

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FRP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN EKSENEL
YÜK ETKİSİNDEKİ SİLİNDİR BETON ELEMANLARIN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ameen Ali ALFAQEEH

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK

Ocak 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FRP KOMPOZİTLER İLE GÜÇLENDİRİLEN EKSENEL
YÜK ETKİSİNDEKİ SİLİNDİR BETON ELEMANLARIN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ameen Ali ALFAQEEH

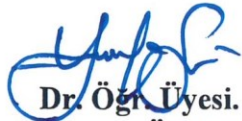
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 30.01.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Dr. Öğr. Üyesi
Ali SARIBIYIK
Jüri Başkanı



Dr. Öğr. Üyesi.
Yusuf SÜMER
Üye



Dr. Öğr. Üyesi.
Hüseyin KASAP
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.


Ameen Ali ALFAQEEH
30.01.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali SARIBIYIK'a teşekkürlerimi sunarım. ABAQUS programı konusunda yardımlarını esirgemeyen ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Ergün NART'a ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Yusuf SÜMER'e teşekkür ederim. Lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığına destekleri için teşekkür ederim. Hayatımın her anında yanımda olan ve bir an olsun sevgi ve desteğini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tez İçeriği	3
1.2. Literatür Özetleri.....	4
1.3. Kolon Hasarları ve FRP ile Güçlendirilme Uygulamaları.....	9
1.3.1. Yapılarda meydana gelen kolon hasarları	9
1.3.2. Kolonlarda FRP güçlendirme yöntemi.....	11
1.3.3. Kolonlarda FRP güçlendirme uygulamaları.....	11
BÖLÜM 2.	
SİLİNDİR BETON ELEMANLARIN GENEL DAVRANIŞI	14
2.1. Sargılı ve Sargısız Betonların Davranışı	14
2.2. En Büyük Yanal Güçlendirme Gerilmesinin Hesabı	15
2.3. FRP ile Güçlendirilmiş Beton Model Parametreleri	16
2.3.1. FRP ile sargılanmış betonun gerilme model bağıntıları	16
2.3.2. FRP ile sargılanmış betonların şekil değiştirme model bağıntıları	17
2.4. Mander Tarafından Önerilen Model	18
2.5. FRP ile Güçlendirilmiş Betonların Model Çalışmaları.....	21

2.5.1. Khaloo ve arkadaşları tarafından önerilen model.....	21
2.5.2. Karbhari ve Gao tarafından önerilen model	22
2.5.3. Saadetmanesh ve arkadaşları tarafından önerilen model ...	22
2.5.4. Samaan ve arkadaşları tarafından önerilen model.....	23
2.5.5. Toutanji tarafından önerilen model	24
2.5.6. Saafi ve arkadaşları tarafından önerilen model	24
2.5.7. Miyauchi ve arkadaşları tarafından önerilen model	25
2.5.8. Youssef ve arkadaşları tarafından önerilen model	25
2.5.9. Lam ve Teng tarafından önerilen model	26
2.5.10. Chastre ve Silva tarafından önerilen model	26
2.5.11. Elsanadedy ve arkadaşları tarafından önerilen model.....	27
2.5.12. Jiang ve Teng tarafından önerilen model	28
2.5.13. Faustino ve arkadaşları tarafından önerilen model.....	28
2.5.14. Q.G. Xiao ve arkadaşları tarafından önerilen model.....	28
2.5.15. H.Abdallaha ve arkadaşları tarafından önerilen model	29
2.5.16. Yugui Cao ve arkadaşları tarafından önerilen model.....	29

BÖLÜM 3.

TEST NUMUNELERİ VE DENEY SONUÇLARI	30
3.1. Test Numuneleri.....	30
3.1.1. Silindir betonlar	30
3.1.2. CFRP kompozitler	31
3.1.3. GFRP malzemeleri	32
3.1.4. Epoksi reçine	33
3.2. FRP Kompozitler ile Güçlendirilen Beton Deney Sonuçları.....	34

BÖLÜM 4.

SONLU ELEMENLAR MODEL ÇALIŞMALARI	36
4.1. ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı	36
4.1.1. Program arayüzü.....	36
4.1.2. Ana pencere bileşenleri	37
4.1.3. ABAQUS'te işlem adımları	38

4.1.4. ABAQUS’te kullanılan birimler	39
4.1.5. Analizde kullanılan eleman tipleri	39
4.2. Betonların SEM ile Modellenmesi.....	40
4.2.1. Beton Hasar Plastisite.....	40
4.2.2. Betonların basınç hasar davranışı.....	42
4.2.3. Beton çekme gerilmesi	44
4.2.4. Çözüm Ağı oluşturma	46
4.2.5. Yük ve sınır şartlarının uygulanması.....	47
4.2.6. Analiz tipinin belirlenmesi	48
4.2.7. Beton davranış modeli analizi	48
4.3. FRP Kompozitlerin SEM ile Modellenmesi	51
4.4. FRP ile Güçlendirilmiş Beton Davranış Modeli Analizleri	53
4.5. Parametrik Çalışma	57
4.5.1. S4 beton numunelerinin modellenmesi	57
4.5.2. CFRP2 ve GFRP3 ile güçlendirilmiş S1, S2 ve S3 beton numunelerin modellenmesi.....	58
4.6. FRP ile Sargılanmış Düşük Dayanıma Sahip Betonlara Ait Gerilme Modeli Denkleminin Belirlenmesi.....	60
4.7. FRP ile Sargılanmış Düşük Dayanıma Sahip Betonlara Ait Şekil Değiştirme Modeli Denkleminin Belirlenmesi	62
4.8. Mevcut Denklemlerin Üretilen Gerilme ve Şekil Değiştirme Denklemleri ile Karşılaştırılması	64
2.8.1. Eksenel basınç gerilmelerinin karşılaştırmaları	64
4.8.2. Birim şekil değiştirmelerin karşılaştırmaları	68
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_g	: Brüt beton kesit alanı
A_j	: FRP kesit alanı
A_{co}	: Sargılanmamış brüt beton kesit alanı
a_i	: Düşey donatıların eksenleri arasındaki mesafe
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
CFRP1	: Bir kat Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
D	: Eşdeğer beton çapı
DA	: Dilasyon Açısı
E_{co}	: Sargısız betonun Elastisite modülüsü
E_{FRP}	: FRP kompozitin Elastisite modülü
F_c	: Beton basınç dayanımı
FRP	: Elyaf Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer)
F_j	: FRP malzemesinde oluşan çekme kuvveti
f_{cu}	: FRP ile sargılanmış betonun basınç dayanımı
f_{co}	: Sargısız beton dayanımı
f_j	: FRP malzemesinde oluşan çekme gerilmesi
f_t	: FRP çekme dayanımı
F_{su}	: Çelik donatının kopma dayanımı
F_{sy}	: Çelik donatının akma dayanımı
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer)
GFRP1	: Bir kat Cam Elyaf Takviyeli Polimer
k_1	: Etkin kuşatma katsayısı
k_{s1}	: Şekil katsayısı
k_s	: Biçim katsayısı
n_f	: FRP katman sayısı

SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
S1	: 6,7 MPa basınç dayanımına sahip beton numune
S2	: 11 MPa basınç dayanımına sahip beton numune
S3	: 20,8 Mpa basınç dayanımına sahip beton numune
S4	: 16 Mpa basınç dayanımına sahip beton numune
Δu	: Kopma anındaki şekil değiştirme
\emptyset	: Donatı çapı
Δy	: Akma anındaki şekil değiştirme
ρ_s	: Boyuna donatı oranı
ϵ_j	: FRP şekil değiştirmesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Farklı nedenlerden dolayı kolonların hasarı	10
Şekil 1.2. Daire kesitli kolonların hasarı	10
Şekil 1.3. Kolonların FRP kompozitler ile güçlendirme yöntemleri	11
Şekil 1.4. Göksu köprüsü güçlendirme çalışması	12
Şekil 1.5. Kolonların FRP kompozitler ile güçlendirme uygulamaları.....	13
Şekil 2.1. FRP kompozitler ile güçlendirilen kolonların tipik basınç dayanımı- eksenel/hacimsel şekil değiştirme davranışı.	15
Şekil 2.2. Sargılı kesitin serbest cisim diyagramı	15
Şekil 2.3. Sargısız ve sargılı betonun gerilme- şekil değiştirme ilişkisi	18
Şekil 2.4. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	21
Şekil 3.1. Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP)	31
Şekil 3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP).....	32
Şekil 3.3. Deney sonuçlarına göre betonlarının davranışları	35
Şekil 4.1. Program ara yüz ekranı	36
Şekil 4.2. ABAQUS'te Ana pencerenin bileşenleri	37
Şekil 4.3. ABAQUS'te işlem adımları	38
Şekil 4.4. Analizlerde kullanılan eleman tipleri.....	40
Şekil 4.5. Eksenel basınç altında beton davranışı	41
Şekil 4.6. Eksenel çekme altında beton davranışı	41
Şekil 4.7. Betonların basınç hasar davranışı	43
Şekil 4.8. Hasar değişkeni (dc) - inelastik şekil değiştirme ilişkisi	44
Şekil 4.9. Beton çekme dayanımı ve çatlama şekil değiştirme ilişkisi	44
Şekil 4.10. Beton basınç dayanımı ve şekil değiştirme ilişkisi	45
Şekil 4.11. S1, S2, S3 ve S4 betonu için çekme dayanımı ve çatlama şekil değiştirme	46
Şekil 4.12. Sonlu elemanlar çözüm ağları türü	46
Şekil 4.13. Sonlu elemanlar çözüm ağları boyutu.....	47

Şekil 4.14. Yük ve sınır şartları tanımlanması	47
Şekil 4.15. S3 betonun modelde gerilme dağılımları	48
Şekil 4.16. S1, S2 ve S3 beton numuneleri için çözüm ağı hassasiyeti DA 40 kabul edilerek basınç gerilmesi-birim şekil değiştirme ilişkisi	49
Şekil 4.17. Farklı dilasyon açısı, türü ve boyutu ile S2 betonlarının deney ve SEM analiz sonuçları	50
Şekil 4.18. S1 ve S3 betonları için DA hassasiyeti	51
Şekil 4.19. ABAQUS'te FRP katmanlarının oluşturulması	52
Şekil 4.20. Güçlendirilmiş beton gerilme dağılımları	54
Şekil 4.21. CFRP ile güçlendirilmiş S1, S2, S3 beton numunelerin basınç deney sonuçları ve SEM analiziyle karşılaştırılması	55
Şekil 4.22. GFRP ile güçlendirilmiş S1, S2, S3 beton numunelerin basınç deney sonuçları ve SEM analiziyle karşılaştırılması	56
Şekil 4.23. FRP kompozitler ile güçlendirilmiş S4 betonunun davranışları	58
Şekil 4.25. İki kat CFRP ve Üç kat GFRP ile güçlendirilmiş S1, S2 ve S3 beton davranışları	59
Şekil 4.26. "Gerilme modeli" formülü hesaplanması	61
Şekil 4.27. Şekil Değişirme Modeli formülü hesaplanması	63
Şekil 4.28.a. FRP ile güçlendirilmiş betonlar için (D/SEM) sonuçları - araştırmacıların sargılama modelleri karşılaştırması	66

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. CFRP malzemesinin özellikleri	32
Tablo 3.2. Güçlendirmede kullanılan GFRP malzemesinin özellikleri	33
Tablo 3.3. Epoksi yapıştırıcısının özellikleri	34
Tablo 3.4. Deneysel çalışmada betonların gerilme-şekil değiştirme değerleri ...	34
Tablo 4.1. ABAQUS'te kullanılan birimler	39
Tablo 4.2. SEM modeli FRP özellikleri	52
Tablo 4.3. Deney ve SEM sonuçlarına göre güçlendirilmiş betonların basınç dayanımı ve şekil değiştirmeleri	53
Tablo 4.4. S4-FRP kompozitlerin ile güçlendirilen betonunun aksenal gerilme ve şekil değiştirmeleri	57
Tablo 4.5. S1, S2 ve S3 betonları için CFRP2 ve GFRP3 parametresi sonuçları	58
Tablo 4.6. Sargılama etkililiği faktörü, f_{cu}/f_{c0} ve sargılama oranı, f_j/f_{c0} değerleri	61
Tablo 4.7. Şekil değiştirme etkililiği faktörü, $\epsilon_{cu}/\epsilon_{c0}$ ve sargılama oranı, f_j/f_{c0} değerleri	62
Tablo 4.8. İncelenen modeller için f_{cu} değerleri	65
Tablo 4.9. İncelenen modeller için ϵ_{cu} değerleri	69

ÖZET

Anahtar kelimeler: CFRP, GFRP, güçlendirme, sonlu elemanlar metodu, SEM, düşük dayanımlı beton.

Bu çalışmada, Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP ve GFRP) kompozitler ile güçlendirilen aksel yük etkisi altındaki standart silindirik boyutlara sahip beton elemanların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Silindirik beton numuneler ortalama 6,7, 11 ve 20,8 MPa basınç dayanımına sahiptir. Çalışmada, tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile aksel basınç kuvvetine karşı dışarıdan enine sarılarak güçlendirmiş betonların sonuçları kullanılmıştır.

Beton numunelerin modellenmesinde ABAQUS Sonlu Elemanlar Metodu(SEM) paket programı kullanılmıştır. ABAQUS'te istenen parametreler; deneysel çalışmalardan, literatürden ve modellemede yaygın olarak kullanılan bazı temel formüllerden elde edilmiştir. Modelleme için gerekli parametreler belirlenerek düşük dayanımlı betonlara ait sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Çözüm ağı boyutu ve şekli, dilasyon açısı gibi model parametreleri beton davranışını önemli ölçüde etkilediği için öncelikle düşük dayanımlı betonlara uygun parametrelerin tespiti üzerine çalışılmıştır. Beton modeli deneysel çalışma sonuçları ile doğrulandıktan sonra Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler ile güçlendirilmiş betonların analizi yapılmıştır. FRP Kompozitler sonlu elemanlar modelinde beton yan yüzeylerine kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Ayrıca SEM ile beton dayanımı ve FRP katman sayıları değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. FRP ile güçlendirilmiş düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarını ve birim şekil değiştirmelerini hesaplayabilmek için literatürdeki formüller analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlarına göre; beton numuneler davranışı ve FRP kompozitler ile güçlendirilen betonların davranışı önerilen sonlu elemanlar modeli ile iyi bir yakınsama ile doğrulanmıştır. Düşük dayanıma sahip betonlar için uygun model parametreleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ve parametrik çalışma sonuçları kullanılarak FRP ile güçlendirilmiş düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarını ve birim şekil değiştirmelerini daha doğru hesaplayacak 'Gerilme Modeli' ve 'Birim Şekil Değiştirme Modeli' formülleri üretilmiştir.

FINITE ELEMET ANALYSIS OF LOW-STRENGTH CYLINDER CONCRETE ELEMENT STRENGTHENED WITH FRP COMPOSITES.

SUMMARY

Keywords: CFRP, GFRP, low-strength concrete, strengthening, finite element method, FEM.

In this study, concrete elements with standard cylinder dimensions, with carbon and glass fiber reinforced polymer (CFRP and GFRP) composites were analyzed under the effect of axial load by finite element method. The cylindrical concrete samples have an average compressive strength of 6.7, 11 and 20.8 MPa. The axial force results of outer strengthened concrete with single direction transverse CFRP or GFRP were used in this study.

The behavior of CFRP and GFRP reinforced concrete was modeled by Finite Element Method (FEM) program ABAQUS. The desired parameters for modeling in ABAQUS program has been obtained from experimental studies and some basic formulas commonly used in literature and modeling. Finite element model of low strength concrete was formed by determining the necessary parameters for modeling. As model parameters such as the size and shape of the mesh and the angle of dilution are significantly affect the concrete behavior, the suitable parameters for low strength concrete were determined first. After validating concrete model experimental results, analyzes were obtained for strengthened concrete with fiber reinforced polymers. FRP composites are defined as shell elements in finite element model and connected to concrete side surface. Parametric study was performed by changing the concrete strength and number of FRP layer in FEM model. In order to calculate the compressive strength and deformations of FRP strengthened concrete, the formulas in the literature were analyzed. According to the obtained results, behaviour of concrete samples and behaviour of strengthened concrete by FRP composites are confirmed with a good convergence using the proposed finite element model. Suitable model parameters have been determined for low strength concrete.

By using the results obtained from FEM analyzes and results of the parametric study, formulas for stress and strain model are developed to calculate the compressive strengths and deformations more accurately for FRP retrofitted concrete with low compressive strength.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Türkiye en aktif deprem bölgelerinden biri üzerinde yer almaktadır. 1900 sonrası dünyadaki toplam depremlerin yaklaşık beşte biri Türkiye’de meydana gelmiş ve dünyadaki 600 milyon insanın deprem bakımından riskli kuşaklarda yaşamasına rağmen Türkiye nüfusunun % 98’inin deprem tehlikesi altında yaşamaktadır.

1900 sonrası deprem haritasının bilgilere göre, Türkiye topraklarının %93’ü deprem bölgeleri üzerinde yer almıştır. 2009 yılına kadar Türkiye’de 223 büyük deprem meydana gelmiştir. 17 Ağustos 1999’da 7,4 şiddetinde gerçekleşmiş Marmara depremi olarak da anılmış depremi yakın zamanımızdaki diğer depremlerden binanın hasarı ve yıkımın boyutları bulunduğu bilinmektedir [1]–[8].

Depremlerden sonra yapılmış araştırmalar betonarme yapıların önemli bir kısmının mevcut deprem yönetmeliğine (TDY-2007) göre iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Düşük dayanıma sahip yapı sayısının fazlalığı ve halen kullanımda olmalarından dolayı, her yapı için uygun iyileştirme ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesi amacına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Türkiye’de meydana gelen depremler, mevcut betonarme yapıların önemli bir bölümünün birçok açıdan güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Depreme karşı dayanımı düşük olan betonarme yapıların sayısının fazla olması, bu yapıların halen faal olması büyük risk oluşturmaktadır. Bu yapıların bir an önce depreme karşı yeterli güvenli hale getirilmesi gerekmektedir. Depremlerin yaşandığı bölgelerde depremler sonrası onarım ve güçlendirme işleri hız kazanmakta ama daha sonraları unutulmaktadır. Son yıllarda toplu yerleşim yerlerinde kentsel dönüşüm ile yapılar yıkılarak yerine yeni depreme dayanıklı ve birçok açıdan daha etkili olanları inşa edilmektedir. Ancak burada yüksek maliyetler ve şehrin dokusundan farklı mimariler ortaya çıkmaktadır [9]–[11].

Betonarme yapılar farklı şekillerde onarılarak ve güçlendirilerek depremlere dayanıklı hale getirilmektedir. Depreme karşı betonarme yapıların en önemli elemanı kolonlar ve perdeler oluşturmaktadır. Hasar görmüş betonarme kolonlar incelendiğinde betonların basınç dayanımlarının oldukça düşük olması, kolon etriyelerinin yeterli sıklık ve miktarda olmaması, etriye kancalarının uygunsuzluğu, kolon sürekliliğinin sağlanamaması vb. nedenler ile betonarme yapılar hasar görmekte veya yıkılmaktadır [12]–[19].

Betonarme kolonların onarım ve güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kolonların betonarme elemanlar ile mantolanması kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak bu yöntemler ile yapılan güçlendirmelerde oluşan boyut artışı alan kayıplarına sebep olmakta ve güçlendirilme yapılırken yapının kullanımını mümkün olmamaktadır. Yapı ağırlığını artırmayan, kolay ve hızlı uygulanabilen, elemanların taşıma kapasitelerini önemli ölçüde artıran, güçlendirme sırasında yapının kullanımına olanak sağlayan Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler bu tür problemleri azaltan önemli bir onarım ve güçlendirme malzemesidir. Betonarme kolonlar FRP kompozitler ile sarılarak aksel basınca karşı etkili bir şekilde güçlendirilebilmektedir [20]–[25].

FRP kompozitler ile aksel basınç kuvvetine karşı güçlendirilmiş betonlar üzerine yapılan deneysel çalışmalar ile kolonların davranışı araştırılmaktadır. Ayrıca deneysel çalışma sonuçları Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile doğrulanarak ve deney parametreleri artırılarak yeni ve etkili güçlendirme yöntemleri üzerinde çalışılmaktadır. Beton dayanımının ve içeriğinin değişmesi, beton davranışını önemli derecede etkilemektedir. Ayrıca beton davranışının başlangıçtan itibaren doğrusal olmaması ve karmaşıklığı sonlu elemanlar ile modellenmesini de zorlaştırmaktadır. Farklı dayanımdaki betonların sonlu elemanlar paket programları modellenmesi ve FRP kompozitler ile güçlendirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır [26]–[30].

Bu tezde, betonarme kolonlardaki kusurlar dikkate alınarak FRP kompozitler ile güçlendirilen aksel yük etkisi altındaki standart silindir boyutlara sahip beton elemanların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Silindir beton numuneler

ortalama 6,7, 11 ve 20,8 MPa basınç dayanımına sahiptir. Çalışmada, tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile eksenel basınç kuvvetine karşı dışarıdan enine sarılarak güçlendirmiş betonların sonuçları kullanılmıştır. CFRP ve GFRP ile güçlendirilen betonların davranışı Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile modellenmesi üzerine çalışılmıştır. SEM ile beton dayanımı ve FRP katman sayıları değiştirilerek parametrik çalışma yapılmıştır. FRP ile güçlendirilmiş düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarını ve birim şekil değiştirmelerini hesaplayabilmek için literatürdeki formüller analiz edilmiştir. SEM analizlerinden elde edilen doğrulama sonuçları ve parametrik çalışma sonuçları değerlendirilerek FRP ile güçlendirilmiş düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarını ve birim şekil değiştirmelerini daha doğru hesaplayacak ‘gerilme modeli’ ve ‘birim şekil değiştirme modeli’ formülleri üzerine çalışılmıştır.

1.1. Tez İçeriği

Bu tez çalışmasında CFRP ve GFRP kompozitler ile eksenel basınca karşı güçlendirilen düşük dayanımlı beton elemanların deneysel çalışmalardan alınan basınç davranışı ABAQUS sonlu elemanlar programı yardımı ile modellenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada standart silindir boyutlardaki betonlar 6,7, 11 ve 20,8 MPa üzere üç farklı basınç dayanımına sahiptir. Betonların eksenel basınca karşı güçlendirilmesinde CFRP ve GFRP kompozitler kullanılmıştır. Modellemede son zamanlarda sıkça kullanılan ve mühendislik problemlerinin çözümü için vazgeçilmez bir araç haline gelen sonlu elemanlar yöntemi ABAQUS programı kullanılmıştır.

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır:

Birinci bölümde, literatür taraması; daire/dikdörtgen kolon gibi betonarme yapı elemanların FRP kompozitler ile güçlendirilmesi üzerine yapılan deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi, ABAQUS programı ile modelleme için literatür taraması yapılmış ve literatüre ait özet bilgiler verilmiştir. Yapılan çalışmanın amaç ve kapsamı açıklanmıştır. Ayrıca FRP malzemelerin genel özellikleri, dünyadaki uygulama örnekleri bu bölümde açıklanmıştır.

İkinci bölümde; betonarme kolonların genel davranışı hakkında bilgileri verilmektedir. FRP kompozitler ile kolonların güçlendirilmesi, FRP kompozitler ile sargılanmış betonarme kolonların basınç dayanımı ile şekil değiştirme ilişkileri araştırılmıştır. FRP kompozitler ile sargılı beton modellenmesi hakkında yapılmış bazı araştırmalar vurgulanmıştır.

Üçüncü bölümde; deneysel çalışmalarda SEM modellenmesinde kullanılmış CFRP ve GFRP kompozitlerin özellikleri açıklanmıştır. Betonların güçlendirilmesi üzerine yapılan deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Şahit beton ve güçlendirilmiş betonun deney sonuçları verilmiştir.

Dördüncü bölümde; beton ve FRP malzeme özelliklerin sonlu elemanlarda tanımlanması, model parametrelerinin girilmesi, kurulan modelin özellikleri, beton modeli ve aksenal basınca karşı güçlendirilmiş betonların doğrulama çalışmaları anlatılmıştır. Parametrik çalışmalar ile yeni deney verileri üretilmiştir. Deney sonuçları ve parametrik çalışmaların sonuçları değerlendirilerek FRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonun basınç dayanımını ve birim şekil değiştirmesini tahmin edecek hesap denklemleri üzerine çalışılmıştır.

Beşinci bölümde; sonuçlar ve öneriler özetlenerek sunulmuştur.

1.2. Literatür Özetleri

Betonarme yapıların FRP kompozitler ile güçlendirilmesi üzerine yapılmış birçok deneysel çalışma SEM analizi mevcuttur. Burada betonarme kolonların FRP malzemeler ile güçlendirilmesi üzerine yapılmış deneysel çalışmalar ve SEM analizlerine ait özet bilgiler sunulmuştur.

Shahawy ve Arkadaşları (2000), 152.5 mm çapında 305 mm yüksekliğinde iki farklı basınç dayanımına sahip iki farklı basınç dayanımına sahip silindirik betonlar üretmişlerdir. Birinci ve ikinci grup silindirik betonların basınç dayanımları sırasıyla 20,8 ve 41,4 MPa'dır. Birinci gruptaki numuneleri dışarıdan 1 - 5 kat, ikinci gruptaki

numuneler ise 1- 4 kat sarılarak CFRP ile güçlendirilerek test etmişlerdir. Güçlendirilen betonların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesini yapmışlardır. Tüm silindir betonları sonlu elemanlar programı ile Drucker-Prager plastisite modeli kullanarak modellemişlerdir. Güçlendirilmiş beton numunelere ait basınç dayanımı- birim şekil değiştirme ilişkisini göstermiştir. Farklı katlar CFRP kullanarak dilasyon parametresinin etkisini incelemişlerdir. 5 kat CFRP kullanarak dilasyon değeri 0,63 bir kat ise 0,22 sonuç olarak elde etmişlerdir. Deneysel ve sonlu eleman yöntemi sonuçları basınç dayanımı ve birim şekil değiştirme için karşılaştırarak yeterli bir uyum yakalamışlardır [31].

Lam ve arkadaşları (2006), 152 mm çapında 305 mm yüksekliğinde iki farklı basınç dayanımına sahip toplam silindir beton numuneler üretmişlerdir. Üretilen numuneler iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup silindir betonların basınç dayanımları yaklaşık 41,1 MPa, birim şekil değiştirme ise 0,00256, ikinci grup silindir betonların basınç dayanımları yaklaşık 38,9 MPa birim şekil değiştirmelerini ise 0,0025 olarak tespit etmişlerdir. Numuneleri dışarıdan 1 kat veya 2 kat elastisite modülü 250 GPa ve 0,166 mm kalınlığına sahip CFRP ile sarılarak güçlendirmiş sabit hızlı ve tekrarlı yüklemeler altında test edilmesi sonucunda basınç dayanımı – şekil değiştirme kapasiteleri bakımından karşılaştırmışlardır. Birinci grup silindir betonları bir kat karbon elyaf takviyeli polimer CFRP ile sarılarak güçlendirildiği zaman basınç dayanımı yaklaşık 56 MPa, ikinci grup numune betonları iki kat CFRP ile sarılarak güçlendirildiği zaman basınç dayanımı yaklaşık 78 MPa olarak belirlenmiştir. CFRP ile sarılarak güçlendirilen betonların test edilmesi sonucunda basınç dayanımı -şekil değiştirme eğrileri bulunmuştur. Yapılmış deney sonuçları mevcut sonlu elemanlar yöntemi modelleri ile modellenmişlerdir [32].

