

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİFLİ POLİMER İLE SARGILANMIŞ DAİRE EN KESİTLİ ULTRA-YÜKSEK
DAYANIMLI BETON KOLONLARIN DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alperen ÇOPUR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİFLİ POLİMER İLE SARGILANMIŞ DAİRE EN KESİTLİ ULTRA-YÜKSEK
DAYANIMLI BETON KOLONLARIN DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alperen ÇOPUR
501101204**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin AYDOĞAN

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501101204 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Alperen ÇOPUR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**LİFLİ POLİMER İLE SARGILANMIŞ DAİRE EN KESİTLİ ULTRA-YÜKSEK DAYANIMLI BETON KOLONLARIN DAVRANIŞI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin AYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet SAYGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. İbrahim EKİZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **24 Ocak 2013**

Aileme,

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim süresince bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen ve bana mesleğimi sevdiren çok değerli hocam Prof. Dr. Metin Aydoğan'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın hazırlanmasındaki yardımlarından dolayı Dr. Soner Güler'e ve üniversite hayatımda kazandığım en büyük dostlarımdan biri olan Y. Mimar Ahsen Karagöl'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez yazım sürecinde bana gösterdikleri anlayıştan dolayı İnş. Y. Müh. Şennur Aksu ve İnş. Y. Müh. Şebnem Genç'e teşekkür ederim. Hayatımın her anında yanımda olan ve bir an olsun sevgi ve desteğini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Aralık 2012

Alperen Çopur
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Amaç ve Kapsam	5
2. GENEL BİLGİ	7
2.1 Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar	7
2.2 Lifli Polimer ile Sargılanmış Kolonların Genel Davranışı.....	8
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	13
3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması	13
3.2 Malzeme Özellikleri	15
3.2.1 Beton	15
3.2.2 Lifli polimer	17
3.3 Deney Düzenekinin Kurulması	17
3.4 Deney Sonuçları	19
3.5 Sonuçların Mevcut Sargılama Modelleri ile Karşılaştırılması	24
3.5.1 Sargılama modelleri	26
3.5.1.1 Saadetmanesh ve diğerleri.....	26
3.5.1.2 Miyauchi ve diğerleri	27
3.5.1.3 Kono ve diğerleri.....	27
3.5.1.3 Toutanji	28
3.5.2 Sonuçların karşılaştırılması.....	28
3.5.2.1 Eksenel gerilme	28
3.5.2.2 Eksenel şekildeğiştirme.....	30
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	33
4.1 Giriş	33
4.2 Sonlu Eleman Tipi.....	33
4.3 Sınır Koşullar ve Yükleme Şekli.....	35
4.4 Lifli Polimer Malzeme Modeli.....	35
4.5 Beton Malzeme Modeli	36
4.6 Beton ve Lifli Polimer Arasındaki Etkileşim	40
4.7 Analiz Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması.....	40
5. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ.....	53

KISALTMALAR

AFRP	: Aramid Fiber Reinforced Polymer
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer
CDPM	: Concrete Damage Plasticity Model
DP	: Drucker-Prager Hipotezi
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer
LP	: Lifli Polimer
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
UYDB	: Ultra Yüksek Dayanımlı Beton

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Beton karışım oranları	13
Çizelge 3.2 : Numune özellikleri.....	15
Çizelge 3.3 : LP malzemelerin mekanik özellikleri	17
Çizelge 3.4 : Numunelere ait deney sonuçları	23
Çizelge 4.1 : Beton modeline ait değerler	39
Çizelge 4.2 : Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması.....	46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	2
Şekil 1.2 : LP sargılı beton modeli (Youssef ve diğ.,2006).....	4
Şekil 2.1 : LP sargılı betonun tipik davranışı (Mirmiran ve diğ.,2000).....	9
Şekil 2.2 : Sargılı betona ait serbest cisim diyagramı.....	10
Şekil 2.3 : LP sargılı betona ait tipik dilatasyon oranı-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi (Mirmiran ve Shahawy, 1997b).	11
Şekil 3.1 : Beton silindir numuneler	14
Şekil 3.2 : Epoksi uygulaması	14
Şekil 3.3 : Beton numunelerin sargılama işlemi ve sargılanmış numuneler.....	15
Şekil 3.4 : Sargısız betona ait deney düzeneği.	16
Şekil 3.5 : Betona ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.	17
Şekil 3.6 : Sargılı betona ait deney düzeneği.....	18
Şekil 3.7 : Şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.....	18
Şekil 3.8 : Göçme modları.	19
Şekil 3.9 : 5 kat CFRP sargılı numunelere ait göçme modları.	20
Şekil 3.10 : GFRP sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	20
Şekil 3.11 : AFRP sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.....	21
Şekil 3.12 : CFRP sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.	21
Şekil 3.13 : Gerilme kapasitesi artışı-sargı kat adedi ilişkisi.....	22
Şekil 3.14 : Şekildeğiştirme kapasitesi artışı-sargı kat adedi ilişkisi.....	22
Şekil 3.15 : Çelik ve LP sargılı betona ait aksel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (Spoelstra ve Monti, 1999).....	25
Şekil 3.16a : GFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması	29
Şekil 3.16b : AFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması	29
Şekil 3.16c : CFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.....	29
Şekil 3.17a : GFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması	30
Şekil 3.17b : AFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması	31
Şekil 3.17c : CFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.....	31
Şekil 4.1 : C3D8R 8 düğüm noktalı solid eleman (url-1).....	34
Şekil 4.2 : S4R 4 düğüm noktalı kabuk eleman (Jen, 2009).	34
Şekil 4.3 : Beton ve LP malzemenin sonlu eleman modeli.	34
Şekil 4.4 : Sargılı betonun sonlu elemanlar modeli.....	35
Şekil 4.5 : Von-Mises ve Drucker-Prager akma yüzeyleri.	36
Şekil 4.6 : CDP modelinde akma yüzeyi (Kmiecik ve Kaminski, 2011)	38
Şekil 4.7 : p-q düzleminde plastik akış yüzeyi (Kmiecik ve Kaminski, 2011).	39
Şekil 4.8 : Numunelere ait tipik yanal sargı basıncı dağılımı.....	40
Şekil 4.9 : 2 kat sargılı GFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	41
Şekil 4.10 : 3 kat sargılı GFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	41
Şekil 4.11 : 4 kat sargılı GFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	42
Şekil 4.12 : 5 kat sargılı GFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	42
Şekil 4.13 : 2 kat sargılı AFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	43

Şekil 4.14 : 3 kat sargılı AFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	43
Şekil 4.15 : 4 kat sargılı AFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	43
Şekil 4.16 : 5 kat sargılı AFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	44
Şekil 4.17 : 2 kat sargılı CFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	44
Şekil 4.18 : 3 kat sargılı CFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	45
Şekil 4.19 : 4 kat sargılı CFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	45
Şekil 4.20 : 5 kat sargılı CFRP numunelere ait sonuçların karşılaştırılması	45

LİFLİ POLİMER İLE SARGILANMIŞ DAİRE EN KESİTLİ ULTRA-YÜKSEK DAYANIMLI BETON KOLONLARIN DAVRANIŞI

ÖZET

Günümüzde lifli polimer kompozitler mevcut binaların onarım ve güçlendirilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Lifli polimerlerin uygulandıkları elemanda sünekliği ve dayanımı arttırması, daha kısa uygulama süresi ve daha az işçilik gerektirmesi gibi avantajları lifli polimer kompozitleri tercih edilen bir yapı malzemesi yapmaktadır. Ayrıca lifli polimerler bu avantajları ile mevcut yapılarda kullanımının yanı sıra yeni yapı sistemlerinde de kullanılmaktadır.

Beton teknolojisine yenilikçi bir alternatif olan ultra-yüksek dayanımlı betonlar sunduğu yüksek basınç ve çekme dayanımı, sünekliliği ve kırılma enerjisi kapasitesi ile geleneksel betonlara göre üstün özelliklere sahiptir ve deprem bölgesindeki yapılar için önemli bir yapı malzemesidir.

Bu çalışmada, bu iki malzemeden oluşan kompozit kolonların eksenel yük altındaki davranışı incelenmiştir. Çalışma beş bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde konuya giriş yapılmıştır. Sargılama davranışından bahsedilmiş ve araştırmacılar tarafından önceki yıllarda yapılan çalışmalar kısa ve öz olarak anlatılmıştır. Tez çalışmasının amacı ve kapsamı belirtilmiştir. Bu çalışmanın amacı ve kapsamı, lifli polimer sargılı daire en kesitli kısa kolonların eksenel yük altındaki davranışını eksenel gerilme-şekildeğiştirme açısından incelemektir.

İkinci bölümde, ultra-yüksek dayanımlı betonlar hakkında genel bilgiler verilmiş ve lifli polimer ile sargılanmış kolonların davranışı kısa bir şekilde açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, lifli polimer sargılı kolon numuneleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Bu bölümde lifli polimerlerin ve betonun mekanik özellikleri, deney düzeneğinin kurulması açıklanmıştır. Deneyler İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneysel çalışmada 6 adet sargısız beton ve 36 adet sargılı beton numunesi eksenel yük altında güç tükenmesi durumuna erişene kadar test edilmiştir. Deney sonuçları her bir lifli polimer için ayrı ayrı grafikler halinde sunulmuş ve sonuçlar tablo halinde verilmiştir. Buna ilaveten sonuçlar literatürdeki mevcut sargılama modelleri ile karşılaştırılarak modellerin LP sargılı ultra-yüksek dayanımlı beton kolonların dayanımını ve bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirme değerinin tahmin performansları irdelenmiştir.

Dördüncü bölümde, ABAQUS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak numuneler sayısal olarak modellenmişlerdir. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları tablo ve grafikler yardımıyla karşılaştırılmışlardır.

Beşinci bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar belirtilmiştir.

BEHAVIOR OF FRP WRAPPED CIRCULAR ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE COLUMNS

SUMMARY

Fiber reinforced polymers (FRP) are widely used to repair or strengthening of existing structural members. Some advantages of FRP given below make it a preferable construction materials.

- Higher tensile strength
- Lower weight
- Short implementation period
- More durable against corrosion and chemical effects.

Also FRP is used for new constructions with these advantages.

Ultra-high performance concrete (UHPC) is an innovative alternative for concrete technology. UHPC has an unique properties such as

- Higher compressive strength
- Higher tensile strength and
- Higher fracture energy capacity than conventional concrete.

In this study, behaviour of FRP-wrapped UHPC columns are investigated. The study consist of five chapter.

First chapter is an introduction and in this chapter, confinement behavior is explained in general and previous studies related to FRP confined concrete are given, briefly. Lastly, the aim and scope of this thesis is given which is investigation of behaviour of FRP-wrapped ultra-high performance concrete circular columns under axial load in terms of axial stress-axial strain relationship.

In the second chapter, general information about UHPC is given and behavior of FRP confined concrete are explained in a short manner.

In the third chapter, experimental program is explained.

First of all, UHPC is produced by using very fine sand, cement, silica fume, superplasticizers and steel fibers. The regular CEM I PC 42.5R is used as a cement material in the UHPC mix. Two different types of steel fiber is added in to the mix. UHPC mix proportion for 1 m³ is given in table format.

In experimental program three different types of FRP materials which are GFRP, AFRP and CFRP used. The mechanical properties such as tensile strength, tensile modulus and ultimate elongation of these FRP materials are given in a table format.

All column tests are performed in Structural Materials Laboratory of Civil Engineering Department in Istanbul Technical University by using with a 5000 kN capacities of INSTRON testing machine. Six plain concrete cylinders with a length of 200 mm and a diameter of 100 mm is tested to determine 28-day average compressive strength. From the test results, the 28-day average compressive strength

is obtained as 159 MPa. 36 cylindrical specimens (100mm x 200mm) are wrapped by three different types of FRP materials and four different number of layers (2,3,4,5) for each FRP in hoop direction. For FRP-wrapped specimens, epoxy resins is used for both concrete core and FRP materials in order to provide perfect bonding between concrete core and FRP layers. Total of 42 specimens are tested under axial load until failure and the axial stress-axial strain and axial stress-hoop strain relationships are obtained.

The test results shows there is significant increase in both axial strength and axial strain capacities. The biggest increase in axial strength and axial strain is %48 and %124, respectively. All results are shown in both graphical and table format.

In addition, FRP confined UHPC strength and corresponding strain which are obtained from test results are compared with the existing confinement model predictions proposed by another researchers. There are four confinement models are selected for this comparison. The purpose of this comparison is to investigate the applicability of existing confinement models to the FRP-wrapped UHPC columns.

The efficiency and reliability of each confinement models for predicting ultimate axial strength and corresponding ultimate axial strain of FRP-wrapped UHPC columns are shown in graphical format. For ultimate axial strength, all confinement models are predict the results greater than experimental results and by increasing the confinement ratio the difference between the experimental results and predicted results is increased. Also for ultimate axial strain, none of the selected confinement models are successful enough to predict ultimate axial strain of FRP-wrapped UHPC columns.

Due to the advance in computer technology, some theoretical methods and analytical models are often used the solve problems in the field of applied sciences and engineering. The most widely used of these methods is finite element method. By using finite element method for civil engineering problems, a prediction can be obtained about the behavior of structures or structural elements.

For this purpose, in fourth chapter, commercial three-dimensional finite element (FE) program ABAQUS 6.8 is used to simulate axial load behaviour of FRP wrapped UHPC columns numerically. The materials UHPC and FRP are defined as solid elements and shell elements, respectively. Three-dimensional composite solid element C3D8R is used to modelling to concrete core. This element is an 8-noded solid brick element with three translation degrees of freedom per node on x,y and z direction. C3D8R has a capability of both cracking in tension and crushing in compression. It is also capable of plastic deformation and creep. S4R shell element is used to modelling FRP materials. This element is an 4-noded shell element. This element has variable thickness, stress stiffening and large deflection. In the modelling of the FRP-wrapped UHPC columns to reduce the computation time only quarter of the column is modelled due to the symmetry.

As a finite element analysis result the axial stress-strain relationship of FRP-wrapped UHPC columns for each type and thickness of FRP are obtained. The axial stress-strain relationship of columns obtained from test results are compared with FE results. Results are both presented in graphical and table format. A good agreement is achieved between test and FE results. However, the FE model provides closer results for the FRP-wrapped UHPC columns with smaller confinement ratio (2,3 layers of FRP sheets) than those with greater confinement ratio (4,5 layers of FRP sheets). The largest difference of confined concrete strength between the FE results and the

experimental results is %16. Average difference of confined concrete strength between the FE results and the experimental results is %8.

In the fifth chapter, experimental and numerical results of this thesis are both summarized.

1. GİRİŞ

Sargılı betonun davranışı, literatürde her zaman popüler bir konu olmuştur. Yıllarca çeşitli araştırmacılar tarafından üzerinde çalışılmıştır. 20. yy. başlarında düşük dayanımlı betonların çelik donatı ile sargılanma davranışın incelenmesiyle başlayan süreç, yapı malzemelerindeki hızlı gelişim ile günümüzde betonun çelik tüp ile ya da lifli polimer kompozitler ile sargılanmasına kadar ulaşmıştır. Bu süreçte sargılama malzemelerindeki gelişimin yanında beton teknolojisindeki gelişim de üretilen betonların daha yüksek dayanımlı, daha yüksek şekildeğiştirme kapasiteli ve daha yüksek kırılma enerjisine sahip olmalarını sağlamıştır. Son 20 yılda genelde düşük ve normal dayanımlı betonun yukarıda belirtilen sargılama malzemeleri ile olan sargılama davranışını inceleyen deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Ancak günümüzde yenilikçi bir teknoloji olan ve düşük ya da normal dayanımlı betonlara göre birçok avantajı bulunan ultra-yüksek dayanımlı betonların LP ile sargılanmasına ait çalışmalar literatürde fazla bulunmamaktadır.

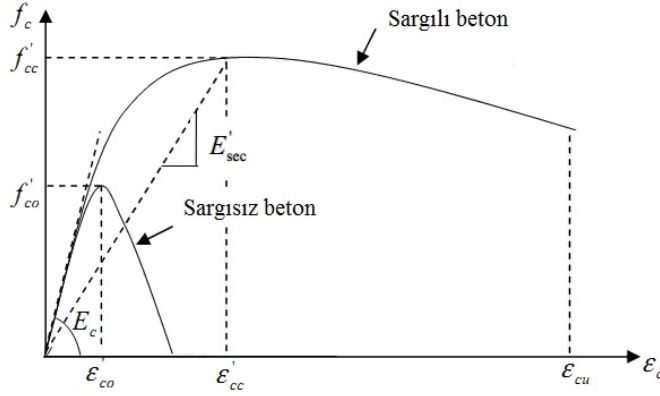
1.1 Literatür Özeti

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaları iki bölümde sınıflandırabiliriz:

- Deneysel çalışmalar
- Teorik çalışmalar

Deneysel çalışmalardaki araştırmacılar konu başlıkları olarak lifli polimer sargılı betonun eksenel yük altındaki davranışı, çevrimsel yük altındaki davranışı, lifli polimer ve beton malzemesinin mekanik özelliklerinin davranışa etkisi ve lifli polimerin betonun ya da mevcut betonarme elemanların dayanım ve sünekliğine katkısını incelemişlerdir. Teorik çalışmalarda ise deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların analitik olarak gerçeklemesi üzerine yoğunlaşmıştır. Geleneksel betonarme kolonların sargılama davranış modellerini lifli polimer sargılı elemanlar üzerinde uygulamışlar ve sonuçları deney sonuçları ile kıyaslamışlar ve yeni sargılama modelleri önermişlerdir.

