

ÖNGERİLMELİ İNŞAAT ELEMANLARINDA GERİLME ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Abdullah DÖNMEZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EKİM 2015

ÖNGERİLMELİ İNŞAAT ELEMANLARINDA GERİLME ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Abdullah DÖNMEZ
(501092008)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV
Eş Danışman: Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU

EKİM 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501092008 numaralı Doktora Öğrencisi Abdullah DÖNMEZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÖNGERİLMELİ İNŞAAT ELEMANLARINDA GERİLME ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Semih KÜÇÜKARSLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI
Haliç Üniversitesi

Doç. Dr. Mesut ŞİMŞEK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Deniz GÜNEY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Lütfi ARDA
Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : **18 Eylül 2015**
Savunma Tarihi : **22 Ekim 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Öngerilmeli inşaat elemanların geliştirilerek inşaat endüstrisinde kullanılmaya başlanması inşaat sektörü açısından büyük bir gelişme olarak kabul edilmektedir. İnşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan öngerilmeli beton elemanların üretimi prefabrik olarak yapılmaktadır. Öngerilmeli beton elemanların üretim aşamasında oluşan gerilme durumlarının araştırılması yapının güvenliği ve tasarım açısından oldukça önemlidir. Gerilmelerin doğrudan olarak ölçülebilmesine olanak sağlayan fotoelastik yöntemin bu amaç için kullanılması ise kesin sonuçlara ulaşılabilmesi açısından oldukça faydalıdır. Öngerilmeli beton elemanlarla ilgili teknik literatürde yeteri kadar bulunmayan araştırma konularının bu çalışma ile tamamlanması esas amaç olmaktadır. Çalışmalarım sırasında beni yönlendirerek yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü olanağı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV'e, Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU'na, çalışmalarım sırasında tavsiyeleri ile çalışmalarına önemli katkıları bulunan jüri üyelerim Prof. Dr. Eyüp Sabri Kayalı'ya, Doç. Dr. Mesut Şimşek'e, Doç. Dr. Deniz Güney'e, Deneysel Mekanik Laboratuvarı teknisyeni Can Kurtulan'a ve maddi, manevi her zaman yanımda olan değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 2015

Abdullah DÖNMEZ
İnşaat Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Öngerilmeli Elemanların Analizi	2
1.3 Uygulamalı Deneysel Yöntem.....	7
1.3.1 Işık hareketi	9
1.3.2 Polariskoplar	11
1.4 Literatür Araştırması	15
2. DENEYSEL PROSEDÜR.....	21
2.1 2-B Model.....	28
2.1.1 2-B Model'in gerilme analizi	32
2.2 3-B Model-1	43
2.2.1 3-B Model-1'in gerilme analizi	46
2.3 3-B Model-2	57
2.3.1 3-B Model-2'nin gerilme analizi	62
3. SAYISAL YÖNTEMLER	69
3.1 2-B Model'in Nümerik Analizi	70
3.2 3-B Model-1'in Nümerik Analizi	75
3.3 3-B Model-2'nin Nümerik Analizi	78
4. GERİLME ANALİZİ	83
4.1 Fotoelastik Analizler ile Yapılan Dönüşümler	83
4.2 Nümerik Analiz Değerlendirmeleri	90
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR.....	97
EKLER	101
EK A	103
ÖZGEÇMİŞ	112

KISALTMALAR

DMA	: Dynamical Mechanical Analysis (Dinamik Mekanik Analiz)
SEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Elyaf takviyeli polimerler)

SEMBOLLER

ε	: Birim şekil değiştirme
ε_0	: Ön birim şekil değiştirme
ε_t	: Sıcaklık birim şekil değiştirmesi
σ	: Gerilme
σ_t	: Üst lifte oluşan gerilme
σ_b	: Alt lifte oluşan gerilme
σ_0	: İlk öngerilme değeri
P	: Kuvvet
E	: Elastisite modülü
A	: En kesit alanı
A_c	: Beton kesit alanı
α	: Termal genleşme katsayısı
T	: Sıcaklık
ΔT	: Sıcaklık farkı
e	: Eksantriklik mesafesi
s	: Geometrik eksene olan mesafesi
s_t	: Üst lifin geometrik eksene olan mesafesi
s_b	: Alt lifin geometrik eksene olan mesafesi
M	: Moment
I	: Atalet momenti
P_i	: Verilen ilk öngerilme kuvveti
P_e	: Etkili öngerilme kuvveti
γ	: Artık öngerilme faktörü
r	: Atalet yarıçapı
S	: Mukavemet momenti
M_d	: Tasarım momenti
M_T	: Toplam moment
M_{SD}	: Ölü yüklerden gelen moment
M_L	: Hareketli yüklerden gelen moment
v_1, v_2, v_3	: Asal eksenlerdeki dalga hızı
v_0	: Gerilmesiz ortamdaki dalga hızı
n_1, n_2, n_3	: Asal eksenlerdeki kırılma indisi
n_0	: Işığın boşluktaki kırılma indisi
A	: Dalganın genliği
t	: Zaman
c	: Dalganın ilerleme hızı
λ	: Dalga boyu
T	: Peryot
f	: Frekans
ω	: Açısal frekans

Δ	:	Faz farkı
h	:	Plak kalınlığı
$\sigma_0^{1.0}$	:	Optik hassasiyet katsayısı
L_t	:	Transfer boyu
R	:	Yarıçap
η	:	Şerit sayısı
f_t	:	Çekme mukavemeti
ϕ	:	Donatı çapı
ν	:	Poisson oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Kullanılan fotoelastik malzemelerin kalibrasyon ölçümleri, $\bar{O}$ =ölçüm, h =kalınlık, R =yarıçap, P =kuvvet, $\sigma_0^{1.0}$ =optik hassasiyet katsayısı.....	25
Çizelge 2.2 : Kama yüzeyindeki normal gerilme bileşenlerinin değişimi.	39
Çizelge 2.3 : Kare enkesitli 3-B Model-1 numunesinin yükleme durumu ile oluşan şekil değiştirmeler, (A ve B kare numunede 2 farklı kenarı, 0 ve 1 alt indisleri ise sırası ile yüklemeden önceki ve sonraki durumları, w ise kalınlığı belirtmektedir)	44
Çizelge 2.4 : Araldit2 malzemesinden yapılan silindirik numunenin yüklemeden önceki ve sonraki boyutları, (0 ve 1 indisleri sırası ile yüklemeden önceki ve sonraki durumları, A ve B indisleri ise çap ölçümleri noktalarını temsil etmektedir).....	60
Çizelge 2.5 : Hazırlanan 3-B Model-2'nin mekanik ve fiziksel özellikleri	62
Çizelge 3.1 : 2-B Model için elde edilen parametreler (E_s/E_c = donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, σ_0 = verilen öngerilme [MPa])......	73
Çizelge 3.2 : 3-B Model-1 için elde edilen parametreler (E_s/E_c = donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, σ_0 = verilen öngerilme [MPa])......	78
Çizelge 3.3 : 3-B Model-2 için elde edilen parametreler (E_s/E_c = donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, σ_0 = verilen ilk öngerilme [MPa])......	81
Çizelge 4.1 : Prototip-model dönüşümü parametreleri (MPa).	84
Çizelge A.1: 2-B Model için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K =kırmızı yöndeki okumalar, S =siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h =kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)103	
Çizelge A.2: 2-B Model'de yatay oyuk için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K =kırmızı yöndeki okumalar, S =siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h =kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)	105
Çizelge A.3: 2-B Model'de eğik oyuk için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K =kırmızı yöndeki okumalar, S =siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h =kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)	106
Çizelge A.4: 2-B Model'de dikey oyuk için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K =kırmızı yöndeki okumalar, S =siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h =kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)	107

Çizelge A.5: 3-B Model-1'in 1 no'lu numunesi için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)	108
Çizelge A.6: 3-B Model-1'in 2 no'lu numunesi için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)	109
Çizelge A.7: 3-B Model-2'nin 1 no'lu numunesi için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı).....	110

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Öngerilmeli kiriş elemanda oluşan gerilmeler, a) eksenel öngerilme, b) eksenel öngerilme ve ölü yük, c) eksantrik öngerilme, d) eksantrik öngerilme ve ölü yük (GE= geometrik eksen, EE= eksantrik eksen, c= geometrik eksenenden olan maksimum uzaklık, dikdörtgen kesit için $s = \frac{1}{2}h$).....	5
Şekil 1.2	: Brewster'in 1818 yılında fotoelastik yöntem ile ilgili makalesinden bir fotoğraf [27]......	8
Şekil 1.3	: Işık vektörünün genliğinin ilerleme doğrultusuna göre fonksiyonu..	9
Şekil 1.4	: a) Işık vektörünün ilerleme ve salınım doğrultuları, b) düzlem polarizasyon, c) polarizör.....	10
Şekil 1.5	: Düzlem polariskop.....	11
Şekil 1.6	: Polarizörden geçen ışığın fotoelastik plakta çift-kırılması, P, polarizasyon eksen, 1 ve 2, asal doğrultular.	12
Şekil 2.1	: Araldit malzemenin elastisite modülünün sıcaklık ile değişimi, $T_g = 120^\circ C$, cam geçiş sıcaklığı, $T_c = 140^\circ C$, kritik sıcaklık, $T_f = 145^\circ C$, dondurulma sıcaklığı.	22
Şekil 2.2	: Fotoelastik modellerde kullanılan a) araldit1, b) araldit2 malzemelerinin sıcaklık-elastisite modülü değişimleri, $T_f =$ dondurulma sıcaklığı.....	23
Şekil 2.3	: a) Disk kalibrasyon deneyi için gerilme dondurulması işlemi (yüklemeye düzeneği), b) beyaz, c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.	24
Şekil 2.4	: Farklı plastik malzemeler için yapılan sıcaklık-elastisite modülü grafikleri.....	26
Şekil 2.5	: a) Araldit2 ve b) Nylon6 için DMA'da $145^\circ C$ 'de yapılan çekme deneyleri, elastisite modülleri ve standart sapmaları.	27
Şekil 2.6	: a) Araldit2 ve b) nylon6'nın DMA'da $145^\circ C$ 'de yapılan çekme deneyleri sonucu elde edilen ortalama değerler.	28
Şekil 2.7	: Dijital kontrollü fırında uygulanan gerilmelerin dondurulması işleminin sıcaklık-zaman (T-t) grafiği ve aralditten yapılan numunenin yüklemeye önce ve sonra polariskopta çekilen fotoğrafları.....	29
Şekil 2.8	: Modelin yükleme, kesilme ve yapıştırılma safhaları.....	30
Şekil 2.9	: Modelin nihai şeması; 1 ve 2 no'lu parçalar 2 donatı arasında kalan beton kısımları temsil etmekte olup 3, 4 ve 5 no'lu parçalar beton içerisindeki kusurları modellemektedir.....	31
Şekil 2.10	: Modelin a) monokromatik ve b) beyaz ışık altında polariskopta çekilen fotoğrafları.	32
Şekil 2.11	: 2-B Model üzerinde belirlenen ölçüm noktaları.....	33

Şekil 2.12	: Modelin a) kenarlarında; b) birleşim arayüzü ve orta ekseninde; ve c) basamaklı bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı. ...	34
Şekil 2.13	: Modelin birleşim arayüzeylerinde oluşan gerilmeler.	35
Şekil 2.14	: Modelin basamaklı bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmeler, a) basamaklı bölgenin birleşim arayüzündeki aderans gerilmeleri, b) süreksizlik noktasındaki gerilme yığılmaları.	36
Şekil 2.15	: Modelin orta noktalarında oluşan boyutsuz gerilmelerin analitik sonuçları.	37
Şekil 2.16	: a) Çeyrek düzlem, b) çeyrek düzlem üzerindeki boyutsuz gerilmeler.	38
Şekil 2.17	: Modellenen kusurlarda belirlenen ölçüm noktaları.	39
Şekil 2.18	: Modelde yatay kusur civarında oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.	40
Şekil 2.19	: Modelde eğik kusur civarında oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.	40
Şekil 2.20	: Modelde dikey kusur civarında oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.	41
Şekil 2.21	: 3-B Model-1 için a) kullanılan numunenin geometrisi, b) yükleme düzeneği (ölçüler mm'dir).	43
Şekil 2.22	: Araldit1 malzemesi için yapılan 95°C'deki çekme testi, f_t = çekme mukavemeti.	43
Şekil 2.23	: a) Yapıştırma işlemi için kurulan düzenek, b) yüklenmiş kare kesitli üç boyutlu modelin beyaz, c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.	45
Şekil 2.24	: 3-B Model-1'de öngerilmelerin dağılmasını karakterize eden interferens şeritleri; a) beyaz b) monokromatik ışıktaki fotoğrafları. ..	46
Şekil 2.25	: a) Numunenin dilimlenme şeklini gösteren kesim yerleri, b) dilimlenmiş numuneler, c) numune boyutları (ölçüler mm'dir.).	47
Şekil 2.26	: Dilimlenmiş 1 no'lu numunenin a) beyaz, b) monokromatik (yeşil), c) monokromatik (gri) ışıktaki fotoğrafları.	48
Şekil 2.27	: 3-B Model-1'den kesilerek çıkartılan 1 no'lu numunede belirlenen ölçüm noktaları.	48
Şekil 2.28	: 3-B Model-1, 1 no'lu numunenin kenar ve orta hattında oluşan gerilmelerin boyutsuz dağılımı.	49
Şekil 2.29	: 3-B Model-1, 1 no'lu numunenin ankraj bölgesinde oluşan gerilme yığılmaları, (L_t = transfer boyu).	50
Şekil 2.30	: 3-B Model-1'de donatı boyunca oluşan kayma gerilmeleri yüzey gösterimi.	51
Şekil 2.31	: 3-B Model-1'den kesilerek çıkartılan 2 no'lu numunenin a) beyaz, b) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.	52
Şekil 2.32	: Bileşik silindir çubuklar.	52
Şekil 2.33	: 3-B Model-1'den çıkartılan 2 no'lu numunede oluşan ve hesaplanan gerilmelerin karşılaştırmalı grafikleri.	54
Şekil 2.34	: 3-B Model-1 için bileşik çubuklarda gerilme analojisi.	55
Şekil 2.35	: 3-B Model-1'in orta bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.	56
Şekil 2.36	: Silindirik numunenin polariskopta a) beyaz, b) ve c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.	57

Şekil 2.37	: 3-B Model-2'nin hazırlanması sırasında numunenin eksenel simetri merkezinden açılan 6 mm'lik delik.....	58
Şekil 2.38	: Araldit2 malzemesi için yapılan 145°C'deki çekme testi, f_t = çekme mukavemeti.	59
Şekil 2.39	: Silindirik numunenin a) geometrisi (ölçüler mm'dir.), b) yükleme düzeneği.	59
Şekil 2.40	: a) Numunenin dijital kontrollü fırın içerisinde yüklenmesi ve oluşan interferens şeritlerinin polariskopta b) beyaz, c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.	60
Şekil 2.41	: a) Epoksi yapıştırıcı için 32.5 gr reçine ile b) 6.5 gr sertleştirici katılması, c) karışımın ısıtıldığı ocak (55°C'ye kadar çıkılır), d) donatı çubuğunun modele yerleştirilmesi işlemi ve hazırlanan düzeneç	61
Şekil 2.42	: 3-B Model-2'nin tamamlanmış durumunu gösteren polariskop fotoğrafları, a) beyaz, b) monokromatik ışık.	62
Şekil 2.43	: 3-B Model-2'de öngerilmelerin dağılmasını karakterize eden interferens şeritlerinin, a) beyaz, b) monokromatik ışık altındaki, c) ankraj kısmı büyütülmüş fotoğrafları.....	63
Şekil 2.44	: 3-B Model-2'nin dilimlenmesi ile elde edilen 1 no'lu numune.	64
Şekil 2.45	: 3-B Model-2'den kesilerek çıkartılan numunenin a) beyaz, b) monokromatik ışık altındaki fotoğrafları.	65
Şekil 2.46	: 1 no'lu numunede a) ankraj bölgesi izokromları, b) ölçüm noktaları.	65
Şekil 2.47	: Birleşik çubukların geometrisi.....	66
Şekil 2.48	: 3-B Model-2'nin kenarlarındaki boyutsuz gerilme dağılımı.	66
Şekil 2.49	: 3-B Model-2'nin birleşim arayüzündeki aderanstan kaynaklanan gerilmeler.	67
Şekil 3.1	: 2-B numunenin ABAQUS modeli.	71
Şekil 3.2	: a) Modelde sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan Tresca gerilmeleri skalası, b) aynı bölgede fotoelastik yöntem ile bulunan şeritler (monokromatik ışık).	71
Şekil 3.3	: Modelin kenarlarında oluşan gerilmelerin analitik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.	72
Şekil 3.4	: Modelin kenarlarında oluşan gerilmelerin analitik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.	72
Şekil 3.5	: Modelin basamaklı bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafikleri.	73
Şekil 3.6	: Modellenen kusurların SEM modeli ile elemanlarda oluşan gerilme skalası, a) yatay kusur, b) 45° eğik kusur, c) dikey kusur.....	74
Şekil 3.7	: Modellenen merkezi dairesel olan dikey şeklindeki kusur civarındaki boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.	74
Şekil 3.8	: 3-B Model-1 için kullanılan simetri eksenleri.....	75
Şekil 3.9	: 3-B Model-1 SEM Modeli.....	76
Şekil 3.10	: Üç-boyutlu modelde oluşan gerilmelerin skalası.	77
Şekil 3.11	: 3-B Model-1'in ankraj bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.	77
Şekil 3.12	: Üç-boyutlu ikinci modelin a) eksenel simetri hali, b) modelin oluşturulması, c) öngerilmelerin betona aktarılması.....	79

Şekil 3.13	: Üç boyutlu ikinci modelin a) Tresca gerilmeleri skalası, b) beyaz ışıktaki polariskop fotoğrafı.	80
Şekil 3.14	: 3-B Model-2'nin arayüzünde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.	80
Şekil 4.1	: 2-B Model'in prototipi için a) kenarlarda, b) arayüzde, c) basamaklı bölgede oluşan gerilmeler.	84
Şekil 4.2	: 2-B Model'in yatay kusurunda oluşan gerilmeler.	85
Şekil 4.3	: 2-B Model'in eğik kusurunda oluşan gerilmeler.	86
Şekil 4.4	: 2-B Model'in dikey kusurunda oluşan gerilmeler.	86
Şekil 4.5	: 3-B Model-1'in prototipinde oluşan gerilmeler.	87
Şekil 4.6	: 3-B Model-1'in arayüzünde oluşan gerilmeler.	88
Şekil 4.7	: 3-B Model-1'in yatay doğrultudaki gerilme değerleri.	88
Şekil 4.8	: 3-B Model-2'nin kenarlarında oluşan gerilmeler.	89
Şekil 4.9	: 3-B Model-2'nin prototipi için birleşim arayüzünde oluşan gerilmeler.	90
Şekil 4.10	: a) 2 no'lu malzemeye b) 1 no'lu malzemeye applike edilen birim öngerilme kuvveti ile farklı modüler orana sahip elemanların nümerik analiz sonuçları.	91

ÖNGERİLMELİ İNŞAAT ELEMANLARINDA GERİLME ANALİZİ

ÖZET

İnşaat sanayinde yaygın olarak kullanılan öngerilmeli beton elemanlarda üretim aşamasında oluşturulan öngerilmelerin değerleri, onun bazı bölgelerinde ilgili betonun mukavemet karakteristiklerinin sınırları ile karşılaştırılabilecek seviyeye ulaşabilirler. Bu bakımdan söz konusu elemanların tasarımının başarılı olarak yapılabilmesi için oluşturulması öngörülen gerilmelerin yapıda dağılması ile ilgili detaylı bilgi gerekmektedir. Fotoelastik yöntem ile incelenen elemanın her noktasında gerilme durumunun kesin değerleri ölçülebilir. Bu bakımdan öngerilmeli beton elemanlarda üretim aşamasında oluşan gerilmelerin incelenmesi için ilgili öngerilmelerle ısı gerilmeler arasındaki benzeşime dayanarak fotoelastik modelleme yönteminin uygulanması amaca uygundur.

Bu çalışmada, inşaat elemanlarında öngerilmeler fototermoelastisitenin “gerilmelerin dondurulması” metodu kullanılarak incelenmiştir. Gerilmelerin incelenmesi 2-B veya 3-B fotoelastik modeller ve sayısal analizler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öngerilmeli beton elemanların fotoelastisite ile modellenmesinde kullanılabilecek malzemeler mekanik parametrelerin deneysel çalışmalar ile elde edilmesi sonucunda belirlenmiştir. Fotoelastik modellerin deneysel analizi sonucunda farklı malzemelerin birleşim bölgeleri olan aderans ve birleşim yüzeyinin serbest kenarı olan ankraj bölgeleri ile ilgili gerilme dağılımları bakımından önemli sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bazı bölgelerde analitik ve sayısal yöntemlerle bulunan verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların incelenmesi ile öngerilme uygulanan bir yapının ankraj bölgelerinde oluşan gerilme yığılmalarının ekstremum değerlerinin kullanılan malzemelerin elastik sabitlerine ve verilen ilk öngerilme değerine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca transfer boyu olarak adlandırılan öngerilme değerinin etkili öngerilme değerine ulaşması için aderans üzerinde gerekli olan mesafe, verilen öngerilme değerine ve bahsedilen elastik sabitlerin oranına bağlı olarak değişmektedir. Öngerilmeli beton elemanların beton kısmında oluşan herhangi bir çatlak, boşluk veya kusurun modellenmesi ile elde edilen sonuçlar geometrik süreksizliğin, gerilme yığılmalarının değerleri bakımından, yapının güvenliğini tehdit edecek seviyelerde çıkabileceği sonucuna varılabilir. Termal gerilmelerle beton elemanlarda oluşturulan öngerilmeler arasındaki analojiye dayanarak bazı bölgeler için gerilme durumu hesap edilebilir. Analitik olarak hesaplanan gerilme değerleri deneysel verileri desteklemektedir. Bulgular dahilinde varılan sonuçlar öngerilmeli tabliye ve kiriş elemanların servis yükleri altında mukavemet sınırlarına ulaşabileceğini göstermektedir. Elde edilen bilgiler öngerilmeli beton elemanların tasarımının optimizasyonu için kullanılabilir.

STRESS ANALYSIS IN PRESTRESSED STRUCTURAL ELEMENTS

SUMMARY

Prestressed concrete is a reinforced concrete type in which the steel rebars have been tensioned against concrete member. This tensioning performance results in a self-equilibrating system of internal stresses which improves the response of the concrete member to external loads. Whilst concrete has a high strength in compression it is brittle and weak in tension, and thus it gains improvement against service loads. Pre-stressed elements are commonly being used in constructions due to the engineering and architectural needs.

The use of high strength steel wires in practice leads to production of pre-stressed concrete members. In practice, it is possible to create more uniform stress distributions in the structural members taking into account the generated elastic strains via pre-stressing during the fabrication process of the structural member. In this context, the stress values at the fabrication process should be taken into account at the design stage.

As it is known, pre-stressed members can be fabricated in different ways, bonded and unbonded tendons, which are pre-tensioned and post-tensioned concrete members. A pre-tensioned concrete is a prestressed concrete in which the prestressing tendon is tensioned prior to casting the section, while a post-tensioned concrete member is one in which the prestressing tendon is tensioned in a longitudinal duct after the concrete has been cast and achieved a major portion of its strength. Therefore, pre-stressing was divided into two main categories, which are pre-tensioned and post-tensioned concrete members, in other words, pre-stressing with bonded and unbonded tendons with the concrete material.

This study deals with the investigation of the prestress distribution after the fabrication process of the pre-tensioned concrete members. With considering the technical literature, it is needed to investigate the stress distribution at the vicinity of the free edges and bonding area of the reinforcing material of the pre-stressed structural members. The pre-tensioning tendons for prestress distributions are being uniaxially tensioned according to the design values just before the casting. So, the bonding stresses have significant importance for redistribution of the self-equilibrated internal stresses after the release. Similarly, the difference of the free thermal expansions causes the thermal stresses in the joint of mechanically dissimilar materials during the uniform heat distribution. Therefore, it is clear that there is an analogy between the generated stresses by the pre-stressing process of the structural members and thermal stresses via the temperature change in the dissimilar material joints. Hence, investigation of the stress distribution of the pre-tensioned concrete members can be conducted by the analytical and experimental methods used for the thermal stress analysis.

In modeling, materials should have similar ratio of elastic moduli in order to sustain the analogy between the stress distribution of prototype and model, made from dissimilar materials. In practice, ratio of the Young moduli of concrete and reinforcing steel varies between 5~10. This range must be taken into account when the prototypes are modeled. Stress “freezing” cycle, one of the most important stages of the used modeling technique, should be implemented at the freezing temperature. In order to fulfill the necessary similarity relationship between the model and prototype, the ratio of the Young moduli of the materials at the freezing temperature, which are representing the concrete and steel bars, should be inside the range mentioned above. At present, it is necessity to use an opaque material for modeling the tensioning bars because of the absent information about the optically sensitive materials satisfying the required ratio. To determine the proper material which contains the required conditions for the model, some tests are conducted using Dynamical Mechanical Analysis (DMA Q800) for different opaque plastic materials. Therefore, an optically sensitive material, araldite for concrete and an opaque plastic material, nylon6 (Quadrant Engineering Plastic Products ERTALON6SA) for steel bars are selected as the model materials.

Naturally, obtaining the stress-strain limits of the concrete part of reinforced concrete member has a major role for the safe design margins. In this context, modeling the concrete part of the reinforced concrete structure with optically sensitive material and steel part with selected opaque nylon 6, is determined for the photoelastic modeling. The models of investigated structures are prepared taking into account the geometrical similarity ratios of the prototype-model conversion.

Two and three-dimensional photoelastic models are prepared and analyzed for the regions of interest. Using the “freezing” method of photothermoelasticity leads to analyze the "frozen" stresses in 2-D and 3-D photoelastic models. Analytical and numerical analysis are made in order to satisfy the obtained results from experimental work and make the predictions for real members. 2-D model has three bars as prestressing tendons. It contains defects in different shapes and sizes. It also contains a staged section which models a geometrical discontinuity often being encountered in practice. 3-D models have square prism and cylindrical geometries with containing a single inclusion at their centers. Neither of them contains any type of defects. Hence the only stress concentration is formed at the anchorage zones. The conversion of the obtained results are made with using the prototype-model analogy formula. Strength limits of the materials are considered with checking the measured and converted stress values of the prototype.

Analytical analysis are made with using thermal analogy. Some basics of theory of elasticity are used depending on the nature of the problems. Numerical simulations are made using one of the most common commercial finite element software, ABAQUS. All the symmetry conditions considering the loading and geometrical structures of the models are used when necessary. 2-D model is implemented with using 2-D shell elements. Cylindrical specimen of the 3-D photoelastic model is simulated by axisymmetric elements. The obtained results from linear elastic implementation of the aforementioned models are sufficiently consistent with the experimental data.

As an initial inspection, all the geometrical discontinuities in a uniform stress field result in remarkable stress concentrations according to the geometry, level of the non-homogeneity and the loading conditions. All the voids and defects modeled in 2-D have stress concentrations in some extent. Geometrically and physically discontinuous

locations of the models produce the stress concentrations at the anchorage zones of the model. Pre-stressing of these members in the fabrication process can produce very high stress values in some particular regions of the concrete. In this context, it is very important to know the details of the designed stress distribution in the structural element in order to keep the safety design margins.

Results are compared with analytical solutions in some regions of the 2-D model. Maximum shear stresses appear where the interface intersects with the free edges, and reach the level which may be compared with the concrete strength. The existence of discontinuities on the interface region yields high values of shear stresses in which the Tresca stresses are multiple times of the initial prestress values. This is crucial for the unknown internal stress state in practice for prestressed members used in infrastructures. This phenomena may cause prestress loss with the prestressing tendon slips. Moreover, because of the complex micro structure of concrete material, hydration may yield in some voids and defects inside the bulk material. Generated stress concentration results in cracking inside the concrete. Thus propagation of the cracks caused by the stress concentrations cannot be avoided which leads to strength reduction of the structure. At the considered regions of the structural member, cracking might be occurred and growth of the cracks might cause destructive damage. The values of maximum shear stresses at the regions mentioned above should be taken into account at the design stage in order to keep the values inside the concrete strength limits. The strength of the interface between concrete and steel bars should be taken into account. The continuity of the material at the aforementioned regions should be checked with non-destructive testing.

The values of the ultimate shear stresses at the anchorage zone are dependent parameters of the used materials' elastic constants and design values of the prestressing. Variation of shear stresses along the transfer length is not linear but decreases with following a hyperbola equation. Results presented herein can be used in the design of prestressed concrete element.

1. GİRİŞ

Yüksek mukavemetli çeliklerin inşaat sanayinde kullanılmaya başlanması ön-gerilmeli beton elemanların üretilmesine olanak sağlamıştır [1, 2]. İnşaat elemanlarında üretim prosesinde oluşturulan ön gerilme durumunun etkisiyle, kullanıldıkları yapılarda maruz kaldıkları yüklerden, elastik sınırlar içerisinde oluşan gerilmelerin daha düzgün dağılması için uygun koşullar sağlanabilir. Bu bağlamda, ön gerilmeli inşaat elemanlarının tasarımı sırasında üretimleri prosesinde oluşturulması öngörülen gerilme durumları dikkate alınmalıdır. Bilindiği gibi, ön gerilmeli inşaat elemanları farklı yöntemlerle üretilir. Beton kütlesi ile donatı çubuğu arasındaki aderanstan kaynaklanan gerilme aktarımına ve beton ile donatı arasında aderans olmadan gerilmelerin elemanın uçlarından verilerek uygulanmasına (art-germeli beton) dayanan iki farklı üretim yöntemi oluşmuştur. İlgili teknik literatürde öngerilmeli beton elemanların üretimi aşamasında oluşan gerilmelerin farklı deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilmiş sonuçları yer almaktadır [3–7]. Bu çalışmalarda öngerilmeli ve art-gerilmeli beton elemanlarda gerilmelerin dağılımı, mutlak değerleri ile ilgili bilgiler açıklanmıştır. Poisson oranının gerilme dağılımına etkisini ihmal edilecek düzeyde kaldığı belirlenmiştir [8–11]. Aynı zamanda, özellikle, öngerilmeli beton elemanlar için gerilme dağılımı ile ilgili önemli sorular (gerilme alanının düzensiz bölgelerinin boyutları, arayüz bölgelerinde oluşan en büyük gerilmelerin değerleri ve konumları vs.), tasarımlarının optimize edilmesi için yeterli seviyede aydınlatılmamıştır. Bu çalışmada önceden eksenel çekme ile yüklenmiş donatılar kullanılarak üretilen elemanlarda oluşan öngerilmeler incelenmiştir. Yapılmış çalışmaların içeriğinden yukarıda gösterilmiş yöntemle üretilen ön gerilmeli inşaat elemanlarının serbest yüzeylerinde, özellikle donatı bölgelerinde, gerilmelerin detaylı incelenmesinin gerekli olduğu anlaşılmaktadır. Bu yöntemle üretilen elemanlarda öngerilmeler, beton kütlesinin katılaşmasından (sertleşmesinden) sonra donatılara etkiyen, P , çekme kuvvetlerinin kaldırılması ile onların eksenel şekil değiştirmelerinin,

donatı-beton birleşmesinde esnek dağılımına bağlı olarak ortaya çıkar (1.1).

$$\varepsilon_0 = \frac{P}{AE} \quad (1.1)$$

burada A donatıların dik kesitlerinin alanı ve E ise donatının elastisite modülüdür. Benzer olarak fizik-mekanik karakteristikleri farklı olan malzemelerden yapılmış birleşimlerde ısının uniform dağılması sırasında serbest termal genleşmeleri farkının dağılması termal gerilmeleri oluşturur [12–14]. Termal genleşme katsayısı α olan bir malzemenin sıcaklığını ΔT kadar arttırdığımızda meydana gelen sıcaklık birim şekil değiştirmesini 1.2 ifadesi ile gösterebiliriz.

$$\varepsilon_t = \alpha \Delta T \quad (1.2)$$

Dolayısıyla inşaat elemanlarında öngerilmelerin yukarıda bahsedilen yöntemle oluşturulması ve farklı malzemelerden yapılmış birleşimlerde, sıcaklığın değişmesi sırasında termal gerilmelerin meydana gelmesi proseslerinin benzerliği açıktır. Bu bakımdan, yukarıda not edilen yöntemle üretilen inşaat elemanlarında oluşturulan öngerilme durumlarının incelenmesinin termal gerilmelerin araştırılması için kullanılan analitik ve deneysel yöntemlerle yapılabileceği sonucuna varılabilir. Bahsedilen analogi kullanılarak öngerilmeli elemanlar deneysel ve analitik yöntemlerle analiz edilmiş olup sayısal çözümleri için ABAQUS programı kullanılarak sonlu elemanlar ile modellenmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, yapım elemanları olarak kullanılan öngerilmeli elemanların üretim aşamasında oluşabilecek gerilme ve şekil değiştirmelerin deneysel, analitik ve sayısal olarak modellenmesidir. Bu bakımdan beton kompozit yapılarda elemanın sınır değerlerini aşan yüklerin hangi durumlarda oluşabileceğini ve yapı güvenliği açısından önlemlerin alınabilmesi için önerilebilecek yöntemlerin oluşturulması temel amaç olarak saptanmıştır.

1.2 Öngerilmeli Elemanların Analizi

Beton genel olarak basınç yükleri altında yüksek, çekme yükleri altında düşük mukavemete sahip bir malzemedir. Çelik ise bilindiği üzere çekme yükleri altında

mukavim bir malzemedir. Çelik ve beton malzemelerinin kullanılması ile oluşan betonarme, betonun basınçtaki mukavemetini ve çeliğin çekmedeki mukavemetini kullanarak oluşturulan kompozit bir malzemedir. Betonun çekme mukavemeti basınç mukavemetinin yaklaşık olarak $1/10 \sim 1/12$ katı kadar olduğundan tasarım sırasında ihmal edilir. Servis yükleri altında betonarme elemanların çekme yüzeylerinde çatlak oluşumuna izin verilir. Çatlaklar çekme yüzeylerinde beton örtüsü olarak adlandırılan 20~70 mm kalınlığındaki ince tabakada ilerlerler. Etkili kalınlık olarak adlandırılan donatıların merkezinden basınç yüzeyine kadar olan yükseklik kesit hesaplarında dikkate alınır. Çekme yüzeyinde oluşan çatlaklar çekme donatılarına kadar ilerler. Donatıların "dowel" etkileri ve çatlak ağzı büyümesinin donatılar tarafından tutulması çatlakların ilerlemesini belli bir yük sınırına erişinceye kadar durdurmaktadır.

Öngerilmeli betonlar ise eğilmeye maruz elemanların yük taşıma kapasitelerini uygulanan öngerilmeye bağlı olarak büyük bir ölçüde artırır. Öngerilme kavramını ilk olarak ortaya çıkaran 1888 yılında aldığı patenti ile P.H. Jackson olmuştur [15]. Aynı yıl içinde C.E.W. Doehring'in öngerilmeli beton tabliyeler için aldığı Alman patentinden de bahsetmek gerekir [16]. Jackson'ın öngerilme fikri oldukça önemli olsa da betonun sünme etkilerinin fazla olması ve yüksek mukavemetli çeliklerin üretilmemesi nedenlerinden dolayı yapım elemanlarında uygulanamamıştır. Freyssinet 1930'lu yıllara kadar sünme etkilerini araştırarak uygun malzemeler ile öngerilme konseptinin yapım elemanlarında uygulanmasına olanak sağlayan fikrini ortaya atmıştır. 1928 yılında aldığı öngerilmeli beton patenti, öngerilmeli betonun doğuşu olarak nitelendirilmektedir [1]. Freyssinet'in devam eden çalışmalarının yanında öngerilmeli beton elemanların gelişmesine bir çok mühendis katkıda bulunmuştur [2]. En önemli katkılarda bulunanlar arasında Magnel, Guyon, Abeles, Leonhardt ve Mikhailov sayılabilir [17–21].

Temel olarak öngerilmeli beton tatbikat açısından "ön-çekmeli" (pre-tensioned) ve art-çekmeli (post-tensioned) olmak üzere ikiye ayrılır. Öngerilmeli ön-çekmeli beton elemanlarda kalıpların içerisinden geçen yüksek mukavemetli öngerme çubuğu belirlenen şekil değiştirmeye erişinceye kadar çekme kuvveti uygulanıp ankrajdaki "babalar" ile sabitlenir. Kalıplara dökülen beton, prizini aldıktan (sertleştikten) sonra öngerilme, uçlardaki çeliklerin kesilmeleriyle serbest bırakılır ve beton çelik arasındaki aderans ile öngerilme kuvvetinin (çekme) bir kısmı betona aktarılır (basınç).

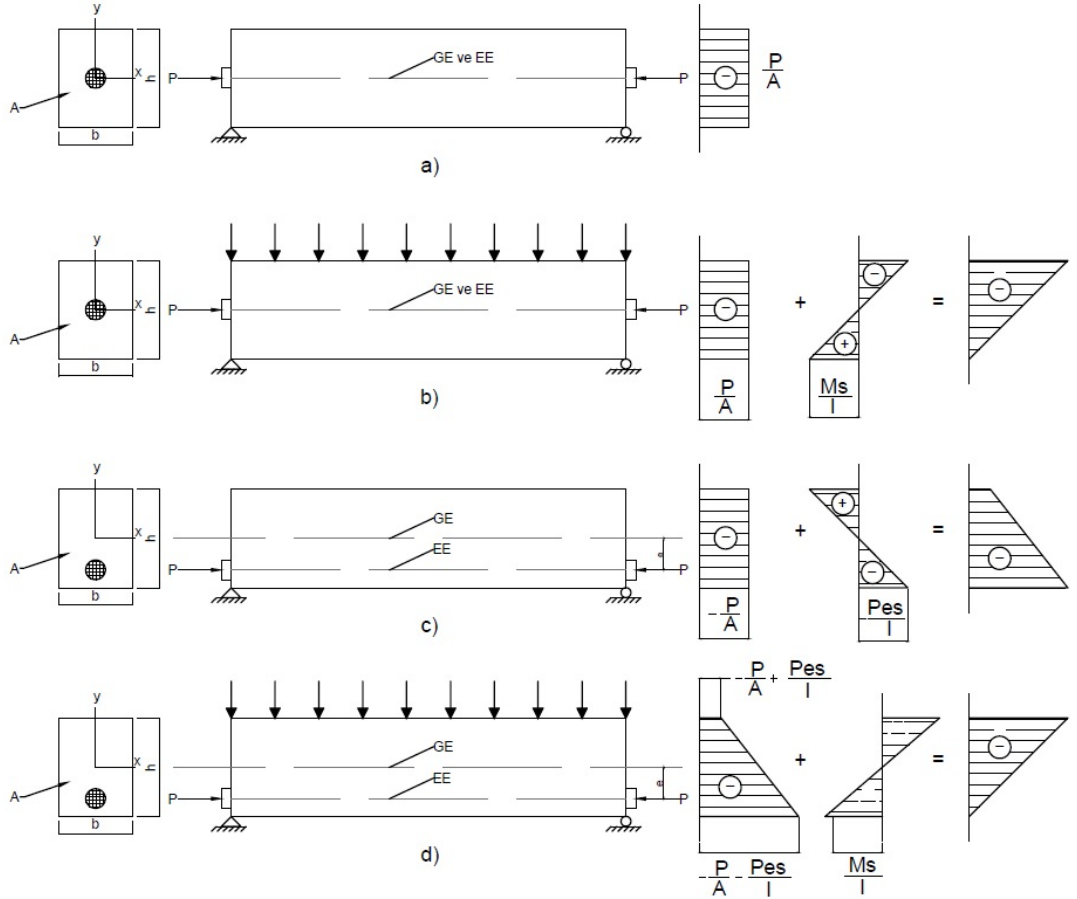
Böylece servis yükleri altında çekme alacak olan beton yüzeyi öngerilmenin etkisi ile önceden basınç gerilmeleri halinde olmaktadır. Beton tasarlanan servis yüklerine ve öngerilmeli elemanın etkili öngerme seviyesine bağlı olarak, servis yükleri altında çekme gerilmelerine maruz kalmaz. Öngerilmeli art-çekmeli beton elemanlarda ise öngerilme çubuğu boş bir kılıfın içerisinde geçirilerek çekme yüküne maruz bırakılır. Betonun dökülüp sertleşmesi sonrasında aderans mevcut olmadığından öngerme, çeliğin uçlardaki ankrajlarından serbest bırakılması ile tatbik edilir. Elemanın uçlarından verilen öngerilme yükleri zaman içerisinde betonun sünmesi, çeliğin ise gerilme gevşemesi (stress relaxation) etkileri sebebiyle öngerilme kayıpları meydana gelir. Beton çelik aderansının olmaması art-çekme çubuklarının zaman içerisinde tekrar çekilerek öngerilme kayıplarının telafi edilmesini mümkün kılar. Bu çalışmada, sadece öngerilmeli, ön-çekmeli beton elemanlar üzerinde durulmuş olup öngerilmeden kastedilenin, ön-çekmeli beton olduğunu belirtmek gerekir.

Öngerilmeli beton elemanlarda yüksek mukavemetli beton ve çeliklerin kullanılması gerekmektedir. Öngerme donatısı olarak tellerin birleştirilmesi ve tel gruplarının birbirlerine örgü şeklinde sarılması ile oluşturulan öngerme kabloları ve farklı boy ve çaplarda çelik çubuklar şeklinde üretilen öngerme çubukları kullanılmaktadır.