Youssef ve Arkadaşları (2006); FRP kompozitler ile güçlendirilmiş beton için gerilme – şekil değiştirme modeli önermişlerdir. FRP kompozitler ile güçlendirilmiş beton için bir gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirilmiştir. Model, CFRP ve GFRP kompozitler ile oluşturulmuş dairesel, kare ve dikdörtgen kısa kolonları içeren deneysel çalışmalarının sonuçlarına dayanmaktadır. Maximum gerilme, kopma gerilmesi, kesit geometrisi ve kompozit parametrelerinin, FRP ile güçlendirilmiş

betonun gerilme – şekil değiştirme davranışını etkileyen önemli faktörler olduğunu elde etmişlerdir. Bu parametreler, deneysel verilere dayanarak istatistiksel olarak analiz edilmiş ve teorik olarak bu parametreleri tahmin etmek için denklemler sunulmuştur. Tahmin edilen parametreler dairesel, kare ve dikdörtgen kısa kolonları için ayrı ayrı tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar, literatürdeki diğer yarı deneysel modellerle karşılaştırılmıştır. Son olarak bir FRP-sınırlı beton modeli önerilmiştir. Önerilen model, hem bu çalışmadan elde edilen deney sonuçları hem de daha önce yayınlanmış diğer veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Geliştirilen model ile dairesel ve dikdörtgen kesitli kolonların davranışını tespit etmişlerdir [33].

Jiang ve Teng (2007), FRP ile güçlendirilmiş betonların gerilme-şekil değiştirme modelleri üzerine çalışmışlardır. FRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonlar için gerilme-şekil değiştirme modelleri geliştirmişler ve bu modelleri iki gruba ayırmışlardır. Birinci grupta;. Çalışmada ilk olarak FRP kompozitler ile güçlendirilmiş beton için analiz odaklı mevcut modellerin ciddi bir şekilde incelemesini ve değerlendirmesini sunmuşlardır. Bu değerlendirme için yazarlar tarafından yürütülen son 48 testten oluşan bir veri tabanı sunmuşlardır. Analiz odaklı mevcut modellerinin gerilme – şekil değiştirme davranışını değerlendirmek için FRP kompozitler ile güçlendirilmiş silindirik boyutlardaki betonların (çap $D = 152$ mm ve yükseklik $H = 305$ mm) eksenel basınç testlerinin sonuçlarını içeren bir test veri tabanı kullanmışlardır. Teng ve arkadaşlarının modelinin geliştirilmiş bir modeli de önermişlerdir. Son olarak, düşük dayanımlı beton için gerilme – şekil değiştirme davranışının daha doğru tahminlerini sağlayan rafine bir versiyonunu sunmuşlardır [34].

Wei ve arkadaşları (2009), ortalama 41,1 MPa ve 57,5 MPa basınç dayanımına sahip iki seri kare kesitli kolonları CFRP ile kısmi sarma metodu kullanarak güçlendirmişlerdir. Birinci seri betonlar donatısız ikinci seri betonlar donatılı olarak üretilmiştir. Birinci ve ikinci serideki numunelerden orta bölgelerine denk gelen yüzeyleri tahrip edilerek CFRP ile sarılmış ve kolonların mekanik davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Beton dayanımı düşük kolonlarla yüzeyine hasar verilen beton dayanımı daha yüksek olan kolonlar karşılaştırılmıştır. Kısmi sarılmadaki

iyileşmeyi görmek için FRP kompozitler düşük dayanımlı bölüm üzerine sarılmıştır. Deneysel sonuçlarından elde edilen verilere göre; hasar verilmiş bölümler üzerinde yapılan güçlendirme, kolonların dayanım ve sünekliğini önemli ölçüde artırmıştır. Tüm güçlendirilen kolonların taşıma kapasiteleri, taşıma kapasitesi yeterli olan kolonlardan daha yüksek çıkmıştır. Var olan analitik model yardımı ile FRP ile yapılan güçlendirme teorik olarak doğrulanmıştır. Elemanların sadece zayıf bölgeleri güçlendirilerek aşırı maliyetten ve zaman israfından kazanç sağlanabileceği vurgulanmıştır [35].

Korhan Deniz Dalgıç (2010), düşük dayanımına sahip betonlar üzerinde deney ve sonlu eleman yöntemi ile modelleme çalışması yapmıştır. Dıştan sargılayarak beton dayanımının yanında sünekliğini de arttıracak yapısal bir güçlendirme yöntemi incelemiştir. Çalışmada ekonomiklik dikkat alınarak düşük elastisite modülüne sahip GFRP kompozit ile 2, 4 ve 6 kat sarılarak güçlendirilmiş ve aksel basınç testi ile test edilmiştir. Silindirik betonların sonlu elemanlar programı ile sargılı silindirik betonun Drucker-Prager Plastisite modeli kullanılarak modellenmiştir. Deneysel ve sonlu eleman yöntemi sonuçları karşılaştırılarak arasındaki uyum incelenmiştir [36].

Kmieciak ve Kaminski (2011); beton basınç dayanımının zamanla bozulmasını dikkate alarak betonarme yapıların ve kompozit yapıların sonlu elemanlar yardımı ile modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Betonların sonlu elemanlar ile modellenmesinde Beton Hasarlı Plastisite modelini kullanmışlardır. Beton Hasarlı Plastisite modelinde bulunan K_c parametresi, genleşme açısı, eksantriklik viskozite parametresini hesaplamışlardır. ABAQUS modellenmesi için elde edilen denklemler kullanarak hasarlı beton davranışını oluşturmuşlardır [37].

Chaudhari ve Chakrabarti (2012); bir sonlu elemanlar programı kullanarak betonun Lineer olmayan analizi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada analiz yapmak için ABAQUS genel amaçlı sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. SEM'de betonlar üç boyutlu olarak, çatlak modeli ve beton hasarı plastisite yaklaşımı kullanılarak hazırlanmıştır. ABAQUS'te 150 mm'lik küp boyutlu beton modellenmiştir. Basınç yükünün beton yüzeyine eşit dağılması için 25 mm kalınlığında bir çelik levha

numunenin yükleme yapılacak yüzeylerine bağlanmıştır. Malzeme özellikleri beton için IS 456- 2000 koda göre ortalama basınç gerilmesi $\sigma_{cu} = 30 \text{ Mpa}$ maksimum şekil değiştirme $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ ve $\varepsilon_{co} = 0.002$ belirlenmiştir. SEM'de beton özelliklerini tanımlamak için iki yöntem kullanılmıştır. Birincisi Smear Çatlak Modeli ikinci ise Beton Hasar Plastisite yöntemi kullanarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Parametre olarak 25, 18,75 ve 15'lik mm çözüm ağı boyutları kullanılmıştır. Beton modelinde uygun ağ boyutu 15 mm olarak tespit edilmiştir [38].

Alperen Çopur (2013) FRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonların aksel yük altındaki davranışı incelenmiştir. CFRP, GFRP ve AFRP kompozitler ile güçlendirmek için daire kesitli yüksek dayanımlı betonlar üretilmiştir. Betonlar 2, 3, 4 ve 5 katlı CFRP, GFRP ve AFRP kompozitler ile güçlendirilmiş ve aksel yük altındaki davranışını aksel gerilme-birim şekil değiştirme davranışını incelemek amacıyla deneysel ve sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçları her bir güçlendirme malzemesi için ayrı ayrı grafikler halinde sunulmuştur. Çalışmada deneysel sonuçları literatürdeki mevcut güçlendirme modelleri ile karşılaştırılmıştır. Modellerin CFRP, GFRP ve AFRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonun basınç dayanımını ve birim şekil değiştirme değerinin tahmin performansları sorgulanmıştır. Analiz yapmak amacıyla sonlu elemanlar paketi için ABAQUS programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ABAQUS programında numuneler Beton Hasarlı Plastisite yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Deneysel sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar paket programı ABAQUS içinde tanımlı olarak bulunan ve beton hasar plastisite hipotezini temel alan kullanılarak modellenen lifli polimer sargılı ultra-yüksek dayanımlı beton kolonun sonlu elemanlar modeli deneysel sonuçlarını iyi bir yakınsaklıkla tahmin etmiştir. Bu da normal dayanımlı betonlarda aksel gerilme-şekil değiştirme eğrisini iyi bir şekilde tahmin edebilen BHP 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. Deneysel sonuçları ile sonlu eleman modeli arasındaki en büyük fark %16 olarak hesaplanmıştır [39].

Delnavaz ve Hamidnia (2015) CFRP ile güçlendirilmiş tek eksenli silindirik kolonların davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı 17,8, 25, 45 MPa basınç dayanımlarına sahip ve değişken CFRP katmanlarına sahip silindirik numuneler kullanılmıştır. Tüm betonların 30 cm çapında ve 60 cm yüksekliğinde ve CFRP katmanları sayısı ise 1, 3, 6 ve 9 kat ile güçlendirilmiş beton üretilmiştir. Kolonlar sonlu elemanlar ABAQUS yazılımında üç boyutlu olarak modellenmiştir. SE modellenmesi için Beton Hasarlı Plastisite yöntemi (CDP) kullanarak beton özellikleri tanımlanmıştır. Modeller deneysel çalışmaların sonuçları ile doğrulanmıştır. Modellerin doğrulanmasının ardından sonlu eleman ABAQUS analizinin sonuçları ISIS Kanada eğitim modülü sonuçları ile karşılaştırılarak; arasındaki fark, hata miktarları ve dayanım artışlarındaki değişimler incelenmiştir. Ayrıca farklı katmanlardaki CFRP kullanımı ve beton mukavemetinde değişim incelenmiştir. Yüksek dayanımlı betonlara göre daha düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarında daha fazla sapma olduğunu tespit edilmiştir. Kurulan sonlu elemanlar modeli, EN 1992-1-1'deki ilişkileri kullanarak, silindirik numunenin davranışını doğru tahmin etmiştir [40].

1.3. Kolon Hasarları ve FRP ile Güçlendirilme Uygulamaları

FRP kompozitler betonarme yapı elemanlarının onarımı ve güçlendirilmesi için uzun zamandır kullanılmaktadır. Hafif, yüksek mukavemete sahip, ayrıca fiberler herhangi bir yönde yönlendirilebildiğinden, bunların kullanımı optimize edilmektedir. Bu da FRP kompozitlerin özellikle acil onarım ve güçlendirme için uygun hale getirilmesini sağlamaktadır.

1.3.1. Yapılarda meydana gelen kolon hasarları

Depreme karşı betonarme yapıların en önemli elemanı kolonlar ve perdelerdir. Meydana gelen depremler, mevcut betonarme yapıların önemli bir bölümünün birçok açıdan güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Kolonların en çok zorlanan kısımları kolon uç bölgeleridir. Eksenel basınçla birlikte maksimum moment ve kesme kuvveti kolon uç bölgelerini zorlamamaktadır (Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.). Bu

bölgelere gerekli özen gösterilmemesi durumunda elemanın hasar alması kaçınılmaz olmaktadır. Beton dayanımının düşük olması kolonun dayanımını düşürmekte, donatının kenetlenmesini zorlaştırmakta ve kolon uç bölgelerinde mafsallaşmayı kolaylaştırmaktadır. Kolon uç bölgelerinde yeterli etriye sıkılaştırılmaması (Şekil 1.1.a), etriye kancalarının 135 °C kıvrılarak beton içerisine saplanmaması (Şekil 1.1.b), boyuna donatı yeteri kadar sarmaması kolonların hasar görmesine sebep olmaktadır.



a) Etriye adımı çok fazla



b) Uygun kanca yapılmamış

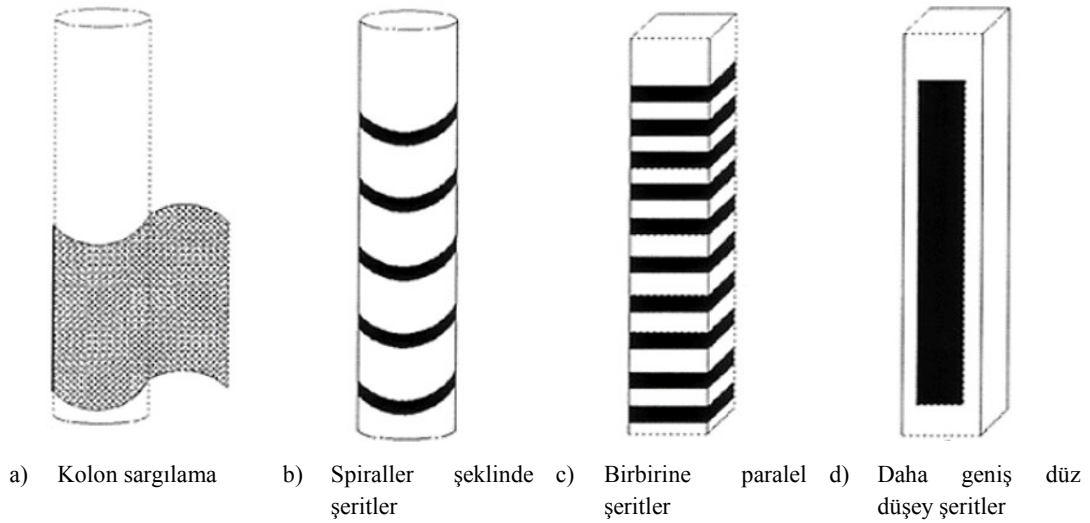
Şekil 1.1. Farklı nedenlerden dolayı kolonların hasarı [41]



Şekil 1.2. Daire kesitli kolonların hasarı [41]

1.3.2. Kolonlarda FRP güçlendirme yöntemi

Farklı lif doğrultulu kumaşlar kullanılarak güçlendirme mümkündür (Şekil 1.3.a). Kolonun yüksekliği boyunca yerleştirilmiş; spiraller şeklinde (Şekil 1.3.b), birbirine paralel şeritler (Şekil 1.3.c), daha geniş düz şeritler ile (Şekil 1.3.d) kolonlar güçlendirilmektedir [42].



Şekil 1.3. Kolonların FRP kompozitler ile güçlendirme yöntemleri

1.3.3. Kolonlarda FRP güçlendirme uygulamaları

FRP kompozitler ile güçlendirme uygulamalarının kapsamı oldukça geniştir [43]. 1980'lerin başından itibaren, çok sayıda deneysel ve saha projelerinde yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. 1990'ların başından itibaren FRP kompozitler kullanılarak 1500 ün üzerinde yapı kuvvetlendirilmiştir. İlk uygulamalarından birisi, 1991 yılındaki İsviçre'de bir beton köprü üzerinde uygulanarak kullanılmıştır. Sonra Japonya ve Almanya'da yoğunlaşmıştır. 1990'ların başından itibaren, Kanada, ABD ve Suudi Arabistan'ı da kapsayan birçok ülkeden araştırmacılar bu alandaki çabalarını bir araya getirmişler ve FRP malzemelerle yeniden donatımın değişik tasarım, analiz, uygulama ve dayanıklılık özelliklerini incelemişler. Avrupa'da yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesi amacıyla FRP kompozitlerin kullanımı araştırmaları 1980'lerin ortalarında başlamış, özellikle

kolonlar ve kirişlerin eğilme güçlendirmesi üzerinde yoğunlaşarak devam etmiştir. FRP kompozitler yapıların depreme karşı kuvvetlendirmesinde, yapıların uygun bir hale getirilmesinde, kolonların, kirişlerin, döşemelerin, bacaların, duvarların, tünellerin, tankların ve diğer yapı elemanların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır [44].

Türkiye’de, de Gaziantep ve Kahramanmaraş arasında bağlantıyı sağlayan anayol üzerindeki iki köprü (Karababa ve Göksu köprüleri) taşıma dayanımlarını arttırması amacıyla kolon ve kirişlerinde toplam 6250 m CFRP plaka ve 3765 m² CFRP dokuma ile kuvvetlendirme ve güçlendirme yapılmıştır. Şekil 1.4.’te Göksu köprüsüne ait kuvvetlendirme ve güçlendirme görülmektedir [43].



Şekil 1.4. Göksu köprüsü güçlendirme çalışması

Kolonlar FRP kompozitler ile dışarıdan enine ve boyuna doğrultuda sargılanarak kesme/eğilme/basınçça karşı etkili bir şekilde güçlendirilebilmektedir. FRP malzemelerin kolonlardaki uygulama şekilleri görülmektedir (Şekil 1.5.a,b).



a) FRP ile kompozitlerin Dikdörtgen kesitli kolonlarda uygulanması



b) FRP kompozitlerin daire kesitli kolonlarda uygulanması

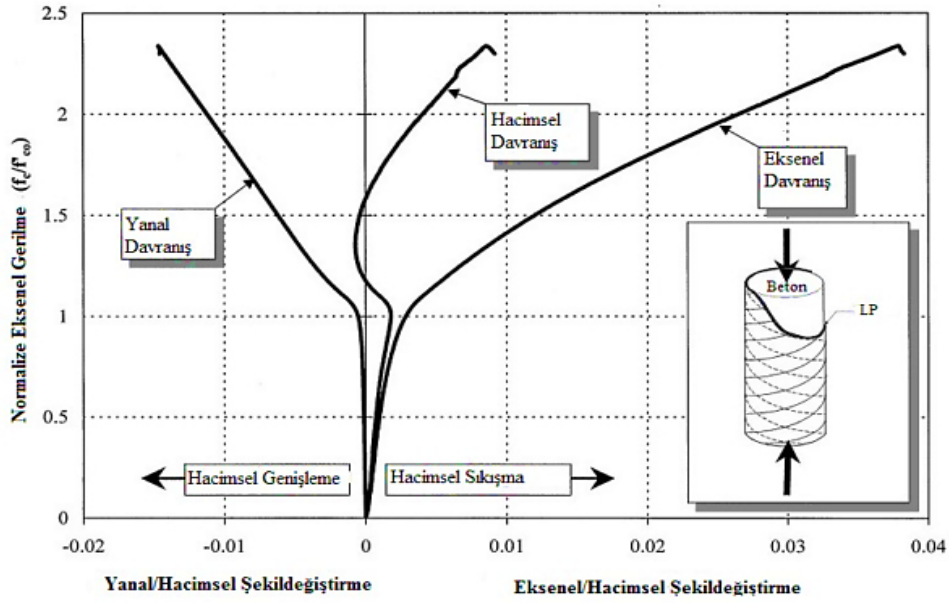
Şekil 1.5. Kolonların FRP kompozitler ile güçlendirme uygulamaları [45].

BÖLÜM 2. SİLİNDİR BETON ELEMANLARIN GENEL DAVRANIŞI

Bu bölümde, sargısız ve sargılı betonarme kolonların genel davranışı hakkında bilgileri verilmektedir. FRP kompozitler ile kolonların güçlendirilmesi, FRP kompozitler ile güçlendirilmiş, etriye ile sargılanmış betonarme kolonların basınç dayanımı ile şekil değiştirme ilişkileri, FRP kompozitler ile sargılı beton modellenmesinin incelenmesi, FRP kompozitler ile sargılı beton modellenmesi hakkında yapılmış bazı araştırmalar vurgulanmaktadır.

2.1. Sargılı ve Sargısız Betonların Davranışı

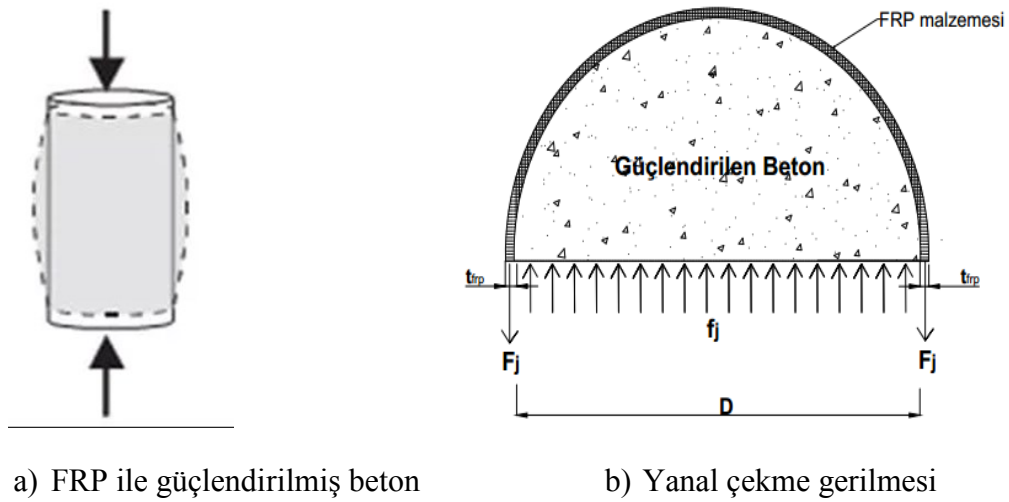
FRP kompozitler ile güçlendirilen kolonların tipik basınç dayanımı-eksenel/hacimsel şekil değiştirme davranışı ve FRP kompozitler ile güçlendirilen kolonların tipik basınç dayanımı - yanal/hacimsel şekil değiştirme bilineer (iki lineer) davranış Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Kolonların tipik basınç dayanımı-eksenel/hacimsel şekil değiştirme ve basınç dayanımı - yanal/hacimsel şekil değiştirme davranışlarındaki ilk zarf eğrisi güçlendirilmemiş (sargısız) beton dayanımına erişene kadar devam etmektedir ve bu, betonun davranışına benzemektedir. İkinci zarf eğrisi ise FRP kompozitlerin Elastisite modülüne bağlı olarak şekillenmektedir. Güçlendirilmiş kolonun aksenal yük taşıma kapasitesine ulaşması ile birlikte FRP malzemesi de dayanımına ulaşmış olmaktadır (Şekil 2.1.) [46]. FRP malzemesinde yırtılmalar başlar ve sistem güç tükenmesi durumuna erişmektedir. Betonun yanal şekil değiştirmesi ile FRP malzemesinin oluşacak çekme gerilmeleri ilişkisi vardır. Beton en büyük yanal şekil değiştirmeyi aksenal dayanımına eriştiği anda yapmaktadır. Dolayısıyla daire en kesitli FRP ile güçlendirilmiş kolonların sisteminde denge denklemi yazılarak lifli polimer tarafından uygulanan en büyük yanal sargılama basıncının değeri hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.1. FRP kompozitler ile güçlendirilen kolonların tipik basınç dayanımı-eksenel/hacimsel şekil değiştirme davranışı [46].

2.2. En Büyük Yanal Güçlendirme Gerilmesinin Hesabı

Daire en kesitli FRP ile güçlendirilen kolonların sistemindeki denge denklemleri yazılarak FRP tarafından uygulanan en büyük yanıl sargılama basıncının değeri hesaplanabilmektedir. Buna ait denge hali Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



a) FRP ile güçlendirilmiş beton

b) Yanıl çekme gerilmesi

Şekil 2.2. Sargılı kesitin serbest cisim diyagramı

Sargının, f_{frp} , yanal gerilme ve kolonun kesitinin çapı, D , değerlerine bağlı olarak beton üzerindeki yanal kuvvet, F_j , Denklem 2.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$F_j = n_{frp} t_{frp} f_{frp} \quad (2.1)$$

FRP malzemesinde birim boyda oluşan çekme kuvveti, F_j , FRP katı, n_{frp} , FRP bir kat şeridinin kalınlığı, t_{frp} , ve FRP malzemesi çekme dayanımı, f_{frp} , ile ifade edilmektedir. Sargı FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi hesap Denklemi 2.2’de verilmiştir [47].

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.2)$$

Burada; f_j : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi ve f_{frp} : FRP kompozitin çekme dayanımı, D : betonun çapını ifade etmektedir.

2.3. FRP ile Güçlendirilmiş Beton Model Parametreleri

Güçlendirilmiş beton modelinde kontrol parametreleri; f_{cu} : FRP ile güçlendirilmiş betonun en yüksek aksenal basınç dayanımı, ϵ_{cu} : FRP ile güçlendirilmiş betonun en büyük aksenal birim şekil değiştirme ve f_j : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal gerilmesinden oluşmaktadır [48].

2.3.1. FRP ile sargılanmış betonun gerilme model bağıntıları

Gerilme modeli parametresi, güçlendirilmiş beton için bir basınç gerilme – şekil değiştirme modelinin en önemli iki parametresinden biridir.

f_{cu} : FRP kompozit ile güçlendirilen elemanın göçmeden önce ulaştığı en büyük aksenal gerilmedir. FRP ile güçlendirilmiş dairesel betonun, orta ve yüksek sınır oranları için en yüksek gerilme, her zaman betonarme gerilmelerden daha yüksektir

ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi hemen hemen her zaman yükselmektedir. FRP ile güçlendirilmiş betonun en yüksek dayanımı, değerini etkileyecek parametrelere bağlayan bir formül genellikle “gerilme modeli” olarak isimlendirilmektedir. Bu formül genellikle etkililik faktörü; güçlendirilen elemanda göçmeden önce oluşan en büyük aksenal gerilmenin, güçlendirilmemiş elemanın aksenal gerilmesine bölünmesi ile sargılama oranı; FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal gerilmesinin, güçlendirilmemiş elemanın aksenal gerilmesine bölünmesi ile elde edilir ve Denklem 2.3’te gösterildiği gibi bir doğrusal ilişkiyi temsil etmektedir:

$$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_j \quad (2.3)$$

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_j}{f_{co}} \quad (2.3a)$$

Burada; $\frac{f_{cu}}{f_{co}}$; etkili sargılama faktörleri, $\frac{f_j}{f_{co}}$;sargılama oranı ve k_1 ; etkili FRP sargısının katsayısını ifade etmektedir [47].

2.3.2. FRP ile sargılanmış betonların şekil değiştirme model bağıntıları

Bu parametre, güçlendirilmiş beton için bir basınç gerilme – şekil değiştirme modelinin en önemli iki parametresinden biridir.

ϵ_{cu} : FRP kompozit ile güçlendirilen elemanın göçmeden önce ulaştığı en büyük aksenal şekil değiştirmesidir. FRP ile güçlendirilmiş betonun en büyük şekil değiştirme değerini etkileyecek parametrelere bağlayan bir formül genellikle “şekil değiştirme modeli” olarak isimlendirilmektedir.

