

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK ELASTİSİTE MODÜLLÜ CAM LİFLİ POLİMERLE  
SARGILANMIŞ DÜŞÜK DAYANIMLI BETONUN EKSENEL YÜKLER  
ALTINDA DAVRANIŞI VE SONLU ELEMAN METODU İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Korhan Deniz DALGIÇ**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Yapı Mühendisliği**

**Haziran 2010**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK ELASTİSİTE MODÜLLÜ CAM LİFLİ POLİMERLE  
SARGILANMIŞ DÜŞÜK DAYANIMLI BETONUN EKSENEL YÜKLER  
ALTINDA DAVRANIŞI VE SONLU ELEMAN METODU İLE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Korhan Deniz DALGIÇ  
(501071060)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ (İTÜ)  
Eş Danışman : Doç. Dr. Alper İLKİ (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kadir GÜLER (İTÜ)  
Doç. Dr. Şevket ÖZDEN (KOÜ)  
Doç. Dr. Hilmi LUŞ (BÜ)**

**HAZİRAN 2010**



*aieme,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan, sayın hocalarım Doç. Dr. Alper İlki ve Doç. Dr. Abdullah Gedikli'ye teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkıları için; çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen başta sevgili arkadaşım Oktay Özel'e, İnşaat Yüksek Mühendisi Medine İspir'e, İnşaat Yüksek Mühendisi Hakan Saruhan'a, Arş.Gör. Cem Demir'e, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı değerli personeline, tüm yüksek lisans ve doktora öğrencilerine, İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı değerli personeline, Arş.Gör. Gökhan Karaman'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerde kullanılan malzemelerin temin edilmesini sağlayan Global MT Müşteri Temsilciliği ve Organizasyon Tic. Ltd. Şti'ne ve sayın Gökhan Terlemez ile Ogün Fırat'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bugüne kadar aldığım her kararda yanımda olduklarını hissettiren, koşulsuz sevgi ve desteklerini veren aileme teşekkür ederim.

Haziran 2010

Korhan Deniz Dalgıç  
İnşaat Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Yöntemin Tanımı ve Tarihçesi.....	1
1.2 Kolonların Lifli Polimer Kompozitler ile Güçlendirilmesi.....	2
1.3 Lifli Polimer Kompozitler ile Sargılanmış Betonun Davranışı.....	3
1.4 Tez Çalışması .....	10
<b>2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ.....</b>	<b>11</b>
2.1 Amaç .....	11
2.2 Lifli Polimerin Malzeme Özellikleri .....	11
2.2.1 LP çekme testi metodunun özellikleri.....	12
2.2.2 LP kupon numune boyutları.....	13
2.2.3 Kaydedilen verilerden LP'e ait elastik mekanik özelliklerin hesaplanması .....	14
2.2.4 Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi .....	15
2.2.5 LP'e ait direk çekme test sonuçları .....	16
2.3 Betona ait Malzeme Özellikleri.....	18
2.3.1 Beton karışımının özellikleri ve beton silindir numunelerin imalatı .....	18
<b>3. LP SARGILANMIŞ BETON SİLİNDİR DENEYLERİ .....</b>	<b>23</b>
3.1 Numunelerin Hazırlanması.....	23
3.2 Ölçüm Sistemi .....	23
3.3 Deney Sonuçları .....	25
<b>4. SONLU ELEMAN ANALİZİ .....</b>	<b>31</b>
4.1 Giriş.....	31
4.1.1 Literatür özeti.....	31
4.2 Beton Davranış Modelleri .....	35
4.2.1 Doğrusal elastik modeller .....	35
4.2.1.1 Çatlak modelleri .....	38
4.2.2 Doğrusal olmayan elastik modeller.....	39
4.2.3 Beton için göçme kriterleri .....	39
4.2.3.1 Gerilme durumu ve invaryantların geometrik anlamı .....	43
4.2.3.2 Mohr-Coulomb göçme kriteri .....	44
4.2.3.3 Drucker-Prager göçme kriteri .....	47
4.3 LP Sargılanmış Betonun Modellenmesi.....	49
4.3.1 Giriş.....	49

4.3.2 Davranış .....	53
4.3.2.1 Plastik akış .....	55
4.3.3 Model .....	61
4.4 Deney Sonuçları ile Sonlu Eleman Metodu Çözümü Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	65
4.4.1 n1_k_6_1 ve n1_k_6_2 numuleri.....	65
4.4.2 n1_k_4_1 ve n1_k_4_2 numuleri.....	68
4.4.3 n1_k_2_1 ve n1_k_2_2 numuleri.....	69
4.5 Sonuç .....	70
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>6. EK A .....</b>	<b>77</b>

## **KISALTMALAR**

<b>ASTM</b>	: American Society for Testing Materials
<b>ACI</b>	: American Concrete Institute
<b>DBYBHY</b>	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
<b>DP</b>	: Drucker-Prager Göçme Hipotezi
<b>İTÜ</b>	: İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>LP</b>	: Lifli Polimer
<b>TS</b>	: Türk Standartı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Kupon numunelere ait mekanik özellikler ve istatistiksel değerlendirilmesi. ....	16
Çizelge 2.2 : Çalışmada kullanılan beton karışım reçetesi. ....	18
Çizelge 2.3 : Deneyde kullanılacak beton dayanım grupları. ....	20
Çizelge 3.1 : Sargılı silindir deney sonuçları.....	16
Çizelge 4.1 : $k_1$ değerleri.....	65
Çizelge 4.2 : Modelleme parametreleri .....	66



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1	: 1999 Kocaeli Depreminde hasar görmüş bir kolon (Ilki,2006).....	2
Şekil 1.2	: Sünek (solda) ve ani (sağda) olarak kırılan sargılı beton davranışı, (Sağdaki alıntıdır.Koç, 2004). ....	4
Şekil 1.3	: Çelik tüp ve LP ile sargılanmış betonlara ait gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Becque, 2000).....	4
Şekil 1.4	: Asal gerilme ve şekil değiştirme yönleri.....	5
Şekil 1.5	: Çelik tüp sargılı beton ve LP sargılı betonun hacimsel davranışları (Becque, 2000). ....	5
Şekil 1.6	: Eksenel şekil değiştirme-dilatasyon oranı grafiği (Mirmiran ve Shahawy,1997). ....	7
Şekil 1.7	: LP'nin kopmadan hemen önceki denge hali .....	9
Şekil 2.1	: Lifli polimer kupon numuneleri. ....	12
Şekil 2.2	: Kupon numunelere ait olası göçme modları ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008). ....	13
Şekil 2.3	: Kupon numunelere ait eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkileri.....	17
Şekil 2.4	: Kupon numunelere ait eksenel gerilme-enine şekil değiştirme ilişkileri. .....	17
Şekil 2.5	: Çalışmada kullanılan LP dokuma.....	18
Şekil 2.6	: Kuru karışım.....	19
Şekil 2.7	: Beton silindirlerin imalatı.....	19
Şekil 2.8	: Kalıplara dökülmüş beton silindir numuneler. ....	19
Şekil 2.9	: n1 dayanım grubu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi. ....	20
Şekil 2.10	: n2 dayanım grubu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi. ....	21
Şekil 2.11	: n3 dayanım grubu gerilme-şekil değiştirme ilişkisi. ....	21
Şekil 2.12	: Tek eksenli basınç deneyi düzeneği. ....	21
Şekil 3.1	: Silindir sargılama işlemi.....	23
Şekil 3.2	: Deney düzeneği. ....	24
Şekil 3.3	: Sargılı numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri.....	27
Şekil 3.4	: Sargılı numunelerin gerilme-hacimsel şekil değiştirme ilişkileri.....	27
Şekil 3.5	: %5 şekil değiştirme yapmış hasarlı numune. ....	28
Şekil 3.6	: 4 kat ve 2 kat sargılanmış hasarlı numuneler. ....	29
Şekil 3.7	: 6 kat sargılanmış hasarlı numune. ....	29
Şekil 4.1	: Farklı gerilme durumlarına göre değişen deviatorik düzlem. ....	32
Şekil 4.2	: Doğrusal elastik kırılma modelleri (Chen W.F., 1982).....	35
Şekil 4.3	: Çekmede gerilme-şekil değiştirme kırılma ilişkisi (Chen W.F., 1982)...	36
Şekil 4.4	: Direk çekme, yarma ve nokta yükleme deneylerinin kıyaslanması .....	37
Şekil 4.5	: Gerilme uzayında bir gerilme durumunun belirtilmesi ve deviatorik düzlem ( Davis ve Selvadurai, 2002) .....	42
Şekil 4.6	: Mohr-Coulomb kırılma hipotezi ve üç eksenli gerilme hali( Davis ve Selvadurai, 2002) .....	43

<b>Şekil 4.7</b> : Mohr-Coulomb kırılma hipotezi deviatorik düzlemi ( Davis ve Selvadurai, 2002).....	44
<b>Şekil 4.8</b> : Mohr-Coulomb kriterine ait göçme yüzeyi ( Davis ve Selvadurai, 2002).....	45
<b>Şekil 4.9</b> : Mohr-Coulomb kriteri, $\theta = 0^\circ$ meridyani (Davis ve Selvadurai, 2002)..	45
<b>Şekil 4.10</b> : Von Mises ve Tresca akma yüzeyleri (Url-1). .....	46
<b>Şekil 4.11</b> : Drucker--Prager akma yüzeyi (Url-1).. .....	47
<b>Şekil 4.12</b> : Farklı çevresel durumlarda göçme hallerini gösteren daireler. ....	49
<b>Şekil 4.13</b> : Mohr-Coulomb göçme yüzeyine dıştan çakıştırılmış DP göçme yüzeyi .....	50
<b>Şekil 4.14</b> : İlki ve Kumbasar sargılı beton modeli (Ilki ve diğ., 2004). .....	52
<b>Şekil 4.15</b> : Artan yanal basınca karşılık artan dayanımın modellenmesi. ....	53
<b>Şekil 4.16</b> : Artan hidrostatik gerilme ile birlikte artan eksenel dayanım ve yüzey üzerinden gerçekleşen plastik akış (Becque, J., 2000). ....	54
<b>Şekil 4.17</b> : DP'ın tanımladığı sargısız betona ait elastik-tam plastik gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Yu ve diğ., 2010).....	54
<b>Şekil 4.18</b> : Asosyatif ve asosyatif olmayan akım kuralları (Becque, J., 2000) .....	56
<b>Şekil 4.19</b> : Betonun üç eksenli gerilme altındaki tipik davranışı ..(Imran I., 1994). 57	
<b>Şekil 4.20</b> : Sargılı betonun dilatasyon karakteri (Mirmiran ve Shahawy, 1997).....	58
<b>Şekil 4.21</b> : Deneysel ve nümerik olarak bulunan dilatasyon davranışlarının kıyaslanması (Mirmiran ve Shahawy, 1997).....	59
<b>Şekil 4.22</b> : SOLID 65 beton elemanı (Ansys V.12) .....	60
<b>Şekil 4.23</b> : SHELL 41 LP elemanı (Ansys V 12). ....	61
<b>Şekil 4.24</b> : Beton silindirin 1/8 lik parçası. ....	62
<b>Şekil 4.25</b> : Beton silindir parçanın kesit görünümü. ....	62
<b>Şekil 4.26</b> : LP'e ait SHELL 41 elemanları. ....	63
<b>Şekil 4.27</b> : Simetri sınır koşulu yüzeyleri.....	63
<b>Şekil 4.28</b> : Deneysel ve sonlu eleman çözümlemesine ait eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.....	66
<b>Şekil 4.29</b> : Eksenel gerilme- çevresel (veya radyal ) şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.....	67
<b>Şekil 4.30</b> : Eksenel gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.....	67
<b>Şekil 4.31</b> : Eksenel gerilme- çevresel (veya radyal ) şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.....	68
<b>Şekil A.1</b> : n1_k_6_1 numunesine ait eksenel gerilme ve yanal/eksenel şekil değiştirme ilişkisi .....	72
<b>Şekil A.2</b> : n1_k_6_2 numunesine ait eksenel gerilme ve yanal/eksenel şekil değiştirme ilişkisi .....	72
<b>Şekil A.3</b> : n2_k_4_1 numunesine ait eksenel gerilme ve yanal/eksenel şekil değiştirme ilişkisi. ....	73
<b>Şekil A.4</b> : n2_k_4_2 numunesine ait eksenel gerilme ve yanal/eksenel şekil değiştirme ilişkisi .....	73
<b>Şekil A.5</b> : n3_k_2_1 numunesine ait eksenel gerilme ve yanal/eksenel şekil değiştirme ilişkisi .....	74



<b>Şekil A.6 :</b> n3_k_2_2 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal/aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.....	74
<b>Şekil A.7 :</b> n1_k_6_1 numunesinin sargılı dayanımına eriştiği anda LP üzerinde oluşan asal çekme gerilmesi kontürleri .....	75
<b>Şekil A.8 :</b> n1_k_6_1 numunesinin sargılı dayanımına eriştiği anda beton üzerinde oluşan asal basınç gerilmesi kontürleri .....	75



# DÜŞÜK ELASTİSİTE MODÜLLÜ CAM LİFLİ POLİMERLE SARGILANMIŞ BETONUN EKSENEL YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI VE SONLU ELEMAN METODU İLE ANALİZİ

## ÖZET

Gelişmekte olan ülkelerde mevcut betonarme yapılar bazı tipik yapısal kusurlar taşımaktadırlar. Ülkemizde de özellikle nüfus yoğunluğunun ciddi bir kısmını barındıran büyük kentlerde bahsedilen bu yapısal kusurlara sıkça rastlanmaktadır. Aynı zamanda bu bölgeler ciddi sismik aktiviteye sahiptirler ve çok sayıda betonarme yapı bir deprem tehditi ile karşı karşıyadır. Düşük beton dayanımı, yeterince sargılanmamış taşıyıcı elemanlar (yetersiz sargılama donatısı), yetersiz birleşim detayları ve bindirme boyları, beton ile düz donatı arasındaki aderansın yetersizliği yukarıda bahsedilen yapısal kusurlardan sayılabilir. Bu türden yapıların oluşturduğu ciddi stok göz önüne alındığı zaman, ekonomik ve olabildiğince pratik yapısal güçlendirme yöntemlerine acil ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

Bu çalışmada betonarme kolonları (narinlik göz önünde tutulmamıştır) yerinde, dıştan sargılayarak hem beton dayanımını hem de sünekliğini arttıracak yapısal bir güçlendirme yöntemi olan ve “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY), 2007” yedinci bölümü altında verilen “*lifli polimerler ile kolonların sargılanması*” yöntemi incelenmiş, bu sargılama işlemi düşük elastisite modülüne sahip, görece diğer cam elyaf esaslı lifli polimerlerden (LP) biraz daha ekonomik bir tür cam elyaf esaslı güçlendirme malzemesi ile yapılmıştır. Eksenel basınç altında eksenel taşıma gücü ve sünekliğinin nasıl arttığını araştırmak amacıyla olabildiğince basit ama ciddi fikirler veren standart silindir deneyleri yapılmıştır. Sargılanmış beton silindir numunelere ait gerilme şekildeğiştirme ilişkisi farklı sargılama kat sayıları için elde edilmiştir. Bunun için 6 adet düşük dayanımlı standart beton silindirde sırasıyla 2,4 ve 6 kat sargı sayılarına karşılık her gruptan 2’şer adet eksenel basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları göstermiştir ki bu düşük elastisite modüllü ve görece daha ekonomik LP ile sargılanan betonun hem dayanımını hem de sünekliğini arttırmak mümkündür.

Ayrıca bahsedilen silindirler ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak modellenmişlerdir. Bunun için betonun çok eksenli gerilme durumu altındaki davranışının iyi anlaşılması gerekmektedir. Dördüncü bölümde beton davranış modelleri gözden geçirilmiş ve sargılı betonun Drucker-Prager plastisite modeli ile modellenmesine karar verilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar kıyaslanmış, hem gerilme ve hem de şekildeğiştirme anlamında yeterli bir uyum görülmüştür. Böylece sonlu eleman modelinin LP sargılanmış betonun deney sonuçlarını önceden tahmin etmek için kullanılabileceği ifade edilmiştir.



# **AXIAL COMPRESSIVE BEHAVIOUR AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF LOW STRENGTH CONCRETE CONFINED BY LOW MODULUS GLASS FIBRE POLYMER**

## **SUMMARY**

Existing reinforced concrete structures in developing countries have general several deficiencies such as low compressive strength, insufficient ductile sections, plain reinforcement and poor detailing in terms of transverse reinforcement, column-beam joints. A majority of the existing structures in our country, especially those of cities with large population, have also the deficiencies. Since our country is situated in high seismic areas, these existing structures are vulnerable to earthquake effects and need retrofitting. In order to reduce earthquake effects, the structures may be retrofitted by various techniques. The high number of these structures requires economic and practical retrofitting techniques. Confining of reinforced concrete members with fiber reinforced polymer (FRP) materials is one of the retrofitting techniques.

In this study, taking into account the proposals and requirements of the 7<sup>th</sup> part of Turkish Seismic Design Code (TSDC) (2007) related to the retrofitting techniques, the efficiency of a fiber reinforced polymer composite with a low modulus of elasticity are detected. The mechanical characteristics of the fiber polymer composite used in this study are similar to those of glass fiber reinforced polymer, but the fiber polymer is more economical than the glass. In order to understand the efficiency of the fiber polymer composite, compression tests were carried out on the standard cylinder specimens of concrete with low strength. These specimens were retrofitted by confining with two, four and six layers of the fiber polymer composite sheets. Additionally, the cylinder specimens were modelled using ANSYS finite element programme so as to compare the results of test and numerical analysis.



# 1. GİRİŞ

## 1.1 Yöntemin Tanımı ve Tarihçesi

Mevcut betonarme bir yapının daha fazla tasarım yüküne karşı direnç gösterebilmesi için yapılacak güçlendirme ya da iyileştirilme, dayanım kayıplarının düzeltilmesini, tasarım ya da imalat eksiklerinin giderilmesini ya da yapı sünegliğinin arttırılmasını ifade eder. Bahsedilen güçlendirme geleneksel olarak dışarıdan elemana eklenecek çelik plakalar, çelik ya da beton mantolamalar, ard germeli sistemler gibi yöntemlerle yapılabilir.

Lifli polimer (LP) güçlendirme sistemleri yapıya ciddiye alınabilecek fazladan ağırlık katmamaları (dayanım/ağırlık oranlarının diğer güçlendirme sistemlerinden yüksek oluşu), kolay uygulanabilirlikleri ve korozyona karşı dirençli olmaları bakımından yukarıda bahsedilen geleneksel yöntemlere göre bazı önemli avantajlar sunmaktadır, (ACI 440.2R-08, 2008).

“Hasarlı ve düşük standartlara sahip yapıların onarım ve güçlendirilme gereksinimi bütün dünyada yapı endüstrilerinin üzerinde çalıştığı en önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Geçen on yılda dünyadaki şiddetli depremler tasarım ve inşaat standartlarındaki yetersizliği göstermiş ve çok sayıda yapının ivedilikle onarımına ve yeniden techizine yol açmıştır. Elyaf takviyeli plastik kompozitler (Fiber Reinforced Plastic-FRP), yapıların günün gereklerine uygun duruma getirilmesi ve rehabilitasyonu sorunlarına yanıt vermede büyük bir potansiyele sahiptir. Son yıllarda LP sistemlerinin onarım ve kuvvetlendirme amacıyla betonarme yapılara uygulaması bütün dünyada giderek yaygınlaşmaktadır. Birçok araştırma çalışmaları, değişik yapı elemanlarına LP kompozit sistemlerinin yapıştırılmasının bu elemanların yük taşıma kapasitelerinin alışıl gelmiş yöntemlerle elde edilebilenlere göre önemli ölçüde ve kolaylıkla arttırdığını ortaya çıkarmıştır” (Büyüköztürk ve diğerleri ).

Daha önceleri uçak-uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanımı gelişen ve uzun yıllardan beri bu alanda kullanılan lif takviyeli polimerler son on yıl içerisinde

fiyatlarındaki azalmaya bağı olarak yapı onarım ve güçlendirilmesi ve hatta yeni yapılacak yapılarda kullanımı alanında da geniş bir uygulama şansı bulmuştur (Teng ve diğ. , 2002).

## 1.2 Kolonların Lifli Polimer Kompozitler ile Güçlendirilmesi

Kolonların LP kompozitler ile sargılanmasıyla betonun aksel basınç dayanımı ve aksel nihai şekildeğiştirilmesi, sargı kat sayısına (sargılamamanın aksel rijitliğine) bağı olarak önemli ölçüde artırılabilir. Böylelikle kolonun yük taşıma kapasitesi ve şekildeğiştirebilme yeteneği de ciddi derecede iyileştirilebilir. Bunun dayandığı fiziksel temel aslında LP kompozit tarafından yüklemeye dik doğrultuda yanal olarak ortaya çıkan sargı basıncına bağı olarak yaratılan üç aksel bir gerilme durumudur. Böylelikle yeterince sık etriye buldurmamayan ve etkili bir sargılamadan söz edilemeyecek yapı elemanlarında dışarıdan sargılanacak LP kompozitler sayesinde gerekli sargılama sağlanmış olunur. Ayrıca betonarme kolonların ve düğüm noktalarının kesme kuvveti kapasiteleri, eğilme elemanlarında eğilme kapasiteleri bu elemanların LP ile sargılanması ile artırılabilir.



**Şekil 1.1** : 1999 Kocaeli Depreminde hasar görmüş bir kolon (Ilki,2006).

LP kompozitler kullanılarak yapılacak kolon sargılama işleminde birkaç farklı metod izlenebilir (Teng ve diğ., 2002). Bunlardan en yaygın olarak uygulananı kolonların yerinde, çevresinin şeritler halinde ya da sürekli olarak, reçineye doyurulmuş lifler (ya da bu liflerden dokunmuş kumaş) ile sarılması diğeri bir deyişle “ıslak serme



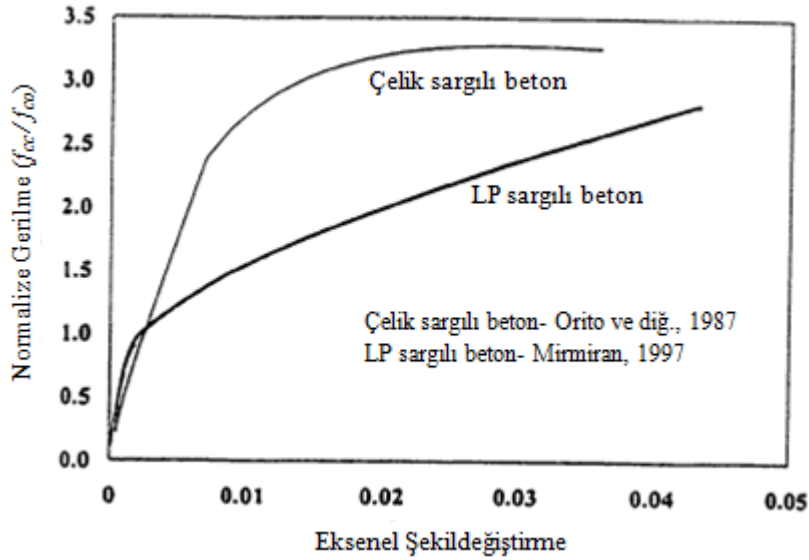
metodu”dur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta asal liflerin doğrultusunun, kolonun yükleme eksenine dik olmasıdır. Bu türden yapılacak bir güçlendirmenin etkinliğinin, sargılanacak elemanın kesit geometrisinden çokça etkilendiği yapılan araştırmalarda ortaya konulmuştur. Dairesel kesitli elemanların sargılanmasının tam etkin olduğu kabul edilir. Dörtgen kolonlarda ise kolon köşeleri yuvarlatılarak sargılama gerçekleştirilir. DBYYHY 2007’de bu yuvarlatmanın yarıçapı minimum 30 mm olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada sadece dairese kesitli standart beton silindirler sargılanacak ve davranışları incelenecektir.

### **1.3 Lifli Polimer Kompozitler ile Sargılanmış Betonun Davranışı**

Şekil 1.3’de çelik tüp ve cam elyaf esaslı LP ile sargılanmış beton silindir elemana ait aksenal gerilme-şekildeğiştirme grafiği kıyaslamalı olarak verilmiştir. Grafikten de görüleceği gibi çeliğin elastisite modülünün cam elyaf esaslı LP’den fazlasıyla büyük olmasına bağlı olarak çok küçük yanal deformasyonlarda dahi çelik tüp üzerinde daha fazla çevresel gerilme (*hoop strength*) ve bunu dengeleyen yanal sargı basıncı oluşmuştur (Orito ve diğ., Mirmiran, 1997). Çelik tüp üzerindeki gerilmeler akma gerilmesine eriştiği anda kompozit sisteme ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi yataylaşırken, LP ile sargılanmış kompozit sistem ise iki kolla karakterize edilebilen bir ilişki ortaya koymaktadır. LP ile sargılanmış beton, sargısız dayanımına eriştiği noktada bir geçişle daha düşük bir eğime sahip ve tamamen LP’in rijitliğine bağlı olarak değişen ikinci bir kola girmektedir. LP lineer elastik ve gevrek bir malzemedir. LP sargılanmış sistem, taşıyacağı maksimum aksenal gerilmeye eriştiği anda sargı malzemesi de dayanımına erişmiş demektir (aderans sorunu olmadığı düşünülmektedir). Bu noktada sargı malzemesinin ve kullanılan reçinenin sünek veya gevrek oluşuna bağlı olarak farklı göçme tipleri gözlenerek sargıda yırtılmalar ve ayrışmalar başlar, beton-LP kompozit sisteminin taşıdığı yük aniden veya yavaş yavaş azalır, Şekil 1.2.



Şekil 1.2 : Yavaş yavaş göçen (solda) ve ani (sağda, Koç, 2004) olarak kırılan sargılı beton davranışı

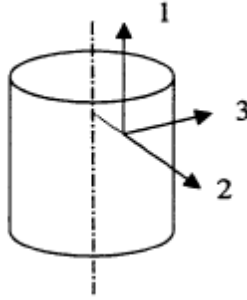


Şekil 1.3 : Çelik tüp ve LP ile sargılanmış betonlara ait gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Becque, 2000).

LP'de oluşacak çevresel gerilmeler, çekirdek betonun aksel gerilme altında ne kadar yanıl deformasyon yapacağına bağlıdır. Diğer bir deyişle betonun hacimsel şekil değiştirmesinin bir fonksiyonudur. Betonun yaklaşık 0.002 aksel şekil değiştirme seviyesinde (dayanımına eriştiği yük seviyesinde) oluşan mikro çatlakların sonucu olarak en büyük yanıl genişlemeyi (*dilatasyon*) yaptığı bilinmektedir. İşte tam bu yük seviyesinde LP tarafından taşınan gerilmeler de birden

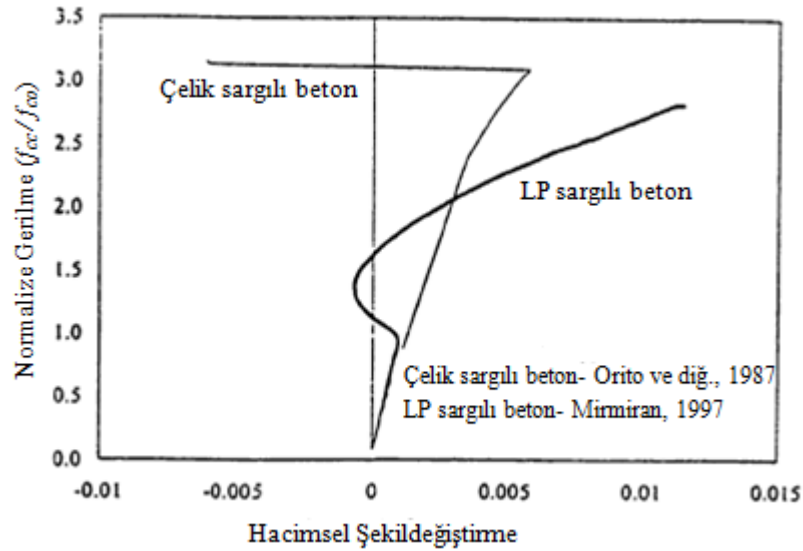
artmaktadır ve kopma gerçekleşinceye kadar azalan bir gerilme artışıyla devam etmektedir.