Öngerilmeli beton elemanlarda uygulanan öngerilme kuvveti, P , betonun ve kullanılan öngerilme donatılarının alanına göre öngerilme durumu oluşturur (Şekil 1.1 a,b).

$$\sigma = -\frac{P}{A} \quad (1.3)$$

burada P çeliğe uygulanan öngerilme kuvveti, A , beton kesit alanıdır. Hazırda öngerilmeli elemanlarda oluşturulan gerilmeleri değerlendirmek için Şekil 1.1’de gösterilen hesap şemaları kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 : Öngerilmeli kiriş elemanda oluşan gerilmeler, a) aksenal öngerilme, b) aksenal öngerilme ve ölü yük, c) eksantrik öngerilme, d) eksantrik öngerilme ve ölü yük (GE= geometrik eksen, EE= eksantrik eksen, c= geometrik eksenenden olan maksimum uzaklık, dikdörtgen kesit için $s = \frac{1}{2}h$)

Öngerilme uygulaması ile amaçlanan servis yükleri altında betonun çekme yüzünde gerilme meydana gelmemesidir. Belli bir miktar çekme gerilmelerine müsaade eden tasarımlar da mevcuttur. Dış yüklerin uygulanması ile süperpoze olan öngerilme değerleri elemanın çekme ve basınç yüzeylerinde aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$\sigma^t = -\frac{P}{A} - \frac{Ms}{I} \quad (1.4a)$$

$$\sigma^b = -\frac{P}{A} + \frac{Ms}{I} \quad (1.4b)$$

burada;

- σ^t = Basma yüzündeki liflerde oluşan basınç gerilmeleri
- σ^b = Çekme yüzündeki liflerde oluşan çekme gerilmeleri

- s = Dikdörtgen kesitler için $\frac{1}{2}h$ (tarafsız eksenden olan maksimum uzaklık)
- I = Kesit atalet momenti
- b = Kesit genişliği

Öngerilme kuvvetlerinin eksantriklik durumu ise öngerilme kuvvetlerine, P/A , eksantriklik durumundan kaynaklanan $(Pe/I)s$ etki basma yüzünde eklenir, çekme yüzünde ise çıkartılır (Şekil 1.1c, d). Burada elemanın çatlaksız ve elastik davrandığı kabul edilmektedir. Öngerme çubuklarından kaynaklanan basınç gerilmeleri betonun çekme gerilmeleri altındaki dezavantajını telafi etmektedir. Fakat öngerilmelerin orta merkezli uygulanması betonun basınç lifinde yük taşıma kapasitesini düşürmektedir. Bu yüzden öngerilme donatısı en kesit alanı içerisinde eksantrik olarak yerleştirilir ve öngerilme uygulanır. Eğer donatı kesit ağırlık merkezinden e kadar eksantriklik verilirse donatının bulunduğu eksene eksantriklik eksenini denir ve Pe kadar bir moment oluşturarak orta eksende gerilmeler meydana gelir. Kesitin üst ve alt liflerinde oluşan gerilmeler 1.5'teki gibi hesaplanır.

$$\sigma^t = -\frac{P}{A} + \frac{Pes}{I} - \frac{Ms}{I} \quad (1.5a)$$

$$\sigma^b = -\frac{P}{A} - \frac{Pes}{I} + \frac{Ms}{I} \quad (1.5b)$$

Bu durumda da kesitin üst lifinde çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Tasarımın ihtiyaçları ve kullanılan malzemelere göre en üst lifte oluşan çekme gerilmeleri eksantriklik ekseninin y eksenini doğrultusunda yer değiştirmesi ile ya tamamen yok edilir ya da azaltılır.

Öngerilmeli elemanlarda uygulanan öngerilmeden kaynaklanan elastik şekil değiştirmelerden ve zaman içerisinde betonda oluşan sünme şekil değiştirmelerinden ve çelik donatıdaki *relaxation* etkilerinden kaynaklanan ilk öngerilme değerinde azalmalar meydana gelmektedir. Tam aderansın sağlanamadığı durumlarda donatı sıyrılmasından kaynaklanan azalmalar da meydana gelebilir. Bu azalmalar öngerme kaybı olarak adlandırılmaktadır. P_i ilk verilen öngerme kuvveti ve P_e öngerilme kayıplarından sonraki etkili öngerme kuvveti olursa artık öngerilme faktörü;

$$\gamma = \frac{P_e}{P_i} \quad (1.6)$$

olarak ifade edilebilir.

1.5 ifadeleri $\frac{I_g}{A_c}$ yerine atalet yarıçapı (r^2) dönüşümü yapılarak tekrar düzenlenebilir. Düzenlenen ifade ağırlık kuvvetleri olmayıp sadece öngerilme kuvvetleri için aşağıda verilen 1.7 denklemleri ile gösterilebilir.

$$\sigma^t = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{es_t}{r^2}\right) \quad (1.7a)$$

$$\sigma^b = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{es_b}{r^2}\right) \quad (1.7b)$$

burada A_c beton elemanın kesit alanı s_t ve s_b sırası ile geometrik eksenin en üst ve en alt life olan uzaklığını temsil etmektedir.

Ağırlık yükleri hesaba katıldığında M_D momenti oluşan kesitte üst ve alt liflerde oluşan gerilmeler aşağıdaki gibi hesaplanır

$$\sigma^t = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{es_t}{r^2}\right) - \frac{M_D}{S^t} \quad (1.8a)$$

$$\sigma^b = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{es_b}{r^2}\right) + \frac{M_D}{S^b} \quad (1.8b)$$

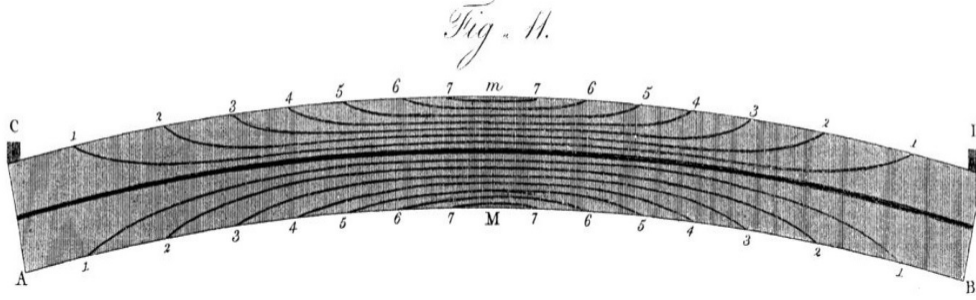
burada S_t ve S_b sırası ile üst ve alt liflerin mukavemet momentidir ($S = I/s$). Ölü yük ve hareketli yüklerin mevcut olduğu durumlarda ayrı tiplerdeki yüklerden doğan momentler süperpoze edilerek 1.8 ifadesindeki M_D yerine $M_T = M_D + M_{SD} + M_L$ yazılabilir. Burada M_T , M_{SD} ve M_L sırası ile toplam moment, ölü yüklerin süperpoze edildiği moment ve hareketli yüklerden kaynaklanan momenttir [22].

1.3 Uygulamalı Deneysel Yöntem

Öngerilmeli elemanlarda üretim prosesinde oluşturulan gerilmelerin incelenmesi için fototermoelastisite yöntemi uygun görülmüştür. Bu yöntem mühendislik yapılarında farklı mekanik ve termal yüklerin etkisinde oluşan gerilme durumunun incelenen alanın tümünde değişmesini ve gerilme yığılma bölgelerinin belirlenmesini aynı zamanda önemli görülen her bir noktada gerilmelerin yüksek hassasiyetle ölçülebilmesine olanak sağlar.

Fotoelastisite yönteminin geliştirilmesi Brewster'in 1816 yılında cam plağın gerilme altında çift-kırılma özelliği gösterdiğini farketmesi ile başlamıştır [23](Şekil 1.2). Fakat konunun teorik olarak geliştirilmesi Neumann [24] ve Maxwell [25] tarafından 1841 ve 1853 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Ancak, yüksek optik hassasiyete

sahip malzeme ve polarize ışık elde etmekteki güçlükler fotoelastisite yönteminin geliştirilmesini zorlaştırmıştır [26].



Şekil 1.2 : Brewster'in 1818 yılında fotoelastik yöntem ile ilgili makalesinden bir fotoğraf [27].

Neumann gerilme-optik etkisi teorisini yayınlarken dikdörtgen kesitli kirişler üzerinde eğilme deneyleri yapmıştır. Bu denemeler sonucunda karşılıklı polarize olmuş ışık dalgalarının farkının asal şekil değiştirmeler farkıyla orantılı olduğu sonucunu çıkarmıştır. Böylece birbirlerine dik üç asal eksen den geçen ışık dalgasının hızlarının yani titreşim doğrultusunun asal eksenlere paralel olduğu dalgaların hızlarının asal gerilmelerle bağlantılı olduğu aşağıdaki ifadeyi geliştirmiştir [28].

$$v_1 = v_0 + \alpha \varepsilon_x + \beta \varepsilon_y + \gamma \varepsilon_z \quad (1.9a)$$

$$v_2 = v_0 + \alpha \varepsilon_y + \beta \varepsilon_z + \gamma \varepsilon_x \quad (1.9b)$$

$$v_3 = v_0 + \alpha \varepsilon_z + \beta \varepsilon_x + \gamma \varepsilon_y \quad (1.9c)$$

burada v_0 şekil değiştirme olmayan ortamdaki dalga hızıdır. Neumann denemeleri sonucunda β ve γ katsayılarının eşit olduğunu göstermiştir. Maxwell ise şekil değiştirme yerine gerilmeler cinsinden bir ifade önermiştir. Neumann'ın denklemine benzer olan ifade 1.10 daki gibidir.

$$n_1 = n_0 + c_1 \sigma_x + c_2 (\sigma_y + \sigma_z) \quad (1.10a)$$

$$n_2 = n_0 + c_1 \sigma_y + c_2 (\sigma_z + \sigma_x) \quad (1.10b)$$

$$n_3 = n_0 + c_1 \sigma_z + c_2 (\sigma_x + \sigma_y) \quad (1.10c)$$

Yukarıdaki eşitlikler asal gerilmelerin farkı ile ifade edilmek istenirse 1.11'deki gibi yazılır.

$$n_1 - n_2 = (c_1 - c_2)(\sigma_x - \sigma_y) \quad (1.11)$$

1.11 ifadesinde c_1 ve c_2 optik sabitler olup n_1 ve n_2 malzemenin kırılma indisleridir. Cismin gerilmeli ve gerilmesiz durumda gösterdiği kırılma indislerindeki bu farklılık çift kırılma olarak adlandırılmaktadır.

1.3.1 Işık hareketi

Adi ışık çeşitli frekanslarda birçok yönde rastgele titreşen birçok ışık vektöründen ibarettir. Işık ilerleme doğrultusuna dik bir titreşim olarak alınıp A vektörü ile gösterilebilir. Eğer bu titreşimler düzenli hale getirilebilirse düzenli haldeki ışığa polarize ışık denir. Öyle bir süzgeç levha varsayalım ki süzgeçten geçen ışık tek doğrultuda titreşim yapabilsin. İşte bu süzgece polarizör adı verilir. Işığın tek doğrultudaki dalga hareketi için 1.12 ifadesi yazılabilir.

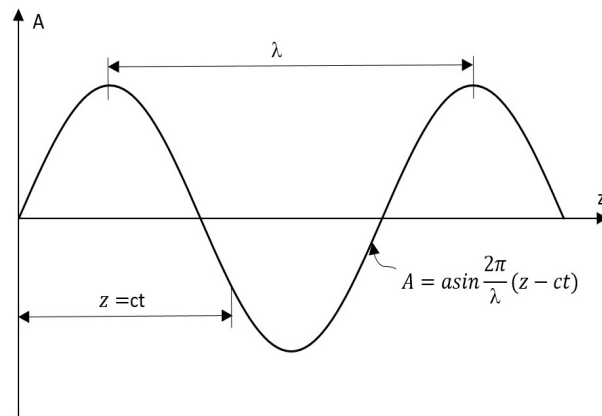
$$A = f(z - ct) + g(z + ct) \quad (1.12)$$

Burada A dalganın genliği, z , ilerleme doğrultusu üzerindeki konumu, t , zaman ve c ise dalganın ilerleme hızıdır (boşlukta $3 \times 10^{10} \text{ cm/sn}$). Basit bir ifade ile belirtmek gerekirse fotoelastik etki, ışığın z eksen yönünde sinüsoidal dalga hareketinin pozitif bileşeni alınarak elde edilebilir. Böylece 1.12 ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A = f(z - ct) \quad (1.13a)$$

$$A = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \quad (1.13b)$$

Işık vektörünün grafik olarak gösterimi Şekil 1.3'te verilmektedir.



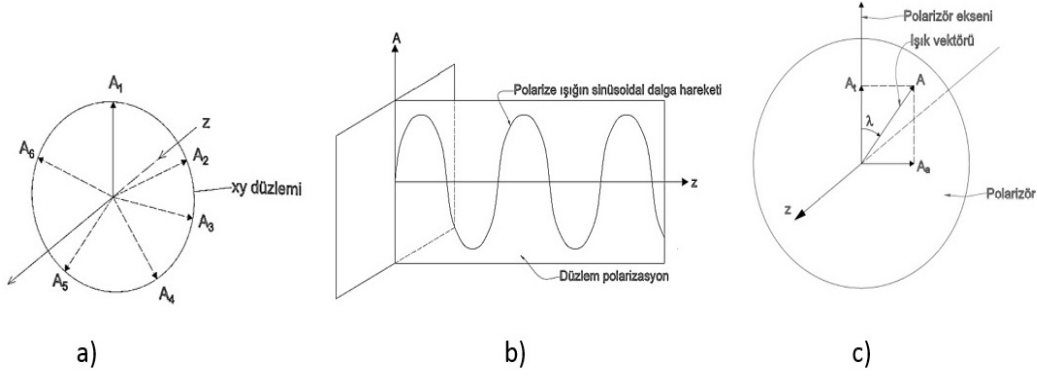
Şekil 1.3 : Işık vektörünün genliğinin ilerleme doğrultusuna göre fonksiyonu.

Dalga hareketinin iki maksimum (pik) nokta arasındaki hareketi için geçen süre periyot T olarak adlandırılır.

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (1.14)$$

Frekans periyodun tersi olup birim zamanda dalga hareketinin yaptığı salımların sayısını ifade etmektedir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.15)$$

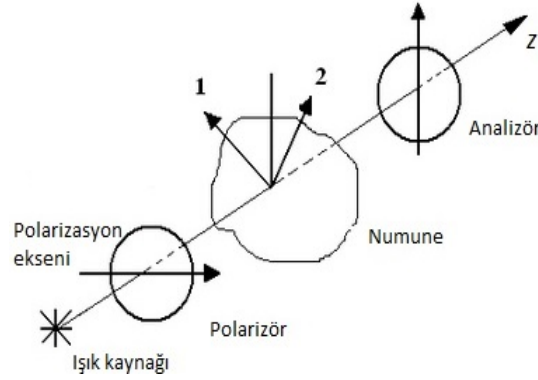


Şekil 1.4 : a) Işık vektörünün ilerleme ve salınım doğrultuları, b) düzlem polarizasyon, c) polarizör.

Işık vektörleri ilerleme doğrultusuna dik yönde titreşim (vibrasyon) hareketi yaparlar. xy düzleminde yapılan bu salınım hareketi arasında her bir ışık vektörünün frekansı aynı ise tek bir renk görünür. Eğer salının hareketi yapan vektörler (A₁, A₂, A₃, vs.) farklı frekanslara sahipse göz ile algıladığımız, farklı renklerin karışımı olan beyaz ışıktır (Şekil 1.4a). Polarize ışıktaki elektromanyetik dalga hareketinin titreşimleri ilerleme doğrultusuna dik olan düzlemde sadece belli bir ekseninde salınım yapar (Şekil 1.4b). Işığın polarizasyonunu sağlayan polarizörler sentetik ve kompozit olan optik birer levhadır (Şekil 1.4c). Polaroid levha olarak da adlandırılan iki optik levhayı geçirme eksenleri birbirlerine dik olacak şekilde ışık kaynağının önüne koyarsak ışık kaynağına bakan kimse hiç ışık görmez. Birinci levhanın polarizasyon eksenine dik şekilde yerleştirilen ikinci polaroid levhaya analizör adı verilmektedir.

1.3.2 Polariskoplar

Işık kaynağıyla birlikte bahsedilen polaroid levhaların birbirlerine dik ve farklı açılarla yerleştirildiği optik sistemlere polariskop adı verilmektedir. Yaygın olarak polariskoplar düzlem, dairesel ve eliptik olarak sınıflandırılırlar. Geçirme eksenleri birbirlerine dik olarak yerleştirilen ışık kaynağının önüne konmuş iki polaroid levha düzlem polariskopları oluşturmaktadır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 : Düzlem polariskop.

z doğrultusunda hareket eden ışık vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} ct \quad (1.16a)$$

$$A = a \sin 2\pi ft = a \sin \omega t \quad (1.16b)$$

Burada $\omega = 2\pi f$ olup açısal frekansı ifade etmektedir. z eksenini doğrultusunda ilerleyen bir ışık ilerleme doğrultusuna dik yönde bir polarizör ile karşılaştığında ışığın genliği 1.17 ile ifade edilir.

$$A_a = a \sin \omega t \sin \lambda \quad (1.17a)$$

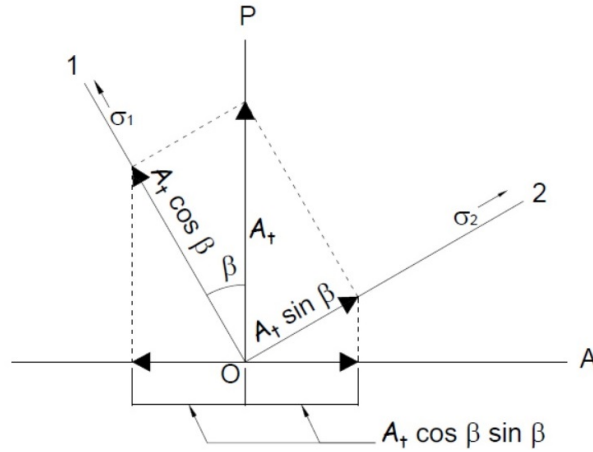
$$A_t = a \sin \omega t \cos \lambda \quad (1.17b)$$

burada λ ışık vektörünün salınım yönü ile polarizasyon eksenini arasındaki açıdır (Şekil 1.4c). Belli bazı malzemelerden yapılmış plaklar ışık vektörünü birbirlerine dik iki ekseninde kırılmasını sağlarlar. Bu özellik çift kırılma olarak adlandırılmaktadır. Polarize ışık vektörü çift kırılma özelliği gösteren bir plak ile karşılaştığında birbirlerine dik (asal eksenler) olan bileşenleri 1.18 ile ifade edilir (Şekil 1.6).

$$A_{t1} = a \cos \lambda \sin \omega t \cos \beta = k \sin \omega t \cos \beta \quad (1.18a)$$

$$A_{t2} = a \cos \lambda \sin \omega t \sin \beta = k \sin \omega t \sin \beta \quad (1.18b)$$

burada $k = a \cos \lambda$ dir.



Şekil 1.6 : Polarizörden geçen ışığın fotoelastik plakta çift-kırılması, P, polarizasyon eksenini, 1 ve 2, asal doğrultular.

Çift kırılma özelliği gösteren plakdan geçen birbirlerine dik iki ışık vektörü plak kalınlığından geçerken birbirlerinden farklı hızlarla hareket ederler (c_1 ve c_2). Bu hız farkı ışıkların plaktan farklı zamanlarda çıkmasına neden olur. İki bileşenin arasında oluşan bu mesafe farkı (faz farkı)'nın bulunması için her bir vektörün gecikmesi ayrı ayrı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta_1 = \frac{2\pi h}{\lambda}(n_1 - n) \quad (1.19a)$$

$$\Delta_2 = \frac{2\pi h}{\lambda}(n_2 - n) \quad (1.19b)$$

burada n ışığın havadaki kırılma indisidir. Faz farkları olan $\Delta_1 - \Delta_2$ açısal faz farkını veya çift kırılan ışığın plaktan çıkarken ki mesafe farkını vermektedir. Bu durumda;

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 = \frac{2\pi h}{\lambda}(n_1 - n_2) \quad (1.20)$$

olur. Böylece faz farkı olan Δ , çift kırılma özelliği gösteren levhanın kalınlığına (h), ışığın dalga boyuna (λ), ve dalga plağı olarak adlandırılan plağın kırılma indisi özelliklerine ($n_1 - n_2$) bağlıdır. Eğer levha ışığın çıkıştaki faz farkının $\pi/2$ olmasını sağlayacak şekilde dizayn edilirse buna çeyrek dalga plağı, π ve 2π olduğu durumlarda ise sırası ile yarım ve tam dalga plağı olarak adlandırılmaktadır. Plaktan ayrılırken Δ kadar gecikme yapan ışık bileşenleri için 1.21a, b ifadeleri yazılabilir.

$$A'_{t1} = k \cos \beta \sin(\omega t + \Delta) \quad (1.21a)$$

$$A'_{r2} = k \sin \beta \sin \omega t \quad (1.21b)$$

Bu iki bileşenden oluşan dalğanın genliği için 1.22 ifadesi yazılabilir.

$$A'_{t1} = \sqrt{A'^2_{t1} + A'^2_{t2}} = k\sqrt{\sin^2(\omega t + \Delta) \cos^2 \beta + \sin^2 \omega t \sin^2 \beta} \quad (1.22)$$

Ayrıca çift kırılma özelliği gösteren plakta ayrılan bileşenlerden hızlı olanı 1 ekseninde ise, ışığın plaktan çıkarken 1 eksenini ile yaptığı açı da γ olur ve 1.23 ile ifade edilebilir.

$$\tan \gamma = \frac{A'_{t2}}{A'_{t1}} = \frac{\sin \omega t}{\sin(\omega t + \Delta)} \tan \beta \quad (1.23)$$

Elde edilen ifadelerden anlaşıldığı üzere hem dalğanın genliği hem de levhadan çıkarken dönme açısı dalga plağı ile kontrol edilebilir. Bu durumda kontrol parametreleri faz farkı olan Δ ve yönelim açısı olan β olarak belirlenebilir. Bu iki kontrol parametrelerinin varyasyonları ile düzlem, dairesel ve eliptik polariskoplar elde edilir.

Eğer β açısı 0 olup Δ serbest kalacak şekilde dalga plakları tasarlanırsa 1.24 ile verilen ifadeler elde edilir.

$$A'_t = k \sin(\omega t + \Delta) \quad (1.24a)$$

$$\gamma = 0 \quad (1.24b)$$

Burada $\gamma = 0$ olduğundan ışık plaktan geçerken dönme hareket yapmayacak ve ışık düzlem polarize olarak ilerlemeye devam edecektir.

Eğer faz farkı $\Delta = \pi/2$ ve $\beta = \pi/4$ olacak şekilde dalga plağı tasarlanırsa (çeyrek dalga plağı), bu durumda oluşacak dalğanın genliği ve açısı 1.25 ile ifade edilir.

$$A'_t = \frac{\sqrt{2}k}{2} \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (1.25a)$$

$$\tan \gamma = \tan \omega t; \quad \gamma = \omega t \quad (1.25b)$$

Bu durumda kırılan ışık vektörünün genliği sabit olup yönelim açısı zaman ile artmaktadır. İlerleme doğrultusuna dik düzlemde dairesel helisel bir hareket gösteren bu durumdaki ışığa dairesel polarize ışık denir. Eğer çeyrek dalga plağı için ($\Delta = \pi/2$), π , 0, $\pi/4$ ve $\pi/2$ dışında herhangi bir açı seçilirse plaktan çıkan ışığın genliği ve açısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$A'_t = k\sqrt{\cos^2 \omega t \cos^2 \beta + \sin^2 \omega t \sin^2 \beta} \quad (1.26a)$$

$$\tan \gamma = \tan \omega t \tan \beta \quad (1.26b)$$

Bu durumda genlik ve açı zamanla değiştiğinden dalga hareketi ilerleme doğrultusunda eliptik bir helisel çizerek yayılır. Bu duruma uygun dizayn edilen polariskoplar eliptik polariskop olarak adlandırılır. Dairesel ve düzlem polariskoplar eliptik polariskopların özel durumlarıdır. Fotoelastisitede en çok kullanılan polariskop çeşidi ise daireysel polariskoptur.

Gerilmeye maruz kalmış çift kırılma özelliği gösteren bir plak optik anizotrop özelliği ile dalga plağı gibi hareket eder. Polarize olan bir ışık vektörü gerilmeli bir plaktan geçerken faz farkına uğrayarak bileşenlerine ayrılır. Maxwell'in 1.10 ifadeleri ile fotoelastik modelin düzlem gerilme hali analiz edilebilir.

$$n_1 - n_2 = (c_1 - c_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1.27a)$$

$$n_1 - n_2 = \frac{\lambda \Delta}{2\pi h} \quad (1.27b)$$

$$\Delta = \frac{2\pi h}{\lambda}(c_1 - c_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1.27c)$$

Faz farkını ifade eden 1.27c ifadesinde $c_2 - c_1$ yerine c yazdığımızda görelî gecikme Δ için,

$$\Delta = \frac{2\pi hc}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1.28)$$

yazılabilir. 1.28 gerilme optik kanunu olarak bilinmektedir. Görelî gecikme olan Δ asal gerilmelerin farkı olan $\sigma_1 - \sigma_2$ ve plak kalınlığı olan h ile doğrusal orantılı, dalga boyu olan λ ile ters orantılı olarak değişmektedir. Burada c , çift kırılma özelliği gösteren fotoelastik malzemenin bir özelliğidir. Denklemden $\eta = \frac{\Delta}{2\pi}$ ve optik hassasiyet katsayısı olan $\sigma_0^{1.0} = \frac{\lambda}{c}$ ifadeleri yazıldığında asal gerilme farkı için fotoelastik gerilme analizlerinde kullanılan 1.29 denklemini elde edilir.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\eta \sigma_0^{1.0}}{h} \quad (1.29)$$

Burada η görelî gecikmeyi temsil etmekle beraber şerit sayısını, $\sigma_0^{1.0}$ optik hassasiyet katsayısını ve h ise analiz yapılan fotoelastik modelin kalınlığını temsil etmektedir [28–30].

Kısaca açıklamak gerekirse birbirlerine dik yönde titreşen iki ışık vektörü analizörden çıkarken oluşturdıkları faz farkının büyüklüğüne göre şeritleri oluştururlar. Faz farkı renklerin dalga boylarının tam katı kadar olduklarında izoklin olarak adlandırılan renk demetinin belirli noktalarında parlaklığı değiştirirler. Her rengin dalga

boyuna göre bu durum asal gerilme farklarının şiddeti ölçüsünde yüklü numunenin noktalarında farklı renklerle belirir. Fotoelastisite yöntemi her bir noktada elde edilen gerilme durumlarının ölçülmesine yukarıda bahsedilen mekanizmaya dayanarak imkan verir. Bu bakımdan fotoelastisite yöntemi diğer deneysel yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır.

1.4 Literatür Araştırması

Teknik literatürde öngerilmeli betonarme elemanların gerilme analizinin fotoelastik yöntem kullanılarak yapıldığı çalışmaların sayısı oldukça azdır. Görülen çalışmalardan daha çok art germeli beton elemanların fotoelastik yöntemle analizleri dikkat çekmektedir. Fotoelastik modelleme dışında deneysel olarak yapılan analizler büyük bir oranda *strain gauge* kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatür araştırmasını art germeli yapılarla ilgili, ön çekmeli yapılarla ilgili ve fotoelastik yöntemle yapılan beton elemanlarla ilgili olan araştırmalar olarak sınıflandırabiliriz.

Teknik literatürde öngerilmeli (ön-çekmeli) elemanların fotoelastik yöntemler kullanılarak araştırılması ile ilgili rastlanılan tek çalışma Linger ve Bhonsle'e aittir [11]. Linger çalışmasında epoksi ve çelik teller kullanarak 2-boyutlu fotoelastik numuneler oluşturmuştur. Çalışma daha çok öngerilmeli elemanların transfer boyu ile ilgili olup modellerin analizleri sonucu gerilme değerleri ile ilgili bazı sonuçlara varılmıştır. Bu çalışma ile transfer boyunun kullanılan elemanın kalınlığına ve verilen ilk öngerilme değerine bağlı olarak değiştiği ayrıca ankraj bölgesinde oluşan maksimum kayma gerilmelerinin elemanın kenarlarından $2.54 \sim 7.62 \text{ mm}$ mesafe kadar içerisinde olduğu sonuçlarına varılmıştır.

G. D. Base 1957 yılında öngerilmeli beton elemanların transfer boyu ile ilgili çalışmasında *strain gauge* kullanarak yaptığı ölçümler neticesinde transfer boyunun beton rötresi ve sünme etkileri ile nasıl değiştiğini belirtmiştir [3]. P. D. Arthur ve S. Ganguli 1965 yılında öngerilmeli kirişlerle ilgili teorik ve deneysel bir araştırma yapmışlardır. Bu araştırmada I profilili betonarme kirişlerin üst ve alt flanşlarına yerleştirdikleri 5 mm çaplı öngerme kabloları ile yapılan deneysel analizler ile daha önceki çalışmalar karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar şöyledir: a) Öngerilme transferi sırasında yüzeyde oluşan çekme gerilmeleri beton küp basınç dayanımının 0.3 katı değerine vardığında çatlak oluşumları başlayabilir, b) Daha önceki teorik ve deneysel

çalışmaların ortak görüşüne göre en büyük çekme şekil değiştirmeleri öngerme çubuklarının kirişin üst ve alt flanşlarına uniform olarak dağılımları sonucunda oluşur, c) Kiriş ucunda oluşan maksimum çekme gerilmeleri ortalama öngerilme değerinin 1.25 ile 2.25 katı arasında olmaktadır [4].

Bruce W. Russel ve Ned H. Burns 1997 yılında öngerilmeli betonarme yapılarda aderansla oluşan gerilme transferi boylarını araştırmışlardır. Tek donatılı özel 18 numune üzerinde beton yüzeyine ve öngerme çubuğu üzerine yerleştirdiği *strain gauge*'leri kullanarak yaptığı ölçümler sonucunda Russel birleşim arayüzlerindeki yüzey gerilmelerin yaklaşık olarak sabit olduğunu ve transfer boyunun 66.6ϕ (ϕ =öngerme donatısı çapı) ve $L_t = 0.0725f_{se}\phi_b$ (L_t =Transfer boyu, f_{se} =Etkili öngerme, ϕ_b =öngerme donatı çapı) ifadeleri ile hesaplanabileceğini ifade etmiştir [5].

J. M. Benitez ve J. C. Galvez 2011 yılında öngerilmeli beton elemanların beton ve öngerme çubuğu arasındaki aderans gerilmeleri ile ilgili analitik bir model belirtmiştir. Bu modelin hesaplamalarında Poisson oranı dahil edilmiş olup sonuçlar deneysel verilerle uyumlu olmaktadır [6]. J.R. Marti-Vargas, ve arkadaşları öngerilmeli betonun beton-öngerme çubuğu arayüzlerinin parametrelerini tayin etmek için daha önceden geliştirilen test metodu ile 2014 yılında çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kullanılan test metodu ile transfer boyu, ankraj boyu, etkili öngerilme yükü, aderans gerilmeleri, öngerme donatısı sıyrılmaları, eleman uzunluğundaki beton şekil değiştirmeleri, öngerme transferi sırasında beton elastisite modülü, ve öngerme kayıpları tayin edilmiştir. Vargas ve arkadaşlarının kullandığı *strain gauge* ve *AMA* sistemi ile hazırlanan test düzeneği ile öngerilmeli beton parametreleri kapsamlı olarak çalışılmıştır [7].

Art-germeli beton elemanlar ile ilgili olarak Christodoulides 1955 yılında art-germeli kirişlerin serbest uçlarında oluşan yüksek gerilme mertebelerini 2 boyutlu fotoelastik modeller ile incelemiştir. Bu incelemede tek malzeme kullanmış ve modelin üzerine ankraj noktalarından yükleme yapılmıştır. Optik hassasiyeti olan CR39 (Columbia Resin) malzemesi ile yaptığı fotoelastik analiz sonucunda en yüksek kayma gerilmelerinin yükleme noktalarının ekseninde olduğu, elde edilen sonuçların Lamé-Maxwell çözümü ve Kayma Eğimi metodu ile yapılan çözümlerle %6 gibi makul bir farkla uygunluk gösterdiği, ve artgermeli yapılarda kullanılan betonların serbest uçlarındaki gerilme dağılımlarının en iyi 3-boyutlu gerilme analizlerinden

elde edilebileceği sonuçlarına varmıştır [8]. Christodoulides'in 1957 yılında yapmış olduğu çalışma ile demiryolu köprülerinde kullanılan Freyssinet kabloları kullanılarak oluşturulmuş art-germeli kirişlerin 3-boyutlu gerilme dağılımları, fotoelastik yöntem ve *strain gauge* yöntemleri ile incelenmiştir. Öngerilmeli kirişi modellemek için önce Areldit B malzemesi döküm ile oluşturulup yaklaşık 1.6 mm çapındaki kablo telleri ile takviye malzemesi yerleştirilmiştir. Gerilmelerin dondurulması (stress-freezing) metodu kullanılarak fırında kendi yuvası içindeki kabloları germe işlemi uygulanmıştır. Modelin boyutları için 1/25 benzerlik oranı uygulanmış olup model ve prototip arasındaki Poisson oranı farklılığı etkilerini tekrar *strain gauge*'lerle incelemiştir [9].

D. J. Douglas, ve N. S. Trahair 1960 yılında yüksek gerilme konsantrasyonuna sahip olan art-germeli kirişlerin ankraj bölgelerindeki yüksek gerilme konsantrasyonlarının etkilerini teorik ve deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde 3-boyutlu matematiksel analizle elektrik resistanslı *strain gauge*'ler kullanılarak ölçülen test sonuçları benzerlik göstermekte uygulanan analitik yöntem konuyla ilgili önceki analitik çalışmalarla uyum sağlamaktadır [31]. K. T. S. R. Iyengar ve C.V. Yogananda 1966 yılında art germeli elemanların teorik çalışmalarını incelemiş ve ankraj bölgesinde oluşan gerilmelerin elastisite teorisi ile analitik çözümünü problemi basitleştirerek yapmışlar ve sonuçları önceki analitik çalışmalarla karşılaştırmışlardır [32].

A. L. Yettram ve K. Robbins'in 1969 yılında yapmış olduğu çalışma, art-germeli dikdörtgen kesitli elemanların ankraj bölgelerinde oluşan gerilme dağılımlarının FEM analizi ile ilgilidir. Yettram fotoelastik yöntemle yapılmış olan çalışmaların kullanılan malzemelerin prototipteki malzemelerin Poisson oranlarıyla farklılık göstermesinin bu yöntemin eksikliği olarak yorumlamış, yaptığı çalışmalarını önceki çalışmalarla kıyas etmiştir. Ankraj bölgesinde oluşan gerilme artışlarıyla ilgili birçok sonuç bulmuş ve 3-boyutlu gerilme analizi sonucunda yüzeyde oluşan gerilme dağılımlarının merkezde oluşan dağılımlardan farklı olduğunu ve 2-boyutlu gerilme analizlerinin yanıltıcı olabileceğini belirtmiştir [33].

Al-Saouud ve arkadaşlarının 1984 yılındaki çalışması art-germeli beton elemanların ankraj bölgelerindeki gerilmelerin 3-boyutlu fotoelastik yöntemler kullanılarak analizlerinin yapılması ile ilgilidir. Bu çalışmaların sonucunda Al-Saouud

3-boyutlu fotoelastik gerilme analizlerinin gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerin tespiti açısından analitik çalışmalara karşı üstünlüğünden bahsetmiş olup gerilme dağılımlarının uygulanan ankraj ünitesine bağlı olarak karşılaştırmıştır [10].

Fenwick ve Lee 1986 yılında yaptıkları art-germeli betonların ankraj bölgelerindeki gerilme analizi çalışmalarında *strain gauge* kullanmışlar ve çatlak oluşturan kuvvetleri dikkate alarak deneysel ve sonlu elemanlar yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Uyumlu sonuçlar bulan Fenwick ve Lee ankraj bölgelerinde çatlamaya sebep olan gerilme değerlerinin verilen öngerilmenin değerine bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır [34].

Yong ve arkadaşlarının 1987 yılında yaptıkları çalışma art-germeli dikdörtgen kesitli betonarme elemanların ankraj bölgelerinde oluşan kayma gerilmelerinin sonlu elemanlarla analizi olup buldukları sonuçları önceki deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır [35].

Theocaris ve Koufopoulos'un 1969 yılında yapmış oldukları çalışma betonların büzülmeleri sebebiyle oluşan mikro çatlakların fotoelastik incelenmesi ile ilgili olmuştur. Modelde epoksi kullanarak yapılan gerilme analizi sonucunda oluşan gerilme dağılımlarının kullanılan beton hamuru ve agreganın elastisite modülüne doğrudan bağlı olduğu, kullanılan agrega boyutları ve dağılımlarının da gerilme dağılımlarını etkilediği sonuçlarına ulaşmışlardır [36].

Chang ve arkadaşları 2008 yılında öngerilmeli betonda oluşan artık gerilmeleri fotoelastik kaplama yöntemi ile incelemişlerdir. Tam merkezinde dairesel boşluk bulunan kare silindir şeklindeki öngerilmeli beton numunesini fotoelastik malzeme ile kaplayarak basınç testine maruz bırakmışlar ve dijital fotoelastik yansımali kamera yardımı ile oluşan şeritleri incelemişlerdir. İnceleme sonucunda numune merkezindeki deliğin derinliği 2 cm'ye kadar arttıkça oluşan artık gerilmelerin seviyeleri de artmış fakat 2 cm'den sonra derinliğin artması şerit sayılarını değiştirmemiştir [37].

1966 yılında Staley F. Adams betonarmenin fotoelastik yöntemle incelenebilmesi için daha önce yapılanlardan farklı bir malzeme bulmaya çalışmış. Beton için gözlük camlarında sıkça kullanılan polikarbonat türevi bir polimer olan ADC (allyl dyglycol carbonate) kullanmıştır. Takviye malzemesi için ise birkaç denemeden sonra beton ile çeliğin elastisite modülleri oranını modelleyebilmesi için cam lif takviyeli epoksi kullanmıştır [38].

1963 yılında V. F. Bignell, V. Smalley, ve N. P. Roberts betonarmenin fotoelastik yöntemle incelenmesine yönelik çalışmalarında yeni bir malzeme kullanmış ve bu malzemenin 3-boyutlu fotoelastik incelemelerde oldukça iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmıştır. Bignell ve arkadaşları matris malzemesi için modifiye edilmiş epoksiyi (Arelidite B) takviye malzemesi için ise Mg ve Al alaşımlarını kullanmıştır. Bu çalışmada modelde kullanılan modüler oranın prototipteki ile aynı mertebede olmasına dikkat edilmiştir. $38.1 \times 4.5 \times 1.5$ cm boyutlarındaki kiriş numunesine belirli noktalardan çatlaklar oluşturarak eğilme deneyi yapılmış ve oluşan gerilme şeritleri kaydedilmiştir [39].

2. DENEYSEL PROSEDÜR

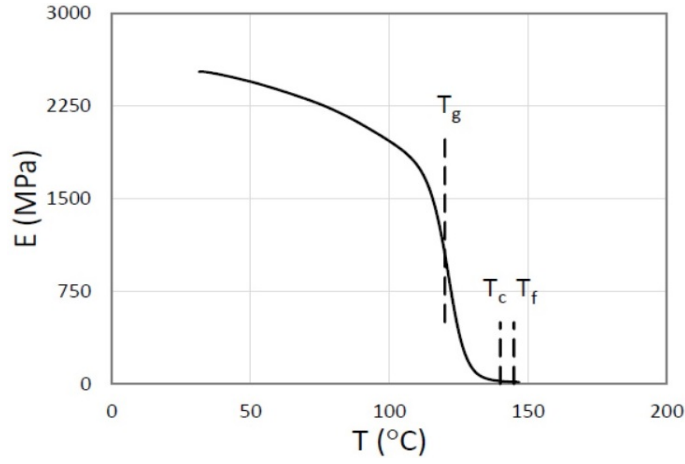
Fotoelastik modeller ile yapılan deneylerde sıcaklık yüklemesine maruz bırakılmış farklı malzemelerin birleşmesi ile oluşan elemanlardaki gerilme durumu analojisi kullanılmıştır. Deneylerde fototermoelastisitenin "gerilmelerin dondurulması" metodu kullanılmıştır. Modellerin oluşturulmasında kullanılacak malzemelerin seçilmesi oldukça önemlidir. Beton, çelik, dökme demir ve/veya alüminyumdan yapılmış kompozit elemanların simülasyonu için gerekli malzemelerin temin edilmesi halinde bir çok problem fotoelastik incelemeler ile araştırılabilir. Fotoelastik çalışmalarda uygun optik hassasiyet katsayısına sahip malzemelerin temin edilmesi önemlidir. Betonarme gibi kompozit malzemelerin fotoelastik modellerinin yapılabilmesi için kullanılacak malzemelerde aranılan özelliklerden biri de modellemesi yapılacak olan prototipi oluşturulan malzemelerin elastisite modüllerinin oranının modelde de sağlanması gerekmektedir. Bahsedilen modüler oran analojisi 2.1 ifadesi ile gösterilebilir.

$$\frac{E_{pi}}{E_{p(i+1)}} \equiv \frac{E_{mi}}{E_{m(i+1)}}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

Burada E elastisite modülünü, p ve m indisleri sırasıyla prototip ve modeli, i ise kompoziti oluşturan malzemelerin sırasını temsil etmektedir. İnşaat sanayinde ön gerilmeli betonarme elemanların yapımında kullanılan çelik öngerme donatıların ve betonun elastisite modüllerinin E_s ve E_c oranı $5 \sim 10$ aralığında değişebilir [22]. Modüler oran olarak adlandırılan bu oranın sağlanması halinde deneyde gerilme-donması tekniği uygulanacağından malzemeler "dondurulma" sıcaklığında aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır:

- Lineer gerilme-şekil değiştirme davranışı
- Lineer gerilme-şerit değişimi davranışı
- Yakın termal genleşme katsayıları

Dondurulma tekniği ile yapılacak olan çalışmalarda dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da kullanılan malzemelerin kritik sıcaklıklarının göz önüne alınmasıdır. Kompozit malzemelerin fotoelastik incelemelerinde malzemelerin kritik sıcaklıkları dondurulma devrinin tam olarak uygulanabileceği en düşük sıcaklık olarak tanımlanır. Deneyin yapılacağı dondurulma sıcaklığı ise kullanılan malzemelerin kritik sıcaklıklarının en büyüğünden daha yüksek bir sıcaklık değeri olmasına önem gösterilmelidir. Yüksek optik hassasiyet katsayısına sahip olması kolay işlenebilirliği ve göreceli olarak az kenar efektine sahip olması özelliklerinden dolayı fotoelastik araştırmalarda araldit (epoksi) oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. En genel halde araldit bir malzemenin elastisite modülünün sıcaklık ile değişimi şekil 2.1'deki gibidir.



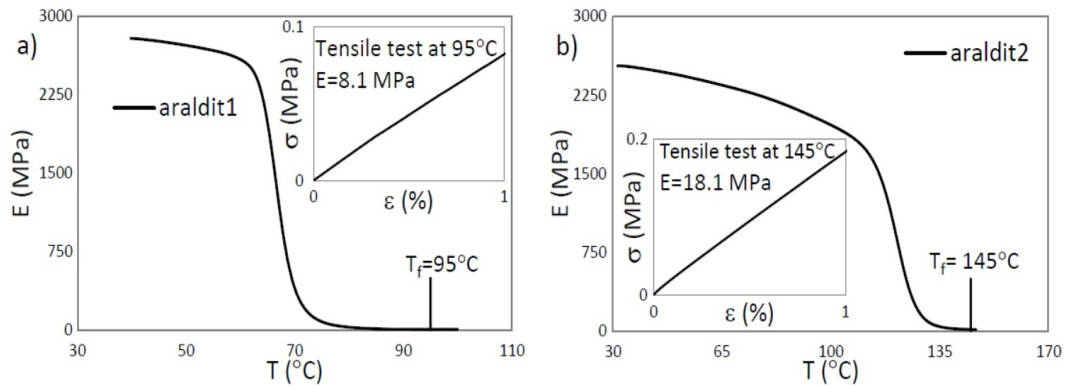
şekil 2.1 : Araldit malzemenin elastisite modülünün sıcaklık ile değişimi, $T_g = 120^{\circ}C$, cam geçiş sıcaklığı, $T_c = 140^{\circ}C$, kritik sıcaklık, $T_f = 145^{\circ}C$, dondurulma sıcaklığı.