Bu formülde genellikle etkililik faktörü güçlendirilen elemanda göçmeden önce oluşan en büyük şekil değiştirmenin, güçlendirilmemiş elemanın şekil değiştirmesine bölünmesi ile sargılama oranı; FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük şekil değiştirmenin, güçlendirilmemiş elemanın şekil değiştirmesine bölünmesi ile elde edilir ve Denklem 2.4’te gösterildiği gibi bir doğrusal ilişkiyi temsil etmektedir:

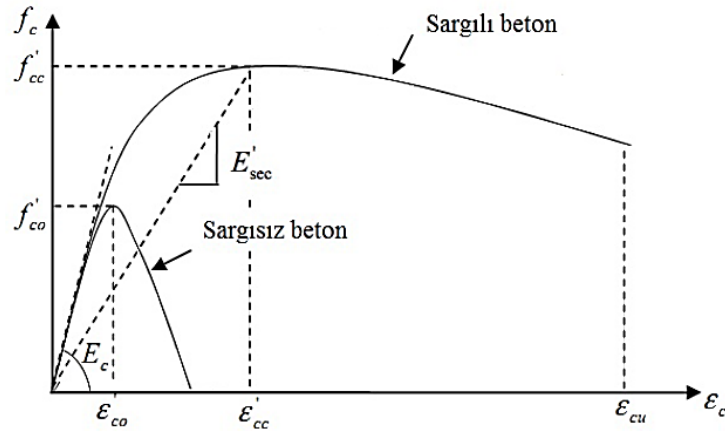
$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + k_2 \frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.4)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = \left[1 + k_2 \frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.4a)$$

Burada $\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}}$:etkili birim şekil değıştirme faktörünü, $\frac{f_j}{f_{co}}$: sargılama oranını ve k_2 ise etkili FRP sargı katsayısını ifade etmektedir.

2.4. Mander Tarafından Önerilen Model

Mander tarafından sargısız ve sargılı betonarme elemanlar için geliştirdikleri beton davranış modeli Şekil 2.3.'te gösterilmiştir [49].



Şekil 2.3. Sargısız ve sargılı betonun gerilme- şekil değıştirme ilişkisi

Sargısız beton için Denklem 2.5 kullanarak beton modellenabilmektir:

$$f_c = \frac{f_{co} x r}{r-1+x^r} \quad \text{for } \varepsilon_c \leq 2\varepsilon_{co} \quad (2.5a)$$

$$f_c = f_{cu} - \frac{(\varepsilon_c - 2\varepsilon_{co}) f_{cu}}{\varepsilon_{co}} \quad \text{for } 2\varepsilon_c < \varepsilon_c \leq 0.006 \quad (2.5b)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \quad \& \quad r = \frac{\varepsilon_c}{E_c - E_{sec}} \quad \& \quad E_{sec} = \frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}} \quad \& \quad E_c = 4700 \sqrt{f_{co}} \quad (2.5c)$$

$$f_{cu} = \frac{2f_{co} r}{(r-1+2r)} \quad (2.5d)$$

Burada;

f_c :Sargısız betonun basınç gerilmesi,

ε_c :Basınç gerilmesinin altındaki birim şekil değiştirmesi,

f_{co} :Sargısız betonun en yüksek basınç dayanımı,

ε_{co} :Basınç dayanımının altındaki birim şekil değiştirmesi ifade etmektedir.

Sargılı beton için Denklem 2.6 kullanarak beton modellenmektedir.

$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r-1+xr} \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da kullanılan terimlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} ; \quad \varepsilon_{co} \cong 0,002 ; \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} ; \quad (2.6 a)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{co}} \text{ Mpa} ; E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.6 b)$$

Burada;

f_c :Kuşatılmış betondaki basınç gerilmesi,

f_{cc} :Kuşatılmış betondaki maksimum basınç dayanımı,

ε_c :Basınç gerilmesinin altındaki birim şekil değiştirmesi,

f_{co} :Sargısız betonun en yüksek basınç dayanımı,

Kuşatılmış betondaki maksimum basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmesi ε_{cc} Denklem 2.7 ile hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_{cc} = 0,004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2.7)$$

Burada dikdörtgen kesitli elemanlarda;

$$\rho_s = \rho_x + \rho_y$$

ρ_s : Toplam enine donatının hacimsel oranını,

ε_{su} :Enine donatı (etriye) çeliğinde maksimum basınç dayanımının altındaki birim şekil değiştirmesi,

f_{yw} : Etriyenin akma dayanımını ifade etmektedir.

Kuşatılmış betonun basınç gerilmesi ve birim şekil değıştirmesi (f_{cc} , ε_{cc}) ile kuşatılmamış betonun basınç gerilmesi ve birim şekil değıştirmesi (f_{co}) arasındaki ilişki elde edilebilmektedir Denklem 2.8 ve Denklem 2.9.

$$f_{cc} = \lambda_c f_{co}; \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}(1 + 5(\lambda_c - 1)); \quad (2.9)$$

Burada;

$$\lambda_c = 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_e}{f_{co}}} - 2 \frac{f_e}{f_{co}} - 1,254 \quad (2.9a)$$

$$f_{ex} = k_e \rho_y f_{yw}; \quad (2.9b)$$

$$f_{ey} = k_e \rho_x f_{yw}; \quad (2.9c)$$

f_e : Etkili sargılama basınç dayanımı;

Etkili sargılama basınç dayanımı; dairesel kesitli elemanlarda f_e , dikdörtgen kesitli elemanlarda f_{ex} ve f_{ey} olarak tanımlanır.

k_e ise tanımlanan kuşatılma etkilik katsayısı verilmektedir (Denklem 2.9d).

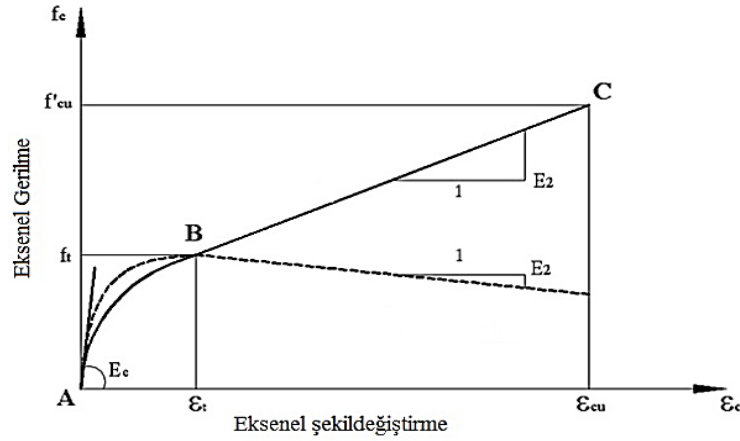
$$k_e = \left[1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_0 h_0}\right] \left[1 - \frac{s}{2b_0}\right] \left[1 - \frac{s}{2h_0}\right] \left[1 - \frac{A_s}{b_0 h_0}\right]^{-1}; \quad (2.9d)$$

Burada, ρ_y, ρ_x enine donatıların hacimsel oranlarını, k_e etkili kuşatılma katsayısı, a_i düşey donatıların eksenleri arasındaki mesafeliği, s düşey doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki uzaklığı, A_s boyuna donatı alanı, b_0, h_0 Göbek betonunu kuşatmış etriyenin eksenleri arasındaki kalan kesit boyutlarını temsil etmektedir.

2.5. FRP ile Güçlendirilmiş Betonların Model Çalışmaları

2.5.1. Khaloo ve arkadaşları tarafından önerilen model

FRP ile güçlendirilmiş silindirik betonu test ederek deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlardan güçlendirilen betonların basınç dayanımını ve şekil değiştirmesini hesaplayabilmek için hesap modeli önermişlerdir. Deneysel sonuçlarına göre aksel basınç gerilme Denklem 2.10 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.11 ile hesaplamışlardır. Sargılı ve sargısız beton için gerilme – şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.4’te gösterilmiştir [51].



Şekil 2.4. Sargılı ve sargısız beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

$$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_j ; \quad (2.10)$$

$$k_1 = 1.94 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{-0.28} ; \quad (2.10a)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.10 b)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 2.23 \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} + 1 \right] ; \quad (2.11)$$

Burada; f_{cu} : FRP kompozit ile güçlendirilen elemanın göçmeden önce ulaştığı en büyük aksel gerilmedir, f_{co} : beton basınç dayanımı, f_j : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi, k_1 etkili FRP sargısının katsayısı f_{frp} : FRP kompozitin çekme dayanımı, n_{frp} : FRP katı, t_{frp} : FRP bir kat şeridinin kalınlığı, D : betonun çapını ifade etmektedir.

2.5.2. Karbhari ve Gao tarafından önerilen model

FRP ile güçlendirilmiş betonun aksenal basınç dayanımı ve şekil değiştirme davranışını test etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre aksenal gerilme Denklem 2.12 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.13 ile hesaplamışlardır [52].

$$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_j \quad (2.12)$$

$$k_1 = 2.1 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{-0.13} \quad (2.12a)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.12b)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} + 0.01 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.13)$$

2.5.3. Saadetmanesh ve arkadaşları tarafından önerilen model

Saadetmanesh ve arkadaşları, Mander (1988), tarafından önerilen çelik sargılı beton modelini FRP ile güçlendirilmiş betona uygulamışlardır. Mander'in modelinde kuşatılmış betonun basınç gerilmesi (f_{cu}) ile kuşatılmamış betonun basınç gerilmesi (f_{co}) arasındaki ilişki elde edilebilmek üzere Denklem 2.10 kullanmışlardır [53].

$$f_{cu} = \lambda_c f_{co} ; \text{ (mander)}$$

Burada,

$$\lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_e}{f_{co}}} - 2 \frac{f_e}{f_{co}} - 1.254 \quad \text{(mander)}$$

Saadetmanesh ve arkadaşları, FRP ile güçlendirilmiş betona uygulamak için Mander'in modelinde kullandığı Denklem 2.10 kullanmışlardır. Fakat λ_c değerine bazı değişiklikleri yapmışlar ve 2.14 Denklemine dönüştürülmüştür.

$$\lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_j}{f_{co}}} - 2 \frac{f_j}{f_{co}} - 1.254 \quad \text{(Saadetmanesh ve arkadaşları)} \quad (2.14)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.14a)$$

Şekil değiştirme ise Denklem 2.15 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} + 1 \right] \right] \quad (2.15)$$

2.5.4. Samaan ve arkadaşları tarafından önerilen model

Samaan ve arkadaşları, FRP kompozitler ile güçlendirilen eksenel yük etkisi altındaki standart silindirik boyutlara sahip beton elemanlar için test ederek deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlardan güçlendirilen betonların basınç dayanımını ve şekil değiştirmesini hesaplayabilmek için hesap modeli önermişlerdir. Deney sonuçlarına göre eksenel basınç gerilme Denklem 2.16 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.17 ile hesaplanmıştır [54].

$$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_j \quad (2.16)$$

$$k_1 = 6.0 [f_j]^{-0.3} \quad (2.16a)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.16b)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{cu} - f_n}{E_2} \quad (2.17)$$

Burada;

$$f_n = 0.872 f_{co} + 0.371 f_j + 6.258 \quad (2.17a)$$

$$E_2 = 245.61 f_{co}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_{frp} t_{frp}}{D} \quad (2.17b)$$

Burada; f_{cu} : FRP kompozit ile güçlendirilen elemanın göçmeden önce ulaştığı en büyük eksenel gerilmedir, f_{co} : beton basınç dayanımı, f_j : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi, k_1 etkili FRP sargısının katsayısı f_{frp} : FRP kompozitin çekme dayanımı, n_{frp} : FRP katı, t_{frp} : FRP bir kat şeridinin kalınlığı, D : betonun çapını ifade etmektedir.

2.5.5. Toutanji tarafından önerilen model

Toutanji, daire en kesitli numuneleri CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş silindir betonu test ederek deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlardan güçlendirilen betonların basınç dayanımını ve şekil değiştirmesini hesaplayabilmek için hesap modeli önermiştir. Deney sonuçlarına göre eksenel basınç gerilme Denklem 2.18 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.19 ile hesaplamıştır [55].

$$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_j \quad (2.18)$$

$$k_1 = 3.5 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{-0.15} \quad (2.18a)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.18b)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + (310.57 \varepsilon_h + 1.9) \left[\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right] \right] \quad (0.002 \leq \varepsilon_h \leq \varepsilon_{FRP,rup}) \quad (2.19)$$

Burada; ε_h : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük betonun birim şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

2.5.6. Saafi ve arkadaşları tarafından önerilen model

Saafi ve arkadaşları, daire en kesitli ve FRP kompozitler ile güçlendirilen eksenel yük etkisi altındaki standart silindir boyutlara sahip beton elemanlar için test ederek deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlardan güçlendirilen betonların basınç dayanımını ve şekil değiştirmesini hesaplayabilmek için hesap modeli önermişlerdir. Deney sonuçlarına göre eksenel basınç gerilme Denklem 2.20 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.21 ile hesaplamışlardır.

$$f_{cu} = f_{co} + k_1 f_j \quad (2.20)$$

$$k_1 = 2.2 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{-0.16} \quad (2.20a)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.20b)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + (537 \varepsilon_h + 2.6) \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} - 1 \right] \right] \quad (0.002 \leq \varepsilon_h \leq \varepsilon_{FRP,rup}) \quad (2.21)$$

Burada; ε_h : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük betonun birim şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

2.5.7. Miyauchi ve arkadaşları tarafından önerilen model

Miyauchi ve arkadaşları, FRP kompozitler ile güçlendirilen aksenal yük etkisi altındaki farklı basınç dayanımları daire en kesitli beton elemanları için test ederek deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlardan güçlendirilen betonların basınç dayanımını ve şekil değiştirmesini hesaplayabilmek için hesap modeli önermişlerdir. Deney sonuçlarına göre aksenal basınç gerilme Denklem 2.2 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.23 ile hesaplamışlardır. [56].

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_j \quad (2.22)$$

$$k_1 = 2.98$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.22a)$$

$$\varepsilon_{cc} = \left(1 + A \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^B \right) \quad (2.23)$$

Burada

A ve B katsayılar olmak üzeredir.

$$A = 15.87 - 0.093 f_{co} \quad (2.23a)$$

$$B = 0.246 + 0.0064 f_{co} \quad (2.23b)$$

2.5.8. Youssef ve arkadaşları tarafından önerilen model

Marwan N. Youssef ve arkadaşları, farklı basınç dayanımları dikdörtgen ve daire en kesitli beton elemanları için test ederek deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlardan güçlendirilen betonların basınç dayanımını ve şekil değiştirmesini hesaplayabilmek için hesap modeli önermişlerdir. Deney sonuçlarına göre aksenal

basınç gerilme Denklem 2.24 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.25 ile hesaplamışlardır [48].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2.25 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^4 \quad (2.24)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.24a)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.003368 + 0.259 \left[\frac{f_{cc}}{f_{co}} \right] \left[\frac{f_{ju}}{E_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (R^2 = \% 94 \leq \varepsilon_h) \quad (2.25)$$

E_j FRP malzemesi için elastisite modülü ifade etmektedir.

2.5.9. Lam ve Teng tarafından önerilen model

Lam ve Teng, FRP ile güçlendirilen betonların aksel basınç altında basınç dayanımı ve şekil değiştirme ilişkisi incelemişlerdir. f_{cu} ve ε_{cu} 'yi hesaplamak için önerdikleri Denklem 2.26 ve 2.27'de verilmiştir [29].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.3 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.26)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.26a)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1.75 + 12 \left[\frac{f_{cc}}{f_{co}} \right] \left[\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right] \right] \quad (2.27)$$

$\varepsilon_{h,rup}$: FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük aksel şekil değiştirmesi ifade etmektedir.

2.5.10. Chastre ve Silva tarafından önerilen model

Chastre ve Silva, iki farklı çapı (150mm ve 250mm) ve iki farklı basınç dayanımlarına sahip daire en kesitli beton elemanları FRP ile güçlendirerek aksel basınç altında test etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre aksel basınç gerilme Denklem 2.28 ve şekil değiştirme değerlerini Denklem 2.29 ile hesaplamışlardır [57].

$$f_{cu} = f_D + k_1 f_{lu} , \quad (2.28)$$

$$k_1 = 5.29$$

$$f_D = \alpha f_{co} \quad (2.28a)$$

$$\alpha = \left[\frac{1.5 + \frac{D}{H}}{2} \right] \quad (2.28b)$$

$$f_{lu} = f_{Ju} + f_{shu} \quad (2.28c)$$

$$f_{Ju} = \frac{2t E_j \varepsilon_{lu}}{D} \quad (2.28d)$$

$$f_{shu} = \frac{2 A_{sw} \varepsilon_{lu} f_{sw}}{s d_w} \quad (2.28e)$$

$$f_{sw} = \left\{ \begin{array}{ll} E_s \chi \frac{d_w \varepsilon_{lu}}{D} & \varepsilon_{lu} < \frac{D}{d_w} \varepsilon_y \text{ için} \\ f_y & \varepsilon_{lu} < \frac{D}{d_w} \varepsilon_y \text{ için} \end{array} \right\} \quad (2.28f)$$

$$\varepsilon_{cu} = k_2 \varepsilon_{co} \left[\frac{f_{FRP}}{f_D} \right]^{0.7} \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{0.7}{1000} f_{co}^{0.31}$$

Burada f_{cu} : FRP ile güçlendirilmiş betonun basınç dayanımı, f_{co} : Sargısız betonun basınç dayanımı, ε_{cu} : FRP ile güçlendirilmiş betonun basınç dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme, ε_{co} : FRP ile güçlendirilmemiş betonun basınç dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme, f_j : FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal sargı gerilmesi, d_w etriyenin çapı, f_{FRP} : FRP malzemesinde oluşan çekme gerilmesi f_{shu} : etriyede oluşan çekme gerilmesi ve D : betonun çapı olarak ifade etmektedir.

2.5.11. Elsanadedy ve arkadaşları tarafından önerilen model

Elsanadedy ve arkadaşları, CFRP ile güçlendirilen ve farklı basınç dayanımına sahip betonların davranışı incelemiştir. f_{cu} ve ε_{cu} 'yi hesaplamak için önerilmiş formüller Denklem 2.30 ve 2.31'de sunulmuştur [58].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.30)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.30a)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[2.14 + 3.65 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \right] \quad (2.31)$$

2.5.12. Jiang ve Teng tarafından önerilen model

Jiang ve Teng daire en kesitli beton kolonları FRP ile güçlendirerek aksenal basınç altında test etmişlerdir. Betonlarda gerilme-şekil değiştirme davranışı gözlemlenmiştir. f_{cu} ve ε_{cu} 'yi hesaplamak için önerdikleri formüller Denklem 2.32 ve 2.33'te verilmiştir [26].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + k_1 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right], \quad k_1 = 3.5 \quad (2.32)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.32a)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + 17.5 \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} \right]^{1.2} \right] \quad (2.33)$$

2.5.13. Faustino ve arkadaşları tarafından önerilen model

Faustino ve arkadaşları, CFRP ile güçlendirilen betonarme kolonların basınç dayanımı ve şekil değiştirme ilişkisi incelemişlerdir. f_{cu} ve ε_{cu} 'yi hesaplamak için önerilmiş bağıntılar Denklem 2.34 ve 2.35'te sunulmuştur [59].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 5.29 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + 17.65 \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} \right]^{0.7} \right] \quad (2.35)$$

2.5.14. Q.G. Xiao ve arkadaşları tarafından önerilen model

Xiao ve arkadaşları, CFRP ile güçlendirilen betonarme kolonların basınç dayanımı ve şekil değiştirme ilişkisi incelemişlerdir. f_{cu} ve ε_{cu} 'yi hesaplamak için önerilmiş formüller Denklem 2.36 ve 2.37 aşağıda önerilmiştir [60].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 4 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.36)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.36a)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + 20 \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} \right] \right] \quad (2.37)$$

2.5.15. Maha H.Abdallaha ve arkadaşları tarafından önerilen model

Maha H. Abdallaha ve arkadaşları, CFRP ile güçlendirilen betonarme kolonların analitik modellenmesi incelenmiştir. f_{cu} ve ε_{cu} 'yi hesaplamak için önerilmiş denklemler Denklem 2.38 ve 2.39 aşağıda sunulmuştur [61].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 3.3 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right] \quad (2.38)$$

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D} \quad (2.38a)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1.75 + 12 \left[\frac{f_{cu}}{f_{co}} \right] \left[\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{co}} \right]^{0.45} \right] \quad (2.39)$$

$$\varepsilon_{fe} \geq 0.004$$

2.5.16. Yugu Cao ve arkadaşları tarafından önerilen model

FRP ile güçlendirilen beton kolonları aksenal basınç altında test etmişlerdir. Betonların davranışı incelemişlerdir. f_{cu} ve ε_{cu} değerleri için önerilmiş denklemler Denklem 2.40 aşağıda verilmiştir [62].

$$\frac{f_{cu}}{f_{co}} = 1 + 2.2 \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{0.94} \quad (2.40)$$

BÖLÜM 3. TEST NUMUNELERİ VE DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada kullanılan deneysel çalışma sonuçları “Beton Dayanımı Düşük Betonarme Yapı Elemanlarının Lifli Kompozitler ile Güçlendirilmesi ve Karşılaştırılması” başlıklı doktora tez çalışmasından alınmıştır [45].

3.1. Test Numuneleri

Karbon ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP ve GFRP) kompozitler ile güçlendirilen aksenal yük etkisi altındaki standart silindir boyutlara sahip S1, S2, S3 silindir beton numuneleri sırasıyla ortalama 6,7, 11 ve 20,8 MPa basınç dayanımına sahiptir. Çalışmada, tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile aksenal basınç kuvvetine karşı dışarıdan enine sarılarak güçlendirmiş betonların sonuçları kullanılmıştır. Bir kat karbon elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S1 betonları, S1-CFRP1; bir kat Cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S1 betonları; S1-GFRP1, iki kat Cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S1 betonları, S1-GFRP2; bir kat karbon elyaf kumaş sarılarak güçlendirilmiş S2 betonları, S2-CFRP1, bir kat Cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S2 betonları; S2-GFRP1, iki kat Cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S2 betonları, S2-GFRP2; bir kat karbon elyaf kumaş sarılarak güçlendirilmiş S3 betonları, S3-CFRP1, bir kat Cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S3 betonları; S3-GFRP1, iki kat Cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilen S3 betonları; S3-GFRP2 ile simgelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan malzeme bilgileri aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

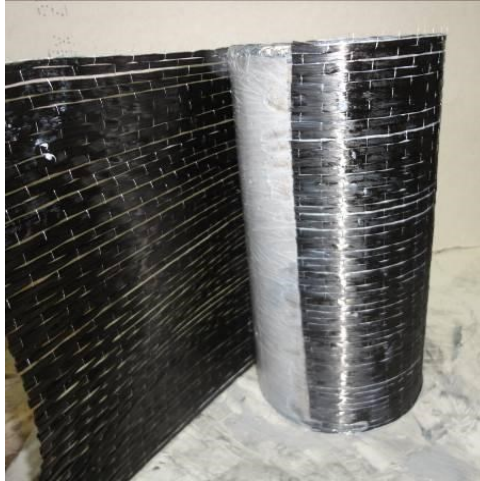
3.1.1. Silindir betonlar

Betonlar 15 çapında 30 cm yüksekliğinde, 6,7, 11 ve 20,8 MPa olmak üzere üç farklı basınç dayanımındadır. Betonların aksenal basınç altındaki davranışı Şekil 3.1.’de gösterilmiştir.

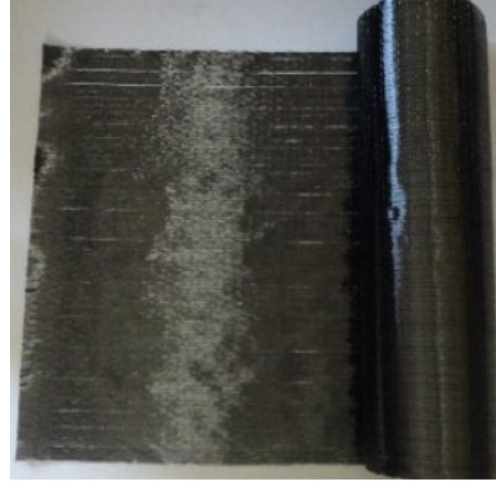
3.1.2. CFRP kompozitler

Karbon Elyaf Takviyeli Polimer, en sağlam malzemelerden birisidir. Bu olağanüstü sağlamlıkları nedeniyle CFRP liflerinden dokunan kumaşlar endüstrinin çeşitli kademelerindeki kullanılmaktadır. İplik yumuşaklığındaki olmuş lifler, kolaylıkça istenilen şekle getirilir ve özel epoksi reçinesi ile muamele edilince sertleşmektedir. Kullanımındaki pratiklik, binaya ekstra yük getirmemesi ve yüksek mekanik özellikler bu malzemenin en belirgin üstünlüklerindedir. CFRP, inşaat mühendisliği alanında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat sektörünün yüksek miktarda ve ekonomik maliyetli sahip olan malzeme gereksinimi varsa da, CFRP liflerin kullanımının yaygınlaşmasıyla maliyetler azalmış ve bu sektörde kullanılabilir hale getirilmiştir. Özellikle korozyon hasarlı ve depremler binaların ekonomik ve hızlı güçlendirmede iyi sonuçlar getirmiştir. CFRP malzemeleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

Silindir betonların ve betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde tek doğrultulu CFRP kullanılmakta, CFRP kompozitin karakteristik özellikleri Tablo 3.1.'de sunulmuştur.



a. CFRP ile beton güçlendirmesi



b. CFRP malzemesi

Şekil 3.1. Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) [45]

Tablo 3.1. CFRP malzemesinin özellikleri

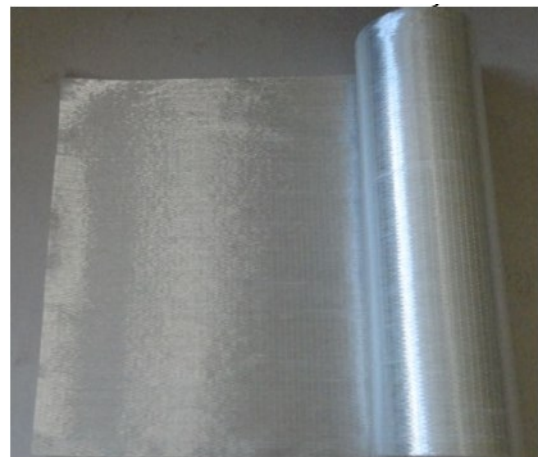
Birim ağırlık	300 g/m ² + 15 g/m ²
Dokuma tasarım kalınlığı	0,17 mm (karbon elyafın toplam alanına göre).
Lif yoğunluğu	1,79 g/cm ³
Mekanik / Fiziksel özellikler	
Kuru lif özellikleri	Çekme dayanımı: 3900 N/mm ² (nominal)
	Çekme E-modülü: 230000 N/mm ²
	Kopma uzaması: %1,5 (nominal)

3.1.3. GFRP malzemeleri

Yapılan deneysel çalışmada Bu tez kapsamında da silindir betonun güçlendirilmesinde tek doğrultulu alkali dayanıklı cam kumaş kullanılmıştır. Cam elyafın; kolay temin edilebilir olması, karbon elyafa göre çok daha ucuz olması, deformasyon yapma kabiliyetinin yüksek olması, üretiminin karbon elyafa göre daha kolay ve yaygın olması, karbon elyafın kullanıldığı alanlarda kolaylıkla kullanılabilmesi gibi birçok avantajı vardır. CFRP malzemeleri Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Cam kumaşın karakteristik özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.



a. GFRP ile beton güçlendirmesi



b. Değişik amaçlar için GFRP

Şekil 3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) [45]

Tablo 3.2. Güçlendirmede kullanılan GFRP malzemesinin özellikleri

Birim ağırlık	445 g/m ² + 22 g/m ²
Dokuma tasarım kalınlığı	0,17 mm (cam liflerin toplam alanına göre).
Lif yoğunluğu	2,56 g/cm ³
Mekanik / Fiziksel özellikler	
Kuru lif özellikleri	Çekme dayanımı: 3400 N/mm ² (measured on virgin filament). 2300 N/mm ² (measured on roving).
	Çekme E-modülü: 76000 N/mm ²
	Kopma uzaması: %2.8 (nominal)

3.1.4. Epoksi reçine

Cam ve karbon elyafın silindir numunelerin yüzeylerine yapıştırılmasında çift bileşenli epoksi esaslı doyum reçinesi kullanılmıştır. 4 kg A bileşeni (reçine), 1 kg B bileşeninden (sertleştirici) oluşan ve hazır setler halinde ambalajlanan epoksi reçinesi 4/1 oranında karıştırılarak beton yüzeylerine uygulama yüzeyi sıcaklığı +10°C ile +35°C arasında mala, fırça, rulo yardımı ile kolaylıkla uygulanabilmektedir. Epoksi reçinesi yüksek mukavemete sahip ve devamlı yükler altında yüksek bir sünme dayanımı göstermektedir.

