



İç Basıncılı Beton Tünellerde Betonarme Kaplama Davranışının Yenilikçi Deneysel ve Sayısal Yaklaşımlar ile İrdelenerek Tasarım Aracı Oluşturulması

Program Kodu: 1001

Proje No: 215M870

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Kağan TUNCAY

Araştırmacılar:

Prof. Dr. Yalın Arıcı
Prof. Dr. Barış Binici
Prof. Dr. Erdem Canbay
Prof. Dr. İsmail Özgür Yaman

Danışman:

Doç. Dr. Hakan Başarır

Bursiyerler:

Münci Tunç Kalaycıoğlu
Gökberk Işık

Mayıs 2019
ANKARA



ÖNSÖZ

Proje üç senelik bir TÜBİTAK 1001 projesidir (15 Nisan 2016 – 15 Nisan 2019). Projenin temel amacı iç basınçlı betonarme enerji tünellerinin iç basınç altındaki davranışlarının anlaşılmasına yönelik yenilikçi deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak tasarım ilkeleri geliştirmektir. Basınçlı enerji tünelleri hidroelektrik enerji sistemlerinin önemli bir parçası olup tasarım ve performans açısından klasik kuru tünellerden yükleme ve işletme açısından farklılık gösterir. Baraj rezervuarında depolanan su, kapakların açılması ile enerji tüneline dolar ve basınçlı bir şekilde türbine iletilir. Bu esnada ani basınç artışına maruz kalan tünel, kuru tünellerin aksine yüksek iç basınç altındadır. Bu tür dinamik bir deneyin laboratuvar ortamında yapılması mümkün olmadığından beton davranışını en iyi şekilde tahmin edebilecek modern sayısal araçlara ihtiyaç bulunmaktadır. Son on beş yıldır kullanımı giderek yaygınlaşan, parça etkileşim tabanlı bir metod olan peridinamik yaklaşımı beton ve betonarme sistemlerin modellenmesinde kullanılmak üzere proje kapsamında geliştirilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekçi deney düzenekleri ile test ve kalibre edilen sayısal model, daha sonra dinamik çatlak oluşumunu, ilerlemesini ve dağılımını tahmin etmek üzere kullanılmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal analizler neticesinde iki tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin ülkemizde betonarme basınçlı tünel tasarımlarını kolaylaştıracağı düşünülmektedir.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
TABLolar.....	iv
ŞEKİLLER.....	v
ÖZET.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Basıncılı Tünel.....	1
1.2 Çatlaklı Ortamların Sayısal Modellenmesi.....	3
2. SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	6
2.1 Örtüşen Kafes Metodu (OLM).....	6
2.1.1 Bünye Denklemleri	6
2.1.2 Çatlak Enerjisi Normalleştirme Kuralı	8
2.1.3 Örtüşen Kafes Elemanlarında Oluşan bir Çatlak için Çatlak Enerjisinin Hesaplanması	9
2.1.4 Sayısal Kalibrasyon Yöntemi.....	11
2.2 Sıralı Doğrusal Analiz	14
2.3 Belirtik Entegrasyon.....	18
2.4 Doğrusal Davranış Sergilemeyen Sistemlerin PID Kontrolü Yardımıyla Belirtik Entegrasyon Kullanılarak Deplasman Kontrollü Modellenmesi	18
2.5 OLM Analiz Motoru için Örgü Programının Geliştirilmesi	20
2.6 Geliştirilen OLM Yazılımının Özellikleri	21
2.7 Örtüşen Kafes Modelinin Deneysel Eleman Testleriyle Doğrulaması	22
2.7.1 Kiriş Deneyi	22
2.7.2 Ölçekli Baraj Testi	23
2.7.3 Çekme Rijitleşmesi	26
2.8 Örtüşen Kafes Modelinin Betonarme Eleman Testleriyle Doğrulaması	27
2.8.1 Betonarme Kiriş Deneyi.....	27
2.8.2 Betonarme Kiriş Deneyi.....	28
2.8.3 Derin Kiriş Deneyi.....	31
2.8.4 Betonarme Duvar Deneyi.....	34
2.9 Lifli Beton için OLM Parametrelerinin Elde Edilmesi	36
2.9.1 Çelik Lif ile Güçlendirilmiş Kiriş Deneyleri ve Modeli.....	36
2.9.2 Sentetik Lif ile Güçlendirilmiş Kiriş Deneyleri ve Modeli	38
2.10 Yayılı Çatlak Modelleri için Ginzburg-Landau ve Cahn-Hillard Faz Ayrımı Modelleriyle Çatlak Açıklıklarının Tahmini	39
2.10.1 Ginzburg-Landau Yaklaşımı	39
2.10.2 Cahn-Hillard Yaklaşımı.....	41
2.10.3 Ginzburg-Landau Formülasyonunun Sayısal Çözümleri	43
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	46
3.1 Giriş.....	46
3.2 Deney 1: Düşük Saha Gerilimleri Altında Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi	47
3.2.1 Geometri.....	47
3.2.2 Deney Düzeneğinin İmalatı	48
3.2.3 Yükleme Parçalarının Tasarımı ve Pistonların Yerleştirilmesi	54
3.2.4 Ölçüm Sistemi	57
3.2.5 Deney Sonuçları	58
3.2.6 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	64
3.3 Deney 2: Tünel Kaplamasının Kaya Etkileşimi Olmadan İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi.....	66

3.3.1 Ölçüm sistemi.....	66
3.3.2 Deney Sonuçları.....	68
3.3.3 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	72
3.4 Deney 3: Saha Gerilimleri Altında Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi.....	76
3.4.1 Öngermeli İyileştirilmiş Deney Düzenineğin Tasarımı.....	76
3.4.2 Deney Düzenineğin İmalatı	85
3.4.3 Ölçüm Sistemi	91
3.4.4 Kaya Katmanına Öngerme Uygulaması.....	95
3.4.5 Öngerme Kontrolü	98
3.4.6 Deney Sonuçları.....	101
3.4.7 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	106
3.5 Deney 4: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Kaya ile Kısmi Etkileşimli Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi	109
3.5.1 Deney Sonuçları.....	109
3.5.2 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	114
3.6 Deney 5: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Tamir Edilmiş Çatlaklı Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi	117
3.6.1 Tamirat İşlemi.....	117
3.6.2 Deney Sonuçları.....	118
3.7 Deney 6: Lif Katkılı Betondan Üretilen Tünel Kaplamasının Kaya Etkileşimi Olmadan İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi	123
3.7.1 Lifli Beton.....	124
3.7.2 Deney Sonuçları.....	124
3.7.3 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	128
3.8 Deney 7: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Kaya ile Kısmi Etkileşimli Lifli Betondan Üretilen Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi	131
3.8.1 Deney Sonuçları.....	131
3.8.2 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	134
3.9 Deney 8: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Kaya ile Kısmi Etkileşimi İyileştirilmiş Lifli Betondan Üretilen Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi.....	136
3.9.1 Deney Sonuçları.....	137
3.9.2 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi	141
4. DİNAMİK DAVRANIŞIN SAYISAL MODELLENMESİ	144
4.1. Giriş.....	144
4.2 Farklı Kaya Rijitlikleri için Elde Edilen Dinamik Sonuçlar	145
4.3 Mevcut Saha Gerilimlerinin Tünel Kaplamasının Davranışına Etkisi	154
4.4 Tünel Geometrisinin Tünel Kaplamasının Davranışına Etkisi	158
5. BASİTLEŞTİRİLMİŞ TASARIM YÖNTEMLERİ.....	162
5.1 Giriş.....	162
5.2 Eksenel Simetrik Matematiksel Model.....	162
5.3 Basitleştirilmiş Elastik Tasarım	163
5.4 Basitleştirilmiş İnelastik Tasarım	166
6. SONUÇLAR.....	183
KAYNAKLAR	185



TABLolar

<i>Tablo 2.1 Kalibrasyon sonuçları ($d_s = 1 \text{ mm}$).</i>	12
<i>Tablo 2.2 Sayısal kalibrasyon sonuçlarıyla (Tablo 2.1), Bölüm 2.1.3'de verilen yöntem kullanılarak hesaplanan çatlak enerjisi değerlerinin mukayesesi.</i>	13
<i>Tablo 2.3 Çelik lifli beton için OLM davranış parametreleri ve çatlak enerjisi değerleri.</i>	37
<i>Tablo 2.4 Sentetik lifli beton için OLM davranış parametreleri ve çatlak enerjisi değerleri.</i>	38
<i>Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan beton reçeteleri.</i>	50
<i>Tablo 3.2 Deneyde kullanılan donatı boyutları.</i>	52
<i>Tablo 3.3 Birinci deneyde kullanılan betonların deneysel özellikleri.</i>	59
<i>Tablo 3.4 İkinci deneyde kullanılan betonun malzeme özellikleri.</i>	66
<i>Tablo 3.5 Yaslanma betonu, kaya katmanı ve tünel kaplaması için kullanılmış beton karışım oranları.</i>	90
<i>Tablo 3.6 Beton özellikleri.</i>	101
<i>Tablo 3.7 Lifli beton reçetesi.</i>	126
<i>Tablo 5.1 R/t oranının 8 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.</i>	175
<i>Tablo 5.2 R/t oranının 6 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.</i>	177
<i>Tablo 5.3 R/t oranının 4 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.</i>	179
<i>Tablo 5.4 R/t oranının 3 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.</i>	181



ŞEKİLLER

Şekil 2.1 a-b) OLM ufkunun illüstrasyonu (ufuk=1.5d ve ufuk=3.01d), c) Beton malzeme davranışı, d) SLA uygulaması, e) Çelik malzeme davranışı.	7
Şekil 2.2 Altı farklı uzunlukta kafes elemanı için çatlak enerjisi normalleştirme kuralı ile elde edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	9
Şekil 2.3 a) OLM ufkunun 3.01d olduğu durum için 1x1'lik bir bölge için kafes elemanlarının dağılımı, b), c), d) farklı çatlak uzunlukları ve yönleri için çatlak elemanlarının gösterimi. Farklı renkler farklı uzunluktaki kafes elemanlarını göstermektedir.	11
Şekil 2.4 Kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri (ufuk =1.5d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).	14
Şekil 2.5 Çatlak görünümü (ufuk =1.5d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).	15
Şekil 2.6 Kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri (ufuk =3.01d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).	16
Şekil 2.7 Çatlak görünümü (ufuk =3.01d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).	16
Şekil 2.8 Sayısal örnek için kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri a) ufuk=1.5d, b) ufuk=3.01d.	17
Şekil 2.9 Sayısal örnek için çatlak görünümü kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri a) ufuk=1.5d, b) ufuk=3.01d.	17
Şekil 2.10 PID kontrolü.....	19
Şekil 2.11 Düzensiz sistem. a) Düğüm noktaları, b) Eleman detayı.	21
Şekil 2.12 İki katlı çerçeve sistemi.	21
Şekil 2.13 a) Deney geometrisi, b), c), d) Çatlak görünümü, kuvvet-deplasman eğrilerinin mukayesesi ($G_f=124$ N/m), e), f), g) Çatlak görünümü, kuvvet-deplasman eğrilerinin mukayesesi ($G_f=150$ N/m). .24	
Şekil 2.14 a) Deney geometrisi, b) Deneysel çatlak dağılımı, c), d) Deneysel ve sayısal kuvvet-uç deplasman eğrileri.	25
Şekil 2.15 a) Deney geometrisi, b) Sayısal çatlak gerinimleri, c) Kuvvet-uzama eğrilerinin mukayesesi.	27
Şekil 2.16 a) Deney geometrisi, b) Kuvvet-orta nokta deplasman eğrilerinin mukayesesi.	28
Şekil 2.17 a) Deney düzeneği (Acun 2010), b) OLM modeli.....	29
Şekil 2.18 Yatay deplasman hızı PID kontrolü vasıtasıyla sabit tutulmuştur.	30
Şekil 2.19 Farklı çözünürlükte OLM simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle mukayesesi.	30
Şekil 2.20 a) $d=35$ mm, OLM ufku=1.5d, b) $d=17.5$ mm, OLM ufku=1.5d, c) $d=17.5$ mm, OLM ufku=3.01d.	30

Şekil 2.21 Deneyde gözlemlenen hasar dağılımı (Acun 2010).....	31
Şekil 2.22 Deney düzeneği (Foster ve Gilbert 1998).....	32
Şekil 2.23 Yatay yer değişim hızı PID kontrolü vasıtasıyla sabit tutulmuştur.	32
Şekil 2.24 Deneysel (Foster ve Gilbert 1998) ve sayısal kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin mukayesesi.	32
Şekil 2.25 Hasar dağılımı a. d=10 mm, b. 20 mm.....	33
Şekil 2.26 Deneyde gözlemlenen çatlaklar (Foster ve Gilbert 1998).....	33
Şekil 2.27 Deney Düzeneği (Thomsen ve Wallace 1995)	34
Şekil 2.28 Yatay deplasman hızı PID kontrolü vasıtasıyla sabit tutulmuştur.	35
Şekil 2.29 Deneysel (Thomsen ve Wallace 1995) ve sayısal kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin mukayesesi.	35
Şekil 2.30 Hasar dağılımı.	35
Şekil 2.31 Dört noktalı eğilme deney düzeneği.....	36
Şekil 2.32 OLM Modeli ile dört noktalı eğilme deneyi sonucu (30 mm uzunluğunda fiber, 30 kg/m ³)..	36
Şekil 2.33 Çelik lifli beton için deneysel ve OLM sonuçlarının mukayesesi.....	37
Şekil 2.34 Sentetik lifli beton için deneysel ve OLM sonuçlarının mukayesesi.....	38
Şekil 2.35 İki minimuma sahip serbest enerji fonksiyonu $f = f_{\epsilon c} / \epsilon x 2 \epsilon c / \epsilon x - 12$. Burada ϵx ve f değerleri sırasıyla 0.001 ve 1 olarak alınmıştır.	41
Şekil 2.36 a) Yayılı çatlak dağılımı, b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak.	44
Şekil 2.37 a) Yayılı çatlak dağılımı (10% gürültü oranı), b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak.	44
Şekil 2.38 a) Yayılı çatlak dağılımı (25% gürültü oranı), b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak.	44
Şekil 2.39 a) Üç yayılı çatlağın kesişimi, b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak dağılımı.....	45
Şekil 2.40 a) Üç yayılı çatlağın kesişimi (25% gürültü), b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak dağılımı.	45
Şekil 3.1 Birinci deneyde kullanılan geometri.	48
Şekil 3.2 Birinci deney yerleşim planı ve kontrplakların yerleştirilmesi.	49
Şekil 3.3 Eşdeğer elastisite modülü 8.37 GPa olması hedeflenen kompozit sistem.	50

Şekil 3.4 Gazbeton tasarımı ve uygulaması.	51
Şekil 3.5 Alt beton katmanın dökümü ve gazbeton blokların beton katman üzerine yerleştirilmesi.	51
Şekil 3.6 Üst beton katmanın dökümü.	52
Şekil 3.7 Tünelin kuvvet uygulanacak iç kısmı için imal edilmiş altı parçadan oluşan özel çelik kalıp.	53
Şekil 3.8 Ölçek oranında (0.4) küçültülmüş donatı detayı.	53
Şekil 3.9 Kaplama donatısının yerleştirilmesi.	54
Şekil 3.10 Yükleme plakaları. 1. Pistonlar, 2. Yük hücreleri, 3. Yük aktarma plakaları, 4. Yük aktarma plakaları, 5. Yük aktarma plakaları, 6. Kaplama Betonu	55
Şekil 3.11 Piston-Yük hücreleri.	56
Şekil 3.12 Yükleme plakalarının imal edildikten sonra pistonlarla beraber tünel içine yerleştirilmiş hali.	56
Şekil 3.13 Birinci deneyde kullanılan ölçüm sistemi.	57
Şekil 3.14 Birinci deneyde kullanılan ölçüm sisteminin yerleştirilmiş hali.	58
Şekil 3.15 Yükleme seviyelerini gösteren ham veri ve kullanılan ortalama yük noktaları. Silindir başına uygulanan kuvvet 0.0043 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	60
Şekil 3.16 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	61
Şekil 3.17 Tünel düzeneğinin hareketini gösteren LVDT ölçümleri. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	61
Şekil 3.18 Kaya katmanında ölçülen uzunluk değişimleri. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	62
Şekil 3.19 Kaplama üzerinde ölçülen uzunluk değişimleri	62
Şekil 3.20 Birinci deneyde gözlemlenen çatlak dağılımını gösteren kroki. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	63
Şekil 3.21 Birinci deneyin sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı.	63
Şekil 3.22 Birinci deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları. Yükleme plakaları ve plaka rijitliğinin lokal değişimi, yükleme plakaları ve tünel kaplamasının içi arasındaki küçük bölge de modele dahil edilmiştir.	64
Şekil 3.23 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	65
Şekil 3.24 Kayanın çatlama ve iç basıncın ani bir şekilde tünel kaplamasına aktarılmasından dolayı çatlakların ani bir şekilde artması.	65

Şekil 3.25 İkinci deneyde kullanılan ölçüm sistemi. Şekilde 1 numara rozetleri, 2 numara teğet gerinim ölçerleri, 3 numara mutlak LVDT'leri, 4 numara göreceli uzunluk değişimi ölçen LVDT'leri göstermektedir.	67
Şekil 3.26 İkinci deneyden hemen önce ölçüm ve yükleme sistemlerinin hazırlanmış hali.	67
Şekil 3.27 İkinci deneyde gözlemlenen çatlakların gelişimi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	68
Şekil 3.28 İkinci deneyde oluşan çatlaklar.	69
Şekil 3.29 İkinci deneyde oluşan çatlakların detaylı görünümü.	70
Şekil 3.30 Yükleme seviyelerini gösteren ham veri ve kullanılan ortalama yük noktaları.	71
Şekil 3.31 Tünelin içinde ölçülen düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin uygulanan kuvvete göre değişimi.	71
Şekil 3.32 Tünelin dışa doğru yaptığı deplasmanın yüke göre değişimi.	72
Şekil 3.33 a) Yatay yönde ölçülen dışa doğru deplasmanların toplamının tünelin yatay iç açıklığının uzunluğunun açılmasıyla mukayesesi. b) Düşey yönde ölçülen dışa doğru deplasmanların toplamının tünelin düşey iç açıklığının uzunluğunun açılmasıyla mukayesesi.	74
Şekil 3.34 İkinci deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları. Yükleme plakaları ve plaka rijitliğinin lokal değişimi, yükleme plakaları ve tünel kaplamasının içi arasındaki kauçuk bölge de modele dahil edilmiştir.	74
Şekil 3.35 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	75
Şekil 3.36 Toplam uygulanan kuvvet 160 kN, 180 kN, 220 kN ve 250 kN olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).	75
Şekil 3.37 Birinci deney numunesi için geliştirilen sonlu eleman modeli.	76
Şekil 3.38 Çekme gerilmesi konturları (iç basınç 1.0 MPa).	77
Şekil 3.39 130 KN büyüklüğünde silindirik kuvveti için gevrek göçme simülasyonu ve çatlak ilerlemesi.	78
Şekil 3.40 Orijinal numune geometrisi ve sonlu eleman ağı.	79
Şekil 3.41 Kritik noktaların yer değiştirmelerinin mukayesesi.	80
Şekil 3.42 Deney kurulumunun modeli.	82
Şekil 3.43 Öngerme yüklemesi altında asal çekme gerilmeleri	83
Şekil 3.44 Kaya katmanında tahmin edilen hasar dağılımı.	83
Şekil 3.45 Orijinal numune geometrisi, öngerme yüklemesi	84
Şekil 3.46 Deney numunesi ile büyük model simülasyonu, yük-deplasman karşılaştırması.	85

Şekil 3.47 Üçüncü deneyin genel krokisi (A. I çelik giriş, B. yaslanma betonu, C. kaya katmanı, D. öngerme halat aksı, E. kauçuk, F. beton kaplama, G. yükleme plakası).....	87
Şekil 3.48 Üçüncü deney düzeneğinin imalatında kullanılan boyutlar.....	87
Şekil 3.49 Yaslanma betonunda kullanılan donatı detayı.....	88
Şekil 3.50 Sekizgen kalıp ve yaslanma betonu donatısı.....	88
Şekil 3.51 Yaslanma betonu döküldükten sonra yapılan hazırlıklar.....	88
Şekil 3.52 Kaya katmanı ile betonarme tünel kaplaması arasında daha sonra çıkarılmak üzere yerleştirilen yaklaşık 1 cm kalınlığındaki köpük katman.....	89
Şekil 3.53 Üst beton katmanının dökümünden önce yapılan hazırlıklar.....	89
Şekil 3.54 Tünel kaplamasının öngerme esnasında yük almasını engelleyecek boşluğun oluşturulması.....	89
Şekil 3.55 Öngerme düzeneğinin yerleştirilmiş hali.....	90
Şekil 3.56 Kaya yerine kullanılan malzemenin özelliklerini ölçümü için hazırlanan numuneler.....	91
Şekil 3.57 a) Üçüncü deneyde kullanılan gerinim pulları ve yük hücreleri, b) LVDT ölçüm yerleri.....	93
Şekil 3.58 Kaplama donatısına yapıştırılan gerinim pullarının yerleri. Rakamlar saat yönlerini temsil etmektedir.....	94
Şekil 3.59 Donatı üzerine yapıştırılmış gerinim pulu.....	94
Şekil 3.60 Üçüncü deneyde DIC için kullanılan fotoğraflama sistemi: DSLR fotoğraf makinaları (kırmızı) ve led spot (sarı).....	94
Şekil 3.61 Öngerme düzeneğinin yerleştirilmiş hali ve öngerme aksları. Şekillerde bu terminoloji kullanılmaktadır.....	95
Şekil 3.62 Öngerme uygulaması. Aynı anda iki halata öngerme uygulanarak meydana gelecek dönme etkisi minimize edilmiştir.....	95
Şekil 3.63 Düşey tendon kuvvetlerinin öngerme uygulaması ile değişimi. Düşey yönde her aks için iki yük hücresi kullanılmıştır.....	96
Şekil 3.64 Yatay aks kuvvetlerinin öngerme uygulaması ile değişimi. Yatay yönde her aks için iki yük hücresi kullanılmıştır.....	96
Şekil 3.65 a) Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler, b) kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler.....	97
Şekil 3.66 Mutlak yer değiştirmelerin öngerme kuvvetiyle değişimi.....	97
Şekil 3.67 Düşey tendon kuvvetlerinin öngermenin tamamlanmasından sonra gösterdiği değişim.....	98
Şekil 3.68 Yatay aks kuvvetlerinin öngermenin tamamlanmasından sonra gösterdiği değişim.....	99
Şekil 3.69 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler.....	99

Şekil 3.70 a) Yatay yönde ve b) düşey yönde rölatif LVDT okumaları.	100
Şekil 3.71 Mutlak LVDT okumaları.	100
Şekil 3.72 Uygulanan iç basıncın zamana göre değişimi (üçüncü deney).	102
Şekil 3.73 a) Düşey öngerme tendon kuvvetleri, b) yatay öngerme aks kuvvetleri (üçüncü deney). .	102
Şekil 3.74 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (üçüncü deney).	103
Şekil 3.75 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney).	103
Şekil 3.76 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney).	103
Şekil 3.77 Üçüncü deney için elde edilen DIC sonuçları (video bağlantıları: https://www.youtube.com/watch?v=5fiXU1_nKys ve https://www.youtube.com/watch?v=8fL7XmDS1KI).	104
Şekil 3.78 Üçüncü deneyde DIC sayesinde gerinim pulunun ölçemediği çatlak (1), gerinim pulu ile ölçülmüş çatlak (2) ve kaplama-kaya ara yüzünde ölçülen gerinim (3)	104
Şekil 3.79 Üçüncü deneyin tekrarında kullanılan ölçüm sistemi.	105
Şekil 3.80 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney, ikinci yükleme).	105
Şekil 3.81 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney, ikinci yükleme).	106
Şekil 3.82 Üçüncü deneyin OLM modeli için kullanılan 6 farklı malzemeden oluşan OLM ağı.	106
Şekil 3.83 Öngerme yüklemesinin tamamlanmasının ardından oluşan a) gerinimler (renk skalası mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0001), b) çatlaklar (kırmızı 0.0001 geriniminden büyük elemanları göstermektedir).	108
Şekil 3.84 Üçüncü deney için tünelin yatay ve düşey yönlerdeki ölçülen uzunluk değişimlerinin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (üçüncü deney).	109
Şekil 3.85 İç basınç yüklemesinin tamamlanmasının ardından (1000 kN) oluşan a) gerinimler (renk skalası mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0001) ve b) çatlaklar (kırmızı 0.0001 geriniminden büyük elemanları göstermektedir). Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir.	110
Şekil 3.86 Dördüncü deneyde kullanılan ölçüm sistemi.	111
Şekil 3.87 Uygulanan iç basıncın zamana göre değişimi (dördüncü deney).	111
Şekil 3.88 Yeni oluşan çatlak yerleri ve oluşum sırası (dördüncü deney).	112
Şekil 3.89 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (dördüncü deney).	113
Şekil 3.90 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (dördüncü deney)...	113

Şekil 3.91 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (dördüncü deney).....	113
Şekil 3.92 Dördüncü deney için elde edilen DIC sonuçları (Video linkleri: https://www.youtube.com/watch?v=P-zl8-inkhk ve https://www.youtube.com/watch?v=EQPVBnZJm1A)	114
Şekil 3.93 Dördüncü deneyin OLM modeli için kullanılan 6 farklı malzemeden oluşan OLM ağı Tünelin üst kısmı ile kaya arasında boşluk bırakılmıştır.	115
Şekil 3.94 Öngerme yüklemesinin tamamlanmasının ardından oluşan a) gerinimler (renk skalası mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0001), b) çatlaklar (kırmızı 0.0001 geriniminden büyük elemanları göstermektedir).	116
Şekil 3.95 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (dördüncü deney).	116
Şekil 3.96 Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 450 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0003) . Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (dördüncü deney).	117
Şekil 3.97 Tamirat uygulaması (beşinci deney).	119
Şekil 3.98 Tamiratın tamamlanmış hali (beşinci deney).	119
Şekil 3.99 Uygulanan iç basıncın zamana göre değişimi (beşinci deney).	120
Şekil 3.100 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi (beşinci deney).	120
Şekil 3.101 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (beşinci deney). ...	120
Şekil 3.102 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (beşinci deney).	121
Şekil 3.103 a) Beşinci deneyde gözle görünür hale gelen çatlakların oluşma sırası (yeni oluşan çatlaklar), b) deney sonunda çatlakların yerleri ve ölçülen açıklıkları (tüm çatlaklar).	121
Şekil 3.104 Dördüncü (HC-I) ve beşinci (HC-I-R) deney için uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi.	122
Şekil 3.105 Dördüncü (HC-I X) ve beşinci (HC-I-R X) deneyde tünelin yatay yöndeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi.	122
Şekil 3.106 Dördüncü (HC-I-Y) ve beşinci (HC-I-R Y) deneyde tünelin düşey yöndeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi.	122
Şekil 3.107 Beşinci deneyden sonra taç bölgesinin görünümü.	123
Şekil 3.108 Beşinci deney için elde edilen DIC sonuçları (https://www.youtube.com/watch?v=iK8ojWekiVU ve https://www.youtube.com/watch?v=ffuiUuiSd-A)	123
Şekil 3.109 Kullanılan sentetik lifler (altıncı deney).	125
Şekil 3.110 Altıncı deneyde kullanılan ölçüm sistemi.	125



Şekil 3.111	Lif özellikleri	(http://www.forta-ferro.com/wp-content/uploads/2017/11/FERRO_FD110318.pdf)	125
Şekil 3.112	Altıncı deneyde kullanılan görüntü sistemi		126
Şekil 3.113	Uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi (altıncı deney)		126
Şekil 3.114	Tünelin yatay ve düşey yöndeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi (altıncı deney)		127
Şekil 3.115	Deney sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı (altıncı deney)		127
Şekil 3.116	Altıncı deney için elde edilen DIC sonuçları: a) iç basınç = 0.18 MPa, b) iç basınç = 0.35 MPa, c) iç basınç = 0.47 MPa	(https://www.youtube.com/watch?v=FetFEDPYMmE)	128
Şekil 3.117	Altıncı deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları		129
Şekil 3.118	Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa)		130
Şekil 3.119	Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 400 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı. Kırmızı gerinim değeri 0,0008'den büyük elemanları göstermektedir. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa)		130
Şekil 3.120	Yedinci deney numunesinin ölçüm cihazları yerleştirilmeden önceki görünümü		132
Şekil 3.121	Uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi (yedinci deney)		132
Şekil 3.122	Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (yedinci deney)		133
Şekil 3.123	Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (yedinci deney)		133
Şekil 3.124	Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (yedinci deney)		133
Şekil 3.125	Yedinci deney için elde edilen DIC sonuçları	(https://www.youtube.com/watch?v=IKON99DTDA8 , https://www.youtube.com/watch?v=27fnCC2cZTw , https://www.youtube.com/watch?v=W4Tg8M4XOcs , https://www.youtube.com/watch?v=FetFEDPYMmE , https://www.youtube.com/watch?v=W4Tg8M4XOcs)	134
Şekil 3.126	Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa)		135
Şekil 3.127	Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 450 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0003) . Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (dördüncü deney)		136
Şekil 3.128	Yedinci deney numunesinin ölçüm cihazları yerleştirilmeden önceki görünümü		138
Şekil 3.129	Uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi (sekizinci deney)		138

Şekil 3.130 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (sekizinci deney).....	139
Şekil 3.131 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (sekizinci deney) .	139
Şekil 3.132 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (sekizinci deney) .	140
Şekil 3.133 Sekizinci deneyde gözlemlenen çatlaklar	140
Şekil 3.134 Üçüncü deney için elde edilen DIC sonuçları (video bağlantıları: https://www.youtube.com/watch?v=jJa_YN0dE0Q ve https://www.youtube.com/watch?v=gvSszYNzWFI)	141
Şekil 3.135 Sekizinci deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları. Yükleme plakaları ve plaka rijitliğinin lokal değişimi, tünel kaplamasının içi arasındaki kauçuk bölge ve kaplama kaya katmanı arası eklenen betonarme bölge modele dahil edilmiştir.....	142
Şekil 3.136 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa) .	143
Şekil 3.137 Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 450 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0003) . Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (sekizinci deney) .	143
Şekil 4.1 Ters at nalı şeklindeki tünelin hesap alanı. Alt, üst, sol ve sağ sınırlarda saydam sınır koşulları kullanılmıştır.	145
Şekil 4.2 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi ($E = 2$ GPa) .	147
Şekil 4.3 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir ($E = 2$ GPa) .	148
Şekil 4.4 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için OLM tarafından tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 2$ GPa) .	148
Şekil 4.5 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için çekme dayanımını geçen elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir ($E = 2$ GPa).....	149
Şekil 4.6 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir ($E = 4$ GPa) .	149
Şekil 4.7 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için OLM tarafından tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 4$ GPa) .	150
Şekil 4.8 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için çekme dayanımını geçen elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir ($E = 4$ GPa).....	150
Şekil 4.9 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir ($E = 8$ GPa) .	151
Şekil 4.10 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için OLM tarafından tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 8$ GPa) .	151

- Şekil 4.11 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için çekme dayanımını geçen elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir ($E = 8 \text{ GPa}$)..... 152
- Şekil 4.12 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir. 152
- Şekil 4.13 İç basıncın sırasıyla 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 Mpa ve 1.0 MPa değerleri için tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035 , kırmızı = 0.0035 , $E = 8 \text{ GPa}$). 153
- Şekil 4.14 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi ($E = 2 \text{ GPa}$). 155
- Şekil 4.15 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi ($E = 4 \text{ GPa}$). 156
- Şekil 4.16 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi ($E = 8 \text{ GPa}$). 157
- Şekil 4.17 Üst sıradan itibaren artan kaya elastisite modülüne ($E=2 \text{ GPa}$, $E=4 \text{ GPa}$, $E=8\text{GPa}$) ve soldan sağa artan derinliğe (0 m, 25 m, 50 m) göre tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035 , kırmızı = 0.0035 , $E = 8 \text{ GPa}$). Kırmızı bölgeler çatlak bölgelerini göstermektedir..... 158
- Şekil 4.18 İç basıncın sırasıyla 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 Mpa ve 1.0 MPa değerleri için tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035 , kırmızı = 0.0035 , $E = 8 \text{ GPa}$). 160
- Şekil 4.19 Üst sıradan itibaren artan kaya elastisite modülüne ($E=2 \text{ GPa}$, $E=4 \text{ GPa}$, $E=8 \text{ GPa}$) ve soldan sağa artan derinliğe (0 m, 25 m, 50 m) göre tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035 , kırmızı = 0.0035 , $E = 8 \text{ GPa}$). Kırmızı bölgeler çatlak bölgelerini göstermektedir. 161
- Şekil 5.1 Eksenel Simetrik Model ve Formülasyon 162
- Şekil 5.2 En büyük çekme gerilmesinin basınca oranı a) $R/t = 3$, b) $R/t = 4$, c) $R/t = 8$. Donatı oranı toplam donatı oranının beton alana oranıdır. R iç yarıçapı (m) ifade etmektedir. P ise uygulanan iç basınçtır..... 164
- Şekil 5.3 Kayaya uygulanan iç basınç oranı a) $R/t = 3$, b) $R/t = 4$, c) $R/t = 8$. Donatı oranı toplam donatı oranının beton alana oranıdır..... 167
- Şekil 5.4 Kayaya uygulanan iç basınç oranı a) $R/t = 3$, b) $R/t = 4$, c) $R/t = 8$. Donatı oranı toplam donatı oranının beton alana oranıdır. R iç yarıçapı (m) ifade etmektedir. 168
- Şekil 5.5 R/t oranının 8 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5 \text{ GPa}$, b) $E_{kaya}=5 \text{ GPa}$, c) $E_{kaya}=7.5 \text{ GPa}$ 171
- Şekil 5.6 R/t oranının 6 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5 \text{ GPa}$, b) $E_{kaya}=5 \text{ GPa}$, c) $E_{kaya}=7.5 \text{ GPa}$ 172
- Şekil 5.7 R/t oranının 4 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5 \text{ GPa}$, b) $E_{kaya}=5 \text{ GPa}$, c) $E_{kaya}=7.5 \text{ GPa}$ 173
- Şekil 5.8 R/t oranının 3 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5 \text{ GPa}$, b) $E_{kaya}=5 \text{ GPa}$, c) $E_{kaya}=7.5 \text{ GPa}$ 174

Ülkemizde iç basınçlı enerji tünellerinin yapımında betonarme sıklıkla kullanılmaktadır. Bu projede iç basınçlı betonarme tünellerin iç basınç altındaki davranışı yenilikçi deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırılmıştır. Deneyler laboratuvar ortamında özel deney düzenekleri tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kaya ortamının simüle edilmesi için kompozit bir yapı kullanılmıştır. Kayanın maruz kaldığı saha gerilimlerinin gerçekçi bir şekilde deneyde ele alınabilmesi için öngerilim halatları kullanılmıştır. Toplam 8 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde farklı kaya ve saha gerilimleri altında tünel davranışı incelenmiştir. Ayrıca lifli beton kullanımının tünel davranışına etkisi irdelenmiştir. Deneylerin sayısal modellenmesi için ise parça etkileşim tabanlı bir metot olan peridinamik yaklaşımı kullanılmıştır. Beton ve betonarme sistemlerin peridinamik yaklaşımı ile modellenmesi detaylı olarak incelenmiş ve geliştirilen simülasyon platformu çok sayıda deneysel beton/betonarme eleman davranışı ile doğrulanmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekçi deney düzenekleri ile test ve kalibre edilen sayısal model, daha sonra dinamik çatlak oluşumunu, ilerlemesini ve dağılımını tahmin etmek üzere kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizlerin ışığında yaklaşık tasarım yöntemleri geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: tünel, betonarme, peridinamik, çatlak, lifli beton



ABSTRACT

Reinforced concrete is frequently used in the construction of internally pressurized energy tunnels in Turkey. In this project, mechanical behaviour of energy tunnels was investigated using innovative experimental and numerical methods. Special experimental setups were designed and manufactured so that realistic tunnel behaviour can be reproduced in the laboratory environment. In the experiments, a composite structure was used to simulate the rock environment. In order to represent in-situ stress, prestressed tendons were utilized. A total of 8 experiments were performed. In these experiments, tunnel behavior under different rock and in-situ stress conditions was investigated. In addition, the effect of the use of fiber concrete on tunnel behavior was examined. For the numerical modeling of the experiments, a particle-based approach was used. The modeling of the concrete and reinforced concrete systems with the developed numerical approach was investigated in detail and the simulation platform was validated by a large number of experimental studies for concrete / reinforced concrete elements. The calibrated numerical model was then used to estimate dynamic crack formation, propagation and distribution. Two approximate design methods were developed in the light of experimental and numerical analyzes.

Key Words: Tunnel, reinforced concrete, peridynamics, crack, fiber reinforced concrete



1. GİRİŞ

1.1 Basıncılı Tüneller

Tünel kaplama tasarımında elastisite teorisi kullanarak oluşan gerilmeleri tahmin etmeye yönelik ilk çalışmalar Biot (1935) ve Westergaard (1938) tarafından yapılmıştır. Daha sonra önerilen tünel yaklaşım metodunda ise iç basınç altında tünelin radyal deplasmanı belirlenerek gerekli destek miktarının hesaplanması hedeflenmiştir. 1960'larda ortaya çıkan Yeni Avusturya Tünel Metodunda ise mevcut kaya dayanımının mümkün olduğunca dikkate alınması, püskürtme beton ile ilk önlemlerin alınmasının ardından tünel deplasmanlarının ölçülmesine ve gözlemlenen deplasmana göre mümkün olduğunca esnek ve deplasman yapabilen destek kullanılması hedeflenmiştir. Gelişmeler ağırlıklı olarak karayolu tünelleri esas alınarak kaydedilmiştir. Tünel kaplama tasarımında kullanılan ve özellikle iç basınçlı tünellerin tasarımında sıklıkla tercih edilen bir yöntem de rölatif rijitlik yaklaşımıdır. Bu yaklaşıma göre genellikle aksenal simetrik çözümler kullanılarak kaplama ile kaya arasındaki yük paylaşımı elastik analiz ile tespit edilip, kaplamada oluşan iç kuvvetler belirlenerek tasarım gerçekleştirilir. 1980'lerden itibaren ise tünel tasarımında, diğer alanlarda olduğu gibi, sayısal çözümlerin ağırlık kazanmaya başladığı ve elastik ötesi davranışın modellendiği sonlu eleman, ayırık eleman gibi modelleme tekniklerinin ön plana çıktığı söylenebilir.

İç Basıncılı tünellerde kullanılan kaplamalar aşağıdaki tiplerde yapılabilmektedir:

- Kaplamasız ve geçirimli
- Püskürtme beton ve yarı geçirimli
- Donatısız beton ve yarı geçirimli
- Betonarme ve az geçirimli
- Ard germeli beton ve az geçirimli
- Çelik ve geçirimsiz
- Kompozit ve geçirimsiz

Yukarıda sunulan alternatiflerden beton kullanımını öngören kaplamalarda çatlama oluşması beklendiğinden oluşacak çatlak genişliğine göre yarı veya az geçirimli durum oluşabilmektedir. Basıncılı tünellerde, klasik tünel prensiplerinden farklı olarak iç basınç altında performans kriterlerinin sağlanması gereklidir. Dış basıncın artması ile tünel çevresindeki kayada mevcut olan çatlaklı yapı artmaktadır. Çatlaklardan sızan su, yeni yüzey su kaynaklarının oluşmasına ve heyelan tehlikesinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Kayanın su etkisi ile çatlaklı yapısının artması ise kemerleme etkisi ile oluşan kayanın taşıma kapasitesinde düşüşe sebep olmaktadır. Sürekli artan enerji ihtiyacı sonucunda iç basınçlı tüneller ülkemizde giderek daha



fazla kullanılmaya başlanmıştır. Ekonomik nedenlerden dolayı beton/betonarme kaplamaların tercih edildiği görülmektedir. Son yıllarda tamamlanan enerji tünelleri arasında Arkun (13655 m), Kandil (9513 m), Kale (4226 m), Tefen (3200 m), Topçam (7460 m), Dim (4221 m) ve Akkay (12430 m) enerji tünellerini sayabiliriz (parantez içinde tünel uzunlukları verilmiştir). Çok sayıda enerji tünelinin de inşaatına devam edilmektedir.

Tünel tasarımında genellikle kaplamanın iç basınç yükünün en az %30'unu taşıyacağı varsayımı yapılır (Sinha 1989). Kaplamanın düşük oranlarda (yaklaşık %50'nin altında) iç basınç yükü taşıyabileceği varsayımı yapılabilmesi için kaplama-kaya kontak enjeksiyonunun çok dikkatli bir şekilde yapılması gereklidir. Enjeksiyonda kullanılan basınç miktarları 2-25 bar arası değişebilmektedir. Yüksek basınçlı durumlar, kaplamanın ard germeye tabi tutularak çatlak kontrolü sağlanması durumuna karşılık gelmektedir. Tasarımda kullanılan iç basınç miktarının dinamik etkiler için büyütülmesine ilişkin katsayının 1-2 arasında bir faktör olarak alınması gerektiği de önemli hususlardandır (Sinha 1989). Yüksek basınçlı durumlarda geçirimsiz kaplamanın yapılması önerilmektedir.

Literatürde hasar görmüş basınçlı tüneller incelendiğinde hasarın su kaçaklarına, kayanın bütünlüğünün bozulmasına ve kaplama-kaya göçmesine sebep olduğu söylenebilir (Brekke ve Ripley 1987). Brekke ve Ripley (1988) basınçlı tünel hasarlarının 59%'u su kaybına, 22%'si ise kayanın bütünlüğünü kaybetmesine bağlı olduğunu rapor etmiştir. 2010 yılında göçen Panama-Esti Tüneli 2003 yılında servis girmiş 4.8 km uzunluğunda 1.8 MPa iç basınç altında çalışan 8.8 m iç çapa sahip bir tüneldir. Tünelde oluşan göçmeler sebebi ile çelik profiller, püskürtme ve kaplama betonundan oluşan bir güçlendirme uygulanmıştır. Yaşanan diğer bir örnek ise Ekvador'da bulunan Pucara tüneli olup oluşan hasar sonucu üzerinde kaya yükünün yetersiz olduğu sonucuna varılmış ve hidrolik kırılma ve heyelan tehlikesinin bertaraf edilebilmesi için yeni bir by-pass tüneli yapılmıştır.

Kaplamanın az veya yarı geçirimli olduğu beton veya betonarme için tasarımda en önemli parametre çatlak genişliğidir. Basınçlı enerji tünelleri için çatlak genişliği sınırını belirleyen bir tasarım kılavuzu bulunmamaktadır. Ülkemizde yürürlükte olan yapı tasarım yönetmeliği TS-500-2000, nemli koşullar için servis çatlak genişliğini 0.2-0.3 mm mertebesinde vermektedir. ASTM C-76-15 (Betonarme Menfez ve Atık Boru Standardı) ise basınçlı betonarme borular için çatlak sınırını 0.25 mm olarak vermektedir. Kanada Betonarme Boru Birliği (CCPA 2004), betonarme borularda taşıma gücünün 0.3 mm çatlak genişliğine karşı gelen yük olarak alınmasını önermektedir. Görüldüğü üzere mevcut yönetmeliklerde çatlak genişlik sınırı 0.3 mm civarında sunulmaktadır. İşletme esnasında çatlak genişlikleri açılır, ancak sonrasında tünel dış su basıncı sızmalar sebebi ile artar ve çatlak genişlikleri azalır. Basınçlı tünellerde,

tünel işletim performansını, kaçan su miktarını ve donatı gerilmelerini belirleyen en önemli faktör çatlak genişliği olduğundan tasarımda bir parametre olarak değerlendirilmesi önemlidir.

Literatürde betonarme iç basınçlı tünelleri deneysel ve sayısal olarak araştıran çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. 1980'li yıllardan itibaren beton kaplamalı enerji tünellerinin yarı geçirgen olduğunu kabul eden çalışmalar yapılmıştır (Schleiss 1986, Fernandez 1994, Schleiss vd. 1997). Ancak bu çalışmaların tümü sayısal olarak dairesel kesitler için yapılmış olup herhangi deneysel bir bileşen içermemektedir. Çalışmalar tünel çevresindeki mevcut su basıncını tahmin ederek kaplamadaki çatlak genişliği ve çatlakların arasındaki mesafe ile su kaçışı arasında kurulan basit analitik modellere dayanmaktadır. Ülkemizdeki enerji tünellerinin çoğunlukla ters at nalı şeklinde olması, mevcut yeraltı suyu seviyeleri hakkında yetersiz veri olması, çalışmalarda kullanılan beton çatlak modellerinin son derece basit olmasından dolayı bu çalışmaların iç basınçlı tünel tasarımında yetersiz olduğu görülmektedir. Yapısal çatlakların oluşturduğu risk üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır (örneğin Chung ve diğerleri 2001). Ancak bu çalışmalarda beton kaplamanın nasıl ve neden çatladığı değil, mevcut çatlaklı sistemde tünel içine parça düşmesi riski hesaplanmaya çalışılmaktadır. Sonlu eleman modelleri ile kaplamadaki gerilmelerin hesaplanması üzerine yapılan çalışmalarda beton kaplama bir kabuk eleman olarak formülasyona girdiği için çatlakların hassas olarak tahmini mümkün olmamaktadır (Olumide 2013, Zhou ve diğerleri 2015). Bu çalışmalardaki ortak eksiklikler sayısal sonuçların herhangi bir deneysel sonuçla mukayese edilmemiş olmasıdır. Mevcut proje kapsamında, iç basınçlı betonarme enerji tünellerinin basınç altındaki davranışının anlaşılmasına yenilikçi deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak ışık tutmayı hedeflenmiştir. Deneysel sonuçların modellenmesinde son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan peridinamik yaklaşımı kullanılmıştır. Sonraki bölümde beton ve betonarme elemanlarda çatlak oluşumu ve dağılımının modellenmesi irdelenmiştir.

1.2 Çatlaklı Ortamların Sayısal Modellenmesi

1960'lı yıllardan başlayarak, betonda çatlakların oluşmasının ve ilerlemesinin sayısal olarak incelenmesi için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Rashid (1968) tarafından önerilen malzeme rijitlik matrisinin (yani yayılı çatlak yaklaşımı) değiştirilmesi öncü çalışmalardan biri olarak değerlendirilebilir. Hillerborg ve diğerleri (1976) ve Bažant ve Oh'un (1983) çalışmalarında geliştirilen gerilme-birim şekil değiştirme modelleri, karakteristik bir uzunluk ölçeği ve çatlak enerjisi tanımının yardımıyla, sayısal modellerde rastlanılan düğüm noktalarının dağılımına bağlı sonuçların azaltılmasına yol açmıştır (Rots 1988, TNO Diana 2008, Palermo ve Vecchio 2003). Çatlak oluşumunu tahmin etmek için geliştirilen iki tür yayılı çatlak modeli bulunmaktadır. Bunlardan ilki dönebilen çatlak yöntemi (Rots 1988, Vecchio ve Collins 1986), diğeryse sabit çatlak yönü yöntemidir (Willam ve diğerleri 1987). Süreklilik esasına bağlı

kalınarak geliştirilen sonlu elemanlar yönteminin temel dezavantajı, gerçek çatlak açıklıkları yerine bir ölçme uzunluğu boyunca ortalama gerinimlerle çalıştırılarak çatlağın gerçekçi bir şekilde modelde temsil edilememesidir. Bu gelişmeye paralel olarak çatlak açılmasının daha iyi modellenmesi için sonlu elemanlar arasında temas elemanları ve yaylar kullanılarak ayırık çatlak modelleri de geliştirilmiştir (Ngo ve Scordelis 1967, Blaauwendraad 1985, Ingraffea ve Sauma 1985, Koutromanos ve Sing 2012). Ayırık elemanlar yoluyla çatlakların modellenmesinin mevcut avantajlarına rağmen, çatlakların yerlerinin önceden belli olmaması, sayısal yapının simülasyon süreci içinde defalarca tekrar yaratılmasının gerekmesi ve çatlak bölgesinde ve süreklilik durumunun devam ettiği bölgelerde farklı bünye modellerin tanımlanması gerekmesi, ayırık çatlak modellerinin temel dezavantajları olarak görülmektedir.

Aslında sonlu eleman yönteminin geliştirilmesinden önce birçok araştırmacı kafes sistemlerinin kullanılması yoluyla, kuvvet akışını ve yük taşıma kapasitesi mekanizmalarını yapısal elemanlar yardımıyla açıklamaya çalışmıştır. Mörsch (1909) betonarme kirişlerindeki kayma iletimi için ünlü kafes benzetmesini önermiştir. Wagner (1929) ince metal kirişlerin ilk burkulma yüklerinden daha fazla kesme yükü taşıdıkları durumda gösterdikleri davranışı açıklamak için benzer bir yaklaşım geliştirmiştir. Hrennikoff (1941) elastik problemlerini çözmek için yine bir kafes modelini kullanmıştır. Bahsi geçen yaklaşımlar sayısal modellerin henüz mevcut olmadığı yıllarda yaklaşık mühendislik çözümü amaçlı geliştirilmiştir. 1960'lı yıllarda sayısal modellerin ortaya çıkmasıyla araştırmaların süreklilik esasına bağlı kalınarak geliştirilen sonlu elemanlar yöntemi üzerinde yoğunlaştığı ancak 1970'li yıllarda özellikle doğrusal olmayan davranışın modellenmesinde yapısal eleman yaklaşımının yeniden kullanılmaya başlandığı anlaşılmaktadır. Sıkışma alanı teorisi (Mitchell ve Collins 1974), yumuşatılmış kafes modelleri, kafes kiriş modeli (Schlaich ve diğerleri 1987) gibi çalışmalar bu tip araştırmalara örnek teşkil etmektedir. Özellikle Schlaich ve diğerlerinin (1987) önerdiği kafes kiriş modeli tasarımda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu modeller, bir kafes sistemi kullanılarak yapı ve kuvvet akışının modellenmesi için ortak bir yaklaşımı paylaşmaktadır.

Silling (2000) tarafından geliştirilen bir parçacık etkileşim modeli olan bağ temelli peridinamik (PD) aslında benzer bir gelişim çizgisinde görülebilir. Bağ temelli PD'de, her nokta çiftli kuvvet fonksiyonuyla komşu noktalarla etkileşime girer ve hasar, uzama kritik değeri aştığında bağların kopmasına izin vererek dâhil edilir. Çatlağın oluşturulmasından sonra yumuşayarak da olsa yük taşımaya devam eden malzemeler için, bağ kuvveti uzamanın doğrusal olmayan bir fonksiyonu olabilir. Son on yılda, doğrusal olmayan problemler için PD (Silling ve Bobaru 2005, Silling ve diğerleri 2007, Mitchell 2011) kullanılarak çok sayıda teorik ve sayısal model geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Betonda çatlak oluşumunu ve ilerlemesini modellemek için kiriş elemanlarının kullanımı son yıllarda çok sayıda araştırmaya konu olmuştur (Schlangen ve Van



Mier 1992, Van Mier 2013). Bu çalışmalarda çatlak kritik zorlamalara ulaşıktan sonra elemanları sistemden kaldırarak yarı-gevrek tepki modellenmeye çalışılmıştır. Kafes yaklaşımı mezo ölçekli araştırmalarda (Cusatis ve diğerleri 2003, Van Mier 2013), agregalar, çimento ve ara yüzey geçiş bölgelerini farklı malzeme sabitleri ile ayrı ayrı modellemek için de kullanılmıştır. Dolayısıyla kafes yaklaşımı beton çatlağının çok ölçekli bir modeli olarak da düşünülebilir (Van Mier 2013).

Bu projede betonda çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin örtüşen kafes modeli (OLM) olarak adlandırılan yeni bir yaklaşımla modellenmesi gerçekleştirilmiştir. OLM yaklaşımı kafes analogisine benzemekle beraber PD yaklaşımında kullanılan PD ufku kavramını da içermektedir. OLM mezo ölçekte (yani birkaç milimetre örgü çözünürlüğü) çalışmaktadır. Ancak pratikliği korumak amacıyla beton tek fazlı süreklilik arz eden bir ortam olarak modellenmektedir (agrega, çimento ayrı fazlar olarak ele alınmamaktır). Literatürde sunulan yaklaşımlardan farklı olarak, yumuşama etkisi için yeni bir kalibrasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Yavaş yüklemelerin modellenmesi için sıralı doğrusal analiz (SLA) tekniği ve belirtik entegrasyon metodu için özel olarak geliştirilmiş olan yeni bir teknik kullanılmaktadır. Dinamik yüklemelerde ise belirtik entegrasyon metodu kullanılmaktadır. OLM sayısal olarak malzeme testleriyle kalibre edildikten sonra, giriş eğilme, ölçekli baraj, çekme rijitleşmesi ve betonarme giriş deneyleri sayısal olarak modellenerek doğrulama çalışması yapılmıştır. Daha sonra da geliştirilen simülasyon platformu kullanılarak dinamik iç basınçlı tünel simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen OLM simülasyon platformu ile proje kapsamında gerçekleştirilen iç basınçlı tünel deneylerinin statik ve dinamik yüklemeler altında davranışını incelenmiştir.



2. SAYISAL ÇALIŞMALAR

2.1 Örtüşen Kafes Metodu (OLM)

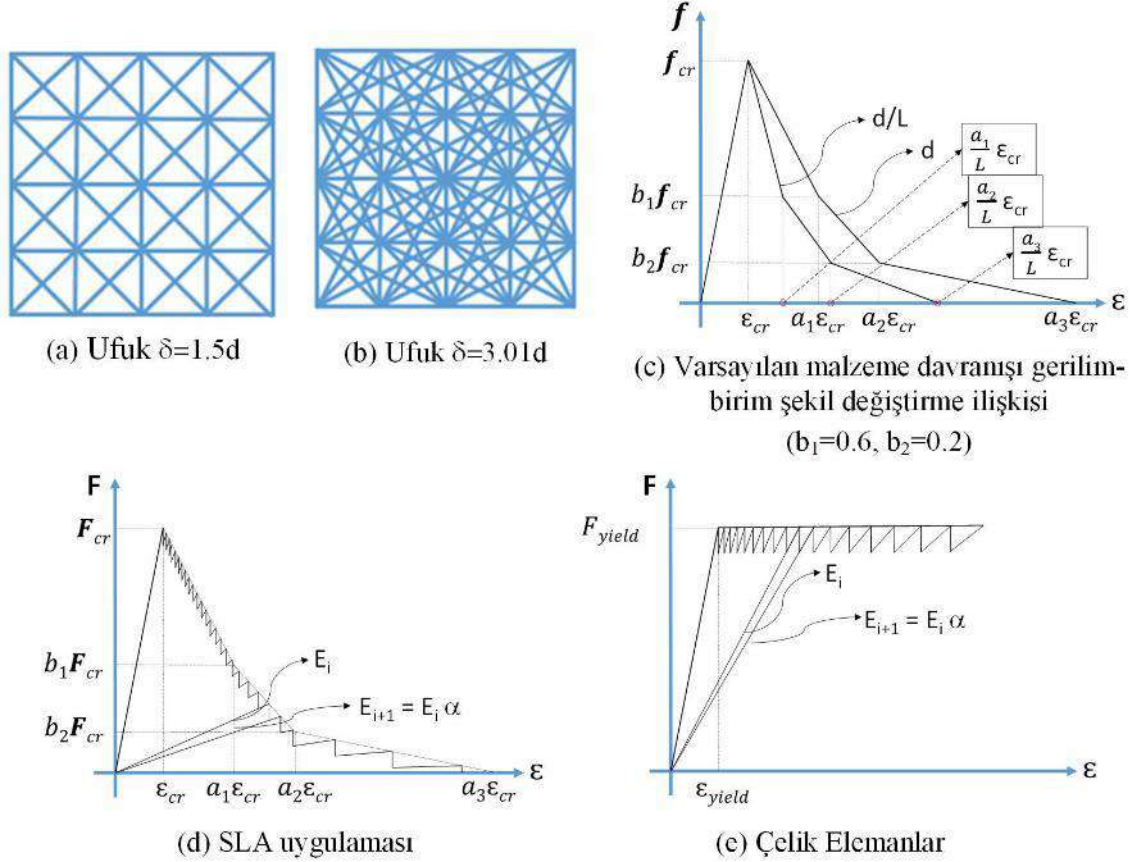
Sürekli ortamlar mekaniğinin temel denklemleri yer değiştirme fonksiyonlarının türevlerine bağlıdır. OLM metodunda ise yer değiştirme fonksiyonlarının kendileri kullanılmaktadır. Dolayısıyla çatlakların etrafında klasik sayısal metotlarda karşılaşılan türevlerin sınırsız olma durumu ile karşı karşıya gelinmemektedir. OLM aslında katı mekaniği problemleri için Newton'un denklemlerinin süreksiz ortamlar için yeni bir formülasyonu olarak da değerlendirilebilir. İntegral denklemler sürekli veya süreksiz ortamlarda da geçerliliklerini korumaktadırlar. Hasar, peridinamik modellerde malzeme davranışı denklemlerinin bir parçası olarak yer almaktadır. Bu özellikler çatlakların kendiliğinden oluşup ilerlemesinin modellenmesine imkân vermektedir. Son on yılda doğrusal olmayan davranışlar için de birçok peridinamik model geliştirilmiştir (Silling ve Bobaru 2005, Silling ve diğerleri 2007, Mitchell 2011).

Geliştirilen OLM modelinde, her bir düğüm noktası, yerel olmayan etkileri hesaba katmak için ufuk (δ) olarak adlandırılan önceden belirlenmiş bir mesafedeki tüm düğüm noktaları ile etkileşime girer. Böylece klasik modellerin aksine lokal olmayan etkileri de içerir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi etki alanı parametresinin artırılmasıyla lokal olmayan etkiler ve aynı zamanda birçok çatlak yönü de hesaplamalara katılabilmektedir. Ufuk değeri genellikle düğüm noktaları arasındaki en küçük mesafenin bir çarpanı ile ifade edilir (örneğin $\delta=1.5d$ veya $\delta=3.01d$). Ufuk tanımının bir diğer etkisi de klasik kafes modellerinde gözlenen çatlak tahminlerinin düğüm noktalarının dağılımına ve oryantasyonuna bağlı olmasını da kısmen ortadan kaldırmasıdır. OLM ufkunun sıfıra yaklaşması ve düğüm noktası sayısının artırılması durumunda, hasarsız problemler için, klasik sürekli ortam mekaniği sonuçlarıyla örtüşen sonuçlar elde edilmektedir (Silling ve diğerleri 2003, Weckner ve Abeyaratne 2005).

2.1.1 Bünye Denklemleri

İki boyutlu problemlerde düzgün dağıtılmış (düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe d) düğüm noktaları için her bir düğüm noktası ufuk değerinin $1.5d$ olması durumunda 8, ufuk değerinin $3.01d$ olması durumundaysa 28 noktayla etkileşim halindedir. Tüm düğüm noktaları etkileşim içinde oldukları düğüm noktalarıyla aksel yük aktarımı yapmaktadır. Kafes elemanlarının doğrusal elastik limitler içindeki davranışı, aktarılan yükün çekme veya basma olmasından bağımsızdır. Kafes elemanlarında aktarılan kuvvet kritik birim şekil değiştirmeye (ϵ_{cr}) ulaşılan kadar doğrusaldır. Bu değer aşılması durumunda kafes elemanı yumuşamaya başlayacak ancak bağı-temelli klasik PD yaklaşımının aksine yük taşımaya devam edecektir (Şekil 2.1). Kafes elemanlarının elastisite modülü ve kafes eleman alanının çarpımı olan değeri EA basit bir enerji prensibi yardımıyla hesaplanmaktadır. İlk olarak problem geometrisi

desteklerden arındırılmakta ve sabit bir gerinim alanı uygulanmaktadır. Doğrusal elastik bir malzeme için malzemede saklanacak elastik enerji analitik olarak hesaplanmaktadır. Daha sonra aynı gerinim alanı örtüşen kafes modeline uygulanmakta ve saklanan elastik enerji hesaplanmaktadır. Hesaplanan enerjilerin oranı OLM'de kullanılması gereken EA değerini vermektedir.



Şekil 2.1 a-b) OLM ufukunun illüstrasyonu (ufuk=1.5d ve ufuk=3.01d), c) Beton malzeme davranışı, d) SLA uygulaması, e) Çelik malzeme davranışı.

OLM gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi için basit kurallar kullanılmaktadır. Böylece modelde kalibre edilebilecek oldukça az sayıda parametre bulunması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, uygulanan kuvvetler sonucunda çatlakların oluşması ve ilerlemesi, kafes elemanlarının karmaşık bağlantı ve hasar sırası tarafından belirlenir. Model izotropik olarak başlamakta ve hasarın yönüne ve büyüklüğüne göre anizotropi gelişmektedir. Her ne kadar kafes elemanlarının uzunlukları mm-cm mertebesinde olsa da tüm kafes elemanları için homojen hale getirilmiş gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak OLM'nin pratik bir simülasyon aracı olması hedeflenmiştir. Bununla beraber her kafes elemanı için çatlak enerjisinin aynı olması sağlanarak sayısal analizlerin ölçekten bağımsız olması sağlanmıştır. Çatlak enerjisi normalleştirme kuralı bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir. OLM'nin geliştirilmesindeki temel amaç hem çatlakların dağılımının ve aralıklarının hem de sistem

ölçeğinde gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin hepsinin aynı anda ve mümkün olduğu kadar az kalibrasyon gerektiren parametre ile tahmin edilmesidir.

OLM'nin ihtiyacı olan malzeme özellikleri betonun elastisite modülü, çekme mukavemeti, çatlak enerjisi ve Şekil 2.1'de gösterilen parçalı doğrusal yumuşama eğrisinde kullanılan parametrelerdir (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2). Yapılan sayısal çalışmalar literatürde betonun yumuşaması için önerilen modellerin OLM'de kullanılan kafes elemanları için olduğu gibi kullanılamayacağını göstermiştir. Mevcut yumuşama modelleri çekme deneylerinde ölçülen ortalama yer değiştirme değerlerine bağlıdır. OLM'de ise elde edilen sistem gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri kafes elemanlarında kullanılan yumuşama eğrisinin kompleks bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, çekme gerilmesi-ortalama yer değiştirme eğrileri sayısal olarak hesaplanarak parçalı doğrusal yumuşama eğrisinde kullanılan parametrelerin kalibre edilmesi yoluna gidilmiştir. Değişik kafes elemanı uzunlukları için OLM parametreleri (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) sonlu elemanlar metodunda kullanılan yöntemle benzer bir kurala göre değiştirilmiştir (Bažant ve Oh 1983).

2.1.2 Çatlak Enerjisi Normalleştirme Kuralı

Örtüşen kafes metodunda farklı uzunluklarda kafes elemanları bulunmaktadır. Şekil 2.1'de verilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin elemanın uzunluğuna göre normalleştirilmesi, yani elemanın uzunluğu ne olursa olsun çatlak enerjisinin aynı olması gerekmektedir. Bu normalleştirme kuralı, aynı malzeme özelliklerini taşıyan farklı OLM uygulamalarında da yine benzer bir şekilde uygulanabilecektir.

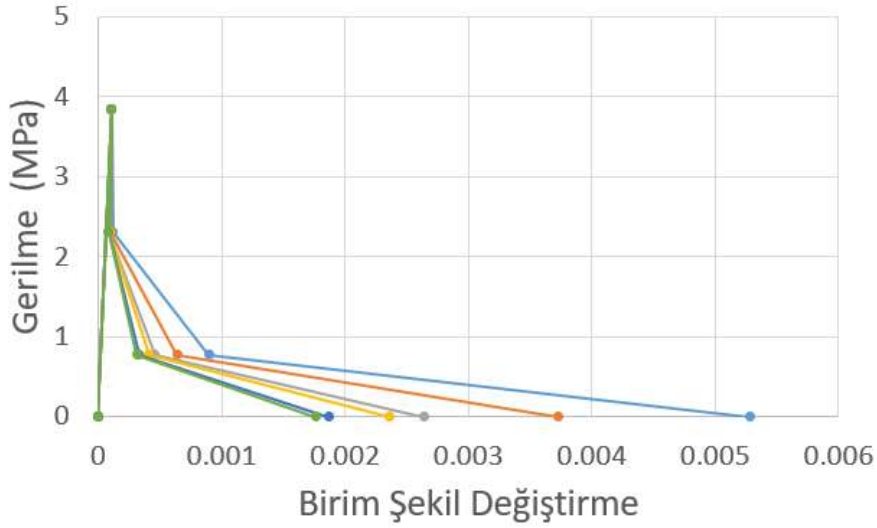
Şekil 2.1c'de verilen gerilim-birim şekil değiştirme eğrisi d_s uzunluğunda bir kafes elemanı için elde edilmiş olsun. Aynı malzeme özelliklerine sahip ama uzunluğu d_s değerinden daha uzun (h) olan farklı bir kafes elemanını ele alalım. Kafes elemanlarının uzunluklarının yeteri kadar küçük olduğu varsayılırsa, her bir kafes elemanında sadece tek bir çatlak olacağı öngörülebilir. Bu durumda d_s değerinden daha uzun olan elemanların sadece d_s kadarlık kısmı çatlaktan etkilenecek, geri kalan kısmı elastik davranmaya devam edecektir. Kafes elemanının çatlayacağı birim şekil değiştirme değeri yine ε_{cr} olacaktır. Ancak çatlak açıldıkça, yani birim şekil değiştirme değeri arttıkça, çatlağın taşıdığı gerilme azalacak dolayısıyla elastik davranan bölgedeki birim şekil değiştirme değeri azalacaktır. Bu durumda h uzunluğundaki bir kafes elemanı için a'_1, a'_2, a'_3 değerleri, doğrusal elastik ve çatlak bölgesinin seri olarak yük aktardığını düşünerek aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$\begin{aligned} a'_1 &= \frac{b_1(h-d_s)}{h} + \frac{a_1 d_s}{h} \\ a'_2 &= \frac{b_2(h-d_s)}{h} + \frac{a_2 d_s}{h} \end{aligned} \quad (2.1)$$



$$a'_3 = \frac{a_3 d_s}{h}$$

OLM parametreleri b_1 ve b_2 'nin değerleri ise uzunluğa göre değişmemektedir. OLM ufkunun $\delta=3.01d$ olduğu zaman, altı çeşit eleman uzunluğu bulunmaktadır ($d, 1.41d, 2d, 2.24d, 2.83d, 3d$). Şekil 2.2'de $\delta=3.01d$ için örnek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Burada a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 değerleri sırasıyla 3.1, 40, 240, 0.6 ve 0.2 alınmıştır. $d_s=0.005$ m, $d=0.025$ m, $E_c=35.7$ GPa, $\varepsilon_{cr}=1.11e-04$ olarak alındığı zaman çatlak enerjisi G_f değeri 151 N/m olarak hesaplanmıştır. Şekilde gösterilen 6 çizgi elemanın boyları uzadıkça altlarında kalacak alan azalacak şekilde ($d, 1.41d, 2d, 2.24d, 2.83d, 3d$) uzunlukları için elde edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme eğrileridir.



Şekil 2.2 Altı farklı uzunlukta kafes elemanı için çatlak enerjisi normalleştirme kuralı ile elde edilmiş gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

2.1.3 Örtüşen Kafes Elemanlarında Oluşan bir Çatlak için Çatlak Enerjisinin Hesaplanması

Çatlak enerjisi G_f birim çatlak alanını açmak için harcanan enerji olarak tanımlanmıştır. Bu tanımları kullanarak Şekil 2.1c'de verilen kuvvet-birim şekil değiştirme eğrisi ve çatlak enerjisi normalleştirme kuralı kullanılarak G_f değeri yaklaşık olarak herhangi bir simülasyon yapmadan da hesaplanabilir. Şekil 2.3'de örnek bir 1×1 'lik bir OLM problemi için düğüm noktaları ve kafes elemanları gösterilmiştir. Düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe $d=0.05$ olarak alındığında ve OLM ufku olarak $3.01d$ alındığında toplam düğüm noktası sayısı 441 olmaktadır. Altı farklı uzunlukta kafes elemanı bulunmaktadır. Toplam kafes elemanı sayısı 5436 olarak hesaplanmıştır. Kafes elemanlarının uzunluklarına göre dağılımı aşağıdaki şekildedir:

U1: uzunluk d , eleman sayısı 840

U2: uzunluk $1.41d$, eleman sayısı 800

U3: uzunluk $2d$, eleman sayısı 798



U4: uzunluk 2.24d, eleman sayısı 1520

U5: uzunluk 2.83d, eleman sayısı 722

U6: uzunluk 3d, eleman sayısı 756

Tüm kafes elemanlarının sadece bir noktadan çatlayacağı varsayılır ve yukarıda detayları verilen normalleştirme kuralı uygulanırsa hangi uzunlukta olursa olsun kafes elemanlarının tamamen koptuğu zaman harcayacağı enerji birbirlerinin aynı olacaktır. Ancak incelenmesi gereken husus herhangi bir yönde ve uzunlukta olan çatlakın keseceği eleman sayısıdır. Örneğin Şekil 2.3b'de gösterilmiş problemi boydan boya kesen çatlak 21 U1, 40 U2, 42 U3, 118 U4, 76 U5 ve 63 U6 kafes elemanını kesmektedir. Toplam çatlayan eleman sayısını, çatlak uzunluğunun d'ye oranına böldüğümüz zaman $r=18$ sayısı elde edilmektedir. Farklı çatlak boyları ve yönleri ile hesaplama tekrarlandığı zaman Şekil 2.3c için bu rakam $r=17,85$, Şekil 2.3d için ise $r=18.5$ olarak hesaplanmıştır. Yeteri kadar düğüm noktası olması durumunda, çok farklı çatlak yönleri ve uzunlukları için hesaplama tekrarlandığında değişimin en fazla 3-4% mertebesinde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla herhangi bir çatlakın kestiği eleman sayısının çatlak uzunluğu/d sayısına oranı yaklaşık olarak 18 olarak kabul edilebilir. Çatlak enerjisi normalleştirme kuralı uygulandığında uzunluklarından bağımsız olarak harcanan çatlak enerjisi aynı olacağından aşağıdaki formülasyonda (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2) parametrelerinin elde edildiği d_s ölçeği kullanılacaktır. Daha büyük bir ölçekte formülasyon tekrar edildiğinde, çatlak enerjisi normalleştirme kuralı kullanıldığı takdirde aynı sonuçlar elde edilecektir.

Çatlak enerjisi aşağıdaki denklemden hesaplanabilir

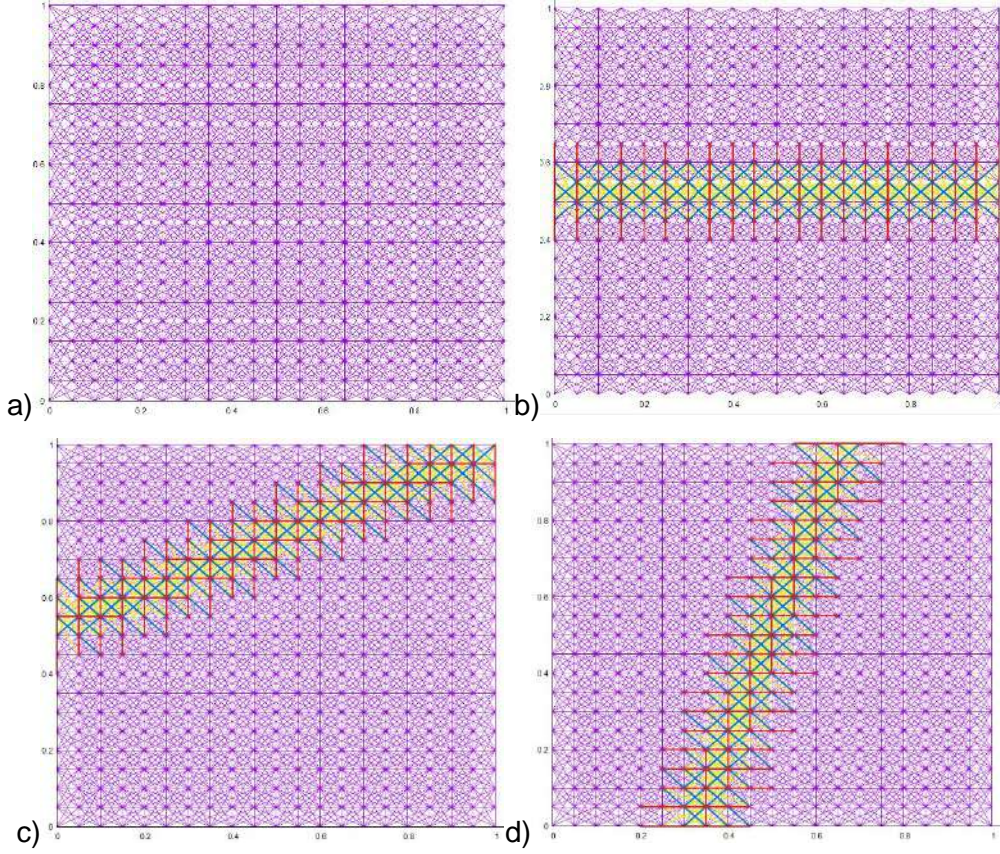
$$G_f = \text{Çatlamış eleman sayısı} \times \frac{\text{kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan}}{\text{Çatlak Uzunluğu} \times \text{Kalınlık}} \quad (2.2)$$
$$= r \times \frac{\text{kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan}}{d_s \times w}$$

Burada w çatlak kalınlığını ifade etmektedir. Bu denklemde r değeri ($r = 18$) sabit olarak kabul edilmekte olduğundan herhangi bir eleman tipi için kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanın hesaplanması çatlak enerjisinin hesaplanması için yeterli olacaktır. Yapılan modelleme çalışmalarında OLM ufkunun 3.01d olduğu zaman kafes elemanlarının aksenal rijitliğinin $EA=C E_c d_s w$ olarak ifade edilebileceği tespit edilmiştir. Bu denklemde bulunan C parametresi ufkun 3.01d olduğu zaman 0.105 olarak hesaplanmıştır. Bu bilgiler ışığında G_f denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$G_f = 0.5 r C E_c d_s \varepsilon_{cr}^2 \left((1 + b_1)(a_1 - 1) + (b_1 + b_2)(a_2 - a_1) + b_2(a_3 - a_2) \right)$$
$$= 0.945 E_c d_s \varepsilon_{cr}^2 (a_1(1 - b_1) + a_2 b_1 + a_3 b_2 - 1 - b_1) \quad (2.3)$$

Çatlak enerjisine etki eden parametreleri incelendiğinde en önemli etken olarak $E_c f_c \varepsilon_{cr}$ ve $a_3 b_2$ çarpımları olduğu gözükmektedir. Bu yöntemle hesaplanan G_f değerleri sayısal modelleme ile

kalibre edilen G_f değerleri ile mukayese edildiğinde sonuçların birbirine son derece yakın çıktığı görülmektedir. Elde edilen denklemin kalibrasyon çalışmaları hızlandırdığı ve kolaylaştırdığı belirtilmelidir.



Şekil 2.3 a) OLM ufkunun 3.01d olduğu durum için 1x1'lik bir bölge için kafes elemanlarının dağılımı, b), c), d) farklı çatlak uzunlukları ve yönleri için çatlakmış elemanların gösterimi. Farklı renkler farklı uzunluktaki kafes elemanlarını göstermektedir.

2.1.4 Sayısal Kalibrasyon Yöntemi

OLM simülasyonunun gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki parametrelere ihtiyaç vardır:

- E_c : Elastisite modülü
- f_t : Çekme mukavemeti (veya $\varepsilon_{cr}=f_t/E_c$)
- G_f : Çatlak enerjisi
- a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 : Şekil 2.1c'de d_s uzunluğunda bir kafes elemanı için gereken model sabitleri

E_c, f_t, G_f değerlerinin bilinmesi durumunda d_s uzunluğundaki bir kafes elemanının a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 değerlerinin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler çekme deneylerinin mevcut olması durumunda sayısal sonuçların doğrudan deney sonuçlarıyla mukayese ederek kalibre edilmektedir. Çekme deneyi sonuçlarının olmaması durumundaysa çekme davranışını

tahmin etmek için kullanılan analitik modeller kullanılarak kalibrasyon yapılmaktadır. Kalibrasyon için gerçekleştirilen modellerde Bölüm 2.2'de verilen Sıralı Doğrusal Analiz kullanılmıştır.

İlk deneysel kalibrasyon çalışmasında Gopalaratnam ve Shah (GS) (1985) ve Cornelissen ve diğerlerinin (COR) (1986) gerçekleştirdikleri gerilme testleri kullanılmıştır. E , f_{cr} , ve G_f değerleri GS için 29.1 GPa, 3.41 MPa, 0.054 kN/m COR için ise 21.0 GPa, 3.47 MPa, 0.1 kN/m olarak alınmıştır. Çekme deneyinde kullanılan çentik yükseklikleri ve numune genişlikleri GS için 3 mm ve 13 mm, COR için ise 5 mm ve 5 mm olarak rapor edilmiştir. Deneyselerde uzama ölçümlerinin alındığı mesafeler GS için 83 mm, COR için ise 35 mm olarak belirtilmiştir. Deneyselerde düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe $d=1$ mm (GS) ve $d=2.5$ mm (COR) olarak seçilmiştir. Düğüm noktalarının yerleri ve düğüm noktaları/kafes elemanları ilişkileri kurulduktan sonra deneysel yük-yer değiştirme eğrisine en yakın sonucu veren a_1 , a_2 , a_3 , b_1 ve b_2 değerleri, rapor edilen ve hesaplanan çatlak enerjileri arasındaki farkı en aza getirecek şekilde kalibre edilmiştir. Boyut etkisini azaltmak için yukarıda detayları verilen çatlak enerjisi normalleştirme kuralı uygulanmıştır.

Değişik deneyler ve OLM ufkü için kalibre edilmiş a_1 , a_2 , a_3 değerleri Tablo 2.1'de $d_s=1$ mm değeri için verilmiştir. Bölüm 2.1.3'de geliştirilen çatlak enerjisi denklemi ile mukayese ise Tablo 2.2'de verilmiştir. Gerilme eksenine ile ilgili parametreler olan b_1 ve b_2 için 0.6 ve 0.2 değerleri, çatlak enerjisi, d_s ve OLM ufkünden bağımsız olarak, tüm incelemelerimizde en iyi seçenekler olarak ortaya çıkmıştır. OLM ufkünün $\delta=1.5d$ olduğu durum için deneysel ve sayısal model sonuçları Şekil 2.4'de verilmiştir. Sayısal modellemenin sonunda elde edilen

Tablo 2.1 Kalibrasyon sonuçları ($d_s = 1$ mm).

	GS $G_f=5$ 4 N/m	COR $G_f=100$ N/m	Sayısal model $G_f=70$ N/m	Petersson $G_f=124$ N/m	Petersson $G_f=150$ N/m	Baraj $G_f=60$ N/m	Baraj $G_f=100$ N/m	Baraj $G_f=150$ N/m	Çekme rijitleşmesi $G_f=60$ N/m
$\delta=1.5d$									
a_1	6.6	9	6.4	7.5	7.5	15	12.5	10	-
a_2	75	100	120	200	250	30	60	125	-
a_3	450	700	600	1200	1400	300	500	650	-
$\delta=3.01d$									
a_1	12	12.5	12.4	15.5	15.5	20	17.5	15.5	15.5
a_2	75	100	120	200	250	30	60	125	150
a_3	450	700	600	1200	1400	300	500	650	1000

Tablo 2.2 Sayısal kalibrasyon sonuçlarıyla (Tablo 2.1), Bölüm 2.1.3'de verilen yöntem kullanılarak hesaplanan çatlak enerjisi değerlerinin mukayesesi.

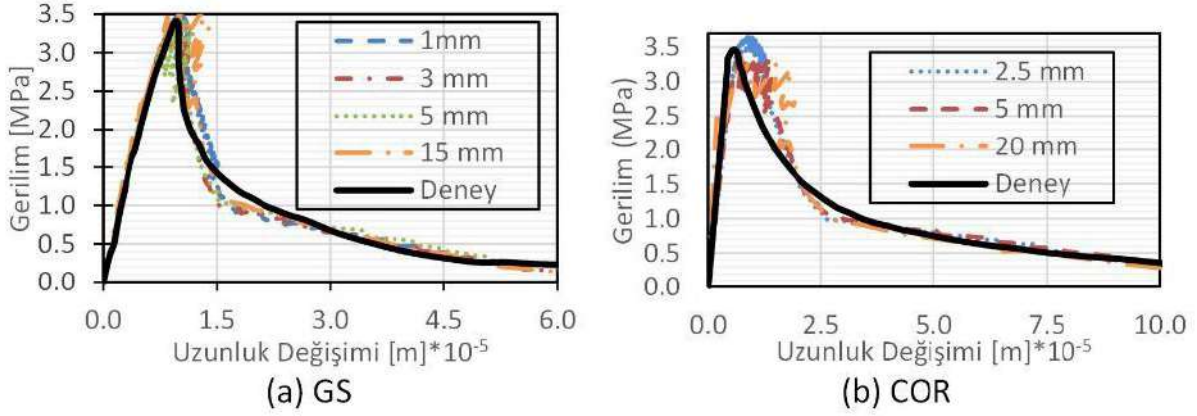
	GS	COR	Sayısal	Petersson	Petersson	Baraj	Baraj	Baraj	Çekme rijitleşmesi
Sayısal Model	54 N/m	100 N/m	70 N/m	124 N/m	150 N/m	60 N/m	100 N/m	150 N/m	60 N/m
Denklemler 2.3	52 N/m	108 N/m	65 N/m	133 N/m	158 N/m	66 N/m	107 N/m	156 N/m	60 N/m

çatlak görünümü Şekil 2.5'de görülebilir. Bu şekilde renkler gerinim değerinin kritik birim şekil değiştirme değerinden 0.02'ye kadar olan değişimini göstermektedir. Yer değiştirme büyüklükleri çok küçük olduğundan şekillerde amplifikasyon faktörü 20 olarak kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların büyük d değerleri için bile yakın olduğu gözükmektedir.

OLM ufkunun artırılması sonucunda ($\delta=3.01d$) elde edilen sonuçlar Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmiştir. Ufkun artırılması sadece a_1 değerini etkilemektedir. OLM ufkunun 3.01d olduğu durumda, 1.5d olarak alındığı duruma göre çatlak, çentikle işaretlenmiş bölgenin dışına çıkmaktadır. Bunun nedeni uzun diyagonal elemanların çentik bölgesindeki düğüm noktalarını çentikli bölgenin dışındaki düğüm noktalarına bağlamasıdır. Küçük d değerleri kullanıldığı zaman bu durumun ortadan kalkması beklenmektedir. Daha tarafsız bir şekilde OLM ufkunun sayısal sonuçlara etkisinin araştırılması için sayısal bir deney yapılmıştır. Bu deneyde çentikli bölgenin yüksekliği Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da görüldüğü gibi oldukça büyük alınmıştır. Böylece çentikli bölgede yer alan düğüm noktalarının dışarıda kalan düğüm noktalarıyla etkileşimi azaltılmıştır. E, f_{cr} , G_f , ve ölçüm uzunluğu değerleri 27.0 GPa, 3.1 MPa, 0.07 kN/m, ve 48 mm olarak alınmıştır. Gerilme-yer değiştirme eğrisi için Cornelissen (1986) tarafından geliştirilmiş denklem kullanılmıştır:

$$\frac{f(u)}{f_{cr}} = \left(1 + \left(c_1 \frac{u}{u_{ult}} \right)^3 \right) \exp \left(-c_2 \frac{u}{u_{ult}} \right) - \frac{u}{u_{ult}} (1 + c_1^3) \exp(-c_2), \quad 0 < u_n < u_{n,ult} \quad (2.4)$$

Bu denklemde, f_{cr} tek eksenli çekme mukavemetini, c_1 (3.0) ve c_2 (6.93) denklem sabitlerini, u_{ult} nihai yer değiştirmeyi ($5.136 \cdot G_f / f_{cr}$), ve u ölçüm uzunluğu içinde kalan ortalama çatlak açıklığını ifade etmektedir. Sonuçlar Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmektedir. Bu deneyin iki önemli sonucu göze çarpmaktadır: i- OLM ufkunun artırılması yumuşama bölgesinde daha iyi sonuçlara yol açmaktadır, ii-Yukarıda bahsedilen çatlak enerjisi normalleştirme kuralı büyük ufuk değerleri için iyi sonuçlar vermektedir ancak eleman uzunlukları çentik yüksekliğine göre yeterince küçük olmalıdır.



Şekil 2.4 Kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri (ufuk =1.5d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).

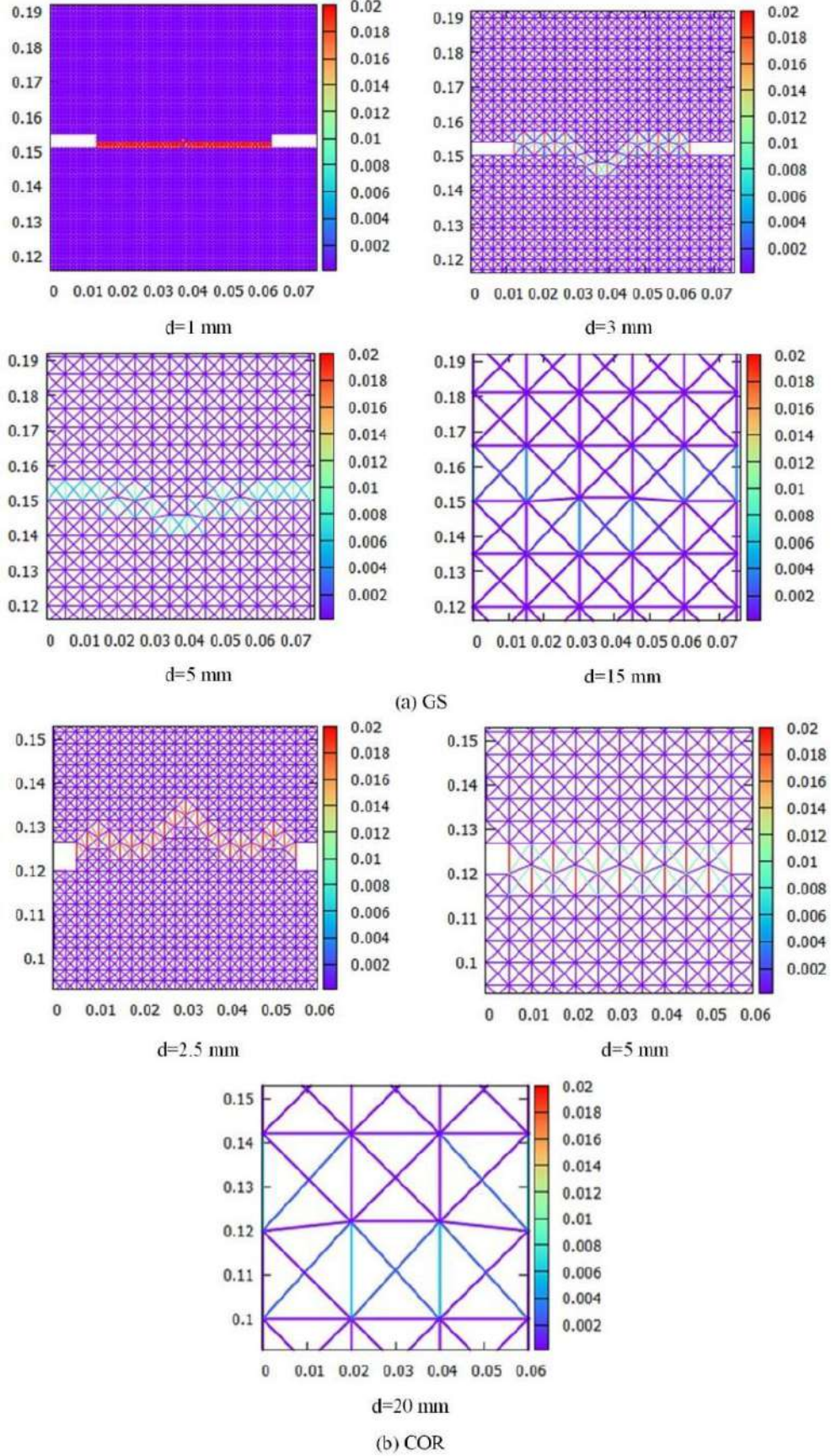
2.2 Sıralı Doğrusal Analiz

Dinamik etkilerin ihmal edilebileceği problemler için örtüşen bir kafes yaklaşımı ile modellenen sistemin kuvvet-yer değiştirme davranışı Rots (2001) tarafından önerilen Sıralı Doğrusal Analiz (SLA – **S**equentially **L**inear **A**nalysis) yaklaşımı kullanılarak araştırılmıştır. Benzer bir yaklaşım Schlangen ve van Mier (1992) tarafından malzeme testlerini simüle etmek amacıyla gerilme durumuna bağlı olarak sonlu elemanlar metodunda eleman kaldırma yoluyla uygulanmıştır. Rots (2001) ise bu metodu doğrusal olmayan yapı mekaniği problemlerinin çözümünde başarıyla kullanmıştır. DeJong ve diğerleri (2008) bu yöntemi sonlu elemanlar çerçevesinde oransal olmayan yükler için daha da geliştirmiştir. SLA yinelemeler olmaksızın elastik analiz gerektiren, kuvvet-yer değiştirme eğrisinde olabilecek geri çekmelere bile tepki verebilen ve programlaması oldukça kolay bir yaklaşımdır. Analiz sonuçları, analizin ardışık elastik doğasından ötürü genellikle inişli çıkışlıdır ve monotonik davranış yük-yer değiştirme eğrisinin zarfı olarak kabul edilir.

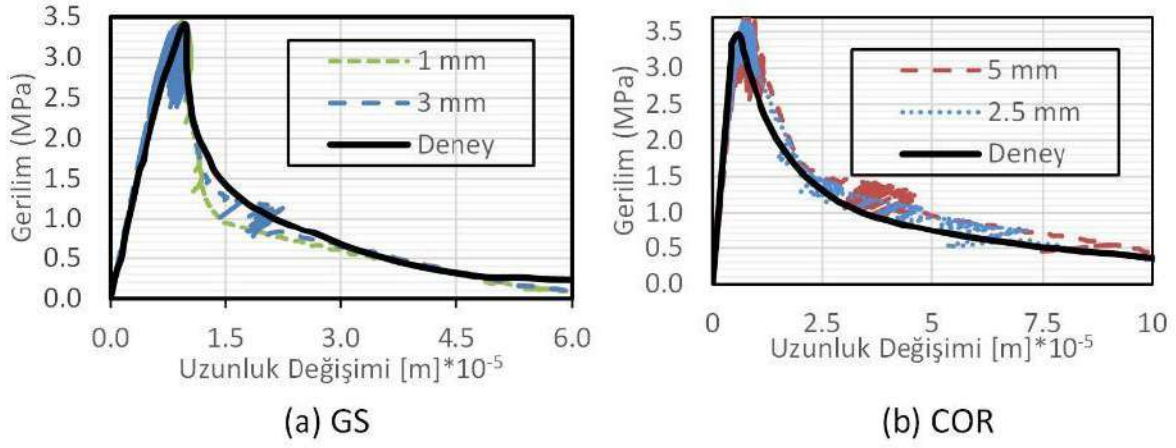
SLA aşağıdaki aşamalar ile özetlenebilir:

- 1) Uygulanan referans yükler altında örtüşen kafes modelinin doğrusal elastik analizi yapılır ve en yüksek talep/kapasite oranına (eleman gerilmesi / gerilme mukavemeti) sahip olan kafes elemanı bulunur,
- 2) Şekil 2.1d'de verilen testere diş eğrisini takip edecek şekilde en kritik elemanın rijitlik değeri azaltılır,
- 3) Hasar gören elemanın rijitlik değeri azaltılır ve analiz tekrarlanır,
- 4) Bütün kritik gerilme altındaki elemanların etkin rijitlik modülünü azaltılarak hasarın artacağı şekilde 1-3 adımları tekrarlanır.