şekilde malzemenin elastisite modülünün hızlı bir şekilde düştüğü aralığın merkezindeki sıcaklık cam geçiş sıcaklığı olarak adlandırılmaktadır. Sert düşüşün gerçekleştiği bölgeden sonra öyle bir sıcaklık değeri gelinir ki, bu sıcaklıktan sonra elastisite modülü sıcaklık artışı ile ya çok az değişir ya da sabit kalır. Bu sıcaklık değeri de kritik sıcaklık olarak adlandırılmaktadır. Bir çok plastik malzeme için bu kritik sıcaklıkta yapılan bir yükleme sonucu oluşan gerilmeler numunenin oda sıcaklığına kadar yavaş bir şekilde soğutulması sonucu dondurulmuş olur. Başka bir deyişle oda sıcaklığında yükün kaldırılması ile donmuş olan gerilmeler ortadan kalkmaz. Bu mekanizma üç boyutlu fotoelastik çalışmalarda kullanılan gerilmelerin dondurulması yöntemidir. Kritik sıcaklığın sınır bir değeri olması sebebiyle deneyler genelde belirlenen kritik sıcaklıktan yaklaşık $3 \sim 5^{\circ}C$ yüksek bir sıcaklık değeri gerçekleştirilir. Deneyin gerçekleştiği bu sıcaklık da dondurulma sıcaklığı olarak tanımlanır.

Şekil 2.1’de gösterilen ve bu çalışmadaki benzer deneyler Dinamik Mekanik Analiz (TA Instrument Q800) sonuçları ile elde edilmiştir. Yapılan testlerde numuneler tek konsol (single cantilever) ya da çift konsol (dual cantilever) başlıklarına takılıp DMA (Dinamik Menakik Analizör)’da *multifrequency mode* operasyonu ile sabit frekans ve sıcaklık artış hızı ile oda sıcaklığından malzemenin termal özelliklerine göre belirlenen sıcaklığa kadar dinamik çevrimli yük uygulanır. Uygulanan yük malzemenin 5×10^{-9} mm kadar deplasman yapmasına yetecek kadardır. Malzemenin rijitliğinin sıcaklık ile azalması sonucu belirlenen deplasmanın yapması için uygulanması gereken kuvvet azalır. Plastik malzemelerin termal ve mekanik özelliklerinin tayini için DMA’da yapılan deneylerin işlemleri aşağıda sıralanmaktadır.

- DMA’da sırası ile pozisyon, dinamik, sıcaklık ve başlık kalibrasyonları yapılır
- Operasyonlardan *Multifrequency Mode* seçilir
- Metotlardan *Single Frequency* metodu seçilir ve 1 Hz sabit frekans girişi yapılır
- Sıcaklık değişimi $3^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$ seçilerek dakikada 3°C artış hızı ile istenilen sıcaklık değerine kadar fırının sıcaklığı yükseltilir
- Sabit frekansta dinamik verilen çevrimli yük ile malzemenin termal ve viskoelastik özellikleri ölçülür

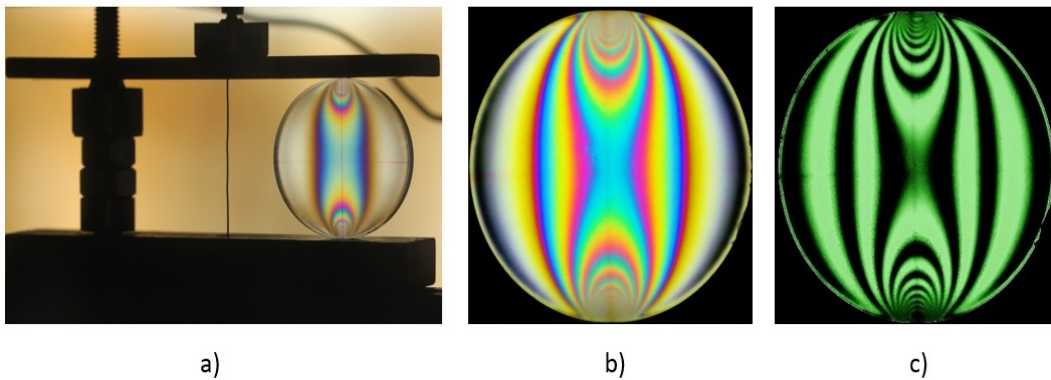
Öngerilmeli beton elemanların fotoelastik modellemesinde beton elemanların simülasyonu için iki farklı araldit malzeme kullanılmıştır. Araldit1 ve araldit2 olarak adlandırılan fotoelastik malzemelerin sıcaklık ile elastisite modüllerinin değişimi aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Fotoelastik modellerde kullanılan a) araldit1, b) araldit2 malzemelerinin sıcaklık-elastisite modülü değişimleri, T_f = dondurulma sıcaklığı.

Şekil 2.2’de iki farklı araldit malzeme için verilen sıcaklık-elastisite modülü grafiklerinden de anlaşılacağı gibi araldit1 malzemesinin cam geçiş sıcaklığı (T_g) $80 \sim 85^\circ C$ arasında olup bu değer araldit2 için $125^\circ C$ ’dir. Kritik sıcaklıkları ise sırası ile 90 ve $140^\circ C$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda tespit edilen dondurulma sıcaklıkları ise araldit1 ve araldit2 malzemeleri için sırası ile 95 ve $145^\circ C$ ’dir. Bu malzemelerin dondurulma sıcaklıklarında eksenel yük halinde elastisite modüllerini tespit etmek için DMA ile yapılan çekme deneyleri grafik olarak Şekil 2.2’de verilmektedir. Şekilde gösterilen malzemeler fotoelastik özellikte, yani çift kırılma özelliği gösteren araldit malzemelerdir. Araldit1 ve araldit2 malzemelerinin elastisite modülleri sırası ile $8.1 MPa$ ve $18.1 MPa$ olarak ölçülmüştür. Bu malzemelerin elastik sabitleri prototipin modüler oranları dikkate alındığında araldit2 malzemesinin daha uygun olduğu görülmektedir. Karşılaştırma bakımından araldit1 ile üç boyutlu 1. modelin deneyi yapılmış olup önerilmeli eleman parametrelerinin modüler oranları değişimi ile nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Bu bakımdan her iki malzeme ile fotoelastik modeller yapılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerin optik hassasiyet katsayılarının bulunması için kalibrasyon işlemleri yapılmalıdır. Malzemelerin kalibrasyonları için fotoelastik disk numuneleri kullanılmıştır. İki farklı fotoelastik malzeme için yapılan disk kalibrasyon deneyleri için gerilme-dondurulması işlemi uygulanır (Şekil 2.3). Disklerde dondurulan gerilmelerin ölçülmesi polarize mikroskop ile yapılır.



Şekil 2.3 : a) Disk kalibrasyon deneyi için gerilme dondurulması işlemi (yükleme düzeneği), b) beyaz, c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.

Malzemenin optik hassasiyet katsayısının ölçülmesi için yapılan disk kalibrasyon deneyi her iki araldit malzemesi için de aynı prosedür takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde araldit1 ve araldit2 malzemelerinden yapılan fotoelastik

disklere uygulanan yükler sırası ile 0.73 ve 1.07 kg'dır (7.25 ve 10.49 N). Bu yükler hazırlanan düzenele ile dijital kontrollü fırın içerisinde aplike edilir. Uygulanan yüklerden kaynaklanan şekil değiştirmelerin her iki malzemenin kendi krtitik sıcaklığında "dondurulması" gerekmektedir. Bu işlem için belirlenen "dondurulma" sıcaklıkları daha önceden de belirtildiği gibi araldit1 ve araldit2 malzemeleri için sırası ile 95 ve 145°C'dir. Bu sıcaklıklarda yapılan yüklemeler ile gerilmelerin dondurulması işlemleri uygulanmıştır. Dondurulan gerilmelerden disk merkezinde oluşan interferens şerit sayısının bulunması ile kalibrasyon işlemleri tamamlanmış olur. Ölçümler merkez noktadan alınan okumaların ortalaması baz alınarak gerçekleştirilmiş ve 2.2 denklemleri kullanılarak diskin x eksenindeki okumaları hesaplanmış ve teyit edilmiştir. Araldit1 ve araldit2 malzemeleri ile yapılan disk deneyinde merkez noktadan alınan ölçümler tablo şeklinde Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Kullanılan fotoelastik malzemelerin kalibrasyon ölçümleri, $\bar{O}$ =ölçüm, h =kalınlık, R =yarıçap, P =kuvvet, $\sigma_0^{1.0}$ =optik hassasiyet katsayısı.

Orta nokta	Ö.1	Ö.2	Ö.3	Ö.4	η (şerit)	h (mm)	R (mm)	P (N)	$\sigma_0^{1.0}$
Araldit1	7.65	7.95	7.65	7.92	2.404	5.06	15.475	7.25	0.25
Araldit2	7.70	7.95	7.69	7.90	2.413	4.39	24.92	10.49	0.22

Malzemenin optik hassasiyet katsayısının bulunması için diskin simetri eksenini üzerindeki asal gerilme farklarının hesaplanmalarıyla ilgili olarak aşağıda verilen 2.2 ifadeleri kullanılır.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{4P}{\pi R h} \frac{1 - x_*^2}{(1 + x_*^2)^2}; \quad x_* = \frac{x}{R} \quad (2.2a)$$

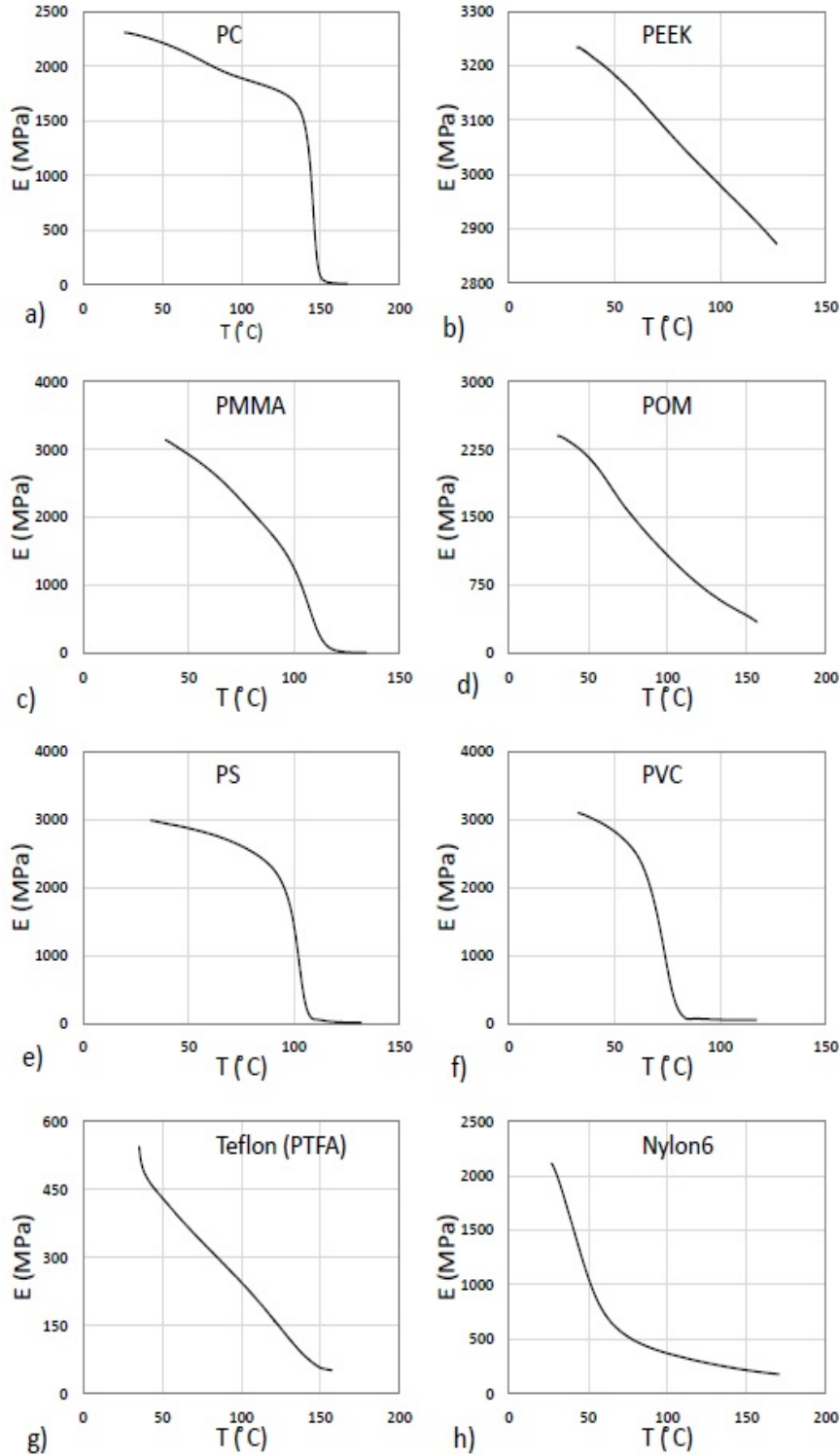
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\sigma_0^{1.0} \eta}{h} \quad (2.2b)$$

$$\sigma_0^{1.0} = \frac{4PR}{\pi \eta} \frac{R^2 - x^2}{(R^2 + x^2)^2} \quad (2.2c)$$

Burada, P , eksenel uygulanan kuvveti, R , disk yarıçapını, h , disk kalınlığını, η ise şerit sayısını ifade etmektedir. 2.2 ifadesi ile disk orta merkezi için hesap yapıldığında ($x = 0$) araldit1 ve araldit2 için elde edilen optik hassasiyet katsayıları sırası ile 0.25 ve 0.22 N/(mm.şerit) olarak bulunur.

DMA ile elde edilen sıcaklık-elastisite modülü deney sonuçlarına göre öngerilme donatısını temsil edecek olan malzeme belirlenmektedir. Deneylerde malzemelerin viskoelastik karakterleri ve elastisite modüllerinin değişiminin aynı yükleme koşullarında gerçekleştirilerek elde edilmesi önemli olduğundan tek frekansta (single

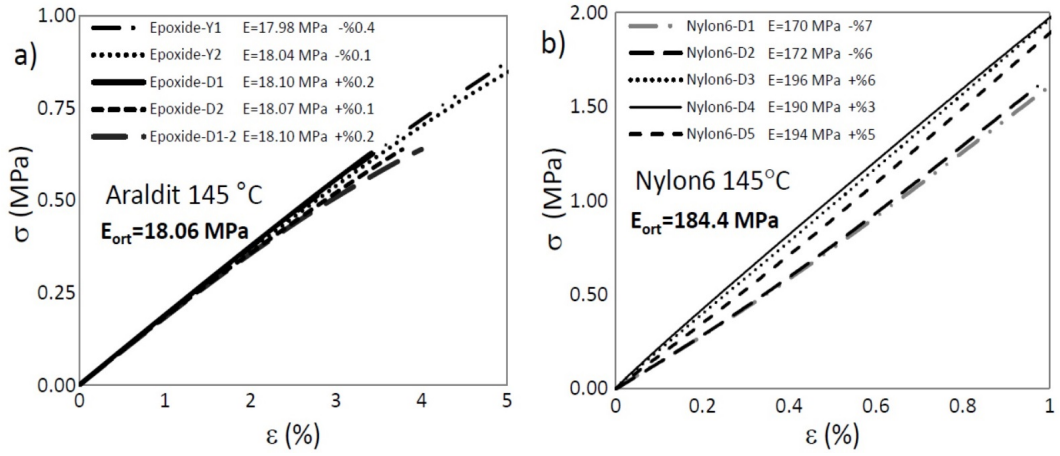
frequency) çevrimli yükleme yapılmıştır. Söz konusu deneylerin farklı termoplastikler için yapılması sonucu elde edilen grafikler aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Farklı plastik malzemeler için yapılan sıcaklık-elastisite modülü grafikleri.

Şekil 2.4'ten de görüldüğü üzere farklı plastik çeşitlerinin birbirlerinden farklı cam geçiş sıcaklıkları, (T_g), ve viskoz durumdayken farklı Young modülleri gözlemlenmektedir. 2-boyutlu ve 3-boyutlu ikinci modelde kullanılan araldit2

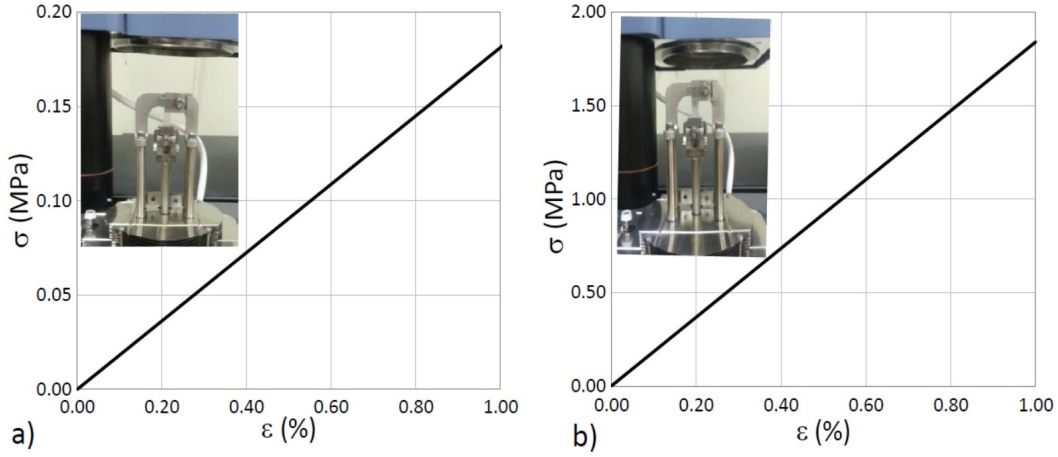
malzemenin kritik sıcaklığı baz alınarak modüler oran koşulunu sağlayan farklı optik hassas malzemelerle ilgili bilgi olmadığından modelin yapımında gereken koşulu sağlayan bir opak (mat) malzemenin kullanılması gerekmiştir. Talep edilen koşulları sağlayan opak plastik malzeme için DMA cihazı kullanılarak yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Bu durumda model malzemeleri için, Vishay PS-1 sheet, ve ikinci bir malzeme olarak opak plastik Poliamid 6, (Nylon6 (Polyamid 6): Quadrant Engineering Plastic Products ERTALON6SA) tercih edilmiştir. Modelin yapılması için seçilmiş malzemelerin 145°C sıcaklıkta DMA cihazında yapılan deneylerde elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme bağlantıları Şekil 2.5 ve 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.5 : a) Araldit2 ve b) Nylon6 için DMA'da 145°C'de yapılan çekme deneyleri, elastisite modülleri ve standart sapmaları.

Görüldüğü üzere bu bağlantılar lineer karakterdedirler. Seçilmiş optik hassas ve opak malzemelerin elastisite modülleri sırasıyla 18.06 ve 184.40 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 2.5'te her bir model malzemesi için hazırlanmış 5 numuneden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri gösterilmektedir.

Ortalamalar bazında oluşturulan gerilme-şekil değiştirme grafikleri ise Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : a) Araldit2 ve b) nylon6'nın DMA'da 145°C'de yapılan çekme deneyleri sonucu elde edilen ortalama değerler.

Grafiklerden de anlaşılabileceği gibi prototipin modüler oranı araldit2 ve nylon6 plastikleri tarafından karşılanabilmektedir.

Bir adet 2-boyutlu ve iki adet 3-boyutlu fotoelastik model oluşturulmuştur. 2-boyutlu modelde betonu temsil eden malzeme araldit2 olarak seçilmiş olup donatı nylon6 malzemesi ile temsil edilmektedir. 3-boyutlu birinci modelde beton araldit1 ile donatı nylon6 ile temsil edilmektedir. 3-boyutlu ikinci modelde de beton için araldit2 donatı için ise nylon6 malzemeleri uygun görülmüştür.

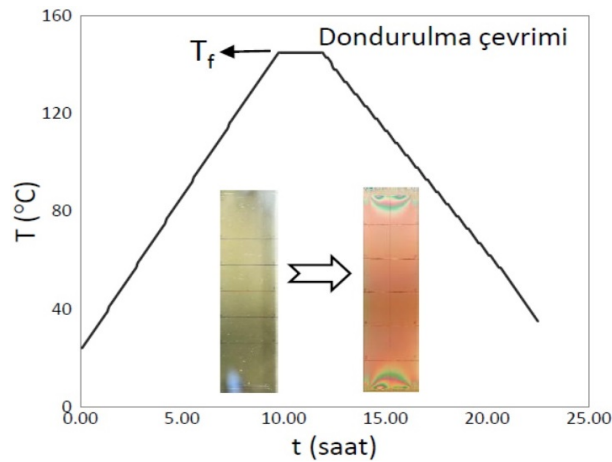
2.1 2-B Model

Bu çalışmada, betonarme plakta ön gerilmelerin dağılımının deneysel araştırılması için üç-boyutlu fototermoelastisitenin termal gerilmelerin incelenmesi için geliştirilmiş serbest termal genleşmelerin mekanik modellenmesi metodu uygulanmıştır [40–43]. Farklı malzemelerden üretilmiş yapıda ve geometrik benzeşim oranı dikkate alınarak yapılmış modelinde oluşan gerilme durumlarının benzeşimli olması için onların içerdikleri malzemelerin elastisite modüllerinin oranları eşit olması gerektiği daha önce bahsedilmişti [44]. Bilindiği gibi düzlem durumda gerilmelerin dağılımını Poisson oranının değeri kuvvetle etkilememektedir [13, 45, 46]. İlgili elemanların modelleri yapılırken modüler oran olarak tarif edilmiş olan orantı aralığı dikkate alınmalıdır. Uygulanan yöntemin önemli aşaması olan şekil değiştirmelerin dondurulması işlemi modelin yapımında kullanılacak optik hassas malzemenin, araldit2 (Vishay PS-1), ilgili test ile belirlenmiş viskoelastik sıcaklığında (145°C) yapılmalıdır. Dolayısıyla, modelin çelik donatıları ve beton kütesini temsil eden

kısımlarının bu sıcaklıktaki elastisite modüllerinin orantısı yukarıda dikkat çekilen aralığı sağlamalıdır.

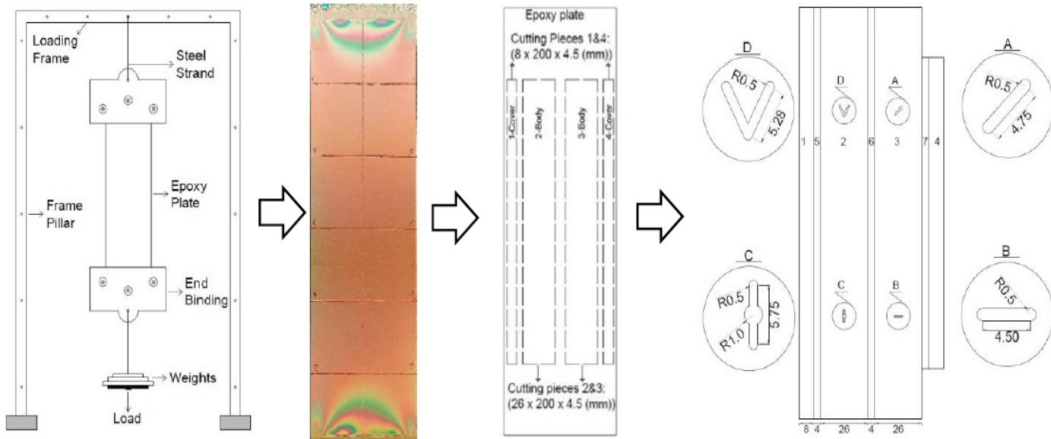
Gerçek elemanın mukavemet analizi bakımından beton kütleğinde oluşan gerilmelerin belirlenmesi daha önemlidir. Bu bağlamda, modelde yapının beton kısımlarının optik hassas malzemeden, donatıların ise seçilmiş opaque nylon6 plastiğinden yapılmış parçalar ile temsil edilmesi öngörülmüştür. İncelenen elemanın modeli geometrik benzeşim ölçeği olan $\frac{1}{4}$ oranı dikkate alınarak yapılmıştır. Uygulanan deneysel yöntemle göre modelin ilgili parçalarında öngörülen yüklerin modellenmesi üç-boyutlu fototermoelastisitenin şekil değiştirmelerin “dondurulması” metoduyla yapılır (Şekil 2.7). Dolayısıyla, modelde yüklenmenin gerçekleştirilmesi için öngörülen üniform çekme şekil değiştirmelerinin onun beton kısımlarını temsil eden optik hassas malzemeden yapılmış parçalarında “dondurulması” gerekmektedir. Şekil değiştirmelerin dondurulması işlemi için dijital kontrollü fırına yükleme düzeneği yerleştirilir ve eksenel çekme yükü için hazırlanan ağırlıklar numunede 8.66 N kuvvet oluşturacak şekilde belirlenir ve Şekil 2.8’de gösterildiği gibi numune, uçlarından tutularak yükleme düzeneği hazırlanır.

Modelin beton kısımlarını temsil eden parçalarının hazırlanması için optik hassas malzemeden yapılmış uzun şerit şeklinde numuneler kullanılmıştır. Termostatda numunelerin orta bölgesinde eksenel çekme ile $\epsilon_{0m} = 0.014$ kadar üniform şekil değiştirme durumu oluşturulur ve dondurulur. Şekil değiştirme durumunun dondurma işlemi, yüklenmiş numuneleri $5^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ hızla 145°C sıcaklığına dek ısıtarak, bu sıcaklıkta 3 saat bekletilerek ve aynı hızla oda sıcaklığına dek soğutularak yapılır.



Şekil 2.7 : Dijital kontrollü fırında uygulanan gerilmelerin dondurulması işleminin sıcaklık-zaman (T-t) grafiği ve aralditten yapılan numunenin yüklemeden önce ve sonra polariskopta çekilen fotoğrafları.

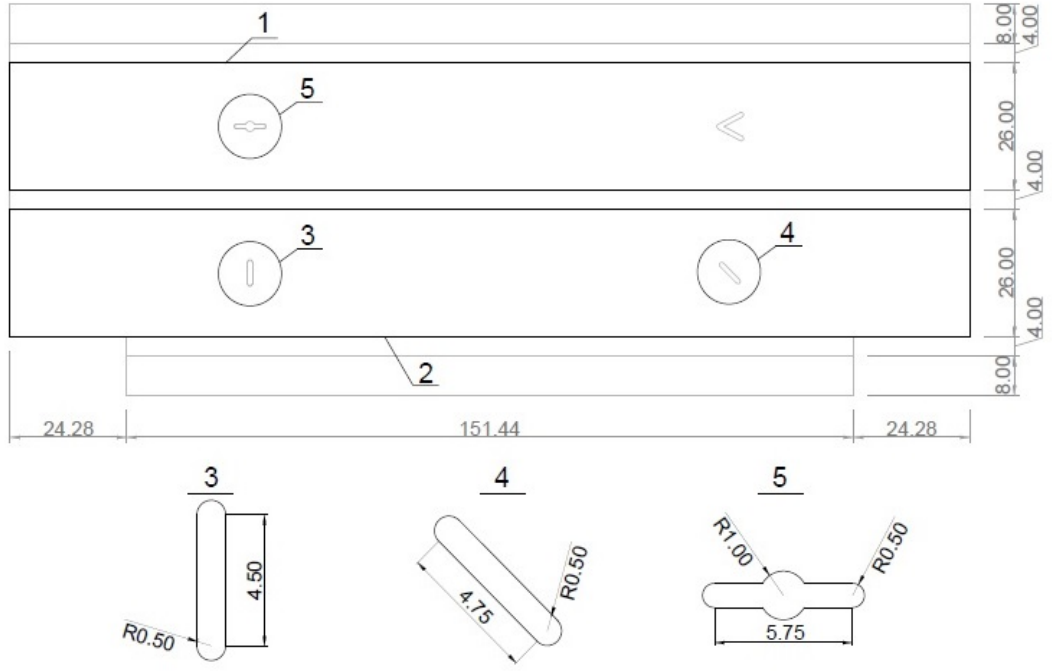
Dondurulma işleminden geçirilen numunede şekil değiştirmelerin dağılımını karakterize eden interferens şeritlerinin fotoğrafı Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Modelin beton kısımlarını temsil eden parçalar ilgili numunelerin uniform şekil değiştirme durumunun yer aldığı orta bölgelerinden kesilerek yapılır. Bu bölgeler Şekil 2.8’de gösterilen ince şeritlerdir. Bu şeritlerin ortadan kesilmesi ile üniformluğu bozan bir gerilme durumunun numunede bulunmasını önlemek içindir. İncelenen elemanın modeli, optik hassas malzeme olan araldit2 (Vishay) ve opak malzeme olan nylon6 (Quadrants ErtalonSA) parçaları gereken sıra ile yapıştırarak yapılır. Yapıştırma işlemi önerilmeli betonarme plağın öngerme donatıları ile etkileşimi ve öngerilme donatıların beton içerisinde gömülü vaziyette bulunması göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Parçaların yapıştırılması için epoksi reçine esaslı tutkal kullanılmıştır. 3-boyutlu modellerin yapımı sırasında üretimi ayrıntılı olarak anlatılacak olan yapıştırıcı epoksi için reçine/sertleştirici oranı 5/1 olarak belirlenmiş ve üretim tamamlanmıştır.



Şekil 2.8 : Modelin yükleme, kesilme ve yapıştırılma safhaları.

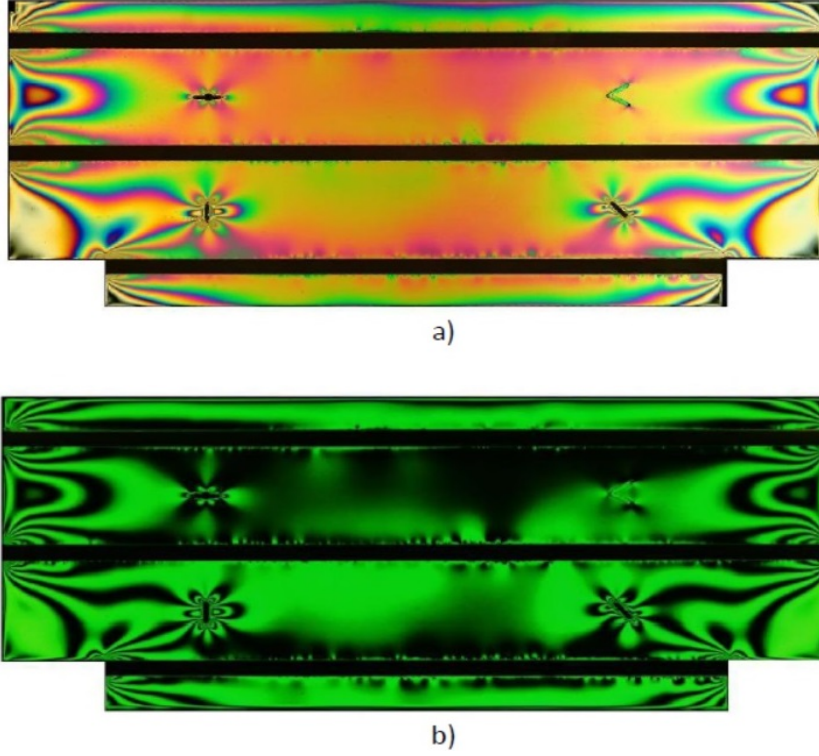
Şekil 2.8’de gösterildiği gibi yapıştırılan numuneler modelin tamamlanması için geometrik süreksizliği modelleyen sağ uç kısımlarından 25 mm derinliğinde kesilmiştir (Şekil 2.9). Kesim işlemi ile beton örtüsü olmayan öngerilme donatısının gerilme durumunu nasıl etkilediğini gözlemlemek amaçlanmıştır.

Hazırlanmış model termostata yerleştirilir ve numunelerin yüklenmesi prosesinde uygulanan ısı işlemi tabi tutulur (Şekil 2.7). Sıcaklığın 145°C’de sabit tutulduğu aralıkta modelin optik hassas malzemeden yapılmış parçalarında önceden “dondurulmuş” şekil değiştirmeleri serbestleşirler.



Şekil 2.9 : Modelin nihai şeması; 1 ve 2 no’lu parçalar 2 donatı arasında kalan beton kısımları temsil etmekte olup 3, 4 ve 5 no’lu parçalar beton içerisindeki kusurları modellemektedir.

Dondurulmuş şekil değiştirmelerin yeniden dağılımı modelde araştırılması gereken öngerilmelerin oluşmasını sağlar. Termostat ilgili rejimde oda sıcaklığına dek soğutularak modelde oluşmuş gerilme-şekil değiştirme durumu “dondurulur”. Modelde oluşmuş gerilmelerin dağılımını karakterize eden interferens şeritlerinin polariskopta çekilmiş fotoğrafı Şekil 2.10’da verilmiştir.

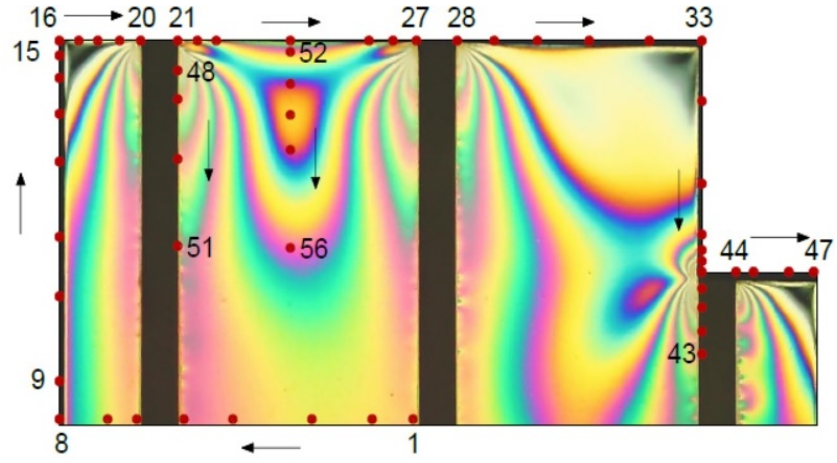


Şekil 2.10 : Modelin a) monokromatik ve b) beyaz ışık altında polariskopta çekilen fotoğrafları.

Şekil 2.10’da polariskopta monokromatik ve beyaz ışık altında gerilme değerlerinin temsil edildiği şeritlerin bazı bölgelerde sıklaştığı gözlemlenmektedir. Bu bölgeler kusur civarları, modelin basamaklı bölgesi ve öngerilmelerin uygulandığı ankraj noktalarıdır. Ayrıntılı ölçümler ve analiz aşağıdaki bölümde anlatılmaktadır.

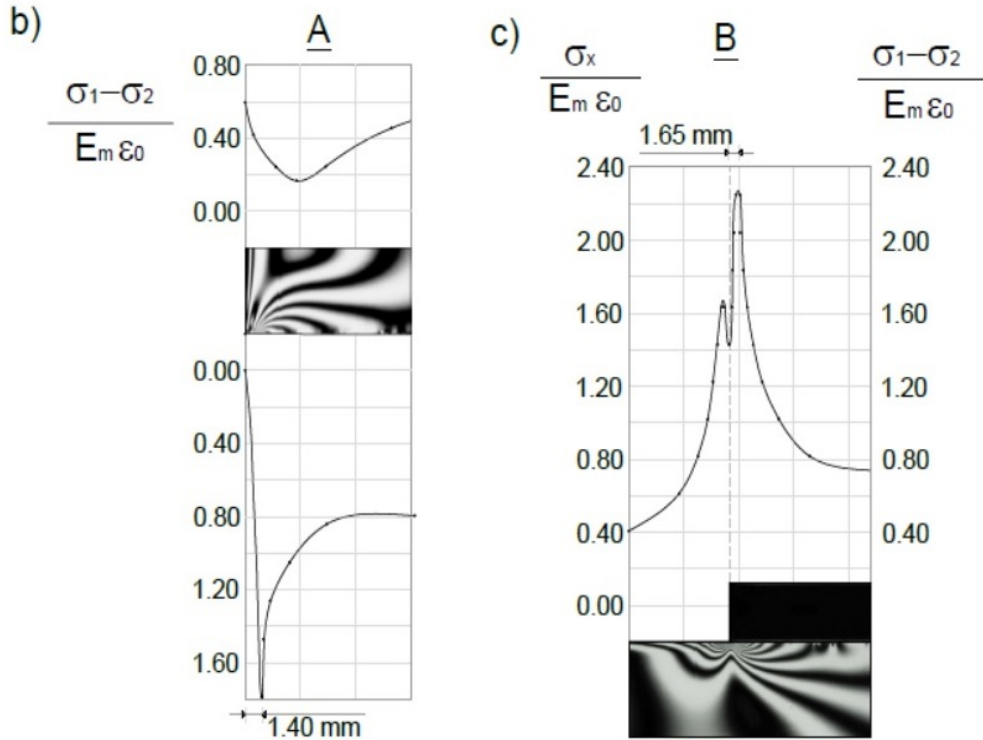
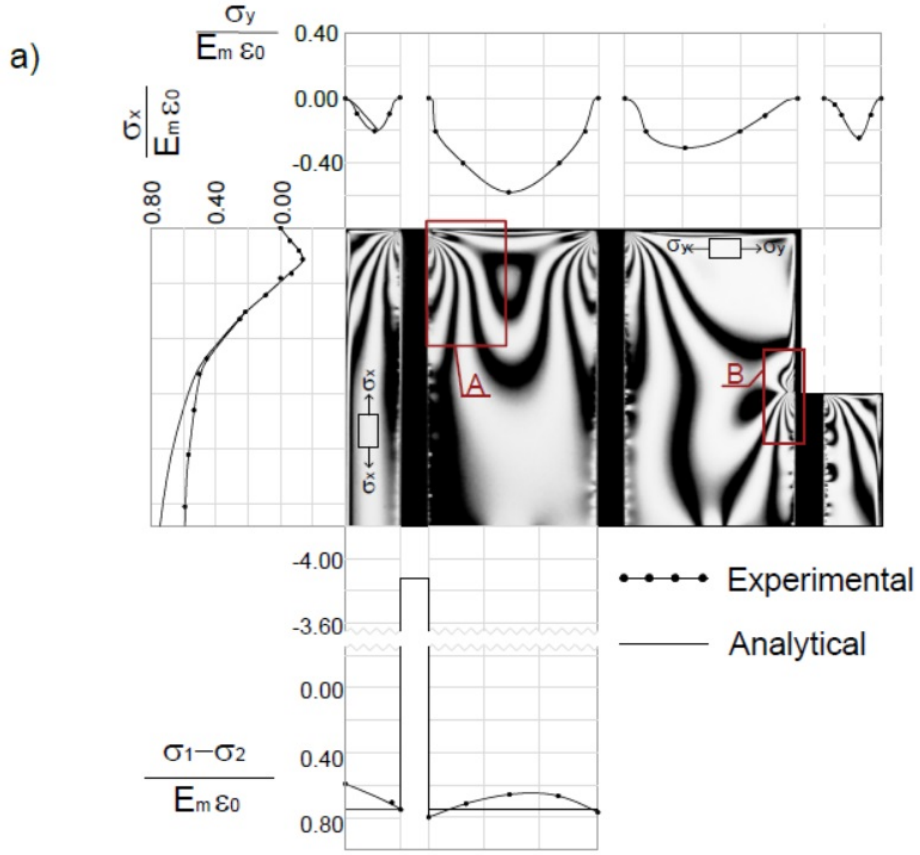
2.1.1 2-B Model’in gerilme analizi

Modelin üst kısmında sürekliliğin geometrik ve fiziksel olarak bozulduğu bölgesinde gerilmelerin dağılımı karmaşıktır ve yığılma bölgelerinin oluşması ile karakterize edilebilirler. Bu bölgelerin uzunluğu ilgili kısımlarının genişliklerinin 2~3 katına kadar ulaşabilir. Modelin orta bölgesinde gerilme dağılımı, yaklaşık, üniform olarak karakterize edilebilir. Modelin ölçümlerinin yapılacağı noktalar Şekil 2.11’de verilmektedir. Ölçüm noktalarında yapılan ölçümler okumalar ile birlikte Ek’te tablo halinde Çizelge A.1 olarak verilmektedir.



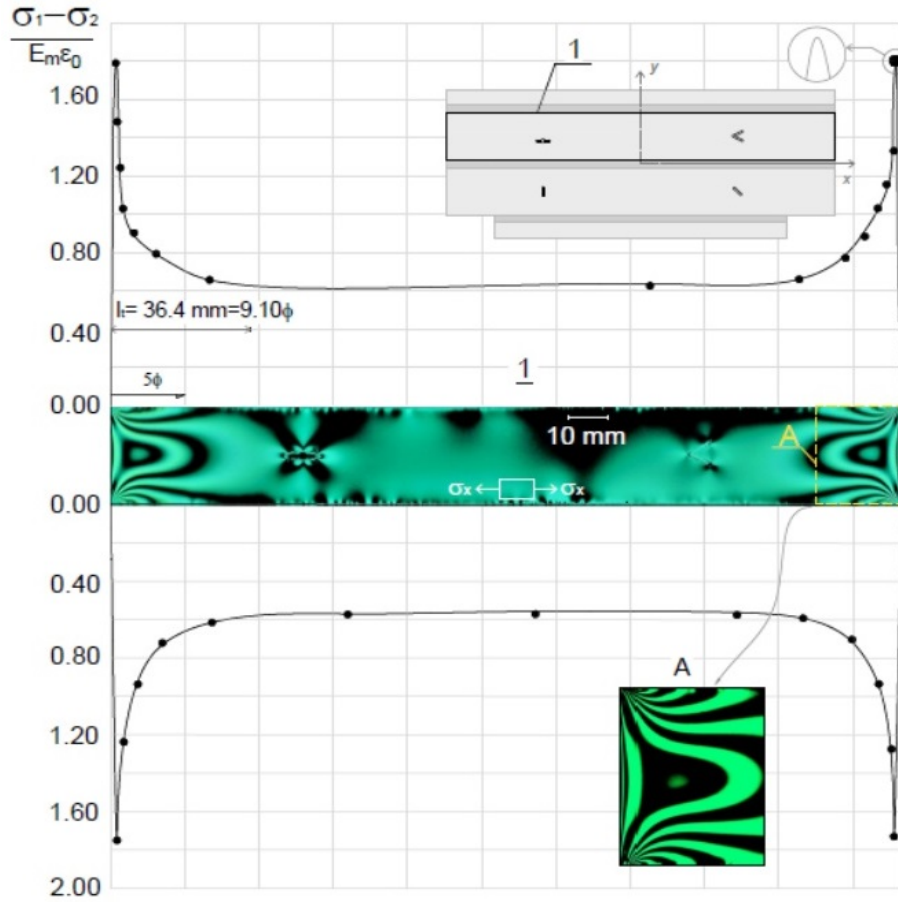
Şekil 2.11 : 2-B Model üzerinde belirlenen ölçüm noktaları.