Saadetmanesh ve diğ. (1994) yaptıkları çalışmada sargı donatısı açısından yetersiz kolonların LP ile sargılanmasının kolon dayanımına ve sünekliğine etkisini araştırmışlardır. Mander ve diğ. (1988) tarafından geleneksel betonarme elemanlar için önerilen modeli (Şekil 1.1) LP sargılı elemanlar için uygulamışlardır. Karbon ve



Şekil 1.1 : Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.

cam katkılı LP sargının kare ve dairesel kolonlarda dayanım ve sünekliği büyük oranda arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Mirmiran ve Shahawy (1997a) yaptıkları deneysel çalışmada toplam 24 adet LP kolonu aksel basınç altında test etmişlerdir. Numuneleri sargısız betonun dayanımına göre 3 gruba ayırmışlar (30.9 MPa, 29.6 MPa, 32.0 MPa) ve bu 3 grup kolonu 3 ayrı sargı kat adedi ile sargılamışlardır (6,10,14). Davranışı farklı sargı kat adedi ve farklı beton dayanımına göre gerilme-eksenel şekildeğiştirme/hacimsel şekildeğiştirme açısından incelemişlerdir.

Samaan ve diğ. (1998) çelik donatı ile sargılanmış kolonlar için önerilen tasarım modellerinin LP sargılı kolonların performansını gerçeğin çok üstünde hesapladığını belirterek LP sargılı beton için bir analitik model önermişlerdir. Mirmiran ve Shahawy (1997) tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarını kullanarak yeni bir sargılama modeli önermişlerdir. Bu modelde sargılı betonun dayanımını ve bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirme değerini Denklem 1.1 ve Denklem 1.2 ile

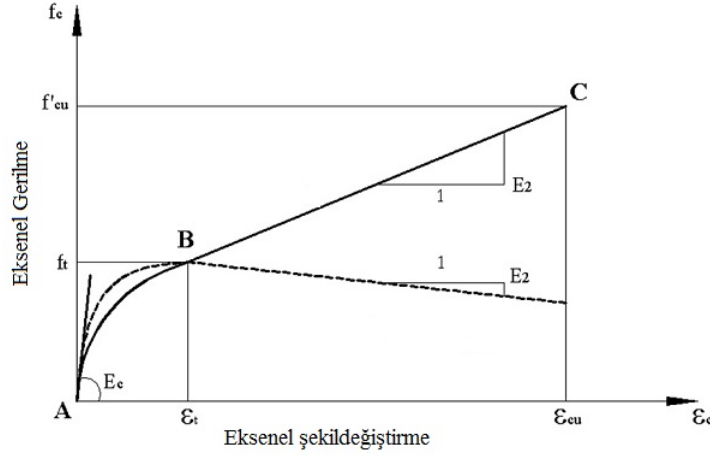
$$f_{cc} = f_c + 6.0 f_r^{0.7} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_{cc} = (f_{cc} - f_o / E_2) \quad (1.2)$$

ifade etmişlerdir. Bu ifadelerde f_{cc} sargılı betonun dayanımı, f_{co} sargısız betonun dayanımı, f_r yanal sargılama basıncı, ε_{cc} sargılı betonun dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme, f_o sargısız beton ile sargılama basıncının bir fonksiyonu, E_2 ise bilineer gerilme-şekildeğiştirme ilişkisindeki ikinci eğimdir. Modelin dayanım ve şekildeğiştirme tahmin performansını çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslayarak kontrol etmişlerdir.

Shahawy ve diğ. (2000) yaptıkları çalışmada karbon sargılı beton kolonları hem deneysel hem de teorik açıdan incelemişlerdir. 45 adet normal ve yüksek dayanımlı beton kolon 5 farklı sargı kat sayısı ile sargılanarak eksenel basınç altında test edilmiştir. Deneysel çalışmaya ilaveten sonlu elemanlar paket programı kullanılarak Drucker-Prager plastisitesi ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Çalışmalarında sargılamanın betonun yanal genişlemesini engelleyerek dayanım ve sünekliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak araştırmacılar DP plastisitesini kullanarak oluşturdukları sonlu elemanlar modelinin deney sonuçları ile tutarlı olduğunu belirtmişler, fakat lifli polimer sargılı betonun davranışının daha iyi bir yaklaşımla elde edilebilmesi için modelde sargılı betonun dilatasyon davranışını gözönüne almasının gerekliliğini ifade etmişlerdir.

Youssef ve diğerleri (2006), 87 adet narin kolon ve 30 adet kısa kolon üzerinde yaptıkları deneysel ve teorik çalışmada karbon ve cam katkılı lifli polimer ile sargılı beton için gerilme-şekildeğiştirme modeli önermişlerdir. Önerdikleri modelde sargılama oranı aralığını geniş tutarak modelin uygulama alanını arttırmayı amaçlamışlardır. Bu doğrultuda düşük sargılama oranına sahip kolonlar için ikinci eğimi negatif olan bir gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı, normal ve yüksek sargılama oranına sahip kolonlar için ikinci eğimi pozitif olan bir gerilme-şekildeğiştirme davranışını önermişlerdir (Şekil 1.2). Modelde daire ve kare enkesitli kolonlar için gerilme-şekildeğiştirme davranışını Samann ve diğ. (1998) tarafından önerilen modele göre daha etkili bir şekilde tahmin edebilmişlerdir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi araştırmacılar modelin tahmin performansını mevcut deney sonuçları ile kıyaslayarak kontrol etmişlerdir.



Şekil 1.2 : LP sargılı beton modeli (Youssef ve diğ.,2006).

Eid ve diğerleri (2009) ortalama basınç dayanımları 31.1 MPa ile 107.7 MPa arasında değişen beton karışımlarının kullanarak ürettikleri 36 adet kısa ve narin kolonu eksenel basınç altında test etmişlerdir. 3 ayrı sargı kat adedi kullanmışlardır. Kolon numunelerini sargı donatılı ve sargı donatısız olarak ikiye ayırarak mevcut sargı donatısının LP sargılı beton davranışına katkısını incelemişlerdir. Deney sonuçlarını sargısız beton dayanımına, sargı donatısının hacimsel oranına, mekanik özelliklerine ve LP sargı kat sayısına göre yorumlamışlardır. Sonuç olarak normal dayanımlı betondan üretilen kolon numunelerinde yüksek dayanımlı betondan üretilenlere oranla daha iyi bir dayanım ve süneklilik artışı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar, hesaplarda mevcut yatay sargı donatısının LP sargılı betonun davranışına etkisinin gözönüne alınması gerekliliğini belirtmişlerdir.

Zohrevand ve Mirmiran (2011) yaptıkları deneysel çalışmada normal ve yüksek dayanıma sahip betonlara göre üstün özellikleri bulunan ultra-yüksek dayanımlı betonların lifli polimer ile sargılanma davranışlarını incelemişlerdir. Ürettikleri hacimce %2 çelik tel oranına sahip ve 28 günlük basınç dayanımı 189 MPa olan 16 adet daire en kesitli kolonları farklı sargı kat sayıları ile CFRP ve GFRP malzemeyeyle sargılayarak eksenel basınç altında test etmişlerdir. Tüm numunelerde güç tükenmesi lifli polimer malzemenin kolon orta bölgesinde yırtılmaya başlamasıyla oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Dayanım kapasitesindeki en büyük artış %98, şekildeğiştirme kapasitesindeki en büyük artış %195 olarak bulmuşlardır. Deney sonuçlarını literatürde normal dayanıma sahip betonlar için önerilen sargılama modelleri ile

kıyaslamışlardır. Genel olarak, tüm sargılama modellerinde lifli polimer t p kalınlığının artmasıyla birlikte tahmin performansının düştüğünü belirtmişlerdir.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu yüksek lisans tezinin amacı LP sargılı ultra-yüksek dayanımlı betonların eksenel basınç altındaki sargılama davranışının daire en kesitli kolonlarda, eksenel gerilme-şekildeğiştirme açısından deneysel ve teorik olarak incelemektir. Deneysel çalışmada lifli polimerin sargılandığı kolonlarda sağladığı dayanım ve süneklik artışı araştırılmıştır ve mevcut sargılama modellerinin deney sonuçlarının tahmin performansı irdelenmiştir. Teorik çalışmada ise sonlu elemanlar metodu kullanılarak deneysel çalışmayı tamamlayıcı bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

2. GENEL BİLGİ

2.1 Ultra Yüksek Dayanımlı Betonlar

Beton, agrega, çimento ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Hammaddesinin doğada kolay ve bol miktarda bulunması, servis ömrünün uzun olması, dayanım ve maliyet açısından uygun bir malzeme olması betonu dünyanın en yaygın kullanılan yapı malzemesi yapmıştır. Son yıllarda inşaat mühendisliğindeki gelişmeler, yapı malzemelerinin üretiminde yeni yaklaşımların oluşmasına ve betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların yapılmasının sağlamıştır.

Yüksek ve ultra-yüksek dayanımlı yalın betonların en büyük sorunu gevrekliktir. Basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük bu malzemelere çelik tel katılması ile yüksek basınç dayanımının yanında yüksek süneklik de elde edilebilir. Ayrıca bu tür betonlarda çok ince agrega kullanılarak matristeki mikro boşluklar azaltılır. Böylece normal betonlarda kullanılan rijit agrega tanelerinin matris boyunca oluşturduğu boşluklar tane çapının azaltılmasıyla ortadan kaldırılır. Bu düzenleme ile betonun porozitesi azaltılarak çevresel etkilere karşı direnci arttırılmaktadır. Böylelikle reaktif pudra betonu için homojen yapı, düşük boşluk oranı ve güçlendirilmiş çimento yapısı diğer betonlara göre en büyük avantajı haline gelmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalarda, üretilen ultra-yüksek dayanımlı sünek kolonların basınç dayanımları 200 MPa'ın üzerine çıkmakta, çekme dayanımları 25 MPa ile 150 MPa arasında değişmekte ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000J/m² değerine ulaşmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1994).

Tanım olarak reaktif pudra betonları, ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliğe ve aşırı derecede düşük geçirimsiliğe sahip ultra-yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir (Matte ve Moranville, 1999). Reaktif pudra betonları bu avantajlı özellikleri ile deprem sonrası yapıların güçlendirilmesinde, stratejik yapılarda ve hasar görmemesi istenen köprü, tünel tipi yapılarda kullanılabilir.

Reaktif pudra betonları sahip olduğu avantajlı özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir (Taşdemir ve Bayramov, 2003):

- Karışımındaki bütün tanelerin dağılımının hassas bir biçimde ayarlanarak en uygun matrisin elde edilmesi
- Agregatanelerinin boyutunun küçültülerek betonun homojenliğinin sağlanması
- Betondaki su miktarının azaltılması
- Yüksek inceliğe sahip silis dumanının karışımda kullanılması
- Beton bileşenlerinin optimum bileşimi
- Betonun sünekliği için çelik tellerin kullanımı

Reaktif pudra betonlarında, su/çimento oranı 0.20 değerinin altındadır. Su/çimento oranının düşük olmasından dolayı azalan işlenebilirlik, yeni nesil süper akışkanlaştırıcıların fazla kullanımı ile sağlanmaktadır.

Betonda çelik tel kullanımının başlıca yararları Taşdemir ve diğerleri (2003) tarafından 5 madde halinde sıralanmıştır. Bunlar:

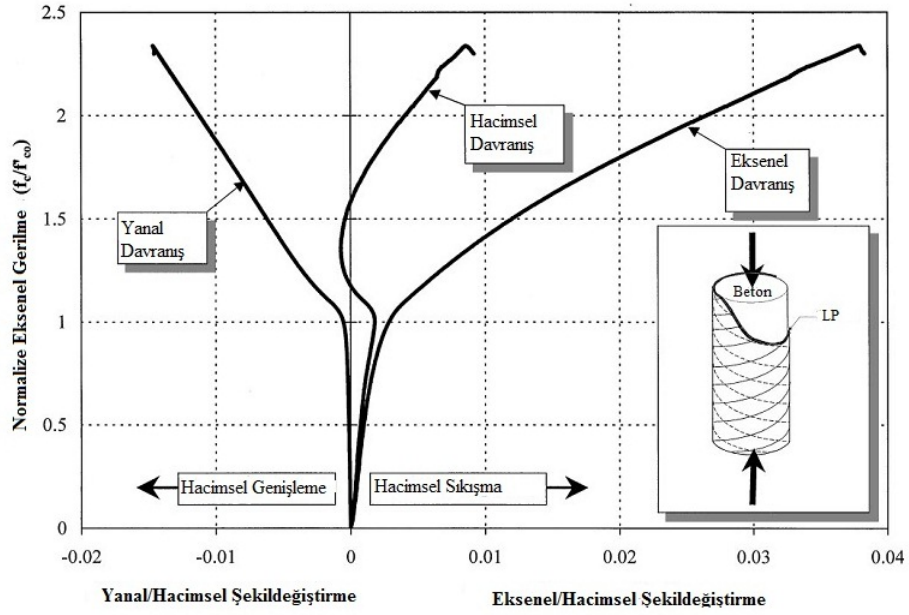
- 1) Yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton
- 2) Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi
- 3) Etkin çatlak kontrolü
- 4) Dayanıklılık
- 5) Donatı işçiliğindeki belirgin azalmadır.

Çelik teller beton içinde yüzey ve kenarlara homojen olarak dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında, hidrasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik teller karşı koyar, böylelikle rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir.

2.2 Lifli Polimer ile Sargılanmış Kolonların Genel Davranışı

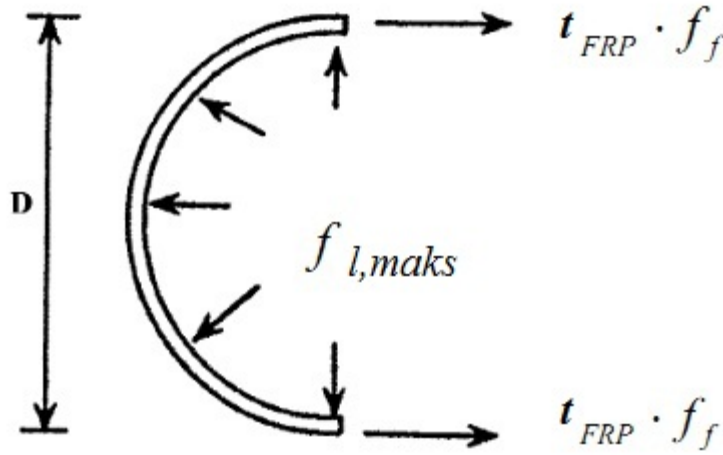
Lifli polimer sargılı kolonların tipik gerilme-eksenel/hacimsel şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1’de de görüldüğü üzere gerilme eksenel gerilme

ve eksenel/yanal şekildeğiştirme ilişkisi bilineer davranış göstermektedir. Her iki davranışta ilk kol sargısız beton dayanımına erişene kadar



Şekil 2.1 : LP sargılı betonun tipik davranışı(Mirmiran ve diğ,2000).

devam eder. Bu bölgede henüz lifli polimer etkin değildir ve davranış sargısız betonun davranışına benzerdir. Lifli polimerin aktif hale gelmesiyle birlikte oluşan ikinci kol ise lifli polimer malzemenin rijitliğine bağlı olarak şekillenir. Sargı malzemesi ve beton arasında tam aderansın sağlanması şartıyla sargılanmış kolon elemanın eksenel yük taşıma kapasitesine ulaşmasıyla birlikte sargı malzemesi de dayanımına ulaşmış olur. LP’de yırtılmalar başlar ve sistem güç tükenmesi durumuna erişir. Lifli polimerde oluşacak çekme gerilmeleri betonun yanal şekildeğiştirmesi ile ilişkilidir. Beton en büyük yanal şekildeğiştirmeyi eksenel dayanımına eriştiği anda yapmaktadır. Bu durumda daire en kesitli LP sargılı sistemde denge denklemi yazılarak lifli polimer tarafından uygulanan en büyük yanal sargılama basıncının değeri hesaplanabilir. Bu duruma ait denge hali Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Sargılı betona ait serbest cisim diyagramı.