Bahsetmek gerekir ki; bu çalışma boyunca aksel yöndeki asal gerilme ve şekildeğişimler sırasıyla  $\sigma_1$  ve  $\epsilon_1$ , radyal yöndeki asal gerilme ve şekildeğişimler  $\sigma_2$  ve  $\epsilon_2$ , çevresel yöndeki asal gerilme ve şekildeğişimler ise  $\sigma_3$  ve  $\epsilon_3$  ile gösterilmiştir, Şekil 1.4. Basınç için pozitif çekme için negatif işaret kabulü yapılmıştır.



**Şekil 1.4** : Asal gerilme ve şekildeğişirme yönleri

Cam esaslı LP ile sargılanmış betona ait normalize aksel gerilme-hacimsel şekildeğişirme diyagramı, çelik tüp sargılı betona ait normalize aksel gerilme-hacimsel şekildeğişirme diyagramı ile kıyaslamalı olarak Şekil 1.5'te verilmiştir (Becque, 2000).



**Şekil 1.5** : Çelik tüp sargılı beton ve LP sargılı betonun hacimsel davranışları (Becque, 2000).

Şekil 1.5'ten de kolayca görülebileceği üzere LP sargılı beton sargısız dayanımına ( $f_{co}$ ) kadar hacimsel bir sıkışma yaşamaktadır. Ancak sargısız dayanımına eriştiği anda ani bir hacimsel genişleme başlar, hemen ardından bu genişleme LP sargı tarafından frenlenir. Hacimsel şekil değiştirme tekrar sıkışma yönüne geçer. LP sargı üzerinde işte tam bu noktada ciddi gerilme artışı meydana gelir. Sargı yırtılıncaya kadar hacimsel sıkışma devam eder.

Çelik tüp ile sargılanmış sistemde ise durum farklıdır. Çelik tüp akmaya erişinceye kadar sürekli bir hacimsel bir sıkışma olurken akma başlar başlamaz kararsız hale geçer ve hızla genişleme yoluna girer.

Bahsi geçen hacimsel şekildeğiştirme Denklem 1.1 ile hesaplanır.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (1.1)$$

$\varepsilon_3$  ve  $\varepsilon_2$  şekildeğiştirme değerleri eşit olduğundan Denklem 1.1, Denklem 1.2'deki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (1.2)$$

Bir yönde artan şekildeğiştirmelere karşılık buna dik yönde oluşacak şekildeğiştirmelerin büyüklüğü o malzemeye ait Poisson oranına bağlıdır. Ancak Poisson oranı şekildeğiştirmeler elastik sınırlar içerisinde kaldığı sürece sabit bir değere eşittir. Bu değer beton için yaklaşık 0.15 - 0.20'dir. Dayanımın ( $f_{co}$ ) %70'i civarına erişildiğinde Poisson oranı da artmaya başlar (Mirmiran ve Shahawy, 1997). Poisson oranı Denklem 1.3'de olduğu gibi verilebilir.

$$\nu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 \quad (1.3)$$

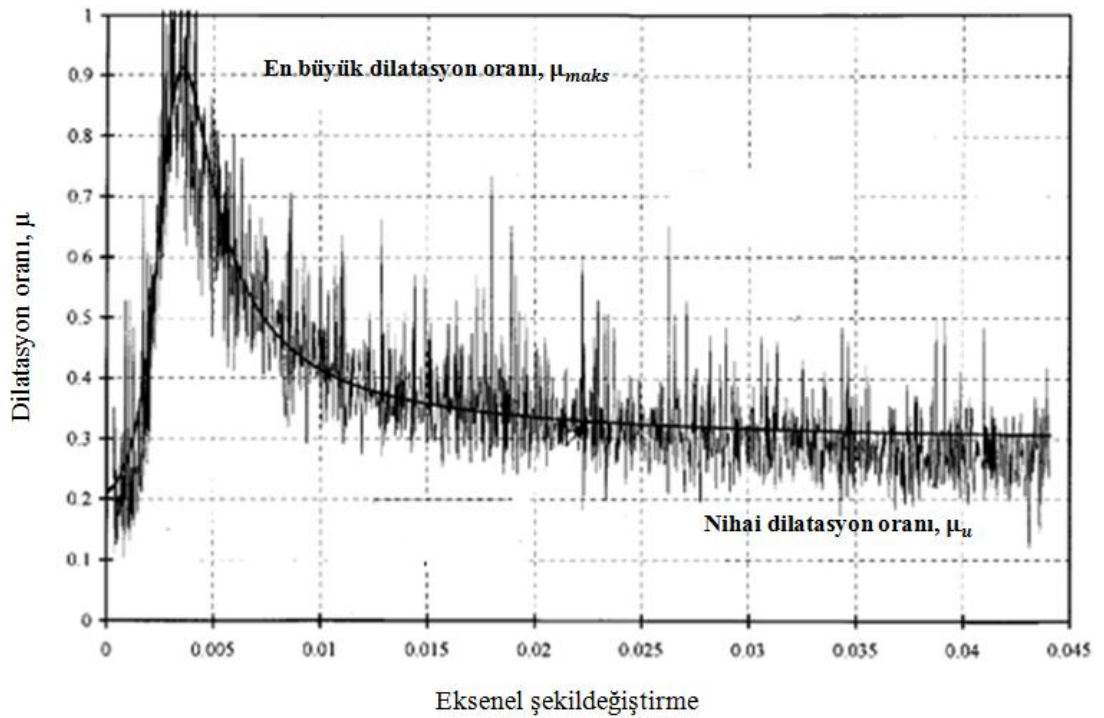
Poisson oranının 0.5 değerini aşması halinde beton için dilatasyon başlamış demektir. Dilatasyon başlangıcı mikro-çatlakların oluşması ve/veya gelişmesi ile tetiklenir. Sargısız betonda bu noktadan itibaren doğrusal olmayan bir gerilme yumuşaması meydana gelir ve yük düşmeye başlar.

Sargılanmış betonun bir sistem olarak davranışını da bu dilatasyonun değişimi belirler. Bu amaçla Poisson oranı yerine “*dilatasyon oranı*” (teğetsel poisson oranı) ifadesinden faydalanmak durumu daha açık ifade etmek için gereklidir.

Elwi ve Murray (1979) betonun dilatasyon davranışı için şekildeğiştirmelerin oranının üçüncü dereceden polinomu olan bir model önermişlerdir.

Mirmiran ve Shahawy (1997) sargılanmış betonun dilatasyon karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 1.6'da on kat LP ile sargılanmış beton silindire ait dilatasyon oranı artan aksenal şekildeğiştirme değerlerine karşılık deney sonuçlarından hesaplanarak bir grafikte verilmiştir.

Dilatasyon oranı yüklemenin herhangi bir adımı için, kaydedilen ardışık radyal şekildeğiştirmelerin farkının, aksenal şekildeğiştirmelerin farkına oranı alınarak hesaplanır, Denklem 1.4.



**Şekil 1.6 :** Aksenal şekildeğiştirme-dilatasyon oranı grafiği (Mirmiran ve Shahawy,1997).

$$\mu_{deneysel} = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_1} \quad (1.4)$$

Aynı çalışmada; bilinen sargı rijitliğinden yola çıkılarak deney yapılmaksızın her yükleme adımında hesaplanabilecek dilatasyon oranı için de kesirli bir denklem önerilmiştir, Denklem 1.5. Burada  $a, b, c, d$  skaler katsayılar olup  $\mu - \varepsilon_1$  eğrisinin bazı özel noktalarında türev alınarak ve sınır koşullarından faydalanılarak hesaplanırlar.  $\mu_0$  ise başlangıç dilatasyon oranıdır ve 0.20 alınabilir.

$$\mu = \frac{\mu_0 + ax + bx^2}{1 + cx + dx^2} \quad (1.5)$$

Denklem 1.5'te  $x$  değişkeni ile gösterilen  $\varepsilon_1/\varepsilon_{co}$  oranıdır. Burada  $\varepsilon_1$  eksenel ve  $\varepsilon_{co}$  ise dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirme değerleridir. Bu durumda  $x$ 'in sıfır değerine karşılık elde edilecek dilatasyon oranı,  $\mu_0$  yaklaşık 0.20'ye eşittir. Bu noktada  $\mu - \varepsilon_1$  eğrisinin teğetinin eğimi sıfırdır.  $x$ 'in 1 değerini aldığı noktada  $\varepsilon_{co}$  değeri 0.002'dir. Bu noktada en büyük dilatasyon oranına ( $\mu_{maks}$ ) ulaşılır.  $\mu_u$  ise yatay, eksenel şekildeğiştirme eksenine asimptotik giden nihai dilatasyon oranıdır. Belirtilen ifadeler denklem halinde aşağıdaki gibi gösterilir, Denklem 1.6.

$$\mu(x=0) = \mu_0, \quad \frac{d\mu}{dx} = 0 \quad (1.6a)$$

$$\mu(x=1) = \mu_{maks}, \quad \frac{d\mu}{dx} = 0 \quad (1.6b)$$

$$\mu(x \rightarrow \infty) = \mu_u, \quad \frac{d\mu}{dx} = 0 \quad (1.6c)$$

Denklem 1.6 yardımıyla  $a, b, c, d$  katsayıları Denklem 1.7'deki gibi hesaplanabilir.

$$a = \mu_0 \cdot c \quad (1.7a)$$

$$b = \mu_u \cdot d \quad (1.7b)$$

$$c = -2 \quad (1.7c)$$

$$d = \frac{\mu_{maks} - \mu_0}{\mu_{maks} - \mu_u} \quad (1.7d)$$

Ulaşılabilecek en büyük ve nihai dilatasyon oranları sargı rijitliğine bağlıdır. Sargı rijitliği arttıkça hem en büyük dilatasyon değeri  $\mu_{maks}$  hem de nihai dilatasyon değeri  $\mu_u$  azalmaktadır. Mirmiran ve Shahawy (1997)  $\mu_{maks}$  ve  $\mu_u$  için aşağıdaki amprik ifadeleri önermişlerdir. Denklem 1.8'de verilen bu ifadeler, maksimum ya da nihai

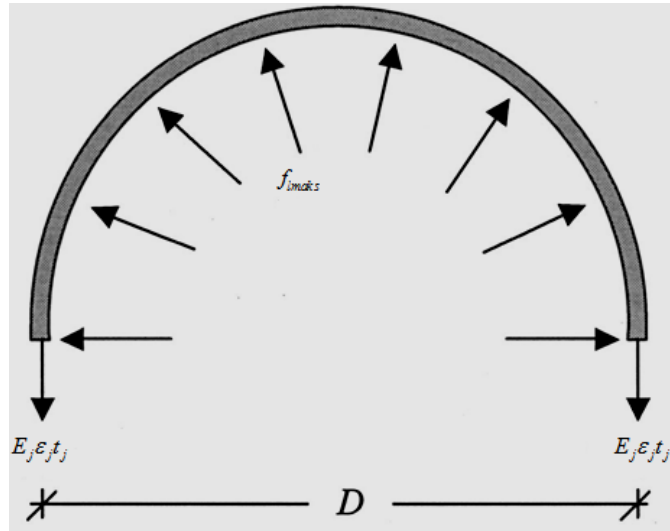
dilatasyon oranı ile o anda bunu sağlayan LP rijitliği  $(2E_j t_j / f_{co} D)$  noktalarına karşılık çizilen grafikten regresyon analizi yoluyla elde edilmişlerdir.

$$\mu_{maks} = -0.7611 \ln \left( \frac{2E_j t_j}{f_{co} D} \right) + 4.0167 \quad (1.8a)$$

$$\mu_u = -0.1375 \ln \left( \frac{2E_j t_j}{f_{co} D} \right) + 0.8646 \quad (1.8b)$$

Bu ifadelerde  $E_j$  ve  $t_j$  sırasıyla LP kompozite ait elastisite modülü ve sargılanan kalınlık değerleridir.  $f_{co}$  betonun sargılanmamış basınç dayanımı ve  $D$  ise sargılanan dairesel kesitli beton elemanın çapını göstermektedir.

Son durumda yük düşmeye başlamadan hemen önce LP kompozitin üzerinde taşıyabileceği en büyük gerilme meydana gelir. Birçok sargılı beton modeli bu son durumda betona LP tarafından aktarılabacak sargı basıncı göz önünde tutularak oluşturulmuştur. Bu ana ait bir serbest cisim diyagramı Şekil 1.7'de verilmiştir. Burada verilen kuvvetlerin dengesinden son durumda betona aktarılabacak yanıl sargı basıncının değerinin ne olacağı hesaplanabilir.



Şekil 1.7 : LP'nin kopmadan hemen önceki denge hali

LP sargının birim boy genişliği için denge denkleminde  $f_{maks}$  sargı basıncı, Denklem 1.9'daki gibi bulunur. Denklem 1.9'da verilen  $\epsilon_j$  LP'e ait efektif kopma birim şekildeğiştirmesini göstermektedir ve bir çok araştırmacı tarafından direk

çekmede kopma birim şekildeğiştirme değerinin yaklaşık %70'i civarında olduğu belirtilmiştir.

$$f_{maks} = \frac{2E_j \varepsilon_j t_j}{D} = \frac{2f_j t_j}{D} \quad (1.9)$$

#### 1.4 Tez Çalışması

Bu tez kapsamında, görece düşük elastisite modülü ve dayanıma sahip, ancak görece diğer lifli polimer malzemelerden biraz daha ekonomik bir tür cam elyaf esaslı, çift yönlü dokunmuş lifli polimerin, sargılandığı düşük dayanımlı beton kolonda aksenal basınç yüklemesi hali için dayanım artışı ve süneklik artışı sağlayıp sağlayamayacağı deneysel olarak araştırılmıştır. Buna ek olarak son günlerde sıkça kullanılan ve mühendislik problemlerinin çözümü için vazgeçilmez bir araç haline gelen sonlu elemanlar metodunun yukarıda bahsedilen deneysel çalışma ve diğer benzer LP sargılı betonun davranışı için tamamlayıcı bir sayısal çalışma olacağı düşünülmüş, ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak bir modelleme yapılmıştır.



## **2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ**

### **2.1 Amaç**

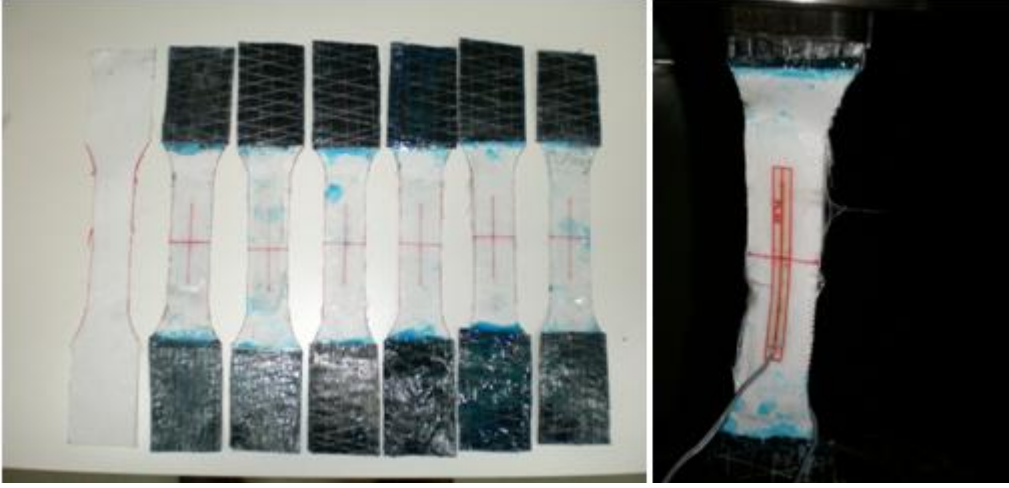
Tez çalışmasında kullanılacak LP ve beton malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla her iki malzeme için de bir dizi deneyler yapılmıştır.

LP malzemesi için çekmede kopma dayanımı, kopma uzaması, elastisite modülü değerleri ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008) (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*) standardının öngördüğü şekilde tespit edilmiştir. Bunun için ilgili çekme deneyi şerit halinde kesilen, her iki yönde de lif bulunduran ve her iki yüzüne de yapıştırıcısı sürülmüş halde bulunan dokuma parçası üzerinde yapılmıştır.

Beton malzemesinin ise özellikle ülkemizdeki mevcut yapıları temsil etmesi bakımından düşük dayanımlı olması istenmiştir. Tek eksenli basınç deneyi yapılarak basınç dayanımları belirlenmiştir.

### **2.2 Lifli Polimerin Malzeme Özellikleri**

Sargılama malzemesinin kopma dayanımı ve kopma uzamasının belirlenmesi amacıyla genişliği 30 mm olan kupon numuneler yapıştırıcı malzemeye doyurularak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi 100 tonluk Amsler çekme aletinde yapılmıştır. Kupon numunelerin başlıkları karbon elyaf liflerinin epoksi ile doyurulması ve sarılması yoluyla güçlendirilmiş ve çekme aletinin çeneleri arasında kalan kısımdan başlayan bir hasar olması önlenmiştir. Böylelikle kopma, kupon numunenin ortasında ya da ortaya yakın bir bölgede meydana gelmiş ve kopma anına kadar olan uzamalar şekildeğiştirmeölçerler ile kaydedilebilmiştir. Kupon numunelerin hazırlanmasında ve deneyin yapılmasında ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008) standardının verdiği yöntemlere bağlı kalınmıştır.



**Şekil 2.1** : Lifli polimer kupon numuneleri.

Bu standart, LP' e ait kopma yükü, kopma uzaması, çekme elastisite modülü, poisson oranı gibi mekanik büyüklükleri elde etmeye yönelik bazı metodları kapsamaktadır.

### **2.2.1 LP çekme testi metodunun özellikleri**

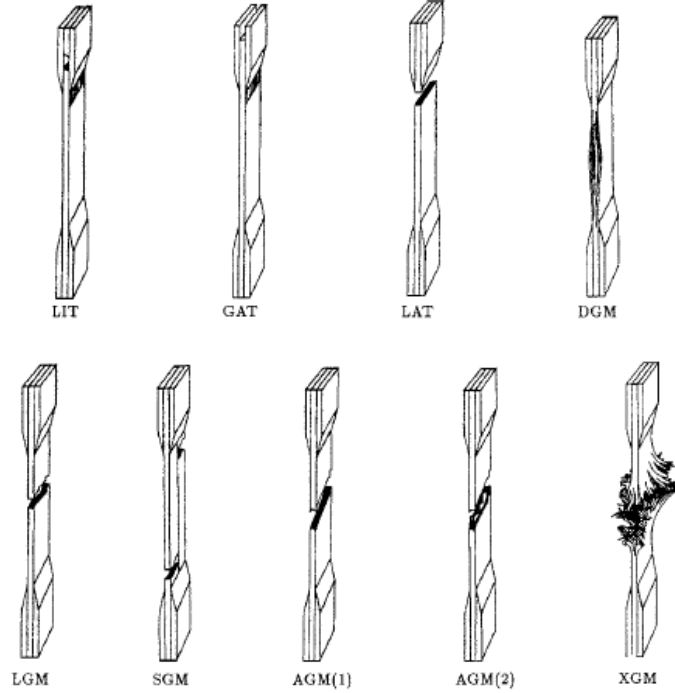
Bu standart uyarınca deneyi yapılacak malzemeden üretilmiş sabit genişlikli, dikdörtgen enkesitli ince ve düz şerit numune, mekanik test aletinin çeneleri arasına yerleştirilir. Numune monotonik olarak artan çekme yüküyle yüklenir ve yükleme boyunca yük değerleri, şekildeğiştirme değerleriyle eş zamanlı olarak adım adım kaydedilir. Göçmeden hemen önce okunacak yük değeri kopma yükü olarak değerlendirilir. Uzamaları ölçmek için şekildeğiştirme ölçerler kullanılır. Numunenin her iki yüzüne yapıştırılan birer adet şekildeğiştirme ölçer yardımıyla kopma anına kadar uzamalar kaydedilir.

Burada dikkat edilmesi gereken birkaç nokta vardır. Üretim hataları olan, lif yönelimleri sorunlu olan numunelerin deneyde kullanılmaması gerekir. Ayrıca deney sırasında kupon numunelerin eğilme momenti alması durumunda prematüre kopmalar gözlemlenebileceği gibi uygun olmayan elastisite modülü değerleri de elde edilebilir. Bunun için kupon numuneler çeneler arasına eğik ya da burulmuş vaziyette yerleştirilmemelidir.

Şekildeğiştirmeölçerler yapıştırılmadan önce özenli bir yüzey hazırlığı yapılmalıdır ve numuneye zarar vermeden bu işlem gerçekleştirilmelidir. Eğer Poisson oranı da ölçülecek ise boyuna şekildeğiştirmeölçere ek olarak enine olanı da yapıştırılmalıdır.

### 2.2.2 LP kupon numune boyutları

Enkesitinde, malzemeyi istatistik olarak yeterince temsil edeceği düşünölen miktarda lif bulunduran genişlikte ( ihtiyaca göre değışmekle birlikte en az 25 mm genişlikli şerit kullanılmalıdır) ve kopmanın ölçüm alınan bölgede olmasını sağlayacak kadar yeteri uzunlukta (175-250 mm) kupon elemanlar hazırlanmalıdır. Numune boyu, istenilmeyen eğilme gerilmelerinin etkinliğini minimize edecek şekilde uzun tutulmalıdır. Ölçüm alınacak bölge, çenelerden mümkün olabildiğince uzakta olmalıdır. Özellikle tek yönlü lif yönelimine sahip polimerler için kupon başlıklarının yapılması tavsiye edilmektedir. Başlık, test edilen malzeme ile aynı malzemeden olabileceği gibi farklı polimerler kullanılarak da yapılabilir.



**Şekil 2.2 :** Kupon numunelere ait olası göçme modları ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008).

Deneyde şekildeğıştirmeölçerlerin okuduğu uzama değeri bilgisayara bağı bir veri toplayıcısı (*data logger*) aracılığı ile alınmış ve kaydedilmiştir. Boyuna şekildeğıştirmeler 60 mm, enine şekildeğıştirmeler ise 5 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğıştirmeölçerler (*straingage*) kullanılarak ölçölmüştür. Boyuna ve enine şekildeğıştirme değeri her iki yüzdeki şekildeğıştirmeölçerlerin okumalarının ortalaması alınarak değeriendirilmiştir.

### 2.2.3 Kaydedilen verilerden LP'e ait elastik mekanik özelliklerin hesaplanması

LP'e ait mekanik özelliklerin hesaplanmasında ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008) yönetmeliğinin önerdiği ifadelerden faydalanılmıştır ve kaydedilen şekildeğiştirme ve yük değerleri bu yönetmeliğin belirttiği şekilde değerlendirilmiştir.

#### 1) Kopma dayanımının hesabı

$$F^{tu} = \frac{P_{maks}}{A} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de adı geçen  $F^{tu}$  (MPa) kopma dayanımı,  $P_{maks}$  (N) kopma öncesi okunan son yük değeri,  $A$  ( $\text{mm}^2$ ) ise LP şeritinin kopma en kesiti alanıdır.

$A$  alanı Denklem (2.2)'deki gibi hesaplanır.

$$A = w \cdot h \quad (2.2)$$

$w$  ile gösterilen kupon numune genişliği ve  $h$  ile gösterilen ise kupon numune kalınlığıdır.  $w$  ve  $h$ 'nin birimi milimetredir.

#### 2) Kopma uzamasının hesabı

Kopma uzaması bu çalışmada şekildeğiştirme ölçerler tarafından okunmuştur fakat ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008) standartında testin herhangi bir anına ait uzama; ekstansometreden elde edilen yerdeğiştirme değerinin başlangıç ölçüm boyuna oranı olarak verilmiştir. Denklem (2.3)'de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_g} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de  $\varepsilon_i$  herhangi bir  $i$  inci yükleme adımındaki aksenal uzamayı,  $\delta_i$  (mm)  $i$  inci adımdaki aksenal yerdeğiştirmeyi,  $L_g$  (mm) ise ilk boyu göstermektedir.

#### 3) Elastisite modülünün hesabı

ASTM D 3039/D 3039M – 08 (2008) standartında LP'in elastisite modülünün hesaplanacağı aralığın 0.001 – 0.003 uzama şekildeğiştirme değerleri arasında seçilmesi önerilir. Eğer ki test sonucu elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi sadece tek bir eğime sahip değilse uygun olan aralıktan bu ölçümün yapılması ve

raporlanması tavsiye edilmektedir. Denklem 2.4'te LP'e ait elastisite modülü değerinin nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.4)$$

$E$  ile belirtilen LP'e ait elastisite modülü (GPa),  $\Delta\sigma$  seçilen iki şekildeğiştirme değeri arasında uygulanan çekme gerilmesi farkı (MPa),  $\Delta\varepsilon$  ise seçilen iki şekildeğiştirme değeri arasındaki farktır.

#### 4) Poisson oranının hesabı

Elastisite modülünün hesaplandığı aksel uzama aralığında (önerilen 0.001-0.003 aralığında) LP'in enine, kısaltmaya yönelik şekildeğiştirme değerleri kaydedilmiş ise poisson oranı rahatlıkla Denklem 2.5'te verildiği gibi bulunabilir.

$$\nu = \frac{-\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te verilen  $\nu$  Poisson oranını,  $\Delta\varepsilon_t$  Poisson oranının hesaplanacağı aralıktaki enine şekildeğiştirme farkını,  $\Delta\varepsilon_l$  Poisson oranının hesaplanacağı aralıktaki boyuna şekildeğiştirme farkını göstermektedir.

### 2.2.4 Deney sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilmesi

Yukarıda bahsedilen mekanik büyüklüklerin hesaplanmasının ardından sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla her test serisinde ortalama değer, standart sapma ve varyasyon katsayısı, bahsedilen mekanik büyüklüklerin her biri için hesaplanmalıdır. Bu istatistik analizin ardından uygun olan sonuçlar değerlendirmeye alınır.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.6a)$$

$$s_{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1} \quad (2.6b)$$

$$CV = 100 \frac{S_{n-1}}{\bar{x}} \quad (2.6c)$$

Denklem 2.6a, 2.6b ve 2.6c'de verilen istatistik parametreleri sırasıyla ortalama değer, standart sapma değeri ve varyasyon katsayısıdır (%).  $n$  ile gösterilen değerlendirmeye alınan numune sayısıdır,  $x_i$  değeri ise ölçülen büyüklüktür.

### 2.2.5 LP'e ait direk çekme test sonuçları

Bu çalışma kapsamında kullanılacak görece düşük elastisite modülüne sahip cam elyaf LP'e ait kopma gerilmesi, kopma uzaması ve elastisite modülü değerlerinin saptanması için dört adet kupon numune üzerinde direk çekme testi yapılmıştır. Gerilme şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 2.3'de verildiği gibidir. Verilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin LP'ler için bilinen doğrusal olma durumundan farklı olmasının nedeni yazara göre deneyi yapılan ve bu tez kapsamında kullanılan LP'in çift yönlü bir dokuma olmasıyla açıklanabilmektedir.