Cam ve karbon dokumasının ilave kat uygulamaları için epoksi bir önceki kat üzerine 60 dakika içerisinde, henüz alttaki reçine katı ıslak durumdayken uygulanmalıdır. Cam ve karbon dokumasının bindirme boyu, güçlendirme projesinde belirtildiği şekilde veya en az 100 mm olmalıdır. Güçlendirmede kullanılan epoksinin karakteristik diğer özellikleri Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Epoksi yapıştırıcısının özellikleri

Kimyasal yapı	Epoksi reçine
Birim ağırlık	Reçine karışımı: 1,31 kg/l (+23°C'de)
Mekanik/ fiziksel özellikler	
Çekme dayanımı	30 N/mm ² (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53455)
E-modülü	Eğilme: 3800 N/mm ² (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53452) Çekme: 4500 N/mm ² (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53455)
Kopma uzaması	%0,9 (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53455)

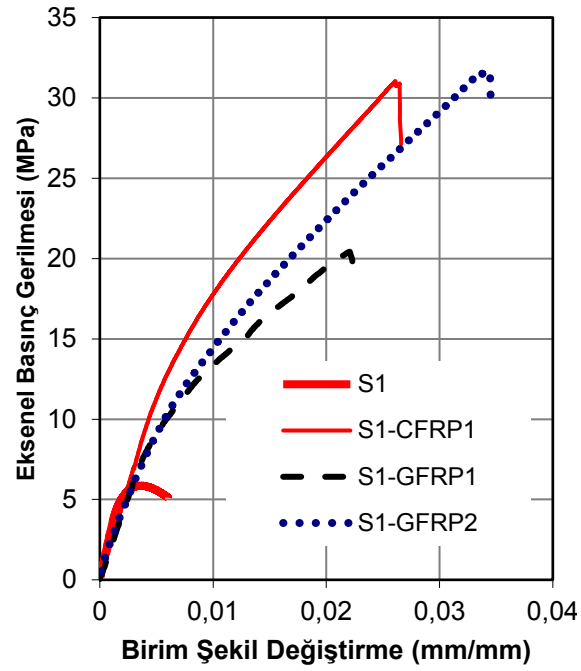
3.2. FRP Kompozitler ile Güçlendirilen Beton Deney Sonuçları

FRP kompozitler ile güçlendirme çalışması yapılan betonların basınç dayanımı ve birim şekil değiştirme değerleri Tablo 3.4.'te özetlenmiştir. Betonların aksenal basınç gerilmesi ve birim şekil değiştirme grafikleri şekil 3.3.'te sunulmuştur

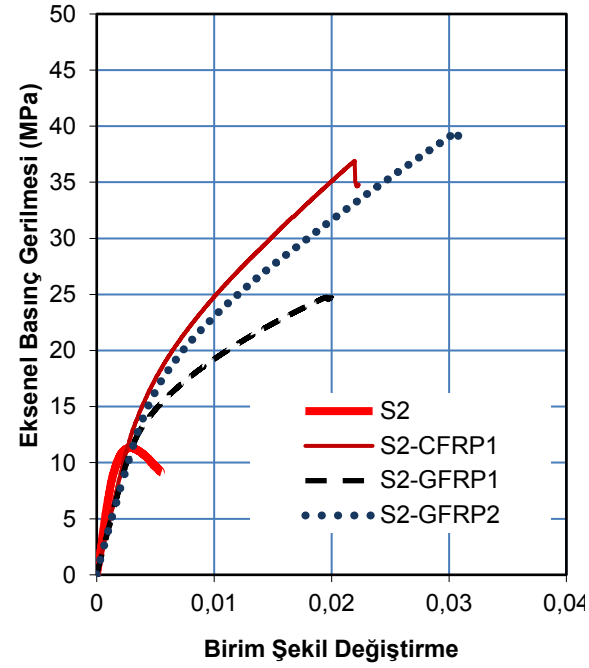
Deney sonuçları incelendiğinde FRP ile güçlendirilen tüm betonların basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri artmıştır bu artışta FRP türü ve katman sayısı ve beton basınç dayanımının etkisi görülmektedir.

Tablo 3.4. Deneysel çalışmada betonların gerilme-şekil değiştirme değerleri

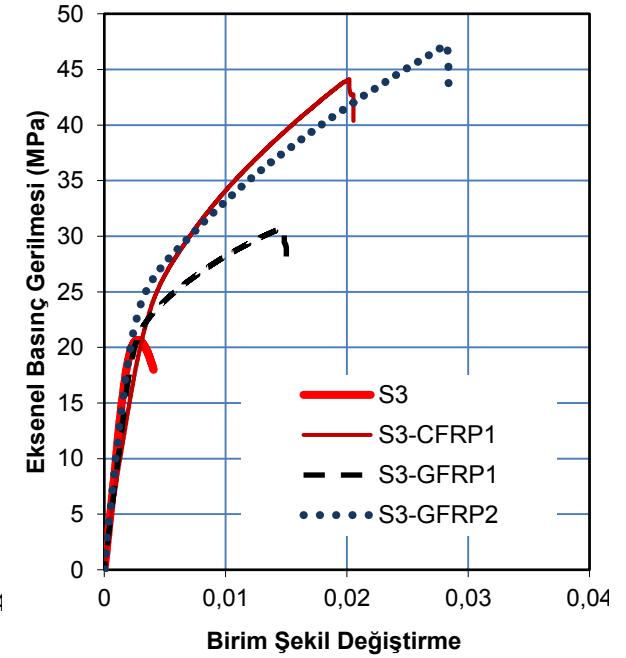
Numune ismi	Basınç Dayanımı(MPa)	Şekil Değiştirme
S1	6,7	0,0036
S1-CFRP1	31,06	0,0262
S1-GFRP1	20,18	0,0242
S1-GFRP2	30,73	0,0362
S2	11	0,0029
S2-CFRP1	35,60	0,0208
S2-GFRP1	24,67	0,0187
S2-GFRP2	39,80	0,0305
S3	20.8	0.0029
S3-CFRP1	41.3	0.0185
S3-GFRP1	29.54	0.0139
S3-GFRP2	45.21	0.0251



a. S1 betonlarının davranışları



b. S2 betonlarının davranışları



c. S3 betonlarının davranışları

Şekil 3.3. Deney sonuçlarına göre betonlarının davranışları

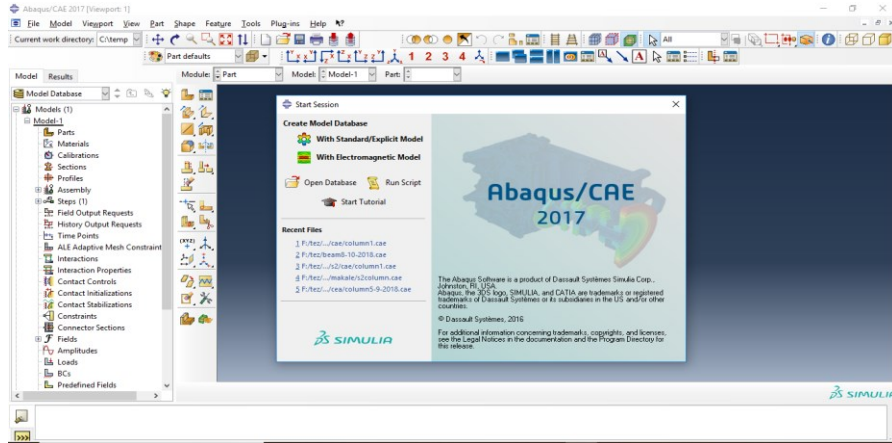
BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR MODEL ÇALIŞMALARI

Son yıllarda daha hızlı ve çabuk sayısal hesap yöntemlerinde bilgisayar programları etkin olarak kullanılmaktadır. Sayısal çözüm yöntemi inşaat mühendisliği, makine mühendisliği, zemin mekaniği, uçak mühendisliği ve akışkanlar mekaniği gibi alanlarda problemlerin çözümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kabul edilebilir bir yaklaşımla sayısal çözüm yöntemidir. Bu bölümde FRP kompozitler ile aksenal basınca karşı güçlendirilmiş düşük dayanımlı standart silindir boyutlardaki betonların davranışı ABAQUS sonlu elemanlar paket programı ile modelleme çalışması yapılmıştır. Alt bölümlerde SEM model çalışmaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.1. ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı

4.1.1. Program arayüzü

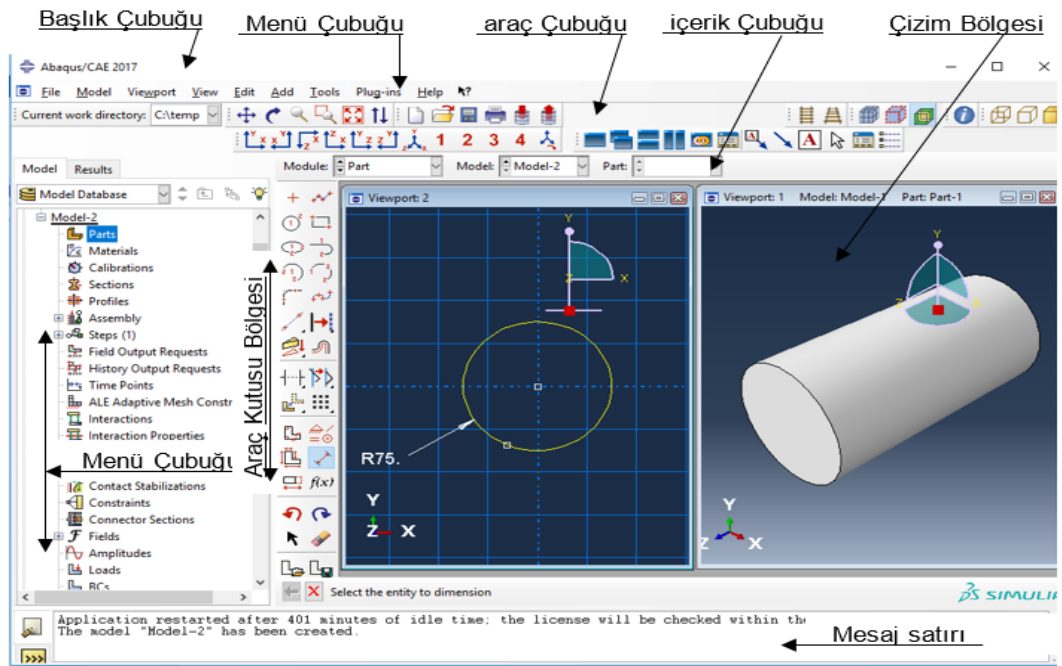
ABAQUS sonlu elemanlar programı, statik ve dinamik problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. ABAQUS programında yapılan her tanımlama, belli bir birim altında toplanmıştır. Program, malzeme özellikleri tanımlanması ve modellemesi, analiz, çözüm yönetimi ve sonuç değerlendirmesi işlemlerini bir arada, tek bir kullanıcı ABAQUS/CAE ara yüzünde sunmaktadır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Program ara yüz ekranı

4.1.2. Ana pencere bileşenleri

ABAQUS programında ana pencerenin bileşenleri Başlık Çubuğu, Menü Çubuğu, Araç Çubuğu, İçerik Çubuğu, Model Ağacı, Araç Kutusu Bölgesi, Ve Çizim Bölgesinden oluşmaktadır. Başlık Çubuğu, ABAQUS /CAE'nin versiyonunu ve model veri tabanının ismini belirtir. Menü Çubuğu, mevcut bütün menüleri içerir. Hangi modülü seçilirse o modül ile ilgili menüler gelmektedir. Araç Çubuğu, çok kullanılan bazı menülere hızlı erişimi sağlamaktadır. İçerik çubuğu, ABAQUS/CAE programı bir takım modüller sunar. Her bir modül oluşturulan modelin farklı bir aşamasına denk gelmektedir. İçerik çubuğunda bulunan "Module"listesi bu modüller arasında geçiş yapmayı sağlamaktadır. Model Aracı, yapılmış işlem adımları bu araçta görülebilir ve tamamlanan modellerin çalışmasının üzerinde değişiklik yapabilme imkanı sağlamaktadır. Çizim bölgesi, oluşturacak parçalarının çizim ekranıdır (Şekil 4.2.).



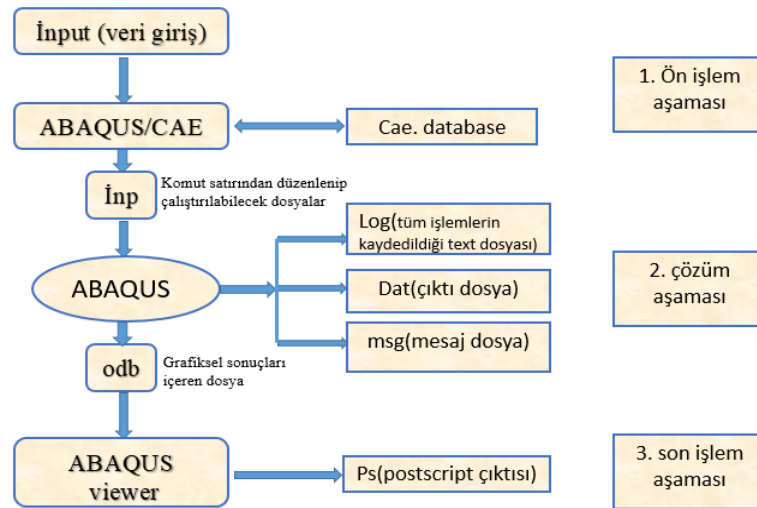
Şekil 4.2. ABAQUS'te Ana pencerenin bileşenleri

4.1.3. ABAQUS'te işlem adımları

ABAQUS'te işlem aşamaları sırasıyla ön işlem aşaması, çözüm aşaması ve son işlem aşamasından oluşmaktadır. Programın Part bölümünde, iki ya da üç boyutlu geometrik parçaların oluşturulması işlemi yapılabilmektedir.

Malzeme Özellikleri (Property) bölümünde, malzeme özellikleri tanımlanması sağlanmaktadır. Bu çalışmada beton özelliklerinin tamamlanmasında Property kısmında bulunan Beton Hasarlı Plastisite yöntemi kullanılmıştır. Assembly bölümünde, parçaların birbirlerine montajının oluşturulması işlemi gerçekleştirilmektedir. Step bölümünde, analiz tipi, analiz adımları, çıktıları, analiz yapmak için kullanılacak çözücü ve çözüm tipi tanımlanması gerçekleştirilmektedir.

Yük kısmında, yükleme tipi, yükleme miktarı ve sınır şartları tanımlanması gerçekleştirilmektedir. Çözüm ağı (mesh) kısmında, geometri üzerine istenecek sayıda ve aralıkta nokta atanmaktadır. Job bölümünde, Çözüm yönetimi ve izleme işlemleri gerçekleştirilmektedir ABAQUS'te İşlem Adımları Şekil 4.3.'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. ABAQUS'te işlem adımları

4.1.4. ABAQUS'te kullanılan birimler

ABAQUS'te kullanılan üç birimin sistemleri SI, SI (mm), US Birim (inch) mevcuttur. Malzeme özelliklerinin tanımlanması, part oluşturulması ve yükleme tanımlanması için aynı birimin sistemini kullanmak gerekmektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlar modellenmesi için SI (mm) birim sistemi kullanılmıştır (Tablo 4.1.).

Tablo 4.1. ABAQUS'te kullanılan birimler

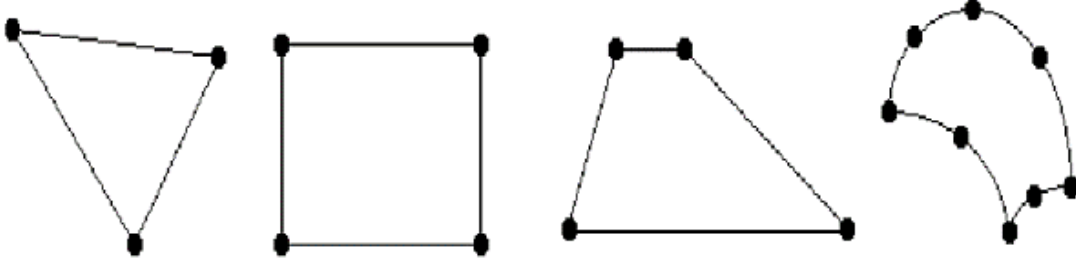
Büyüklik	SI	SI(mm)	US Birim (inch)
Uzunluk	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>in</i>
Kuvvet	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>ibf</i>
Gerilme	<i>pa</i> [<i>N/m²</i>]	<i>Mpa</i> [<i>N/mm²</i>]	<i>psi</i> [<i>ibf/in²</i>]
Kütle	<i>kg</i>	<i>tonne</i> (<i>10⁻³kg</i>)	<i>ibf S²/in</i>
Yoğunluk	<i>kg/m³</i>	<i>tonne/mm³</i>	<i>ibf [S²/in⁴]</i>
Zaman	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>

4.1.5. Analizde kullanılan eleman tipleri

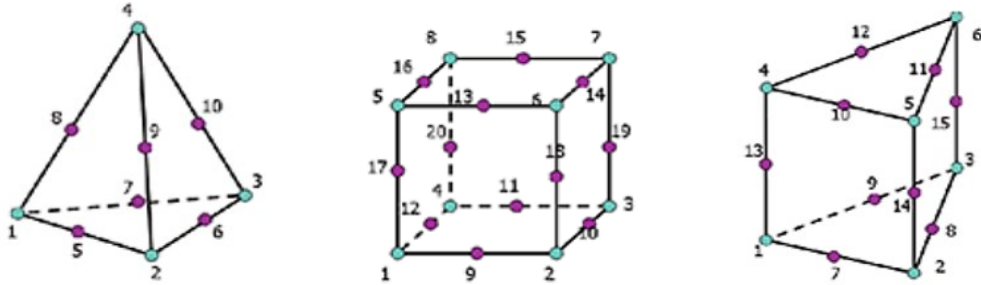
ABAQUS eleman kütüphanesinde 1 boyutlu (Şekil 4.4.a) , 2 boyutlu (Şekil 4.4.b) ve 3 boyutlu sürekli elemanlar mevcuttur. Birinci derece elemanlar düğüm noktalarında deplasmanları hesaplamak için lineer enterpolasyon kullanırken, ikinci derece elemanlar kuadratik enterpolasyon kullanmaktadırlar. Üç boyutlu sürekli elemanlar kullanarak ABAQUS'te eleman doğrulanması gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar türü kullanılmıştır (Şekil 4.4.)



a) Bir boyutlu elemanlar



b) İki boyutlu elemanlar



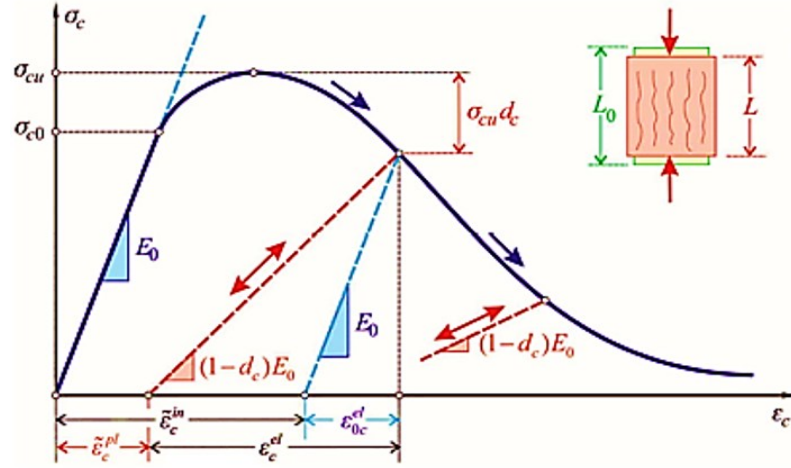
c) Üç boyutlu elemanlar

Şekil 4.4. Analizlerde kullanılan eleman tipleri

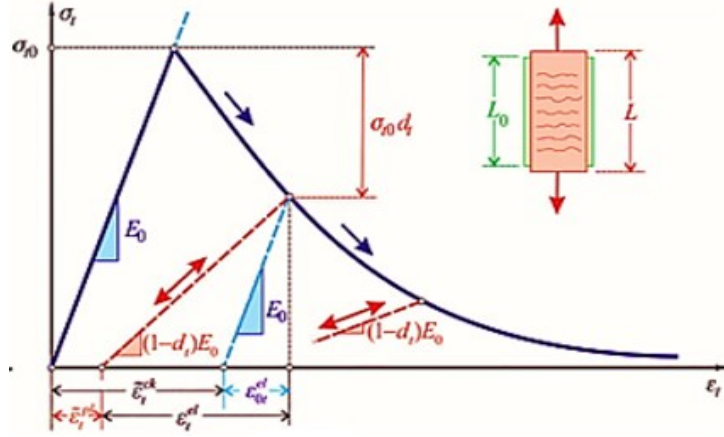
4.2. Betonların SEM ile Modellenmesi

4.2.1. Beton Hasar Plastisite

Beton Hasar Plastisite (BHP) yöntemi, beton için sürekli plastisiteye dayalı bir hasar modelidir. BHP yöntemine göre çekme çatlama ve basınç kırılması olmak üzere betonda temel iki önemli yenilme mekanizması vardır. Hasarın oluşumu ve elastik rijitlikte değişimi tanımlamak için iki birim şekil değiştirme değişkeni sırasıyla çekme ve basma eşdeğer plastik gerilmeler olarak adlandırılmaktadır [43]. SEM’de aksenal basınç ve çekme altında beton davranış mekanizması sırasıyla Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.’da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Eksenel basınç altında beton davranışı



Şekil 4.6. Eksenel çekme altında beton davranışı

Beton davranışı çekme gerilmesine (σ_{t0}) kadar doğrusal bir ilişki izler. Maksimum çekme gerilmesine ulaşılmaya ile betonda çekme çatlakları oluşur. Elastik rijitliğin bozulması, sıcaklığın ve alan değişkenlerinin işlevleri olduğu varsayılan iki hasar değişkeniyle (d_t ve d_c) karakterize edilmektedir Denklem 4.1 ve 4.2 [43].

$$d_t = d_t(\varepsilon_t^{\sim pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_t \leq 1, \quad (4.1)$$

$$d_c = d_c(\varepsilon_c^{\sim pl}, \theta, f_i); 0 \leq d_c \leq 1. \quad (4.2)$$

Grafiklerde malzeme hasarlı olmayan elastisite modülünü E_0 ile gösterilmekte ve $\varepsilon_c^{\sim pl}$, $\varepsilon_t^{\sim pl}$, $\varepsilon_c^{\sim in}$, $\varepsilon_t^{\sim in}$ sırasıyla; eksenel basınç plastik şekil değiştirmesini, eksenel

çekme plastik şekil değiştirmesini ve elastik olmayan basınç ve çekme şekil değiştirmelerini göstermektedir. Gerilme (σ_t, σ_c) - şekil değiştirmeler ($\varepsilon_t, \varepsilon_c$) Denklem 4.3 ve 4.4 ile ifade edilmektedir:

$$\sigma_t = \left[[1 - d_t] E_0 \left[\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl} \right] \right], \quad (4.3)$$

$$\sigma_c = [1 - d_c] E_0 \left[\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl} \right], \quad (4.4)$$

"Etkin" olan çekme ve basınç kohezyonu (cohesion) gerilmelerini (σ_t^-, σ_c^-) Denklem 4.5 ve 4.6 ile ifade edilmektedir:

$$\sigma_t^- = \frac{\sigma_t}{[1 - d_t]} = E_0 \left[\varepsilon_t - \varepsilon_t^{\sim pl} \right], \quad (4.5)$$

$$\sigma_c^- = \frac{\sigma_c}{[1 - d_c]} = E_0 \left[\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\sim pl} \right], \quad (4.6)$$

Çekme rijitliği ve tek eksenel basınç altında doğrusal olmayan birim şekil değiştirmeler plastik ($\varepsilon_c^{\sim pl}, \varepsilon_t^{\sim pl}$) birim şekil değiştirmelere Denklem 4.7 ve 4.8 ile tanımlanmaktadır.