Modelde oluşmuş gerilme durumu fotoelastisitenin yöntemleriyle polariskop (universal bench 060-XDP, basic polariscope 052) ve Leica DM4500 P polarizon araştırma mikroskobu kullanılarak incelenmiştir [29,30]. Elde edilmiş sonuçların bir kısmı grafik olarak Şekil 2.12’de verilmektedir.



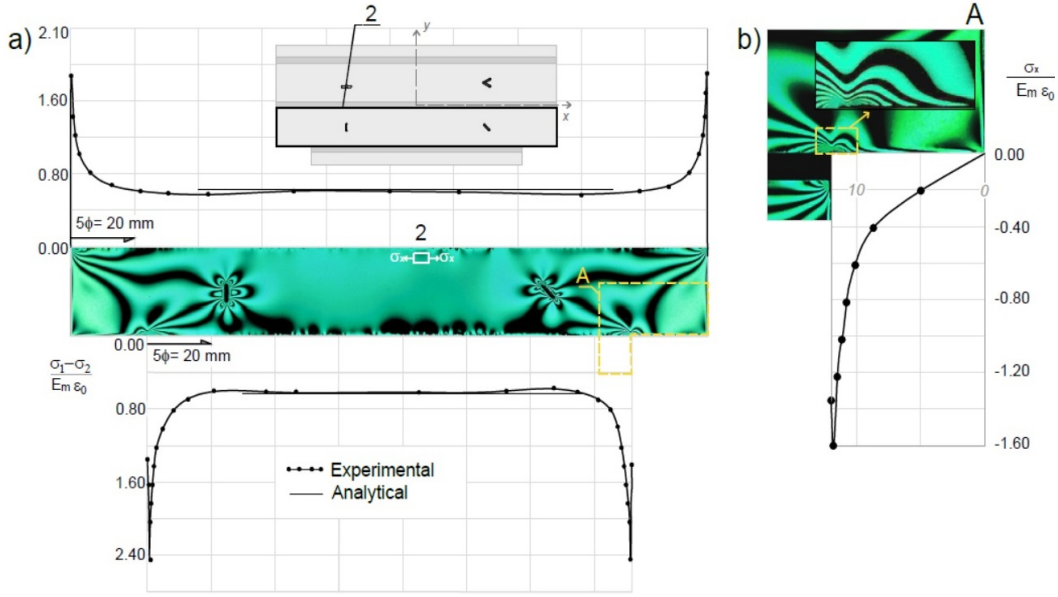
Şekil 2.12 : Modelin a) kenarlarında; b) birleşim arayüzü ve orta ekseninde; ve c) basamaklı bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.

Şekil 2.12’de gösterilen gerilme durumu öngerilmeli plak elemanın ankraj bölgelerinde gerilme yığılmalarının olduğunu göstermektedir. Gerilme yığılmaları serbest uçlara doğru birleşim arayüzünde meydana gelmektedir. Bu bölgelerin dışında öngerilmelerin aktarılamadığı basamaklı bölgede iki farklı yığılma noktası meydana gelmiştir. Buradaki yığılmalardan birisi basamaklı bölgede, betonun serbest arayüzünün birleşim noktasına yakın bir bölgesinde, diğer yığılma ise birleşim arayüzünün serbest hale geldiği noktaya yakın bir bölgede meydana gelmektedir. Öngerilmelerin aktarıldığı yığılma noktasında oluşan gerilmeler hem ankraj bölgesinde oluşan gerilmelerden hem de betonun öngerilme aktarılamayan kısmındaki yığılma bölgesinde oluşan gerilmelerden daha yüksek değerdedir.



Şekil 2.13 : Modelin birleşim arayüzeylerinde oluşan gerilmeler.

Şekil 2.13’te gösterilen grafik ankraj bölgeleri ve modelin orta bölgesinde oluşan kayma gerilmelerinin modelin arayüzeyi boyunca gösterimidir. Burada maksimum kayma gerilmelerinin değeri grafikte verilen asal gerilme farklarının yarısıdır. Modelin orta bölgesinde üniform olan gerilmelerin uçlara doğru ekstrem değerlerine kadar arttığı ve şerit sayılarının bu bölgelerde yoğunlaştığı şekilden görülmektedir.



Şekil 2.14 : Modelin basamaklı bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmeler, a) basamaklı bölgenin birleşim arayüzündeki aderans gerilmeleri, b) süreksizlik noktasındaki gerilme yığılmaları.

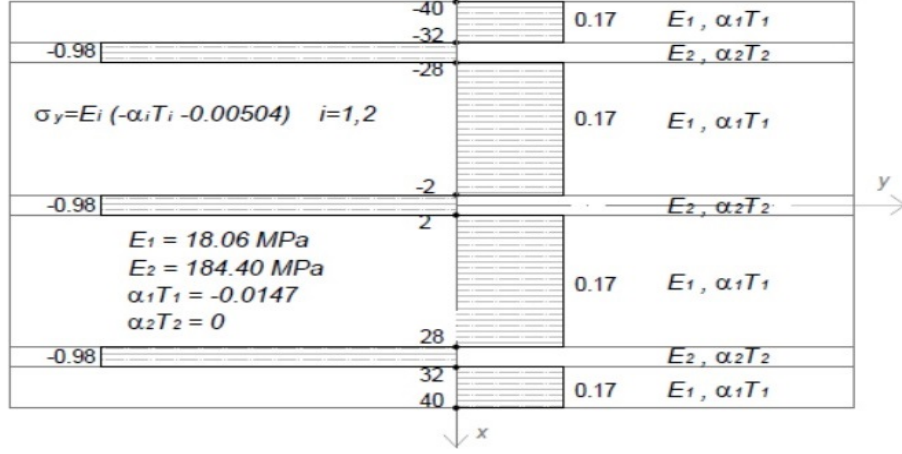
Elemanın basamaklı bölgesi için verilen Şekil 2.14’te gerilme yığılmalarının basamaklı bölgelerde ankraj bölgesinden daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Elemanın serbest uçlarından uzak bölgesinde gerilme durumu betonu temsil eden parçalarda üniform baskı ve donatıları temsil eden parçalarda ise üniform çekme olarak karakterize edilebilir. Bu bölgede oluşan gerilmeler, fototermoelastisitenin problemleri ile benzeşime dayanarak, aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanabilir [13].

$$\sigma_x = E_i \left(-\alpha_i T_i + \frac{\int_{-h}^h E_i \alpha_i T_i dy}{\int_{-h}^h E_i dy} + \frac{\int_{-h}^h E_i \alpha_i T_i y dy}{\int_{-h}^h E_i y^2 dy} \right) \quad (2.3)$$

Modelin orta noktalarının analitik olarak incelenmesi 2.3 formülü kullanılarak yapılır.

Bu formüle göre modelde oluşan gerilmeler aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.15 : Modelin orta noktalarında oluşan boyutsuz gerilmelerin analitik sonuçları.

Arayüzeylerin yakınlığında deneysel ölçülmüş gerilmelerin değerlerinin analitik yöntemle bulunmuş sonuçlarla uyuşumu yeterlidir (Şekil 2.15). Arayüzden geçerken normal boyutsuz gerilmeler beton kısımlardaki $\frac{\sigma_{xm}^a}{E_m \epsilon_{0m}} = -0.67$ den donatıdaki $\frac{\sigma_{xm}^i}{E_m \epsilon_{0m}} = 3.87$ değerine dek değişir. Bu bölgede normal gerilmelerin sıçrayışı mutlak değerce $\frac{\sigma_x^i - \sigma_x^a}{E_m \epsilon_{0m}} = 3.87 + 0.67 = 4.54$ değerine ulaşır.

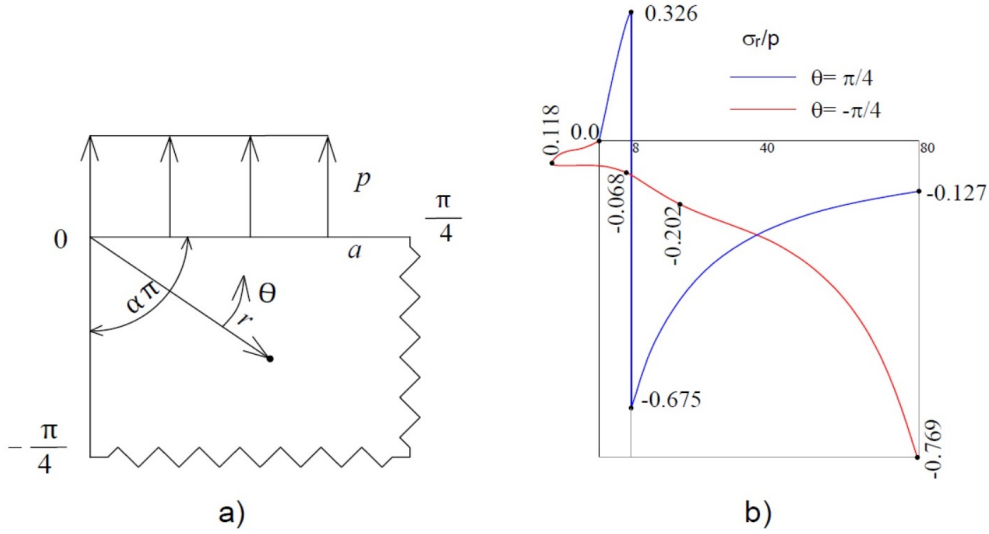
Modelin serbest yüzeyinde oluşan gerilmeler basınç ve çekme gerilme bölgelerinin değişimi ile karakterize edilebilirler ve mutlak olarak $\frac{\sigma}{E_0 \epsilon_0} = 0.60$ değerine ulaşırlar. Modelin üst yüzeyinde oluşan gerilmelerin yaklaşık olarak karşılaştırılması için veriler termoelastisitenin *strain suppression* yöntemi uygulanarak yapılabilir [13,47].

Değerlendirme sadece sıcaklıktan genleşme katsayıları farklı olan iki malzemeden oluşturulmuş, çeyrek düzlem için (Şekil 2.16) Papkovich problemi kullanılarak yapılabilir [48]. Çeyrek düzlemin köşe (apex) bölgesinde $\theta = \frac{\pi}{4}$ yüzeyin $0 \leq r \leq a$ aralığında etkiyen uniform p çekme yükünün oluşturduğu gerilme durumu aşağıdaki ifade ile belirlenebilir [49]:

$$2\pi a i e^{-i\gamma} \phi'(z) = \int_0^\infty p(r_0, \gamma) \phi_0(\xi, \gamma) \frac{dr_0}{r_0} \quad (2.4)$$

burada $\xi = -i\left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \frac{i\theta}{e^{\alpha}}$ ve $\phi_0(\xi, \gamma)$ fonksiyonu yaklaşık olarak;

$$\begin{aligned}
\phi_0(\xi, \gamma) = & \frac{\sqrt{\xi}}{\xi-1} + \frac{1}{4} \ln \frac{\sqrt{\xi}+1}{\sqrt{\xi}-1} \left[1 - \frac{1}{\xi}\right] + \frac{0.3407}{\sqrt{\xi}} + 0.1593 \sqrt{\xi} \ln(\xi-1) \left[1 - \frac{1}{\xi^2}\right] \\
& - 0.3186 \sqrt{\xi} \ln \sqrt{\xi} - \frac{\pi i 0.1593}{\xi \sqrt{\xi}} - ie^{-2i\gamma} \left\{ \frac{i}{4} \ln \frac{\sqrt{\xi}-1}{\sqrt{\xi}+1} \left[1 + \frac{1}{\xi}\right] - \frac{\pi}{4\pi} + \frac{0.1765}{\xi \sqrt{\xi}} + \right. \\
& \left. \frac{0.5353}{\sqrt{\xi}} - 0.1765 \sqrt{\xi} + 0.1235 \sqrt{\xi} \ln(1+\xi) \left[1 - \frac{1}{\xi^2}\right] - \sqrt{\xi} \right. \\
& \left. [0.2470 + 0.3530\xi] \ln \sqrt{\xi} + 0.1765 \ln(1+\xi) \left[\xi \sqrt{\xi} - \frac{1}{\xi^2 \sqrt{\xi}}\right] \right\}
\end{aligned} \quad (2.5)$$



Şekil 2.16 : a) Çeyrek düzlem, b) çeyrek düzlem üzerindeki boyutsuz gerilmeler.

İncelenen durumda kamanın merkez açısının $\frac{\pi}{2}$ ve yükün yüzeye (kontura) normal etkidiğinden, ilgili olarak $\alpha = \frac{1}{2}$ ve $\gamma = 0$ 'dır. Çeyrek düzlemin serbest yüzeylerinde oluşan gerilmeler aşağıdaki ifade ile tanımlanır [50]:

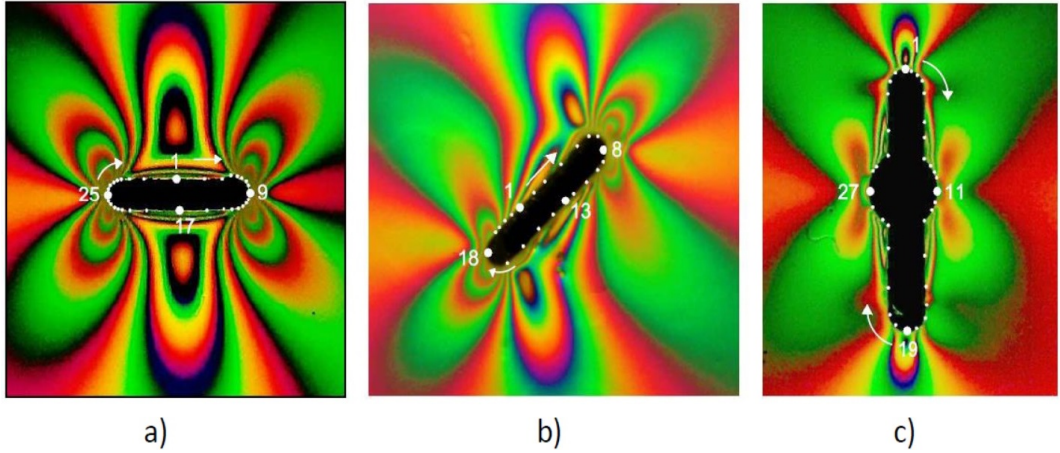
$$\sigma_r + \sigma_\theta = 4 \operatorname{Re} \phi'(z) \quad (2.6)$$

Böylelikle, 2.4 ve 2.6 ifadeleri dikkate alınarak kamanın yüzeylerinde etkiyen σ_r normal gerilmeleri hesaplanabilir. Belirlenmiş gerilme durumuna çeyrek düzlemin $\theta = \frac{\pi}{4}$ yüzeyinin $0 \leq r \leq a$ aralığında, *strain suppression* metoduna dayanarak, normal $p = -\varepsilon_0 E_0$ baskısı uygulanarak söz konusu dörtte bir düzlemin kontuarında etkiyen normal σ_r gerilmeleri elde edilebilir [47]. Gerilmelerin sayısal değerleri $\theta = \pm \frac{\pi}{4}$ yüzeyi için $a = 8 \text{ mm}$ olduğunda Çizelge 2.2'de boyutsuz olarak verilmiştir. Bu veriler modelde deneysel yöntemle bulunmuş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan veriler çeyrek düzlemin köşe bölgesinde ve köşe ile şeridin genişliğinin üç misli kadar uzaklığı aralığında yeterli uyum sağlarlar. Sonuç olarak, bu aralıkta oluşan

Çizelge 2.2 : Kama yüzeyindeki normal gerilme bileşenlerinin değişimi.

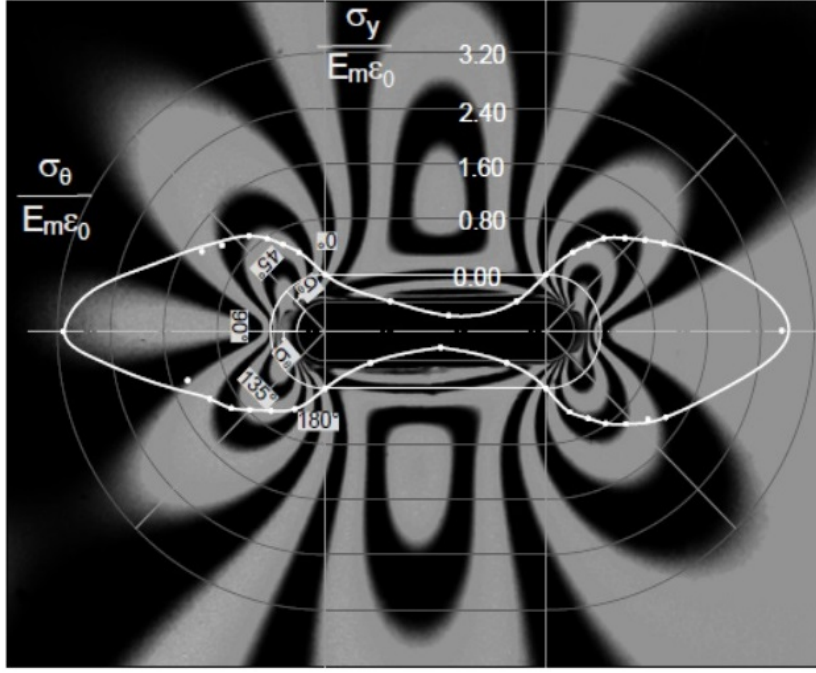
	r (mm)	2	4	5.6	8	12	16	25.6	40	80
$\frac{\sigma_r}{p}$	$\theta = \frac{\pi}{4}$	0.069	0.163	0.231	0.326	-0.553	-0.468	-0.337	-0.235	-0.127
	$\theta = -\frac{\pi}{4}$	0.048	0.107	0.118	-0.068	-0.066	-0.202	-0.435	-0.614	-0.796

gerilmelerin değerlerine modeli oluşturan malzemelerin elastisite modüllerinin farklı olmasının etkisi büyük değildir. Çeyrek düzlemin köşe bölgesinden uzaklaştıkça analitik ve deneysel veriler arasındaki fark $\frac{|0.6-0.67|}{0.6} 100 \cong \%11.11$ 'e ulaşır. Plâgın modelinde sayısal değerce büyük gerilmeler arayüzlerin serbest yüzeyle kesiştikleri bölgelerde oluşurlar ve modelin içerisinde serbest yüzeyin civarında yer alırlar. Asal gerilmelerin boyutsuz olarak farkı serbest yüzeyin doğrusal kısmında $\frac{(\sigma_1-\sigma_2)_m}{E_m \epsilon_{0m}} = 1.80$ (yüzeyden 1.40 mm uzaklıkta) ve basamaklı bölgede $\frac{(\sigma_1-\sigma_2)_m}{E_m \epsilon_{0m}} = 2.25$ (yüzeyden 1.65 mm uzaklıkta) değerlerine ulaşılır (Şekil 2.12b, c). Böylelikle maksimum kayma gerilmeleri elemanın içerisinde serbest yüzeyden, yaklaşık olarak, donatıyı temsil eden parçanın genişliğinin (% 35~40)'ı kadar uzaklıkta oluşurlar.

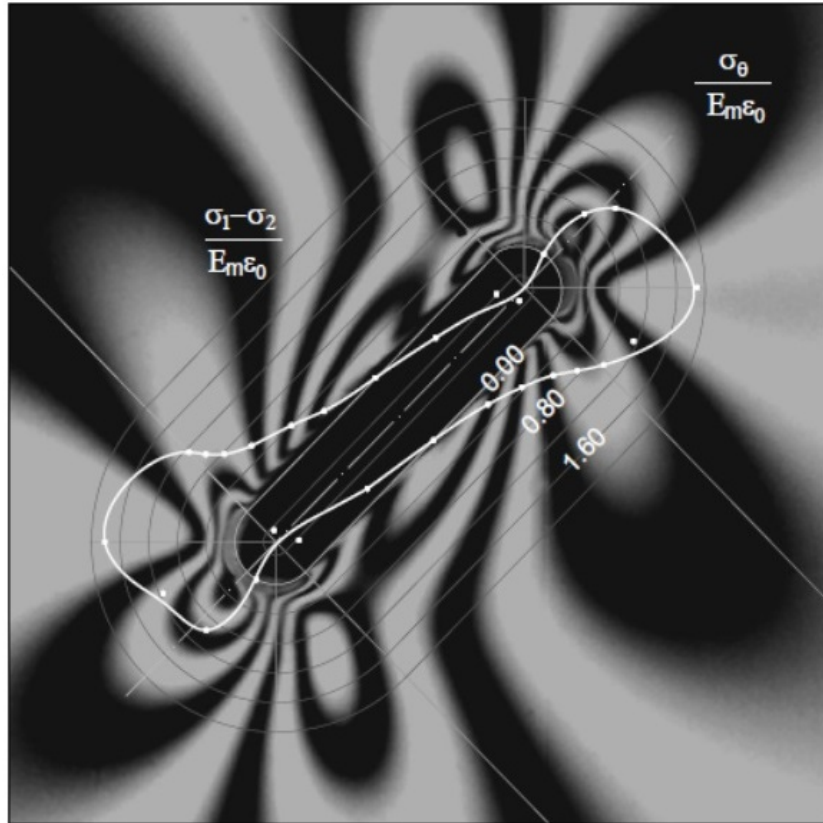


Şekil 2.17 : Modellenen kusurlarda belirlenen ölçüm noktaları.

Modellenen 3 adet kusur civarında belirlenen ölçüm noktaları Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Yatay, eğik ve dikey kusur için sırası ile belirlenen 32, 22 ve 34 adet noktada yapılan ölçümler Ekte Çizelge A.2, A.3 ve A.4'te verilmektedir.



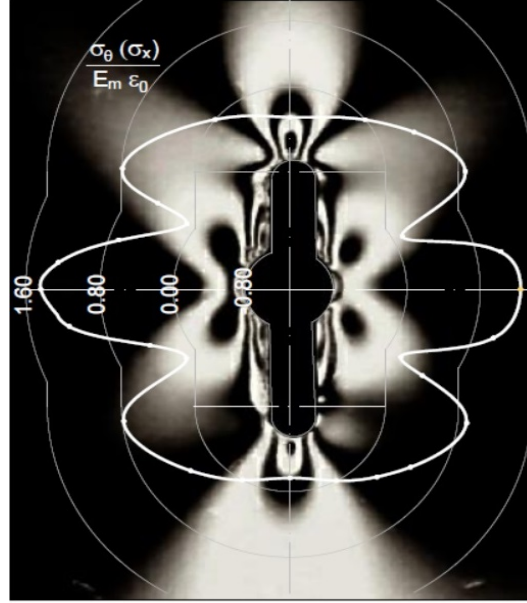
Şekil 2.18 : Modelde yatay kusur civarında oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.



Şekil 2.19 : Modelde eğik kusur civarında oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.

Modellenen kusurlarda oluşan boyutsuz gerilmelerin gösterimi Şekil 2.18 ve 2.19’da verilmektedir. Yükleme doğrultusuna dik olan asal eksenli eliptik kusurda oluşan gerilmeler beklenildiği gibi uçlarda maksimum değerine ulaşmaktadır. Kusurun orta

üst kısmında negatif değerde olan gerilmeler sağ ve sol uçlarda ekstrem noktalarına geometriden dolayı çok hızlı bir şekilde çıkarlar (Şekil 2.18). Şekil 2.19’da yatay kusurdakine benzer bir geometrik kusur modellenmiştir. Yükleme doğrultusu ile 45° açı yapan eliptik boşlukta oluşan gerilmeler asal eksen uçlarında maksimum değerine ulaşmaktadır. Fakat bu sefer gerilmelerin doğrultuları şeritlerin dizilişinden de anlaşıldığı üzere yükleme doğrultularına dik yönde olduğu gözlemlenmektedir. Eğik kusur olarak adlandırılan bu bölgede oluşan maksimum gerilmeler beklenildiği gibi yatay kusurda oluşan gerilmelerden % 17~20 daha küçük değerdedir.



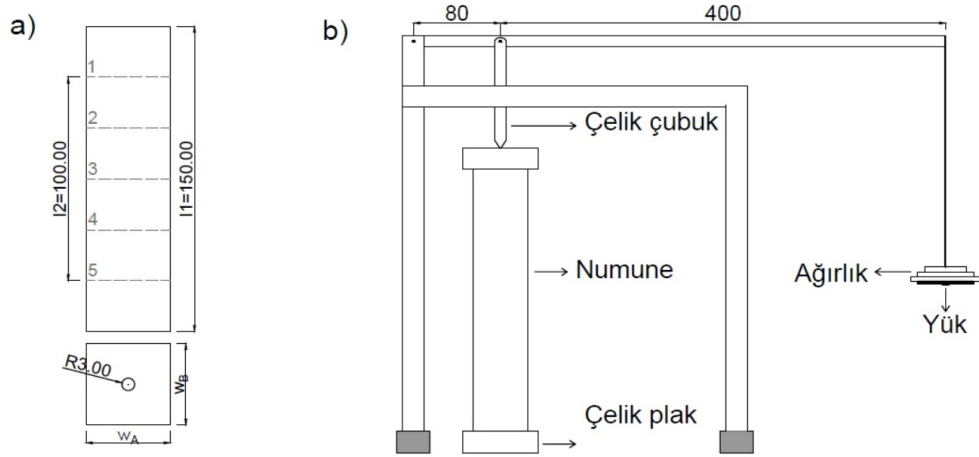
Şekil 2.20 : Modelde dikey kusur civarında oluşan boyutsuz gerilmelerin dağılımı.

Şekil 2.20’de gösterilen kusur dikey boşluk ortasında, boşluk genişliğinin 2 katı çapında bir dairesel oyuktan meydana gelmektedir. Modellenen kusurun üst kısımlarında gerilmeler negatif değerler almaktadır. Fakat geometrinin doğasından kaynaklanan hızlı değişimler modelin yan kısımlarında ilk öngerilme değerinin yaklaşık 1.5 katı kadar değerlere ulaşmaktadır. Yukarıda bahsedilen şekillerde verilen gerilme değerleri öngerilmeli beton elemanların iç yapısında oluşan gerilme dağılımlarının oldukça tehlikeli boyutlara ulaşabileceğini göstermektedir. Verilen şekillerde modellenen kusurlar tam olarak bir çatlağı modellemeyip benzer oyuk geometrileri ile çatlak olduğu durumda karşılaşılabilecek sorunlar hakkında bilgi vermektedir. Öngerilme uygulanan bir beton elemanın aderansı ile betona aktarılan öngerilme kuvvetleri beton elemanın homojen ve gerilmelerin üniform olarak dağılımı varsayımına göre dizayn edilmektedir. Betonun oldukça karmaşık olan mikro yapısı

dikkate alındığında oluşabilecek herhangi bir kusur, çatlak veya boşluk etrafında Eshelby'nin "inclusion" problemine göre gerilme yığılmaları meydana gelmektedir [51]. Eğer beton tamamen gevrek bir yapıda olsaydı oluşan herhangi bir çatlak ilerleyişi çatlak köprüleme (crack bridging) durumunun yetersiz olduğu durumlarda toptan göçmeye sebebiyet verebilirlerdi. Çatlak ilerleyişinin kuazi-gevrek bir malzemede plastikleşen uç ilerleyişi çatlak ilerlemelerini yavaşlatmaktadır. Yalnız beton içerisinde bilinmeyen ve olması çok muhtemel olan non-üniform yapılanmalar çatlakların birleşmesine ve sanılan dayanım verilerinin altında bir performans göstermesine neden olabilir. Homojenliğin artması gevrekliğin ve aynı zamanda mukavemetin artmasına neden olur. Homojen yapıdaki bir beton elemanın dizayn kuvvetleri ile elde edilen bilgiler yapılan hesapların tutarlılığını arttırdığından, çatlak oluşturabilecek homojen olmayan unsurların oluşması konusunda önlem alınması gerekmektedir.

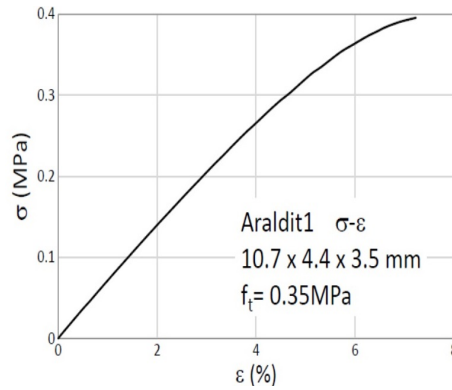
2.2 3-B Model-1

Araldit1 malzemesi ile yapılan üç-boyutlu modelin prototipi kare en kesitli öngerilmeli beton eleman olarak belirlenmiştir. Modelin boyutları $40 \times 40 \times 150 \text{ mm}$ olup 6 mm çapında öngerme donatısı en kesitin merkezinden geçmektedir (Şekil 2.21). Modelin dondurulma çevrimi ile yüklenmesi toplamda 24 kg ağırlık konularak Şekil 2.21’de gösterilen düzenek yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.21 : 3-B Model-1 için a) kullanılan numunenin geometrisi, b) yükleme düzeneği (ölçüler mm’dir).

Yükleme düzeneği için modelin stabilitesinin sağlanması konusunda yapılan hesaplar malzemenin mukavemeti ve burkulma yükü analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Malzemenin çekme mukavemeti DMA ile araldit1 malzemesi için 95°C ’de yapılan çekme testi ile belirlenir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 : Araldit1 malzemesi için yapılan 95°C ’deki çekme testi, f_t = çekme mukavemeti.

Çizelge 2.3 : Kare enkesitli 3-B Model-1 numunesinin yükleme durumu ile oluşan şekil değiştirmeler, (A ve B kare numunede 2 farklı kenarı, 0 ve 1 alt indisleri ise sırası ile yüklemeye önceki ve sonraki durumları, w ise kalınlığı belirtmektedir) .

	A_0	B_0	A_1	B_1	ϵ_{ort}
w_1	39.69	39.05	40.04	39.35	0.00825
w_2	39.68	39.08	40.06	39.35	0.00842
w_3	39.69	39.06	40.07	39.35	0.00849
w_4	39.70	39.04	40.08	39.35	0.00901
w_5	39.71	39.07	40.08	39.37	0.00837
w_{ort}	39.69	39.06	40.07	39.36	0.00847
l	150.10	150.05	147.2	147.2	0.0191

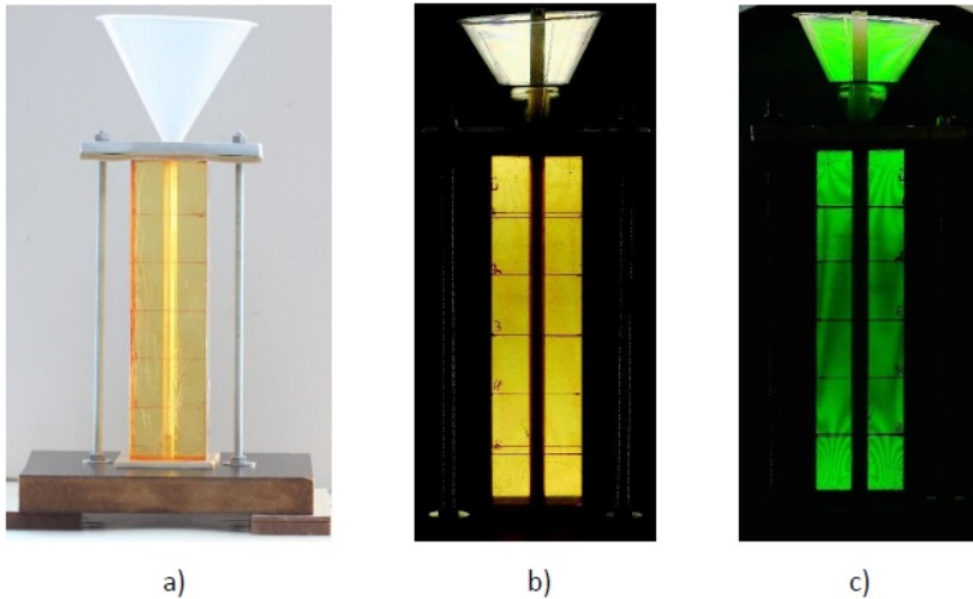
Şekilden de görüldüğü üzere dayanım testi sonucu üç-boyutlu birinci model için kullanılan araldit1 malzemenin dondurulma sıcaklığındaki çekme mukavemeti $f_{t1} = 0.35 \text{ MPa}$ 'dır. Akma mukavemeti baz alınarak hesaplanan elastik sınırlar içerisinde uygulanabilecek maksimum kuvvet ise 537 N (54 kg)'dur. Burkulma'dan dolayı kullanılabileceğimiz maximum kuvvet 257 N 'dur (26 kg). 235 N 'luk kuvveti sağlamak için numuneye 24 kg 'lık yük asılmıştır. En kesit alanı 1532 mm^2 olan numuneye uygulanan gerilme 0.154 MPa 'dır. Numunenin yaptığı şekil değiştirme ise 0.019 ($E = 8.1 \text{ MPa}$)'dur. Numuneye Şekil 2.21b'de gösterilen yükleme düzeneği yardımı ile uygulanan gerilmelerin dondurulması için numune fırın içerisinde belirlenen dondurulma sıcaklığına (95°C) kadar 5°C/saat ile çıkartılır. Bu sıcaklıkta 4 saat bekletilen numune sıcaklığın artış hızı ile aynı hızda oda sıcaklığı olan yaklaşık $25\sim 30^\circ\text{C}$ 'ye kadar düşürülür. Dondurulan gerilmelerin polariskopta çekilen fotoğrafı Şekil 2.23b ve c'de gösterilmektedir.

Ağırlıkların asılarak yüklerin dondurulması işleminden sonra modelde donatıya karşı gelen nylon6 plastiğinden imal edilmiş 6 mm çapındaki malzemenin yapıştırılması işlemine geçilmektedir.

Yapıştırma işleminin adımları aşağıdaki gibidir:

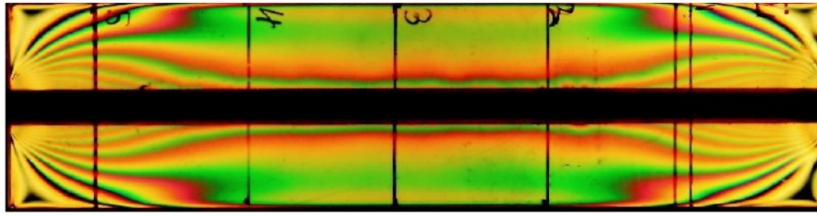
- Model malzemelerinin tüm yapışma yüzeyleri alkol ile temizlenir
- Yapıştırma işlemi için numunenin üst ve alt kısımlarından sıkıştırarak kısaç düzeneği hazırlanır (Şekil 2.23)
- Merkezinden 6 mm çapında delik açılan epoksi kısaç düzeneğinin arasına konur

- Araldit numunenin üst ve alt yüzeylerine izolasyonun sağlanması için ortası delinmiş kauçuk (elastomer) parça yerleştirilir
- Yapıştırma işleminden önce düzeneğin sıdırmazlık testi için alkol ile test yapılır
- Araldit numune içerisinden alkol temizlendikten sonra uçucu maddelerin buharlaşması için 15 dakika beklenir
- Yapıştırma işlemi için epoksi yapıştırıcı hazırlanır.
- Epoksi yapıştırıcı hazırlanırken reçine/sertleştirici oranı 5/1 dikkate alınarak sırası ile 32.5 gr reçineye 6.5 gr sertleştirici beher içerisine konulur
- Cam beher, içerisinde su bulunan kabın içerisine konularak ocakta 55°C 'ye kadar ısıtılır
- Belli bir kıvama gelen epoksi yapıştırıcı, yapıştırma düzeneği üzerindeki huniden numunenin ortasındaki deliği tam dolduracak şekilde dökülür
- Modelin öngerme donatısını temsil eden nylon6 malzemesinden yapılmış 6 mm çapındaki plastik çubuk, içi epoksi dolu deliğe sıkıca yerleştirilir
- İçerisinde hava kabarcığı kalmadığından emin olunduktan sonra yapıştırıcının kendi polimerizasyonunu tamamlaması için fırında 40°C 'de 8 saat postkür uygulaması yapılır.

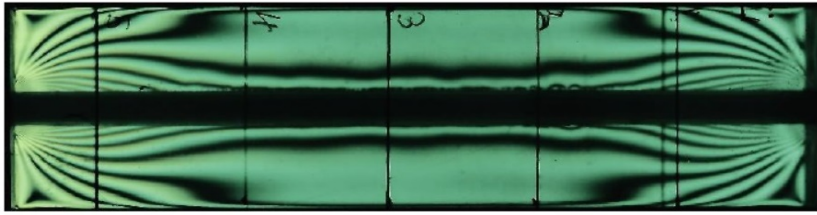


Şekil 2.23 : a) Yapıştırma işlemi için kurulan düzenek, b) yüklenmiş kare kesitli üç boyutlu modelin beyaz, c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.

Donatı ile beton arasındaki adanstan kaynaklanan kayma gerilmeleri vasıtası ile verilen öngerilmelerin aktarılması için donmuş olan şekil değıştirmelerin serbest hale getirilmesi yani çözümleri gerekmektedir. Şekil 2.23'te gösterilen yüklü numune yapışma işleminden sonra öngerilmelerin tekrar dağılmasını sağlamak için dondurulma işlemine tabi tutulur. Bu işlemi gerçekleştirmek için model dijital kontrollü fırına konularak dondurulma sıcaklığı olan 95°C 'ye daha önce bahsedilen dondurulma çevrimine uygun olarak çıkartılır bu sıcaklıkta 4 saat bekletilir ve yine 5°C/saat hız ile oda sıcaklığına kadar soğutulur. Çözülmüş olan öngerilmelerin 3-B Model-1 içerisindeki dağılımını karakterize eden interferens şeritleri Şekil 2.24'te gösterilmektedir.



a)



b)

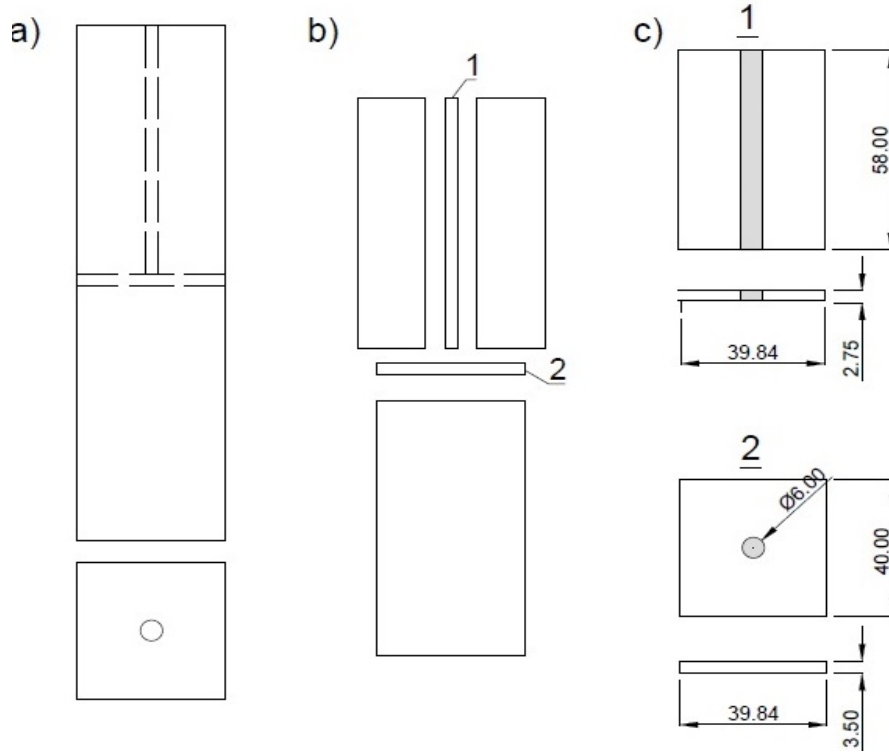
Şekil 2.24 : 3-B Model-1'de öngerilmelerin dağılmasını karakterize eden interferens şeritleri; a) beyaz b) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.

Şekil 2.24a ve b'de modelde oluşan izokromlar ve monokromatik ışıktaki şeritler görülmektedir. Üç-boyutlu modellerin interferens şeritleri modelin kalınlığından kaynaklanan etkiler nedeniyle gerilme analizi bakımından yanıltıcı olabilir. Bu bakımdan analiz için dilimleme yöntemi uygulanmalıdır.

2.2.1 3-B Model-1'in gerilme analizi

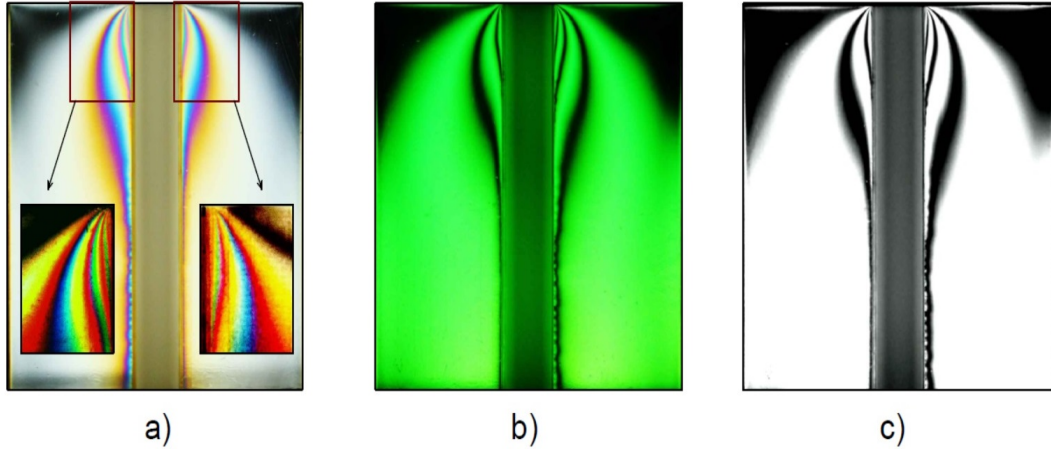
Modelin şeritlerinin dağılımı incelenerek öngerilme kuvvetlerinin aktarıldığı yapışma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve ankraj bölgelerinde yığılmaların meydana geldiği sonuçlarına varılabilir. Detaylı ve kesin analizler için dilimleme yöntemine başvurulur. Dilimleme yönteminden kastedilen modelin analiz yapılması

gereken kısımlarının kesilerek üç boyutlu modelin düzlem fotoelastisite teknikleri ile ölçülmesine imkan tanınmasıdır. Gerilmelerin model içerisindeki noktalarda kilitlenmesini sağlayan "dondurulma" yöntemi üç-boyutlu fotoelastik modellerin analizinin yapılmasını sağlamaktadır. Üç-boyutlu fotoelastik modellerin analizine izin veren sünme (*creep method*) ve kür (*curing method*) metotları da mevcuttur. Fakat en yaygın ve etkili olan "gerilmelerin-dondurulması" (*frozen – stress method*) metodudur. Dilimleme tekniği kullanılarak ankrajda oluşan gerilme yığılmalarının analiz edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden modelin donmuş gerilmeleri ve asal gerilme doğrultuları dikkate alınarak Şekil 2.25'te gösterilen numuneler üç-boyutlu modelden kesilerek çıkartılır.