**Çizelge 2.1** : Kupon numunelere ait mekanik özellikler ve istatistiksel değerlendirilmesi.

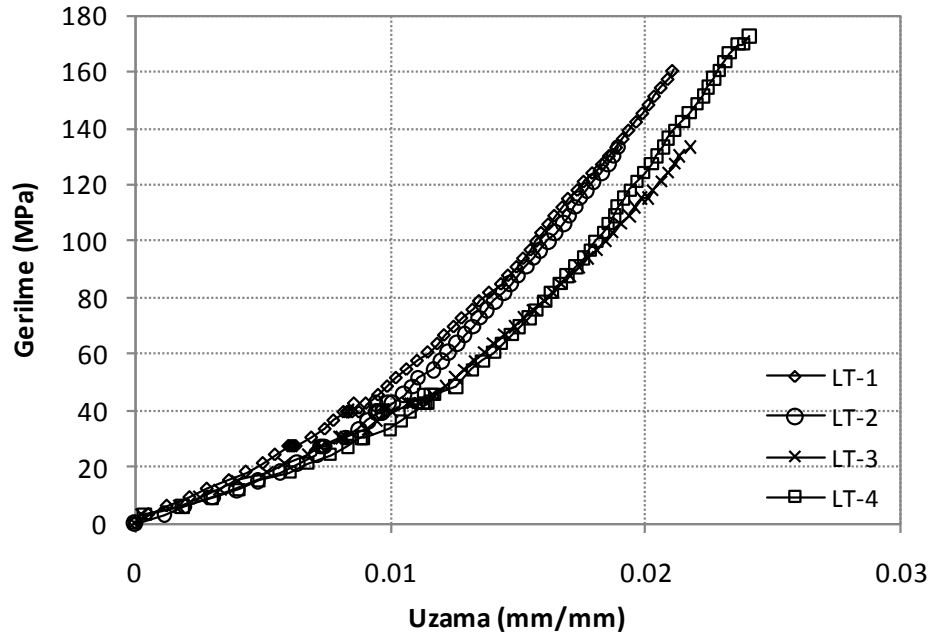
Numune adı	Kopma Gerilmesi (Mpa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (Mpa)*	Poisson Oranı**
LT-1	166.70	0.022	6459	0.47***
LT-2	133.33	0.019	6042	-
LT-3	133.33	0.022	5025	-
LT-4	172.73	0.024	5074	0.42
Ortalama	151.52	0.022	5650	0.45
Standart sapma	21.15	0.0021	714.27	0.035
Varyasyon katsayısı (%)	14	9.5	13	7

devamı.

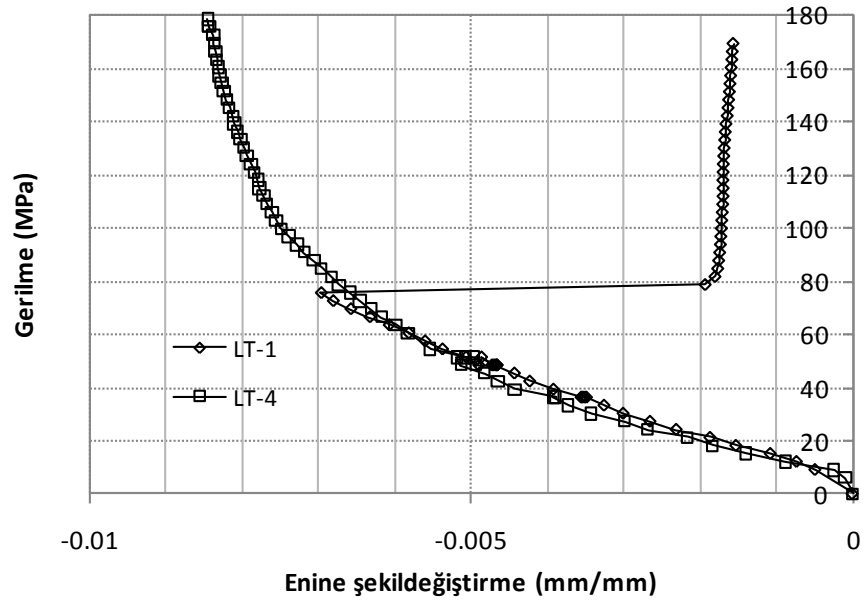
\*0.01-0.02 şekildeğiştirme aralığında hesaplanmıştır.

\*\*0.001-0.003 şekildeğiştirme aralığında hesaplanmıştır.

\*\*\* Enine doğrultuda yapıştırılan şekildeğiştirmeölçer bir süre sonra çalışmamıştır.



Şekil 2.3 : Kupon numunelere ait aksenal gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.



Şekil 2.4 : Kupon numunelere ait aksenal gerilme-enine şekildeğiştirme ilişkileri.



Şekil 2.5 : Çalışmada kullanılan LP dokuma.

## 2.3 Betona ait Malzeme Özellikleri

### 2.3.1 Beton karışımının özellikleri ve beton silindir numunelerin imalatı

Çalışmanın amacı düşük beton dayanımlı yapı elemanlarının dayanım ve süneklik özelliklerinin iyileştirilmesinde düşük elastisite modülüne sahip ve görece biraz daha ekonomik cam elyaf lifli polimerlerin katkısını araştırmaktır. Bu nedenle çalışmada düşük basınç dayanımına sahip beton 15x30 cm silindir elemanların üretilmesi planlanmıştır. Çizelge 2.2.'de karışım özellikleri verilen beton İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda üretilmiştir.

Çizelge 2.2 : Çalışmada kullanılan beton karışım reçetesi.

Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	Su (kg/m <sup>3</sup> )	NO I Mıdır (kg/m <sup>3</sup> )	İnce kum (kg/m <sup>3</sup> )
160	205	1140	990

Karışım hazırlanırken, önce kuru karışım karıştırıcı içerisinde homojen bir görünüm kazanıncaya kadar karıştırılmış ve ardından yavaş yavaş su eklenmiştir ve daha sonra bir süre daha karıştırılmaya devam edilmiştir, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7. Önceden içi yağlanarak hazırlanan silindir kalıplarının içine hazırlanan beton boşaltıldıktan sonra sarsma tablasında sarsılarak iyice yerleşmesi sağlanmıştır. Şekil 2.8'de kalıplar içerisine dökülmüş beton numuneler görülmektedir.





**Şekil 2.6 :** Kuru karışım.



**Şekil 2.7 :** Beton silindirlerin imalatı.



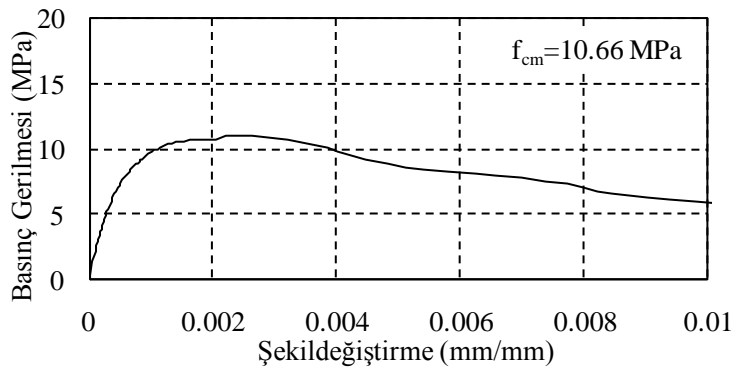
**Şekil 2.8 :** Kalıplara dökülmüş beton silindir numuneler.

Bu çalışmanın başında önce toplam 15 adet beton silindir eleman imal edilmiştir. Bunlardan 9 tanesi bu tezin kapsamında bulunan numunelerdir, geri kalanları tezin devamı niteliğinde olacak bir başka çalışma için ayrı tutulmuştur. Karıştırıcının kapasitesinin sınırından dolayı bahsedilen 15 adet silindir tek seferde değil beşerli üç grup halinde imal edilmiştir. Her ne kadar hassas ölçümler yapılmış olsa da bu üç ayrı imalat grubu arasında basınç dayanımları açısından istenilmeyen küçük bir fark meydana geldiği beton malzeme deneyleri sırasında gözlenmiştir. Bu üç farklı dayanım grubundan birer adet sargısız tek eksenli basınç testi yapılarak gruplara ait basınç dayanımı ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi elde edilmiştir, Çizelge 2.3.

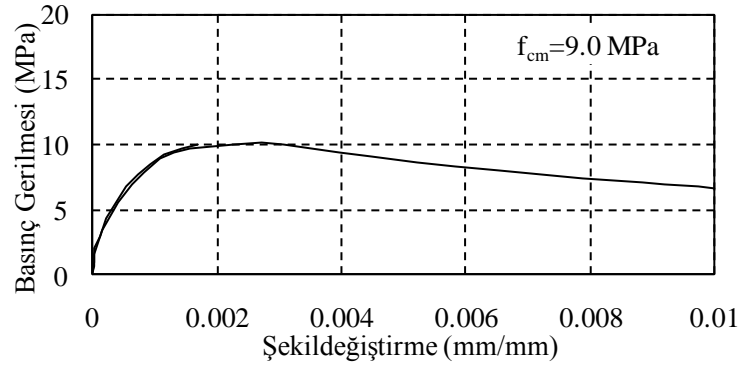
Betonun mekanik özelliklerini belirlemek için her bir dayanım sınıfından birer adet test edilmiş bu üç numuneye ait gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.9, 2.10 ve 2.11’de verilmiştir. Bunun için 500 tonluk Amsler basınç aleti kullanılmıştır. Uygulanan yük değeri silindir numune altına yerleştirilmiş olan yük hücresi (*loadcell*) aracılığı ile ölçülmüş ve TDS 302 veri toplayıcıya aktararak kaydedilmiştir. Düşey kısalma şekildeğiştirme değerleri numune orta bölgesinden ölçüm yapan, 150 mm ölçüm boyuna sahip kompresometre ile ölçülmüştür ve aynı veri toplayıcıya aktarılmıştır. Beton malzemesi mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan bu üç deneye ait test düzeneği Şekil 2.12’de verilmiştir.

**Çizelge 2.3 :** Deneyde kullanılacak beton dayanım grupları.

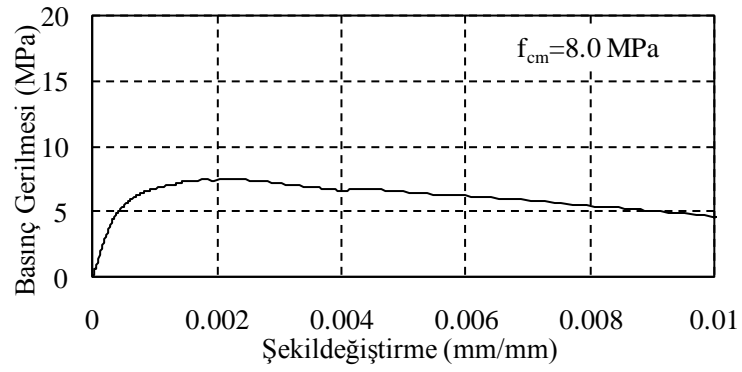
Dayanım Grupları	Adeti	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
n1	1	10.7	17500
n2	1	9.0	16200
n3	1	8.0	15500



**Şekil 2.9 :** n1 dayanım grubu gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 2.10 : n2 dayanım grubu gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 2.11 : n3 dayanım grubu gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 2.12 : Tek eksenli basınç deneyi düzeneği.



### 3. LP SARGILANMIŞ BETON SİLİNDİR DENEYLERİ

#### 3.1 Numunelerin Hazırlanması

LP ile güçlendirilecek standart beton silindir numuneler kağıt zımpara ile zımparalanarak yüzeyleri düzeltilmiştir, kalıp izleri ortadan kaldırılmıştır. LP'in betona sarılması sırasında Lerefalin isimli bir yapıştırıcı malzeme kullanılmıştır. Yapıştırıcının su bazlı bir yapıya sahip olması nedeniyle sürüldüğü yüzeyde sertleşebilmesi için hava ile yeterince temas etmesi gerekmektedir. Bu yüzden LP katları sargılanırken birer gün beklenilmiştir. Yapıştırıcının dışında herhangi bir astar ya da primer malzeme kullanılmamıştır. Sargılama işlemi sırasında katlar arasında hava boşlukları oluşturmamaya özen gösterilmelidir. Tüm katlar sargılandıktan sonra en dış yüze de yapıştırıcı sürülerek sargılama işlemi tamamlanmıştır.



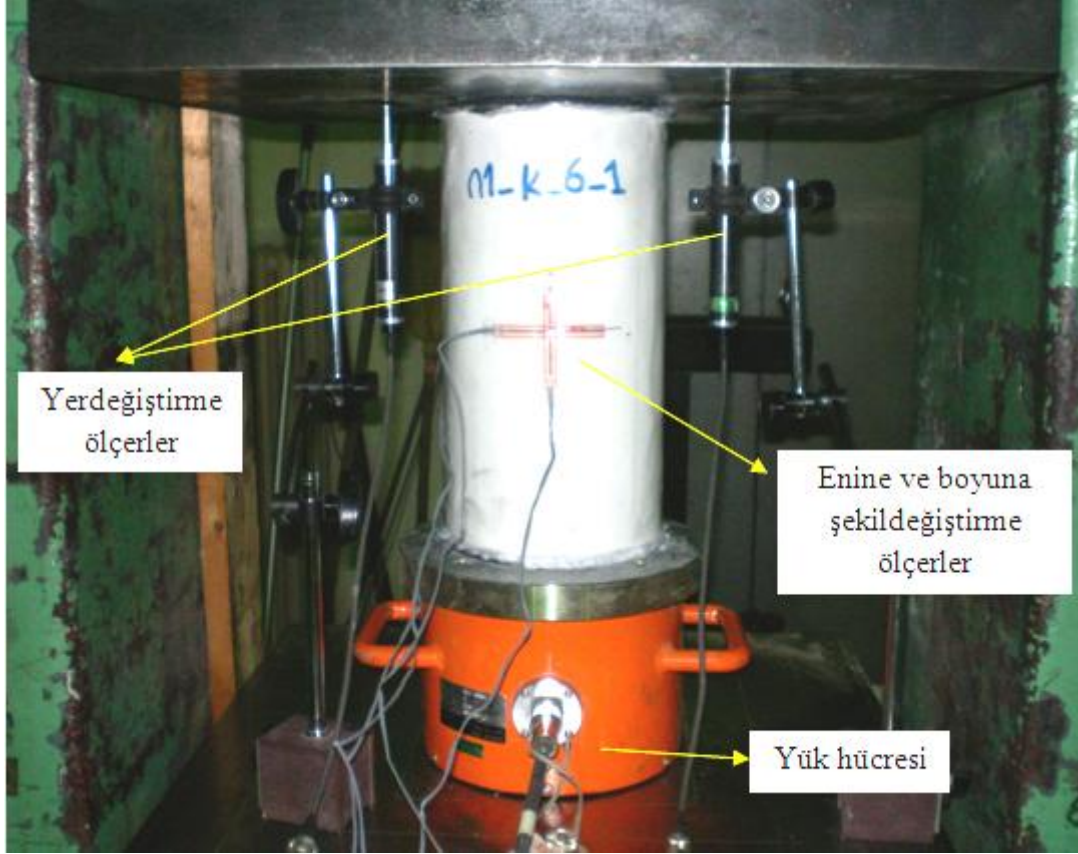
**Şekil 3.1** : Silindir sargılama işlemi.

Sargılama 20 cm uzunluğunda bindirme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan malzemeler GlobalMT firması tarafından temin edilmiştir.

#### 3.2 Ölçüm Sistemi

Tez kapsamında bulunan tüm sargılı silindir numune deneyleri, İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan 500 ton kapasiteli Amsler basınç aletinde yük kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yükün değeri silindir numune altına yerleştirilen CLL-NA 100 ton kapasiteli yük hücresi ile deney boyunca okunup

kaydedilmiştir. Hem aksenal doğrultuda hem de radyal doğrultuda numuneye ait şekildeğiştirme değerleri kaydedilmiştir. Bunun için düşeyde ve yatayda numune orta bölgesine 180° ara ile yerleştirilmiş, 60 mm ölçüm boyuna sahip TML PL-60-11-3L şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Ayrıca basınç aletinin paletleri arasına yine 180° ara ile yerleştirilen 2 adet 25 mm ölçüm kapasiteli CDP-25 yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait bir fotoğraf Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.2 : Deney düzeneği.**

Tüm şekildeğiştirmeölçerlerin, yerdeğiştirmeölçerlerin ve yük ölçerin ölçtüğü değerler TDS 302 data toplayıcı ile toplanarak bilgisayara aktarılmıştır.

Şekildeğiştirmeölçerler numune üzerine yapıştırılmadan önce bazı yüzey hazırlığının yapılması gerekmektedir. Bu nedenle şekildeğiştirmeölçer yapıştırılacak bölgelerde önceden epoksi esaslı bir yapıştırıcı kullanılarak ince, pürüzsüz bir yüzey oluşturulmaya çalışılmıştır. Ardından şekildeğiştirmeölçerler güçlü bir yapıştırıcı ile hazırlanan yüzeylere yapıştırılmıştır. Bindirme bölgelerine şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılmasından kaçınılmalıdır.

### 3.3 Deney Sonuçları

Bu bölümde her birinden ikişer adet olmak üzere sırasıyla 2, 4 ve 6 kat LP ile sargılanmış 6 adet beton silindir numuneye ait deney sonuçları verilmiştir. Numunelere ait gerilme şekildeğiştirme ilişkisi incelenirken gerilme eksenel birimsiz hale ( $f_{cc}/f_{co}$ ) getirilerek verilmiş ve böylece sargısız dayanımlarının farkından dolayı karşılaştırma sırasında ortaya çıkacak zorluklar giderilmiştir. Eksenel doğrultudaki gerilme şekildeğiştirme ilişkisinin yanısıra eksenel gerilmenin seviyesi ile radyal yöndeki şekildeğiştirmenin değişimi de incelenmiş ve ilk bölümde bahsedilen teğetsel Poisson oranı ya da dilatasyon oranı her bir numune için deney sonuçlarından elde edilmiştir. Eksenel doğrultudaki gerilme ve şekildeğiştirme sırasıyla  $\sigma_1$  ve  $\varepsilon_1$  ile ve radyal doğrultudaki gerilme ve şekildeğiştirme ise  $\sigma_2$  ve  $\varepsilon_2$  ile gösterilmiştir. Numune üzerine yapıştırılmış yatay şekildeğiştirmeölçerlerden okunan, taşınabilecek en büyük eksenel gerilme altında elde edilen çevresel ortalama şekildeğiştirme değeri (*hoop strain*) ise  $\varepsilon_{ch}$  olarak ifade edilmiştir. Yine bu ana karşılık elde edilen sargılı betona ait eksenel kısalma ise  $\varepsilon_{cc}$  olarak verilmiştir.

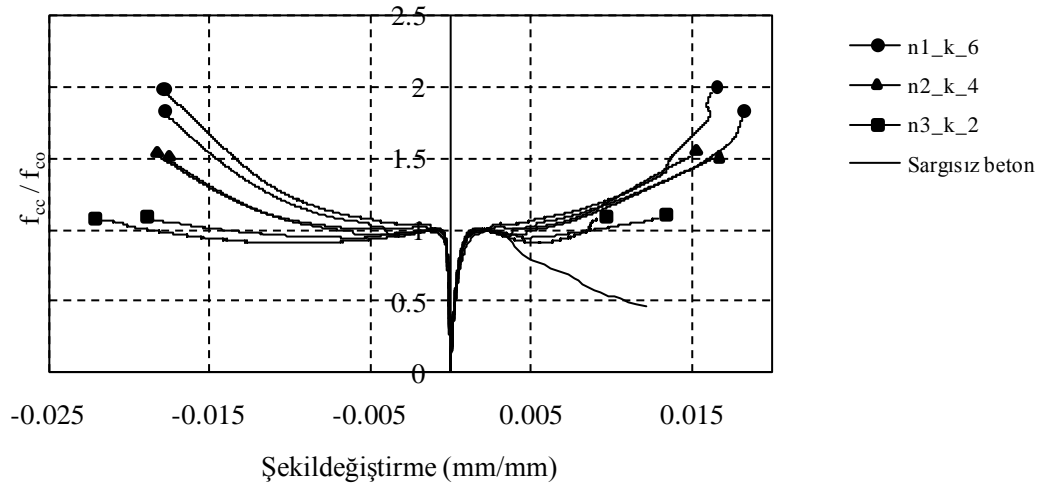
Numuneler beton dayanım sınıfına ve sargı kat sayılarına göre adlandırılmıştır. Örneğin n1\_k\_6\_1, 2.bölümde bahsedilen n1 beton dayanım sınıfına sahip betonun 6 kat LP ile sargılanmasıyla elde edilmiş 2 numuneden 1.sini göstermektedir. Çizelge 3.1’de numunelere ait deney sonuçları, sargılanmış dayanım ve buna karşı gelen eksenel şekildeğiştirme ile çevresel şekildeğiştirme değerleri açısından verilmiştir. Çizelge 3.1’de verilen sonuç tablosundaki eksenel şekildeğiştirme değerleri, numune orta bölgesine yapıştırılmış 60 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi silindirin 6 kat sargılanması durumunda yaklaşık %90 dayanım artışı sağlanırken, 4 kat sargılanması durumunda yaklaşık %60 dayanım artışı sağlanmıştır. Ancak 2 kat sargılanması durumunda dayanım artışı yaklaşık %10 mertebelerinde kalmıştır. Buna karşılık şekildeğiştirebilme yeteneği, 6 kat sargılanmış numunelerde 8.5, 4 kat sargılanmış numunelerde 7.8 ve 2 kat sargılanmış numunelerde ise 5.5 kat artmıştır. Çoğu araştırmacı, sargılanmış halde LP ‘e ait kopma uzamasının, eksenel çekmedeki kopma uzamasının %70’i civarında alınmasını önerir. Bu çalışmada ise sargılanmış halde LP’e ait çevresel uzama kopma anında eksenel kopma uzamasının yaklaşık %80’i mertebesindedir.

**Çizelge 3.1 : Sargılı silindir deney sonuçları.**

Numune	Dayanım sınıfı	$f_{co}$ (MPa)	Sargı kat sayısı	$f_{cc}$ (MPa)	$\epsilon_{co}$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{ch}$	$f_{cc} / f_{co}$	$\epsilon_{cc} / \epsilon_{co}$
n1_k_6_1	n1	10.60	6	19.69	0.002	0.018	0.0177	1.86	9
n1_k_6_2	n1	10.60	6	20.13	0.002	0.016	0.0177	1.9	8
n2_k_4_1	n2	9.00	4	14.50	0.002	0.016	0.0177	1.61	8
n2_k_4_2	n2	9.00	4	14.11	0.002	0.015	0.0180	1.57	7.5
n3_k_2_1	n3	8.00	2	8.69	0.002	0.013	0.0190	1.08	6.5
n3_k_2_2	n3	8.00	2	8.67	0.002	0.009	0.0220	1.08	4.5

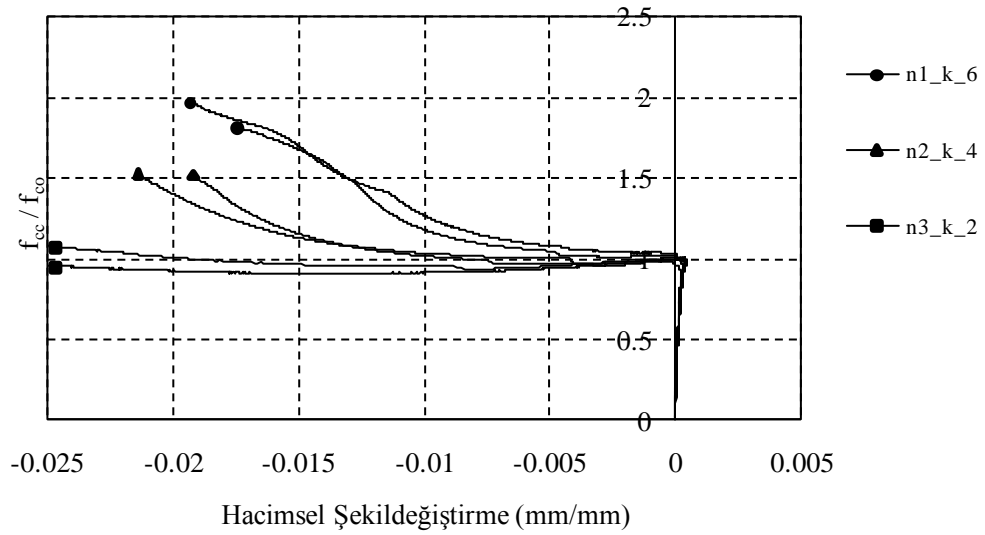


Sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri Şekil 3.3’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 3.3 : Sargılı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Numunelerin aksenal gerilmeye karşılık yaptıkları hacimsel şekildeğiştirmeler Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 : Sargılı numunelerin gerilme- hacimsel şekildeğiştirme ilişkileri.

Her bir numuneye ait tüm gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ve dilatasyon oranının eksenel gerilme ile değişimi EK-A'da verilmiştir.

Şekil 3.3'den de görüleceği üzere LP ile sargılanan betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışı sargı kat sayısına bağlı olarak değiştirilebilir; şekildeğiştirebilme yeteneği arttırılabilir, eksenel bir yükleme durumunda daha fazla yük taşıması sağlanabilir.

Sargılama malzemesinin diğer LP'lere kıyasla daha kalın bir dokuya sahip olması ve epoksi kullanılmaması sargılama sırasında beton ile LP arasında tam anlamıyla bir bütünleşmenin gerçekleşmesini engellemektedir. Buna bağlı olarak sargısız dayanıma erişildiğinde taşınan eksenel gerilme azalma eğilimine girmekte fakat yeteri kadar dilatasyon gerçekleştikten sonra LP devreye girerek tekrar artmaktadır. Bu artan ikinci kolun eğimi de kullanılan sargı malzemesinin düşük eksenel rijitliğe sahip olması nedeniyle aynı hacimsel oranda kullanılan diğer LP'lere kıyasla gayet düşüktür.

Tüm numunelerde LP üzerinde küçük bir yırtık açılmasıyla birlikte taşınan yük azalmaya başlamıştır. Bu yırtık giderek genişlemiştir ve numune üzerindeki yük de beraberinde yavaş yavaş azalmıştır, Şekil 3.5.



Şekil 3.5 : %5 şekildeğiştirme yapmış hasarlı numune.



Şekil 3.6 : 4 kat ve 2 kat sargılanmış hasarlı numuneler.



Şekil 3.7 : 6 kat sargılanmış hasarlı numune.



## **4. SONLU ELEMAN ANALİZİ**

### **4.1 Giriş**

Sonlu elemanlar yöntemi son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin gelişimine bağlı olarak özellikle mühendislik alanında birçok problemin çözümünde sıkça başvurulan yollardan biri haline gelmiştir. Her ne kadar yapı mühendisliği alanında bir elemanın ya da yapının davranışını kavrayabilmek için deneysel çalışmalar yapmak kaçınılmaz olsa da sonlu elemanlar yöntemi etkin kullanılabildiğinde ve gerçekçi modeller oluşturulabildiğinde deneysel çalışmayı tamamlayıcı nitelikte nümerik bir çözümleme de yapılmış olur. Böylelikle deney sayısı azaltılabilir, ölçüm sistemi iyileştirilebilir, sonuçların yorumlanması kolaylaştırılabilir. Harcanan zaman ve işçilik azaltılabilir, daha ekonomik bir çözüm sağlanabilir.

Sonlu elemanlar metodu betonarme eleman ya da yapıların tasarımı için de bu günlerde güçlü bir analitik araç olarak kullanılmaktadır. Beton çatlaması, çok eksenli malzeme özellikleri, çekme sertleşmesi (*tension stiffening*), karmaşık donatı-beton arası arayüzey davranışı gibi önceleri hesaplarda dikkate alınamayan ya da çok kaba yaklaşımlar yapılarak hesaba katılan bu gibi özellikler bugün bu yöntem sayesinde rasyonel olarak dikkate alınabilmektedir (Chen W. F., 1982).