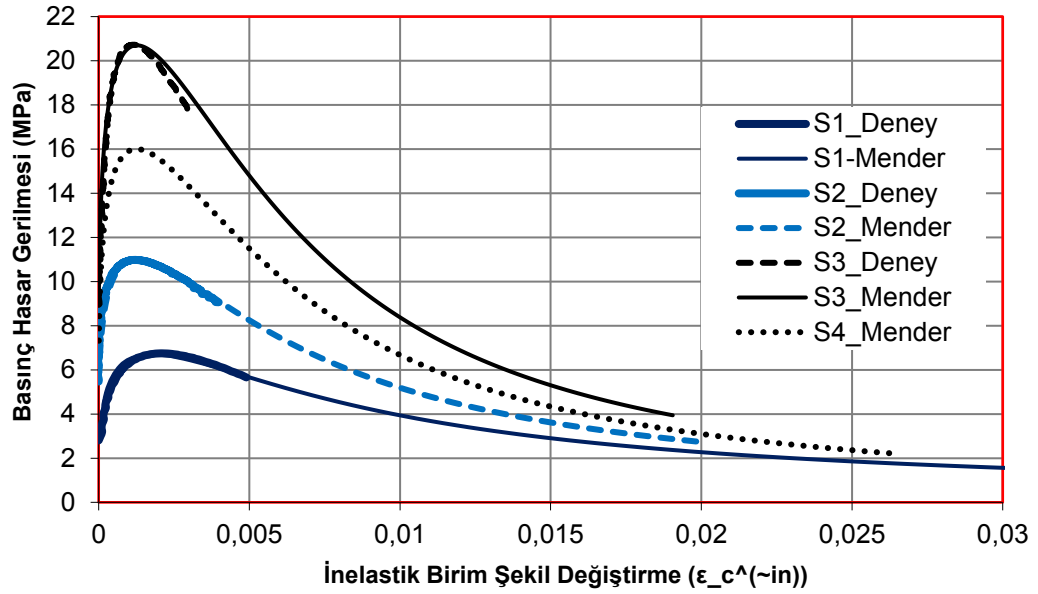
$$\varepsilon_c^{\sim pl} = \varepsilon_c^{\sim in} - \frac{d_c}{[1 - d_c]} \left[\frac{\sigma_c}{E_0} \right], \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_t^{\sim pl} = \varepsilon_t^{\sim ck} - \frac{d_t}{[1 - d_t]} \left[\frac{\sigma_t}{E_0} \right], \quad (4.8)$$

4.2.2. Betonların basınç hasar davranışı

Bu çalışmada S1, S2 ve S3 beton numunelerinin mekanik özellikleri deney sonuçlarından, 16 MPa basınç dayanımına sahip beton numunenin (S4) mekanik özellikleri bölüm 2.4'te anlatılan Mander sargısız beton modelinden elde edilmiştir.

[63]. S1, S2, S3 ve S4 beton numunelerinin basınç hasar davranışları mander sargısız beton modeli kullanılarak tekrar oluşturulmuş ve deney sonuçları ile karşılaştırılarak Şekil 4.7.'de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Betonların basınç hasar davranışı

Beton elastik bölgesi, beton basınç dayanımının %40'ı alınarak hesaplanmıştır. bölgesi Beton dayanımının %40 alınarak betonların elastik bölgedeki dayanımı (σ_{c0}) hesaplanmıştır. BHP yöntemi kullanmak amacıyla sıfırdan σ_{c0} değerine kadar doğrusal elastik kabul edilen kısım ihmal edilmiştir. Betonun basınç ve çekme hasar davranışı SEM'de oluşturmak için iki hasar değişkeninin (d_t ve d_c) belirlenmesi gerekmektedir. Ancak bu çalışmada silindirik beton numuneler aksel basınç gerilmeler altında yüklenmesinden dolayı çekme hasar değişkeni (d_t) değeri ihmal edilmiştir. Basınç hasarı parametresi, d_c , Denklem 4.10 ile d_t ise Denklem 4.11 ile hesaplanabilmektedir [64]. S1, S2, S3 ve S4 beton numuneler için basınç hasar parametresi hesaplanarak Şekil 4.8.'de sunulmuştur.

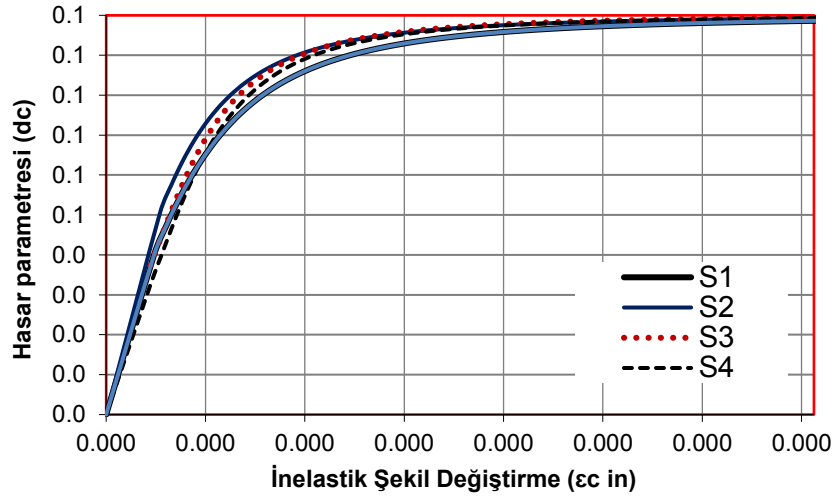
$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_0^{-1}}{\sigma_c E_0^{-1} + \varepsilon_c^{in} (1-b_c)} \quad (4.10a)$$

$$\varepsilon_c^{pl} = b_c \varepsilon_c^{in}, \quad (4.10b)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_0^{-1}}{\sigma_t E_0^{-1} + \varepsilon_t^{cr} (1-b_t)} \quad (4.11a)$$

$$\varepsilon_t^{pl} = b_t \varepsilon_t^{ck} \quad (4.11b)$$

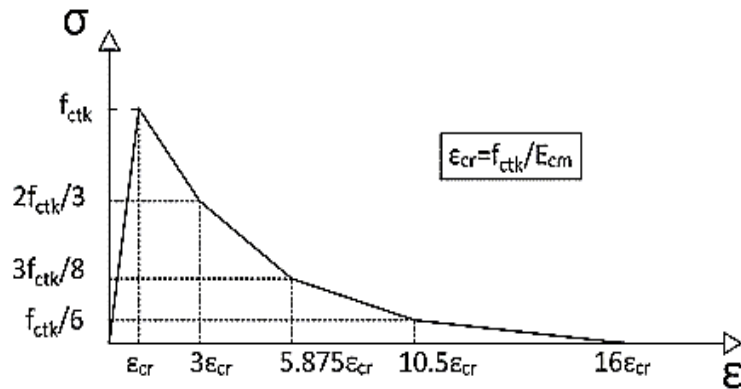
$bc = bt = 0,7$ kullanılabilir.



Şekil 4.8. Hasar değişkeni (dc) - inelastik şekil değiştirme ilişkisi

4.2.3. Beton çekme gerilmesi

Beton davranışı çekme gerilmesine (σ_{t0}) kadar doğrusal bir ilişki izlemektedir. Maksimum çekme gerilmesine ulaşılmaya betonda çekme çatlakları oluşmaktadır (Şekil 4.9.). Çekme dayanımı ve çatlama şekil değiştirme ilişkisi yardımıyla hasar davranışı oluşturulmuştur. Çekme dayanımı ve çatlama şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. BHP yöntemi kullanması amacıyla doğrusal elastik kabul edilen kısmı ihmal edilmiştir. Beton numunelerin çekme altındaki hasarı Bitusca tarafından önerilen Gerilme –Şekil değiştirme modeliyle tanımlanmıştır[67].



Şekil 4.9. Beton çekme dayanımı ve çatlama şekil değiştirme ilişkisi [65]

Avrupa Beton Kodu'na göre, betonun çekme gerilmesi Denklem 4.12 kullanarak hesaplayabilmektedir [69].

$$f_{ctk} = 0,7 f_{ctm} \quad (4.12)$$

Beton basınç dayanımı sınıfı $\leq C50/60$ için;

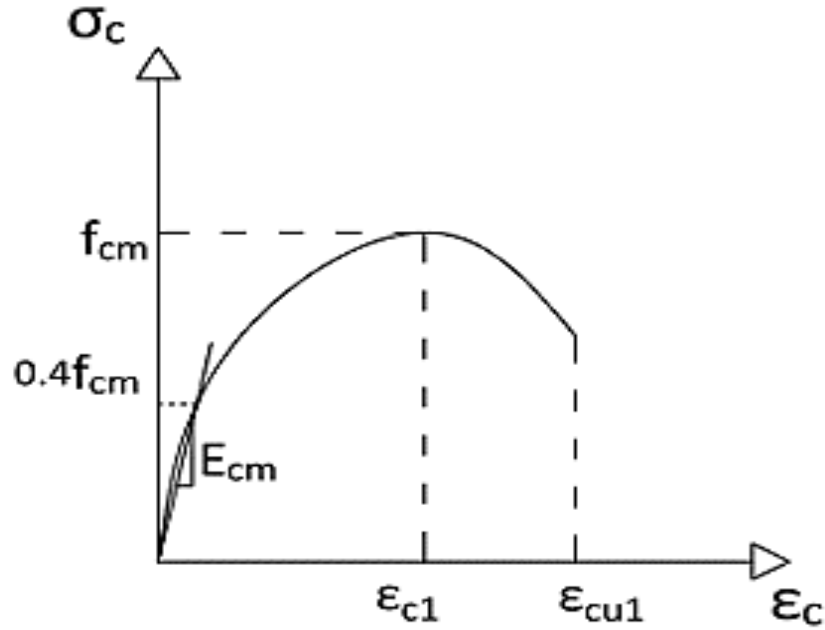
$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{[2/3]} \quad (4.12a)$$

Beton basınç dayanımı sınıfı $\geq C50/60$ için;

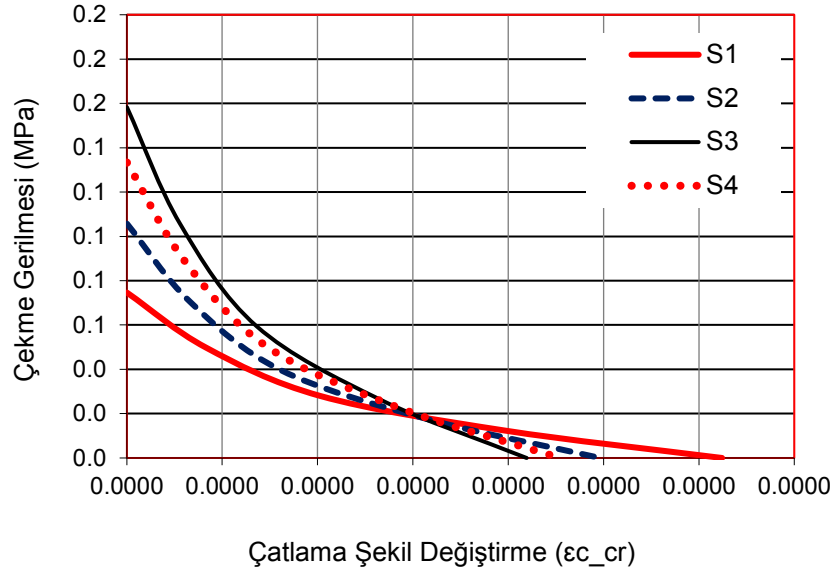
$$f_{ctm} = 2,12 \log_e 1 + \left(\frac{f_{ck}+8}{10}\right) \quad (4.12b)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_{ctk}}{E_{cm}} \quad (4.12c)$$

Eksenel basınç dayanımı – birim şekil değiştirme ilişkisi gösterilmiş ve $0.4f_{cm}$ değeri elde edilmesinin ardından E_{cm} değeri hesaplayabilmektedir (Şekil 4.10.). S1, S2, S3 ve S4 betonları için çekme gerilmesi - çatlama şekil değiştirme, (ε_c^{cr}), davranışı gösterilmiştir (Şekil 4.11.).



Şekil 4.10. Beton basınç dayanımı ve şekil değiştirme ilişkisi [40]

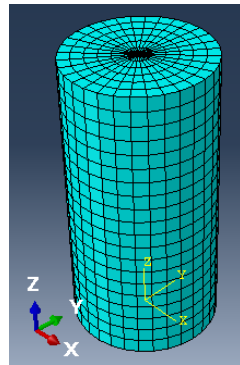


Şekil 4.11. S1, S2, S3 ve S4 betonu için çekme dayanımı ve çatlama şekil değişirme

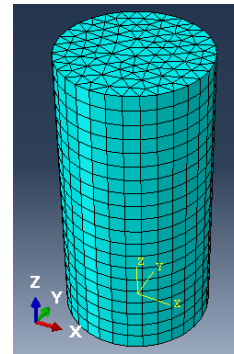
Diğer parametreler; betonun iki eksenli gerilme altındaki basınç dayanımının tek eksenli gerilme altındaki basınç dayanımına oranı 1,16 kabul edilmiş. Beton için Poisson oranı 0,2 kabul edilmiştir [64].

4.2.4. Çözüm Ağı Oluşturma

Bu çalışmada çözüm ağı (mesh) türleri ve çözüm ağı boyutu parametreler olarak seçilmiştir. 15 mm, 21 mm ve 25 mm çözüm ağı büyüklükleri kullanılmıştır. Beton numunelerinin modellenmesinde kullanılan doğrusal (hex) ve dağınık (wedge) çözüm ağı türleri Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



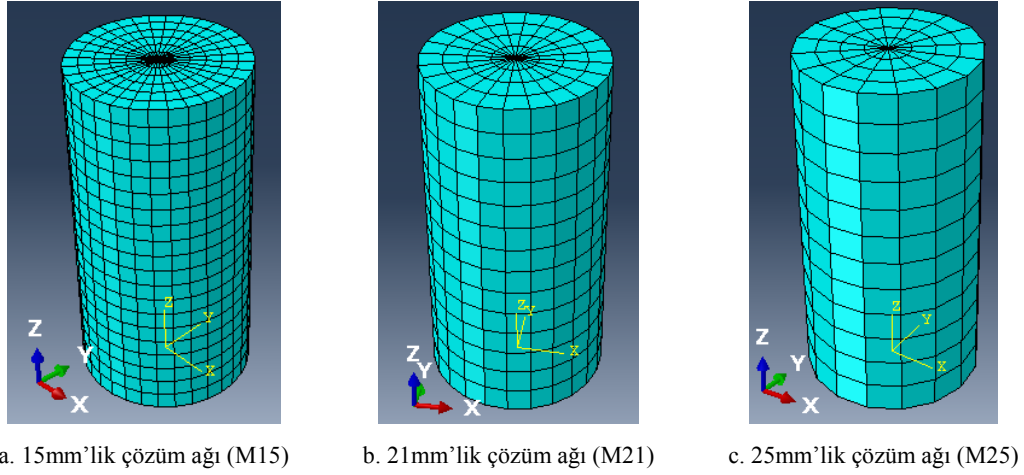
a. Doğrusal (hex) çözüm ağı türü



b- Dağınık(wedge) çözüm ağı türü

Şekil 4.12. Sonlu elemanlar çözüm ağları türü

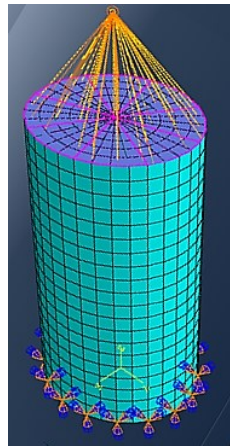
Beton basınç ve çekme davranışına ait özelliklerin belirlenmesiyle nümerik analize yönelik çözüm ağı sıklığı araştırması yapılmıştır. Hex çözüm ağı ile farklı boyutlarda oluşturulan çözüm ağları Şekil 4.13.'te sunulmuştur.



Şekil 4.13. Sonlu elemanlar çözüm ağları boyutu

4.2.5. Yük ve sınır şartlarının uygulanması

Beton elemanlarda yükleme deneyde olduğu gibi beton üst yüzeyine kinematik olarak tanımlanmıştır. Beton üst yüzeyinin merkezinden 120 mm yükseklikte oluşturulan bir noktadan beton üst yüzeyine bağlanarak yükleme bu nokta üzerinden yapılmıştır. Sınır şartları, alt yüzeyi ankastre üst yüzeyi ise serbest olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.14.).



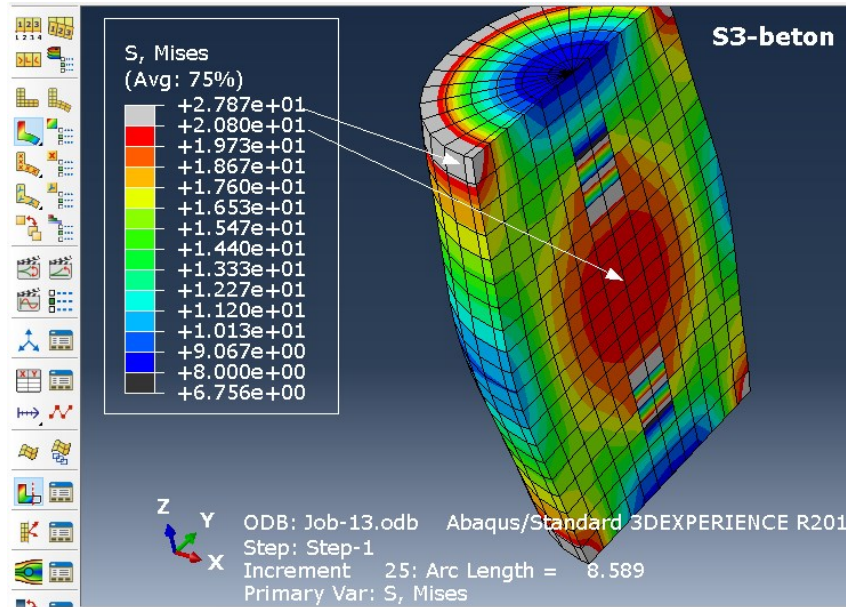
Şekil 4.14. Yük ve sınır şartları tanımlanması

4.2.6. Analiz tipinin belirlenmesi

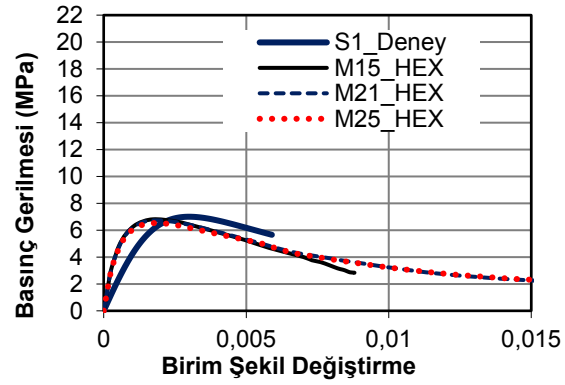
Bu çalışmada analiz tiplerini SEM Abaqus kütüphanesinde mevcut olan modifiye edilmiş Statik RIKS yöntemi kullanılmıştır. Statik RIKS yöntemi, bir yapının kararsız ve doğrusal olmayan göçmesini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntemde yük büyüklüğü ilave bir bilinmeyen olarak kabul edilir ve yüklerle birlikte deplasmanlar eş zamanlı olarak çözülmektedir [68].

4.2.7. Beton davranış modeli analizi

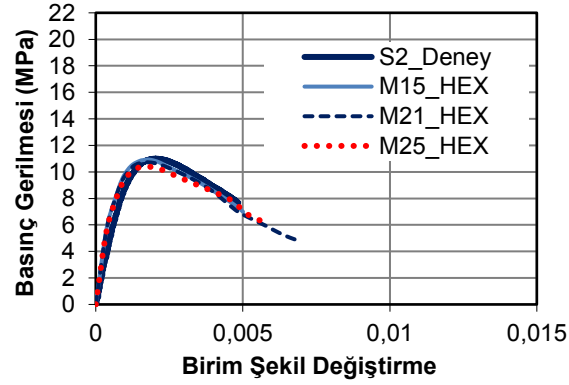
S1, S2 ve S3 betonlarının basınç davranışları; çözüm ağı ve boyutu, Dilasyon Açısı (DA) parametreleri değiştirilerek modellenmeye çalışılmıştır. Kurulan model analiz edilerek beton kesitinde oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir (Şekil 4.15.). Ağ türü ve boyutunda değişken olarak Hex ve Wedge ağ türü, en büyük ağ boyutu olarak 15 mm, 21 mm ve 25 mm büyüklükler kullanılarak model analiz edilmiştir (Şekil 4.16.). Betonların basınç davranışlarının modellenmesinde plastik hacimsel değişimi belirleyen DA parametresi 30, 36, 40 ve 45 derece kullanılarak uygun açı araştırılmıştır (Şekil 4.17. ve 4.18.).



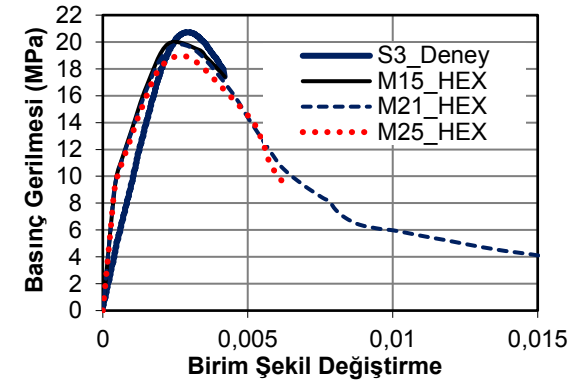
Şekil 4.15. S3 betonun modelde gerilme dağılımları



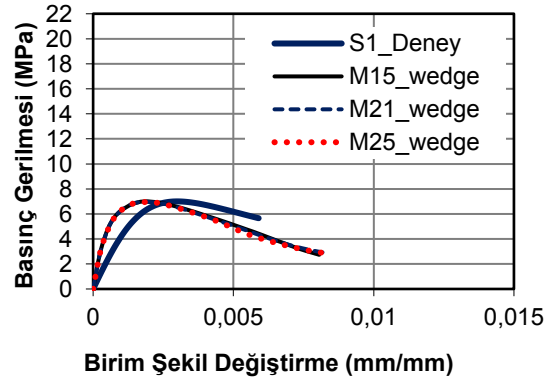
S1 için çözüm ağı hassasiyeti



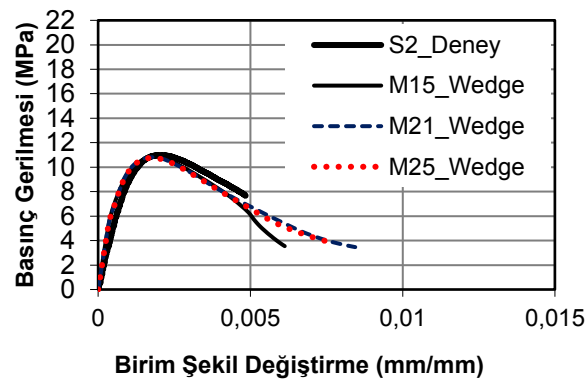
S2 için çözüm ağı hassasiyeti



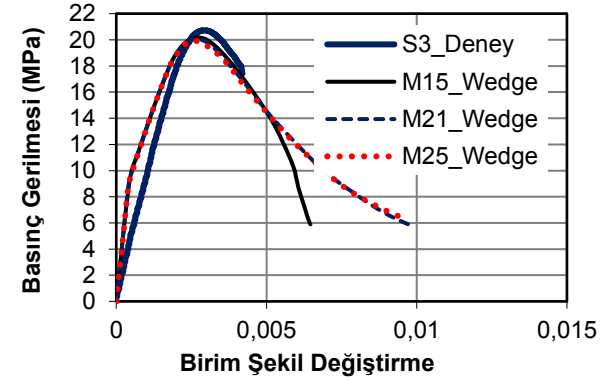
S3 için çözüm ağı hassasiyeti



S1 için çözüm ağı hassasiyeti

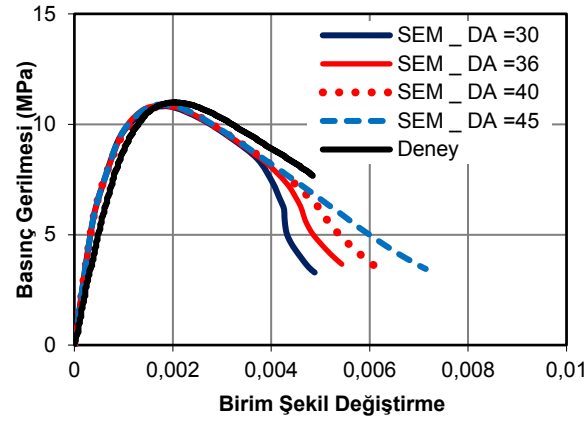


S2 için çözüm ağı hassasiyeti

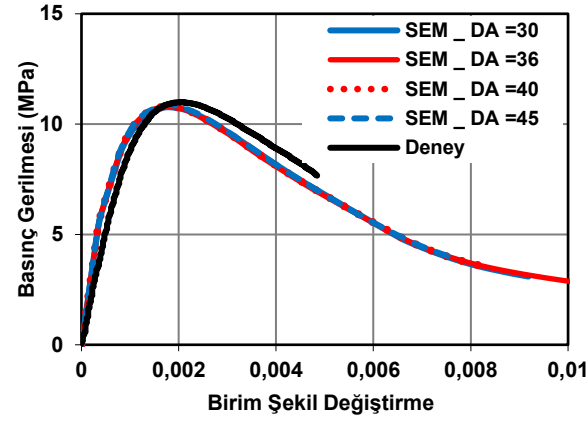


S3 için çözüm ağı hassasiyeti

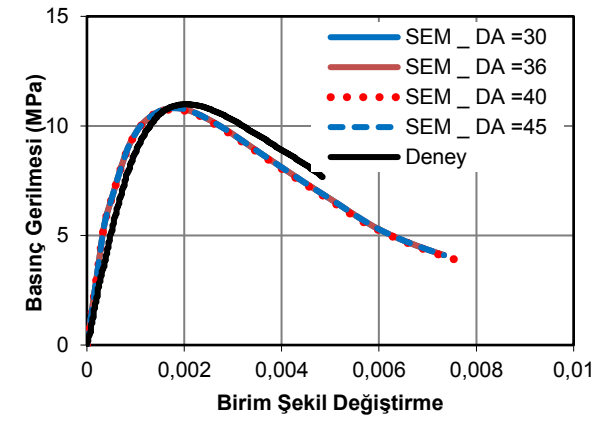
Şekil 4.16. S1, S2 ve S3 beton numuneleri için çözüm ağı hassasiyeti DA 40 kabul edilerek basınç gerilmesi-birim şekil değişirme ilişkisi



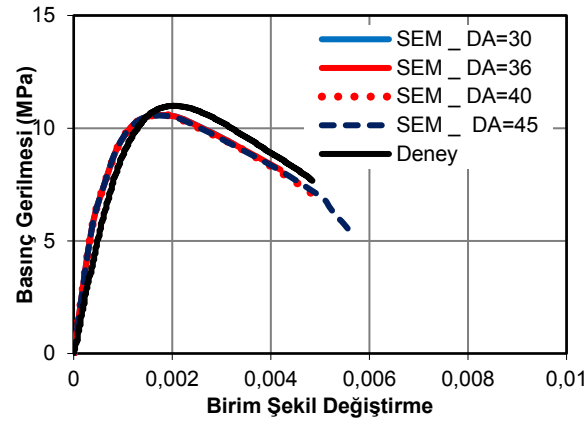
a. Ağ türü ve boyutu: Dağınık, 15



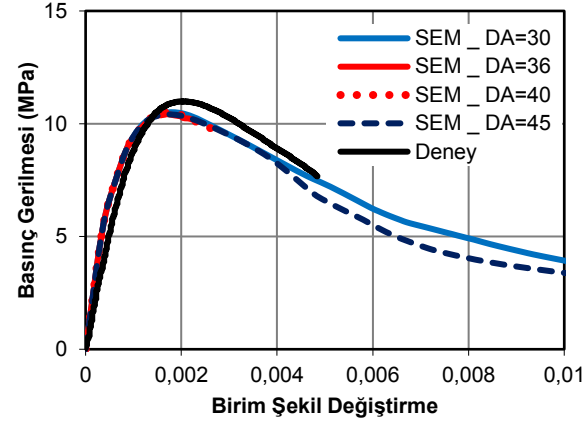
b. Ağ türü ve boyutu: Dağınık , 21mm



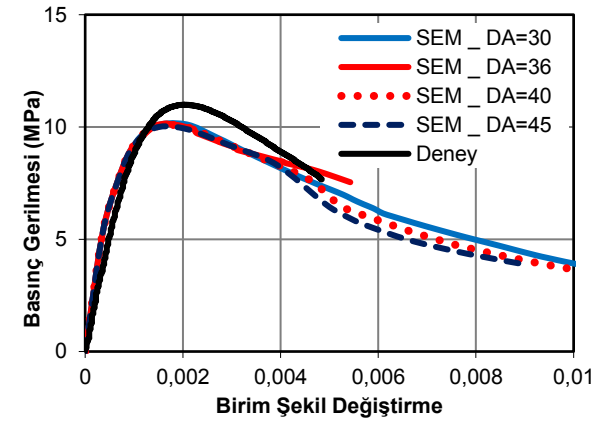
c. Ağ türü ve boyutu: Dağınık , 25mm



d. Ağ türü ve boyutu: Doğrusal, 15mm

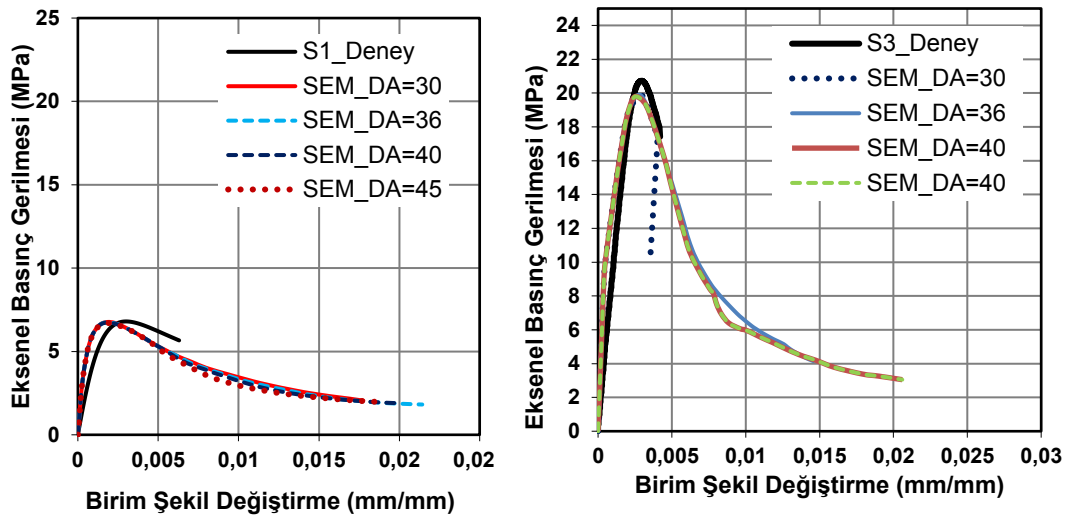


e. Ağ türü ve boyutu: Doğrusal, 21mm



f. Ağ türü ve boyutu: Doğrusal, 25mm

Şekil 4.17. Farklı dilasyon açısı, türü ve boyutu ile S2 betonlarının deney ve SEM analiz sonuçları



a. S1 için Ağ türü ve boyutu: Doğrusal, 15mm

b. S3 için Ağ türü ve boyutu: Doğrusal, 15mm

Şekil 4.18. S1 ve S3 betonları için DA hassasiyeti

Ağ türü ve boyutu incelendiğinde Doğrusal Çözüm ağı türünün, 21 mm ağ boyutunun deneye en yakın sonucu verdiği ve çözüm ağları büyüdükçe kırılma dayanımının azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.17. ve 4.18.).