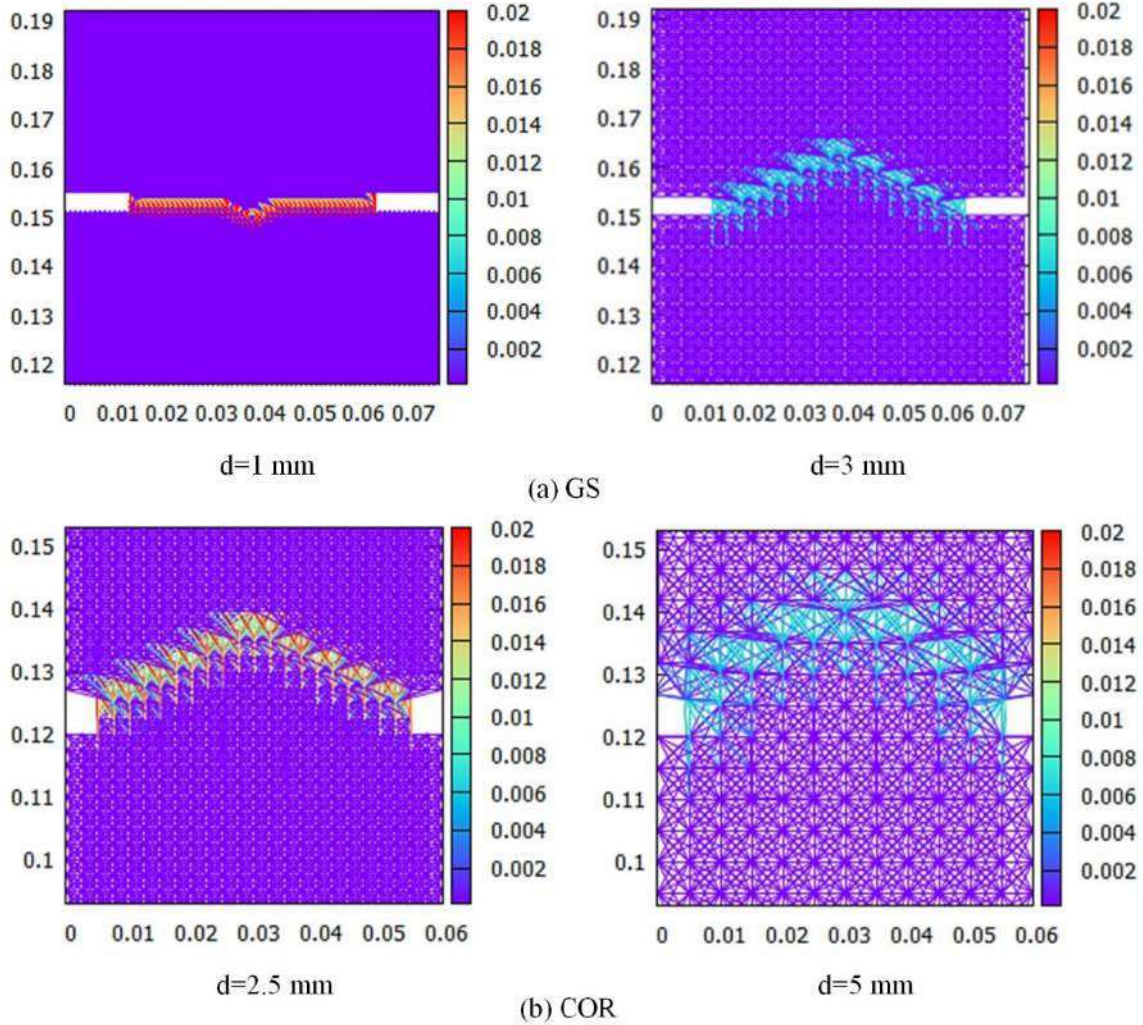
Örtüşen kafes modelini önceden belirlenmiş bir eleman boyutu ve ufku ile otomatik olarak oluşturan ve SLA adımlarını doğrusal cebirsel denklemler kümesinin çözümünü PCG (eşlenik gradyan) metodu yardımıyla iteratif olarak elde eden bir yazılım geliştirilmiştir.



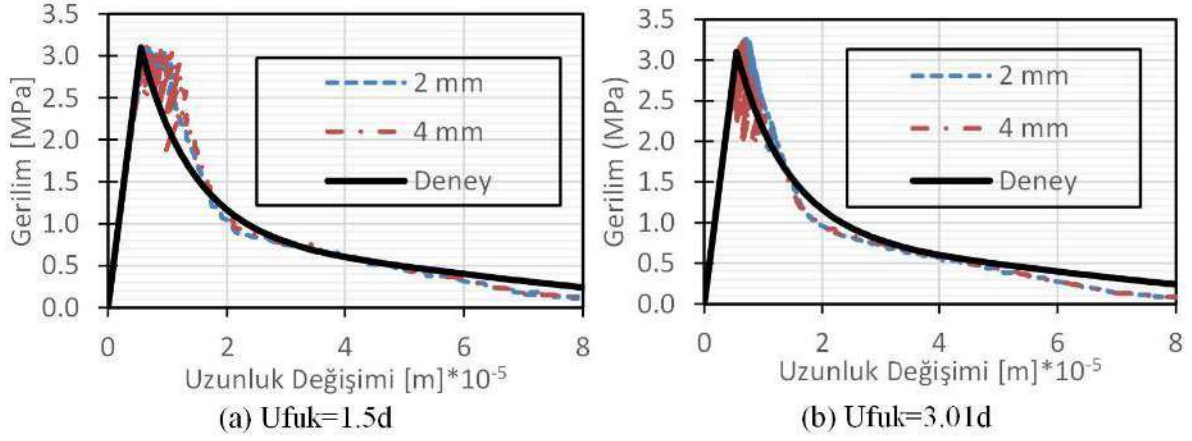
Şekil 2.5 Çatlak görünümü (ufuk =1.5d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).



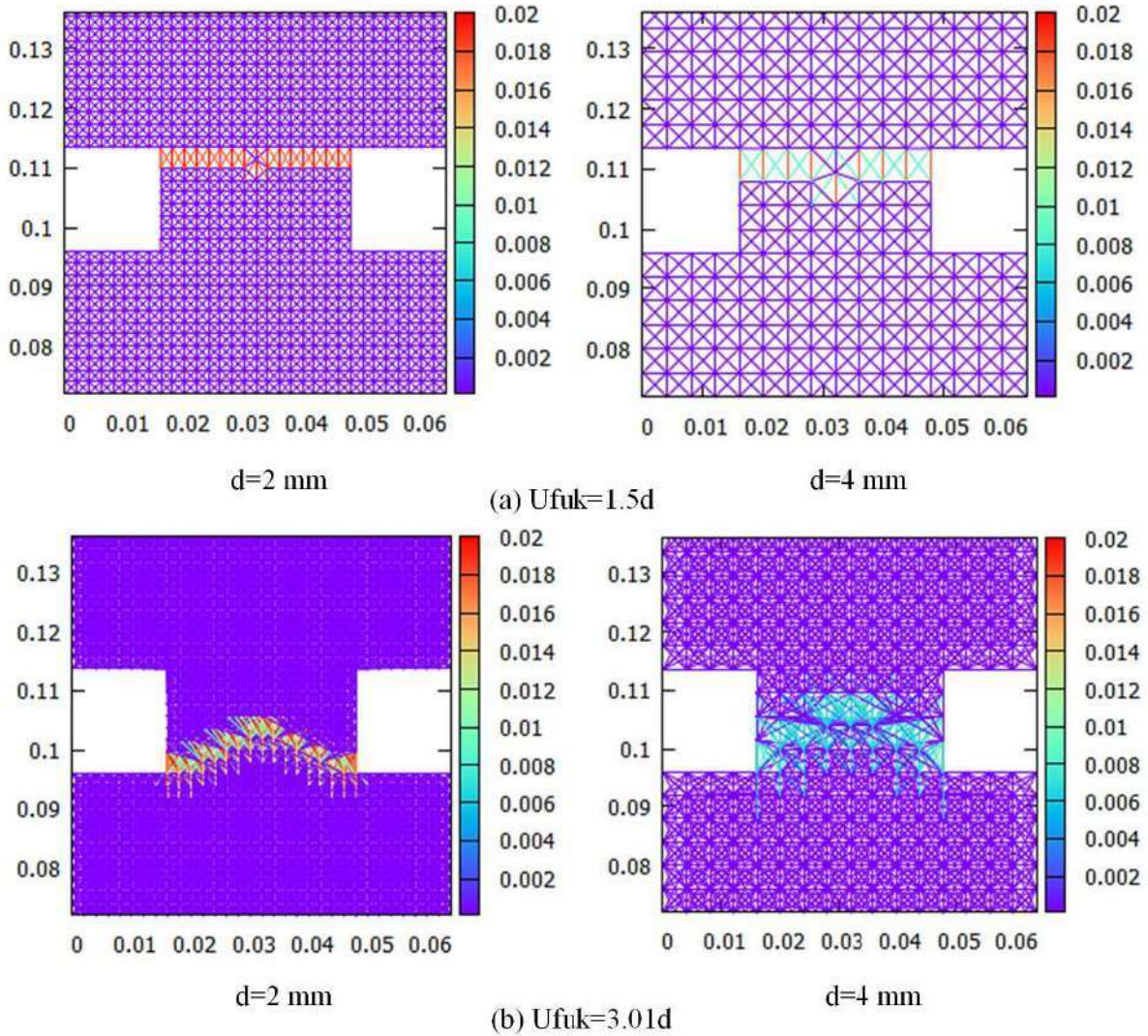
Şekil 2.6 Kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri (ufuk =3.01d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).



Şekil 2.7 Çatlak görünümü (ufuk =3.01d) a) Gopalaratnam ve Shah (1985), b) Cornelissen ve diğerleri (1986).



Şekil 2.8 Sayısal örnek için kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri a) ufuk=1.5d, b) ufuk=3.01d.



Şekil 2.9 Sayısal örnek için çatlak görünümü kuvvet-uzunluk değişimi eğrileri a) ufuk=1.5d, b) ufuk=3.01d.

2.3 Belirtik Entegrasyon

Dinamik problemlerin çözümü için çoğunlukla kullanılan örtük entegrasyon yöntemi yerine belirtik entegrasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu tercihin nedeni çatlakların sistem rijitlik matrisinde yarattığı çok büyük ve ani değişimlerden dolayı denge denklemlerini iterasyon yöntemleriyle sağlanmasındaki zorluklardır. Dinamik analizlerde kullanılan denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f \quad (2.5)$$

Burada M = kütle matrisi (diyagonal), C = enerji sönüm matrisi, K =rijitlik matrisi, u =yer değiştirme vektörü, f =dış yük vektörünü göstermekte olup Rayleigh enerji sönüm matrisi ($C=\alpha M+\beta K$) yaklaşımı kullanılmıştır. Doğrusal olmayan problemlerde K sekant rijitlik matrisi olarak alınmaktadır. Sönüm matrisinin hesabında kullanılan rijitlik matrisi başlangıç rijitlik matrisi olarak kullanılmıştır. Belirtik entegrasyon için Chung ve Lee (1994) tarafından önerilmiş algoritma tercih edilmiştir. Algoritma aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1. Diyagonal M matrisini ve doğrusal olmayan kuvvet vektörünü hesapla

$$N = f - Ku - Cv_0$$

2. $u_0, v_0, N(u_0, v_0), f_0$ ve a_0 değerlerinin ilk değerlerini hesapla $a_0 = M^{-1}(f_0 - N(u_0, v_0))$

3. Entegrasyon parametresi β değerini seç ($1 \leq \beta \leq 28/27$) ve aşağıdaki belirtilen parametreleri hesapla

$$\beta_1 = \Delta t^2(1/2 - \beta), \quad \beta_2 = \Delta t^2\beta, \quad \gamma_1 = -\Delta t/2, \quad \gamma_2 = 3\Delta t/2$$

4. Her adım için aşağıdaki değerleri hesapla

- a. $a_{n+1} = M^{-1}(f_n - N(u_n, \dot{u}_n))$

- b. $u_{n+1} = u_n + \Delta t\dot{u}_n + \beta_1 a_n + \beta_2 a_{n+1}$

- c. $v_{n+1} = v_n + \gamma_1 a_n + \gamma_2 a_{n+1}$

5. Bir sonraki zaman değerine git, $n=n+1$ ve simülasyon tamamlanana kadar dördüncü adımı tekrarla.

2.4 Doğrusal Davranış Sergilemeyen Sistemlerin PID Kontrolü Yardımıyla Belirtik Entegrasyon Kullanılarak Deplasman Kontrollü Modellenmesi

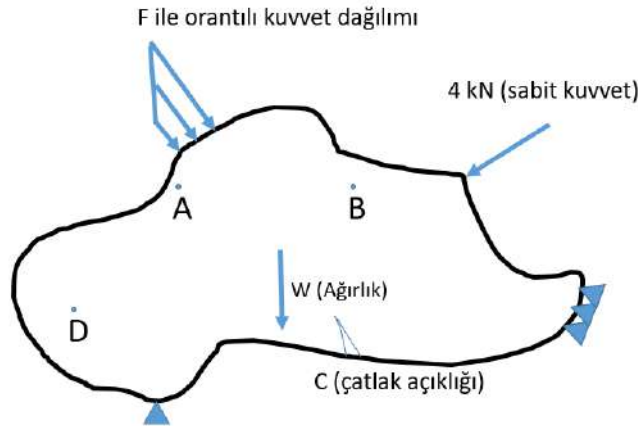
Dinamik etkilerin ihmal edilebileceği problemler için Sıralı Doğrusal Analiz (SLA – Sequentially Linear Analysis) yaklaşımı kullanımı oldukça kolay bir yaklaşım sunmaktadır. SLA yinelemeler olmaksızın elastik analiz gerektiren, kuvvet-yer değiştirme eğrisinde olabilecek geri çekmelere bile tepki verebilen ve programlaması oldukça kolay bir yaklaşımdır. Ancak proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda çok sayıda bağ elemanının olduğu problemlerde hasar gören elemanların rijitlik değerlerinin yavaş yavaş azaltılmasının çok sayıda doğrusal analiz yapılmasına neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle çok sayıda eleman içeren problemlerde

veya zaman tanım alanında çözülmesi gereken problemlerde belirtik entegrasyon ile dinamik denklemlerin çözümü yoluna gidilmiştir. Bu tercihin nedeni çatlakların sistem rijitlik matrisinde yarattığı çok büyük ve ani değişimlerden dolayı denge denklemlerinin iterasyon yöntemleriyle sağlanmasındaki zorluklardır. Belirtik entegrasyon doğrusal olmayan dinamik problemler için doğal bir seçim olmakla beraber deplasman kontrollü ve/veya yavaş yükleme hızları altında gerçekleştirilen deneylerin simülasyonlarında kullanılmasına uygun değildir. Bu problemi gidermek için geliştirilen OLM analiz motoruna PID kontrolü eklenmiştir.

Sürekli denetim türleri, geri besleme yoluyla hata farkına göre çıkışa sinyal üreterek kontrolü sağlar. PID'nin açılımı P (proportional/oransal), I (integral/integral) ve D (derivative/türevsel) olarak yapılmaktadır. Kontrol tipleri P denetleyici, I denetleyici, D denetleyici ve bu denetimlerden birkaçının bir araya gelerek PI denetleyici, PD denetleyici ve PID denetleyici olarak yapılmaktadır. Bu proje kapsamında PID kontrolü tercih edilmiştir. Bir PID denetleyici çıkıştan geri besleme ile gelen sinyali giriş sinyali ile karşılaştırır. Sinyaller arasında fark hata olarak kaydedilir. Bu hataya göre PID denetleyici hatayı en aza indirmeye çalışarak bir etki yapar ve çıkışa gönderir. Bu şekilde hata en aza indirilene kadar çıkıştan girişe sürekli geri besleme ile hatalar belirlenir ve denetleyici etkisini çıkışa göndererek hata azaltılır.

Şekil 2.10'da verilen bir örnek için yükleme parametresi F olsun. Bu sistemin deneysel olarak test edilmesi sırasında F 'in artış hızı farklı şekillerde kontrol edilebilir. Aşağıda kontrol seçeneklerinin bazıları listelenmiştir:

- A noktasındaki x yönündeki deplasmanın zamana göre değişimi
- A ve B noktaları arasındaki x yönündeki yer değişiminin göreceli olarak zamana göre değişimi
- C noktasındaki çatlak genişliğinin zamana göre değişimi
- D noktasındaki gerilim veya birim şekil değiştirmenin zamana göre değişimi



Şekil 2.10 PID kontrolü.

Bu seçeneklerin arasında değişim yapmakta mümkündür. Kontrol parametresinin arzu ettiğimiz değişiminin $u(t)$ olarak belirlendiğini varsayalım. Sayısal modelden gelen değerin $u_p(t)$ olarak ifade edersek aralarındaki fark t zamanındaki hatayı vermektedir, $e(t) = u(t) - u_p(t)$. F 'nin zamana göre değişimini aşağıdaki şekilde bir integral-diferansiyel denklemi vasıtasıyla kontrol edebiliriz

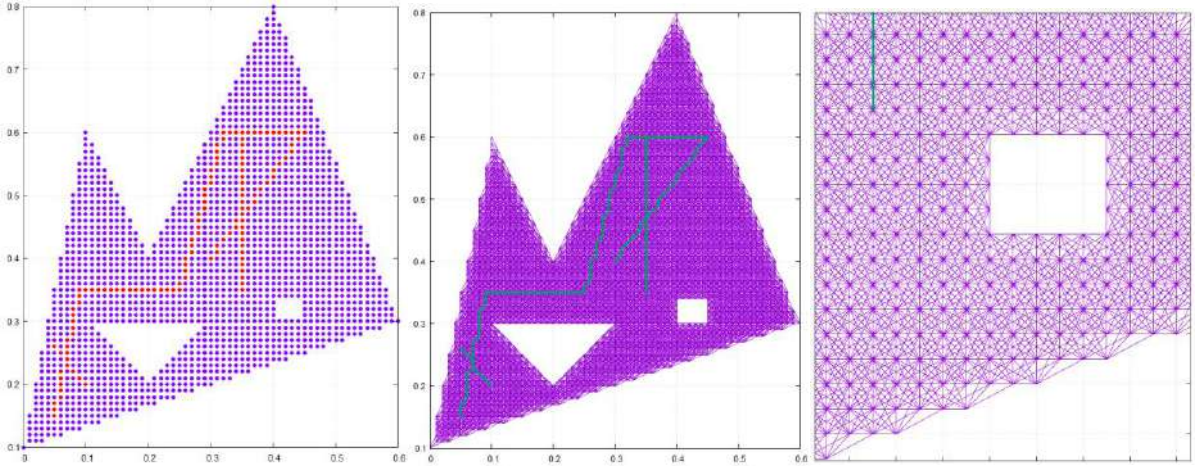
$$\frac{dF}{dt} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.6)$$

K_p , K_i ve K_d parametreleri oransal, integral ve türevsel kontrol parametreleridir. K_p parametresi oransal kontrol, denetleyici çıkışı üretir. K_i parametresi hata birikimini kontrol eder ve dinamik cevapta hata olması pahasına statik doğruluk miktarını artırır. K_d dinamik davranışı artırır ve hatanın değişme hızına göre geri dönüş yaratır. Bu denklem OLM simülasyonunda zamanda atılan her adımda eş zamanlı olarak çözülerek F değeri güncellenir. Doğrusal davranıştan doğrusal olmayan davranışa geçildiği zaman F 'nin zamana göre olan türevi negatif değerler almaya başlar ve bu da yumuşama davranışının doğru olarak modellenmesini sağlar. PID parametrelerinin seçimi için Ziegler-Nichols metodu kullanılmaktadır (Ziegler ve Nichols 1942).

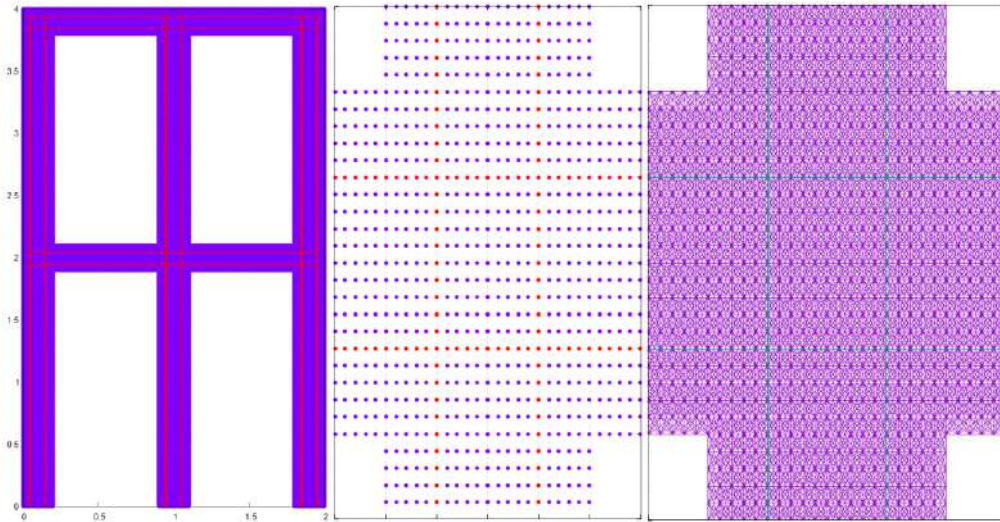
PID kontrolü bu proje kapsamında geliştirdiğimiz OLM analiz motoruna eklenmiş ve tünel simülasyonlarına uygulanmadan önce test edilmiştir. Doğrulama çalışmalarında elde edilen sonuçlar Bölüm 2.8'de verilmiştir.

2.5 OLM Analiz Motoru İçin Örgü Programının Geliştirilmesi

Deney düzeneği oldukça kompleks bir geometriye sahip olduğu için OLM analiz motoru için gerekli olan düğüm noktaları ve bağ elemanları bilgisini hazırlayan örgü programı geliştirilmiştir. Program girdi olarak poligonlar kullanılmaktadır. İlk poligon hesaplama yapılacak alanı tanımlamaktadır. Bu alanın içinde boşluklar varsa bu boşluklar da poligonlar vasıtasıyla tanımlanmakta ve hesaplama yapılacak alandan çıkarılmaktadır. Betonarme problemler için donatı yerleri ve donatı detayları çizgiler yardımıyla tanımlanmaktadır. Program çıktı olarak OLM analiz motoru tarafından okunan düğüm noktası ve bağ bilgisini (beton-beton, beton-çelik, çelik-çelik ve malzeme bilgileri) içeren dosyayı vermektedir. Ayrıca tüm poligonların sınırlarında bulunan düğüm noktalarını içeren bir dosya da hazırlanmaktadır. Böylece yükleme yapılacak, mesnet olarak kullanılacak veya ölçüm yapılacak düğüm noktaları kolaylıkla bulunabilmektedir. Şekil 2.11'de tamamen düzensiz bir örnek verilmektedir. Şekil 2.12'de ise düzenli 2 katlı bir çerçeve örneği görülmektedir. OLM ufku her iki örnekte de 3d olarak alınmıştır (d: düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe). Proje kapsamında OLM modellerinin oluşturulmasında geliştirilen örgü programı kullanılmıştır.



Şekil 2.11 Düzensiz sistem. a) Düğüm noktaları, b) Eleman detayı.



Şekil 2.12 İki katlı çerçeve sistemi.

2.6 Geliştirilen OLM Yazılımının Özellikleri

Proje kapsamında geliştirilen sayısal modelleme platformu (OLM) Fortran programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Program tek işlemci üzerinde çalışmakla beraber gerek duyulması halinde kolaylıkla paralel işlemcide çalışır hale de getirilebilir. OLM yazılımı beş adet girdi dosyasına ihtiyaç duymaktadır. Bu dosyalar aşağıdaki bilgileri içermelidir:

xxx.control.inp: Bu dosya temel simülasyon bilgilerini içermektedir. Bunların arasında kullanılacak Δt , Rayleigh sönüm matrisi parametreleri, çıktı dosyaları ile ilgili bilgiler, OLM malzeme parametreleri (a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2), beton elastisite modülü, beton yoğunluğu, çelik donatının malzeme özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca modellenecek malzemede bulunabilecek mevcut çatlakların olması durumunda çatlakların yerleri, uzunlukları ve çatlak açıklığı bilgileri de bu dosyada verilebilmektedir.



xxx.mesh.inp: Bu dosya modellenecek problemde kullanılacak düğüm noktalarının yerlerini ve kafes elemanları / düğüm noktaları ilişkilerini içermektedir. Ayrıca çalışılması istenen problemde birden fazla malzeme olması durumunda bu bilgiler de düğüm noktası ve kafes elemanı özelliklerinin arasında yer almaktadır. Benzer şekilde çelik donatı bilgisi de dosya içinde yer almaktadır.

xxx.boundary.inp: Bu dosya düğüm noktalarının sınır koşullarını içermektedir. Her düğüm noktasında iki serbestlik derecesi bulunmaktadır. Ayrıca bazı durumlarda sınır koşullarının sabit hızla belirli bir yönde hareket etmesi durumunda, gerekli bilgi bu dosyada verilmektedir.

xxx.output.inp: Bu dosya çıktı bilgisini içermektedir. OLM programı herhangi bir düğüm noktasının yer değiştirme, hız veya ivme değerinin zamana göre değişimini kaydedebilmektedir. Bir başka seçenek ise iki düğüm noktası arasında herhangi bir yöndeki göreceli yer değiştirme, hız ve ivmenin zamana göre değişiminin kaydedebilme özelliğidir. Bu dosyaların yanında istenen aralıklarla kafes elemanlarındaki gerinme, çatlamış elemanlardaki erişilmiş en büyük gerinme gibi değerlerin mekâna göre değişimi arzu edilen aralıklarla çıktı olarak ayrı ayrı dosyalara yazılabilmektedir. Bu bilgilerin dışında sistemin destek reaksiyonları ve reaksiyonların herhangi bir düğüm noktasındaki yer değiştirme, hız ve ivmeye göre değişimi de kayıt edilebilmektedir.

xxx.loading.inp: Bu dosyada dış yüklemelerle ilgili bilgiler yer almaktadır. Düzgün yük, tekil yük ve yamuk yük özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca tünel simülasyonlarında kullanılan belirli bir merkezden uygulanmış yükler de modellenebilmektedir. Tüm yükler zamana göre değişebilmekte ve arzu edilen sayıda yükleme kombinasyonu kullanılabilir. Bazı problemlerde yerçekimi yükü de önemli olduğu için ağırlığın hesaba katılması için gereken bilgiler yine bu dosyada yer almaktadır. Belirtik entegrasyon kısmında anlatıldığı gibi yavaş yüklemelerin hız kontrollü bir şekilde modellenmesi ile ilgili seçenek de burada bulunmaktadır.

2.7 Örtüşen Kafes Modelinin Deneysel Eleman Testleriyle Doğrulaması

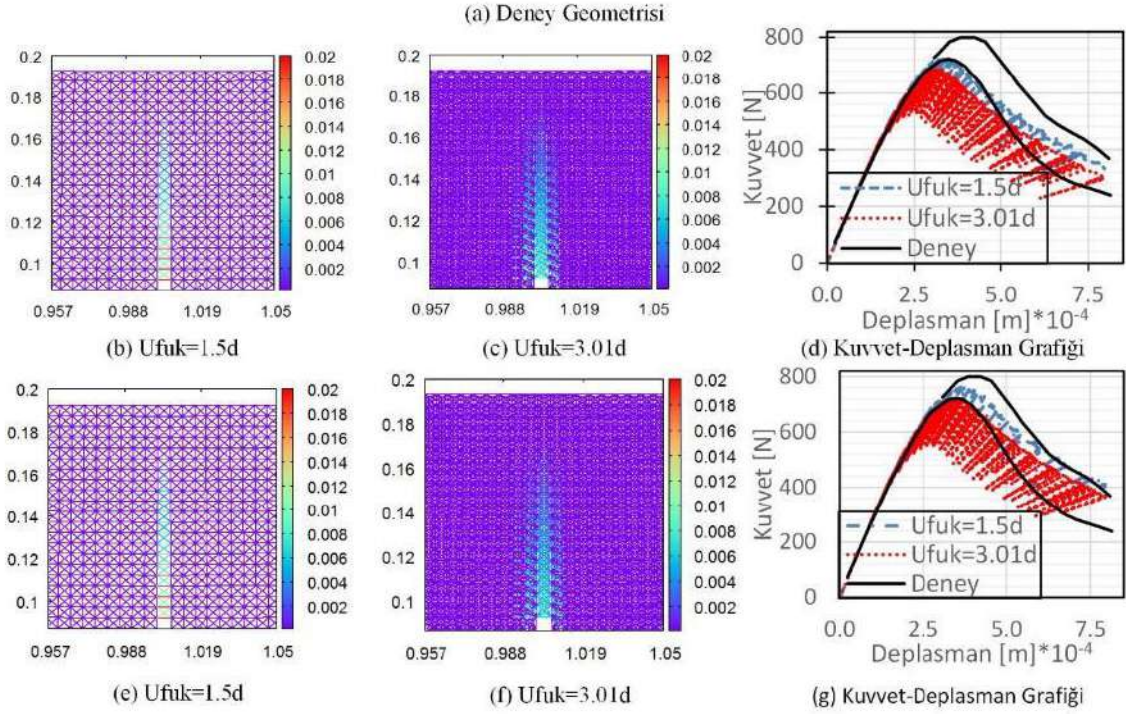
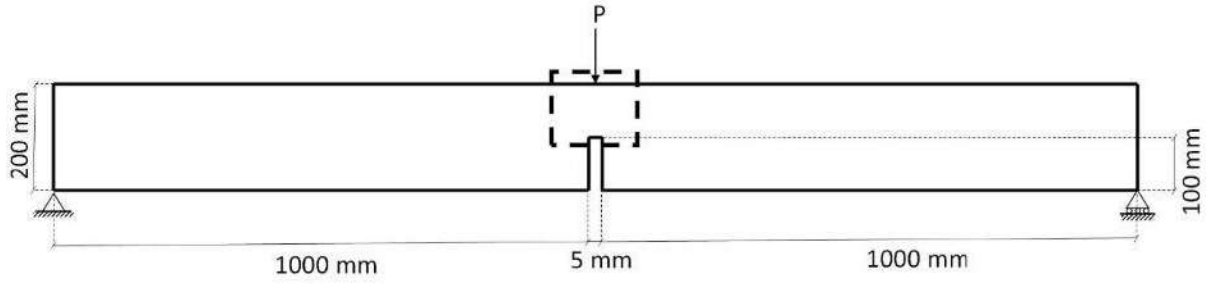
2.7.1 Giriş Deneyi

İlk olarak Petersson (1981) tarafından gerçekleştirilmiş olan üç noktalı eğilme deneyi, OLM'nin eğilmeden dolayı oluşan çatlakları ne seviyede tahmin edebildiğini değerlendirmek üzere sayısal olarak modellenmiştir (Şekil 2.13). E , f_{cr} , ve G_f değerleri sırasıyla Petersson tarafından raporlandığı gibi 30.0 GPa, 3.33 MPa, 0.124 kN/m olarak alınmıştır. Eğilme deneyi modellenmeden önce OLM parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için sayısal çekme deneyleri yapılarak sonuçlar Cornelissen modeliyle karşılaştırılmıştır. Sayısal model

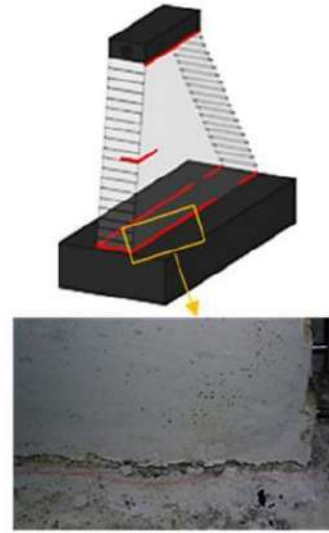
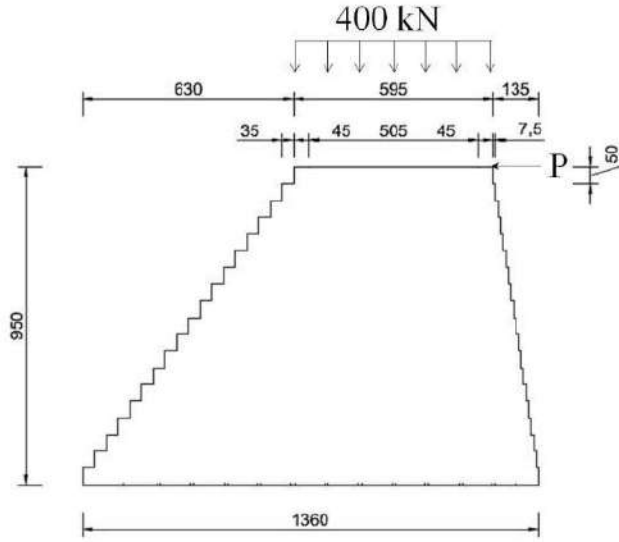
0.305 m yüksekliğinde olup 5 mm (OLM ufku 1.5d) ve 15 mm (OLM ufku 3.01d) çentik yükseklikleri kullanılmıştır. Ölçüm uzaklığı 45 mm olarak alınmıştır. Kalibre edilmiş OLM parametreleri Tablo 2.12.1'de verilmiştir. Daha sonra giriş için OLM düğüm noktaları ve elemanları tanımlanmıştır. Düğüm noktaları arasında en kısa mesafe $d=5$ mm olarak alınmıştır. Elde edilen çatlak dağılımları Şekil 2.13'de verilmiştir. Burada kalın çizgiler deneysel verileri, kesik çizgiler ise her iki OLM ufuk değeri için elde edilen sayısal sonuçları göstermektedir. Deneysel ortamda bulunan belirsizlikler göz önüne alındığında sayısal sonuçların deneysel verilerle kabul edilebilir seviyede yakınlık gösterdiği görülmektedir. Çatlak enerjisinin simülasyon sonuçlarına olan etkisini değerlendirebilmek için tüm diğer parametreler sabit tutularak çatlak enerjisi 0.15 kN/m alınarak simülasyonlar tekrarlanmıştır. Artan çatlak enerjisiyle beraber simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara daha da yaklaştığı görülmektedir (Şekil 2.13). Hassas olarak elde edilmesi oldukça zor olan ve büyük bir ihtimalle betonda mekânsal farklılıklar gösteren çatlak enerjisinin çatlak oluşumu, ilerlemesi ve dağılımı problemlerinde ne kadar önemli bir parametre olduğu bu basit örnekle açık bir şekilde görülmektedir.

2.7.2 Ölçekli Baraj Testi

Melen Barajının 1/75 ölçekli modeli üç farklı ölçekli deprem hareketi için dinamik benzeri teste (Pseudo-Dynamic Test) tabi tutulmuştur (Aldemir 2016). Deneyin orijinal kurulumu baraj kesitinin sadece alt yarısının incelenmesine izin vermektedir. Atalet ve hidrodinamik yük etkileri yatay yönde etki eden hidrolik pistonlar yardımıyla deneyde ele alınmıştır. En yakın iki düğüm noktası arasındaki mesafe $d=25$ mm olarak alınmıştır. İlk doğrulama deneyi olan giriş deneyinde kullanılan sayısal kalibrasyon tekniği ölçekli baraj deneyi için de tekrarlanmıştır. G_f değeri deneysel olarak elde edilmediği için üç farklı G_f değeri için kalibrasyon ve simülasyon tekrarlanmıştır (0.06 kN/m, 0.1 kN/m and 0.15 kN/m). E , f_{cr} ve baraj kesitinin kalınlığı sırasıyla 10.5 GPa, 2.9 MPa and 200 mm olarak alınmıştır. Deneyde baraj kesitinin üst 300 mm'lik bölümünde yer alan kafes elemanları özel olarak üretilmiş dişli çelik plaka tarafından desteklenerek elastik kalması sağlanmıştır. Öncelikle düşey yönde 400 kN büyüklüğünde yük uygulanmıştır. Daha sonra da yatay yönde yükleme uygulanmıştır. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları Şekil 2.14'de verilmiştir. Barajın elastik rijitliği neredeyse hatasız olarak tahmin edilmekle beraber yatay yük kapasitesi 20% kadar daha az tahmin edilmektedir.

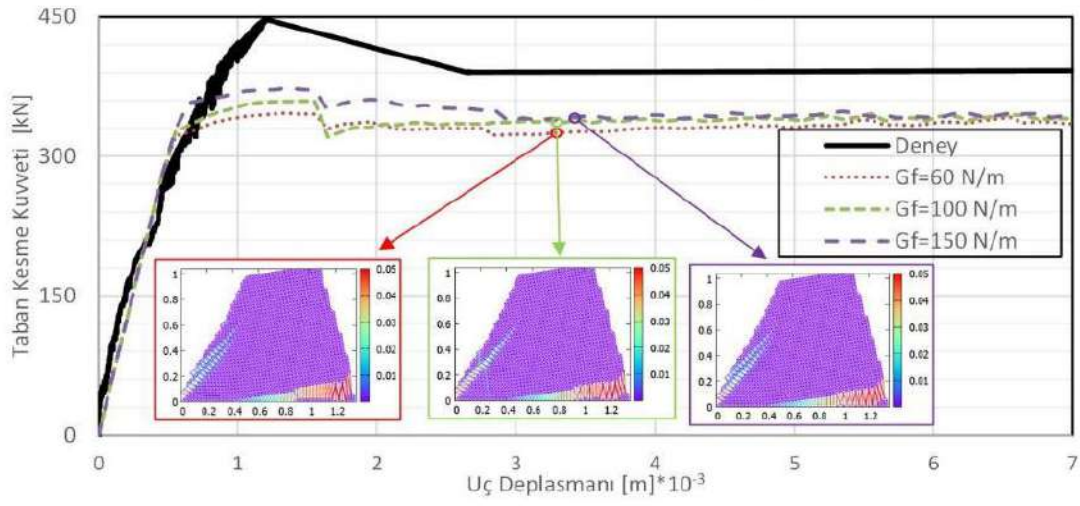


Şekil 2.13 a) Deney geometrisi, b), c), d) Çatlak görünümü, kuvvet-deplasman eğrilerinin mukayesesi ($G_f=124$ N/m), e), f), g) Çatlak görünümü, kuvvet-deplasman eğrilerinin mukayesesi ($G_f=150$ N/m).

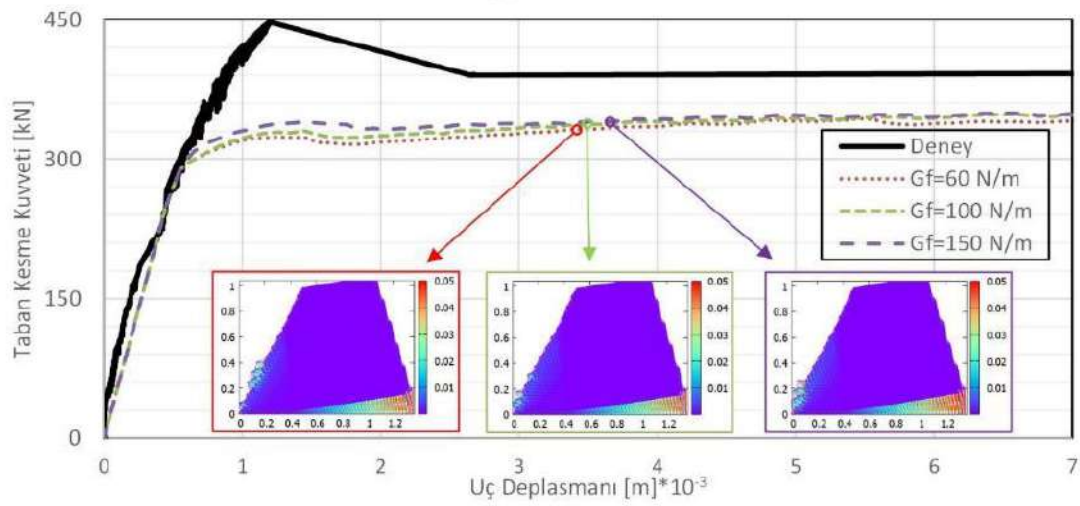


(a) Numune

(b) Çatlak Dağılımı



(c) Ufuk=1.5d



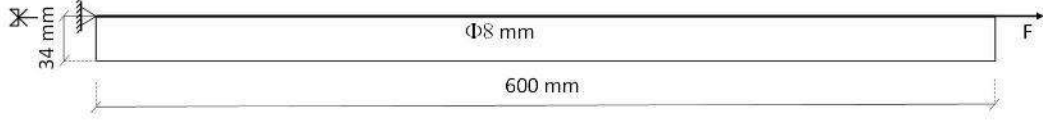
(d) Ufuk=3.01d

Şekil 2.14 a) Deney geometrisi, b) Deneysel çatlak dağılımı, c), d) Deneysel ve sayısal kuvvet-uç deplasman eğrileri.

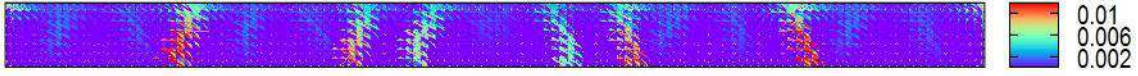
Barajın yer değiştirmesiyle makul bir şekilde tahmin edilmiş, yük taşıma kapasitesinin yaklaşık 1.5 mm yer değiştirme değerine ulaşıldığında düştüğü doğru olarak tahmin edilmiştir. Şekil 2.14'de çatlak dağılımı da gösterilmektedir (en üst yer değiştirme değerinin 3.5 mm olduğu durum). Sayısal olarak elde edilen çatlak dağılımı deneysel çatlak dağılımıyla örtüşmektedir. Bu doğrulama testinde çatlak enerjisi etkisinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür.

2.7.3 Çekme Rijitleşmesi

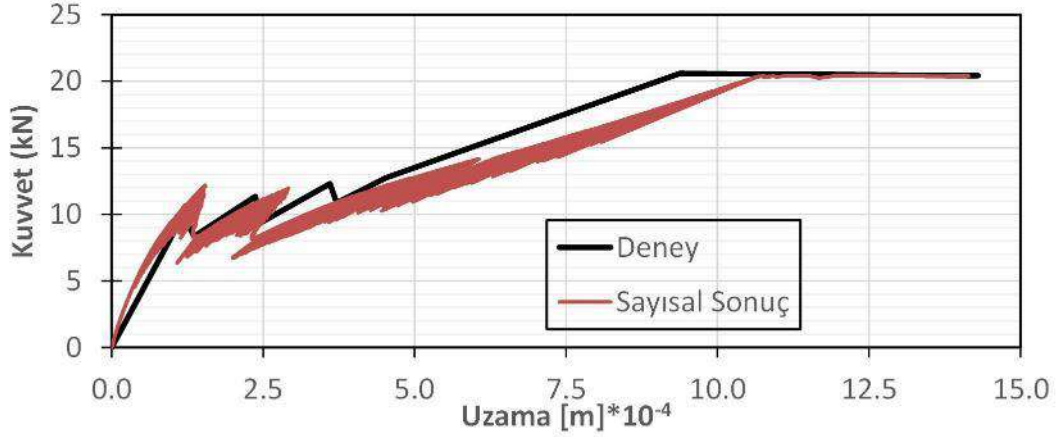
OLM'nin beton ve çelik donatı arasındaki yük aktarımını ne derecede tahmin edebildiğini test etmek için çekme rijitleşmesi deneyi sayısal olarak modellenmiştir. Bu deneyde çelik donatının etrafı betonla kaplandıktan sonra çelik donatının uçlarından tek yönlü çekme kuvveti uygulanmaktadır. Böylece çelik donatı ve beton arasındaki yük aktarımı ve ilgili çatlak aralığı incelenebilmektedir. OLM'nin doğrulanması için Gijbers ve Hehemann (1977) tarafında gerçekleştirilmiş deneyler seçilmiştir. Deneyde kullanılan betonun kesit alanı 68 mm x 68 mm, donatının çapı ise $\phi 8$ mm olarak rapor edilmiştir. Simetriden dolayı deneyin sadece yarısı modellenmiştir. Düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe $d=5$ mm olarak alınmış ve sadece OLM ufkunun 3.01d değeri için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simetriden dolayı üst tarafta yatay yönde harekete izin veren makaralı destek yerleştirilmiştir. Donatının sol ucunun ise yer değiştirmesine izin verilmemiştir. E , f_{cr} , ve G_f değerleri sırasıyla 28.0 GPa, 2.5 MPa, 0.06 kN/m olarak alınmıştır. Kalibre edilmiş OLM parametreleri Tablo 2.12.1'de verilmiştir. Donatı için elastisite modülü ve akma gerilmesi sırasıyla 192.3 GPa and 400 MPa olarak kullanılmıştır. Simetriden dolayı donatı alanının sadece yarısı hesaba alınmıştır. Çelik ve beton düğüm noktaları arasında yer alan kafes elemanlarının davranışının daha iyi modellenmesi için yaptığımız çalışmalar yük aktarımının gerçekleşmesi için bu elemanların betonun çekme mukavemetinin en az 70%'i kadar bir mukavemete ihtiyacı olduğu görülmüştür. Çelik-beton kafes elemanlarının önce elastik daha sonra da plastik bir yük-deformasyon eğrisi ile tanımlanması bir ilk öneri olarak kullanılmıştır. Deneyin ilk kısmında yük yaklaşık olarak 13 kN civarındayken çatlaklar açılmaya başlamıştır. Deneyin ikinci kısmında ise çatlaklar daha da açılmış ve çelik donatının taşıdığı yükün oranı artmaya başlamıştır. Deneyin son aşamasındaysa uygulanan yük yaklaşık olarak 20 kN civarındayken çelik donatı akma gerilmesine ulaşmıştır. Şekil 2.15'de görüldüğü üzere simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyum içindedir. Şekilde görülen yükün ani düşüşleri yeni çatlakların oluşma anlarını göstermektedir. Bu düşüşlerin de deneysel verilerle uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu doğrulama OLM'nin betonarme modellemesinde de hem kuvvet-yer değiştirme eğrisini hem de çatlakların oluşumunu, ilerlemesini ve dağılımını tahmin etmekte kullanılabilecek önemli bir araç olduğunu göstermektedir.



(a) Deney Geometrisi



(b) Hesaplanan çatlak gerinimleri



(c) Kuvvet-uzama Sonucu

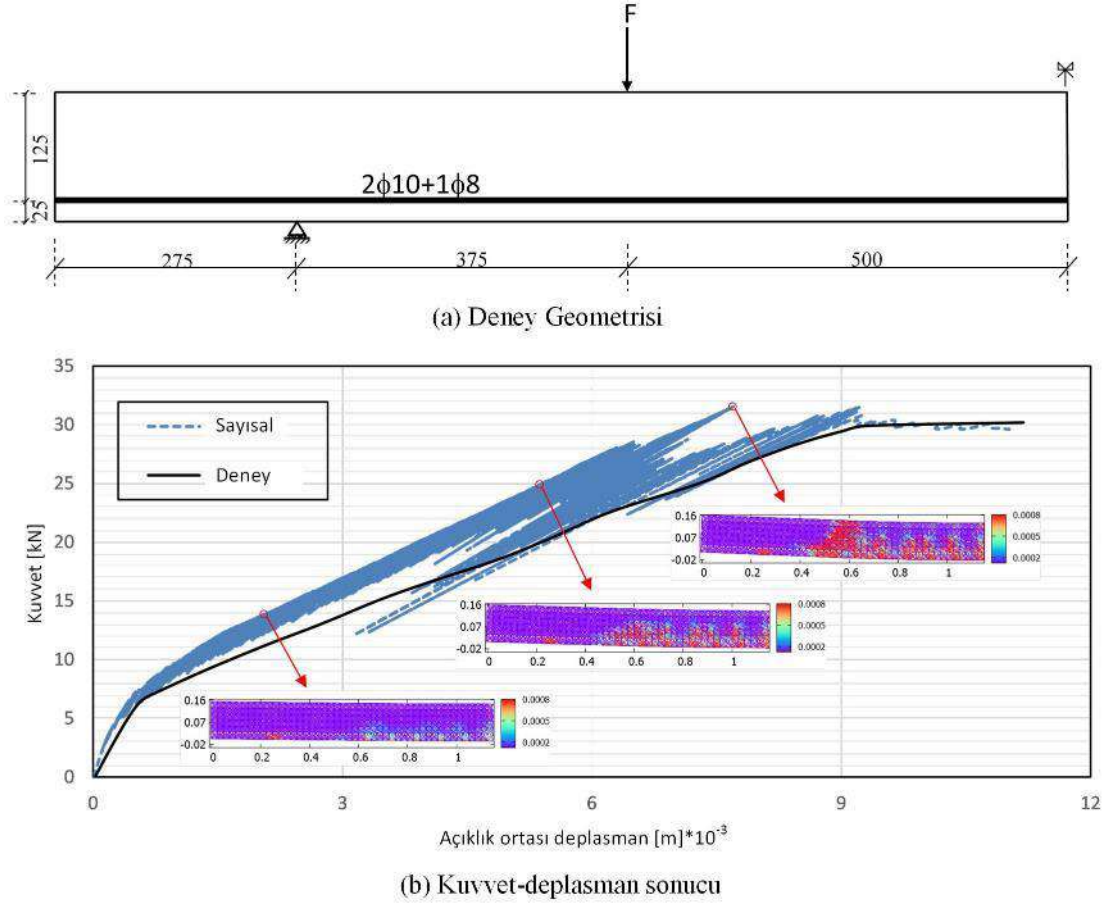
Şekil 2.15 a) Deney geometrisi, b) Sayısal çatlak gerinimleri, c) Kuvvet-uzama eğrilerinin mukayesesi.

2.8 Örtüşen Kafes Modelinin Betonarme Eleman Testleriyle Doğrulaması

2.8.1 Betonarme Kiriş Deneyi

Doğrulama testi olarak Walraven (1978) tarafından gerçekleştirilmiş olan betonarme kiriş deneyi seçilmiştir. Düğüm noktaları arasındaki en kısa mesafe $d=25$ mm olarak alınmış ve OLM ufku olarak $3.01d$ kullanılmıştır. Kiriş kalınlığı, E , f_{cr} , and G_f değerleri sırasıyla 200 mm, 25.0 GPa, 2.5 MPa ve 0.06 kN/m olarak alınmıştır (Walraven 1978). Kirişin yüksekliği 150 mm, uzunluğuyse 2300 mm olarak rapor edilmiştir. Donatı olarak $2\phi 10 + 1\phi 8$ mm kullanılmıştır. Donatının elastisite modülü ve akma gerilmesi 210 GPa and 440 MPa olarak alınmıştır. Simetriden dolayı kirişin yarısı modellenmiştir. Simetri durumundan dolayı kirişin sağ ucundaki düğüm noktalarının yatay yönde yer değiştirmesine izin verilmemiştir (Şekil 2.16). Gijbers ve Hehemann (1977) tarafından rapor edilmiş elastisite modülü ve çatlak enerjisi Walraven (1978) tarafından verilmiş değerlerle çok yakın olduğundan aynı OLM parametreleri kullanılmıştır (Tablo 2.1). Çelik-beton düğüm noktaları arasında kullanılan kafes elemanları bir önceki doğrulama testinde anlatıldığı şekilde modellenmiştir. Deneysel veriler ve OLM simülasyonları Şekil 2.16'da mukayese edilmiştir. OLM ilk çatlak yükünü oldukça hassas bir şekilde tahmin edebilmektedir. Bundan sonra çatlaklı rijitlik değeri kirişin orta noktasındaki yer değiştirme 5 mm değerine gelene kadar biraz daha fazla tahmin edilmektedir. Bu noktadan

sonra sonuçlar oldukça yakın bir şekilde seyretmektedir. Çatlakların arasındaki mesafelerin yaklaşık olarak 10 cm olduğu görülmektedir. Kirişin nihai kapasitesinin de deney sonuçlarıyla uyum içinde olduğu görülmektedir.

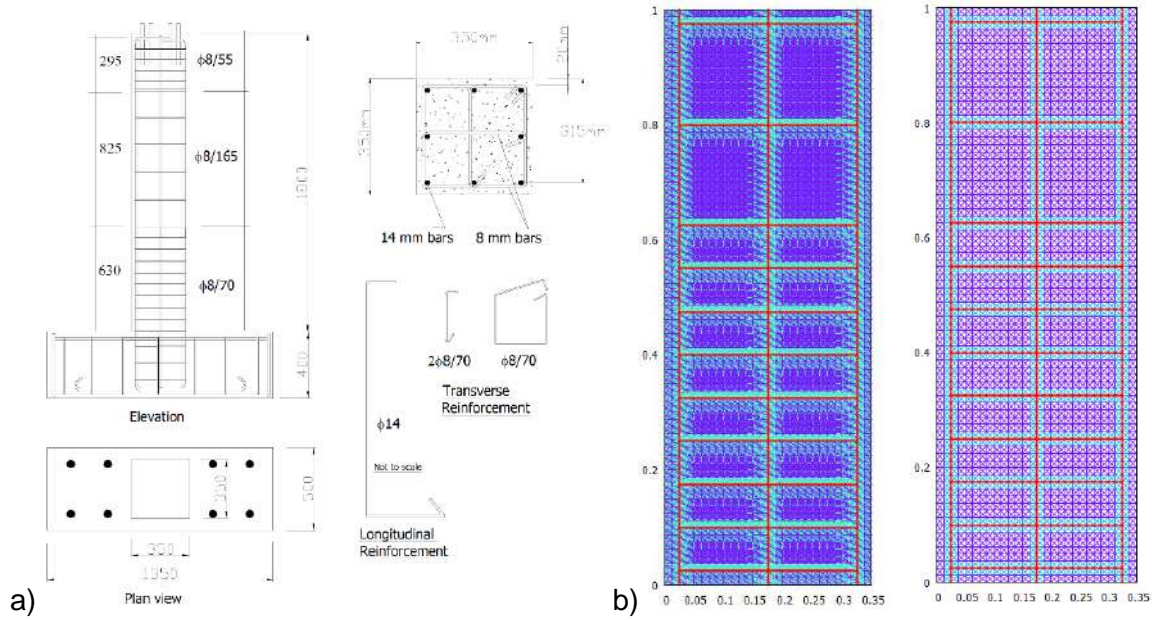


Şekil 2.16 a) Deney geometrisi, b) Kuvvet-orta nokta deplasman eğrilerinin mukayesesi.

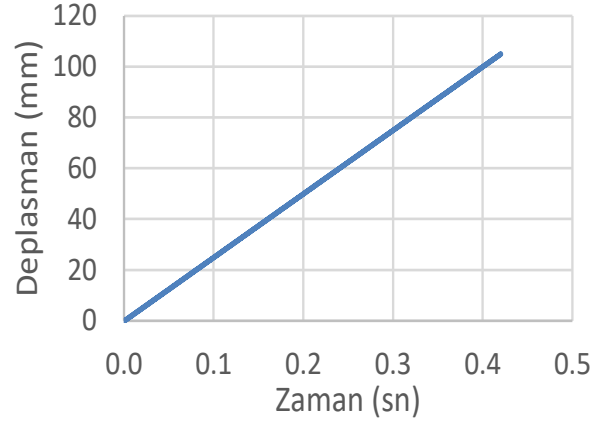
2.8.2 Betonarme Kiriş Deneyi

İlk olarak Acun (2010) tarafından yapılan betonarme kolon testinin OLM analizi sunulmuştur. Deneysel çalışmada sabit eksenel yük altında olan kolona çevrimlyanal yer değiştirme uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Kullanılan betonun basınç dayanımı ve çeliğin akma dayanımı sırasıyla 25.9 MPa ve 454 MPa olarak rapor edilmiştir. Elastisite modülü ve çekme dayanımı verilmediği için bu değerler sırasıyla ACI ve TS500 kodları yardımıyla 1.78 MPa ve 23.92 GPa olarak bulunmuştur. Değişik çözünürlüklerde OLM düğüm noktaları ve OLM ufku için gerekli dosyalar hazırlanmıştır. Deney düzeneğinin altı sabit mesnet olarak modellenmiştir. Kolona 632 kN sabit eksenel basınç kuvveti uygulanmıştır. Bu kuvvet kolonun üstündeki düğüm noktalarına dağıtılmıştır. Yatay kuvvet ise kolonun solunda yukarıdan 400 mm uzunluğundaki bölüme eşit olarak dağıtılmıştır. OLM analiz motorunda kolonun en üst noktasının yatay yer değiştirmesinin sabit hızla değişimi için gerekli olan yatay kuvvetin büyüklüğünün değişim hızı yukarıda verilen PID denklemi tarafından bulunmaktadır.

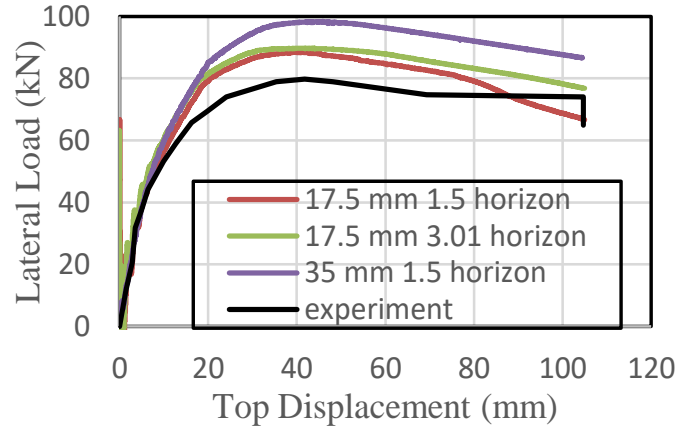
Yatay yer değiştirme hızı 0.25 m/s olarak alınmıştır. Simülasyon sonuçlarında ataletin etkisinin olmadığına emin olmak için simülasyonlar farklı hızlarda tekrarlanmıştır. PID parametreleri $K_p=1.e08$, $K_i=1.0e09$ ve $K_d=1.0e04$ olarak kalibre edilmiştir. PID kontrolü ile elde edilen yatay yer değiştirmenin zamana göre değişimi Şekil 18'de görölmektedir. Bu grafik PID kontrolünün başarılı bir Şekilde çalıştığını göstermektedir. OLM analiz motoru ile elde edilen yatay yer değiştirme eğrileri ve hasar dağılımı (analizin geldiği son nokta) Şekil 2.19 ve Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Yer değiştirmenin rahat bir Şekilde görölebilmesi için 10 faktörü ile büyütölmüştür. Şekilde renk skalası bağ elemanlarındaki birim Şekil değiştirmenin büyüklüğünü göstermektedir. Çözünürlük arttıķça OLM sonuçlarının deneysel verilerle daha iyi örtüştüğü görölmektedir. Yatay kuvvet kapasitesi 10% hata ile tahmin edilmiştir. Bu farkın muhtemelen deney verisinin çevrimli olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Simülasyonlarda eğilmeden dolayı oluşan çatlakların arasındaki ortalama mesafenin deneyde gözlemlendiği gibi yaklaşık 15 cm olduğu görölmektedir. Deneylerde basınç bölgesinde görölen kopmaların OLM simülasyonlarında da meydana geldiği de belirtilmelidir (Şekil 2.20 ve Şekil 2.21).



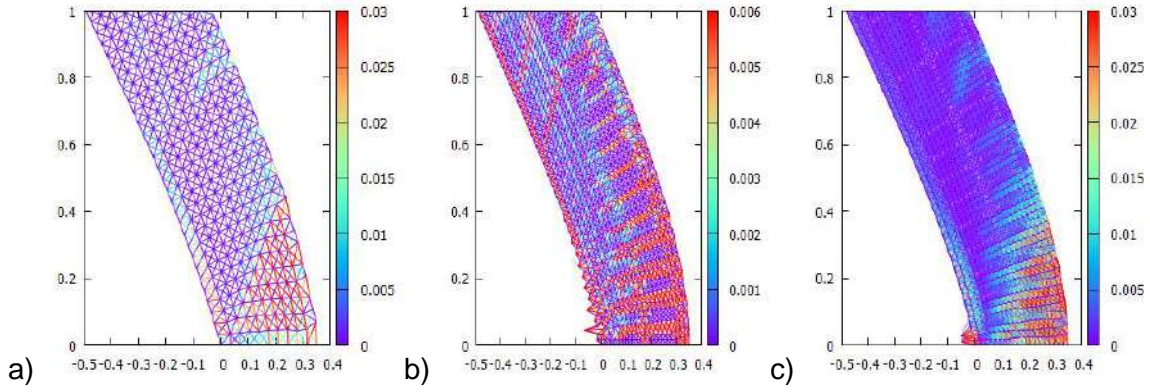
Şekil 2.17 a) Deney düzeneği (Acun 2010), b) OLM modeli.



Şekil 2.18 Yatay deplasman hızı PID kontrolü vasıtasıyla sabit tutulmuştur.



Şekil 2.19 Farklı çözünürlükte OLM simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle mukayesesi.



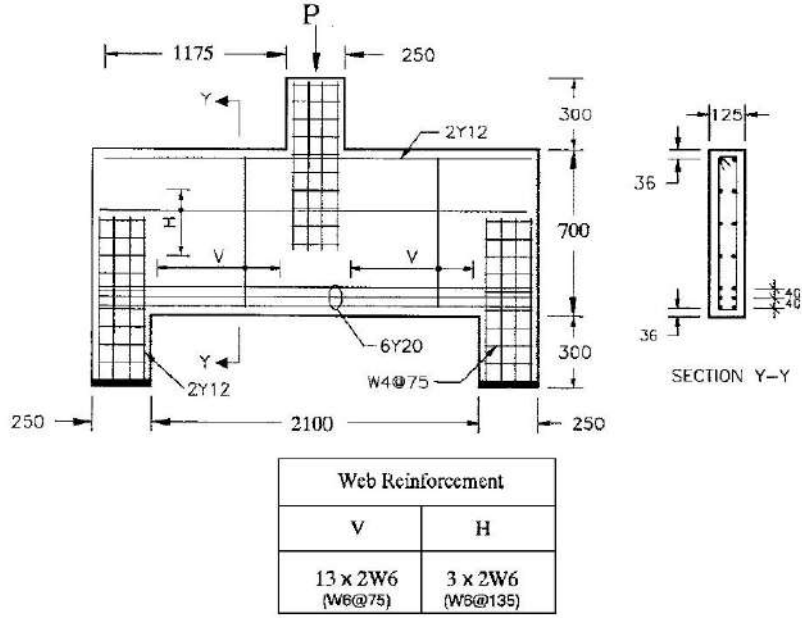
Şekil 2.20 a) d=35 mm, OLM ufku=1.5d, b) d=17.5 mm, OLM ufku=1.5d, c) d=17.5 mm, OLM ufku=3.01d.



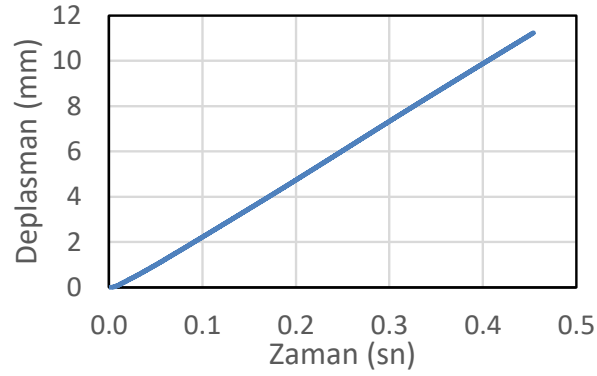
Şekil 2.21 Deneyde gözlemlenen hasar dağılımı (Acun 2010).

2.8.3 Derin Kiriş Deneyi

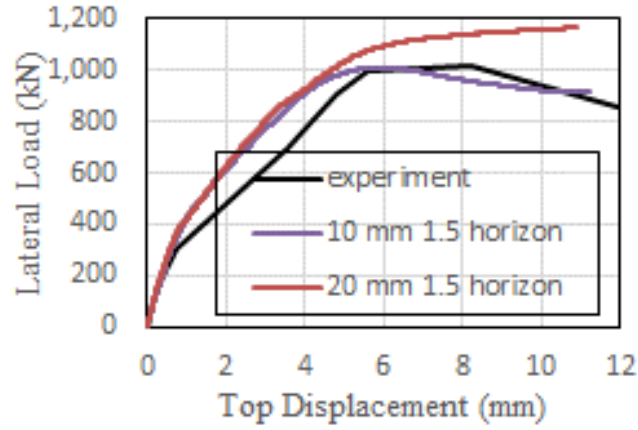
Foster ve Gilbert (1998) tarafından gerçekleştirilen yüksek dayanımlı beton kullanılan derin kiriş testi OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Deney düzeneği Şekil 2.22’de verilmiştir. Kirişin genişliği 125 mm olarak verilmiştir. Betonun elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 47.7 GPa ve 6.20 MPa olarak rapor edilmiştir. Çelik donatının elastisite modülü ve akma dayanımı ise 200 GPa ve 460 MPa olarak verilmiştir. Düşey kuvvet kirişin ortasında bulunan yüksekliğe eşit olarak dağıtılmıştır. Deneyin sol ayağında sabit mesnet kullanılmıştır. Sağ ayağında ise yatay deplasmanlar serbest bırakılmıştır. Düşey yer değiştirme hızı 0.025 m/s olarak seçilmiştir. Bu değer seçilirken atalet etkilerinin olmadığına emin olmak için farklı hızlar için simülasyonlar yapılmıştır. PID kontrolü vasıtasıyla yatay yer değiştirme hızının sabit olarak tutulduğu Şekil 2.23’de gösterilmiştir. PID parametreleri $K_p=1.e08$, $K_i=1.0e09$ ve $K_d=1.0e04$ olarak kalibre edilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 2.24’de verilmiştir. OLM eğrisinin deneysel eğri ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. Hasar dağılımı Şekil 2.25 ve Şekil 2.26’da görülmektedir. Şekilde yer değiştirme 10 faktörü ile büyütülerek daha kolay görülmesi sağlanmıştır. Bir önceki deneyde olduğu gibi renk skalası bağ elemanlarındaki birim şekil değiştirmenin büyüklüğünü göstermektedir. Betonarme problemlerde donatı ve hemen çevresinde bulunan beton arasındaki ara yüzey yüksek hasar almaktadır. Deneysel veri ise sadece kirişin yüzeyindeki hasarı göstermektedir. Bu nedenle OLM tarafından tahmin edilen çatlak dağılımı aslında üçüncü boyut boyunca (kiriş genişliği boyunca) elde edilen ortalama hasarı ifade etmekle olup yüzeysel çatlak dağılımından farklılık göstermektedir. Bu betonarmenin her zaman üç boyutlu olan davranışının iki boyuta indirgenerek yaklaşık olarak modellenmesinin sonucudur.



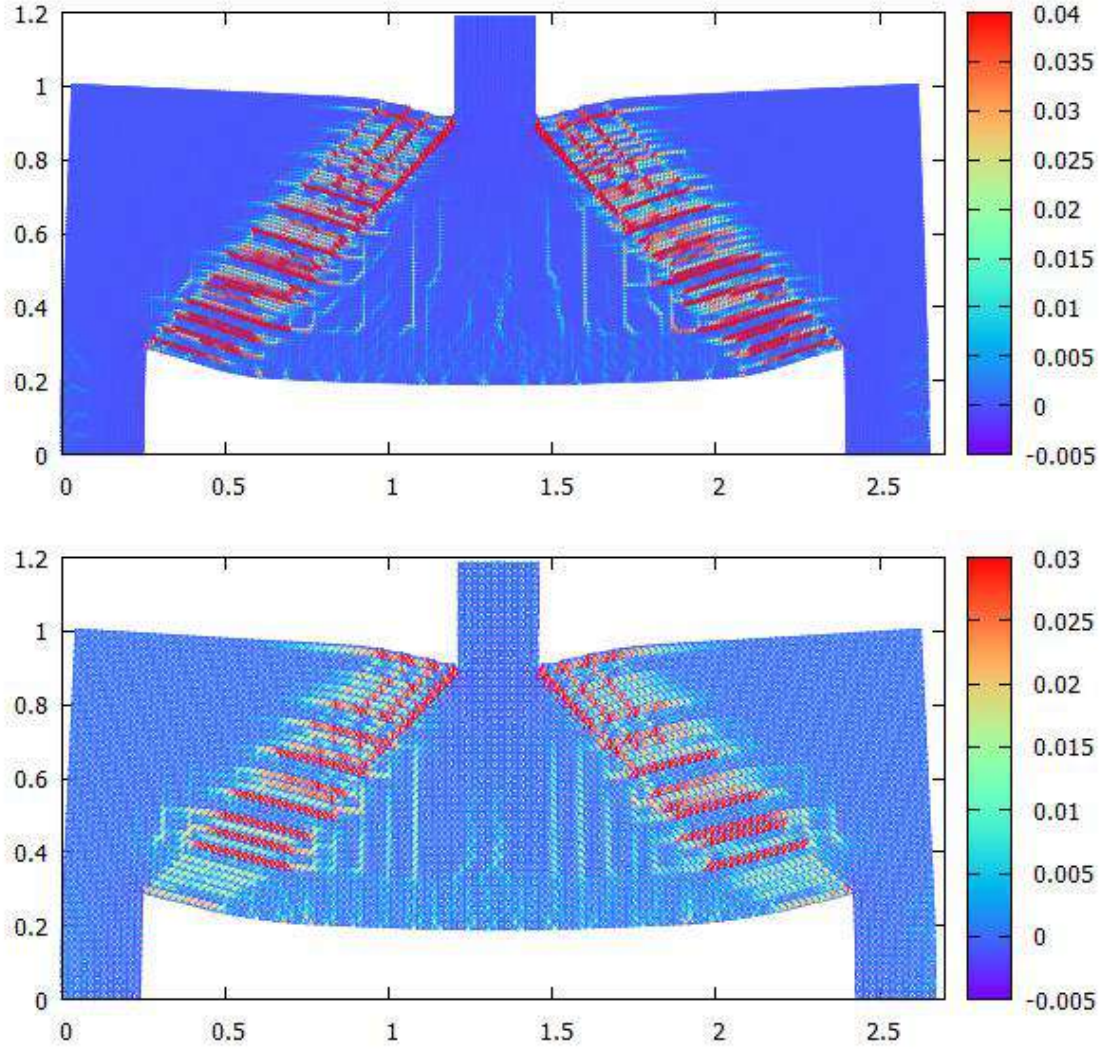
Şekil 2.22 Deney düzeneği (Foster ve Gilbert 1998).



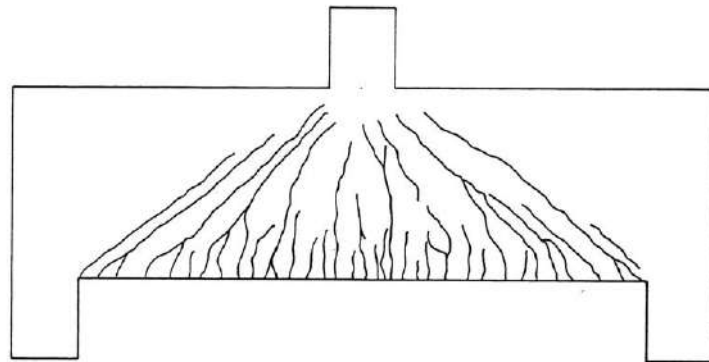
Şekil 2.23 Yatay yer değişim hızı PID kontrolü vasıtasıyla sabit tutulmuştur.



Şekil 2.24 Deneysel (Foster ve Gilbert 1998) ve sayısal kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin mukayesesi.



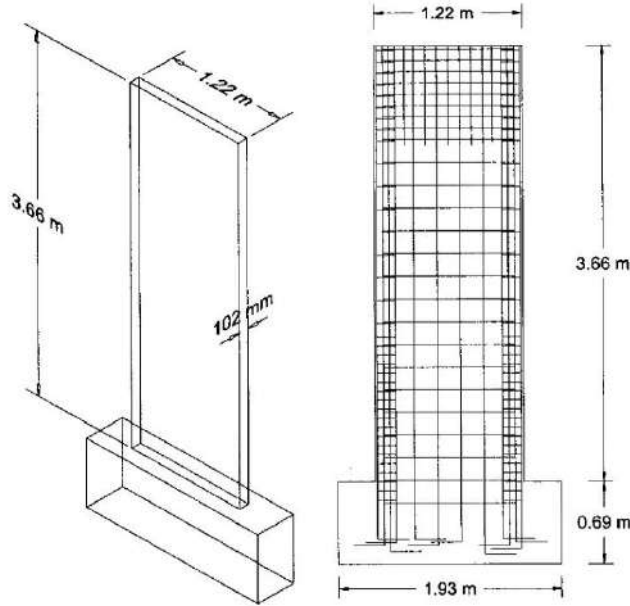
Şekil 2.25 Hasar dağılımı a. $d=10$ mm, b. 20 mm.



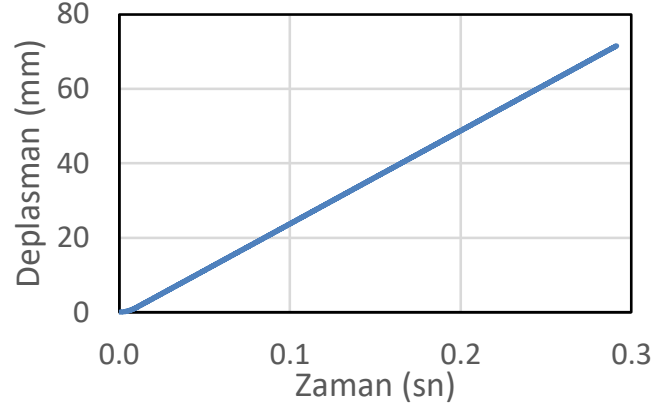
Şekil 2.26 Deneyde gözlemlenen çatlaklar (Foster ve Gilbert 1998).

2.8.4 Betonarme Duvar Deneyi

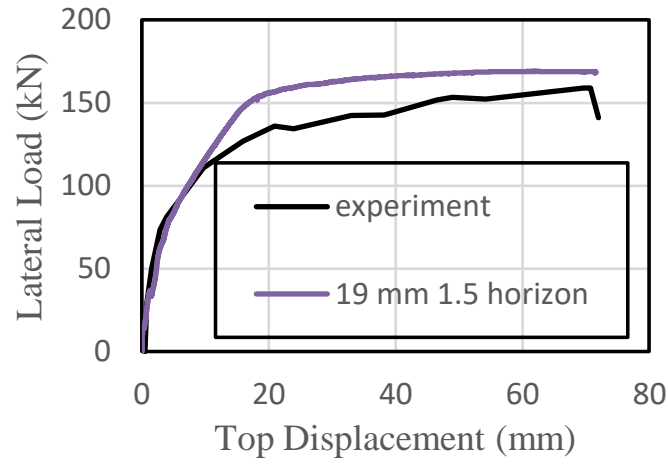
Thomsen ve Wallace (1995) sabit aksenal kuvvet altındaki bir betonarme duvarın çevrimli yanal yer değiştirme altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Deney düzeneğinin detayları Şekil 2.27’de verilmiştir. OLM simülasyonlarında önce aksenal kuvvet (378 kN) en üstte bulunan düğüm noktalarına dağıtılarak uygulanmış daha sonra ise PID kontrolü ile monotonik yer değiştirme uygulanmıştır. Betonun çekme dayanımı 2.03 MPa, elastisite modülü 31.03 GPa, donatının akma dayanımı ise 414 GPa olarak verilmiştir. Ataletin simülasyon sonuçlarına etkisinin olmadığına emin olmak için farklı yatay yer değiştirme hızlarında simülasyonlar yapılmış ve yatay yer değiştirme hızı 0.25 m/s olarak seçilmiştir. PID parametreleri $K_p=1.0e08$, $K_i=1.0e09$ ve $K_d=1.0e04$ olarak kalibre edilmiştir. Şekil 2.28’de PID kontrolünün yatay yer değiştirme hızını sabit tutmayı başardığı görülmektedir. Şekil 2.29’da kuvvet–yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. OLM sonuçlarının deneysel kuvvet–yer değiştirme eğrilerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Simülasyon sonunda elde edilen hasar dağılımı ise Şekil 2.30’da verilmiştir. Daha önceki hasar dağılımı şekillerinde olduğu gibi yer değiştirmeler 10 faktörü ile büyütülmüştür. Renk birim şekil değiştirmenin büyüklüğünü göstermektedir.



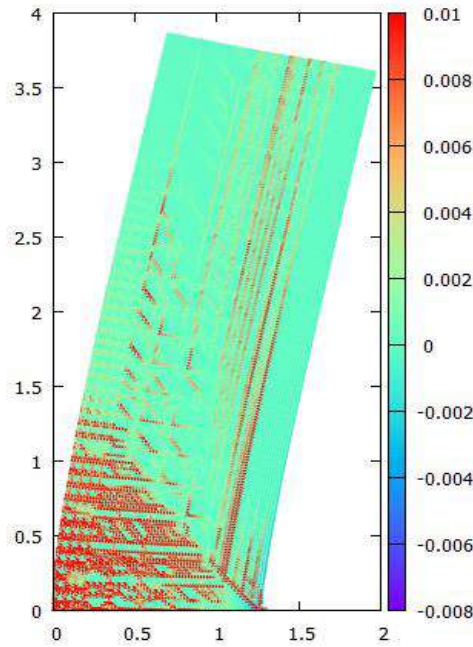
Şekil 2.27 Deney Düzeneği (Thomsen ve Wallace 1995)



Şekil 2.28 Yatay deplasman hızı PID kontrolü vasıtasıyla sabit tutulmuştur.



Şekil 2.29 Deneysel (Thomsen ve Wallace 1995) ve sayısal kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin mukayesesi.



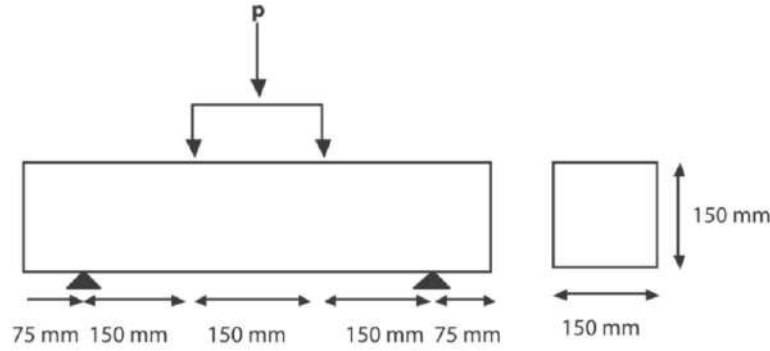
Şekil 2.30 Hasar dağılımı.

2.9 Lifli Beton için OLM Parametrelerinin Elde Edilmesi

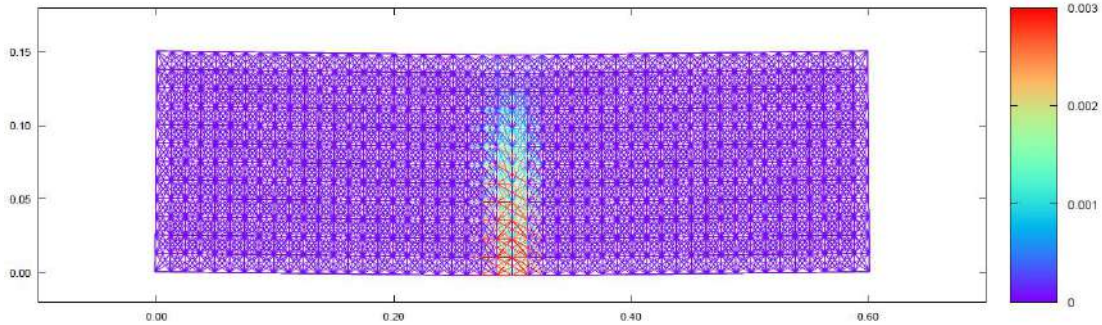
Lifli beton deney verileri kullanılarak lifli beton için OLM davranış parametreleri elde edilmiştir. Aşağıda OLM parametrelerin elde ediliş aşamaları anlatılmaktadır. Çekme altında gevrek bir davranış sergileyen betonun sünekliliğini artırılması için çelik ve sentetik liflerin kullanılması tercih edilen yöntemlerden biridir. Lifli beton tünel yapılarında püskürtme beton uygulamalarında ve kaplama güçlendirme uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

2.9.1 Çelik Lif ile Güçlendirilmiş Kiriş Deneyleri ve Modeli

Bu projede çelik lifle güçlendirilmiş iç basınçlı tünel kaplamalarının performans değerlendirilmesi, kaplama tasarımı için en uygun lifli beton karışım oranlarının elde edilmesi ve OLM parametrelerinin kalibrasyonu amacıyla basit kiriş deney sonuçları kullanılmıştır. Kullanılan deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında Sengun ve diğerleri (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada 150 mm x 150 mm x 600 mm boyutlarındaki numuneler ile dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır (Şekil 2.31). Deneylerde kullanılan beton basınç mukavemet değerleri 40-45 MPa aralığında rapor edilmiştir. Lifli betonun elastisite modülü 37 GPa olarak ölçülmüştür. Deneylerde elastisite modülü 210 GPa olan iki farklı uzunlukta 30 mm (0.55 mm kalınlığa sahip) ve 60 mm (0.75 mm kalınlığa sahip) lifler kullanılmıştır. Bu lif dozajları 30, 60 ve 90 kg/m³ alınarak dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneylerin sonunda 25 mm büyüklüğündeki kiriş sehimine karşılık hesaplanan enerji değerleri Tablo 2.3'de verilmiştir.



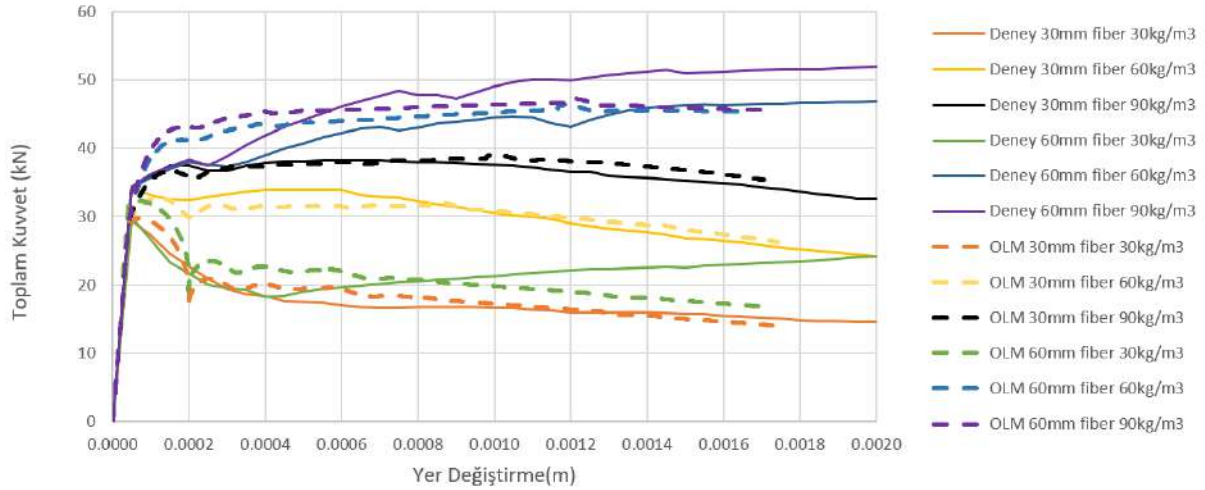
Şekil 2.31 Dört noktalı eğilme deney düzeneği.



Şekil 2.32 OLM Modeli ile dört noktalı eğilme deneyi sonucu (30 mm uzunluğunda fiber, 30 kg/m³)

Eğilme deneyleri OLM analiz motoru ile 12.5 mm örgü, 637 düğüm noktası ve 7820 eleman olacak şekilde 3d ufuk kullanılarak modellenmiştir. OLM analiz motorunda kirişin orta noktasının düşey yer değiştirmesinin sabit hızla değişimi için gerekli olan düşey kuvvetin büyüklüğünün değişim hızı PID kontrol denklemi kullanılarak bulunmuştur. Simülasyonlar farklı hızlarda tekrarlanmış ve sonuçların hızdan bağımsız olmasına dikkat edilmiştir. Düşey yer değiştirme hızı 0.001 m/s olarak alınmıştır. PID parametreleri $K_p=1.e09$, $K_i=1.0e07$ ve $K_d=1.0e04$ olarak kalibre edilmiştir. 30 mm uzunluğunda fiber, 30 kg/m³ lif dozajı ile elde edilen örnek bir OLM simülasyon sonucu Şekil 2.32'de verilmiştir.

OLM toplam kuvvet-yer değiştirme eğrileri farklı uzunluk ve dozaj için deneysel sonuçlar ile Şekil 2.33'de karşılaştırılmıştır. OLM eğrilerinin deneysel eğriler ile oldukça yakın olduğu görülmektedir. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreler ve bu parametrelere karşılık gelen GF çatlak enerjisi değerleri Tablo 2.3'de verilmiştir. 60 mm uzunluğundaki liflerin kullanıldığı deneysel sonuçlarda tutarsızlık olduğu görülmüştür (60 kg/m³ ve 90 kg/m³ sonuçları neredeyse aynı çıkmıştır).



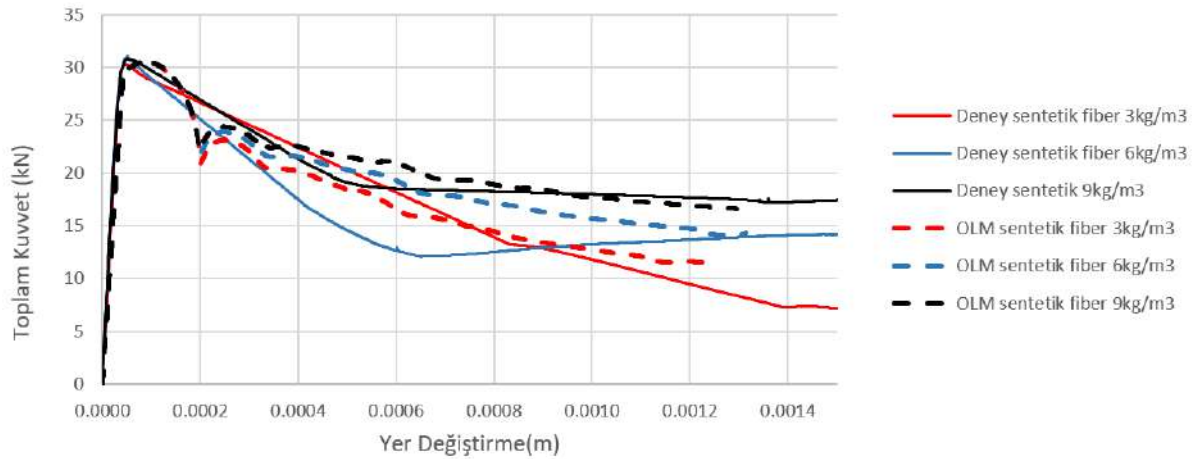
Şekil 2.33 Çelik lifli beton için deneysel ve OLM sonuçlarının mukayesesi.

Tablo 2.3 Çelik lifli beton için OLM davranış parametreleri ve çatlak enerjisi değerleri.

Lif uzunluğu	Dozaj	25mm sehime karşılık enerji (N.m)	ϵ_{cr}	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	GF çatlak enerjisi (N/m)
30 mm	30 kg/m ³	116462	0.0001	1	1500	5000	0.15	0.1	1300
30 mm	60 kg/m ³	201911	0.0001	1	2000	5000	0.25	0.2	2635
30 mm	90 kg/m ³	274158	0.0001	1	3000	5000	0.3	0.25	3630
60 mm	30 kg/m ³	496032	0.0001	1	2000	7000	0.13	0.5	5990
60 mm	60 kg/m ³	682444	0.0001	1	5000	15000	0.35	0.3	10570
60 mm	90 kg/m ³	651541	0.0001	1	5000	15000	0.37	0.27	9971

2.9.2 Sentetik Lif ile Güçlendirilmiş Kiriş Deneyleri ve Modeli

İç basınçlı tünel kaplamasında çelik liflerin kullanımının yol açabileceği korozyon probleminden dolayı makro sentetik lif kullanılmasına karar verilmiştir. Makro sentetik lifli beton davranışının incelemesi ve OLM parametrelerinin kalibrasyonu amacıyla basit kiriş deney sonuçları kullanılmıştır. Kullanılan deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında Sengun ve diğerleri (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan beton basınç mukavemet değerleri 40-45 MPa aralığında rapor edilmiştir. Lifli betonun elastisite modülü 37 GPa olacak ölçülmüştür. Deneylerde elastisite modülü 550 - 750 MPa aralığında, 54 mm uzunluğunda ve 0,677 mm çapında forta-ferro sentetik lif kullanılmıştır. Bu lif proje kapsamında gerçekleştirilen iç basınçlı tünel deneylerinde kullanılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreler ve bu parametrelere karşılık gelen çatlak enerjisi değerleri Tablo 2.4'de verilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçların mukayesesi Şekil 2.34'de verilmiştir.



Şekil 2.34 Sentetik lifli beton için deneysel ve OLM sonuçlarının mukayesesi.

Tablo 2.4 Sentetik lifli beton için OLM davranış parametreleri ve çatlak enerjisi değerleri.

Dozaj	25mm sehime karşılık enerji (N.m)	ϵ_{cr}	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	GF çatlak enerjisi (N/m)
3kg/m ³	84402	0.0001	1	1000	10000	0.2	0.1	1184
6kg/m ³	121392	0.0001	1	1000	10000	0.2	0.1	1691
9kg/m ³	203878	0.0001	1	1000	12000	0.2	0.1	2367

2.10 Yayılı Çatlak Modelleri İçin Ginzburg-Landau ve Cahn-Hillard Faz Ayrımı Modelleriyle Çatlak Açıklıklarının Tahmini

1960'lı yıllardan başlayarak, betonda çatlakların oluşmasının ve ilerlemesinin sayısal olarak incelenmesi için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Rashid (1968) tarafından önerilen malzeme rijitlik matrisinin (yani yayılı çatlak yaklaşımı) değiştirilmesi öncü çalışmalardan biri olarak değerlendirilebilir. Hillerborg ve diğerleri (1976) ve Bažant ve Oh'un (1983) çalışmalarında geliştirilen gerilme-birim şekil değiştirme modelleri, karakteristik bir uzunluk ölçeği ve çatlak enerjisi tanımının yardımıyla, sayısal modellerde rastlanılan düğüm noktalarının dağılımına bağlı sonuçların azaltılmasına yol açmıştır (Rots 1988, TNO Diana 2008, Palermo ve Vecchio 2003). Çatlak oluşumunu tahmin etmek için geliştirilen iki tür yayılı çatlak modeli bulunmaktadır. Bunlardan ilki dönebilen çatlak yöntemi (Rots 1988, Vecchio ve Collins 1986), diğeryse sabit çatlak yönü yöntemidir (William ve diğerleri 1987). Süreklilik esasına bağlı kalınarak geliştirilen sonlu elemanlar yönteminin temel dezavantajı, gerçek çatlak açıklıkları yerine bir ölçme uzunluğu boyunca ortalama gerinimlerle çalıştırılarak çatlağın gerçekçi bir şekilde modelde temsil edilememesidir. Diğer bir deyişle yayılı çatlak yaklaşımları kuvvet-deplasman eğrilerini tahmin etmekte başarılı olmakla beraber çatlak açıklıklarını tahminde aynı derecede başarılı olamamaktadır. Bunun temel nedeni bünye denklemlerinin büyük ölçekli davranışı modellemek için kalibre edilmesi ve sonlu eleman enterpolasyon fonksiyonlarının devamsızlıkları ifade etmekteki yetersizliğidir. OLM sonlu elemanlar metoduna göre çatlak açıklıklarını göstermekte daha başarılı olsa da simülasyonlarda elde edilen çatlakların gerçekte gözlemlenen çatlaklardan daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Aşağıda verilen formülasyon ile simülasyonlarda elde edilen yayılı çatlak bölgesinin daha gerçekçi bir çatlak bölgesine dönüştürmeyi sağlayacağı öngörülmektedir.

Yayılı çatlaklarda bulunan boşluk ayrı bir faz olarak kabul edilirse bu fazın katı fazdan ayrışması bir faz ayrımı problemi olarak nitelendirilebilir. Ginzburg-Landau ve Cahn-Hillard faz ayrımı problemlerine yaygın olarak uygulanmış iki yaklaşımdır (Kim ve diğerleri 2016, Zhou ve Wang 2007, Lee ve diğerleri 2014). İki yaklaşımın çıkış noktaları ve genelleştirilmiş halleri Gurtin (1994) tarafından özetlenmiştir. Ginzburg-Landau ve Cahn-Hillard faz ayrımı fomülasyonları aşağıdaki gibi yayılı çatlak problemine uygulanabilir.