#### **4.1.1 Literatür özeti**

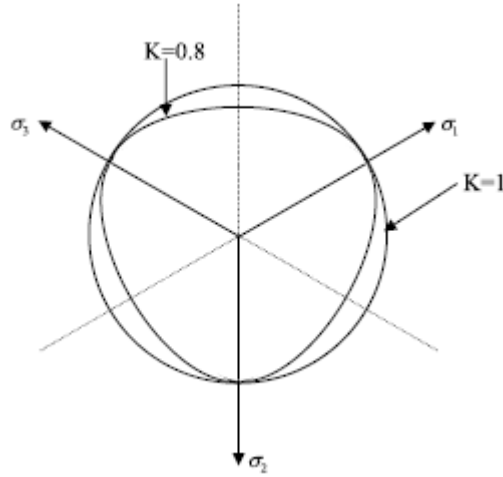
Sargılı betonun doğrusal olmayan sonlu eleman analizi bir çok araştırmacı tarafından farklı malzeme modelleri kullanılarak uygulanmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Mirmiran ve diğ. (2000) tarafından LP ile sargılanmış betonun doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli oluşturulmuş, betona uygulanan çevresel basınca duyarlı Drucker-Prager plastisitesi kullanılmıştır.

Çalışmalarında, daha önce yapılmış bir araştırmadaki (Mirmiran ve Shahawy, 1993), cam esaslı lifli polimer tüplerin (6,10,14 kat kalınlıklı) içine beton dökülerek hazırlanmış, 30 adet silindir numune (152.2 x 305 mm) ve 12 adet (152.5 x 152.5 x 305 mm) dörtgen numunenin test sonuçlarından faydalanmışlardır. Betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için elastik tam plastik bir kabul yapılmış, beton davranışı için herhangi bir pekleşme ya da yumuşama dikkate alınmamıştır. Drucker–Prager plastisitesinde kullanılan kohezyon ( $c$ ), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon açısı ( $\phi_f$ )nın etkinliğini araştırmak için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Sargılı betona ait gerilme şekildeğiştirme diyagramında ikinci kolun daha çok  $\phi$  içsel sürtünme açısından etkilendiği, birinci koldan ikinci kola geçiş noktasının yerinin ise hem kohezyonun hem de içsel sürtünme açısının değişiminden etkilendiğini belirtilmiştir. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri sabit tutularak sadece  $\phi_f$  dilatasyon açısı değeri değiştirilmiş ve bu değişimin gerilme şekildeğiştirme diyagramında ikinci kolun eğimini etkilediği görülmüştür. Dilatasyon açısının değerinin azalması halinde kolun eğimi de azalmaktadır. Dilatasyon açısı değerinin sıfır alındığı asosyatif olmayan bir akım kuralının bu çalışmada seçilmesi benimsenmiştir. Modelden elde edilen gerilme şekildeğiştirme eğrilerinin deneysel sonuçlar ile yeterince uyum gösterdiği görülmüştür. Ancak betonun hacimsel genişleme eğilimi sonlu eleman modelince yeteri miktarda yakalanamamıştır. Yazarlara göre bunun nedeni Drucker-Prager plastisitesinde beton davranışının elastik-tam plastik malzeme olarak tanımlanmasıdır. Ayrıca aynı eleman modeli üzerinde çevrimsel yüklemeli bir analiz de yapılmış ancak ilerleyen çevrimlere karşılık ne rijitlik ne de taşınacak gerilme açısından bir azalma gözlemlenememiştir. Bunun sebebinin de beton için kabul edilen elastik-tam plastik gerilme şekildeğiştirme ilişkisi olduğu vurgulanmıştır.

Rousakis ve diğ. (2006) tarafından farklı hacimsel oranda kullanılmış cam ve karbon esaslı LP ile sargılanmış kare kesitli beton numuneler üzerinde aksel basınç testi yapılmış ve LP sargılı betonun davranışı için bir plastisite modeli önerilmiştir. Modelde beton davranışı için doğrusal olmayan gerilme şekildeğiştirme ilişkisi öngörülmüş ve betonun dilatasyon karakterini gerçeğe yakın modelleyebilmek için asosyatif olmayan bir akım kuralı kullanılmıştır. Sargılı betonun pekleşme ve ardından yumuşama eğilimini de dikkate alabilen bu elastoplastik plastisite modeli kullanılarak elde edilen gerilme şekildeğiştirme ilişkilerinin, deneysel veri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Karabinis ve diğ. (2008) tarafından; Karabinis ve Kioussis (1996) tarafından yapılan çalışma sürekli geliştirilerek (Karabinis ve Rousakis, 2002; Rousakis ve diğ. 2003) LP sargılanmış beton için bir plastisite modeli önerilmiştir. Önerilen gelişmiş Drucker-Prager yükleme fonksiyonu betonun pekleşme ve yumuşama davranışını dikkate alabilen bir parametre içermektedir. Aynı zamanda asosyatif olmayan bir akım kuralı kullanılmıştır. Sargısız beton dayanımı ve sargılama malzemesinin uzama elastisite modülüne bağlı olarak kapalı form ifadeler yoluyla sürtünme parametresi  $\theta$  ( $\theta = f(\phi)$ ) ve plastik dilatasyon parametresi  $\phi_f$  hesaplanmıştır. Önerilen göçme kriterinde  $f(K)$  gibi bir terimle deviatorik gerilmenin ikinci invariantsının karekökü olan terim  $\sqrt{J_2}$  çarpılmış ve böylece deviatorik gerilmelerin üçüncü invariantsının da göçme kriteri fonksiyonuna dahil edildiğinden bahsedilmiştir.  $f(K)$  fonksiyonu Lode açısının dolaylı bir ifadesi olup dikkate alınan üçüncü deviatorik invariant sayesinde değişen gerilme durumları için betonun değişen kayma dayanımı da dikkate alınabilmektedir. Bunu sağlamak için gerektiğinde deviatorik düzlemin şekli daire ya da üçgenimsi bir forma girebilmelidir, Şekil 4.1. Diğer çalışmalara kıyasla daha basit, sadece betonun içsel sürtünme özelliğine ve tek eksenli basınç dayanımına bağlı bir de pekleşme parametresi önerilmiştir.



**Şekil 4.1** : Farklı gerilme durumlarına göre değişen deviatorik düzlem.

Doran ve diğ. (2008) tarafından LP sargılanmış dörtgen ve dairesel kesitli beton elemanların aksenal basınç altındaki davranışlarını elde etmek amacıyla doğrusal olmayan bir sonlu eleman çözümü uygulanmıştır. Drucker-Prager plastisitesi kullanılan çalışmada, betona ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri

tanımlanarak malzeme modeli oluşturulmuştur. Narin kolon elemanlar da dahil olmak üzere farklı dört araştırmacıdan sağlanan otuz üç adet küçük ve büyük ölçekte numune sayısal olarak analiz edilmiş, beton ve sargı arasındaki etkileşimin üzerinde durulmuştur. Sargı basıncının kolon üzerinde dağılımı incelenmiş, kolon orta bölgesindeki etkinliğinin altı çizilmiştir. Sonlu eleman analizinden elde edilen sargı basıncı, silindirik numuneler için hesaplanan düzgün dağılı sargı basıncı ve ACI 440.2R-02 de verilen şekil çarpanı kullanılarak elde edilmiş efektif gerilmeler ile kıyaslanmıştır. Silindir numuneler için düzgün dağılı yanal basınç kabulünün uygun olduğu görülmüştür.

Yu ve diğ. (2010) tarafından mevcut Drucker-Prager tipi beton plastisite modelleri için geniş bir değerlendirme yapılmış, çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen bu modellerin sargılı betonun davranışını öngörmekteki başarısı gözden geçirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda mevcut modellerin LP sargılı ya da diğer pasif sargılı beton davranışını daha gerçekçi öngörebilmesi için bazı düzenlemelere ihtiyaç duyulduğu ortaya konulmuştur. Önerilen düzenlemeler ; (a) üçüncü deviatorik gerilme değişmezini de içeren bir göçme kriteri  $f(I_1, J_2, J_3)$ , (b) sadece plastik şekildeğiştirmelere bağlı olmayıp aynı zamanda sargılama basıncına da bağlı bir pekleşme / yumuşama kuralı (*hardening/softening rule*)  $k = k(f'_1, \bar{\epsilon}_{pl})$  ve (c) sadece sargılama basıncına bağlı olmakla kalmayıp aynı zamanda sargılama etkisindeki artış oranına  $(f'_1/\epsilon_l)$  da bağlı asosyatif olmayan bir akım kuralıdır. Mevcut Drucker-Prager plastisite modellerinden hiç birinin bu üç kriteri de birlikte bulundurmadığından bahsedilmiştir. Yazarlar tarafından bu üç kriteri de sağlayan bir plastisite modeli önerilmiş ve ABAQUS sonlu elemanlar programı içine yerleştirilerek literatürdeki diğer çalışmaların analitik bir değerlendirilmesi yapılmıştır.



## 4.2 Beton Davranış Modelleri

Beton heterojen , kohezif – sürtünmeli bir malzemedir. Ayrıca çok eksenli gerilmeler altında yükleme devam ederken ortaya çıkacak çatlamlar ya da var olan mikro çatlakların yayılımı betonun doğrusal olmayan bir davranış göstermesine neden olur (Tasdemir ve diğ, 1990). Matrikste, agregalarda ya da matriks agrega yapışma yüzeyinde meydana gelecek bu çatlakların bir sonlu eleman modelinde dikkate alınması ve mikro modelleme yapmak oldukça zordur. Sonlu elemanlar metodolojisinde beton, tüm bu içsel mekanizmaları içinde bulunduran bünye modelleri (*constitutive models*) kullanılarak modellenir. Bu modeller malzeme davranışının matematiksel bir tanımı olup, temelde gerilme ve şekil değiştirme tensörleri arasındaki ilişkiye bağlı olarak kurulur. Analitik bir modelin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi, kullanılan bu bağıntılardaki yaklaşımların doğruluğuna bağlıdır.

Betonun farklı gerilme durumları altında, karmaşık gerilme şekil değiştirme ilişkisini belirleyen bu bünye modelleri dört ana grup altında toplanabilir : (1) eğri uydurma yoluyla, interpolasyon ve matematiksel fonksiyonlar kullanılarak gerilme şekil değiştirme ilişkisinin temsil edilmesi; (2) doğrusal ya da doğrusal olmayan elastisite teorileri; (3) tam plastisite (*perfect plasticity*) ya da pekleşen plastisite (*work hardening plasticity*) teorileri; (4) endokronik plastisite teorisi (Chen W.F., 1982).

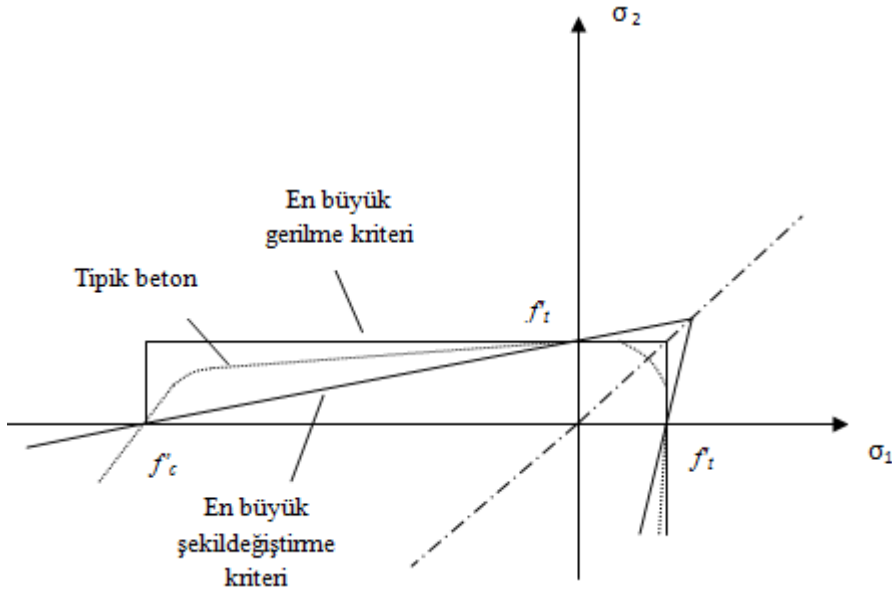
### 4.2.1 Doğrusal elastik modeller

Doğrusal elastik teori, her ne kadar beton davranışını açıklamak için yetersiz bir tanım olsa da birçok beton modeli bu teoriyi esas alarak oluşturulmuştur. Bu bölümde beton doğrusal-elastik gevrek-kırılan malzeme olarak modellenir ve bünye modelleri doğrusal elastisiteden faydalanılarak çatlama ya da çatlama olmamış beton için geliştirilir. Doğrusal elastik modeller, yapı elemanının davranış problemini, betonun çekme çatlağının öngörülmesi ve bunun toplam davranışa olan etkisinin tahmin edilebilmesi durumuna indirgeyerek çözmeye çalışır. Betonun en önemli karakterlerinden biri onun basınca göre düşük çekme dayanımıdır. Bu sebeple basınç gerilmelerine kıyasla çok düşük gerilme seviyelerinde çekme çatlakları meydana gelir. Oluşan çekme çatlakları betonun toplam rijitliğini azaltırken, doğrusal olmayan davranışının da ana nedenlerinden biridir. Şüphesiz ki betona ait çatlama davranışını

dikkate alan bir model oluşturabilmek, beton yapı elemanının davranışını tanımlayabilmek için çok önemlidir. Özellikle kiriş ve perdelerde doğrusal olmayan davranış, betonun çekme yükleri altındaki davranışından fazlaca etkilenir. Birçok doğrusal elastik kırılma modeli önerilmiş ve beton yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışını araştırmak amacıyla kullanılmıştır (Chen W.F., 1982).

Bu kriterlerden biri ve en eskisi Galilei, Leibniz, Navier ve Lamé tarafından ileri sürülen en büyük normal gerilme hipotezidir. Ortanca ve en küçük asal gerilmeye önem verilmeksizin kırılma ya da plastik hale geçmede baş rolün en büyük normal gerilme değeri olan  $\sigma_1$  de olduğu düşünülür. Bu durumda bu hipotezin gösterdiği sınır yüzeyi, Şekil 4.2'deki gibi koordinat düzlemlerine paralel olan bir dikdörtgenler prizmasıdır (Inan M., 1988).

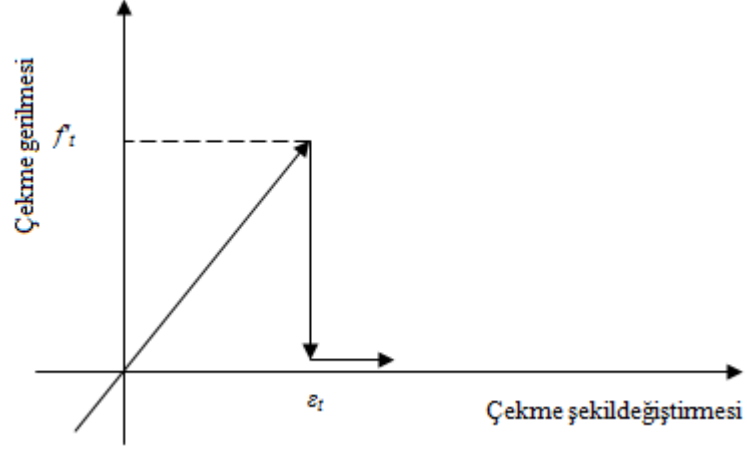
Bir diğeri ise bugün için pratik bir anlamı olmayan ve sadece tarihi bir değere sahip en büyük şekildeğiştirme hipotezidir. Bu hipotez Mariotte, St.Venant ve Poncelet tarafından ileri sürülmüştür. Genel halde, üç eksenli zorlamada tehlikeli halin en büyük uzama veya kısalmanın, bir eksenli durumdaki değere eşit olduğu zaman doğacağı düşünülür. Bu hipotez hidrostatik basınç deneyini sağlamadığı gibi, iki eksenli çekme halinde de tek eksenliden daha büyük bir dayanım göstereceği gibi gerçeğe uymayan bir sonuç verir, Şekil 4.2, (Inan M., 1988).



Şekil 4.2 : Doğrusal elastik kırılma modelleri (Chen W.F., 1982).

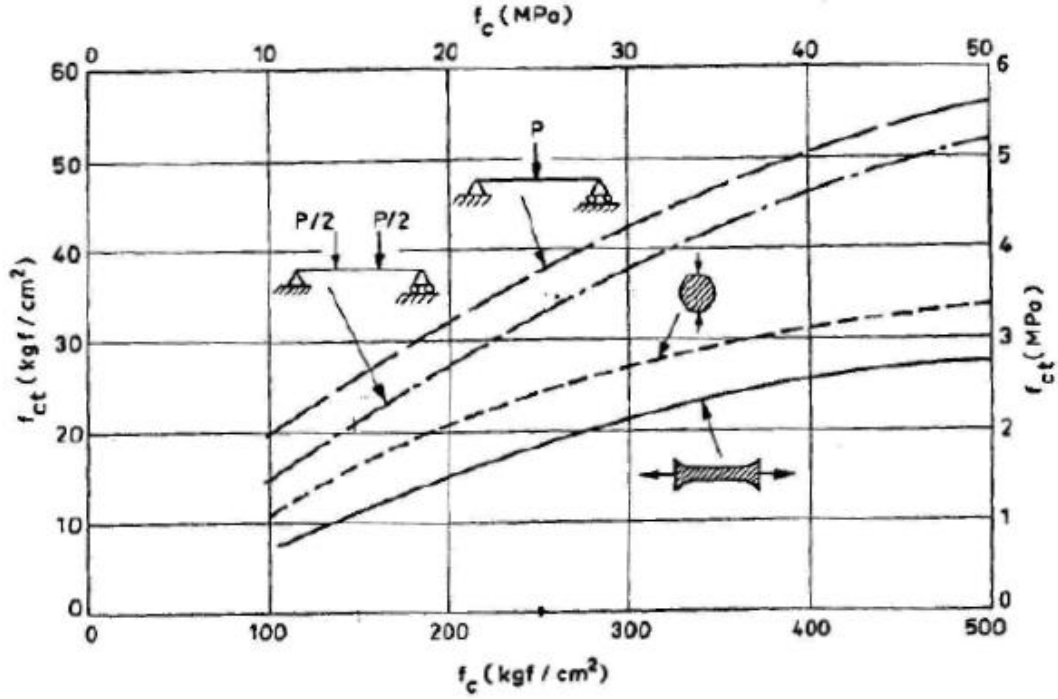
Çatlama kısmi bir göçme durumudur. Çünkü çatlak doğrultusunda malzeme direnci Şekil 4.3'te temsili olarak gösterildiği gibi sifıra düşerken, çatlağa paralel doğrultuda malzeme hala yük taşımaya devam eder. Çekme gerilmesi bölgesinde betonun bu ani

şekildeğiştirme yumuşaması davranışı bir çatlağın oluşmasıyla birlikte gelişir ve gerilme seviyelerinde de ani değışmelere neden olur. Çatlağın gelişmesi ve ardından gerilmelerin yeniden dağılımı betonarme yapı elemanlarının genel davranışında temel bir etkiye sahiptir. Ezilme ise tam bir göçme halidir, tüm yöndeki rijitlikler sıfıra iner.



**Şekil 4.3 :** Çekmede gerilme-şekildeğiştirme kırılma ilişkisi (Chen W.F., 1982).

Betona ait tek eksenli çekme dayanımı  $f'_t$ , direk çekme deneyi, silindir yarma deneyi ya da eğilme deneyi yoluyla elde edilebilir. Ayrıca TS 500'de betonun karakteristik basınç dayanımına bağlı olarak karakteristik çekme dayanımı  $f'_t$ ,  $0.35\sqrt{f_{ck}}$  olarak verilmiştir.



Şekil 4.4 : Direk çekme, yarma ve nokta yükleme deneylerinin kıyaslanması.

#### 4.2.1.1 Çatlak modelleri

Betonun sonlu eleman analizinde farklı üç tip çatlak modeli kullanılır. Bunlar;

1. Yayılı çatlak modeli ( *smeared crack model* )
2. Ayırık çatlak modeli ( *discrete crack model* )
3. Kırılma mekaniği modelidir.

Burada seçilecek olan çatlak modeli yapılacak analizin amacına bağlıdır. Yerel gerilme dağılımları ve bütünüyle gerçek çatlak biçimleriyle ilgilenilmiyor ise yani kabaca yapının tümüne dair yük-yerdeğiştirme ilişkisini bulmak amacıyla bir analiz yapılıyor ise yayılı çatlak modeli iyi bir seçenektir. Eğer detaylı yerel davranış ile ilgileniliyorsa ayırık çatlak modeli uygundur. Çoğu yapı mühendisliği probleminde yayılı çatlak modeli yeterlidir. Bu çalışmada sadece bu modelden bahsedilecek ve kullanılacaktır.

Yayılı çatlak modeli yaklaşımında çatlamış betonun sürekli kaldığı kabul edilir, çatlaklar sürekli bir biçimde yayılıdır. Çatlamamış beton izotropik olarak değerlendirilir. İlk çatlak oluştuğundan sonra betonun ortotropik ya da enine izotropik hale geldiği kabul edilir. Çatlama oluştuğundan sonra çatlamamış beton için

düzenlenmiş bünye matrisleri, bu ortotropik yeni durum için, matriste ilgili çatlakla dik doğrultudaki elastisite modülü değeri sıfırlanarak düzenlenir.

#### **4.2.2 Doğrusal olmayan elastik modeller**

Betona ait gerilme şekildeğiştirme ilişkisinin doğrusal elastik olmadığı gerçeğinden hareketle daha önce bahsedilen doğrusal elastik modeller yeniden düzenlenerek doğrusal olmayan elastik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller daha çok hiper-elastik modellerden oluşur. Elastik davranışın hem geri dönebilir (*reversible*) olmasına hem de o andaki yalnızca şekildeğiştirme durumunu bilerek buradan gerilmelere ya da bilinen yalnızca gerilme durumundan, şekildeğiştirmelere geçilebileceğine dayanan modellerdir (*path independent*). Gerilme ya da şekildeğiştirme geçmişinin o andaki gerilme ya da şekildeğiştirme durumuna bir etkisinin olmadığı varsayılır. Betonun basınç altındaki doğrusal olmayan gerilme şekildeğiştirme ilişkisini dikkate alabildiği için doğrusal elastik modellerden daha iyi modellerdir. Ancak yükleme geçmişini dikkate almayı bu modellerin bir eksikliğidir. Çünkü deneysel olarak da artık çok iyi bilinmektedir ki, betonun mekanik davranışı sadece o andaki gerilme ya da şekildeğiştirme tensörlerinin durumuna bağlı değil aynı zamanda bu gerilme ya da şekildeğiştirmelerin önceden aldıkları değerlere yani kısaca yükleme (veya şekildeğiştirme) geçmişine de bağlıdır (*path dependent*). Bu yüzden bu modellerin beton davranışını tanımlamadaki geçerliliği ancak orantılı olarak artan yük-yerdeğiştirme bölgesi ile sınırlıdır (Chen W.F., 1982).

Yine doğrusal olmayan elastisite teorisi üzerine kurulu bir başka bünye modeli ise hipo-elastik modellerdir. Bu modellerde bünye denklemleri artımsal olarak kurulur. Yük-yerdeğiştirme ilişkisinin orantılılığının olmadığı bölgelerde de kullanılabilen bu modelde yük geçmişi de dikkate alınabilir (Imran I., 1994).

#### **4.2.3 Beton için göçme kriterleri**

Çok eksenli gerilmeler altında betonun dayanımı bu gerilme durumlarının bir fonksiyonudur. Çok eksenli yükleme altında betonun göçmesini; sadece basit çekme, basit basınç veya basit kayma gerilmelerinin birbirinden bağımsız sınırları (ulaşılacak en büyük değerleri) ile açıklamak yetersiz kalır. Betonun dayanımı tüm bu gerilme bileşenlerinin bir etkileşimi ile tanımlanmalıdır. Bu bölümde, üç boyutta tüm gerilme bileşenlerinin etkileşimlerinin matematiksel birer fonksiyonu olan göçme kriterlerinden bazıları açıklanmaya çalışılacaktır.

Göçme kriterleri oluşturulmadan önce betonda göçmeye neden olan durumun ne olduğuna karar verilmelidir ve göçmenin bir tanımı yapılmalıdır. Göçme bazen akmayı bazen çatlak başlangıcını bazen taşıma kapasitesine erişmiş olmayı ya da aşırı deformasyonlar yapmış olmayı tarif ediyor olabilir. Bu çalışmada göçme, betonun sargısız dayanımına erişmiş olmasını ifade etmektedir. Diğer bir deyişle modelde dikkate alınan eleman, sargılanmış olsun olmasın göçme ile kastedilen durum çekirdek beton elemanın dayanımına  $f_{co}$  erişip taşıma gücüne ulaşması halidir.

Betonun göçmesi çekme ya da basınç tipi olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Yukarıda göçme için taşıma gücünün sonu olarak bahsedildiğinden, çekme göçmesi; geniş çatlakların oluşup, çatlakların doğrultusuna dik yönde betonun çekme taşıma gücüne erişmesi olarak açıklanabilir. Aynı şekilde basınç göçmesi ise çok sayıda küçük ezilme çatlağının oluşması ve beton elemanın her doğrultuda dayanımını yitirmesi olarak gösterilebilir.

Betonun dayanımı ya da davranışı oldukça karmaşıktır ve birçok faktöre bağlıdır. Agregaların ve çimento matriksin fiziksel ya da mekanik özelliklerinden tutun da yüklemenin biçimine kadar bu değişken ortamda göçme için tanımlanabilecek tek bir matematiksel fonksiyonun varlığından söz edilemez. Literatürdeki göçme kriterlerinin tümü, dikkate aldıkları parametre sayıları kadar hassastırlar. Bunlar birden beşe kadar farklı sayıda parametreler içerebilir. (Drucker-Prager iki parametre, Mohr-Coulomb iki parametre, William-Warnke beş parametre, vb)

Betonu izotropik olarak kabul ederek oluşturulacak beton göçme kriteri; gerilme durumunun ( $\sigma_{ij}$ ) invaryantlarının bir fonksiyonu olmalıdır. Böylelikle göçme şartı koordinat sisteminden bağımsız olarak gerçekleşebilir ve asal gerilmelerin yönlerinden çok onların skaler büyüklükleri ile ilgilidir. Öncelikle göçme kriterini asal gerilmelerin bir fonksiyonu olarak yazabiliriz.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1 sıfıra eşit olduğu anda elastik sınırın sonuna gelinmiş demektir. Sıfırdan küçük olması halinde ise gerilme durumunun hala elastik bölgede olduğu anlaşılır.

Denklem 4.1'in yerine yukarıda bahsedildiği gibi invaryantlar cinsinden Denklem 4.2 yazılabilir.

$$f(I_1, J_2, J_3) = 0 \quad (4.2)$$

Burada  $I_1$ , gerilme tensörü  $\sigma_{ij}$ 'nin birinci invaryantıdır.  $J_2$  ve  $J_3$  ise deviatorik gerilme tensörü  $s_{ij}$ 'nin ikinci ve üçüncü invaryantlarıdır. Asal gerilme invaryantları tensörel bir büyüklük olmayıp sadece asal gerilmelerden elde edilen skaler büyüklüklerdir.