Lifli polimer üzerinde oluşan çekme gerilmeleri f_f Denklem 2.1 ile ifade edilebilir. Burada, E_{FRP} LP'nin elastisite modülü, ε_f ise LP'ye ait kopma birim şekildeğiştirme değeridir. Denge hali kullanılarak LP sargının birim boy genişliği için $f_{l,maks}$ sargı basıncı Denklem 2.2 ile hesaplanır.

$$f_f = E_{FRP} \varepsilon_f \quad (2.1)$$

$$f_{l,maks} = \frac{2t_{FRP} f_f}{D} \quad (2.2)$$

LP sargılı numunelerde eksenel gerilme-hacimsel şekildeğiştirme ilişkisi hacimsel genişleme başlayana kadar eksenel ve yanal şekildeğiştirme davranışına benzerdir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere LP sargılı beton, sargısız beton dayanımına ulaşana kadar hacimsel sıkışma gerçekleşmektedir. Sargısız beton dayanımına ulaştıktan sonra ise hızlı bir şekilde hacimsel genişleme başlamaktadır. Bu hacimsel genişlemeyi sınırlayan LP sargıdır. Sargının aktifleşmesiyle birlikte hacimsel genişleme tersine dönerek hacimsel sıkışma başlar. Bu durum LP yırtılincaya kadar devam eder. Hacimsel şekildeğiştirme ε_v Denklem 2.3 ile hesaplanabilir.

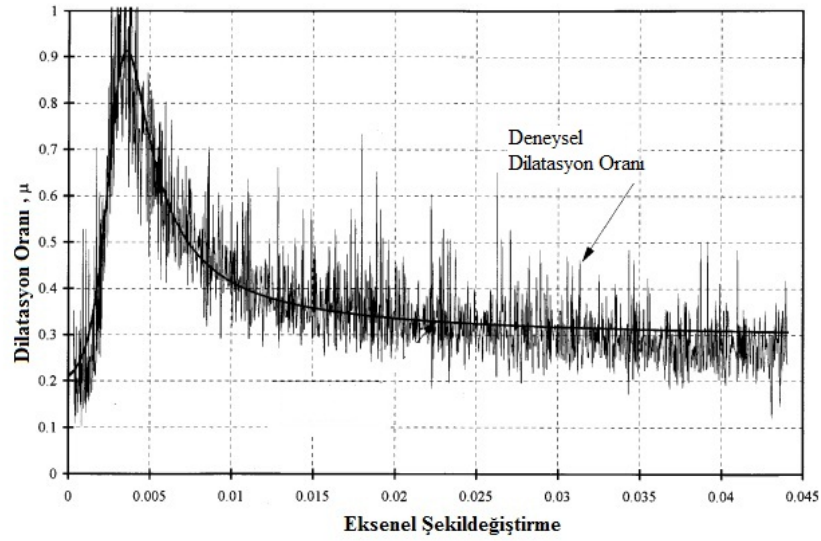
$$\varepsilon_v = \varepsilon_c + 2\varepsilon_r \quad (2.3)$$

Burada ε_c eksenel şekildeğiştirmeyi, ε_r ise yanal şekildeğiştirmeyi ifade etmektedir. Hacimsel genişleme davranışı dilatasyon oranı ile daha iyi ifade edilebilir (Mirmiran

ve Shahawy, 1997b). Deneysel olarak dilatasyon oranı ardışık iki kayıttan okunan yanal şekildeğiştirme değerlerinin farkının yine aynı iki kayıttan okunan eksenel şekildeğiştirme değerlerinin farkının oranlanmasıyla bulunabilir (Denklemler 2.4).

$$\mu_{\text{exp}} = \frac{\Delta \varepsilon_r}{\Delta \varepsilon_c} = \frac{\varepsilon_{r,\text{yeni}} - \varepsilon_{r,\text{eski}}}{\varepsilon_{c,\text{yeni}} - \varepsilon_{c,\text{eski}}} \quad (2.4)$$

Şekil 2.3'te LP sargılı betona ait tipik dilatasyon oranı-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : LP sargılı betona ait tipik dilatasyon oranı-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi(Mirmiran ve Shahawy,1997b).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında karbon, cam ve aramid katkılı lifli polimer ile sargılanmak üzere 36 adet, kontrol numunesi olarak 6 adet olmak üzere 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde toplamda 42 adet daire en kesitli ultra yüksek dayanımlı beton kolon üretilmiştir. Üretim 100 mm çapındaki plastik borular kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beton karışımında çimento olarak CEM I PC 42.5R kullanılmıştır. Bu çalışmada iki tip çelik tel kullanılmıştır. İki ucu kancalı olan Dramix ZP 305 30 mm boyunda 0.55 mm çapındadır ve çekme dayanımları yaklaşık olarak 1100 MPa'dır. İki ucu kancasız olan OL6/16 tipi çelik teller ise 6 mm boyunda ve 0.16 mm çapında olup çekme dayanımları 2250 MPa'dır. Karışımda kullanılan çelik telin hacimce oranı %6'dır. Karışımda dane boyutu 0.5 ile 1.5 mm arasında değişen silis kumu ve dane boyutu 0 ile 0.5 mm arasında değişen ince silis kumu kullanılmıştır. Karışıma ait reçete Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kolon numuneleri

Çizelge 3.1 : Beton karışım oranları.

Malzeme	1 m ³ Beton İçin (kg)
Çimento	1000
Silis Kumu(0.5-1.5 mm)	251
İnce Silis Kumu(0-0.5 mm)	377
Silis Dumanı	250
Akışkanlaştırıcı	31.75
Su	230
Çelik Tel (Dramix ZP)	150
Çelik Tel (OL6/16)	350
TOPLAM	2639.75

üretildikten sonra 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numunelere, kalıptan çıkartıldıktan sonra 90 °C'de buhar kürü 4 gün boyunca uygulanmıştır. Buhar kürünün ısıtma hızı 11°C/saat olarak ayarlanmıştır. Kür işlemi tamamlandıktan sonra numuneler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi

tamamlandıktan sonra numunelerin yüzeyleri temizlenerek sargılama işlemine hazır hale getirilmişlerdir. Numunelere başlık yapılmamış, üst ve alt yüzeyde aşındırma işlemi yapılarak yüzeyler düzleştirilmiştir. Hazırlanan beton numuneleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Beton ile lifli polimer malzemesi arasındaki tam aderansı sağlamak



Şekil 3.1 : Beton silindir numuneler.

amacıyla Hexion şirketi tarafından üretilen L285 adlı epoksi reçinesi kullanılmıştır. Reçine beton numunelerinin çevresine ve lifli polimer malzemenin iç yüzeyine homojen olarak Şekil 3.2’de görüldüğü gibi uygulanmıştır. Sargılama işlemine



Şekil 3.2 : Epoksi uygulaması.

geçilerek beton numuneler 3 ayrı LP malzeme (karbon, cam, aramid) ile sarılmıştır. LP malzemenin betonun dayanım ve sünekliliğine etkisini gözlemlemek amacıyla sargılama işlemi her bir LP malzemesi için 2, 3, 4 ve 5 kat olarak uygulanmıştır. Son katlarda numune çapı kadar (10 cm) bindirme yapılmıştır. Her bir sargı kat sayısı için üçer adet numune oluşturulmuştur. Silindirlerin sargılama işlemi ve sargılanmış numuneler Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Sargılanmış numuneler oda sıcaklığında 1 hafta bekletilerek epoksi reçinesinin yeterli miktarda sertleşmesi sağlanmıştır.

Çizelge 3.2’de deneysel çalışmada kullanılacak numunelerin malzeme tipi, sargılama sayısı ve geometrik özellikleri verilmiştir. Karbon katkılı polimer ile sargılanan numuneler “C” simgesiyle, cam katkılı polimer ile sargılanan numuneler “G” simgesiyle, aramid katkılı polimer ile sargılanan numuneler “A” simgesiyle gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Beton numunelerin sargılama işlemi ve sargılanmış numuneler.

Çizelge 3.2 : Numune özellikleri.

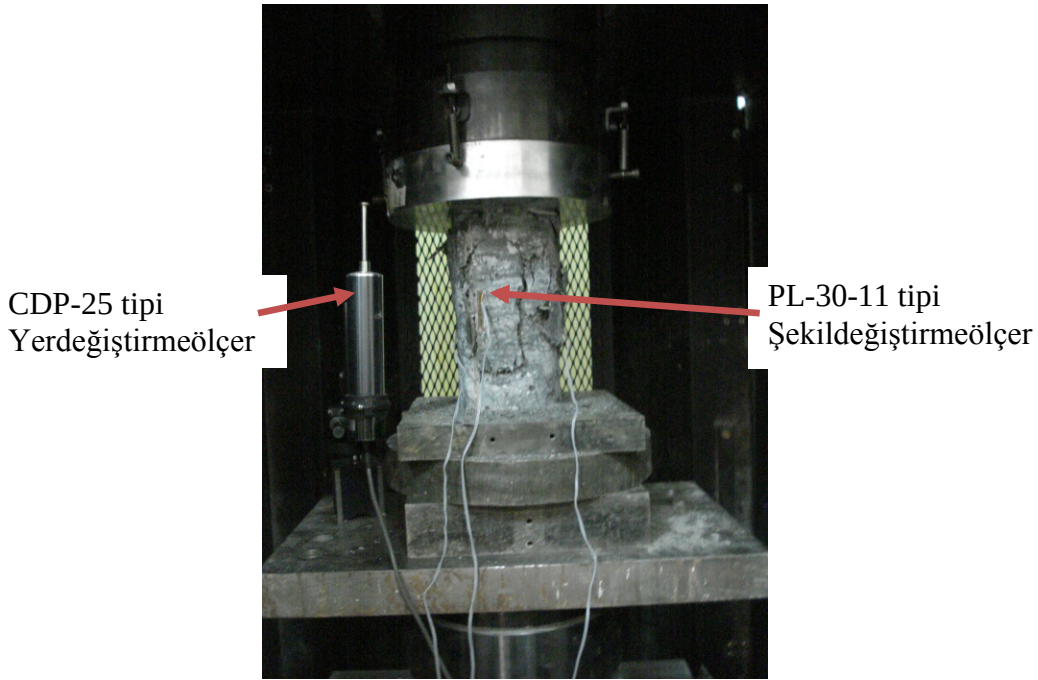
Numune Adı	Adet	D (mm)	h (mm)	Sargılama Sayısı
C2	3	100	200	2
C3	3			3
C4	3			4
C5	3			5
G2	3	100	200	2
G3	3			3
G4	3			4
G5	3			5
A2	3	100	200	2
A3	3			3
A4	3			4
A5	3			5

3.2 Malzeme Özellikleri

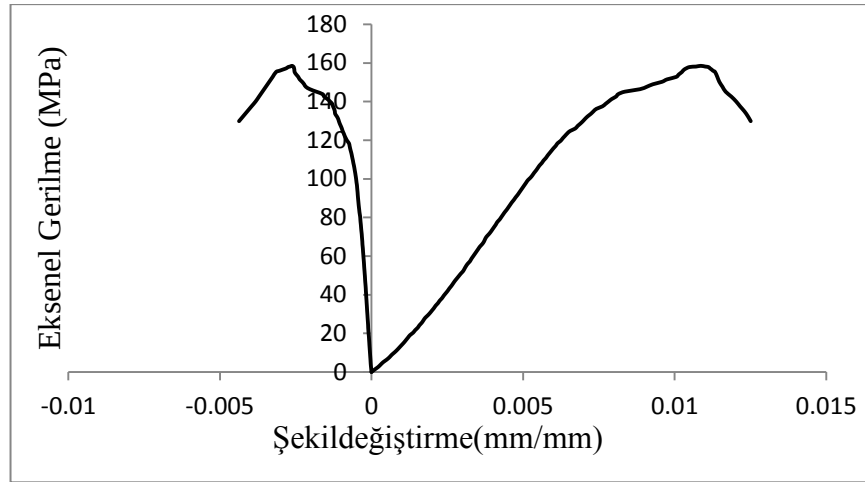
3.2.1 Beton

Üretilen 6 adet silindirik beton numunesi eksenel basınç altında test edilerek mekanik özellikler belirlenmiştir. Testler İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı’nda yapılmıştır. Ölçümlerde 1 adet yatay doğrultuda 2 adedi ise düşey doğrultuda olmak üzere 3 adet PL-30L-11 tipi şekildeğiştirme ölçerler ile şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Ölçülen

şekildeğiştirmeleri kontrol amacıyla CDP25 tipi doğrusal yerdeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Deney sırasında numunelerde tepe yüküne çıkana kadar mikro çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Tepe yüküne eriştikten sonra numuneler kırılğan bir davranış göstererek hızlı bir şekilde güç tükenmesine ulaşmışlardır. Numunelerde hacimce %6 oranında çelik tel bulunması betonun sünekliğine katkıda bulunmuş ve tepe yüküne ulaştıktan sonra çok sayıda mikro çatlakların oluşmasını sağlamıştır. Deney esnasında her bir 20 kN'luk yüke karşılık gelen eksenel ve yanal şekildeğiştirme değerleri okunmuştur. Tüm numunelerden alınan değerler kullanılarak betona ait gerilme-şekildeğiştirme eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri kullanılarak betona ait elastisite modülü hesaplanmıştır. Elastisite modülü hesaplanırken ortalama basınç dayanımının %33'üne kadar olan grafiğin eğiminden yararlanılmıştır. Betonun elastisite modülü 34 GPa olarak elde edilmiştir. Deney sonucunda betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı 159 MPa bulunmuştur. Betonun mekanik özelliklerinin belirlendiği deney düzeneği Şekil 3.4'te, betona ait gerilme-şekil değıştirme ilişkisi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Sargısız betona ait deney düzeneği.



Şekil 3.5 : Betona ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.

3.2.2 Lifli polimer

Lifli polimer malzeme özelliklerinin betonun dayanım ve sünekliğine etkisini gözlemlemek amacıyla karbon, cam ve aramid olarak 3 farklı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin ticari adları sırasıyla HTA40, Hybon 2026 ve HM Aramid'tir. LP malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

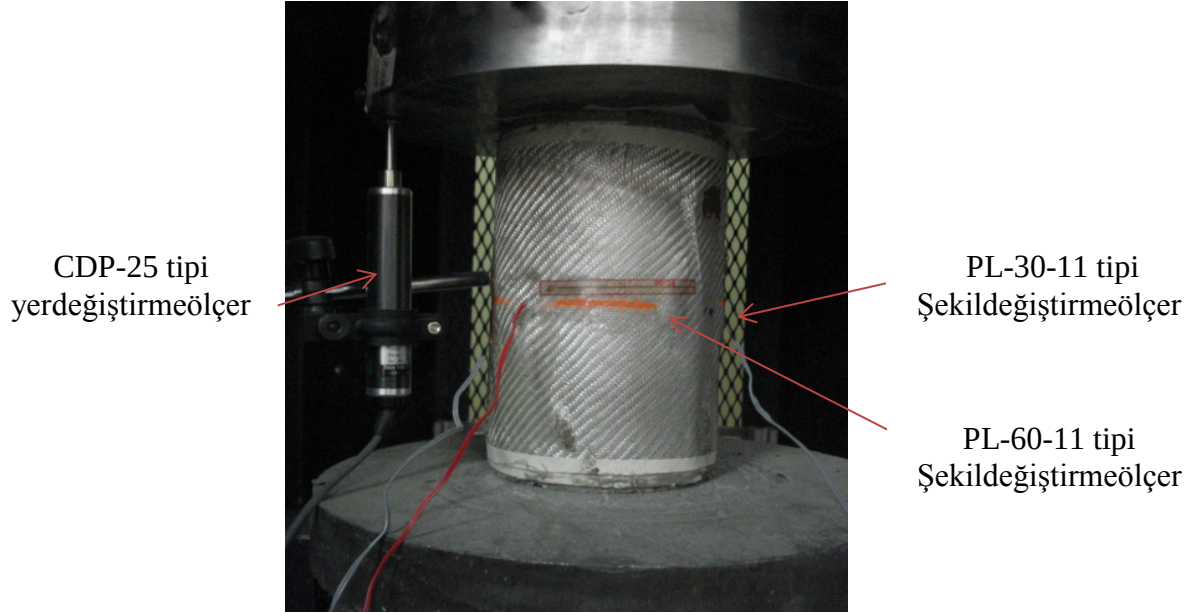
Çizelge 3.3 : LP malzemelerin mekanik özellikleri

	CFRP	GFRP	AFRP
Çekme Dayanımı(MPa)	3950	2790	2926
Çekme Elastisite Modülü (GPa)	238	82.7	110
Kopma Uzaması(%)	1.7	3.2	2.5
Yoğunluk (g/cm ³)	1.76	2.6	1.44
Kalınlık (mm)	0.35	0.35	0.32

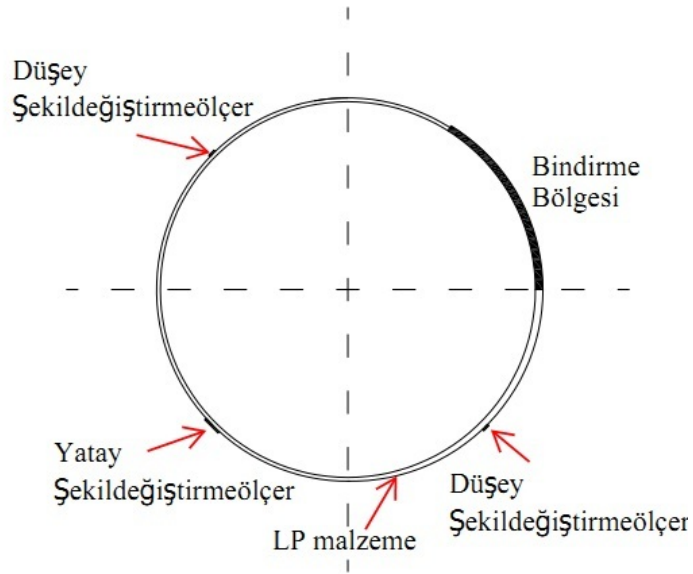
3.3 Deney Düzenekinin Kurulması

Deneyler İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda 5000 kN kapasiteli Instron cihazında yapılmıştır. Yükleme monotonik olarak 0.01 mm/s hızında yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Eksenel yük ve şekildeğiştirmeler 20 kN'luk aralar ile okunmuştur. Eksenel yerdeğiştirmeler 1 adet 25 mm ölçüm kapasiteli CDP-25 yerdeğiştirme ölçer ile ölçülmüştür. Eksenel ve enine şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla her bir numunede 3 adet şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Bunlardan PL-30-11 tipi 30 mm ölçüm uzunluğu olan 2 adet şekildeğiştirmeölçer eksenel doğrultuda 180° ara ile yapıştırılmıştır. PL-60-11 tipi 60 mm ölçüm uzunluğu olan

şekildeğiştirme ölçer enine doğrultuda kolonun orta bölgesine yapıştırılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.6’da, şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Sargılı betona ait deney düzeneği.