Yapılan nümerik analizlerde aksel basınç gerilmesi – birim şekil değiştirme ilişkisi bakımından 40’lik DA deney sonucunu en iyi yakalayan değer olmuştur.

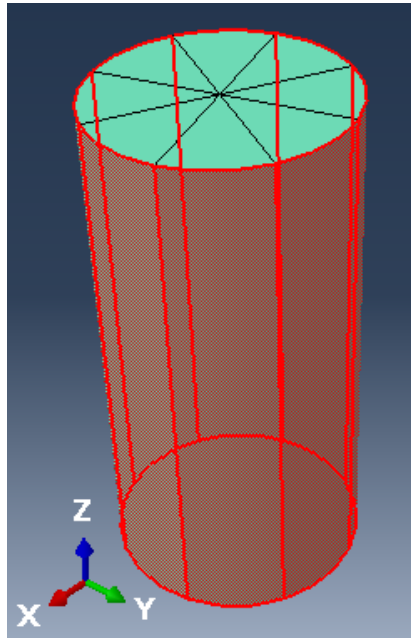
4.3. FRP Kompozitlerin SEM ile Modellenmesi

Deney çalışmalarda kullanılmış CFRP ve GFRP kompozitlerin özellikleri lineer elastik olarak kabul edilmiş ve ABAQUS programına tanımlanan parametreler Tablo 4.2.’de sunulmuştur.

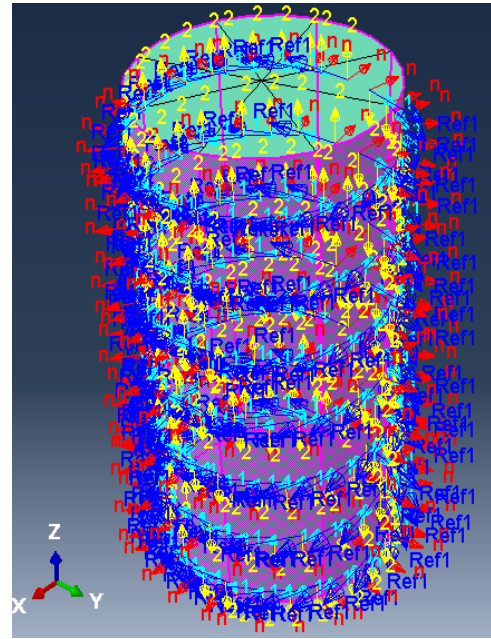
Tablo 4.2. SEM modeli FRP özellikleri

FRP Malzeme Özellikleri	CFRP	GFRP
Birinci Elastisite Modülü (E1) (MPa)	230000	76000
İkinci Elastisite Modülü (E2) (MPa)	4500	4500
Boyuna çekme mukavemeti (MPa)	3900	2300
Kalınlık (mm)	0,17	0,17
Dönme açısı (derece)	0	0

FRP kompozitler beton yan yüzeylerine kabuk eleman (Skin) olarak tanımlanmıştır. FRP kompozitler beton yüzeylerine dairesel olarak sarıldığı için yatay eksen açılı (R), dikey eksen ise doğrusal olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.19.).



1. FRP skin olarak tanımlanması



2. FRP katmanlarının oluşturulması

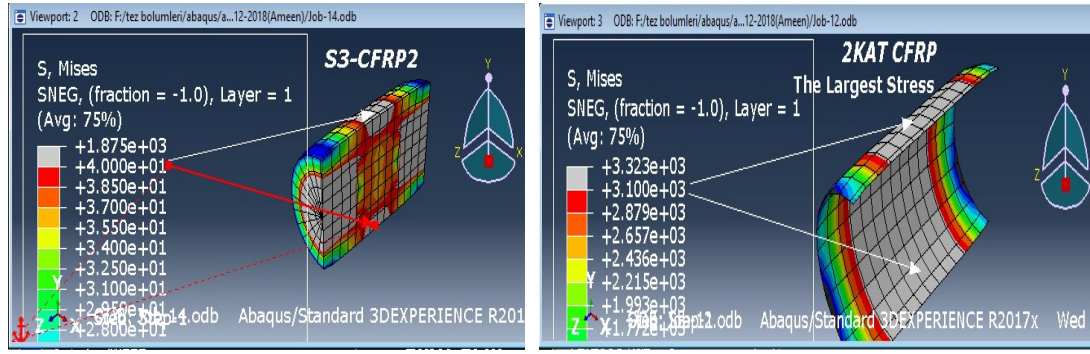
Şekil 4.19. ABAQUS'te FRP katmanlarının oluşturulması

4.4. FRP ile Güçlendirilmiş Beton Davranış Modeli Analizleri

S1, S2 ve S3 betonları için uygun parametreler tespit edildikten sonra güçlendirilmiş betonların SEM analizleri yapılmıştır. Betonların modellenmesinden elde edilen hex ağ türü 21 mm çözüm ağı boyut, ve 40 derece dilasyon açısı parametreleri kullanılarak CFRP, ve GFRP ile güçlendirilmiş betonlar modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ve SEM analizinden elde edilen beton numunelerin basınç dayanımı ve birim şekil değiştirme sonuçları Tablo 4.3.'te sunulmuştur. SEM analizinde CFRP ile güçlendirilmiş betonlar üzerinde oluşan gerilme dağılımları Şekil 4.20.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Deney ve SEM sonuçlarına göre güçlendirilmiş betonların basınç dayanımı ve şekil değiştirmeleri

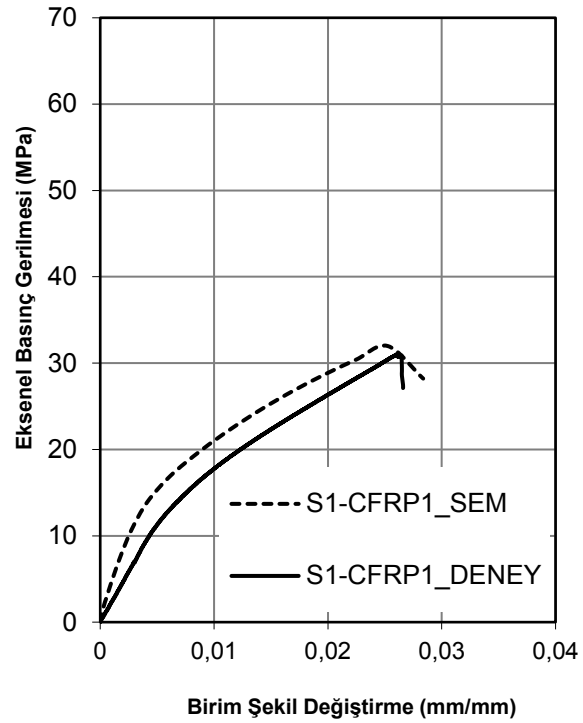
Numuneler	Orjinal Beton		SEM Analiz Sonuçları		Deney Sonuçları		SEM/ Deney	
	f_{co}	ε_{co}	$f_{cu(M)}$	$\varepsilon_{cu(M)}$	$f_{cu(D)}$	$\varepsilon_{cu(D)}$	$\frac{f_{cu(M)}}{f_{cu(D)}}$	$\frac{\varepsilon_{cu(M)}}{\varepsilon_{cu(D)}}$
S1	6,7	0,0036	6,50	0,0030	6,74	0,0036	0,964	0,8333
S1-CFRP	6,7	0,0036	31,98	0,0253	31,06	0,0262	1,030	0,9639
S1-GFRP1	6,7	0,0036	21,14	0,0219	20,18	0,0242	1,048	0,9065
S1-GFRP2	6,7	0,0036	32,54	0,0343	30,73	0,0362	1,059	0,9468
S2	11,02	0,0029	10,80	0,0029	11,02	0,0029	0,980	1,0000
S2-CFRP1	11,02	0,0029	38,90	0,0211	35,6	0,0208	1,093	1,0162
S2-GFRP1	11,02	0,0029	22,67	0,0204	24,67	0,0187	0,919	1,0931
S2-GFRP2	11,02	0,0029	40,98	0,0280	39,8	0,0305	1,030	0,9188
S3	20,8	0,0029	20,10	0,0029	20,82	0,0029	0,965	1,0000
S3-CFRP1	20,8	0,0029	43,12	0,0162	41,3	0,0185	1,044	0,8767
S3-GFRP1	20,8	0,0029	30,62	0,0163	29,54	0,0139	1,037	1,1739
S3-GFRP2	20,8	0,0029	48,15	0,0274	45,21	0,0251	1,065	1,0919



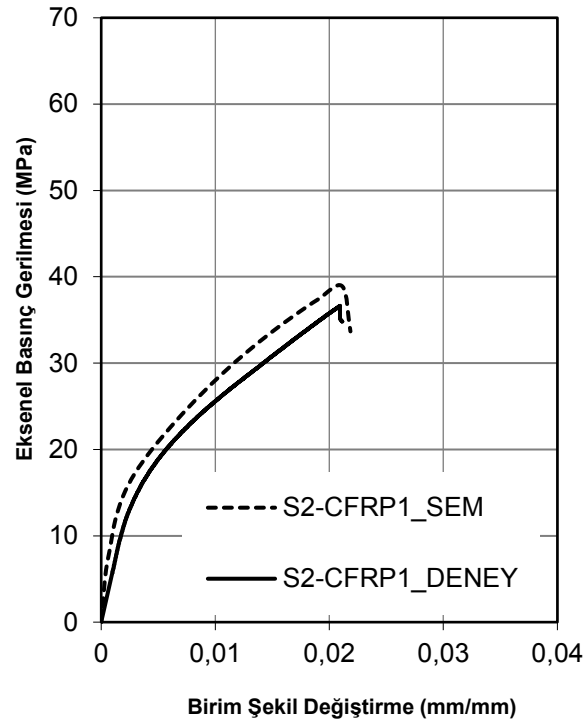
Şekil 4.20. Güçlendirilmiş beton gerilme dağılımları

FRP kompozitler ile güçlendirilmiş betonların aksenal basınç dayanımı – şekil değiştirme grafikleri deneysel ve SEM analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.21. ve 4.22.’de sunulmuştur. Gerilme dağılımları deneysel sonuçlar ile uyumluluk göstermiştir.

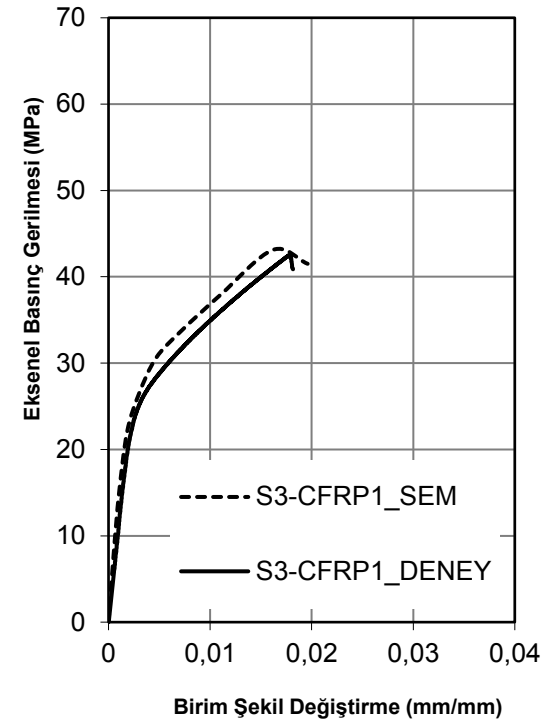
Beton dayanımı arttıkça FRP ile güçlendirilen betonların sem analizleri deneysel çalışma sonuçları ile daha uyumlu çıkmıştır. CFRP ile güçlendirilen betonların davranışı GFRP kompozitler güçlendirilen betonlara göre daha iyi doğrulanmıştır. GFRP kompozitlerle güçlendirilen betonlarda 2 kat sarılarak güçlendirme sonuçları bir kat güçlendirmeye göre deneysel çalışma ile daha uyumludur.



a. S1-CFRP1 betonların davranışı

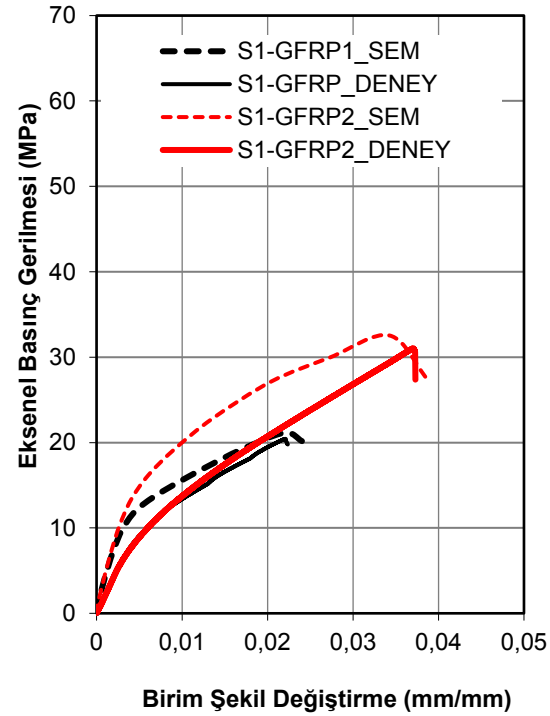


b. S2-CFRP1 betonların davranışı

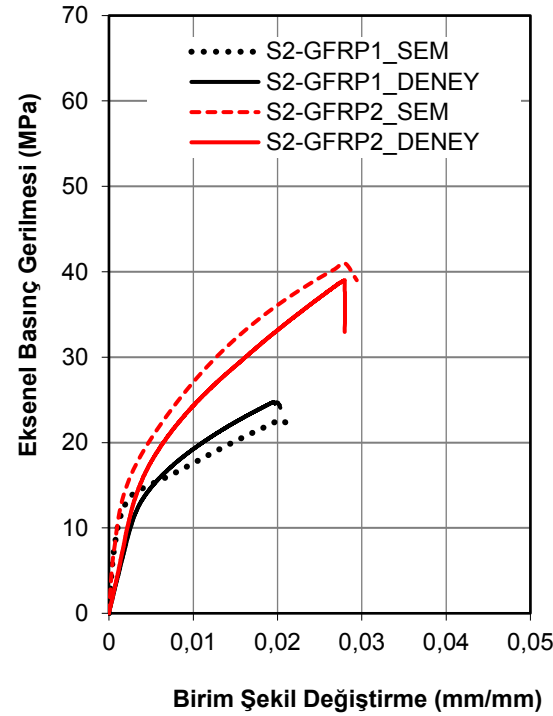


c. S3-CFRP1 betonların davranışı

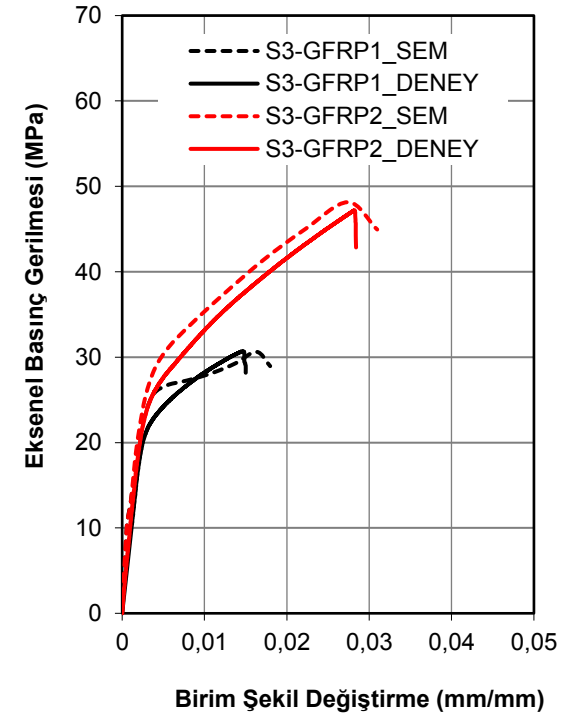
Şekil 4.21. CFRP ile güçlendirilmiş S1, S2, S3 beton numunelerin basınç deney sonuçları ve SEM analiziyle karşılaştırılması



a. GFRP ile güçlendirilmiş S1 betonların davranışı



b. GFRP ile güçlendirilmiş S2 betonların davranışı



c. GFRP ile güçlendirilmiş S3 betonların davranışı

Şekil 4.22. GFRP ile güçlendirilmiş S1, S2, S3 beton numunelerin basınç deney sonuçları ve SEM analiziyle karşılaştırılması

4.5. Parametrik Çalışma

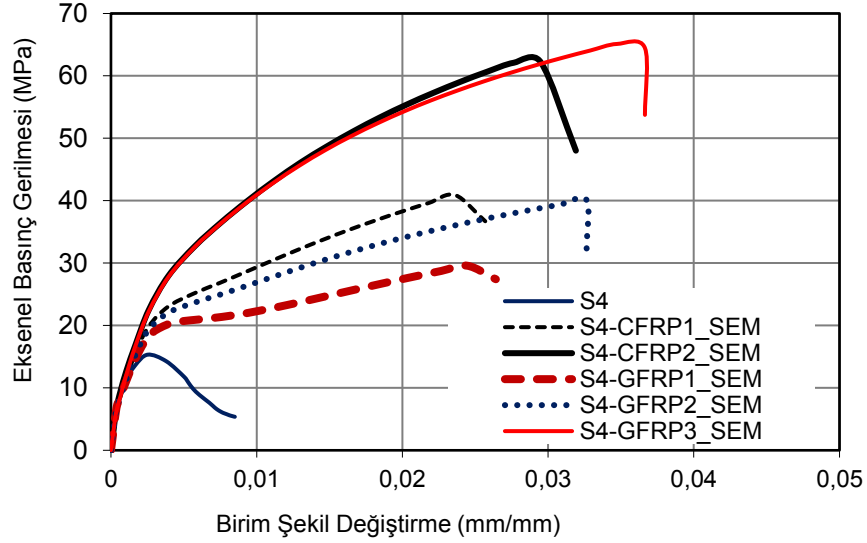
Daha fazla deney sonucu elde etmek ve formül geliştirme amacıyla elimizde deney sonucu olmayan 16 MPa basınç dayanımına sahip beton (S4) ile ve mevcut numunelerin sargı katmanları değiştirilmesi yolu ile parametrik çalışma yapılmıştır.

4.5.1. S4 beton numunelerinin modellenmesi

S1, S2 ve S3 betonlar için ABAQUS analizi ile deney sonuçları karşılaştırılmasının ardından farklı basınç dayanımına sahip betonlarda uygulanabilmesi amacıyla en uygun parametreler elde edilmek istenmektedir. Bu amaçla parametre olarak ABAQUS programı yardım ile CFRP1, GFRP1 ve GFRP2 ile güçlendirilmiş S4 numunesinin davranışları elde edilmiştir. ABAQUS programında S4 betonu modellenmesi için betonların analizinde üretilen parametreler kullanılmıştır. Elde edilen SEM analizi sonuçları Tablo 4.4.'te sunulmuştur. SEM analizinden elde edilen gerilme dağılımları ve gerilme şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.23.'te verilmiştir.

Tablo 4.4. S4-FRP kompozitlerin ile güçlendirilen betonunun aksenal gerilme ve şekil değiştirmeleri

Numuneler	Basınç dayanımı (MPa)	Birim şekil değiştirme
S4	16,00	0,0029
S4_CFRP1	40,90	0,0236
S4_CFRP2	62,22	0,0295
S4_GFRP1	29,58	0,0245
S4_GFRP2	40,10	0,0326
S4_GFRP3	65,12	0,0347



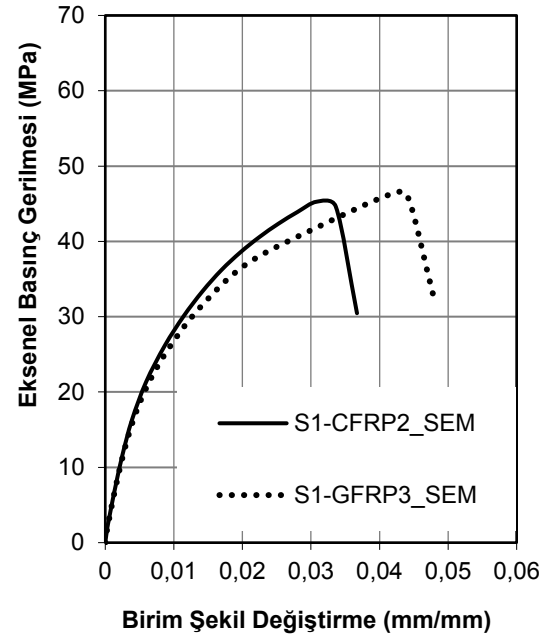
Şekil 4.23. FRP kompozitler ile güçlendirilmiş S4 betonunun davranışları

4.5.2. CFRP2 ve GFRP3 ile güçlendirilmiş S1, S2 ve S3 beton numunlerin modellenmesi

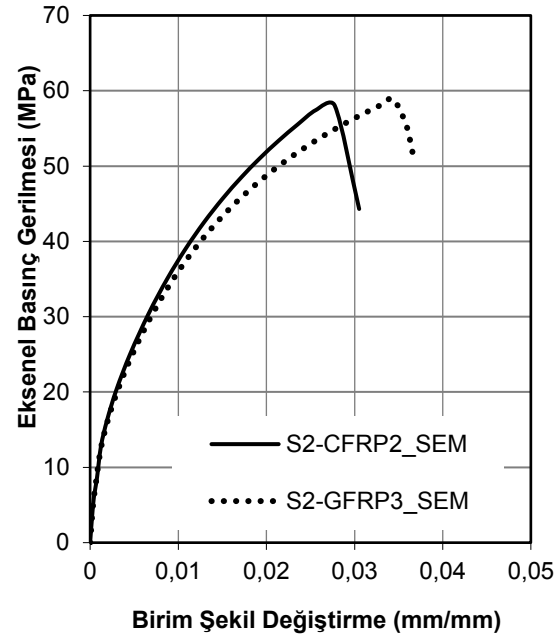
Bu bölümde parametre olarak iki kat CFRP ve üç kat GFRP ile güçlendirilmiş S1, S2 ve S3 betonlarının SEM analizleri çalışılmıştır. edilmiştir. Elde edilen parametreler kullanarak güçlendirilmiş betonunun davranışları elde edilmiştir. Elde edilen SEM analizi sonuçları Tablo 4.5.'te sunulmuştur. İki kat CFRP2 ve üç kat GFRP3 ile güçlendirilmiş S1, S2 ve S3 betonlarının davranışları Şekil 4.25.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. S1, S2 ve S3 betonları için CFRP2 ve GFRP3 parametresi sonuçları

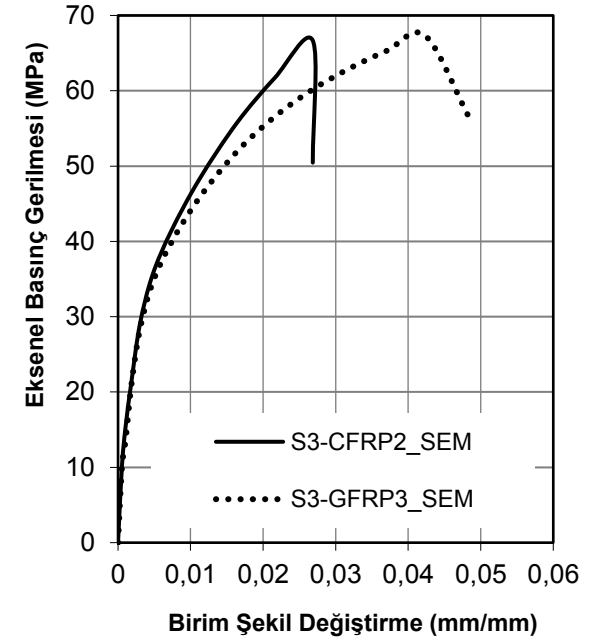
Beton	Basınç dayanımı (MPa)	Birim şekil değişirme
S1-CFRP2	45,27	0,0308
S1-GFRP3	45,93	0,0441
S2-CFRP2	58,01	0,0278
S2-GFRP3	58,87	0,0344
S3-CFRP2	66,98	0,0216
S3-GFRP3	67,32	0,0423



a. S1 betonu



b. S2 betonu



c. S3 betonu

Şekil 4.24. İki kat CFRP ve üç kat GFRP ile güçlendirilmiş S1, S2 ve S3 beton davranışları

4.6. FRP ile Sargılanmış Düşük Dayanıma Sahip Betonlara Ait Gerilme Modeli Denkleminin Belirlenmesi

FRP ile güçlendirilmiş betonun en yüksek dayanımı, değerini etkileyecek parametrelere bağlayan bir formül genellikle “gerilme modeli” olarak isimlendirilmektedir. Bu formül genellikle sargılama etkililiği faktörü, $\frac{f_{cu}}{f_{co}}$ ve sargılama oranı, $\frac{f_j}{f_{co}}$ arasında bir doğrusal ilişkiyi temsil etmektedir (Şekil 4.26.).