Genel gerilme tensörü  $\sigma_{ij}$  iki ayrı tensörün toplamı gibi düşünülebilir. Bu tensörlerden biri gerilme altındaki nesneyi hacimsel olarak sıkışmaya ya da genişlemeye zorlayan, sadece normal gerilmelerden oluşan *ortalama hidrostatik gerilme tensörü*  $m\delta_{ij}$  ve diğeri ise bu nesneyi çarpılmaya, biçimini bozulmaya zorlayan ve sadece kayma gerilmelerinden oluşan *deviatorik gerilme tensörü*  $s_{ij}$ 'dür.

Bu toplam gerilme hali Denklem 4.3 teki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + m\delta_{ij} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 teki ifade Denklem 4.4 teki gibi yazılabilir.

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - m\delta_{ij} \quad (4.4)$$

Buradaki  $m$  ortalama normal gerilme değeridir ve skaler bir büyüklüktür.

$$m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.5)$$

$\delta_{ij}$  ise kronecker deltasıdır. Kronecker deltası aynı zamanda özel bir matristir.

Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \text{ ve } \delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Yukarıda verilen tensörel büyüklüklerin matris formda gösterilmesi de mümkündür.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (4.7a)$$

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}-m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}-m & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33}-m \end{bmatrix} \quad (4.7b)$$

Gerilme invariantları da aşağıdaki gibi verilir.

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4.8a)$$

$$I_2 = (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \quad (4.8b)$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \quad (4.8c)$$

$$J_1 = s_1 + s_2 + s_3 \quad (4.8d)$$

$$J_2 = \frac{1}{2}(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2) = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (4.8e)$$

$$J_3 = s_1s_2s_3 \quad (4.8f)$$

Özetle  $f(I_1, J_2, J_3) = 0$  gibi bir göçme kriterinde göçmeyi meydana getirecek etkiler bu fonksiyonun terimlerinde yer bulan  $I_1$  saf hidrostatik gerilme hali ve buna ek olarak  $J_2$  ve  $J_3$  saf kayma gerilmesi hallerinin ortak etkisidir.

Bu çalışmada göçmeye neden olacak etkinin gerilme hallerinden kaynaklandığı düşünülerek sadece gerilme bazlı göçme kriterlerine yer verilmiştir. Göçme durumundan şekildeğiştirmeleri ya da enerji durumlarını sorumlu tutan kriterler de vardır (Inan, M., 1988).



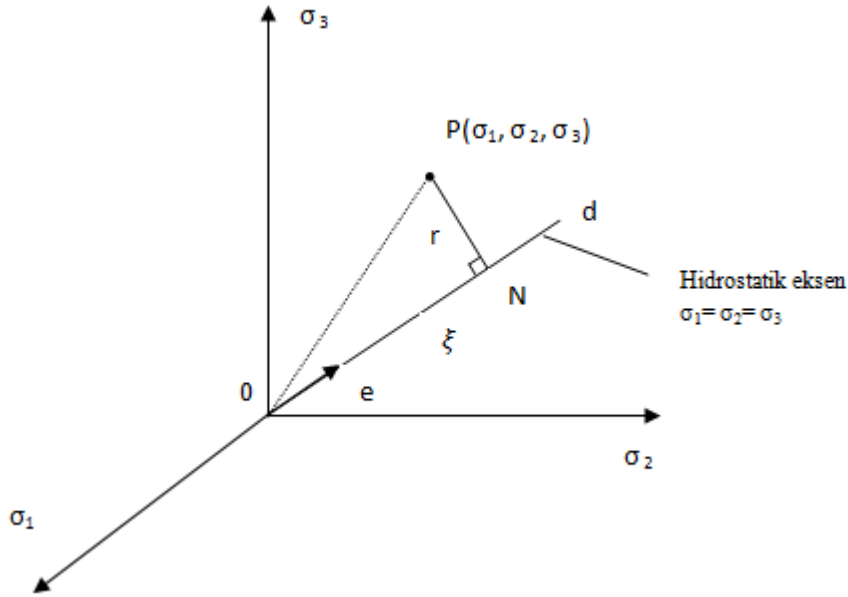
#### 4.2.3.1

#### 4.2.3.2 Gerilme durumu ve invariantların geometrik anlamı

$P(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  üç boyutlu gerilme uzayında herhangi bir asal gerilme durumunu gösteren noktadır.  $\sigma_1, \sigma_2$  ve  $\sigma_3$ 'ün vektörel anlamları olduğu için aslında bu asal gerilme durumu P noktası yerine orijinden P'ye çizilecek bir vektör ile tanımlanabilir, Şekil 3.4. Bu gösterimde diyagonal olarak çizilen  $d$ , asal gerilmelerin üçünden de eşit mesafe uzaklıktaki hidrostatik eksenini gösterir.  $d$  eksenini üzerindeki her noktada  $\sigma_1, \sigma_2$  ve  $\sigma_3$  aynı değere sahiptir.

Hidrostatik eksen boyunca uzanan birim vektör  $e$ 'nin değeri ise  $e = \frac{1}{\sqrt{3}} [1 \ 1 \ 1]$  dir.

$d$  diyagonaline dik düzlemler deviatorik düzlem olarak adlandırılır.



**Şekil 4.5 :** Gerilme uzayında bir gerilme durumunun belirtilmesi ve deviatorik düzlem (Davis ve Selvadurai, 2002).

Göçme kriterleri, eksenleri  $\sigma_1, \sigma_2$  ve  $\sigma_3$ 'ten oluşan bu üç boyutlu gerilme düzleminde bir yüzey belirtirler. Bazen bu yüzey  $\xi, r, \theta$  koordinat sistemi ile de gösterilebilir.  $\xi$  eksenini  $I_1$  invariantı ve dolayısıyla hidrostatik eksene;  $r$  eksenini de  $\sqrt{J_2}$  invariantı değeri ve dolayısıyla deviatorik düzlem içinde kalan eksene karşılık gelmektedir.  $\theta$  ise benzerlik açısı olarak deviatorik düzlem üzerinde dönele bir tasvir yapmaktadır. Bir göçme yüzeyi gerilme uzayında en iyi en kesiti ile ifade edilebilir. Göçme yüzeyinin enkesiti, göçme yüzeyi ile hidrostatik eksene dik deviatorik düzlemin  $\xi$ 'nin

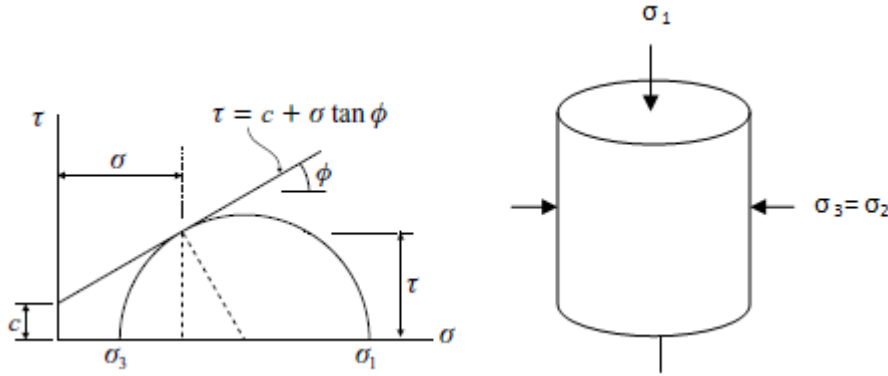
sabit bir değerindeki kesişimidir. Göçme yüzeyinin genel karakterini basit beton deneylerinden elde edilen veriler belirler. Deneyler göstermiştir ki; deviatorik düzlem ile çakışan bu göçme yüzeyi enkesiti şu özelliklere sahip olmalıdır;

1. Göçme eğrisi(enkesit) düz olmalıdır.
2. Göçme eğrisi dışbükey olmalıdır.

Yalın hidrostatik yükleme hali hiçbir kullanılabilir göçme kriteri için göçmeye neden olamaz.

#### 4.2.3.3 Mohr-Coulomb göçme kriteri

Mohr Coulomb göçme kriterine göre; sınır kayma gerilmesinin aşıldığı düzlem boyunca kayma nedeniyle göçme gerçekleşir. Sınır kayma gerilmesi daneler arası yapışma direnci (kohezyon,  $c$ ) ve kayma düzlemine etkiyen aksel gerilme ( $\sigma$ ) düzeyi ile artan sürtünme direncinin toplamıdır. Göçmenin gerçekleşeceği sınır kayma gerilmesi değeri Denklem 4.5 teki gibi hesaplanır. Burada  $\phi$  malzemeye ait içsel sürtünme açısıdır.  $\phi$  agregalar arası kilitlenmeye bağlı fiziksel bir büyüklüktür.



Şekil 4.6 : Mohr-Coulomb kırılma hipotezi ve üç eksenli gerilme hali (Davis ve Selvadurai, 2002).

$$f(\sigma) = \tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.9)$$

Görüldüğü gibi Mohr-Coulomb kriteri iki parametrelili bir modeldir.  $c$  ve  $\phi$  parametreleri betonun üç eksenli basınç deneyi yoluyla kolayca elde edilebilir. Düşük dayanımlı beton gibi gevrek-sünek (*brittle-ductile*) malzemeler için zarf denkleminin (Denklem 4.9) doğrusal olması iyi bir yaklaşım olabilir. Ancak gerçekte bu zarf tam bir doğru değildir. Görece düşük gerilme seviyelerinde bu zarfın doğrusallığından bahsedilebilir. Ayrıca dayanım arttıkça gevreklik düzeyi

artacağından aksenal basınç yüklemesi altında kalan beton elemanda kayma göçmesi dışında eleman boyunca gelişecek düşey çekme çatlakları kırılma biçimine hükmeder ve Mohr-Coulomb göçme hipotezi bu durumu kapsamaz.

Verilen zarf denklemi asal gerilmeler cinsinden de yazılabilir. Mohr-Coulomb kriteri ortanca asal gerilmeden ( $\sigma_2$ ) bağımsız olarak tanımlanmıştır, göçme durumuna ulaşmada ortanca asal gerilmenin bir etkisinin olmadığı düşünülür.

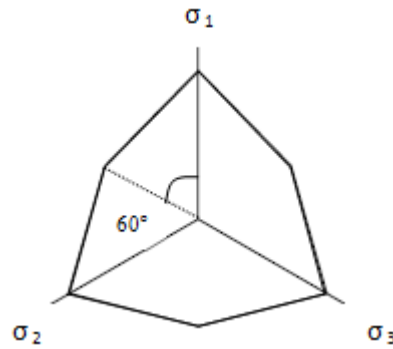
$$\sigma_1(1 - \sin\phi) - \sigma_3(1 + \sin\phi) = 2c \cos\phi \quad (4.10)$$

Her terim  $(1 - \sin\phi)$  ile bölünürse ve trigonometrik eşdeğeri yazılırsa ;

$$\sigma_1 - \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.11)$$

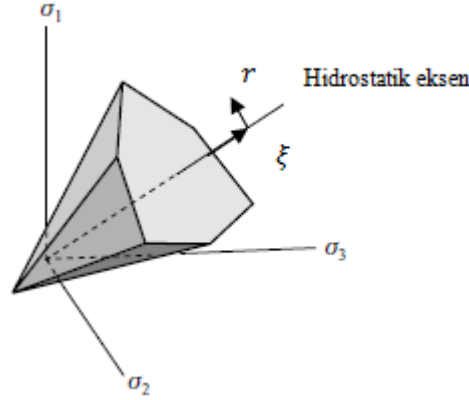
$$\sigma_1 = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.12)$$

Mohr-Coulomb göçme yüzeyi  $\theta$ 'nin  $60^\circ$  lik segmentleriyle düzensiz, altıgen enkesitli bir deviatorik düzleme sahiptir, Şekil 4.7.



**Şekil 4.7 :** Mohr-Coulomb kırılma hipotezi deviatorik düzlemi  
(Davis ve Selvadurai, 2002).

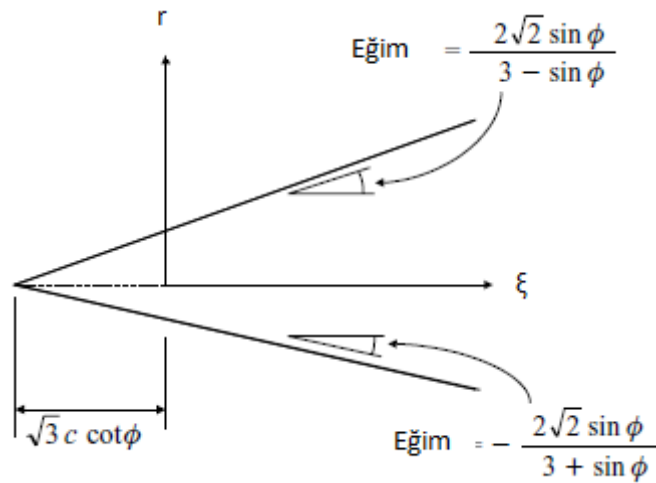
Mohr-Coulomb göçme kriterinin önemli bir özelliği göçme yüzeyinin Şekil 4.6' da görüldüğü gibi hidrostatik eksen boyunca genişlemesidir. Bu durum üç eksenli basınç testi göz önüne alındığında gayet anlamlı gözükmemektedir. Çünkü bu sayede artan hidrostatik gerilmelere karşılık beton elemanın kayma dayanımı artacaktır.



**Şekil 4.8 :** Mohr-Coulomb kriterine ait göçme yüzeyi (Davis ve Selvadurai, 2002).

$\xi$ - $r$  koordinat düzleminin göçme yüzeyi ile kesişimi iki doğrulu bir gösterim verir. Çoğu kez daha az karmaşık olması bakımından bu gösterim anlatımda tercih edilir.  $\xi$ - $r$  koordinat düzleminde yapılacak bu gösterimlere göçme yüzeyinin meridyenleri denir.  $\theta$ 'nin  $0$  ve  $60^\circ$  aralığında alacağı değerler için çizilecek meridyenlerden  $\theta = 0^\circ$  için olanı çekme meridyeni,  $\theta = 60^\circ$  olanı ise basınç meridyeni olarak adlandırılır.

Şekil 4.9'da  $\theta = 0^\circ$  değeri için Coulomb göçme kriterine ait meridyen çizgileri görülmektedir. Meridyen çizgilerinin eğimi içsel sürtünme değerinin bir fonksiyonudur. Bu eğim açısı için değişik araştırmacılar tarafından farklı değerler önerilmiştir. Bu eğim açısı yanal basınca karşı duyarlılığı kontrol etmektedir.



**Şekil 4.9 :** Mohr-Coulomb kriteri,  $\theta = 0^\circ$  meridyeni (Davis ve Selvadurai, 2002).

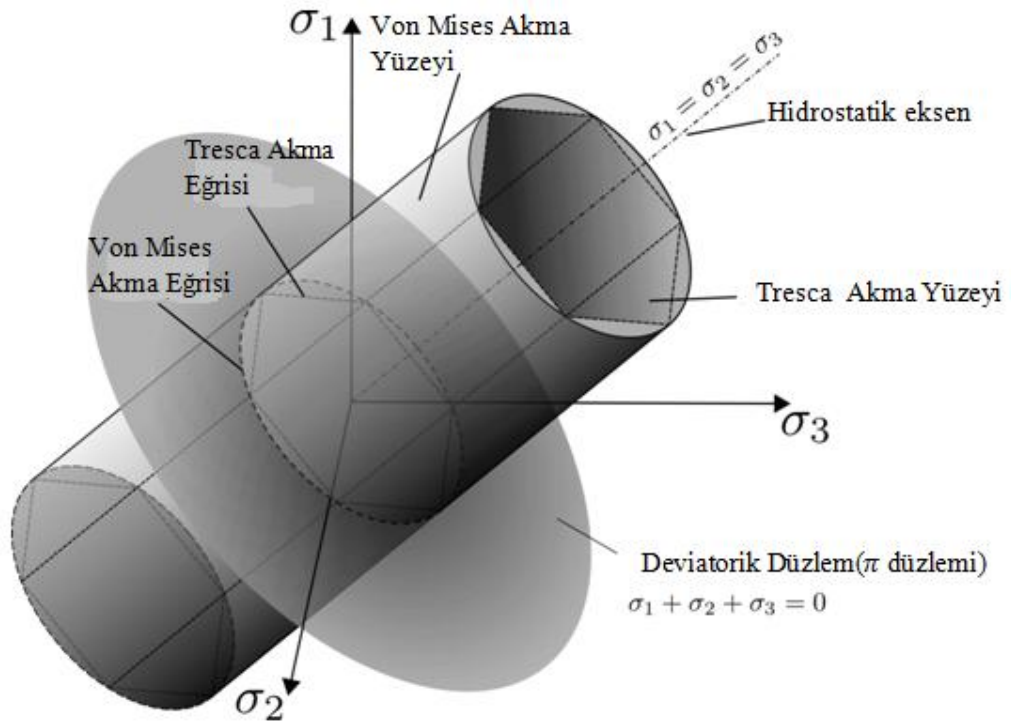
Ortanca asal gerilmenin etkisini göz ardı etmesi, büyük hidrostatik gerilme durumlarında dahi meridyenlerin gerçekte olmadığı şekliyle düz çizgiler olarak dikkate alması, göçme yüzeyinin keskin köşeleri olmasından dolayı sayısal analiz

yöntemleriyle yapılan hesaplarda tekilliklerin meydana gelmesi gibi güçlükler yaratması Mohr-Coulomb kriterinin yetersiz taraflarıdır. Bu nedenle özellikle sayısal hesaplamalar için Mohr-Coulomb üzerinde bazı değişiklikler yapılarak yeni modeller önerilmiştir. Bunlardan en bilinenleri Drucker-Prager (1952), Lade-Duncan(1935), Matsuoka-Nakai(1934)'nin modelleridir (Davis ve Selvadurai, 2002).

#### 4.2.3.4 Drucker-Prager göçme kriteri

Drucker ve Prager (DP), metaller için başarıyla kullanılan von Mises kriterine bir terim daha ekleyip hidrostatik gerilme durumuna duyarlı hale getirerek değiştirmiş ve beton ya da zemin türü malzemeler için sıklıkla kullanılan DP göçme kriterini önermişlerdir (1952).

von Mises göçme kriteri Denklem 4.9'da verildiği gibi bir göçme yüzeyi fonksiyonuna sahiptir. Metallerin plastik davranışından sadece gerilme durumunun deviatorik bileşenini (kayma gerilmelerini) sorumlu tutan von Mises ve Tresca, hidrostatik gerilmelerin bir rolü olmadığına inanır.



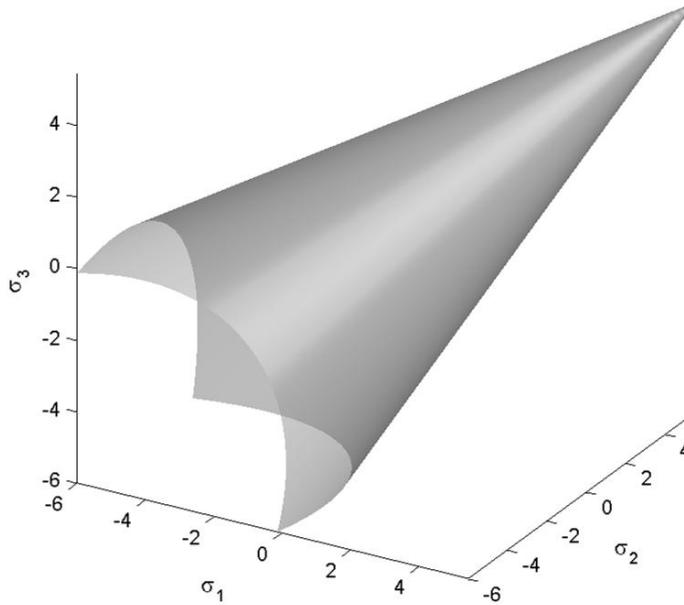
Şekil 4.10 : Von Mises ve Tresca akma yüzeyleri (Url-1).

$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.13)$$

Denklem 4.13'de verilen von Mises kriteri uzun ve sabit enkesitli bir silindirik göçme yüzeyini temsil ederken (Şekil 4.10), bu değişiklikle artan hidrostatik gerilmeye karşılık genişleyen koni biçiminde bir göçme yüzeyi elde edilir, Şekil 4.11.  $\alpha I_1$  teriminin eklenmesiyle Von Mises kriteri değiştirilerek DP göçme kriteri Denklem 4.14 da belirtilen şekilde yazılabilir.

$$f(J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.14)$$

Denklem 4.14'de adı geçen  $\alpha$  ve  $k$  malzemeye ait pozitif katsayılarıdır.  $\alpha$  ve  $k$  katsayıları, Mohr-Coulomb sabitleri  $c$  ve  $\phi$  ile birkaç farklı şekilde ilişkilendirilebilir. DP konisinin büyüklüğü  $\alpha$  ve  $k$  sabitleri ile ayarlanır ve Mohr-Coulomb göçme yüzeyi ile karşılaştırılabilir. Örneğin, eğer bu karşılaştırma işlemi basınç meridyani ( $\theta=60^\circ$ ) boyunca yapılırsa  $\alpha$  ve  $k$  sabitleri Mohr-Coulomb sabitleriyle şu şekilde ilişkilendirilir.



Şekil 4.11 : Drucker-Prager akma yüzeyi (Url-1).

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.15)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.16)$$

Özetle DP göçme yüzeyi Mohr-Coulomb yüzeyinin yuvarlatılmış, Von Mises yüzeyinin ise hidrostatik basınca duyarlı hale getirilmiş bir modifikasyondur.

DP kriteri beton davranışının modellenmesiyle ilgili bazı eksikliklere sahiptir.  $I_1$  ve  $\sqrt{J_2}$  veya bir başka deyişle  $\xi$  ve  $r$  arasındaki ilişkinin doğrusal olması gerçekte uyuşmayan bir durumdur. Deneysel olarak elde edilen  $\xi$ - $r$  ilişkisinin eğrisel olduğundan daha önce bahsedilmiştir. Diğer bir eksiklik ise göçme yüzeyi enkesitinin (deviatorik düzlemin) tam bir daire olması ya da  $\theta$  benzerlik açısından bağımsız oluşudur. Fakat betona ait deviatorik düzlemin tam bir dairesel şekile sahip olmadığı bilinmektedir. Üçüncü gerilme invariantını göçme kriteri fonksiyonunda dikkate alarak DP yüzeyini tam dairesel olmaktan çıkaran, daha gerçekçi göçme yüzeyi fonksiyonları önerilmiştir. DP göçme kriteri bir sonraki bölümde detaylı olarak incelenecektir.

### 4.3 LP Sargılanmış Betonun Modellenmesi

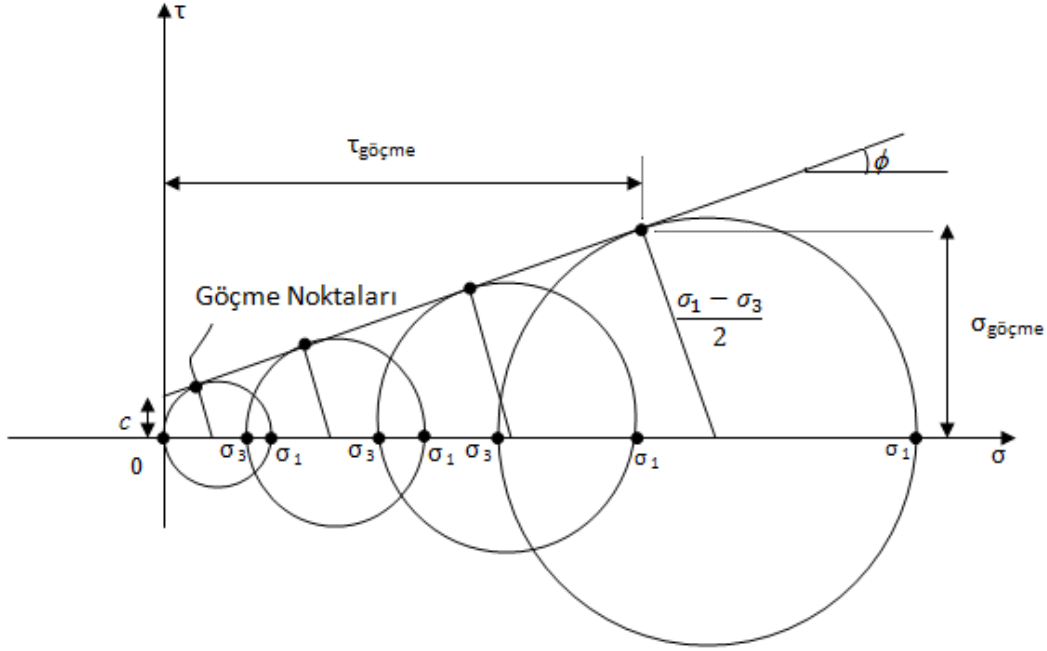
#### 4.3.1 Giriş

Bu bölümde LP sargılı beton davranışı için bir sonlu eleman modeli sunulmuştur. Bunun için sonlu eleman paket programı ANSYS V12 tercih edilmiştir. Her ne kadar bu programda sargılı beton için özel bir model verilmiş olmasa da programın standart özellikleri kullanılarak sargılı betonun temel mekanizmasını dikkate alan basit bir modelleme yapılmıştır.

Modelde Drucker-Prager kırılma kriteri kullanılmıştır. Bu model zemin tipi malzemelerin doğrusal olmayan analizinde çokça kullanılan elastoplastik bir kırılma hipotezidir.

Drucker-Prager kırılma hipotezinde artan hidrostatik basınç gerilmesi ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ) düzeyine bağlı olarak, betonun taşıyabileceği sınır kayma gerilmesi ( $\tau_{göçme}$ ) değeri de artmaktadır. Diğer bir deyişle maksimum kayma gerilmesinin asal gerilmeler

cinsinden karşılığı olan, en büyük ve en küçük asal gerilmeler arasındaki farkın yarısı durumundaki  $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2 =$  deviatorik gerilmenin yarısı olan değer) değer artan hidrostatik gerilme değerleriyle artmaktadır. Hidrostatik basıncın ve dolayısıyla çevresel basıncın artması zemin türü malzemelerde daneler arası sürtünme etkilerini arttırmakta ve malzemeyi göçme durumundan uzaklaştırmaktadır, Şekil 4.12.



**Şekil 4.12 :** Farklı çevresel basınç durumlarında göçme hallerini gösteren daireler.

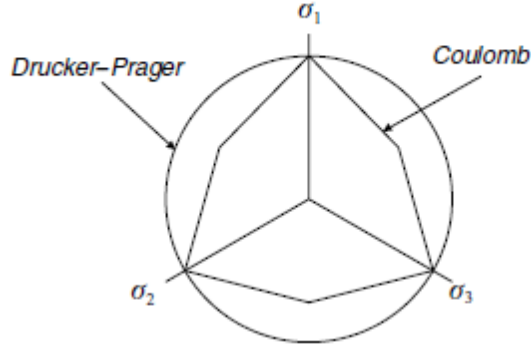
Drucker-Prager modeli, göçme konisinin biçimini belirleyen parametreler ( $c$  ve  $\phi$ ) kalibre edilerek LP sargılanmış betona dair bir göçme kriteri olarak kullanılabilir.

ANSYS programında Drucker-Prager konisi Mohr-Coulomb altıgenine dıştan yerleştirilmiştir, Şekil 4.13. Bu durumda daha önce verildiği gibi,  $\alpha$  ve  $k$  parametreleri  $c$  ve  $\phi$  cinsinden aşağıda gösterildiği şekilde program içerisinde kodlanmış durumdadır.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.17)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4.18)$$





**Şekil 4.13 :** Mohr-Coulomb göçme yüzeyine dıştan çakıştırılmış DP göçme yüzeyi.

Denklem 4.12'e tekrar bakılacak olur ise, çevresel gerilme değeri  $\sigma_3$ 'ün olmadığı durumda  $\sigma_1$  gerilmesinin tek eksenli basınç dayanımı  $f_{co}$  değeri ile aynı şeyi ifade ettiği söylenebilir. O halde, Denklem 4.12 tek eksenli basınç durumu için düzenlenerek Denklem 4.19'daki gibi yazılabilir.

$$f_{co} = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.19)$$

Denklem 4.19'da verilen  $c$  ve  $\phi$  sırasıyla kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleridir.