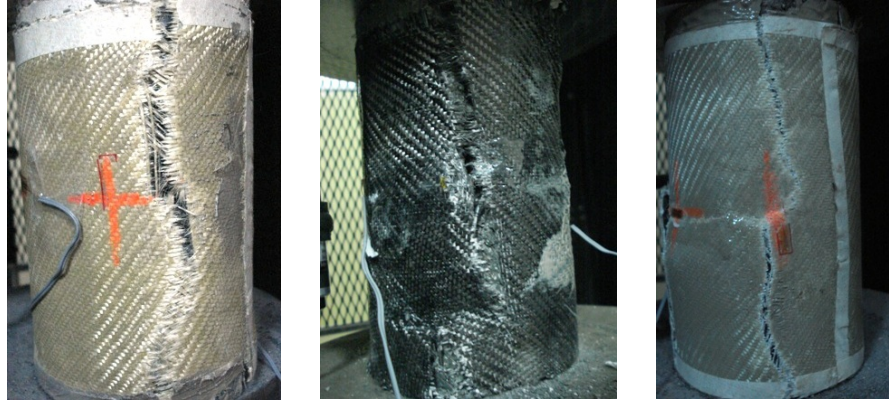
Şekil 3.7 : Şekildeğiştirmeölçerlerin yerleşimi.

Şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmadan önce ölçümlerin alınacağı bölgeler zımpara ile temizlenmiş ve epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılarak pürüzsüz hale getirilmiştir.

Şekildeğiştirme ölçerler ve yerdeğiştirme ölçerinin aldığı veriler TDS-302 tipi veri toplayıcı ile bilgisayara ortamına aktarılmıştır.

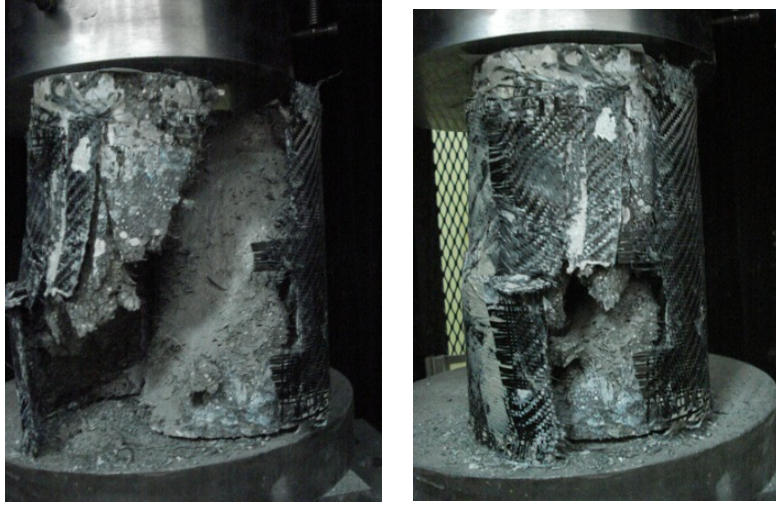
3.4 Deney Sonuçları

Deney kapsamında tüm numuneler güç tükenmesine ulaşana kadar monotonik artan eksenel basınca maruz bırakılmıştır. GFRP sargılı numuneler CFRP ve AFRP sargılı numunelere göre daha sünek bir davranış göstermişlerdir. GFRP sargılı numuneler tepe yüküne ulaştıktan sonra bir miktar dayanım kaybedip yavaşlamış, ardından hızlı bir şekilde güç tükenmesi durumuna ulaşmışlardır. Buna rağmen CFRP ve AFRP ile sargılanmış numuneler tepe yüküne ulaştıktan sonra hızlı bir şekilde yük taşıma kapasitelerini kaybederek güç tükenmesi durumuna ulaşmışlardır. Güç tükenmesi durumu tüm numunelerde çatlak oluşumu ve patlama ile gerçekleşmiştir. CFRP sargılı numunelerde patlama diğer numunelere göre daha şiddetli gerçekleşmiştir. Tüm numunelerde patlama öncesi oluşan yırtılma bindirme bölgesinin dışında gerçekleşmiş ve kolon orta bölgesinde başlayıp kolon alt ve üst ucuna devam etmiştir. GFRP, CFRP ve AFRP sargılı numunelere ait göçme modları sırasıyla Şekil 3.8’de gösterilmiştir. 5 kat sargılı CFRP numunelerde ise normal kuvvet



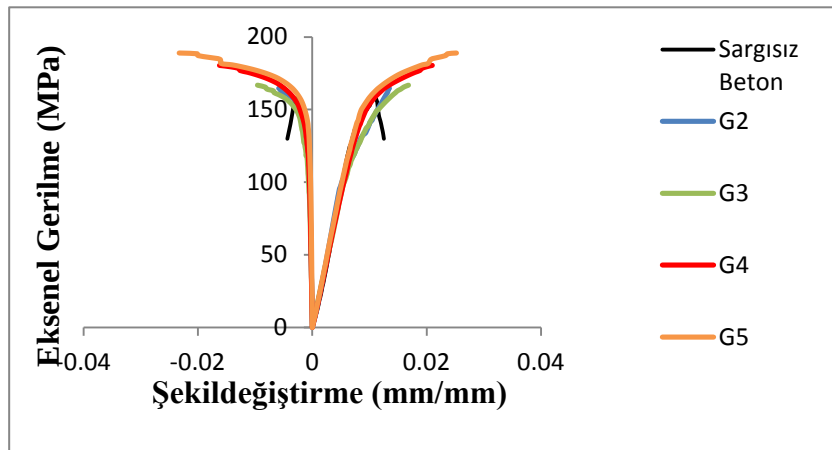
Şekil 3.8 : Göçme modları.

kapasitesinin artıştıktan dolayı çatlak derinliği ve genişliğinin diğer numunelere göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. (Şekil 3.9)

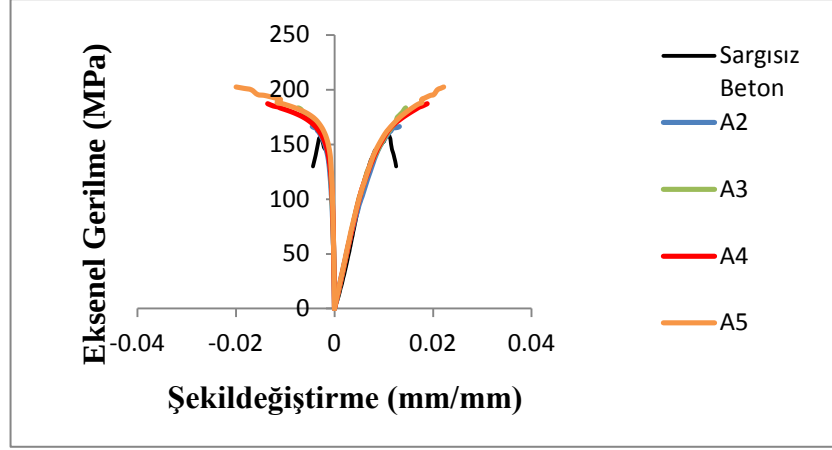


Şekil 3.9 : 5 kat CFRP sargılı numuneye ait göçme modları.

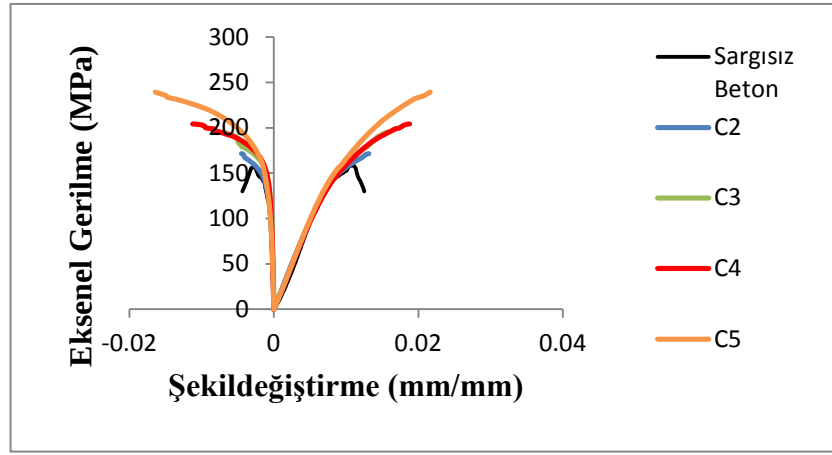
Numunelerin aksenal basınç gerilmesi altındaki şekil değiştirme davranışları Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir. LP ile sargılanmış UYDB numuneler üç ayrı bölgede bilineer bir gerilme-şekildeğiştirme davranışı göstermektedir. Birinci bölge sargısız UYDB’nin davranışına benzerdir. Bu bölgede UYDB'nin dilatasyon miktarının düşük olmasından dolayı LP aktif değildir. Mikro çatlakların artmasıyla birlikte beton çekirdeğin dilatasyonundaki artış ile bir geçiş bölgesi oluşur LP aktif hale gelir. Üçüncü bölge ise LP'nin tam aktif hale gelerek UYDB'nin dilatasyon eğilimine karşı koyduğu bölgedir ve bu bölgedeki davranış büyük oranda LP'nin özelliklerine bağlıdır (Zohrevand ve Mirmiran,2011).



Şekil 3.10: GFRP sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.



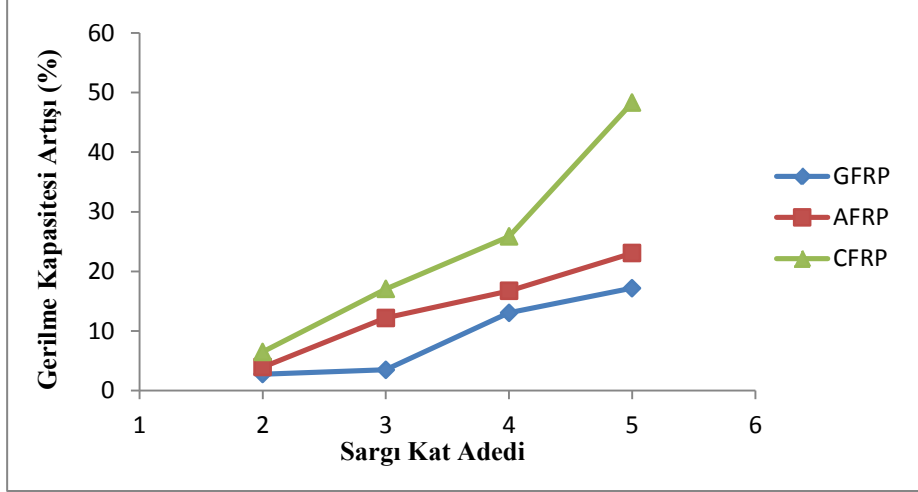
Şekil 3.11: AFRP sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.



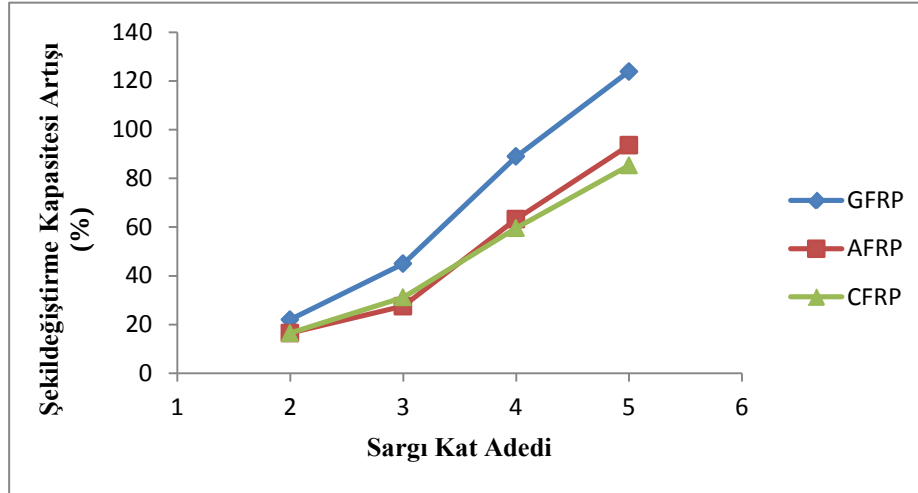
Şekil 3.12: CFRP sargılı numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri.

Gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinden görüldüğü üzere LP sargı, beton çekirdeğin çevresinde yanal sargılama basıncı oluşturarak betonun eksenel dayanım ve eksenel şekildeğiştirme kapasitesini arttırmaktadır. Bu artış özellikle 3,4 ve 5 kat sargılı numunelerde daha belirgin olarak görülmüştür. 2 kat sargılı numunelerde dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesindeki artış sargısız betona kıyasla sırasıyla %3-6 ile %17-22 aralığında gerçekleşmiştir. 5 kat sargılı numunelerde ise bu artışlar sırasıyla %17-48 ile %85-124 aralığında gerçekleşmiştir. Bu da bize göstermektedir ki sargılama oranının artması hem eksenel yük taşıma kapasitesini hem de şekildeğiştirme kapasitesini artırmaktadır. Tüm numunelerde şekildeğiştirme kapasitesindeki artışın eksenel yük taşıma kapasitesindeki artışa oranla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. En büyük dayanım artışı sargısız betona kıyasla %48 olarak gerçekleşirken

şekildeğiştirme kapasitesindeki en büyük artış %124 olarak gerçekleşmiştir. Sargı kat adedi-eksenel gerilme kapasitesi artışı ve sargı kat adedi-eksenel şekildeğiştirme kapasitesi artışı sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Gerilme kapasitesi artışı-sargı kat adedi ilişkisi.



Şekil 3.14 : Şekildeğiştirme kapasitesi artışı-sargı kat adedi ilişkisi.

Numunelerden GFRP ile sargılanmış olanlar daha sünek davranış göstermişlerdir. Bunun sebebinin GFRP malzemenin daha yüksek şekildeğiştirme kapasitesine sahip olması söylenebilir. Buna karşılık CFRP ile sargılanmış numuneler diğer numunelere göre daha az sünek davranmışlardır. Numunelere ait deney sonuçları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Numunelere ait deney sonuçları.