2.10.1 Ginzburg-Landau Yaklaşımı

Ginzburg-Landau denklemi aşağıdaki serbest enerji formundan elde edilmektedir

$$e = f(\phi) + \frac{1}{2}(\nabla\phi \cdot \alpha\nabla\phi) \quad (2.4)$$

Bu ϕ konsantrasyon/yoğunluk/hacimsel oran denklemde f iki minimuma sahip bir fonksiyon ve α ikinci derece bir tensördür. Mevcut formülasyonda, ϕ çatlaklarda bulunan boşluk hacmi/toplam hacim (ε_{cr}) olarak alınacaktır. Bu değer in sıfır olması çatlaksız ortamı, belirli bir

değerden yüksek olmasıysa yüksek çatlak açıklıklı ortamı ifade etmektedir. Örnek bir serbest enerji fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$f = \tilde{f} \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_x} \right)^2 \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_x} - 1 \right)^2 \quad (2.8)$$

Bu denklemin iki minimumu 0 ve ϵ_x değerleridir, \tilde{f} ise fonksiyonun büyüklüğünü belirlemek için kullanılmaktadır (Şekil 2.35). Yayılı çatlak modellerinde ϵ_{cr} dağılımı gerçek çatlaklara dik yönde difüzyon ettiği bilinmektedir. Formülasyonun amacı terz difüzyon sağlayarak çatlaklı bölgeleri çatlaksız bölgelerden ayırmaktır. Bu süreç faz ayrımı süreci olarak da nitelendirilebilir. İkinci derece bir tensör olan α çatlakların bir araya geleceği yönü belirlemektedir. Yayılı çatlak modellerinde çatlaklar çatlak yönüne dik yönde difüzyon ettiği için bu tensör iki boyutlu problemler aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$\alpha = \tilde{\alpha} \epsilon_{cr} (\epsilon_x - \epsilon_{cr}) \begin{bmatrix} \sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Bu denklemden θ çatlak yönü ve x-ekseni arasındaki açı (saatin ters yönünde), $\tilde{\alpha}$ ise problem boyutlarına bağlı pozitif bir parametredir. Üç boyutlu problemler için ise çatlakla dik birim vektör kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılır

$$\alpha = \tilde{\alpha} \epsilon_{cr} (\epsilon_x - \epsilon_{cr}) \begin{bmatrix} n_x^{cr} n_x^{cr} & n_x^{cr} n_y^{cr} & n_x^{cr} n_z^{cr} \\ n_y^{cr} n_x^{cr} & n_y^{cr} n_y^{cr} & n_y^{cr} n_z^{cr} \\ n_z^{cr} n_x^{cr} & n_z^{cr} n_y^{cr} & n_z^{cr} n_z^{cr} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Burada $n_x^{cr}, n_y^{cr}, n_z^{cr}$ çatlakla dik birim vektörün x, y ve z bileşenleridir. Tensörün ϵ_{cr} dağılımına bağlı olarak ifade edilmesi bu değerlere yaklaşıldığı zaman hızlı bir şekilde dengeye ulaşmasını sağlamaktadır. Serbest enerji denklemindeki ikinci terim ϵ_{cr} fonksiyonunun ara değerlerinde serbest enerjinin artmasına sebep olmaktadır. Birinci terimde ifade edilen fonksiyonun iki adet minimum değeri bulunmaktadır. Minimum enerji prensibine göre ϵ_{cr} bu iki değerden farklı değerler aldığı zaman bunun bir enerji maliyeti olmaktadır. Serbest enerjinin toplamı aşağıdaki gibi yazılabilir

$$E = \int f(\epsilon_{cr}) + \frac{1}{2} (\nabla \epsilon_{cr} \cdot \alpha \nabla \epsilon_{cr}) dV \quad (2.11)$$

Toplam enerji ϵ_{cr} dağılımının bir fonksiyonudur. Bu fonksiyonun en az aldığı değer bulunduğu zaman ara yüzey uzunluklarının en aza indirilmesi ve ϵ_{cr} fonksiyonunun 0 ve ϵ_x değerlerine yoğunlaşması anlamına gelmektedir. Tüm dış sınırlarda $\partial \phi / \partial n = 0$ koşulunun (n dışa doğru birim vektör) sağlanması durumunda bu fonksiyonun birinci varyasyonu aşağıdaki gibi yazılarak minimum enerjiyi verecek ϵ_{cr} dağılımının bulunacağı denklem elde edilir

$$\delta E = \int \left(\frac{df}{d\epsilon_{cr}} - \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr}) \right) \delta \epsilon_{cr} dV = 0 \quad (2.12)$$

Varyasyon kalkülüsüne göre $\delta \epsilon_{cr}$ türevleri tanımlı rastgele bir fonksiyon olduğundan aşağıdaki eşitliğin sağlanması yeterlidir

$$\frac{df}{d\epsilon_{cr}} - \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr}) = 0 \quad (2.13)$$

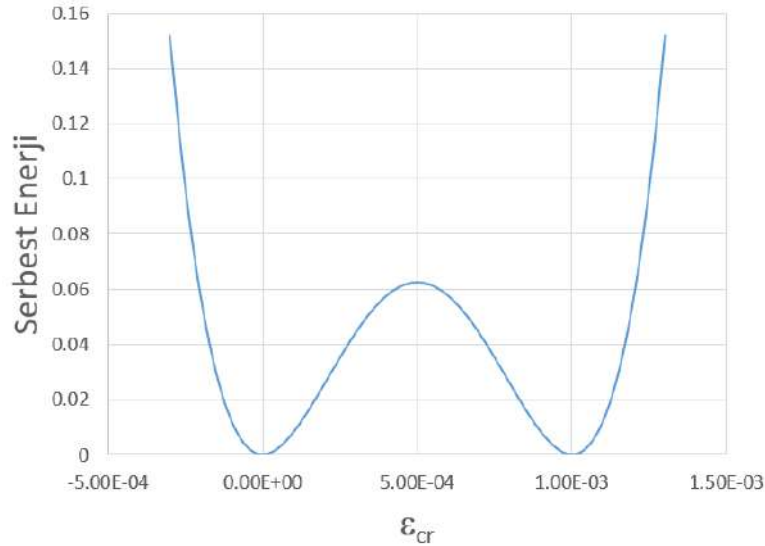
Bu denklem eliptik bir denge denklemi olduğu ve tüm dış sınırlarda $\partial\phi/\partial n = 0$ koşulunun sağlanması arzu edildiği için denkleme sözde zaman ekleyerek doğrusal olmayan parabolik bir denklem haline getirebiliriz. Böylece standart sayısal metotlarla denge konumunun sağlanacağı ϵ_{cr} dağılımı aşağıda verilen denklemin çözümünden bulunabilir

$$\frac{\partial\epsilon_{cr}}{\partial t} = -\frac{df}{d\epsilon_{cr}} + \nabla \cdot (\alpha\nabla\epsilon_{cr}) \quad (2.14)$$

Bu denklem başlangıç koşulu olarak $\epsilon_{cr}(x, y, z, 0)$ dağılımı alınarak çözüldüğü takdirde çatlak yönüne dik yönde yayılmış olan çatlakların ana çatlaklara toplanmasını sağlayacaktır. Doğrusal olmayan anizotrop difüzyon denklemi olarak tanımlanabilecek olan bu denklemin çözümü standart sonlu eleman metodu yardımıyla belirtik entegrasyon kullanarak kolaylıkla elde edilebilir. Denklem 2.14'ün sayısal hesaplama bölgesinde integralini aldığımız zaman toplam çatlak hacminin korunabilmesi için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekmektedir

$$\int \frac{df}{d\epsilon_{cr}} dV = 0 \quad (2.15)$$

Bu eşitliğin yaklaşık olarak (f fonksiyonunun simetrik olarak seçilmesi durumunda) sağlanmasından dolayı Cahn-Hillard yaklaşımına göre oldukça basit Ginzburg-Landau yaklaşımı toplam çatlak hacmini yaklaşık olarak koruyabilmektedir.



Şekil 2.35 İki minimuma sahip serbest enerji fonksiyonu $f = \tilde{f}(\epsilon_{cr}/\epsilon_x)^2(\epsilon_{cr}/\epsilon_x - 1)^2$. Burada ϵ_x ve \tilde{f} değerleri sırasıyla 0.001 ve 1 olarak alınmıştır.

2.10.2 Cahn-Hillard Yaklaşımı

Cahn-Hillard faz ayrımı modelinin başlangıç noktası birincil değişken olan ϕ (bu çalışmada ϵ_{cr}) için korunum denkleminin yazılmasıdır

$$\frac{\partial\epsilon_{cr}}{\partial t} + \nabla \cdot q = 0 \quad (2.16)$$

Bu denklemde q vektörü korunum için gerekli olan ϵ_{cr} akışını ifade etmektedir. Yerel kimyasal potansiyelin (μ) ifadesi Ginzburg-Landau yaklaşımında kullanılan serbest enerji fonksiyonelinin birinci varyasyonu olarak alındığı zaman aşağıdaki denklem elde edilmektedir

$$\mu = \frac{df}{d\epsilon_{cr}} - \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr}) \quad (2.17)$$

Bir önceki denklemde kullanılan q vektörünün itici gücünün yerel kimyasal potansiyelinin gradyanı olduğu kabul edilirse, ikinci derece simetrik bir tensör olan hareketlilik tensörünü kullanarak (M) aşağıdaki denklem yazılabilir

$$q = -M \nabla \mu \quad (2.18)$$

Hareketlilik tensörü daha önce Ginzburg-Landau yaklaşımında kullanılan α tensörü ile büyük benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla aşağıdaki ifade kullanılabilir

$$M = \tilde{M} \alpha \quad (2.19)$$

\tilde{M} sadece pozitif değerler alabilen hareketlilik katsayısıdır. Cahn-Hillard denklemi bu ifadeleri kullandığımız zaman aşağıdaki hali almaktadır

$$\frac{\partial \epsilon_{cr}}{\partial t} = \nabla \cdot \left[M \nabla \left(\frac{df}{d\epsilon_{cr}} - \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr}) \right) \right] \quad (2.20)$$

Bu denklem dördüncü derece kısmi diferansiyel denklemdir. Başlangıç koşulu olarak $\epsilon_{cr}(x, y, 0)$ dağılımı sınır koşulu olarak ise $\partial \phi / \partial n = \partial \mu / \partial n = 0$ kullanılmaktadır (n dışa doğru birim vektör). Doğrusal olmayan anizotrop Cahn-Hillard denklemi aşağıdaki verilen algoritma yardımıyla belirtik entegrasyon kullanılarak çözülebilir:

1. Mevcut $\epsilon_{cr}(x, y, z, t)$ dağılımı kullanılarak $Q = df/d\epsilon_{cr} - \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr})$ sayısal fonksiyonu standart sonlu elemanlar metodu yardımıyla tüm düğüm noktalarında elde edilir. Herhangi bir eleman için aşağıdaki sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılabilir

$$Q_i = \sum_{j=1}^m \left[\int N_i N_j dV \right] (df/d\epsilon_{cr})_j + \sum_{j=1}^m \left[\int \nabla N_i \cdot \alpha \nabla N_j dV \right] \epsilon_{cr}^j \quad (2.21)$$

Burada m elemandaki düğüm noktası sayısını, N_i eleman enterpolasyon fonksiyonunu, ϵ_{cr}^j düğüm noktasında tanımlı ϵ_{cr} fonksiyonunu, $(df/d\epsilon_{cr})_j$ ise $df/d\epsilon_{cr}$ fonksiyonunun düğüm noktasında tanımlı ϵ_{cr}^j değeri kullanılarak elde edilen vektörü etmektedir. Eleman vektörleri toplanarak sistem bazında Q vektörü elde edilir.

2. Bu fonksiyon yardımıyla $T = \nabla \cdot [M \nabla Q]$ sayısal fonksiyonu benzer şekilde tüm düğüm noktalarında elde edilir. Herhangi bir eleman için T vektörü aşağıdaki gibi elde edilebilir

$$T_i = - \sum_{j=1}^m \left[\int \nabla N_i \cdot M \nabla N_j dV \right] Q_j \quad (2.22)$$

Eleman vektörleri toplanarak sistem bazında Q vektörü elde edilir.

3. Düğüm noktalarında $\partial \epsilon_{cr} / \partial t = T$ denklemi belirtik entegrasyon ile çözümlenerek t $\epsilon_{cr}(x, y, z, t + dt)$ elde edilir.

Cahn-Hillard denkleminin homojen $\partial\phi/\partial n = \partial\mu/\partial n = 0$ sınır koşullarıyla ve yukarıda özetlenen sayısal algoritma ile çözülmesi toplam çatlak hacminin korunmasını sağlamaktadır.

2.10.3 Ginzburg-Landau Formulasyonunun Sayısal Çözümleri

Ayrıca yayılı çatlak modelleriyle incelenmesinde çatlakların gerçekten çok daha fazla yayılmasını önlemek amacıyla Ginzburg-Landau formulasyonunun sayısal çözümleri elde edilmeye başlanmış ve ön sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Ginzburg-Landau denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\frac{df}{d\epsilon_{cr}} - \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr}) = 0 \quad (2.23)$$

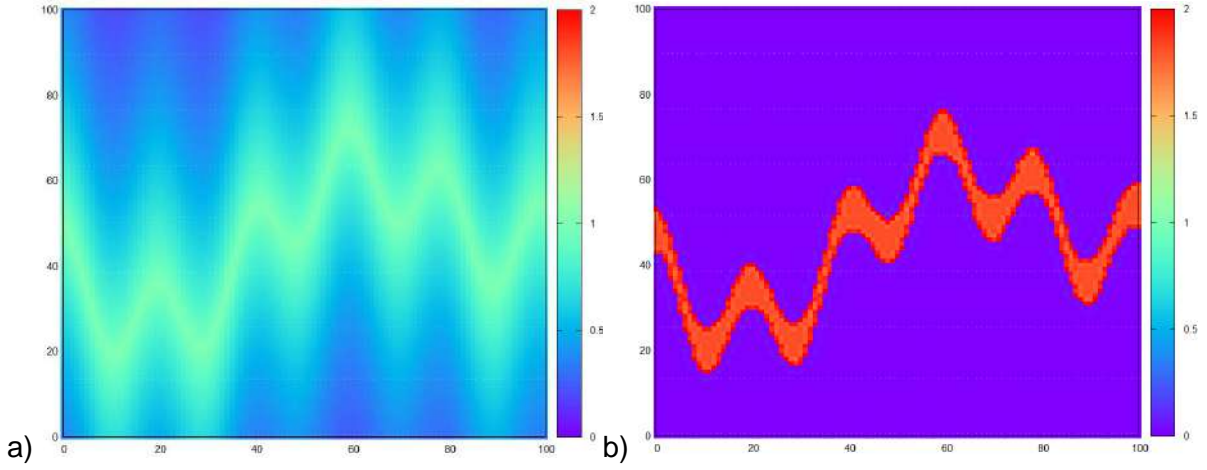
Bu denklem eliptik bir denge denklemi olduğu ve tüm dış sınırlarda $\partial\phi/\partial n = 0$ koşulunun sağlanması arzu edildiği için denkleme sözde zaman ekleyerek doğrusal olmayan parabolik bir denklem haline getirebiliriz. Böylece standart sayısal metotlarla denge konumunun sağlanacağı ϵ_{cr} dağılımı aşağıda verilen denklemin çözümünden bulunabilir

$$\frac{\partial\epsilon_{cr}}{\partial t} = -\frac{df}{d\epsilon_{cr}} + \nabla \cdot (\alpha \nabla \epsilon_{cr}) \quad (2.24)$$

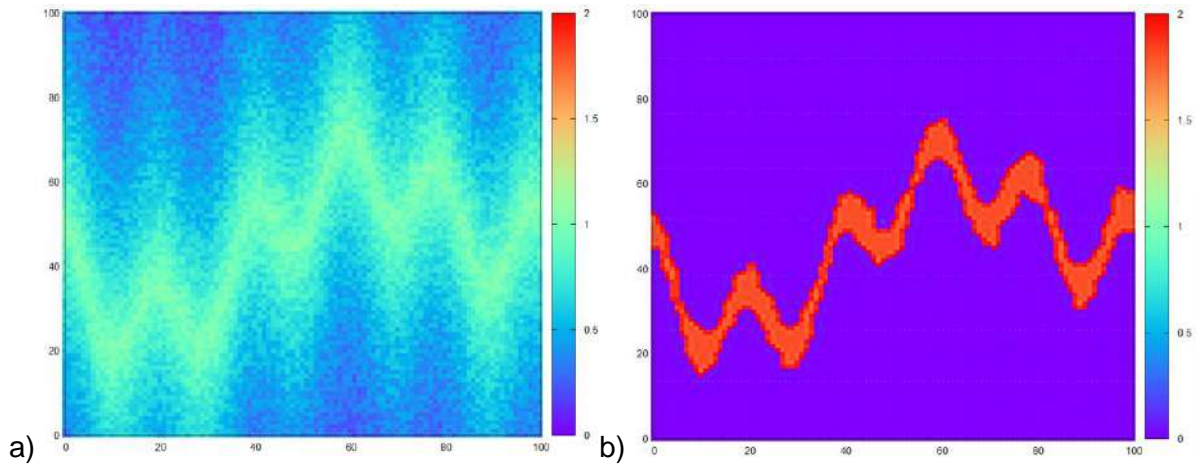
Bu denklem başlangıç koşulu olarak $\epsilon_{cr}(x, y, z, 0)$ dağılımı alınarak çözüldüğü takdirde çatlak yönüne dik yönde yayılmış olan çatlakların ana çatlaklara toplanmasını sağlayacaktır. Doğrusal olmayan anizotrop difüzyon denklemi olarak tanımlanabilecek olan bu denklemin çözümü standart sonlu eleman metodu yardımıyla belirtik entegrasyon kullanarak kolaylıkla elde edilebilir.

Denklem (2.24) bazı test problemlerinde kullanılarak faz ayrımı probleminin temel özellikleri incelenmiştir. İlk problemde 0 ve 2 değerlerinde minimum değere sahip f fonksiyonu, isotropik difüzyon tensörü kullanılmıştır. Şekil 2.36a'da belli belirsiz bir çatlak dağılımı Ginzburg-Landau denklemi yardımıyla Şekil 2.36b'de verilen tek bir çatlak haline getirilmiştir. Çatlak hesaplarında ortaya çıkabilecek gerçekçi durumları test etmek için Şekil 2.36a verilen dağılıma 10% oranında gürültü eklenmiş ve Şekil 2.37a elde edilmiştir. Ginzburg-Landau yaklaşımı etkin bir şekilde yine aynı çatlak bulmuştur. Benzer şekilde gürültü oranı 25% olduğu zaman bile kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 2.38).

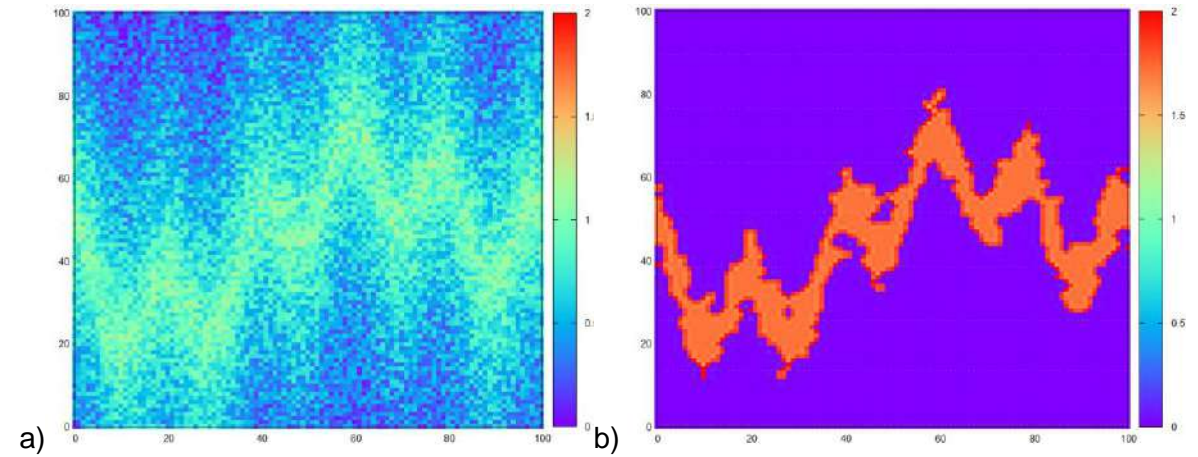
Birden fazla çatlak aynı anda olduğu durumun da incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.39a'da üç çatlak kesişimi gözükmektedir. Ginzburg-Landau yaklaşımı yayılı üç çatlak açıkça gözükür hale getirmiştir (Şekil 2.39). Bu örnek formulasyonun kesişme noktalarında da başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bir önceki örnekte olduğu gibi gürültü oranı 25% olduğu zaman bile kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 2.40).



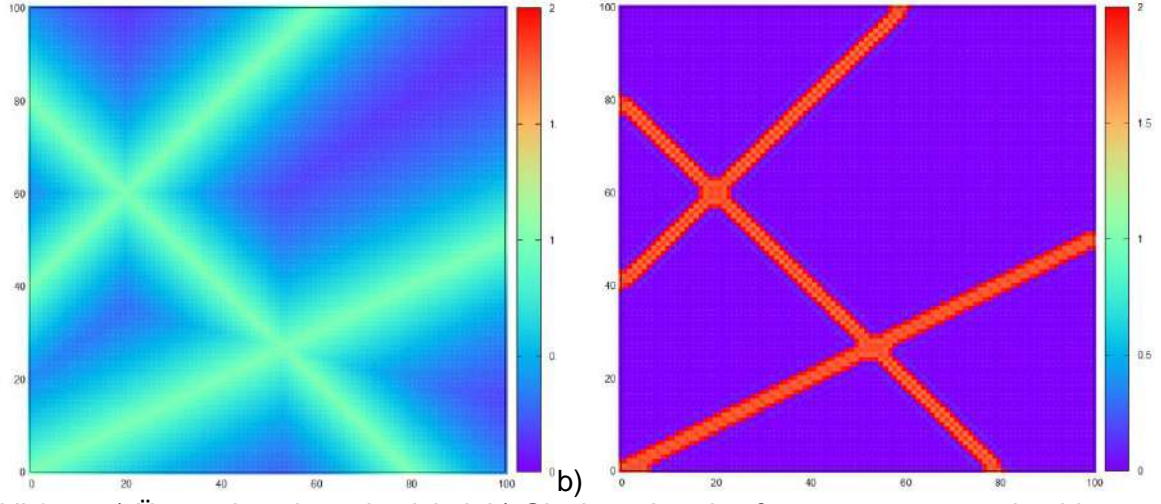
Şekil 2.36 a) Yayıllı çatlak dağılımı, b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak.



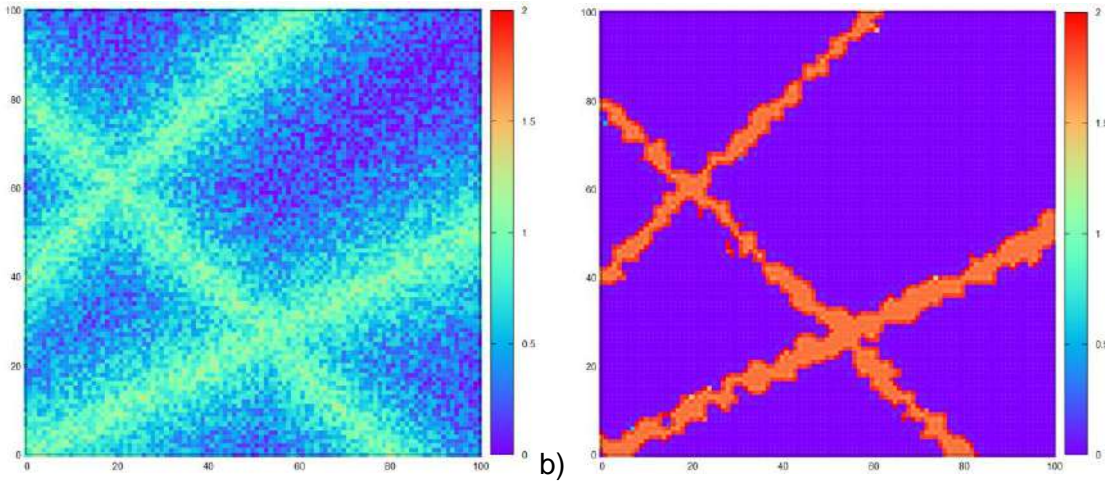
Şekil 2.37 a) Yayıllı çatlak dağılımı (10% gürültü oranı), b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak.



Şekil 2.38 a) Yayıllı çatlak dağılımı (25% gürültü oranı), b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak.



Şekil 2.39 a) Üç yayılı çatlağın kesişimi, b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak dağılımı.



Şekil 2.40 a) Üç yayılı çatlağın kesişimi (25% gürültü), b) Ginzburg-Landay faz ayrımı sonucunda elde edilen çatlak dağılımı.



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Projenin nihai hedefi deney sonuçları kullanılarak kalibre edilmiş sayısal model ile dinamik analizlerin yapılması ve elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların incelenmesi neticesinde iç basınçlı tünellerde kullanılan betonarme kalıplar için tasarım ilkelerinin geliştirilmesidir. Yaptığımız literatür araştırmasında betonarme kaplamalı iç basınçlı tüneller üzerine yapılmış laboratuvar deneyleri bulunamamıştır. Dolayısıyla betonarme kaplamanın çatlama davranışının incelenmesi projenin başarısında önemli bir rol almaktadır. Proje kapsamında 8 deney tamamlanmıştır. Bu deneylerde betonarme ve lifli betonarme tünellerin farklı saha gerilimleri altında davranışı incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen birinci deneyde kaya yerine kullanılan malzemede oluşan çatlakların ilerlemesini durduracak sınır koşulu veya saha gerilimi olmadığı için bu deney düşük saha gerilimleri altında tünel kaplamasının iç basınç altında gösterdiği davranışın incelenmesi olarak tanımlanmıştır. Bu deneyde tüneli sargılayan kaya, tünelin rijitliğine katkı vermeye beraber tünel dışında çatlak olması durumunda iç basınç hızlı bir şekilde sadece betonarme tünel kalıp tarafından taşınmak zorunda kalmaktadır.

Birinci deneyin tamamlanmasından sonra bir sınır davranışı olan kaya etkileşimi olmayan tünel kaplaması davranışının incelenmesinin OLM analiz motorunun kalibrasyonu için faydalı olacağına karar verilmiştir. İkinci deney aslında ülkemizde sıklıkla karşılaşılan tünel dışında yeterli kaya temasının olmadığı (boşluklu) durumu temsil etmektedir. Tünelin sünek davranışa sahip olmamasından dolayı pratikte ihmal edilen milimetre seviyesindeki boşluklar bile çatlakların ilerlemesinde ve dağılımında etkili olmaktadır.

Birinci deney tamamlandıktan sonra yaptığımız inceleme kullanılan kompozit malzemenin yükü rijitlikleri oranında paylaşarak beraber çalıştığını göstermiştir. Bununla beraber kaya yerine kullanılan malzeme saha gerilimlerinin olmaması durumunda oldukça kırılğan bir davranış sergilemektedir. Birinci deneyin tamamlanmasından sonra laboratuvar ortamında saha gerilimlerini oluşturduğu etkiyi yaratabilmek amacıyla öngermeli bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Böylece kaya yerine kullanılan malzeme tünel kaplamasından uzaklaştıkça iki yönlü basınca maruz kalacaktır. Bunun sonucunda kayada oluşacak hasarın tünele yakın bölgede kalacağı öngörülmüştür. Bu tasarım ile ilgili detaylar üçüncü deney ile ilgili bölümde verilmiştir.

Dördüncü deneyde büzüşme veya tünelin delme aşamasında yaşanan olumsuzluklar dolayısıyla tünelin üst ve omuz bölgelerinde kaplama ile kaya katmanları arasında temas sorunu olduğu durum ele alınmıştır. Üçüncü deney de olduğu gibi öngermeli deney düzeneği yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Beşinci deneyde ağır hasar almış tünel kaplaması lifli dokuma ile tamir edilerek, tamir edilmiş tünelin iç basınç altında davranışı incelenmiştir. Deneysel sonuçlar tamiratın oldukça başarılı olduğunu ve tünelin iç basınç kapasitesinin tamirat ile arttırıldığını göstermiştir.

Altıncı deneyde lif katkılı betondan üretilen tünel kaplamasının kaya etkileşimi olmadan iç basınç altında gösterdiği davranış incelenmiştir. Bu deneyde ölçülen iç basınç kapasitesi ikinci deneyde ölçülen kapasiteye oldukça yakın bulunmuştur. Ancak deneysel sonuçlar lif katkılı betonun çatlak kontrolünde çok etkili olduğunu göstermektedir. Çatlaklar normal betonarme kaplamaya göre çok daha sık ancak çatlak açıklıkları kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır.

Yedinci deneyde yüksek saha gerilimleri altında kaya ile kısmi etkileşimli lifli betondan üretilen tünel kaplamasının iç basınç altında gösterdiği davranış incelenmiştir. Deney dördüncü deney ile benzerlik taşımaktadır. Bu iki deney arasında kapasite farkının olmadığı ancak çatlak dağılımının lifli beton kullanımıyla pozitif yönde değiştiği gözlemlenmiştir.

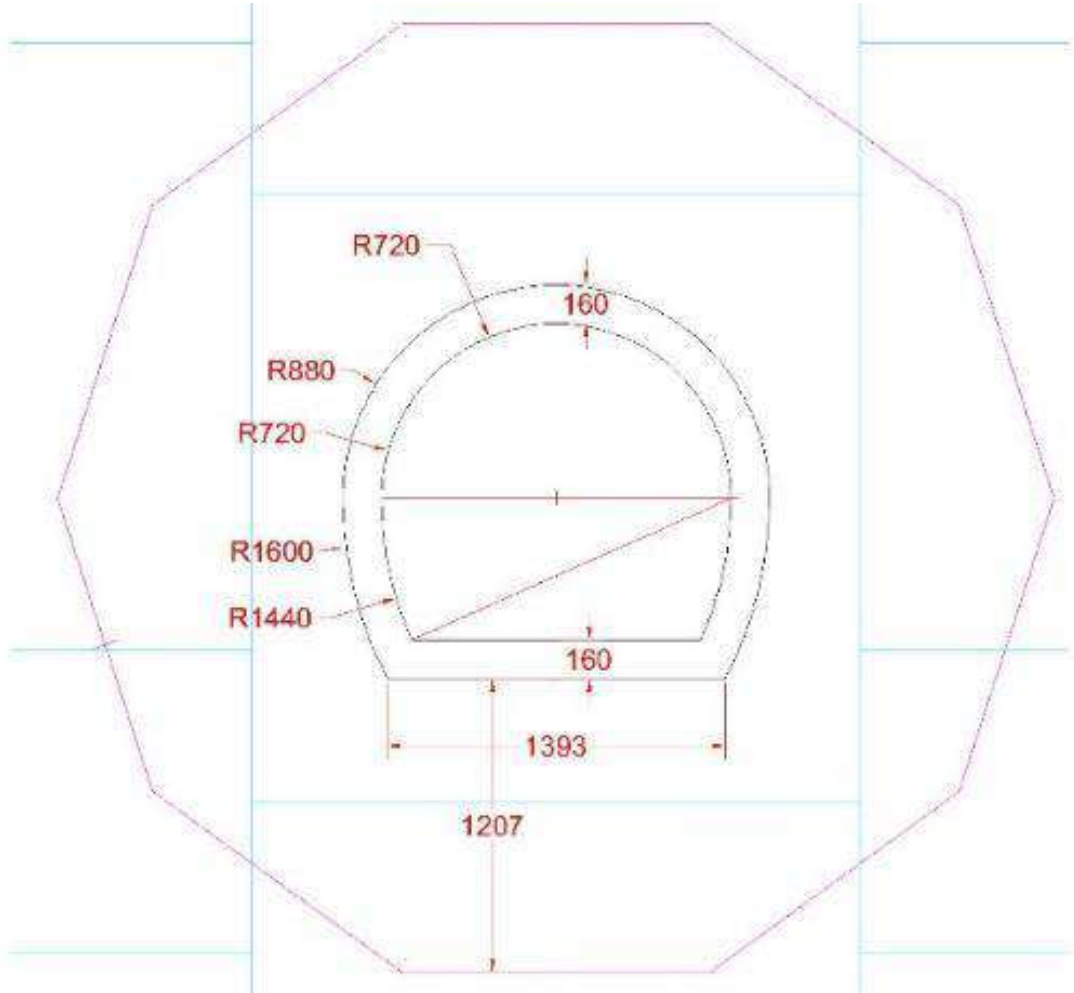
Son deney ise yine yüksek saha gerilimleri altında kaya ile kısmi etkileşimli lifli betondan üretilen tünel kaplamasının iç basınç altında gösterdiği davranış incelenmiştir. Ancak kaya ile etkileşimin tünelin omuz kısmında sağlandığı öngörülmüştür. Yedinci deney ile mukayese edildiğinde kayanın kısmi desteğinin bile tünel davranışında çok önemli bir rol aldığı ve tünelin iç basınç kapasitesini arttırdığı gözlemlenmiştir.

3.2 Deney 1: Düşük Saha Gerilimleri Altında Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

3.2.1 Geometri

Tünel geometrisi olarak ülkemizde tercih edilen ters at nalı tipi seçilmiştir. Boyutlar Topçam (Ordu) Tünelinden aynen alınmış ve projede önerisinde belirtildiği gibi 0.4 oranında ölçeklenmiştir. Deney düzeneğinin iç yarıçapı 72 cm, betonarme kaplama kalınlığı ise 16 cm olarak belirlenmiştir. Deney düzeneği 20 cm yüksekliğinde bir kesit olarak üretilmiştir. Tünel

kaplamasının dışındaki kaya katmanı yaklaşık 1 m kalınlığındadır. Deney geometrisi Şekil 3.1'de verilmiştir.

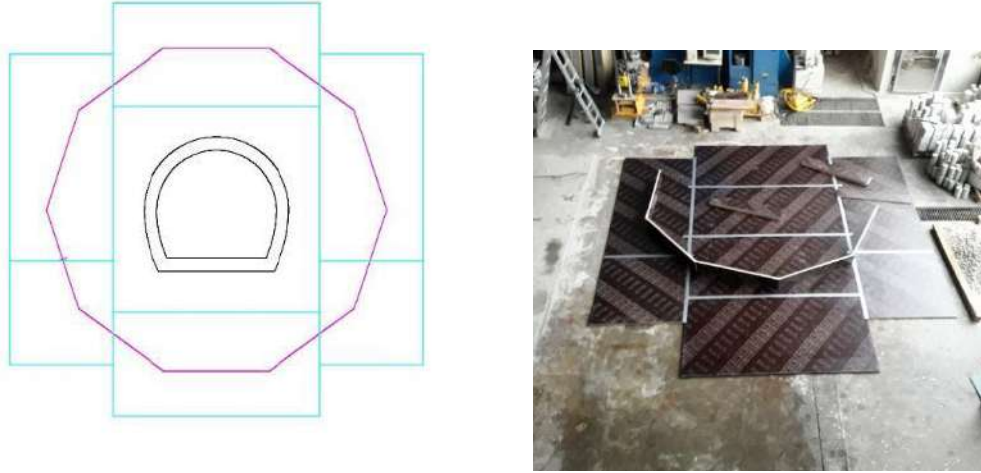


Şekil 3.1 Birinci deneyde kullanılan geometri.

3.2.2 Deney Düzeneğinin İmalatı

Deney yapılacak alanın altı kontrplak ile kaplanmış ve tünelin düz bir yüzeyinde durması sağlanmıştır. Kontrplak tasarımı Şekil 3.2'de sunulmuştur. Test alanının alt kısmında sürtünmeyi asgari seviyeye indirmek amacıyla ince teflon plaka yerleştirilmiştir. Teflonun aşınmaması için teflon plakanın üzeri plastik şilte ile kaplanmıştır.

Kayayı temsil eden kısmın dış sınırı için kontrplak kalıp üretilmiştir. Kalıp geometrisi, her parçası 125 cm uzunluğunda olan düzgün ongen olarak tasarlanmıştır. Parçalar birbirlerine vida ile sabitlendikten sonra ek yerleri yapıştırılmıştır.



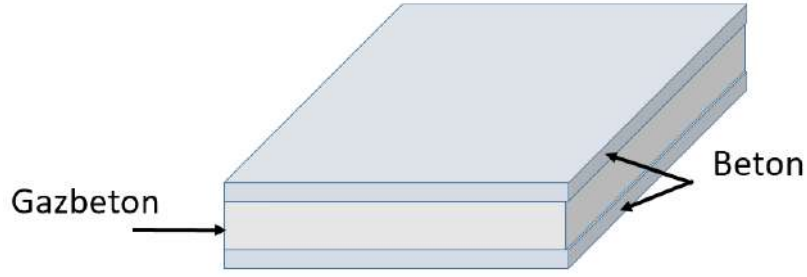
Şekil 3.2 Birinci deney yerleşim planı ve kontrplakların yerleştirilmesi.

Projede kaya özelliklerinin, laboratuvar ortamında elastisite modülü benzer beton ile fiziksel olarak modellenmesi planlanmıştır. Çatlaksız bir kayanın granit, granadiorit, andezit veya dezit gibi kuvvetli olması durumunda elastisite modülü 40-100 GPa değerlerine ulaşabilmektedir. Ancak kayanın çatlaklı olması durumunda (Hoek indeksi GSI=30 ve 50), etkin elastisite modülü 8 GPa değerinin altına düşebilmektedir. Deney elemanı boyutlarına uygun bir kaya kütlelerini laboratuvar ortamına zarar vermeden getirmek mümkün olmadığından kaya kütleleri yerine eşdeğer elastisite modülüne sahip beton kullanılması hedeflenmiştir.

Eşdeğer elastisite modülünün 8 GPa olduğu durum için, kaya kütleleri için kompozit bir tasarım tercih edilmiştir. Bunun için tünel deneyinin 20 cm olan derinliği gösterildiği şekilde tasarlanmıştır. Eşdeğer kayanın efektif elastisite modülü aşağıdaki denklem tarafından hesaplanabilir

$$E = \frac{E_c t_c + E_g t_g}{t} \quad (3.1)$$

Burada t_c , t_g , t , E_c ve E_t sırasıyla beton kalınlığını, araya koyulacak malzemenin kalınlığını, toplam kalınlığını (20 cm), betonun elastisite modülünü ve araya koyulacak malzemenin elastisite modülünü ifade etmektedir. Betonun alt ve üst katman olarak kullanılması (5'er cm kalınlığında, hedeflenen $E_c=14$ GPa) ve araya koyulacak malzemenin gazbeton olarak seçilmesi durumunda (10 cm kalınlığında, $E_g=2.75$ GPa) eşdeğer elastisite modülü 8.37 GPa olarak hesaplanmaktadır (Şekil 3.3). Katmanların beraber çalışması için yatay yönde kuvvet aktarabilecek dik yönde çubuklar yerleştirilmiştir. Deney sonunda yaptığımız inceleme katmanların beraber çalıştığını göstermiştir. Betonun yaklaşık 10 MPa basınç dayanımına sahip olacağı öngörülmüştür. Kullanılan beton reçeteleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

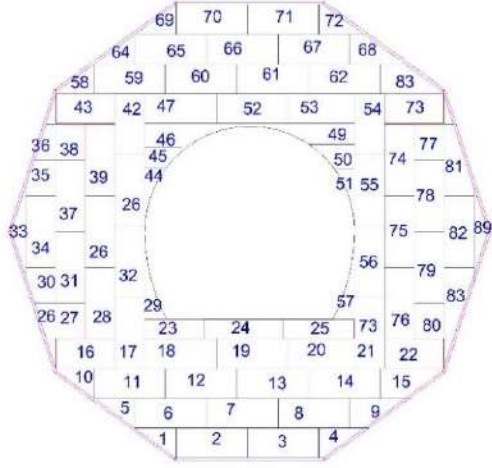


Şekil 3.3 Eşdeğer elastisite modülü 8.37 GPa olması hedeflenen kompozit sistem.

Eşdeğer kaya davranışını elde etmek için kullanılan iki beton katman arasına konulan gazbeton blokların yerleşim planı beton hazırlanmadan önce belirlenmiş, bloklar kesilmiş ve numaralandırılmıştır (Şekil 3.4). Gazbeton blokların yerleştirilmesinde paspaylarına özen gösterilmiştir. Hem blokların yerleşimini ayarlamak hem de üç katmanın beraber çalışmasını sağlayabilmek için (yatay yönde yük aktarımı yapmak üzere) 8 mm x 80 mm boyutlarında vidalar kullanılmıştır. Gazbeton bloklar vidalardan dolayı yerden 5 cm yükseltilmiştir (Şekil 3.4). Üst beton katman ile gazbeton blokların beraber çalışabilmesi için yine 8 mm x 60 mm boyutlarında vidalar kullanılmıştır. Gazbeton bloklar hazırlandıktan sonra alt beton katman (5 cm kalınlığında) dökülmüş ve henüz sertleşmeden gazbeton bloklar beton katmanının üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Daha sonra da üst beton katman dökülmüştür (Şekil 3.6). Üst ve alt beton katmanlar için kullanılan beton karışımlarından 7. gün ve deney gününde kırılmak üzere 6 adet 7.5 cm x 7.5 cm x 32.5 cm boyutlarında dikdörtgen prizma ve 12 adet 15 cm x 30 cm boyutlarında silindir deney numuneleri alınmıştır.

Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan beton reçeteleri.

Beton Bileşeni	Karışım Oranı (kg/m ³)	
	Alt ve Üst Beton Katman	Tünel Kaplama
Çimento CEM II/B-M (P-L) 32.5R	240	420
Su	240	230
Kum (0-3 mm)	1075	775
Agrega (3-12 mm)	760	900
ACE 450 (Süper akışkanlaştırıcı Beton Katkısı)	0	0,75
Hedeflenen E (MPa)	16000	30000
Hedeflenen f_c (MPa)	10	25



Şekil 3.4 Gazbeton tasarımı ve uygulaması.



Şekil 3.5 Alt beton katmanın dökümü ve gazbeton blokların beton katman üzerine yerleştirilmesi.

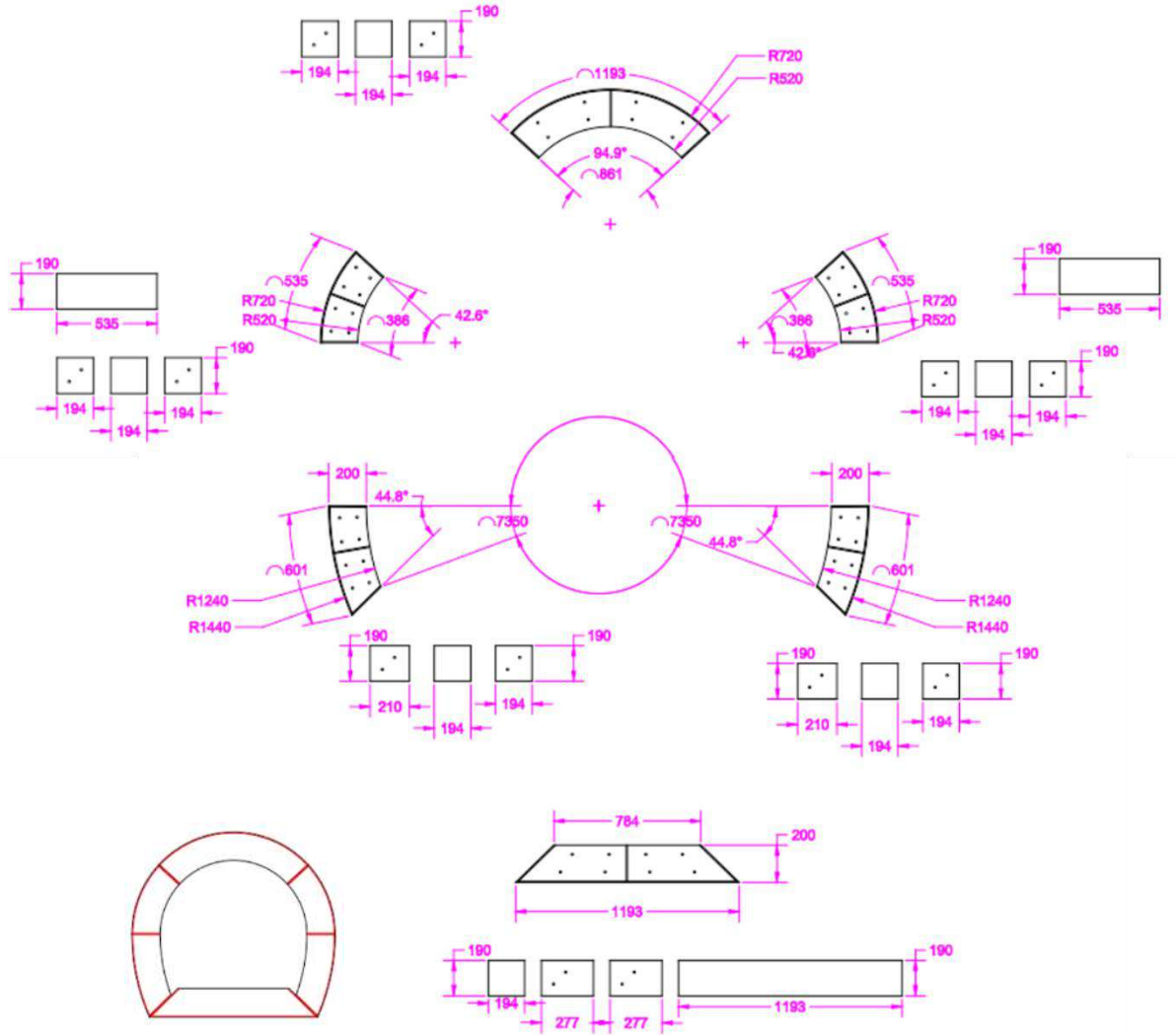


Şekil 3.6 Üst beton katmanın dökümü.

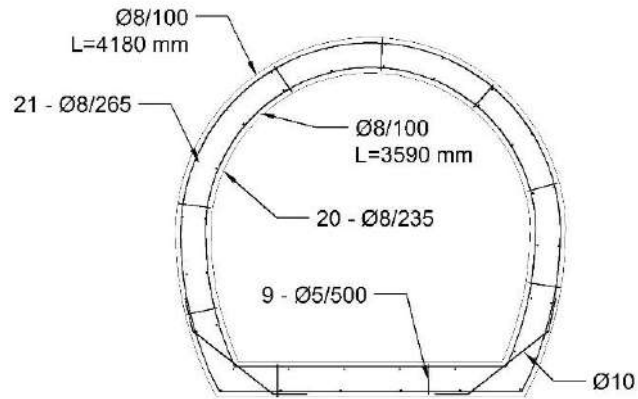
Tünelin kuvvet uygulanacak iç kısmına altı parçadan oluşan özel çelik kalıp imal edilmiştir (Şekil 3.7). Çelik kalıbın kalınlığı ve deney düzeneğinin yerden yüksekliği sırasıyla 1 cm ve 20 cm olarak belirlenmiştir. Betonarme tünel kaplamasında iki sıra 8 mm çapında donatı ve 2 sıra 18 adet 8 mm çapında boyuna donatı kullanılmıştır. Donatıların birbirilerine olan paralel uzaklığını sabit tutabilmek için 9 adet (2 sıra) 5 mm'lik donatı yerleştirilmiştir. İki köşede 10 cm yüksekliğinde (kesit ortasında) 10 mm çapında 45 cm uzunluğunda iki güçlendirme donatısı kullanılmıştır (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).

Tablo 3.2 Deneyde kullanılan donatı boyutları.

	Gerçek donatı		Deneyde kullanılan donatı	
	Ø	S ₁	Ø	S ₂
Boyuna	14	30	8	25
Halka	18	20	8	10
Köşe	14	20	10	20



Şekil 3.7 Tünelin kuvvet uygulanacak iç kısmı için imal edilmiş altı parçadan oluşan özel çelik kalıp.



Şekil 3.8 Ölçek oranında (0.4) küçültülmüş donatı detayı.



Şekil 3.9 Kaplama donatısının yerleştirilmesi.

Donatı hesaplarında aşağıda verilen formülasyon kullanılmıştır. Tünelin ve deneyin aynı donatı/beton oranına sahip olmaları için aşağıdaki eşitliği sağlamaları gerekmektedir

$$\rho = \frac{\pi r_1^2 L_1}{L_1 H_1 S_1} = \frac{\pi r_2^2 L_2}{L_2 H_2 S_2} \quad (3.2)$$

H_1 ve H_2 , sırasıyla tünel ve deneyde kullanılmış kaplama kalınlıklarını ($H_1=400$ mm, $H_2=160$ mm), S_1 ve S_2 , sırasıyla tünel ve deneyde kullanılmış donatı aralıklarını ifade etmektedir. Tünel kaplamasında 14 mm ve 18 mm çapında donatı kullanılırken, deneyde 8 mm ve 10 mm çapında donatı kullanılmasına karar verilmiştir. Aşağıda verilen eşitlik kullanıldığında, deneyde kullanılacak donatı aralıkları Tablo 3.2’de gösterildiği şekilde bulunmuştur.

$$\frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{H_1 S_1}{H_2 S_2} \quad (3.3)$$

Donatı hazırlandıktan sonra kaplamanın altı teflon ile kaplanmış, tünelin iç kısmına özel olarak imal ettirilen çelik kalıp yerleştirilmiş ve yağlanmıştır. Daha sonra da Tablo 3.1’de verilen oranlar kullanılarak tünel kaplaması için beton hazırlanmış ve kalıba yerleştirilmiştir.

3.2.3 Yükleme Parçalarının Tasarımı ve Pistonların Yerleştirilmesi

Yükleme parçaları yatay ve düşey yönlerde 300 kN yük kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11). Bu kapasite tünel kaplamasına uygulanacak basıncı 1.30 MPa değerine kadar çıkarmaya yeterlidir. Böylece proje önerisinde hedef olarak verilen

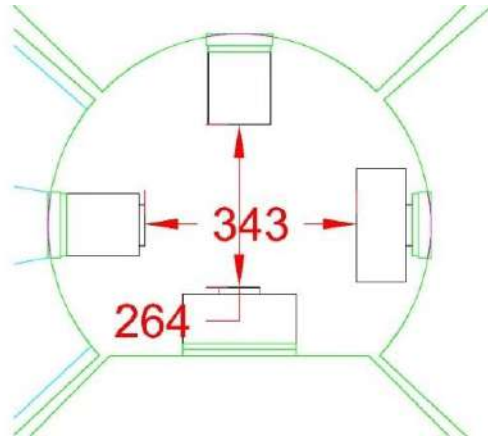
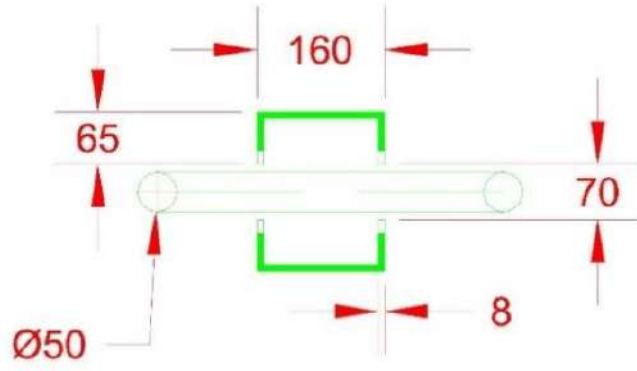
1 MPa değerine rahatlıkla ulaşılabilecektir. Bu basınç seviyesi tünelin bağlandığı rezervuardaki su seviyesinin tünele göre 130 m daha yukarıda olması durumuna karşılık gelmektedir. Örnek olarak aldığımız Topçam Tünelinde bu seviye yaklaşık olarak 80 m'dir. Kuvvetin eşit dağılması ve noktasal yüklemeler oluşmaması için plakaların önüne 1 cm kalınlığında kauçuk yapıştırılmıştır. Deneyin herhangi bir anında yükleme durumunu kontrol edebilmek amacıyla iki yönde de pistonların karşısında yük hücreleri bulunmaktadır. Şekil 3.11'de görüldüğü üzere sol taraftaki piston ve sağ taraftaki yük hücresi arasında ve üst taraftaki piston ve alt taraftaki yük hücresi arasında basmaya çalışacak birer bağlantı elemanı gerekmektedir. Ayrıca, iki yüklemenin de eksantrik olmaması için bu ara elemanların birbirleri içerisinden geçebilmeleri gerekmektedir. Bu sebeple, dolu gövdeli ve küçük çaplı bir daire kesit ile iki C kesitli çelik kullanılması uygun görülmüştür. Düşey yönde piston ile yük hücresi arasındaki bağlantıyı 264 mm uzunluğunda daire kesitli 25 mm yarıçaplı dolu gövdeli çelik sağlarken, yatay yönde bu bağlantı, 343 mm uzunluğunda 160 mm x 65 mm x 8 mm uzunluğunda iki adet C kesitli çelik parça kullanılarak yapılmıştır. Bağlantı elemanları TS-648'e uygun şekilde tasarlanmıştır. Burkulma sayıları metodu ile basınç gerilmesi tahkikinde çubuk kapasitesi çubuğun narinliği ile bağlantılı burulma katsayısı (ω) kullanılarak düşürülür. Burulma katsayısının elde edilmesi için ilk olarak çubuğun narinlik katsayısının (λ) bulunması gerekmektedir. Narinlik katsayısı, uzunluğun atalet yarıçapına bölünmesi ile bulunur:

$$\lambda = \frac{L_x}{i_x} \quad (3.4)$$

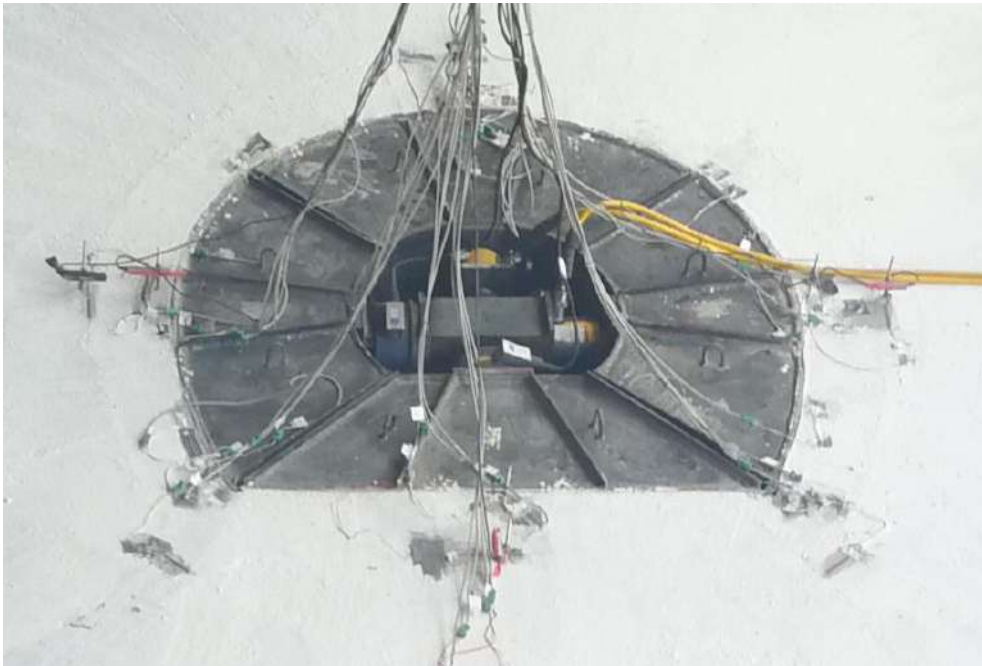
Narinlik katsayısı (λ), 20'den küçük olan elemanlar için burulma katsayısı (ω), 1 kabul edilir. Narinlik katsayısı (λ), 20'den büyük olan elemanlar için burulma katsayısı (ω), TS 648 Çizelge 6'dan alınmalıdır. İki adet C kesitin narinlik katsayıları x ve y yönlerinde 20'den küçük olduğu için kuvvet uygulandığında oluşacak basınç bulunmuş ve mukavemeti ile kıyaslandığında güvenlik katsayısı 2.5 olarak bulunmuştur. Dolu daire kesitin narinlik katsayısı 20'den büyük olduğu için burkulma katsayısı TS 648 Çizelge 6'dan alınmış ve mukavemeti ile kıyaslandığında güvenlik katsayısı 1.5 olarak bulunmuştur. Yükleme plakalarının ve pistonların deney düzeneğine yerleştirilmiş durumları Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.10 Yükleme plakaları. 1. Pistonlar, 2. Yük hücreleri, 3. Yük aktarma plakaları, 4. Yük aktarma plakaları, 5. Yük aktarma plakaları, 6. Kaplama Betonu



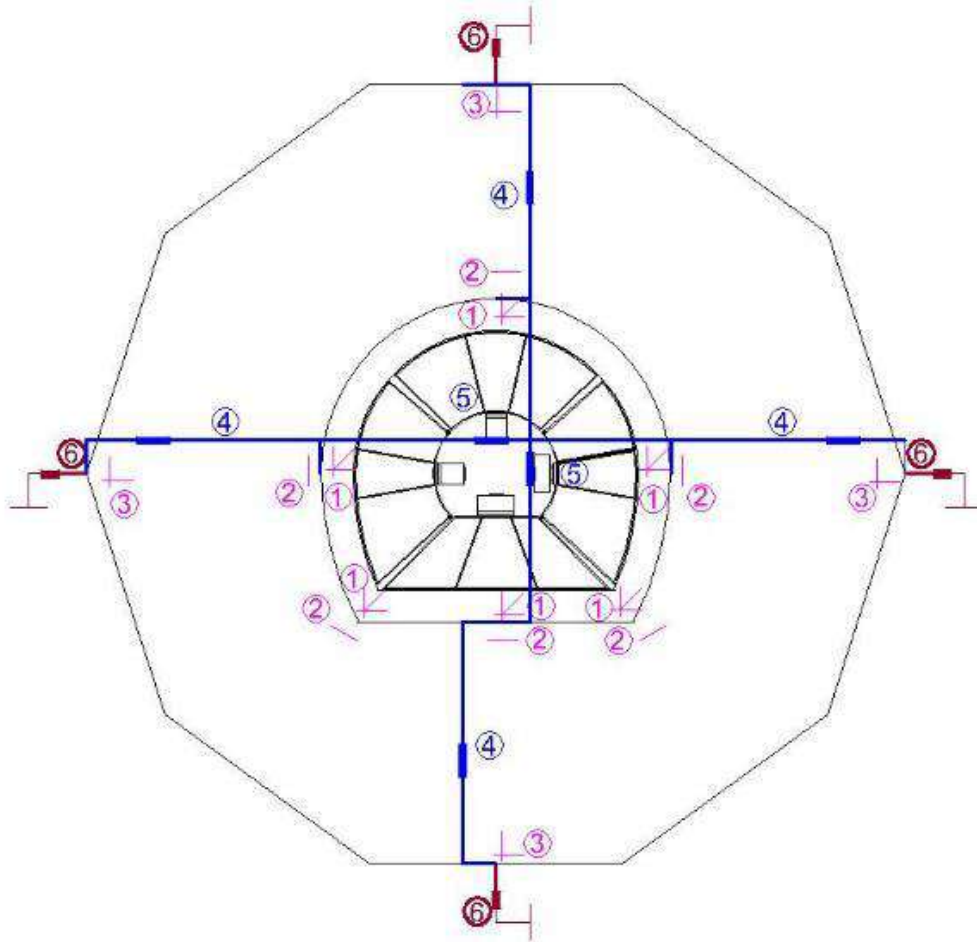
Şekil 3.11 Piston-Yük hücreleri.



Şekil 3.12 Yükleme plakalarının imal edildikten sonra pistonlarla beraber tünel içine yerleştirilmiş hali.

3.2.4 Ölçüm Sistemi

İlk deneyde 32 gerinim pulu ve 10 LVDT kullanılmıştır. Kaplamada oluşan birim şekil değiştirme tensörünü ölçmek için Şekil 3.13'de 1 numara ile gösterilen, 1 cm boyunda gerinim pullarından oluşan üç yönlü rozetlerden 6 adet kullanılmıştır. Rozetler 16 cm kalınlığındaki kaplamanın iç yüzeyinden 4 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Bu rozetlerin ardında, kayadaki tünel kaplamasına paralel birim şekil değiştirme dağılımını ölçme amacıyla deney düzeneğinin merkezine dik olacak şekilde ve kaya-kaplama birleşiminin 5 cm arkasında Şekil 3.13'de 2 numara ile gösterilen, 12 cm uzunluğunda 6 adet gerinim pulu yerleştirilmiştir. Deneysel sistemin dış sınıra yakın 3 numara ile gösterilmiş 4 noktada 6 cm uzunluğunda gerinim pulu ile yatay ve düşey yönde birim şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Daha uzun mesafede ortalama birim şekil değiştirmeleri ölçme amacıyla Şekil 3.13'de 4 numara ile gösterilen 4 adet LVDT kullanılmıştır. Benzer şekilde 2 adet LVDT ile yatay ve düşey yönde tüneldeki göreceli deformasyon ölçülmüştür (numara 5). Tünel düzeneğinin yatay ve düşey yönde hareketlerini takip edebilmek için ise Şekil 3.13'de 6 numara ile gösterilmiş 4 adet LVDT kullanılmıştır. Gerinim pulları ve LVDT'lerin tünel üzerine yerleştirilmiş hali Şekil 14'de verilmiştir.



Şekil 3.13 Birinci deneyde kullanılan ölçüm sistemi.



Şekil 3.14 Birinci deneyde kullanılan ölçüm sisteminin yerleştirilmiş hali.

3.2.5 Deney Sonuçları

Deney öncesinde hidrolik birimler ve ölçüm sisteminin çalışma durumu kontrol edilmek üzere yatay ve düşey pistonlara 10 kN kadar yük uygulanmış ve bu veriler kaydedilmiştir. Bütün okumaların sorunsuz olduğu kontrol edildikten sonra deney yüklemesine başlanmıştır. Davranışın iyi gözlemlenebilmesi için pistonlardaki kuvvet her adımda 20 kN büyüklüğünde arttırılmıştır. Deney altıncı adımda (iki yönde de 120 kN olmak üzere) donatının kopması ile son bulmuştur. Bu değer yaklaşık 0.51 MPa büyüklüğündeki iç basınca karşılık gelmektedir. Deney yaklaşık 90 dakika sürmüş ve toplam 52 kanaldan saniyede 2 veri alınmıştır. Her kanaldan toplam 5600 veri kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan betonun malzeme özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların hedeflere (Tablo 3.1) oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 3.3 Birinci deneyde kullanılan betonların deneysel özellikleri.

7. Gün Basınç Deneyi Sonuçları (MPa)				Deney Günü Basınç Deneyi Sonuçları (MPa)			
Örnek #	C10 Alt	C10 Üst	Kaplama	Örnek #	C10 Alt	C10 Üst	Kaplama
1	2.84	1.77	17.03	1	8.47	8.53	23.01
2	4.59	3.11	17.39	2	6.13	7.28	28.70
3	4.65	3.61	19.71	3	5.32	6.72	23.14
Ortalama	4.03	2.83	18.04	Ortalama	6.64	7.51	24.95

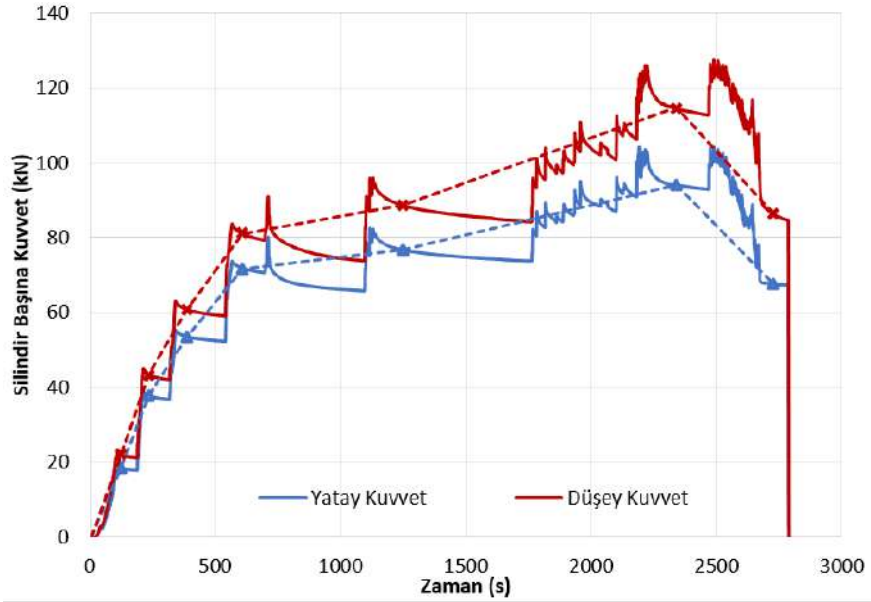
Deney Günü Brezilya Yarma Deneyi (MPa)			
Örnek #	C10 Alt	C10 Üst	Kaplama
1	0.76	0.62	2.19
2	0.81	0.56	1.97
3	0.66	-	1.41
Ortalama	0.74	0.59	1.86

Deney Günü Dört Noktalı Eğilme Dayanımı (MPa)			
Örnek #	C10 Alt	C10 Üst	Kaplama
1	1.71	1.30	3.70
2	1.70	2.30	3.72
3	1.84	1.09	-
Ortalama	1.66		3.71

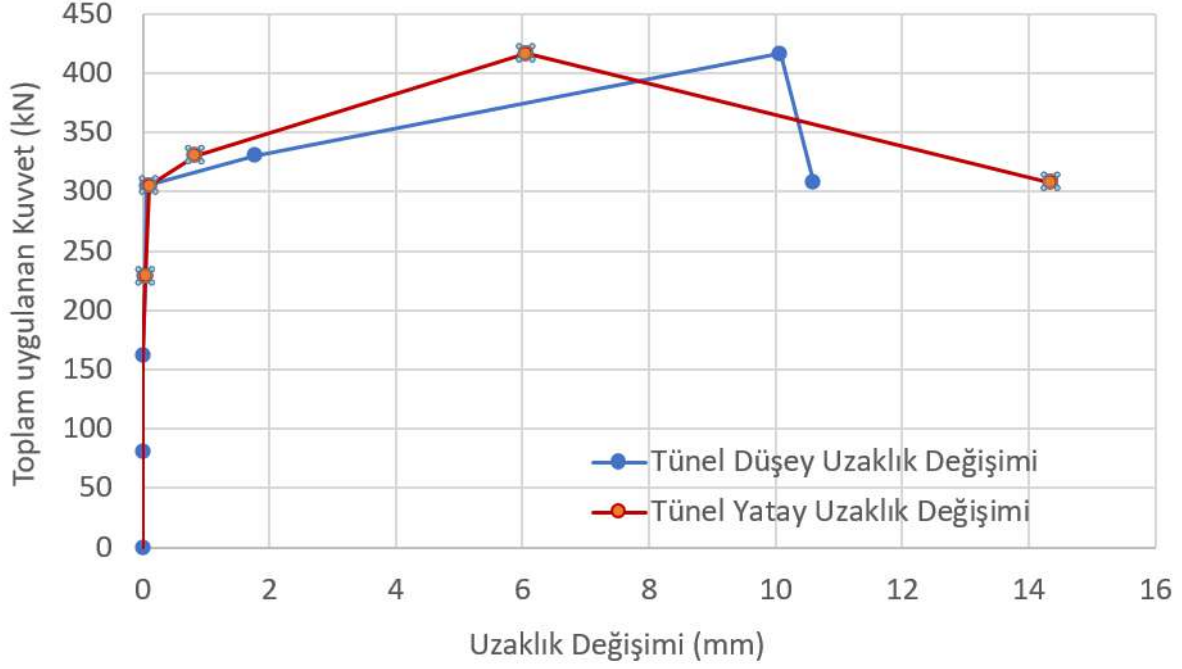
	E (Elastisite Modülü, GPa)
1	24.83
2	24.88
3	21.56
4	21.81
Ortalama	23.27

Verilerin işlenebilir ve anlaşılabilir olması amacıyla Şekil 3.15'de görüleceği üzere çatlak kontrolü yapılan yükün sabit kaldığı zaman aralıklarında her platonun ortalaması alınmıştır. Pistonların uyguladığı kuvvetler arasında yaklaşık 10% fark olduğu görülmektedir. Bu fark sayısal modelleme çalışmalarında göz önüne alınmıştır. Tünelin içinde ölçülen düşey ve yatay uzunluk değişimleri Şekil 3.16'da verilmiştir. Tünel kaplamasının temel serbestlik dereceleri bu iki uzunluk değişimidir. Deney sırasında düşey yönde üst tarafın ve yatay yönde sol tarafın diğer yönler nazaran çok az hareket ettiği görülmüştür (Şekil 3.17). En büyük mutlak hareket, beklendiği gibi düşey yönde aşağıya doğru olmuştur. Kaya katmanının üstünde bulunan LVDT'lerde de düşey yönde saat 12 yönünde ve yatay yönde saat 9 yönünde diğer yönler göre daha büyük uzunluk değişimleri ölçülmüştür (Şekil 3.18). Deneyde tüneli saran kayanın kalınlığında çok az değişim olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.19). Deney esnasında gözlemlenen ilk çatlak dördüncü yük adımında (piston yükü 80 kN) tünel kaplamasının hemen dışında bulunan bölgede başlamıştır. Bu yük seviyesinde tünel kaplamasına yaklaşık 320 kN yük uygulanmaktadır. Bu da 0.34 MPa büyüklüğünde iç basınca eşdeğerdir. Bu değer deney düzeneği için örnek alınan Topçam Barajındaki tünel maruz kalacağı hidrostatik basınçtan (0.8 MPa) düşüktür. Bu çatlak bir sonraki yük adımında dış sınıra kadar ilerlemiştir. Deney düzeneğinde çatlağın ilerlemesini durduracak bir sınır koşulu veya basınç bölgesi

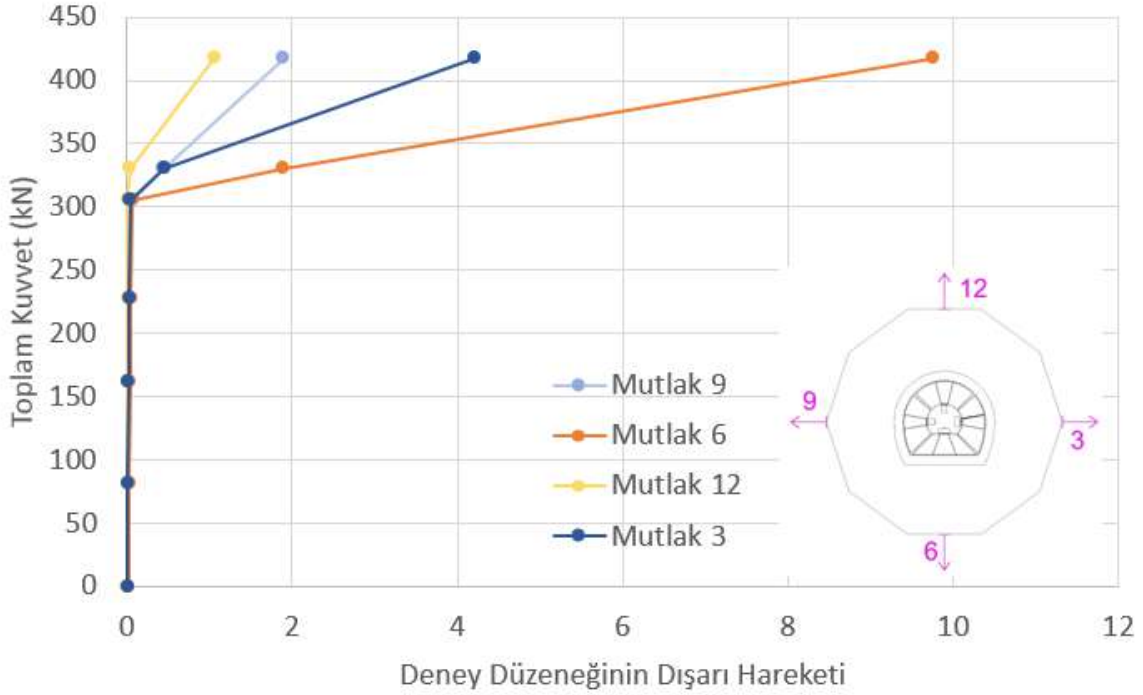
olmadığından bu deney düşük saha gerilimleri altında tünel kaplamasının davranışın incelenmesini temsil etmektedir. Düşük basınç altında olan kaya ilk başta tünel kaplamasının rijitliğine katkı vermekle beraber kırılğan olduğu için bir süre sonra çatlamakta ve iç basınç bir anda tünel kaplaması tarafından taşınmaya başlamaktadır. Kaya düşük basınç seviyelerinde tünel kaplamasını sardığından dolayı kendi kapasitesinin üzerinde yük taşıyan tünel kaplaması kayanın çatlamasıyla aniden kapasitesinin üzerinde bir yüke maruz kalmış ve çatlaklar hızla açılmaya başlamıştır. Boyut ve donatıların örnek alındığı Topçam barajında tünel hidrostatik iç basıncı 0.8 MPa olduğundan deney sonuçları düşük saha gerilimleri altında kullanılan tasarımın çatlak kontrolünde yetersiz olduğunu göstermektedir. Yüklemenin beşinci basamağında (toplam yük 400 kN, iç basınç 0.43 MPa) tünel kaplaması ilk çatlak hizasında ve daha farklı 3 doğrultuda çatlamıştır (Şekil 3.20). Bu noktadan sonra tünel kaplamasının kapasitesi düşmeye başlamıştır ve kaplamanın içinden kaya katmanının dışına kadar birleşmiş çatlak (ilk oluşan çatlak) başta olmak üzere çatlak açıklıkları ve deplasmanlar giderek artmıştır. Altıncı basamakta zaten ilk oluşan çatlak hizasından kaplama donatısı kopmuş ve deney sonlandırılmıştır (toplam yük 480 kN, iç basınç 0.51 MPa). Deneyde oluşan çatlakların gelişimi ve deney sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı sırasıyla Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 verilmiştir.



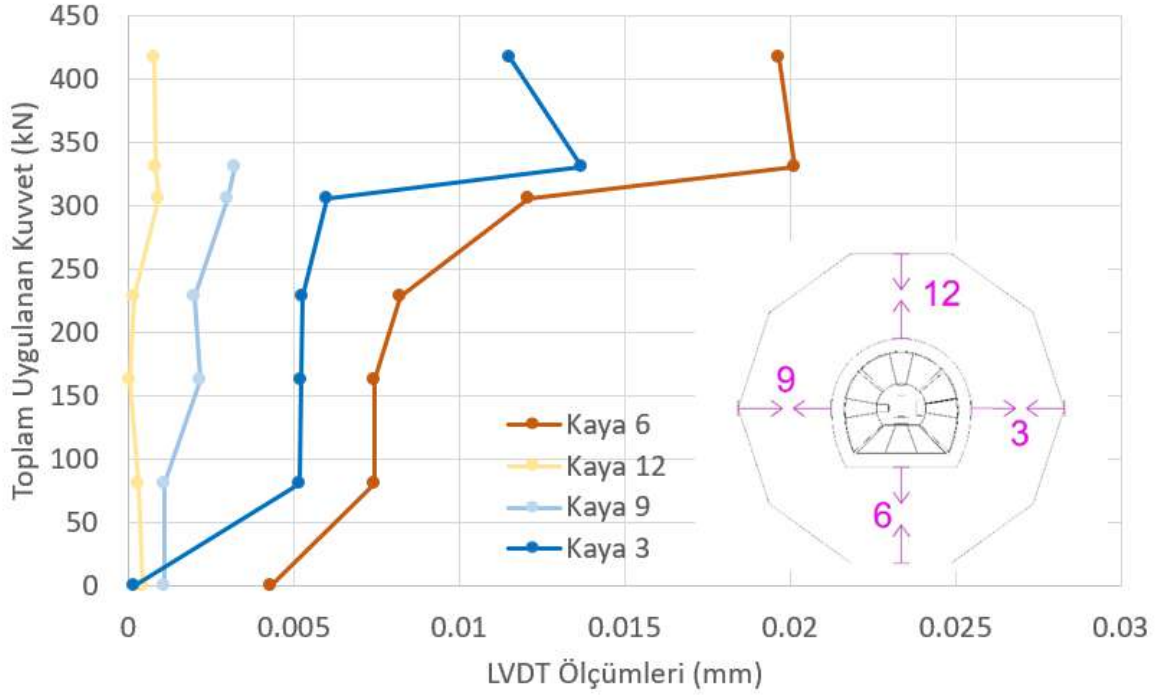
Şekil 3.15 Yükleme seviyelerini gösteren ham veri ve kullanılan ortalama yük noktaları. Silindir başına uygulanan kuvvet 0.0043 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



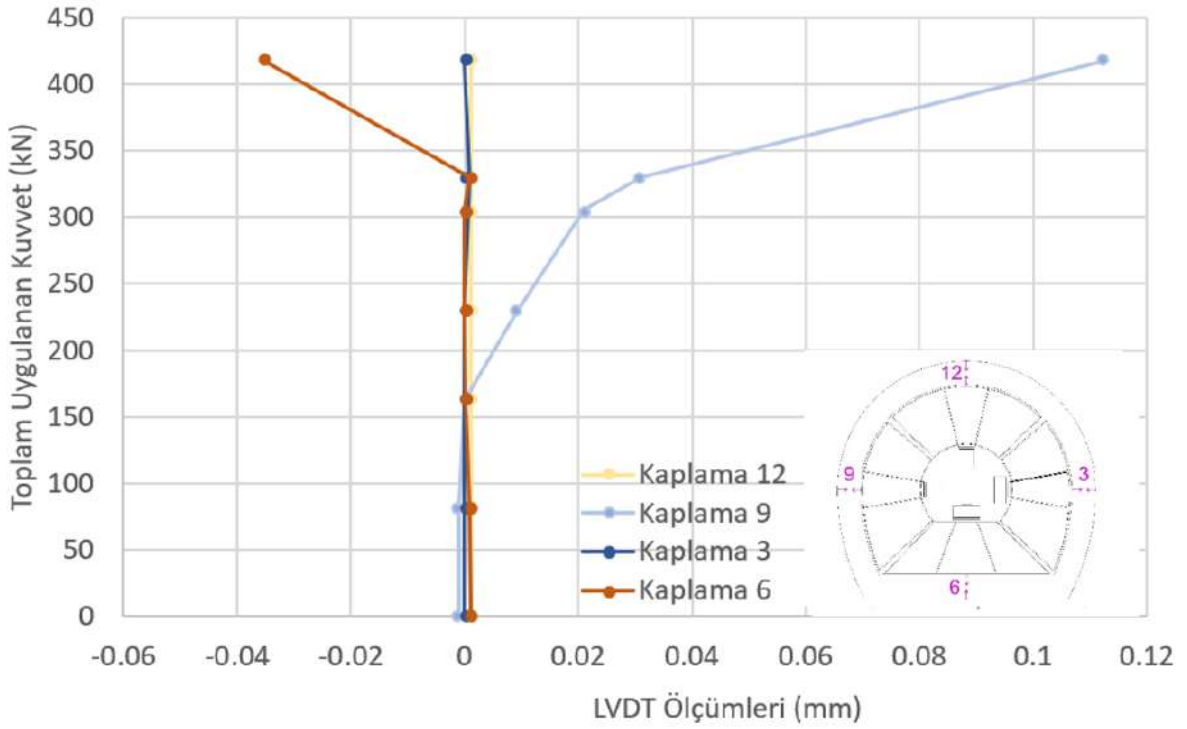
Şekil 3.16 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



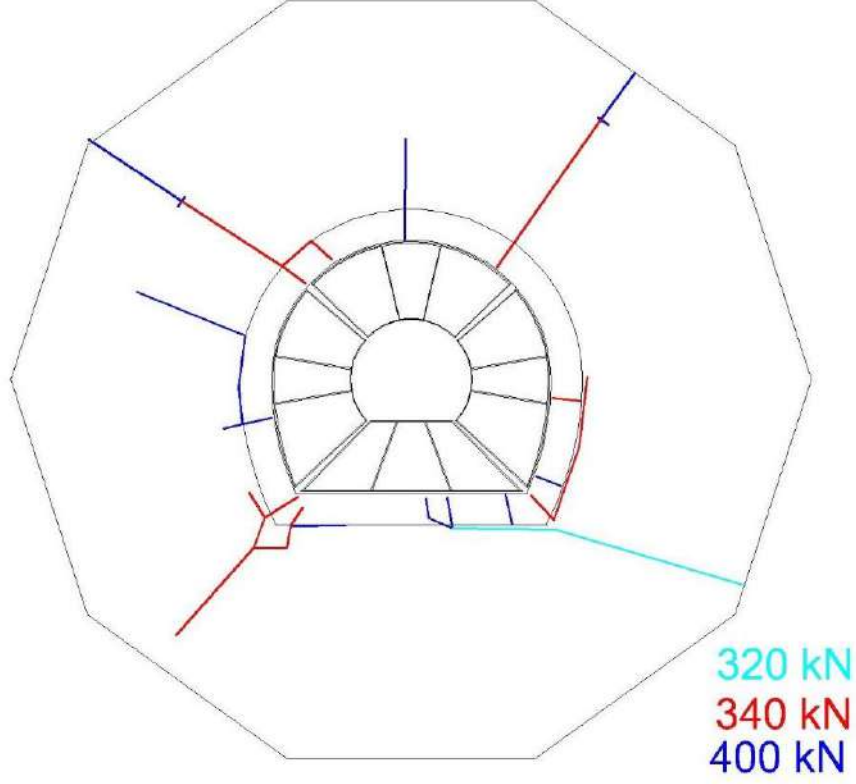
Şekil 3.17 Tünel düzeneğinin hareketini gösteren LVDT ölçümleri. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



Şekil 3.18 Kaya katmanında ölçülen uzunluk değişimleri. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



Şekil 3.19 Kaplama üzerinde ölçülen uzunluk değişimleri



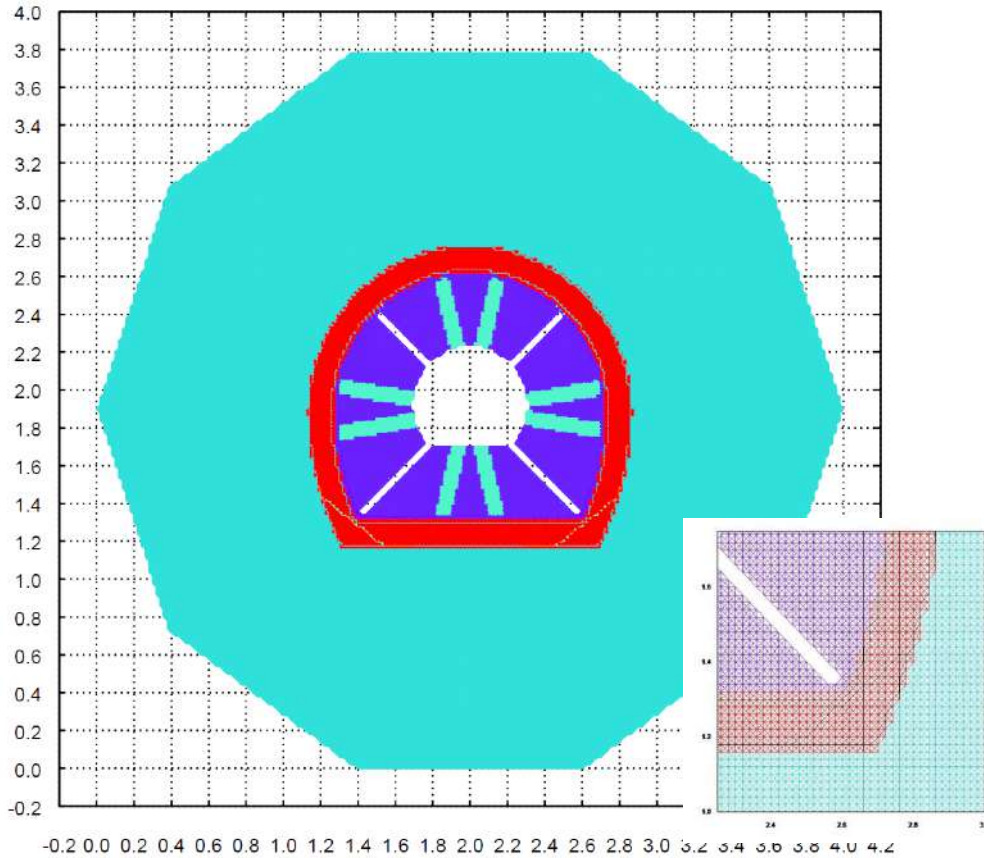
Şekil 3.20 Birinci deneyde gözlemlenen çatlak dağılımını gösteren kroki. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



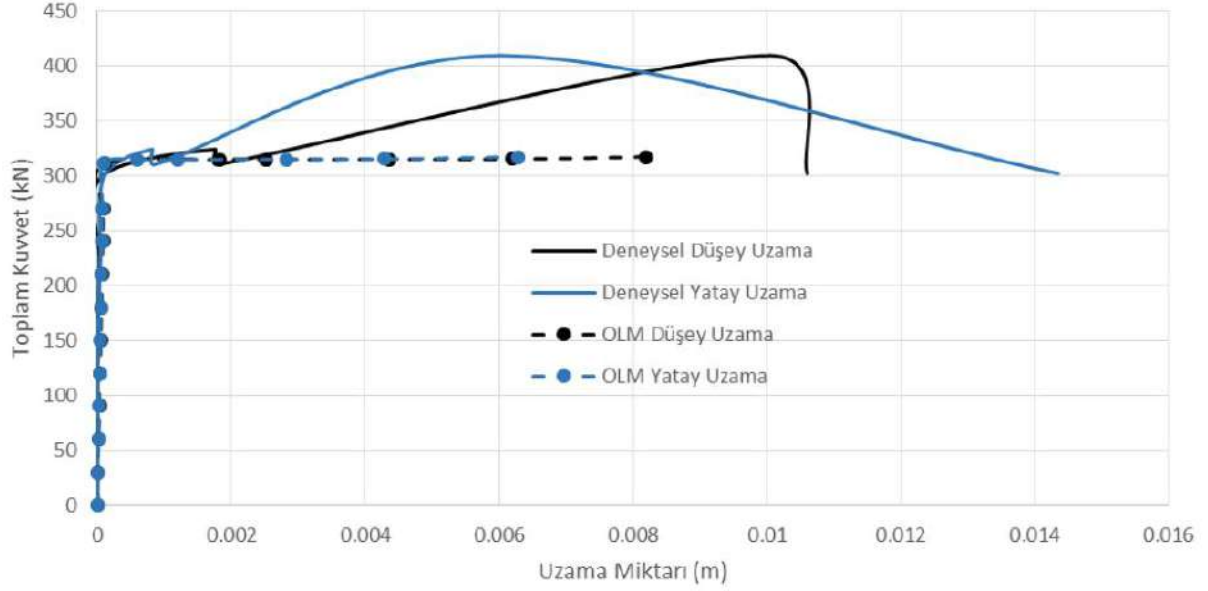
Şekil 3.21 Birinci deneyin sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı.

3.2.6 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

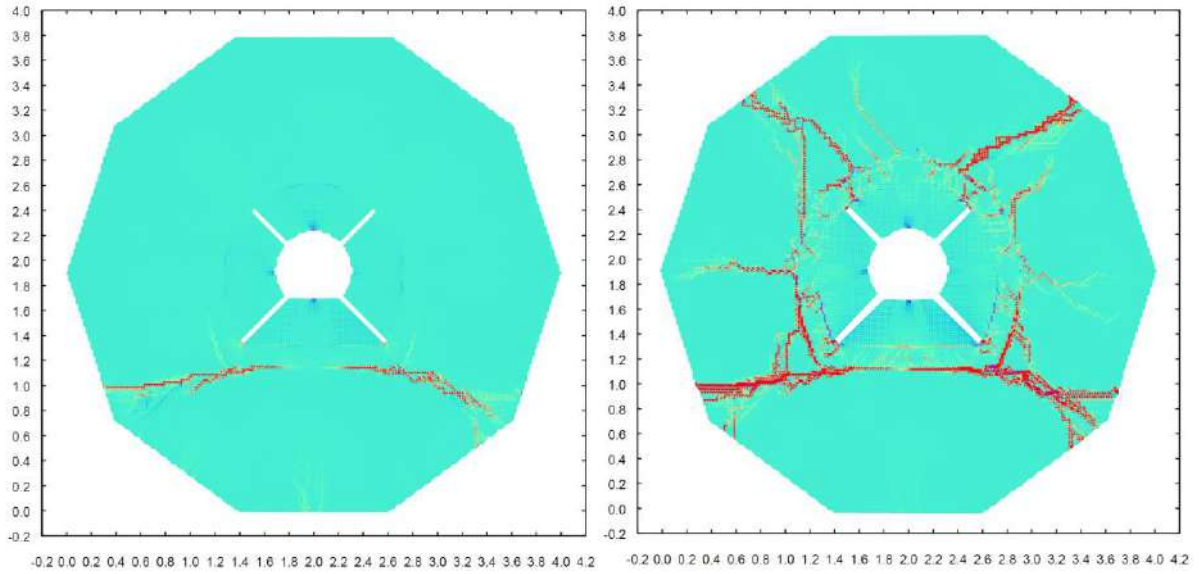
Düşük saha gerilimleri altında tünel kaplamasının doğrusal olmayan davranışını inceleme amacıyla yapılan birinci deney proje kapsamında geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Modelde dört farklı malzeme kullanılmıştır. Beton kaplama için deneysel olarak ölçülen elastisite modülü (23.3 GPa), üç katmanlı kaya için hesaplanan eşdeğer elastisite modülü (8.37 GPa) kullanılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreleri, beton kaplama için $\epsilon_{cr}=6e-05$, $a_1=5$, $a_2=80$, $a_3=300$ olarak ve kırılğan davranış gösterdiği saptanan kaya malzeme özellikleri $\epsilon_{cr} =5e-05$, $a_1=10$, $a_2=30$, $a_3=40$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak beton kaplama ve kaya için sırasıyla $G_f=43$ N/m ve $G_f=2$ N/m (çatlak enerjisi) değerlerine tekabül etmektedir. Çekme dayanımlarıysa sırasıyla 1.40 MPa ve 0.42 MPa olarak alınmıştır. Yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında deneyde kullanılan ince kauçuk için elastisite modülü 1 GPa olarak alınmıştır. Tünelin alt kısmının eğilmesinden dolayı deneyde kauçuk ile beton tünel arası açıldığından sayısal simülasyonda da kauçuğun tünelden ayrılmasını sağlamak için düşük bir ϵ_{cr} değeri kullanılmıştır. Yükleme plakalarında bulunan rijitlik farklılıkları



Şekil 3.22 Birinci deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları. Yükleme plakaları ve plaka rijitliğinin lokal değişimi, yükleme plakaları ve tünel kaplamasının içi arasındaki kauçuk bölge de modele dahil edilmiştir.



Şekil 3.23 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



Şekil 3.24 Kayanın çatlama ve iç basıncın ani bir şekilde tünel kaplamasına aktarılmasından dolayı çatlakların ani bir şekilde artması.

da modelde göz önüne alınmıştır (Şekil 3.22). Donatı için elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 200 GPa ve 420 MPa alınmıştır. Analizlerde kullanılan düğüm noktaları ve bağ elemanları Şekil 22'de gösterilmektedir. Şekil 3.23'de tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese edilmektedir. Şekil 3.24'de ise sırasıyla kayanın çatlama ve beton kaplamanın çatlama durumu için sayısal modelleme sonucundan elde edilen hasar dağılımı gösterilmektedir. Sonuçlar Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 ile karşılaştırıldığında sayısal modelleme ile tahmin edilen hasar dağılımının da deneysel

sonuçlar ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Sayısal model, deneyde gözlemlendiği gibi çatlakların tünel kaplamasının dışında başladığını ve çatlağın açılmasından hemen sonra tünel kaplamasının aldığı yük oranının ani bir şekilde arttığını tahmin etmektedir.

3.3 Deney 2: Tünel Kaplamasının Kaya Etkileşimi Olmadan İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

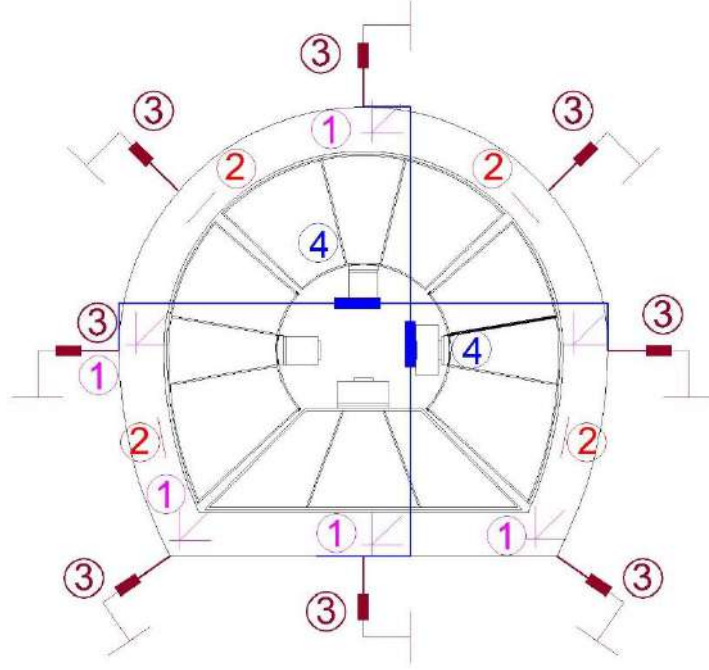
Bu deneyde tünel davranışının bir sınır durumu olan kayanın tünel kaplamasını sargılamadığı durum incelenmiştir. İç kalıbın yanında ilk deneyde kaplamanın dışında bulunan kaya katmanının bu deneyde mevcut olmaması nedeniyle sac ve kontrplak kullanılarak dış kalıp üretilmiştir. Kalıpların arasına beton ve kontrplak arasında kayganlığı sağlaması için ilk deneyde olduğu gibi 1 mm kalınlığında teflon plaka yerleştirilmiş ve naylon örtü ile korumaya alınmıştır. Kaplama donatısı ve beton reçetesi ilk deney ile aynıdır (Tablo 3.1). Beton kompozisyonu ve deney günündeki beton basma mukavemetleri Tablo 3.4’de gösterilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların hedeflere (Tablo 3.1) ve birinci deneyde kullanılan malzeme özelliklerine (Tablo 3.3) oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 3.4 İkinci deneyde kullanılan betonun malzeme özellikleri.

Örnek No	Deney Günü Test Sonuçları		
	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Dört Noktalı Eğilme Dayanımı (MPa)
1	27.67	24.63	3.36
2	21.79	24.61	3.72
3	24.73	24.04	1.30
4	--	24.03	-
Ortalama	24.73	24.33	2.8

3.3.1 Ölçüm sistemi

Deneyde kullanılan ölçüm sistemi ilk deney ile aynıdır (kaya katmanında yapılan ölçümler dışında). Toplam 22 adet gerinim pulu, 18’i 3’lü rozet oluşturacak, kalan 4 adedi yükleme plakalarına teğet duracak şekilde yapıştırılmıştır. Pulların yapıştırılması işlemi işaretleme, aseton ile temizleme, bant yardımı ile hizalama ve özel yapıştırıcı kullanarak yapıştırma sırası ile uygulanmıştır. Kaplamanın yatay ve düşey hareketini ölçmek amacıyla her iki yönde ikişer (biri 50 mm’lik ve biri 10 mm’lik olmak üzere) LVDT kullanılmıştır. Deney düzeneğinin mutlak hareketini ölçmek amacıyla ilk deneyde yatay ve dikeyde ikişer adet konulan LVDT sayısı bu deneyde artırılarak 8’e çıkarılmıştır (Şekil 3.25). Ölçüm ve yükleme sistemlerinin deney düzeneğine yerleştirilmiş hali Şekil 3.26’da verilmiştir.