Eğer ki Denklem 4.12 sargılı betonun taşıyabileceği en büyük eksenel gerilme anı için yazılırsa Denklem 4.20 elde edilir.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{lmaks} \quad (4.20)$$

Bu denklemde  $f'_{cc}$  betonun sargılanmış dayanımı,  $f'_{co}$  tek eksenli beton basınç dayanımı,  $f_{lmaks}$  LP tarafından beton çekirdeğe aktarılan, kopma anından hemen önceki maksimum yanallı sargı basıncıdır.

Bu durumda Denklem 4.20'deki  $\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$  çarpanı sargılama etkinlik katsayısı  $k_1$  olarak düşünülebilir. Sargılama etkinlik katsayısı ilk kez Richart ve diğ. tarafından etriye sargılı beton için 4.1 olarak önerilmiştir. Richart ve diğ. tarafından önerilen bu doğrusal ilişki aşağıda verildiği gibidir.

$$f'_{cc} = f_{co} + k_1 f_{lmaks} \quad (4.21)$$

$f_{lmaks}$  en büyük sargılama basıncı değeri ise Denklem 4.22 yardımıyla hesaplanabilir.

$$f_{lmaks} = \frac{2f_j t_j}{D} \quad (4.22)$$

$f_j$  LP'in kopma dayanımı,  $t_j$  ise sargılama kat sayısına bağlı olarak toplam LP kalınlığıdır.

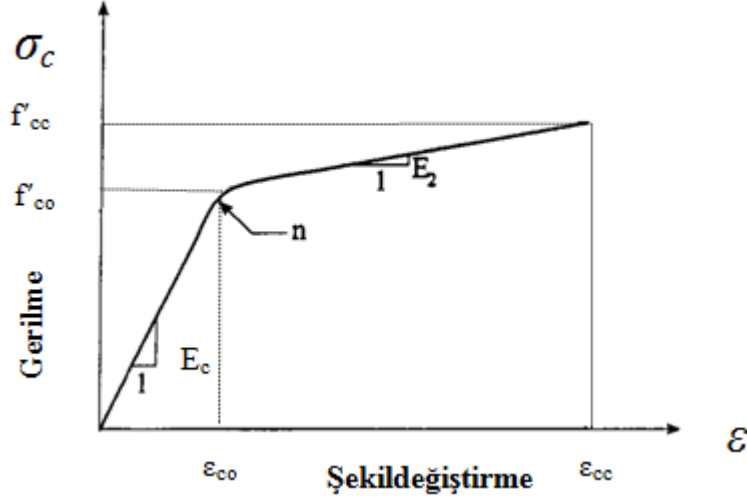
Burada bahsetmek gerekir ki; sargılanmış betonun son halde göçmesi bir kayma göçmesi olmayıp LP'in aksel dayanımına erişip kopmasıyla meydana gelir. Ancak Denklem 4.20'de verilen ifadede göçme durumunun sanki  $\sigma_3$  gerilmesinin  $f_{lmaks}$  değerine eşit olduğu yanal basınç seviyesinde,  $\sigma_1$  gerilmesinin  $f'_{cc}$  gerilmesine ulaşmaz beton elemanda bir kayma göçmesine yol açacağı kabulü yapılır. Böylelikle klasik Mohr-Coulomb teorisi ile kurulan bir analogiden faydalanılır.

Önce de bahsedildiği gibi sargılanmış betonun erişeceği nihai dayanım ve buna karşılık gelen şekildeğiştirme değerini hesaplamak için önerilen çok sayıda model bulunmaktadır. Bu tez kapsamında hem sargılanmış dayanımı hem de buna karşılık gelen şekildeğiştirme değerini başarılı bir biçimde hesaplayabilen ve deneylerle uyumunun gayet iyi olduğu görülen İlki ve diğ. (2004) modeli kullanılmıştır (İlki ve diğ., 2004). Modelde tanımlanan sargılanmış dayanım ve nihai şekildeğiştirme değeri aşağıdaki Denklem 4.23 ve Denklem 4.24 formülleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 2.4 \left( \frac{f_{lmaks}}{f_{co}} \right)^{1.2} \right] \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + 20 \left( \frac{h}{b} \right) \left( \frac{f_{lmaks}}{f_{co}} \right)^{0.5} \right) \quad (4.24)$$

Verilen formüllerde  $\varepsilon_{co}$  sargısız betonun dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme değeri,  $h$  ve  $b$  ise sargılanacak kesitin dörtgen olması durumunda kesite ait sırasıyla uzun ve kısa kenar boyudur. İlki ve Kumbasar tarafından önerilen LP sargılanmış beton modeli gerilme-şekildeğiştirme davranışı Şekil 4.14'de verilmiştir.



**Şekil 4.14** : İlki ve Kumbasar sargılı beton modeli (İlki ve diğ., 2004).

Sargılanmış betonun DP parametrelerinin bulunması için aşağıda verilen yol takip edilir.

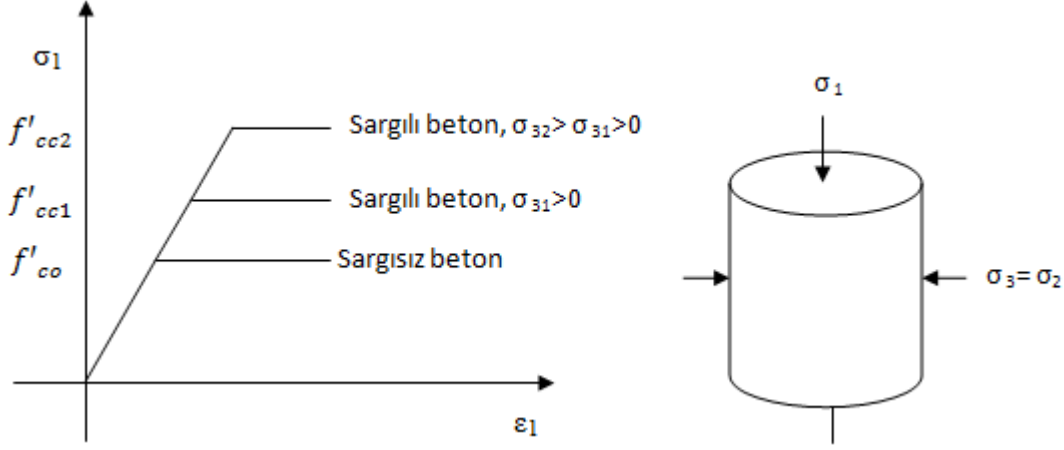
- 1) İlki ve Kumbasar modeli kullanılarak  $f'_{cc}$  değeri hesaplanır ve ardından Denklem 4.21'den faydalanılarak  $k_1$  sargılama etkinlik katsayısı hesaplanır.
- 2)  $k_1 = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$  eşitliğinden içsel sürtünme açısı  $\phi$ 'nin değeri hesaplanır.
- 3) Denklem 4.19 kullanılarak kohezyon  $c$  değeri hesaplanır.

Böylece DP konisini tanımlamak mümkün olur.

### 4.3.2 Davranış

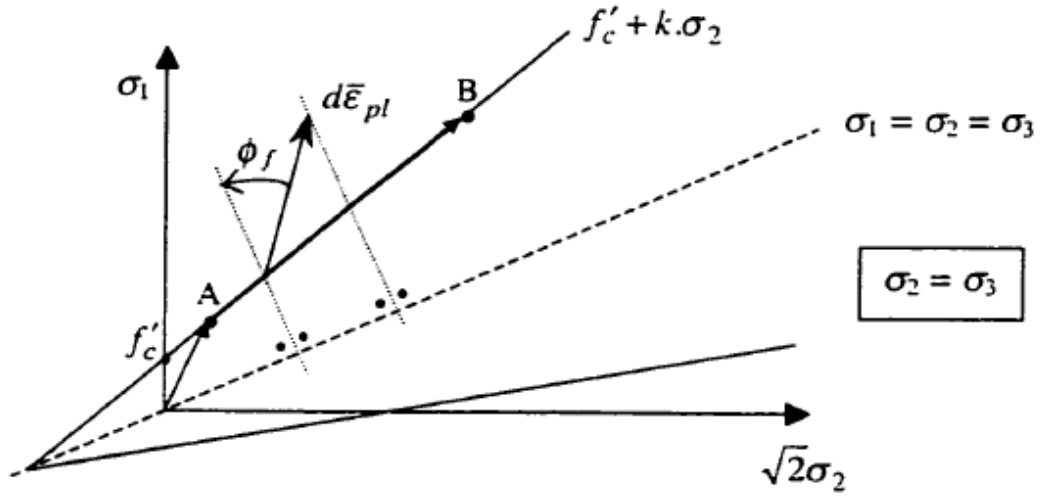
Daha önce de bahsedildiği gibi beton çekirdek, sargısız dayanımına eriştiği ana kadar ciddi bir hacimsel genişleme meydana gelmez. Diğer bir deyişle sargının çalışması tamamen içteki beton çekirdeğin dayanımına erişip göçmesinden sonra başlar. Modellemede bu gerçekten yola çıkılacaktır ve DP göçme kriterinin göçme anından itibaren yapacağı plastik akış teorisi kullanılacaktır.

Modelde doğrusal elastik LP davranışı, DP'nin elastik-tam plastik beton davranış modeli ile birleştirilerek kompozit bir yapı oluşturulur. Böylece göçme noktası sargılamanın seviyesi ya da diğer bir deyişle rijitliği ile ilişkilendirilmiş olur. Örneğin; Şekil 4.15'de görüldüğü gibi sabit yanal basınç altında, aksenal dayanımın  $f'_{cc1}$  veya daha fazla yanal basınç için  $f'_{cc2}$  gerilme değerine çıkacağı düşünülür.

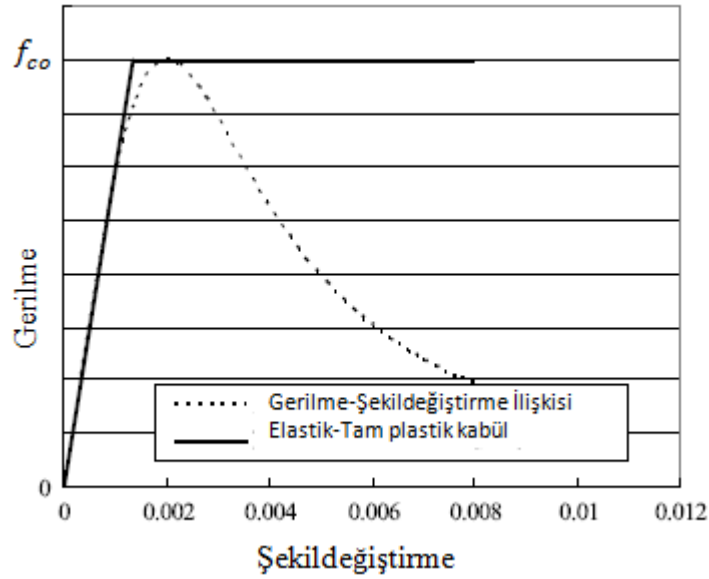


**Şekil 4.15 :** Artan yanal basınca karşılık artan dayanımın modellenmesi.

Ancak LP sargılanmış betonun davranışında LP tarafından betona aktarılan yanal sargı basıncı buradaki gibi sabit kalmaz, artmaya devam eder. Dolayısıyla Denklem 4.20'deki denge anbean güncellenerek artan  $\sigma_3$  değerlerine karşılık adım adım yeni  $\sigma_1$  değerleri hesaplanır. Yalnız burada tüm bu yeni denge halleri de DP göçme yüzeyi üzerinde kalan gerilme durumlarıdır. Çünkü bu çalışmada kullanılan DP göçme kriteri herhangi bir pekleşme parametresine sahip değildir ve sabit ancak giderek genişleyen tek bir göçme yüzeyi vardır (*no progressive yielding*). Sadece koni yüzeyi üzerinde ve genişleyen yönüne doğru gerilme durumu noktası A'dan B'ye hareket eder, Şekil 4.16. Aynı zamanda bu hareket sırasında göçme yüzeyi üzerinde plastik şekildeğiştirme akışı da başlar. ANSYS programında bu plastik akışın nasıl olacağı  $\phi_f$  plastik akış açısı ya da dilatasyon açısı denilen girilebilir (*input*) bir parametre ile kontrol edilir ve bu şekilde plastisite teorisindeki plastik akım kuralı (*flow rule*)'nın bu model için nasıl işleyeceği programa dikte edilmiş olur. Böylece akma (betonun sargısız dayanımına erişmesi bir akma olayı gibi düşünülmelidir) sırasında hacimsel şekil değiştirmelerin miktarı ve yönü bu parametre ile belirlenmiş olur. Sargılı betonun davranışını doğru bir şekilde ortaya koyabilmek için bahsedilen plastik akım kuralının gerçeğe en yakın haliyle tanımlanabilmesi gerekir. Sargılı beton davranışında hacimsel şekil değiştirmelerin miktarı, kompozit sisteme ait davranışı yöneten ana unsurdur.



Şekil 4.16 : Artan hidrostatik gerilme ile birlikte artan aksenal dayanım ve yüzey üzerinden gerçekleşen plastik akış (Becque, J., 2000).



Şekil 4.17 : DP'in tanımladığı sargısız betona ait elastik-tam plastik gerilme şekildeğiştirme ilişkisi (Yu ve diğ., 2010).

#### 4.3.2.1 Plastik akış

Daha önceki bölümlerde göçme durumunun hangi durumda gerçekleşip hangi durumda gerçekleşmeyeceği, göçme kriterleri ve göçme yüzeyleri ortaya konularak açıklanmaya çalışılmıştır. Bu bölümde ise gerilme durumunun göçme yüzeyi (göçme ile kastedilen akma ise akma yüzeyi) üzerine erişmesi halinde ne olacağı araştırılacaktır.

Göçme (akma) durumunun, elastik şekildeğiştirmelerin üzerine eklenerek artan şekildeğiştirmelerin eşliğinde ortaya çıktığı söylenebilir (Davis ve Selvadurai, 2002).

Deformasyonların hızlıca biriktiği plastik durum, elastik duruma göre çok daha yumuşak bir davranış sergiler. Plastik akış ile bu göçme (akma) durumunu takiben ortaya çıkacak deformasyonlar kastedilmektedir.

Plastik ve elastik davranış arasındaki en temel fark, plastik davranışın geri döndürülemez oluşudur. Eğer elastik bir malzeme üzerinde gerilmeler arttırılır ve buna bağlı olarak bir deformasyon artışı sağlanırsa, yükü boşaltarak bu durumu başlangıçtaki haline döndürmek mümkündür. Ancak; eğer yük artımı sırasında göçme (akma) sınırı aşılmış ise oluşacak plastik deformasyonları geri döndürebilmek sadece yükü boşaltmakla sağlanamaz. Eğer gerilme durumu başlangıçtaki değerine düşürülecek olursa elastik şekildeğiştirmeler ortadan kalkar fakat plastik şekildeğiştirmeler cisim üzerinde adeta kilitli olarak kalır.

Plastik deformasyonların geri döndürülemez özelliği nedeniyle plastik akış ve o an ki gerilme durumu arasında bir bağıntı kurmak bazı zorlukları da beraberinde getirir. Önceki yükleme durumlarından birikerek gelmiş, miktarı bilinmeyen plastik deformasyonlar ile o anki gerilme durumu arasında birebir bir bağıntı kurulamaz. Bu nedenle gerilme durumu ile plastik deformasyon oranı ya da plastik deformasyon artış miktarı arasında bir bağıntı aranması daha uygun bir yaklaşım olur (Davis ve Selvadurai, 2002).

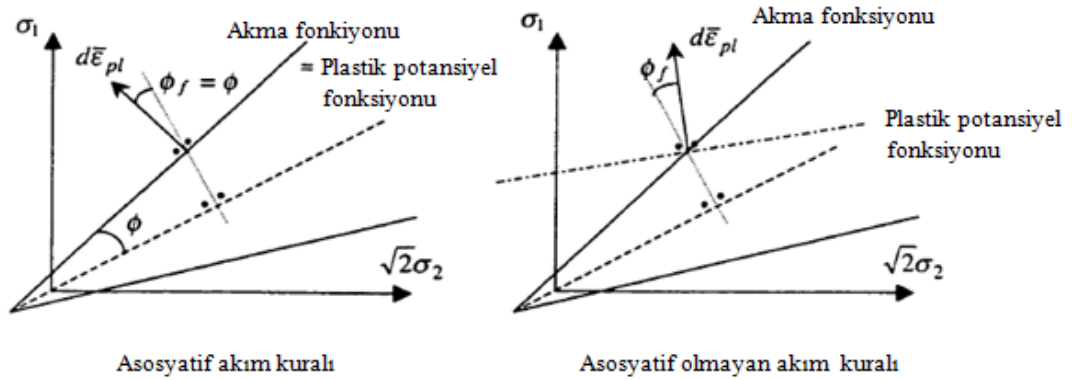
Plastik deformasyonun miktarı yerine onun değişiminin oranı ya da artımı ile gerilme durumu arasında bağıntı kurulması, yukarıda açıklanan geri döndürülemezlikten kaynaklanacak problemlerin önüne geçecektir. Plastisite teorisinde gerilme durumu ile yukarıda bahsedilen artımsal plastik şekildeğiştirme vektörü arasında kurulabilecek ilişkilere akım kuralı (*flow rule*) denir.

Akım kuralına göre; plastik akış devam ederken ortaya çıkacak artımsal plastik şekildeğiştirme vektörü, uygun olarak seçilmiş bir plastik potansiyel fonksiyonunun gradyanı ile orantılıdır, Denklem 4.25.

$$d\bar{\epsilon}_{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.25)$$

Burada  $d\lambda$  artımsal plastik şekildeğiştirme vektörünün büyüklüğünü belirleyen pozitif bir çarpandır.  $g$  ise bahsedilen plastik potansiyel fonksiyonudur. Plastik

teoriye göre artımsal plastik şekildeğiştirme vektörü  $d\bar{\varepsilon}_{pl}$ , herhangi bir noktada plastik potansiyel fonksiyonunun belirlediği yüzeye diktir. Eğer ki Denklem 4.14'de verilen akma yüzeyi fonksiyonunun, plastik potansiyel fonksiyonu ile aynı olduğu kabulü var ise ( $f=g$ ) akım kuralı (*flow rule*) asosyatiftir ya da akma fonksiyonu ile plastik potansiyel fonksiyonu bağlantılıdır denir. Bu durumda  $\phi_f$  plastik akış açısı (*dilatancy angle*),  $\phi$  içsel sürtünme açısına eşittir. Fakat akma yüzeyi fonksiyonunun plastik potansiyel fonksiyonundan farklı olduğu kabul edilirse ( $f \neq g$ ) akım kuralı asosyatif değildir denir ve  $\phi_f$ ,  $\phi$ 'ye eşit olmaz, Şekil 4.18.



**Şekil 4.18** : Asosyatif ve asosyatif olmayan akım kuralları (Becque, J., 2000).

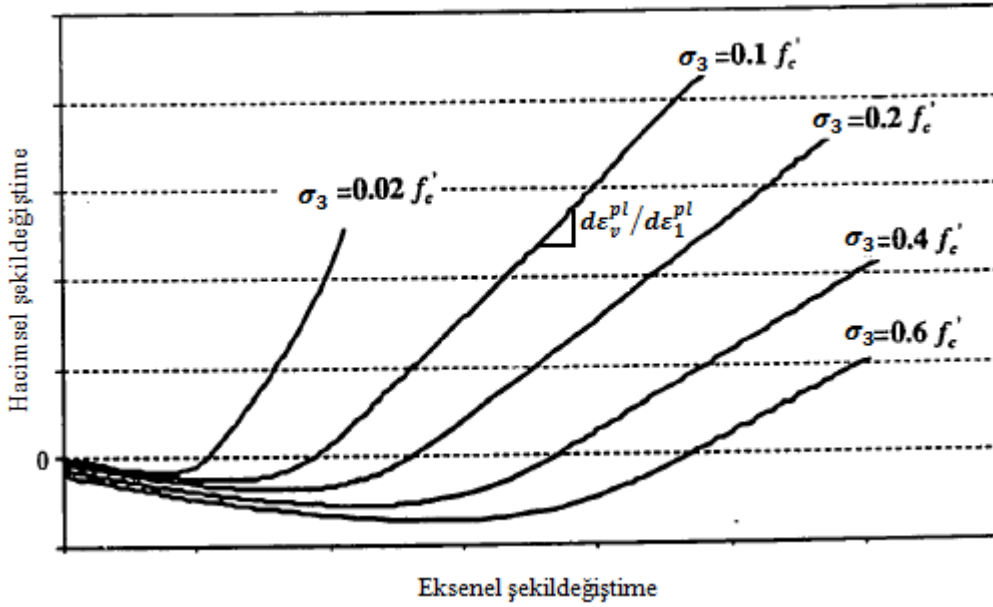
Bahsedilen  $\phi_f$  açısı betonun üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından ya da sargılı beton deneylerinden elde edilen amprik ifadeler yoluyla bulunabileceği gibi değişik araştırmacılar tarafından  $\phi_f$  için farklı ifadeler önerilmiştir. Vermeer ve de Borst (1984);  $\phi_f$  açısını farklı yanıl basınç seviyelerinde gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından basit bir yaklaşımla elde etmeye çalışmıştır ve  $\phi_f$  için aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir;

$$\sin \phi_f = \frac{d\varepsilon_v^{pl}}{d\gamma^{pl}} \quad (4.26)$$

Denklem 4.26'da verilen ifadede  $d\varepsilon_v^{pl}$  betona ait artımsal plastik hacimsel şekildeğiştirme ve  $\gamma^{pl}$  ise artımsal plastik çarpımadır. Kullandıkları akma kriterinin, ortanca asal gerilme değerini ( $\sigma_2$ ) dikkate almaması durumundan faydalanarak Denklem 4.26'da önerdikleri ifadeyi aşağıda verilen haliyle basitleştirmişlerdir.

$$\sin \phi_f = \frac{d\varepsilon_v^{pl}}{-2d\varepsilon_1^{pl} + d\varepsilon_v^{pl}} \quad (4.27)$$

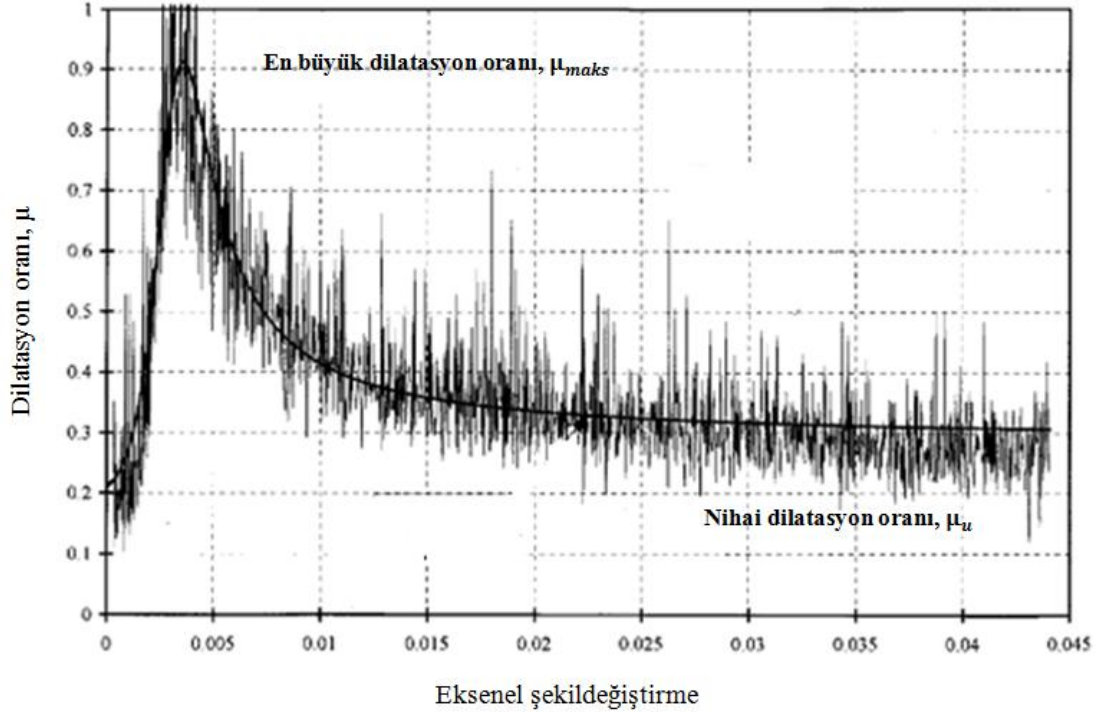
Denklem 4.27'de  $d\varepsilon_1^{pl}$ , beton silindir eleman eksenini boyunca olan artımsızal plastik şekildeğiştirme değeridir. Aynı yönde betonun dayanımına eriştikten hemen sonraki kesimde (*post peak range*) elastik şekildeğiştirme artımı, plastik şekildeğiştirme artımı yanında ihmal edilebilecek düzeyde olduğu için  $d\varepsilon_v^{pl}/d\varepsilon_1^{pl}$  oranı, doğrudan toplam hacimsel şekildeğiştirme-toplam eksenel şekildeğiştirme deney sonucu grafiğinden (Şekil 4.19) elde etmişlerdir. Bu grafikte,  $d\varepsilon_v^{pl}/d\varepsilon_1^{pl}$  oranı verilen, eğrinin dayanım sonrası bölge için eğimine eşittir. Bu oran biliniyor iken,  $\phi_f$  Denklem 4.27 yardımıyla hesaplanır.



**Şekil 4.19 :** Betonun üç eksenli gerilme altındaki tipik davranışı (Imran I., 1994).

Mirmiran ve Shahawy (1997) , sargılı betonun (ya da sargısız) dilatasyon karakterini ifade etmenin iyi bir yolunun da onun teğetsel Poisson oranı (*tangent Poisson's ratio*) ya da başka bir deyişle radyal şekildeğiştirmelerin artımının eksenel şekildeğiştirmelerin artımına oranı (*dilation rate*) olduğunu belirtmişlerdir. Sargılı betona ait deneysel dilatasyon oranı-eksenel şekildeğiştirme grafiği Şekil 4.20'de verilmektedir.





