

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEŞİTLİ FİBER KATKILI POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE
ANALİZİ**

NASİBE İNKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MEKANİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ZEYNEP FIRAT ALEMDAR**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ FİBER KATKILI POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE
ANALİZİ**

Nasibe İNKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 19.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yasin FAHJAN
Gebze Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Çağrı MOLLAMAHMUTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen, çalışmanın her aşamasında değerli zamanını, bilgi ve tecrübelerini aktaran Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR'a ve Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU'na çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli akademisyen arkadaşlarım Mehmet Ozan YILMAZ'a, Orkun YILMAZ'a ve Mehmet ADA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Haziran, 2018

Nasibe İNKAYA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 FRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	1
1.2.1 Çekme Dayanımı.....	2
1.2.2 Basınç Dayanımı.....	3
1.2.3 Kesme Dayanımı.....	3
1.3 Lifli Polimer Sistemlerin Uygulanma Teknikleri.....	3
1.4 Lifli Polimer Sistemlerle Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	4
1.4.1 DowAksa - İstanbul Teknik Üniversitesi Tarafından Yapılan Çalışma	4
1.4.2 Barış Sayın ve Ekrem Manisalı'nın Çalışması.....	5
1.4.3 Oral Büyükoztürk ve Arkadaşlarının Çalışması.....	8
1.5 Tezin Amacı.....	9
1.6 Hipotez.....	10
BÖLÜM 2	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	11
2.1 Genel Bilgiler.....	11
2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Problem Çözümünde İzlenecek Adımlar.....	11
2.3 Geçmiş Sonlu Eleman Çözümleri.....	12
2.3.1 Kachlakev Sonlu Elemanlar Modeli.....	12
2.3.2 Jia Sonlu Elemanlar Modeli.....	13
2.3.3 Supaviriyakit vd. Sonlu Elemanlar Modeli.....	14
2.3.4 Gao vd. Sonlu Elemanlar Modeli.....	14
2.3.5 Lu vd. Sonlu Elemanlar Modeli.....	15

2.3.6	Alsayed Sonlu Elemanlar Modeli.....	16
2.3.7	Masoud ve Soudki'nin FRP Çalışmaları	16
BÖLÜM 3		
SIYRILMA TESTİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİ.....		18
3.1	Sıyrılma deneyi.....	18
3.2	Sonlu Eleman Modelleri.....	22
3.2.1	Geometrinin Oluşturulması.....	23
3.2.2	Mesh: Elemanlara Ayırma İşlemi.....	24
3.2.3	Mesnet ve Deplasman Koşullarının Belirlenmesi.....	25
3.2.4	Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	26
3.2.4.1	Beton Malzeme Modeli.....	26
3.2.4.2	Çelik Donatı Malzeme Modeli.....	28
3.2.4.3	CFRP Malzeme Modeli.....	28
3.3	Kontak Bölgeler.....	31
3.4	Parametrik Sonlu Eleman Analizleri.....	31
BÖLÜM 4		
SONLU ELEMEN ÇÖZÜMLEMELERİ.....		32
4.1	Referans Kirişin Sonlu Eleman Analiz Sonuçları.....	32
4.2	DeneySEL Sonuçlar ile Parametrik Sonlu Eleman Çözümlerinin Karşılaştırılması.....	36
4.2.1	Yük Taşıma Kapasiteleri.....	36
4.2.2	Betonun Gerilme - Birim Şekil Değiştirmesi.....	39
4.2.3	Boyuna Donatıdaki Gerilmeler.....	42
4.2.4	CFRP Birim Şekil Değiştirme Değerleri.....	44
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		47
KAYNAKLAR.....		49
ÖZGEÇMİŞ.....		51

SİMGE LİSTESİ

D	Numunenin çapı
ε_{cr}	Çatlama birim şekil değıştirmesi
ε_{mn}	Çekme birim şekil değıştirmesi
E_0	Elastisite modülü
E_f	FRP'nin elastisite modülü
f_c	Betonun basınç dayanımı
f_t	Çekme dayanımı
f_{fu}	FRP'nin maksimum çekme dayanımı
n	FRP kat adedi
t_f	FRP kumaş/plaka kalınlığı

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
AFRP	Aramid fiber reinforced polymer
ASTM	Amerikan Standart Test metodu
CFH	Yüksek Modüllü Karbon Lifli Polimer Kumaş
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
CFS	Yüksek Dayanımlı Karbon Lifli Polimer Kumaş
EC	Eurocode
GFRP	Glass fiber reinforced polymer
LP	Lifli Polimer
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1	Gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri	2
Şekil 1. 2	Karbon lifli polimer kompozitin uygulanması..	4
Şekil 1. 3	Yıkılan bina ve FRP ile güçlendirilip ayakta kalan bina.....	5
Şekil 1. 4	Betonarme kiriş elemanın geometrisi.....	6
Şekil 1. 5	B01 deney elemanının yük - sehim eğrisi.	7
Şekil 1. 6	Deney ve ANSYS'ten elde edilmiş yük - sehim eğrisi	7
Şekil 1. 7	Yapı elemanlarına ait malzeme özellikleri	8
Şekil 1. 8	Betonarme elemanlarda sıyrılma tipleri	9
Şekil 2. 1	Solid 65 elemanının geometrisi	13
Şekil 2. 2	Solid 46 elemanının geometrisi	14
Şekil 2. 3	Solid 45 elemanının geometrisi.....	14
Şekil 2. 4	Supaviriyakit vd.tarafından kullanılan sonlu elemanlar modeli..	15
Şekil 2. 5	Lu vd.tarafından kullanılan sonlu elemanlar modeli	17
Şekil 3. 1	Numunenin cihaza yerleştirilmesi.....	21
Şekil 3. 2	Deney sonuçlarına göre elastik sınırı kopma grafiği	22
Şekil 3. 3	Sıyrılma testine göre kopma modları [19].	22
Şekil 3. 4	Sırasıyla soldan B, F ve F tipi kopma modları.....	23
Şekil 3. 5	Pham ve Al-Mahaidi'nin CFRP ile güçlendirilen kiriş detayı.....	24
Şekil 3. 6	Dong araştırmacısının CFRP ile güçlendirilen kiriş detayı.	24
Şekil 3. 7	ANSYS yazılımında geometrinin oluşturulması.	25
Şekil 3. 8	Modelin sonlu eleman ağı.....	26
Şekil 3. 9	Mesnet ve deplasmanların gösterilmesi.....	26
Şekil 3. 10	Betonun gerilme - birim şekil değiştirme modeli (Mander vd. [21])	27
Şekil 3. 11	Betonun multilinear isotropic malzeme tanımı	28
Şekil 3. 12	Drucker - Prager beton modeli.....	28
Şekil 3. 13	Çelik donatının geometrisi.....	29
Şekil 3. 14	Çeliğin multilinear isotropic malzeme tanımı..	29
Şekil 3. 15	CFRP'nin geometrisi.....	29
Şekil 3. 16	CFRP'nin malzeme tanımı	30
Şekil 4. 1	ANSYS modelin ve Pham araştırmacısının yük – deformasyon eğrisi.....	33
Şekil 4. 2	Toplam deformasyon dağılımı.	33
Şekil 4. 3	Beton kirişin normal gerilme dağılımı.	34
Şekil 4. 4	Boyuna donatıların dayanım dağılımı.	34

