; Brown, W.S.; and Brace W.R., 1972, The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite: Int. J. of Rock Mech. & Mining Sci., Vol.9, No.4, pp.513-516.

Price M.A., Farmer, I.W. 1980. A General Failure Criterion for Rocks. Proc. 21st US Symp. Rock Mec., Rolla, p.256-264.

Protodiakonov, M.M.; and Koifman M.I., 1963, The scale effect in investigations of rock and coal, Proc. 5th Congress Int. Bureau Rock Mech., Leipzig.
Raup, O.B. 1970. Brine mixing; an additional mechanism for formation of basin evaporites. Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol., 54, 2246.

Richter-Bernburg, G. and Schott, W. 1959. Die nordwestdeutschen Salzstöcke und ihre Bedeutung für die Bildung von Erdöl-Lagerstötten, Erdöl und Kohle, p.12, 29.

Ruchin, L.B. 1958. Grundzüge der Lithologie, Akademie-Verlag, Berlin.

Schmalz, R.F. 1969. Deep-water evaporite deposition: a genetic model. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 53, 798.

Schmidt, E., 1951. A non-destructive concrete tester. Concrete, 59, 34–35.

Schulze, O., Popp, T., Kern, H. 2001. Development of Damage and Permeability in Deforming Rock Salt. Engineering Geology, 61, p.163-180.

Sedlacek, R. 2001. Untertage-Erdgasspeicherung in Deutschland. Erdol Erdgas Köhle, 11, s. 498-504.

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.

Seyment, T., Gönülalan, A.U., Güreli, O., Erduran, D. 2006. Doğalgaz depolamanın önemi ve jeofizik çalışmalar. Türkiye 17. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi, 14-17 Kasım 2006, s.1-4.

Silberschmidt, V.G., Silberschmidt, V.V. 2000. Analysis of Cracking in Rock Salt. Rock Mech. Rock Eng., 33 (1), p.53-70.

Slizowski K., Janeczek J., Przewlocki K. 2003. Suitability of Salt-Mudstones as a Host Rock in Salt Domes for Radioactive-Waste Storage, Applied Energy, vol.75, 119-128.

Stocke K., Horchert H. 1936. Fligrenzen von Salzgesteinen und Salztektonik, Kali, 20, 191-194.

Stormont J.C., Daemen J.J.K. 1990. Changes in Rock Salt Permeability due to Nearby Excavation, Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Ed, Roegiers, Balkema, 899-907.

Sunu, M.Z., Çelik, S. 2002. Petrol ve doğalgazın yeraltında depolanması, s. 289-295, Kayamek'2002-VI.Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Konya.

Swift, G.M., Reddish. D.J. 2005. Underground excavations in rock salt, Geotechnical and Geological Engineering Vol.23, pp.17–42.

Temur, S. 1998. Endüstriyel Hammaddeler. Selçuk Üniversitesi Yayınları, 352s., Konya.

Ter Heege, J.H., De Bresser, J.H.P., Spiers, C.J. 2005. Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain, Tectonophysics, Vol. 396, Issues 1-2, 3, pp.35-57.

Thiadens, A. A. 1968. Het zout der aarde, hoofdstuk III (geologie van hetzout). N.V. Kon. Ned. Zout Industrie, Hengelo.

Thuro, K.; Plinninger, R.J.; Zah, S.; and Schütz, S., 2001, Scale effect in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test: Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2001, Espoo, Finland, pp.169-174.

Trchaninov, I.A., 1979. Principals of Rock Mechanics. Rockville, Maryland, USA.

Trusheim, F. 1960. Mechanism of salt migration in Northern Germany, Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 44, p.1519.

Trusheim, F. 1957. Uber Halokinese und ihre Bedeutung fur die strukturelle Entwicklung Norddeutschland, Zeits. Deutsch. Geol. Ges., p.109-111.

TSE, 2001. Türk Standardı, TS EN 1918-3.

Ünal, E. 2002. Kişisel görüşme, Ankara.

Ünal, E. Özkan, İ. Çakmakçı, G. 2001. Modeling the behavior of longwall coal mine gate roadways subjected to dynamic loading, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.38, Issue 2,pp.181-197.