**Şekil 4.20 :** Sargılı betonun dilatasyon karakteri (Mirmiran&Shahawy,1997).

Mirmiran ve Shahawy (1997) sargılı betonun yapacağı en büyük ve en küçük dilatasyon oranını, yanal sargı rijitliğinin bir fonksiyonu olarak deney sonuçlarından regresyon analizi ile elde etmişlerdir.

$$\mu_{maks} = -0.7611 \ln \left( \frac{2E_j t_j}{f'_c D} \right) + 4.0167 \quad (4.28)$$

$$\mu_u = -0.1375 \ln \left( \frac{2E_j t_j}{f'_c D} \right) + 0.8646 \quad (4.29)$$

$\phi_f$ , yukarıda verilen Denklem 4.29'dan faydalanılarak hesaplanan  $\mu_u$  değeri kullanılarak, Denklem 4.30 yoluyla elde edilebilir (Becque, J., 2000).

$$\phi_f = 54.74 - \arctg \left( \frac{1}{\sqrt{2}\mu_u} \right) \text{ (derece)} \quad (4.30)$$

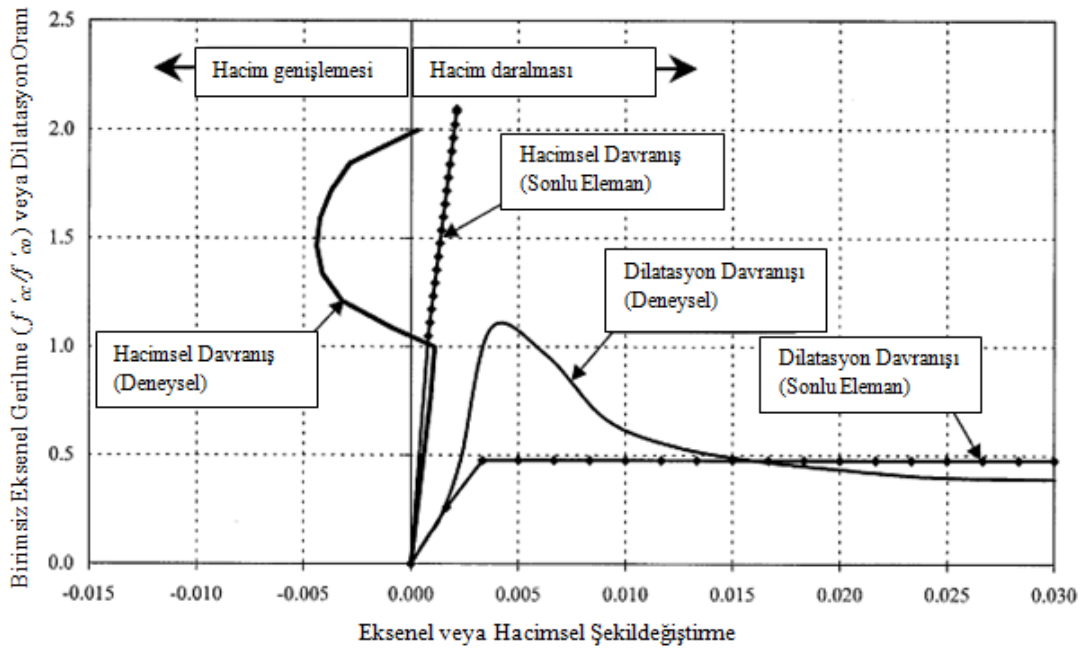
$\phi_f$  açısı, hacimsel şekildeğiştirmenin hacim daralması yönünde mi yoksa hacim genişlemesi yönünde mi olacağını belirler. Şöyle ki;

Eğer  $\phi_f < 0$  ise hacimsel daralmayı ifade eder

Eğer  $\phi_f = 0$  ise hacimsel değişme olmadığını ifade eder

Eğer  $\phi_f > 0$  ise hacimsel genişlemeyi ifade eder

Daha önce bahsedildiği gibi LP sargılı betonun göçmesi, sargısız dayanım civarında ani bir hacim genişlemesi ve ardından sürekli bir hacim daralması eşliğinde olmaktadır. ANSYS'de  $\phi_f$  için yukarıda sayılan üç durumdan sadece birinin seçilmesi ile kurulacak model, sargılı betonun hem genişleme hem de daralma eğilimini dikkate alamaz, Şekil 4.21. Bu nedenle ANSYS'de kurulacak model ile deneyi yapılan numunenin dilatasyon karakterleri birbirinden farklıdır. Yine de  $\phi_f$  başarılı bir şekilde kalibre edilebilirse deneysel gerilme şekil değiştirme ilişkisi ile gayet iyi uyum gösterecek bir sonlu eleman çözümü elde edilebilir.



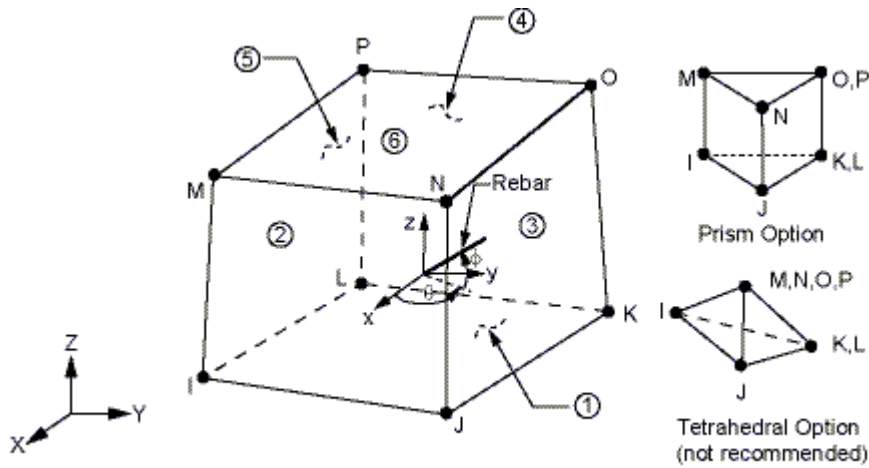
**Şekil 4.21 :** Deneysel ve nümerik olarak bulunan dilatasyon davranışlarının karşılaştırılması (Mirmiran&Shahawy,2000).

Özetle LP sargılanmış betonun ANSYS modeli, betonun kohezyonu  $c$ , betonun içsel sürtünme açısı  $\phi$  ve plastik akış açısı  $\phi_f$  yardımıyla Drucker-Prager kriteri kullanılarak oluşturulabilir.

### 4.3.3 Model

Bu çalışmada LP sargılanmış altı adet beton silindirin doğrusal olmayan sonlu eleman analizi ANSYS V12 programı kullanılarak yapılmış, aksenal gerilme şekildeğiştirme ilişkisi elde edilmiş ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır.

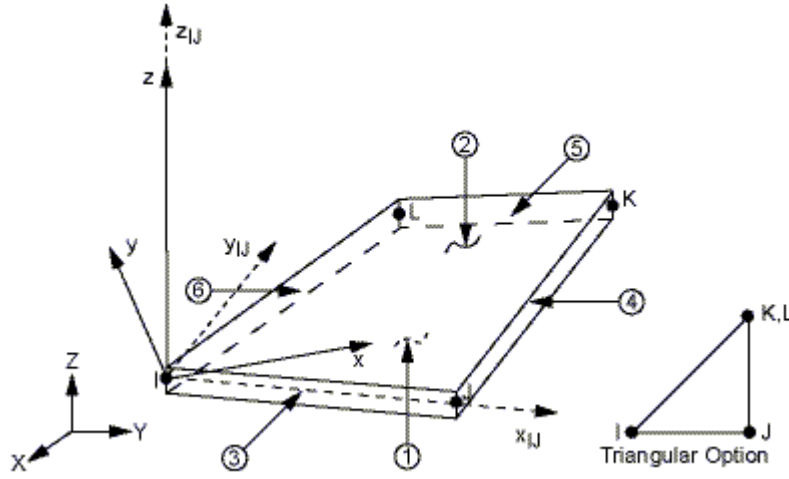
Beton için ANSYS programı içerisinde yer alan sekiz düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine (  $x,y,z$  yönlerinde ) sahip SOLID 65 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman çekmede çatlama, basınçta ise ezilme yeteneğine sahiptir. Yayılı çatlak modeline göre davranan bu elemanda herhangi bir doğrultuda çekme dayanımını aştığı zaman bu doğrultuya dik düzlemde çatlak meydana gelir. Ezilme tüm asal gerilmelerin basınç olması durumunda birleşim noktalarında (*node*) gerçekleşir. Önemli bir özelliği de doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin bu elemana atanabilmesidir. Bu şekilde betonun gerçek davranışına benzer bir davranış modeli oluşturulabilir.



Şekil 4.22 : Solid 65 beton elemanı (Ansys, V12).

LP için ise ANSYS programı içerisinde yer alan dört düğüm noktalı SHELL 41 membran eleman kullanılmıştır. Beton SOLID 65 elemanlarında olduğu gibi SHELL 41 elemanları da her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahiptir ( $x,y,z$ ). Düzlemi içerisinde bir rijitliğe sahip olup düzlemdışı veya eğilme rijitliği yoktur. LP sargılı betonun aksenal yükleme durumu altında sargılama malzemesinin sadece düzlemi içerisindeki çembersel çekme gerilmelerini taşıyacağı düşünülürse SHELL 41 elemanı için “tension only” özelliği aktif hale getirilebilir ve basınç gerilmeleri taşıma özelliği kapatılabilir. Bu özellik seçilmiş ise yükleme yapılırken

eksenel yükün sadece SOLID 65 beton elemanlarına verilmiş olduğundan emin olunmalıdır.



Şekil 4.23 : Shell 41 LP elemanı (Ansys, V12).

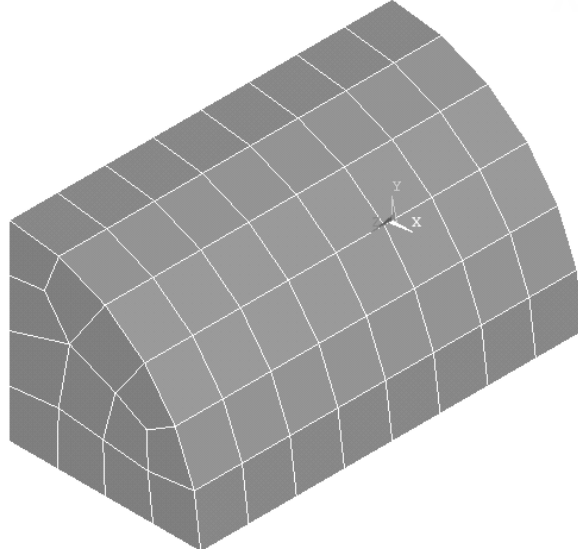
Beton ve LP elemanlarına atanacak malzeme özellikleri programa girilmelidir. Beton için önce doğrusal elastik ve izotropik malzeme özellikleri olarak betonun elastisite modülü ve Poisson oranı girilir. Ardından doğrusal olmayan malzeme özellikleri tanımlanır. Beton için doğrusal olmayan malzeme özelliği olarak Drucker-Prager plastisitesini tanımlayan kohezyon  $c$ , içsel sürtünme açısı  $\phi$  ve plastik akış açısı  $\phi_f$  girilir. LP sadece doğrusal elastik malzeme olarak liflerin doğrultusuna paralel doğrultudaki elastisite modülü girilerek tanımlanır, sadece çevresel doğrultuda çalışacağı düşünülerek LP'in Poisson oranı sıfır alınabilir.

Standart beton silindirin düşey ve yatay simetri özelliğinden faydanılarak yalnızca 1/8'i modellenmiştir. Tanımlanan malzeme özellikleri atandıktan sonra model sonlu elemanlara bölünmelidir. Ancak bu bölümlenme işlemi yapılırken dikkat edilecek bazı noktalar vardır. Her ne kadar daha küçük bölümlenmeler yapmak sonuçların hassasiyeti için olumlu olsa da özellikle betonun modellenmesinde daha küçük ve dolayısıyla daha zayıf elemanlarda erken göçme durumları yaşanmakta ve model taşıma gücüne erişmeden program ırsamaktadır. Bu durumun önüne geçmek için önerilen en küçük sonlu eleman boyutu, beton karışımında kullanılan en büyük agrega çapının iki ya da üç katı büyüklüğünde olmalıdır (Bedard ve Kotsovos, 1986).

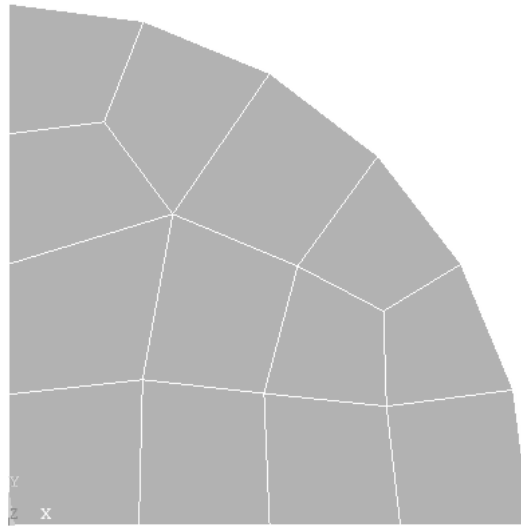
YZ, XZ ve XY simetri düzlemlerine simetri sınır koşulları tanımlanmıştır (Şekil 4.27). Yüklemin yapılacağı başlık kısmı x ve y eksenleri doğrultusunda sabit

mesnetle tutulmuş ve yalnızca z yönünde serbest bırakılmıştır. Böylece yükleme aletinin paletinin numune tepesinde meydana getireceği rijitleştirme ve yatayda mesnetleme etkisi de dikkate alınmıştır.

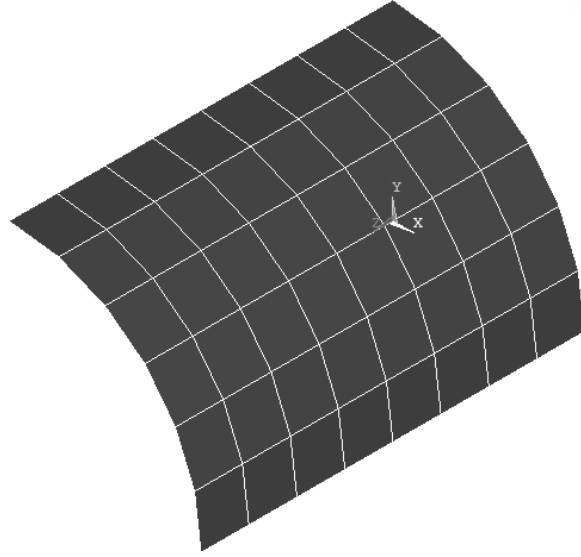
Yükleme yük kontrollü olarak, sadece  $-z$  yönünde ve sadece SOLID 65 beton elemanlarına yayılı basınç yükü olarak verilmiştir.



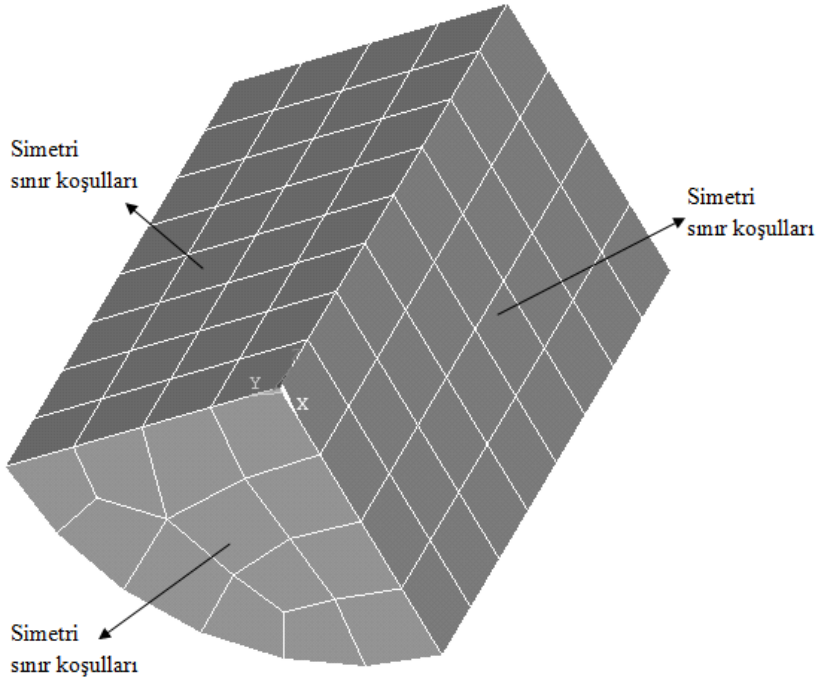
**Şekil 4.24 :** Beton silindirin 8’de 1 lik parçası ( L=150 mm, r = 75 mm).



**Şekil 4.25 :** Beton silindir parçasının kesit görünümü.



Şekil 4.26 : LP'e ait Shell 41 elemanları.



Şekil 4.27 : Simetri sınır koşulu yüzeyleri.

ANSYS programında herhangi bir seçim yapılmadığı takdirde otomatik olarak doğrusal olmayan problemlerin çözümünde Newton-Raphson denge iterasyonlarını kullanılır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde (malzeme ya da geometrik açıdan doğrusal olmayan olabilir) yükleme, yük ya da yerdeğiştirme cinsinden sonuçta ulaşılabilecek değere adımlar halinde artımsal olarak gidilecek şekilde tanımlanır.

#### 4.4 Deney Sonuçları ile Sonlu Eleman Metodu Çözümü Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bölüm 3’de anlatılan sargılı silindir deneylerinden elde edilen sonuçlar, bu bölümde sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Hesaplanan değerlerin yanında parantez içinde verilen değer ise, aynı sargı kat sayısına sahip iki numune için deneysel olarak elde edilen gerçek değerlerin ortalamasını göstermektedir.

##### 4.4.1 n1\_k\_6\_1 ve n1\_k\_6\_2 numuleri

Sonlu elemanlar metodu ile çözüm yapabilmek için ihtiyaç duyulan parametrelerin bulunması aşağıda özetlenmiştir. Bu parametreler; içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), kohezyon ( $c$ ) ve plastik akış açısı ( $\phi_f$ ) dir. Betona ait elastisite modülünün hesabı için İspir ve diğ. (2010) tarafından önerilen ve düşük dayanımlı betonların elastisite modülünü hesaplamak için geliştirilen amprik ifade kullanılmıştır, Denklem 4.31. Betonun bir diğer elastik mekanik özelliği olan Poisson oranı ise 0.2 alınmıştır.

$$E_c = 4630\sqrt{f_{ck}} + 2370 \quad (4.31)$$

$$E_c = 4630\sqrt{10.66} + 2370 = 17500MPa$$

##### İçsel sürtünme açısı ve kohezyon:

Denklem 4.22’de verilen ifade kullanılarak en büyük yanal sargı basıncı değeri hesaplanabilir:

$$f_{lmaks} = \frac{2E_j\varepsilon_j t_j}{D} = \frac{2f_j t_j}{D} = \frac{2 \times 5650 \times (0.7 \times 0.022) \times 6 \times 0.5}{151} = 3.46MPa$$

Bu denklemde kullanılan  $E_j$  ve  $\varepsilon_j$  değerleri, Bölüm 2’de açıklandığı üzere, LP malzemesinin direk çekme deneylerinden elde edilmiştir.

Denklem 4.22’de  $\varepsilon_j$  için, n1\_k6\_1 ve n1\_k6\_2 numunelerinin deneylerinden elde edilen sargılanmış halde ki çevresel şekildeğiştirme (dayanıma karşı gelen) değerlerinin ortalaması kullanılabilir. Bu durumda,  $f_{lmaks}$  3.97 MPa olarak hesaplanır.

$$(\varepsilon_{jdeney} = 0.0177için \rightarrow f_{lmaks} = 3.97MPa)$$

Sargılı betonun dayanımını hiçbir deney yapmaksızın iyi bir yaklaşımla elde etmek için İlki ve diğ. (2004) tarafından önerilen model (Denklem 4.23) kullanılabilir:

$$f_{cc} = f_{co} \left[ 1 + 2.4 \left( \frac{f_{lmaks}}{f_{co}} \right)^{1.2} \right] = 10.66 \left[ 1 + 2.4 \left( \frac{3.46}{10.66} \right)^{1.2} \right] = 17.30 MPa (19.91 MPa)$$

Denklem 4.21 kullanılarak,  $k_I$  sargılama etkinlik katsayısı hesaplanabilir. Elde edilen  $k_I$  değerleri ve  $k_I$  hesaplamak için kullanılan veri kaynakları, Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1 :  $k_I$  değerleri.**

Veri kaynağı	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{co}$ (MPa)	$f_{lmaks}$ (MPa)	$k_I$
Teorik	17.30	10.66	3.46	1.92
DeneySEL	19.91	10.66	3.97	2.33

$k_I$  değerleri kullanılarak, Denklem 4.20'den betona ait içsel sürtünme açısı hesaplanır:

$$k_I = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \Rightarrow 1.916 = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \Rightarrow \phi = 18.31^\circ (23.54^\circ)$$

Denklem 4.19'dan faydalanarak betonun kohezyon değeri;

$$f_{co} = 2c \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \Rightarrow 10.66 = 2c \tan \left( 45 + \frac{18.31}{2} \right) \Rightarrow c = 3.85 MPa (3.49 MPa)$$

olarak bulunur.

### **Plastik akış açısı:**

Kullanılan sonlu elemanlar programında ihtiyaç duyulan diğer bir parametre ise plastik akım kuralını tanımlayan plastik akış açısıdır. Bu açının doğru hesaplanabilmesi, davranışın gerçekçi olarak modellenebilmesi açısından çok önemlidir.

Denklem 4.29 ve Denklem 4.30 kullanılarak;

$$\mu_u = -0.1375 \ln \left( \frac{2E_j t_j}{f_c' D} \right) + 0.8646 \Rightarrow \mu_u = -0.1375 \ln \left( \frac{2 \times 5650 \times 6 \times 0.5}{10.66 \times 151} \right) + 0.8646 = 0.445 (0.71)$$

$$\phi_f = 54.74 - \arctg \left( \frac{1}{\sqrt{2\mu_u}} \right) \Rightarrow \phi_f = 54.74 - \arctg \left( \frac{1}{0.45\sqrt{2}} \right) = -2.787^\circ (9.86^\circ)$$



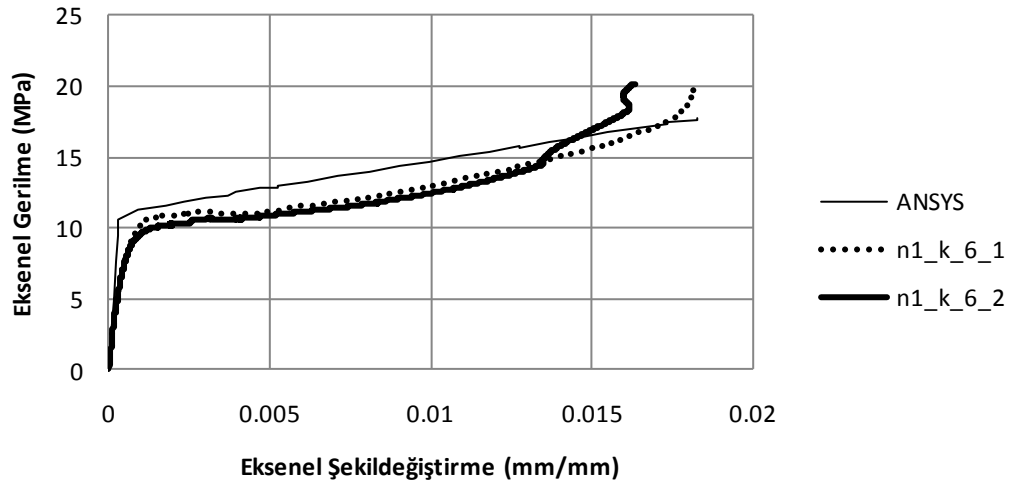
olarak bulunur. Böylece DP plastisitesinin tanımlanması için kullanılacak kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri ile plastik şekildeğiştirmenin nasıl olacağını belirleyen akım kuralını ortaya koyan plastik akış açısı da bulunmuş olur.

Yukarıda modelleme için hesaplanan parametreler, ayrıca Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

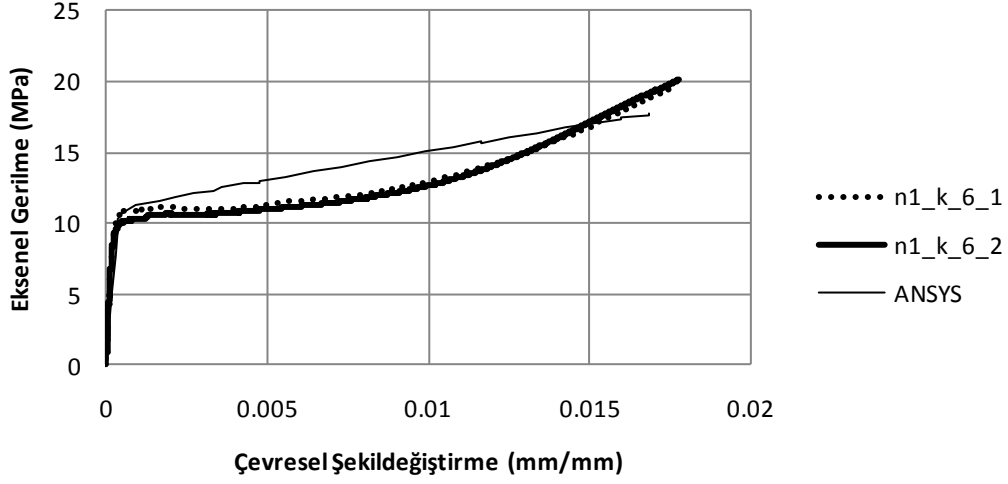
**Çizelge 4.2 : Modelleme parametreleri**

Veri türü	$c$ (MPa)	$\phi^o$	$\phi_f^o$	$E_c$ (MPa)
Teorik	3.85	18.31	-2.79	17500
Deneysel	3.49	23.54	9.86	

Çizelge 4.2’de özetlenen teorik parametreler kullanılarak yapılan sonlu eleman çözümünün sonuç grafikleri aşağıda deneylerden elde edilen grafikler ile birlikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



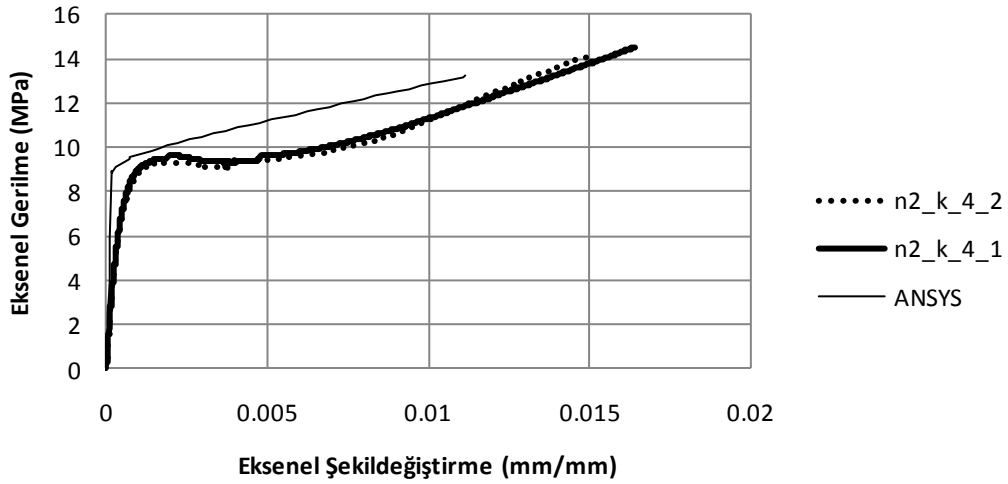
**Şekil 4.28 : Eksenel gerilme- şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.**



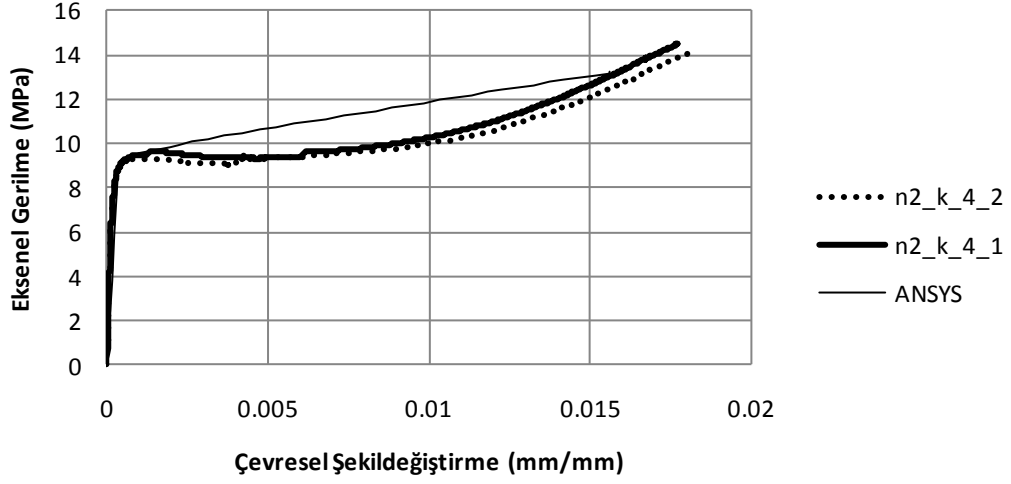
Şekil 4.29 : Eksenel gerilme-çevresel (veya radyal) şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

#### 4.4.2 n1\_k\_4\_1 ve n1\_k\_4\_2 numuleri

Veri türü	$c$ (MPa)	$\phi^o$	$\phi_f^o$	$E_c$ (MPa)
Teorik	3.33	17.05	-1.198	16300
Deneysel	3.19	19.34	12.36	



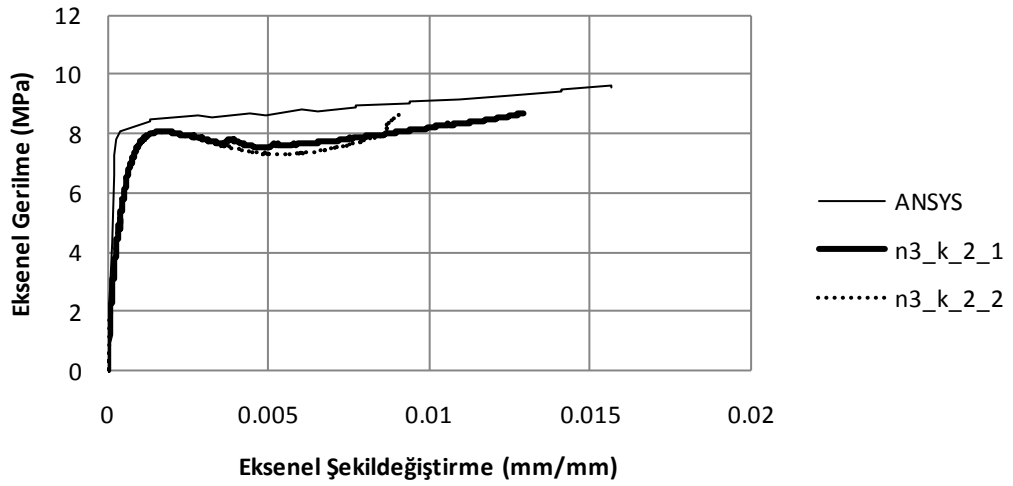
Şekil 4.30 : Eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.