Şekil 4. 5	CFRP'nin kayma gerilmesi dağılımı.	34
Şekil 4. 6	CFRP sistemin Z eksenindeki gerilme dağılımı.	35
Şekil 4. 7	Betonun CFRP ile arayüzündeki normal gerilme dağılımı.....	35
Şekil 4. 8	Pham araştırmacısının S3b beton kirişine ait kopmalar [18].....	36
Şekil 4. 9	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliklerine göre yük - deplasman grafiği.....	37
Şekil 4. 10	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre yük - deplasman grafiği.....	38
Şekil 4. 11	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre yük - deplasman grafiği.....	38
Şekil 4. 12	Çözümlemesi yapılan BD kirişinin yük - deplasman grafiği.....	39
Şekil 4. 13	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliklerine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	39
Şekil 4. 14	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	40
Şekil 4. 15	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	40
Şekil 4. 16	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliklerine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	41
Ş ekil 4. 17	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	41
Ş ekil 4. 18	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	42
Şekil 4. 19	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliğine göre boyuna donatılarının gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	42
Şekil 4. 20	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre boyuna donatılarının gerilme - birim şekil değiştirme grafiği	43
Şekil 4. 21	Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre yük - deplasman grafiği.....	43
Şekil 4. 22	Çözümlemesi yapılan BD kirişinin boyuna donatılarının gerilme - birim şekil değiştirme grafiği.....	44

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1	FRP kompozitlerin ve çeliğin mekanik özellikleri.....	2
Çizelge 3.1	MasterBrace FRP'lerin Teknik Özellikleri [17].....	21
Çizelge 3.2	Çözümlemesi yapılan kirişe ait malzeme özellikleri.....	30
Çizelge 4.1	Çözümlemesi yapılan kirişlere ait yük ve deplasman değerleri.....	37
Çizelge 4.2	Çözümlemesi yapılan kirişlerin referans kirişe göre donatıdaki gerilme değerleri.....	44
Çizelge 4.3	CFRP birim şekil değiştirme değerleri.....	46

**ÇEŞİTLİ FİBER KATKILI POLİMERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE
ANALİZİ**

Nasibe İNKAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep FIRAT ALEMDAR

Depremselliğin önemli olduğu Türkiye’de yapı elemanları, yatay yükler altında gerekli ve yeterli performansı gösterebilmeleri açısından, yük taşıma kapasitesinde ve sistem sünekliğinde önemli artışa neden olan lifli polimer (LP) malzeme ile güçlendirilmektedir. Son yıllarda bilimsel literatürde de yapı elemanlarının LP ile güçlendirilmesi konusunda birçok deneysel ve nümerik çalışmaya rastlamak mümkündür.

Bu tez çalışmasının başlıca amacı, doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemini kullanarak LP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, plastik (doğrusal olmayan) analizlerini gerçekleştirmektir. Çalışmada geçmiş araştırmacıların kullandığı yöntemler dikkate alınarak ANSYS programında sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile yapılan laboratuvar deneyi sonuçlarına göre epoksi elemanı matematiksel olarak modellenmiştir. Literatürdeki Pham ve Al-Mahaidi araştırmacılarının modelleri referans alınarak statik yükler altında betonarme kirişler analiz edilmiştir. Çözümlemelerden ve deneysel sonuçlardan elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırıldığı takdirde, deneysel ve çözümlemeden bulunan sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, Betonarme kiriş, Lifli polimer, Güçlendirme, Sıyırılma testi.

**MODELING AND ANALYSIS OF STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE
BEAMS WITH FIBER ADDITIVE POLYMERS BY FINITE ELEMENT METHOD**

Nasibe İNKAYA

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Asst. Assoc. Zeynep FIRAT ALEMDAR

In Turkey where the seismicity is crucial, the horizontal structural elements are strengthened by the fiber polymer (LP) material which causes to increase the system ductility and the load capacity in order to satisfy the necessary and adequate performance under the horizontal loads. In the scientific literature in recent years, it is possible to find many experimental and numerical studies about the strengthening of the building elements with LP.

The main purpose of this thesis is to perform the plastic (nonlinear) analysis of reinforced concrete beams retrofitted by LP material using nonlinear finite element method. Considering the methods used by earlier researchers, finite element models are created in the ANSYS program. According to the results of the laboratory tests performed, the epoxy component was mathematically modeled. Reinforcement concrete beams in the Pham and Al-Mahaidi's studies in literature are analyzed under static loadings. The load-displacement curve results obtained from the analyses and the experimental data show that the results found are consistent.