Numune	f_{cc} (MPa)	f_{co} (MPa)	$f_{l,a}$ (MPa)	Sargılama Oranı($f_{l,a}/f_{co}$)	ε_{cc}	ε_{co}	$\varepsilon_{h,rup}$	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}}$
Beton	-	159	-	-	-	0.0109	-	-	-
G2	162.89	-	11.46	0.07	0.0133	-	0.0099	1.03	1.22
G3	164.04	-	22.23	0.14	0.0158	-	0.0128	1.03	1.45
G4	179.19	-	44.00	0.28	0.0206	-	0.0190	1.13	1.89
G5	185.72	-	77.57	0.49	0.0244	-	0.0268	1.17	2.24
A2	164.76	-	12.11	0.08	0.0127	-	0.0086	1.04	1.17
A3	177.83	-	21.33	0.13	0.0139	-	0.0101	1.12	1.28
A4	185.00	-	41.11	0.26	0.0178	-	0.0146	1.17	1.63
A5	195.06	-	69.70	0.44	0.0211	-	0.0198	1.23	1.94
C2	168.79	-	24.66	0.16	0.0127	-	0.0074	1.06	1.17
C3	185.51	-	43.48	0.27	0.0143	-	0.0087	1.17	1.31
C4	199.47	-	82.63	0.52	0.0174	-	0.0124	1.26	1.60
C5	235.04	-	126.89	0.80	0.0202	-	0.0152	1.48	1.85

Çizelgede f_{co} sargısız betona ait 28 günlük ortalama basınç dayanımını, ε_{co} bu basınç dayanımı altında elde edilen eksenel şekildeğiştirmeyi, f_{cc} sargılı numunelere ait basınç dayanımını, ε_{cc} ise bu basınç dayanımı altında elde edilen eksenel şekildeğiştirme değerini göstermektedir. Tabloda numunelere ait yanal sargılama basıncı değerleri ve sargılama oranları da verilmiştir. Yanal sargılama basıncı Denklem 3.1 ile hesaplanabilir.

$$f_l = \frac{2t}{D} f_{fp} \quad (3.1)$$

Burada t , LP malzemenin kalınlığı, D beton numunenin çapı, f_{fp} ise LP malzemenin çekme dayanımıdır. Fakat çoğu durumda LP'ye ait üretici tarafından verilen kopma şekildeğiştirme değerleri deney sırasında gerçekleşen kopma şekildeğiştirme değerlerine göre daha büyük kalmaktadır. Bu durum Lorenzis(2003), Lam ve Teng (2003) tarafından vurgulanmıştır. Bu sebeple yanal sargılama basıncının hesabında üreticinin verdiği kopma şekildeğiştirme değerleri yerine deney esnasında ölçülen

kopma şekildeğiştirme değerleri kullanılmıştır. Buna karşılık gelen yanal sargılama basıncı için gerçekleşen yanal sargılama basıncı denilebilir. Gerçekleşen yanal sargılama basıncı ($f_{l,a}$) Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$f_{l,a} = \frac{2tE_{frp}\varepsilon_{h,rup}}{D} \quad (3.2)$$

Burada E_{frp} LP malzemenin elastisite modülü, $\varepsilon_{h,rup}$ ise kopma anında ölçülen yanal şekildeğiştirme değeridir.

3.5 Sonuçların Mevcut Sargılama Modelleri ile Karşılaştırılması

Sargılanmış betonun davranışı ve modellenmesi ile ilgili ilk çalışmalar 20. Yüzyılın başlarında gerçekleştirilmiştir. Richard ve diğerleri (1928) bir dizi deney sonucu yanal sargılamanın betonun dayanımına ve şekildeğiştirme kapasitesine olan pozitif etkisini göstermiş ve sargılı betonun davranışını aktif hidrostatik basınç ile Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'te ifade etmiştir.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (3.4)$$

Denklem 3.3'te,

f_{cc} = Sargılı betonun basınç dayanımı

f_{co} = Sargısız betonun basınç dayanımı

k_1 = Beton karışımına bağlı hesaplanan etki katsayısı

f_l = Yanal sargılama basıncıdır.

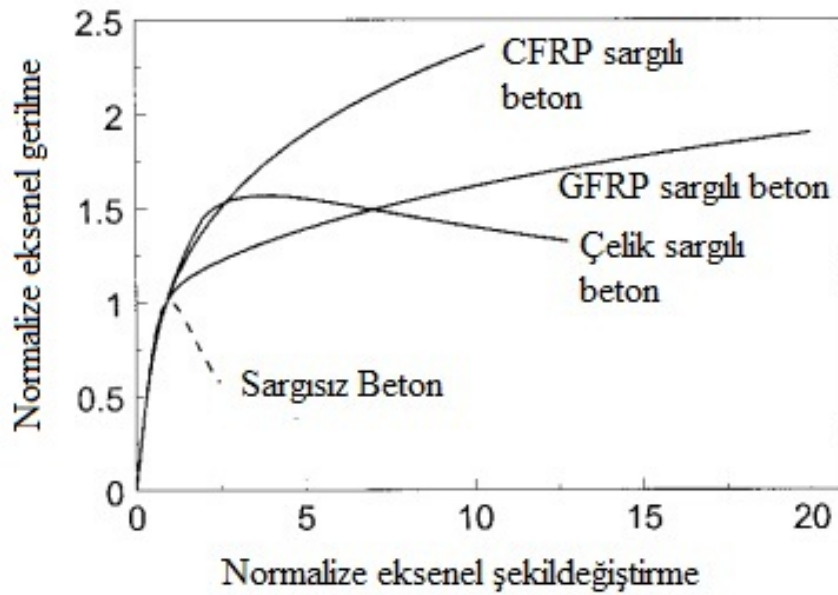
Denklem 3.4'te,

ε_{cc} = Sargılı betonun basınç dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme

ε_{co} =Sargısız betonun basınç dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme

k_2 = Yanal sargı basıncına bağlı hesaplanan etki katsayısıdır.

Bu katsayılar k_1 için ortalama olarak 4.1, k_2 için de ortalama olarak $5k_1$ alınabilir. Bu model üstünden gidilerek pek çok araştırmacı tarafından çelik sargılı betonlar için sargılama modelleri önerilmiştir.(Kent ve Park, 1971, Sheikh ve Uzumeri, 1982). Bu önerilen modeller daha sonraki yıllarda LP sargılı betonların davranışı için de uygulanmıştır (Fardis ve Khalili, 1981). Fakat, Nanni ve Bradford (1995) yaptıkları çalışmada çelik sargılı beton için önerilen formüllerin LP sargılı beton için tam doğru sonuç vermediğini göstermiştir. Çünkü çelik sargılı betonda sargılama basıncı çeliğin akmasına kadar sabit bir değerken, LP sargılı betonda yanıl sargı basıncı şekildeğiştirme ile orantılı olarak LP malzemenin lineer özelliklerine bağlı olarak artış göstermektedir. Çelik ve LP sargılı betona ait eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisindeki davranış farkı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Çelik ve LP sargılı betona ait eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi
(Spoelstra ve Monti 1999)

Bu bölümün amacı literatürdeki mevcut sargılama modellerinin LP sargılı UYDB elemanlara uygulanabilirliğini araştırmaktır. Bu kapsamda literatürden dört adet sargılama modeli seçilerek sargılama modellerinin hesapladığı sargılı beton dayanımı ve bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Seçilen dört model de tasarım amaçlı olup araştırmacıların deney sonuçlarını yorumlanması ve regresyon analizleri sonucu elde edilmişlerdir.

3.5.1 Sargılama modelleri

3.5.1.1 Saadetmanesh ve diğerleri

Saadetmanesh ve diğ. Mander ve diğ. (1988) tarafından önerilen çelik sargılı beton modelini LP sargılı betona uygulamışlardır. Mander'in modelinde kullandığı Popovics (1973) tarafından önerilen Denklem 3.5 ile gerilme şekil değıştirme değerlerini hesaplamışlardır.

$$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (3.5)$$

Burada,

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.6)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\text{sec}}} \quad (3.7)$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (3.8)$$

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right) - 1.254 \quad (3.9)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

Burada;

f_{cc} = Sargılı betonun basınç dayanımı

f_{co} = Sargısız betonun basınç dayanımı

ε_c = Betonun aksenal şekildeğiştirme

ε_{cc} = Sargılı betonun basınç dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme

ε_{co} = Sargısız betonun basınç dayanımına karşılık gelen şekildeğiştirme

E_{sec} = Sargılı betonun sekant modülü

f_l = Yanal sargılama basıncıdır.

3.5.1.2 Miyauchi ve diğerleri

Basınç dayanımları 20, 30, 50 ve 100 MPa olan daire en kesitli beton kolonları karbon katkılı LP malzeme ile sargılayarak aksenal basınç altında test etmişlerdir. Numunelerde bilineer gerilme-şekildeğiştirme davranışı gözlemlenmiştir. Denklem 3.11 ve Denklem 3.12 ile gerilme ve şekildeğiştirme değerlerini hesaplamışlardır.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.98 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (3.11)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + a_1 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{b_1} \quad (3.12)$$

$$a_1 = 15.87 - 0.093 f_{co} \quad (3.13)$$

$$b_1 = 0.246 - 0.0064 f_{co} \quad (3.14)$$

Burada a_1 ve b_1 deney sonucuna göre hesaplanan katsayılarıdır.

3.5.1.3 Kono ve diğerleri

Kono ve diğ.nin (1998) ε_{cc} ve f_{cc} 'yi hesaplamak için önerdikleri formüller Denklem 3.15ve Denklem 3.16'da verilmiştir. Önerdikleri formüllerde diğer araştırmacıların

aksine sargılama oranının (f_l/f_{co}) yerine yanal sargı basıncını kullanarak gerilme ve şekildeğiştirmeyi lineer olarak yanal sargı basıncıyla ilişkilendirmişlerdir.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 0.0572 f_l \quad (3.15)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 0.280 f_l \quad (3.16)$$

3.5.1.4 Toutanji

Toutanji (1999) 12 adet 76 mm x 305 mm boyutlarında daire en kesitli numuneleri karbon ve cam katkılı LP malzeme ile sararak numunelerin sargılama performansını test etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre eksenel gerilme ve şekildeğiştirme değerlerini Denklem (3.17) ve Denklem (3.18) ile hesaplamışlardır.

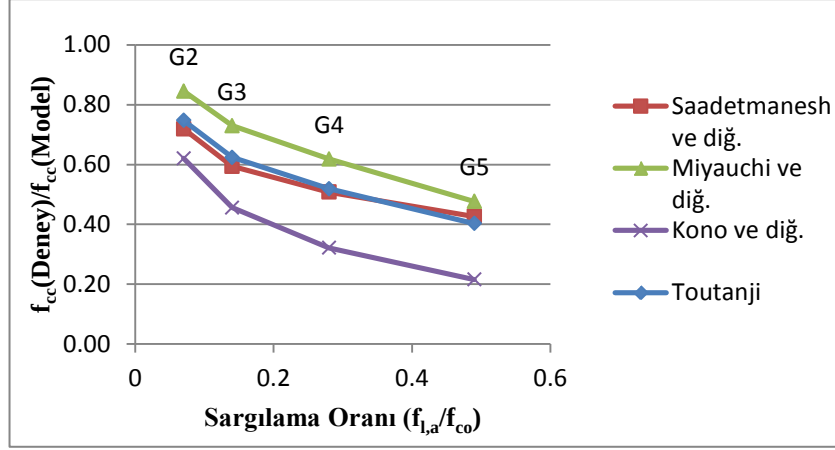
$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.85} \quad (3.17)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + (310.57 \varepsilon_{fu} + 1.9) \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \quad (3.18)$$

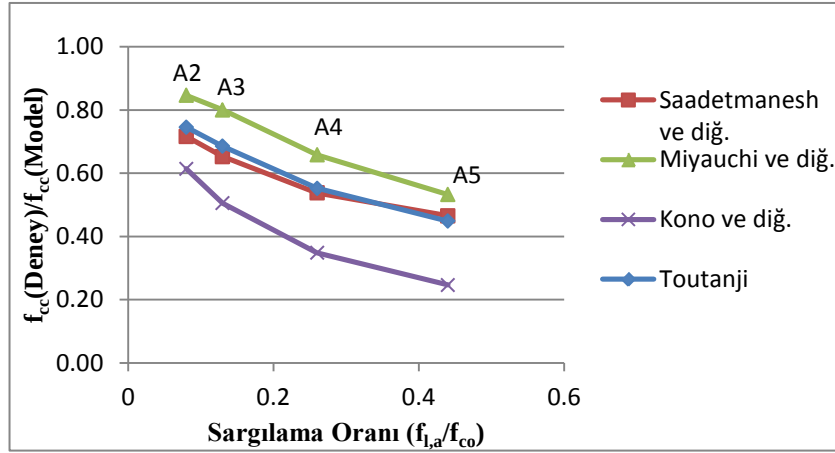
3.5.2 Sonuçların karşılaştırılması

3.5.2.1 Eksenel gerilme

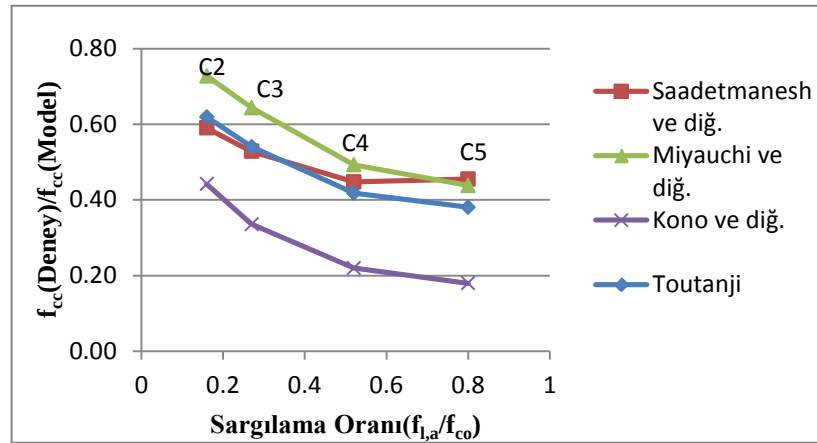
Deney sonuçları ve araştırmacıların sargılama modelleri ile tahmin edilen sargılı betona ait eksenel gerilme değerlerinin oranının ($f_{cc(deney)}/f_{cc(model)}$) sargılama oranına ($f_{l,a}/f_{co}$) göre değişimi her bir malzeme türü için ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla Şekil 3.16a, 3.16b, 3.16c’de verilmiştir.



Şekil 3.16a : GFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.



Şekil 3.16b : AFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.



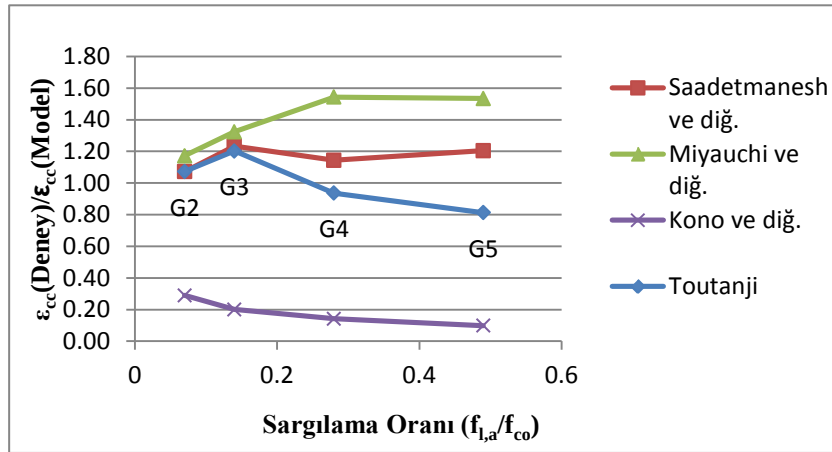
Şekil 3.16c : CFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.

Şekil 3.16a, Şekil 3.16b ve Şekil 3.16c'de görüldüğü üzere tüm sargılama modelleri sargılanmış betona ait eksenel dayanım değerini deney sonuçlarına göre daha büyük

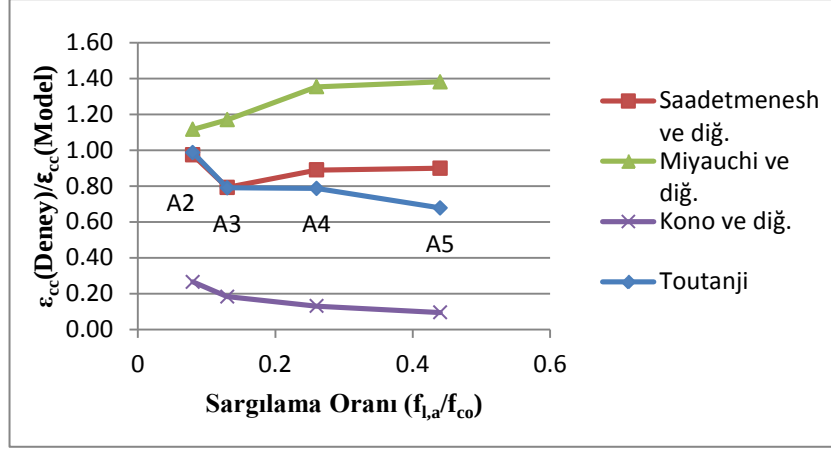
hesaplamışlardır. Tüm modellerde sargı kat adedi bir başka deyişle sargılama oranı arttıkça modellerin deney sonuçlarına göre tutarlılığı azalmıştır. Yine tüm modellerde CFRP için tahmin edilen değerler diğer LP malzemeler için tahmin edilen değerlere göre daha yüksek olmuştur. Her bir malzeme türü içinde deney sonuçlarına en yakın sonucu hesaplayan model Miyauchi ve diğ. tarafından önerilen model olmuştur. Bu modelde 2 kat sargılı numunelerde ortalama rölatif hata GFRP ve AFRP için %15, CFRP için %36 oranında gerçekleşirken bu oran 5 kat sargılı numunelerde ise diğer tüm modellerde de görüldüğü gibi %100'ün üzerine çıkmıştır. Saadetmanesh ve diğ. ve Toutanji tarafından önerilen modellerde de 2 kat sargılı numunelerde en iyi sonuç alınmıştır. Bu modellerde 2 kat sargılı numunelerde ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak GFRP ve AFRP için %33, CFRP için %61 oranında gerçekleşmiştir. Kono ve diğ. sargılama oranı yerine yanal sargı basıncını kullanarak önerdikleri model ise LP sargılı UYDB'lerin eksenel gerilme değerine en uzak sonucu veren model olmuştur.