Şekil 2.25 : a) Numunenin dilimlenme şeklini gösteren kesim yerleri, b) dilimlenmiş numuneler, c) numune boyutları (ölçüler mm'dir.).

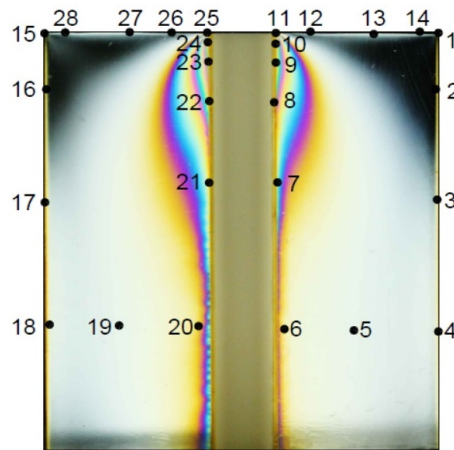
Kesme işlemi için hassas kesim cihazı (Micracut 201 precision cutter) ve freze cihazı (Proxxon milling machine) kullanılmış ve elmas kesici disk, elmas matkap ucu ve makina yağı kullanılarak oluşturulan soğutma sistemi ile modelde kesimden kaynaklanan herhangi bir artık gerilme olmamasına özen gösterilmiştir. Kesilen numunenin boyutları ve geometrisi Şekil 2.25b'de gösterilmektedir. 1 no'lu numunede oluşan interferens şeritlerini gösteren polariskop fotoğrafı Şekil 2.26'da gösterilmektedir.



Şekil 2.26 : Dilimlenmiş 1 no’lu numunenin a) beyaz, b) monokromatik (yeşil), c) monokromatik (gri) ışıktaki fotoğrafları.

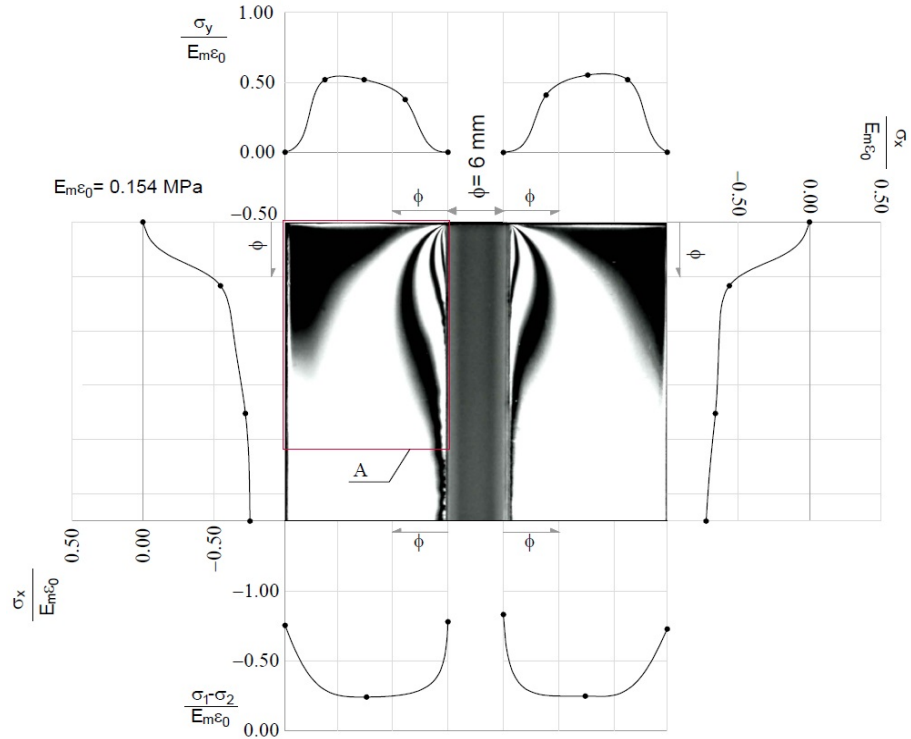
Öngerilmeli beton elemanın üç-boyutlu fotoelastik modellemesi ile ankraj bölgelerinde elde edilen interferens şeritlerinin dağılımı 2-boyutlu modeldekine benzer bir durumdur [52, 53]. Betonu temsil eden araldit1 malzemesine uygulanan basınç gerilmeleri öngerilme durumunu modellemektedir. Böylece gerilmelerin işaretleri prototipteki ile aynı olmaktadır. Başka bir ifade ile öngerilmelerin serbest hale gelmesi ile nihai durumda betonu modelleyen aralditte basınç, donatıyı modelleyen nylon6 malzemesinde ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Modelin gerilme analizinin yapılabilmesi için şerit ölçümlerinin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Şerit ölçümleri için belirlenen noktalara işaretler konularak 2 boyutlu modelde olduğu gibi Leica Polarize Mikroskop ile ölçümler tamamlanır. Ölçüm noktalarının şerit sayıları ve karşı gelen gerilme değerleri Ek’te Çizelge A.5’te gösterilmektedir.



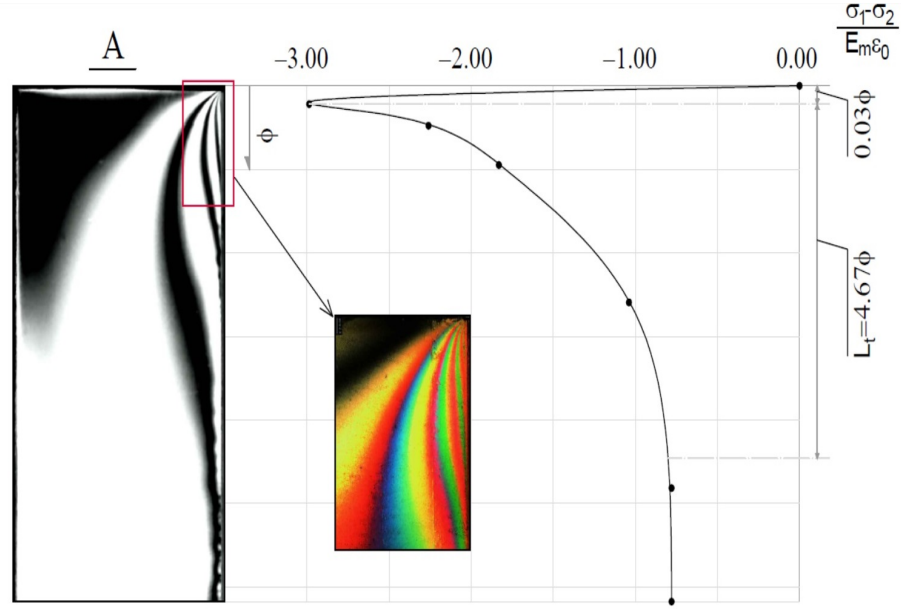
Şekil 2.27 : 3-B Model-1’den kesilerek çıkartılan 1 no’lu numunede belirlenen ölçüm noktaları.

Dilimlenmiş numune üzerinde işaretlenen noktalar Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Tabloda belirtilen kırmızı ve siyah yöndeki okumalar ile o noktadaki şerit numarasına ulaşılmaktadır. Elde edilen şerit numaraları yine aynı noktaya ait kalınlık değeri bilindiğinde denklem 1.29 ile gerilme değerleri elde edilir. Gerilmelerin boyutsuz hale getirilerek grafiklerinin çizilmesi için elde edilen gerilme değerleri numuneye verilen ilk öngerilme değeri ile normalize edilir. Verilen ilk öngerilme değeri 3-B Fotoelastik Model-1 için $\sigma_0 = 0.154 \text{ MPa}$ ’dır. Elde edilen grafik boyutsuz gerilmeler cinsinden Şekil 2.28’de gösterilmektedir.



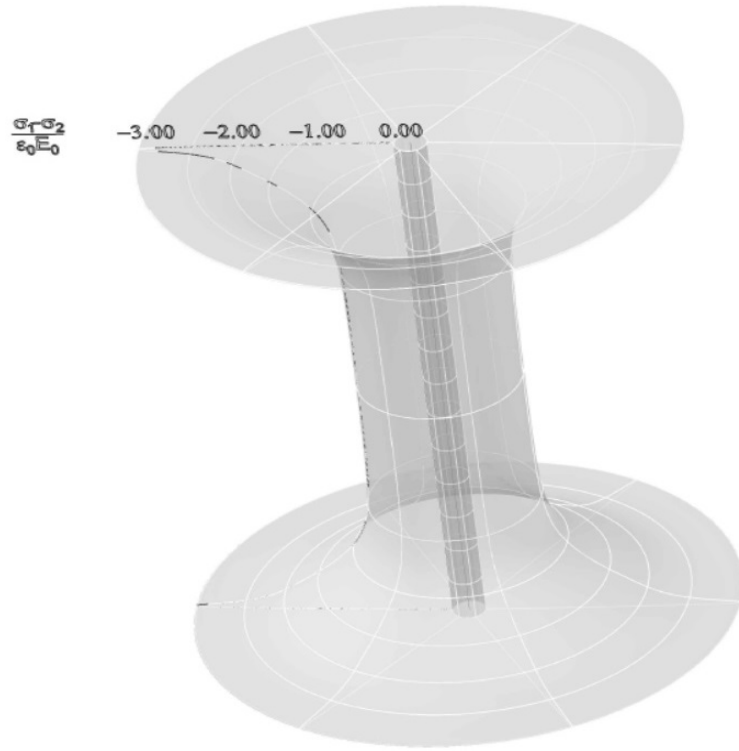
Şekil 2.28 : 3-B Model-1, 1 no’lu numunenin kenar ve orta hattında oluşan gerilmelerin boyutsuz dağılımı.

Grafikten de görüldüğü üzere modelin ankraj bölgelerindeki gerilme yığılmaları donatı ile birleşim bölgelerinde sıfırdır. Bu durum ile iki boyutlu modelin analizinde de karşılaşılmıştır. Modelde oluşan boyutsuz kenar gerilmeleri modelin üst bölgelerinden farklı işaretlerdir. Şekil 2.28’de ölçeklendirme donatı çapı olan $\phi = 6 \text{ mm}$ baz alınarak işaretlenmiştir. Modelde oluşan maksimum kayma gerilmeleri elemanın ankraj bölgesinde oluşmaktadır. Ankraj bölgesinin ayrıca incelenmesi gerekmektedir. Grafikte belirtilen "A" kısmında oluşan gerilmeler Şekil 2.29’da boyutsuz olarak verilmektedir.



Şekil 2.29 : 3-B Model-1, 1 no'lu numunenin ankraj bölgesinde oluşan gerilme yığılmaları, (L_t = transfer boyu).

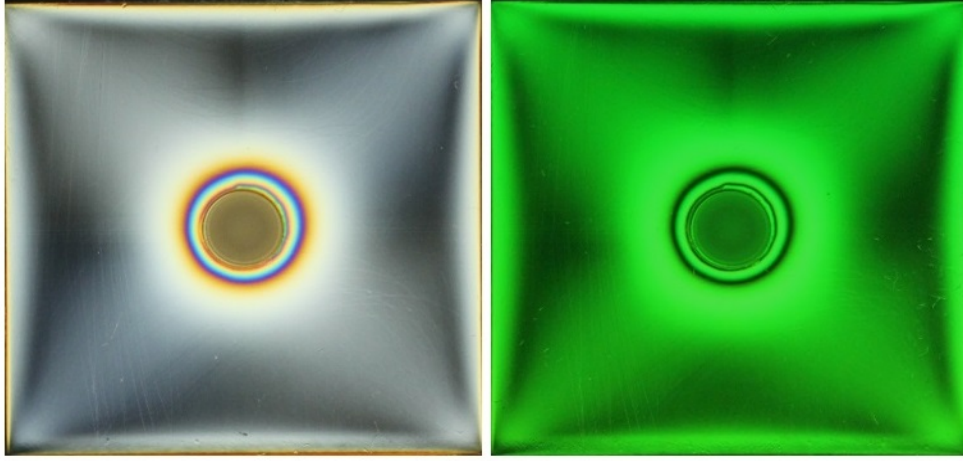
Şekil 2.29'da gösterilen elemanın ankraj bölgesi maksimum gerilmelerin oluştuğu kısımdır. Bu bölgede tasarlanan öngerilme transfer boyu ile adlandırılan mesafede betona aktarılmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere bahsedilen transfer boyu ($L_t = 4.67\phi$) kadardır. Donatı çapının 6 mm olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu mesafe söz konusu model için yaklaşık 28 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum kayma gerilmeleri ise 0.03ϕ kadar yüzeyden uzakta oluşmuştur. Bu mesafe de bahsedilen model için 0.188 mm kadardır. Elemanın ekstrem bölgesinde oluşan şerit numarası ise yaklaşık olarak 5'tir ($\eta = 5.095$). Gerilmeler cinsinden ifade edilecek olursa bu değer yaklaşık olarak verilen öngerilmenin 3 katı kadardır. Gerilmeler 3 boyutlu modelde donatı etrafında yaklaşık aksisimetrik bir düzlem oluşturur. Donatı boyunca oluşan kayma gerilmelerinin 3-B yüzey gösterimi Şekil 2.30'da gösterilmektedir.



Şekil 2.30 : 3-B Model-1’de donatı boyunca oluşan kayma gerilmeleri yüzey gösterimi.

Ankraj bölgelerinde oluşan maksimum kayma gerilmeleri oldukça ciddi aderans problemlerine sebep olabilir. Bu bölgelerde oluşabilecek donatı kaymaları maksimum kayma gerilmelerinin olduğu noktadan itibaren alt ve üst kısımlara doğru ilerleyebilirler.

Modelin orta kısmından yükleme doğrultusuna dik bir disk, kesilerek çıkartılır. Dilimleme yöntemi ile analizin yapılması için kesilip çıkartılan 2 no’lu numune Şekil 2.31’de gösterilmektedir.

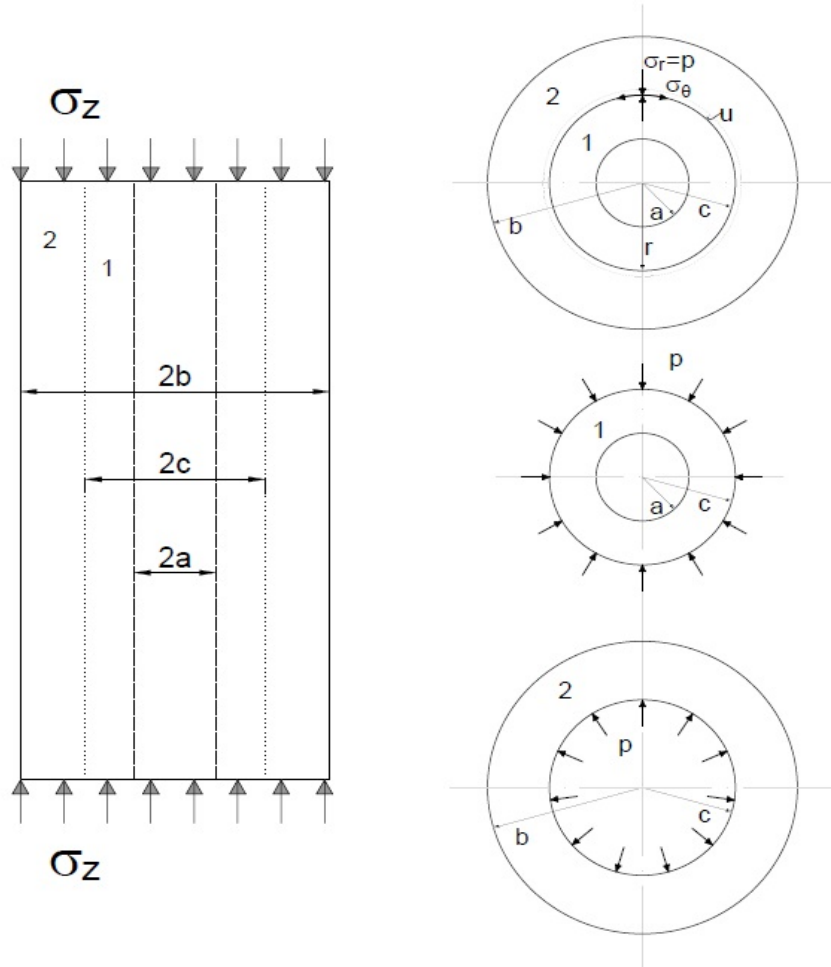


a)

b)

Şekil 2.31 : 3-B Model-1'den kesilerek çıkartılan 2 no'lu numunenin a) beyaz, b) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.

Bileşik silindirlerin gerilme hesabı için kullanılan Lamé probleminin çözümü modelin σ_r ve σ_θ gerilmelerinin tayini için kullanılabilir.



Şekil 2.32 : Bileşik silindir çubuklar.

Beton ve donatıyı modelleyen elemanların birleşim arayüzündeki bir noktanın yer değiştirmesi her iki eleman için aynı olmaktadır. Bu durumda birleşik silindirin arayüzünde oluşan şekil değiştirmelerin bir kısmı termal etkilerden bir kısmı da mekanik etkilerden kaynaklanmaktadır. Radyal doğrultuda dıştaki malzemenin birim şekil değiştirmesi için 2.7 ifadeleri yazılabilir.

$$\varepsilon_z = -\frac{\sigma_z}{E_2} \quad (2.7a)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \nu_2 \varepsilon_z = \nu_2 \frac{\sigma_z}{E_2}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (2.7b)$$

$$u = r \varepsilon_\theta = \Delta_T \quad (2.7c)$$

$$\Delta_T = c \varepsilon_\theta \quad (2.7d)$$

Burada Δ_T termal etkilerden kaynaklanan radyal birim şekil değiştirme olup c birleşim notasındaki yarıçap yani içteki 1 no'lu elemanın dış yarıçapıdır. Her iki malzemenin serbest haldeki şekil değiştirme değeri Δ_T kadardır. Bu değer deneysel ölçümler neticesinde $\Delta_T = 0.027 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Arayüzde oluşan p basıncının bulunması için 2.8 ifadeleri kullanılır.

$$u_2 + u_1 = \Delta_T \quad (2.8a)$$

$$u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{r_i^2 p_i - r_d^2 p_d}{r_d^2 - r_i^2} r + \frac{1 + \nu}{E} \frac{r_i^2 r_d^2 (p_i - p_d)}{(r_d^2 - r_i^2) r} \quad (2.8b)$$

burada r_i ve r_d sırası ile iç ve dış yarıçap olup p_i ve p_d sırası ile iç ve dış basıncı temsil etmektedir. Şekil 2.32'deki yarıçaplar göz önüne alındığında 1 ve 2 nolu malzemeler için ayrı ayrı hesaplanacak olan yer değiştirme ifadeleri 2.8 a'da yerlerine konularak p basıncı bulunur.

$$u_2|_{p_i=p, p_d=0, r_i=c, r_d=b} = \frac{1 - \nu_2}{E_2} \frac{pc^3}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \nu_2}{E_2} \frac{pb^2c}{b^2 - c^2} \quad (2.9a)$$

$$u_1|_{p_i=0, p_d=p, r_i=a, r_d=c} = \frac{1 - \nu_1}{E_1} \frac{-pc^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \nu_1}{E_1} \frac{-pa^2c}{c^2 - a^2} \quad (2.9b)$$

Yukarıdaki 2.9 ifadeleri 2.8a ifadesinde yerine konulursa aşağıdaki 2.10 denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} p = & \Delta_T E_1 E_2 (c^2 - a^2)(c^2 - b^2) / [a^2 b^2 c (E_1 \nu_2 + E_1 + E_2 \nu_1 + E_2) \\ & + a^2 c^3 (-E_1 \nu_2 + E_1 - E_2 \nu_1 - E_2) - b^2 c^3 (E_1 \nu_2 + E_1 + E_2 \nu_1 - E_2) + \\ & c^5 (E_1 \nu_2 - E_1 + E_2 \nu_1 - E_2)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.10 ifadesinde model göz önüne alındığında $a = 0$ yerine konulursa 2.11 elde edilir.

$$p|_{a=0} = \frac{\Delta_T E_1 E_2 (c^2 - b^2)}{b^2 c (-E_1 \nu_2 - E_1 - E_2 \nu_1 + E_2) + c^3 (E_1 \nu_2 - E_1 + E_2 \nu_1 - E_2)} \quad (2.11)$$

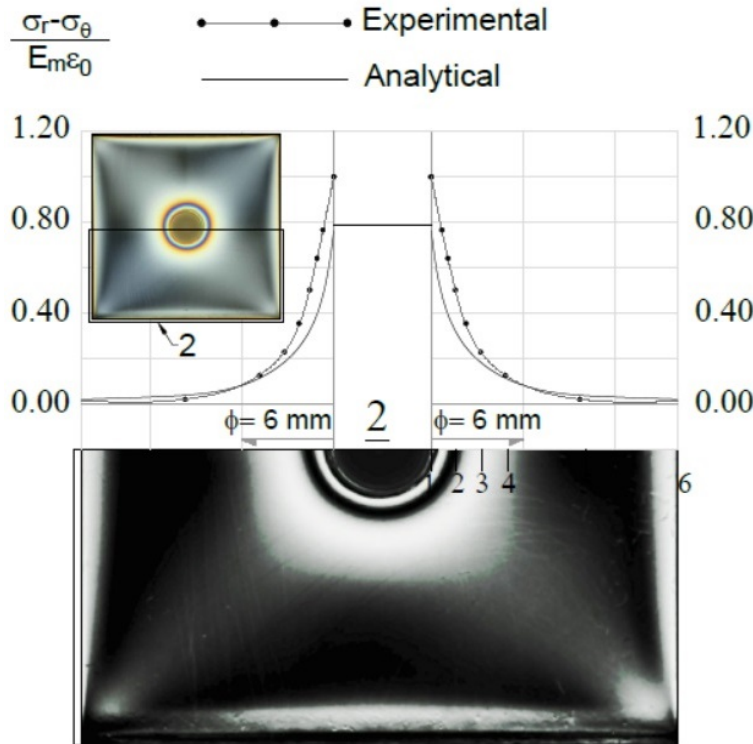
2.11 ifadesi ile içteki ve dıştaki silindirlerin malzeme özellikleri ve ölçülen Δ_T değerleri bilindiğinden arayüzde oluşan basınç için $p = 0.045$ değeri hesaplanır.

Arayüzde oluşan basınç bilindiğine göre σ_r ve σ_θ için aşağıdaki ifadeler yazılabilir

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_d r_d^2}{r_d^2 - r_i^2} + \frac{1}{r^2} \frac{r_i^2 r_d^2 (p_d - p_i)}{r_d^2 - r_i^2} \quad (2.12a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_i r_i^2 - p_d r_d^2}{r_d^2 - r_i^2} - \frac{1}{r^2} \frac{r_i^2 r_d^2 (p_d - p_i)}{r_d^2 - r_i^2} \quad (2.12b)$$

Verilen 2.12 ifadelerinde p yerine konulduğunda elde edilen gerilme grafikleri fotoelastik yöntem ile ölçülen gerilme değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 2.33'te gösterilmektedir.

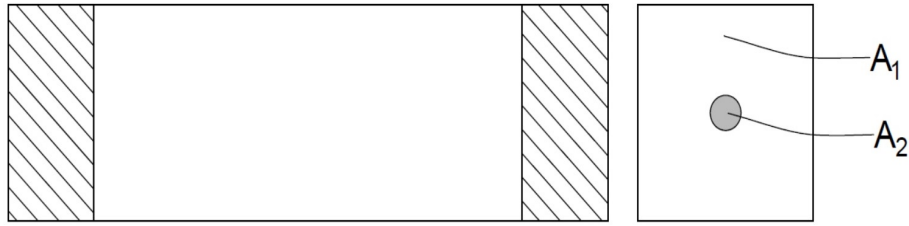


Şekil 2.33 : 3-B Model-1'den çıkartılan 2 no'lu numunede oluşan ve hesaplanan gerilmelerin karşılaştırmalı grafikleri.

Asal gerilmeler farkı olan $\sigma_r - \sigma_\theta$ verilen ilk öngerilme değeri ile normalize edilmiş olarak Şekil 2.33'te verilmektedir. Numune 2 için yapılan ölçümler okumalar ile birlikte Ek'te Çizelge A.6'da verilmektedir. Analitik hesaplamalar ile oldukça uyumlu

olduğu görülen deneysel veriler ile termal genleşmelerden kaynaklanan kontakt problemlerinin birleşim arayüzü civarında önemli gerilmelerin meydana gelebileceği sonucuna varılabilir. Öngerilmeli elemanların orta noktalarında oluşan gerilme değerleri termal analogisi kullanılarak hesaplanabilir. Öngerilme donatısı tarafından oluşturulan gerilme dağılımının kritik noktaları ankraj uçlarında meydana gelmektedir. Orta kısımda ise üniform olarak dağılan σ_z gerilmeleri için izlenecek analitik yöntem aşağıda belirtilmektedir.

$$F_1 + F_2 = 0 \quad (2.13)$$



Şekil 2.34 : 3-B Model-1 için bileşik çubuklarda gerilme analogisi.

Şekil 2.34'te A_1 ve A_2 sırası ile beton ve donatıyı temsil eden elemanların en kesit alanlarını ifade etmektedir. Kuvvet dengesi ve birim şekil değiştirmelerin eşitliğinden aşağıdaki bağıntılara ulaşılır. Bu yaklaşım taralı kısımlar için geçerli değildir. Bu durumda iç kuvvetler için yazılacak olan denge denklemi 2.13 ifadesinin tekrar yazılması ile elde edilir.

$$\sigma_1 A_1 + \sigma_2 A_2 = 0 \quad (2.14)$$

Gerilmelerin belirlenmesi için bir uygunluk denklemine daha ihtiyaç vardır. Tam birleşim söz konusu olduğundan malzemelerin birlikte çalıştığı kabul edilir. Birim şekil değiştirmelerin eşitliği yazılacak olursa 2.15 ifadesi yazılabilir.

$$(\epsilon_T + \epsilon_E)_1 = (\epsilon_T + \epsilon_E)_2 \quad (2.15)$$

burada ϵ_T termal genleşmeden kaynaklanan birim şekil değiştirmeleri, ϵ_E ise elastik etkilerden kaynaklanan birim şekil değiştirmelerdir.

$$\alpha_1 \Delta T + \frac{\sigma_1}{E_1} = \alpha_2 \Delta T + \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (2.16)$$

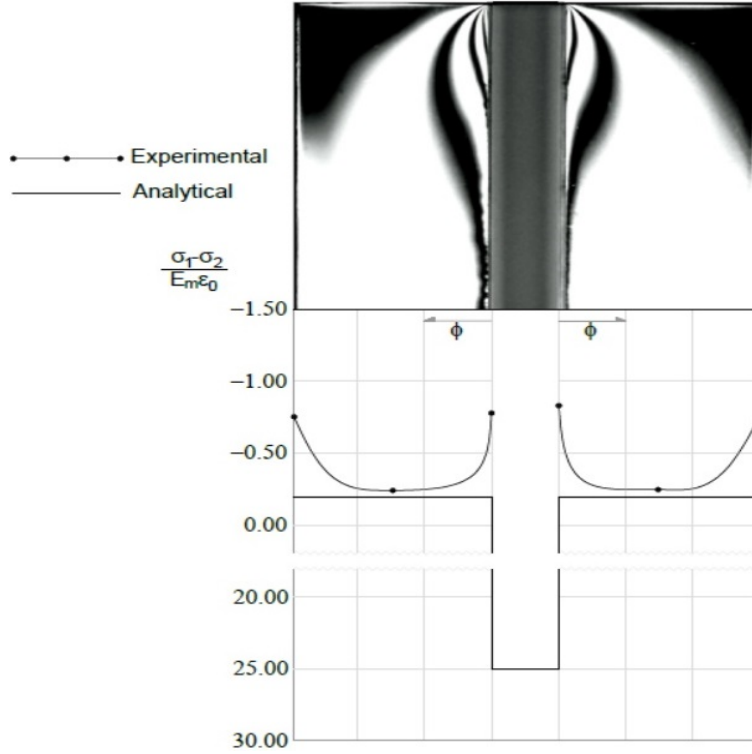
2.16 ifadesinde $\alpha_1 \Delta T$ termal etkilerden kaynaklanan birim şekil değiştirmeler olup 2.15 denkleminde ϵ_T 'ye eşittir. İfadede belirtilen ΔT değeri $T_1 - T_0$ 'a eşit olup

öngerilmeli beton analizlerinde $\alpha_1 \Delta T = 0$ ve $\alpha_2 \Delta T = \varepsilon_0$ olarak alınabilir. Burada ε_0 verilen öngerilme değerinden kaynaklanan birim şekil değiştirme olup bu çalışmada yapılan modellerde $\sigma_0 = \varepsilon_0 E_0$ 'dır. Bu eşitlikler ile beton ve donatı kısmında oluşan gerilmeler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_0}{A_1 \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right)} \quad (2.17a)$$

$$\sigma_2 = \frac{-\varepsilon_0}{A_2 \left(\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right)} \quad (2.17b)$$

Yapılan hesaplamalar ile modelin gerilmelerinin üniform dağıldığı orta bölümünde σ_z gerilmeleri için boyutsuz gerilme grafiği Şekil 2.35'te gösterilmektedir.



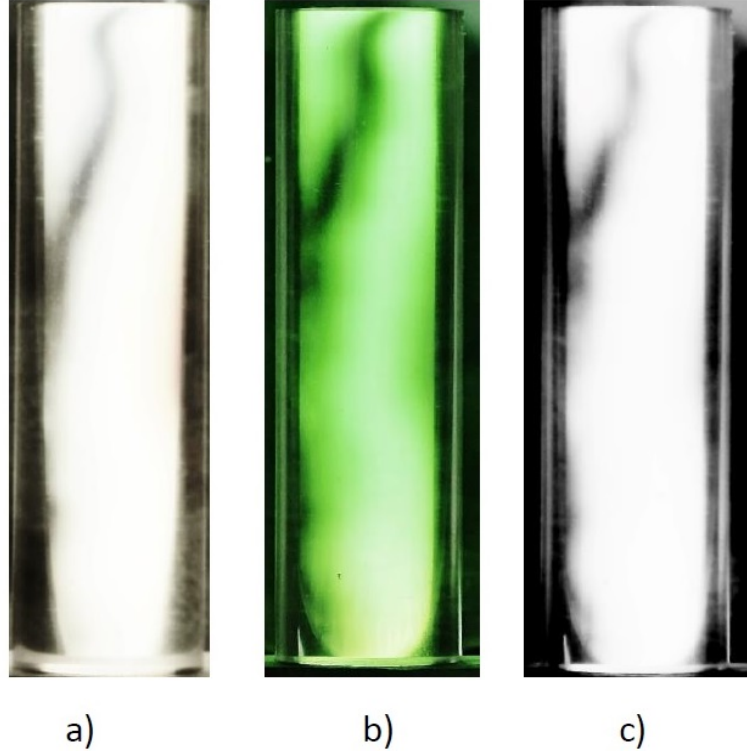
Şekil 2.35 : 3-B Model-1'in orta bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.

Modelin kenarlarında deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki fark artmaktadır. Bu durum modelin malzemelerindeki kenar düzensizliklerinden ve bozulmalardan meydana gelmektedir. Orta kısımlarda ise bu fark %8'in altındadır.

2.3 3-B Model-2

Öngerilmeli beton elemanların fotoelastik yöntemle modellenmesi için yapılan ikinci çalışma araldit2 ve nylon6 malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araldit2 malzemesinin cam geçiş sıcaklığı (T_g) yaklaşık olarak $125^{\circ}C$ 'dir. Bu malzemenin kritik sıcaklığı ise $140^{\circ}C$ 'dir. Bu bilgiler ışığında deneyin yapılacağı olduğu sıcaklık (dondurulma sıcaklığı, T_f) $145^{\circ}C$ olarak belirlenmiştir. Söz konusu modelde kullanılacak olan malzemelerin deneyin yapılacağı dondurulma sıcaklığındaki gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 2.5 ve 2.6'da verilmiştir. Elde olunan bilgiler ışığında prototipin modüler oranının modelde yaklaşık olarak sağlandığı söylenebilir. Başka bir ifade ile öngerilmeli beton elemanların üretiminde kullanılan beton ve öngerme donatısı arasındaki elastisite modülü oranları, modelde kullanılan araldit2 ve nylon6 malzemeleri arasındaki modüler oran ile çok yakındır.

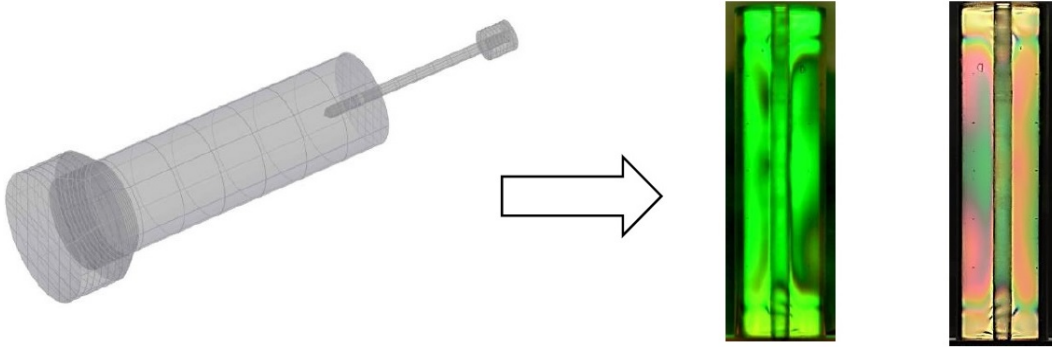
Modelin oluşturulması için elde olunan fotoelastik malzemenin mekanik karakteristikleri bilindiğinden model geometrisi dikkate alınmalıdır. Silindirik numunenin yükleme işlemine başlanmadan önce polariskopta elde edilen fotoğrafı Şekil 2.36'da gösterilmektedir.



Şekil 2.36 : Silindirik numunenin polariskopta a) beyaz, b) ve c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.

Şekilden de görüldüğü üzere silindir numune üzerinde artık gerilmeler yok denecek kadar azdır. Numunenin üst kısmında görülen üniformluğu bozan şerit üç-boyutlu model olması ve artık gerilmelerin kalınlık boyunca süperpoze olarak şeritler oluşturması gerçeği göz önünde bulundurulduğunda ihmal edilebilecek düzeyde olduğu sonucuna varılabilir. Bu durum numunenin eksenel simetriye sahip olması ve kalınlığın merkezde yaklaşık olarak 50 mm 'ye yaklaşması sebeplerinden dolayı ihmal edilir. Kalınlıkla birlikte numunede oluşan gerilmeleri temsil eden interferens şeritleri lineer olarak artmaktadır.

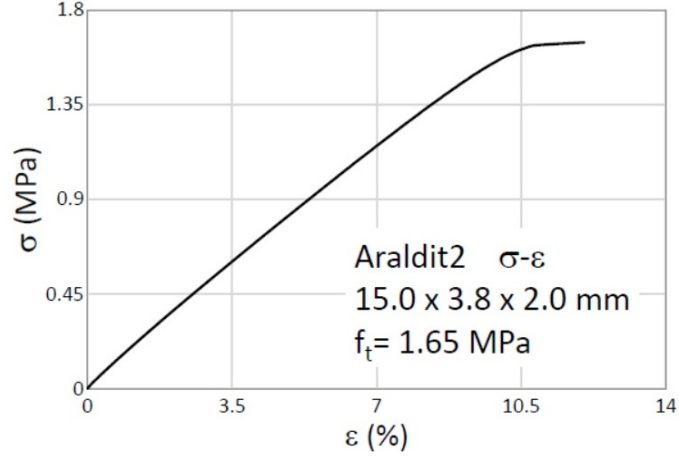
Silindirik numunenin simetri ekseninden 6 mm çapında donatı yerleştirilmelidir. Bu yüzden numunenin orta merkezinden torna cihazı ve 6 mm 'lik matkap ucu ile delik açılır (Şekil 2.37). Elmas uçlu matkap ile torna cihazında yapılan delme işlemi tamamlandıktan sonra numunenin monokromatik ve beyaz ışıktaki şeritleri polariskopta çekilen fotoğraflarda Şekil 2.37'de gösterilmektedir. Delme işlemi ile oluşan gerilmeler ihmal edilecek düzeydedir.



Şekil 2.37 : 3-B Model-2'nin hazırlanması sırasında numunenin eksenel simetri merkezinden açılan 6 mm 'lik delik.

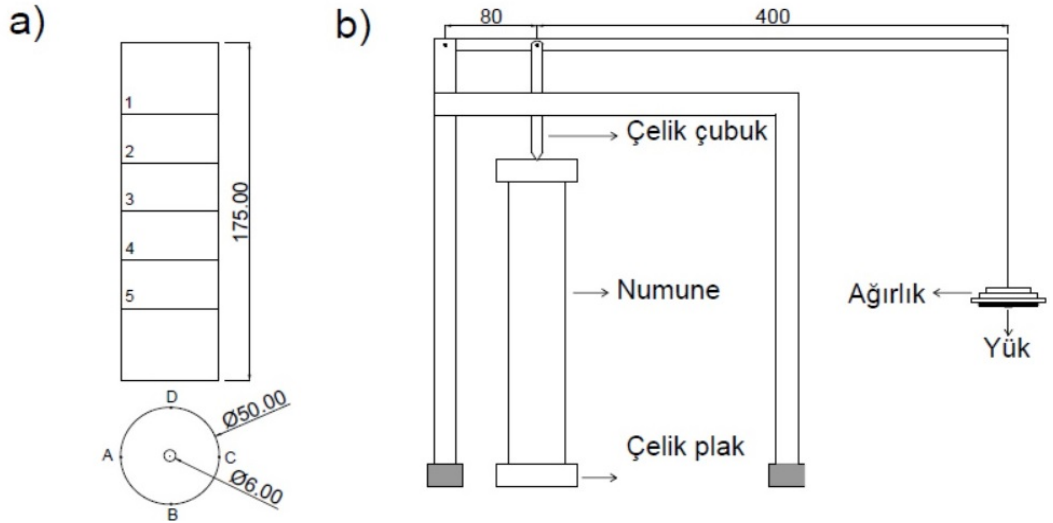
Numunenin yüklenmesi için ilk modelde izlenilen yol takip edilmiştir. Numunede üniform şekil değiştirmelerin oluşması için yüklemenin eksenel yapılabilmesi ve eksantrisitinin minimuma indirilebilmesi gerekmektedir. Numunede üniform basınç gerilmelerinin oluşması için yükleme düzeneği başlıkları ve numune üst ve alt uçları yağlanır. Böylece basınç gerilmelerinden kaynaklanan yatay doğrultudaki (transverse) şekil değiştirmelerde serbestleşme sağlanır. Başka bir deyişle alt ve üst yükleme noktalarındaki sürtünmeden kaynaklanan σ_r gerilmelerinin minimuma düşürülmesi sağlanmaktadır. Numunenin mukavemetinin bulunması için DMA'da

yapılan çekme testi Şekil 2.38’de verilmektedir. Bulunan dayanıma göre yükleme işleminde belirlenecek gerilme değerleri tespit edilir.



Şekil 2.38 : Araldit2 malzemesi için yapılan $145^{\circ}C$ ’deki çekme testi, f_t = çekme mukavemeti.

Numunenin geometrisi ve fırının içerisinde oluşturulan yükleme düzeneği Şekil 2.39’da gösterilmektedir.



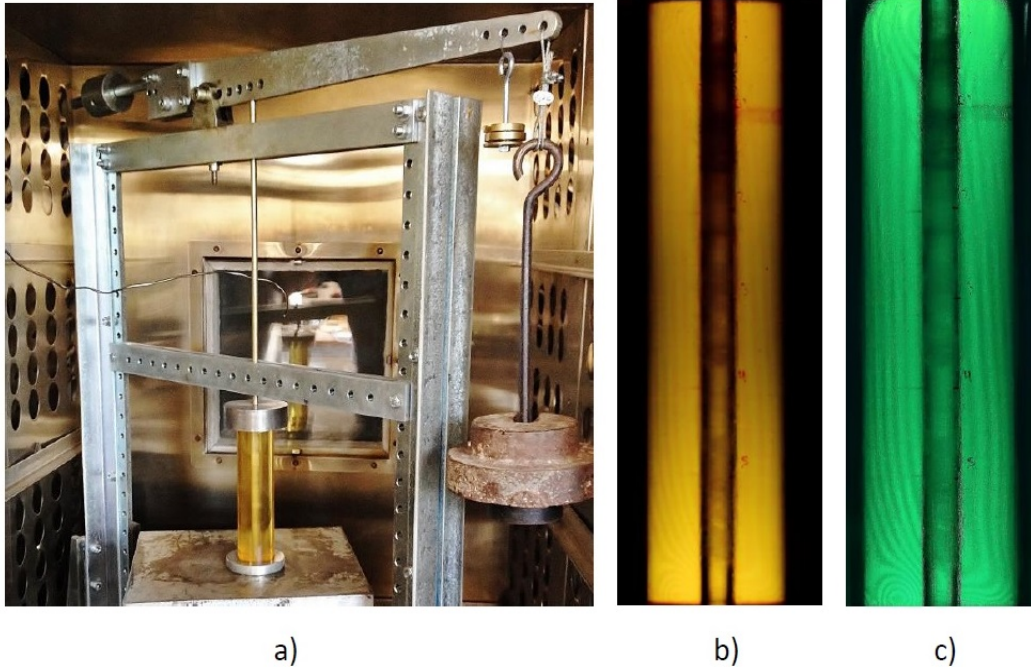
Şekil 2.39 : Silindirik numunenin a) geometrisi (ölçüler mm’dir.), b) yükleme düzeneği.

Numunenin kesit alanı 1912.44 mm^2 ve malzemenin mukavemeti 1.65 MPa ’dır. Numunenin dondurulma sıcaklığında ($145^{\circ}C$) uygulanması gereken basınç gerilmesinin tatbiki için numuneye 382.27 N ’luk kuvvet uygulanır (38.97 kg). Uygulanan bu kuvvet numunede 0.20 MPa ’lık eksenel basınç gerilmesinin donmasını sağlar. Gerilmelerin dondurulduğu silindirik numunede yüklemekten önceki ve sonraki durumlarda ölçülen boyutlar Çizelge 2.4’te verilmektedir.