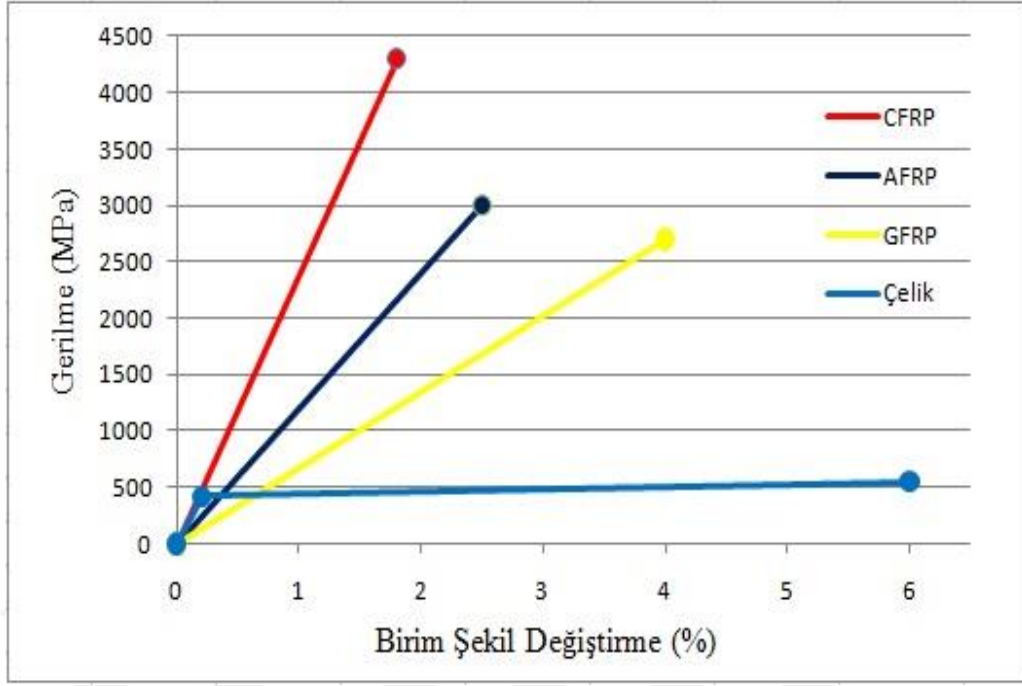
Keywords: Finite element method, reinforced concrete beams, fiber reinforced polymer, strengthening, pull-off test.

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda geleneksel güçlendirme yöntemlerine bir yeni yöntem daha eklenmiştir. Betonarme elemanların güçlendirilmesinde artık lifli polimer kullanılması yaygınlaşmıştır. Lifli Polimerler (Fiber Reinforced Polymer, FRP) isimlerini içinde bulundurduğu malzemeye göre alırlar. Örneğin; Karbon Lifli Donatılı Polimer (CFRP; carbon fiber reinforced polymer), Cam Lifli Donatılı Polimer (GFRP; glass fiber reinforced polymer), Aramid Lifli Donatılı Polimer (AFRP; aramid fiber reinforced polymer).

1.2 FRP Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

FRP kompozit malzemeler çok iyi fiziksel özelliklere, çok yüksek mekanik dayanımlara ve anti korozyon özelliklere sahiptirler. FRP kompozitler tek ve çift yönlü şeritler (plaka) ve kumaşlar (fabrik), ankrajlar ve çubuklar olarak üretilmektedir. Bu kompozitler düşük sünme ve uzama gösterirler. Çelik ile kıyaslandığında hafiftirler ve çekme dayanımı özelliği bakımından çelikten 5 -10 kat daha fazladır. Farklı FRP kompozitlere ve çeliğe ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 1.1'de gösterilmiştir. GFRP, CFRP, AFRP'lerin ve çeliğin mekanik özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrileri

Çizelge 1.1 FRP kompozitlerin ve çeliğin mekanik özellikleri [1]

Malzeme	Elastisite modülü (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Güç tükenmesi uzaması (%)	Sürekli yükte dayanım kaybı (%)
GFRP	50 - 60	1600 - 1700	3,0 - 4,5	60
CFRP	150 - 170	1200 - 2000	2,0 - 2,6	50
AFRP	50 - 75	1700 - 2400	1,0 - 1,5	15
ÇELİK	200	220 - 460	0,2	-

Son yıllarda, betonarme elemanların FRP ile güçlendirilmesi ile ilgili gelişmeler hızlanmıştır. Fakat hesap şekli ve uygulanan teknik esaslar tasarım yönetmeliklerinde henüz bulunmamaktadır.

1.2.1 Çekme Dayanımı

FRP kompozitlerin içinde bulunan lifler esas yükü taşıyıcı eleman oldukları için, lif hacminin bütün FRP hacmine oranı çekme dayanımını etkilemektedir. Aynı özelliklere sahip elemanlarda bile, liflerin hacim oranı değiştikçe dayanım ve rijitlik miktarları farklılık göstermektedir. Üretim şekli ve üretim sırasında uygulanan kalite kontrolü de dayanımı etkileyen diğer faktörlerdir.

FRP sistemin uygulandığı elemanların maruz kalacağı güneş ışığı, yangın, patlama, aşınma, su ve kimyasal bileşenler gibi zararlı etkenlerden korumak amacıyla koruyucu kaplamalar kullanılır [2].

1.2.2 Basınç Dayanımı

Genellikle çekme dayanımı yüksek olan CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişin basınç dayanımı da yüksektir. AFRP liflerinin basınç altındaki düşük gerilme düzeyinde doğrusal olmayan davranış gösterdiği durumlar bunun dışındadır. Basınç dayanımı, çekme dayanımının yaklaşık olarak, GFRP için % 55, CFRP için % 78 ve AFRP için % 20'si kadardır [1].

1.2.3 Kesme Dayanımı

Lif tabakalar arasında güçlendirilmemiş reçine bulunan FRP kompozitler kesmeye karşı dayanıksızdır. Bu durumda kesme kuvvetini daha zayıf olan polimer matris karşılar. Eksenlerden farklı yönlerde yerleştirilmiş lifler, kesme dayanımını artırır. Bu lifler, örgü şeklinde yerleştirilebileceği gibi, esas liflere enine sarılabilir. Kesme dayanımı toplam çekme dayanımının 1/5'i kadardır [3].