3.5.2.2 Eksenel şekildeğiştirme

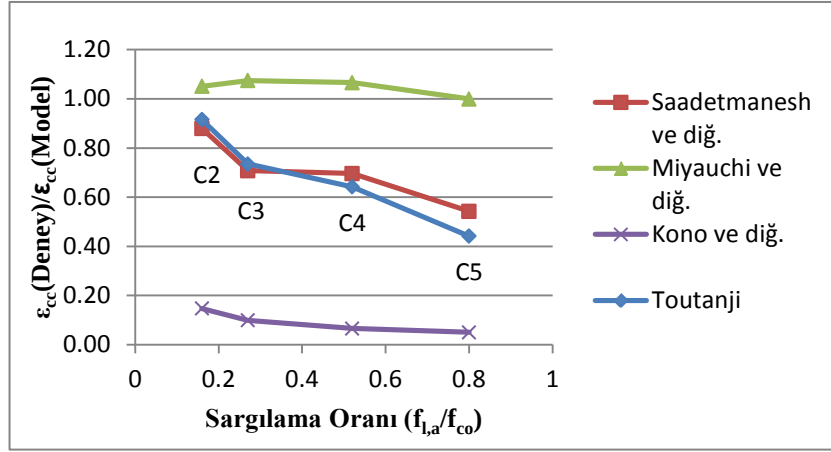
Deney sonuçları ve araştırmacıların sargılama modelleri ile tahmin edilen sargılı betona ait eksenel şekildeğiştirme değerlerinin oranının ($\epsilon_{cc(deney)}/\epsilon_{cc(model)}$) sargılama oranına ($f_{l,a}/f_{co}$) göre değişimi her bir malzeme türü için ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla Şekil 3.17a, 3.17b, 3.17c'de verilmiştir.



Şekil 3.17a : GFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.



Şekil 3.17b : AFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.



Şekil 3.17c: CFRP için deney sonuçları-sargılama modelleri karşılaştırması.

Miyauchi ve diğ. tarafından önerilen model 3 ayrı malzeme için de eksenele şekildeğiştirmeyi deney sonuçlarından daha küçük olarak hesaplamıştır. Saadetmanesh ve diğ. ile Toutanji tarafından önerilen modeller ise GFRP ve AFRP sargılı numunelerde deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar vermişlerdir. Miyauchi ve diğ. tarafından önerilen model hariç olmak üzere tüm modeller 2 kat sargılı numunelerde daha iyi sonuç verirken, Miyauchi ve diğ. tarafından önerilen modelin özellikle CFRP sargılı numunelerin tüm sargı kat sayılarında deney sonuçlarına yakın sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Miyauchi ve diğ. tarafından önerilen modelde GFRP için 2 kat sargıda ortalama rölatif hata %17 oranında gerçekleşirken sargı kat sayısının 5 olduğu numunelerde bu oran %53 oranında gerçekleşmiştir. AFRP sargılı numunelerde ise 2 kat sargı durumunda hata oranı %12 iken 5 kat sargılı numunelerde bu oran %38 oranında gerçekleşmiştir. CFRP sargılı

numunelerde ise eksenel şekildeğiştirme değeri 5 kat sargılı numunelerde hatasız ya yakın bir şekilde tahmin edilebilmiş, diğer sargılı numunelerde de hata oranı en fazla %7 olarak gerçekleşmiştir. Saadetmanesh ve diğ. tarafından önerilen model GFRP numuneler için şekildeğiştirmeyi deney sonuçlarına göre daha küçük hesaplarırken, AFRP ve CFRP için ise deney sonuçlarına göre daha büyük hesaplamıştır. Toutanji tarafından önerilen model Saadetmanesh ve diğ. tarafından önerilen modelde olduğu gibi AFRP ve CFRP için eksenel şekildeğiştirme değerini deney sonuçlarına göre daha büyük hesaplamıştır. GFRP sargılı numunelerde ise 2 ve 3 kat sargılı olanlarda deney sonuçlarına göre daha küçük hesaplarırken 3 ve 4 kat sargılı numunelerde deney sonuçlarına göre daha büyük hesaplamıştır. Kono ve diğ. tarafından önerilen model ise tüm numunelerde, eksenel gerilmeyi hesaplarırken olduğu gibi eksenel şekildeğiştirmeyi hesaplarırken de deney sonuçlarına göre daha büyük hesaplamıştır.

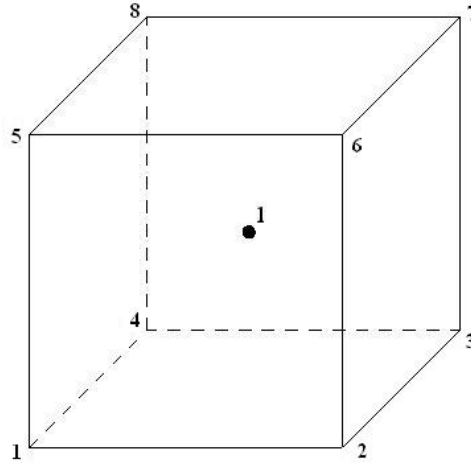
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

4.1 Giriş

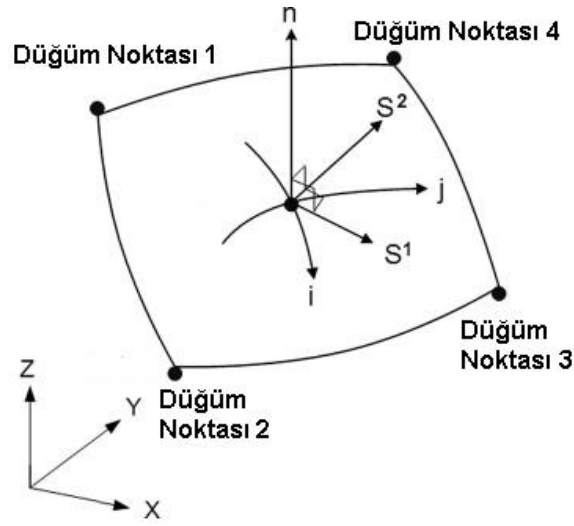
Bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelere bağlı olarak uygulamalı bilimler ve mühendislik alanındaki problemlerin çözümünde çeşitli teorik hesaplama yöntemleri ile analitik modellerin oluşturulması sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden günümüzde en yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yönteminin, inşaat mühendisliğine uygulanmasıyla yapı ve yapı elemanlarının davranışı hakkında bir öngörü elde edilebilir. Bu amaç doğrultusunda tez kapsamında eksenel basınca maruz bırakılan daire enkesitli kolon numunelerin bilgisayar ortamında modellemesi yapılmıştır. ABAQUS paket programı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modeli ile deney sonuçları eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi açısından karşılaştırılmıştır.

4.2 Sonlu Eleman Tipi

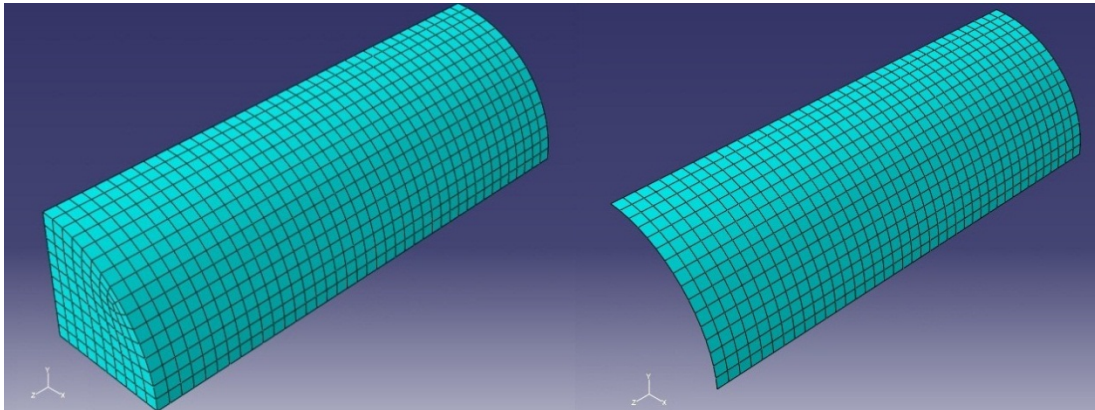
Modelde beton çekirdek ve LP malzeme ayrı ayrı modellenmiştir. Sonlu elemanlar paket programı olan ABAQUS programının kütüphanesinde bulunan 3 boyutlu (solid) ve kabuk (shell) elemanlar sırasıyla beton ve LP malzeme için kullanılmıştır. Beton modeli için seçilen 3 boyutlu(solid) eleman 8 düğüm noktasına sahip lineer tuğla eleman olarak tanımlanan C3D8R'dir (Şekil 4.1). LP malzemenin modelinde ise 4 düğüm noktası olan ve her bir düğüm noktasında 3 adet yerdeğiştirme ve 3 adet dönme serbestlik derecesi olan S4R isimli kabuk elemanlar kullanılmıştır (Şekil 4.2). Beton ve LP malzemenin sonlu elemanlara bölünmüş modeli Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Her iki malzeme modeli tüm doğrultularda 5'er milimetrik sonlu elemanlara bölünmüştür.



Şekil 4.1 : C3D8R 8 düğüm noktalı solid eleman (url-1)



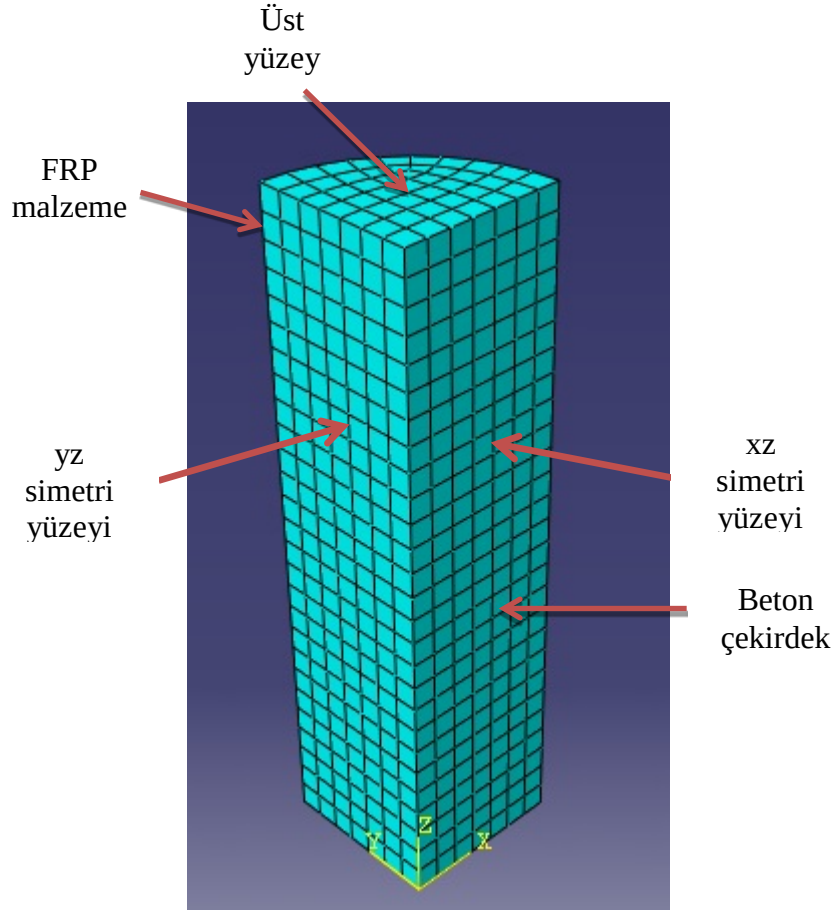
Şekil 4.2 : S4R 4 düğüm noktalı kabuk eleman (url-2).



Şekil 4.3 : Beton ve LP malzemenin sonlu elemanlar modeli.

4.3 Sınır Koşulları ve Yükleme Şekli

Modelde çözüm süresini kısaltmak adına düşey simetriden yararlanılmıştır. Numunelerin x ve y yönlerinde simetrik durumu gözetilerek $\frac{1}{4}$ 'ünün modellenmesi yapılmıştır. Simetriden dolayı xz ve yz simetri yüzündeki yerdeğıştirmeler tutulmuştur. Ayrıca kolon alt yüzeyinde x y ve z yönündeki tüm yerdeğıştirmeler tutulmuş olup üst yüzeyinde ise z yönündeki yerdeğıştirme serbestliğı hariç diğer serbestlikler tutulmuştur. Eksenel yük üst yüzeyden $-z$ yönünde yerdeğıştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Simetri koşulları gözetilerek oluşturulan $\frac{1}{4}$ 'lük sonlu eleman modeli Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Sargılı betonun sonlu elemanlar modeli.

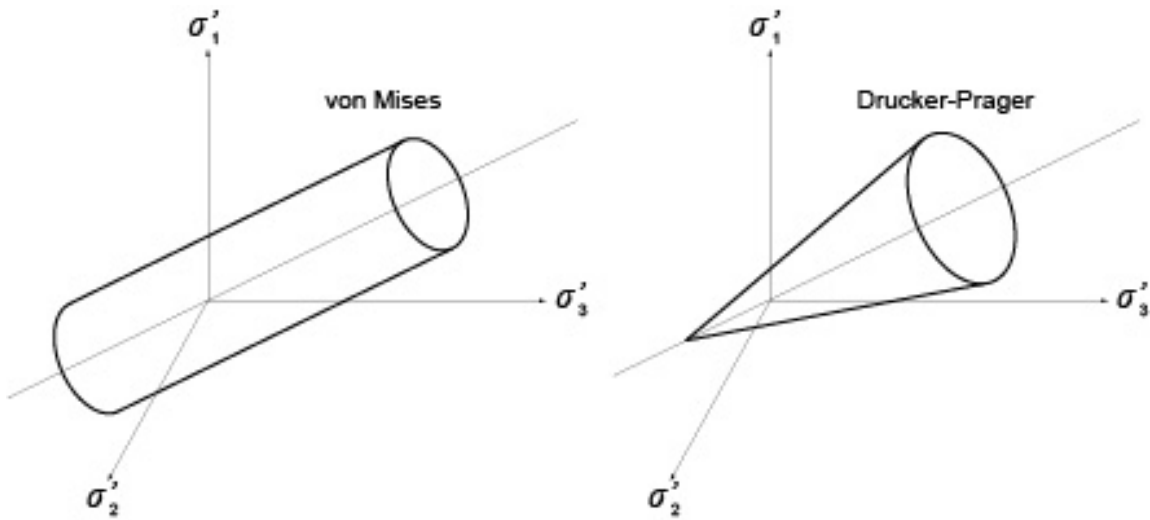
4.4 Lifli Polimer Malzeme Modeli

LP malzeme lineer ortotropik malzemedir. Bu nedenle davranışı modellemek için LP malzemenin elastisite modülü ve Poisson oranı yeterli olacaktır. 3 ayrı LP malzeme

için Poisson oranı (ν) 0.3 alınmıştır. LP malzemenin sadece yanal doğrultuda çalışacağı dışınılılrse bu değer sıfır olarak da alınabilir. Malzemelerin elastisite modülü olarak izelge 3.3'te verilen değerler kullanılmıştır. LP malzemenin eksenel kuvvet almadığı sadece düzlemi içerisinde oluşan çekme gerilmelerinin taşıyacağı varsayılarak modelde 'no compression' seçeneği aktif hale getirilerek malzemenin basınç gerilmelerini alması engellenmiştir.

4.5 Beton Malzeme Modeli

Betonun plastik davranışının modellenmesinde metaller için geliştirilen plastisite teorileri esas alınmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen Drucker-Prager (DP) modeli sargılı betonun plastik davranışının analitik olarak modellenmesinde sıkça kullanılmaktadır. Bunun sebebi DP modelinin diğer modellere göre daha az parametre ile tanımlanabilmesi ve sargılama durumunda artan hidrostatik basını gözönünde bulundurmasıdır. DP modelinde, Von-Mises göçme kriterinde gözönüne alınan kayma gerilmelerine ilave olarak hidrostatik gerilmeler eklenerek Von-Mises akma yüzeyini hidrostatik basına duyarlı hale getirilmiştir. Böylelikle sabit en kesitli silindirik Von-Mises akma yüzeyi artan hidrostatik gerilmeler ile genişleyen koni şekliini almıştır (şekil4.5).



şekil 4.5 : Von-Mises ve Drucker-Prager akma yüzeyleri.