Şekil 3.25 İkinci deneyde kullanılan ölçüm sistemi. Şekilde 1 numara rozetleri, 2 numara teğet gerinim ölçerleri, 3 numara mutlak LVDT'leri, 4 numara göreceli uzunluk değişimi ölçen LVDT'leri göstermektedir.

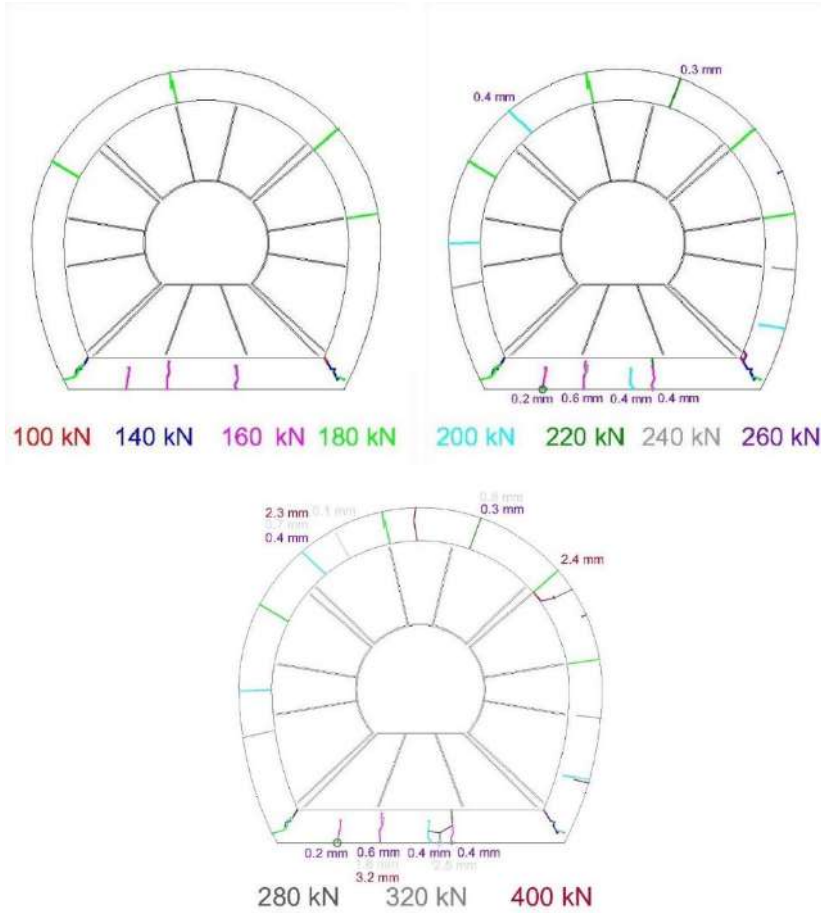


Şekil 3.26 İkinci deneyden hemen önce ölçüm ve yükleme sistemlerinin hazırlanmış hali.

3.3.2 Deney Sonuçları

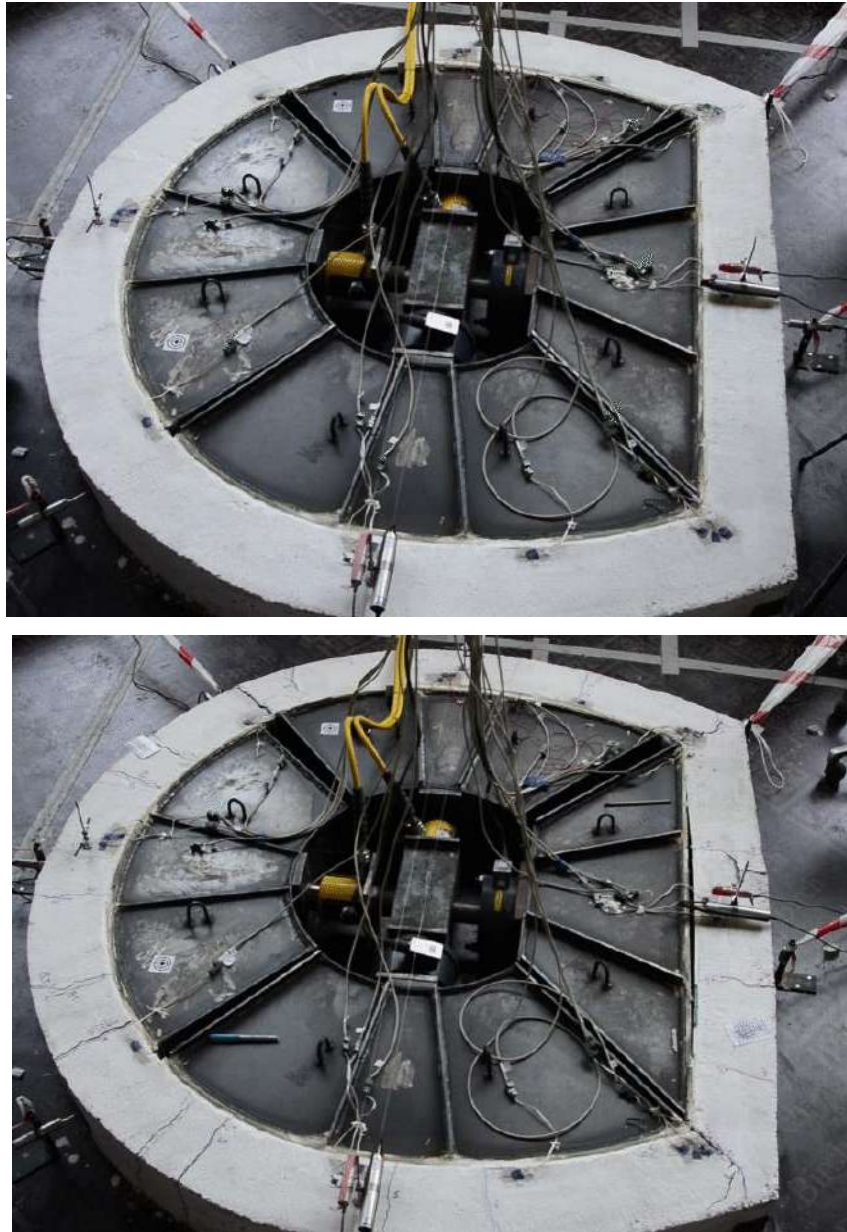
Bu deneyde, ilk deneyden farklı olarak 20 kN'luk yük adımları yerine 5 kN'luk yük adımları tercih edilmiştir. Deney toplam 23 adımda tamamlanmıştır. Deney düzeneğinin tümü ve bir bölgesi birer kamera yardımıyla deney boyunca videoya alınmıştır (http://www.youtube.com/watch?v=9aRB8Zff_A). Deney 70 dakika sürmüştür ve toplam 36 kanaldan saniyede iki defa veri toplanmıştır. Deney adımları sırasında gözlenen çatlaklar Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Çatlak ölçümleri 260 kN (mor), 320 kN (gri) ve 400 kN (kırmızı) yük seviyelerinde gerçekleştirilmiştir.

Deney sırasında ilk olarak beşinci basamakta (toplam 100 kN, iç basınç 0.107 MPa) sağ alt köşede çatlak gözlenmiştir. Çatlakların oluşma sırası Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Toplam uygulanan kuvvetin 280 kN'a ulaşmasından sonra çatlak açıklıkları hassas bir şekilde ölçülmeye başlanmıştır. Deney sırasında kaplama dışarıya doğru genişlemiştir. İlk deneyden farklı olarak deneyin sonuçlanması için donatının kopması beklenmemiş, toplam uygulanan kuvvet 400 kN'a (iç basınç 0.43 MPa) ulaştığında deney tamamlanmıştır. Deney sonunda oluşan çatlakların dağılımı ise Şekil 3.28 ve Şekil 3.28'da verilmiştir.

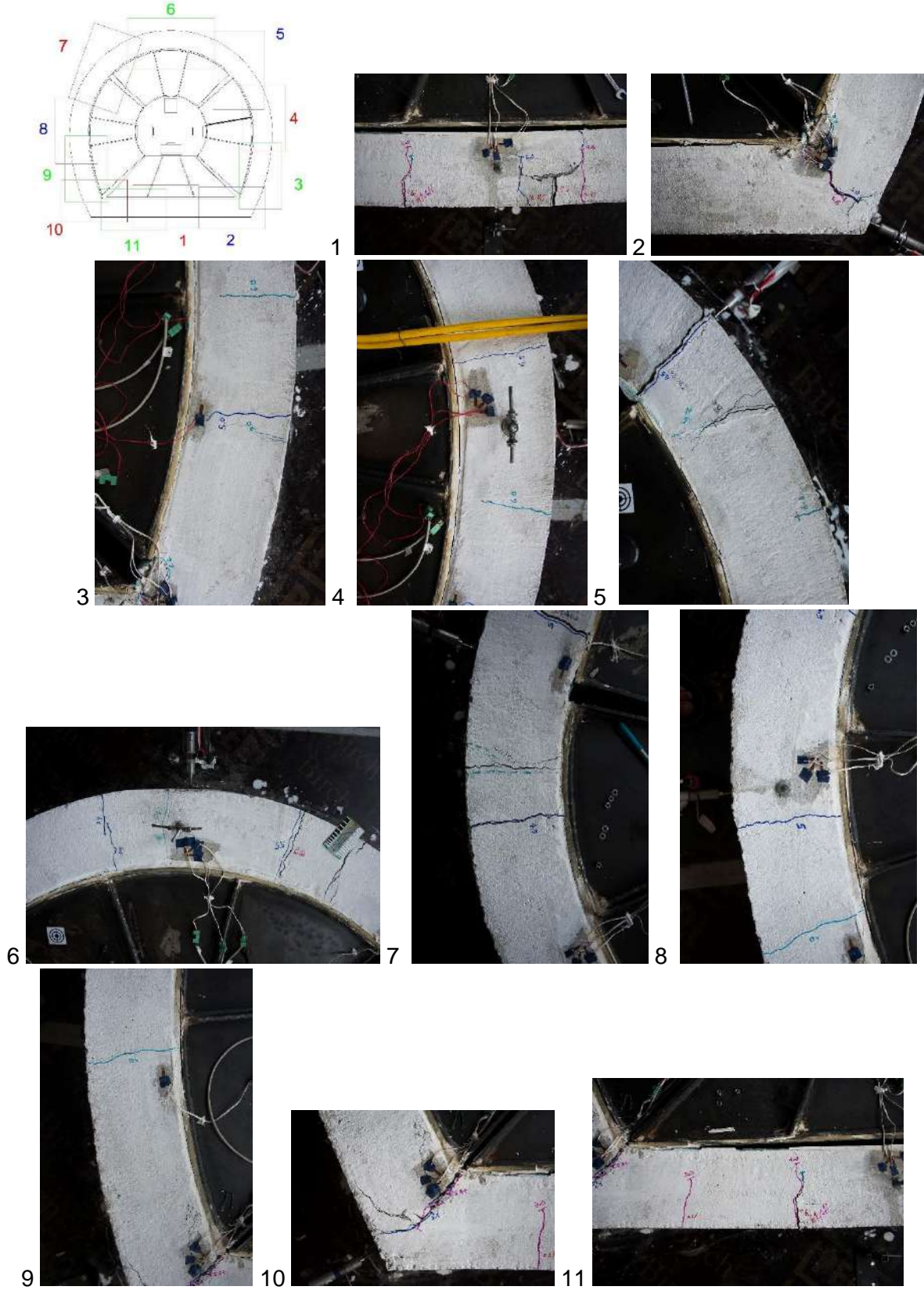


Şekil 3.27 İkinci deneyde gözlemlenen çatlakların gelişimi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).

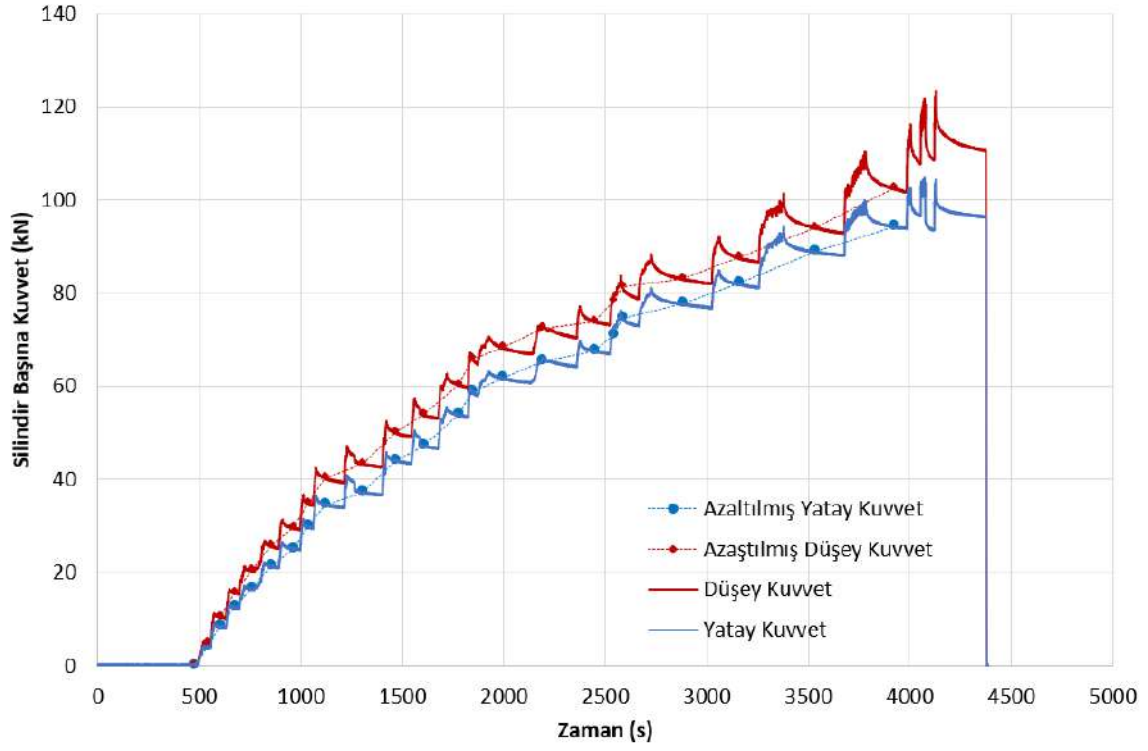
İlk deney sonuçları sunulurken anlatıldığı gibi verilerin ortalaması alınmış ve standart sapma değerleri kontrol edilerek veri, 23 anlamlı adıma düşürülmüştür (Şekil 3.30). Tünel kaplamasının temel serbestlik dereceleri olan tünelin içinde ölçülen düşey ve yatay uzunluk değişimleri Şekil 3.31’de verilmiştir. Düzeneğin dışarıya doğru saat 12, 3, 6, 9 yönlerindeki genişleme değerleri Şekil 3.32’de gösterilmiştir. Tünelin sol ve sağ yöndeki hareketinin benzer olması deneyin simetri durumunu sağladığını göstermektedir. İlk deneyde olduğu gibi ters atmalı geometriden dolayı tünel kaplaması en fazla aşağı yönde hareket etmektedir. Düşey ve yatay yönlerde mutlak deplasmanların toplamları ile aynı yönlerdeki relatif/göreceli deplasmanlar Şekil 3.33’de gösterildiği üzere örtüşmektedir. Bu da ölçümlerin birbirleriyle tutarlı olduğunu göstermektedir.



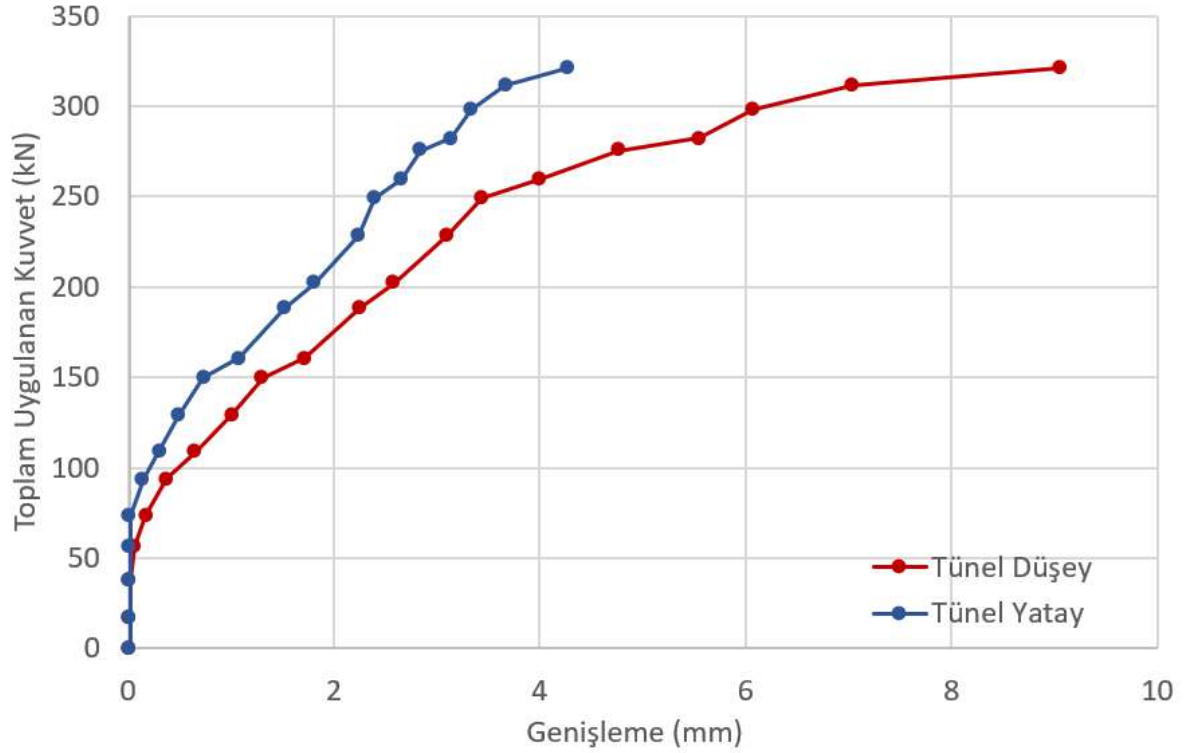
Şekil 3.28 İkinci deneyde oluşan çatlaklar.



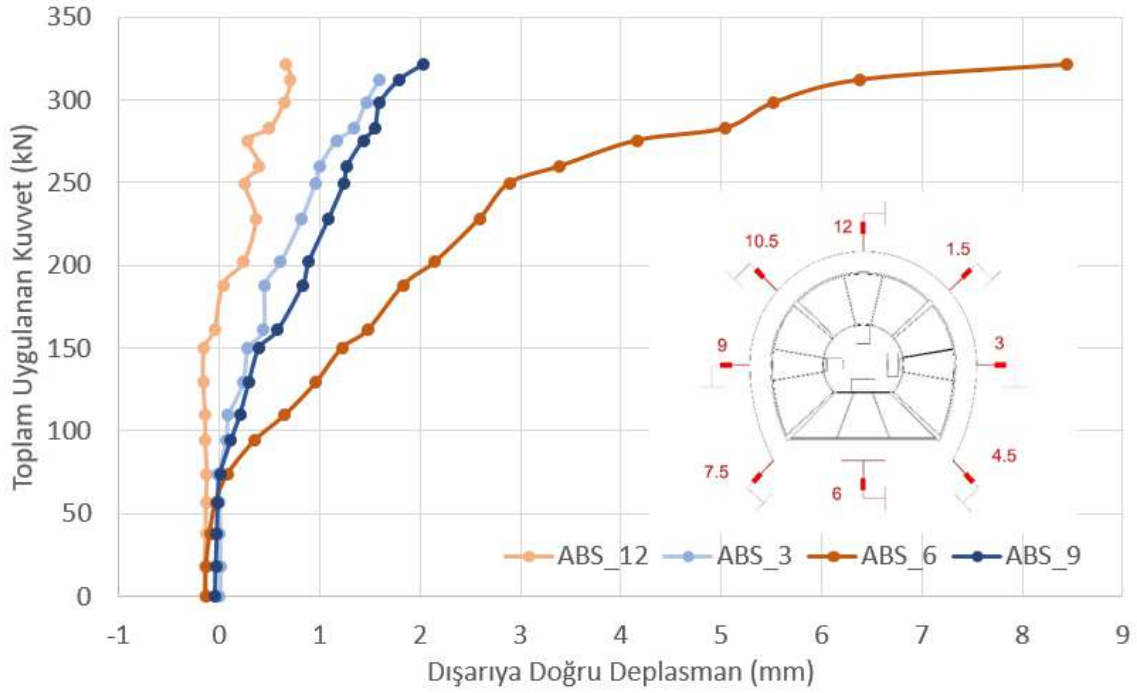
Şekil 3.29 İkinci deneyde oluşan çatlakların detaylı görünümü.



Şekil 3.30 Yükleme seviyelerini gösteren ham veri ve kullanılan ortalama yük noktaları.



Şekil 3.31 Tünelin içinde ölçülen düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin uygulanan kuvvete göre değişimi.



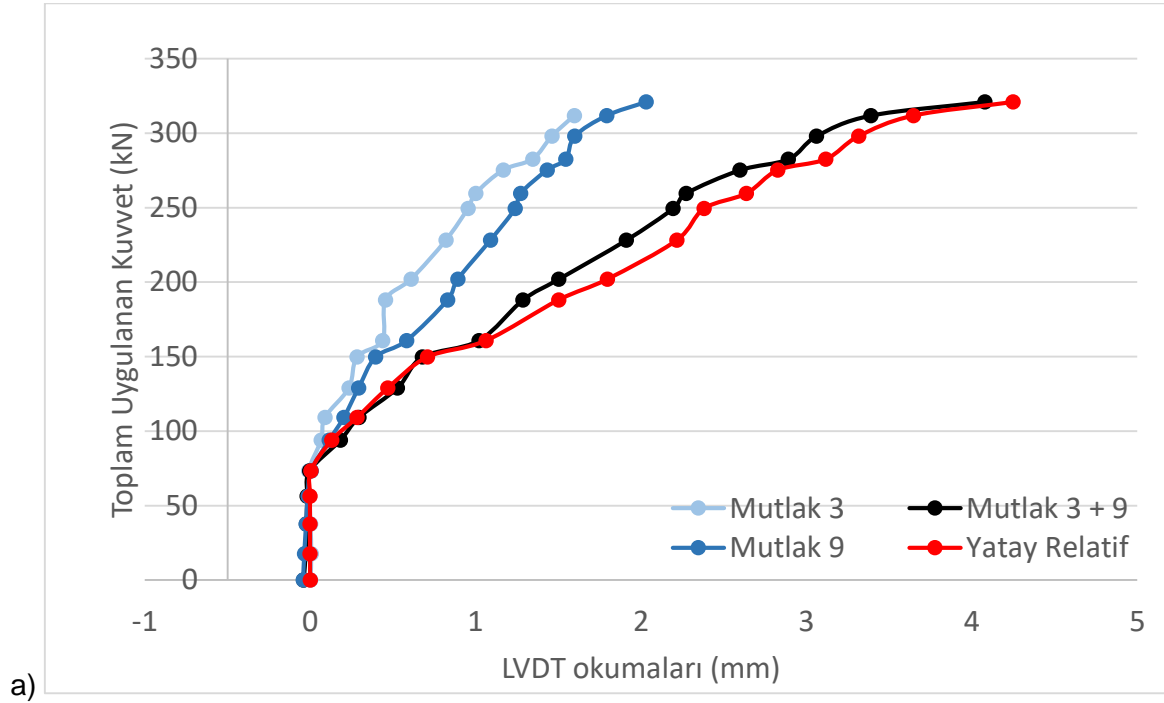
Şekil 3.32 Tünelin dışı doğru yaptığı deplasmanın yüke göre değişimi.

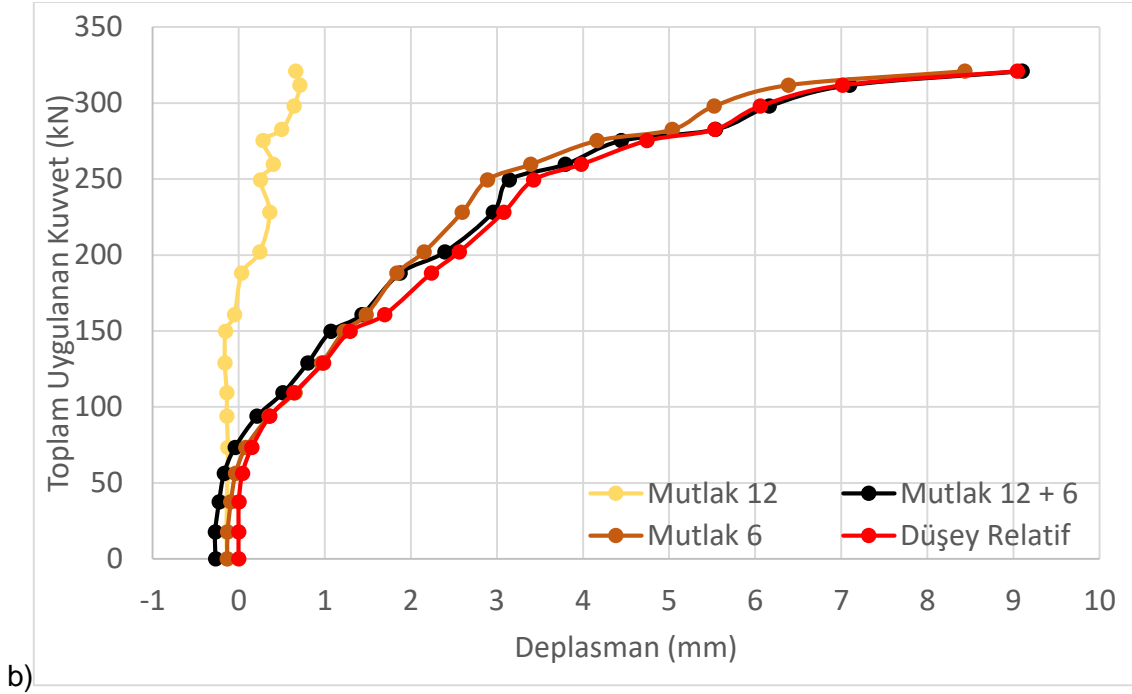
3.3.3 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

Kaya etkileşimi olmadan tünel kaplamasının doğrusal olmayan davranışını inceleme amacıyla yapılan ikinci deney, proje kapsamında geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Oluşturulan sayısal model birinci deneyin modellenmesinde kullanılan modelin neredeyse aynısıdır (kaya dışında). Modelde üç farklı malzeme kullanılmıştır. Beton kaplama için deneysel olarak ölçülen elastisite modülü (24.3 GPa) kullanılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreler $\epsilon_{cr}=6e-05$, $a_1=5$, $a_2=80$, $a_3=300$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak $G_f=50$ N/m (çatlak enerjisi) değerine tekabül etmektedir. Çekme dayanımıysa 1.45 MPa olarak alınmıştır. Deneyde kullanılan beton için gerçekleştirilen dört noktali eğilme deneyinde elde edilen çekme dayanımının ortalama 2.8 MPa (Tablo 3.4) olduğu göz önüne alınırsa kullanılan değer çekme dayanımının beklenen sınırlar içinde olduğu görülmektedir. Deneyde yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında kullanılan kauçuk için elastisite modülü 1 GPa olarak alınmıştır. Tünelin alt kısmının eğilmesinden dolayı deneyde kauçuk ile beton tünel arası açıldığından sayısal simülasyonda da kauçuğun tünelden ayrılmasını sağlamak için düşük bir ϵ_{cr} değeri kullanılmıştır. Yükleme plakalarında (Şekil 3.10) bulunan rijitlik farklılıkları da modelde göz önüne alınmıştır (Şekil 3.34). Donatı için elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 200 GPa ve 420 MPa olarak kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan düğüm noktaları ve bağ elemanları Şekil 3.34'de gösterilmektedir. Şekil 3.35'de tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese

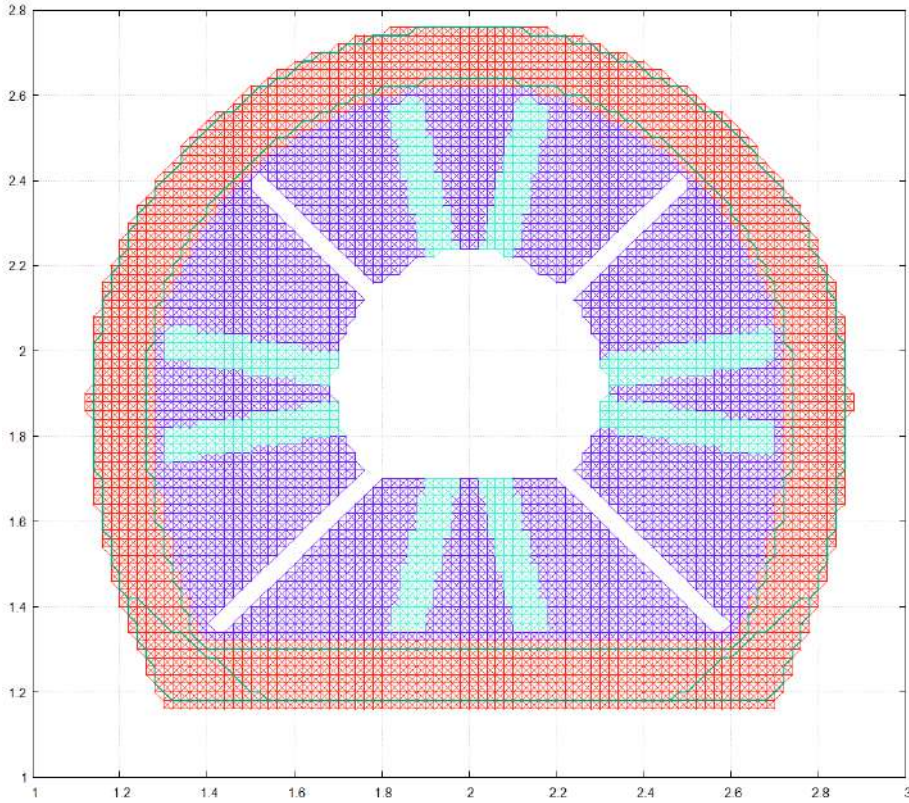
edilmektedir. Sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.36'da ise sayısal modelleme sonucunda toplam yükün dört farklı değeri için elde edilen hasar dağılımı gösterilmektedir. Sonuçların Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 ile karşılaştırıldığında sayısal modelleme ile tahmin edilen hasar dağılımının da deneysel sonuçlar ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Geliştirilen OLM analiz motorunun az sayıda parametre ve gerçekçi malzeme özellikleri kullanılarak deneysel sonuçlara oldukça yakın tahminlerde bulunduğu görülmektedir.

Birinci deneyde tünel düşey ve yatay uzunluk değişimleri (Şekil 3.35) göz önüne alındığında düşük basınç altında kırılğan davranış gösterdiği belirlenen kayanın, tünel kaplamasının rijitliğini ilk çatlama anına kadar artırdığı anlaşılmaktadır. Kayanın çatlamasıyla artırılmış yük altında kalan tünel kaplamasının kendi rijitliğiyle çatlayarak yük taşımaya devam ettiği ve yine tünel düşey ve yatay uzaklık değişimleri göz önüne alındığında bu rijitliğin kaya etkileşimsiz davranış rijitliğiyle (Şekil 3.31) benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Düşük saha gerilimli kaya etkileşiminin başlangıç rijitliğini artırmasının yanında taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir artış sağlamadığı görülmektedir.

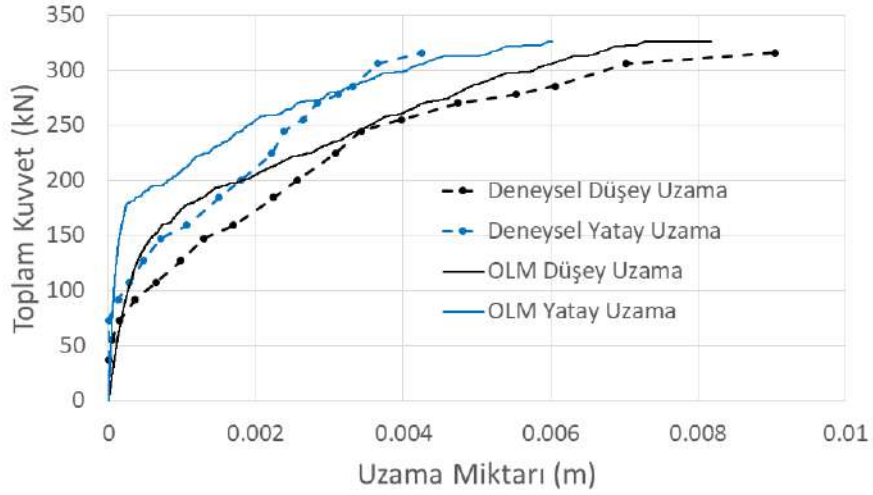




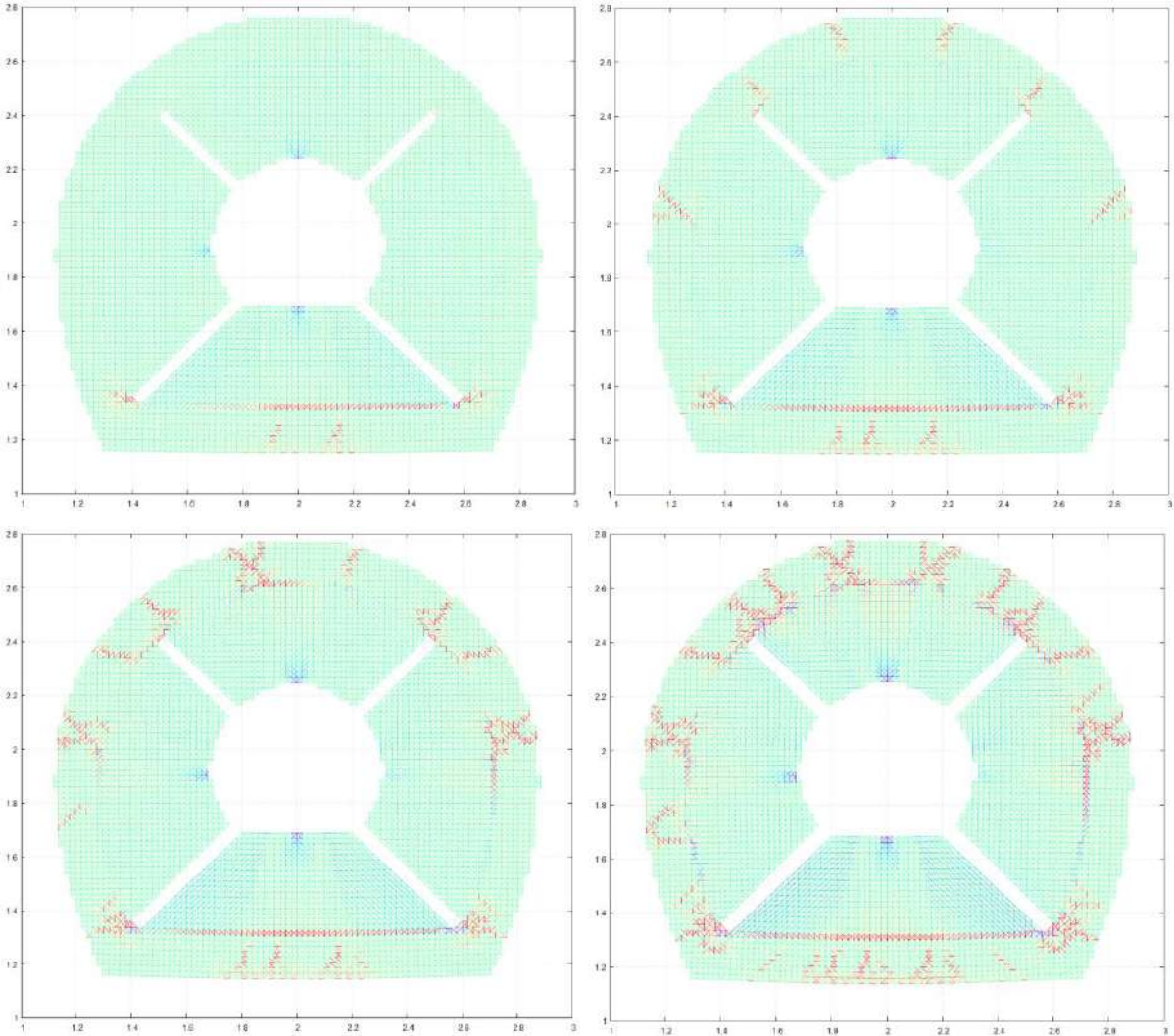
Şekil 3.33 a) Yatay yönde ölçülen dışa doğru deplasmanların toplamının tünelin yatay iç açıklığının uzunluğunun açılmasıyla mukayesesi. b) Düşey yönde ölçülen dışa doğru deplasmanların toplamının tünelin düşey iç açıklığının uzunluğunun açılmasıyla mukayesesi.



Şekil 3.34 İkinci deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları. Yükleme plakaları ve plaka rijitliğinin lokal değişimi, yükleme plakaları ve tünel kaplamasının iç arasındaki kauçuk bölge de modele dahil edilmiştir.



Şekil 3.35 Tünelin yatay ve düşey yönlereki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



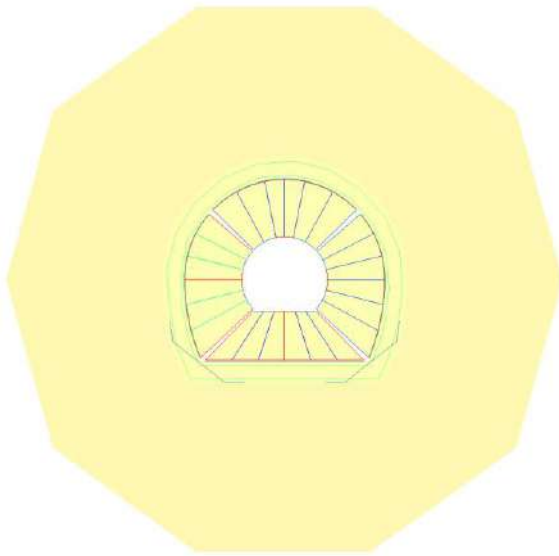
Şekil 3.36 Toplam uygulanan kuvvet 160 kN, 180 kN, 220 kN ve 250 kN olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).

3.4 Deney 3: Saha Gerilimleri Altında Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

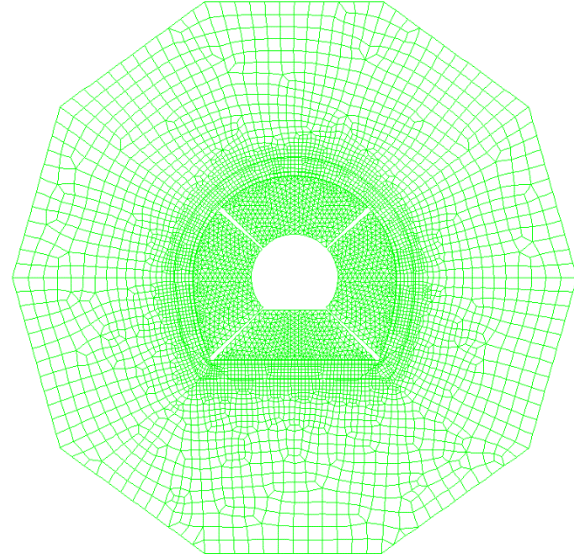
3.4.1 Öngermeli İyileştirilmiş Deney Düzeneğinin Tasarımı

İlk deneyde görülen numune davranışı, tünel kesitinin davranışının modellenmesinde kaya yapısının davranışının değişik bir şekilde ele alınmasının gerektiğini göstermiştir. Birinci deney sırasında 0.34 MPa iç basınçta kesit çevresindeki malzemede gevrek bir göçme görülmüş, oluşan çatlak yük arttırılmaya çalışıldığı sırada kaplama dış sınırına kadar ilerlemiştir. Deney düzeneğinde çatlakın ilerlemesini durduracak bir sınır koşulu veya basınç bölgesi bulunmadığı tespit edilmiştir. Düşük basınç altında olan kaya, ilk başta tünel kaplamasının rijitliğine katkı vermekle beraber kırılğan olduğu için bir süre sonra çatlamakta ve iç basınç bir anda tünel kaplaması tarafından taşınmaya başlamaktadır.

Daha yüksek ve temel olarak dominant basınç gerilmeleri altında çalışacak bir kesit için iyileştirilmiş bir deney tasarımının geliştirilmesi araştırılmaya başlanmıştır. Bu anlamda ilk adım mevcut deney düzeneğinde elde edilen gerilmelerin incelenmesidir. Bu amaçla birinci deneyde test edilen numunenin donatılarının eklenmesi ile olgunlaştırılarak son haline getirilmiştir (Şekil 3.37). Tünel kesitindeki radyal donatıların eklendiği bu sonlu eleman modeli çatlamamanın nedenlerini araştırma amacıyla kaya elemanları doğrusal, tünel kesiti ise doğrusal olmayan şekilde çalışacak biçimde incelenmiştir. İç çepere olan yükleme, yükleme plakalarından verilmekte olup yükleme hedeflenen 1 MPa iç basınç değerine kadar yapılmıştır.



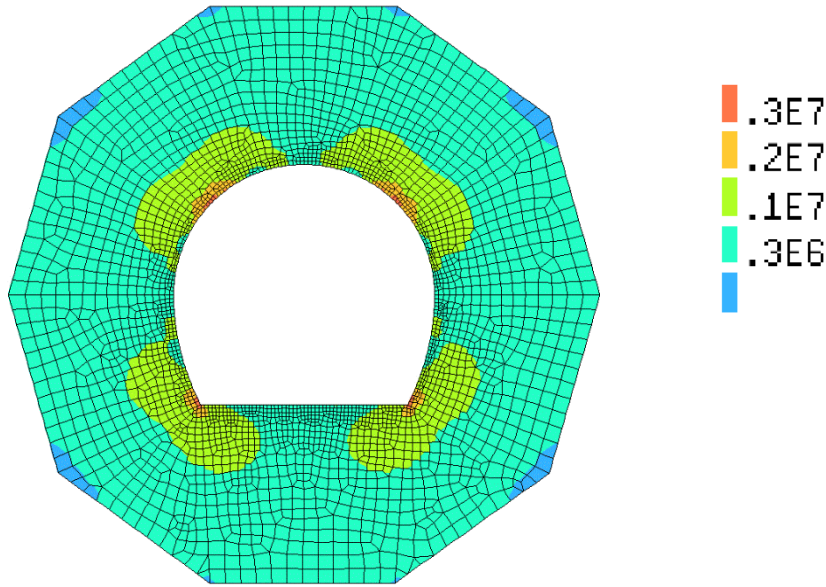
(a) Donatılar Eklenmiş Birinci Deney Numunesi Simülasyon Son Modeli



(b) Kaya, Tünel, Yükleme Elemanları ve Donatıları İçeren Sonlu Eleman Modeli

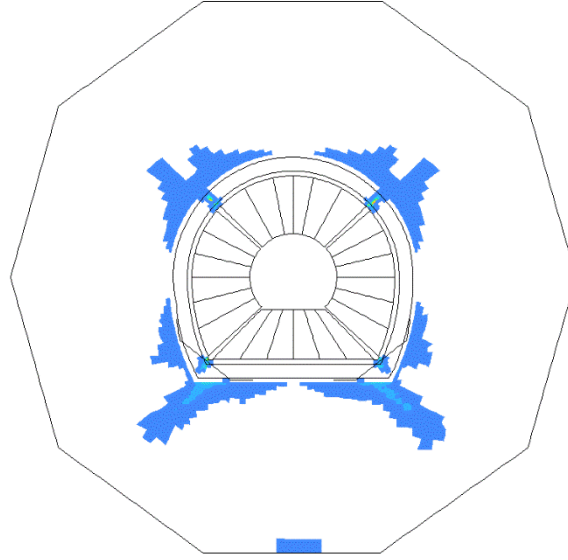
Şekil 3.37 Birinci deney numunesi için geliştirilen sonlu eleman modeli.

Kaya desteğindeki çatlamanın nedenlerini incelemek için yapılan bu analizde öncelikli hedef kaya bölgesinde elde edilen çatlamanın sebebi olan çekme gerilmelerini incelemektir. Tünel kesitine uygulanan basıncın 1 MPa olduğu son durumda kaya kesitinde elde edilen asal çekme değerleri aşağıda sunulmaktadır (Şekil 3.38). Görüldüğü üzere tam yük altında numunede tüneli destekleyen kaya elemanlarında oldukça büyük çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu değerler bu bölge için sınır olarak değerlendirilen 0.3-0.4 MPa çekme gerilmesi limitinin neredeyse her noktada üzerindedir. Özellikle köşe bölgelerde ise deneyde elde edilen davranışı yansıtan çok yüksek çekme gerilmeleri görülmektedir. Dolayısı ile model davranışı rijidite olarak desteği doğru yansıtmak ile birlikte düşük çekme gerilmesi nedeni ile gevrek davranışa sebep vermekte ve yükleme istenen seviyeye kadar gerçekleştirilememektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu çatlak durdurabilecek bir mekanizma ya da destek bulunmadığı için göçme gevrek olarak bir anda oluşmuştur.



Şekil 3.38 Çekme gerilmesi konturları (iç basınç 1.0 MPa).

Kaya elemanlarının bu durumda doğrusal olmayan modellenmesi ile çatlak oluşumu ve ilerleyişi sayısal olarak incelenmiştir. Silindir başına gelen kuvvet yaklaşık 130 KN değerine ulaşıncaya kadar numune yüklenilebilmekte ardından da gevrek bir şekilde elde edilen çatlak ilerlemesi durdurulamadığı için göçmektedir. Aşağıda görüldüğü üzere elde edilen çatlak bölgeleri ve ilerlemeleri deney ile uyumludur (Şekil 3.20 ve Şekil 3.21). Bu aşamanın üzerinde sonlu eleman modelinin de stabilitesini kaybetmesi sebebi ile yük fazla arttırılamamaktadır. Benzer bir durum birinci deneyde de gözlemlenmiştir. Elde edilen sonlu eleman metodu sonuçları birinci deney için geliştirilen sayısal OLM modeli sonuçlarıyla örtüşmektedir.

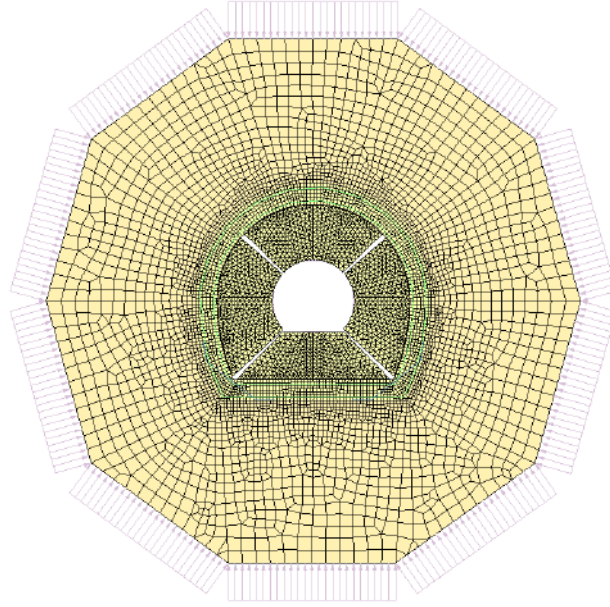


Şekil 3.39 130 KN büyüklüğünde silindirik kuvvet için gevrek göçme simülasyonu ve çatlak ilerlemesi.

Sistemde iç basınç nedeni ile oluşan yüksek çekme gerilmelerini karşılamaya yollarından biri destek için kullanılan malzemenin çekme gerilmesi sınırını arttırmaktır. Kaya desteği için bu tür bir malzeme tasarımı yapılması öncelikle denenmiş olup gereken çok yüksek çekme dayanımına sahip ama düşük elastisite modülüne sahip bir beton karışımı elde etmenin önünde homojen ve tekrar edilebilir davranış problemlerinden dolayı önemli engeller olduğu görülmüştür. Fiber içeren sünek karışımlarda gevrek çatlama davranışı görülmesi de gerilme sınırına ulaşıldığında artık elastisite modülünün yine sıfıra indiği, yani bu tür malzemede elde edilen kazanımın sadece artırılmış uzama kapasitesi olduğu belirlenmiştir. Tünel etrafında elde edilmesi hedeflenen rijiditeyi bu tür malzemeler de sağlayamamaktadır. Betona daha yakın malzemeler de çekme gerilmesi ve elastisite modülü arasındaki pozitif korelasyon sebebi ile zayıf modül ve yüksek çekme gerilmesi kombinasyonu sağlamamaktadır. Dolayısı ile numunedeki çatlama, yani çekme gerilmelerini engellemeye kayadaki mevcut basınç gerilmelerini modelleme olarak yapılması gerekliliği anlaşılmıştır. Zira gerçek ortamda kaya katmanları içindeki mevcut basınç durumu numunede olduğu gibi tünel iç basıncı ile gelişen radyal çekme isteminin kayada çekme gerilmesine dönüşmesine engel olmaktadır. Kaya katmanlarında asıl göçme davranışı üç eksenli basınç altında akma fenomenidir (Hoek-Brown göçme kriteri). Bu davranışı laboratuvarında simüle etmek için numunede kayanın mevcut durumundaki basınç halini elde etmek gerekmektedir.

Kaya içerisinde basınç gerilmesi durumunu elde etmek için en uygun çözüm numuneye öngerme uygulayarak içerisinde deneyden önce gerilme durumu sağlamaktır. Bu hedefin

gerçekleştirilebilmesi için ilk denemede mevcut numune geometrisinin dış çeperlerine 1.5 MPa basınç uygulanmıştır. Tünelin dış çeperine eşit olarak verilmesi ile bu değer kayada yaklaşık 60 m derinlikte kaya gerilme koşullarına denk gelmektedir. Düşey ve yatay gerilmeler aynı alınarak $K_0=1$ durumu incelenmiştir. Modelde kullanılan yük koşulları aşağıda sunulmaktadır (Şekil 3.40).



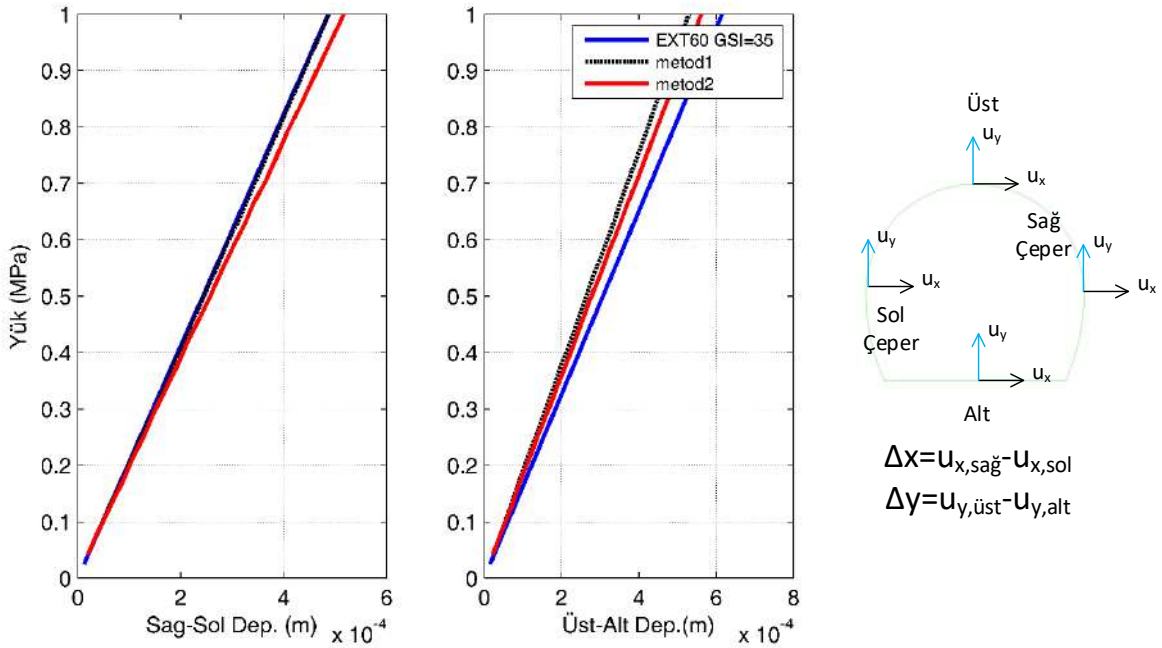
Şekil 3.40 Orijinal numune geometrisi ve sonu eleman ağı.

Numuneye öngerme yüklemesi yaparken gerek deney yapılabilirliği gerekse de gerçekçi yükleme koşullarının oluşabilmesi önemli koşullardır. Yani hem öngermenin laboratuvar ortamına yapılmasının mümkün olup olmadığı, hem de öngerme sisteminin gerçekçi bir şekilde saha gerilmelerini temsil edip etmediği kontrol edilmelidir. Kayakatmanları doğal koşulda basınç altındadır, tünel boşluğu açıldığında bu gerilme sadece lokal olarak sıfırlanmakta, tünel etrafında gerilme akımı devam etmektedir. Tünelin beton kesiti bu aşamanın ardından imal edilmektedir. Bu sürecin simülasyonu deney prosedürü bakımından oldukça zahmetlidir, zira öngermenin önce yapılıp içerde su basıncı yüklemesini yapacak mekanizmanın öngerme altında daha sonra imal edilmesini gerektirecektir. Bu prosedür hem zorluğu hem de yüksek öngerme kuvvetleri nedeni ile çalışanlar için tehlike yarabileceği kanısı ile deney sürecinde tercih edilmeyen bir yöntemdir (yöntem 1). İzlenebilecek bir diğer yöntem ise deney numunesi ve yükleme sisteminin daha önce olduğu gibi tam olarak kurulup ardından öngerme uygulanması ve iç basınç uygulamasına hemen geçilmesidir (yöntem 2).

Bu iki yöntemin uygulanabilirliği sonlu eleman metodu simülasyonları yardımıyla karşılaştırılmıştır. İlk yöntemin modellemesinde öncelikle kaya boşluk olmadan oluşturulmuş, öngerme uygulanmış, daha sonra boşluk oluşturularak çeperde gerilmeler sıfırlanmıştır. Ardından yükleme mekanizması oluşturularak iç basınç yükü öngerme altındaki sisteme

uygulanmıştır. Adımlı analiz ve eleman oluşturulması ile yapılan bu analizler ile modelde aşamalar sırasında artık gerilmeler oluşması engellenmiştir. İkinci yöntemin simülasyonunda ise numune ve yükleme mekanizması önceki gibi oluşturulmuş, sadece yükleme aşamasında önce öngerme, ardından da su basıncı numuneye aktarılmıştır.

Numunenin bu iki şekilde yüklenmesine göre simülasyonlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri aşağıda karşılaştırılmaktadır (Şekil 3.41). Karşılaştırılan gerçek durum ise $K_0=1$ altında çözülen GSI=35 kaya içerisinde açılan tünel yapısıdır. Ölçekli modelde yük-deplasman eğrisi deplasman ölçeğini kullanarak uygulanan iç basınca göre elde edilmiştir. Yük-deplasman eğrileri tünelin sağ-sol ve üst-alt çeperlerinin birbirine göre uzaklaşmasından hesaplanmıştır (Şekil 3.41). Görüldüğü üzere iki yükleme tipinde de yük-deplasman davranışı benzer bir davranış göstermektedir. Bununla beraber öngerme tamamlanmış numune üzerine uygulandığında betonarme kesit üzerinde de 0.5-1 MPa mertebesinde basınca yol açmaktadır. Dolayısı ile imalat sırasında iç kesit ile kaya çeperi arasında bir miktar açıklık bırakılması ile kesit üzerinde gerilme oluşmasının engellenmesi gerekmektedir. Bu tür bir imalat sahadaki gerçek koşullara denk gelmekte olup, tünel kesitinin açılmasının ardından betonarme imalatının yapılması ve kesit ve kaya arasındaki boşlukların beton şerbeti ile doldurulmasına karşılık gelmektedir.

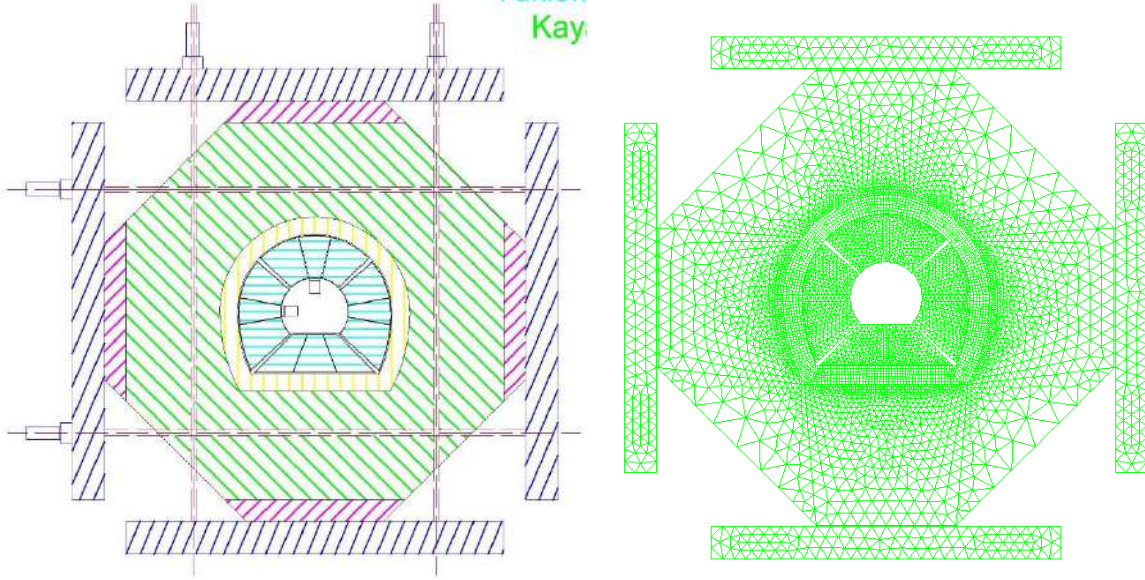


Şekil 3.41 Kritik noktaların yer değiştirmelerinin mukayesesi.

Öngerme sisteminin uygulanabilirliği numunenin imalatı ve deneyin yapılma süreci açısından önemli bir sorun olarak değerlendirilmiştir. Numunenin çevresine Şekil 3.40'da görüldüğü gibi öngerme yapılması oldukça zordur: zira bu amaç için gereken piston ve basma mekanizmaları proje bütçesinin çok üzerindedir. Kablo ile yapılacak germe işleminde ise bu büyüklük ve eğrilikte yapılacak germe sisteminde kayıpların çok büyük miktarda olacağı, bu ince kesitte basma plakası ve sargılama bölgesi imalatının da mümkün olmadığı saptanmıştır. Dolayısı ile numunenin öngermesinin sağlanması için laboratuvar ekipmanından bir destek sistemi imal edilmesi ve düz kablolar kullanılarak bir mekanizma kurulması kararı verilmiştir. Planlanan yükleme sistemi ve buna karşılık gelen simülasyonlarda kullanılacak sonlu eleman modeli aşağıda sunulmaktadır (Şekil 3.42). Kaya desteği basınç gerilmelerinin daha iyi yayılmalarını sağlamak için on kenarlıdan sekiz kenarlı bir sisteme dönüştürülmüş, bu kenarların dördünde büyük kırılganlık ile numuneye basınç uygulanması planlanmıştır. Numuneye basınç kullanılacak olan öngerme halatlarında aşamalı çekme sağlanması ile yine iç dengeyi sağlayacak türden yapılacaktır. Öngerme halatları sürtünmesiz olup numunenin zayıf olarak tasarlanan orta katmanı içerisinde bırakılacak boşluklardan geçecek şekilde planlanmıştır.

Bu yükleme mekanizmasının kurulmasında öncelikli şart kaya desteği içerisinde doğru rijidite sağlanırken çekme oluşmaması ve tünel kesitinde deney sırasında oluşabilecek çatlakların ilerlemesinin önceden oluşturulmuş olan basınç gerilmeleri ile engellenmesidir. Bu davranış için her germe halatına uygulanması gereken öngerme miktarı incelenmiştir. Sırası ile 100, 150, 250 ve 360 KN büyüklüğünde halat kuvvetlerinde sistemde oluşan gerilme durumu değerlendirilmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak 25, 40, 70 ve 100 m derinliklerinde $K_0=1$ durumundaki bir kaya katmanı içerisinde tünel açılmasına denk gelmektedir. Yükleminin dört yandan yapılması nedeni ile gerilme alanları yaklaşıktır.

Şekil 3.43'de değişik öngerme seviyelerinde numune üzerinde elde edilen asal çekme durumları görülmektedir. Görüldüğü üzere en alt öngerme seviyesinde tünelin çevresinde yeterli bir basınç eğrisi oluşmamaktadır. Öngerme miktarı arttıkça tünelin çevresini dönen bir basınç alanı elde edilmektedir. Asal çekme gerilmesinde basınç elde edilmesi ile kaya destek elemanlarındaki çatlamanın yokolması/azalması hedeflenmektedir. Sonuçlar 250 kN-360 kN arası bir öngerme yüklemesinin kayadaki çatlamanın engellenmesi için yeterli olduğunu göstermektedir.



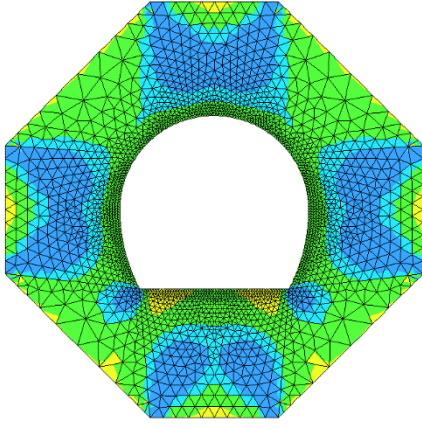
(a) Tasarlanan Numune Sistemi

(b) Sonlu Eleman Modeli

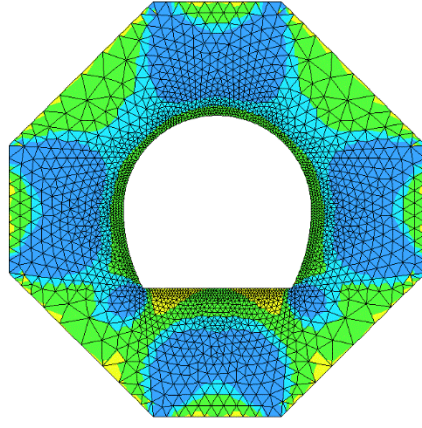
Şekil 3.42 Deneysel kurulumunun modeli.

En düşük ve en yüksek öngerme değerlerinde %100 su basıncı uygulandığı durumlarda kaya desteğinde elde edilen çatlama durumu Şekil 3.44'de sunulmaktadır. 100 kN öngerme kuvveti uygulandığı durumda birinci deneyde elde edilen çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar durdurulamamakta olup yükün bir miktar artması durumunda bütün numune boyunca kenarlara erişmektedir. Öte yandan 360 kN olarak öngerme uygulanan diğer sistemde ise tam su basıncının uygulandığı durumda lokal olarak tutulan çatlak yükün %50 arttırımı durumunda bile gelişmemekte ve mevcut lokasyonunda kalmaktadır. Dolayısı ile deneyin yapılabilmesi amacı ile güvenli tarafta kalınması için öngerme miktarının 300 kN civarında olması tercih edilmiştir.

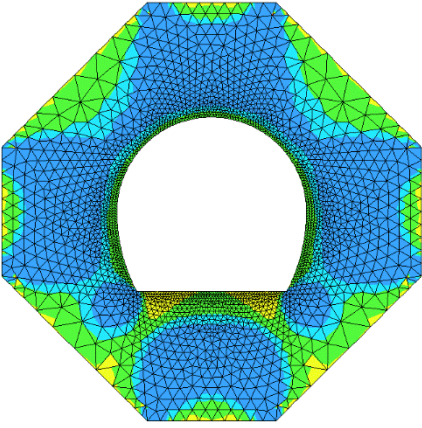
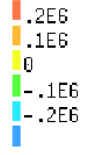
Yüksek öngerme kuvvetinin numune üzerinde oluşturduğu yükleme noktalarından dolayı olan etkiler de deneyin yapılması sırasında göz önüne alınmalıdır. Şekil 3.44'de görüldüğü üzere yükleme kirişlerinin numuneye basması nedeni ile numune üzerinde çekme bölgeleri oluşmaktadır. Bunu yanında yükleme kirişlerinin yükü aktardığı noktalarda da yüksek basınç gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Bu davranışların deney sırasında problem yaratmaması amacı ile numunenin öngerme kirişlerinin oturduğu bölgelerinde katmanlı bir yapı yerine normal 20 cm derinliğinde 20 cm uzunluğunda basit yaslanma bölgeleri yapılması planlanmıştır. Bu sayede deney sırasında olabilecek lokal göçme davranışlarının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.



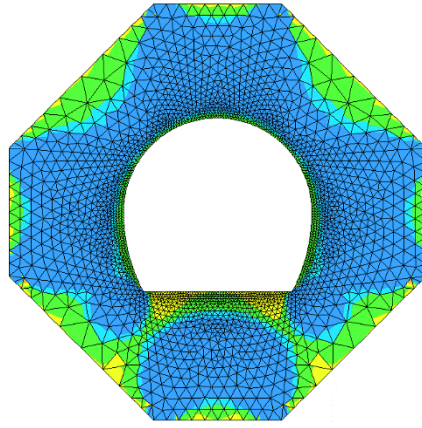
(a) 100 KN Halat Kuvveti



(b) 150 KN Halat Kuvveti



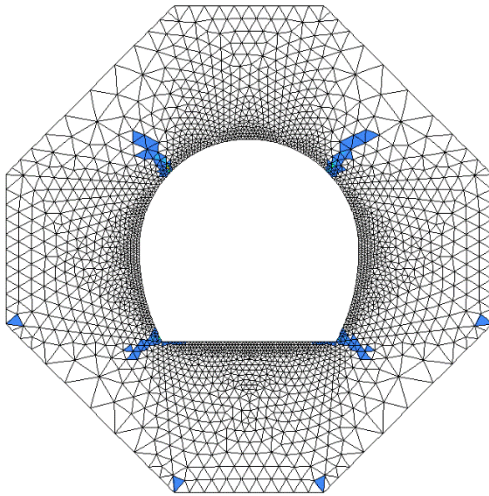
(c) 250 KN Halat Kuvveti



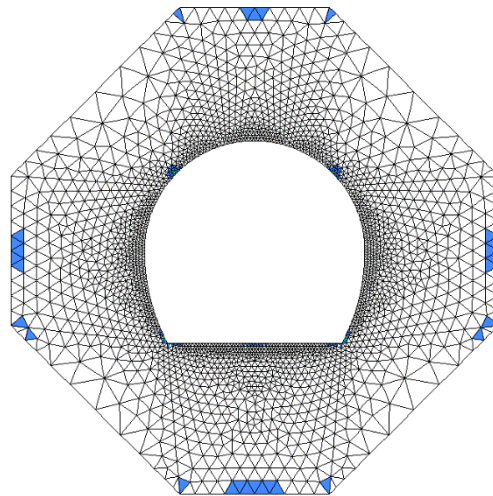
(d) 360 KN Halat Kuvveti



Şekil 3.43 Öngerme yüklemesi altında asal çekme gerilmeleri



(a) Düşük öngerme (100 KN)

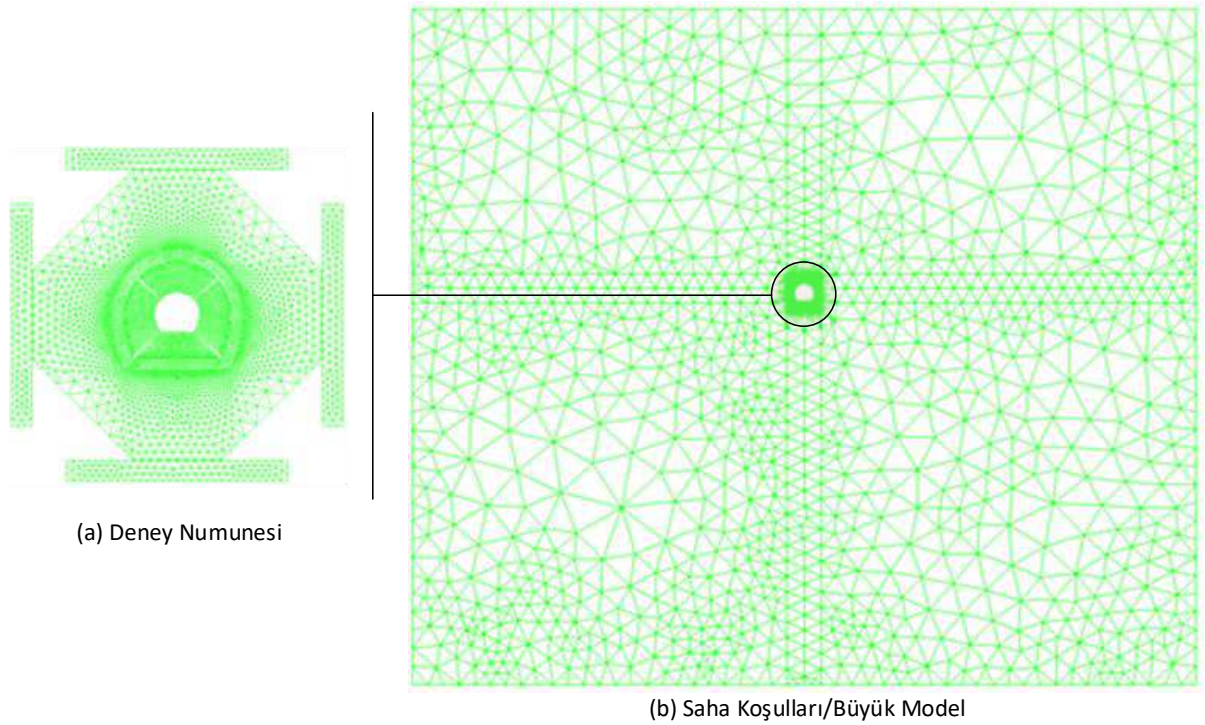


(b) Yüksek öngerme (360 KN)

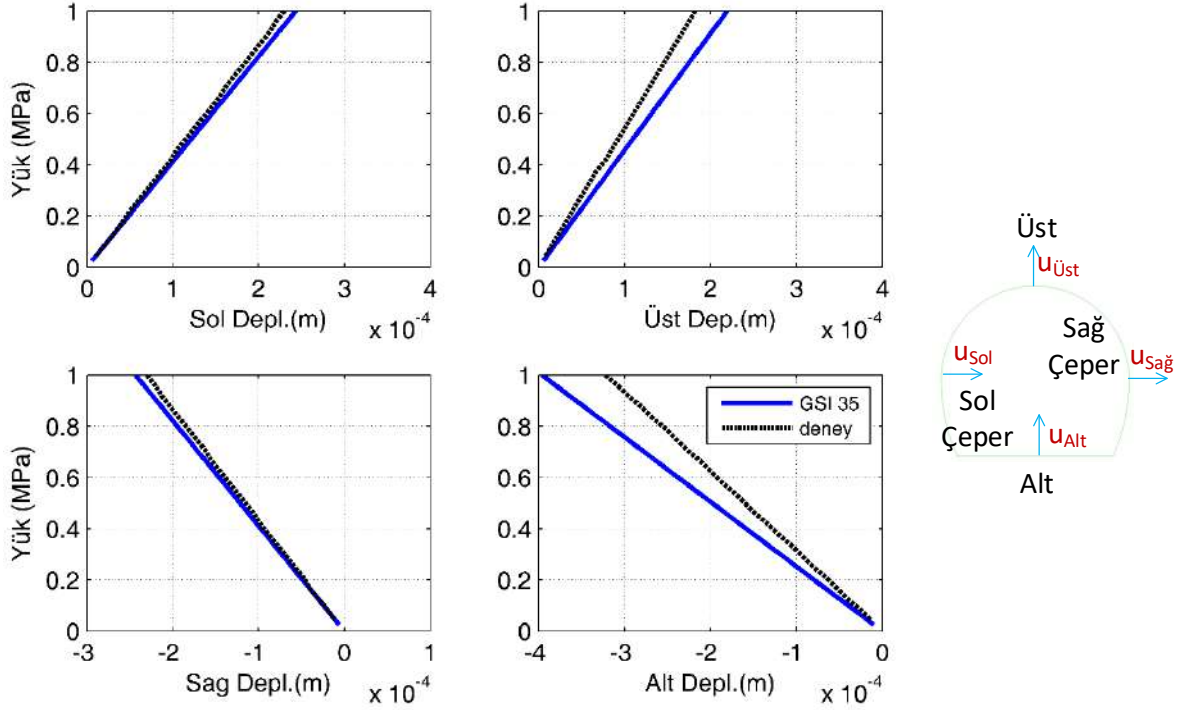
Şekil 3.44 Kaya katmanında tahmin edilen hasar dağılımı.

Modelin uygunluğunu incelemek için deney numunesinin yük-deplasman eğrisi mevkide yapılacak tünelin yük-deplasman eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Gerçek modelde kaya

elemanları Hoek-Brown malzeme modeli ile modellenmiş, deney numunesinde ise yapıma uygun olarak düşük çekme gerilmesi limitli (0.3 MPa) ve düşük elastisite modüllü (8 GPa) beton kullanılmıştır. Öngerme yukarıda önerildiği gibi deney numunesine uygulanmıştır. Saha koşullarını yansıtan büyük model ise tünel çeperinden her yöne tünel çapının 40 kat büyütülmesi ile hazırlanmış ve tünel kesitinin 5 aşamada açılması ile çözülen bir sonlu eleman modelidir (Şekil 3.45). Bu modelde UCS, GSI, mi ve Ei değerleri sırası ile 100 MPa, 35, 25 ve 40 GPa olarak alınmış olup kayanın deformasyon modülü yaklaşık 4.5 GPa olarak elde edilmektedir. İki modelden alınan yük-deplasman eğrileri 1 MPa iç basınca kadar tünelin üst/alt/sağ/sol çeper noktalarında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar büyük model ile deney numunesi arasında oldukça benzer yük-deplasman davranışı elde edildiğini göstermektedir. Üst-alt davranışında deney numunesi az da olsa biraz daha rijit tepki vermektedir (Şekil 3.46). Numunenin kaya destek bölümünün deney sırasında prematüre çatlamaasının ve yük-deplasman eğrilerinin kabul edilebilir ölçülerde sahadaki koşulları yansıtmasının sağlanması ile deney düzeneği son haline getirilmiştir.



Şekil 3.45 Orijinal numune geometrisi, öngerme yüklemesi



Şekil 3.46 Deney numunesi ile büyük model simülasyonu, yük-deplasman karşılaştırması.

3.4.2 Deney Düzeneğinin İmalatı

Kaya katmanının dış sınırını oluşturacak kalıplar, ilk deneydeki ongen kalıplar tekrar kullanılarak sekizgen oluşturacak şekilde değiştirilmiştir. Deney geometrisinin genel görünüşü Şekil 3.47’de, boyutların detaylı bilgileri Şekil 3.48’de verilmiştir. Bu değişiklik yapılırken kaplamanın dışından kaya katmanının dışına olan en kısa uzaklık ilk deney ile aynı (82 cm) tutulmuştur.

Saha gerilimlerini deney düzeneğinde yaratılmasını sağlaması için HEA360 kirişler kullanılmıştır. I kirişlerin germe halatları ile sıkıştırılması için kirişler delinmiş ve güçlendirilmiştir. Saha gerilimlerini deney düzeneğine uygulayacak I kirişlerin kaya katmanını ezmemesi amacıyla 20 cm kalınlığında yaslanma betonu deney günü mukavemetini tam alması amacıyla deneyden yaklaşık bir ay önce dökülmüştür. Yaslanma betonunun detayları Şekil 3.49’da verilmiştir. Yaslanma betonunun dökülmeden önceki deney düzeneğinin görünümü Şekil 3.50’de görülebilir.

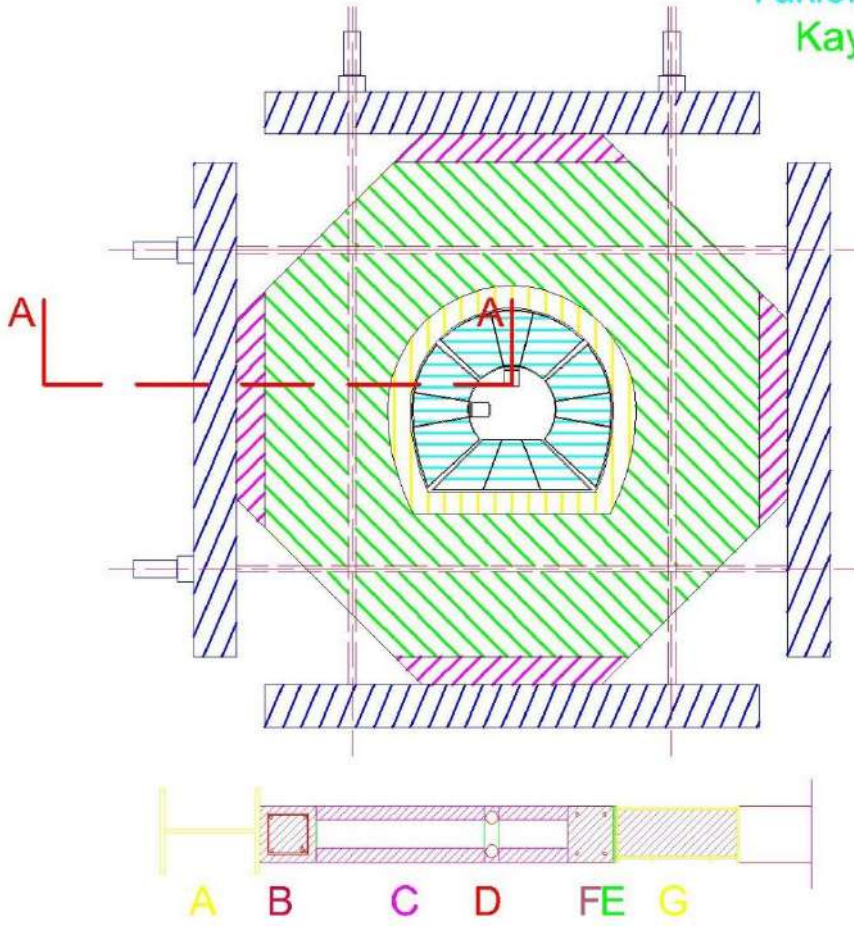
Yaslanma betonunun iç tarafında birinci deneyde kullanılan üç katmanlı kompozit malzeme kullanılmıştır. Gazbeton bloklar deneyin yeni geometrisine göre şekillendirilmiş ve 6*80 vidalar yardımı ile yerden 5 cm yükseltilmişlerdir. Birinci deneyden farklı olarak Şekil 3.51’de gösterilen germe halat akslarına dış çapı 32 mm olan PPRC borular yerleştirilmiştir. Bu halat

yatakları, kaya katmanında düzlem dışı kuvvet ve moment yaratmamaları için düşey yönde merkezleri yerden 4 ve 16 cm, yatay yönde ise 8 ve 12 cm olacak şekilde düzenlenmiştir. Böylece halatların yük bileşenlerinin 20 cm derinliğindeki kesitin ortasında ve kesit düzlemine paralel olması sağlanmıştır. PPRC borular ve gazbeton bloklar kalıba oturtulduktan sonra çıkartılmış ve kaya katmanını saha gerilimine getirecek her iki yönde yapılacak olan basınç yüklemesinin tünel kaplamasına etki etmesini önlemek amacıyla iç kalıbın dış tarafına 1 cm kalınlığında ambalaj köpüğü yerleştirilmiştir (Şekil 3.52).

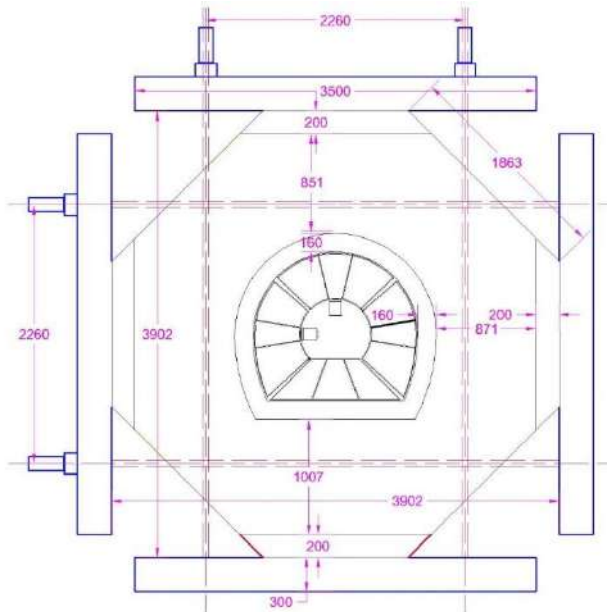
Kalıp, köpük ve bir kısmı alt betonun içinde kalacak PPRC boruların betona yapışmaması için yağlanarak alt betonun dökümüne başlanmıştır. Alt beton katmanı döküldükten hemen sonra gazbeton bloklar yerleştirilmiş ve birinci deneyde olduğu gibi blokların üzerinde bulunan vidalar yardımıyla katmanların beraber çalışması hedeflenmiştir. Şekil 3.53'de görülebileceği gibi üst beton dökümünden önce gazbeton blokların üstleri vidalanmış ve kalan PPRC borular yerleştirilmiştir. Daha sonra da üst beton katmanı dökülmüştür. Tünel kaplaması, ilk iki deney ile aynı geometri, donatı ve kompozisyona sahiptir. Tünel kaplaması döküldükten sonra yapılacak olan öngermenin tünel kaplamasına etki etmesini önlemek amacıyla yerleştirilmiş olan köpük çıkartılmış ve tünel kaplamasının hemen dışında bir boşluk oluşturulmuştur (Şekil 3.54). Bu boşluk öngermenden sonra tamir harcı ile doldurulmuştur. Yaslanma betonu, kaya katmanlarına ve tünel kaplamasına ait beton kompozisyonları Tablo 3.5'de verilmiştir. Deney düzeneğinin öngörme uygulanmadan önceki hali Şekil 3.55'de gösterilmiştir.

Kaplamanın dışını saran kaya katmanı, sahadaki kayaya yakın davranış gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak davranışın doğrulanması için deneysel bir çalışma yapılması gerekli görülmüştür. Deney numunesinde kullanılan beton karışım oranları kullanılarak üç adet numune dökülmüştür (Şekil 3.56). Basınç testi yapılırken gerilim 2.5 MPa seviyesine ulaşana kadar hareketin beraber olduğu görülmüştür. Beton ve gazbetona takılmış üç LVDT ile ölçümler alınmış, kapasitenin yüzde kırkına kadar olan okumaların ortalamaları ile elastisite modülü hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda elastisite modülü ilk yüklemde yaklaşık 12 GPa, ikinci yüklemdeyse yaklaşık 10 GPa olarak ölçülmüştür.

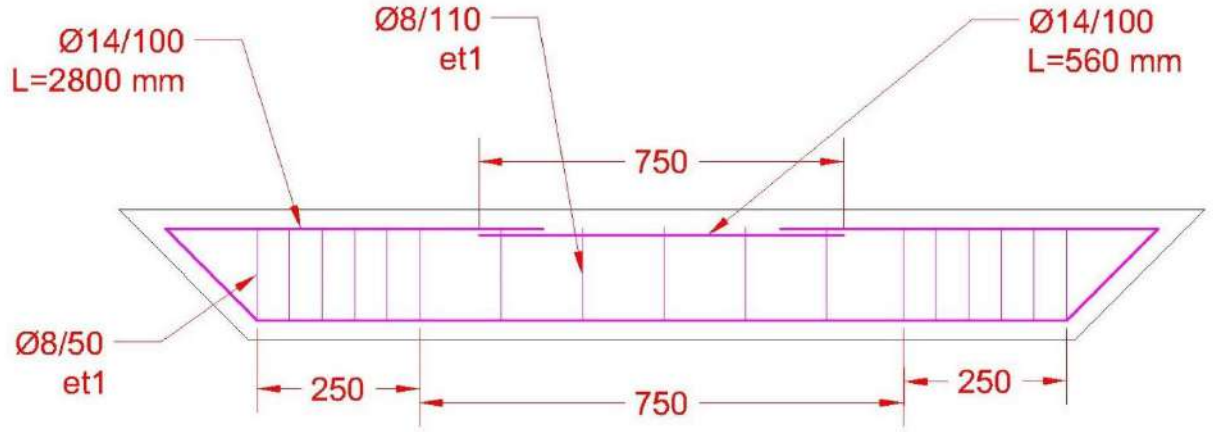
Yaslanma Betonu
Yükleme Plakası
Kaya Katmanı
Kaplama
I Kiriş



Şekil 3.47 Üçüncü deneyin genel krokisi (A. I çelik kiriş, B. yaslanma betonu, C. kaya katmanı, D. öngörme halat aksı, E. kauçuk, F. beton kaplama, G. yüklem plakası).



Şekil 3.48 Üçüncü deney düzeneğinin imalatında kullanılan boyutlar.



Şekil 3.49 Yaslanma betonunda kullanılan donatı detayı.



Şekil 3.50 Sekizgen kalıp ve yaslanma betonu donatısı.



Şekil 3.51 Yaslanma betonu döküldükten sonra yapılan hazırlıklar.



Şekil 3.52 Kaya katmanı ile betonarme tünel kaplaması arasında daha sonra çıkarılmak üzere yerleştirilen yaklaşık 1 cm kalınlığındaki köpük katman.



Şekil 3.53 Üst beton katmanının dökümünden önce yapılan hazırlıklar.



Şekil 3.54 Tünel kaplamasının öngerme esnasında yük almasını engelleyecek boşluğun oluşturulması.



Şekil 3.55 Öngerme düzeneğinin yerleştirilmiş hali.

Tablo 3.5 Yaslanma betonu, kaya katmanı ve tünel kaplaması için kullanılmış beton karışım oranları.

Beton Bileşeni	Karışım Oranı (kg/m ³)		
	Yaslanma Betonu	Alt ve Üst Beton Katmanları	Tünel Kaplama
Çimento CEM II/B-M (P-L) 32.5R	0	240	0
Çimento CEM IV/B-M (P-L) 42.5R	350	0	420
Su	170	240	230
Kum	750	1075	775
Çakıl	900	760	900
Ace 450	1.75	0	0.75
Hedeflenen f_c (MPa)	30	10	25



Şekil 3.56 Kaya yerine kullanılan malzemenin özelliklerini ölçümü için hazırlanan numuneler.

3.4.3 Ölçüm Sistemi

Deneyde kullanılacak ölçüm sistemi 24 adet gerinim pulu, adet yük hücresinden ve 10 adet LVDT'den oluşmaktadır. Gerinim pullarının 10 adedi 6 cm uzunluğundadır. Yerleştirildikleri noktalar Şekil 3.57 de gösterilmiştir. Kaya katmanında kaplamanın hemen dışında 6 adet 12 santimlik gerinim pulu kullanılmıştır (Şekil 3.57). Kaplama donatısının üzerinde bulunan Şekil 3.58'de gösterilmiş noktalara 8 adet 10 milimetrelik gerinim pulu yapıştırılmıştır. Gerinim pulunun donatıya yapıştırılmış hali Şekil 3.59'da görülmektedir. Bu pullar saat 3 ve 9 yönleri dışında gösterilen her noktada birer adet olarak üst donatıya, saat 3 ve 9 yönlerindeyse kontrol amaçlı kullanmak üzere hem üst hem alt donatıya uygulanmıştır. LVDT'ler ilk deneye benzer şekilde yerleştirilmiştir. İlk iki deneyde yükleme sisteminin içinde bulunan 2 adet yük hücresine ek olarak öngerme halatlarındaki gerilimi ölçebilmek amacıyla I kirişlerin arkasına ikisi 100 ton kapasiteli (yatay yönde), dördü 30 ton kapasiteli (düşey yönde) toplam 6 adet yük hücresi yerleştirilmiştir.

Birinci ve ikinci deneyde gerinim pullarından kısıtlı ölçüde faydalanabilmiştir. Bunun temel nedeni gerinim pullarının yerleştirildikleri yerlere göre oldukça farklı değerler okuyabilmesi ve çatlakların oluşmaya başlamasından sonra yük dağılımının ani bir şekilde değişmesinden dolayı kaydedilen gerinim değerlerinin anlamını yitirmesidir. Deneylerde gerçekleşen yer değiştirmelerin büyük ölçekte sürekli olarak ölçülebilmesi amacıyla dijital görüntü korelasyonu (Digital Image Correlation, DIC) metodunun kullanılmasına karar verilmiştir.

DIC yöntemi iki veya daha fazla dijital görüntünün birbirleriyle kıyaslanarak görüntü üzerindeki her bir noktanın yer değiştirme miktarını ölçmek üzerine kurulmuştur. Bu yöntemle iki veya üç boyutlu elemanların yüzeylerinde yer değişimi ve gerinim ölçümü yapmak mümkündür. İki boyutlu ölçümlerde deneysel elemanın sabit zaman aralıklarında tek kamerayla karşıdan görüntü alınması yeterli olurken, üç boyutlu ölçümlerde ise stereo görüntü işleme yöntemi kullanılarak iki adet kameranın belirli açılarla görüntü alıp, aynı zaman adımlarında alınan

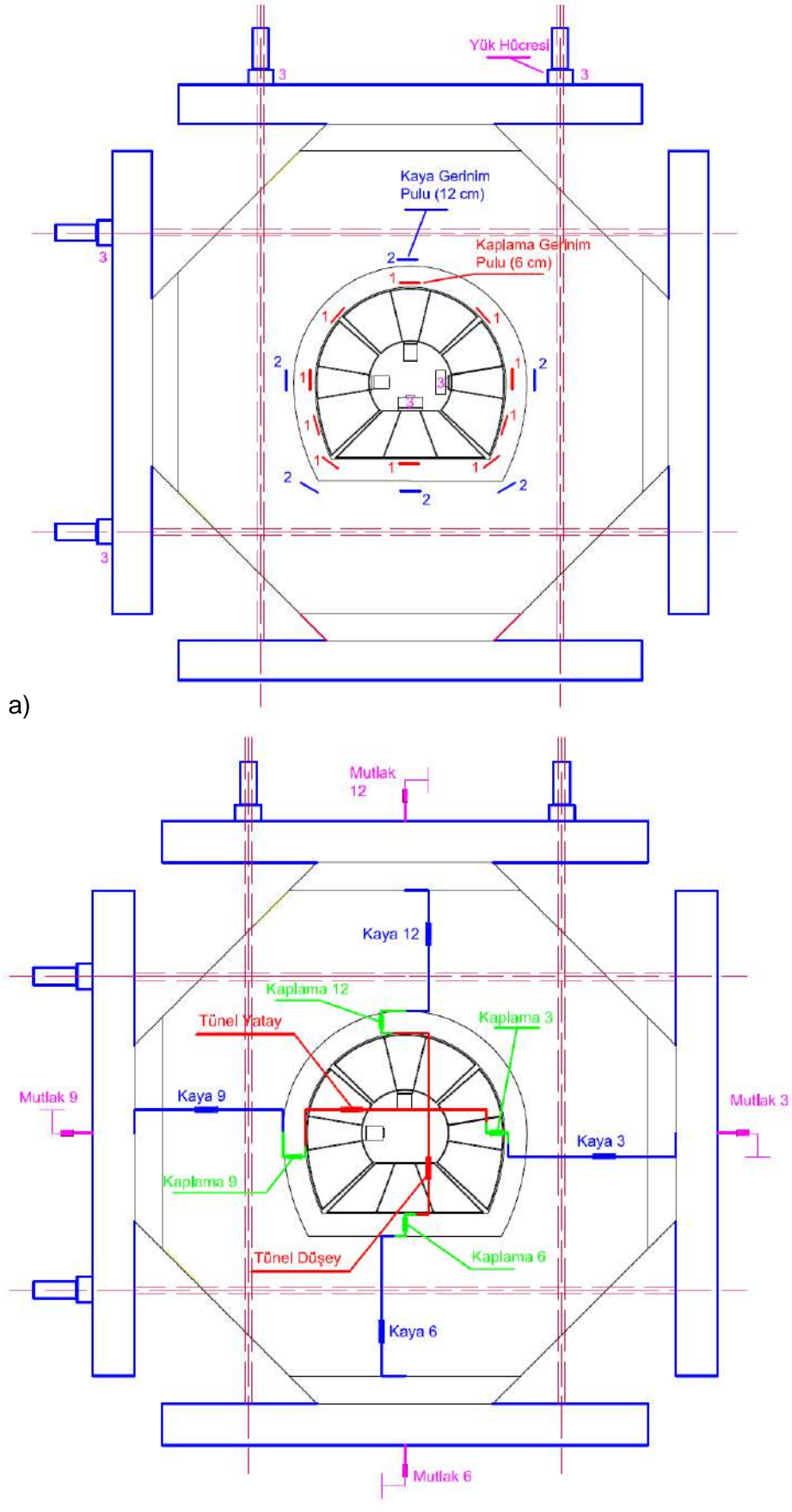
görüntülerin beraber işlenmesi gerekmektedir. DIC yöntemi genel olarak üç ana aşamadan oluşmaktadır:

- 1) Test düzeneğinin ve numunenin hazırlanması
- 2) Görüntü yakalama
- 3) Görüntü işleme yöntemleri kullanılarak yer değiştirme ve gerinim hesabı

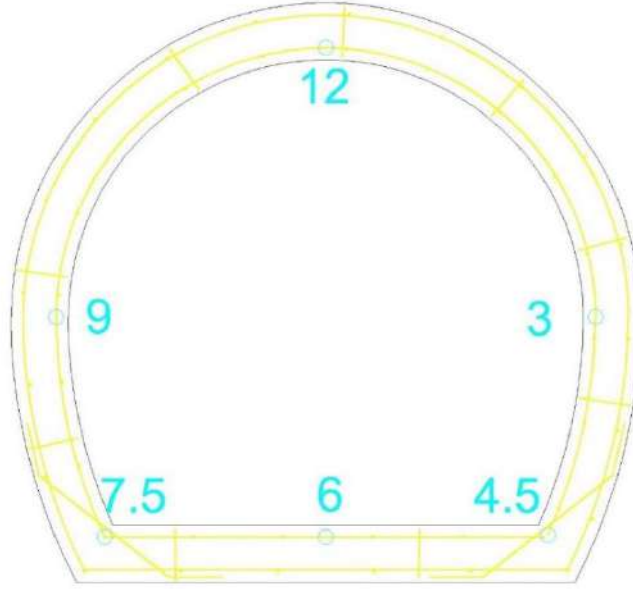
Dijital görüntü korelasyonu yönteminin kullanılabilmesi için ilk olarak deney numunesinin görüntülenecek olan yüzeyinin siyah ve/veya beyaz boya ile rastgele benekler oluşacak şekilde (Romeo 2013, Gajewski ve Garbowski 2014, Buttlar ve diğerleri 2014) boyanması gerekmektedir. Görüntülenecek yüzeydeki beneklerin özellikleri ölçümün hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Pan ve diğerleri (2008) aynı özelliklere sahip numunelerin farklı kişilerce boyanması sonucu aynı benek dağılımını yakalamak mümkün olmadığını ve bu durumda aynı teste maruz kalan numunelerin sonuçlarının da farklı olmasına sebep olduğunu belirtmiştir. Benekler yüzey üzerinde homojen olarak dağılmalı ve boyut olarak mümkün olduğunca küçük olmalıdır (Romeo 2013). Benek boyutlarıyla ilgili daha detaylı hesaplamalara (Sutton ve diğerleri 2009) tarafından çalışılmıştır. Bunların yanı sıra, yüzey üzerindeki beneklerin deformasyona karşı direnç göstermemesi için boya kalınlığı yeterince ince olmaları gerekmektedir (Romeo 2013, Buttlar ve diğerleri 2014).