1.3 Lifli Polimer Sistemlerin Uygulanma Teknikleri

Lifli polimerlerin, yapıştırıcı (epoksi) ve astar kullanılarak betonarme elemanlara uygulanmasıyla oluşan sistemlere Lifli Polimer Sistemler denir. Yapıştırma işlemi "Islak Yapıştırma" veya "Kuru Yapıştırma" şeklinde olabilir. Kuru yapıştırma işleminde FRP kompozit kuru bir şekilde epoksi sürülmüş beton yüzeye yerleştirilir. Uygulanacak her ek kat için, FRP kompozitlerin arasına tekrar epoksi sürülür. Islak yapıştırma işleminde ise, önce beton yüzeye epoksi sürülür, ancak FRP kompozit ayrı bir işlemle epoksi emdirilerek, epoksi sürülen beton yüzeye yerleştirilir. İkinci kat FRP kompozit yine ayrı bir şekilde epoksi emdirilerek, bir önceki katın üstüne yerleştirilir. Diğer katlar içinde işlemler tekrarlanır (Şekil 1.2). İki yöntemle göre kullanılan epoksi cinsi ve miktarları farklılık gösterebilir [1].



Şekil 1.2 Karbon lifli polimer kompozitin uygulanması [4]

1.4 Lifli Polimer Sistemlerle Yapılan Deneysel Çalışmalar

1.4.1 DowAksa - İstanbul Teknik Üniversitesi Tarafından Yapılan Çalışma

Karbon elyaf üreticisi DowAksa [5] ve İstanbul Teknik Üniversitesi karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) teknolojisini kullanarak ortak bir çalışma yaptı. Yalova'da tam ölçekli binalar üzerinde sismik şok simülasyonu oluşturdular. Bu proje için bir araya gelen uzman ekip, karbon FRP ile güçlendirilmiş bir binanın olası bir depremde nasıl ayakta kaldığını karşılaştırılmalı olarak gösteren bir test gerçekleştirmiştir. Test 1999'da 18373 kişinin hayatını kaybettiği Türkiye'nin en büyük deprem felaketlerinden birine sahip olan bölgelerden biri olan Yalova'da gerçekleştirildi. DowAksa, Yalova Valiliği tarafından tahsis edilen arazi üzerinde iki adet tam ölçekli bina inşa etti. Üç katlı iki ayrı yapı üzerinde sismik kuvvetleri simüle etmek için gerçekleştirilen test, bu yöntemle bu ölçekte gerçekleştirilen dünyadaki ilk çalışma olma özelliğini taşıyor. Aynı temel ve yapı malzemelerinin kullanıldığı binalar, 2007 Deprem Yönetmeliği'nden önce inşa edilmiş, Türkiye'de bina yapımında uzun yıllardır yaygın olarak uygulanan yöntemlerle inşa edildi. Hedefi, geleneksel yöntemlerle inşa edilmiş bir binanın güçlü sismik etkilere dayanacak şekilde nasıl güçlendirilebileceğini ölçmektir. Bir binanın kolonları DowAksa tarafından geliştirilen yüksek mukavemetli Karbon FRP teknolojisiyle güçlendirilirken, diğer bina olduğu gibi bırakıldı. Gelişmiş sensörlerin yerleştirilmesiyle tamamlanan saha hazırlıklarının ardından, sismik şok simülasyonunu elde etmek için hidrolik pistonlar kullanıldı. Tamamlanan test sonunda, karbon FRP malzeme ile

güçlendirilen bina ayakta kalırken, güçlendirilmeyen bina ise yıkıldı (Şekil 1.3). Güçlendirilmeyen bina 3. günün sonunda 0,0135 öteleme oranında yıkılmasına rağmen güçlendirilen bina 0,15 öteleme oranında dahi yıkılmamıştır [6].



Şekil 1.3 Yıkılan bina ve FRP ile güçlendirilip ayakta kalan bina

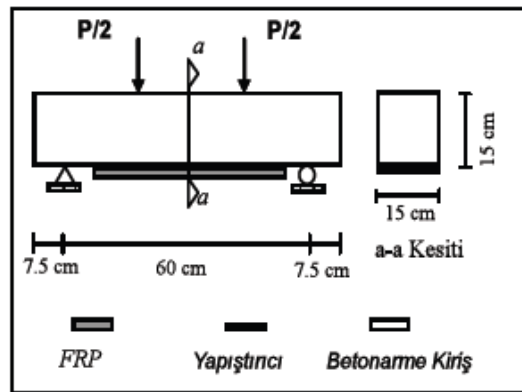
Karbon FRP kompozit malzemeler; geleneksel güçlendirme sistemlerine alternatif olarak geliştirilmişlerdir. Çekme dayanımları çelikten fazla olan bu tür kompozit malzemelerin en büyük avantajları hafif olmaları, korozyona uğramamaları ve kolaylıkla uygulanabilmeleridir. DowAksa tarafından üretilen Karbon FRP çözümünün bir diğer önemli özelliği de konunun uzmanları tarafından yürütülen güçlendirme çalışmaları sırasında yapıların normal işlevlerine aralıksız olarak devam edebilmeleridir. Güçsüz yapıların bir kısmının veya tamamının yıkımını ve yeniden inşasını gerektiren geleneksel iyileştirme veya rekonstrüksiyon tekniklerinden farklı olarak, Karbon FRP mevcut alt katmanın hemen üzerine uygulanabilmektedir. Bu sayede, kurulum süresi ve masraflarından önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır. Kurulum esnasında esnek bir kumaş ile kaplama biçiminde uygulanan malzeme, daha sonra bir reçine matrisi ile doyurulmakta, böylece çeliğin elli katını aşan kuvvet-ağırlık oranına sahip güçlü, dirençli bir yapıya sahip olmaktadır.