FRP malzemesinin kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi hesabı Denklem 2.2’de verilmiştir [47].

$$f_j = \frac{2 n_{frp} t_{frp} f_{frp}}{D}$$

Burada;

n_{frp} , FRP katı sayısı,

t_{frp} FRP bir kat şeridinin kalınlığını,

D Betonun çapı,

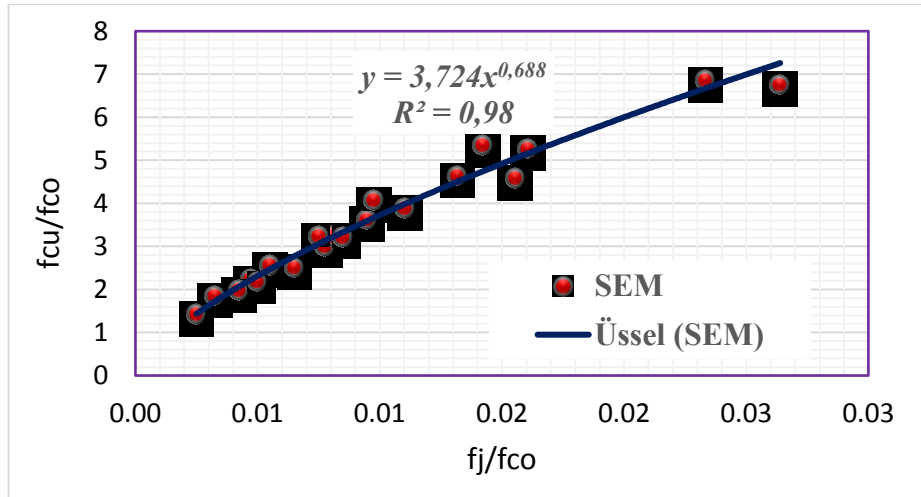
f_{frp} FRP malzemesi çekme dayanımı,

f_j FRP malzemesi kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi olarak ifade edilmektedir.

Sargılama etkililiği faktörü, $\frac{f_{cu}}{f_{co}}$ ve sargılama oranı, $\frac{f_j}{f_{co}}$ değerleri Deney ve SEM analiz sonuçları kullanarak hesaplanmıştır (Tablo 4.6.). Bu çalışmada üretilen “Gerilme modeli” Denklem 4.13’te sunulmuştur.

Tablo 4.6. Sargılama etkililiği faktörü, f_{cu}/f_{co} ve sargılama oranı, f_j/f_{co} değerleri

Numuneler	f_{co} (MPa)	f_{cu} (MPa)	f_{frp} (MPa)	t_{frp} (mm)	n	f_j (MPa)	$\frac{f_j}{f_{co}}$	$\frac{f_{cu}}{f_{co}}$
S1-CFRP1(D)	6,7	31,06	3900	0,17	1	8,84	1,310	4,738
S1-CFRP2(SEM)	6,7	45,27	3900	0,17	2	17,68	2,619	6,706
S1-GFRP1(D)	6,7	20,18	2300	0,17	1	5,21	0,772	3,132
S1-GFRP2(D)	6,7	30,73	2300	0,17	2	10,43	1,545	4,820
S1-GFRP3(SEM)	6,7	45,93	2300	0,17	3	15,64	2,317	6,805
S2-CFRP1(D)	11	35,6	3900	0,17	1	8,84	0,789	3,473
S2-CFRP2(SEM)	11	58,01	3900	0,17	2	17,68	1,579	5,180
S2-GFRP1(D)	11	24,67	2300	0,17	1	5,21	0,465	2,024
S2-GFRP2(D)	11	39,8	2300	0,17	2	10,43	0,931	3,659
S2-GFRP3(SEM)	11	58,87	2300	0,17	3	15,64	1,396	5,256
S3-CFRP1(D)	20,8	41,3	3900	0,17	1	8,84	0,427	2,083
S3-CFRP2(SEM)	20,8	66,98	3900	0,17	2	17,68	0,854	3,236
S3-GFRP1(D)	20,8	29,54	2300	0,17	1	5,21	0,252	1,479
S3-GFRP2(D)	20,8	45,21	2300	0,17	2	10,43	0,504	2,326
S3-GFRP3(SEM)	20,8	67,32	2300	0,17	3	15,64	0,756	3,252
S4-CFRP1(SEM)	16	40,90	3900	0,17	1	8,84	0,553	2,556
S4-CFRP2 (SEM)	16	62,22	3900	0,17	2	17,68	1,105	3,889
S4-GFRP1(SEM)	16	29,58	2300	0,17	1	5,21	0,326	1,849
S4-GFRP2(SEM)	16	40,10	2300	0,17	2	10,43	0,652	2,506
S4-GFRP3(SEM)	16	65,12	2300	0,17	3	15,64	0,978	4,070



Şekil 4.25. “Gerilme modeli” formülü hesaplanması

Elde edilen gerilme modeli formülü:

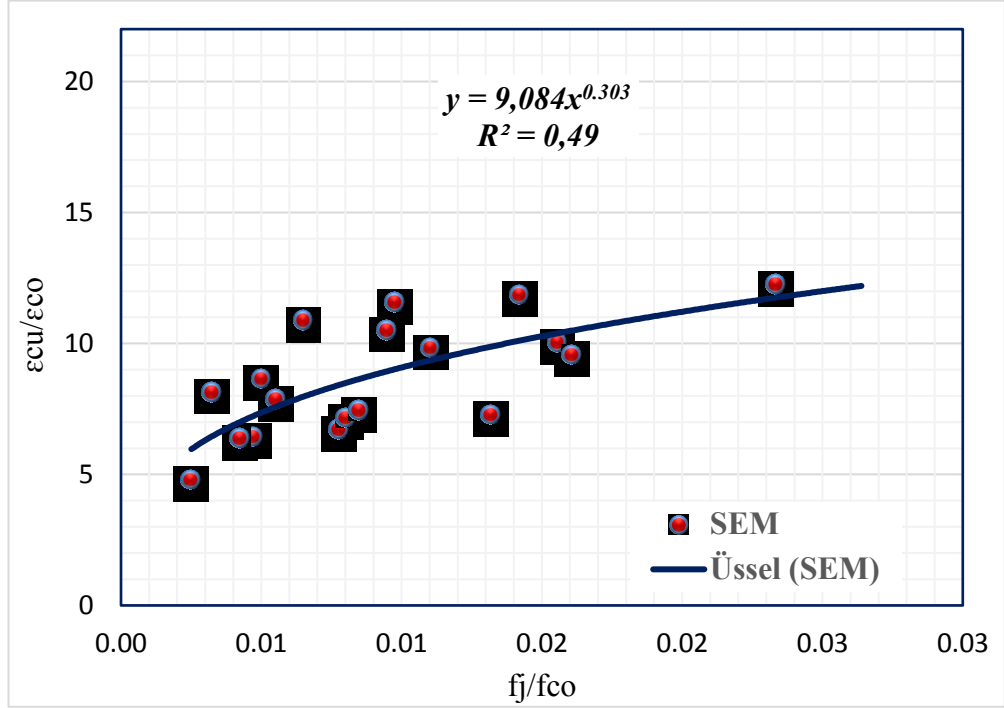
$$f_{cu} = 3,724 f_{co} \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{0,688}, \quad R^2 = 0,98 \quad (4.13)$$

4.7. FRP ile Sargılanmış Düşük Dayanıma Sahip Betonlara Ait Şekil Değişirme Modeli Denkleminin Belirlenmesi

FRP ile güçlendirilmiş betonun en büyük şekil değişirme, değerini etkileyecek parametrelere bağlayan bir formül genellikle “Şekil Değişirme Modeli” olarak isimlendirilmektedir. Bu formül genellikle şekil değişirme etkililiği faktörü $\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{co}}$ ve sargılama oranı, $\frac{f_j}{f_{co}}$ arasındaki ilişki ile belirlenmektedir (Şekil 4.27.). Şekil değişirme etkililiği faktörü ve sargılama oranı hesaplanarak Tablo 4.7.’de sunulmuştur. Bu çalışmada üretilen “Şekil Değişirme Modeli” formülü Denklem 4.14 ile sunulmuştur.

Tablo 4.7. Şekil değişirme etkililiği faktörü, $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ ve sargılama oranı, f_j/f_{co} değerleri

Numuneler	ϵ_{co}	ϵ_{cu}	f_{frp} (MPa)	t_{frp} (mm)	n	f_j (MPa)	$\frac{f_j}{f_{co}}$	$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{co}}$
S1-CFRP1(D)	0,0036	0,026	3900	0,17	1	8,84	1,31	7,02
S1-CFRP2(SEM)	0,0036	0,031	3900	0,17	2	17,68	2,62	8,56
S1-GFRP1(D)	0,0036	0,024	2300	0,17	1	5,21	0,77	6,09
S1-GFRP2(D)	0,0036	0,036	2300	0,17	2	10,43	1,54	9,52
S1-GFRP3(SEM)	0,0036	0,044	2300	0,17	3	15,64	2,32	12,25
S2-CFRP1(D)	0,0029	0,021	3900	0,17	1	8,84	0,79	7,29
S2-CFRP2(SEM)	0,0029	0,028	3900	0,17	2	17,68	1,58	9,57
S2-GFRP1(D)	0,0029	0,019	2300	0,17	1	5,21	0,47	7,05
S2-GFRP2(D)	0,0029	0,031	2300	0,17	2	10,43	0,93	9,66
S2-GFRP3(SEM)	0,0029	0,034	2300	0,17	3	15,64	1,40	11,86
S3-CFRP1(D)	0,0029	0,019	3900	0,17	1	8,84	0,43	5,59
S3-CFRP2(SEM)	0,0029	0,022	3900	0,17	2	17,68	0,85	7,45
S3-GFRP1(D)	0,0029	0,014	2300	0,17	1	5,21	0,25	5,63
S3-GFRP2(D)	0,0029	0,025	2300	0,17	2	10,43	0,50	9,45
S3-GFRP3(SEM)	0,0029	0,042	2300	0,17	3	15,64	0,76	14,60
S4-CFRP1(SEM)	0,003	0,024	3900	0,17	1	8,84	0,55	7,87
S4-CFRP2 (SEM)	0,003	0,029	3900	0,17	2	17,68	1,11	9,83
S4-GFRP1(SEM)	0,003	0,024	2300	0,17	1	5,21	0,33	8,15
S4-GFRP2(SEM)	0,003	0,033	2300	0,17	2	10,43	0,65	10,88
S4-GFRP3(SEM)	0,003	0,035	2300	0,17	3	15,64	0,98	11,57



Şekil 4.26. Şekil değiştirme modeli formülü hesaplanması

Elde edilen şekil değiştirme modeli formülü :

$$\varepsilon_{cu} = 9,084 \varepsilon_{co} \left[\frac{f_j}{f_{co}} \right]^{0,304} \quad (4.14)$$

Burada;

$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}}$: şekil değiştirme etkiliği faktörleri,

ε_{cu} : Güçlendirilmiş beton en büyük şekil değiştirmesi,

$\frac{f_j}{f_{co}}$: Sargılama oranı,

f_j : FRP malzemesi kopmadan önce ulaştığı en büyük yanal güçlendirme gerilmesi ifade edilmektedir.

4.8. Mevcut Denklemlerin Üretilen Gerilme ve Şekil Değişirme Denklemleri ile Karşılaştırılması

2.8.1. Eksenel basınç gerilmelerinin karşılaştırmaları

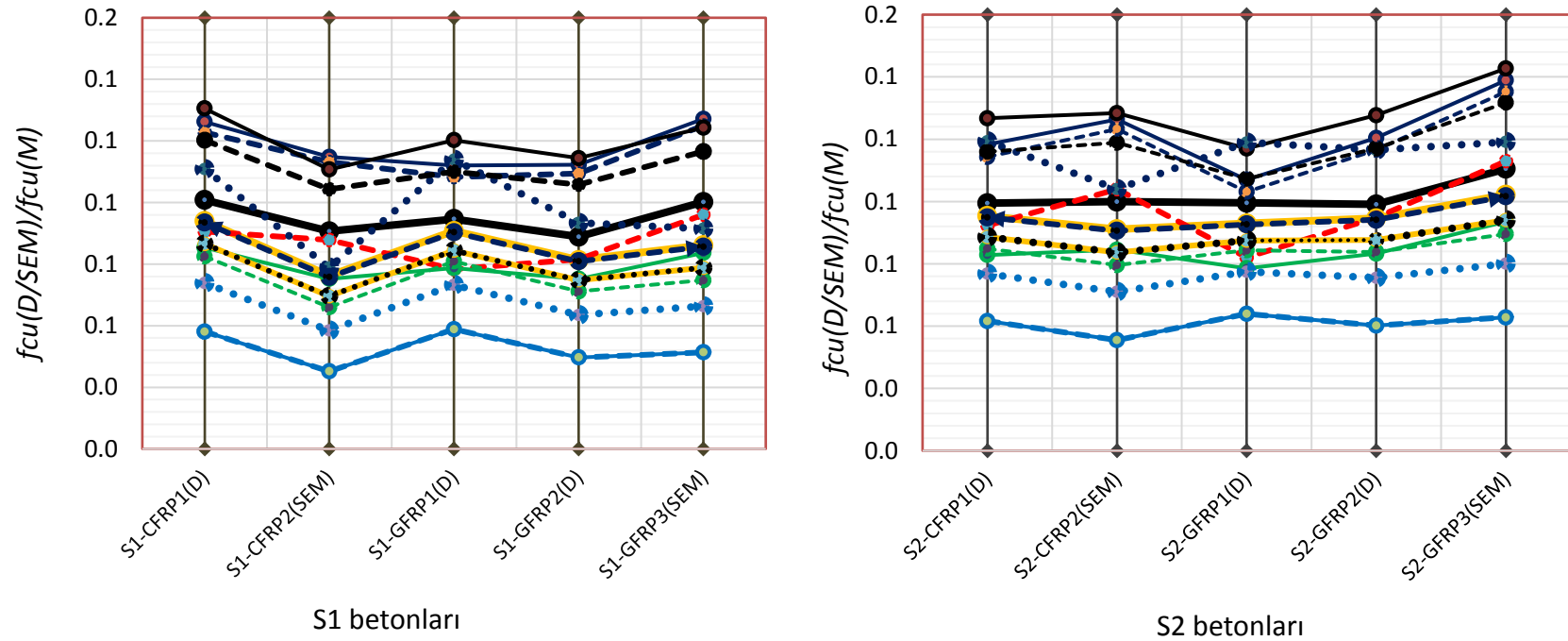
Bu çalışmada üretilmiş model ve araştırmacıların önerilmiş sargılama modelleriyle karşılaştırılmıştır. Tüm modellere ait ‘gerilme modeli’ formülleri kullanarak gerilme değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.8.’de sunulmuştur.

Bu çalışmada üretilmiş modele ait ‘gerilme modeli’ formülü incelenerek ortalama rölatif hataları sırasıyla S1- CFRP1 için %0,8, S1- CFRP2 %10,3, S1- GFRP1 %5,6, GFRP2 ise %12,5 S1 – GFRP3 ise %0,18 oranında çıkmıştır. Güçlendirilmiş S2 betonlarda ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak sırasıyla S2- CFRP1 için %0,56, S2- CFRP2 %0,04, S2- GFRP1 %0,42, GFRP2 ise %0,9 S2 – GFRP3 ise %9,5 oranında bulunmuştur. Güçlendirilmiş S3 betonlarda ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak sırasıyla S3- CFRP1 için %5,1, S3- CFRP2 %5,1, S3- GFRP1 %1,7, GFRP2 ise %7,75 S3 – GFRP3 ise %4 oranında bulunmuştur. Güçlendirilmiş S4 betonlarda ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak sırasıyla S3- CFRP1 için %1,94, S3- CFRP2 %4,45, S3- GFRP1 %6,2, GFRP2 ise %12,2 S3 – GFRP3 ise %8,4 oranında bulunmuştur. Diğer önerilmiş modellere ait ortalama rölatif hataları belirlenmesi için Şekil 4.28.’de gösterilmiştir. En büyük ortalama rölatif hata Fedro Fuastino ve arkadaşları tarafından önerilmiş model tespit edilmiştir (Şekil 4.28.a,b).

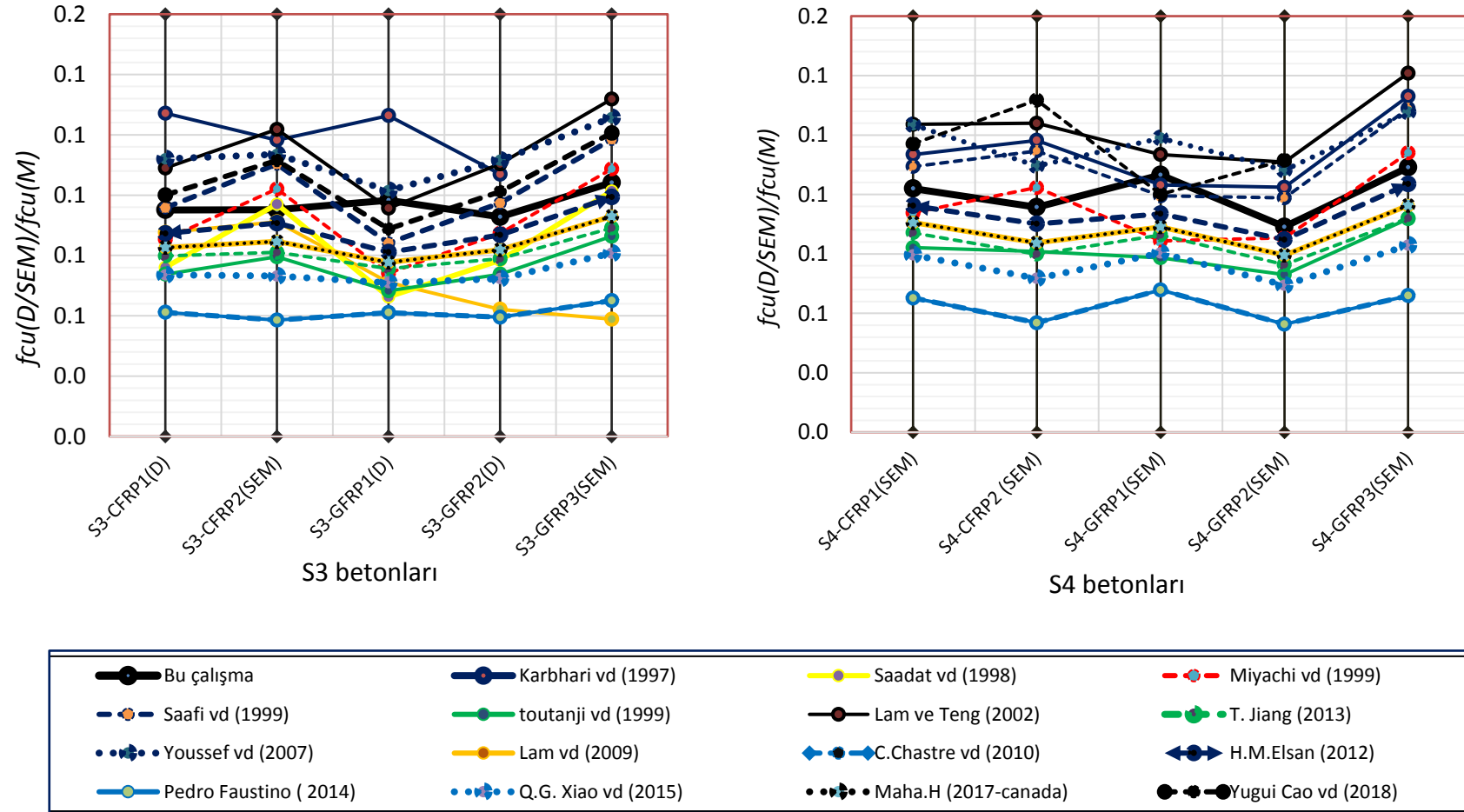
Sonuç olarak bu çalışmanın elde edilmiş gerilme modeli incelenmiş modellere göre daha doğru sonuç vermektedir.

Tablo 4.8. İncelenen modeller için fcu değerleri

Numuneler	Fcu Kontrol (D/SEM)	Bu çalışma	Karbhari ve Gao	Saadetmanesh vd.	miyauchi vd.	saafi vd.	Houssam Toutanji	Chaallal vd.	Youssef vd.	lam-teng	C. Chastre vd	H M. Elsanadedy vd.	T. Jiang, J.G. Teng	Pedro Faustino vd	Q.G. Xiao vd.	Maha Hussein vd	Yugui Cao vd.
Çalışma tarihi		2018	1997	1998	1999	1999	1999	2003	2007	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017	2018
S1-CFRP1(D)	31,1	30,8	24,6	25,1	34,3	25,3	36,4	19,8	28,0	35,9	53,5	33,2	37,6	53,5	42,1	35,9	25,8
S1-CFRP2(SEM)	45,3	49,9	39,4	27,0	51,5	40,0	60,2	19,8	57,4	65,0	100,2	59,7	68,6	100,2	77,4	65,0	43,4
S1-GFRP1(D)	20,2	21,3	18,0	21,6	25,8	18,6	25,6	19,8	17,7	23,9	34,3	22,3	24,9	34,3	27,6	23,9	18,3
S1-GFRP2(D)	30,7	34,6	27,4	25,9	37,7	28,1	40,9	19,8	32,9	41,1	61,9	38,0	43,2	61,9	48,4	41,1	29,0
S1-GFRP3(SEM)	45,9	45,8	36,1	27,1	47,8	36,7	54,9	19,8	50,2	58,3	89,4	53,6	61,4	89,4	69,3	58,3	39,4
S2-CFRP1(D)	35,6	35,8	30,1	35,9	38,6	31,1	43,0	21,2	29,8	40,2	57,8	37,5	41,9	57,8	46,4	40,2	30,7
S2-CFRP2(SEM)	58,0	58,0	45,9	42,8	55,8	47,1	68,6	21,2	55,8	69,3	104,5	64,0	72,9	104,5	81,7	69,3	48,8
S2-GFRP1(D)	24,7	24,8	23,1	29,9	30,1	23,9	31,4	21,2	20,7	28,2	38,6	26,6	29,2	38,6	31,9	28,2	23,0
S2-GFRP2(D)	39,8	40,2	33,0	37,8	42,0	34,1	47,8	21,2	34,1	45,4	66,2	42,3	47,5	66,2	52,7	45,4	34,0
S2-GFRP3(SEM)	58,9	53,3	42,4	41,8	52,1	43,5	62,9	21,2	49,4	62,6	93,7	57,9	65,7	93,7	73,6	62,6	44,7
S3-CFRP1(D)	41,3	43,4	41,5	54,3	48,4	43,1	56,0	28,2	36,9	50,0	67,6	47,3	51,7	67,6	56,2	50,0	41,3
S3-CFRP2(SEM)	67,0	70,4	58,7	69,1	65,6	60,7	84,2	28,2	59,0	79,1	114,3	73,8	82,7	114,3	91,5	79,1	60,1
S3-GFRP1(D)	29,5	30,0	33,9	44,6	39,9	35,1	43,3	28,2	29,1	38,0	48,4	36,4	39,0	48,4	41,7	38,0	33,3
S3-GFRP2(D)	45,2	48,7	44,8	57,7	51,8	46,4	61,3	28,2	40,5	55,2	76,0	52,1	57,3	76,0	62,5	55,2	44,7
S3-GFRP3(SEM)	67,3	64,6	54,9	66,4	61,9	56,8	77,9	28,2	53,6	72,4	103,5	67,7	75,5	103,5	83,4	72,4	55,8
S4-CFRP1(SEM)	40,9	40,1	36,1	46,0	43,6	37,4	49,8	24,5	33,1	45,2	62,8	42,5	46,9	62,8	51,4	45,2	36,2
S4-CFRP2 (SEM)	62,2	65,0	52,6	57,3	60,8	54,3	77,0	24,5	56,8	74,3	109,5	69,0	77,9	109,5	86,7	74,3	54,7
S4-GFRP1(SEM)	29,6	27,8	28,7	37,8	35,1	29,7	37,6	24,5	24,9	33,2	43,6	31,6	34,2	43,6	36,9	33,2	28,3
S4-GFRP2(SEM)	40,1	45,0	39,1	48,7	47,0	40,6	54,9	24,5	37,1	50,4	71,2	47,3	52,5	71,2	57,7	50,4	39,5
S4-GFRP3(SEM)	65,1	59,7	48,9	55,4	57,1	50,5	70,9	24,5	51,0	67,6	98,7	62,9	70,7	98,7	78,6	67,6	50,5



Şekil 4.27a. FRP ile güçlendirilmiş betonlar için (D/SEM) sonuçları - araştırmacıların sargılama modelleri karşılaştırması



Şekil 4.28b. FRP ile güçlendirilmiş betonlar için (D/SEM) sonuçları - araştırmacıların sargılama modelleri karşılaştırması

4.8.2. Birim şekil değiştirmelerin karşılaştırmaları

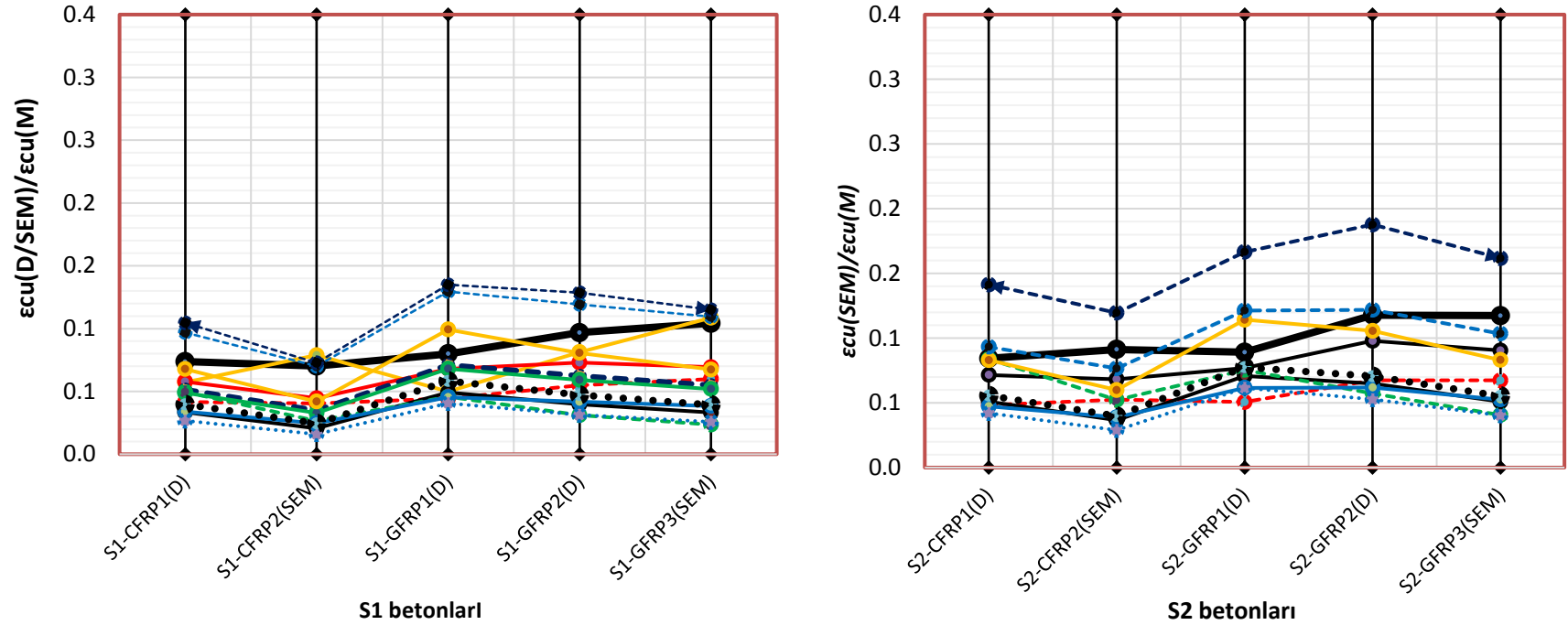
Bu çalışmada üretilmiş model ve araştırmacıların önerilmiş sargılama modelleriyle karşılaştırılmıştır. Tüm modellere ait ‘şekil değiştirme modeli’ formülleri kullanarak şekil değiştirme değerleri hesaplanmış ve Tablo 4.9.’da sunulmuştur.