Deney esnasında numuneye herhangi bir temasa ihtiyaç olmaması bu yöntemi oldukça popüler kılmaktadır. Literatürde pek çok uygulamada dijital görüntü korelasyonu yöntemi başarı ile uygulanmıştır. Örnek olarak asfalt numunenin yer değiştirme ve gerinim ölçümünde (Romeo 2013), betonun malzeme parametrelerinin kalibrasyonunda (Gajewski ve Garbowski 2014), taşıyıcı olmayan duvarların davranışlarını incelemede (Guerrero ve diğerleri 2014), eski binaların kolonlarının çelik plakalarla güçlendirilmesinde (Tung ve diğerleri 2014), uçak kanadı deformasyonu incelemede (Li ve diğerleri 2014), çatlak mekaniği testlerinde (Pitti ve diğerleri 2014), duvar kağıdı deformasyonun ölçümünde (Lennard ve Delieu-Barton 2014), yumuşak doku davranışının incelenmesinde (Sun ve diğerleri 2013) dijital görüntü korelasyon yöntemi başarıyla kullanılmıştır.

Tünel deneylerinde en az iki adet DSLR kamera ve bir aydınlatma cihazı kullanılmıştır. İki kolon ve bir giriş yardımı ile dört metrelik numunenin hareketinden etkilenmeyecek şekilde takılan kameralar, gerilim yoğunlaşma bölgelerini en fazla yedi saniyede bir kaydetmiştir (Şekil 3.60). Yükleme adımları da bu frekansa uyacak şekilde ayarlanmış ve her yük adımında yeteri kadar fotoğraf çekilmesi beklenmiştir. Numune, pencere önünde ve çoğunlukla aydınlık olmasına rağmen yapay ışıklandırma yapılması gerekli olmuştur. Bunun sebebi, doğal ışığın ortalama deney süresi olan 30 dakika içerisinde değişiklik gösterebilmesidir. Yeterli sabit ışık sağlayabilmek adına bir adet led spot iki kameranın ortasına sabitlenmiştir.



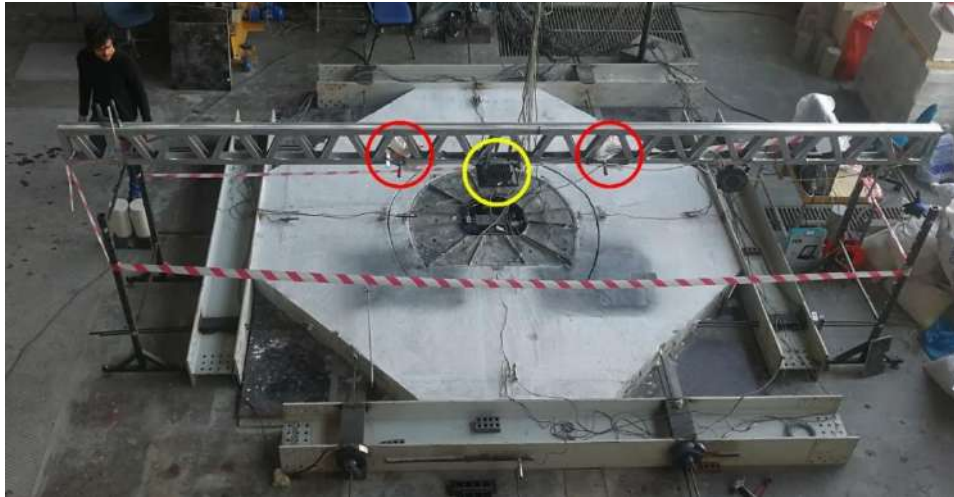
Şekil 3.57 a) Üçüncü deneyde kullanılan gerinim pulları ve yük hücreleri, b) LVDT ölçüm yerleri.



Şekil 3.58 Kaplama donatısına yapıştırılan gerinim pullarının yerleri. Rakamlar saat yönlerini temsil etmektedir.



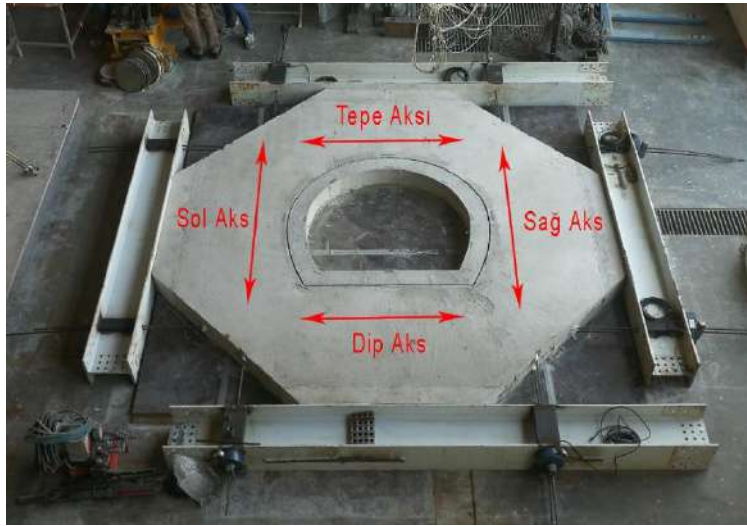
Şekil 3.59 Donatı üzerine yapıştırılmış gerinim pulu.



Şekil 3.60 Üçüncü deneyde DIC için kullanılan fotoğraflama sistemi: DSLR fotoğraf makinaları (kırmızı) ve led spot (sarı).

3.4.4 Kaya Katmanına Öngerme Uygulaması

Düsey ve yatay yönlerde karşılıklı bulunan çelik kirişler, toplam sekiz öngerme halatı ile birbirlerine sistemin içinden bağlı bulunmaktadır. Sekiz adet öngerme halatına ihtiyaç duyulmasının sebebi numuneyi muntazam bir şekilde yükleyebilmektir. Ancak yükleme aparatlarının şekli sekiz öngerme halatının eşzamanlı gerilmesini imkânsız hale getirmektedir. Aynı aksta bulunan iki öngerme halatı da aynı anda yüklenememektedir (Şekil 3.61), bu durumun numunenin eğilmesine yol açacağı öngörüldüğü için uygulamanın küçük yük basamakları ile yapılması planlanmıştır. Tek bir çelik kirişin iki tarafındaki öngerme halatlarının sıra ile yüklenmesi durumunda, çelik I kirişin döneceği düşünülmüş, bu sebepten ötürü her bir öngerme halatının paralel aksta bulunan simetrik karşılığıyla beraber yüklenmesine karar verilmiştir.

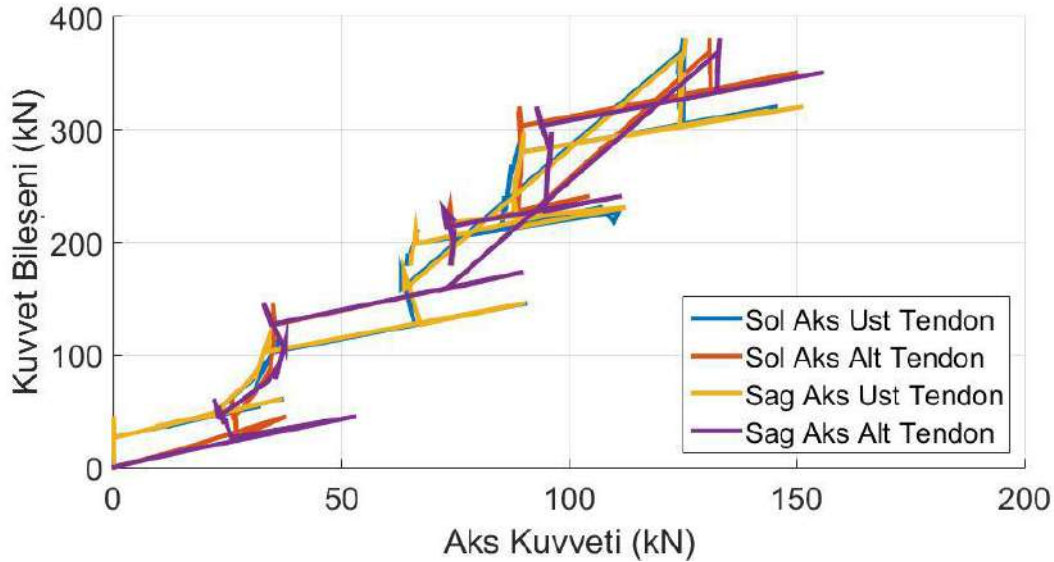


Şekil 3.61 Öngerme düzeneğinin yerleştirilmiş hali ve öngerme aksları. Şekillerde bu terminoloji kullanılmaktadır.

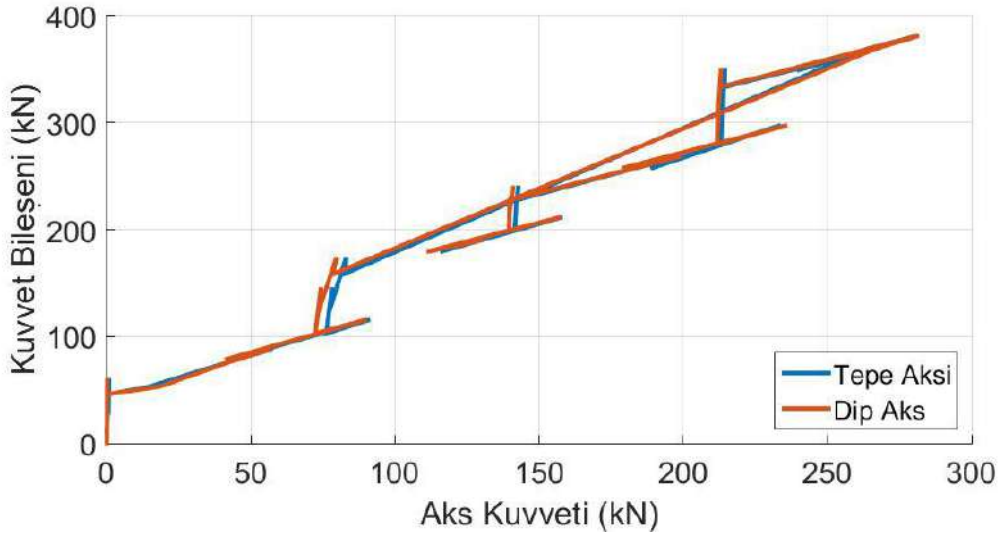


Şekil 3.62 Öngerme uygulaması. Aynı anda iki halata öngerme uygulanarak meydana gelecek dönme etkisi minimize edilmiştir.

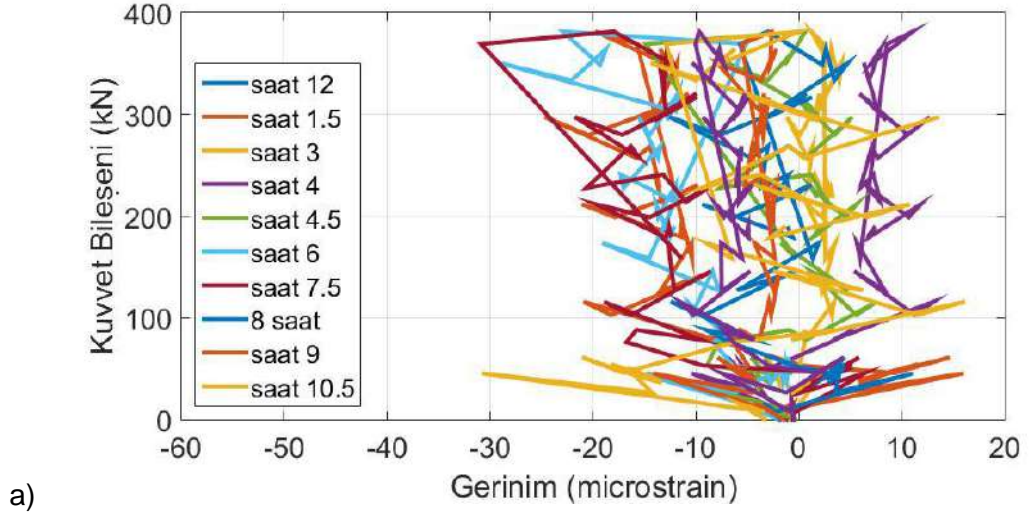
Tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra öngerme uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.62). Aks başına 250 kN uygulanması hedeflenmiştir. Her aksta iki adet öngerme halatı bulunduğu için halat başına 125 kN düşmektedir. Bu yük 30 kN büyüklüğünde dört basamakta verilmiştir (Şekil 3.63 ve Şekil 3.64). Yükleme ilk basamağı sırasında kaya katmanında çekme çatlakları oluşmuş ancak karşılıklı yüklemeler sonucunda tüm çatlakların kapandığı gözlemlenmiştir. Yükleme sırasında boşlukla kaya katmanından ayrılan kaplama üzerinde en fazla 30 μ gerinim oluşmuştur (Şekil 3.65). Öngermenin verilmeye başlamasıyla oluşan yöne bağlı farklılıklar düşey ve yatay öngerme kuvvet oranının bire ($K_0=1$) yaklaşmasıyla kaybolmaktadır (Şekil 3.65b). Numunenin saha gerilimlerine getirilmesi sırasında ortalama mutlak boyut kısılması her yönde yaklaşık 4 mm büyüklüğünde olmuştur (Şekil 3.66).



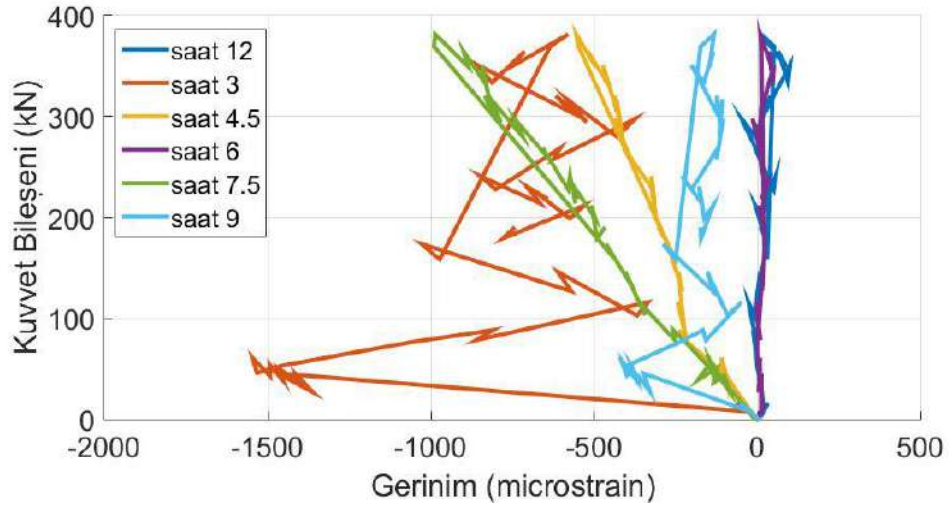
Şekil 3.63 Düşey tendon kuvvetlerinin öngerme uygulaması ile değişimi. Düşey yönde her aks için iki yük hücresi kullanılmıştır.



Şekil 3.64 Yatay aks kuvvetlerinin öngerme uygulaması ile değişimi. Yatay yönde her aks için iki yük hücresi kullanılmıştır.

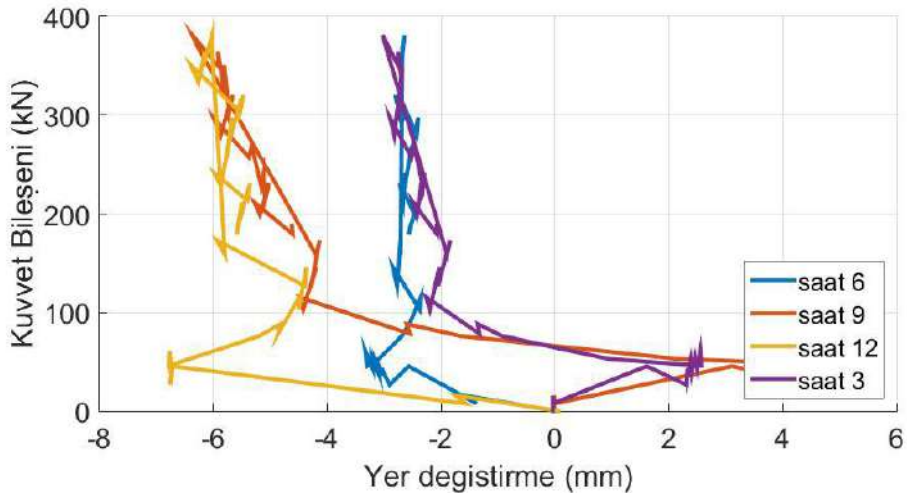


a)



b)

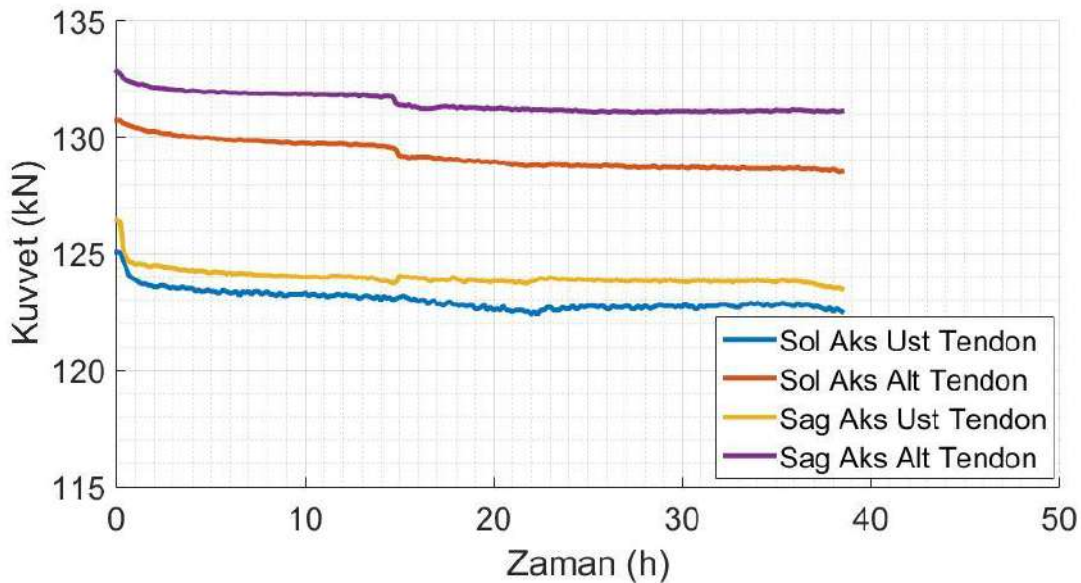
Şekil 3.65 a) Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler, b) kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler.



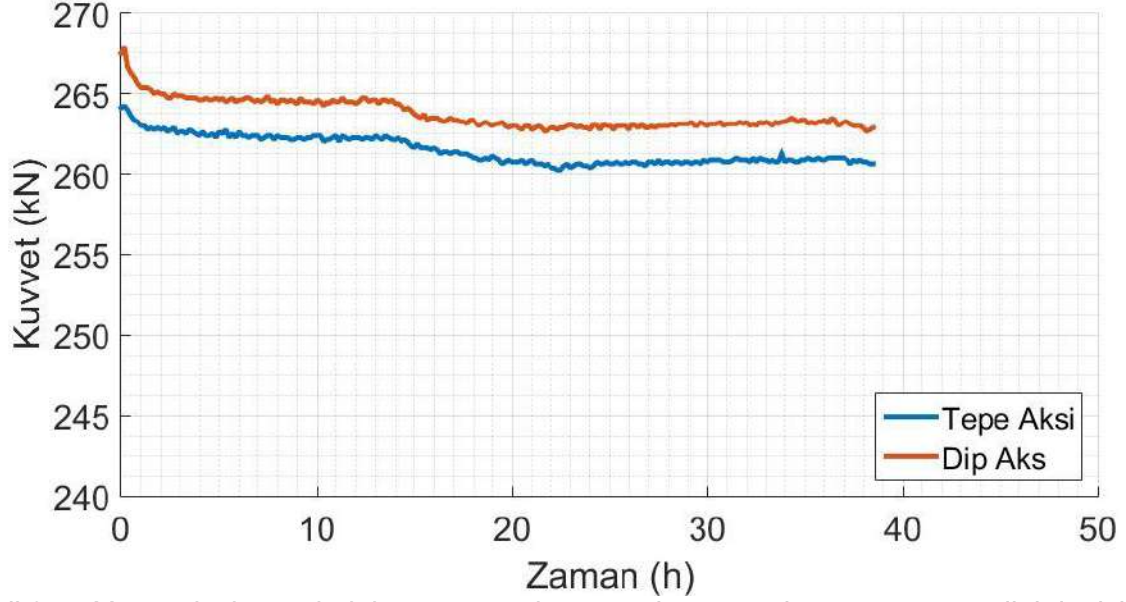
Şekil 3.66 Mutlak yer değiştirmelerin öngerme kuvvetiyle değişimi.

3.4.5 Öngerme Kontrolü

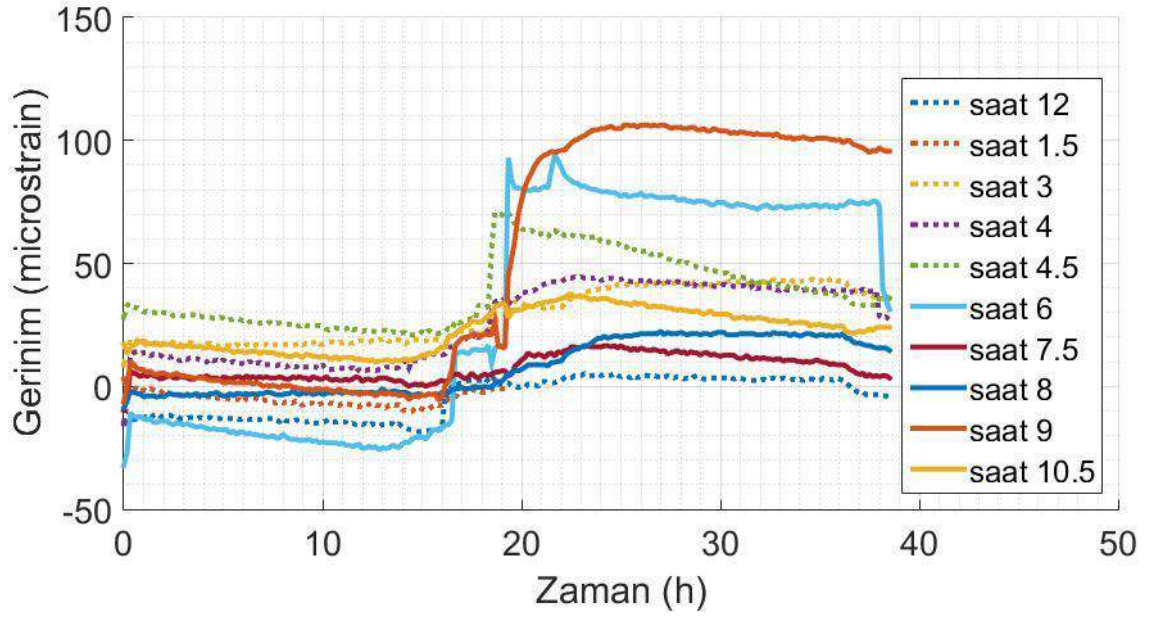
Deney düzeneği öngerme halatlarının gerilmesinin ardından iç basınçlı tünel kaplaması deneyine kadar on dakikada bir alınan okumalar ile 40 saat boyunca takip edilmiştir. Bu şekilde kaya katmanının üzerindeki öngerme kuvvetin gevşeme durumu kontrol edilmiştir (Şekil 3.67 ve Şekil 3.68). Bu süre zarfında deney sırasında alınacak bütün okumalar eksiksiz olarak kaydedilmiştir (düşey ve yatay halatlardaki çekme kuvvetleri, yükleme plakası üzerinde okunan kuvvetler, kaplama ve kaya üzerinde bulunan gerinim pulları, son olarak rölatif ve mutlak LVDT okumaları). Öngermenin verilmesinin ardından tünel kaplaması ve kaya katması arasında bırakılan boşluk tamir harcı ile (Sika Monotop 612) doldurulmuştur. Bu doldurma işlemi öngerme uygulamasının tamamlanmasından 15 saat sonra başlamıştır ve işlem yaklaşık 2 saat sürmüştür. Harcın doldurulmasından hemen sonra kaplamada yerleştirilmiş olan gerinim pullarının çekme okuduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.69). Bunun nedeninin harcın büzülmesi olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.70'de verilen LVDT okumaları bu süre içinde tünel bileşenlerinin rölatif yer değişim seviyesinin en fazla 0.2 mm olduğunu göstermektedir. Şekil 3.71'de deney düzeneğinin mutlak yer değişim grafikleri verilmiştir. Saat 12 ve saat 6 yönünde alınan LVDT okumalarında zıplamalar olduğu görülmektedir. Ancak diğer yönde değişim olmaması bu zıplamaların çarpma gibi bir dış etkiden dolayı olduğu izlenimini bırakmaktadır. Elde edilen ölçümler prizini alan tamir harcının, kaya ile beraber çalışmaya başladığını göstermektedir. Kullanılan harcın basınç mukavemeti, üçüncü deneyin yapıldığı gün 4.5 MPa olarak ölçülmüştür.



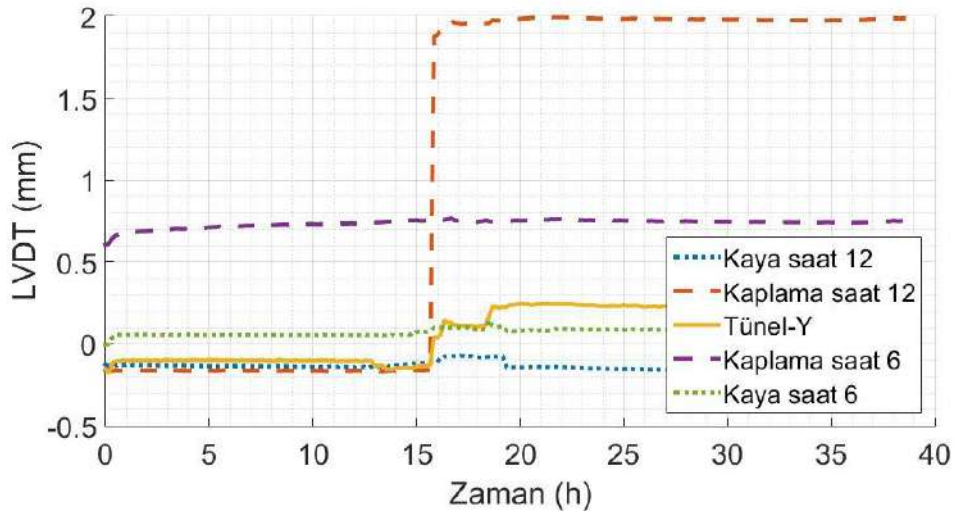
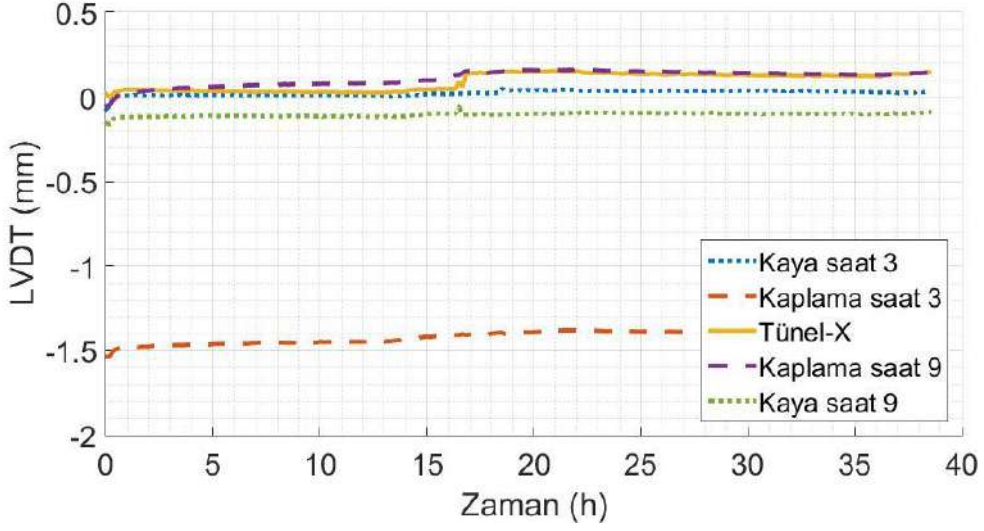
Şekil 3.67 Düşey tendon kuvvetlerinin öngermenin tamamlanmasından sonra gösterdiği değişim.



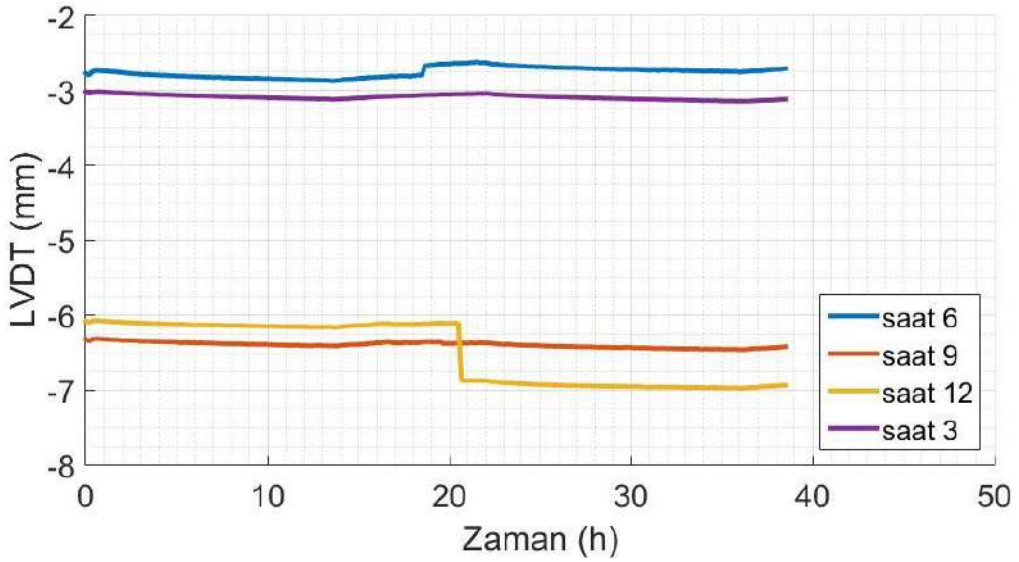
Şekil 3.68 Yatay aks kuvvetlerinin öngermenin tamamlanmasından sonra gösterdiği değişim.



Şekil 3.69 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler.



Şekil 3.70 a) Yatay yönde ve b) düşey yönde rölatif LVDT okumaları.



Şekil 3.71 Mutlak LVDT okumaları.

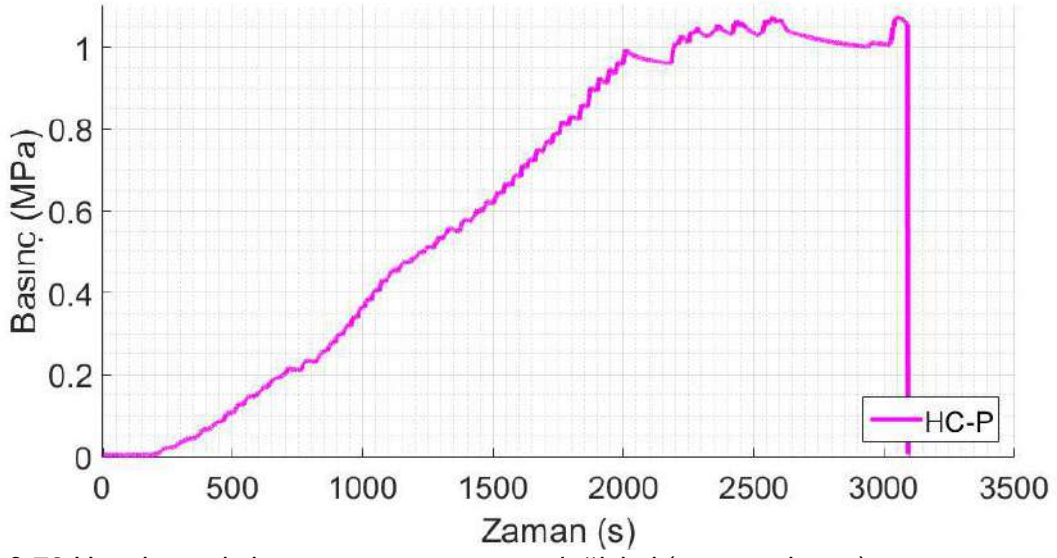
3.4.6 Deney Sonuçları

Deney günü elde edilen beton dayanım değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Deney sırasında yükleme hızı ortalama 0.6 kPa/s olarak uygulanmıştır (Şekil 3.72). Yükleme sırasında öngerme halatlarından ölçüm alınmıştır. İç basıncın artmasıyla halatlardaki kuvvetlerde 2-3 kN mertebesinde artışlar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.73). Bu değer tünel kaplamasının içinden uygulanan toplam kuvvetin 1-2% olduğundan kabul edilebilir büyüklükte olduğu düşünülmüştür. Deney sırasında gerinim pullarından alınan okumalar neticesinde betonun gerilim yoğunlaşma noktalarında çatlak sınırını geçtiği anlaşılmıştır. Şekil 3.74'de tünelin iç çeperinin düşey ve yatay yöndeki değişimi verilmiştir. İç basınç 1 MPa ulaştığı zaman değişim 0.3 mm değerine ulaşmaktadır. Dairesel bir kesit olarak tünel kaplamasını ele alırsak tünel kaplamasının çevre uzunluğunun 1 mm civarında uzadığı söylenebilir. Bu durumda oluşabilecek çatlak genişliklerinin toplamının 1 mm değerinin çok altında olması beklenmelidir. Kaplama üzerine yerleştirilen gerinim pullarından alınan ölçümler Şekil 3.75'da verilmiştir. Saat 4.5 ve saat 7.5 (tünelin sol ve sağ alt köşeleri) yönlerindeki gerinim pullarının çatlığa denk geldiği ancak diğer gerinim pullarının neredeyse elastik bir davranışı ölçtüğü görülmektedir. Ancak deney sonunda gerçekleştirdiğimiz inceleme sonucunda göz ile görülmeyen bir çatlak bulunamamıştır. Kaya tarafından tünel kaplamasının sargılanmasının çatlakların açılmalarını engellediği sonucuna varılmıştır. Şekil 3.76'da verilen kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarında ölçülen değerlerin küçük oldukları ve yüklemenin boşaltılmasından sonra çok az miktarda artık gerinim kaldığı görülmektedir. Bu da saha gerilimleri altında kaya yerine kullanılan malzemenin neredeyse elastik davrandığına işaret etmektedir. Geniş alanları tarayabilen bir metot olan DIC sonuçlarına bakıldığında göz ile görülmeyen çatlakların şekli açıklığa kavuştuğu gibi, gerinim pulu ile ölçüm alınmayan bölgelerde çatlaklar bulunmuştur (Şekil 3.77 ve Şekil 3.78). DIC ölçümlerinden hazırlanan videolar için bağlantılar aşağıda verilmiştir:

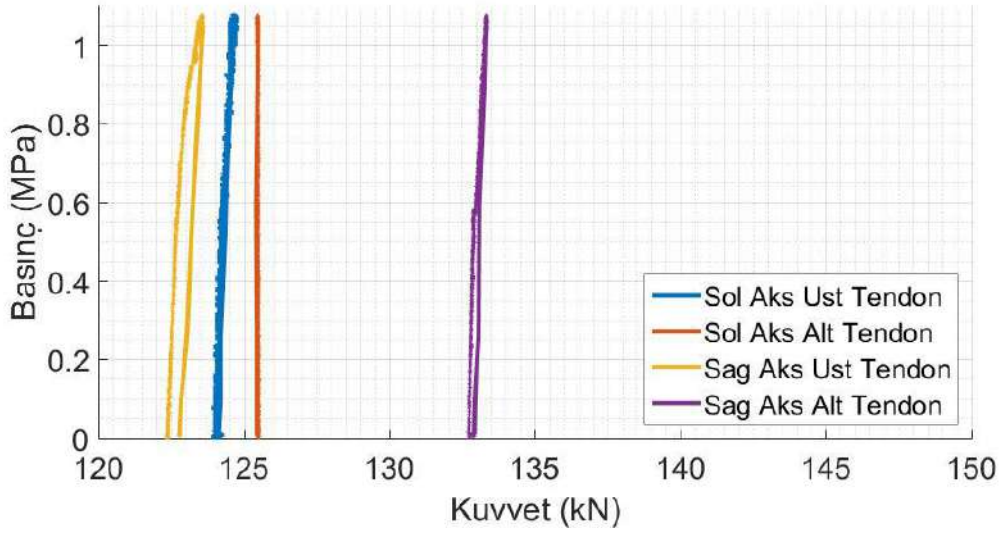
- Video 1: https://www.youtube.com/watch?v=5fiXU1_nKys
- Video 2: <https://www.youtube.com/watch?v=8fL7XmDS1KI>

Tablo 3.6 Beton özellikleri.

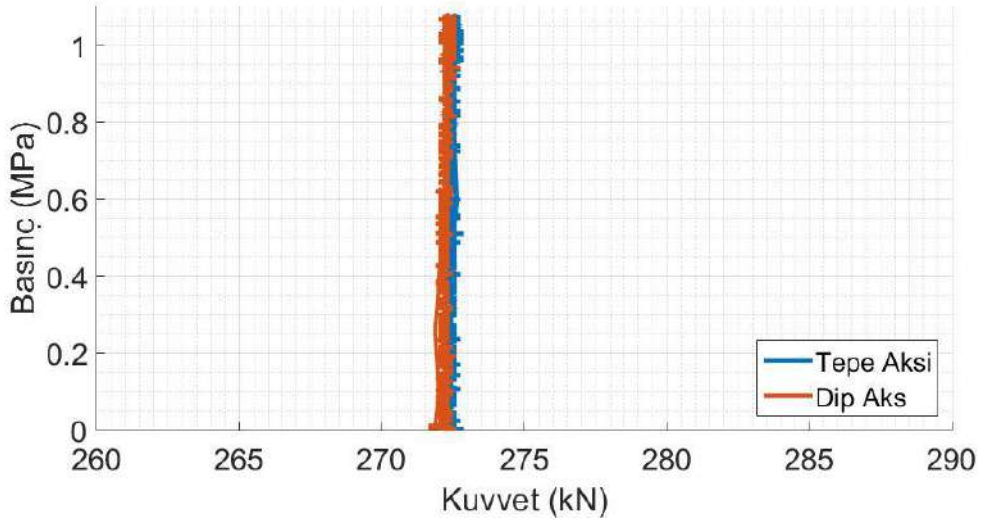
	Deney 3, 4, 5	Deney 6	Deney 7, 8
Basınç (MPa)	39.43	29.68	37.26
Çekme (MPa)	3.05	2.67	2.45
Elastisite Modülü (GPa)	33.81	36.84	31.82



Şekil 3.72 Uygulanan iç basıncın zamana göre değişimi (üçüncü deney).

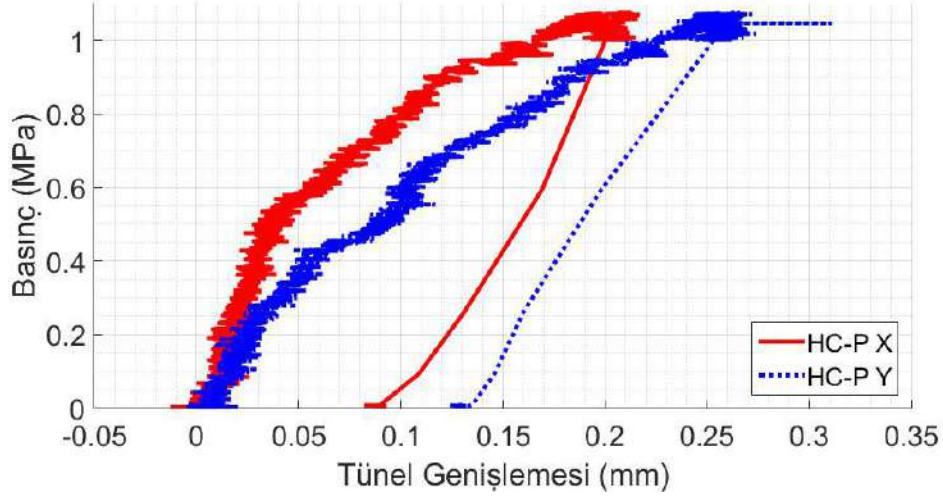


a)

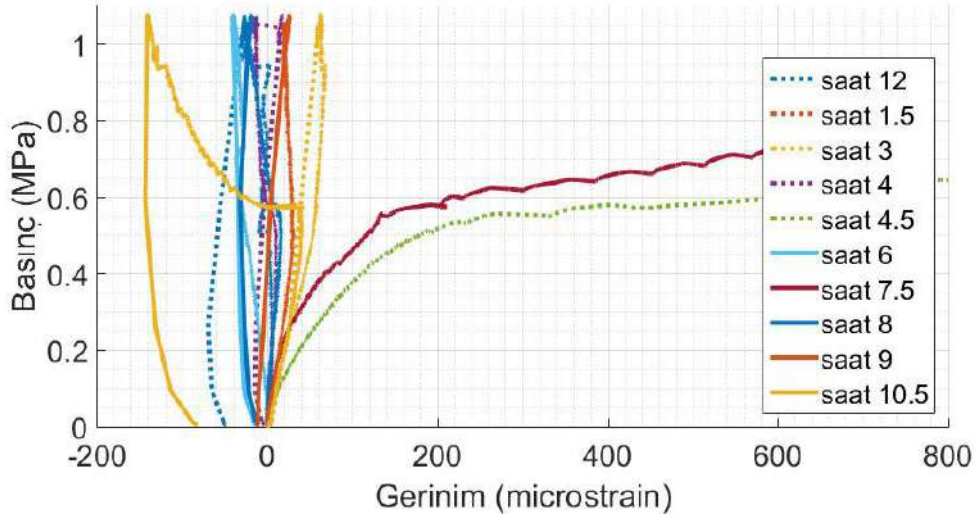


b)

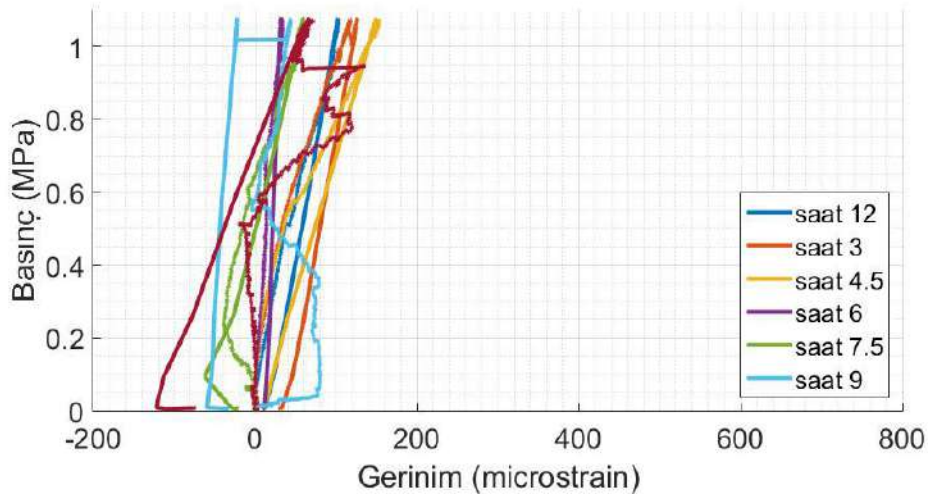
Şekil 3.73 a) Düşey öngerme tendon kuvvetleri, b) yatay öngerme aks kuvvetleri (üçüncü deney).



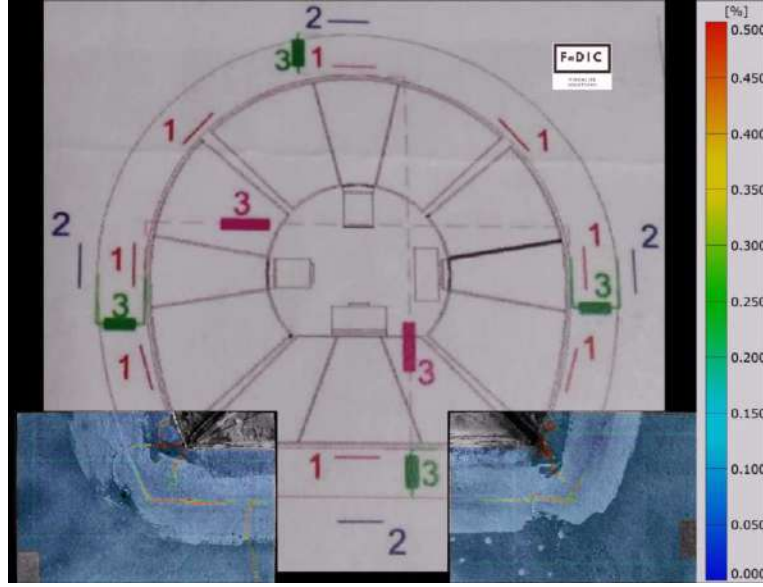
Şekil 3.74 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (üçüncü deney).



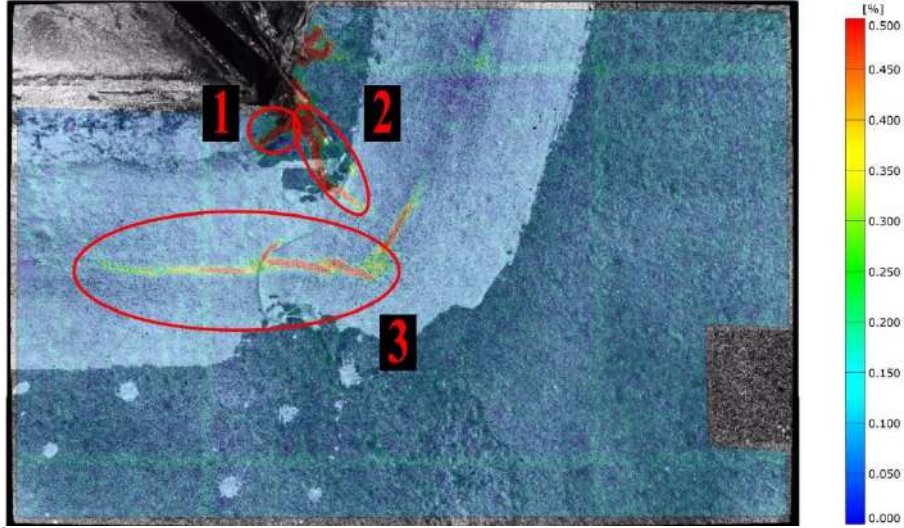
Şekil 3.75 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney).



Şekil 3.76 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney).



Şekil 3.77 Üçüncü deney için elde edilen DIC sonuçları (video bağlantıları: https://www.youtube.com/watch?v=5fiXU1_nKys ve <https://www.youtube.com/watch?v=8fL7XmDS1KI>).

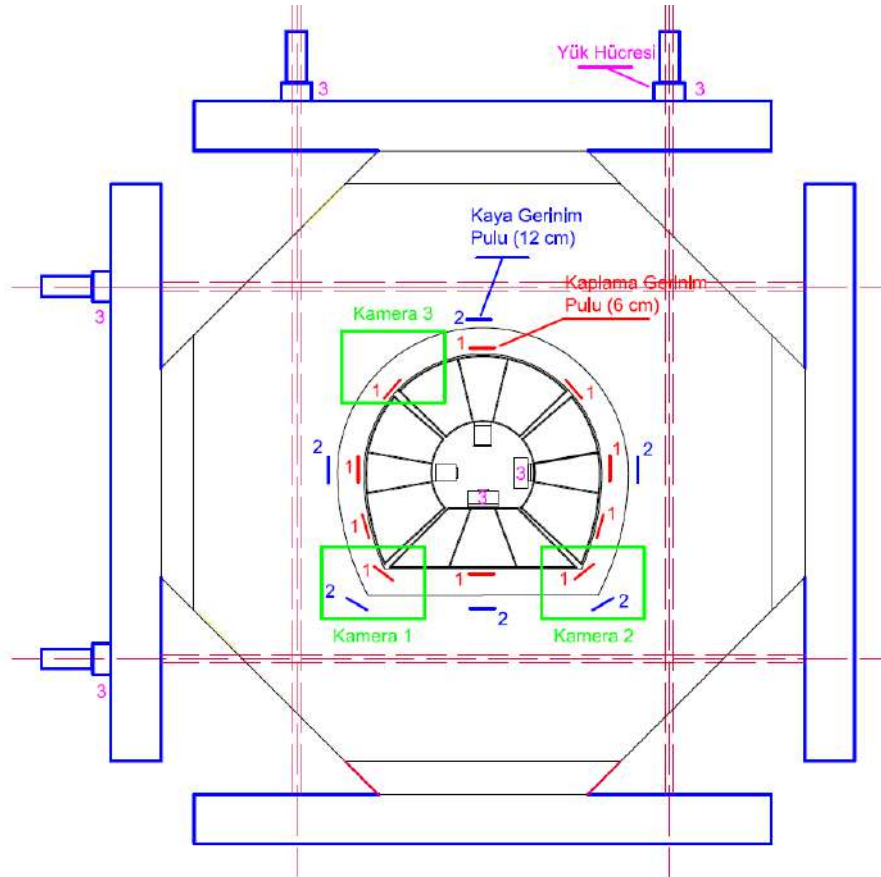


Şekil 3.78 Üçüncü deneyde DIC sayesinde gerinim pulunun ölçemediği çatlak (1), gerinim pulu ile ölçülmüş çatlak (2) ve kaplama-kaya ara yüzünde ölçülen gerinim (3)

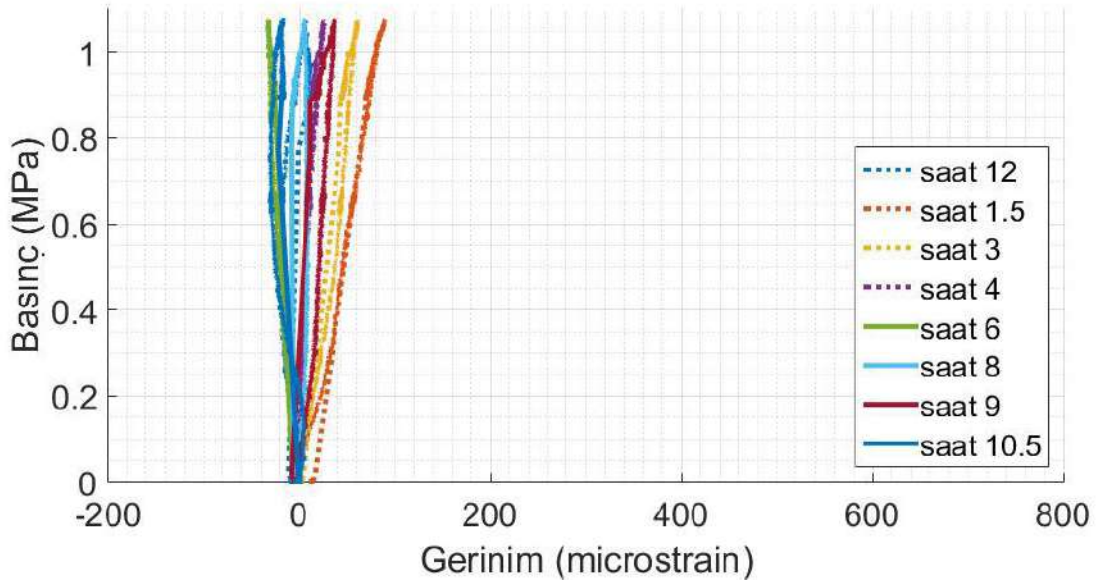
Deney sonuçlarının kontrolü için ölçüm metotlarında gösterilmiş görsel ölçüm sistemine bir fotoğraf makinesi daha eklenerek tekrar yükleme yapılmıştır (Şekil 3.79). Kaplama üzerinde Saat 4.5 ve saat 7.5 yönlerindeki gerinim pulları ilk yüklemde devre dışı kaldıklarından dolayı bu yönlerde ölçüm alınamamıştır. Aynı yük düzeyine ulaşıldığında çatlak açılması gözlemlenmiş, yük boşaltımı esnasında ise ilk yüklemeye yakın ölçümler alınmıştır (Şekil 3.80 ve Şekil 3.81). Tekrar yükleme esnasında tüm gerinim pullarının neredeyse elastik davrandığı ve yeni çatlak açılmadığı gözlemlenmiştir. DIC ölçümlerinden hazırlanan videolar için bağlantılar aşağıda verilmiştir:

- Video 1: <https://www.youtube.com/watch?v=Nvo9aeuiosY>

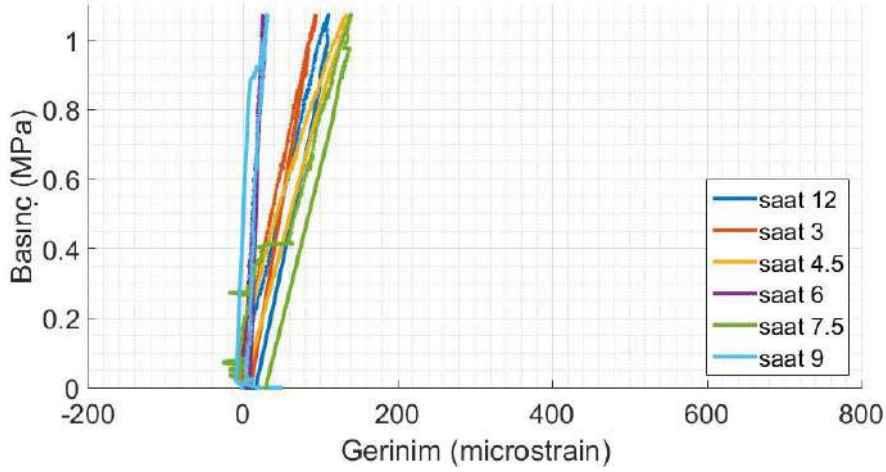
- Video 2: <https://www.youtube.com/watch?v=FqLEZFclaXQ>



Şekil 3.79 Üçüncü deneyin tekrarında kullanılan ölçüm sistemi.



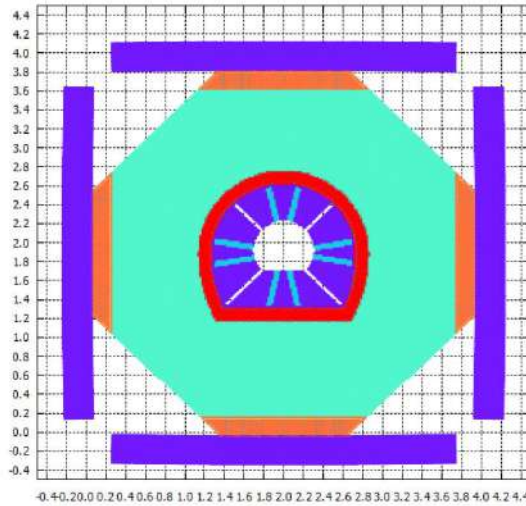
Şekil 3.80 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney, ikinci yükleme).



Şekil 3.81 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (üçüncü deney, ikinci yükleme).

3.4.7 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

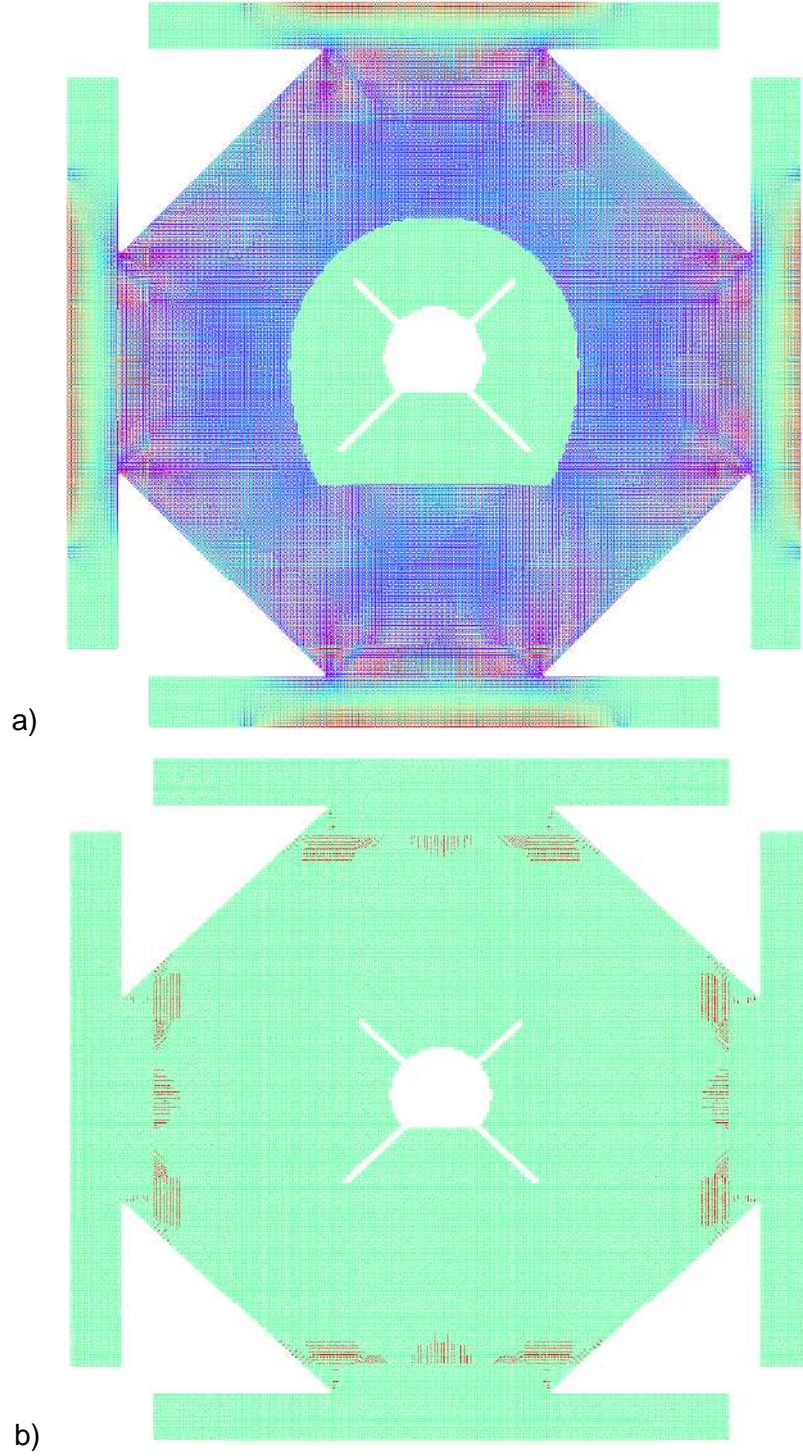
Saha gerilimleri altında tünel kaplamasının doğrusal olmayan davranışını inceleme amacıyla yapılan üçüncü deney, proje kapsamında geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Bir önceki model malzemelerine ek olarak bu deneye, öngerme yükleme çelik plakaları HEA360 I kirişler ve I kirişlerin kaya katmanını ezmesine engel olmak amacıyla kullanılan yaslanma beton malzemeleri eklenmiştir. OLM modelinde 6 farklı malzeme kullanılmıştır (Şekil 3.82): ilk iki deneyde kullanılan yükleme plakaları (1), yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında deneyde kullanılan zayıf kauçuk tabaka (2), ilk iki deney ile aynı geometri ve donatı düzeninde beton kaplama (3), birinci deneye benzer olarak hazırlanan, sekizgen geometriye uygun olarak düzenlenen kaya katmanı (4), deney için tasarlanan geometri ve donatı düzenine sahip 20 cm kalınlığında yaslanma betonu (5), HEA360 I kirişleri (6).



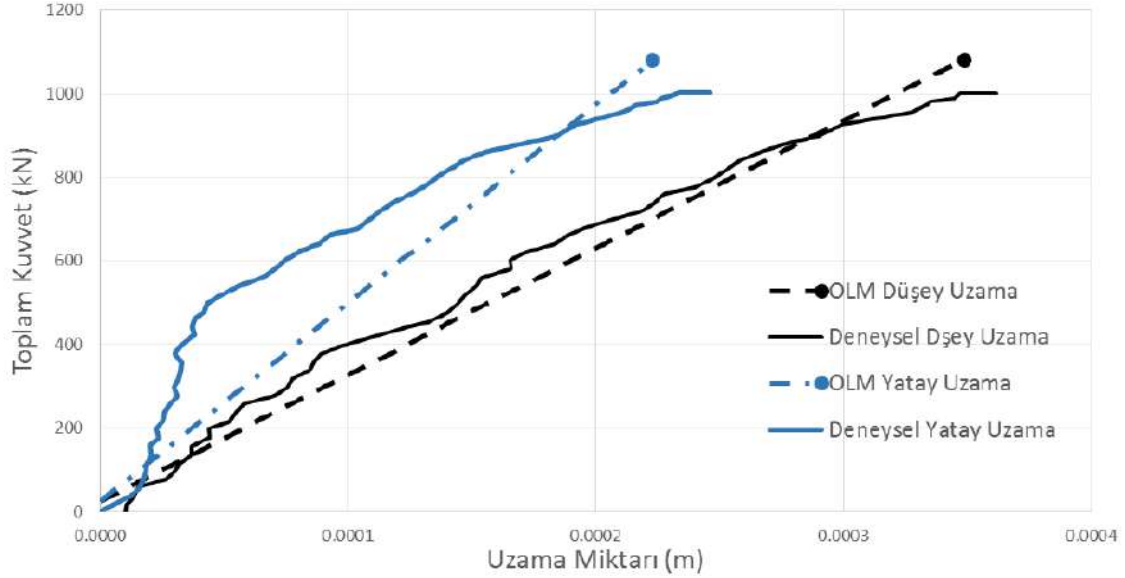
Şekil 3.82 Üçüncü deneyin OLM modeli için kullanılan 6 farklı malzemeden oluşan OLM ağı.

Beton kaplama için deneysel olarak ölçülen elastisite modülü (33.8 GPa), üç katmanlı kaya için birinci ve ikinci deneyde kullanılan elastisite modülü (8.37 GPa) kullanılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreleri, beton kaplama için $\epsilon_{cr}=8e-05$, $a_1=5$, $a_2=80$, $a_3=300$ olarak ve kırılma davranış gösterdiği saptanan kaya malzeme özellikleri $\epsilon_{cr} =5e-05$, $a_1=10$, $a_2=30$, $a_3=40$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak beton kaplama ve kaya için sırasıyla $G_I=110$ N/m ve $G_I=2$ N/m (çatlak enerjisi) değerlerine karşılık gelmektedir. Çekme dayanımlarıysa sırasıyla 2.03 MPa ve 0.42 MPa olarak alınmıştır. Yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında deneyde kullanılan ince kauçuk için elastisite modülü 1 GPa olarak alınmıştır. Birinci deneye paralel olarak, tünelin alt kısmının eğilmesinden dolayı deneyde kauçuk ile beton tünel arası açıldığından sayısal simülasyonda kauçuğun tünelden ayrılmasını sağlamak için düşük bir ϵ_{cr} değeri kullanılmıştır. Donatılar için elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 200 GPa ve 420 MPa alınmıştır. Deneyde gerçekleştirilen öngerme yüklemesi OLM analiz motorunda birinci yükleme fazında gerçekleştirilmiştir. Öngerme yüklemesi etkisinin tek bir noktada oluşturacağı lokal ezilmeleri ortadan kaldırmak amacıyla her bir öngerme halatının yük aktarımı 4 OLM düğüm noktası üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 60-100 m derinliğindeki saha gerilimlerine denk gelen her aks boyunca 250 kN büyüklüğünde öngerme kuvveti kullanılmıştır. Ayrıca sayısal modelin deney davranışını bire bir yansıtılması amacıyla betonarme tünel kaplamasının öngerme yüklemesi esnasında yük taşınması engellenmiştir.

Öngermenin uygulanmasından sonra çelik kirişin yanında bulunan yaslanma betonunda oluşan ezilmeler dışında herhangi bir hasar olmamıştır (Şekil 3.83). İkinci OLM yükleme fazında iç basınç verilmiştir. Şekil 3.84'de tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese edilmektedir. Deneyde ulaşılan maksimum yük miktarlarına ulaşıldığında, kaya da oluşan öngermeden dolayı oluşan ezilmeler ve zayıf kauçuk malzeme deformasyonu dışında betonarme tünel kaplaması üzerinde herhangi bir çatlak gelişimi gözlenmemiştir.(Şekil 3.85). Bu davranış deneysel gözlemlerle benzerlik taşımaktadır. Deneysel düşey ve yatay yönlerde başlangıç rijitliklerinin, sayısal başlangıç rijitliklerinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin ilk başta etkili olan sürtünme kuvvetlerinin olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.83 Öngerme yüklemesinin tamamlanmasının ardından oluşan a) gerinimler (renk skalası mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0001), b) çatlaklar (kırmızı 0.0001 geriniminden büyük elemanları göstermektedir).



Şekil 3.84 Üçüncü deney için tünelin yatay ve düşey yönlerdeki ölçülen uzunluk değişimlerinin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (üçüncü deney).

3.5 Deney 4: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Kaya ile Kısmi Etkileşimli Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

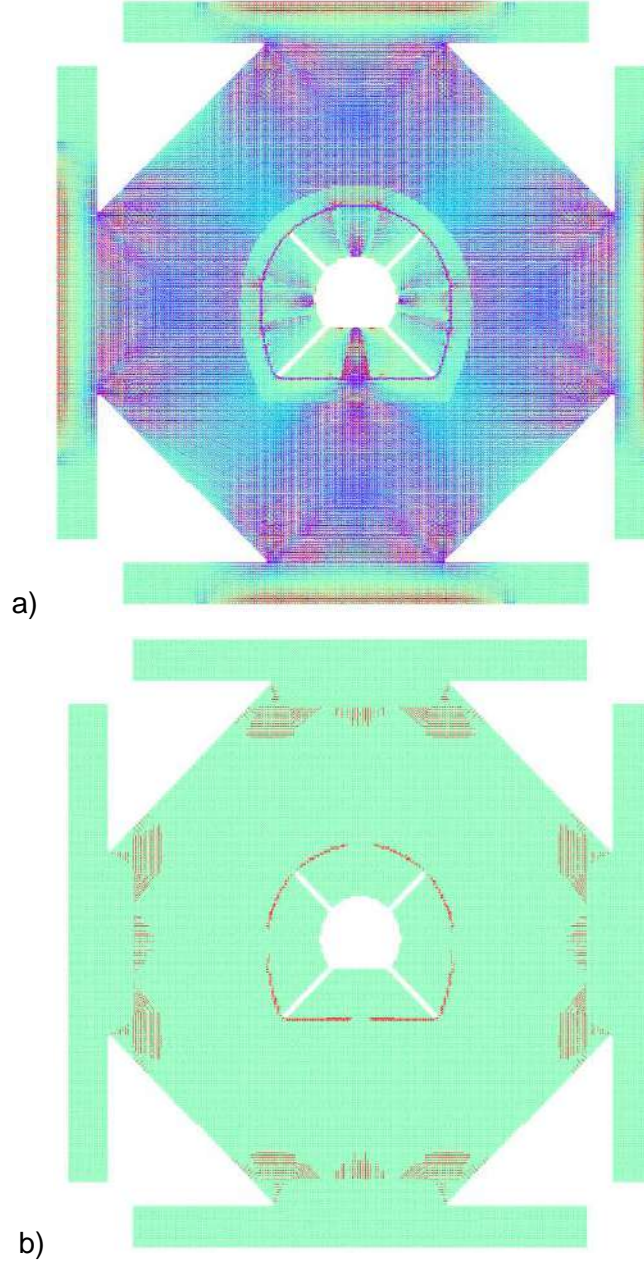
Bu deneyde büzüşme veya tünelin delme aşamasında yaşanan olumsuzluklar dolayısıyla tünelin üst ve omuz bölgelerinde kaplama ile kaya katmanları arasında temas sorunu olduğu durum ele alınmıştır. Kaya matkabı ile tünel kaplamasının ortadan yukarı kısmının kaya katmanı ile arasına bir santimlik genişliğinde boşluk açılmış, böylece yük aktarımı bu bölgede engellenmiştir. Düşey yönde rijitliği azaltılmış tünel yapısını inceleyen bu deneyde, ilk çatlakların yarattığı gerilim yoğunlaşma noktaları yerine tünelin üst kısmında oluşması beklenmektedir. Bu sebepten ötürü, üst ve omuz bölgelerini izleyen DSLR kamera sayısı artırılmıştır. Ayrıca, çözünürlüğü yüksek tutmak amacıyla bölgesel kayıt alan kameralardan farklı olarak görüş alanı tüm kaplamayı kapsayan bir kamera daha eklenmiştir (Şekil 3.86).

3.5.1 Deney Sonuçları

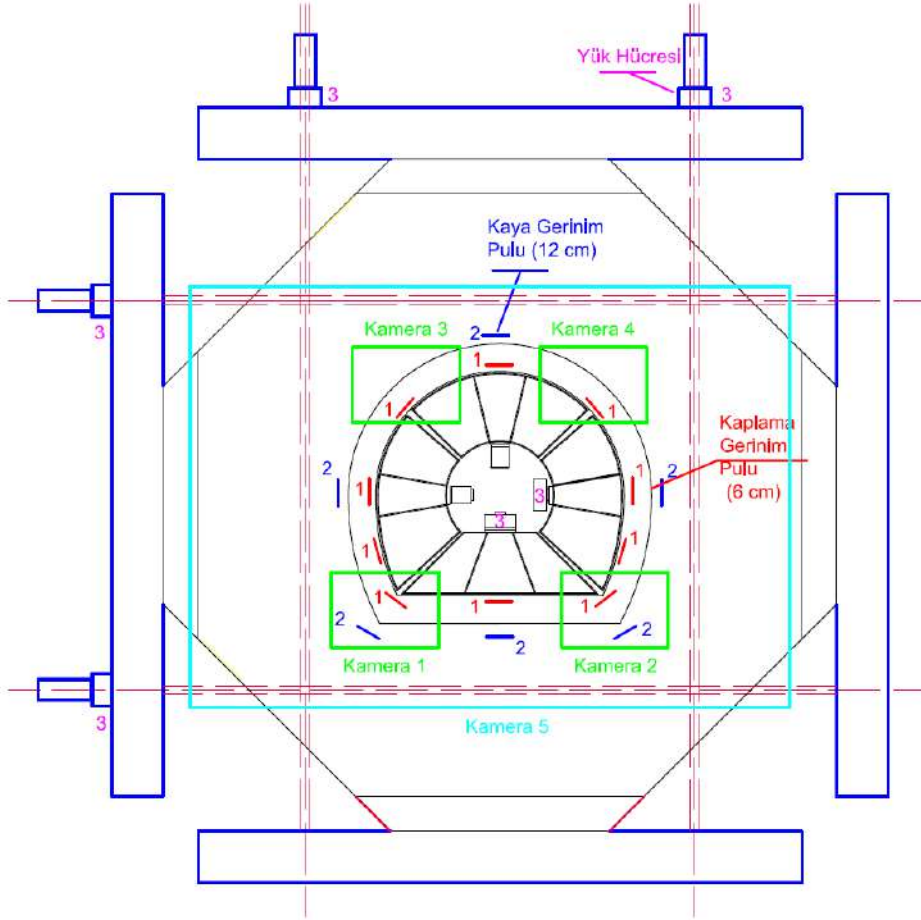
Deney günü elde edilen beton dayanım değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Dördüncü deney, öncekilere benzer şekilde silindir başına 5 kN büyüklüğünde (iç basınç eşdeğeri 0.021 MPa) yük adımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında ölçülebilir deplasman iç basınç 0.24 MPa seviyesine ulaştıktan sonra başlamıştır. Çatlaklar ilk olarak iç basınç 0.43 MPa'ı geçince gözlenmiştir. Kaplamanın, 0.59 MPa değerinden sonra daha fazla yük taşımadığı ve yer değiştirmelerin hızlı biçimde arttığına görüldüğü üzerine deney düzeneğinin daha sonra kullanılabilmesi adına durdurulmuştur (Şekil 3.87). Çatlakların yerleri ve oluşum sırası, Şekil 3.88'de verilmiştir. Azami uzama, düşey yönde 8.051 mm ve yatay yönde 0.255 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.89). Kaplama ve kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından elde

edilen ölçümler Şekil 3.90 ve Şekil 3.91'de verilmiştir. Kaplamanın üzerine bulunan temas eksikliği tünelin üst kısmında yoğun hasara yol açmıştır. Kaya ise üçüncü deneyde olduğu gibi büyük ölçüde elastik kalmıştır. DIC ölçümleri de görsel çatlak dağılımına (Şekil 3.88) benzer bir çatlak dağılımı göstermektedir (Şekil 3.92). DIC ölçümlerinden hazırlanan videolar için bağlantılar aşağıda verilmiştir:

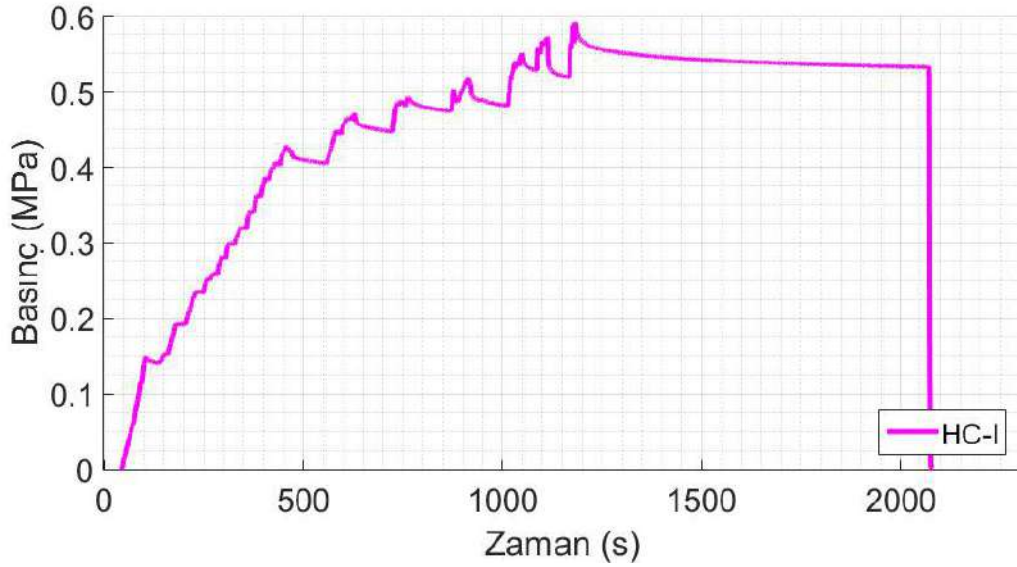
- Video 1: <https://www.youtube.com/watch?v=P-zl8-inkhk>
- Video 2: <https://www.youtube.com/watch?v=EQPVBnZJm1A>



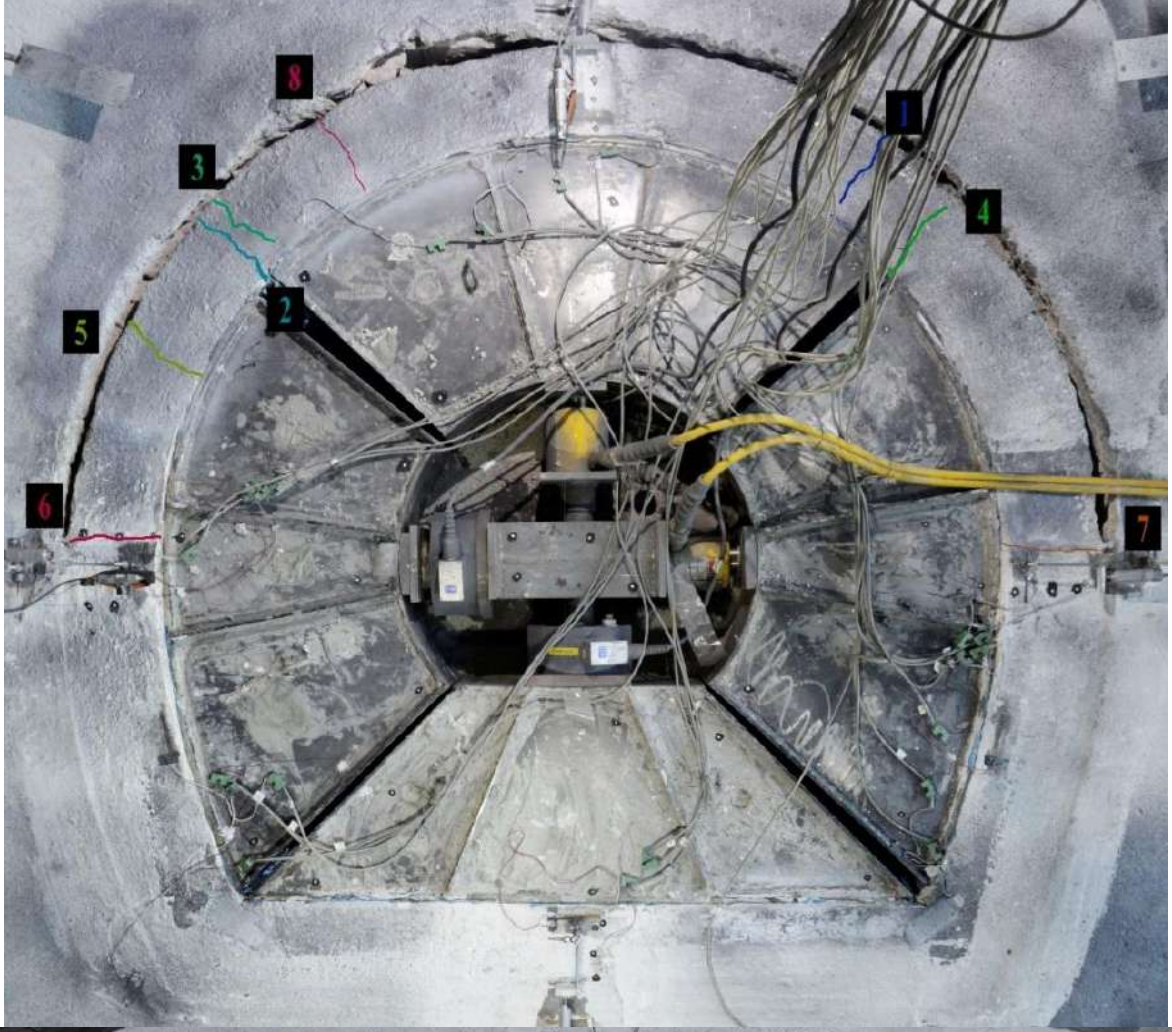
Şekil 3.85 İç basınç yüklemesinin tamamlanmasının ardından (1000 kN) oluşan a) gerinimler (renk skalası mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0001) ve b) çatlaklar (kırmızı 0.0001 geriniminden büyük elemanları göstermektedir). Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir.



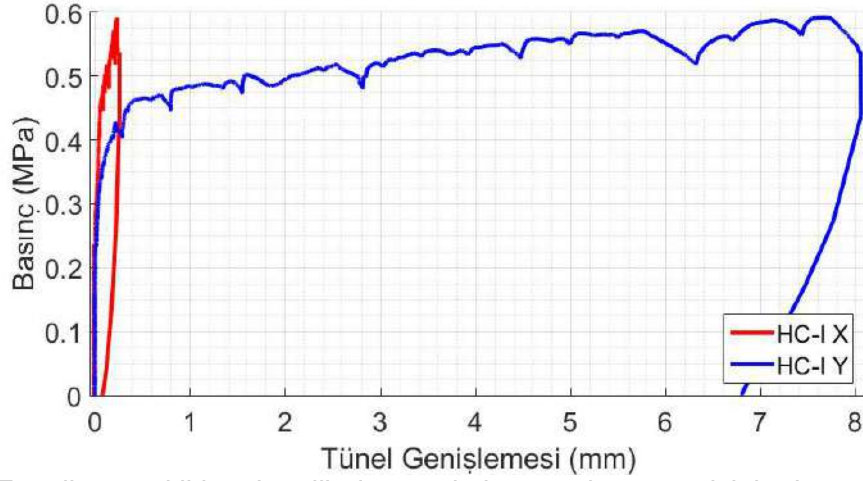
Şekil 3.86 Dördüncü deneyde kullanılan ölçüm sistemi.



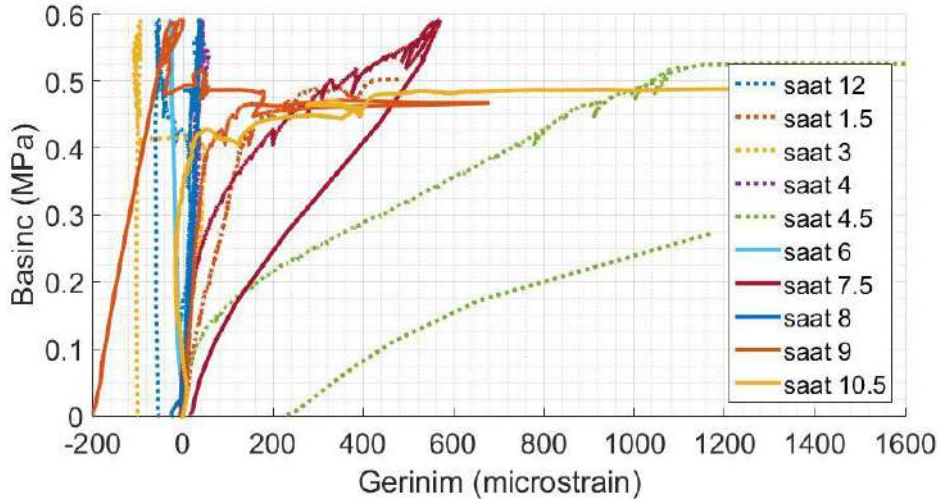
Şekil 3.87 Uygulanan iç basıncın zamana göre değişimi (dördüncü deney).



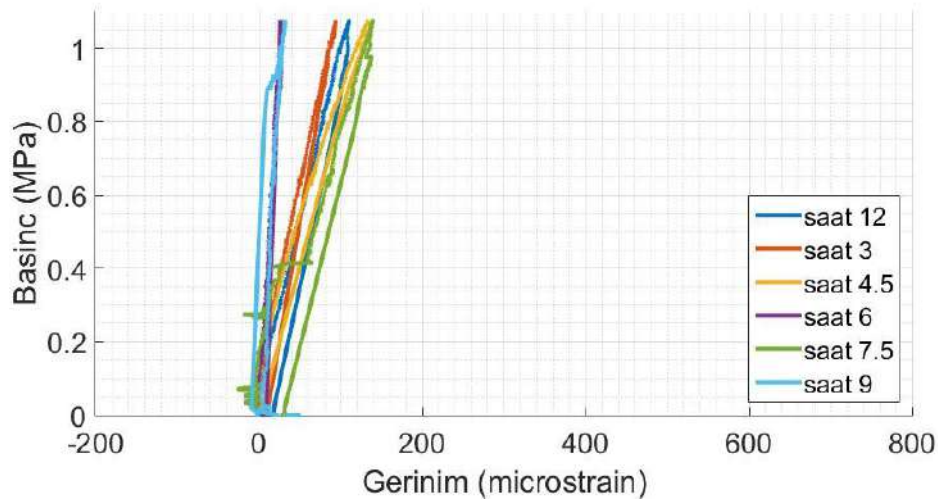
Şekil 3.88 Yeni oluşan çatlak yerleri ve oluşum sırası (dördüncü deney).



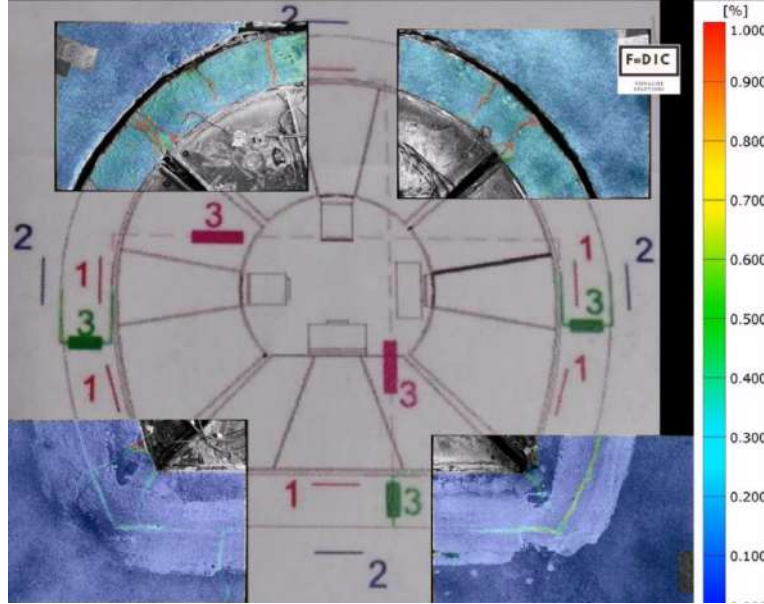
Şekil 3.89 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (dördüncü deney).



Şekil 3.90 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (dördüncü deney).



Şekil 3.91 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (dördüncü deney).

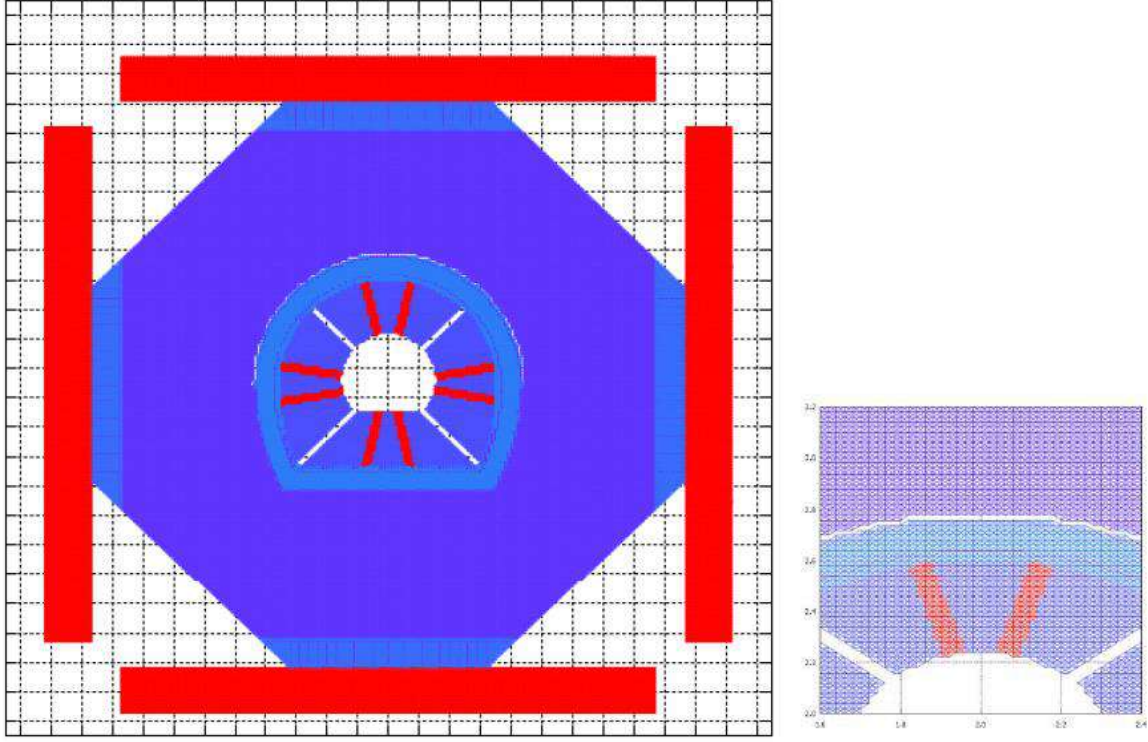


Şekil 3.92 Dördüncü deney için elde edilen DIC sonuçları (Video linkleri: <https://www.youtube.com/watch?v=P-zl8-inkhk> ve <https://www.youtube.com/watch?v=EQPVBnZJm1A>)

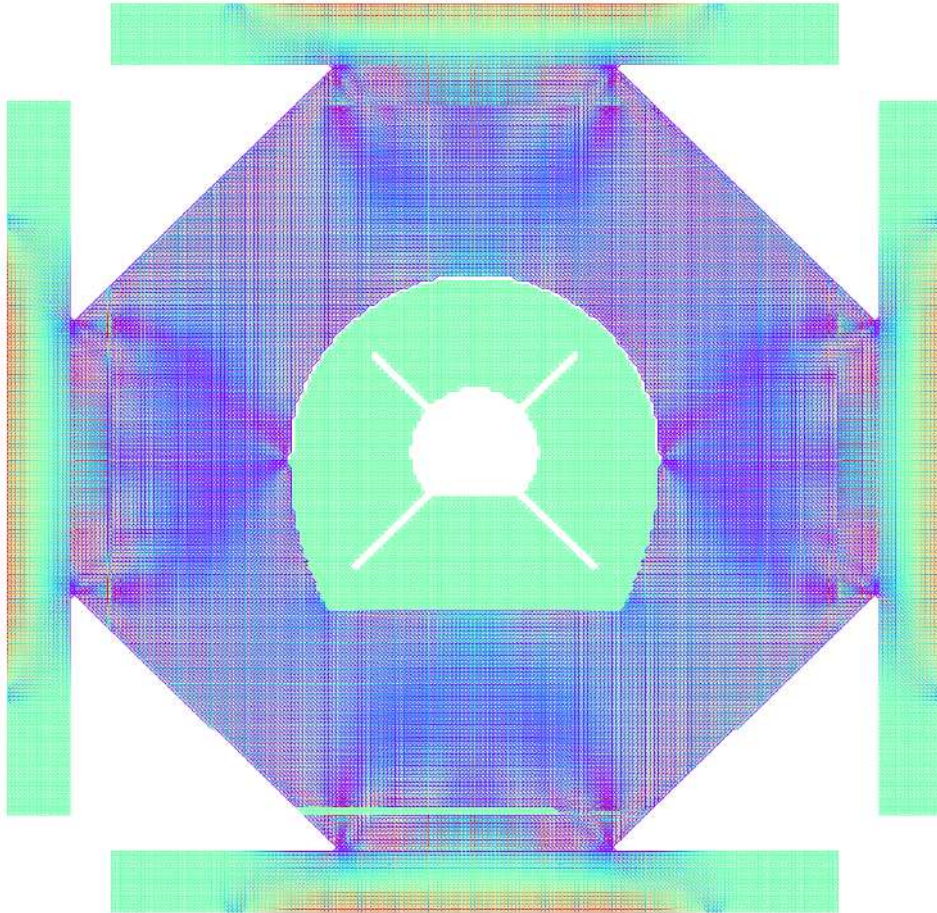
3.5.2 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

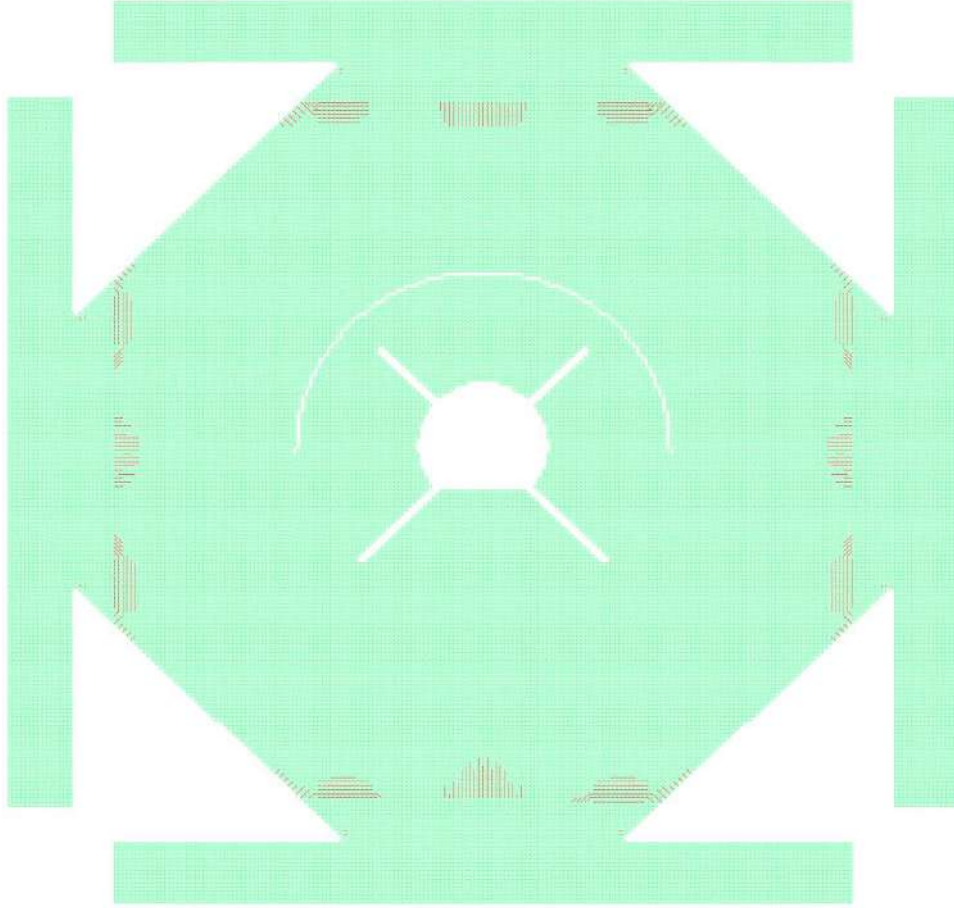
Saha gerilimleri altında tünel kaplamasının doğrusal olmayan davranışını inceleme amacıyla yapılan dördüncü deney proje kapsamında geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Bir önceki deneyde kullanılan hasar görmemiş öngermeli kaya ve tünel kaplaması aynen kullanılarak modele dâhil edilmiştir. Ancak tünelin üst kısmında kaplama ile kaya arasında deneyde olduğu gibi boşluk yaratılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 ve b_3 parametreleri ve hesaplanan G_f çatlak enerjisi üçüncü deneyin modellenmesinde kullanılan değerlerle aynıdır.