Lee ve Fenves (1998) tarafından DP göçme hipotezinin geliştirilmesiyle elde edilen CDP(Concrete Damage Plasticity Model) modelinde akma yüzeyi (F), aşağıdaki formüller ile ifade edilmiştir (Denklem 4.1-Denklem 4.4)

$$F(\bar{\sigma}, \tilde{\varepsilon}^{pl}) = \frac{1}{1-a} (\bar{q} - 3ap + \beta)(\tilde{\varepsilon}^{pl})(\bar{\sigma}_{\max}) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}^{pl}) \quad (4.1)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{3} \bar{\sigma} : I \quad (4.2)$$

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} \bar{S} : \bar{S}} \quad (4.3)$$

$$\bar{S} = \bar{p}I + \bar{\sigma} \quad (4.4)$$

Burada,

$\bar{p}$: Etkili hidrostatik basıncı

$\bar{q}$: Von-Mises etkili gerilmeyi

$\bar{S}$: Etkili gerilme tansörünün deviatorik kısmını

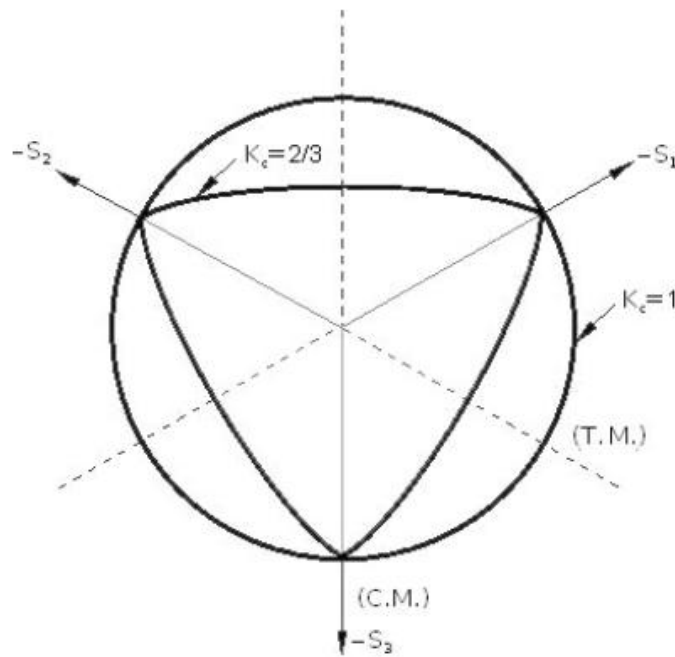
$\bar{\sigma}$: Etkili gerilmeyi ifade etmektedir.

Plastik akış fonksiyonu G Denklem 4.5 ile ifade edilmektedir.

$$G = -\bar{p} \tan \varphi + \sqrt{(e\sigma_{to} \tan \varphi)^2 + \bar{q}^2} \quad (4.5)$$

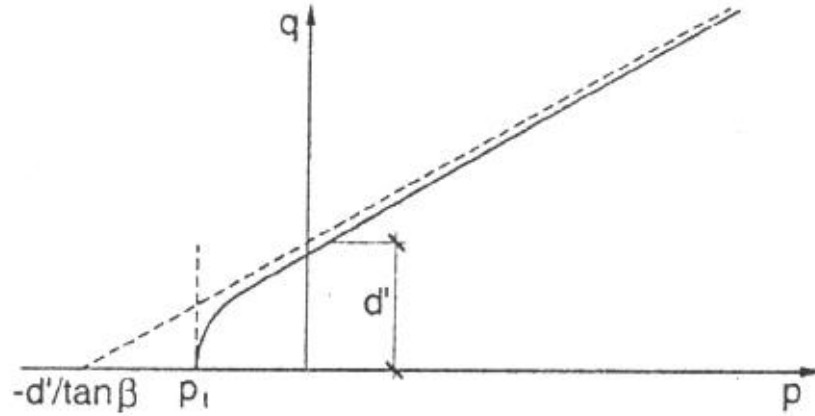
Burada; ϕ , p-q düzleminde gerilmeler altında oluşan dilatasyon açısını, σ_{to} kırılma anında oluşan çekme gerilmesini ve e eksantrisiteyi temsil eden bir katsayıyı ifade etmektedir.

Betonun modellenmesinde ABAQUS programının içinde bulunan, Drucker-Prager plastisitesini esas alarak geliştirilmiş olan CDPM (Concrete Damage Plasticity Model) modeli kullanılmıştır. CDPM’de deviatorik düzlemdeki akma yüzeyi K_c parametresine bağlı olarak Şekil 4.6’da gösterilmiştir. K_c ; deviatorik düzlemde hidrostatik eksenin basınç ve çekme



Şekil 4.6 : CDP modelinde akma yüzeyi (Kmieciak ve Kaminski,2011).

meridyanyına olan uzaklıklarının oranı olarak tanımlanabilir. Modelde K_c değeri 2/3 olarak alınmıştır. CDP modelinde potansiyel plastik akış yüzeyi p-q düzleminde hiperboliktir. Beton modelindeki eksantrisiteyi temsil eden katsayı (e) 0 alınarak plastik akış yüzeyi p-q düzleminde düz bir çizgi haline getirilmiştir(Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : p-q düzleminde plastik akış yüzeyi(KmieciK ve Kaminski,2011).

Beton malzemesinin sonlu elemanlar modelinde kullanılan bir diğer parametre f_{bo}/f_{co} oranıdır. Tanım olarak f_{bo}/f_{co} betonun iki eksenli gerilme altındaki basınç dayanımının tek eksenli gerilme altındaki basınç dayanımına oranıdır. Bu değer 1.16 olarak alınmıştır. Betonun üç eksenli gerilme durumundaki davranışını tanımlamak için gereken bir diğer parametre ise dilatasyon açısıdır. Sonlu elemanlar modelinde dilatasyon açısı (ϕ) 18° olarak alınmıştır. Beton modeline ait parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Betonun elastisite modülü 34GPa, Poisson oranı (ν) ise 0.2 olarak alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Beton modeline ait değerler.

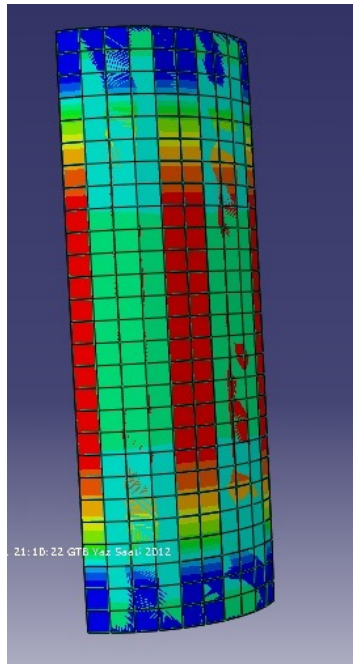
	Değer
Dilatasyon Açısı	18°
Eksantrisite	0
f_{bo}/f_{co}	1.16
K_c	0.667
Elastisite Modülü (GPa)	34

4.6 Beton ve Lifli Polimer Arasındaki Etkileşim

Deneyisel çalışmada beton numune ve LP malzemenin yüzeylerine epoksi uygulaması yapılarak malzemeler birbirine yapıştırılmıştır. Böylece iki malzeme arasında tam aderansın sağlandığı kabul edilebilir. Sonlu elemanlar modelinde ise bu durum beton ve LP malzemenin karşılıklı etkileşim durumunda olan yüzeylerinin birbirine bağlanmasıyla (Constraints→tie seçeneği seçilerek) teşkil edilmiştir.

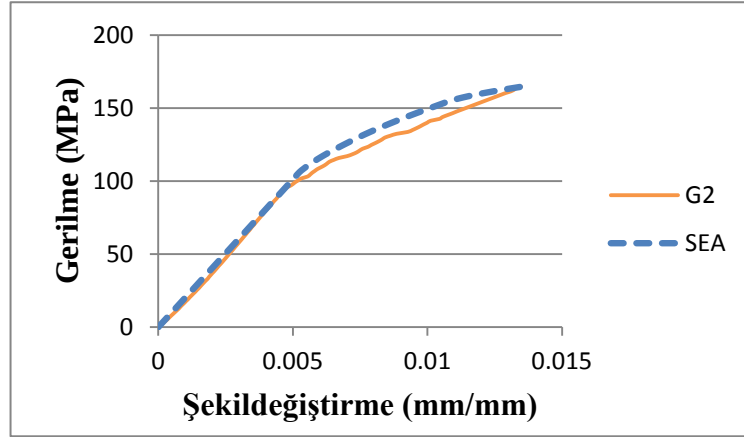
4.7 Analiz Sonuçlarının Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Bu başlık altında deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile sonlu eleman modeli kullanılarak hesaplanan değerlerin aksel gerilme-aksel şekil değiştirme ilişkisi bakımından karşılaştırması yapılmıştır. Bölüm 3.4'te belirtildiği üzere tüm numuneler güç tükenmesine ulaştığı durumda LP malzemesindeki yırtılma kolon orta bölgesinde başlayıp kolon alt ve üst ucuna doğru yayılmıştır. Bu da yanal sargı basıncının kolon orta bölgesinde en büyük değerine ulaştığını göstermektedir. Bu durum ile ilgili olarak sonlu eleman modelinde sargılı betonun dayanımına eriştiği andaki yanal sargılama basıncının LP yüzeyindeki dağılımı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

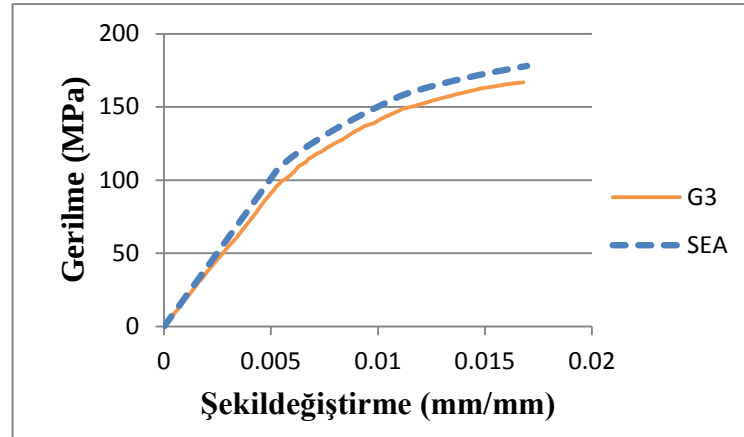


Şekil 4.8 : Numunelere ait tipik yanal sargı basıncı dağılımı.

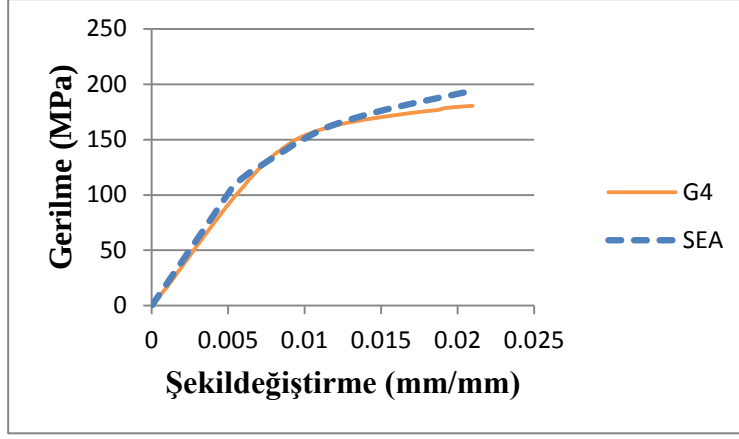
Deney sonuçlarında gözlenen bilineer davranış sonlu eleman modelinde başarıyla yakalanmıştır. Model ile deney sonuçları arasında, sargılı betonun basınç dayanımındaki en büyük fark %16'dır. Numunelere ait deney sonuçları ile sonlu eleman analizinden elde edilen değerler Şekil 4.9 ile Şekil 4.20 arasında gösterilmiştir.



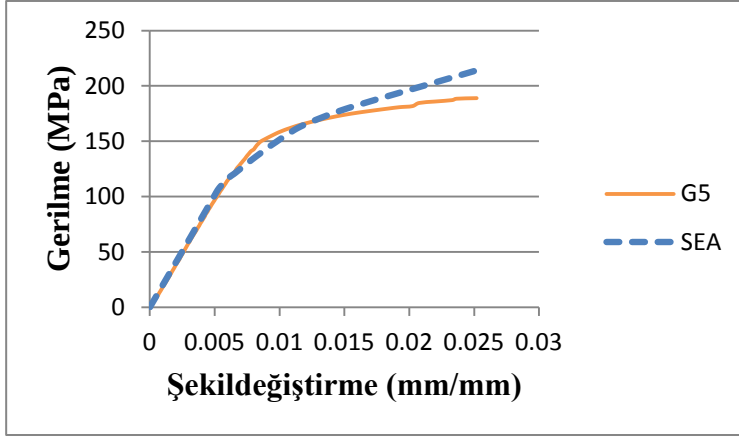
Şekil 4.9 : 2 kat GFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 4.10 : 3 kat GFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

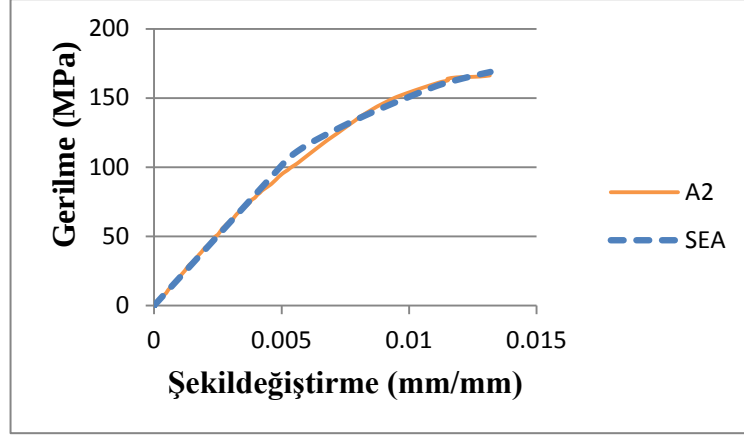


Şekil 4.11 : 4 kat GFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

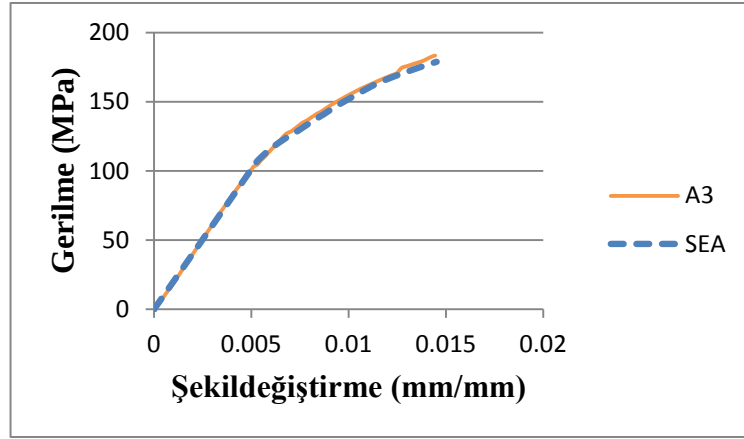


Şekil 4.12 : 5 kat GFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

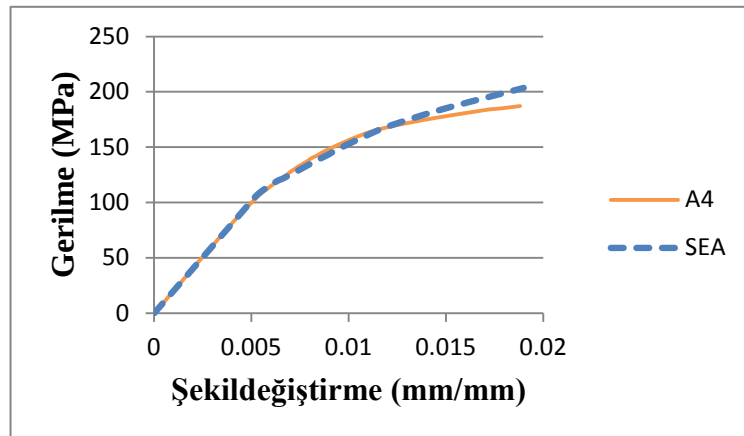
GFRP sargılı numunelerde 2 ve 3 kat sargılı numunelerde tahmin edilen değerler deney sonuçlarına daha yakın bulunurken, 4 ve 5 kat sargılı numunelerde sonuçlar arasındaki yakınsaklık azalmıştır. 5 kat sargılı numunelerde model ile deney sonuçları arasındaki fark %15 oranında gerçekleşmiştir.