Ünüçok, C. 1985. Tuzköy kaya tuzlasının (Nevşehir-Gülşehir) jeolojik etüt ve rezerv raporu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 37 s., Ankara.

Üşenmez, Ş. 1985. Sedimantoloji ve Sedimanter Kayaçlar. Gazi Üniversitesi Yayın No:57, 403s., Ankara.

Van den Broek, W.M.G.T., Van Der Zande, M.J., Janssen P.H. 2001. Downhole dehydration vs. reduction of oil droplet break-up. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, p.26-28.

Van den Broek, V.M.G.T. 1989. Aspects of underground disposal of radioactive waste in rock salt. Bibliotheek Tecnische Universitat, 185p.

Van den Broek, W.M.G.T. 1982. Impurities in rock salt; consequences for the temperature increases at the disposal of high-level nuclear waste, Report Delft University of Technology.

Van Eekelen, H.A., Hulsebos, T. Urai, J.L. 1981. Creep of Biscofite. Proc. 1st Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, The Pennsylvania State Univ. p.389-405.

Vouille, G. 1984. Experimental Determination of the Rheological Behavior of Tersanne Rock Salt. Proc. of 1st Conf on Mec. Behavior of Salt, Pennsylvania State Univ., p.407-420.

Wallner, M., Brauer, V., Bornemann, O. 1998. Geoscientific Characterization and Evaluation of Suitability of the Gorleben Repository Site. Proc. Distec'98, Hamburg, p.75-81.

Wallner, M., Caninenberg, C., Gonther, H. 1979. Laboratory Tests on Time and Temperature Depended Mechanical Behavior of Rock Salt. Proc. 4th Cong. Int. Soc. Rock Mechanics, Vol.1, p.313-318.

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.

Wetchasat, K. 2002. Assessment of mechanical performance of rock salt formations for nuclear waste repository in northeastern Thailand, M.S. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

Wawersik W.R., Hannum D.W. 1980. Mechanical Behavior of New Mexico Rock Salt in Triaxial Compression Up to 200 °C, Journal of Geophys. Res. B85, 891-900.

Weidinger P., Hampel A., Blum W., Hunsche U. 1997. Creep Behaviour of Natural Rock Salt and Its Description with the Composite Model, Materials Science & Engineering, vol. A234-236, 646-648.

Wittke, W. 1996. Abdichtung von Strecken im Endlager Morsleben mit hochverichtetem Bentonit. Geoteknik, 19, p. 2-8.

Wong, R.H.C., Lin, P., Tang, C.A., Chau, K.T. 2002. Creeping damage around an opening in rock-like material containing non-persistent joints, Engineering Fracture Mechanics, Vol.69, Issue 17, pp.2015-2027.

www.mta.gov.tr, 2008.

www.rockscience.com, 2008.

www.turkiyetuz.com, 2008.

Yalçın, E., Ertem, M.E. 1997. Deniz Tuzlalarının Türkiye Tuz Potansiyelindeki Yeri. 2.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir Türkiye.

Yang, C. 2000. Time Dependent Behavior of Rock Salt Experimental Investigation and Theoretical Analysis. PhD Thesis, University of Nevada, Reno, 202 p.

Yang C., Daemen J.J.K., Yin J.H. 1999. Experimental Investigation of Creep Behavior of Salt Rock, Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.36, 233-242.

Yüzer, E., Vardar, M. 1986. Kaya Mekaniği. İstanbul, İTÜ Vakfı.

Zak, I. 1978. The geochemical evolution of the Dead Sea. Proceedings Fifth Symposium on Salt, Vol. 1, 181, The Northern Ohio Geological Society, Cleveland.

Zhigalkin, V.M.; Usol'tseva, O.M.; Semenov, V.N.; Tsoi, P.A.; Asanov, V.A.; Baryakh, A.A.; Pan'kov, I.L.; and Toksarov, V.N., 2005, Deformation of quasi-plastic salt rocks under different conditions of loading report I : deformation of salt rocks under uniaxial compression: Journal of Mining Science, Vol.41, No.6, pp.507-515.