Dördüncü deney için kullanılan 6 farklı malzemeden oluşan OLM ağı Şekil 3.93'de verilmiştir. Öngerme yüklemesi halat yükü (her aks yönü için 250 kN) üçüncü deney için yapılan sayısal çalışmalarda olduğu gibi ele alınmış ve tünel kaplamasının öngerme sırasında yük alması engellenmiştir. Öngerme yüklemesi (birinci OLM yükleme fazı) sonucunda yerel ezilme dışında herhangi bir hasar oluşmamıştır (Şekil 3.94). İkinci yükleme fazında iç basınç uygulanmıştır. Şekil 3.95'de tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese edilmektedir. Şekil 3.96'da ise sayısal modelleme sonucunda toplam yükün dört farklı değeri için elde edilen hasar dağılımı gösterilmektedir. OLM sonuçlarının deneysel hasar dağılımı ile benzerlik gösterdiği görülmektedir (Şekil 3.88).

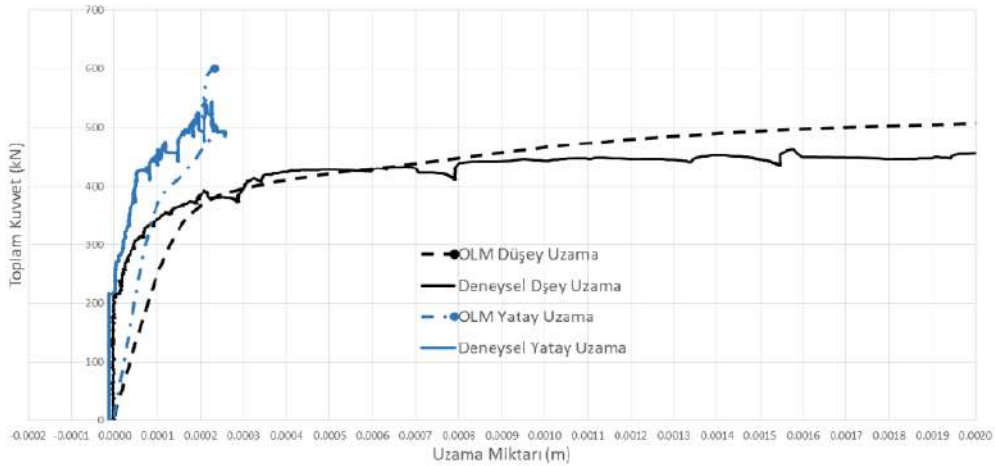


Şekil 3.93 Dördüncü deneyin OLM modeli için kullanılan 6 farklı malzemeden oluşan OLM ağı Tünelin üst kısmı ile kaya arasında boşluk bırakılmıştır.

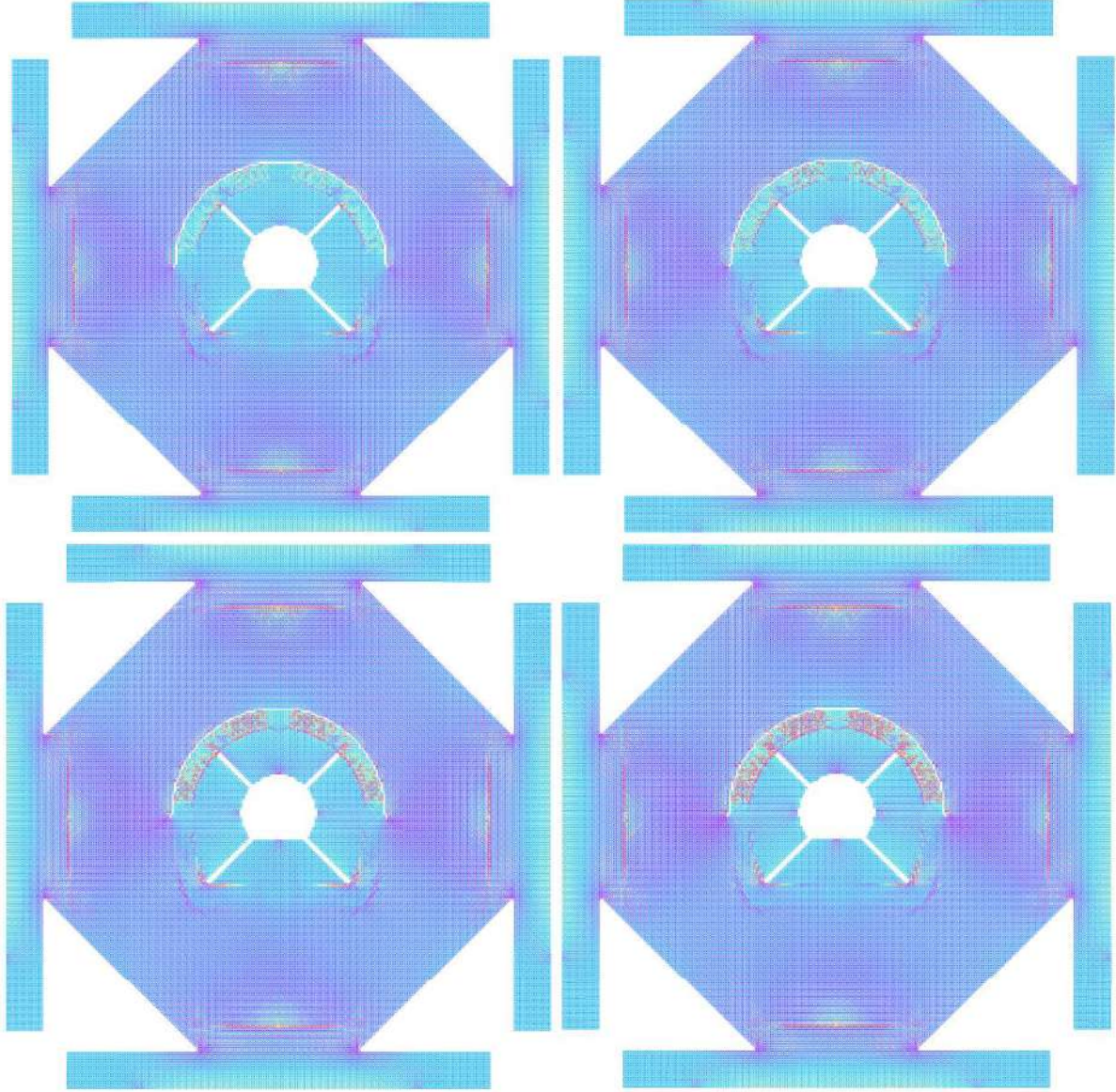




Şekil 3.94 Öngerme yüklemesinin tamamlanmasının ardından oluşan a) gerinimler (renk skalası mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0001), b) çatlaklar (kırmızı 0.0001 geriniminden büyük elemanları göstermektedir).



Şekil 3.95 Tünelin yatay ve düşey yölerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0.00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (dördüncü deney).



Şekil 3.96 Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 450 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0003) . Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (dördüncü deney).

3.6 Deney 5: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Tamir Edilmiş Çatlaklı Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

Tamir yöntemi olarak karbon lifli dokuma (FRP) uygulaması kullanılmıştır. Dördüncü deneyde çatlakların çoğunluğu tünel kaplamasının üst bölgesinde olduğu için lifli dokumanın tünelin üst yarım daire şeklindeki kısmına uygulanmasına karar verilmiştir (Şekil 3.97).

3.6.1 Tamirat İşlemi

Lifli dokumanın uygulamasından önce kaplamanın iç yüzeyinin pürüzsüzlüğünü sağlamak amacıyla epoksi bazlı tamir harcı (Sikadur-30) tünelin iç yüzeyine uygulanmıştır. Bu uygulama lifli dokuma katmanlarının tünel kaplaması ile bütünleşebilmesi için elzemdir. Pürüzsüzlüğü

sağlayacak tamir harcının mekanik özellikleri, kaplama özelliklerine yakın olmalıdır. Tamir harcının çekmede elastisite modülü 11 GPa ve 24 saat mukavemeti 20 MPa olarak verilmiştir. Tamir harcı tabakasının 2 mm'den kalın olmamasına dikkat edilmiştir. Kullanılan tamir harcı, toplam 6 kg'lık çift bileşenli paketler ile tedarik edilmektedir. Numunenin üzerinde sadece 1 kg kullanılması gerektiği halde, bileşenlerin heterojenliğinden kaynaklanabilecek farklılıkların olmaması tüm paket karıştırılmış ve gerektiği kadarı numune üzerinde kullanılmış, fazlası atılmıştır.

Tamir harcı 24 saatlik mukavemetini aldıktan sonra, 2 bileşenli epoksi esaslı laminasyon reçinesi (Sikadur-330) yine 2 milimetreden kalın olmayacak şekilde kaplamanın iç yüzeyine uygulanmıştır. Laminasyon tabakası için yüzeyde ve eklenen her tabaka için 1 mm kalınlık önerilmektedir. Laminasyon reçinesi, tamir harcı gibi çift bileşenlidir ve tüm paket karıştırıldıktan sonra gerektiği kadarı kullanılmıştır. Lifli dokuma (Sikawrap-300 C/60), bu deneyde tek kat olarak kullanılmıştır. 20 santim yüksekliğindeki numunenin merkezini ortalayacak şekilde 14 cm enindeki lifli dokuma bir fırça yardımıyla reçinenin içine gömülmüştür. Böylece numunenin üst ve alt tarafında 3 cm uzunluğunda boşluklar bırakılmış, yüzeyin %70'i ise tamir edilmiştir (Şekil 3.98). Tavsiye edilen kür süresi kış şartlarında 7 gündür. Beşinci deney 12. günde yapılmıştır. Tamir sırasında kaplamanın iç yüzü dışında kalan kısma veya kaya ile etkileşim bölgesine tamir veya enjeksiyon gibi herhangi bir işlem yapılmamıştır.

3.6.2 Deney Sonuçları

Dördüncü deney gibi 0,021 MPa büyüklüğünde adımlar ile iç basınç artırılmıştır (Şekil 3.99). Dördüncü deneyde tanıtılan ölçüm sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.86). Deney okumalarına bir önceki deneyden bağımsız olarak bakıldığında yük kapasitesinin üçüncü deneyde gözlemlenen kapasiteye çok yaklaştığı gözükmektedir (Şekil 3.99 ve Şekil 3.100). Şekil 3.101 ve 3.102'de sırasıyla kaplama ve kaya üzerinde yerleştirilmiş gerinim pullarının iç basınca göre değişimi verilmiştir. Kaplamanın yatay yönde neredeyse hareket etmediği ve tüm açılmanın düşey yönde olduğu anlaşılmaktadır. Kayanın önceki deneylerde olduğu gibi neredeyse elastik bir davranış sergilediği görülmektedir. Dördüncü deney sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı ile beşinci deney sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı mukayese edildiğinde 11 adet yeni çatlak oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.103). Tamir edilmiş tünel kesitinin davranışı, dördüncü deney ile birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 3.104). Tünelin düşey ve yatay yönde genişlemesi mukayese edildiğinde (Şekil 3.105 ve Şekil 3.106), kaplamanın mevcut çatlaklardan dolayı daha yumuşak bir davranış sergilediği görülmektedir. İç basınç yaklaşık olarak 0.5 MPa değerine ulaştığında yeni çatlakların açılmaya başladığı ancak lifli dokumanın kaplamanın mukavemetini arttırdığı anlaşılmaktadır.

Tamir sonrası yapılan incelemede, taç bölgesinde bulunan 6 çatlağın arasında 6 çatlak daha oluştuğu, sol omuz bölgesinde ise mevcut 2 çatlağın arasında 2 yeni çatlak oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.103). Kaya ile temasın kesildiği sağ omuz bölgesinde mevcut tek çatlak ise taç bölgesine kadar 3 ayrı yerden çatlamıştır. Çatlak sayısı ve sıklığındaki artışların sebebi, lifli dokumanın gerilim dağılıma yardımcı olmasıdır. Deney bittikten sonra yükleme plakaları çıkartılmış ve kaplamanın iç yüzeyi incelenmiştir. Lifli dokumanın, yükleme esnasında kopmadığı ancak kaplama yüzeyinden ayrıldığı görülmüştür (Şekil 3.107).

DIC yöntemi, kaplamada oluşan çatlak sırası ve dağılımı dışında, gözle görülmeyen ve gerinim pulları ile ölçüm yapmanın çok zor olduğu sonradan doldurulmuş kaya kaplama ara yüzündeki gerinimleri de vermektedir (Şekil 3.108). DIC ölçümlerinden oluşturulan videolar için bağlantıları aşağıda verilmiştir:

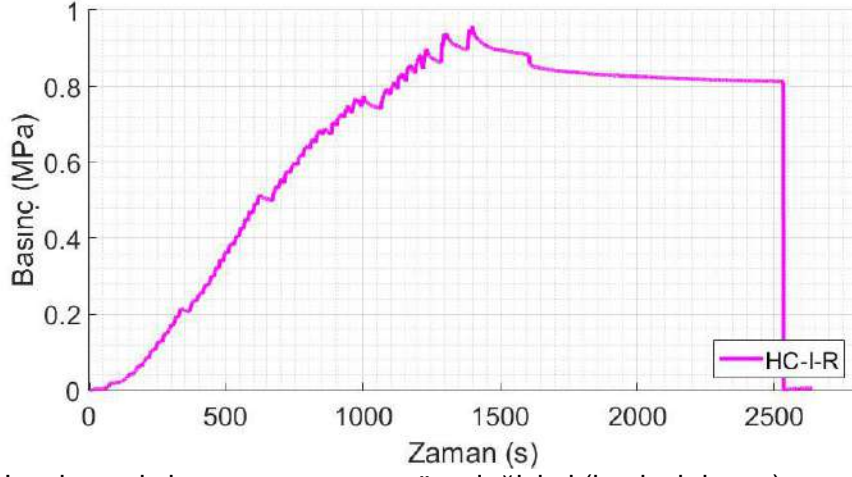
- Video 1: <https://www.youtube.com/watch?v=iK8ojWekiVU>
- Video 2: <https://www.youtube.com/watch?v=ffuiUuiSd-A>



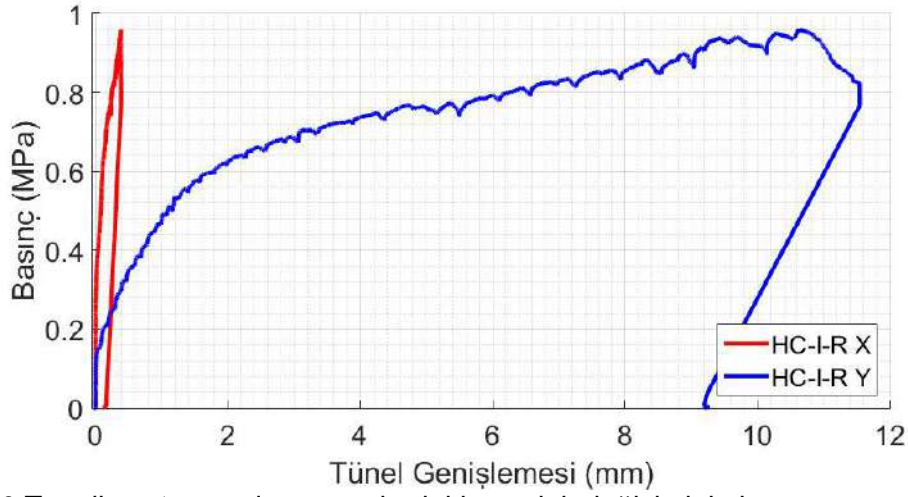
Şekil 3.97 Tamirat uygulaması (beşinci deney).



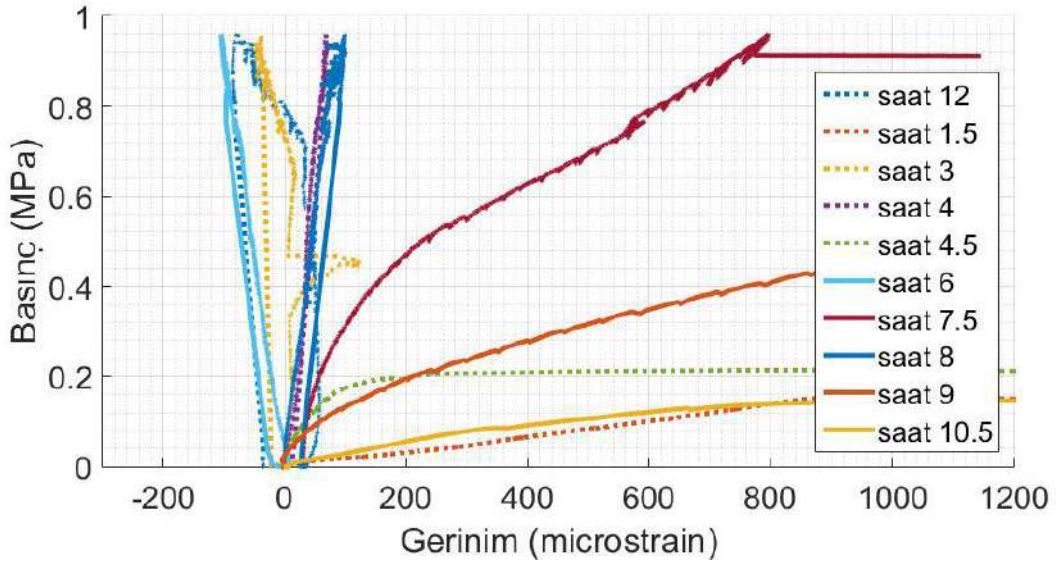
Şekil 3.98 Tamiratın tamamlanmış hali (beşinci deney).



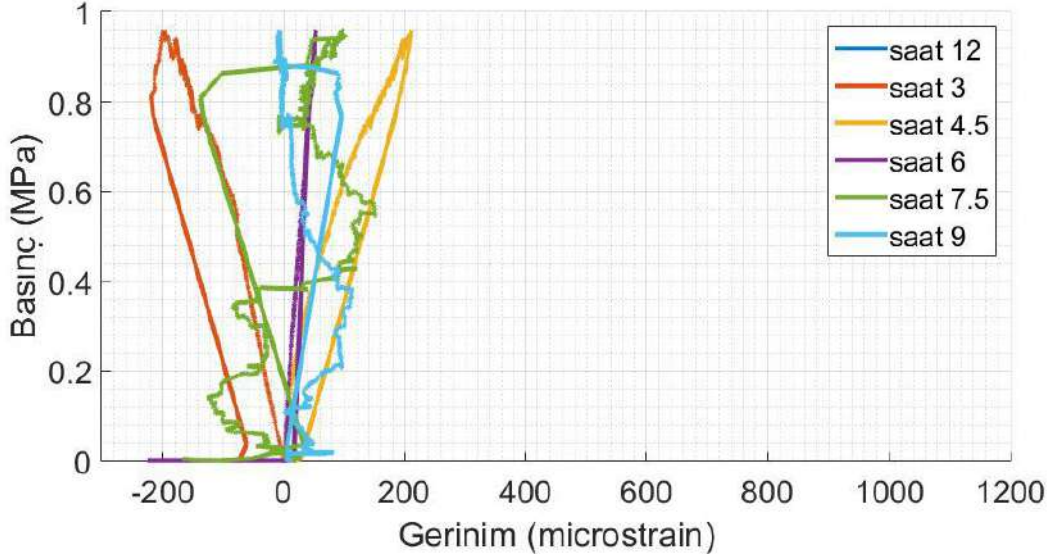
Şekil 3.99 Uygulanan iç basıncın zamana göre değişimi (beşinci deney).



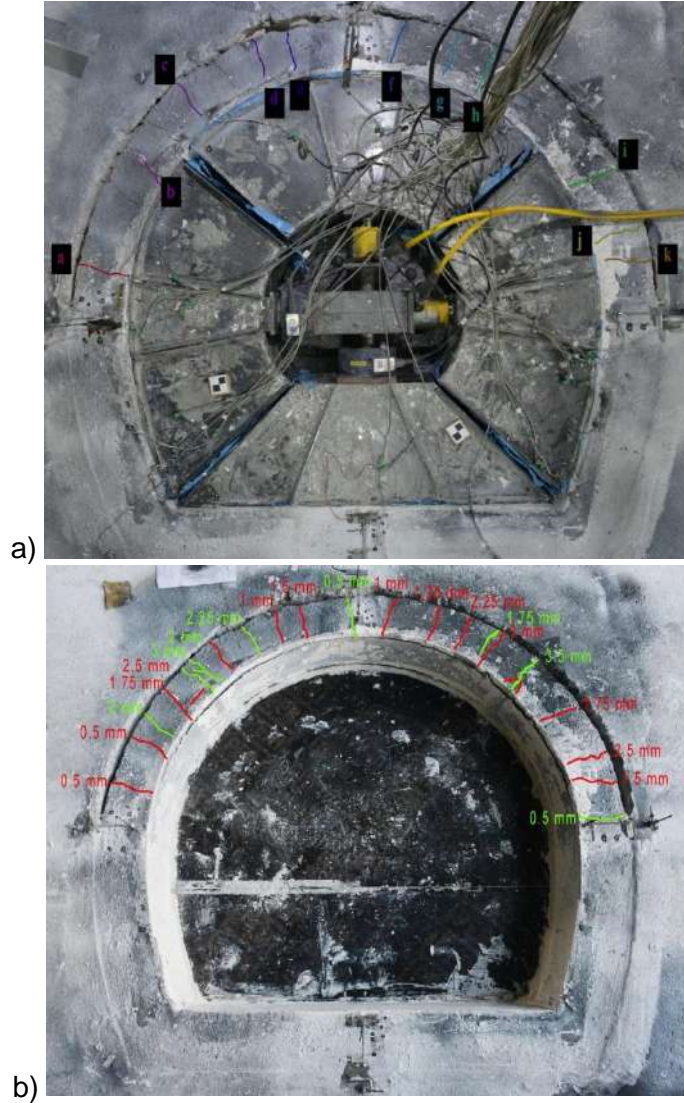
Şekil 3.100 Tünelin yatay ve düşey yönlere uzunluk değişiminin basınca göre değişimi (beşinci deney).



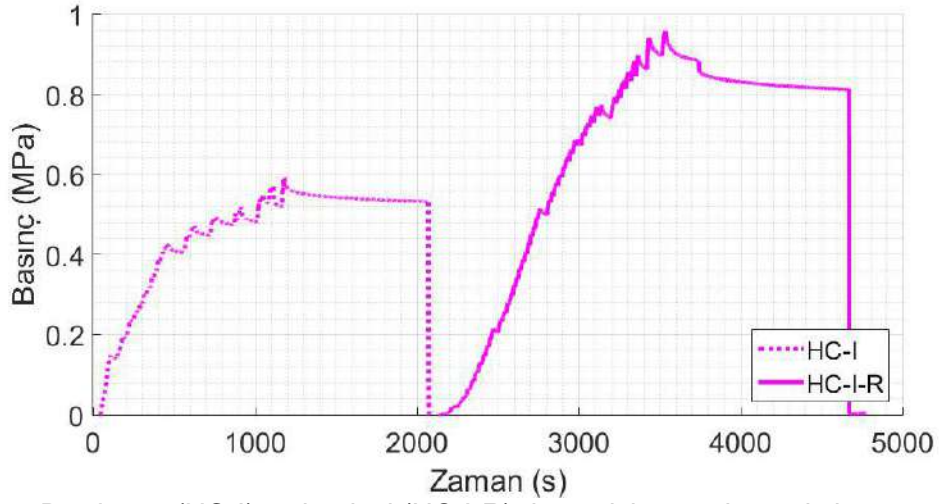
Şekil 3.101 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (beşinci deney).



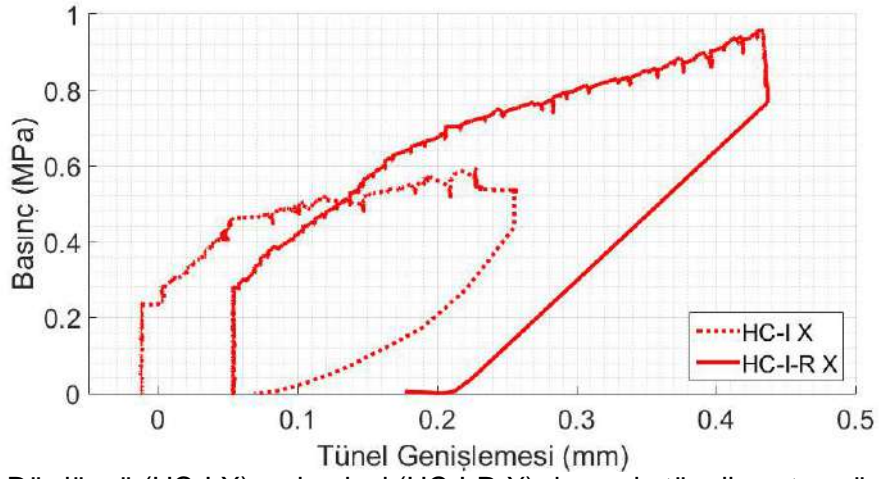
Şekil 3.102 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (beşinci deney).



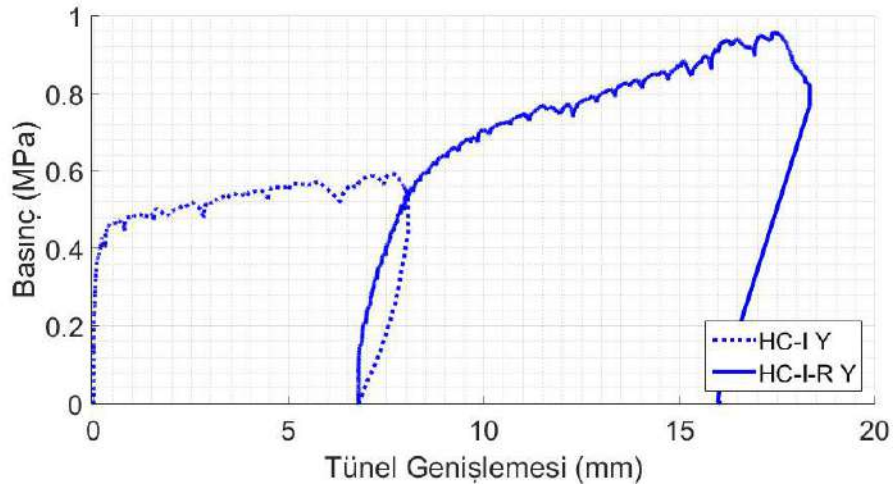
Şekil 3.103 a) Beşinci deneyde gözle görünür hale gelen çatlakların oluşma sırası (yeni oluşan çatlaklar), b) deney sonunda çatlakların yerleri ve ölçülen açıklıkları (tüm çatlaklar).



Şekil 3.104 Dördüncü (HC-I) ve beşinci (HC-I-R) deney için uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi.



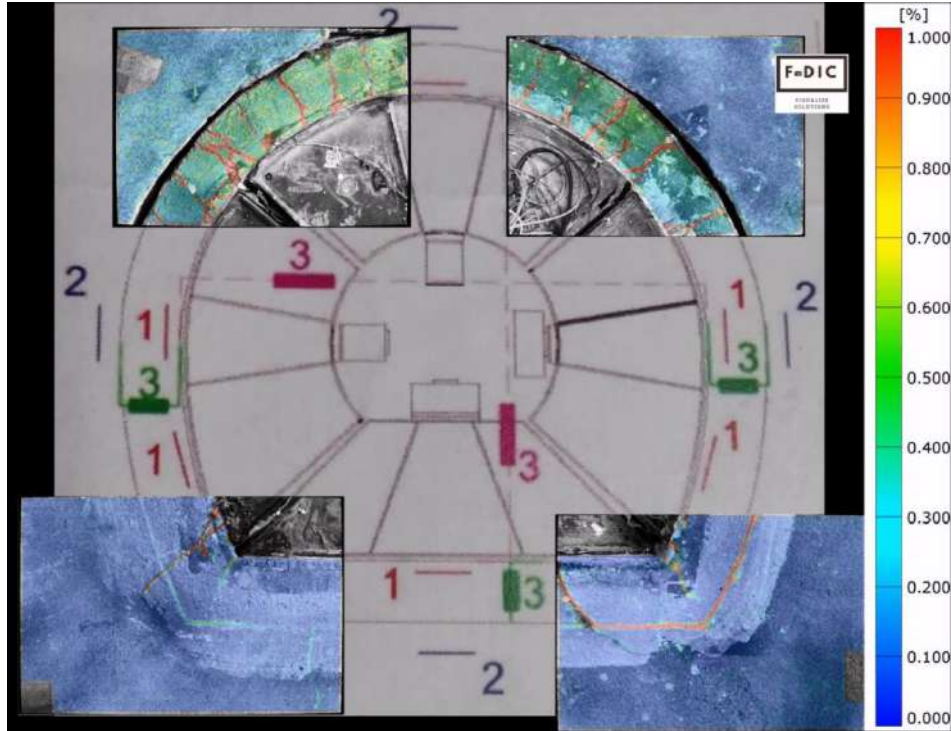
Şekil 3.105 Dördüncü (HC-I X) ve beşinci (HC-I-R X) deneyde tünelin yatay yöndeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi.



Şekil 3.106 Dördüncü (HC-I-Y) ve beşinci (HC-I-R Y) deneyde tünelin düşey yöndeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi.



Şekil 3.107 Beşinci deneyden sonra taç bölgesinin görünümü.



Şekil 3.108 Beşinci deney için elde edilen DIC sonuçları
(<https://www.youtube.com/watch?v=iK8ojWekiVU> ve
<https://www.youtube.com/watch?v=ffuiUuiSd-A>)

3.7 Deney 6: Lif Katkılı Betondan Üretilen Tünel Kaplamasının Kaya Etkileşimi Olmadan İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

Bu deney kaya etkileşimi olmadan gerçekleştirilen deney ile (Deney 2) büyük benzerlik taşımaktadır. İki deney arasındaki temel fark, beton karışım içeriğine eklenmiş olan lif ve süperakışkanlaştırıcı beton katkısıdır (Tablo 3.7).

3.7.1 Lifli Beton

Kullanılan sentetik lif (Forta-Ferro marka) 54 mm boyundadır (Şekil 3.109). İkinci önemli fark ise, yükleme plakalarının içlerinin rijitliğin artırılması amacıyla beton ile doldurulmuş olmasıdır. Prosedürü tekrar etmek gerekirse, kontrplak levhalarının üzerine kalıplar kurulmuş, sürtünmeyi azaltmak için kalıbın altı teflon levha ile kaplanmış, teflon levha da naylon örtü ile korumaya alınmıştır. Beton döküldükten sonra yedi gün kür edilmiş, hemen ardından pürüzlü yüzeyler alçı ile düzeltilmiş ve yükleme plakaları yerleştirilmiştir. Kaplama üzerine ve etrafına uygulanan gerinim pulları ve LVDT'lerin konumları ve özellikleri ikinci deney ile benzer şekilde seçilmiştir (Şekil 3.110). Deneyde kullanılan liflerin öz ağırlığı 910 kg/m^3 olarak raporlanmıştır. Sentetik liflerin çekme mukavemeti 570 MPa olarak verilmektedir (Şekil 3.111). Karıştırıcıda topaklanma olmaması için demetler halinde paketlenmiş lifler, karışıma agrega ile beraber eklenmiştir. Lifler, betonun akışkanlığı ciddi ölçüde azalttığı için süperakışkanlaştırıcı katkı (ace 450) kullanılmıştır. DIC ölçüm sistemi için 3 adet kamera kullanılmıştır. Bunlardan bir adedi deneyin sağ yarısını (saat 6-12 arası), diğer ikisi sol yarısını (saat 6-9 arası ve 9-12 arası) görecektir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.112).

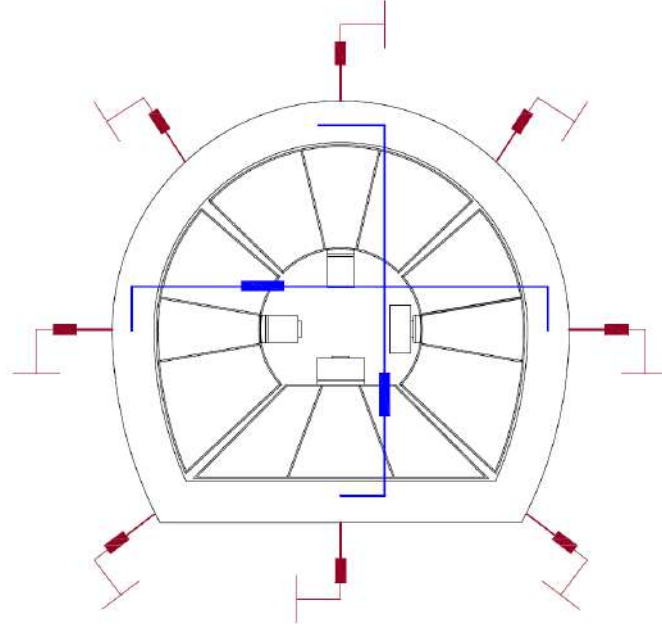
3.7.2 Deney Sonuçları

Deney günü elde edilen beton dayanım değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. İç basınç 0.021 MPa büyüklüğünde adımlar ile artırılmıştır (Şekil 3.113). Yerleştirilmiş DSLR kameralar 3 saniyede bir görüntü almıştır. Beklendiği üzere tünel kaplamasının düşey yönde genişlemesi, yataydan önce başlamış ve yatay genişlemeye göre daha hızlı artmıştır (Şekil 3.114). İlk çatlaklar, gerilim yoğunlaşma bölgelerinde, iç basınç 0.16 MPa seviyesine ulaştığında görülmüştür (saat 4.5 ve saat 7.5 yönleri) ancak çatlak oluşumu, kaplamanın her yönünde gerçekleşmiş ve çatlak dağılımı nispeten homojen olmuştur. Bu deneyde tünelin alt kısmını oluşturan düz kısmın giriş benzeri bir davranış sergilediği görülmüştür. Kaplama geometrisinin davranışı yönlendirdiği bu deneyde, taç, omuz ve giriş bölgelerindeki çatlakların genişlemesi, liflerin çekmeye olan katkılarından dolayı sınırlandırılmıştır. Ancak sol ve sağ alt köşelerdeki çatlaklar genişlemeye devam etmiştir. Deney sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı Şekil 3.115 verilmiştir. DIC sonuçları çatlakların oluşum sırası hakkında detaylı bilgi vermektedir (Şekil 3.116). DIC ölçümlerinden hazırlanan videolar için bağlantılar aşağıda verilmiştir:

- Video 1: <https://www.youtube.com/watch?v=FetFEDPYMmE>
- Video 2: <https://www.youtube.com/watch?v=vFzkhdZnn3g>
- Video 3: <https://www.youtube.com/watch?v=a07LioKMiSo>



Şekil 3.109 Kullanılan sentetik lifler (altıncı deney).



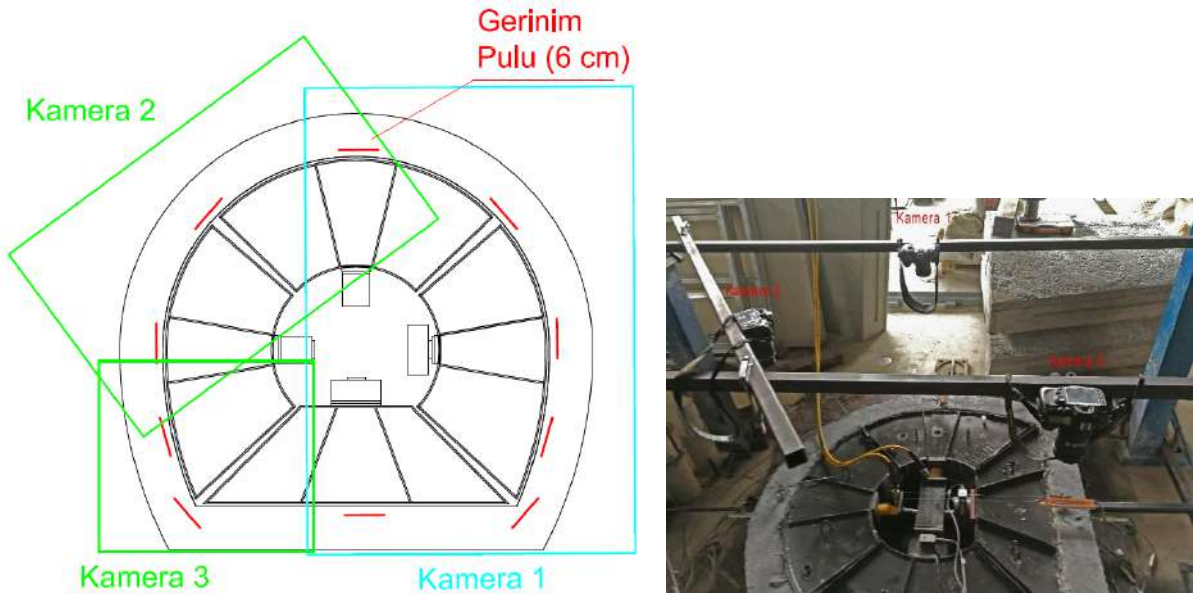
Şekil 3.110 Altıncı deneyde kullanılan ölçüm sistemi.

Specific Gravity	0.91
Density	1,534 lb/cu yd (910 kg/cu m)
Tensile Strength	83-96 ksi (570-660 MPa)
Length	2.25 in (54 mm), 1.5 in (38 mm)
Melting Point	319°F (160°C)
Material	Virgin Copolymer / Polypropylene
Form	Monofilament / Fibrillated
Color	Gray
Acid / Alkali Resistance	Excellent
Absorption	Nil

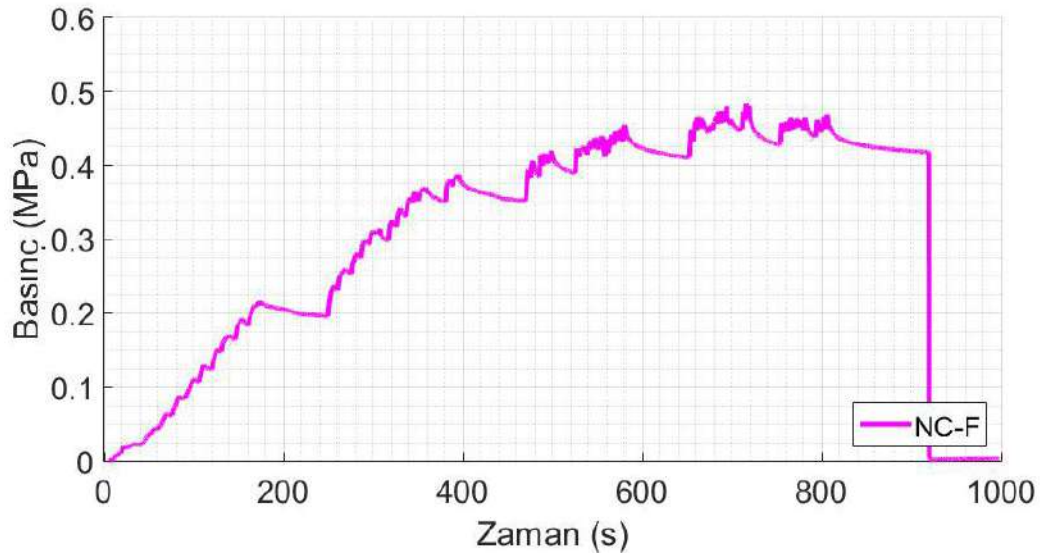
Şekil 3.111 Lif özellikleri (http://www.forta-ferro.com/wp-content/uploads/2017/11/FERRO_FD110318.pdf).

Tablo 3.7 Lifli beton reçetesi

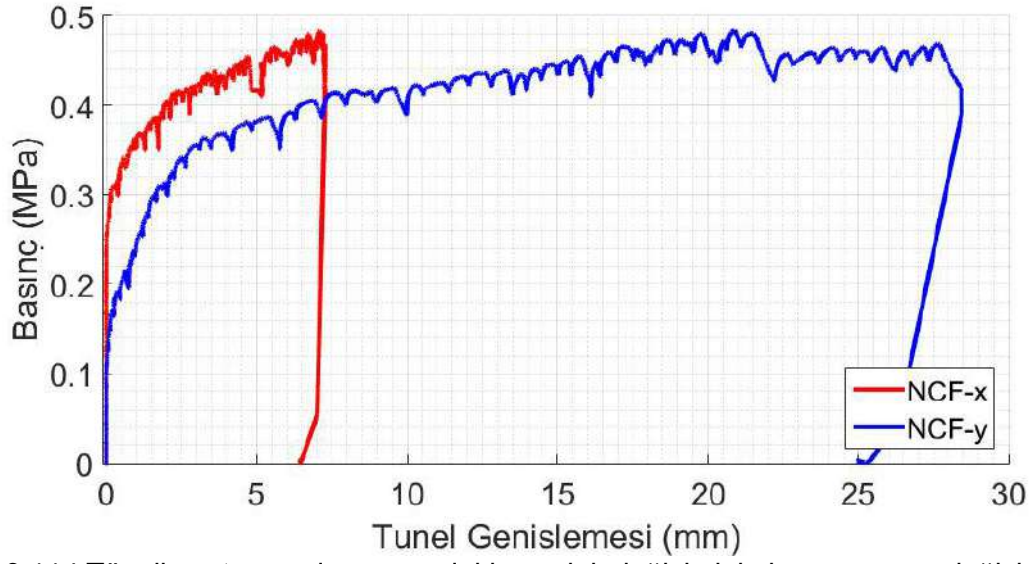
Beton Bileşeni	Karışım Oranı (kg/m ³)	
	Ağırlık (kg/m ³)	Hacmen (m ³)
Çimento CEM IV/B-M (P-L) 42.5R	300	9.62 %
Su	165	16.50 %
Kum	1255	46.93 %
Çakıl	693	25.83 %
Lif	14	1.03 %
Ace 450	1	0.09 %
Hedeflenen f_c (MPa)	30	30



Şekil 3.112 Altıncı deneyde kullanılan görüntü sistemi.



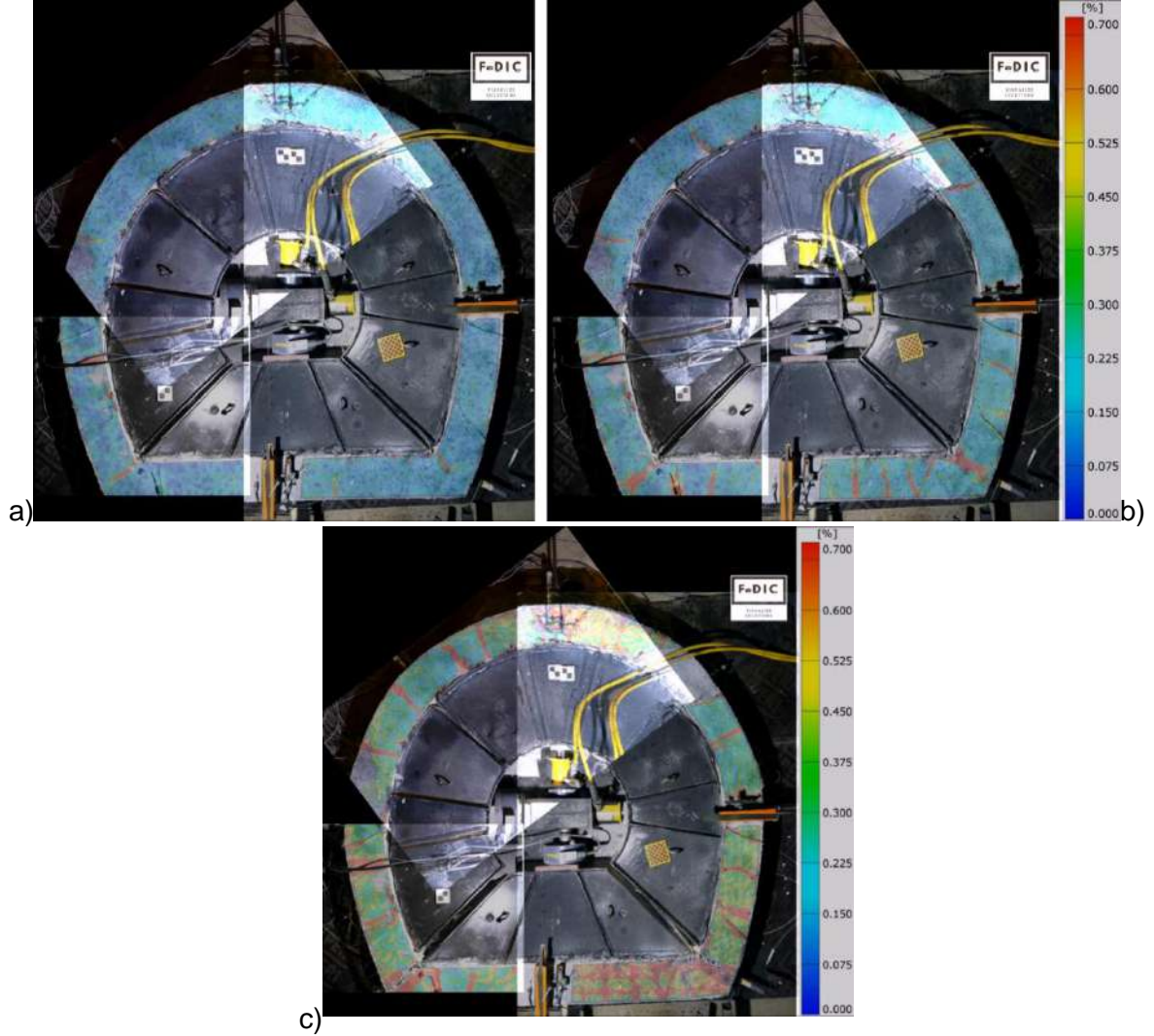
Şekil 3.113 Uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi (altıncı deney).



Şekil 3.114 Tünelin yatay ve düşey yöndeki uzunluk değişiminin basınca göre değişimi (altıncı deney).



Şekil 3.115 Deney sonunda gözlemlenen çatlak dağılımı (altıncı deney).



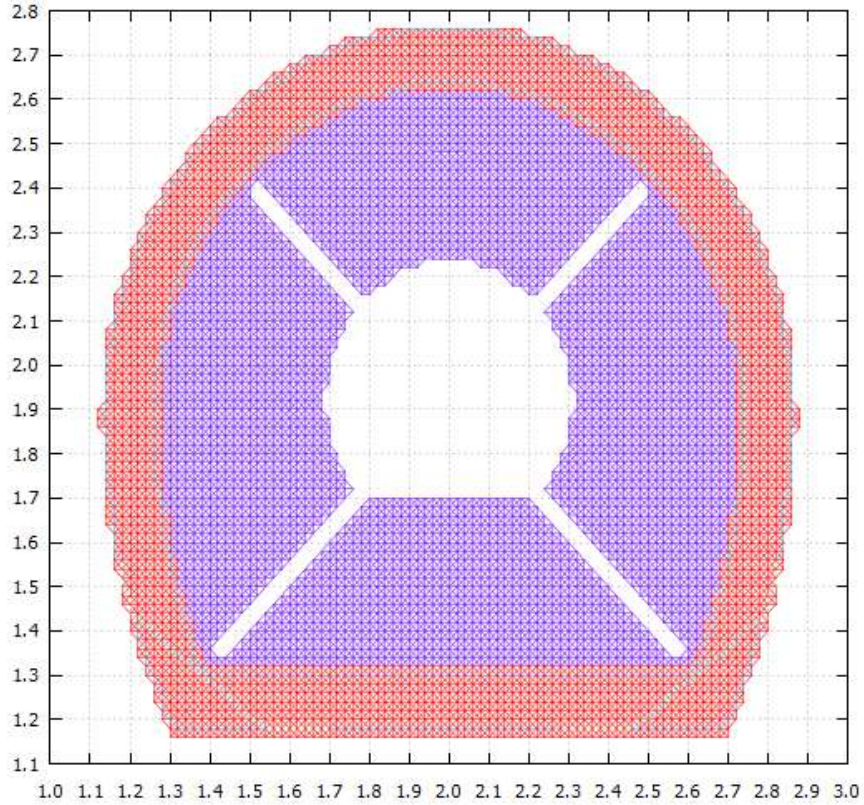
Şekil 3.116 Altıncı deney için elde edilen DIC sonuçları: a) iç basınç = 0.18 MPa, b) iç basınç = 0.35 MPa, c) iç basınç = 0.47 MPa (<https://www.youtube.com/watch?v=FetFEDPYMmE>, <https://www.youtube.com/watch?v=vFzkhdZnn3g> ve <https://www.youtube.com/watch?v=a07LioKMiSo>).

3.7.3 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

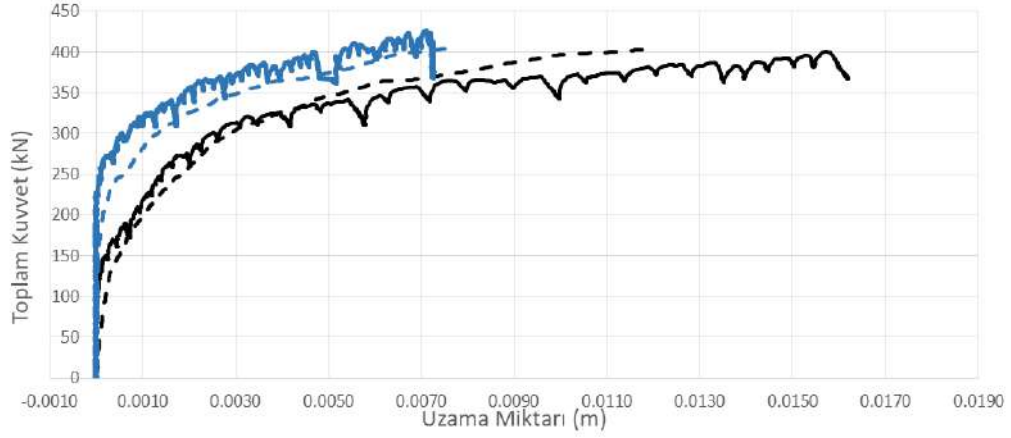
Kaya etkileşimi olmayan makro sentetik lifli tünel kaplamasının doğrusal olmayan davranışını inceleme amacıyla yapılan altıncı deney, proje kapsamında geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Basit kiriş deneyleri sonucu kalibre edilen OLM modelinde, 14 kg/m^3 makro sentetik fiber karışım oranına ve kullanılan beton elastisite modülü ($E_c=31.82 \text{ GPa}$) için OLM malzeme modeli parametreleri $\epsilon_{cr}=6e-05$, $a_1=1$, $a_2=1000$, $a_3=10000$ $b_1=0.2$, olarak $b_2=0.05$ belirlenmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak $G_f= 1180 \text{ N/m}$ (çatlak enerjisi) değerine tekabül etmektedir. Çekme dayanımıysa 1.90 MPa olarak alınmıştır. Deneyde önceki analizlerde olduğu gibi, yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında elastisite modülü 1 GPa kullanılan kauçuk kullanılmıştır. Önceki analizlerde olduğu gibi tünelin alt kısmının eğilmesinden dolayı kauçuğun tünelden ayrılmasını sağlamak için düşük bir ϵ_{cr} değeri kullanılmıştır. Ayrıca yükleme plakaları, mevcut donatı oranları ve donatı düzeni korunacak

şekilde elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 200 GPa ve 420 MPa olarak kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan düğüm noktaları ve bağ elemanları Şekil 3.117’de gösterilmektedir.

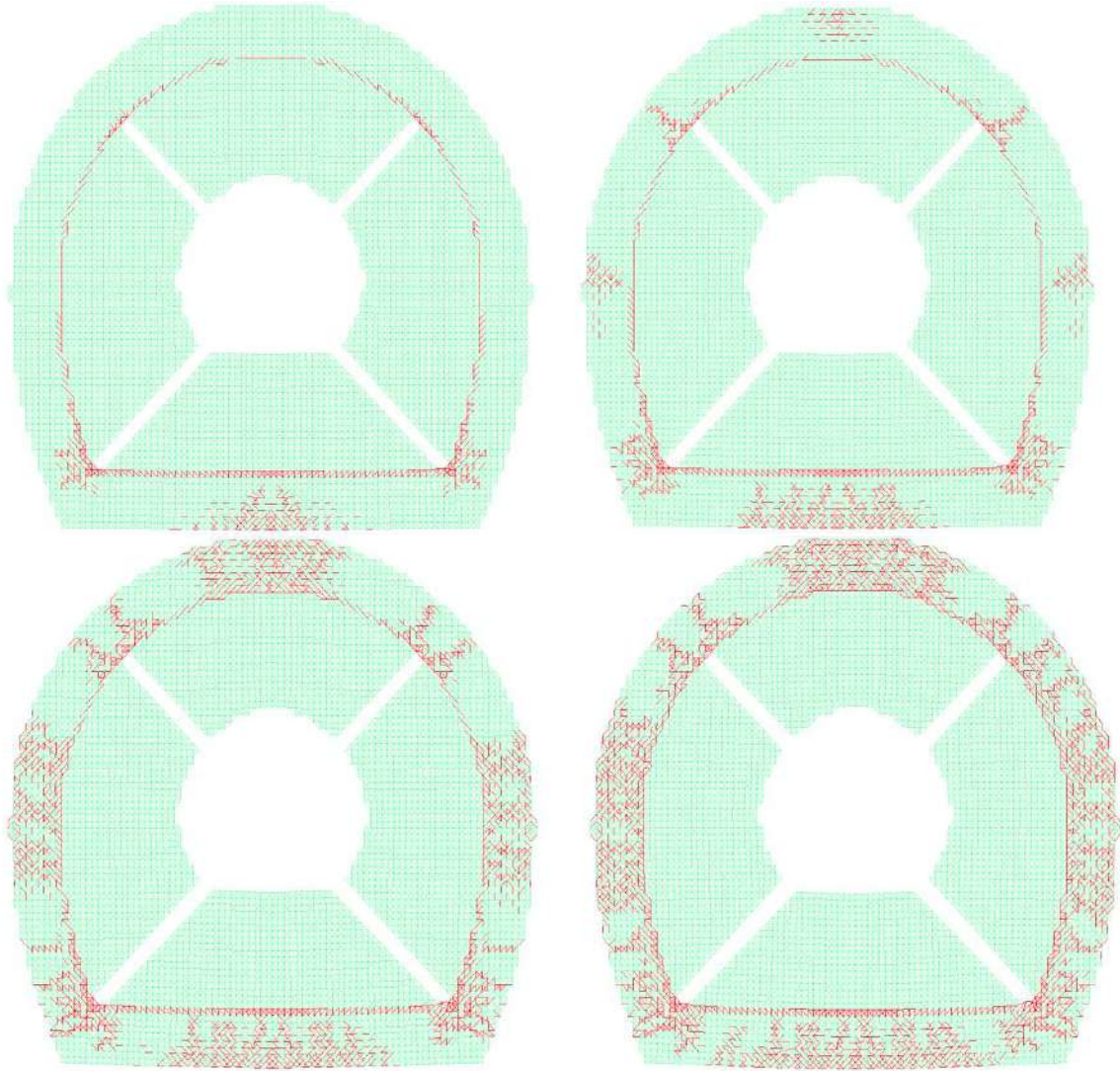
Şekil 3.118’de tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese edilmektedir. Sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.119’de ise sayısal modelleme sonucunda toplam yükün dört farklı değeri için elde edilen hasar dağılımı gösterilmektedir. OLM sonuçlarının deneysel sonuçlarla mukayesesi yapıldığında elde edilen hasarın biraz daha yayılı olduğu ancak genel davranışın sayısal model tarafından oldukça doğru bir şekilde yakalandığı görülmektedir (Şekil 3.115 ve Şekil 3.116). Altıncı deney için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar ikinci deney ile karşılaştırıldığında lifli betonun hasarı kaplama üzerine yaydığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.117 Altıncı deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları.



Şekil 3.118 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



Şekil 3.119 Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 400 kN (sağ üst) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı. Kırmızı gerinim değeri 0,0008'den büyük elemanları göstermektedir. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).

3.8 Deney 7: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Kaya ile Kısmi Etkileşimli Lifli Betondan Üretilen Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

Yedinci deney, dördüncü ve beşinci deneye benzer şekilde yüksek saha gerilimleri altında kaya ile kısmi temas halindeki betonarme kaplamanın davranışını incelemektedir. Yapılan diğer deneylerden farkı lifli beton kullanılmış olmasıdır. Lifler betonun çekme dayanımını çok fazla değiştirmese de, çatlak açıldıktan sonra daha sünek bir davranış elde edilmesini sağlamaktadır. Bu da daha sık ama daha dar çatlaklar oluşmasına neden olmaktadır.

Deney düzeneğinin hazırlanması aşamasında daha öncekilere benzer şekilde bir iç kalıp kurulmuştur. Kaplamanın dışı ise, daha önce yapılan deneylerde olduğu gibi, öngerme tendonları ile saha gerilimi altında olan kaya katmanı bulunmaktadır. Dördüncü deneyde olduğu gibi kaplamanın üst ve omuz tarafı ile kaya arasında boşluk olma durumu incelenmiştir.

Bu bölgedeki temassızlık, beton dökümünden önce yerleştirilen ve beton kürünü aldıktan sonra çıkartılacak köpükler ile sağlanmıştır. Beton karışım oranları, altıncı deneyde kullanılan karışım oranları ile aynıdır. Beton yedi gün boyunca kür edilmiştir. Deney kaplama betonunun 28. gün mukavemetini almasından sonra yapılacağı için süreç içerisinde yükleme plakaları, klasik ölçüm sistemi ve görsel ölçüm sistemi ayarlanmış ve yerleştirilmiştir. Önceki kısmi temaslı deneyler sırasında, temassızlık sağlayan boşluk boyunca, kaya katmanına yapıştırılan gerinim pullarından önemli bir okuma alınamadığı için saat 9, 12 ve 3 yönlerine yeni gerinim pulları yapıştırılmamıştır. Kaya katmanı ile kaplamanın temasta bulunduğu bölgede ise (saat 4.5, 6 ve 7.5 yönleri) gerinim pulları yeni deney için değiştirilmiştir. Görsel ölçüm sisteminin çalışması için yapılan boyama, deneyden bir gün önce yapılmıştır.

3.8.1 Deney Sonuçları

Deney günü elde edilen beton dayanım değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Deney sırasında 0.021 MPa büyüklüğünde iç basınç adımları kullanılmıştır (Şekil 3.121). Beklenen basınç seviyesine ulaşıldıktan sonra numune üzerindeki yük boşaltılmış ve yükleme tekrarlanmıştır. Böylece hem plastik deformasyonun derecesi görülmüş, hem de ölçüm cihazlarının hassaslığı test edilmiştir (Şekil 3.121 ve Şekil 3.122). Deney sırasında görsel ölçüm sistemi beş saniyede bir kayıt almıştır. Diğer deneyden farklı olarak, gerilim yoğunlaşma bölgelerindeki çatlaklar (sol ve sağ alt köşeler), taç bölgesi ile neredeyse eşzamanlı bir şekilde başlamıştır. İç basınç 0.3 MPa mertebelerindeyken çatlaklar genişlemeye başlamıştır. İç basınç 0.65 MPa seviyesine ulaştığında çatlak sayısı 16'ya ulaşmış ve deney sonlandırılmıştır. Deney sonunda yapılan tekrar yükleme ayrıca incelenmiş ve tüm ölçümlerin kontrol limitleri içerisinde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.123 ve Şekil 3.124'de gerinim pullarından elde edilen veri verilmiştir. Deney sonuçlarının dördüncü deney sonuçlarıyla

benzerlik taşıdığı söylenebilir. Şekil 3.125’de DIC ile elde edilen hasar dağılımını göstermektedir. DIC ölçümlerinden oluşturulan videolar için bağlantıları aşağıda verilmiştir:

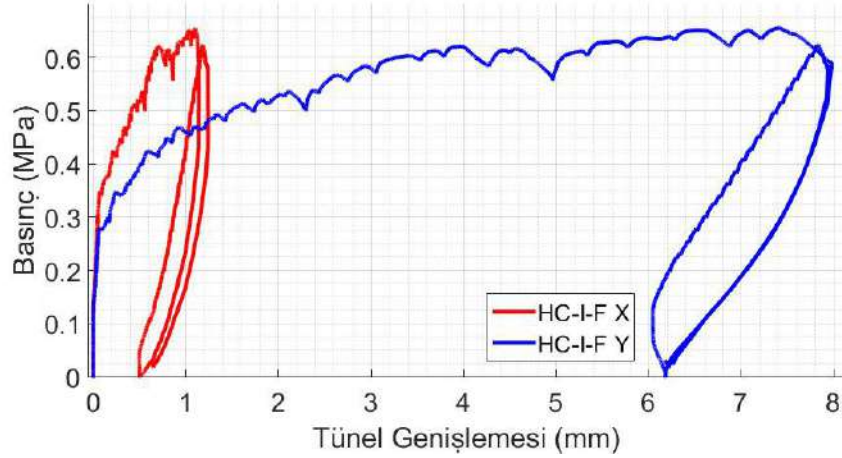
- Video 1: <https://www.youtube.com/watch?v=IKON99DTDA8>
- Video 2: <https://www.youtube.com/watch?v=27fnCC2cZTw>
- Video 3: <https://www.youtube.com/watch?v=W4Tg8M4XOcs>
- Video 4: <https://www.youtube.com/watch?v=FetFEDPYMmE>
- Video 5: <https://www.youtube.com/watch?v=W4Tg8M4XOcs>



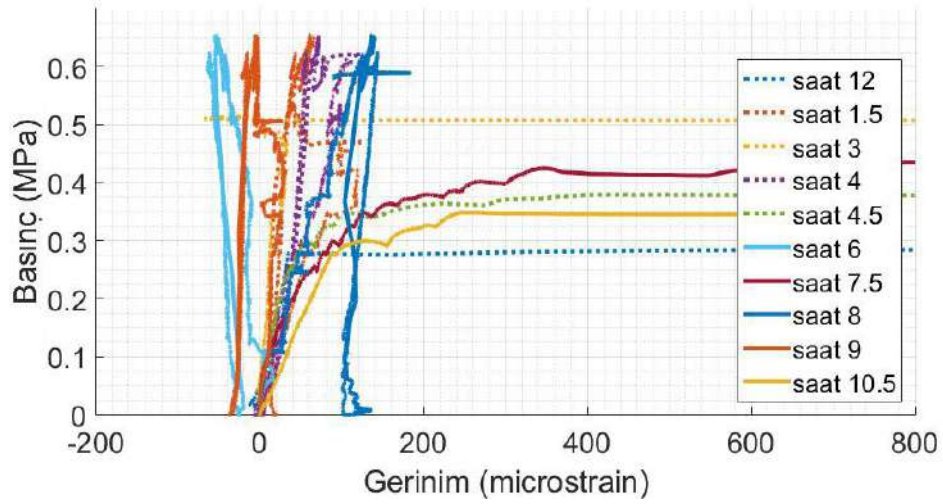
Şekil 3.120 Yedinci deney numunesinin ölçüm cihazları yerleştirilmeden önceki görünümü.



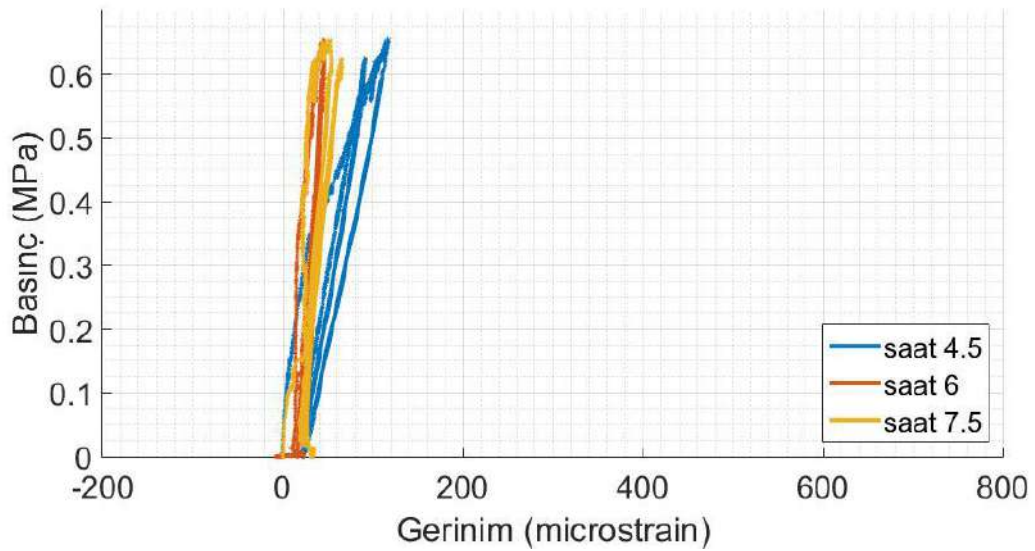
Şekil 3.121 Uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi (yedinci deney).



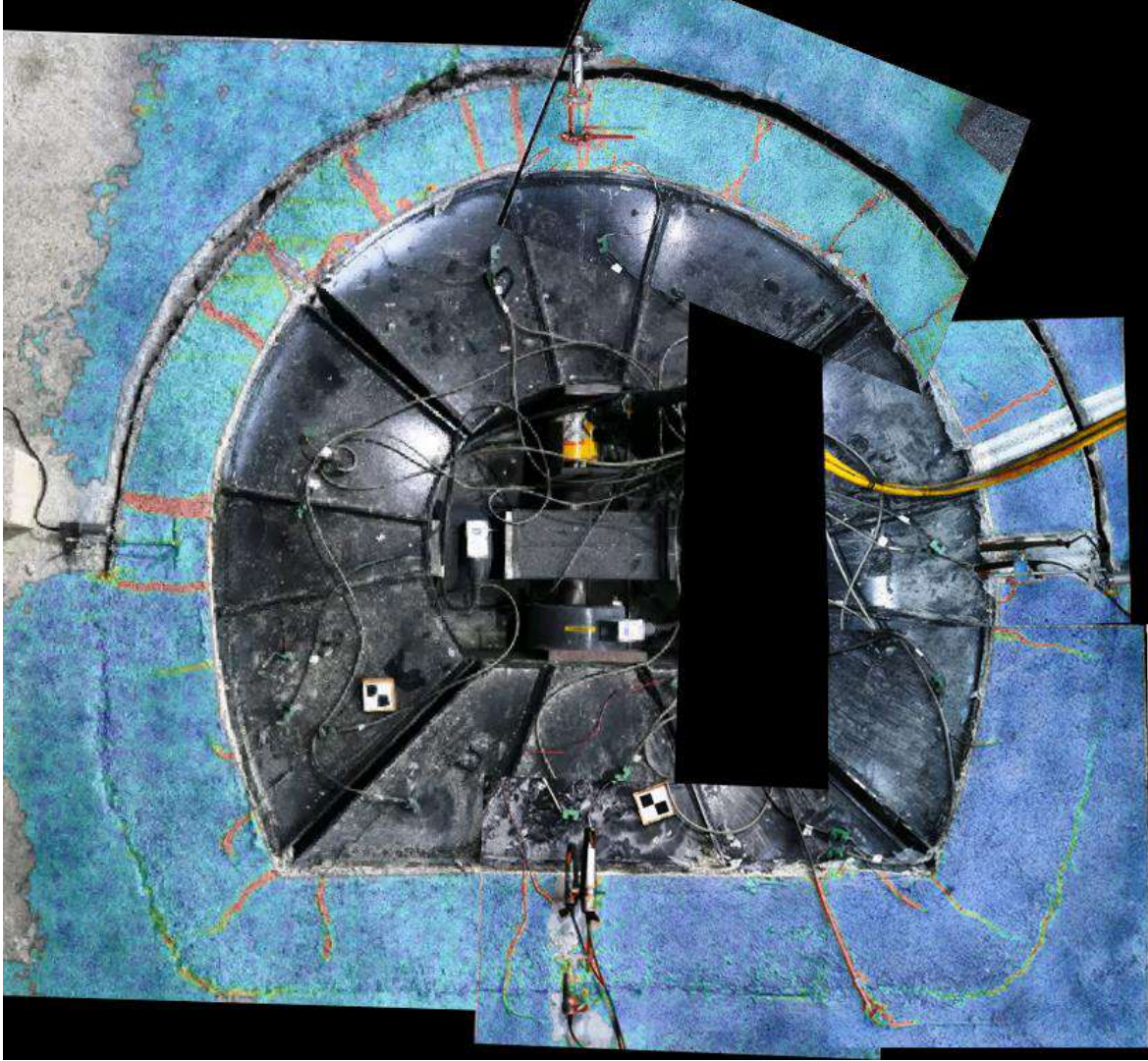
Şekil 3.122 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (yedinci deney).



Şekil 3.123 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (yedinci deney).



Şekil 3.124 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (yedinci deney).



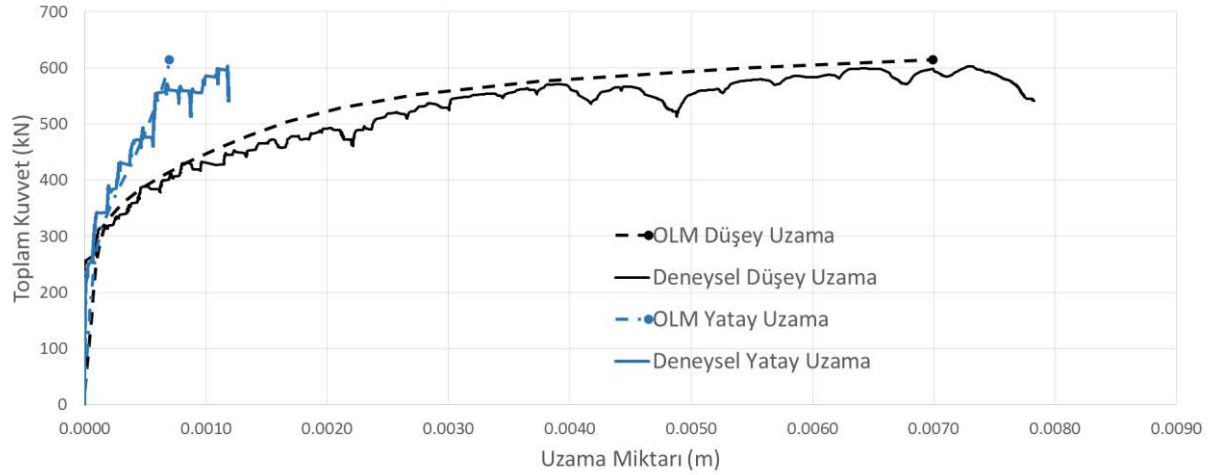
Şekil 3.125 Yedinci deney için elde edilen DIC sonuçları
(<https://www.youtube.com/watch?v=IKON99DTDA8>,
<https://www.youtube.com/watch?v=27fnCC2cZTw>,
<https://www.youtube.com/watch?v=W4Tg8M4XOcs>,
<https://www.youtube.com/watch?v=FetFEDPYMmE>,
<https://www.youtube.com/watch?v=W4Tg8M4XOcs>)

3.8.2 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

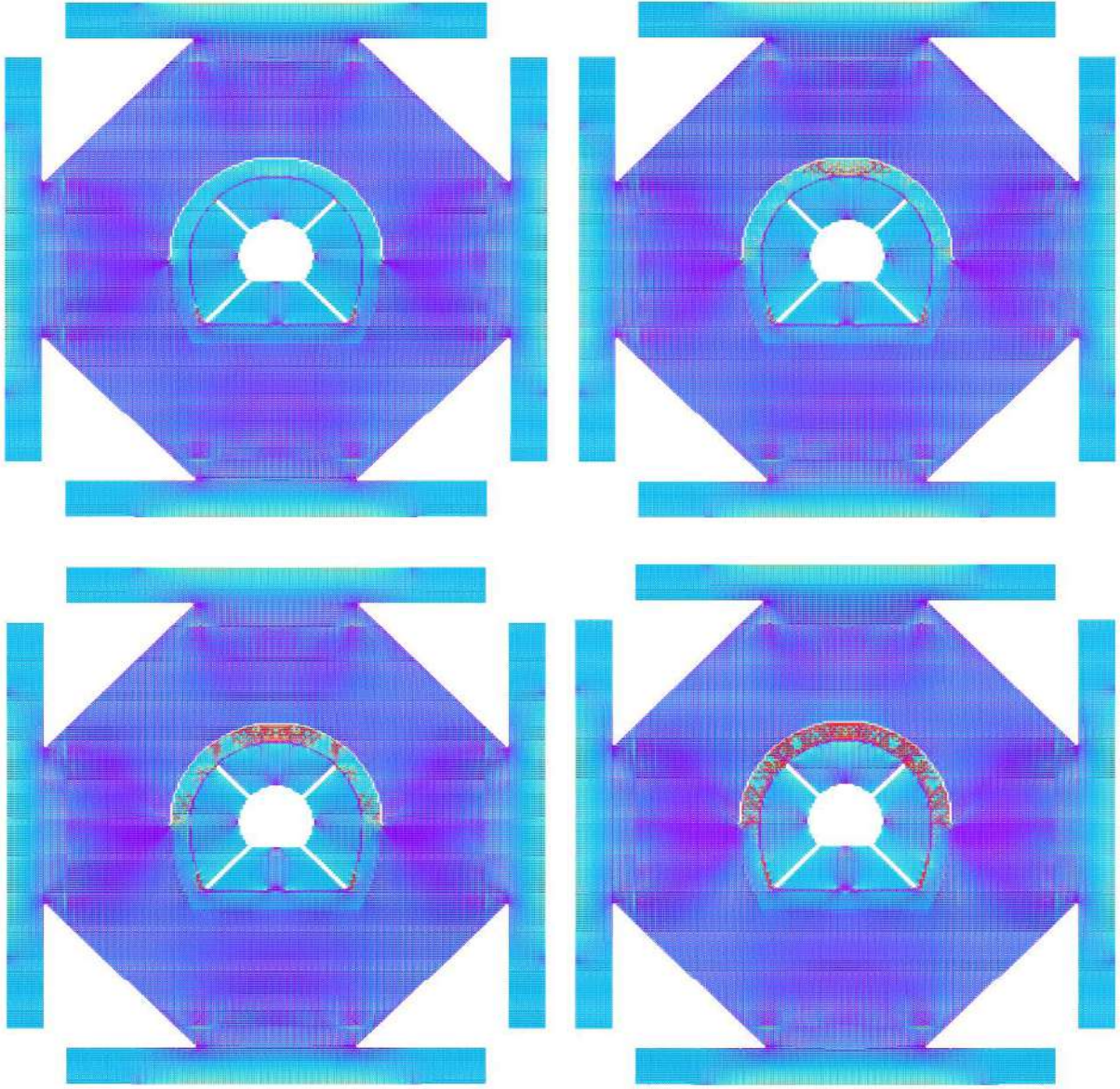
Yüksek saha gerilmeleri altındaki lif katkılı beton tünel kaplaması proje kapsamında geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Dördüncü deneyde bulunan, 6 farklı malzemeden oluşan OLM bağ elemanları birebir kullanılmıştır (Şekil 3.93). Yine aynı şekilde, tünelin üst kısmında lifli kaplama ile kaya arasında boşluk yaratılmıştır. İki deney arasındaki temel fark, beton karışım içeriğine eklenmiş olan lif ve süperakışkanlaştırıcı beton katkısı göz önünde bulundurulurken malzeme modelinin oluşturulmasıdır. Bu modelde, sentetik lif ile güçlendirilmiş kiriş deneylerinden elde edilen ve lifli beton kaplama modelinde de kullanılan OLM modeli malzeme parametreleri kullanılmıştır. Bu değerler, $G_f = 1180 \text{ N/m}$ (çatlak enerjisi) değerine

denk gelen elastisite modülü $E_c=31.82$ GPa ve $\varepsilon_{cr}=6e-05$, $a_1=1$, $a_2=1000$, $a_3=10000$ $b_1=0.2$, $b_2=0.05$ değerleridir. Deneyde önceki analizlerde de olduğu gibi, yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında elastisite modülü 1 GPa kullanılan kauçuk kullanılmıştır. Önceki analizlerde olduğu gibi tünelin alt kısmının eğilmesinden dolayı kauçuğun tünelden ayrılmasını sağlamak için düşük bir ε_{cr} değeri kullanılmıştır. Ayrıca yükleme plakaları, mevcut donatı oranları ve donatı düzeni korunacak şekilde elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 200 GPa ve 420 MPa olarak kullanılmıştır.

Şekil 3.126'da tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese edilmektedir. Sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. OLM hasar dağılımlarının deneysel sonuçlarla mukayesesi yapıldığında elde edilen hasarın biraz daha yayılı olduğu görülmektedir (Şekil 3.127). OLM sonuçlarının dördüncü analiz sonuçlarıyla benzerlik taşıdığı söylenebilir. Bu deney için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar dördüncü deney ile karşılaştırıldığında lifli betonun hasarı kaplama üzerine yaydığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.126 Tünelin yatay ve düşey yönlerdeki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



Şekil 3.127 Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 450 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0003) . Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (dördüncü deney).

3.9 Deney 8: Yüksek Saha Gerilimleri Altında Kaya ile Kısmi Etkileşimi İyileştirilmiş Lifli Betondan Üretilen Tünel Kaplamasının İç Basınç Altında Gösterdiği Davranışın İncelenmesi

Son deney dördüncü, beşinci ve yedinci deneye benzer şekilde yüksek saha gerilimleri altında kaya ile kısmi temas halindeki betonarme kaplamanın davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yedinci deneyden farkı tünel kaplamasının her iki omuz kısmında kaya ile temasının kısmi olarak sağlanıyor olmasıdır (Şekil 3.128). Kullanılan sentetik altıncı ve yedinci

deneyde kullanılan lif ile aynı özelliklere sahiptir (Şekil 3.109). Özellikleri ise Şekil 3.111'de verilmiştir.

3.9.1 Deney Sonuçları

Deney günü elde edilen beton dayanım değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. Kaya-Kaplama etkileşim alanındaki etkileşim saat 1.30 ve 10.30 yönlerini merkezleyecek şekilde, 400 mm genişliğinde ve tüm deney kesiti boyunca yapılmış tamir harcı dolgusudur. Bu dolgu, üçüncü deneyde tünel kaplaması ve kaya arasına doldurulmuş tamir harcı ile aynı özelliklere sahiptir. Deney düzeneğinin hazırlanması aşamalarında, klasik ve görsel ölçüm sistemleri, yedinci deney ile aynı şekilde tasarlanmıştır. Görsel ölçüm sisteminin ayarları ve boyamalar, deneyden bir gün önce yapılmıştır.

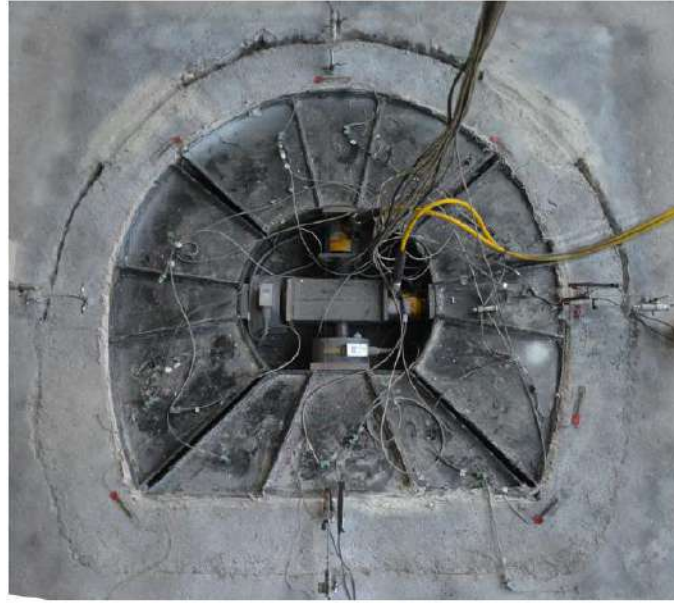
İç basınç 0.021 MPa büyüklüğünde adımlar ile artırılmıştır (Şekil 3.129). Deney sırasında tünel kaplaması, sırası ile 0.4 MPa, 1.05 MPa ve 0.9 MPa seviyelerine kadar yüklenip boşaltılmıştır. Son yükleme döngüsü, tepkinin doğrusallığını sınamak amacıyla 0.021 MPa yük adımları kullanılmaksızın hızlıca yapılmıştır. Deney, kısmi etkileşimli deneyler ile kıyaslanabilecek geometriye sahip olmasına karşın, deney sırasında sünek davranış bozulmadan ulaşılan azami yük üçüncü ve beşinci deneyde ölçülen mertebededir. Aynı şekilde tünelin yatay ve düşey yöndeki uzunluk değişimleri (Şekil 3.130), kaya-kaplama etkileşiminin kısmen de olsa sağlanabildiği için yedinci deneye kıyasla büyük oranda limitlenmiştir. Kaplama üzerinden okunan gerinimlerden saat 4 ve 9 yönlerinde çatlak yakınında buldukları için, 6 yönünde ise giriş şeklinde çalışan alt kısmın ortasında olması sebebiyle üç adet gerinim pulunda çok ufak mertebelerde okumalar alınmış, diğer altı gerinim pulunu ise beklendiği gibi ölçün kaydedilmiştir (Şekil 3.131). Kaya üzerine uygulanmış gerinim pulları ise, deney boyunca kayanın elastik limitler içerisinde kaldığını göstermektedir (3.132).

Yedinci deneyde oluşan 12 adet çatlaktan 3 tanesinde kılcal seviyede açılma gözlemlenmemiştir. Diğer saha gerinimlerinin yüksek olduğu ve kısmi etkileşimli deneylerden farklı olarak sağ ve sol köşelerde çatlaklar gelişmiştir. Aktif olan çatlaklarda ise, aynı basınç değerleri karşılaştırıldığında (0.6 MPa) çatlak genişliklerinin yedinci deneyle karşılaştırıldığında çok daha küçük mertebelerde olduğu gözlemlenmiştir. Deneyde gözlemlenen çatlakların oluşum sırası ve genişlikleri Şekil 3.133'de verilmiştir.

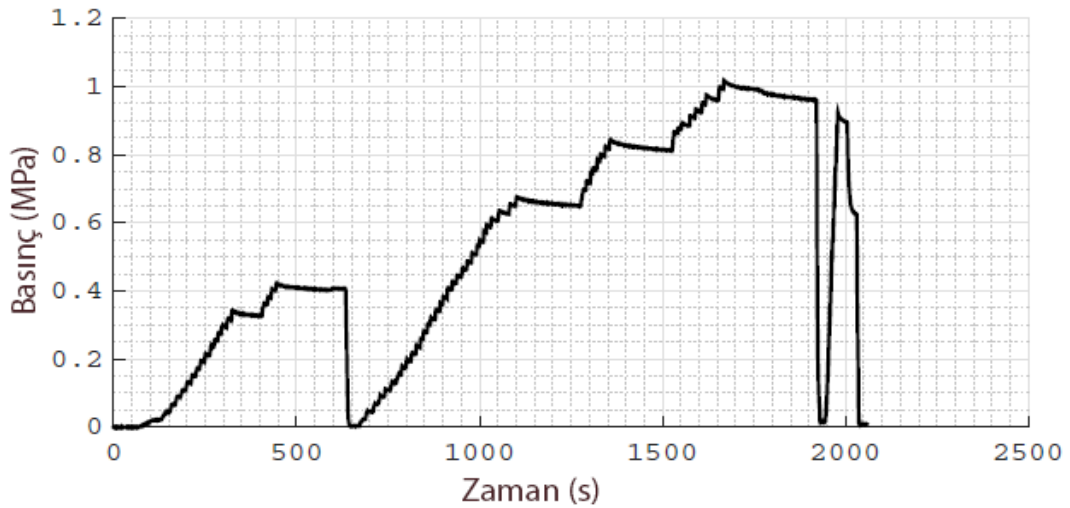
Sekizinci deneyin görsel ölçüm sisteminde kullanılmış beş adet kameradan birinin (saat 5-6 yönlerini tarayan) odak noktası, deney sırasında kaydığı için anlamlı ölçüm alınamamıştır. Düzgün çalışan dört kameranın ölçümleri (Şekil 3.134), göz ile görülemediği için genişlik ölçümü yapılmamış ve Şekil 3.133'de gösterilmemiş toplam 5 adet çatlağı ortaya çıkarmıştır.

Bunlardan 2 tanesi saat 9 yönünde, kaya-kaplama etkileşiminin kesildiği alanda, iki tanesi saat 11 yönünde ve son olarak bir tanesi de saat 4 yönündedir. Şekil 3.134’de bu çatlaklar dışındaki işaretler, DIC programının yakaladığı klasik ölçüm methodu yapan gerinim pullarına bağlı kabloların hareketleridir. Sekizinci deneyin görsel ölçüm sonuçlarının önemli bir başka sonucu ise, kaplama-kaya etkileşim bölgesi boyunca diğer deneylerde de gözlemlenen saat 4.30 ve 7.30 bölgelerinde (köşelerde) gözlemlenen gerinimlerin, saat 10.30 ve 2.30 yönlerinde (yani kısmi etkileşim bölgelerinde) gözlemlenmemesidir. DIC ölçümlerinden hazırlanan videolar için bağlantılar aşağıda verilmiştir:

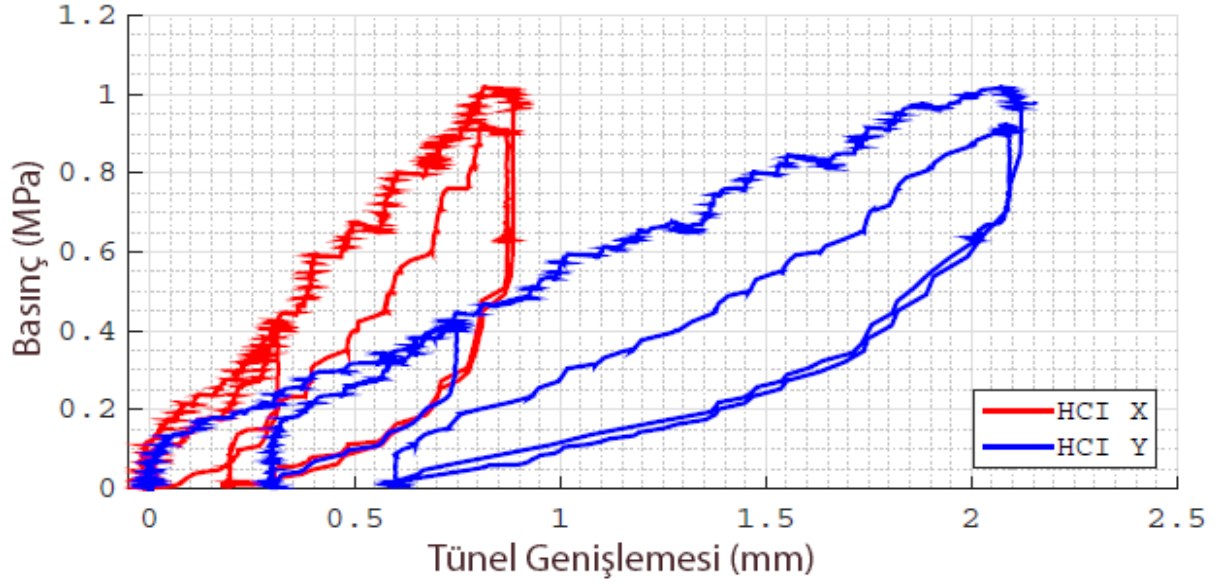
- https://www.youtube.com/watch?v=jJa_YN0dE0Q
- <https://www.youtube.com/watch?v=gvSszYNzWFI>



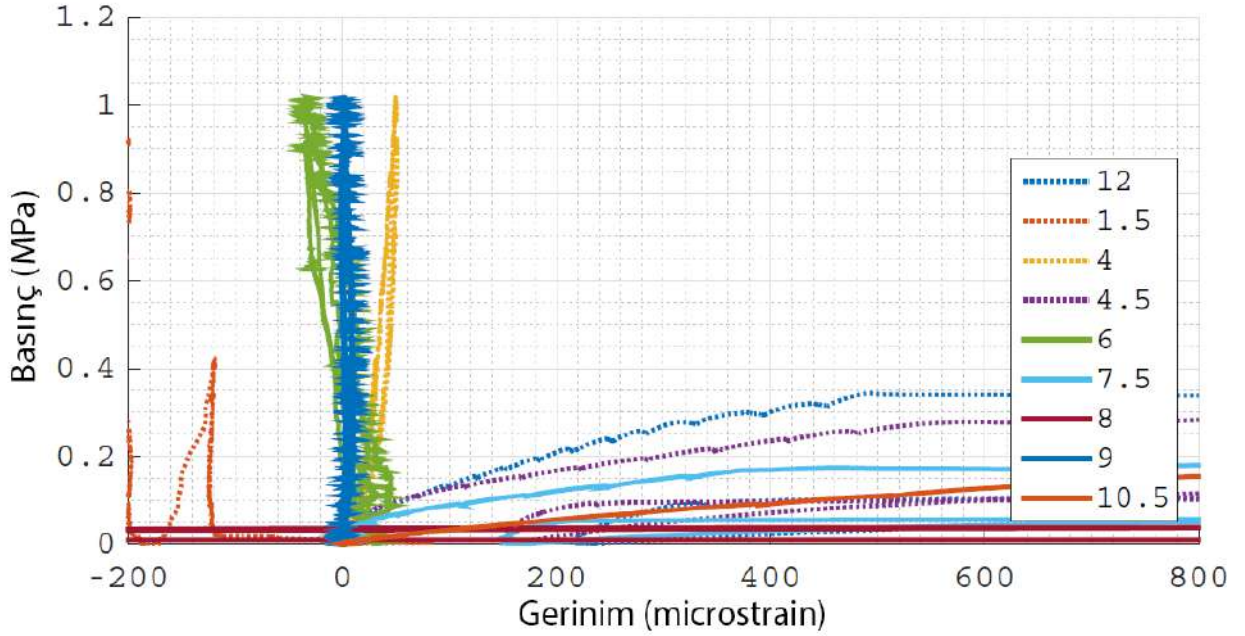
Şekil 3.128 Yedinci deney numunesinin ölçüm cihazları yerleştirilmeden önceki görünümü.