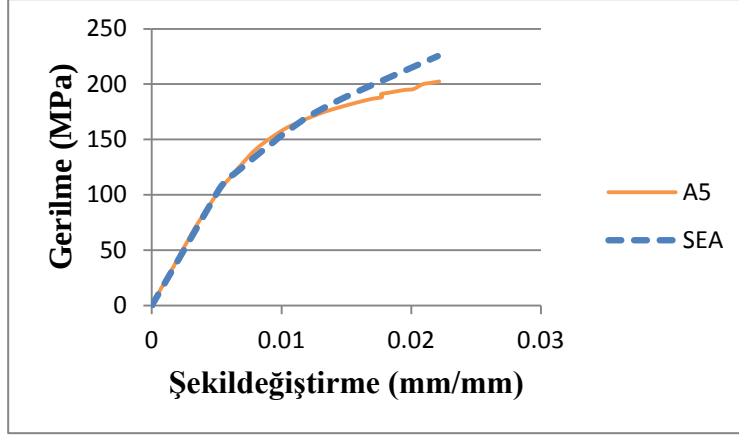
Şekil 4.13 : 2 kat AFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 4.14 : 3 kat AFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

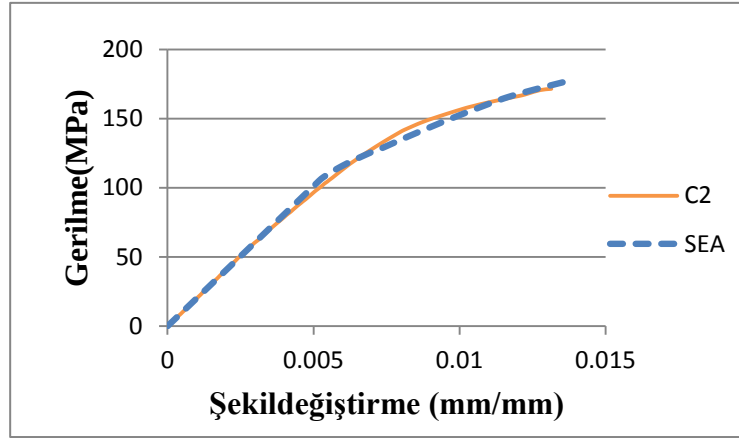


Şekil 4.15 : 4 kat AFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

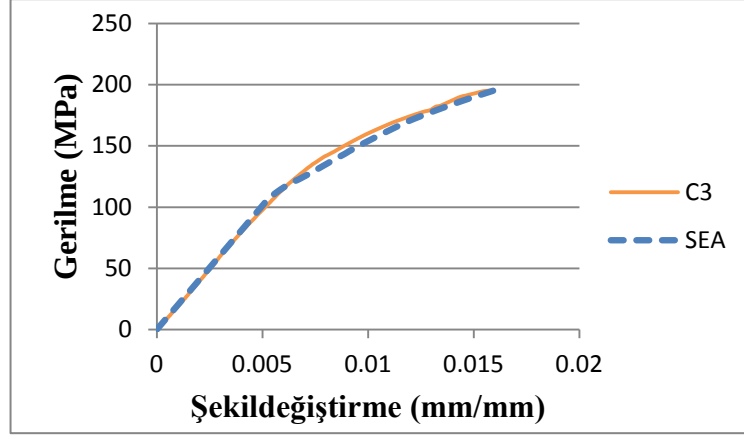


Şekil 4.16 : 5 kat AFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

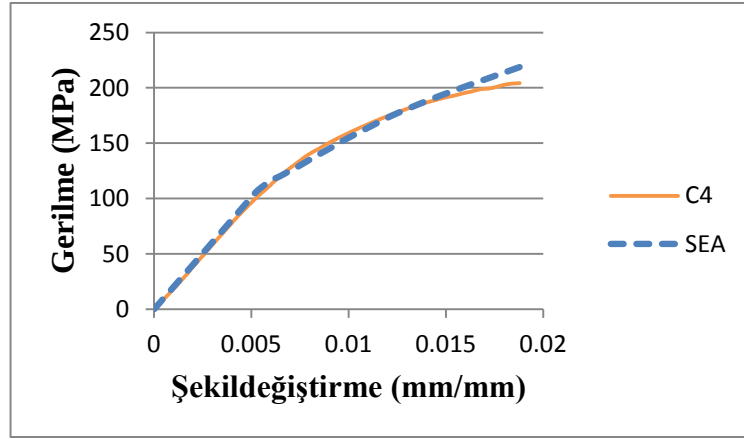
AFRP sargılı numunelerde de GFRP sargılı numunelere benzer davranış gözlemlenmiştir. Sonuçlar arası fark sargı katsayısındaki artışa bağlı olarak yükselmiştir. Sonuçlar arasındaki en büyük fark %16 ile 5 kat sargılı numunelerde gözlemlenmiştir.



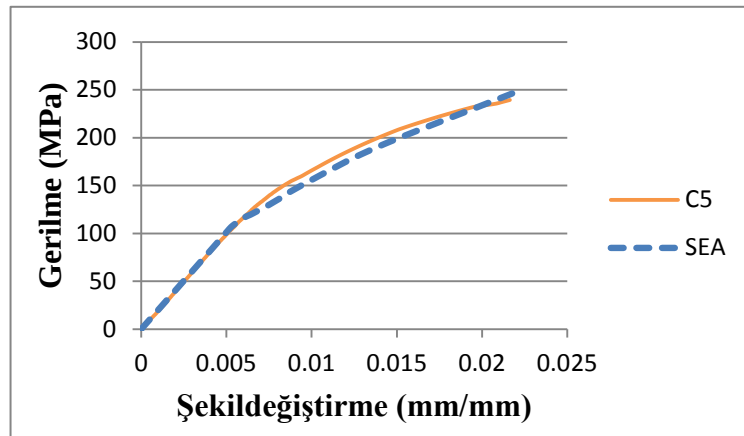
Şekil 4.17 : 2 kat CFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 4.18 : 3 kat CFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 4.19 : 4 kat CFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.



Şekil 4.20 : 5 kat CFRP sargılı numunelere ait sonuçların karşılaştırılması.

CFRP ile sargılanmış numunelerde ise en iyi tahmin sonuçları elde edilmiştir. Farklı sargı kat sayılarında görülen hatanın ortalama %7 oranında sonlu elemanlar modelinde yüksek hesaplandığı görülmüştür. Numunelere ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune	$f_{cc,deney}$ (MPa)	$f_{cc,SEA}$ (MPa)	$\frac{f_{cc,SEA}}{f_{cc,deney}}$
G2	162.89	165.09	1.01
G3	164.04	178.03	1.09
G4	179.19	194.20	1.08
G5	185.72	213.36	1.15
Ort. Hata(%)			%8
Std. Sapma			0.05
A2	164.76	168.82	1.03
A3	177.83	178.80	1.01
A4	185.00	203.53	1.10
A5	195.06	225.32	1.16
Ort. Hata(%)			%8
Std. Sapma			0.06
C2	168.79	177.18	1.05
C3	185.51	195.04	1.05
C4	199.47	220.04	1.10
C5	235.04	247.78	1.06
Ort. Hata(%)			%7
Std. Sapma			0.02

5. SONUÇLAR

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında hazırlanan bu çalışmada, ultra-yüksek dayanımlı daire en kesitli beton kolonların farklı mekanik özelliklere sahip lifli polimer malzeme ile sargılanarak, sargılı betonun davranışı gözlemlenmiş ve bu davranışın sayısal olarak modellenmesi yapılmıştır. Bu amaçla, 6 adedi sargısız, 36 adedi sargılı olmak üzere toplamda 42 adet numune test edilmiştir. Güç tükenmesi durumuna ulaşana kadar test edilen numunelerin eksenel gerilme-eksenel şekildeğiştirme ilişkisi gözlemlenmiştir. Deney sonuçları, literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından sargılı beton davranışı için önerilen modeller ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmayı takiben sonlu elemanlar paket programı kullanılarak numuneler bilgisayar ortamında modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) Lifli polimer sargılı betona ait bilineer gerilme-şekildeğiştirme eğrisi betonun ve lifli polimerin mekanik özelliklerine göre şekillenmektedir. Başlangıçta davranışa hâkim olan malzeme betondur ve yükselen ilk kol sargısız betonun eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine benzerdir. Sonrasında lifli polimer malzemenin aktif hale geldiği bölgede oluşan ikinci kol lifli polimerin rijitliğine bağlı olarak şekillenmektedir. İkinci kolun eğimi LP'nin mekanik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Bu doğrultuda deney sonuçlarında elastisite modülü yüksek olan malzemelerde bu kolun eğiminin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

2) Güç tükenmesi durumu tüm numunelerde LP'nin yırtılması ve sonrasında oluşan patlama ile gerçekleşmiştir. Yırtılma, bindirme bölgesi dışında yanal sargılama basıncının en yüksek değerine ulaştığı kolon orta bölgesinden başlamıştır ve kısa sürede kolon alt ve üst ucuna uzamıştır. LP'nin yırtılmasından sonra oluşan patlamanın şiddeti sargılama oranı daha yüksek olan numunelerde daha şiddetli gerçekleşmiştir. Özellikle 5 kat CFRP sargılı numunelerde diğer tüm numunelere yırtılma daha derin ve patlama şiddeti de daha büyük olmuştur.

3) Sargılı betona ait basınç dayanımı sargı kat adedi ile orantılı olarak artış göstermiştir. Sargı kat adedinin aynı, fakat LP'nin farklı olduğu durumda ise rijitliği daha yüksek olan CFRP sargılı numunelerde artış daha yüksek olmuştur. Sargılı betonun dayanımındaki en büyük artış %48 ile 5 kat CFRP sargılı numunelerde gözlemlenmiştir. Bu artış GFRP sargılı numunelerde en yüksek %17 AFRP sargılı numunelerde ise en yüksek %24 oranında gerçekleşmiştir.

4) Sargılı betonun şekildeğiştirme kapasitesi de sargı kat adedi ile orantılı olarak artış göstermiştir. Diğer malzemelere göre daha sünek olan GFRP ile 5 kat sargılı numunelerde şekildeğiştirme kapasitesindeki artış %124 olarak gerçekleşmiştir. CFRP için bu değer %85, AFRP için de %94 oranında gerçekleşmiştir. Şekildeğiştirme kapasitesindeki artışın normal ya da yüksek dayanımlı betonlarda gözlemlenen artışa göre düşük olması, sargısız ultra-yüksek dayanımlı betonların normal ya da yüksek dayanımlı betonlara göre daha iyi şekildeğiştirme kapasitesine sahip olmaları söylenebilir.

5) Literatürde, araştırmacılar tarafından normal dayanımlı betonlar için önerilen sargılama modellerinin ultra-yüksek dayanımlı betonlara uygulandığında elde edilen sargılı beton dayanımının deney sonuçlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm sargılama modellerinde sargı kat adedi arttıkça tahmin edilen değer ile deney sonuçları arasındaki tutarlılık azalmıştır. Miyauchi ve diğerleri tarafından önerilen modelin diğer araştırmacılar tarafından önerilen modellere göre daha iyi sonuç verdiği fakat yeterli olmadığı söylenebilir.

6) Sargılı betonun dayanımına karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme değerinin tahmininde önerilen modellerin tümünün başarısız olduğu gözlemlenmiştir. Sadece Miyauchi ve diğerleri tarafından önerilen modelin CFRP sargılı numunelerde şekildeğiştirme değerini iyi bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür.

7) Deney sonuçlarının mevcut sargılama modelleri tarafından hesaplanan değerlere göre farklı olmasının nedeni ultra-yüksek dayanımlı betonların sahip olduğu yüksek dayanım ve şekildeğiştirme kapasitelerinin mevcut sargılama modellerinde tam olarak yansıtılamamasıdır. Bu da göstermektedir ki sargılı ultra-yüksek dayanımlı betonların davranışı için daha ileri çalışmalar gerekmektedir.

8) Sargılı betonun eksenel gerilme-şekildeğiştirme davranışının normal dayanımlı betonlarda DP hipotezi kullanılarak iyi bir şekilde tahmin edilebileceği Mirmiran ve

diğerleri (2000) tarafından belirtilmiştir. Sonlu elemanlar paket programı ABAQUS içinde tanımlı olarak bulunan ve DP hipotezini temel alan CDPM(Concrete Damage Plasticity Model) kullanılarak modellenen lifli polimer sargılı ultra-yüksek dayanımlı beton kolonun sonlu elemanlar modeli deney sonuçlarını iyi bir yakınsaklıkla tahmin etmiştir. Bu da normal dayanımlı betonlarda eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisini iyi bir şekilde tahmin edebilen DP hipotezinin ultra-yüksek dayanımlı betonlar için de uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Sonlu elemanlar modeli 2 ve 3 kat sargılı numunelerde 4 ve 5 kat sargılı numunelere göre daha yakın sonuçlar vermiştir. Deney sonuçları ile sonlu eleman modeli arasındaki en büyük fark %16 olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- ABAQUS, Inc.** (2008). Computational ABAQUS Analysis User's Manual. *Dassault Systemes Simulia Corp.*, Providence, RI, USA.
- Drucker, D.C., Prager, W.** (1952). Soil mechanics and plastic analysis for limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, **10**, 157-165.
- Eid, R., Roy, N., Paultre, P.** (2009). Normal and High-Strength Concrete Circular Elements Wrapped with FRP Composites, *Journal of Composites for Construction*, **13**(2), 113–124.
- Fardis, M. N. ve Khalili, H.** (1981). Concrete Encased in Fiber Reinforced-Plastic, *J. Am. Concr. Inst. Proc.*, **78**(6), 440–446.
- Kent, D. C. ve Park, R.** (1971). Flexural Members with Confined Concrete, *J. Struct. Div., ASCE*, **97**(7), 1969-1990.
- Kmiecik, P. ve Kaminski, M.** (2011). Modelling of Reinforced Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taking into Consideration, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **11**(3), 623-636.
- Kono, S., Inazumi, M., ve Kaku, T.** (1998). Evaluation of Confining Effects of CFRP Sheets on Reinforced Concrete Members, *Proc., ICCI'98, Tucson, Arizona*, 343-355.
- Lam, T. ve Teng, J.G.** (2003). Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete, *Construction and Building Materials*, **17**, 471-489.
- Lorenzis, L.D. ve Tepfers, R.** (2003). Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, **7**(3), 219-237.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., ve Park, R.** (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J Strut Div ASCE*, Vol.**114**, no.8, 1804-1826.
- Matte, V. ve Moranville, M.** (1999). Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, *Cement and Concrete Composites*, **21**, 1-9.
- Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., ve Kobayashi, A.** (1999). Strengthening Effects of Concrete Columns with Carbon Fibre Sheet, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, **21**, 143-150.
- Mirmiran, A. ve Shahawy, M.** (1997a). Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **123**(5), 583-590.
- Mirmiran, A. ve Shahawy, M.** (1997b). Dilation Characteristics of Confined Concrete, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol.**2**, 237-249.

- Mirmiran, A., Zagers, K., Yuan, W.** (2000). Nonlinear Finite Element Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites, *Finite Elements in Analysis and Design*, **35**, 79-96.
- Nanni, A. ve Bradford, N.M.** (1995). FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression, *Construction and Building Materials*, **9**(2), 115-124.
- Popovics, S.** (1973). A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves for Concrete, *Cement and Concrete Research*, **3**(5), 583-599.
- Richard, F.E., Brandtzaeg, A., ve Brown, R.L.** (1928). A Study of Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Engineering Experimental Station, Bulletin No. **185**, University of Illinois, Urbana.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M.H.** (1994). Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, Internal Report, p15, Bouygues.
- Saadetmanesh, H., Ehsani, M.R., Li, M.W.** (1994). Strength and Ductility of Concrete Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps, *ACI Structural Journal*, **91**(4), 434-447.
- Shahawy, H., Mirmiran, A., Beitelman, T.** (2000). Test and Modelling of Carbon-wrapped concrete columns, *Composites: Part B*, **31**(6), 471-480.
- Sheikh, S.A. ve Uzumeri, S.M.** (1980). Strength and Ductility of Tied Concrete Concrete Columns, *Journal Of Structural Division, ASCE*, **108**(12), 2703-2722.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Yerlikaya, M.** (2003). Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı **426**, 76-84.
- Toutanji, H.A.** (1999). Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fibre Composite Sheets, *ACI Material Joournal*, **96**(3), 397-404.
- Youssef, M.N., Feng, M.Q., Mosallam, A.S.** (2006). Stress-strain Model for Concrete Confined by FRP Composites, *Composites Part: B*, **38**(5), 614-628.
- Zohrevand, P. ve Mirmiran, A.** (2011). Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Confined by Fiber-Reinforced Polymers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(12), 1727-1734.
- Url-1** <http://web.mit.edu/calculix_v2.0/CalculiX/ccx_2.0/doc/ccx/node15.html >, alındığı tarih: 01.11.2012
- Url-2** < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844209000731> >, alındığı tarih: 01.11.2012

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Alperen Çopur

Doğum Yeri ve Tarihi: Aydın 30.05.1987

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın ve Patent Listesi:

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ **Çopur A.**, Guler S., Ozalp F., Aydogan M., 2012: Performance of CFRP Wrapped UHPC Columns under Axial Compression. *International Multi-Conference on Management, Chemical, Environment and Medical Sciences (IMMCEMS'12)*, November 23-24, 2012 Bangkok, Thailand.