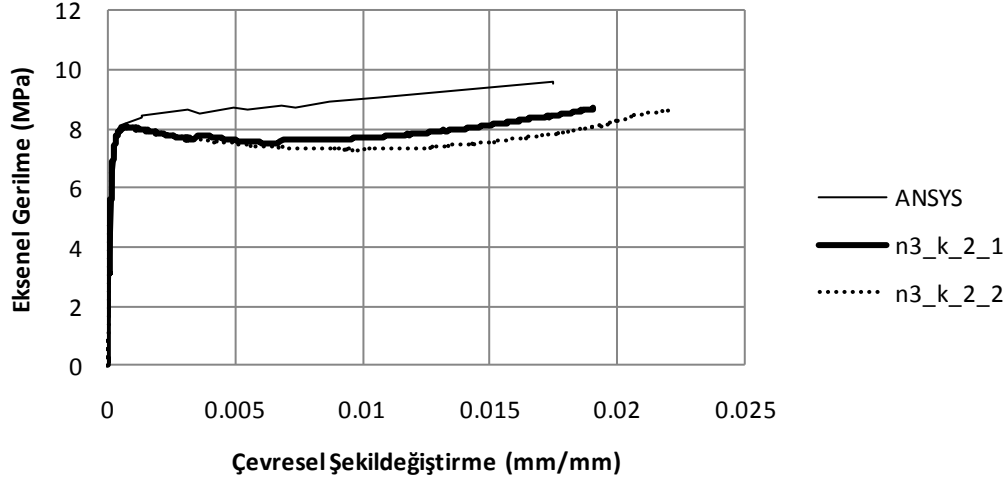
Şekil 4.31 : Eksenel gerilme-çevresel (veya radyal) şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

#### 4.4.3 n1\_k\_2\_1 ve n1\_k\_2\_2 numuleri

Veri türü	$c$ (MPa)	$\phi^o$	$\phi_f^o$	$E_c$ (MPa)
Teorik	3.31	13.89	2.93	15500
Deneysel	-	-	-	



Şekil 4.32 : Eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.



**Şekil 4.33 :** Eksenel gerilme-çevresel (veya radyal) şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

#### 4.5 Sonuçlar

Deneyssel olarak elde edilmiş gerilme şekil değiştirme ilişkilerinin sonlu eleman analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmasından görülebileceği üzere, LP sargılanmış betonun davranışı, dilatasyon davranışının iyi tanımlanabilmesi halinde sonlu eleman programları ile gerçeğe yakın olarak modellenabilir. Bunun için çevresel basınç gerilmelerine duyarlı bir plastisite modeli kullanılması uygundur. Ancak kullanılacak plastisite modelinin bir pekleşme ya da yumuşama parametresi içermemesi durumunda, diğer bir deyişle bu tezde kullanıldığı gibi beton davranışının sadece elastik-tam plastik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile tanımlanması halinde daha doğru bir çözüme ulaşamamaktadır. Bunun için pekleşme ve yumuşama parametreleri de içeren bir plastisite modeli kullanılmalıdır.

Betonun elastik özellikleri tanımlanırken kullanılan elastisite modülü, beton dayanımının %5'i ile %45'i arasındaki gerilme şekil değiştirme noktalarından elde edilmiş bir eğimi göstermektedir, İspir ve diğ. (2010). Bu yüzden gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin dayanıma yakın olduğu bölümlerinde bahsedilen eğimden farklı (daha az) bir eğime sahip olması dolayısıyla sonlu eleman metodu çözümü ve deneysel sonuç grafikleri arasında bir fark olduğu görülmüştür. Sargısız dayanımın ardından özellikle az kat sargılı (düşük sargı eksenel rijitliği olan) numunelerde görülen gerilme azalması da sonlu eleman çözümünde dikkate alınmamaktadır.

DP parametrelerinin belirlenmesinde İlki ve diğ. (2004) tarafından sargılı betonun gerilme şekildeğiştirme davranışını elde etmeye yönelik olarak önerilen amprik model kullanılmıştır. Modelden elde edilen sargılı dayanım, deneysel dayanımdan biraz farklıdır ve buradan elde edilen parametreler ile kurulan modelin çözümü de deneysel değerinden biraz farklı bir değeri vermektedir. Dayanım anına karşı gelen şekildeğiştirme değeri deneyde olduğu gibi sonlu eleman modelinde de silindir numunenin orta bölgesinden, gerçekte şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılı olduğu kesimden alınmıştır.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında diğer lifli polimerlere göre görece daha düşük bir elastisite modülü ve dayanıma sahip ancak daha ekonomik bir tür cam elyaf esaslı lifli polimerin, üzerine sargılandığı betonarme taşıyıcı elemanın aksel taşıma gücünü ve şekil değiştirebilme yeteneğini nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Farklı sargılama kat sayıları ile gerçekleştirilen deneyler göstermiştir ki bu malzeme ile sargılanan kolonun aksel basınç taşıma gücü ve şekil değiştirebilme kapasitesi arttırılabilmektedir. Aynı hacimsel oranda lif içeren bilindik lifli polimerler ile sargılanmış elemanın gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde, bu tezde elde edilenlerden daha ileri dayanım ve şekil değiştirebilirlik artışı sağlandığı söylenebilir. Bunun başlıca nedeni kuşkusuz bilindik LP'in dayanım değerinin ve elastisite modülünün bu tezde kullanılanlardan büyük olmasıdır. Ayrıca bilindik sargılama uygulamalarının epoksi kullanılarak gerçekleştirilmesi de sargılama malzemesinde bu tezde olduğundan farklı bir aksel rijitlik durumu yaratmaktadır. Fakat epoksinin insan sağlığına bilinen zararlarının olması, kırılma-gevrek yapısı, yüksek maliyeti ile kıyaslandığında burada kullanılan tutkalın bu açılardan bir çözüm sunduğu söylenebilir.

Kullanılan tutkal bakımından sağlanan bir ekonomik avantajın yanı sıra LP'in kendisi de diğer bilinen LP'lere kıyasla daha ekonomiktir.

Günümüzde LP'ler ile yapılan güçlendirmelere ilişkin yaygınlaşan kanı, büyük kopma uzama değerine sahip düşük dayanımlı fakat bunun doğal sonucu olarak düşük maliyetli malzemeler kullanılarak, yüksek dayanımlı malzemeler (yüksek maliyet) ile elde edilecek dayanım farkının sargılama sayısı ile optimize edilebileceğidir.

Tez kapsamında kullanılan LP çift yönlü bir dokumaya sahiptir. Üretici firmanın bu dokumayı üretmekteki asıl amacının betonarme çerçeve içi bölme duvarların herhangi bir etki karşısında düzlemsel doğrultuda devrilmesinin ya da dağılmasının

önlenmesi olduğu bilinmektedir. LP'e ait aksenal çekme testlerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin bilinen LP'de olduğu gibi tek bir eğim ve elastisite modülüne sahip olmamasının nedeni de çekme yönündeki liflerin çekme yönüne dik olan lifler ile atkı-örgü ilişkisi içerisinde bulunması ile açıklanabilir. LP'e ait bu doğrusal olmaktan uzak gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi özellikle sargılı betona ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini de etkilemektedir. Sargılı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinde ikinci kolun eğiminin de benzer şekilde bir yere kadar daha az sonrasında (LP üzerindeki uzama yaklaşık 0.01 şekildeğiştirmeye gelene kadar) biraz daha fazla olduğu görülmüştür.

Böylesi bir sargılama işleminin asıl hedefi belki doğrudan dayanımı arttırmak olmamalıdır. Bunun yerine bu sargılamanın, sargılandığı kolonun üzerindeki yükü yavaş yavaş kaybetmesinin sağladığı bir avantajla, toptan göçmeye karşı etkili olabileceği düşünülmektedir. Diğer bir deyişle kolon, dağılıp parçalanmadan ama sargının içinde çok ciddi hasar görerek düşeyde yük taşımaya devam edebilecektir.

Her ne kadar tasarıma yönelik geliştirilmiş ve sargılı betonun nihai dayanım ve şekildeğiştirmesini büyük bir yaklaşıklıkla hesap edebilen analitik ya da ampririk bir çok model mevcut olsa da, sargılanmış eleman üzerinde gerilme ve deformasyonların nasıl dağıldığını görmek, bu LP ile sargılanmış betona ait mekanik parametrelerin tespit edilip sonrasında gerçek yapı elemanlarının modellenmesinde bir fikir oluşturmak, eğilme etkilerinin de bulunduğu bir yapı elemanında basınç gerilmelerine maruz kalan kısımda betonun davranışını için bir model geliştirmek amaçlanmış olup 4.bölümde, 3.bölümde gerçekleştirilen deneylerin sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi incelenmiştir. Sargılı betonun dilatasyon karakterinin yeterince iyi tanımlanması halinde sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilecek davranışın gerçek davranışa oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

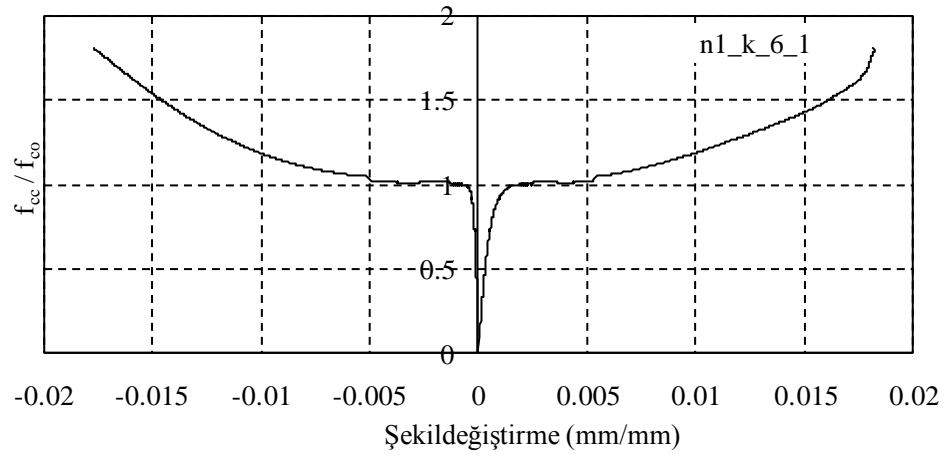


## KAYNAKLAR

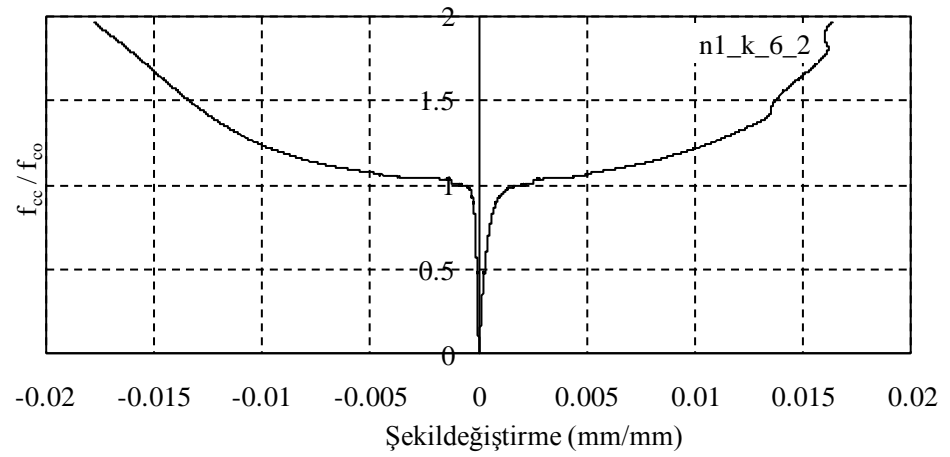
- ACI 440.2R-08**, 2008: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- ANSYS 12** Kullanım Kılavuzu, 2010.
- Becque, J.**, 2000 : Analytical Modelling of Concrete Columns Confined by FRP, *MSc Thesis*, The University of Manitoba, Canada.
- Chen, W. F.**, 1982: Plasticity In Reinforced Concrete, McGraw-Hill Book Company.
- Davis, R. O., Selvadurai, A. P. S.**, 2002: Plasticity and Geomechanics, *Cambridge University Press*.
- Doran, B., Koksal, H. O., Turgay, T.**, 2009: Nonlinear Finite Element Modelling of Rectangular/Square Concrete Columns Confined with FRP, *Materials and Design*, Vol. **30**, 3066-3075.
- Elwi, A. A., Murray, D. W.**, A 3D Hypoelastic Concrete Constitutive Relationship, *Proceedings of the ASCE*, **105**, 623-641.
- İlki, A., Kumbasar, N., and Koc, V.**, 2004: Low strength concrete members externally confined with FRP sheets, *Struct. Eng. and Mech.*, Vol. **18**, No. 2, pp. 167-194.
- Imran, I.**, 1994 : Application of Non-Associated Plasticity In Modelling the Mechanical Response of Concrete, *MSc Thesis*, The University of Toronto, Canada.
- Inan, M.**, 1988: Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ Vakfı.
- Ispir, M., Dalgic, K. D., Sengul, C., Kuran, F., Tasdemir, M. A., İlki, A.** 2010: Elasticity Modulus of Low Strength Concrete, *9 th International Congress on Advances in Civil Engineering, Trabzon. (Kabül edildi ,henüz sunulmadı.)*
- Karabinis, A.I., Rousakis, T. C., Manolitsi, G.E.**, 2008: 3D Finite-Element Analysis of Substandard RC Columns Strengthened by Fiber-Reinforced Polymer Sheets, *Journal of Composites for Construction* , ASCE, V 12, No: **5**, 531-540.
- Mirmiran, A., Shahawy, M.**, 1997: Behaviour of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, *Journal of Structural Engineering*, 583-590.
- Mirmiran, A., Zagers, K., Yuan, W. Q.**, 2000: Nonlinear Finite Element Modelling of Concrete Confined by Fiber Composites, *Finite Element in Analysis and Design* , **35**, 79-96.

- Orito, Y., Sato, T., Tanaka, N., Watanabe, Y.,** : 1987: Study on the Unbounded Steel Tube Structure, *Proc.Int/ Conference on Composite Structures in Steel and Concrete*, ASCE, 786-804.
- Rousakis, T. C., Karabinis, A.I., Kiouisis, P. D.,** 2007: FRP Confined Concrete Members : Axial Compression Experiments and Plasticity Modelling, *Engineering Structures* , **29**, 1343-1353.
- Tasdemir, M. A., Maji, A. K., Shah, S. P.,** 1990: Crack Propagation In Concrete Under Compression, *Journal of Engineering Mechanics*, **116**, No: 5 1058-1076.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., Lam, L.,** 2002 : FRP Strengthened RC structures., *John Wiley&Sons Ltd.*
- TS-500,** 2000: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Url-1** <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Yield\\_surface.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Yield_surface.svg)>, alındığı tarih 29.04.2010.
- Yu, T., Teng, J. G., Wong, Y. L., Dong, S. L.,** 2010: Finite Element Modelling of Confined Concrete-I: Drucker-Prager Type Plasticity Model, *Engineering Structures*, **32**, 665-679.

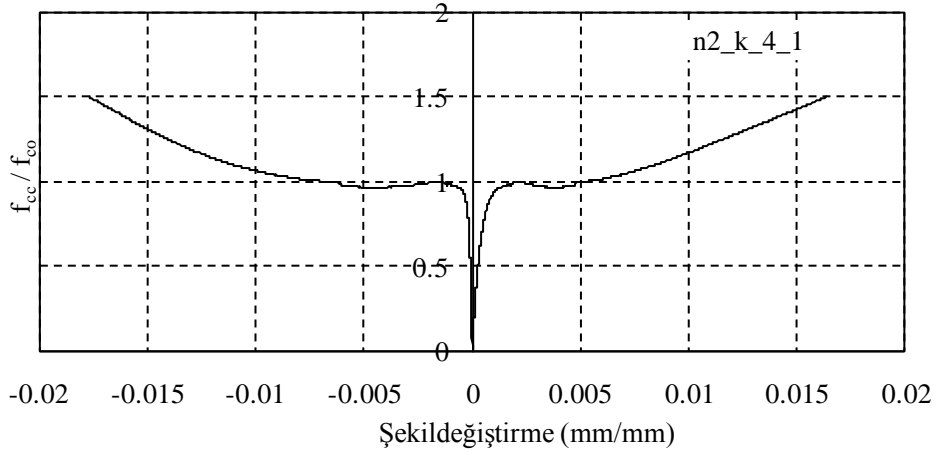
## 6. EK A



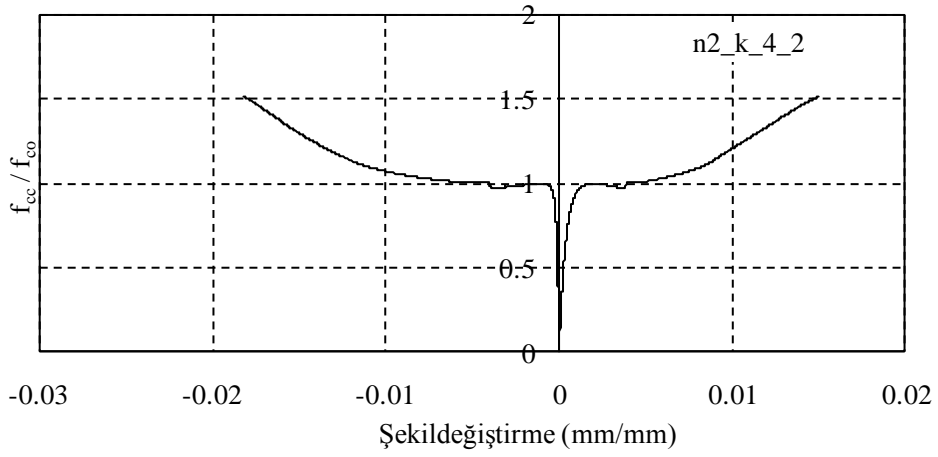
**Şekil A.1:** n1\_k\_6\_1 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal / aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.



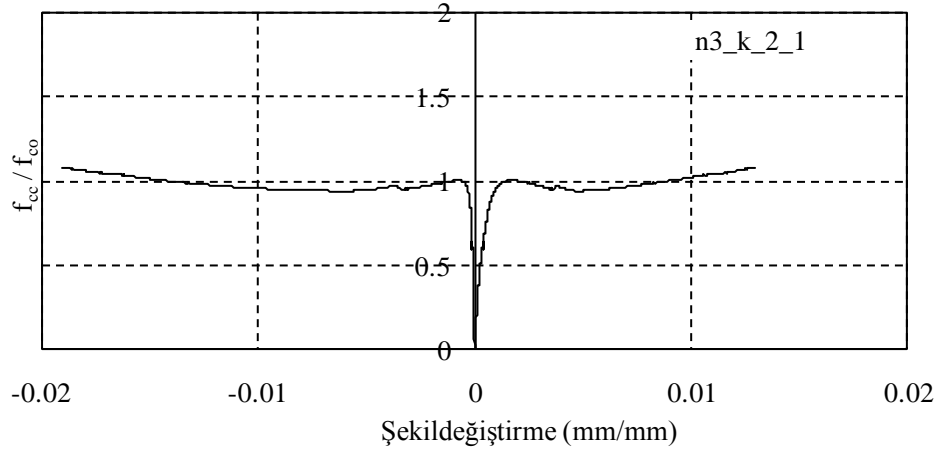
**Şekil A.2:** n1\_k\_6\_2 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal / aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.



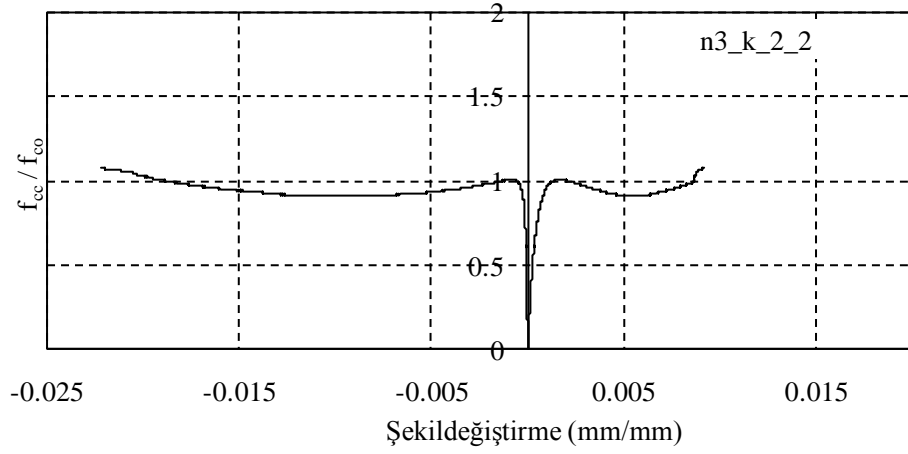
**Şekil A. 3:** n2\_k\_4\_1 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal / aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.



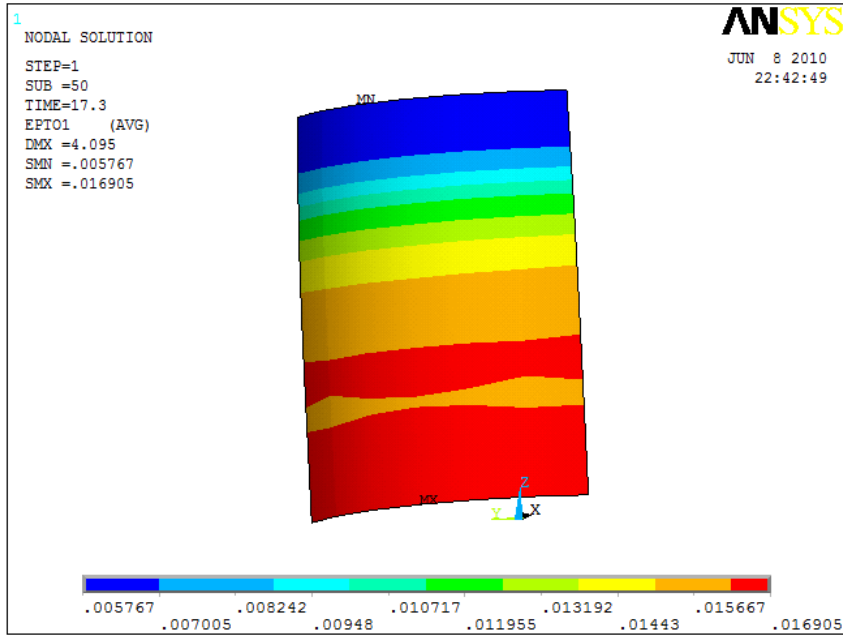
**Şekil A. 4:** n2\_k\_4\_2 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal / aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.



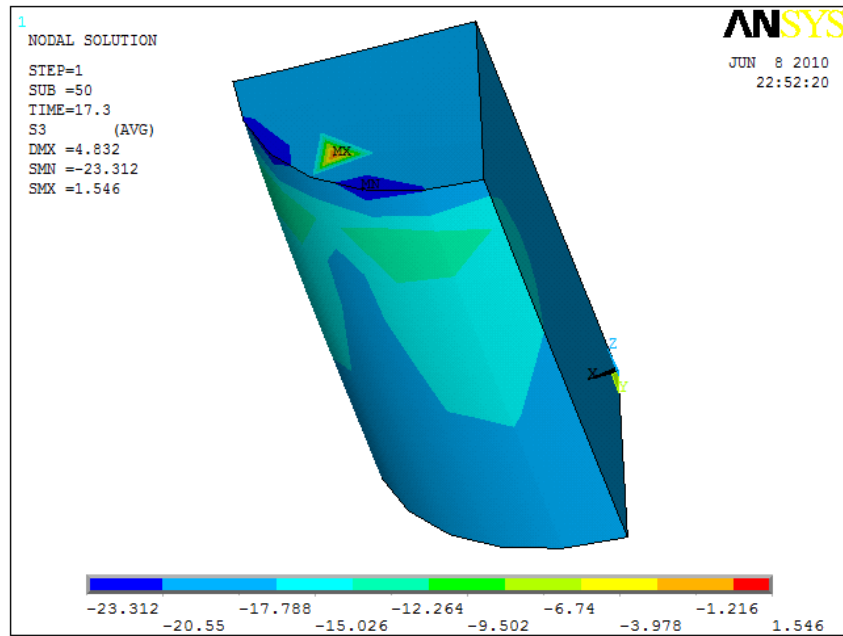
**Şekil A.5:** n3\_k\_2\_1 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal / aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.



**Şekil A. 6:** n3\_k\_2\_2 numunesine ait aksenal gerilme ve yanal / aksenal şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil A. 7: n1\_k\_6\_1 numunesinin sargılı dayanımına eriştiği anda LP üzerinde oluşan asal çekme gerilmesi kontürleri.



Şekil A. 8: n1\_k\_6\_1 numunesinin sargılı dayanımına eriştiği anda beton üzerinde oluşan asal basınç gerilmesi kontürleri.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad: Korhan Deniz DALGIÇ**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Ereğli/Konya, 08.04.1985**

**Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği Bölümü**