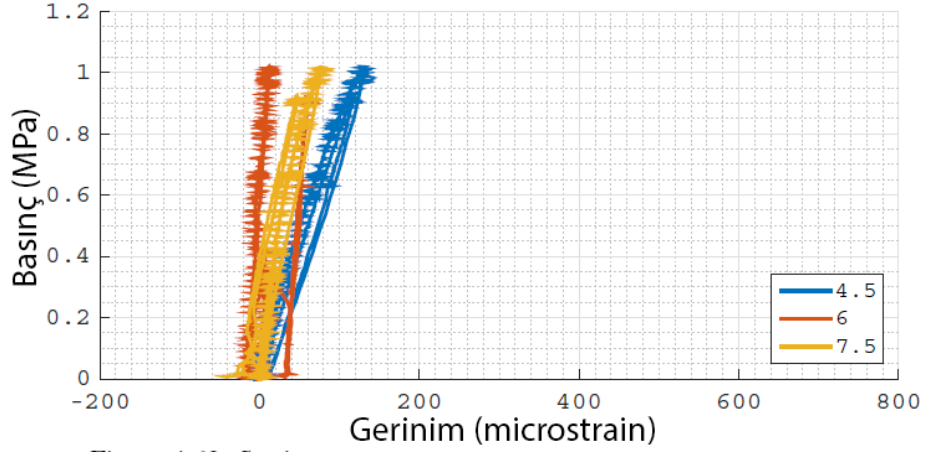
Şekil 3.129 Uygulanan iç basıncın zaman göre değişimi (sekizinci deney).



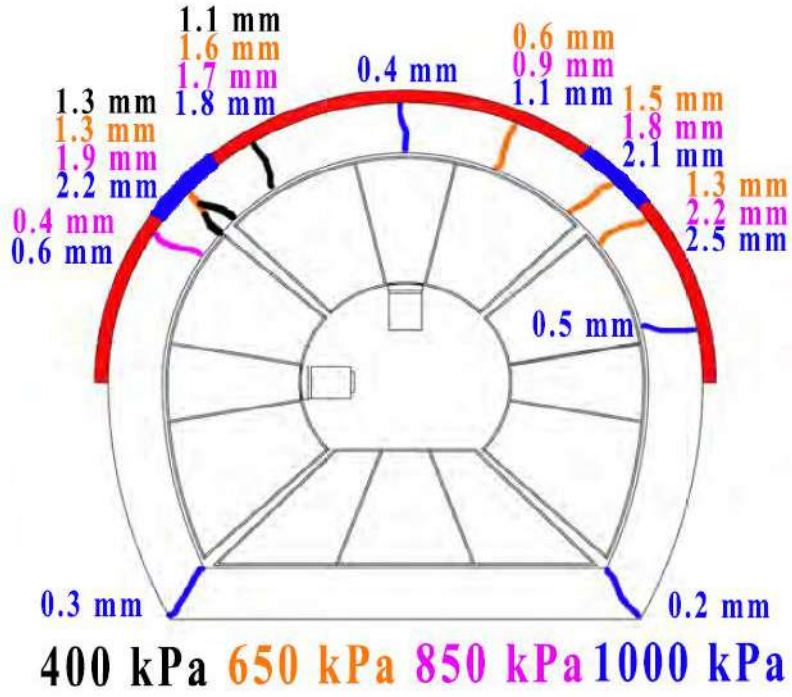
Şekil 3.130 Tünelin temel iki serbestlik derecesi olan tünel geometrisinin düşey ve yatay yönde ölçülen uzunluk değişimleri (sekizinci deney).



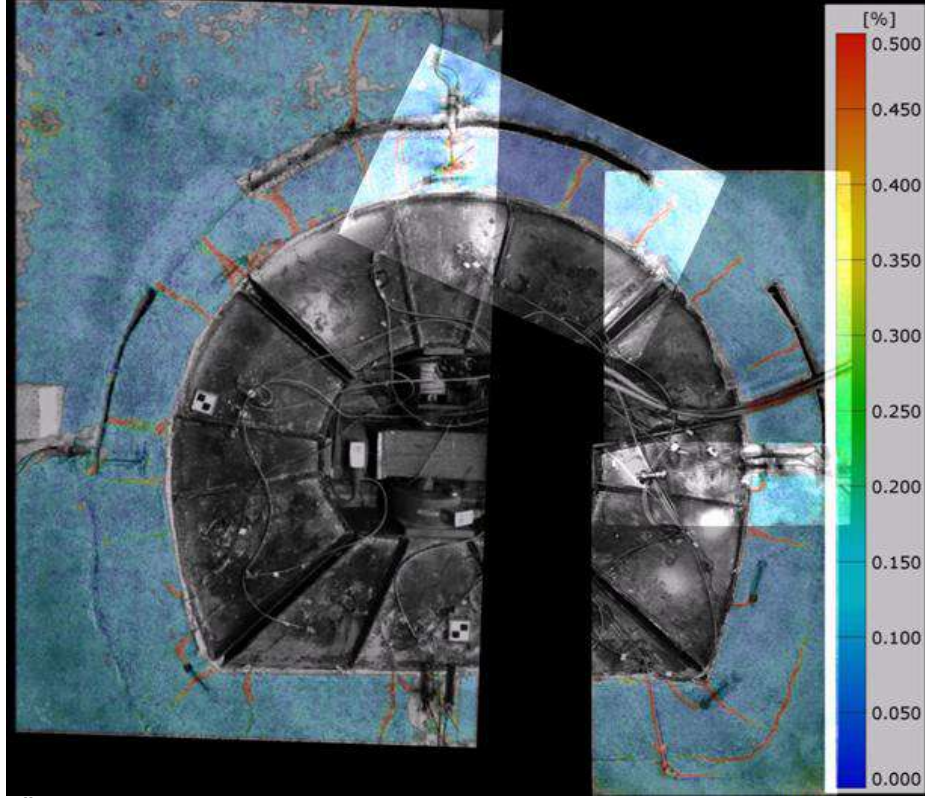
Şekil 3.131 Kaplama üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (sekizinci deney).



Şekil 3.132 Kaya üzerine yerleştirilmiş gerinim pullarından okunan ölçümler (sekizinci deney).



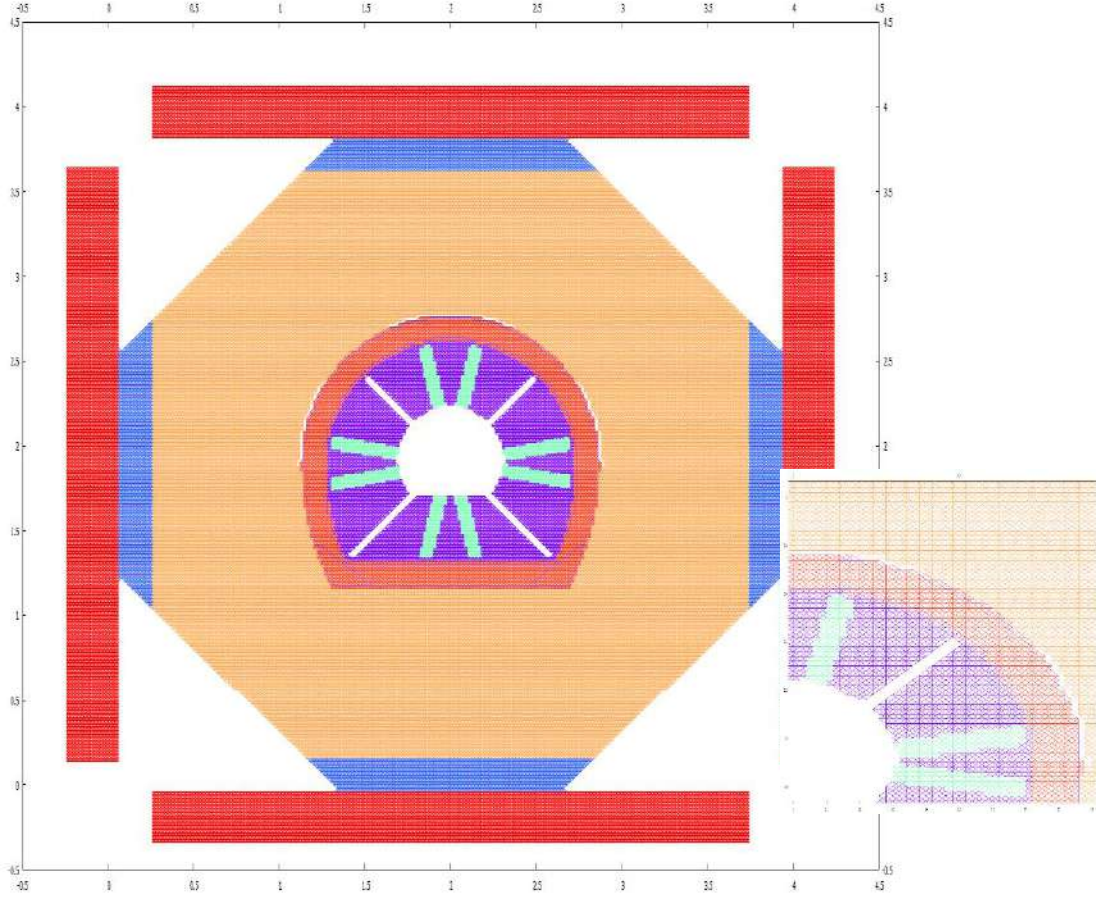
Şekil 3.133 Sekizinci deneyde gözlemlenen çatlaklar



Şekil 3.134 Üçüncü deney için elde edilen DIC sonuçları (video bağlantıları: https://www.youtube.com/watch?v=jJa_YN0dE0Q ve <https://www.youtube.com/watch?v=qvSszYNzWFI>)

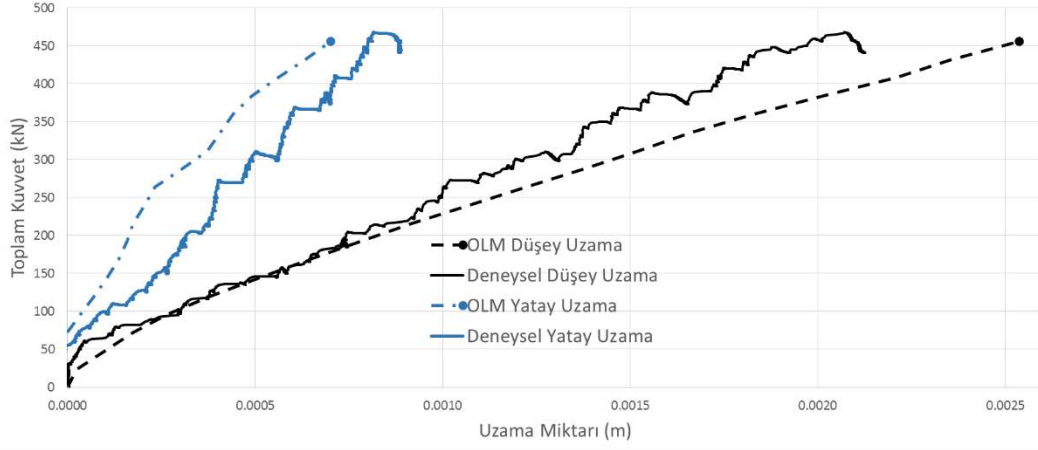
3.9.2 OLM ile Elde Edilen Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlarla Mukayesesi

Yüksek saha gerilimleri altındaki lif katkılı beton tünel kaplamasının kaya katmanı ile artırılmış temasını inceleyen proje kapsamındaki son deney, geliştirilen OLM analiz motoru ile modellenmiştir. Dördüncü ve yedinci deneyde bulunan, 6 farklı malzemeden oluşan OLM bağ elemanları birebir kullanılmıştır. (Şekil 3.135). Bu deneyin yedinci deneyden temel farkı, önceki deneylerde oluşturulan boşluğun bir kısmına beton dolgusu eklenerek artırılmış kaya etkileşimi sağlanmasıdır. Bu dolgu tabakası modele eklenerek analizler yapılmıştır. Sentetik lif ile güçlendirilen betonarme kaplama parametreleri $G_f = 1180 \text{ N/m}$ (çatlak enerjisi) değerine denk gelen elastisite modülü $E_c = 31.82 \text{ GPa}$ ve $\epsilon_{cr} = 6e-05$, $a_1 = 1$, $a_2 = 1000$, $a_3 = 10000$ $b_1 = 0.2$, $b_2 = 0.05$ olacak şekilde modele dahil edilmiştir. Deneyde önceki analizlerde de olduğu gibi, yükleme plakaları ile betonarme kaplama arasında elastisite modülü 1 GPa kullanılan kauçuk kullanılmıştır. Önceki analizlerde olduğu gibi tünelin alt kısmının eğilmesinden dolayı kauçuğun tünelden ayrılmasını sağlamak için düşük bir ϵ_{cr} değeri kullanılmıştır. Ayrıca yükleme plakaları, mevcut donatı oranları ve donatı düzeni korunacak şekilde elastisite modülü ve çekme dayanımı sırasıyla 200 GPa ve 420 MPa olarak kullanılmıştır.

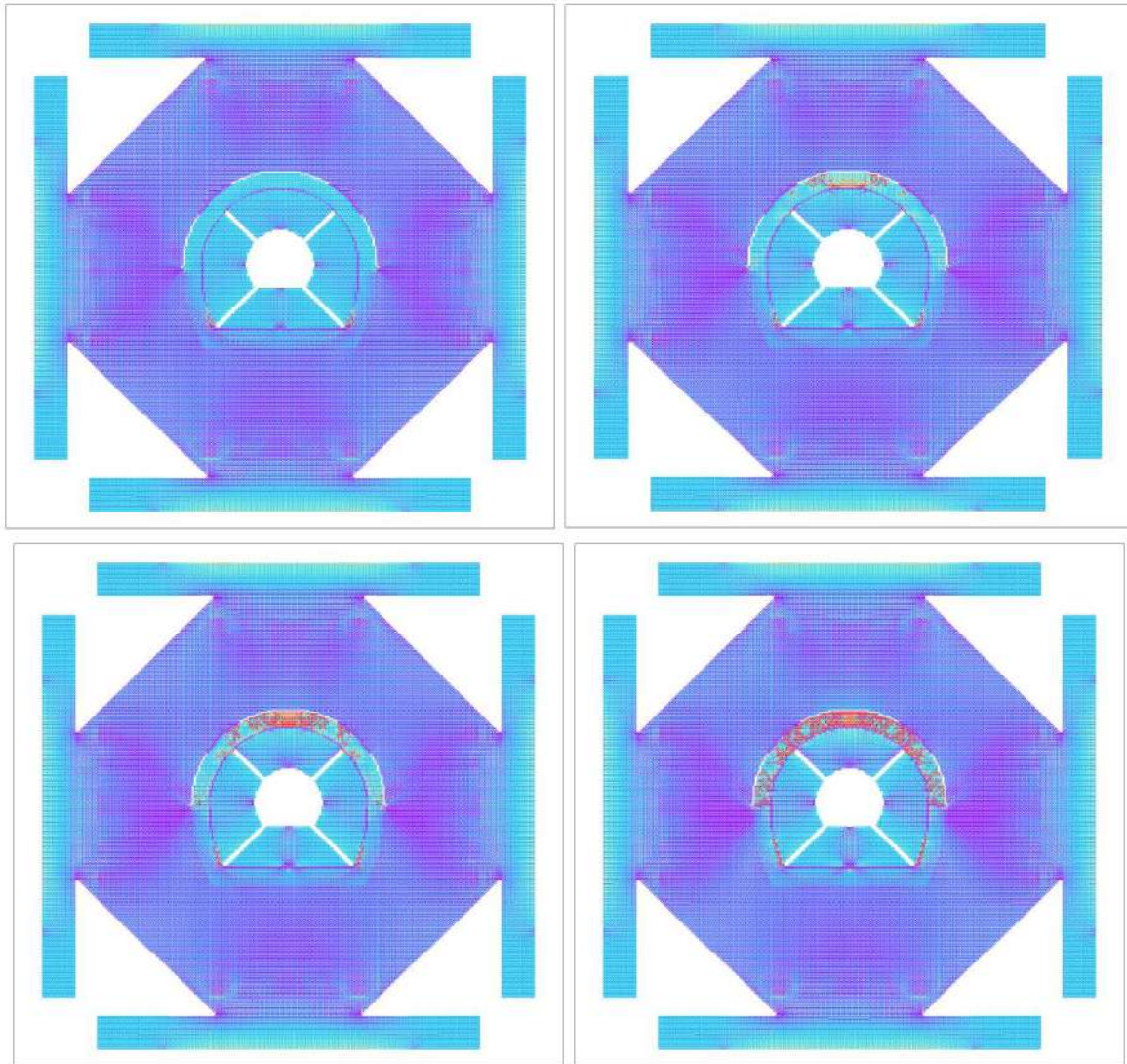


Şekil 3.135 Sekizinci deneyin modellenmesinde kullanılan OLM bağ elemanları. Yükleme plakaları ve plaka rijitliğinin lokal değişimi, tünel kaplamasının içi arasındaki kauçuk bölge ve kaplama kaya katmanı arası eklenen betonarme bölge modele dahil edilmiştir.

Şekil 3.136'da tünelin iç kısmında oluşan sayısal ve deneysel yatay ve düşey uzunluk değişimleri mukayese edilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında sayısal modelleme ile tahmin edilen yatay ve düşey uzama miktarlarının deneysel sonuçlar ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 3.137'de ise sayısal modelleme sonucunda toplam yükün dört farklı değeri için elde edilen hasar dağılımı gösterilmektedir. OLM sonuçları ve deneysel sonuçlar irdelendiğinde, lifli betonarme kaplama üzerindeki hasarın kaya temasının az olduğu kısımlarda yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 3.133 ve Şekil 3.134).



Şekil 3.136 Tünelin yatay ve düşey yönlereki uzunluğunun değişiminin sayısal sonuçlarla mukayesesi. Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç değerini vermektedir (MPa).



Şekil 3.137 Toplam uygulanan kuvvet 200 kN (sol üst), 300 kN (sağ üst), 350 kN (sol alt) ve 450 kN (sağ alt) olduğu zaman OLM tarafından tahmin edilen hasar dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0001, kırmızı = 0.0003) . Uygulanan toplam kuvvet 0,00107 ile çarpıldığı zaman iç basınç (MPa) değerini vermektedir (sekizinci deney).



4. DİNAMİK DAVRANIŞIN SAYISAL MODELLENMESİ

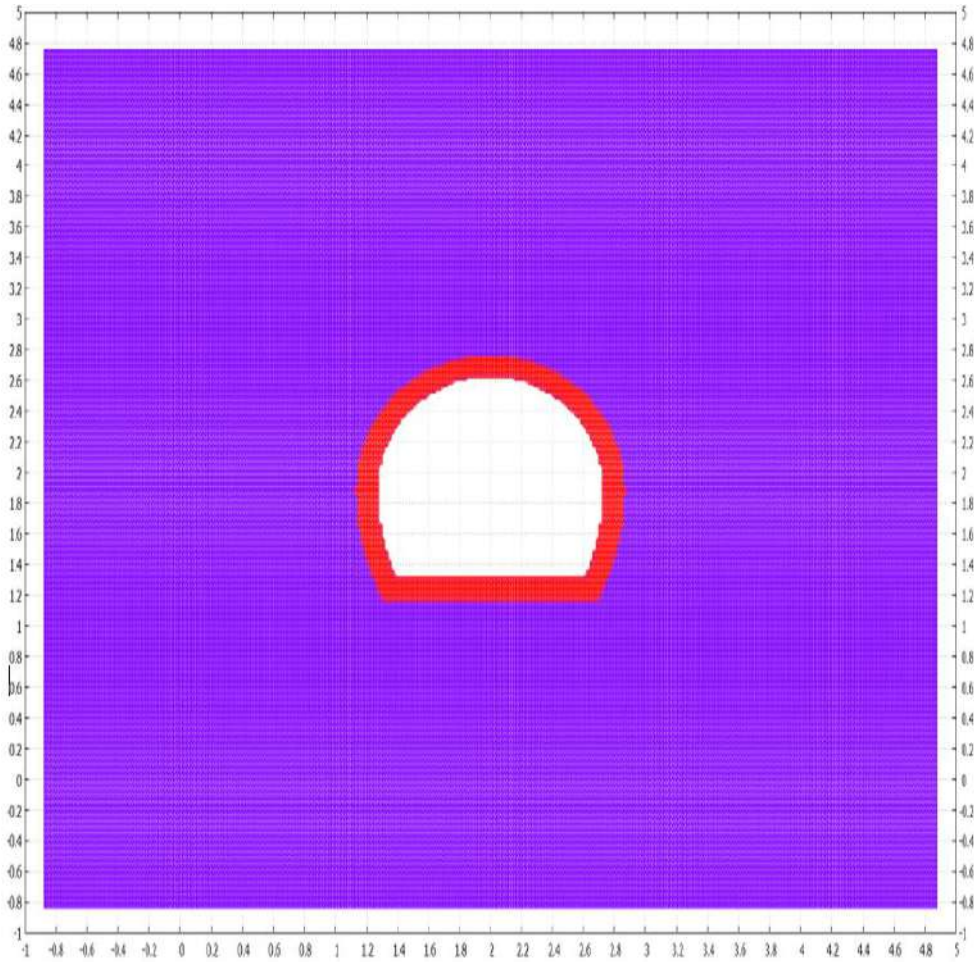
4.1. Giriş

Proje kapsamında geliştirilen OLM analiz platformu hem statik hem dinamik problemlerin incelenmesinde kullanılabilir. Statik problemlerin çözümü detayları Bölüm 2.2'de verilen sıralı doğrusal analiz (SLA) yöntemi veya detayları Bölüm 2.4'de verilen PDI kontrolü ile elde edilebilmektedir. Dinamik problemlerin incelenmesinde ise detayları Bölüm 2.3'de verilen belirtik entegrasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu tercihin nedeni çatlakların sistem rijitlik matrisinde yarattığı çok büyük ve ani değişimlerden dolayı denge denklemlerini iterasyon yöntemleriyle sağlanmasındaki zorluklardır. Belirtik entegrasyon stabil çözüm için oldukça küçük zaman adımlarının kullanılmasını zorunlu hale getirmekle beraber, doğrusal olmayan çatlak oluşumu ve ilerlemesinin herhangi bir yakınsama problemi yaşanmadan modellenmesini sağlamaktadır. Proje kapsamında gerçekleştirilen deneylerin modellenmesinde hem OLM hem de PDI kontrollü belirtik entegrasyon yöntemi başarıyla kullanılmış ve deney sonuçları ile kalibre edilmiş bir çatlaklı ortam simülatörü geliştirilmiştir. Raporun bu kısmında deneysel sonuçlarla kalibre edilmiş matematiksel model kullanılarak iç basınçlı betonarme tünellerin dinamik yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu tür deneylerin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi mümkün olmadığından sayısal analizler dinamik davranışın anlaşılmasında yararlanılabilecek tek yol olarak görülmektedir.

Bu kısımda verilen sayısal sonuçlar deneylerin modellenmesinde kullanılan malzeme parametreleri aynen kullanılarak elde edilmiştir. Bir önceki kısımda yapılan tüm deney sonuçlarının geliştirilen analiz metodu yardımıyla kabul edilebilecek yakınlıkta tahmin edilebildiği gösterilmiştir. PID ve belirtik entegrasyon kullanıldığında yavaş yüklemelerde çok az bir etkiye sahip olan sönüm matrisi dinamik analizlerde oldukça önemli hale gelmektedir. Sönüm matrisi Bölüm 2.3'de belirtildiği gibi Rayleigh enerji sönüm matrisi olarak seçilmiştir. Sonuçların güvenli kalması için sönüm 1% değerinin altında tutulmuştur.

Deneysel sonuçlarda simetri koşulları kullanılarak sınır koşulları belirlenmişti. Dinamik analizlerde ise sonsuz ortam içine yerleştirilmiş tünel davranışının incelenmesinden dolayı özel sınır koşullarının geliştirilmesi gerekmiştir. Bu özel sınır koşulları literatürde iletken/saydam/emici sınır koşulları olarak isimlendirilmiştir. Kullanılan sınır koşullarının temel hedefi sayısal hesap alanının sınırından dalga yansımalarının en aza indirmektir. Saydam sınır şartı yaklaşımında, sınır bölgesindeki dalga denklemi yerine yansımayı önleyici tek yönlü denklemler kullanılarak kenarlardan dalga yayılması ve hesaplama alanı içindeki değerleri etkilemesi önlenmeye çalışılır. Saydam sınır koşulları kullanılmadan elde edilen sayısal sonuçlarda sınır koşullarından kaynaklanan dalga yansımalarının tünel kaplamasındaki

çatlakları etkilediği gözlemlendiğinden OLM platformuna saydam sınır koşulları eklenmiştir. Bu sınır koşullarının başarılı bir şekilde çalışabilmesi için sınırın tünel kaplamasından yeteri kadar uzağa yerleştirilmesi gerekmektedir. Yaptığımız sayısal analizler sonucunda saydam sınır koşullarının kullanıldığı düzlemin tünel iç yarıçapının dört katı mesafesinde olmasının yeterli olacağı görülmüştür. Tünel geometrisi deneysel çalışmalarda kullanılan geometrinin aynısı olarak alınmıştır. Deneyde kullanılan iç yarıçap 0.72 m olduğundan sınır koşulları 2.88 m mesafeye yerleştirilmiştir (Şekil 4.1). Dairesel tüneller için yapılan dinamik analizlerde de iç yarıçap 0.72 m olarak alınmış ve sınır koşulları yine 2.88 m mesafeye yerleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Ters at nalı şeklindeki tünelin hesap alanı. Alt, üst, sol ve sağ sınırlarda saydam sınır koşulları kullanılmıştır.

4.2 Farklı Kaya Rijitlikleri için Elde Edilen Dinamik Sonuçlar

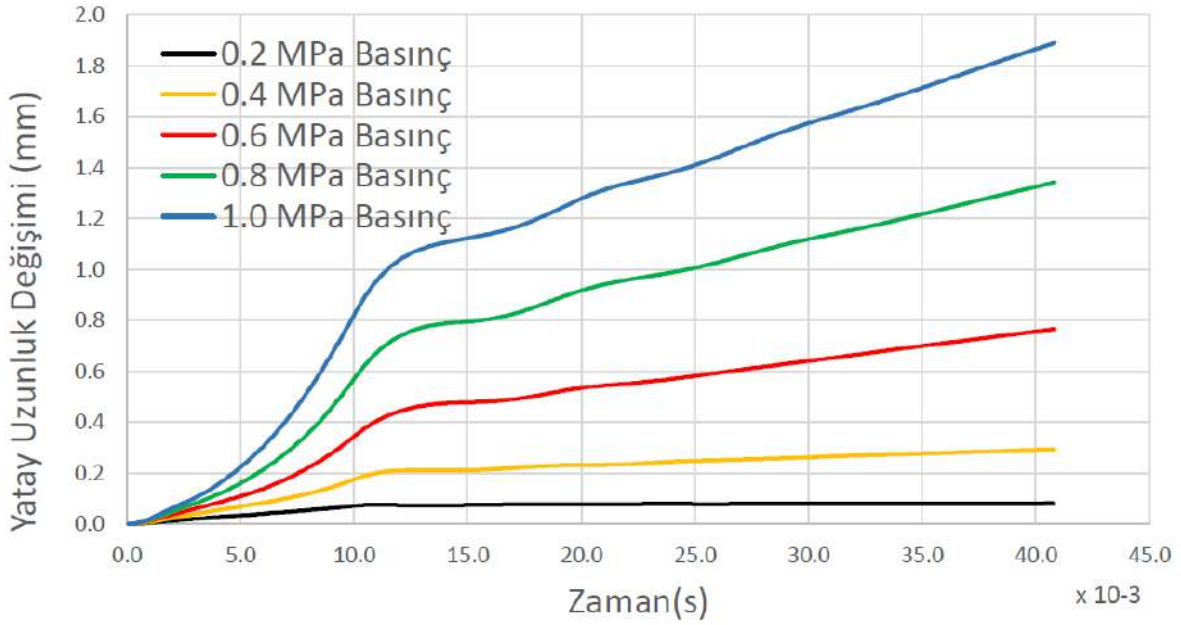
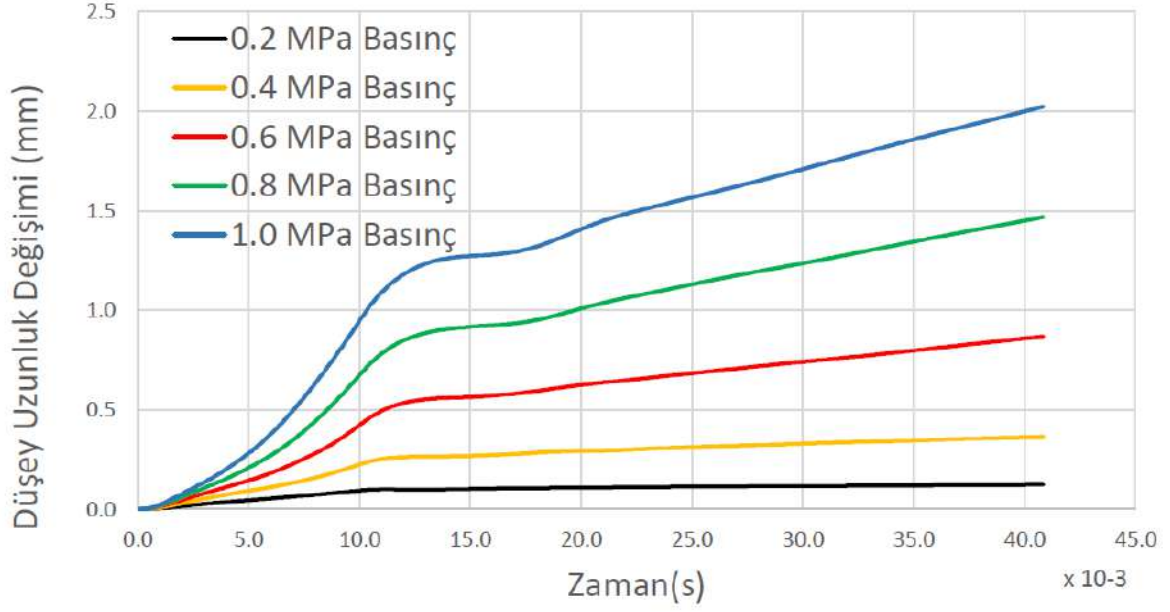
İlk olarak deneysel sonuçlar ile kalibre edilmiş malzeme özellikleri kullanılarak saha gerilmelerinin ihmal edilebilir olduğu durum için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu durum birinci deneyle benzerlik göstermektedir. Beton kaplama için deneysel olarak ölçülen elastisite modülü (24.3 GPa) kullanılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreler $\epsilon_{cr}=6e-05$, $a_1=5$, $a_2=80$, $a_3=300$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak $G_f=50$ N/m (çatlak

enerjisi) değerine tekabül etmektedir. Çekme dayanımıysa 1.45 MPa olarak alınmıştır. Üç farklı kaya elastisite modülü (2 GPa, 4 GPa, 8 GPa) ve beş farklı iç basınç değeri (0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa, 1.0 MPa) için değerlendirme yapılmıştır. Kayanın çekme mukavemeti sırasıyla 0.1 MPa, 0.2 MPa ve 0.4 MPa alınmıştır. Son değer deneysel sonuçlarda kullanılan değer ile örtüşmektedir.

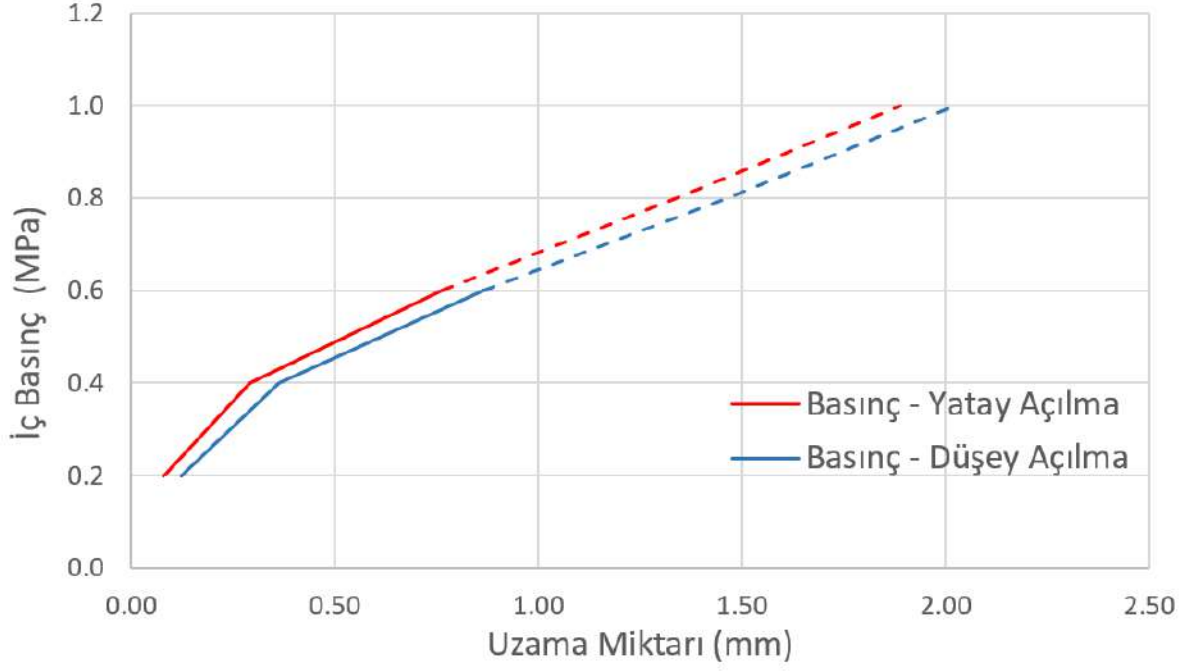
İlk olarak rijitliği en az olan kaya ($E = 2$ GPa) için sonuçlar sunulmuştur. Şekil 4.2'de düşey ve uzunluk değişimlerinin zaman göre değişimi sunulmaktadır. Şekilde iç basıncın 0.4 MPa değerinden büyük olduğu takdirde tünelin deforme olmaya devam ettiği görülmektedir. Yani birinci deneyde gözlemlendiği gibi kaya çatlamakta ve tünel aşırı iç basınç altında ağır hasar almaktadır. Düşey ve yatay uzunluk değişimleri Şekil 4.3'de iç basınca bağlı olarak verilmiştir. Bu şekilde kesik çizgiler tünelin şekil değiştirmeye devam ettiğini ve ağır hasar aldığını göstermektedir. Tünel kaplaması 0.2 MPa iç basınca kadar neredeyse doğrusal davranış göstermekte bu değer üzerinde ise hasar giderek daha fazla artarak devam etmekte, yaklaşık 0.6 MPa değerinden sonra ise hem kayanın hem de tünel kaplamasının rijitliğindeki oluşan ağırlı hasardan dolayı tünel çok büyük şekil değiştirmelere maruz kalmaktadır. Çatlak dağılımı (çatlak genişliği 0.2 mm'den büyük olan çatlaklar) Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.5'de ise çekme dayanımını geçen tüm elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de görüldüğü üzere iç basınç 0.2 MPa olduğu zaman her ne kadar tünelin sol ve sağ alt köşelerinde çekme dayanımı aşılırsa da gözlemlenebilecek bir çatlak oluşmamaktadır. İç basınç 0.6 MPa değerine ulaştığı zaman ise tünelin önemli bir kısmı çekme dayanımını aşmakta ve çok sayıda çatlak açılmaya başlamaktadır.

Kaya elastisite modülünün 4 GPa ve 8 GPa olduğu değerler için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.6-4.8 ve Şekil 4.9-4.11'da verilmiştir. Şekil 4.3, 4.6 ve 4.9'da kesik çizgilerle gösterilen kısımda tünelin şekil değiştirmeye devam ettiği dolayısıyla bu iç basınç değerleri için verilen hasar dağılımının son hasar dağılımı olmadığı, tünelin şekil değiştirmeye devam ettiği not edilmelidir. Tünelin maruz kaldığı şekil değiştirme kabul edilebilir seviyenin çok ötesinde olduğu için hasar dağılımının son halinin elde edilmesinin bir önemi yoktur. Kaya elastisite modülü arttıkça tünel kaplamasında oluşan çatlakların sayısı ve genişliğinin azaldığı görülmektedir. Tüm sonuçların mukayese edildiği Şekil 4.12'de ise doğrusal olmayan davranışın kaya rijitliği azaldıkça daha küçük iç basınç değerlerinde başladığı açıkça gözlemlenmektedir. Birinci deneyde iç basınç yaklaşık 0.45 MPa değerine geldiğinde tüneli saran kaya çatlamaya başlamış ve uygulanan basıncın tünel kaplama kapasitesini aşmasından dolayı tünel ağır hasar görmüş ve deney sonlandırılmıştır. Bu değer Şekil 4.12'de ağır hasarın oluştuğu iç basınç değerinden küçük olmakla beraber deneyin sınırlı bir kaya katmanı tarafından sargılandığı unutulmamalıdır. Sayısal sonuçlar ise sonsuz ortama

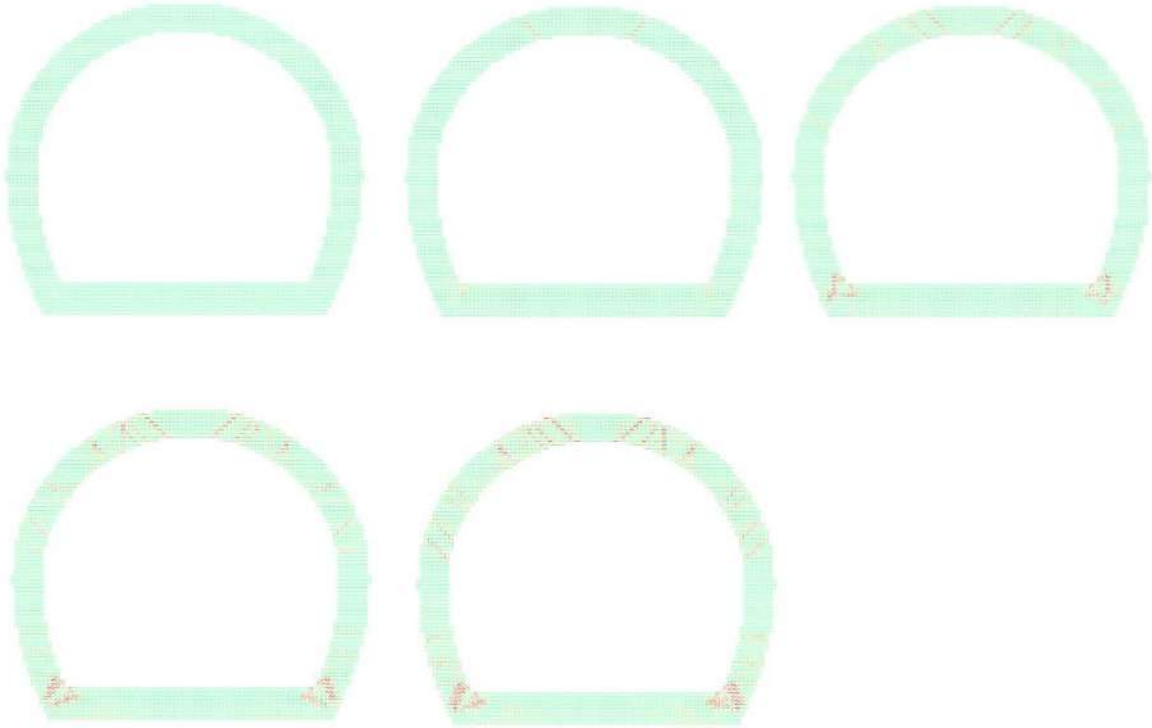
yerleştirilmiş bir tünel elde edildiğinden sayısal değerlerin deneysel değerlerden fazla olması normal karşılanmıştır.



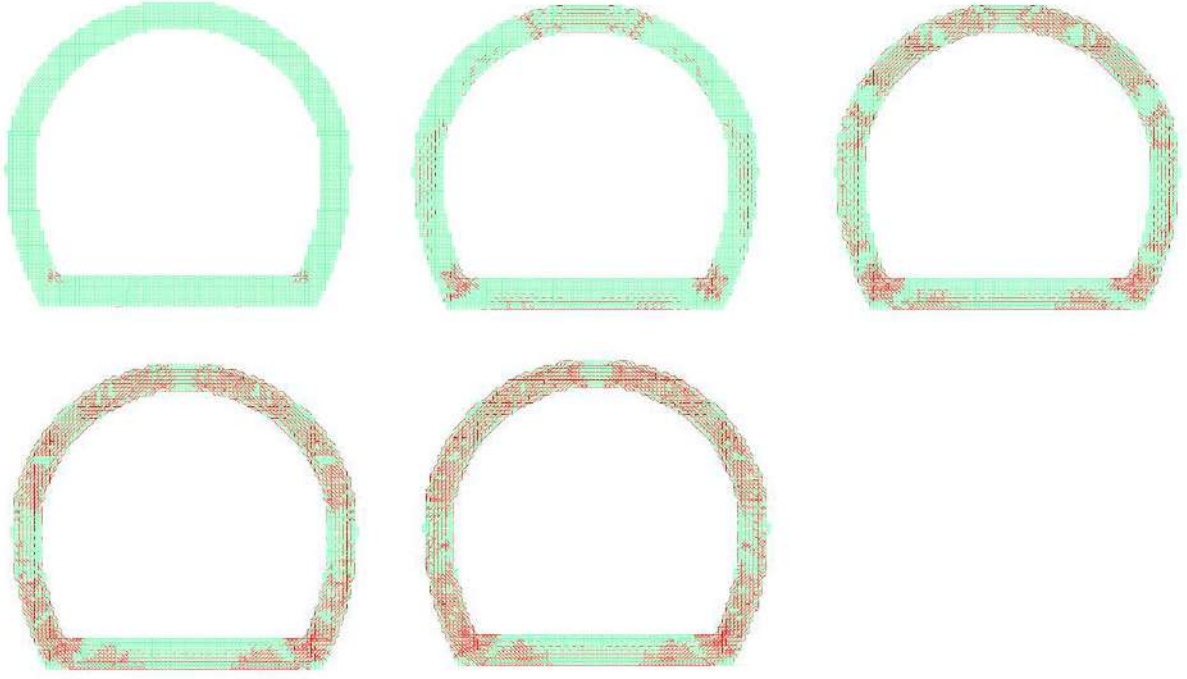
Şekil 4.2 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi (E = 2 GPa).



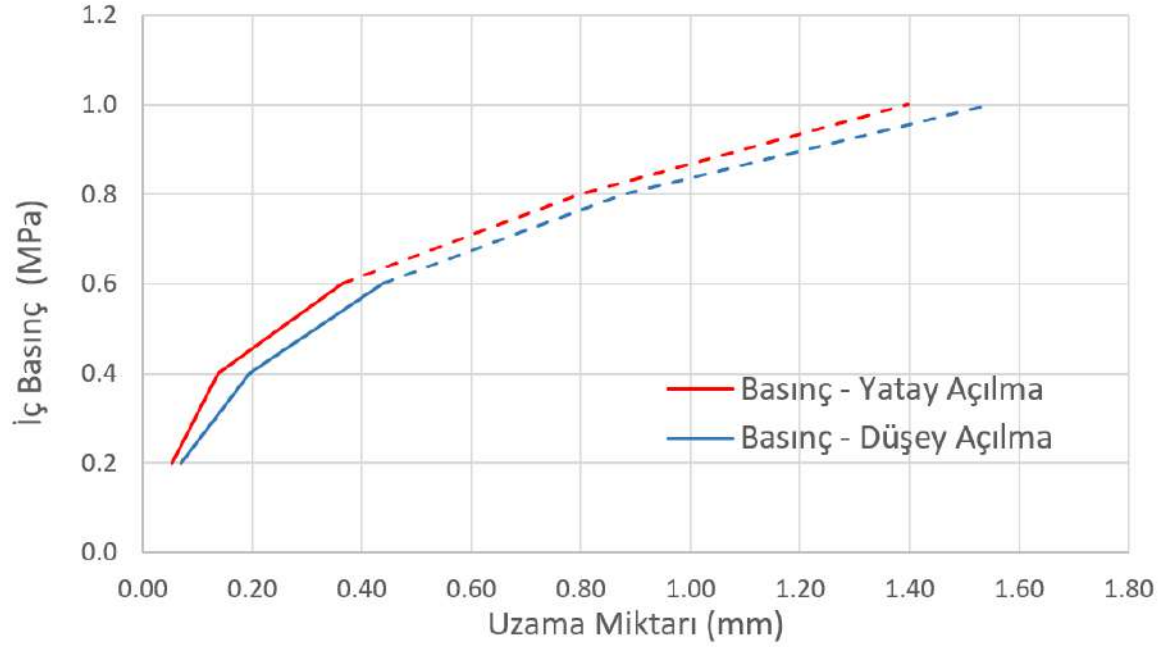
Şekil 4.3 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir (E = 2 GPa).



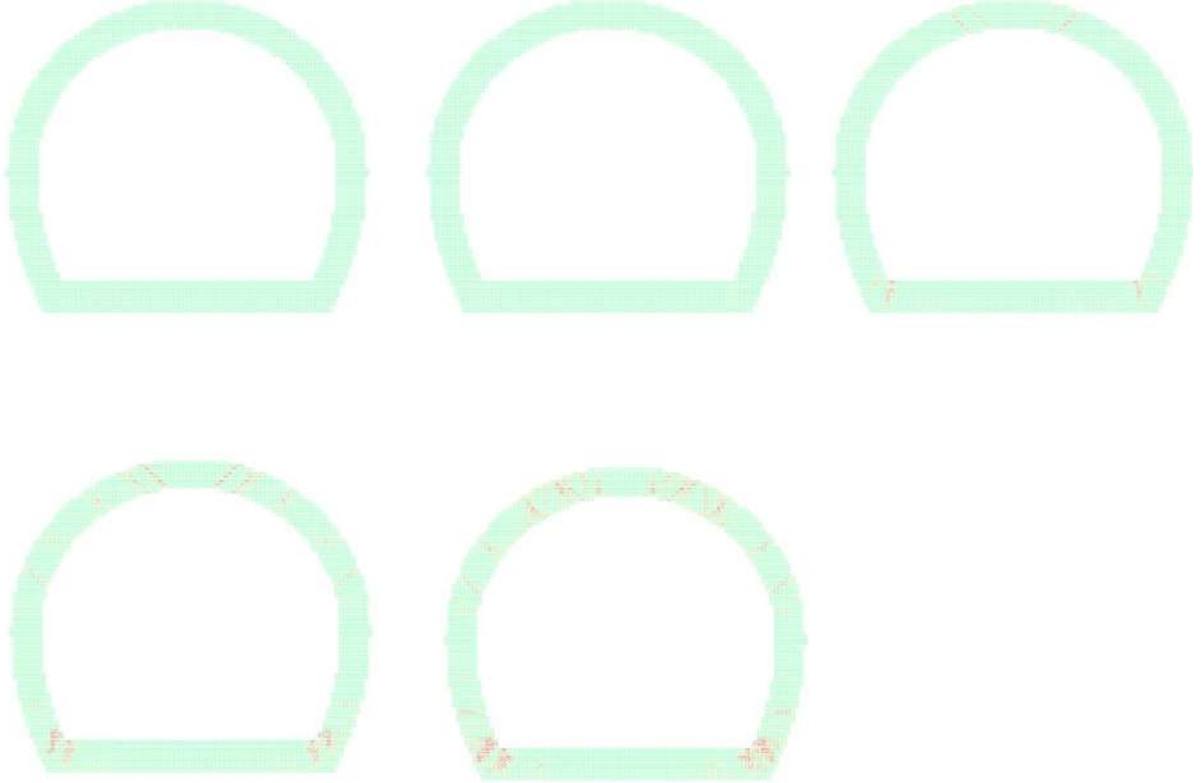
Şekil 4.4 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için OLM tarafından tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, E = 2 GPa).



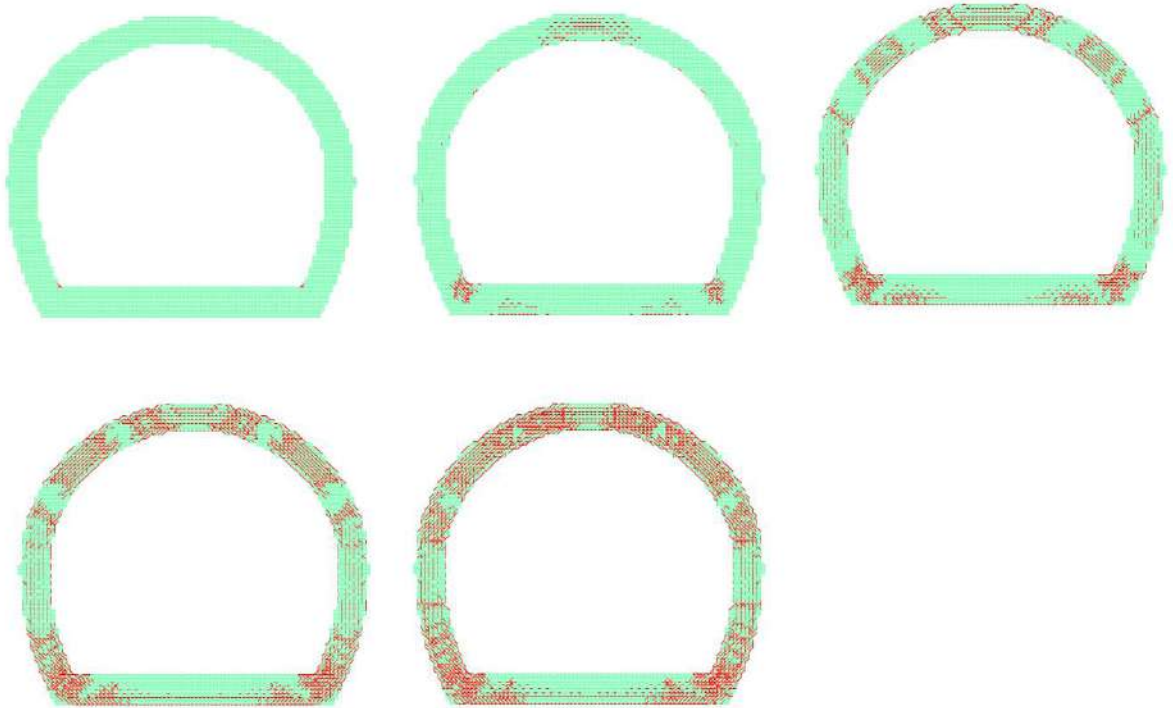
Şekil 4.5 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için çekme dayanımını geçen elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir (E = 2 GPa).



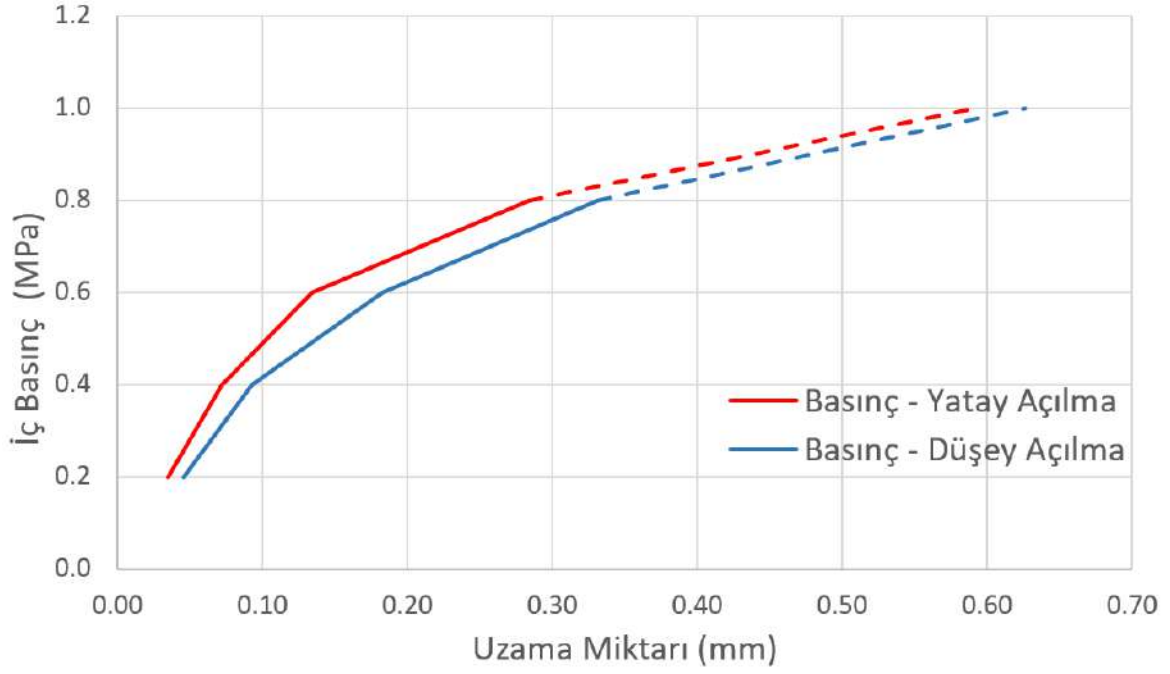
Şekil 4.6 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir (E = 4 GPa).



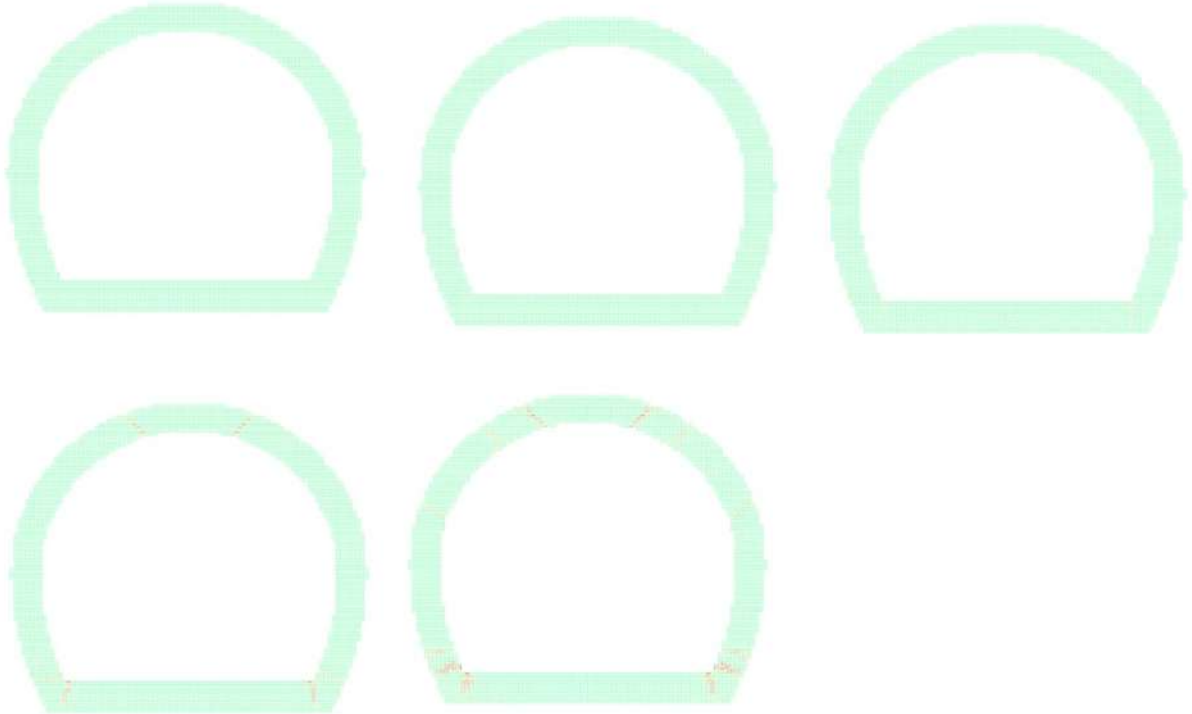
Şekil 4.7 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için OLM tarafından tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 4$ GPa).



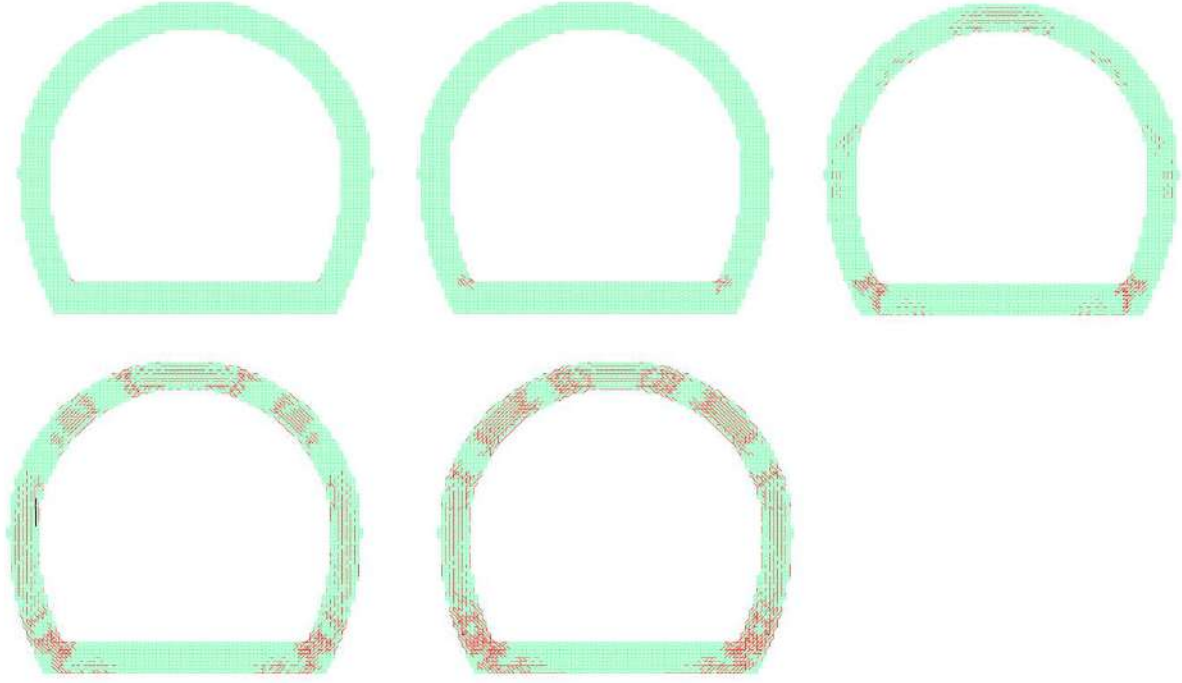
Şekil 4.8 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için çekme dayanımını geçen elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir ($E = 4$ GPa).



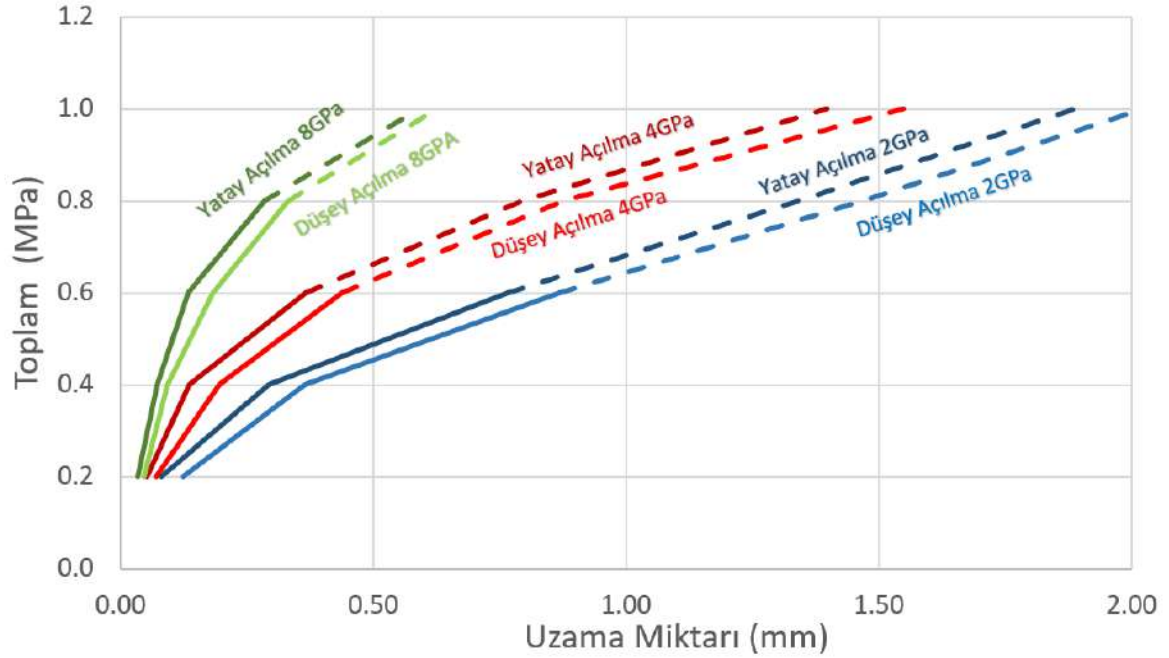
Şekil 4.9 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir ($E = 8 \text{ GPa}$).



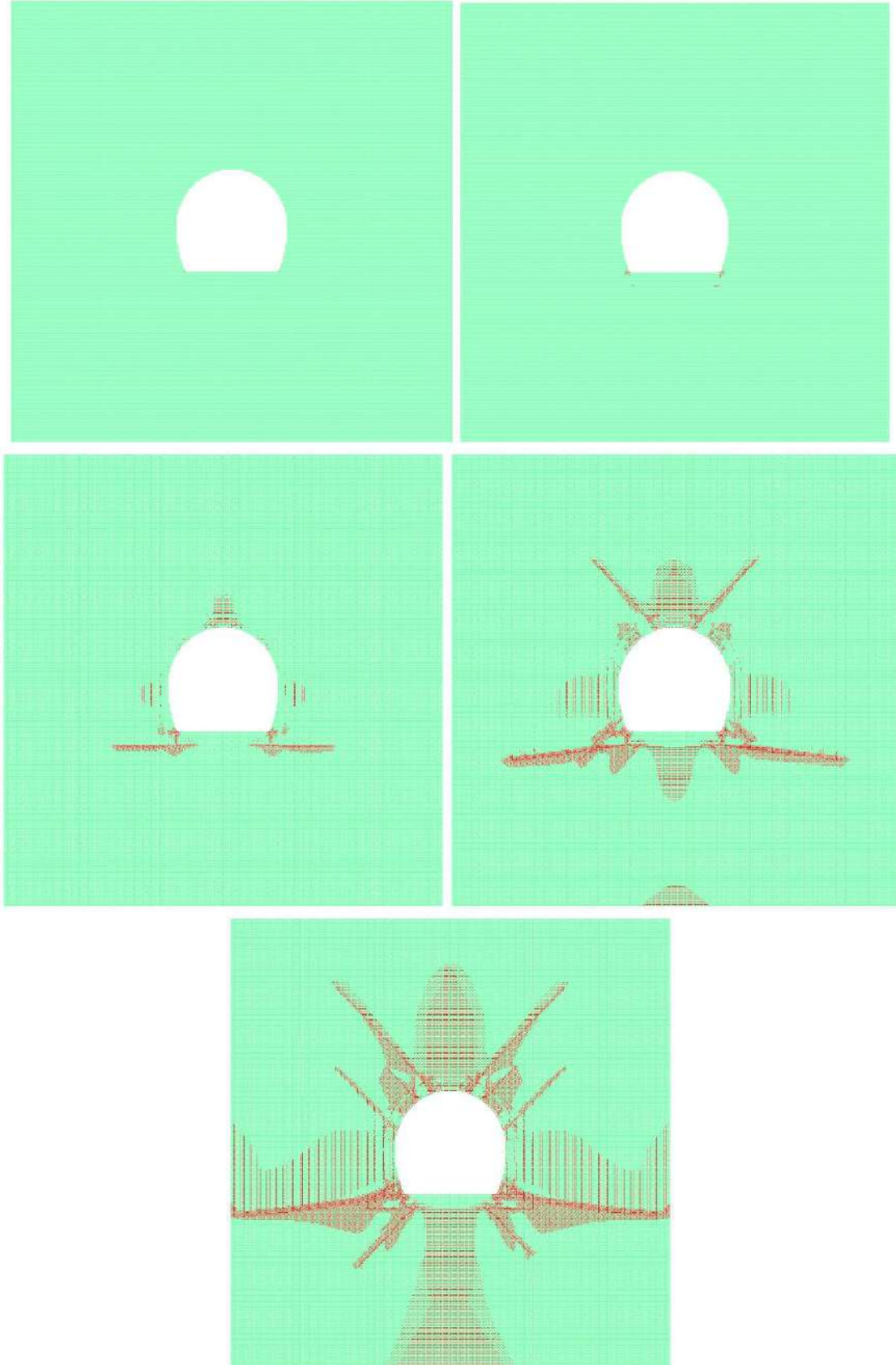
Şekil 4.10 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için OLM tarafından tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 8 \text{ GPa}$).



Şekil 4.11 İç basıncın 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa ve 1.0 MPa değerleri için çekme dayanımını geçen elemanlar kırmızıyla gösterilmiştir (E = 8 GPa).



Şekil 4.12 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin iç basınca göre değişimi. Burada kesik çizgiler tünelin hasar almaya devam ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.13 İç basıncın sırasıyla 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 Mpa ve 1.0 MPa değerleri için tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 8$ GPa).

4.3 Mevcut Saha Gerilimlerinin Tünel Kaplamasının Davranışına Etkisi

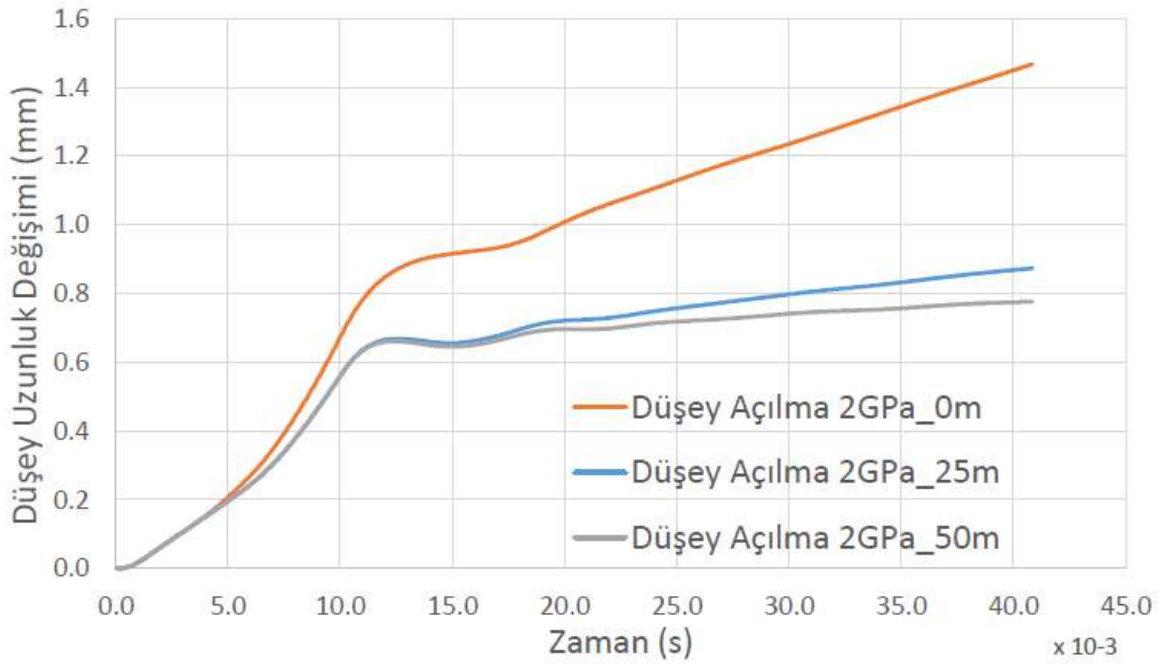
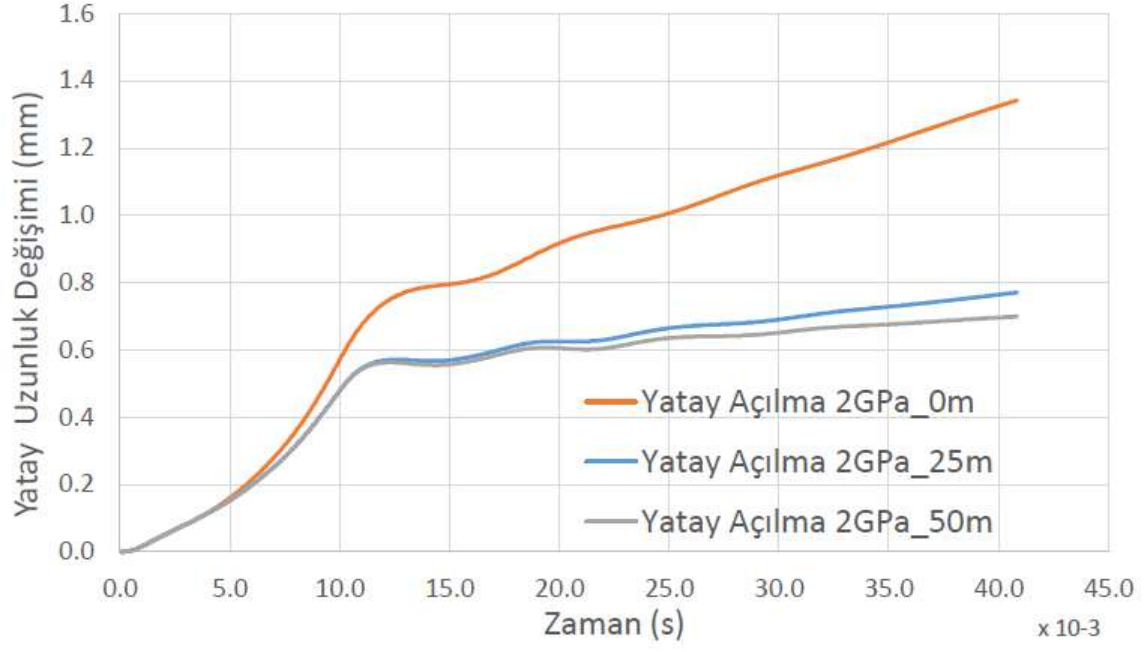
Tünelin yüzeyden uzaklığı tünel kaplamasının davranışını etkileyen önemli parametreler arasındadır. Deneysel çalışmalar da bu etkiyi açık bir şekilde göstermiştir. Tünel daha derine yerleştirildikçe tüneli saran kayanın maruz kaldığı basınç kayanın çatlamasını geciktirmekte ve kayanın rijitliğini korumasına yardımcı olmaktadır. Tünelin çok derine yerleştirildiği durumlarda elbette tünelin açılmasından dolayı oluşan gerilmeleler kayanın plastik olarak davranmasına yol açabilmektedir. Ancak bu davranışın oldukça yüksek derinliklerde olması beklenmektedir.

Bu çalışmada kayanın maruz kaldığı basınç derinliğe bağlı olarak yaklaşık olarak hesaplanmış ve kayanın çatlayacağı kritik birim şekil değiştirme değeri arttırılmıştır. Bu yaklaşım tünel açıldıktan sonra plastik deformasyondan dolayı rijitlik kaybına uğramayan kayalar için kullanılabilir. Tünelin derinliği bağlı olarak düşey ve yatay gerilimlerin eşit olduğu varsayılarak kayanın kritik birim şekil değiştirme değeri aynı oranda arttırılarak bir önceki bölümde sunulan simülasyonlar tekrarlanmıştır. Dolayısıyla 4.1'de verilen sonuçlar tünelin yüzeye çok yakın olduğu duruma karşılık gelmektedir.

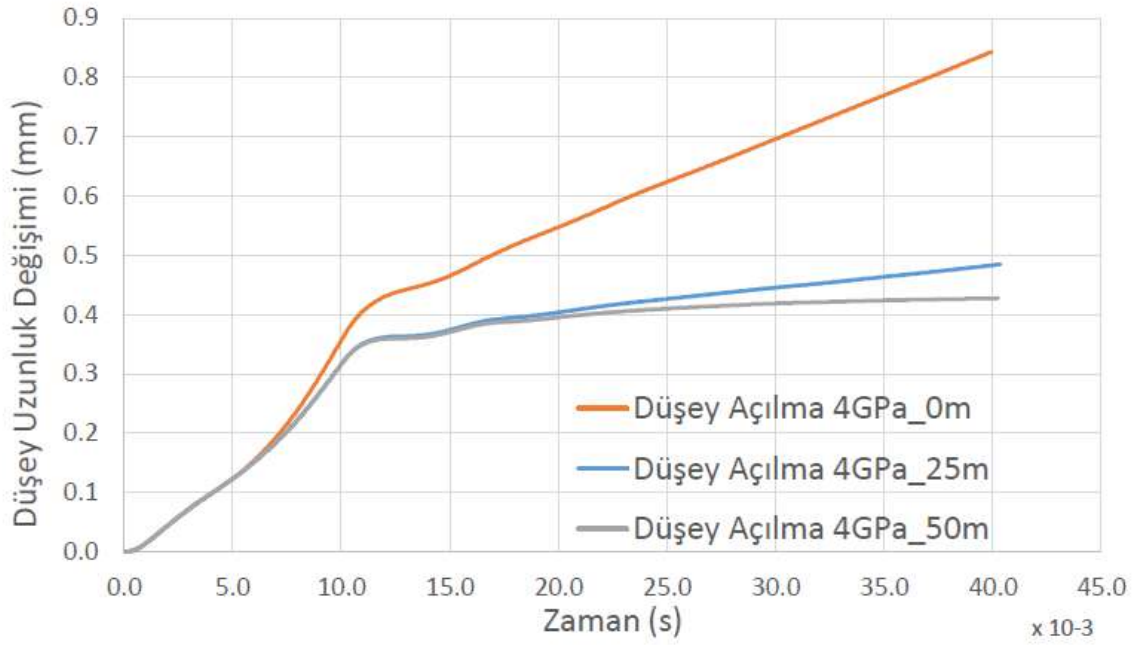
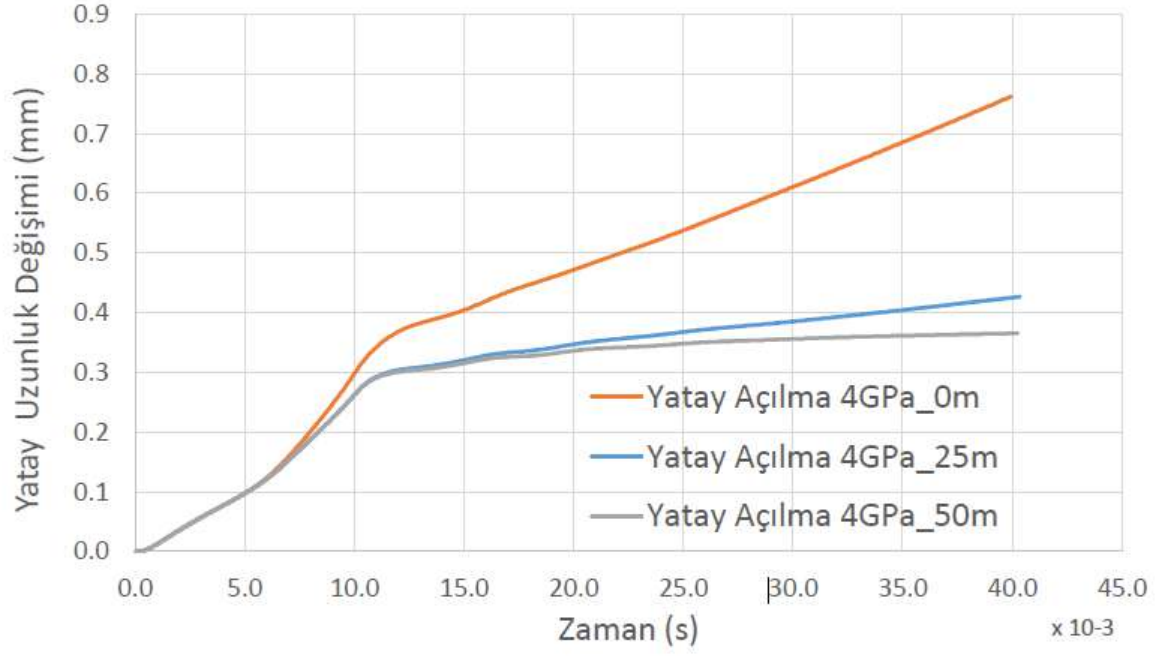
Şekil 4.14'de kayanın elastisite modülünün 2 GPa, iç basıncın 0.8 MPa olduğu durum için yatay ve düşey uzunluk değişimleri verilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan parametreler bir önceki bölümde verilen parametreler ile aynıdır. Tek fark kayanın kritik birim şekil değiştirme değerinin derinliğe göre arttırılmasıdır. Şekilde açıkça görüldüğü üzere tünelin derinliğinin arttırılması kayanın daha az çatlamasına neden olmakta ve bu da iç basıncın kayaya aktarılmasıyla oluşan çatlakların azalmasına ve kaya rijitliğinin korunmasına yol açmaktadır. Yaklaşık olarak 50 m derinlikten sonra kaya neredeyse rijitliğini hiç kaybetmemektedir. Benzer bir davranış kaya elastisite modülünün 4 GPa ve 8 GPa olduğu durumlar için de gözlemlenebilir (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).

Yapılan simülasyonlarda tünel kaplamasının gördüğü hasar Şekil 4.17'de verilmiştir. Tünelin basınç bölgesine girdikçe daha az hasar gördüğü açıkça görülmektedir. Ancak tünel rijitliğini kaybetmeyen kaya tarafından sarılsa dahi, tünel ve kaya rijitliklerinin oranına bağlı olarak çatlakların oluştuğu da not edilmelidir.

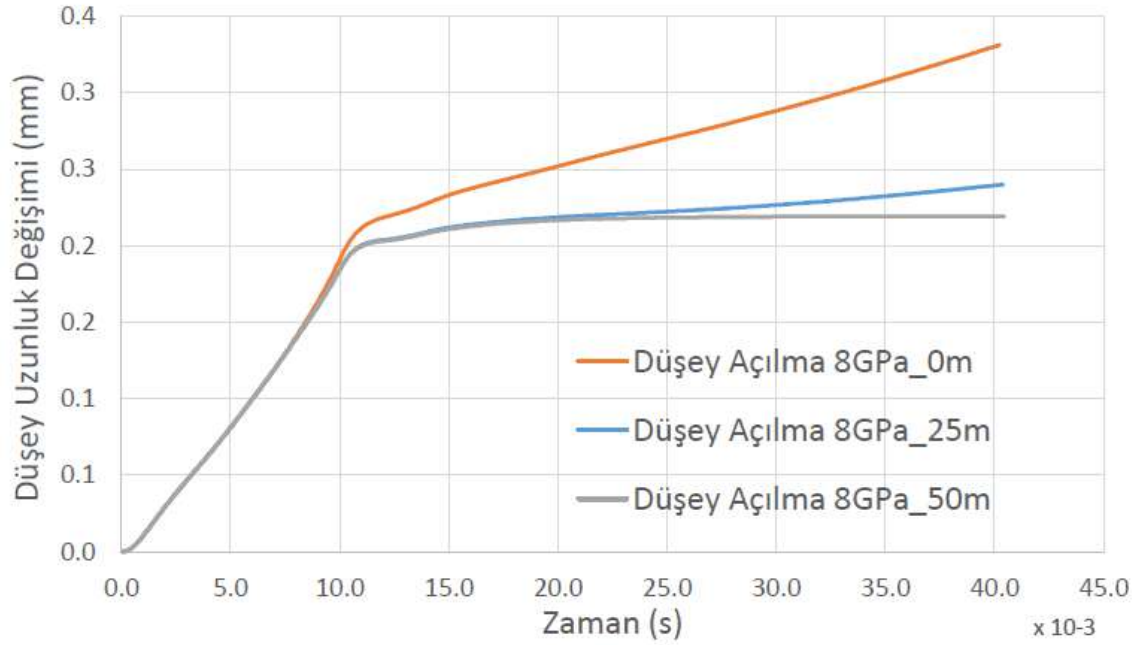
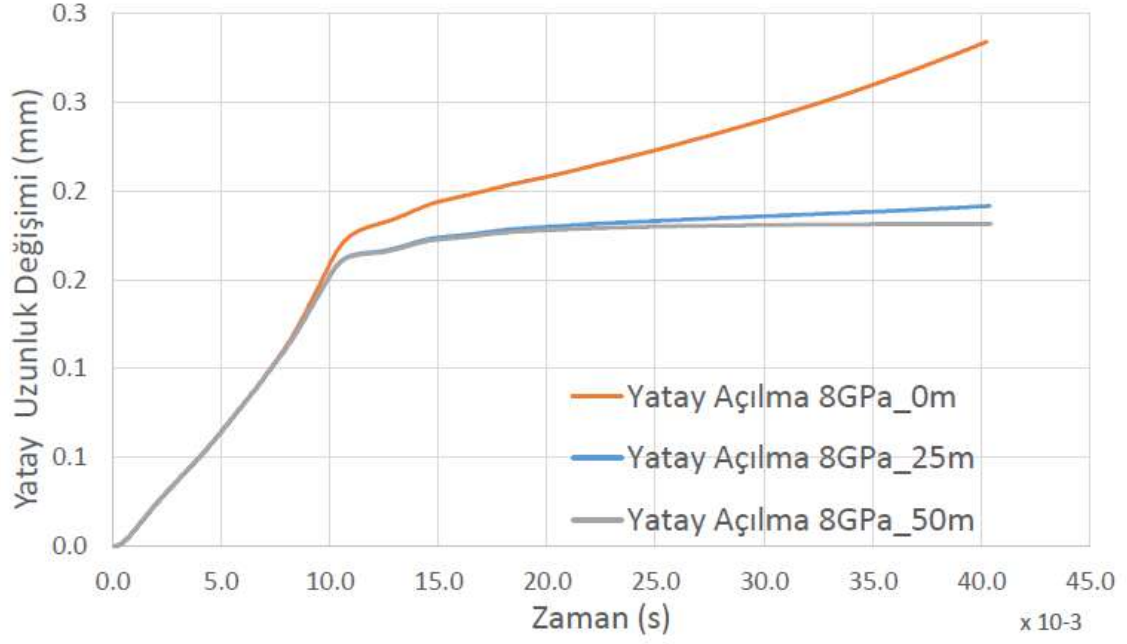
Gerçekleştirilen sayısal simülasyonların ışığında 50 m derinlikten sonra kayanın neredeyse elastik davranacağı söylenebilir. Zayıf kaya ve/veya açılma işlemi sırasında hasar alacağı tahmin edilen kaya ortamların için tasarımın saha gerilimleri dikkate alınmadan yapılmasının güvenli tarafta kalınmasını sağlayacağı anlaşılmaktadır.



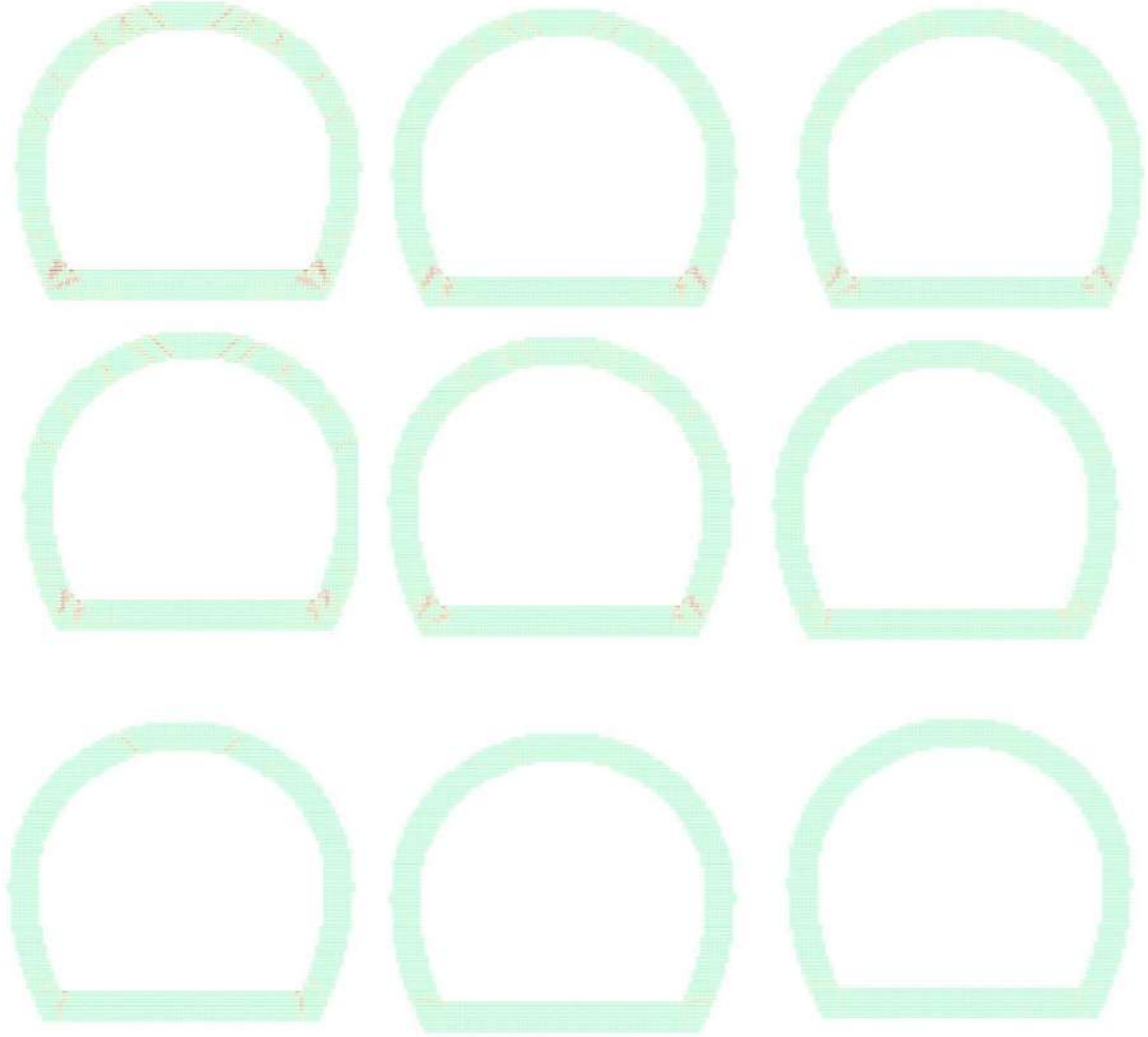
Şekil 4.14 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi (E = 2 GPa).



Şekil 4.15 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi (E = 4 GPa).



Şekil 4.16 Düşey ve yatay uzunluk değişimlerinin zamana göre değişimi (E = 8 GPa).



Şekil 4.17 Üst sıradan itibaren artan kaya elastite modülüne ($E=2$ GPa, $E=4$ GPa, $E=8$ GPa) ve soldan sağa artan derinliğe (0 m, 25 m, 50 m) göre tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, $E = 8$ GPa). Kırmızı bölgeler çatlak bölgelerini göstermektedir.

4.4 Tünel Geometrisinin Tünel Kaplamasının Davranışına Etkisi

Proje kapsamında yapılan deneylerde ve sayısal çalışmalarda ters at nalı tünel geometrisi kullanılmıştır. Bu seçimin nedeni ülkemizde bu tür iç basınçlı tünel geometrisinin inşaat sürecinde sağladığı avantajlardan dolayı yaygın olarak kullanılmasıdır. Ters at nalı şeklindeki tünelin sol ve sağ alt köşelerinde oluşan yüksek gerilim hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda ilk çatlayan kısım olarak ön plana çıkmıştır. Dolayısıyla kullanılan geometrinin köşe noktalar barındırmasının önemli bir dezavantaj sağladığı söylenebilir. Alan olarak birbirlerine çok yakın olan bu iki geometrinin çevre uzunluklarında ise yaklaşık 3% fark bulunmaktadır (dairesel kesitin çevre uzunluğu daha kısadır). Raporun bu kısmında dairesel tünellerin dinamik iç basınç yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Bu çalışmanın yapılmasının

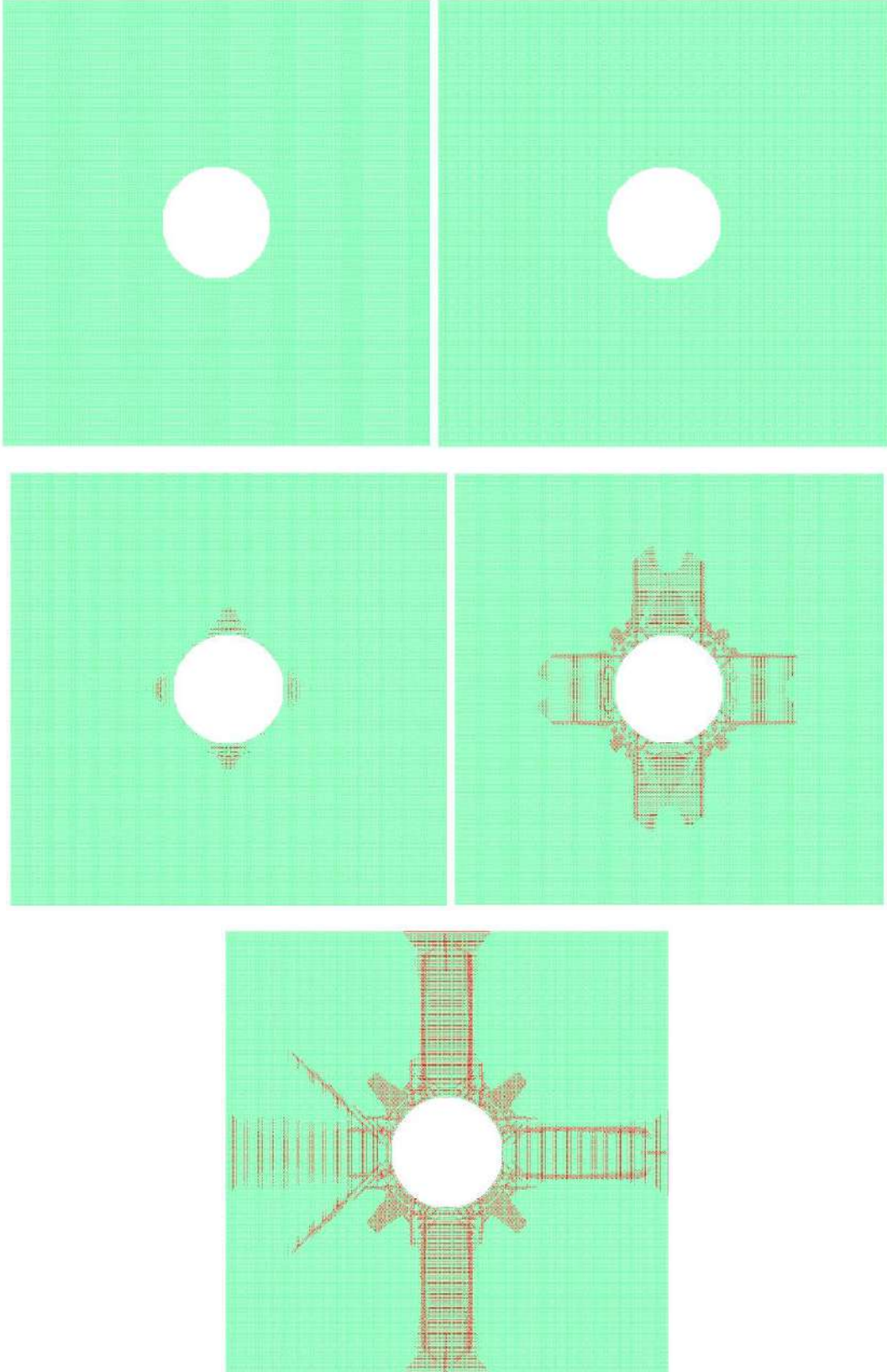
önemli nedenlerinden biri raporun son kısmında önerilen basitleştirilmiş tünel tasarım yöntemlerinde dairesel kesitlerin kullanılmasıdır. Geliştirilen yöntemde dairesel kesitler için elde edilen sonuçlar geometri ve dinamik etki katsayıları ile ters at nalı tünel geometrilere de uygulanabileceği önerilmektedir.

Malzeme özellikleri 4.2’de verilen malzeme özelliklerinin aynısı alınmıştır. Beton kaplama için deneysel olarak ölçülen elastisite modülü (24.3 GPa) kullanılmıştır. OLM malzeme modelinde kullanılan parametreler $\varepsilon_{cr}=6e-05$, $a_1=5$, $a_2=80$, $a_3=300$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler yaklaşık olarak $G_f=50$ N/m (çatlak enerjisi) değerine tekabül etmektedir. Çekme dayanımıysa 1.45 MPa olarak alınmıştır. Kaya elastisite modülünü 8 GPa olarak alınmış ve beş farklı iç basınç değeri (0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa, 1.0 MPa) için değerlendirme yapılmıştır. Kayanın çekme mukavemeti sırasıyla 0.4 MPa alınmıştır.