Çizelge 2.4 : Araldit2 malzemesinden yapılan silindirik numunenin yüklemmeden önceki ve sonraki boyutları, (0 ve 1 indisleri sırası ile yüklemmeden önceki ve sonraki durumları, A ve B indisleri ise çap ölçümleri noktalarını temsil etmektedir).

	1	2	3	4	5	Ort.
d_{0A}	49.81	49.82	49.81	49.81	49.81	49.81
d_{0B}	49.81	49.80	49.81	49.82	49.81	49.81
d_{1A}	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05
d_{1B}	50.04	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05
ε_{rA}	%0.482	%0.462	%0.482	%0.482	%0.482	%0.478
ε_{rB}	%0.462	%0.502	%0.482	%0.462	%0.482	%0.478
ε_r	%0.472	%0.482	%0.482	%0.472	%0.482	%0.478
	A	B	C	D		Ort.
l_0	174.15	174.10	174.15	174.15		174.14
l_1	172.15	172.20	172.20	172.20		172.19
ε_z	%1.148	%1.091	%1.112	%1.112		%1.112

Malzemenin elastisite modülü DMA ile yapılan testlerden ve yükleme ile oluşan şekil değiştirmelerinden 18.10 MPa olarak tekrardan hesaplanmıştır.

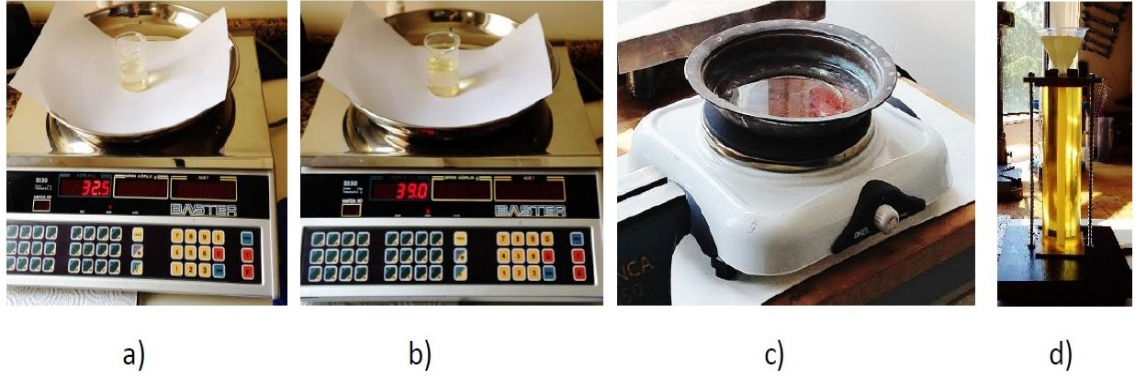


Şekil 2.40 : a) Numunenin dijital kontrollü fırın içerisinde yüklenmesi ve oluşan interferens şeritlerinin polariskopta b) beyaz, c) monokromatik ışıktaki fotoğrafları.

Uygulanan basınç gerilmesi altında oluşan şekil değiştirmelerin dondurulması işlemi için fırın içi sıcaklık değeri oda sıcaklığından ($25 \sim 35^\circ C$) malzemenin dondurulma sıcaklığı olan $145^\circ C$ 'ye kadar $5^\circ C/saat$ hız ile çıkartılır. Fırın içerisindeki yüklü numune bu sıcaklıkta (T_f) 4 saat bekletildikten sonra sıcaklık artış hızı ile aynı

hızda oda sıcaklığına kadar düşürülür. Dondurulmuş numunede oluşan interferens şeritlerinin fotoğrafı Şekil 2.40b ve c’de görülmektedir.

Donatının yerleştirilmesi için 3-B Model-1’de uygulanan işlemler uygulanır. Yapıştırma işlemi için kullanılan epoksi yapıştırıcı 5/1 (reçine/sertleştirici) oranı ile karıştırıcıya dökülüp aplike edilmektedir. Yapıştırma işlemi için kurulan düzeneğe yapıştırıcı olan epoksi kendi polimerizasyonunu tamamlayana kadar 36 saat bekletilir. Bu sürenin ilk 8 saat geçtikten sonra yine 8 saat "postkür" uygulaması yapılır. Bu uygulama fırının 40°C ’de yapıştırıcı olarak kullanılmak üzere hazırlanan epoksinin mekanik özelliklerinin arttırılması için yapılmaktadır. Yapıştırma işleminin adımlarından olan yapıştırıcı epoksinin hazırlanması ve yapıştırma düzeneği Şekil 2.41’de gösterilmektedir.

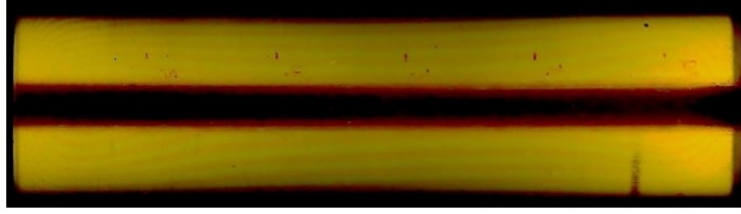


Şekil 2.41 : a) Epoksi yapıştırıcı için 32.5 gr reçine ile b) 6.5 gr sertleştirici katılması, c) karışımın ısıtıldığı ocak (55°C ’ye kadar çıkılır), d) donatı çubuğunun modele yerleştirilmesi işlemi ve hazırlanan düzeneğe

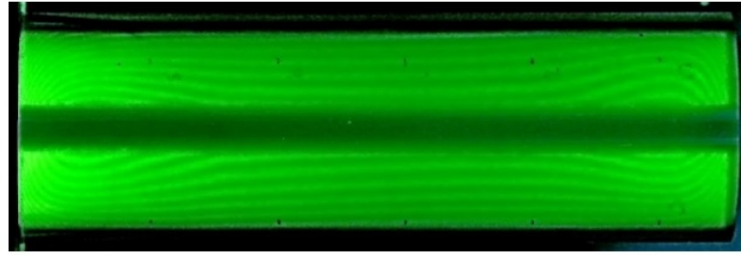
Yapıştırma işleminden sonra üniform basınç gerilmesi durumunun oluşması için numune baş kısımlarından 30 mm kadar kesilir. Kesilen numunenin üniform basınç gerilmelerini gösteren interferens şeritlerinin polariskopta çekilmiş fotoğrafı Şekil 2.42’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.5 : Hazırlanan 3-B Model-2'nin mekanik ve fiziksel özellikleri

$E_{araldit2}$	E_{nylon6}	$A_{araldit2}$	A_{nylon6}	$\sigma_0(MPa)$	ϵ_0	$\sigma_0^{1.0}(N/mm.\eta)$
18.10	184.40	1912.44	36.32	0.20	0.011	0.22



a)



b)

Şekil 2.42 : 3-B Model-2'nin tamamlanmış durumunu gösteren polariskop fotoğrafları, a) beyaz, b) monokromatik ışık.

Şekilden de görüldüğü üzere basınç gerilmeleri, başka bir deyişle öngerilmeler, uniform karakterdedir. Hazırlanan modelin analizinde kullanılacak olan mekanik ve fiziksel özellikler tablo şeklinde Çizelge 2.5'te gösterilmektedir.

Gerilmelerin serbestleşmesi için dondurulma çevriminin tekrarlanması gerekmektedir.

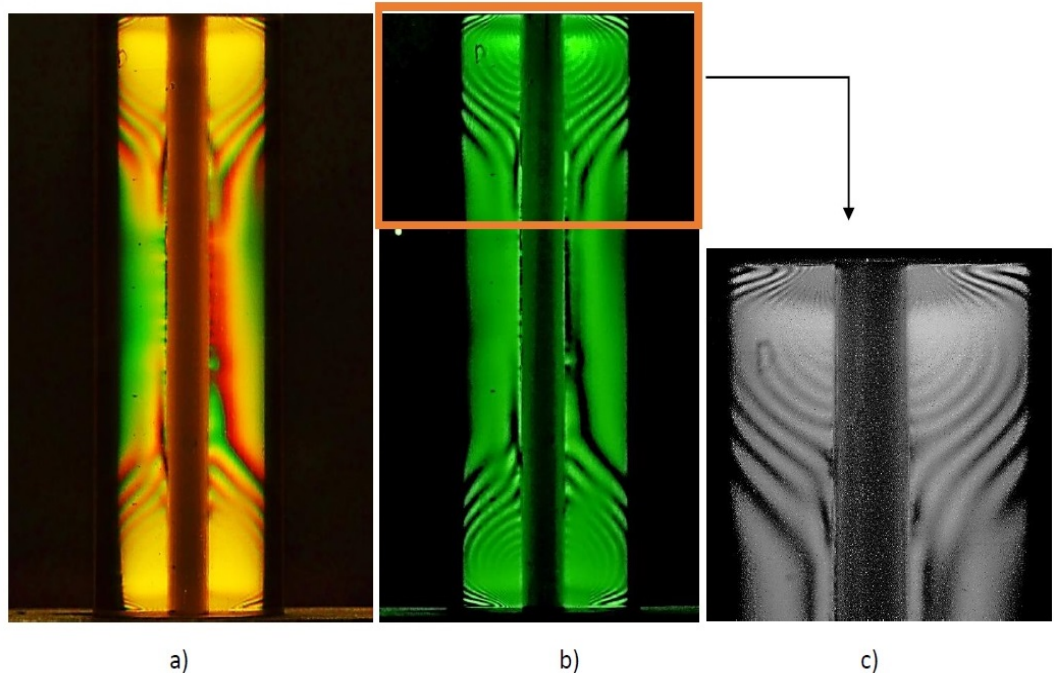
2.3.1 3-B Model-2'nin gerilme analizi

Hazırlanan modelin deyeninin yapılması için dondurulmuş olan gerilmelerin serbest hale gelmesi yani öngerilmelerin serbestleşmesi gerekmektedir. Bu işlem için uygulanan gerilmelerin dondurulması çevrimi, daha önce bahsedilen adımların aynen uygulanması şeklinde gerçekleştirilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus üç-boyutlu kompozit modellerde ısı iletim katsayılarının çok düşük olduğu malzemeler kullanıldığından kritik sıcaklık olarak adlandırılan sıcaklıkta (deneyin gerçekleştiği sıcaklık) numunenin iki-boyutlu modellere kıyasla daha uzun tutulması gerektiğidir. Burada betonu temsil eden araldit2 malzemesinin dondurulma sıcaklığının 145°C olduğu daha önce belirlenmiş olup aderansın gerçekleştiği donatı çevresine bu sıcaklığın ulaşp ulaşmadığından emin olmak için numunenin bahsedilen sıcaklıkta

4 saat kadar bekletilmesi gerekmektedir. Dijital kontrollü fırına herhangi bir yük uygulanmadan ve sınır şartlarının serbestleşmesini kolaylaştırmak için kumun üzerine konulan 3-B Model-2 için uygulanan sıcaklık rejimi aşağıda sıralanmıştır.

- Model dijital kontrollü fırın içerisinde hazırlanan kum dolu yatağa yerleştirilir
- Fırının sıcaklığı oda sıcaklığından 145°C 'ye $5^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ hız ile çıkartılır
- Fırın, dondurulma sıcaklığı olan 145°C 'de 4 saat bekletilir
- 4 saat sonunda fırın içerisinde serbest halde bulunan kompozit modelde aktarılan yüklerin dondurulması işlemi için sıcaklık 145°C 'den 30°C 'ye $5^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ hız ile düşürülür

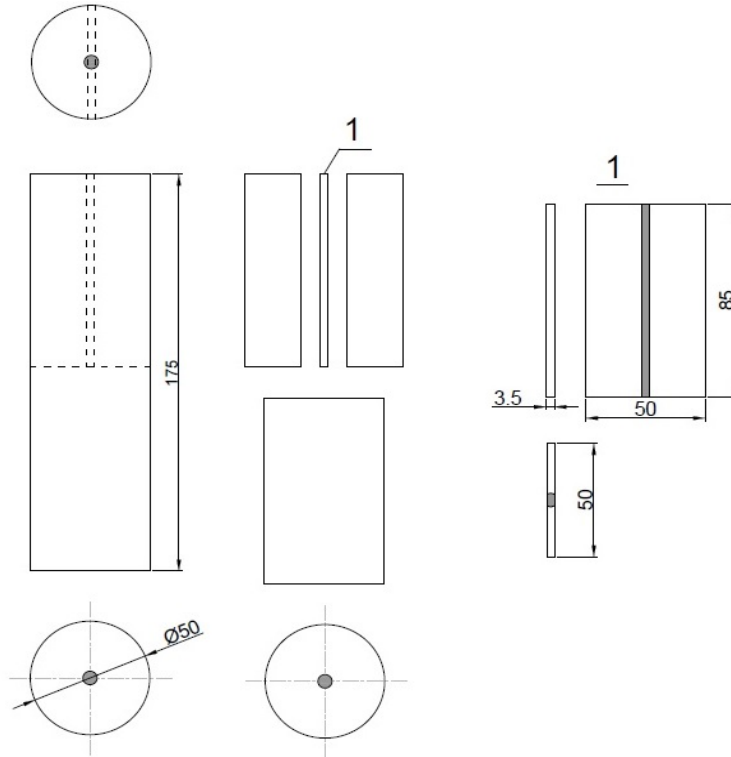
Öngerilmelerin serbest hale gelmesi ile birlikte modelin polariskopta çekilen fotoğrafı Şekil 2.43'te verilmektedir.



Şekil 2.43 : 3-B Model-2'de öngerilmelerin dağılmasını karakterize eden interferens şeritlerinin, a) beyaz, b) monokromatik ışık altındaki, c) ankraj kısmı büyütülmüş fotoğrafları.

Şekil 2.43'ten de görüldüğü üzere aderanstan kaynaklanan kayma gerilmeleri ankraj noktasına çok yakın bir bölgede maksimum değerine ulaşmaktadır. Şeritlerin serbest uçtan model ortasına doğru gittikçe daha seyrek değiştiğini gözlemlemek mümkündür. Bu durum aktarma boyu üzerinde gerilmelerin dağılımının, başka

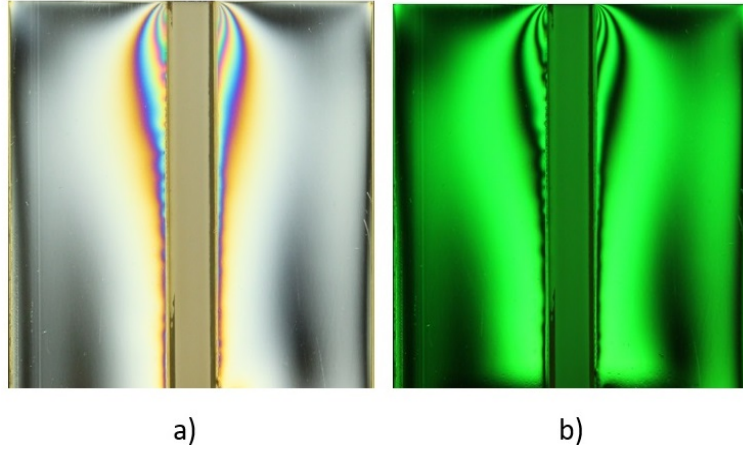
bir deyişle öngerilmelerin betona transferinin lineer olmayıp yüksek dereceden bir fonksiyona göre değıştiğini söylemek yanlış olmaz. Aynı durum daha önce bahsedilen 2-B modelde ve 3-B Model-1’de de görölmektedir. Daha önceki modellerde de bulunan bir diğ er husus ise aderans yüzeyinde oluşan maksimum kayma gerilmelerinin elemanın serbest yüzeyinde değı l de birleşim noktasının serbest yüzeyinin belli bir miktar altında oluştuğ udur. Numunenin 3-B olması ş eritlerin polariskopta net olarak gör ünmesini engellemektedir. Bunun sebebi ise silindirik numunenin eksenel simetri eksenin etrafında oluş an σ_r ve σ_z gerilmelerinin analizörden süperpoze olmuş bir şekilde ş erit oluşturuyor olmasıdır. Kalınlık donatıya yakın noktalarda maksimum değı rine erişmektedir. Bu noktalardaki gerilme değı rlerinin ölçülmesi için dilimleme yöntemi uygulanmalıdır. Dilimleme yöntemi ile model belli bir plan dahilinde parçalara ayrılır. Yapılacak olan dilimleme yöntemi ile Ş ekil 2.44’te gösterildiğı gibi gerçekleştirilmiştir.



Ş ekil 2.44 : 3-B Model-2’nin dilimlenmesi ile elde edilen 1 no’lu numune.

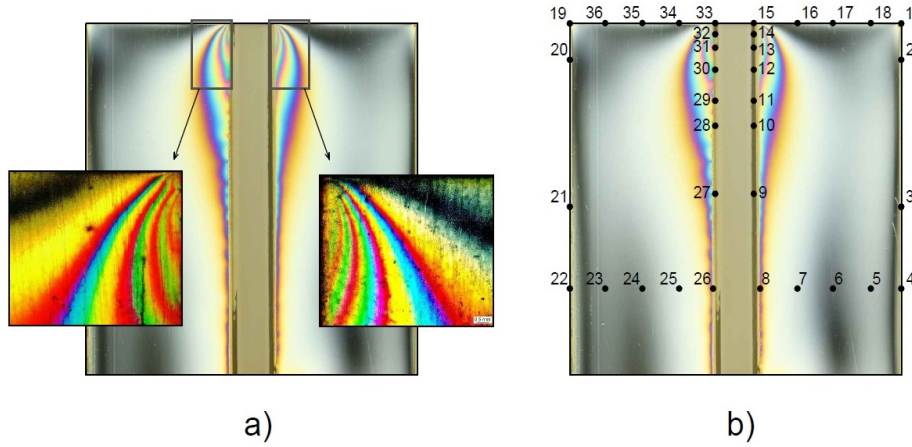
Dilimleme iş lemi 3-B Model-1’de kullanılan kesici cihazlar ile yapılmıştır. Artık gerilmelerin olmaması için soğutma sistemi için viskozitesi yüksek makina yağı kullanılmıştır. Dilimleme iş leminden elde edilen numune modelin ankraj bölgesinde oluş an gerilme yığı lmalarının (numune 1) ölçülebilmesine imkan verecek şekilde

seçilmiştir. Dilimlenmiş olan numunenin polariskopta çekilen fotoğrafları şekil 2.45'te gösterilmektedir.



Şekil 2.45 : 3-B Model-2'den kesilerek çıkartılan numunenin a) beyaz, b) monokromatik ışık altındaki fotoğrafları.

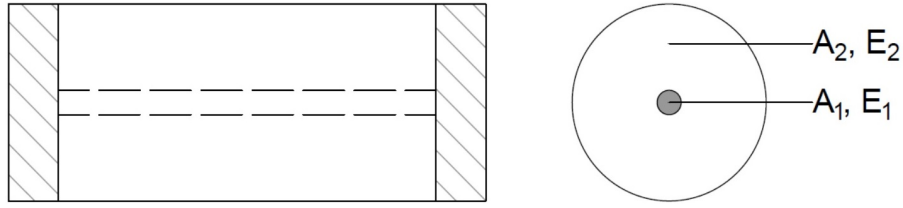
Dilimlenmiş 1 no' lu numune için ölçüm noktaları tespit edilir. Bu noktalar kenar gerilme durumunu ve ankraj bölgesi kayma gerilmesi dağılımını karakterize edebilecek şekilde belirlenmelidir. Bahsedilen durumlar göz önüne alınarak yapılan ölçüm noktaları tespiti ve 1 no'lu numunede ankraj bölgesi izokrom şeritlerinin fotoğrafı Şekil 2.46'da gösterilmektedir.



Şekil 2.46 : 1 no'lu numunede a) ankraj bölgesi izokromları, b) ölçüm noktaları.

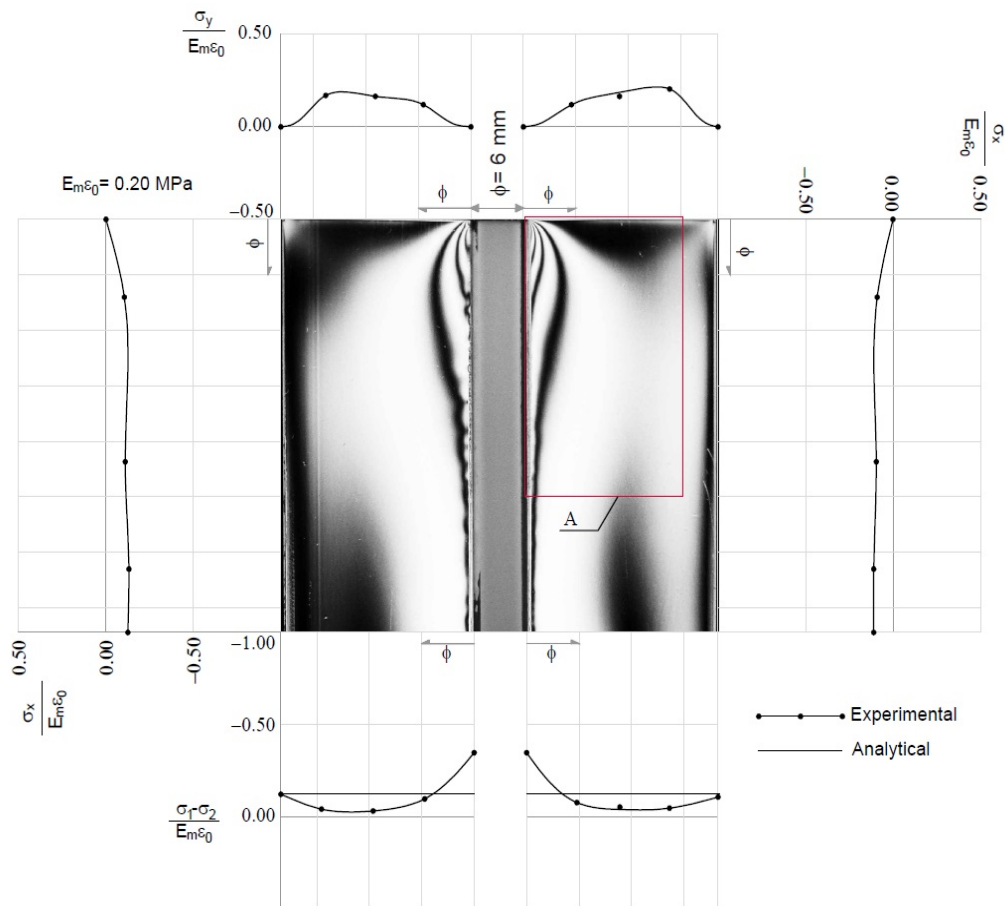
Noktaları belirlenmiş olan ölçümler Leica polarizon mikroskop kullanılarak gerçekleştirilir. Yapılan okumalar ve karşı gelen gerilme değerleri Ek'te Çizelge A.7'de verilmektedir.

Analitik olarak hesaplanan σ_z gerilme değerleri için 3-B Model-1'de bahsedilen yöntem uygulanır.



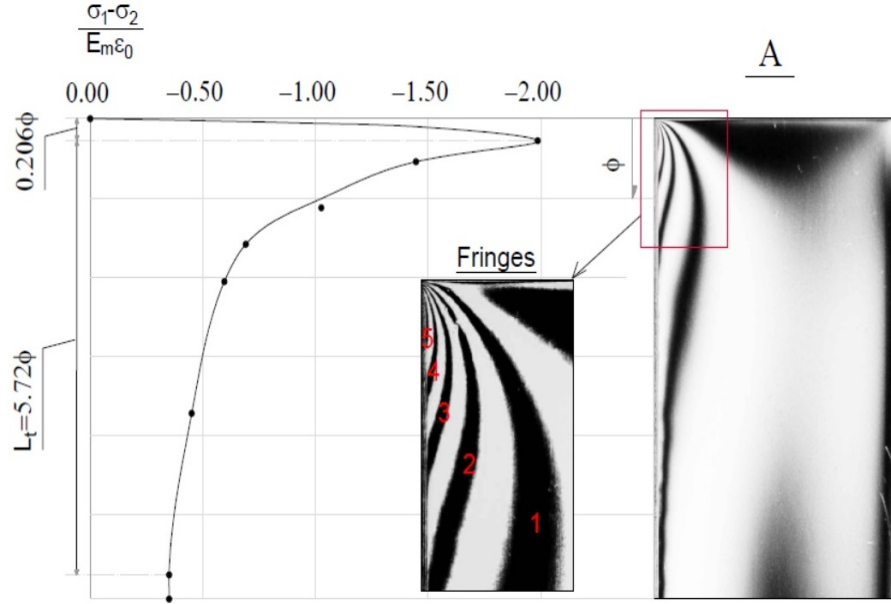
Burada A_1 ve A_2 sırası ile beton ve donatıyı temsil eden elemanların en kesit alanlarını ifade etmektedir. Kuvvet dengesi ve birim şekil değiştirmelerin eşitliği için 2.15, 2.16 ve 2.17 bağıntıları kullanılır.

2.17a ifadesinde (-) işareti bileşik çubuklarda oluşan gerilmelerin ters işaretli olduğunu göstermektedir. Yapılan hesaplamalar ile 3-B Fotoelastik Model-2'in orta bölümünde yük ekseninde oluşan gerilme değerleri boyutsuz olarak Şekil 2.48'de gösterilmektedir.



Modelin kenarları için yapılan gerilme analizi sonucu oluşan grafik Şekil 2.48’de gösterildiği gibi üniform karakterdedir. Modelin eksenel simetri olması gerilme analizinin herhangi bir birleşim arayüzünde yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Öngerilmelerin aktarılması donatı-beton aderansından kaynaklanan kayma gerilmeleri vasıtası ile gerçekleştiğinden donatı etrafında oluşan asal gerilme farklarını temsil eden interferens şeritlerinin ölçülmesi sonucu elde edilen boyutsuz gerilmeler Şekil 2.49’da gösterilmektedir.



Şekil 2.49 : 3-B Model-2’nin birleşim arayüzündeki aderanstan kaynaklanan gerilmeler.

Şekil 2.49’dan de görüldüğü üzere ankraj bölgesinde oluşan maksimum kayma gerilmeleri serbest kenardan yaklaşık olarak 0.206ϕ kadar altında meydana gelmektedir. Burada ϕ donatı çapını temsil etmektedir (6 mm). Transfer boyu ise 5.72ϕ olarak ölçülmüştür. Maksimum kayma gerilmeleri ise öngerilme değerinin 1.82 katı kadardır.

3. SAYISAL YÖNTEMLER

Öngerilmeli beton elemanların sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar metodu ile hesaplanması için ABAQUS paket programı kullanılmıştır. Programın kullanıcı "*subroutineleri*" birçok problemin çözümü konusunda ihtiyaçlara cevap verebilecek seviyededir. Fotoelastisite gerilme analizleriyle lineer elastik sınırlar içerisinde bulunan gerilmeler ölçüldüğünden sonlu elemanlar ile yapılan analizlerde de lineer elastik sınırlarda çözümler yapılır. Öngerilmeli betonarme elemanlarda üretim aşamasında oluşan "ön gerilmeler" malzemelerin elastik limit sınırlarının içerisinde olduğu düşünüldüğünde lineer elastik yöntemlerle bulunan gerilme seviyeleri öngerilmeli beton elemanların tasarımı ile ilgili oldukça gerekli olan yeterli bilgilerin elde edilmesine imkan vermektedir.

Modelin oluşturulması için ABAQUS CAE arayüzü kullanılır. Tüm modellerin analitik hesapları için kullanılan malzeme özellikleri için, deneyin yapıldığı sıcaklıkta (T_f) malzemenin gösterdiği mekanik özellikler dikkate alınarak girdi oluşturulmuştur. İki-boyutlu fotoelastik modelin düzlem gerilme halinde olması onun düzlem gerilme (shell) elemanlarıyla çözülebilmesine olanak sağlamaktadır. Üç-boyutlu silindirik fotoelastik modelin ise eksenel simetriye sahip olması sonlu elemanlar yöntemi ile eksenel simetrik (axisymmetric) olarak modellenmesine olanak sağlamaktadır. Tüm modellerin fotoelastisite yöntemi ile gerilme analizinin yapılmış olması sayısal yöntemlerde lineer elastik sınırlar içerisinde çözüm yapılmasını gerektirmektedir. Kullanılan elemanlar geometrik kolaylık ve/veya zorunluluk sebepleriyle üçgen veya dörtgen şekillerde olabilmektedir. İki ve üç-boyutlu fotoelastik modellerin deney sonuçları ile sayısal hesaplamalar ile elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

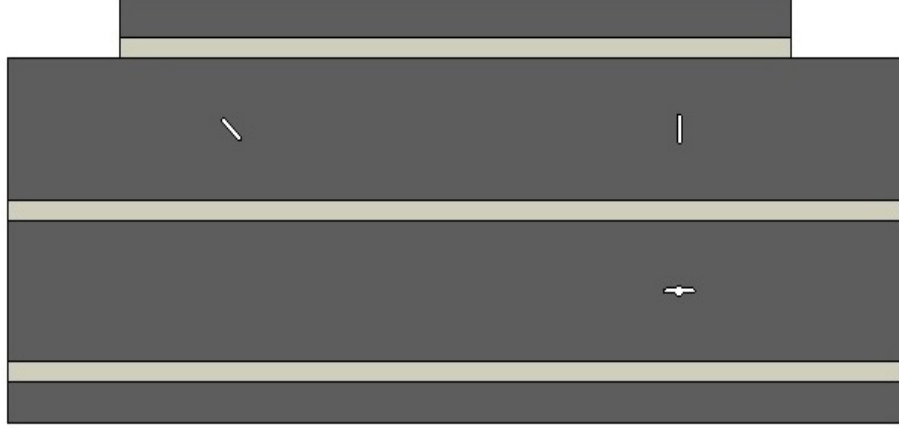
3.1 2-B Model'in Nümerik Analizi

2-B fotoelastik modelin oluşturulması için düzlem (plain-stress) elemanlar kullanılmaktadır. Programda modelin oluşturulması için gerekli olan adımlar aşağıda sıralanmaktadır.

- *Part Module*'ünde model taslağı geometrisi ve boyutları oluşturulur. Modelin donatı ve beton kısımları için *Partition* işlemi uygulanır.
- *Property Module*'de kompozit modeli oluşturan iki adet malzemenin dondurulma sıcaklığındaki mekanik özellikleri girilir (145°C). Oluşturulan 2 adet malzeme modelin uygun parçalarına atanır.
- *Assembly Module* model parçalarını birleştirmek içindir. Fakat oluşturduğumuz model tek parça ve farklı malzeme özelliklerine sahip kısımlardan oluştuğu için tek parça *dependent* olarak modellenir.
- *Step Module*'ünde modelin hesaplamalarının yapılacağı tek adım *General, Static* olarak seçilir. Bu adımda yakınsama için kullanılacak *increment* yöntemi otomatik olarak seçilir.
- *Load Module*'ü modelin yüklerinin ve sınır koşullarının girildiği modüldür. Bu modülde malzemenin öngerilmeye maruz kalması için *Initial* adımında malzemenin öngerilmeli olarak hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir. Bu konuda *predefined field* olarak ilk adımda modele verilen $E_m \varepsilon_0 = \sigma_0$ kadar gerilme y eksenine doğrultusunda verilir. Modelin şekil değiştirmesini engelleyecek herhangi bir sınır koşulu bulunmamaktadır.
- *Mesh Module*'ünde modelin tamamlanması için 2 farklı eleman kullanılmıştır. Birinci eleman tipi geometrik süreksizliği bozan kusurların olmadığı *CPS4R(Plain stress quadrilateral element)* elemanlar ve diğer durumda da kullanılan üçgen elemanlardır. Bu yöntemin kullanılmasının sebebi modelde oluşan sınır gerilmeleri için *mesh refinement*'in kusursuz durumda daha düzgün yapılabilmesidir. Hesaplama yönteminde kullanılan kolaylık bakımından kusurların sınırlarda oluşan gerilme değerlerini etkilemediği kabul edilmektedir.

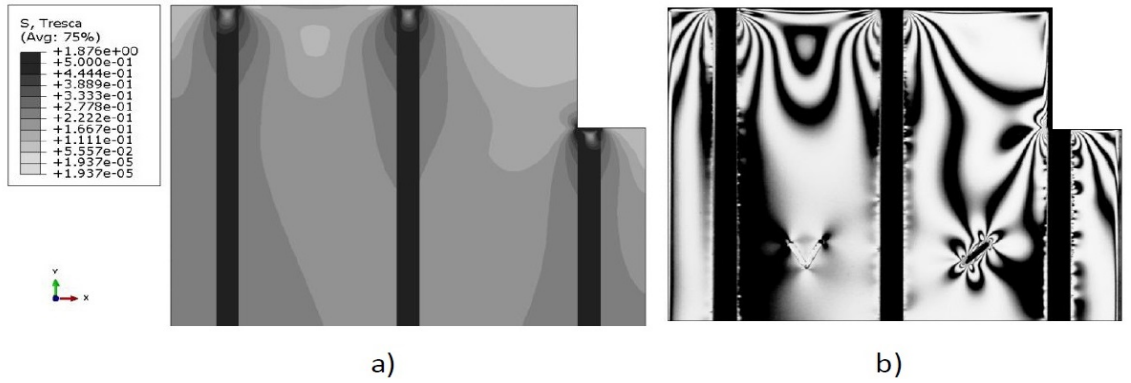
Fotoelastik modelin interferens şeritlerini gösteren şekiller incelendiğinde bu kabulün oldukça makul olduğu görülmektedir.

Oluşturulan model Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : 2-B numunenin ABAQUS modeli.

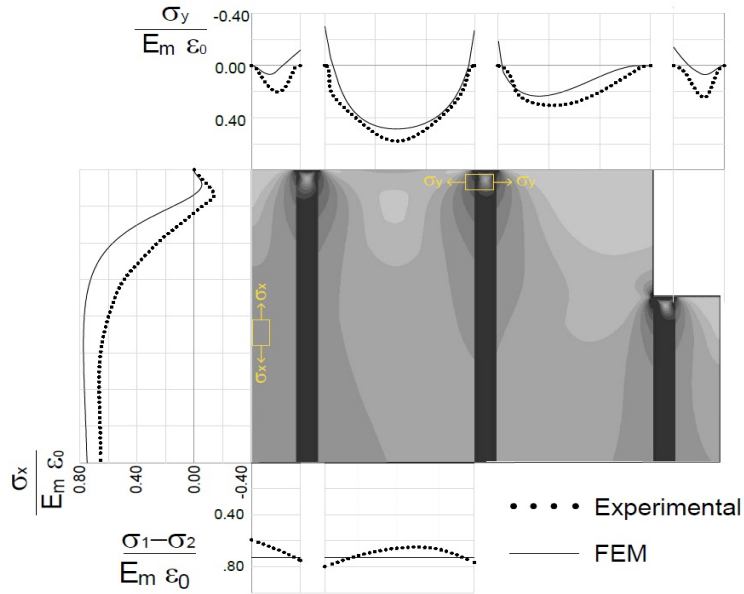
Modelin tamamlanması ile çözüme geçilir. Çözümünden elde edilen sonuçları görmek için *Visualization Module*’ü kullanılır. Fotoelastik yöntem ile yapılan deneylerde elde edilen interferens şeritlerinin eğilimi asal gerilmeler farkının eşit olduğu noktalarda aynı renkte olduğundan hesaplamalarda bu durum *Tresca* gerilmeleri ile elde edilir. Eş gerilme durumunu gösteren SEM modelin *Tresca* gerilmeleri deneyde elde edilen şeritler ile birlikte Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : a) Modelde sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan Tresca gerilmeleri skalası, b) aynı bölgede fotoelastik yöntem ile bulunan şeritler (monokromatik ışık).

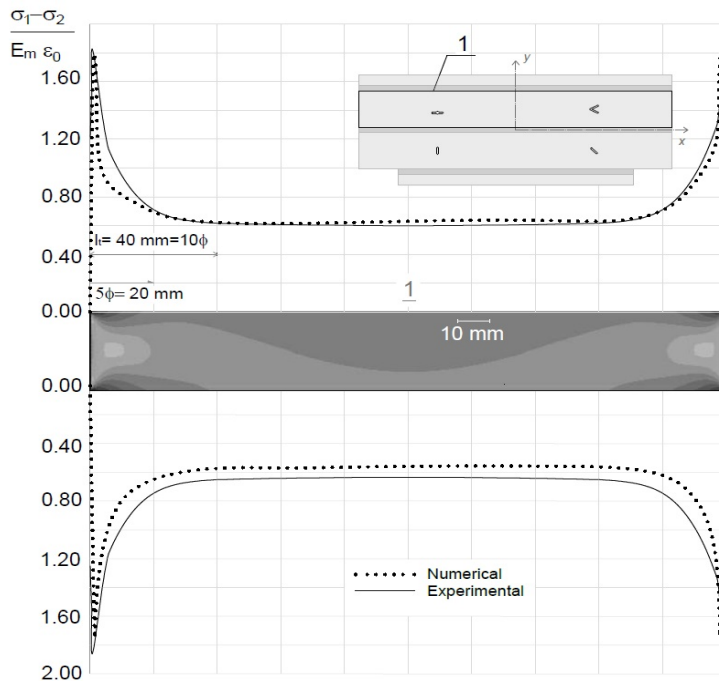
Hesaplamalar sonucu bulunan asal gerilme farklarını temsil eden Şekil 3.2 ile fotoelastik modelin monokromatik ışık altında gösterilen interferens şeritleri şekil ve değer bakımından benzerlik göstermektedir. SEM modeli 406421 nod ve 405000

quadrilateral plain stress shell elemanlardan oluşmuş olup *structured mesh* metodu kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : Modelin kenarlarında oluşan gerilmelerin analitik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.

Karşılaştırmalı grafikten görüldüğü üzere SEM modelinde kullanılan metotlarla elde edilen sonuçlar iki-boyutlu fotoelastik modelde elde edilen veriler ile uyumludur (Şekil 3.3). Gerilmelerin sıçrayış gösterdiği birleşim noktalarında hesaplama hataları meydana gelmektedir. Bu kısımlarda ağın inceltilmesi problemi kısmen çözmektedir.

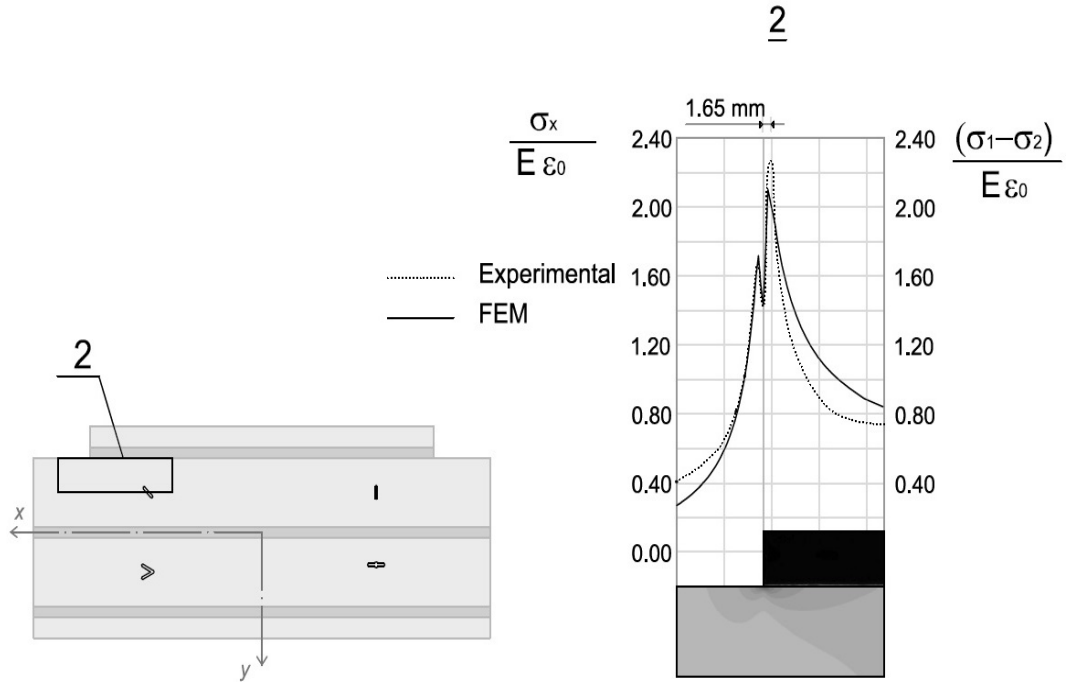


Şekil 3.4 : Modelin kenarlarında oluşan gerilmelerin analitik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.

Çizelge 3.1 : 2-B Model için elde edilen parametreler (E_s/E_c = donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, σ_0 = verilen öngerilme [MPa]).

	E_c/E_r	σ_0	Max Kayma Gerilmesi	Transfer Boyu
Fotoelastik Model	10.29	0.253	0.230	9.10ϕ
Sonlu Elemanlar Modeli	10.29	0.253	0.252	10.00ϕ
Fark	% 0.0	% 0.0	% 8.7	% 9.0

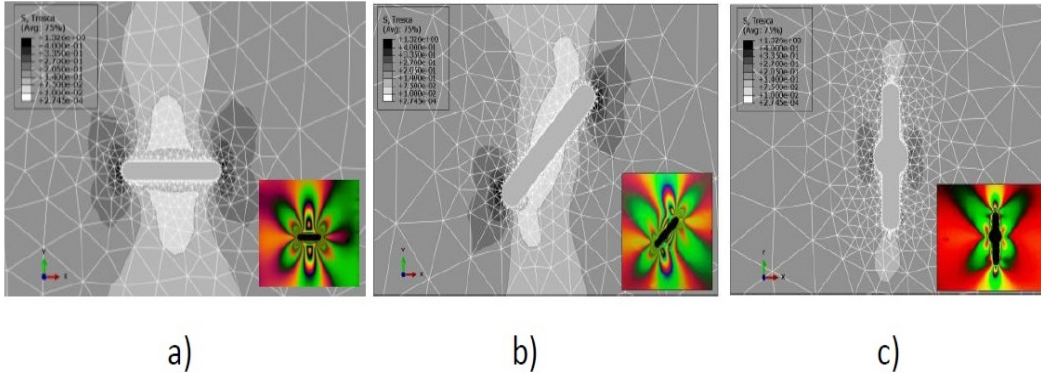
Şekil 3.4'ten de görüldüğü üzere iki boyutlu fotoelastik modelin ölçümleri SEM sonuçlar ile arayüzdeki gerilmeler için oldukça uyumludur. SEM'de birleşim yüzeyinin sınırdaki gerilmeleri sıfır olması gerekirken tam olarak deneysel sonuçlarla örtüşmemektedir. Bu durum hesaplama hatası olarak algılanmaktadır. Transfer boyu ise donatı çapının on katı kadardır. Modelin arayüzünde oluşan kayma gerilmeleri hiperbola fonksiyonu eğilimine sahiptir.