1.4.2 Barış Sayın ve Ekrem Manisalı'nın çalışması

Barış Sayın ve Ekrem Manisalı [7] FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin arayüz gerilmelerini etkileyen parametreleri deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Çalışmanın konusu, betonarme kirişlerin FRP ile güçlendirilmesinde kompozit malzeme davranışını

etkileyen parametreler ile ilgilidir. Bu kapsamda, FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kayma gerilmesi ve normal gerilmeleri belirlenmiştir. Kirişin gerçek davranışını belirlemek için laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapılmıştır. 0,2x10x55 cm boyutlarındaki FRP plakalar, 15x15x75 cm boyutlarında ve paspayı 25 mm olan betonarme kirişlere epoksi esaslı yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Kirişlere ait boyuna donatılar 4 ϕ 10 ve enine donatılar ϕ 8/10 şeklindedir. FRP olarak SikaCarbodur 1012, yapıştırıcı olarak Sikadur 30 epoksi reçinesi ve Sikadur 52 enjeksiyon reçinesi kullanılmıştır. Yapıştırıcı kalınlıkları ise <1 mm ile 4 mm arasında alınmıştır. FRP'nin kirişe uygulanmasında kullanılan yapıştırıcının kalınlığını, yapıştırıcı türünü ve beton yüzeyinin durumunu (kuru/nemli), üretilen deney numuneleri üzerinde eğilme etkisine maruz bırakılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonrasında ANSYS programında FRP'li betonarme kiriş modellenmiştir ve analizler gerçekleştirilmiştir. Programa, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü, beton yüzeyi parametrelerinin özellikleri girilerek analizlere sonucunda kayma gerilmesi ve normal gerilme sonuçları elde edilmiştir. Sonlu eleman (SE) analizleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmada lif takviyeli polimerle güçlendirilmiş kare kesitli basit mesnetli betonarme kiriş seçilmiştir. Şekil 1.4'te betonarme kiriş elemanın geometrisine yer verilmiştir. Deney elemanına monotonik yükleme, dört nokta yüklemesi olarak otomatik kontrollü bir hidrolik kriko ile uygulanmış ve yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmada bir adedi referans kiriş olmak üzere onbeş adet betonarme kiriş test edilmiştir.

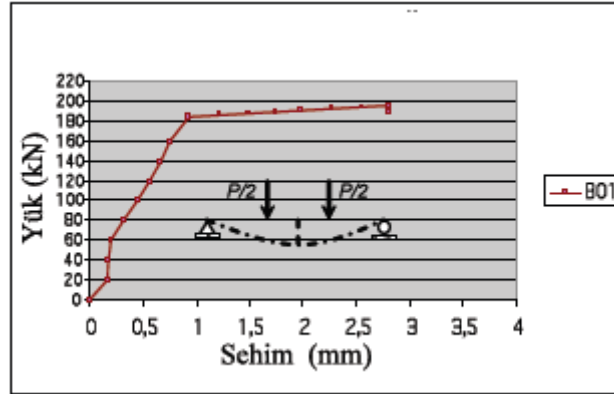


Şekil 1.4 Betonarme kiriş elemanın geometrisi

Test edilen kirişlerde, yüklemenin başlangıcında yer değiştirmeler çok küçük değerlerde seyretmiş, çekme bölgesinde ilk çatlak oluşuktan itibaren yer değiştirme değerlerinin

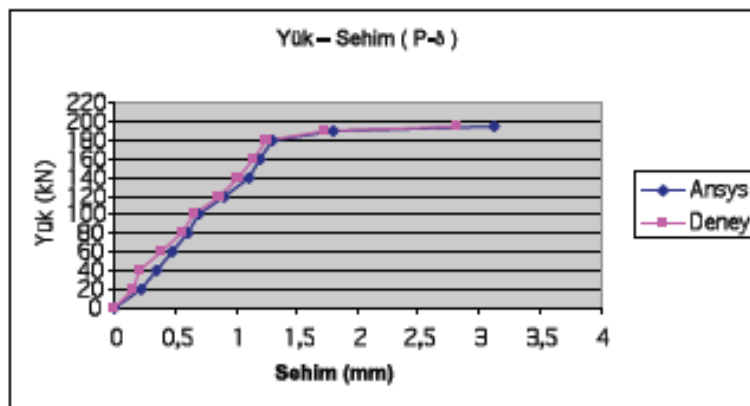
artmaya başladığı görülmüştür. Kirişlerde deney sonrasında, kirişin çekme bölgesinde beklenildiği üzere eğilme ve kesme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

Test kirişlerinden B01 deney elemanına ait yük sehim eğrisi Şekil 1.5'te gösterilmiştir. B01 deney elemanının yapıştırıcı kalınlığı <1 mm'dir. Yapıştırıcı olarak Sikadur 30 kullanılmıştır. Beton sınıfı C30/37'dir ve beton yüzeyi kurudur.



Şekil 1.5 B01 deney elemanının yük - sehim eğrisi

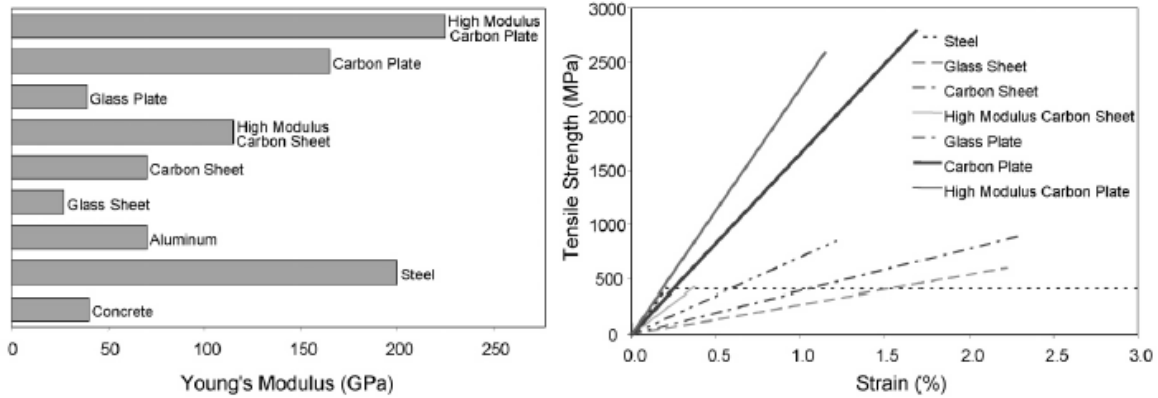
Çalışmada, monotonik yüke maruz bırakılan betonarme kirişlerin analizi SEY kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik problemlerin nümerik çözümünde kullanılan ANSYS programı modelin analizinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Analiz sonrasında oluşturulan modelin yük - sehim eğrisi incelendiğinde deneysel çalışmada ortaya çıkan yük- sehim eğrisi ile birbirine oldukça benzer olduğu Şekil 1.6'da görülmektedir. Deneyde elde edilen maksimum sehim 2,88 mm iken, ANSYS'te elde edilen maksimum sehim 3,12 mm'dir.