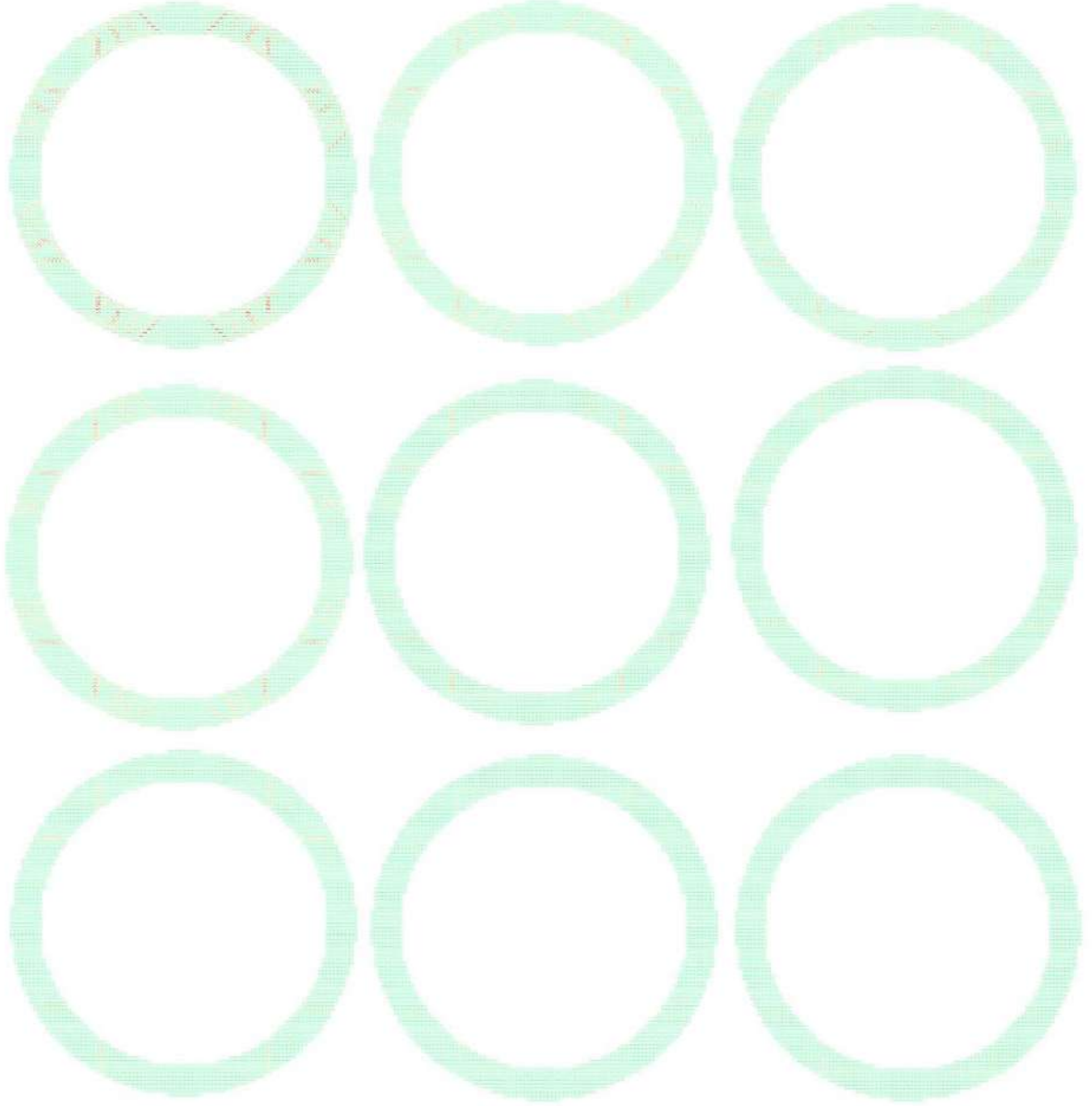
Şekil 4.18’de iç basıncın sırasıyla 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 MPa, 1.0 MPa değerlerini aldığı durum için çatlaklar gösterilmektedir. Şekilde iç basıncın 0.4 MPa değerinden küçük olduğu takdirde tünelde çatlakların kabul edilebilir seviyede kaldığı görülmektedir. Şekil 4.13 ile mukayese edildiği zaman hasar miktarlarında farklılığın iç basıncın 0.6 MPa değerine kadar dairesel kesitin yükü daha iyi dağıttığı ancak bu değer üzerinde iki tünel geometrisinin de basıncı karşılamakta yetersiz kaldığı görülmektedir. Ters at nalı tünel geometrisinde iç basıncın 0.4 MPa olduğu zaman alt köşelerde çatlaklar oluşmakta, iç basınç 0.6 MPa değerine geldiği zaman ise düşey ve yatay tünel rijitlikleri arasında oldukça büyük sayılabilecek farklılıklar oluşmaktadır. Dairesel tünel geometrisinde ise iç basıncın 0.6 MPa değerinin altında kaldığı zaman çatlakların kabul edilebilir açıklıklarda olduğu görülmektedir.

Bölüm 4.3’de kullanılan yöntem ile dairesel tünelin 0 m, 25 m ve 50 m derinliğe yerleştirildiği ve kaya elastisite modülünün 2 GPa, 4 GPa ve 8 GPa olduğu tüm kombinasyonlar için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar özet olarak Şekil 4.19’da verilmiştir. Sonuçlar ters at nalı geometrisi için yapılan simülasyonlar (Şekil 4.17) ile mukayese edildiğinde alt köşelerde oluşan yüksek gerilim bölgelerinin daha derine yerleştirilmiş veya daha yüksek elastisite modülüne sahip kaya tarafından sarılan tünellerde dahi kolayca hasar gördüğü açıkça görülmektedir.

Gerçekleştirilen sayısal çalışmalar kullanılarak yapılan mukayese sonucunda iki tünel geometrisinin kabul edilebilir seviyede performans gösterdiği iç basınç değerlerinin oranının 1.2-1.5 arasında olduğu söylenebilir. Bu değer aralığı basitleştirilmiş tünel tasarım yaklaşımında ters at nalı geometriye sahip tünellerin tasarımında kullanılmıştır.



Şekil 4.18 İç basıncın sırasıyla 0.2 MPa, 0.4 MPa, 0.6 MPa, 0.8 Mpa ve 1.0 MPa değerleri için tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035, kırmızı = 0.0035, E = 8 GPa).



Şekil 4.19 Üst sıradan itibaren artan kaya elastite modülüne ($E=2$ GPa, $E=4$ GPa, $E=8$ GPa) ve soldan sağa artan derinliğe (0 m, 25 m, 50 m) göre tahmin edilen gerilme dağılımı (renk skalası: mavi = -0.0035 , kırmızı = 0.0035 , $E = 8$ GPa). Kırmızı bölgeler çatlak bölgelerini göstermektedir.

5. BASİTLEŞTİRİLMİŞ TASARIM YÖNTEMLERİ

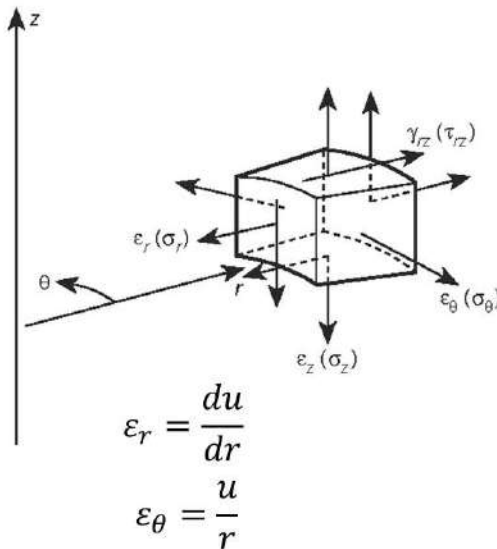
5.1 Giriş

Bu bölümde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler, doğrusal olmayan sayısal tünel modellerinden elde edilen bilgiler ışığında iç basınçlı tünel tasarımında kullanılabilecek, proje kapsamında geliştirilmiş basitleştirilmiş analiz yöntemleri verilmiştir.

Geliştirilen en kolay analiz yöntemi elastik tünel ve kaya etkileşiminin radyal donatı etkilerini de kapsayacak şekilde sayısal olarak çözümdür. Bu yaklaşım sayesinde mühendislerin tünel tasarımında merteye kontrollerini yapabilmesi hedeflenmiştir.

5.2 Eksenel Simetrik Matematiksel Model

İç basınçlı tünellerin ön tasarımı ve hızlı performans tahkikinde kullanılabilecek yöntemlerden en önemlisi Eksenel Simetrik Model ile yapılan analizlerdir. Eksenel simetrik model, düzlemsel şekil değiştirme durumu için dairesel bir tünelin etrafında farklı sayıda ve özellikle katmanlı malzeme bulunması halinde gerilme ve birim şekil değiştirmeleri bulmak için kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında eksenel simetrik bir formülasyon geliştirilmiş ve tünel kaplaması, kaya zonları ve çelik donatı çubuklarını bir boyutlu (1-D) davranışı modele dâhil edilmiştir. Klasik eksenel simetrik model ve ilgili denge ve bünye denklemleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\sigma_r = K \left(\varepsilon_r + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_\theta \right)$$

$$\sigma_\theta = K \left(\varepsilon_\theta + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_r \right)$$

$$K = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

E = Elastisite modülü

ν = Poisson oranı

Şekil 5.1 Eksenel Simetrik Model ve Formülasyon

Proje kapsamında geliştirilen yaklaşımın literatürdeki muadillerine göre en önemli farkı ve donatının da modele dahil edilmesidir. Şekil 5.1’de verilen klasik denge denklemi radyal donatılı beton kaplama için aşağıdaki gibi yazılabilir



$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{\sigma_\theta^{steel} d(r)}{s r} = 0 \quad (5.1)$$

Bu denklemde s donatı aralığı ve d(r) donatının z yönündeki uzunluğunu verir.

Bu fonksiyonun donatıyı da içeren integrali donatının alanına eşittir

$$\int d(r) dr = A_s \quad (5.2)$$

Donatı gerilimleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$\sigma_\theta^{steel} = E_s \varepsilon_\theta = \frac{E_s u}{r} \quad (5.3)$$

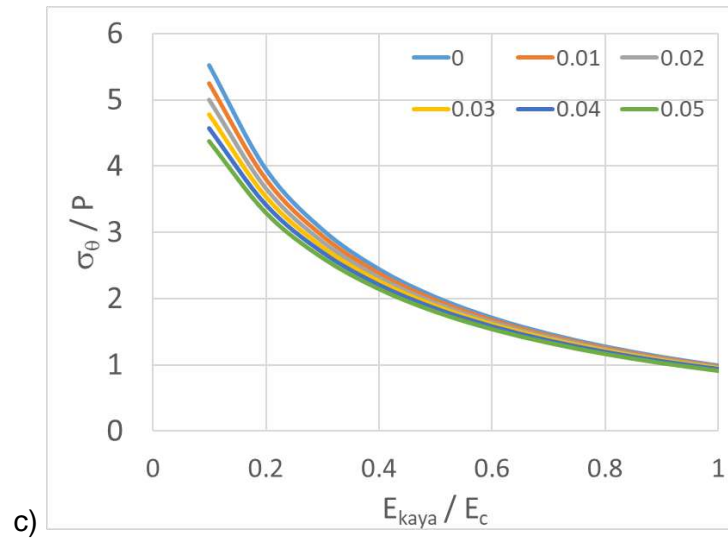
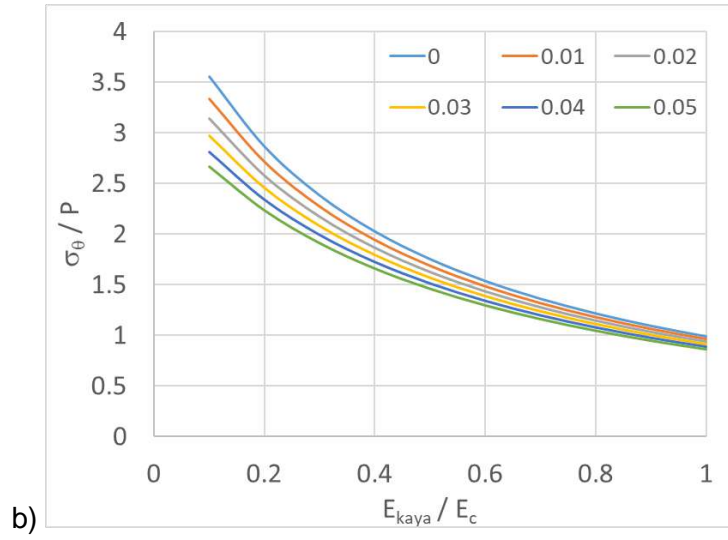
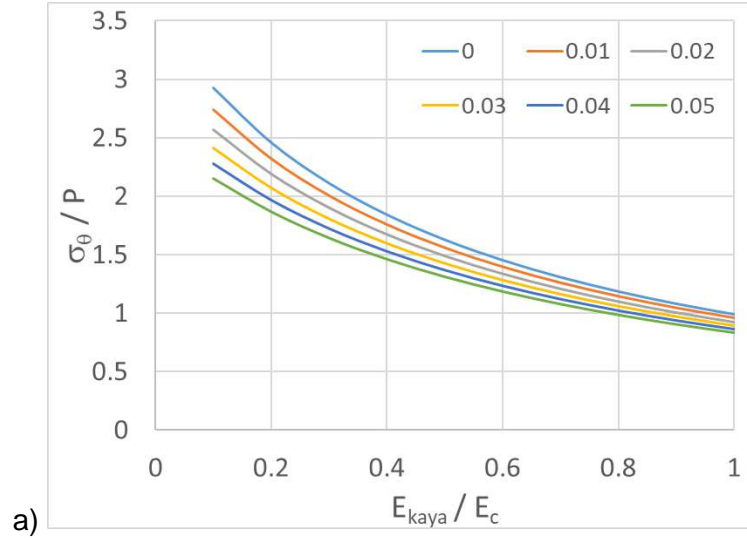
Bu şekilde Şekil 5.1'de verilen klasik denge denklemini aşağıdaki formu alır

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{E_s u d(r)}{s r^2} = 0 \quad (5.4)$$

Bu denklem ve Şekil 5.1'de verilen bünye denklemleri tek boyutlu sonlu eleman metoduyla sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çözümde kullanılan parametreler tünelin R/t (yarı çap / kalınlık) oranı, beton, donatı ve kayanın elastisite modülü, beton ve kayanın Poisson oranıdır.

5.3 Basitleştirilmiş Elastik Tasarım

Şekil 5.2'de sonuçlar özet olarak sunulmuştur. Değerlerin elde edilmesinde beton ve çeliğin elastisite modülü 25 GPa ve 200 GPa alınmıştır. Bu sonuçlar donatı/beton elastisite modülü oranının 8 olduğu durum için elde edilmiştir. Grafiklerde y eksenini en büyük çekme gerilmesinin iç basınca olan oranını vermektedir. Donatının iki sıra olarak tünelin iç ve dış sınırından 5 cm uzaklığa yerleştirildiği varsayılmıştır. Ancak yaptığımız hesaplarda iki sıradan fazla donatı kullanımının sonuçları çok az değiştirdiği görülmüştür. Donatı oranı toplam donatı alanının beton tünel kaplama alanına bölümüdür. Radyal donatı aralığı s olarak ifade edilirse $A_s / (t \times s)$ olarak hesaplanabilir. Kayanın elastisite modülü betonun elastisite modülüne yaklaştıkça gerilme çarpanı azalmaktadır.



Şekil 5.2 En büyük çekme gerilmesinin basınca oranı a) $R/t = 3$, b) $R/t = 4$, c) $R/t = 8$. Donatı oranı toplam donatı oranının beton alana oranıdır. R iç yarıçapı (m) ifade etmektedir. P ise uygulanan iç basınçtır.

Şekil 5.2’de verilen eğrilerin kullanımı bir örnekle kolaylıkla açıklanabilir. Tünelin iç çapı 2 m, iç basınç 1 MPa, betonun çekme mukavemeti 2 MPa varsayılırsa en büyük gerilme çarpanının 2 olması gerekir. E_{kaya}/E_c değerinin 0.2 olduğu durum için hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılabilir. R/t oranının (iç yarıçap/kalınlık) 8 olduğu durum (kalınlık 25 cm) hiçbir şekilde bu değerin altına inmemektedir (Şekil 5.2c) R/t oranının 4 olduğu durumda (kalınlık 50 cm) benzer şekilde en büyük gerilme çarpanı 2 değerinin altına inmemektedir (Şekil 5.2b). R/t oranının 3 olduğu durumda (kalınlık 66 cm) donatı oranının 0.04 olduğu durumda talebi karşılayabilmektedir (Şekil 5.2a).

Hesaplanan tünel kalınlıklarının çok fazla bulunması durumunda beton kalitesinin artırılmasının hesaplara etkisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Betonun çekme mukavemeti 2 MPa değerinden 2.5 MPa değerine çıkarılırsa kabul edilebilir en büyük çarpan 2.5 değerine çıkmaktadır. Donatı oranı 0.01 olarak seçildiğini varsayalım. R/t oranının 8, E_{kaya}/E_c oranının 0.2 olduğu durumda en büyük gerilme çarpanı 3.8 olarak şekilden bulunabilir (Şekil 5.2c). R/t oranının 4, E_{kaya}/E_c oranının 0.2 olduğu durumda ise 2.7 olarak bulunmaktadır (5.2b). R/t oranının 3, E_{kaya}/E_c oranının 0.2 olduğu durumda ise 2.3 olarak bulunmaktadır (5.2a). Bu bilgiler ışığında enterpolasyon yaparak tünel kalınlığı 58 cm olarak bulunur. Yani çekme mukavemetindeki 0.5 MPa büyüklüğündeki artış kaplama kalınlığını 8 cm, donatı oranını ise 0.04’den 0.01’e düşürmüştür.

Tünel geometrisinin deneysel çalışmalarda kullanıldığı gibi ters at nalı şeklinde olması durumunda, dinamik yük etkilerini ve dayanım katsayısı kavramını da kullanarak yukarıda verilen yaklaşım genelleştirilebilir. Çekme mukavemeti dayanım katsayısına (γ) bölünerek tasarım dayanımı hesaplanır. Dayanım katsayısının 1.2 olarak alınabilir. Şekil 5.2’de verilen en büyük gerilme çarpanı (C), dinamik etkiler (c_1) ve geometrik düzeltme (c_2) çarpanı ile büyütülür

$$C' = C \times c_1 \times c_2 \quad (5.5)$$

Bu yeni değerlerle yukarıda örnekte gösterildiği gibi tünelin ön tasarımı kolaylıkla tamamlanabilir. Yaptığımız sayısal çalışmalar dinamik etki çarpanı (c_1) değerinin 1.1 alınabileceğini göstermektedir. Geometrik düzeltme (c_2) çarpanı ise dairesel tüneller için 1, ters at nalı tünel kesiti için ise 1.2-1.5 arasında alınabilir.

Bu yaklaşım tünelde oluşacak çekme gerilmeleri kapasitenin altında tutmayı hedeflemekte olduğunda tasarım çok ekonomik olmayabilir. Yaklaşımında kayanın elastik kalacağı öngörüldüğünden, kayanın basınçtan dolayı çatlama ihtimali varsa (birinci deneyde olduğu

gibi) kullanılmaması önerilmektedir. Ayrıca deneysel çalışmalarda önemi gösterilen kaya ve tünel kaplaması arasında temasın sağlanması modelin kullanılabilmesi için gereklidir.

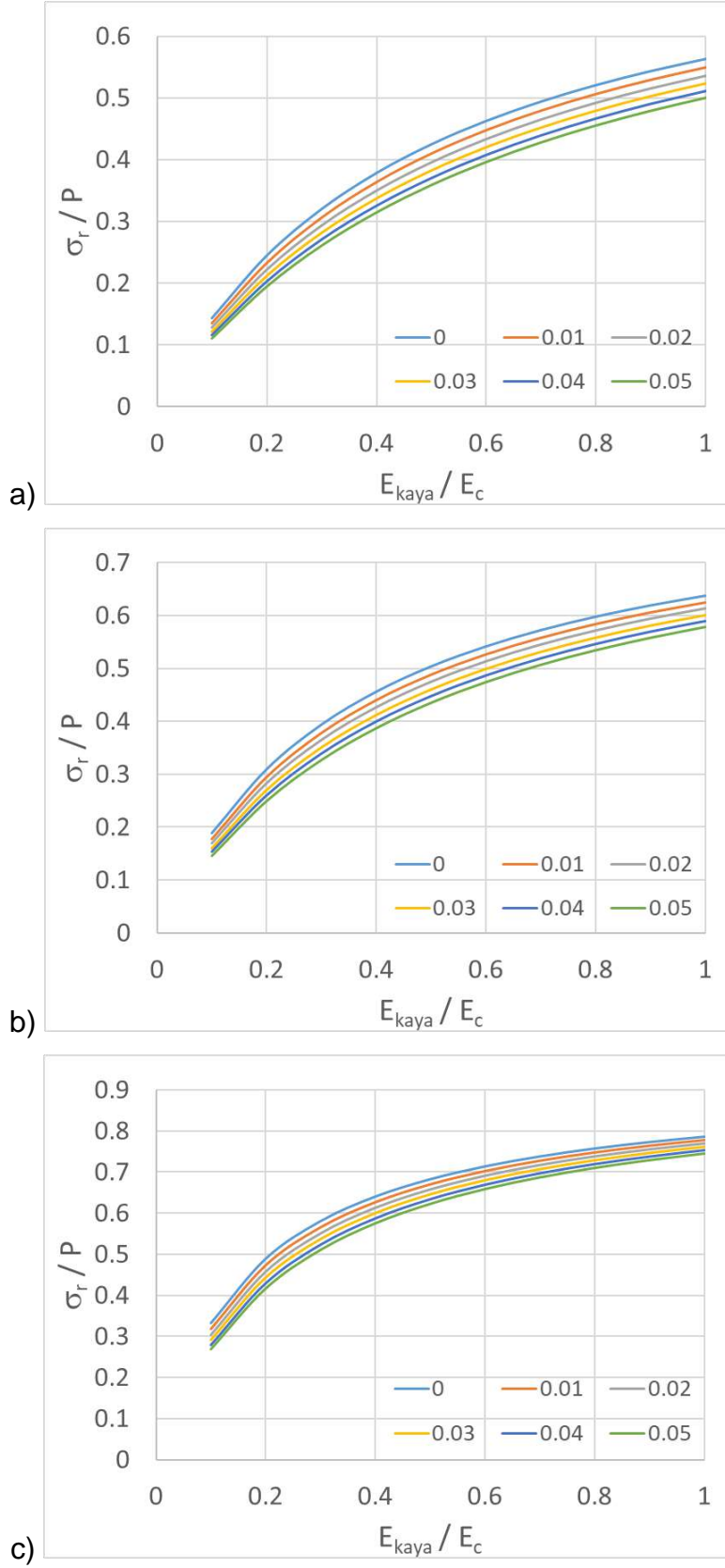
Yukarıda ön tasarıma yardımcı olması için geliştirilen model elastik durum için kaya aktarılan basıncın da incelenmesine izin vermektedir. Şekil 5.3'de iç basıncın kayaya aktarılan oranı, E_{kaya}/E_c oranı, donatı oranı ve iç yarıçapın fonksiyonu olarak üç farklı R/t oranı (8, 4 ve 3) için verilmiştir. Beklendiği gibi donatı oranı arttıkça tünel kaplaması daha az basıncı kayaya iletmektedir. R/t oranı düştüğünde de benzer bir değişim gözlemlenmektedir. Düşük kaya rijitliğinde doğal olarak kayaya aktarılan basınç düşmektedir. Şekil 5.3'de verilen basınç oranı yardımıyla tünel genişlemesinin kayayı ezme durumu kontrol edilebilir.

Benzer şekilde kayanın maruz kaldığı açısız yöndeki gerilim E_{kaya}/E_c oranı, donatı oranı ve iç yarıçapın fonksiyonu olarak üç farklı R/t oranı (3, 4 ve 8) için Şekil 5.4'de verilmiştir. Donatı oranları benzer şekilde açısız yöndeki normal gerilmeyi etkilemektedir. Daha fazla iç basınca maruz kalan rijitliği yüksek kayada doğal olarak daha fazla açısız yönde normal gerilme hesaplanmaktadır.

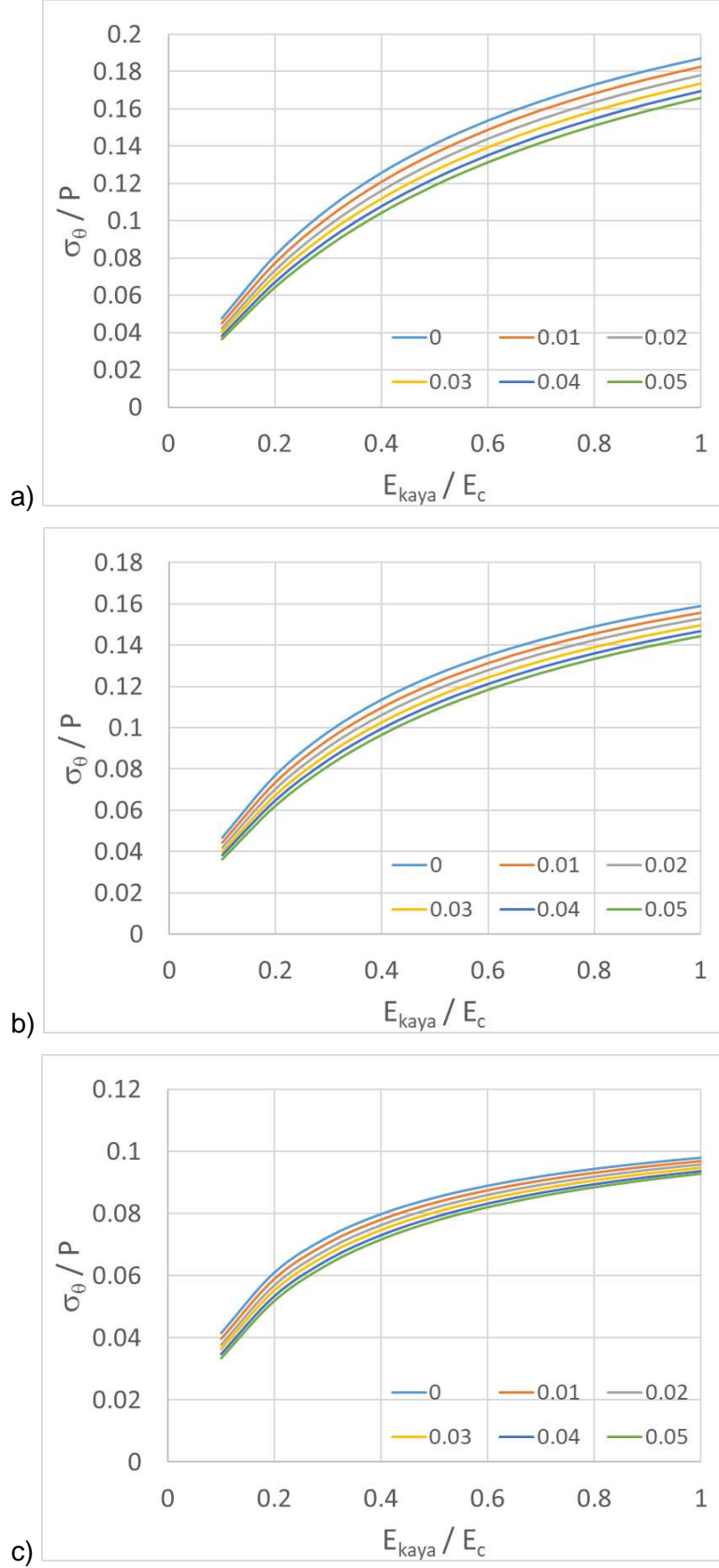
5.4 Basitleştirilmiş İnelastik Tasarım

Bölüm 5.2'de sunulan matematiksel model, tünelin elastik davranacağı varsayılırsa Bölüm 5.3'de verilen yöntem kullanılarak basitleştirilmiş elastik tasarım grafiklerinin elde edilmesine imkân vermektedir. Bu yaklaşımda betonun çekme mukavemetinin aşılması engellenmektedir. Elastik yaklaşım kimi zaman ekonomik olmayan mühendislik tasarımlarına yol açabileceğinden, bu kısımda inelastik şekil değiştirmelere maruz kalan tünel kaplamalarının basitleştirilmiş tasarımı için geliştirilen yöntem sunulmaktadır. Geliştirilen yaklaşım betonun çekme mukavemetinin aşılmasına izin vermekte ancak açılan çatlakların genişliklerinin tünelin servisini etkilemeyecek boyutlarda olmasını sağlamayı hedeflemektedir.

İnelastik çözüm için iteratif bir yöntem geliştirilmiştir. Bölüm 5.2'de verilen denklemler ve 5.3'de sunulan basitleştirilmiş tasarım yöntemi beton ve donatının elastisite modüllerine (E ve E_s), geometriye (R ve t), betonun çekme mukavemetine (f_t), kayanın elastisite modülüne (E_{kaya}) dayanmaktadır. Donatının akmayacağı ve kayanın çekme ve basınç mukavemetlerinin aşılmayacağı öngörülürse, doğrusal olmayan davranış çekme altında beton kaplamanın çatlama, betonun taşıdığı çekme gerilmelerinin azalması ve benzer şekilde betonun elastisite modülünün düşmesi ile açıklanabilir. Bu davranışın incelenebilmesi için öncelikle betonun çekme şekil değiştirme yumuşaması modeline ihtiyaç vardır. Bu çalışmada aşağıda verilen model kullanılmıştır (Vecchio ve Collins 1986)



Şekil 5.3 Kayaya uygulanan iç basınç oranı a) $R/t = 3$, b) $R/t = 4$, c) $R/t = 8$. Donatı oranı toplam donatı oranının beton alana oranıdır.



Şekil 5.4 Kayaya uygulanan iç basınç oranı a) $R/t = 3$, b) $R/t = 4$, c) $R/t = 8$. Donatı oranı toplam donatı oranının beton alana oranıdır. R iç yarıçapı (m) ifade etmektedir.



$$\sigma_c = \frac{f_{ct}}{1 + \sqrt{500(\varepsilon - \frac{f_{ct}}{E})}}$$

Bu denklemde f_{ct} çekme mukavemetini ve E elastik modülünü (azaltılmamış) ifade etmektedir. Betonun f_{ct} değerine kadar elastik davrandığı varsayılmaktadır. Artan birim şekil değiştirme ile betonun taşıyabileceği çekme gerilmesi azalmaktadır. Çekme gerilmesinin birim şekil değiştirme değerine oranı sekant modülünü vermektedir. Bölüm 5.2'de verilen matematiksel model azalan sekant elastisite modülü değerleri için çözülebilir. Kullanılan beton elastisite modülüne karşılık gelen çekme gerilmesi, Bölüm 5.2'de sunulan denklemlerin çözümünde en büyük beton çekme gerilmesine eşit olduğu durum eşdeğer elastik çözüm olarak kabul edilir. Modelde tünel kaplamasındaki gerilme tünel kalınlığı boyunca değişim göstermektedir. Yaklaşık yöntemde en büyük çekme gerilmesi kullanılmaktadır. Bu yaklaşım güvenli tarafta kalmaktadır.

Tünelin iç sınırında elde edilen birim şekil değiştirme değeri kullanılarak tünelin iç çevre uzunluğunun ne kadar değiştiği hesaplanır

$$\Delta L = 2\pi R\varepsilon$$

Bu uzunluk değişimi çatlak genişliklerinin toplamı ve betonun çatlamamış kısımlarda oluşan uzunluk değişimlerinin toplamıdır. Betonun taşıdığı çekme gerilmesi çatlaklardan uzaklaştıkça artmakta, çatlaklara yaklaştıkça azalmaktadır. Dolayısıyla betonun çatlamamış kısımlardaki toplam uzunluk değişiminin en büyük değeri

$$\Delta L_1 = 2\pi R \frac{f_{ct}}{E}$$

olarak hesaplanabilir. Çatlak genişliklerinin toplamı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$nw = 2\pi R(\varepsilon - \frac{f_{ct}}{E})$$

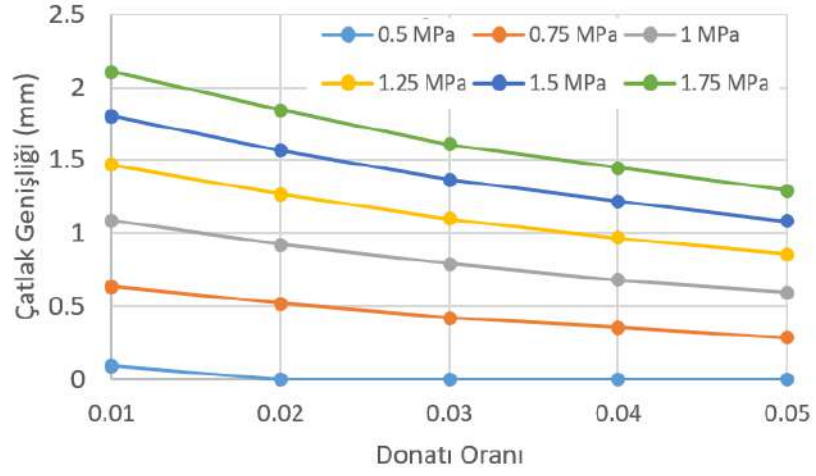
Burada n çatlak sayısını ve w ise çatlak genişliğini ifade etmektedir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda betonarma kaplama kullanılan tünellerde en az 3 çatlak olduğu gözlemlenmiştir. Çatlak sayısının daha fazla olma durumunda çatlak genişliği yukarıda hesaplanan değerden daha küçük olacağı için güvenli tarafta kalınacaktır. Fiber katkılı beton kullanıldığı zaman yaptığımız deneysel çalışmalar çatlak sayısının 6-9 olarak alınabileceğini göstermektedir.

Yukarıda anlatılan model beton elastisite modülü 25 GPa, donatı elastisite modülü 200 GPa, betonun çekme mukavemeti 2.5 MPa alınarak, 3 farklı kaya elastisite modülü (2.5 GPa, 5 GPa, 7.5 GPa), 5 donatı oranı (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05), 5 farklı iç basınç değeri (0.5 MPa, 0.75 MPa, 1 MPa, 1.25 MPa, 1.5 MPa, 1.75 MPa), üç farklı R/t oranı (R/t =8, 6, 4, 3) için

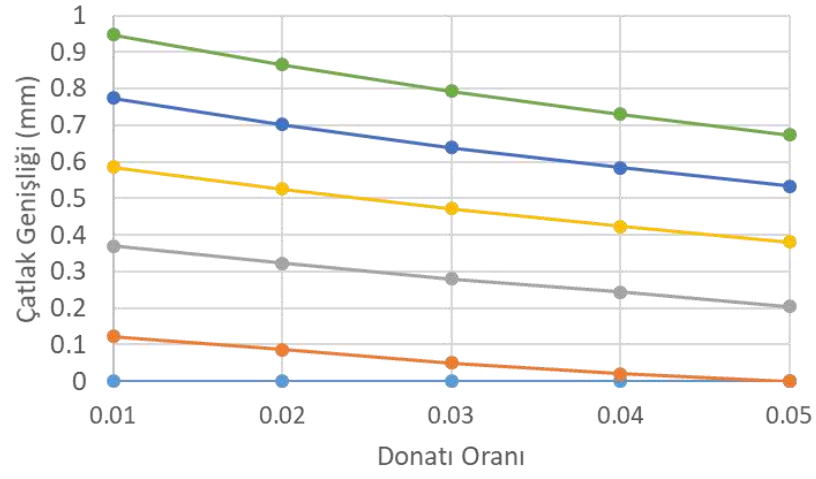


çözülmüştür. Şekil 5.5 ($R/t=8$), Şekil 5.6 ($R/t=6$), Şekil 5.7 ($R/t=4$) ve Şekil 5.8 ($R/t=3$) sonuçları özet olarak vermektedir. Verilen sonuçlar 5.3'de sunulan basitleştirilmiş elastik yaklaşımla uyum içindedir. İç basınçlı betonarme tüneller için kabul edilebilir çatlak açıklığı 0.3 mm olarak kabul edilerek bu sonuçlar kullanılarak ön tasarım yapılabilir. Sonuçlar betonun elastisite modülü ve çekme mukavemetine bağlı olduğundan kullanılacak beton kalitesine göre sayısal analizlerin tekrarlanmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Sonuçlar tablo olarak Tablo 5.1-5.4'de sunulmuştur.

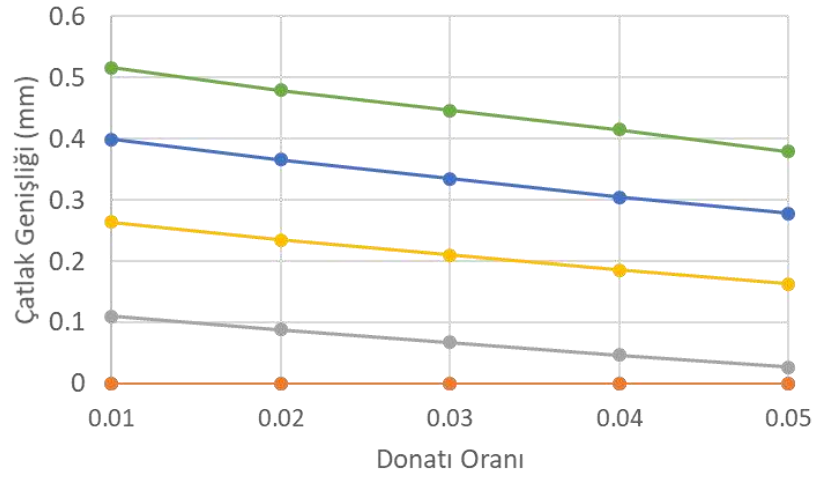
Tünel iç yarıçapının 2 m, iç basıncın 1 MPa ve kaya elastisite modülünün 5 GPa olduğunu varsayalım. Kabul edilebilir çatlak açıklığı 0.3 mm olarak kabul edillirse Şekil 5.5'den 25 cm kalınlık ve 0.03 donatı oranı, Şekil 5.6'dan ise 33 cm kalınlık ve 0.01 donatı oranı bulmaktadır. Kaya elastisite modülünün 2.5 GPa'a düştüğü durumda ise 25 cm ve 33 cm tünel kalınlığı yeterli gelmemektedir. Bu durumda Şekil 5.7, yani tünel kalınlığının 50 cm olduğu durumda donatı oranı 0.03 olarak bulunmaktadır. Tünel kalınlığının 66 cm olduğu durumda ise donatı oranı 0.02 değerine düşmektedir (Şekil 5.8).



a)

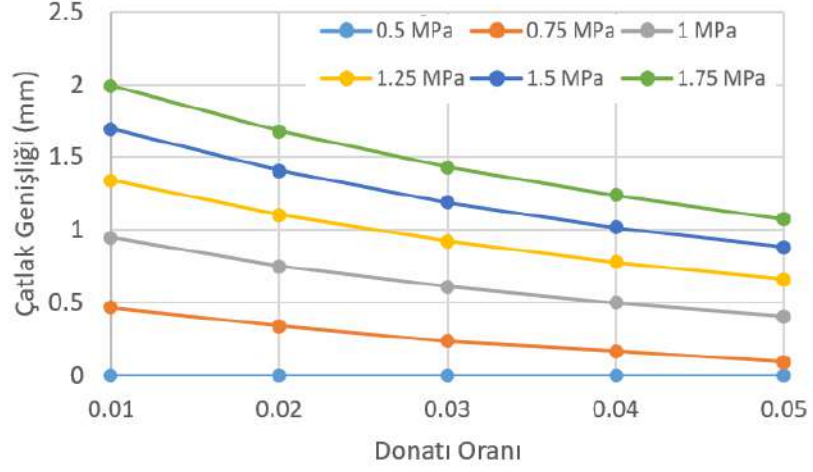


b)

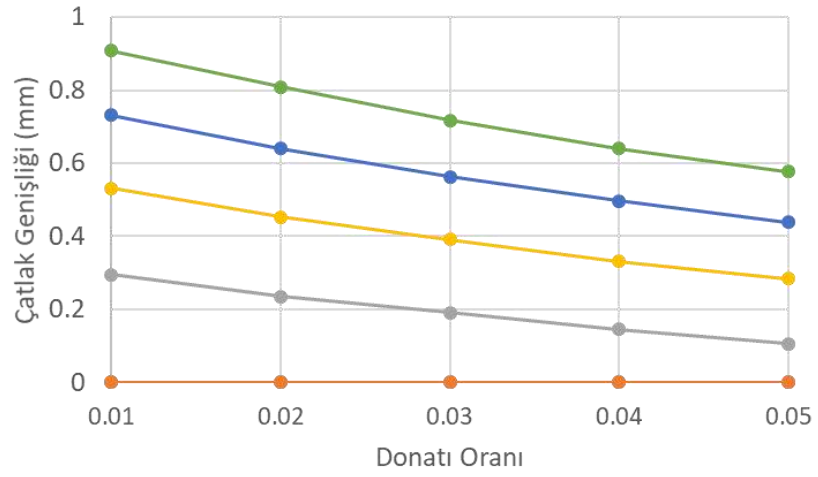


c)

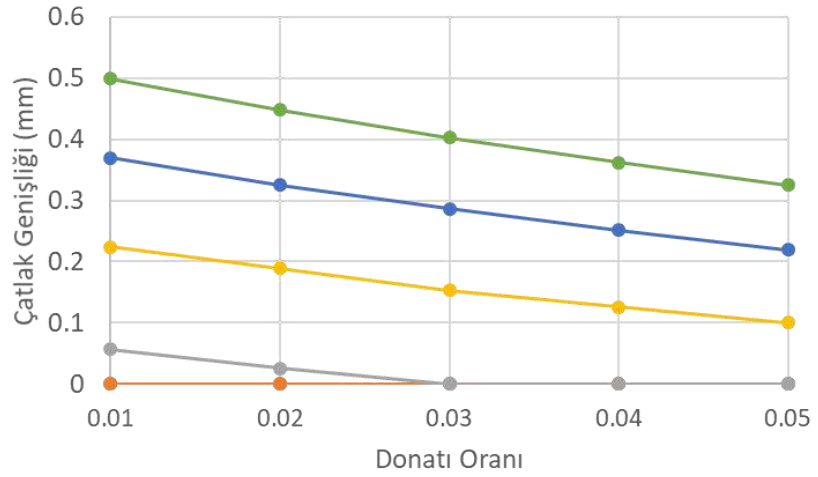
Şekil 5.5 R/t oranının 8 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5$ GPa, b) $E_{kaya}=5$ GPa, c) $E_{kaya}=7.5$ GPa.



a)

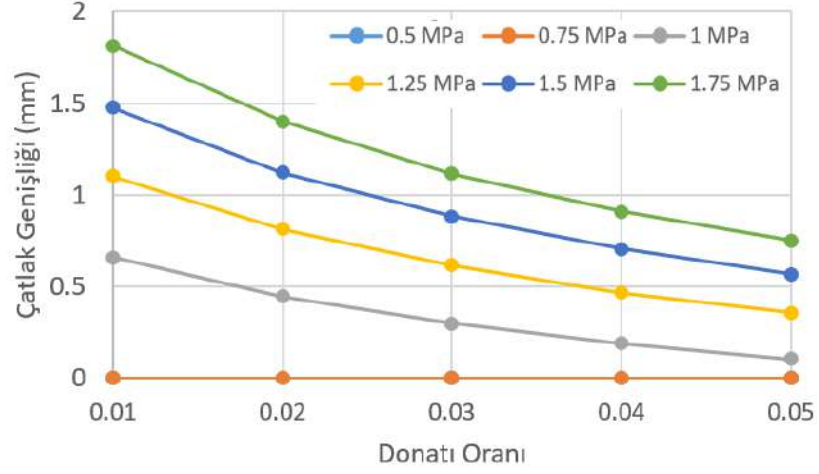


b)

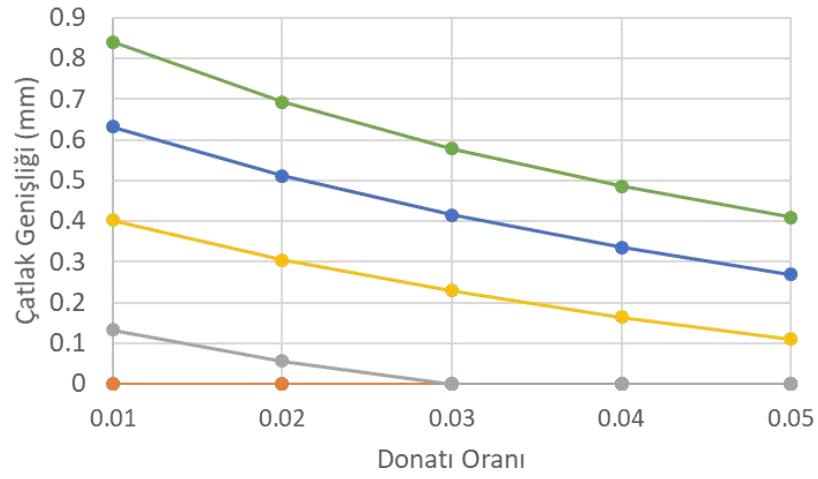


c)

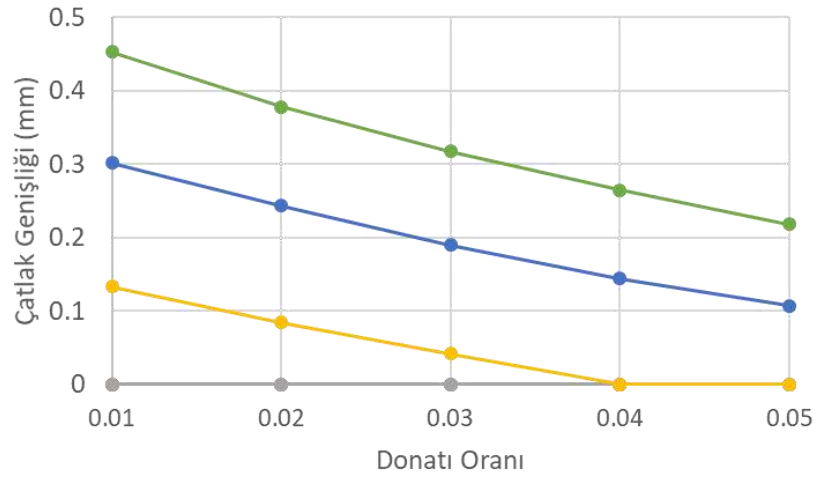
Şekil 5.6 R/t oranının 6 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5$ GPa, b) $E_{kaya}=5$ GPa, c) $E_{kaya}=7.5$ GPa.



a)

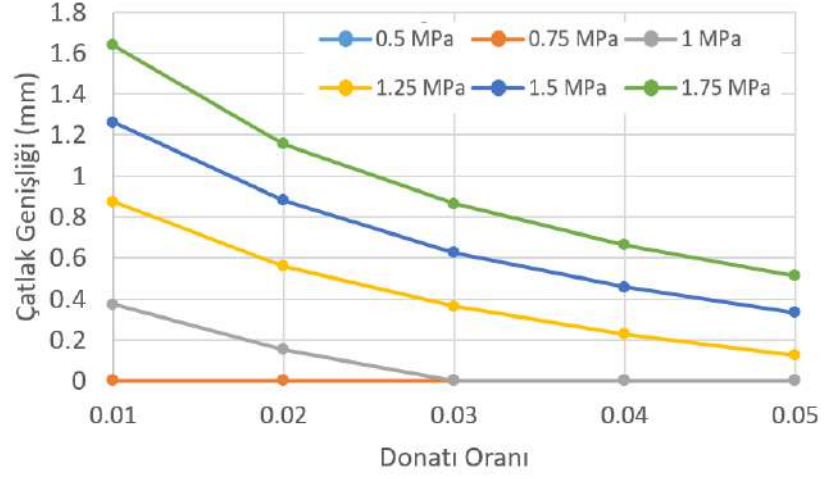


b)

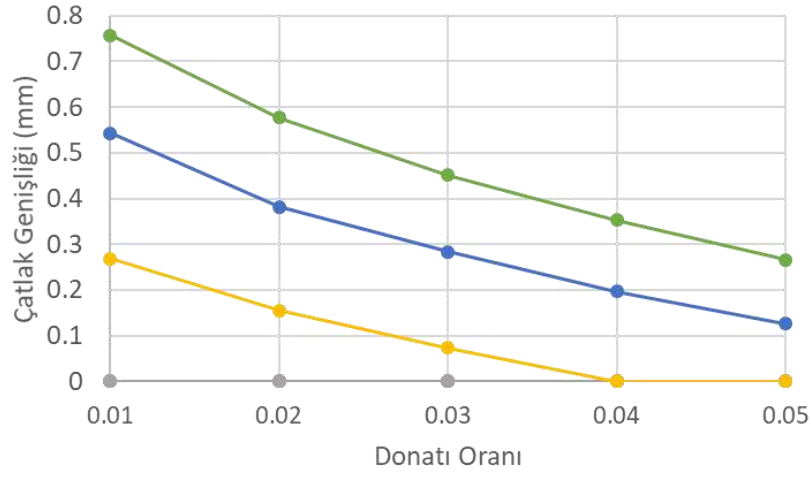


c)

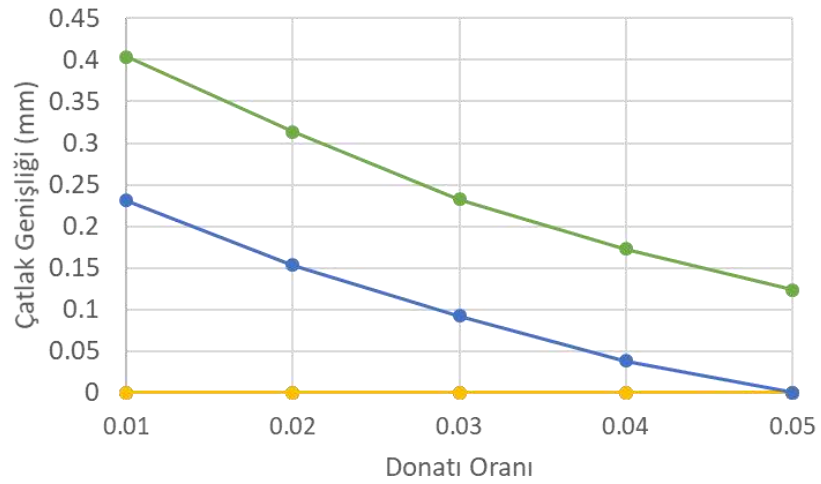
Şekil 5.7 R/t oranının 4 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5$ GPa, b) $E_{kaya}=5$ GPa, c) $E_{kaya}=7.5$ GPa.



a)



b)



c)

Şekil 5.8 R/t oranının 3 olduğu durum için çatlak genişliğinin farklı kaya elastisite modülleri için donatıya göre değişimi, a) $E_{kaya}=2.5$ GPa, b) $E_{kaya}=5$ GPa, c) $E_{kaya}=7.5$ GPa.

Tablo 5.1 R/t oranının 8 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.

Basınç (MPa)	ρ	E_{kaya} (GPa)	E (beton, GPa)	w (mm)	σ_r (Kaya, MPa)	σ_θ (Kaya, MPa)
0.5	0.01	2.5	18.44	0.09	0.19	0.19
0.5	0.02	2.5	25.00	0.00	0.15	0.15
0.5	0.03	2.5	25.00	0.00	0.15	0.14
0.5	0.04	2.5	25.00	0.00	0.14	0.14
0.5	0.05	2.5	25.00	0.00	0.13	0.13
0.75	0.01	2.5	7.78	0.64	0.41	0.41
0.75	0.02	2.5	8.89	0.52	0.37	0.36
0.75	0.03	2.5	10.11	0.42	0.33	0.32
0.75	0.04	2.5	10.77	0.36	0.30	0.30
0.75	0.05	2.5	12.17	0.29	0.27	0.27
1	0.01	2.5	4.80	1.09	0.63	0.62
1	0.02	2.5	5.52	0.92	0.56	0.55
1	0.03	2.5	6.35	0.79	0.50	0.50
1	0.04	2.5	7.28	0.68	0.45	0.45
1	0.05	2.5	7.78	0.59	0.42	0.41
1.25	0.01	2.5	3.88	1.47	0.82	0.81
1.25	0.02	2.5	4.47	1.27	0.73	0.72
1.25	0.03	2.5	4.80	1.10	0.67	0.66
1.25	0.04	2.5	5.52	0.97	0.60	0.60
1.25	0.05	2.5	5.92	0.86	0.56	0.55
1.5	0.01	2.5	3.13	1.80	1.03	1.01
1.5	0.02	2.5	3.61	1.57	0.91	0.90
1.5	0.03	2.5	3.88	1.37	0.83	0.82
1.5	0.04	2.5	4.47	1.22	0.75	0.74
1.5	0.05	2.5	4.80	1.08	0.69	0.68
1.75	0.01	2.5	2.71	2.10	1.22	1.21
1.75	0.02	2.5	3.13	1.84	1.09	1.08
1.75	0.03	2.5	3.36	1.61	0.99	0.98
1.75	0.04	2.5	3.88	1.45	0.90	0.89
1.75	0.05	2.5	4.17	1.29	0.83	0.82
0.5	0.01	5	25.00	0.00	0.24	0.23
0.5	0.02	5	25.00	0.00	0.23	0.23
0.5	0.03	5	25.00	0.00	0.22	0.22
0.5	0.04	5	25.00	0.00	0.21	0.21
0.5	0.05	5	25.00	0.00	0.21	0.21
0.75	0.01	5	16.84	0.12	0.42	0.41
0.75	0.02	5	18.44	0.09	0.39	0.38
0.75	0.03	5	20.71	0.05	0.36	0.35
0.75	0.04	5	22.65	0.02	0.34	0.33
0.75	0.05	5	25.00	0.00	0.31	0.31
1	0.01	5	10.77	0.37	0.64	0.63
1	0.02	5	11.46	0.32	0.60	0.59
1	0.03	5	12.17	0.28	0.57	0.56

1	0.04	5	12.91	0.24	0.54	0.53
1	0.05	5	14.44	0.20	0.50	0.50
1.25	0.01	5	7.78	0.59	0.86	0.85
1.25	0.02	5	8.32	0.53	0.81	0.80
1.25	0.03	5	9.49	0.47	0.75	0.75
1.25	0.04	5	10.11	0.42	0.71	0.70
1.25	0.05	5	10.77	0.38	0.68	0.67
1.5	0.01	5	6.35	0.77	1.08	1.07
1.5	0.02	5	6.80	0.70	1.01	1.00
1.5	0.03	5	7.28	0.64	0.95	0.94
1.5	0.04	5	7.78	0.58	0.90	0.89
1.5	0.05	5	8.32	0.53	0.85	0.84
1.75	0.01	5	5.52	0.95	1.29	1.27
1.75	0.02	5	5.92	0.86	1.21	1.19
1.75	0.03	5	6.35	0.79	1.14	1.13
1.75	0.04	5	6.80	0.73	1.08	1.06
1.75	0.05	5	7.28	0.67	1.02	1.01
0.5	0.01	7.5	25.00	0.00	0.28	0.28
0.5	0.02	7.5	25.00	0.00	0.28	0.27
0.5	0.03	7.5	25.00	0.00	0.27	0.27
0.5	0.04	7.5	25.00	0.00	0.26	0.26
0.5	0.05	7.5	25.00	0.00	0.26	0.25
0.75	0.01	7.5	25.00	0.00	0.42	0.42
0.75	0.02	7.5	25.00	0.00	0.41	0.41
0.75	0.03	7.5	25.00	0.00	0.40	0.40
0.75	0.04	7.5	25.00	0.00	0.39	0.39
0.75	0.05	7.5	25.00	0.00	0.38	0.38
1	0.01	7.5	17.65	0.11	0.63	0.63
1	0.02	7.5	18.44	0.09	0.61	0.60
1	0.03	7.5	19.22	0.07	0.58	0.58
1	0.04	7.5	20.71	0.05	0.56	0.55
1	0.05	7.5	22.05	0.03	0.53	0.53
1.25	0.01	7.5	12.91	0.26	0.86	0.85
1.25	0.02	7.5	13.67	0.24	0.82	0.81
1.25	0.03	7.5	13.67	0.21	0.80	0.79
1.25	0.04	7.5	14.44	0.19	0.76	0.75
1.25	0.05	7.5	15.23	0.16	0.73	0.72
1.5	0.01	7.5	10.11	0.40	1.08	1.07
1.5	0.02	7.5	10.77	0.37	1.04	1.02
1.5	0.03	7.5	11.46	0.33	0.99	0.98
1.5	0.04	7.5	11.46	0.30	0.96	0.95
1.5	0.05	7.5	12.17	0.28	0.92	0.91
1.75	0.01	7.5	8.32	0.52	1.31	1.29
1.75	0.02	7.5	8.89	0.48	1.25	1.24
1.75	0.03	7.5	9.49	0.45	1.20	1.18
1.75	0.04	7.5	10.11	0.41	1.15	1.13
1.75	0.05	7.5	10.11	0.38	1.11	1.10

Tablo 5.2 R/t oranının 6 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.

Basınç (MPa)	ρ	E_{kaya} (GPa)	E (beton, GPa)	w (mm)	σ_r (Kaya, MPa)	σ_θ (Kaya, MPa)
0.5	0.01	2.5	25.00	0.00	0.13	0.13
0.5	0.02	2.5	25.00	0.00	0.12	0.12
0.5	0.03	2.5	25.00	0.00	0.12	0.11
0.5	0.04	2.5	25.00	0.00	0.11	0.11
0.5	0.05	2.5	25.00	0.00	0.11	0.10
0.75	0.01	2.5	9.49	0.47	0.33	0.32
0.75	0.02	2.5	11.46	0.34	0.28	0.27
0.75	0.03	2.5	13.67	0.24	0.24	0.24
0.75	0.04	2.5	15.23	0.17	0.22	0.21
0.75	0.05	2.5	18.44	0.09	0.19	0.18
1	0.01	2.5	5.52	0.95	0.53	0.53
1	0.02	2.5	6.80	0.75	0.45	0.45
1	0.03	2.5	7.78	0.61	0.40	0.39
1	0.04	2.5	8.89	0.50	0.36	0.35
1	0.05	2.5	10.11	0.41	0.32	0.31
1.25	0.01	2.5	4.17	1.34	0.72	0.71
1.25	0.02	2.5	4.80	1.10	0.63	0.62
1.25	0.03	2.5	5.52	0.92	0.55	0.54
1.25	0.04	2.5	6.35	0.78	0.49	0.48
1.25	0.05	2.5	7.28	0.66	0.44	0.43
1.5	0.01	2.5	3.36	1.69	0.91	0.90
1.5	0.02	2.5	3.88	1.41	0.79	0.78
1.5	0.03	2.5	4.47	1.19	0.70	0.69
1.5	0.04	2.5	5.15	1.02	0.62	0.61
1.5	0.05	2.5	5.92	0.88	0.56	0.55
1.75	0.01	2.5	2.71	1.99	1.11	1.09
1.75	0.02	2.5	3.36	1.68	0.95	0.94
1.75	0.03	2.5	3.88	1.43	0.83	0.82
1.75	0.04	2.5	4.47	1.24	0.74	0.73
1.75	0.05	2.5	4.80	1.07	0.68	0.67
0.5	0.01	5	25.00	0.00	0.20	0.20
0.5	0.02	5	25.00	0.00	0.19	0.19
0.5	0.03	5	25.00	0.00	0.18	0.18
0.5	0.04	5	25.00	0.00	0.18	0.18
0.5	0.05	5	25.00	0.00	0.17	0.17
0.75	0.01	5	25.00	0.00	0.30	0.29
0.75	0.02	5	25.00	0.00	0.29	0.28
0.75	0.03	5	25.00	0.00	0.28	0.27
0.75	0.04	5	25.00	0.00	0.27	0.26
0.75	0.05	5	25.00	0.00	0.26	0.25
1	0.01	5	12.17	0.30	0.54	0.54
1	0.02	5	13.67	0.23	0.50	0.49
1	0.03	5	14.44	0.19	0.46	0.46
1	0.04	5	16.04	0.15	0.43	0.42
1	0.05	5	17.65	0.11	0.40	0.39
1.25	0.01	5	8.32	0.53	0.77	0.76

1.25	0.02	5	9.49	0.45	0.70	0.69
1.25	0.03	5	10.11	0.39	0.65	0.64
1.25	0.04	5	11.46	0.33	0.60	0.59
1.25	0.05	5	12.17	0.28	0.56	0.55
1.5	0.01	5	6.80	0.73	0.97	0.95
1.5	0.02	5	7.28	0.64	0.89	0.88
1.5	0.03	5	8.32	0.56	0.82	0.81
1.5	0.04	5	8.89	0.50	0.77	0.76
1.5	0.05	5	9.49	0.44	0.72	0.71
1.75	0.01	5	5.52	0.91	1.18	1.16
1.75	0.02	5	6.35	0.81	1.07	1.06
1.75	0.03	5	6.80	0.72	1.00	0.99
1.75	0.04	5	7.28	0.64	0.93	0.92
1.75	0.05	5	8.32	0.58	0.86	0.85
0.5	0.01	7.5	25.00	0.00	0.24	0.24
0.5	0.02	7.5	25.00	0.00	0.24	0.23
0.5	0.03	7.5	25.00	0.00	0.23	0.23
0.5	0.04	7.5	25.00	0.00	0.22	0.22
0.5	0.05	7.5	25.00	0.00	0.22	0.21
0.75	0.01	7.5	25.00	0.00	0.37	0.36
0.75	0.02	7.5	25.00	0.00	0.36	0.35
0.75	0.03	7.5	25.00	0.00	0.35	0.34
0.75	0.04	7.5	25.00	0.00	0.34	0.33
0.75	0.05	7.5	25.00	0.00	0.33	0.32
1	0.01	7.5	19.98	0.06	0.54	0.53
1	0.02	7.5	22.05	0.03	0.50	0.49
1	0.03	7.5	25.00	0.00	0.46	0.45
1	0.04	7.5	25.00	0.00	0.45	0.44
1	0.05	7.5	25.00	0.00	0.43	0.43
1.25	0.01	7.5	13.67	0.22	0.76	0.75
1.25	0.02	7.5	14.44	0.19	0.72	0.71
1.25	0.03	7.5	16.04	0.15	0.67	0.66
1.25	0.04	7.5	16.84	0.13	0.64	0.63
1.25	0.05	7.5	17.65	0.10	0.61	0.60
1.5	0.01	7.5	10.77	0.37	0.97	0.96
1.5	0.02	7.5	11.46	0.33	0.92	0.91
1.5	0.03	7.5	12.17	0.29	0.87	0.86
1.5	0.04	7.5	12.91	0.25	0.83	0.82
1.5	0.05	7.5	13.67	0.22	0.79	0.78
1.75	0.01	7.5	8.89	0.50	1.19	1.17
1.75	0.02	7.5	9.49	0.45	1.12	1.11
1.75	0.03	7.5	10.11	0.40	1.06	1.05
1.75	0.04	7.5	10.77	0.36	1.01	0.99
1.75	0.05	7.5	11.46	0.33	0.96	0.95

Tablo 5.3 R/t oranının 4 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.

Basınç (MPa)	ρ	E_{kaya} (GPa)	E (beton, GPa)	w (mm)	σ_r (Kaya, MPa)	σ_θ (Kaya, MPa)
0.5	0.01	2.5	25.00	0.00	0.09	0.09
0.5	0.02	2.5	25.00	0.00	0.08	0.08
0.5	0.03	2.5	25.00	0.00	0.08	0.08
0.5	0.04	2.5	25.00	0.00	0.08	0.08
0.5	0.05	2.5	25.00	0.00	0.07	0.07
0.75	0.01	2.5	25.00	0.00	0.13	0.13
0.75	0.02	2.5	25.00	0.00	0.13	0.13
0.75	0.03	2.5	25.00	0.00	0.12	0.12
0.75	0.04	2.5	25.00	0.00	0.12	0.11
0.75	0.05	2.5	25.00	0.00	0.11	0.11
1	0.01	2.5	7.53	0.66	0.37	0.36
1	0.02	2.5	9.80	0.44	0.29	0.29
1	0.03	2.5	12.17	0.30	0.24	0.24
1	0.04	2.5	14.84	0.19	0.21	0.20
1	0.05	2.5	18.04	0.10	0.18	0.17
1.25	0.01	2.5	4.97	1.10	0.55	0.54
1.25	0.02	2.5	6.35	0.81	0.44	0.44
1.25	0.03	2.5	7.78	0.62	0.37	0.37
1.25	0.04	2.5	9.49	0.47	0.32	0.31
1.25	0.05	2.5	11.11	0.36	0.28	0.27
1.5	0.01	2.5	3.88	1.48	0.71	0.70
1.5	0.02	2.5	4.97	1.12	0.58	0.57
1.5	0.03	2.5	5.92	0.88	0.49	0.48
1.5	0.04	2.5	7.03	0.70	0.42	0.41
1.5	0.05	2.5	8.32	0.57	0.37	0.36
1.75	0.01	2.5	3.13	1.82	0.88	0.87
1.75	0.02	2.5	4.02	1.40	0.72	0.70
1.75	0.03	2.5	4.97	1.12	0.60	0.59
1.75	0.04	2.5	5.92	0.91	0.52	0.51
1.75	0.05	2.5	6.80	0.75	0.46	0.45
0.5	0.01	5	25.00	0.00	0.15	0.15
0.5	0.02	5	25.00	0.00	0.14	0.14
0.5	0.03	5	25.00	0.00	0.14	0.13
0.5	0.04	5	25.00	0.00	0.13	0.13
0.5	0.05	5	25.00	0.00	0.13	0.12
0.75	0.01	5	25.00	0.00	0.22	0.22
0.75	0.02	5	25.00	0.00	0.21	0.21
0.75	0.03	5	25.00	0.00	0.20	0.20
0.75	0.04	5	25.00	0.00	0.20	0.19
0.75	0.05	5	25.00	0.00	0.19	0.19
1	0.01	5	16.84	0.13	0.37	0.37
1	0.02	5	20.35	0.06	0.32	0.31
1	0.03	5	25.00	0.00	0.27	0.27
1	0.04	5	25.00	0.00	0.26	0.26
1	0.05	5	25.00	0.00	0.25	0.25
1.25	0.01	5	10.44	0.40	0.58	0.57

1.25	0.02	5	12.17	0.30	0.51	0.50
1.25	0.03	5	13.67	0.23	0.46	0.45
1.25	0.04	5	15.63	0.16	0.41	0.40
1.25	0.05	5	17.65	0.11	0.37	0.36
1.5	0.01	5	7.78	0.63	0.77	0.76
1.5	0.02	5	8.89	0.51	0.68	0.67
1.5	0.03	5	10.11	0.42	0.61	0.60
1.5	0.04	5	11.46	0.34	0.55	0.54
1.5	0.05	5	12.91	0.27	0.50	0.49
1.75	0.01	5	6.13	0.84	0.96	0.95
1.75	0.02	5	7.28	0.69	0.85	0.83
1.75	0.03	5	8.32	0.58	0.76	0.75
1.75	0.04	5	9.18	0.49	0.69	0.68
1.75	0.05	5	10.11	0.41	0.63	0.62
0.5	0.01	7.5	25.00	0.00	0.19	0.19
0.5	0.02	7.5	25.00	0.00	0.18	0.18
0.5	0.03	7.5	25.00	0.00	0.18	0.17
0.5	0.04	7.5	25.00	0.00	0.17	0.17
0.5	0.05	7.5	25.00	0.00	0.16	0.16
0.75	0.01	7.5	25.00	0.00	0.28	0.28
0.75	0.02	7.5	25.00	0.00	0.27	0.27
0.75	0.03	7.5	25.00	0.00	0.26	0.26
0.75	0.04	7.5	25.00	0.00	0.25	0.25
0.75	0.05	7.5	25.00	0.00	0.25	0.24
1	0.01	7.5	25.00	0.00	0.38	0.37
1	0.02	7.5	25.00	0.00	0.37	0.36
1	0.03	7.5	25.00	0.00	0.35	0.35
1	0.04	7.5	25.00	0.00	0.34	0.33
1	0.05	7.5	25.00	0.00	0.33	0.32
1.25	0.01	7.5	16.84	0.13	0.57	0.56
1.25	0.02	7.5	18.83	0.08	0.52	0.51
1.25	0.03	7.5	21.06	0.04	0.48	0.47
1.25	0.04	7.5	25.00	0.00	0.42	0.42
1.25	0.05	7.5	25.00	0.00	0.41	0.40
1.5	0.01	7.5	12.17	0.30	0.78	0.77
1.5	0.02	7.5	13.28	0.24	0.72	0.71
1.5	0.03	7.5	14.84	0.19	0.66	0.65
1.5	0.04	7.5	16.44	0.14	0.61	0.60
1.5	0.05	7.5	17.65	0.11	0.57	0.56
1.75	0.01	7.5	9.49	0.45	0.98	0.97
1.75	0.02	7.5	10.77	0.38	0.90	0.88
1.75	0.03	7.5	11.81	0.32	0.83	0.81
1.75	0.04	7.5	12.91	0.26	0.77	0.76
1.75	0.05	7.5	14.05	0.22	0.71	0.70

Tablo 5.4 R/t oranının 3 olduğu durum için elde edilen sonuçlar.

Basınç (MPa)	ρ	E_{kaya} (GPa)	E (beton, GPa)	w (mm)	σ_r (Kaya, MPa)	σ_θ (Kaya, MPa)
0.5	0.01	2.5	25.00	0.00	0.07	0.07
0.5	0.02	2.5	25.00	0.00	0.06	0.06
0.5	0.03	2.5	25.00	0.00	0.06	0.06
0.5	0.04	2.5	25.00	0.00	0.06	0.06
0.5	0.05	2.5	25.00	0.00	0.05	0.05
0.75	0.01	2.5	25.00	0.00	0.10	0.10
0.75	0.02	2.5	25.00	0.00	0.10	0.09
0.75	0.03	2.5	25.00	0.00	0.09	0.09
0.75	0.04	2.5	25.00	0.00	0.09	0.09
0.75	0.05	2.5	25.00	0.00	0.08	0.08
1	0.01	2.5	10.77	0.37	0.24	0.24
1	0.02	2.5	16.04	0.15	0.17	0.17
1	0.03	2.5	25.00	0.00	0.12	0.12
1	0.04	2.5	25.00	0.00	0.12	0.11
1	0.05	2.5	25.00	0.00	0.11	0.11
1.25	0.01	2.5	5.92	0.87	0.42	0.41
1.25	0.02	2.5	8.32	0.56	0.31	0.31
1.25	0.03	2.5	10.77	0.36	0.25	0.25
1.25	0.04	2.5	13.67	0.23	0.21	0.20
1.25	0.05	2.5	16.84	0.13	0.17	0.17
1.5	0.01	2.5	4.47	1.26	0.56	0.55
1.5	0.02	2.5	5.92	0.88	0.44	0.43
1.5	0.03	2.5	7.78	0.63	0.35	0.34
1.5	0.04	2.5	9.49	0.46	0.29	0.29
1.5	0.05	2.5	11.46	0.33	0.25	0.24
1.75	0.01	2.5	3.36	1.63	0.72	0.71
1.75	0.02	2.5	4.80	1.15	0.55	0.54
1.75	0.03	2.5	5.92	0.86	0.45	0.44
1.75	0.04	2.5	7.28	0.66	0.38	0.37
1.75	0.05	2.5	8.89	0.51	0.32	0.32
0.5	0.01	5	25.00	0.00	0.12	0.11
0.5	0.02	5	25.00	0.00	0.11	0.11
0.5	0.03	5	25.00	0.00	0.11	0.10
0.5	0.04	5	25.00	0.00	0.10	0.10
0.5	0.05	5	25.00	0.00	0.10	0.10
0.75	0.01	5	25.00	0.00	0.17	0.17
0.75	0.02	5	25.00	0.00	0.17	0.16
0.75	0.03	5	25.00	0.00	0.16	0.16
0.75	0.04	5	25.00	0.00	0.15	0.15
0.75	0.05	5	25.00	0.00	0.15	0.14
1	0.01	5	25.00	0.00	0.23	0.23
1	0.02	5	25.00	0.00	0.22	0.22
1	0.03	5	25.00	0.00	0.21	0.21
1	0.04	5	25.00	0.00	0.20	0.20
1	0.05	5	25.00	0.00	0.19	0.19
1.25	0.01	5	12.91	0.27	0.43	0.42

1.25	0.02	5	16.04	0.16	0.36	0.35
1.25	0.03	5	19.22	0.07	0.31	0.30
1.25	0.04	5	25.00	0.00	0.25	0.25
1.25	0.05	5	25.00	0.00	0.24	0.24
1.5	0.01	5	8.32	0.54	0.63	0.62
1.5	0.02	5	10.77	0.38	0.52	0.51
1.5	0.03	5	12.17	0.28	0.46	0.45
1.5	0.04	5	14.44	0.20	0.40	0.39
1.5	0.05	5	16.84	0.13	0.35	0.35
1.75	0.01	5	6.80	0.76	0.79	0.78
1.75	0.02	5	8.32	0.58	0.67	0.66
1.75	0.03	5	9.49	0.45	0.59	0.58
1.75	0.04	5	10.77	0.35	0.53	0.52
1.75	0.05	5	12.91	0.27	0.46	0.45
0.5	0.01	7.5	25.00	0.00	0.15	0.15
0.5	0.02	7.5	25.00	0.00	0.15	0.14
0.5	0.03	7.5	25.00	0.00	0.14	0.14
0.5	0.04	7.5	25.00	0.00	0.14	0.13
0.5	0.05	7.5	25.00	0.00	0.13	0.13
0.75	0.01	7.5	25.00	0.00	0.23	0.23
0.75	0.02	7.5	25.00	0.00	0.22	0.22
0.75	0.03	7.5	25.00	0.00	0.21	0.21
0.75	0.04	7.5	25.00	0.00	0.20	0.20
0.75	0.05	7.5	25.00	0.00	0.20	0.19
1	0.01	7.5	25.00	0.00	0.31	0.30
1	0.02	7.5	25.00	0.00	0.29	0.29
1	0.03	7.5	25.00	0.00	0.28	0.28
1	0.04	7.5	25.00	0.00	0.27	0.27
1	0.05	7.5	25.00	0.00	0.26	0.26
1.25	0.01	7.5	25.00	0.00	0.38	0.38
1.25	0.02	7.5	25.00	0.00	0.37	0.36
1.25	0.03	7.5	25.00	0.00	0.35	0.35
1.25	0.04	7.5	25.00	0.00	0.34	0.33
1.25	0.05	7.5	25.00	0.00	0.33	0.32
1.5	0.01	7.5	13.67	0.23	0.63	0.62
1.5	0.02	7.5	16.04	0.15	0.55	0.54
1.5	0.03	7.5	18.44	0.09	0.49	0.48
1.5	0.04	7.5	21.40	0.04	0.44	0.43
1.5	0.05	7.5	25.00	0.00	0.39	0.38
1.75	0.01	7.5	10.11	0.40	0.82	0.81
1.75	0.02	7.5	11.46	0.31	0.74	0.72
1.75	0.03	7.5	13.67	0.23	0.65	0.64
1.75	0.04	7.5	15.23	0.17	0.59	0.58
1.75	0.05	7.5	16.84	0.12	0.54	0.53



6. SONUÇLAR

Proje kapsamında, iç basınçlı betonarme tünellerin davranışının incelenmesi çok yönlü bir araştırma programı ile incelenmiştir. İç basınçlı tünel analiz ve tasarımına yönelik literatürde bulduğumuz tüm çalışmalar sayısal veya teoriktir. Projenin ilk ayağında iç basınçlı tünel davranışının laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenmesine olanak veren yenilikçi bir deneysel kurulumu geliştirilmiştir. Bu kurulum saha gerilimlerinin gerçekçi bir şekilde laboratuvar ortamında oluşturulmasına imkan vermektedir. Bu tür bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Geliştirilen deneysel ortamda 8 deney başarıyla tamamlanmıştır. Yapılan deneyler saha gerilimleri, kaya elastisite modülü, lifli beton, tünel ve kaya arasındaki etkileşim parametrelerinin tünel davranışına etkisinin incelenmesine olanak vermiştir. Deneysel çalışmalar en önemli parametrelerin tünel ve kaya arasında oluşabilecek boşluklar ve saha gerilimleri olduğunu göstermiştir. Deneysel program içinde lifli dokuma ile tamir edilmiş tünel performansının ölçülmesi dahil edilmiş ve tamiratın başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Lifli beton kullanımının da çatlak genişliklerini kontrol altında tutmakta oldukça faydalı olduğu yine deneysel çalışmaların önemli sonuçları arasındadır.

Projenin ikinci ayağında çatlaklı betonarme elemanların davranışının incelenmesi için örtüşen kafes modeli geliştirilmiştir. Örtüşen kafes modeli bağ temelli peridinamik yöntem ile bir çok benzerlikler taşımaktadır. Bünye denklemlerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem önerilmiş ve geliştirilen analiz platformu çok sayıda beton/betonarme deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Platform çatlaklı beton/betonarme elemanların hem belirtik entegrasyon ile dinamik, hem de sıralı doğrusal analiz yöntemi ile statik davranışının incelenmesinde kullanılabilir. Statik problemlerin belirtik entegrasyon ile dinamik olarak çözülebilmesi için PID kontrol algoritması geliştirilmiş ve kullanımı bir çok deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Geliştirilen yöntem proje kapsamında yapılan deneylerin modellenmesinde kullanılmış ve hem deneylerde gözlemlenen çatlak dağılımlarını, hem de basınç/şekil değişimlerini oldukça başarılı bir şekilde tahminde bulunduğu belirlenmiştir.

Projenin üçüncü ayağında betonarme kaplama tünellerin ani iç basınç altında davranışı deneysel çalışmalar ile kalibre edilmiş sayısal yöntem kullanılarak dinamik olarak incelenmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi mümkün olmayan ani iç basınç yükünden dolayı, sayısal simülasyonlar dinamik tünel davranışının incelenmesinde tek seçenek olarak gözükmektedir. Dinamik simülasyonlar saha gerilimlerinin ve tünel geometrisinin etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır.



Projenin son ayağında ise basitleştirilmiş iki tasarım yöntemi sunulmuştur. Birinci yöntem tünelin elastik davranış göstereceği varsayımına dayanmaktadır. İkinci yöntem ise çatlak genişliklerini yaklaşık olarak tahmin etmek için kullanılabilir. Elde edilen deneysel verilerin, geliştirilen analiz platformunun ve önerilen basit tasarım yaklaşımlarının hem bu alanda yapılacak deneysel ve teorik çalışmalara yol göstermesini, hem de ülkemizde oldukça sık kullanılan iç basınçlı betonarme tünel tasarımında kolaylık ve güvenlik sağlamasını ümit etmekteyiz.



KAYNAKLAR

- Acun, B. 2010. "Energy Based Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Columns", Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Aldemir, A. 2016. "Seismic Performance Evaluation of Roller Compacted Concrete Gravity Dams By Pseudo Dynamic Testing", Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Bazant, Z.P. ve Oh, B.H. 1983. "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", *Materials and Structures (RILEM)*, 16, 155–177.
- Biot, M. A. 1935. "Effect of certain discontinuities on the pressure distribution in a loaded soil", *Physics*, 6, 367-375.
- Blaauwendraad, J. 1985. "Realisations and Restrictions - Application of Numerical Models to Concrete Structures", *Finite element analysis of reinforced concrete structures, Proceeding of US-Japan Seminar*, (Meyer C., Okamura H. Eds.), ASCE, 557-578.
- Brekke, T., Ripley, B. 1987. "Design strategies for pressure tunnels and shafts." Rep. EPRI contract No. RP-1747-17, Electric Power Research Inst. (EPRI), Palo Alto, Calif.
- Buttlar, W. G., Hill, B. C., Kim, R. Y., Kutay, M. E., Millien, A., Montepara, A. 2014. "Digital Image Correlation Techniques to Investigate Strain Fields and Cracking Phenomena in Asphalt Materials", *Materials and Structures*, 1373-1390.
- Chung, J., ve Lee, M.L. 1994. "A New Family of Explicit Integration Methods for Linear and Non-Linear Structural Dynamics", *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37, 3961-3976.
- Chung, S.K., Synn, J.H., Park, C., Sunwoo, C., Park C., ve Choi, S.O. 2001. "Design Criteria for the Reinforcement of a Water Pressure Tunnel Driven by TBM", *Geosystem Engineering*, 4, 43-49.
- Vecchio, F.J., ve Collins, M.P. 1986. "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI Journal*, 83, 219-231.
- Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D.A. ve Reinhardt, H.W. 1986. "Experimental Determination of Crack Softening Characteristics of Normal Weight and Lightweight Concrete", *Heron*, 31(2), 45-56.
- Cusatis, G., Bazant, Z.P. ve Cedolin, L. 2003. "Confinement-Shear Lattice Model for Concrete Damage in Tension and Compression: I. Theory", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 129, 1439-1448.
- DeJong, M.J., Hendriks, M.A.N. ve Rots, J.G. 2008. "Sequentially Linear Analysis of Fracture under Non-Proportional Loading", *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 5042-5056.
- Fernandez, G. 1994. "Behavior of Pressure Tunnels and Guidelines for Liner Design", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120, 1768-1791.



- Foster, S. J., ve Gilbert, R. I., 1998, "Experimental Studies on High-Strength Concrete Deep Beams", *ACI Structural Journal*, 95, 382-390.
- Gajewski, T., & Garbowski, T. 2014. "Calibration of Concrete Parameters Based on Digital Image Correlation and Inverse Analysis", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 170-180.
- Gijsbers, F.B.J. ve Hehemann, A.A. 1977. "Some Tensile Tests on Reinforced Concrete", Report BI-77-61, TNO Inst. For Building Mat. and Structures, Delft.
- Gopalaratnam, V.S. ve Shah, S.P. 1985. "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension", *ACI Journal*, 3, 310-323.
- Guerrero, N., Martinez, M., Picon, R., Marante, M. E., Hild, F., Roux, S., & Florez-Lopez, J. 2014. "Experimental Analysis of Masonry Infilled Frames Using Digital Image Correlation", *Materials and Structures*, 873-884.
- Gurtin, M. E. 1994. "Generalized Ginzburg-Landau and Cahn-Hilliard equations based on a microforce balance", Research Report No. 94-NA-020, Carnegie Mellon University.
- Hillerborg, A., Modéer, M. ve Petersson, P. E. 1976. "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements", *Cement and Concrete Research*, 6, 773-782.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. "Empirical Strength Criterion for Rock Masses", *J. Geotechnical Engineering*, 106,1013-1035.
- Hrennikoff, A. 1941. "Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method", *Journal of Applied Mechanics*, 8, 169–175.
- Ingraffea, A.R. ve Saouma, V. 1985. "Numerical Modelling of Discrete Crack Propagation in Reinforced and Plain Concrete", *Fracture Mechanics of Concrete*, 4, 171-225.
- Kim, J, Lee, S., Choi, Y., Lee, S. M., Jeong, D. 2016. "Basic Principles and Practical Applications of the Cahn–Hilliard Equation", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 9532608, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9532608>.
- Koutromanos, I. ve Shing, P.B. 2012. "A Cohesive Crack Model to Simulate Cyclic Response of Concrete and Masonry Structures", *ACI Structural Journal*, 109, 349-358.
- Lee, D., Huh, J.Y., Jeong, D., Shin, J. Yun, A., and Kim, J. 2014. "Physical, mathematical, and numerical derivations of the Cahn–Hilliard equation", 81, 216-225.
- Lennard, F., & Delieu-Barton, J. M. 2014. "Quantifying and Visualizing Change: Strain Monitoring of Tapestries with Digital Image Correlation", *The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works*, 241-255.
- Li, L.-G., Liang, J., Guo, X., Guo, C., Hu, H., & Tang, Z.-Z. 2014. "Full-field Wing Deformation Measurement Scheme for In-Flight Cantilever Monoplane Based on 3D Digital Image Correlation", *Measurement Science and Technology*, 10.



- Mitchell, D. ve Collins, M.P. 1974. "Diagonal Compression Field Theory-a Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion", *ACI Structural Journal*, 71, 396-408.
- Mitchell, J.A. 2011. "A Nonlocal, Ordinary, State-Based Plasticity Model for Peridynamics", SAND2011-3166. Sandia National Laboratories, Albuquerque.
- Mörsch, E. 1909. "Concrete-Steel Construction", McGraw-Hill, New York. (English translation by E. P. Goodrich).
- Ngo, D. ve Scordelis, A.C. 1967. "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, 64, 152-163.
- Olumide, B. F. 2013. "Numerical coupling of stress and seepage in the design of pressure tunnels under high internal water pressure", *International Journal of Engineering and Technology*, 3, 235-244.
- Palermo, D. ve Vecchio, F.J. 2003. "Compression Field Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Reversed Loading: Formulation", *ACI Structural Journal*, 100(5), 616–625.
- Pan, R, Xie, H., Wang, Z., Qian, K., & Wang, Z. 2008. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics Express*, 16, 7037-7048.
- Petersson, P.E. 1981. "II Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials", 1I Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Pitti, R. M., Badulescu, C., & Grediac, M. 2014. "Characterization of a Cracked Specimen with Full-Field Measurements: Direct Determination of the Crack Tip and Energy Release Rate Calculation", *International Journal of Fracture*, 109-121.
- Rashid, Y.R. 1968. "Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels", *Nuclear Engng. and Design*, 7, 334-344.
- Romeo, E. 2013. "Two-Dimensional Digital Image Correlation for Asphalt Mixture Characterisation: Interest and Limitations", *Road Materials and Pavement Design*, 747-763.
- Rots, J.G. 1988. "Computational Modelling of Concrete Fracture", Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft.
- Rots, J.G. 2001. "Sequentially Linear Continuum Model for Concrete Fracture", In: de Borst R, Mazars J, Pijaudier-Cabot G, van Mier JGM, Balkema AA, editors, *Fracture mechanics of concrete structures*, The Netherlands: Lisse, 2, 831–839.
- Schlaich, J., Schäfer, K. ve Jennewein, M. 1987. "Toward a Consistent Design of Structural Concrete", *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, 32(3), 74-150.
- Schlangen, E. ve Van Mier, J.G.M. 1992. "Experimental and Numerical Analysis of the Micro-Mechanisms of Fracture of Cement- Based Composites", *Cement and Concrete Composites*, 14, 105-118.



- Schleiss, A. J. 1986. "Design of pervious pressure tunnels", *Water Power & Dam Construction*, 38, 21-26.
- Schleiss, A. J. 1997. "Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts", *International Journal on Hydropower and Dams*, 4, 88-94.
- Sengun, E., Alam, B. Yaman, I. O. 2016. "Effect of synthetic fibers on flexural performance of nominal and high performance concrete", 9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 925-934.
- Silling, S.A. 2000. "Reformulation of Elasticity Theory for Discontinuities and Long- Range Forces", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(1), 175-209
- Silling, S.A., Zimmermann, M. ve Abeyaratne, R. 2003. "Deformation of a Peridynamic Bar", *Journal of Elasticity*, 73, 173-190..
- Silling, S.A. ve Bobaru, F. 2005. "Peridynamic Modeling of Membranes and Fibers", *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 40, 395-409.
- Silling, S.A., Epton, M., Weckner, O., Xu, J. ve Askari, A. 2007. "Peridynamics states and constitutive modeling", *Journal of Elasticity*, 88, 151-184.
- Sinha, R. 1989. "Underground Structures: Design and Instrumentation", Elsevier.
- Sun, C., Standish, B., Vuong, B., Wen, X.-Y., & Yang, V. 2013. "Digital Image Correlation Based Optical Coherence Elastography", *Journal of Biomedical Optics*, 12.
- Sutton, M. A., Orteu, J.-J., & Schreier, H. W. 2009. "Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements", Columbia: Springer.
- Thomsen, J.H. and Wallace, J.W., 1995. "Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls: An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross-Sections", Report No. CU/CEE-95/06, Department of Civil Engineering, Clarkson University, Postdam, New York.
- TNO Diana, 2008. Diana User's Manual.
- Tung, S.-H., Shih, M.-H., & Sung, W.-P. 2014. "Applying the Digital Image Correlation Technique to Measure the Deformation of an Old Building's Column Retrofitted with Steel Plate in an In Situ Pushover Test", *Sadhana*, 699-711.
- Van Mier, J.G.M. 2013. "Concrete Fracture a Multiscale Approach", CRC, Boca Raton.
- Vecchio, F.J. ve Collins, M.P. 1986. "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Structural Journal*, 83(2), 219-231.
- Wagner, H. 1929. "Ebene blechwandträger mit sehr dünnem stegblech (Metal Beams with Very Thin Webs)", *Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt*, 20, 8-12.
- Walraven, J.C. 1978. "The Influence of Depth on The Shear Strength of Lightweight Concrete Beams without Shear Reinforcement", Report 5-78-4, Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Delft.



- Weckner O., ve Abeyaratne R. 2005. "The effect of long-range forces on the dynamic bar", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 53, 705–728.
- Westergaard, H. M. 1938. "A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics; soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets", *Contributions to Mechanics of Solids, Stephen Timoshenko Sixtieth Anniversary Volume*, MacMillan Co., New York, 268-277.
- Willam, K., Pramono, E. ve Sture, S. 1987. "Fundamental Issues of Smeared Crack Models", *Proceedings of SEM-RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock*, S.P. Shah and S.E. Swartz (Eds.), 192-207, SEM, Bethel.
- Zhou, Y., Su, K., ve Wu H. 2015. "Hydro-mechanical interaction analysis of high pressure hydraulic tunnel", *Tunneling and Underground Space Technology*, 47, 28-34.
- Zhou, S., ve Wang, M. Y. 2007 "Multimaterial structural topology optimization with a generalized Cahn–Hilliard model of multiphase transition", *Structural Multidisciplinary Optimization*, 33, 89-111.
- Ziegler, J.G & Nichols, N. B. 1942. "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of the ASME*, 64, 759–768.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. KAĞAN TUNCAY
Proje No:	215M870
Proje Başlığı:	İç Basıncılı Beton Tünellerde Betonarme Kaplama Davranışının Yenilikçi Deneysel Ve Sayısal Yaklaşımlar İle İrdelenerek Tasarım Aracı Oluşturulması
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	YALIN ARICI, İSMAIL ÖZGÜR YAMAN, BARIŞ BİNİCİ, ERDEM CANBAY
Danışmanlar:	HAKAN BAŞARIR (Yurt Dışı)
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/04/2016 - 15/04/2019
Onaylanan Bütçe:	625050.0
Harcanan Bütçe:	377502.33

TÜBİTAK

<p>Öz:</p>	<p>Proje kapsamında, iç basınçlı betonarme tünellerin davranışının incelenmesi çok yönlü bir araştırma programı ile incelenmiştir. İç basınçlı tünel analiz ve tasarımına yönelik literatürde bulduğumuz tüm çalışmalar sayısal veya teoriktir. Projenin ilk ayağında iç basınçlı tünel davranışının laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenmesine olanak veren yenilikçi bir deneysel kurulumu geliştirilmiştir. Bu kurulum saha gerilimlerinin gerçekçi bir şekilde laboratuvar ortamında oluşturulmasına imkan vermektedir. Bu tür bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Geliştirilen deneysel ortamda 8 deney başarıyla tamamlanmıştır. Yapılan deneyler saha gerilimleri, kaya elastisite modülü, lifli beton, tünel ve kaya arasındaki etkileşim parametrelerinin tünel davranışına etkisinin incelenmesine olanak vermiştir. Deneysel çalışmalar en önemli parametrelerin tünel ve kaya arasında oluşabilecek boşluklar ve saha gerilimleri olduğunu göstermiştir. Deneysel program içinde lifli dokuma ile tamir edilmiş tünel performansının ölçülmesi dahil edilmiş ve tamiratın başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Lifli beton kullanımının da çatlak genişliklerini kontrol altında tutmakta oldukça faydalı olduğu yine deneysel çalışmaların önemli sonuçları arasındadır.</p> <p>Projenin ikinci ayağında çatlaklı betonarme elemanların davranışının incelenmesi için örtüşen kafes modeli geliştirilmiştir. Örtüşen kafes modeli bağ temelli peridinamik yöntem ile bir çok benzerlikler taşımaktadır. Bünye denklemlerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem önerilmiş ve geliştirilen analiz platformu çok sayıda beton/betonarme deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Platform çatlaklı beton/betonarme elemanların hem belirtik entegrasyon ile dinamik, hem de sıralı doğrusal analiz yöntemi ile statik davranışının incelenmesinde kullanılabilir. Statik problemlerin belirtik entegrasyon ile dinamik olarak çözülebilmesi için PID kontrol algoritması geliştirilmiş ve kullanımı bir çok deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Geliştirilen yöntem proje kapsamında yapılan deneylerin modellenmesinde kullanılmış ve hem deneylerde gözlemlenen çatlak dağılımlarını, hem de basınç/şekil değişimlerini oldukça başarılı bir şekilde tahminde bulunduğu belirlenmiştir.</p> <p>Projenin üçüncü ayağında betonarme kaplama tünellerin ani iç basınç altında davranışı deneysel çalışmalar ile kalibre edilmiş sayısal yöntem kullanılarak dinamik olarak incelenmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi mümkün olmayan ani iç basınç yükünden dolayı, sayısal simülasyonlar dinamik tünel davranışının incelenmesinde tek seçenek olarak gözükmektedir. Dinamik simülasyonlar saha gerilimlerinin ve tünel geometrisinin etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır.</p> <p>Projenin son ayağında ise basitleştirilmiş iki tasarım yöntemi sunulmuştur. Birinci yöntem tünelin elastik davranış göstereceği varsayımına dayanmaktadır. İkinci yöntem ise çatlak genişliklerini yaklaşık olarak tahmin etmek için kullanılabilir. Elde edilen deneysel verilerin, geliştirilen analiz platformunun ve önerilen basit tasarım yaklaşımlarının hem bu alanda yapılacak deneysel ve teorik çalışmalara yol göstermesini, hem de ülkemizde oldukça sık kullanılan iç basınçlı betonarme tünel tasarımında kolaylık ve güvenlik sağlamasını ümit etmekteyiz.</p>
<p>Anahtar Kelimeler:</p>	<p>tünel, betonarme, peridinamik, çatlak, lifli beton</p>
<p>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:</p>	<p>Hayır</p>
<p>Projeden Yapılan Yayınlar:</p>	<p>1- Overlapping Lattice Modeling for concrete fracture simulations using sequentially linear analysis (Makale - İndeksli Makale),</p>