Bu çalışmada üretilmiş modele ait ‘şekil değiştirme modeli’ formülü incelenerek ortalama rölatif hataları sırasıyla S1- CFRP1 için %35,7, S1- CFRP2 %42,4, S1- GFRP1 %25,2, GFRP2 ise %3,3 S1 – GFRP3 ise %4,1 oranında çıkmıştır. Güçlendirilmiş S2 betonlarda ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak sırasıyla S2- CFRP1 için %18,5, S2- CFRP2 %9,6, S2- GFRP1 %12,2, GFRP2 ise %15,1 S2 – GFRP3 ise %14,8 oranında bulunmuştur. Güçlendirilmiş S3 betonlarda ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak sırasıyla S3- CFRP1 için %9,7, S3- CFRP2 %16,1, S3- GFRP1 %0,24,4, GFRP2 ise %14,96 S3 – GFRP3 ise %43 oranında bulunmuştur. Güçlendirilmiş S4 betonlarda ortalama rölatif hata ise yaklaşık olarak sırasıyla S3- CFRP1 için %6,92, S3- CFRP2 %7,95, S3- GFRP1 %23,42, GFRP2 ise %28,2 S3 – GFRP3 ise %24,7 oranında bulunmuştur. Diğer önerilmiş modellere ait ortalama rölatif hataları belirlenmesi için şekil 4.29.’da gösterilmiştir. En büyük ortalama rölatif hata Fedro Fuastino ve arkadaşları tarafından önerilmiş model tespit edilmiştir (şekil 4.29.a,b).

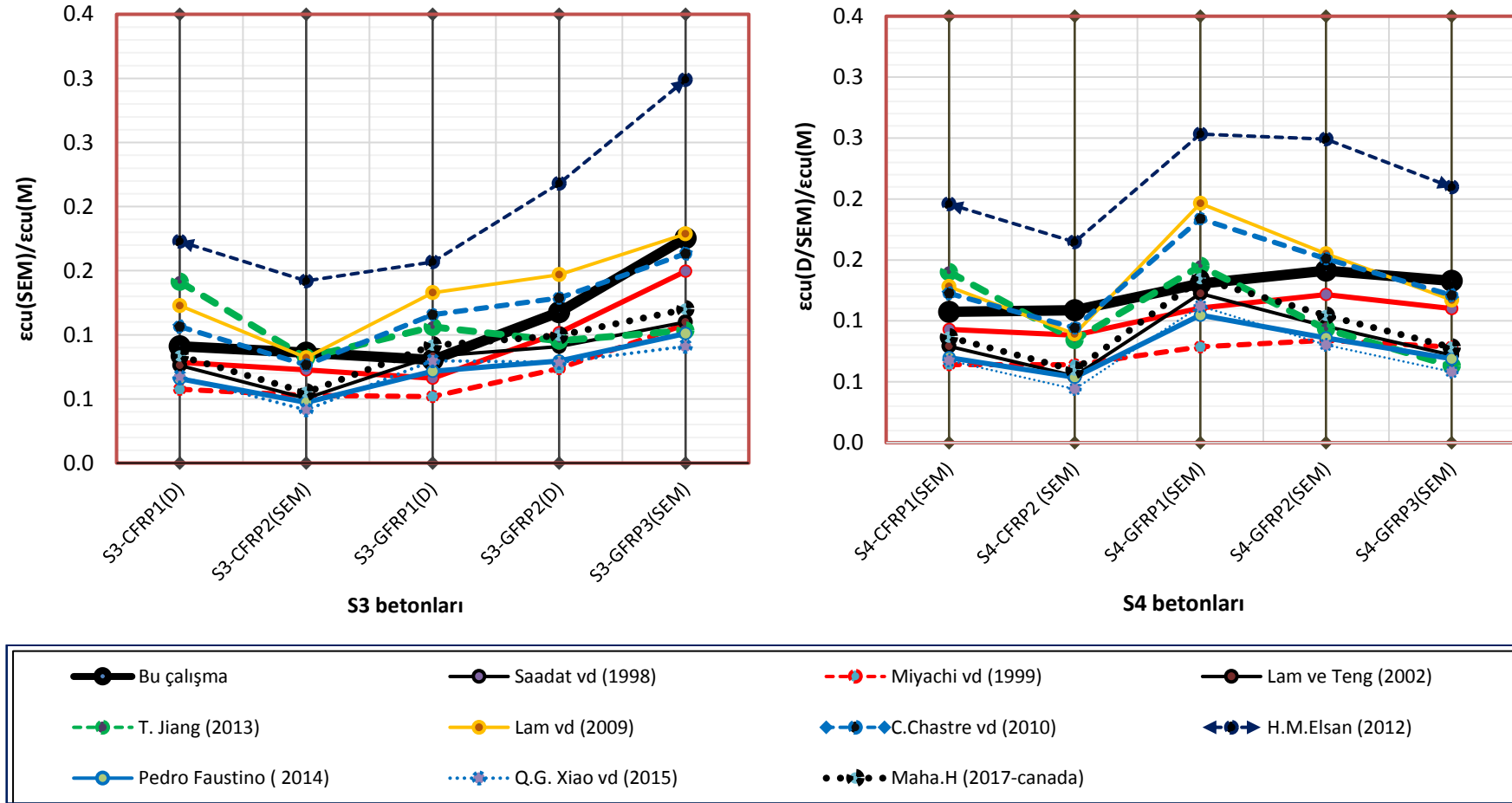
Sonuç olarak bu çalışmanın elde edilmiş şekil değiştirme modeli incelenmiş modellere göre daha doğru sonuç vermektedir.

Tablo 4.9. İncelenen modeller için ϵ_{cu} değerleri

Güçlendirilmiş beton	ϵ_{cu} kontrol (D/SEM)	Bu çalışma	Saadetmanesh vd.	miyauchi vd.	saafi vd.	lam-teng	C. Chastre vd	H M. Elsanadedy vd.	T. Jiang, J.G. Teng	Pedro Faustino vd	Q.G. Xiao vd.	Maha Hussein vd
Çalışma tarihi		2018	1998	1999	1999	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2017
S1-CFRP1(D)	0,0262	0,036	0,045	0,063	0,051	0,039	0,027	0,025	0,039	0,077	0,099	0,07
S1-CFRP2(SEM)	0,030827	0,044	0,069	0,076	0,089	0,074	0,044	0,042	0,074	0,125	0,194	0,13
S1-GFRP1(D)	0,0242	0,030	0,036	0,055	0,034	0,024	0,019	0,018	0,024	0,053	0,060	0,04
S1-GFRP2(D)	0,0362	0,037	0,050	0,066	0,058	0,045	0,030	0,028	0,045	0,087	0,116	0,08
S1-GFRP3(SEM)	0,044109	0,042	0,064	0,074	0,080	0,065	0,040	0,038	0,065	0,115	0,172	0,11
S2-CFRP1(D)	0,0208	0,025	0,029	0,043	0,028	0,025	0,022	0,015	0,025	0,044	0,050	0,04
S2-CFRP2(SEM)	0,027756	0,030	0,041	0,053	0,048	0,046	0,036	0,023	0,046	0,071	0,096	0,07
S2-GFRP1(D)	0,0187	0,021	0,024	0,037	0,019	0,016	0,015	0,011	0,016	0,030	0,030	0,02
S2-GFRP2(D)	0,0305	0,026	0,031	0,045	0,032	0,029	0,025	0,016	0,029	0,049	0,058	0,04
S2-GFRP3(SEM)	0,034391	0,029	0,038	0,051	0,044	0,041	0,033	0,021	0,041	0,065	0,085	0,06
S3-CFRP1(D)	0,0185	0,020	0,024	0,032	0,018	0,015	0,017	0,011	0,015	0,028	0,028	0,02
S3-CFRP2(SEM)	0,0216	0,025	0,030	0,041	0,029	0,026	0,028	0,015	0,026	0,046	0,052	0,04
S3-GFRP1(D)	0,0139	0,017	0,021	0,027	0,012	0,010	0,012	0,009	0,010	0,019	0,017	0,02
S3-GFRP2(D)	0,0251	0,021	0,025	0,034	0,020	0,017	0,020	0,012	0,017	0,032	0,032	0,03
S3-GFRP3(SEM)	0,042345	0,024	0,028	0,039	0,027	0,024	0,026	0,014	0,024	0,042	0,047	0,04
S4-CFRP1(SEM)	0,023621	0,022	0,025	0,037	0,021	0,018	0,019	0,012	0,018	0,034	0,035	0,03
S4-CFRP2 (SEM)	0,029488	0,027	0,033	0,046	0,036	0,033	0,031	0,018	0,033	0,055	0,067	0,05
S4-GFRP1(SEM)	0,024452	0,019	0,022	0,031	0,015	0,012	0,013	0,010	0,012	0,023	0,022	0,02
S4-GFRP2(SEM)	0,032643	0,023	0,027	0,039	0,024	0,021	0,022	0,013	0,021	0,038	0,041	0,03
S4-GFRP3(SEM)	0,034723	0,026	0,032	0,044	0,033	0,030	0,029	0,017	0,030	0,050	0,060	0,04



Şekil 4.29a. FRP ile güçlendirilmiş betonlar için (D/SEM) analizi sonuçları- araştırmacıların sargılama modelleri karşılaştırılması



Şekil 4.29b. FRP ile güçlendirilmiş betonlar için D/SEM sonuçları v araştırmacıların sargılama modelleri karşılaştırılması

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, CFRP ve GFRP kompozitler ile güçlendirilen basınç dayanımı düşük betonların sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmıştır. FRP kompozitler ile farklı katmanlarda sarılarak güçlendirilen. 6,7, 11, 20,8 MPa olmak üzere üç farklı basınç dayanımlarına sahip betonların eksenel basınç yükü etkisindeki davranışı incelenmiş ve SEM ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. SEM analizi ile deneysel çalışma sonuçları doğrulandıktan sonra parametrik çalışma ile yeni deney numuneleri üretilmiştir. Parametrik çalışmada; 16 MPa basınç dayanımına sahip betonların (S4) FRP kompozitler ile güçlendirilmesi SEM ile analiz edilmiştir. Ayrıca 6,7, 11, 20,8 MPa basınç dayanımına sahip betonlarda FRP sargı katmanları artışının beton davranış ve dayanımına etkileri çalışılmıştır. Deneysel ve SEM analiz verileri ile düşük dayanıma sahip betonların eksenel basınç dayanımı ve birim şekil değiştirmesini hesaplayacak yeni bağıntılar üretilerek mevcut bağıntılar ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- a. Düşük dayanıma sahip betonlar için SEM'de uygun parametre değerleri; çözüm ağı türü = HEX, çözüm ağı boyutu 21mm ve DA ise 40 derece olduğu tespit edilmiştir.
- b. FRP kompozitler ile güçlendirilen düşük dayanıma sahip betonların deneysel çalışma ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri SEM analizi ile de iyi bir yakınsaklıkla elde edilmiştir.
- c. Deneysel sonuçları, SEM analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmasının ardından elde edilen parametrelere dayanarak deney ve SEM analizi arasındaki hata oranları beton dayanımı arttıkça azalmaktadır.
- d. Deneysel ve SEM arasındaki hata oranları ortalama S1-CFRP1, S2-CFRP1 ve S3-CFRP1 betonlarında sırasıyla %2,96, %9,3, %4,41, S1-GFRP1, S2-GFRP1 ve S3-GFRP1 betonlarında sırasıyla %4,76, %8,1, %3,66, S1-GFRP2, S2-GFRP2 ve S3-GFRP2 betonlarında sırasıyla %5,9, %5,62, %6,5, olarak bulunmuştur.

Bu değerler düşük dayanıma sahip betonlarda deneysel çalışma yapmadan SEM analizi ile sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

- e. Ayrıca beton dayanımı artıkça CFRP ile güçlendirmede deneysel çalışma ile daha uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. GFRP ile yapılan güçlendirmede ise katman sayısı arttıkça deneysel çalışma ile daha uyumlu sonuçlar elde edilmektedir.
- f. Deneysel ve nümerik çalışmalar ışıkında aksenal basınç kuvvetine karşı düşük dayanıma sahip betonların ‘gerilme modeli’ bağıntısı ve ‘şekil değiştirme modeli’ bağıntısı bulunmuştur.
- g. Bulunan ‘gerilme modeli’ bağıntısı ve ‘şekil değiştirme modeli’ bağıntısı araştırmacıların önerdiği denklemlerle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve bulunan bağıntuların daha doğru sonuç verdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Damci, E., Temur, R., Bekdaş, G., Damages and causes on the structures during the October 23, 2011 Van earthquake in Turkey, *Journal of Case Studies in Construction Materials*, 112–131, 2015.
- [2] Bayraktar, A., Altunişik, C., Pehlivan, M., Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49–72, 2013.
- [3] Sezen, H., Whittaker, A. J., Elwood, S. K. and Mosalam, K. M., Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey, *Engineering Structures journal*, 103–114, 2003.
- [4] Bayraktar, A., Structural Performance Evaluation of 90 RC Buildings Collapsed during the 2011 Van, Turkey, Earthquakes, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013.
- [5] Saatcioglu, M., The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake — damage to structures, *Can. Journal Civil Engineering*, 715–737, 2001.
- [6] Doğangün, A., Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, *Engineering Structural Journal*, 841–856, 2004.
- [7] Çelebi, E., *et al.*, October 23, 2011 Turkey/Van-Ercis earthquake: Structural damages in the residential buildings, *Natural Hazards Journal*, 2287–2310, 2013.
- [8] Sezen, H., Whittaker, A., S., Elwood, K., J., and Mosalam, K., M., Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey, *Journal of Engineering Structural*, 103–114, 2003.
- [9] Eid R., and Paultre, P., Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns, *Journal of Engineering Structural*, 518–530, 2017.
- [10] Tapan, M., Comert, M., Demir, C., Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey, *Engineering Failure Analysis Journal*, 606–628, 2013.
- [11] Kaplan, H., Yılmaz, S., Binici, H., Yazar, E., and Çetinkaya, N., “May 1, 2003 Turkey—Bingöl earthquake: damage in reinforced concrete structures, *Engineering Failure Analysis Journal*, 279–291, 2004.

- [12] Ilki, A., Kumbasar, N., and Koç, V., Low and medium strength concrete members confined by fiber reinforced polymer jackets, *ARI Bulletin of the Istanbul Technical University*, 1, 2003.
- [13] Mirmiran, a., and Shahawy, M., Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 583–590, 1997.
- [14] Ilki, A., Kumbasar, N., and Koc, V., Low strength concrete members externally confined with FRP sheets, *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, 167–194, 2004.
- [15] Zhong, Y., Z., Yu, Q., and Tao, Z. Compressive behaviour of CFRP-confined rectangular concrete columns, *Magazine of Concrete Research*, 735–745, 2008.
- [16] Teng, J. G., and Lam, L., Behavior and modeling of fiber reinforced polymer-confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 1713–1723, 2004.
- [17] Li J., and Hadi, M. N. S., Behaviour of externally confined high-strength concrete columns under eccentric loading, *Journal of Composites for Construction*, 145–153, 2003.
- [18] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., and Li, M. W., Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps, *ACI Structural, Journal*, 434–447, 1994.
- [19] Toutanji, H. A., Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets, *ACI Materials Journal*, 397–404, 1999.
- [20] Ozbakkaloglu, T., and Akin, E., Behavior of FRP-Confined Normal- and High-Strength Concrete under Cyclic Axial Compression, *Journal of Composites for Construction*, 451–463, 2012.
- [21] Seffo, M., and Hamcho, M., Strength of concrete cylinder confined by composite materials (CFRP), in *Energy Procedia Journal*, 276–285, 2012.
- [22] Shin, M., Andrawes, B., Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys, *Journal of Structural Engineering*, 656–664, 2010.
- [23] Lam, L., Teng, J. G., Cheung, C. H., Xiao, Y., FRP-confined concrete under axial cyclic compression, *Journal of Cement & Concrete Composites*, 949–958, 2006.
- [24] Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., Kumbasar, N., FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 169–188, 2008.
- [25] Toutanji, H., Deng, Y., Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets, *Composites Part B:Engineering*, 255–261, 2002.
- [26] Teng, J. G., Hu, Y. M., Yu, T., Stress-strain model for concrete in FRP-confined steel tubular columns, *Engineering Structures journal*, 156–167, 2013.
- [27] Kumutha, R., Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP, *Cement & Concrete Composites Journal*, 609–615, 2007.

- [28] Lin, H., Liao, C., Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material, *Composite Structures Journal*, 239–250, 2004.
- [29] Lam, L., Teng, J. G., Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression, *Engineering Structures journal*, 308–321, 2009.
- [30] Yin, P., Huang, L., Yan, L., Zhu, D., Compressive behavior of concrete confined by CFRP and transverse spiral reinforcement, Part A: experimental study, *Materials and Structures*, 1001–1011, 2016.
- [31] Shahawy, M., Mirmiran, A., Beitelman, T., Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns, *Composites Part B: Engineering*, 471–480, 2000.
- [32] Lam L., Teng, J. G., FRP-confined concrete under axial cyclic compression, *Cement & Concrete Composites Journal*, 949–958, 2006.
- [33] Youssef, M. N., Feng, M. Q., Mosallam, A. S., Stress – strain model for concrete confined by FRP composites, *journal of Composites Part B: Engineering*, 614–628, 2007.
- [34] Jiang, T., Teng, J. G., Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete, *Engineering Structures journal*, 2968–2986, 2007.
- [35] Wei, H., Wu, Z., Guo, X., Yi, F., Experimental study on partially deteriorated strength concrete columns confined with CFRP, *Engineering Structures journal*, 2495–2505, 2009.
- [36] Dalgıç, K. D., Düşük elstisite modüllü cam lifli polimer sargılanmış düşük dayanımlı betonun eksenel yükler altında davranışı ve sonlu eleman metodu ile analizi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2010.
- [37] Kmiecik, P., Kaminski, M., Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 623–636, 2011.
- [38] Chaudhari, S. V., Chakrabarti, M. A., Modeling of Concrete for Nonlinear Analysis using Finite Element Code ABAQUS, *International Journal of Computer Applications*, 14–18, 2012.
- [39] Çoper, A., Lifli Polimer İle Sargılanmış Daire En Kesitli Ultra-Yüksek Dayanımlı Beton Kolonların Davranışı, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2013.
- [40] Hamidnia, M., A. D., Behavior Comparison of Uniaxial Cylindrical Columns Strengthened with CFRP, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 80-88, 2016.
- [41] Navigation, S., Route, N. S., Betonarme binalarda oluşan yapı hasar biçimleri, 1–14, 2015.
- [42] Giorgio, M., Seismic Upgrade Of Reinforced Concrete Columns With Frp, *Journal of Earthquake Engineering*, July, 2003, .
- [43] Sümer, Y., FRP Elemanlar ile Güçlendirilmiş Hasarlı Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, *Sakarya. Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, inşaat Mühendisliği, Doktora tezi*, 2010.

- [44] Öncü, M. A., CFRP İle Güçlendirilmiş Kesitlerin Eksenel Yük Altındaki Davranışı Özeti, *Journal of Engineering Sciences*, 2010.
- [45] Özcan, O., Improving Ductility And Shear Capacity Of Reinforced, Middle East Technical University, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora tezi, 2019.
- [46] Mirmiran, A., Zagers, K., Yuan, W., Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites, *Finite elements in analysis and design*, Article in Finite Elements in Analysis and Design, 1, 79–96, 2000.
- [47] Touhari, M., Mitiche-kettab, R., Behaviour of FRP Confined Concrete Cylinders: Experimental Investigation and Strength Model, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Research Article, 647–660, 2016.
- [48] Youssef, M. N., Feng, M. Q., Mosallam, A. S., Stress-strain model for concrete confined by FRP composites, *Elsevier, Composites Part B: Engineering*, 614–628, 2007.
- [49] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, no. 8, 1804–1826, 1988.
- [50] Bouafia, Y., Iddir, A., Kachi, M. S., Dumontet, H., Stress – Strain Relationship for the Confined Concrete, 11th World Congress on Computational Mechanics, Wccm Xi, 2014.
- [51] Khaloo, A., Javid, Y., Tazarv, M., Experimental Study of the Internal and External (FRP) Confinement Effect on Performance of Compressive Concrete Members, *ACI Structural Journal*, 1–8, 2009.
- [52] Arabshahi, A., Moghaddam, N. G., Tavakkolizadeh, M., A New Strength Model for FRP Confined Circular Concrete Columns, *Smar 2015-Third Conference On Smart Monitoring Assessment And Rehabilitation Civil Structures*, 1–8, 2015.
- [53] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced With Fiber Composite Straps, *Structural Journal*, 434–447, 1994.
- [54] Mirmiran, A., Effect of column parameters on FRP-confined concrete, *Journal of Composites for construction*, *Journal of Composites for construction* 175–185, 1998.
- [55] Toutanji, H., Behaviour of large-scale columns confined with FRP composites in compression, *FRP Composite in Civil Engineering*, CICE, 2004.
- [56] Liu, H., He, M., Luan, Y., Guo, J., Liu, L., A modified constitutive model for FRP confined concrete in circular sections and its implementation with OpenSees programming, *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, ISSN, 856–866, 2013.
- [57] Chastre, C., Silva, M. A. G., Monotonic axial behavior and modelling of RC circular columns confined with CFRP, *Journal of Engineering Structures*, 2268–2277, 2010.

- [58] Elsanadedy, H. M., Al-salloum, Y. A., Alsayed, S. H., Iqbal, R. A., Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns, *Journal of Construction and Building Materials*, 56–72, 2012.
- [59] Faustino, P., Chastre, C., Paula, R., Composites : Part B Design model for square RC columns under compression confined with CFRP, *Journal of Composites Part B: Engineering*, 187–198, 2014.
- [60] Teng, J. G., Xiao, Q. G., Yu, T., Lam, L., Three-dimensional finite element analysis of reinforced concrete columns with FRP and/or steel confinement, *Engineering Structures journal*, 15–28, 2015.
- [61] Hussein, M. H., Mohamed, M., Masmoudi, R., Moussa, A., Analytical modeling of moment-curvature behavior of steel and CFRP RC circular confined columns, *Journal of Composites Structural*, 473–487, 2018.
- [62] Cao, Y., Wu, Y., Jiang, C., Stress-strain relationship of FRP confined concrete columns under combined axial load and bending moment, *Journal of Composites Part B: Engineering*, 207–217, 2018.
- [63] Sarıbyyık, A., Beton Dayanımı Düşük Betonarme Yapı Elemanlarının Lifli Kompozitlerle Güçlendirilmesi Ve Karşılaştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Doktora tezi, 2013.
- [64] Dassault Systems, Abaqus/CAE User Manual, 1051, 2010.
- [65] Bitiusca, L., Finite element modelling: Analysis of Reinforced Concrete Elements, Aalborg University, The School of Engineering and Science, Master's Thesis, 2016.
- [66] ERMCA, Guidance to the engineering properties of concrete, European Ready Mixed Concrete Organisation, 5, 2006.
- [67] EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2, Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Union Per Regulation 305/2011.
- [68] Mustafa, A. D., Merkezi Yüklü Korniyerlerin Yük Taşıma Kapasiteleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Doktora tezi, Trabzon, 99–246, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Ameen Ali ALFAQEEH, 22.02.1987'de Yemen-Sanaa'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sanaa'da tamamladı. 2006 yılında Alshaab Lisesi'nden mezun oldu. 2007 yılında başladığı Thamar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. 2013 yılında Thamar Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2013 yılından 2015 yılına kadar Thamar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktaydı. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi TÖMER'de Türkçe hazırlığını yaptı. 2016 yılında yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Yapı ana bilim dalı'nda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.