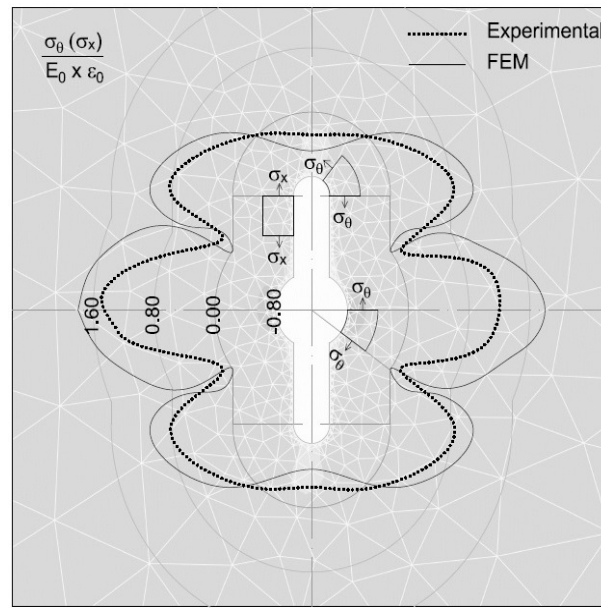
Şekil 3.5 : Modelin basamaklı bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafikleri.

Öngerilmeli beton elemanın iki-boyutlu analizi sonucu bulunan parametreler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Modelde oluşturulan kusurlar için sayısal (nümerik) yöntemde farklı eleman (triangular) kullanılarak kusur kenarlarında ağın inceltilmesi ile hesaplamalar tekrarlanır. Kusurlar için elde edilen gerilme skalaları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Modellenen kusurların SEM modeli ile elemanlarda oluşan gerilme skalası, a) yatay kusur, b) 45° eğik kusur, c) dikey kusur.

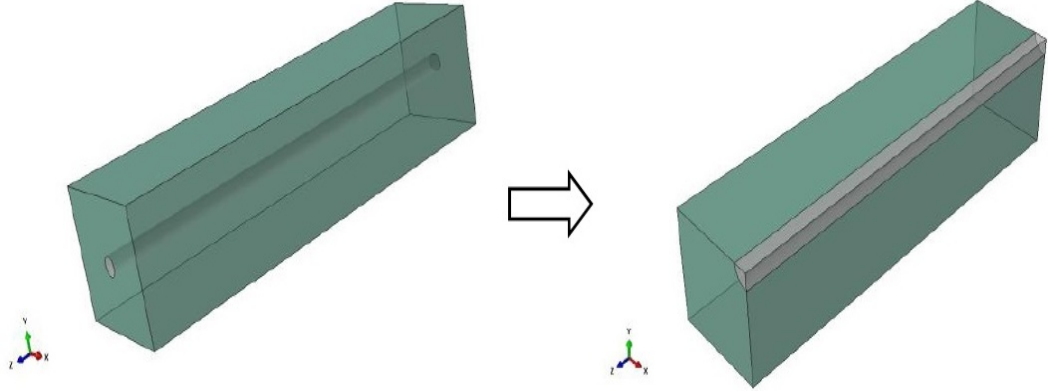


Şekil 3.7 : Modellenen merkezi dairesel olan dikey şeklindeki kusur civarındaki boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.

2-B fotoelastik modelin SEM modellerinden yapılan hesaplamaların ölçülen değerler ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. %10~20 arasında oluşan farklı değerlerin bir kısmı sayısal hesaplamalardan bir kısmı da deneysel hatalardan kaynaklanmaktadır. Genel davranış olarak aynı eğilimlere sahip olan grafiklerden de anlaşıldığı üzere maksimum gerilmeler sürekliliği bozan geometrik yapılarda ve kusur civarlarında meydana gelmektedir. Gerilme yığılmalarının olmadığı durumlarda ankraj bölgelerinde meydana gelen ekstremum değerleri verilen öngerilmenin 1.80~2.00 katı arasında bir gerilmeye maruz kalmaktadır. Bu gerilme değerleri ile ilgili yapının güvenliği düşünüldüğünde önlem alınması gerekmektedir.

3.2 3-B Model-1'in Nümerik Analizi

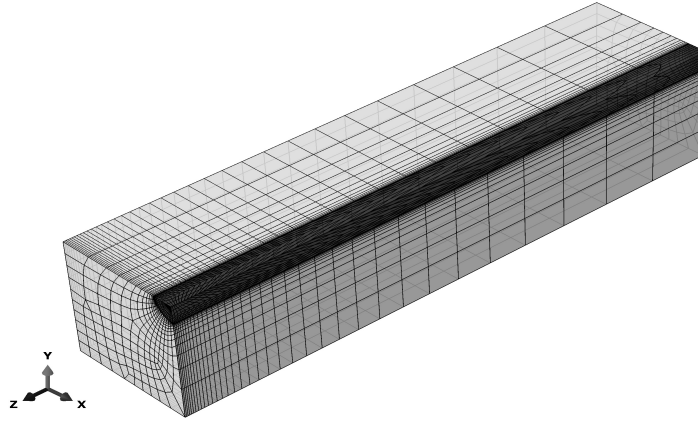
Fotoelastik yöntem ile yapılan modellemelerden 3-B Model-1 için kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri prototipte kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinden farklılık göstermektedir. Bu modelin yapılması ile öngörilmeli beton elemanların önemli parametreleri ile ilgili karşılaştırmalı verileri elde etmek amaçlanmaktadır. Modelin geometrisi eksenel simetriye sahip olmayıp kare en kesitli bir prizma şeklindedir. Kullanılan malzemenin elastik sabitleri Bölüm 2'de verilmiştir. Modüler oran olarak $E_r/E_c = 30.86$ değerine sahip olan modelde kullanılan matris malzemesi araldit1 olarak adlandırılan fotoelastik malzemedir. Donatı için ise nylon6 kullanılmıştır. Malzeme parametreleri programın *Property Module*'ünde tanıtılması ve yükleme koşullarının da göz önünde bulundurulması ile birlikte modelin her üç ekseninde sahip olduğu simetri koşullarından faydalanılabilir.



Şekil 3.8 : 3-B Model-1 için kullanılan simetri eksenleri.

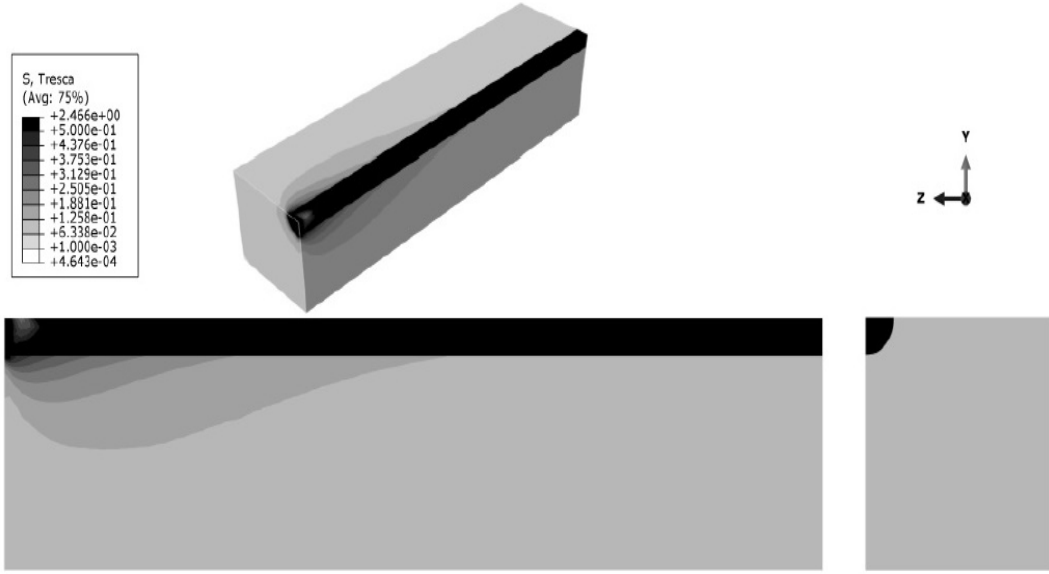
- *Part Module*'ünde *3D Deformable Solid* seçenekleri ile model taslağı, geometrisi ve boyutları oluşturulur. Modelin donatı ve beton kısımları için *Partition* işlemi uygulanır. Bu işlemlerden sonra simetri eksenlerine uygun olarak modelin Şekil 3.8'de gösterildiği gibi 1/8'lik kısmı elde edilir
- *Property Module*'de üç-boyutlu olan modelin malzemeleri ile ilgili girdiler deneyin yapılacağı dondurulma sıcaklığındaki mekanik özellikleri dikkate alınarak girilir ($T_f = 95^\circ C$).

- *Assembly Module* model parçalarını birleştirmek içindir. Fakat oluşturduğumuz model tek parça ve farklı malzeme özelliklerine sahip kısımlardan oluştuğu için tek parça *dependent* olarak *assembly* edilir.
- *Step Module*'ünde modelin hesaplamalarının yapılacağı tek adım için iki-boyutlu modelde uygulanan metod uygulanır. Steady-State analiz için yapılacak olan hesaplamalarda adım tipi için *General*, *Static* seçimi yapılır ve otomatik zaman aralığı tercih edilir.
- *Load Module*'ünde içinde silindirik kesitli boşluk bulunan kare kesitli beton kısma *Initial* adımında *Predefined field* olarak $E_m \epsilon_0$ (-0.154 MPa) kadar öngerilme z eksenine doğrultusunda verilir. Modelin şekil değiştirmesini engelleyecek herhangi bir sınır koşulu bulunmamaktadır.
- *Mesh Module*'ünde model için *Standart Linear 3D Stress hexahedral* elemanlar kullanılmıştır. Kullanılan elemanların integrasyonu için hesaplamalarda *reduced integration* yöntemi tercih edilmiştir. Model dairesel sınırları ihtiva ettiğinden *hexagonal* elemanlarla birlikte *linear wedge* elemanlar da kullanılmıştır. Ağları oluşturulan model Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



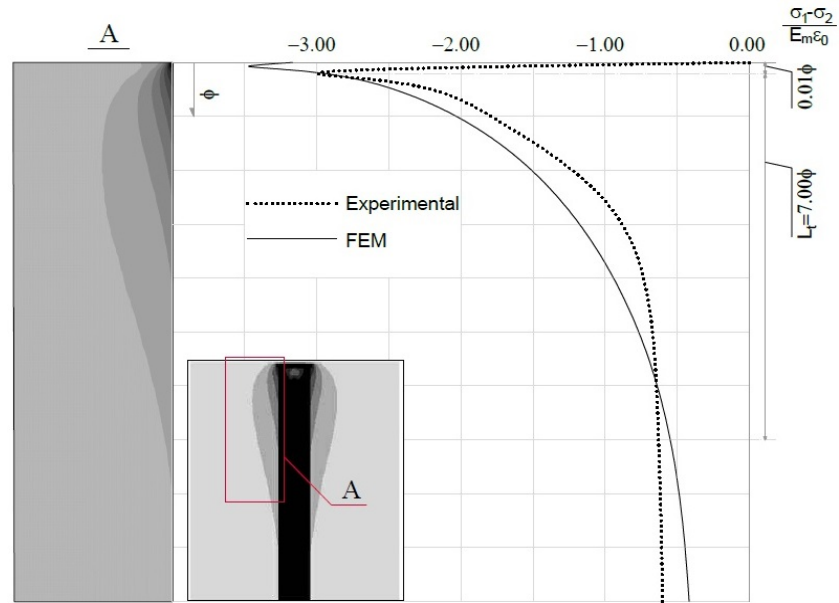
Şekil 3.9 : 3-B Model-1 SEM Modeli.

Modelde 12600 nod ve 11375 eleman kullanılmıştır. Kullanılan elemanların büyük bir çoğunluğu (10885) *linear hexahedral* elemanlardan oluşmuştur (C3D8R- Continuous- 3 Dimensional - 8 Nodes - Reduced Integration). *Linear Wedge* elemanların (C3D6) sayısı ise 490 adettir. Şekil 3.9'dan da görüldüğü üzere ağlar ankraj bölgelerinde inceltirilmiştir.



Şekil 3.10 : Üç-boyutlu modelde oluşan gerilmelerin skalası.

Kare en kesitli 3-B Model-1'in sayısal analizi ile ankraj bölgelerinde gerilme konsantrasyonlarının olduğu görülmektedir. Gerilmelerin karşılaştırmalı analizleri Şekil 3.11'de verilmektedir.



Şekil 3.11 : 3-B Model-1'in ankraj bölgesinde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.

3-B Model-1'in sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplamaları sonuçları ile deneysel sonuçlar birbirleri ile uyumludur. Öngerilmeli elemanın modelinden elde edilen parametreler Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2 : 3-B Model-1 için elde edilen parametreler (E_s/E_c = donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, σ_0 = verilen öngerilme [MPa]).

	E_c/E_r	σ_0	Max Kayma Gerilmesi	Transfer Boyu
Fotoelastik Model	30.86	0.154	0.230	4.67 ϕ
Sonlu Elemanlar Modeli	30.86	0.154	0.266	7.00 ϕ
Fark	% 0.0	% 0.0	% 13.6	% 33.2

Ankraj bölgesi için verilen boyutsuz gerilmelerin grafiğinden deneysel ve sayısal analiz sonucu bulunan maksimum kayma gerilmeleri arasında %8~11 kadar bir fark vardır. Maksimum kayma gerilmelerinin olduğu yer bakımından fark biraz daha büyük olup % 13.6 kadardır. Transfer boyu bakımından ise sayısal analiz sonucu bulunan gerilmelerin dağılımı lineer eğilime daha geç ulaşmaktadır. Deneysel analiz sonucu elde edilen transfer boyu ile sayısal analiz sonucu elde edilen değer arasında % 33.2 kadar bir fark bulunmaktadır.

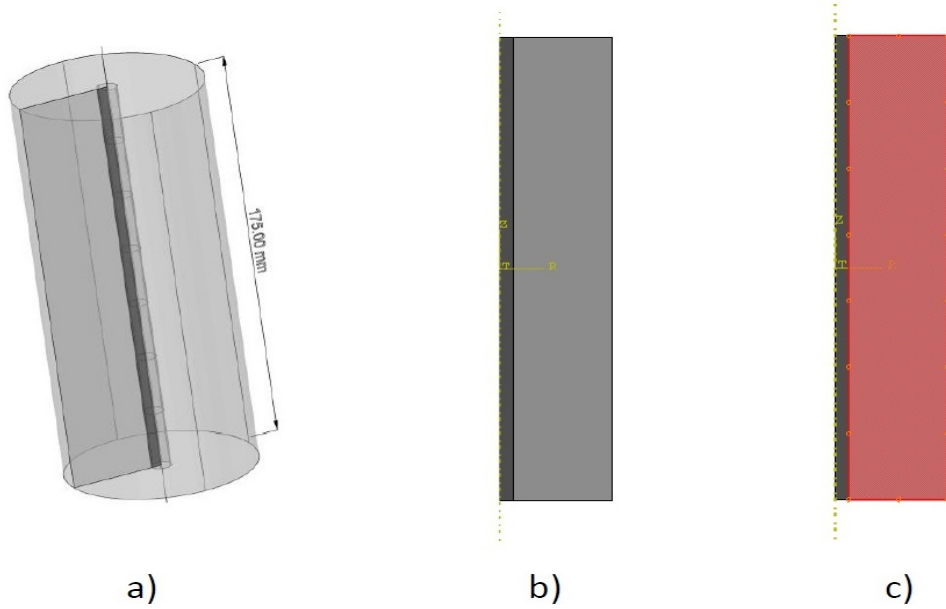
3.3 3-B Model-2'nin Nümerik Analizi

Fotoelastik yöntem ile deneyi yapılan son model 3-B Model-2 olarak adlandırılmaktadır. Model-2'nin sayısal analizi modelin geometrisinden ve yükleme durumundan kaynaklanan eksenel simetri hali göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Eksenel simetriye sahip olan beton ve donatı kısımlarının ABAQUS CAE arayüzü kullanılarak modellenmesi aşağıdaki adımların gerçekleştirilmesi ile yapılır.

- *Part Module*'ünde modelin geometrisi *Axisymmetric* modelleme uzayında *Deformable Shell* tipi çizim ortamında gerçekleştirilir. Eksenel simetriye sahip olan modelin sadece simetri eksenini olan z eksenini ile r ekseninin oluşturduğu yüzeyde model taslağı oluşturulur. *Partition* işlemi ile donatı ve beton kısımlarını temsil eden parçalar birbirlerinden ayrılır.
- *Property Module* ile malzemelerin (araldit2 ve nylon6) oluşturulması ve belirlenen parçalara atanması işlemi yapılır.
- *Assembly Module* ile SEM model oluşturulur.
- *Step Module*'ünde lineer elastik ortamda steady-state gerilme durumunun analizi söz konusu olduğundan *Automatic Incrementation* tipi belirlenen zamanda uygulanır.

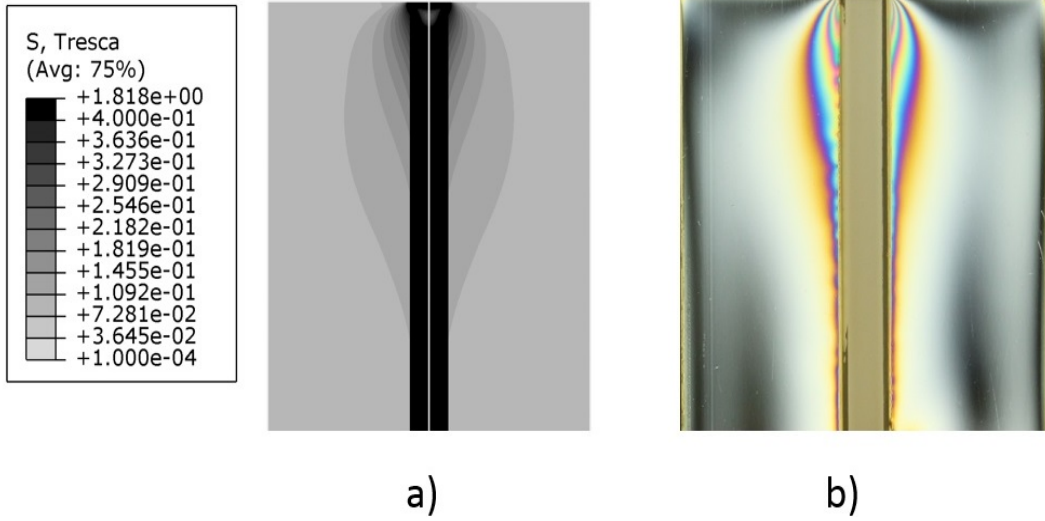
- *Load Module*'ünde içinde silindirik kesitli boşluk bulunan kare kesitli beton kısma *Initial* adımımda *Predefined field* olarak $E_m \epsilon_0$ (-0.200 MPa) kadar öngerilme z eksenini doğrultusunda verilir. *ABAQUS Input* dosyasına yazılan kod ise (**Initial Conditions, type = STRESS*) şeklindedir. Modelin şekil değiştirmesini engelleyecek herhangi bir sınır koşulu bulunmamaktadır.
- *Mesh Module*'ünde model için 4 – *Node Bilinear Axisymmetric (CAX4R)* elemanlar kullanılmıştır. Kullanılan elemanların integrasyonu için hesaplamalarda *reduced integration* yöntemi tercih edilmiştir.

Oluşturulan SEM modeli Şekil 3.12'de verilmektedir.



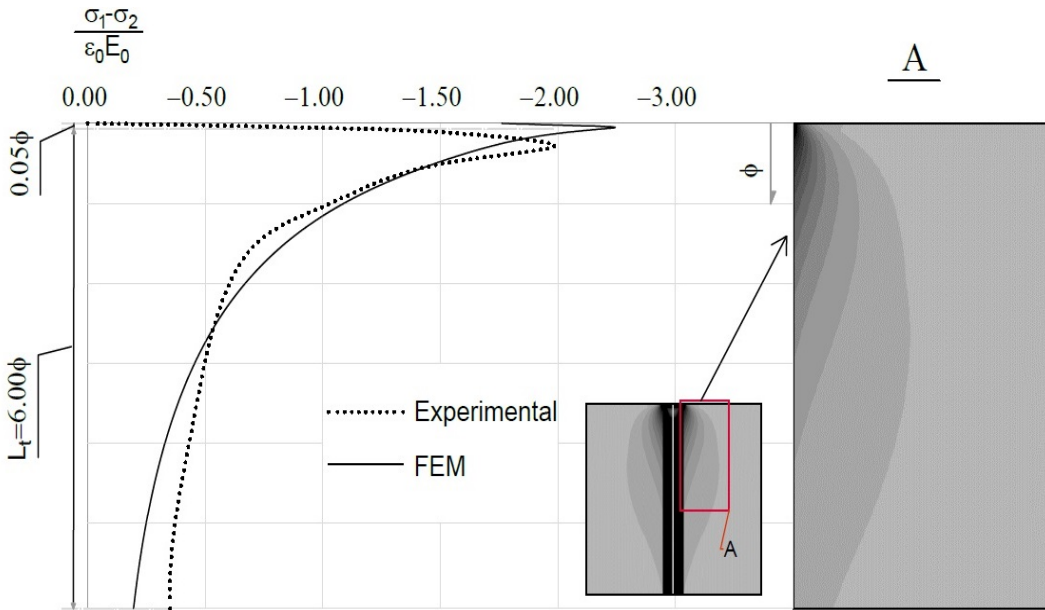
Şekil 3.12 : Üç-boyutlu ikinci modelin a) aksel simetri hali, b) modelin oluşturulması, c) öngerilmelerin betona aktarılması.

Modelin oluşturulması için "CAX4R" tipi elemanlar tercih edilmiş olup modelde 301451 nod ve 300000 *linear axisymmetric* eleman kullanılmıştır. Modelin hesaplamalarından sonra elde edilen *Tresca* gerilmelerinin skalası Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13 : Üç boyutlu ikinci modelin a) Tresca gerilmeleri skalası, b) beyaz ışıktaki polariskop fotoğrafı.

Şekil 3.13'ten de görüldüğü üzere ilgilenilmesi gereken bölge olan ankraj kısmında gerilme yığılmaları sayısal analiz ve fotoelastik model için benzer şekillerdedir. Ankraj bölgesi için oluşturulan gerilmelerin grafik olarak gösterimi ise Şekil 3.14'te verilmektedir.



Şekil 3.14 : 3-B Model-2'nin arayüzünde oluşan boyutsuz gerilmelerin karşılaştırmalı grafiği.

Modelin sayısal analizi sonucu elde edilen parametreler deneysel veriler ile Çizelge 3.3'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3 : 3-B Model-2 için elde edilen parametreler (E_s/E_c = donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, σ_0 = verilen ilk öngerilme [MPa]).

	E_c/E_r	σ_0	Max Kayma Gerilmesi	Transfer Boyu
Fotoelastik Model	10.27	0.20	0.195	5.72 ϕ
Sonlu Elemanlar Modeli	10.27	0.20	0.225	6.00 ϕ
Fark	% 0.0	% 0.0	% 11.4	% 4.7

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler maksimum kayma gerilmelerinin ve transfer boyunun verilen öngerilme değerine ve kullanılan malzemelerin elastisite modülleri oranına bağlı olduğunu göstermektedir.

4. GERİLME ANALİZİ

Yapılan deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların değerlendirilebilmesi için modellerde uygulanan benzerlik oranı dikkate alınarak gerçek bir elemanda karşılaşılabilecek gerilme değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bu bakımdan model ile prototip arasında gerilme dönüşümü yapılması gerekir.

4.1 Fotoelastik Analizler ile Yapılan Dönüşümler

Fotoelastik modeller ile üç farklı deney yapılmış ve gerilme analizleri fotoelastisitenin teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Bir yapının belli bir ölçeği dahilinde yapılan modellemelerin gerçek boyuttaki bir elemandaki eşdeğer gerilme değerinin bulunması için 4.1’de verilen eşitlikten yararlanılır.

$$\sigma_p = \frac{1 - \nu_p \epsilon_{0p} E_p}{1 - \nu_m \epsilon_{0m} E_m} \sigma_m \quad (4.1)$$

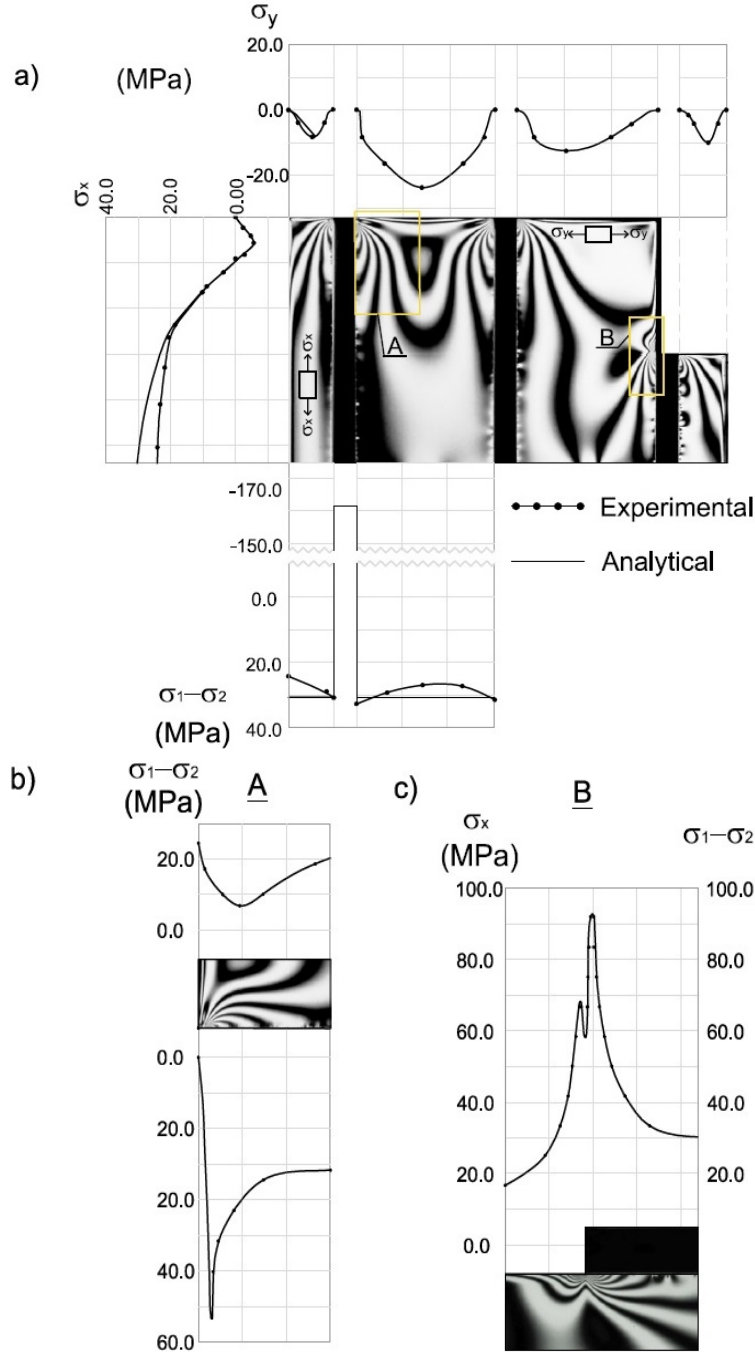
Burada p ve m indisleri sırası ile prototipi ve modeli temsil etmektedir. ν ve E ise sırası ile malzemenin Poisson oranı ve elastisite modülüdür. İfadede prototip ve model için verilen ϵ_0 verilen ilk öngerilme ile elemanda oluşan birim şekil değiştirmelerdir. Dönüşüm işlemleri için prototipte ve modelde kullanılan elemanların elastik sabitlerinin ve verilen öngerilme değerlerinin tablo şeklinde gösterilişi Çizelge 4.1’de verilmektedir. Öngerilmeli betonarme elemanlarda kullanılan beton malzemesi için elastisite modülü $E_p = 20,000 \text{ MPa}$ olan ve Poisson oranı $\nu_p = 0.24$ olan C50 sınıfında beton ele alınmaktadır. Öngerilme donatısı olarak yüksek mukavemetli çelik kullanılmış olup akma dayanımı 1000 MPa olan çelik malzeme kullanılmıştır. Mukavemetinin %30’una kadar öngerilme uygulanan çelik için yapılan gerilme dönüşümleri için elde edilen tablo Çizelge 4.1’deki gibidir.

Gerilme değerlerinin dönüşüm faktörü olan $n = \sigma_p / \sigma_m$ Çizelge 4.1’de elde edilmiştir. Dönüşüm faktörü kullanılarak fotoelastik modellerde elde edilen gerilme değerleri Şekil 4.1’de verilmektedir. Öngerilmeli tabliye veya kirişlerde oluşabilecek

Çizelge 4.1 : Prototip-model dönüşümü parametreleri (MPa).

	E_m	E_p	ν_m	ν_p	ϵ_{0m}	ϵ_{0p}	$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}$
2-B Fotoelastik model	18.06	20000	0.45	0.25	0.014	0.0015	162
3-B Fotoelastik Model-1	8.10	20000	0.45	0.25	0.019	0.0015	266
3-B Fotoelastik Model-2	18.10	20000	0.45	0.25	0.011	0.0015	205

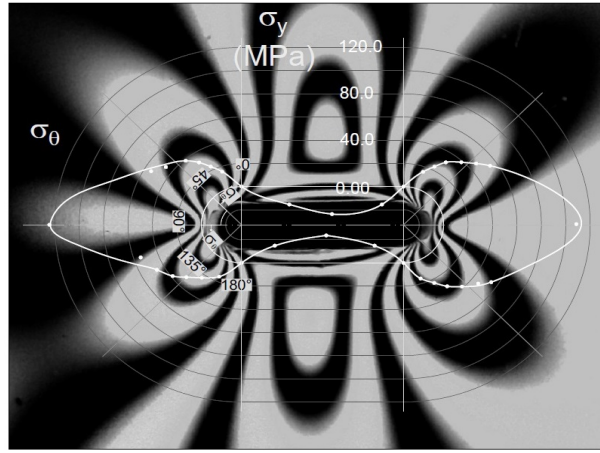
gerilmelerin, mukavemet sınırları göz önüne alınarak, analizlerinin yapılabileceği prototiplerin gerilme grafikleri bazı önlemlerin alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.1 : 2-B Model'in prototipi için a) kenarlarda, b) arayüzde, c) basamaklı bölgede oluşan gerilmeler.

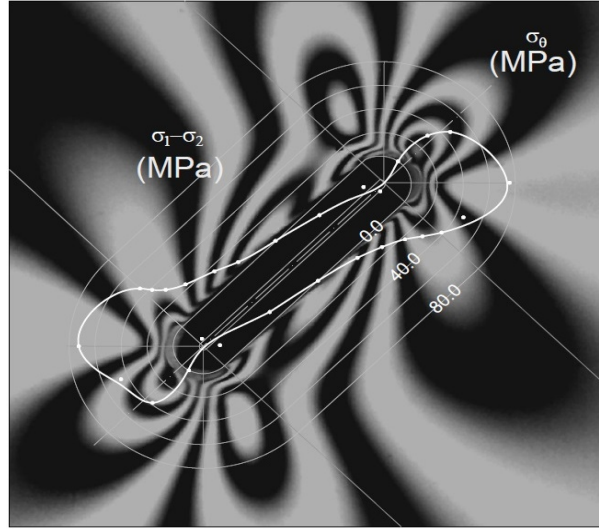
2-B fotoelastik modelin prototipi öngerilmeli plaklar için model parametreleri doğrultusunda oluşturulan gerilmeler Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere ankraj bölgelerinde oluşan gerilmeler malzemenin mukavemet sınırlarını aşan değerlerdedir. Bu bölgelerde oluşabilecek bir kayma gerilmesi sınırlara ulaştığı anda donatının sıyrılması gözlemlenebilir. Bu durum betonun plastisite parametreleri ölçeğinde belli bir yere kadar devam eder. Beraberinde oluşan öngerilme kayıpları dizayn değerlerini değiştirdiğinden yapının servis yükleri altında güvenliği tehlikeli sınırlara erişebilir. Öngerilmeli plaklar yüksek açıklıklı tek veya iki yönde çalışan tabliyelerde ve özellikle geniş açıklıklı köprülerin tabliyeleri olarak kullanılmaktadır. Altyapısal sorunların yaşanabileceği bu durumların önlenmesi can ve mal kaybına yol açabilecek katastrofik toptan göçmelerin ihtimallerinin azaltılmasına yardım eder. Ayrıca en yüksek gerilmelerin (kayma gerilmelerinin) ölçüldüğü basamaklı bölgeler için öngerilmeli tabliyelerde veya kirişlerde düzensizliklerden olabildiğince kaçınılması gerekmektedir.

2-B modelde oluşturulan yatay kusurun gerilmeleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



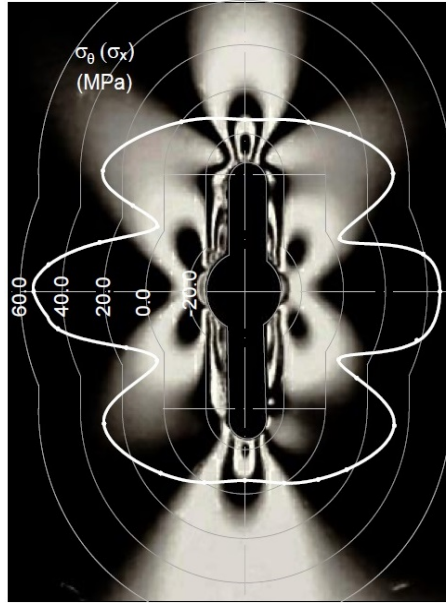
Şekil 4.2 : 2-B Model'in yatay kusurunda oluşan gerilmeler.

Yatay kusurun asal eksenı üzerinde uç kısımlarda oluşan σ_{θ} gerilmeleri oldukça yüksek olup (112 MPa) malzeme mukavemet sınırlarını aşan elverişsiz gerilme durumlarının oluşmasına neden olabilir. Modellenen eğik kusur için elde edilen dönüştürülmüş gerilme değerleri ise Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 : 2-B Model'in eğik kusurunda oluşan gerilmeler.

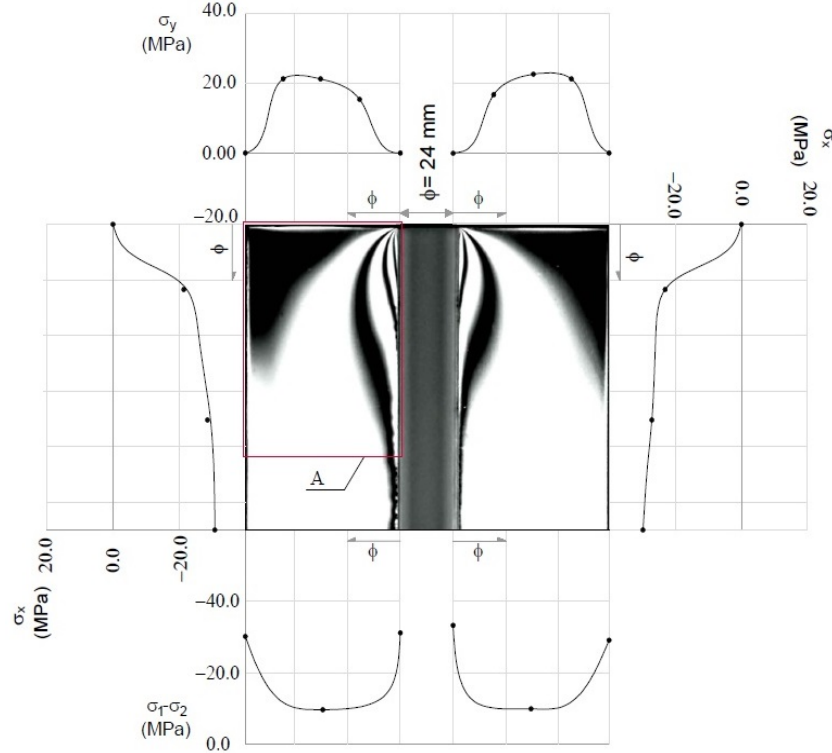
Eğik olarak oluşturulan oyuk uçlarındaki maksimum gerilme değeri (σ_{theta}) 75 MPa kadardır. Bu değer 42 derece eğik şeklin uçlarında meydana gelmektedir. Dikey kusur civarında oluşan gerilmeler Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Elde edilen maksimum gerilme değeri 52 MPa kadardır.



Şekil 4.4 : 2-B Model'in dikey kusurunda oluşan gerilmeler.

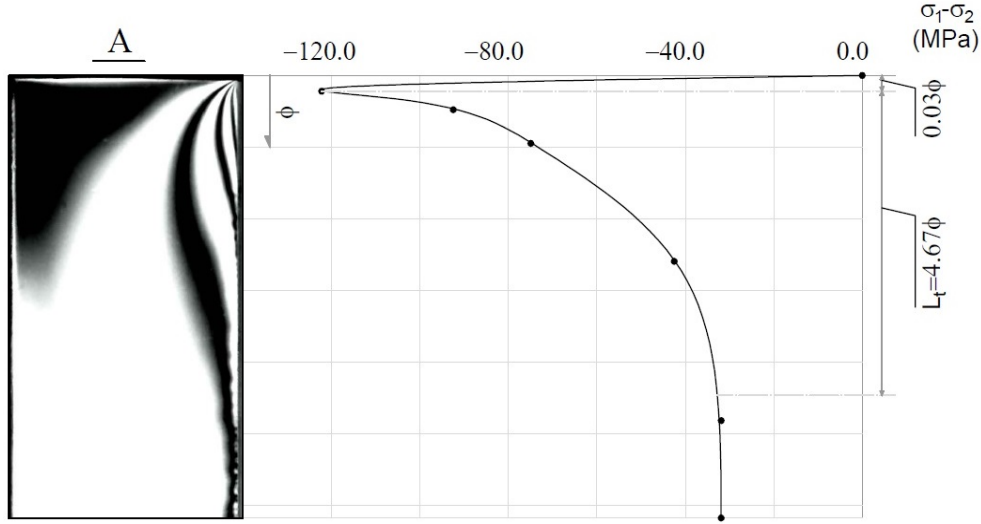
Modellenen kusurların uygulanan yük doğrultusuna dik yönde oluşan gerçek gerilme değerleri betonun mukavemet sınırları bakımından oldukça yüksektir. Öngerilmeli elemanların iç yapısında bulunan herhangi bir non-üniform oluşumda mukavemet sınırlarını aşabilen gerilme durumlarının oluşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Üç-boyutlu fotoelastik modellerin ilkinde modüler oran 30'un üzerinde olduğundan prototip kiriş elastisite modülleri arasındaki farkın gerilmeleri nasıl etkilediğini görmek açısından önem kazanmaktadır. Modelin öngerilmeli kiriş prototipinde serbest kenarlarda oluşan gerilmeler Şekil 4.5'te verilmektedir.



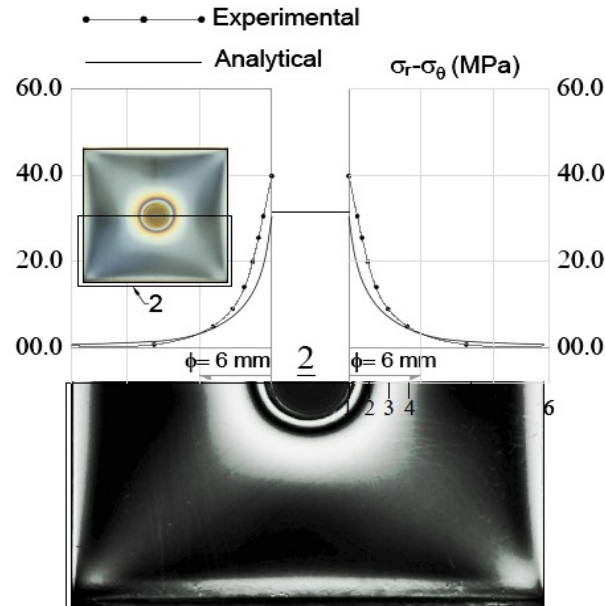
Şekil 4.5 : 3-B Model-1'in prototipinde oluşan gerilmeler.

Kirişin ankraj uçlarında öngerme donatısının çevresinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler betonun zayıf olduğu çekme gerilmeleri durumunda uçlarda çatlakların oluşmasına sebep olabilir. Şekil 4.5'te A ile belirtilen bölüm ankraj bölgesinde oluşan kayma gerilmelerini temsil etmektedir. Bu bölge için kirişte oluşan gerilmeler Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6 : 3-B Model-1'in arayüzünde oluşan gerilmeler.

Beton donatı birleşim arayüzünde oluşan Tresca gerilmeleri uç kısma doğru maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu bölgede beton mukavemet değerini aşan gerilmeler kirişte öngerilme kayıplarına neden olur. Modüler oranların değişiminin gerilmeler bazında etkilerini görmek için karşılaştırmalı analiz yapılması gerekmektedir.

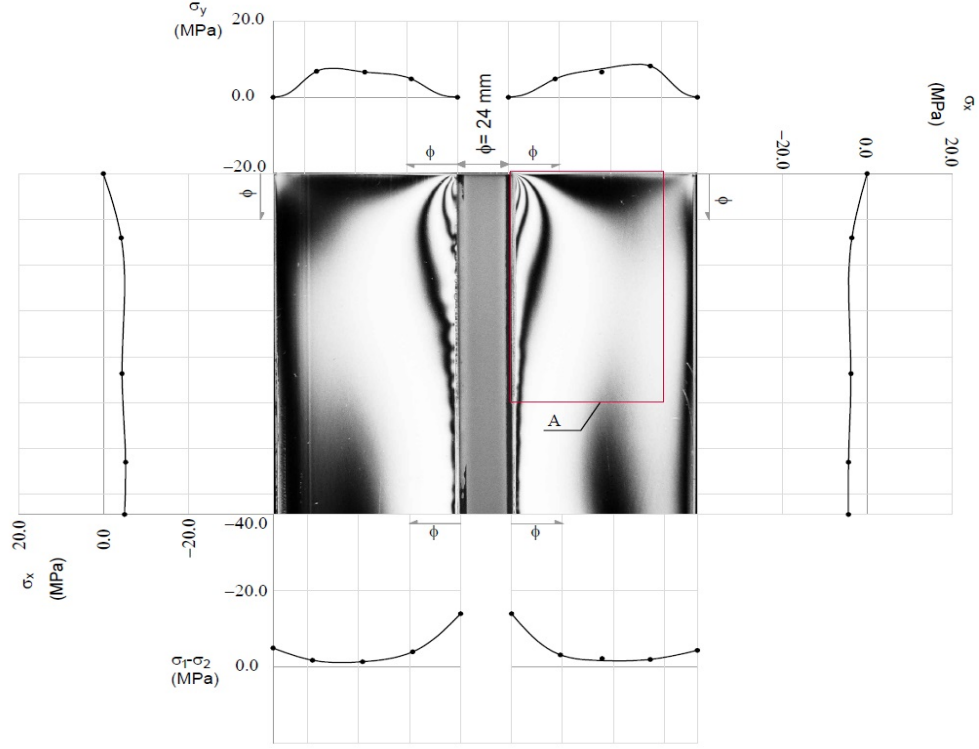


Şekil 4.7 : 3-B Model-1'in yatay doğrultudaki gerilme değerleri.