Şekil 1.6 Deney ve ANSYS'ten elde edilmiş yük - sehim eğrisi

1.4.3 Oral Büyüköztürk ve arkadaşlarının çalışması

Büyüköztürk [8] 'ün çalışmasında FRP ile güçlendirilmiş betonarme (RC) ve çelik elemanlarındaki ayrışma hatalarının anlaşılması ve modellenmesi konusundaki ilerlemeler gözden geçirilmiştir. FRP kompozit ile güçlendirmenin uygulanabilirliği ve etkinliği materyale ve güçlendirilecek malzemenin tipine bağlıdır. Bu alanda bugüne kadar yapılan araştırmalar RC elemanlar üzerine yoğunlaşmıştır. Uygulamada güçlendirici malzemenin, güçlendirilen elemanın taban malzemesine kıyasla benzer veya daha yüksek bir rijitliğe sahip olması beklenir. Bu genellikle beton ve yumuşak metal olan alüminyum için geçerli olsa da çoğu FRP kompozit sistemin rijitliği yapısal çelikten çok daha azdır. Şekil 1.7'de alüminyum, beton ve çeşitli FRP kompozitlerin Elastisite modülü değerleri ve çekme dayanımı - birim şekil değiştirme davranışları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan çelik elemanların FRP ile güçlendirilmesinin, beton ve alüminyum elemanlara kıyasla daha az avantajlı ve ekonomik olarak daha az uygulanabiliridir. Son zamanlarda, çelik elemanların dahil olduğu diğer uygulama türlerindeki araştırma ve uygulamalar, FRP malzemelerinin azalan maliyetleri, kurulum kolaylığı, kaynaklı ve cıvatalı onarımları ortadan kaldırması nedeniyle artmıştır.



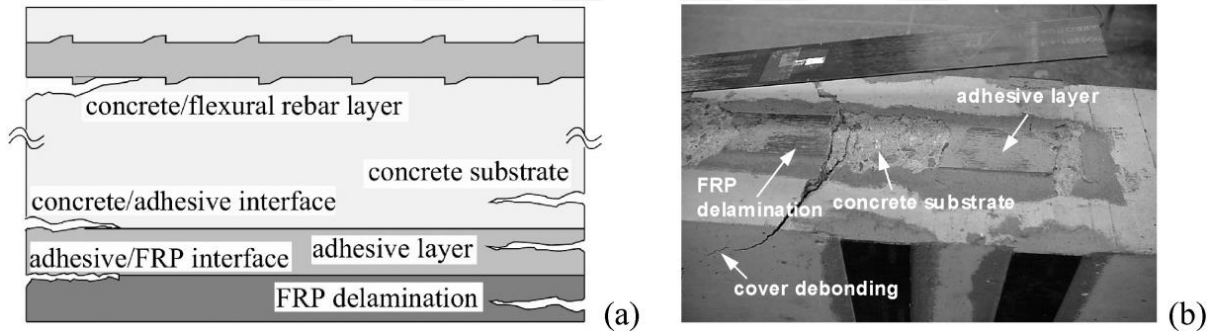
Şekil 1.7 Yapı elemanlarına ait malzeme özellikleri

Kirişler, kolonlar, levhalar ve duvarlar dahil çeşitli yapısal elemanlar FRP kompozit ile güçlendirilebilir. Malzeme türüne bağlı olarak güçlendirmenin amacı aşağıdaki maddelerden bir veya birkaçının kombinasyonu olabilir.

- 1) Eksenel, eğilme veya kesme yük kapasitesini artırmak,
- 2) Gelişmiş sismik performans için sünekliği artırmak,
- 3) Servis ve tasarım yükleri altında azalan deplasmanların rijitliğini artırmak,

- 4) Kalan yorulma ömrünü artırmak,
- 5) Çevre etkilerine karşı dayanıklılığı artırmak.

FRP ile güçlendirilmiş elemanlarda sıyrılma, çoğunlukla malzeme süreksizlikleri ve çatlakların olduğu yüksek gerilme konsantrasyonu olan bölgelerinde gerçekleşir. Teorik olarak, FRP ile güçlendirilmiş elemanların sıyrılması, en az miktarda enerji gerektiren bir yayılma yolunu destekleyen, güçlendirme sistemini oluşturan malzemelerin ara yüzeylerinde veya içinde yer alabilir. Bileşen malzemelerin birinde oluşan çatlak yayılımı, yapısal bileşenlerin tasarımında arayüz sıyrılması tercih edilir. İkincisine, zayıf yüzey hazırlama veya uygulama durumlarında sıklıkla rastlanmaktadır. Şekil 1.8.a, FRP ile güçlendirilmiş RC elemanlarda olası sıyrılma türlerini göstermektedir. Literatürde bildirilen sıyrılmaların çoğu, betonun alt tabakasında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, geometrik ve malzeme özelliklerine bağlı olarak, diğer sıyrılma mekanizmaları da gözlemlenebilir. Şekil 1.8.b, farklı sıyrılma tiplerinin ve mekanizmalarının bir kombinasyonunun tek bir deneyde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 1.8 Betonarme elemanlarda sıyrılma tipleri

1.5 Tezin Amacı

Bu çalışmada FRP kompozitlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesine CFRP'nin katkısı araştırılmıştır. Öncelikle laboratuarda yapılan deneylerde sıyrılma testi yapılarak FRP'nin kat adedinin etkisi incelenmiştir. Sonrasında literatür taraması yapılmış ve kabul görmüş deneysel çalışmalarda betonarme kirişler bilgisayar ortamında ANSYS'de modellenerek plastik SE çözümleri yapılmıştır. Sonlu eleman modelin uygulanabilirliği kontrol edildikten sonra beton yüzey ve CFRP arasına epoksi tanımı yapılmış ve yük - deformasyon eğrilerinin deneysel çalışmalar ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

1.6 Hipotez

Günümüzde sonlu eleman çözümlmeleri için pek çok yazılım vardır. ANSYS'de bu yazılımlardan biridir. ANSYS'in güçlü bir grafik ara yüzüne sahip olması, modelleme sırasında kolaylık sağlayan çok sayıda malzeme tanımı yapılabilmesi gibi sebeplerden dolayı bu çalışmada da tercih edilme sebebi olmuştur. Bölüm 2'de sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgi verilmiş, SEY ile problem çözümünde izlenecek adımlar belirtilmiş ve sonlu eleman çözümlmeleri hakkında çalışmalara yer verilmiştir.

Bölüm 3'te YTÜ Yapı laboratuvarında ASTM 7522 standardına göre yapılan sıyrılma testi hakkında bilgi verilmiştir. Deneyde kullanılan malzemelerin mekanik ve yapısal özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Deney sonuçları ASTM 7522 standardına göre değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Sonrasında Pham ve Dong araştırmacılarına ait deney çalışmaları ANSYS'de modellenmiştir. ANSYS'de geometrinin ve mesh ağının oluşturulması, malzeme tanımlarının yapılması, yük ve mesnet koşullarının belirlenmesi, yapılan kabuller anlatılarak SE modelinin oluşturulması hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4'te sonlu eleman çözümlmelerinden elde edilen yük - yerdeğıştirme eğrileri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, çözümlmelerden bulunan sonuçların deney sonuçları ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Referans alınan kirişin CFRP genişliği, CFRP kat adedi ve CFRP'nin yan yüzeyleri de sarmasına göre farklı kombinasyonları oluşturularak parametrik analizler yapılmıştır. Çözümleme sonuçlarına göre yük - yerdeğıştirme, betonun ve boyuna donatının gerilme - birim şekil değıştirme değışimleri incelenmiştir.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

2.1 Genel Bilgiler

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde kullanılan sayısal bir metoddur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiştir. Günümüze kadar sonlu elemanlar yöntemi ve çözüm teknikleri hızla gelişmiş ve birçok problemin çözümünde kullanılan en iyi yöntemlerden biri olmuştur. Bu yöntem pek çok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Bunun ana sebeplerinden birisi genel bir bilgisayar programının sadece giriş verilerini değiştirerek herhangi bir özel problemi çözüme ulaştırabilmesidir. Yöntemin esası çözüm aranan yapıyı, bölgeyi veya cismi çok sayıda küçük sonlu elemanlara bölmektir. Bir, iki veya üç boyutlu olabilen bu elemanlar düğüm yada düğüm noktası adı verilen noktalarda birbirine bağlanmaktadır.

2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Problem Çözümünde İzlenecek Adımlar

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak bir yapı probleminin statik olarak çözümü için aşağıdaki basamaklar takip edilmelidir. Bunlardan 1, 4 ve 5'inci basamaklar sonlu elemanlar programının kullanıcısı tarafından, diğerleri ise program tarafından yerine getirilir.

1) Yapının veya çözüm bölgesinin elemanlara ayrılması

Sonlu elemanlar yönteminde ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Bu ayırımda uygun sonlu elemanlar kullanılmalı, elemanların cinsi, sayısı ve düzeni tespit edilmelidir.

2) Her elemanın özelliklerinin formüle edilmesi, eleman katılık matrislerinin ve yük vektörlerinin bulunması

Karmaşık bir yapının herhangi bir yük altındaki deplasmanının kesin olarak tahmin edilmesi imkansız olduğundan, bir eleman için, bilinmeyen çözümü yaklaşık olarak ifade edilebilecek uygun bir deplasman modeli seçilmelidir. Bu model hesaplamalar açısından basit olmalı, ancak bazı yakınsama gereklerini de yerine getirmelidir. Çoğunlukla bu model bir polinom şeklinde olmaktadır. Denge denklemleri veya varyasyonel prensipler ve yaklaşık deplasman modeli kullanılarak eleman katılık matrisleri ve yük vektörleri bulunmalıdır.

3) Yapının veya çözüm bölgesinin sonlu elemanlar modelinin elde edilebilmesi için elemanların birleştirilmesi

Yapının çok sayıda elemandan oluşmuş olması nedeniyle, her bir eleman için bulunmuş olan katılık matrisleri, yük vektörleri ve denge denklemleri uygun bir şekilde birleştirilmeli ve genel denge denklemleri elde edilmelidir.

4) Bilinen yüklerin (kuvvet ve/veya moment) uygulanması

5)Yapının nasıl desteklendiğinin belirtilmesi

Düğüm noktaları için bilinen deplasman değerleri (genellikle sıfır) belirtilmelidir.

6) Bilinmeyen düğüm noktası deplasmanlarının bulunması

Genel denge denklemleri problemin sınır şartları uygulanarak düzeltilmeli ve daha sonra düğüm noktalarının deplasmanları çözülmelidir.

7) Eleman gerilme ve birim uzamalarının hesaplanması

Düğüm noktalarının deplasmanları ile katı hal mekaniği ve yapısal mekaniğin gerekli denklemleri kullanılarak eleman birim uzamaları ve gerilmeleri hesaplanmalıdır.