Şekil 4.7'de $r - \theta$ düzleminde oluşan gerilmelerin dönüştürülmüş değerleri gösterilmektedir. Bu grafik Poisson etkisi ile donatıda öngerme eksenine dik doğrultuda oluşan birim şekil değiştirmelerin öngerilme kuvvetlerinin serbestleşmesi ile beton elemanda yapacağı basınç etkileri hakkında bilgi vermektedir. Tahmin edildiği üzere aderans noktasında $\sigma_r - \sigma_\theta$ değerleri yüksek olup donatıdan uzaklaştıkça hızla

azalmaktadır. Bu durumda oluşabilecek betonun ezilme tehlikesi araştırılması gereken bir diğer konudur.

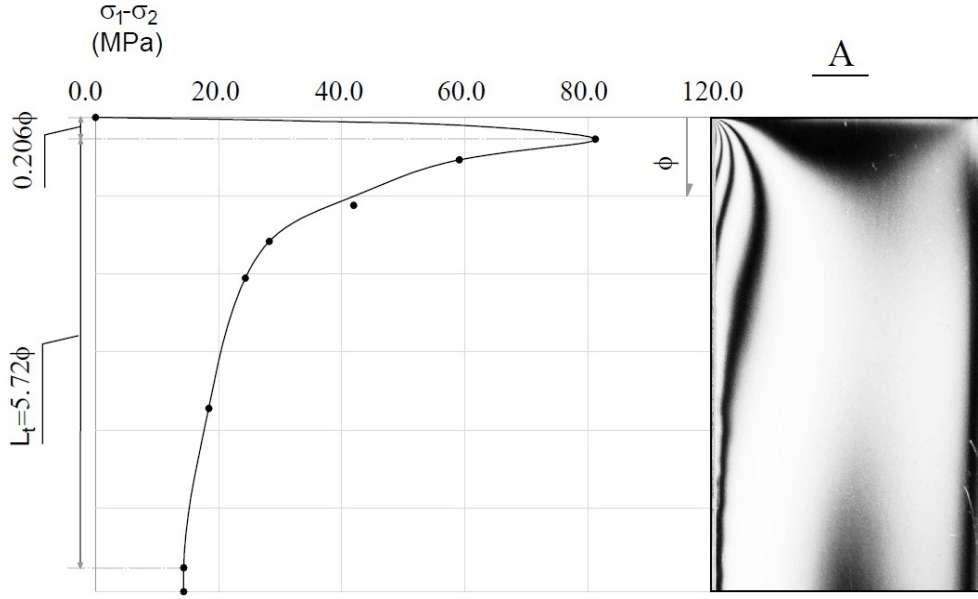
Üç boyutlu fotoelastik modellerden ikincisinde modüler oran öngerilmeli beton elemanların modüler oranına uygun olduğundan karşılaştırmalı analiz bu modelin gerilmelerinin incelenmesi ile yapılabilir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : 3-B Model-2'nin kenarlarında oluşan gerilmeler.

Üç-boyutlu modellerden ikincisi olan Model-2 için dizayn edilen ilk öngerilme değeri ($\sigma_0 = \epsilon_0 E_0$) 0.20 MPa'dır. Bu değer kare kesitli ilk modelin öngerilme değerinden fazla olduğu halde beton elemanda oluşan gerilme değerleri ilkinden daha azdır. Burada modüler oranın yani betonun elastisite modülü ile donatının elastisite modülü oranının değişmesi ile aktarılan öngerilme değerleri de değişmektedir. Aynı zamanda transfer boyu ve ankrajda oluşan maksimum kayma gerilmelerinin değeri de değişmektedir. En kesit alanlarının farklı olması ile verilen öngerilme değerinin enerjinin korunumu ilkesine dayanarak nihai durumdaki gerilme değerleri tespit edilebilir.

Şekil 4.9'de 3-B Model-2'nin prototipi için birleşim arayüzünde oluşan gerilmeler gösterilmektedir.

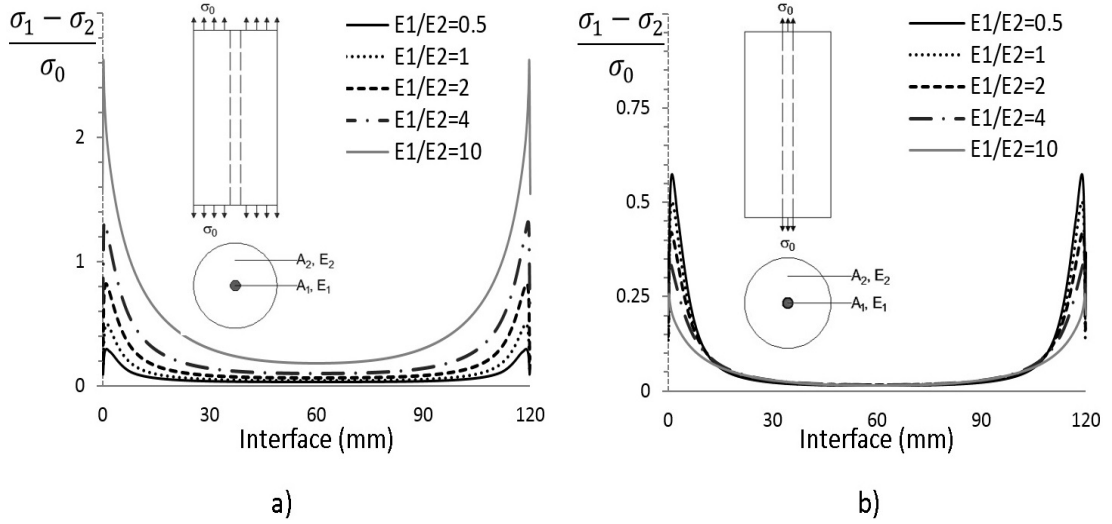


Şekil 4.9 : 3-B Model-2'nin prototipi için birleşim arayüzünde oluşan gerilmeler.

Öngerilmelerin dağılması ile beton donatı arayüzünde oluşan gerilmeler ankraj bölgesine doğru gerilme yığılması oluşturmaktadır. Oluşan gerilme yığılmaları için maksimum kayma gerilmesi yaklaşık olarak $80/2 = 40 \text{ MPa}$ 'dır. Bu değer betonun kayma mukavemetinin çok üzerindedir. Mukavemet analizi bakımından betonun elastik sınırlarını aşır çatlak oluşumuna neden olan gerilme alanının içerisinde olan bu kısımlarda donatı sıyrılmaları meydana gelebilir.

4.2 Nümerik Analiz Değerlendirmeleri

Yapılan modellerin sayısal yöntemler ile modellenmesi sonucu kullanılan metodun öngerilmeli inşaat elemanları için kullanılabileceği sonucuna varılmaktadır. Öngerilmeli elemanların önemli parametrelerinden olan transfer boyu ve ankraj bölgelerinde oluşan gerilme yığılmalarının değerinin $\frac{E_s}{E_c}$ 'e bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Burada E_s ve E_c sırası ile donatı çeliğinin ve betonun elastisite modülleridir. Bu durumda inşaat malzemeleri haricinde iki farklı malzemenin birleşmesi ve birinin öngerilmeye maruz kalmış olması durumunda oluşan gerilme yığılmaları için eksenel simetri durumundaki üç-boyutlu modelin nümerik analiz yöntemi kullanılabilir. Yapılan farklı modeller ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 : a) 2 no'lu malzemeye b) 1 no'lu malzemeye aplike edilen birim öngerilme kuvveti ile farklı modüler orana sahip elemanların nümerik analiz sonuçları.

Şekil 4.10a'da görüldüğü gibi kullanılan malzemelerin elastisite modülleri oranı arttıkça yani 1 no'lu malzemenin Young modülü 2 no'lu malzemeye kıyasla arttıkça 2 no'lu malzemenin birleşim arayüzünde ankraj (uç) bölgelerinde elde edilen gerilme yığılmalarının değeri de artmaktadır. Öteki taraftan öngerilmelerin 1 no'lu malzemeye uygulanması ve E_2/E_1 oranının artması ile birleşim arayüzünde oluşan gerilme yığılmalarının azaldığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.10a ve b). Buradaki hesaplamalarda herbir model için birim ilk öngerilme değeri uygulanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel, nümerik ve analitik analizler sonucunda elde edilen veriler maddeler halinde aşağıda verilmektedir.

- Bu çalışmada öngerilmeli beton elemanların deneysel olarak araştırılması 3-B fototermoelastisitenin "gerilmelerin dondurulması" metodu uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Öngerilme uygulamalarının, termal gerilme analojisine dayanılarak gerçekleştirilen deneysel yöntem ile incelenen yapısal elemanın üretim aşamasında oluşan gerilmelerinin analizi mümkün olmaktadır. Kompozit yapıların fotoelastik modellenmesi konusunda, gerilme değerlerinin lineer elastik sınırlar içerisinde kaldığı kabul edildiğinde, model için kullanılan malzemelerin elastisite modüllerinin oranının prototipteki malzemelerin modüler oranları ile uyumlu olması gerektiği sonucuna varılmaktadır.
- Öngerilmeli beton elemanların analizleri sonucu ankraj bölgelerinde gerilme yığılmalarının olduğu belirlenmiştir. Bu bölgelerde oluşan gerilme seviyeleri analiz edilen modeller göz önünde bulundurulduğunda verilen ilk öngerilme değerinin 1.8-3.0 katı kadardır. Modüler oranın beton ve çelik düşünüldüğünde prototipteki malzemeler ile uyumlu olduğu 2-B Model ve 3-B Model-2 için bu değer sırası ile 1.8 ve 2.0 olmaktadır. 3-B Model-1'de ankraj bölgesinde elde edilen maksimum gerilme değeri verilen ilk öngerilme değerinin yaklaşık 3.0 katı kadardır.
- Ankraj bölgelerinde oluşan gerilme yığılmaları ilk öngerilme değerinin betona aktarılmasını sağlayan beton donatı aderansı marifetiyle gerçekleşmektedir. Yığılma noktasında oluşan maksimum kayma gerilmelerinin değerinin deneysel ve nümerik analizler sonucunda verilen ilk öngerilme değerine, kullanılan malzememelerin elastisite modülleri oranına ve kuvvet dengesinden en kesit alanları oranına ($\frac{A_s}{A_c}$) bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

- Beton-donatı birleşim arayüzünde oluşan maksimum kayma gerilmeleri deneysel veriler göz önünde bulundurulduğunda arayüzün serbest kenarla birleştiği noktadan donatı çapının 0.01~1.00 katı bir mesafe kadar içerisinde oluşmaktadır.
- Arayüzün ankraj bölgesinde oluşan Tresca gerilmelerinin ölçülmesi ile hesaplanan kayma gerilmeleri betonun mukavemet sınırlarını aşmaktadır. Bu durumda oluşabilecek donatı sıyrılmaları, aderans ve öngerilme kayıplarına sebep olabilir.
- Öngerilmelerin aktarılması ile ankraj bölgelerinde oluşan yüksek seviyelerdeki gerilmeler betonda çatlak oluşumuna veya mevcut çatlağın ilerlemesine neden olabilir. Bu durum yapı güvenliğini tehlikeye sokacak seviyelere ulaşabilir.
- Donatı sıyrılamalarından ve betonun ezilmesinden kaynaklanan öngerilme kayıpları tasarım değerlerinin servis yükleri altında güvensiz bölgelere düşmesine sebep olabilir. Bu durumda yapının tasarımı sırasında kullanılan güvenlik katsayılarının kontrol edilmesi gerekmektedir.
- Ankraj bölgelerindeki gerilme yığılmalarından kaynaklanan olumsuz şartları ile betonun sünme etkileri ve donatıda meydana gelen gerilme geçmesi (stress relaxation) etkileri birlikte düşünüldüğünde öngerilmeli beton tasarımına esas hesap kurallarının gerçekten uzaklaşabileceği kanısına varılabilir.
- İki boyutlu modellerin analizinden iki öngerme donatısı arasında kalan kısımda oluşan gerilmeler için basınç halinden çekme haline doğru bir eğilimin varlığından söz edilebilir. İki ankraj noktası arasında kalan bölgede beton malzemesinin zayıf olduğu çekme gerilmeleri durumu ankraj bölgelerine yakın bir bölgede olduğundan her iki bölgede oluşabilecek çatlakların birleşmesi elverişsiz durumların oluşmasına neden olabilir.
- Öngerilmeli beton elemanın öngerilme uygulanan kenarında öngerilme donatısının beton ile birleştiği noktada asal gerilme farkları sıfır olmaktadır. Bu gerilme değeri beton yüzeyinde diğer ankraj bölgesine doğru gidildikçe çekme gerilmelerine rastlanılır. Çekme gerilmeleri kenar boyunca diğer bir ankraj noktasına veya kenarın bittiği uç noktaya kadar yaklaşık üniform bir şekilde devam eder. Bu durumda öngerilmeli bir elemanın öngerme uygulanan noktanın etrafında çekme gerilmelerinden kaynaklanan çatlakların oluşması oldukça muhtemeldir.

- 2-B fotoelastik modelin incelenmesi ve nümerik analiz sonuçlarında beton donatı aderansı ile aktarılan öngerme kuvvetlerinin sürekliliğini bozan bir geometri ile karşılaşıldığında çok büyük gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu durum 2-B modelin basamaklı bölgesinde görülmektedir. Bu bölgede öngerilmelerin aktarılamadığı serbest kenarda oluşan gerilme yığılmaları hemen altında aktarımın başladığı birleşim arayüzünde oluşan yığılmalardan biraz daha küçük değerdedir. Mimari zorunluluklardan kaynaklanan, öngerilme kuvveti ekseninde olabilecek bir aderans süreksizliğinden alternatif çözümlere başvurularak kaçınılmalıdır.
- Öngerilme kuvvetinin betona aktarıldığı mesafe transfer boyu olarak isimlendirilir. 3-B fotoelastik modellerin deneysel sonuçları ile nümerik sonuçlarının karşılaştırılması ile elde edilen bulgular neticesinde transfer boyunun kullanılan malzemelerin elastisite modülleri oranına ve donatı çapına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Modellerde transfer boyu donatı çapının yaklaşık 4~10 katı arasında ölçülmüştür.
- 2-B fotoelastik modelin analizi ve nümerik hesaplamaları neticesinde, beton içerisinde üniformluğu bozan bir oluşumun öngerilme doğrultusuna dik yönde oldukça elverişsiz gerilme durumlarını oluşturduğu belirlenmiştir.
- 2 ve 3-B modellerin incelenmesi sonucunda gerilmelerin aktarıldığı transfer boyu üzerinde oluşan Tresca gerilmeleri için uç kısımdaki ekstremum noktasından genel hiperbol fonksiyonu şeklinde azaldığı sonucuna varılabilir ($xy = c$). Burada x etkili öngerilmelerin üniform olarak dağıldığı aks değeri olup y ankraj uç kısmındaki yatay eksendir. formülde verilen c ise malzemelerin elastisite modülüne, verilen öngerilme değerine ve donatı çapına bağlı bir katsayıdır.
- Genel olarak öngerilmeli beton elemanlarda elde edilen en elverişsiz gerilme durumları ankraj uç noktalarında gözlemlenmiştir. Bu kısımlarda oluşan çekme gerilmelerinin ve ankraj birleşim yerinde oluşan maksimum kayma gerilmelerinin önlemlerinin alınması gerekmektedir. Bu konularda betonun bu kısımlara denk gelen bölgelerinde FRP veya ek donatı ile takviye edilmeleri ve beton içerisinde olabilecek herhangi bir non-üniform yapıdan olabildiğince kaçınılması adına betonun homojenliğini arttırıcı önlemlere başvurulması düşünülebilir.
- Verilen ilk öngerilme değeri kritik noktalardaki gerilme seviyelerini direkt olarak etkidiğinden tasarım aşamasında verilecek ilk öngerilme değeri dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Jackson, P.H. & Seailles, J.** (1889). French Patent No. 680547.
- [2] **Naaman, E.A.** (1991). *Prestressed Concrete Analysis and Design, Fundamentals*. McGraw-Hill, New York.
- [3] **Base, G.D.** (1957). Some tests on the effect of time on transmission length in pre-tensioned concrete, *Magazine of Concrete Research*, 9(26), 73–82.
- [4] **Arthur, P.D. & Ganguli, S.** (1965). Tests on end-zone stresses in pre-tensioned concrete I beams, *Magazine of Concrete Research*, 17(51), 85–96.
- [5] **Russell, B.W. & Burns, N.H.** (1997). Measurement of transfer lengths on pretensioned concrete elements, *Journal of Structural Engineer*, 123(5), 541–549.
- [6] **Benitez, J.B. & Galvez, J.C.** (2011). Bond modelling of prestressed concrete during the prestressing force release, *Materials and Structures*, 44(1), 263–278.
- [7] **Marti-Vargas, J.R., García-Taengua, E., Caro, L.A., & Serna, P.** (2014). Measuring specific parameters in pretensioned concrete members using a single testing technique, *Measurement*, 49(2014), 421–432.
- [8] **Christodoulides, S.P.** (1955). A two-dimensional investigation of the end anchorages of post-tensioned concrete beams, *The Structural Engineer*, 120–133.
- [9] **Christodoulides, S.P.** (1957). Three-dimensional investigation of the stresses in the end anchorage blocks of a prestressed concrete gantry beam, *The Structural Engineer*, 349–356.
- [10] **Rasheeduzzafar, Allison, I.M., & Al-Saadoun, S.S.** (1984). A photoelastic investigation of anchorage bearing stresses, *Magazine of Concrete Research*, 36(127), 81–91.
- [11] **Linger, D.A., & Bhonsle, S.R.** (1963). An investigation of transfer length in pretensioned concrete using photoelasticity, *PCI Journal*, 13–30.
- [12] **Boley, B.A., & Weiner, J.H.** (1960). *Theory of thermal stresses*. Wiley, New York.
- [13] **Timoshenko, S.P., & Goodier, J.N.** (1970). *Theory of elasticity*. McGraw-Hill, Singapore.
- [14] **Hetnarski R., & Ignaczak J.** (2010). *The Mathematical Theory of Elasticity*. Taylor and Francis Group, FL USA, 2. sürüm.

- [15] **Jackson, P.H.** (1888). US Patent No. 375999.
- [16] **Doehring, C.E.W.** (1888). Prussian Patent No. 53548.
- [17] **Magnel, G.** (1954). *Prestressed Concrete*. Concrete Publications Ltd., London, 3. sürüm.
- [18] **Guyon, Y.** (1960). *Prestressed Concrete*. Vol. 1 & 2, Wiley, New York.
- [19] **Abeles, P.** (1964). *An Introduction to Prestressed Concrete*. Vol. 1 & 2, Concrete Publications Ltd., London.
- [20] **Leonhardt, F.** (1964). *Prestressed Concrete Design and Construction*. English translation, Wilhelm Ernst and Sohn, Berlin, 3. sürüm.
- [21] **Mikhailov, V.V.** (1969). *Prestressed Concrete Structures: Theory and Design*. translated from Russian by J.H.Dixon, Cement and Concrete Association, London.
- [22] **Nawy, E.G.** (2006). *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 5. sürüm.
- [23] **Brewster, D.** (1816). On the Communication of the Structure of Doubly Refracting Crystals to Glass, Murate of Soda, Flour Spar and Other Substances by Mechanical Compression and Dilatation, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1816, 156–178.
- [24] **Neumann, F.E.** (1841). Über Gesetze der Doppelbrechung des Lichtes in comprimierten oder ungleichförmig Erwarmten unkrystallischen Körpern, *Abh. Akad. Wiss. Berlin, Part II*, 1–254.
- [25] **Maxwell, J.C.** (1853). On the equilibrium of elastic solids, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 20, 87–120.
- [26] **Akoz, Y.** (1974). Fotoelastisite, *TMMOB Türkiye İnşaat Mühendisliği 6. Teknik Kongresi*, 4(11).
- [27] **Brewster, D.** (1818). On the Laws of Polarisation and Double Refraction in Regularly Crystallized Bodies, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 108(1818), 199–273.
- [28] **Dally, J.W., & Riley, W.F.** (1965). *Experimental stress analysis*. McGraw Hill, New York.
- [29] **Frocht, M.M.** (1948). *Photoelasticity* (Vol. 1). Pergamon, Oxford.
- [30] **Frocht, M.M.** (1948). *Photoelasticity* (Vol. 2). Pergamon, Oxford.
- [31] **Dougless, D.J., & Trahair, N.S.** (1960). An examination of the stresses in the anchorage zone of a post-tensioned prestressed concrete beam, *Magazine of Concrete Research*, 12(34), 9–18.
- [32] **Iyengar, K.T.S.R., & Yogananda, C.V.** (1966). A three-dimensional stress distribution problem in the anchorage zone of a post-tensioned concrete beam, *Magazine of Concrete Research*, 18(55), 75–84.

- [33] **Yettram, A.L., & Robbins, K.** (1969). Anchorage zone stresses in axially posttensioned members of uniform rectangular section, *Magazine of Concrete Research*, 21(67), 103–112.
- [34] **Fenwick, R.C., & Lee, S.C.** (1986). Anchorage zones in prestressed concrete members, *Magazine of Concrete Research*, 38(135), 77–89.
- [35] **Yong, Y.K., Gadekbeku, C.B.K., & Nawy, E.G.** (1986). Anchorage zone stresses of beams subjected to shear forces, *Jornal of Structural Engineering*, 1987(113), 1789–1805.
- [36] **Theocaris, P.S. & Koufopoulos, T.** (1969). Photo-elastic analysis of shrinkage micro cracking in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 21(66), 1789–1805.
- [37] **Chang, C.W., Chen, P.H. & Lien, H.S.** (2008). Evaluation of residual stress in pre-stressed concrete material by digital image processing photoelastic coating and hole drilling method, *Measurement*, 42(2009), 552—558.
- [38] **Adams, S.F.** (1966). Photoelastic concrete similitude with CR-39 reinforced with epoxy and glass, *Experimental Mechanics*, 6(1), 54—57.
- [39] **Bignell, V.F., Smalley, V. & Roberts, N.P.** (1963). A new photoelastic material for use in problems concerning reinforced concretes, *Magazine of Concrete Research*, 15(45), 171—176.
- [40] **Leven, M.M., & Sampson, R.C.** (1959). Photoelastic stress and deformation analysis of nuclear reactor components, *Pros. Soc. ESA*, 17(1).
- [41] **Slot, T.** (1965). Photoelastic simulation of thermal stresses by mechanical prestraining, *Experimental Mechanics*, 5(9), 273–282.
- [42] **Abdulaliyev, Z.** (1970). Determination of thermal stresses in components made by joining different materials, *Industrial Laboratory:Plenum Public Corporation*, 36(3), 460–473.
- [43] **Abdulaliyev, Z.E., & Pigorovskiy, N.I.** (1976). Modeling of thermoelastic stresses in zones of welded joints (Rusça), *Photomechanics and Application Thermal stresses and strains analysis*, Editor: Pisarenko, G.S..
- [44] **Durelli, A.J., Phillips, E.A. & Tsao, C.H.** (1958). *Introduction to the theoretical and experimental analysis of stress and strain*. McGraw-Hill, New York.
- [45] **Coker, E., & Filon, L.** (1931). *Treatise on photoelasticity*. Cambridge University Press, London.
- [46] **Abdulaliyev, Z., & Ataoglu, S.** (2009). Effect of Poisson's ratio on three-dimensional stress distribution, *Journal of Applied Mechanics, ASME*, 76(1).
- [47] **Horvay, G.** (1954). Thermal stresses in rectangular strips, *Proc. II. National Cong. of Applied Mechanics, ASME*, New York.
- [48] **Papkovich, P.F.** (1939). *Elasticity Theory* Oborongiz, Leningrad-Moscow .

- [49] **Belonosov, S.M.** (1962). Fundamental plane statistical problems of the theory of elasticity for simply connected or double connected regions, Novosibirsk (in Russian).
- [50] **Muskhelishvili, N.I.** (1963). *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*. P. Noordhoff Ltd., Groningen.
- [51] **Eshelby, J.D.** (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, University of Birmingham, UK
- [52] **Abdulaliyev, Z., Donmez, A., & Ataoglu, S.** (2015). Photoelastic stress analysis of pre-tensioned concrete elements, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering (in Turkish)*, in press.
- [53] **Donmez, A., Ataoglu, S., Aldemir, U., Artan, R., & Abdulaliyev, Z.** (2014). Residual Stresses in the Prestressed Concrete Elements, *11th International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE2014*, Istanbul.

EKLER

EK A : Fotoelastik Ölçümler

EK A

Çizelge A.1 : 2-B Model için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	8.85	9.50	8.78	9.58	3.300	3.75	0.205
2	8.61	9.06	8.56	9.14	3.089	4.03	0.178
3	8.37	8.62	8.35	8.70	2.863	4.03	0.165
4	8.65	9.25	8.80	9.10	3.168	4.03	0.183
5	8.85	9.50	8.78	9.58	3.300	3.78	0.203
6	8.85	9.50	8.78	9.58	3.300	3.75	0.205
7	7.65	8.35	7.45	8.55	2.534	4.02	0.146
8	7.25	7.35	6.85	7.10	2.019	3.31	0.142
9	7.25	7.35	6.85	7.10	2.019	3.31	0.142
10	7.25	7.35	6.85	7.10	2.019	3.31	0.142
11	6.85	7.15	8.82	7.18	1.941	3.31	0.136
12	4.98	5.15	4.95	5.10	1.009	3.31	0.071
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	3.31	0.000
14	2.98	3.12	2.97	3.13	0.236	3.31	0.017
15	3.95	4.12	3.85	4.25	0.648	3.31	0.045
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	3.31	0.000
17	2.98	3.12	2.97	3.13	0.236	4.10	0.013
18	3.95	4.12	3.85	4.25	0.648	4.10	0.037
19	2.98	3.12	2.97	3.13	0.236	4.10	0.013
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.10	0.000
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.51	0.000
22	4.95	5.10	4.98	5.25	1.018	4.51	0.052
23	7.28	7.45	6.98	7.10	2.056	4.51	0.106
24	8.75	9.10	8.78	9.25	3.181	4.51	0.164
25	7.28	7.45	6.98	7.10	2.056	4.51	0.106
26	4.95	5.10	4.98	5.25	1.018	4.51	0.052
27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.51	0.000
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.51	0.000
29	4.86	5.00	4.85	5.10	0.973	4.32	0.052
30	4.75	4.99	4.85	5.21	0.971	4.32	0.052
31	3.50	2.85	3.20	2.75	0.375	4.32	0.020
32	2.25	2.56	2.15	2.45	0.219	4.32	0.012
33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.32	0.000
34	2.25	2.56	2.15	2.45	0.219	4.51	0.011
35	5.10	5.25	4.98	5.30	1.055	4.51	0.054
36	7.00	7.50	7.25	7.65	2.138	4.51	0.110
37	9.10	9.55	9.25	9.60	3.480	4.51	0.179

Çizelge A.1 (devam): 2-B Model için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı)

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
38	14.75	14.85	14.82	15.10	8.718	4.51	0.450
39	13.15	13.48	13.20	13.55	7.015	4.51	0.362
40	18.00	18.20	18.08	18.05	12.802	4.51	0.661
41	11.20	11.55	11.15	11.60	5.101	4.51	0.263
42	10.25	10.65	10.30	10.58	4.313	4.51	0.223
43	9.25	9.55	9.32	9.60	3.523	4.51	0.182
44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.51	0.000
45	4.50	4.82	4.45	4.75	0.852	4.51	0.044
46	5.65	5.80	5.55	5.78	1.286	4.51	0.066
47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	4.51	0.000
48	14.25	15.00	14.40	15.00	8.553	4.51	0.442
49	11.25	11.59	14.40	11.60	5.183	4.51	0.268
50	9.80	10.25	9.95	10.40	4.038	4.51	0.208
51	8.70	9.00	8.80	9.30	3.168	4.51	0.134
52	7.45	7.65	7.30	7.50	2.212	4.51	0.114
53	5.30	5.55	5.25	5.50	1.156	4.51	0.060
54	3.20	3.60	3.25	3.55	0.459	4.51	0.024
55	5.26	5.40	5.30	5.48	1.141	4.51	0.059
56	7.42	7.65	7.47	7.71	2.265	4.51	0.117

Çizelge A.2 : 2-B Model’de yatay oyuk için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı) .

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	9.74	10.05	9.75	10.02	3.864	4.44	0.202
2	8.78	8.89	8.61	8.85	3.040	4.44	0.159
3	7.84	8.50	8.29	8.50	2.741	4.44	0.143
4	8.69	8.89	8.50	8.78	3.020	4.42	0.158
5	10.10	9.55	10.17	10.32	4.048	4.42	0.212
6	11.60	11.85	11.72	12.05	5.513	4.42	0.289
7	12.50	12.60	12.26	12.67	6.163	4.42	0.323
8	13.12	13.44	13.12	13.47	7.014	4.42	0.368
9	13.60	13.55	13.47	13.55	8.600	4.42	0.451
10	13.12	13.44	13.12	13.47	7.014	4.42	0.368
11	12.50	12.60	12.26	12.67	6.163	4.42	0.323
12	11.60	11.85	11.72	12.05	5.513	4.42	0.289
13	10.10	9.55	10.17	10.32	4.048	4.42	0.212
14	8.69	8.89	8.50	8.78	3.020	4.42	0.158
15	7.84	8.50	8.29	8.50	2.741	4.42	0.144
16	8.78	8.89	8.61	8.85	3.040	4.44	0.159
17	9.75	9.95	9.78	9.90	3.846	4.44	0.201
18	8.78	8.89	8.61	8.85	3.040	4.44	0.159
19	8.30	8.56	8.32	8.59	2.821	4.44	0.147
20	8.78	8.89	8.61	8.85	3.040	4.37	0.161
21	10.10	9.55	10.175	10.325	4.048	4.37	0.215
22	11.45	11.70	11.46	11.67	5.284	4.37	0.280
23	12.50	12.15	12.17	12.40	5.971	4.37	0.317
24	13.12	13.35	13.16	13.35	6.923	4.37	0.367
25	13.15	13.42	13.24	13.56	8.000	4.37	0.425
26	13.12	13.35	13.16	13.35	6.923	4.37	0.367
27	12.50	12.15	12.17	12.40	5.971	4.37	0.317
28	11.45	11.70	11.46	11.67	5.284	4.37	0.280
29	10.10	9.55	10.17	10.32	4.048	4.37	0.215
30	8.78	8.89	8.61	8.85	3.040	4.37	0.161
31	7.87	8.15	7.82	8.10	2.521	4.37	0.134
32	8.78	8.89	8.61	8.85	3.040	4.44	0.159

Çizelge A.3 : 2-B Model’de eğik oyuk için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı) .

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	5.05	4.85	4.97	4.87	0.965	4.42	0.051
2	2.00	2.15	2.07	2.20	0.178	4.42	0.009
3	4.85	4.82	4.90	4.90	0.943	4.42	0.049
4	7.40	7.57	7.41	7.50	2.207	4.42	0.116
5	9.10	9.35	9.17	9.42	3.400	4.42	0.178
6	10.40	10.50	10.17	10.32	4.203	4.42	0.221
7	11.72	11.89	11.77	11.90	5.513	4.42	0.289
8	12.70	12.80	12.76	12.86	6.438	4.42	0.338
9	10.50	10.55	10.17	10.47	4.267	4.42	0.224
10	8.80	9.00	8.92	8.93	3.144	4.42	0.165
11	6.82	7.02	6.72	6.94	1.864	4.42	0.098
12	4.70	4.82	4.68	4.70	0.883	4.42	0.046
13	2.05	2.20	2.10	2.10	0.176	4.42	0.009
14	5.20	5.60	5.21	5.39	1.13	4.42	0.059
15	7.35	7.75	7.32	7.55	2.212	4.42	0.116
16	8.99	9.34	8.93	9.28	3.297	4.42	0.173
17	10.50	10.45	10.38	10.44	4.304	4.42	0.226
18	13.00	12.70	12.97	12.70	6.502	4.42	0.341
19	11.45	11.70	11.46	11.67	5.284	4.42	0.277
20	10.63	10.75	10.66	10.73	4.524	4.42	0.237
21	8.76	9.05	8.78	8.95	3.120	4.42	0.0.164
22	7.55	7.75	7.71	7.93	2.387	4.42	0.125

Çizelge A.4 : 2-B Model’de dikey oyuk için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı) .

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	6.17	6.42	6.22	6.36	1.571	4.45	0.082
2	7.45	7.60	7.63	7.61	2.280	4.45	0.119
3	8.30	8.56	8.32	8.59	2.821	4.45	0.145
4	8.60	8.90	8.60	8.97	3.046	4.45	0.159
5	7.10	7.34	7.07	7.23	2.042	4.45	0.106
6	6.00	6.22	6.09	6.27	1.504	4.52	0.077
7	5.20	5.25	5.21	5.20	1.077	4.52	0.055
8	7.10	7.34	7.07	7.23	2.042	4.52	0.105
9	8.89	9.00	8.89	9.07	3.181	4.52	0.163
10	10.15	10.20	10.12	10.30	4.112	4.52	0.211
11	13.00	12.90	13.00	13.05	6.667	4.52	0.342
12	11.45	11.70	11.46	11.67	5.284	4.52	0.271
13	10.15	10.20	10.12	10.30	4.112	4.52	0.211
14	8.89	9.00	8.89	9.07	3.181	4.52	0.163
15	5.83	6.21	6.22	6.20	1.500	4.52	0.077
16	7.45	7.60	7.63	7.60	2.280	4.52	0.117
17	8.05	8.02	8.00	8.03	2.552	4.49	0.132
18	7.45	7.60	7.63	7.60	2.280	4.49	0.118
19	6.55	6.45	6.40	6.48	1.656	4.49	0.085
20	7.45	7.60	7.63	7.60	2.280	4.49	0.118
21	8.89	9.00	8.89	9.07	3.181	4.49	0.164
22	8.89	9.00	8.89	9.07	3.181	4.49	0.164
23	7.50	7.40	7.37	7.29	2.152	4.49	0.111
24	6.95	7.05	6.95	7.05	1.383	4.52	0.071
25	8.89	9.00	8.89	9.07	3.181	4.52	0.163
26	10.15	10.20	10.12	10.30	4.112	4.52	0.211
27	11.85	11.84	12.07	12.08	5.687	4.52	0.292
28	10.15	10.20	10.12	10.30	4.112	4.52	0.211
29	8.89	9.00	8.89	9.07	3.181	4.52	0.163
30	7.50	7.40	7.37	7.29	2.152	4.52	0.110
31	7.10	7.26	7.05	7.07	1.996	4.52	0.102
32	7.50	7.40	7.37	7.29	2.152	4.52	0.111
33	7.40	7.57	7.41	7.50	2.207	4.45	0.115
34	7.45	7.60	7.63	7.60	2.280	4.45	0.119

Çizelge A.5 : 3-B Model-1'in 1 no'lu numunesi için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı) .

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	2.75	0.000
2	4.60	5.05	4.90	5.00	0.949	2.75	0.087
3	5.15	5.49	5.20	5.45	1.125	2.75	0.102
4	5.40	5.78	5.40	5.70	1.231	2.75	0.112
5	3.20	3.30	3.15	3.38	0.420	2.74	0.038
6	5.60	6.15	5.80	6.20	1.398	2.74	0.128
7	6.55	7.00	6.75	6.98	1.845	2.74	0.168
8	7.42	7.72	7.60	7.80	2.308	2.75	0.210
9	8.31	8.61	8.37	8.62	2.845	2.75	0.259
10	10.25	10.65	10.25	10.50	4.286	2.75	0.390
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	2.75	0.000
12	4.00	4.50	3.85	4.40	0.694	2.74	0.063
13	4.45	5.00	5.00	5.50	0.938	2.74	0.085
14	4.50	5.00	4.30	4.85	0.863	2.74	0.079
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.95	0.000
16	4.75	5.20	4.95	5.10	0.991	2.95	0.084
17	5.25	6.00	5.60	6.15	1.310	2.95	0.111
18	5.50	6.15	5.80	6.10	1.374	2.95	0.116
19	3.15	3.32	3.20	3.37	0.421	2.87	0.037
20	5.65	6.00	5.85	6.10	1.381	2.87	0.120
21	6.80	6.90	6.68	6.85	1.836	2.87	0.160
22	8.72	9.05	8.70	9.10	3.126	2.77	0.282
23	9.95	10.00	9.75	9.82	3.855	2.77	0.348
24	11.45	11.25	11.35	11.40	5.095	2.77	0.460
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	2.77	0.000
26	3.75	4.40	4.00	4.40	0.679	2.92	0.058
27	4.50	5.10	4.95	4.85	0.932	2.92	0.080
28	4.70	5.00	4.65	5.10	0.938	2.92	0.080

Çizelge A.6 : 3-B Model-1'in 2 no'lu numunesi için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı) .

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	7.30	7.45	7.25	7.55	2.161	3.54	0.152
2	5.10	5.40	5.00	5.39	1.081	3.54	0.077
3	3.32	3.61	3.43	3.63	0.485	3.42	0.034
4	2.49	2.70	2.47	2.74	0.269	3.54	0.019
5	1.00	1.20	0.98	1.31	0.050	3.51	0.003
6	1.05	1.30	1.00	1.28	0.053	3.45	0.003

Çizelge A.7 : 3-B Model-2'nin 1 no'lu numunesi için ölçüm yapılan noktalar ve okumalar ile elde edilen şerit sayıları (K=kırmızı yöndeki okumalar, S=siyah yöndeki okumalar, η =şerit sayısı, h=kalınlık, $\sigma_1 - \sigma_2$ =asal gerilmeler farkı).

No.	K1	S1	K2	S2	η	h (mm)	$\sigma_1 - \sigma_2$ (MPa)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	3.60	0.000
2	2.50	3.20	2.70	2.80	0.311	3.65	0.018
3	2.90	2.80	2.80	3.10	0.333	3.70	0.019
4	2.85	3.20	2.85	3.30	0.369	3.70	0.022
5	2.00	2.15	1.85	2.20	0.167	3.70	0.010
6	2.05	2.20	2.10	2.15	0.179	3.70	0.011
7	2.50	2.90	2.40	2.85	0.281	3.70	0.016
8	5.40	5.45	5.50	5.40	1.172	3.70	0.070
9	5.90	6.20	6.10	6.40	1.500	3.65	0.090
10	6.85	7.20	6.90	7.30	1.978	3.65	0.119
11	7.50	7.70	7.50	7.75	2.289	3.65	0.138
12	8.80	9.50	9.00	9.50	3.352	3.60	0.205
13	10.75	11.10	10.80	11.10	4.725	3.60	0.289
14	12.70	13.05	12.70	13.10	6.438	3.56	0.397
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	3.60	0.000
16	3.20	3.60	2.60	3.30	0.400	3.60	0.024
17	3.50	4.00	3.40	3.95	0.547	3.60	0.033
18	4.05	4.40	3.80	4.30	0.679	3.60	0.041
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	3.30	0.000
20	2.50	3.20	2.70	2.80	0.311	3.30	0.021
21	2.90	2.80	2.80	3.10	0.333	3.30	0.022
22	2.85	3.20	2.85	3.30	0.369	3.30	0.025
23	1.80	2.20	1.50	2.00	0.139	3.35	0.009
24	1.40	1.90	1.45	2.00	0.113	3.40	0.007
25	2.90	2.90	2.70	2.90	0.322	3.50	0.020
26	5.30	5.40	5.30	5.60	1.156	3.60	0.071
27	5.60	6.50	5.80	6.20	1.440	3.60	0.088
28	6.80	7.80	7.00	7.60	2.112	3.60	0.129
29	7.40	8.40	7.65	8.90	2.595	3.60	0.158
30	8.70	9.40	8.70	8.90	3.150	3.60	0.192
31	10.10	10.70	10.15	10.80	4.304	3.60	0.263
32	11.70	12.00	11.85	11.90	5.549	3.53	0.345
33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	3.60	0.000
34	2.80	3.30	3.00	3.25	0.377	3.50	0.024
35	3.30	3.60	3.50	4.00	0.514	3.40	0.033
36	3.55	3.75	3.50	3.70	0.521	3.35	0.034

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Abdullah Dönmez

Doğum Tarihi ve Yeri: 1982 Ankara

E-Posta: donmezab@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans:** Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Kağıthane Belediyesi kontrol mühendisliği
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi yapı denetim büro şefliği
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı müfettiş yardımcılığı
- Avrupa Birliği Bakanlığı Avrupa Birliği uzman yardımcılığı
- İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü Araştırma Görevliliği

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Abdulaliyev Z., **Donmez A.**, and Ataoglu S., 2015: Photoelastic Stress Analysis Of Pre-tensioned Concrete Elements. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* (in Turkish), baskıda.
- **Donmez A.**, Ataoglu S., Aldemir U., Artan R., and Abdulaliyev Z., 2014: Residual Stresses In The Prestressed Concrete Elements. *ACE2014, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, October 21-25, 2014 İstanbul, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

- Bazant Z.P., and **Donmez A.**, 2015, Extrapolation of short-time drying shrinkage tests based on measured diffusion size effect: concept and reality. *RILEM, Materials and Structures*, DOI:10.1617/s11527-014-0507-0, 2015.
- Asikuzun E., **Donmez A.**, Arda L., Cakiroglu O., Ozturk O., Akcan D., Tosun M., Ataoglu S., and Terzioglu C., 2015, Structural and mechanical properties of (Co/Mg) co-doped nano ZnO. *Ceramics International*, 41(5), 2015.
- **Donmez A.**, and Ataoglu S., 2014, Magneziyum Diborur Tellerin Mikroyapisi ve Gerilme Analizi. *C.B.U. Journal of Science (Celal Bayar Universitesi Fen Bilimleri Dergisi)*, 10(2), Part A, June, pp 73-78.
- Ataoglu S., Ipek C., **Donmez A.**, Tosun M., Arda L., Akcan D., 2014, Effect of Annealing Temperature on the Structural and Mechanical Properties of $BaTiO_3$ Nanoparticles, *The Twenty-second Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-22)*, Saint Julien, Malta, July 13-19, 2014, Saint Julien, Malta.
- **Donmez A.**, Arda L., Akcan D., Ozturk S., Ipek C., Ataoglu S., 2014, Structural, optical and electrical properties of Er-doped ZnO Nano-particles and Films. *The Twenty-second Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-22)*, Saint Julien, Malta, July 13-19, 2014, Saint Julien, Malta, July 13-19.