2.3 Geçmiş Sonlu Eleman Çözümlemeleri

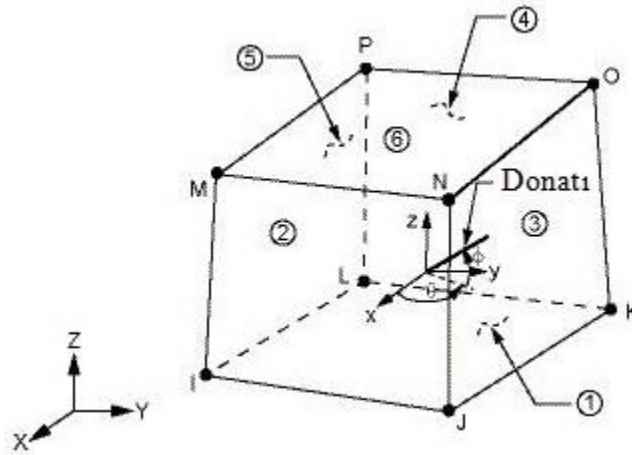
Literatürde bulunan FRP kompozitler ile güçlendirilen betonarme yapı elemanları SEY ile çözümlenmiştir. Bu çözümlemelerin çoğunda deneysel çalışmalara yakın sonuçlar bulmak için ANSYS, SAP, NASTRAN, ABAQUS, LUSAS, DIANA ve MARC gibi paket programlar

kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarla ilgili bazı örnekler ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

2.3.1 Kachlakev Sonlu Elemanlar Modeli

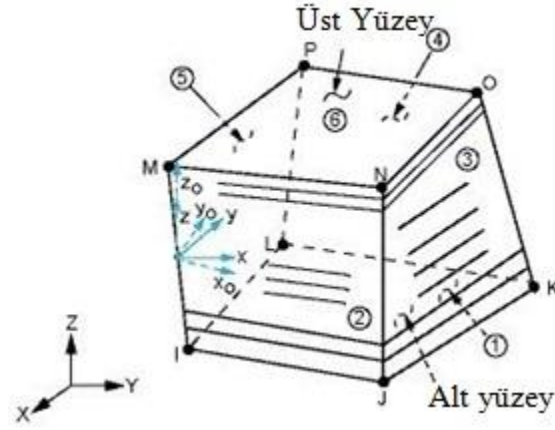
FRP kompozitleri kullanılarak betonarme yapılmış Horsetail Creek Köprüsü'nün güçlendirilmesinde, doğrusal ve doğrusal olmayan SEY geliştirilmiştir. Kachlakev [9] sonlu elemanlar modellerini SAP ve ANSYS paket programları kullanarak oluşturmuştur. Köprüde cam ve elyaf lifli donatılı polimerler kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar güçlendirilmiş kirişin eğilme/kesme yük taşıma kapasitesinin kontrol kirişinden % 105 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Teorik olarak yapılan hesaplamalarda da FRP kompozit ile güçlendirilen kirişin % 104 yüksek bir nihai yüke sahip olduğu belirlenmiştir. Böylece sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir.

3 boyutlu tasarlanan köprü ve güçlendirme elemanları ANSYS'de modellenmiştir. Modellemede beton için Solid 65 elemanı seçilmiştir. Bu eleman x, y ve z eksenlerinde 3 ötelenme derecesine sahiptir ve elemanın 8 düğüm noktası vardır (Şekil 2.1). Bu elemanın plastik deformasyon, üç ortogonal doğrultuda çatlama ve ezilme yeteneği vardır [2].



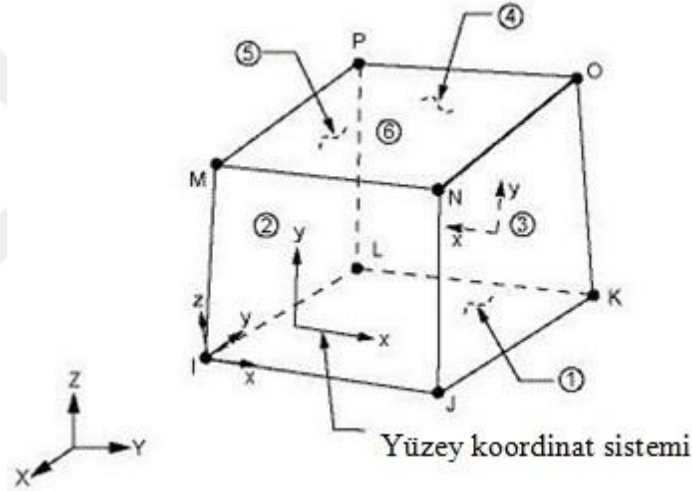
Şekil 2.1 Solid 65 elemanının geometrisi

FRP kompozitlerin modellenmesi için katlı bir eleman olan Solid 46 kullanılmıştır. Bu eleman 100 farklı materyal katmanına izin verir. Bu tabakalı yapı CFRP kumaşların ya da plakaların modellenmesi için çok uygundur. Solid 46 elemanı x, y ve z eksenlerinde 3 ötelenme serbestlik derecesi bulunan 8 düğüm noktasına sahiptir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Solid 46 elemanın geometrisi

Kiriş modellerinde desteklerdeki çelik levhalar için sekiz düğümlü katı bir eleman olan Solid 45 kullanılmıştır. Bu eleman tipine ait geometri ve düğüm noktaları Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Solid 45 elemanın geometrisi

Modelde FRP ile beton arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle epoksi tabakası modellenmemiştir. Köprüdeki simetri özelliğinden dolayı kirişin çeyreği modellenerek analizler yapılmıştır.

2.3.2 Jia Sonlu Elemanlar Modeli

FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışlarını incelemek için Jia [10] tarafından sonlu elemanlar modellemesi ANSYS'de yapılmıştır. Bu çözüm de kullanılan yöntem ile Kachlakev tarafından kullanılan yöntem birbirine çok benzerdir. Bu araştırmada, FRP ile

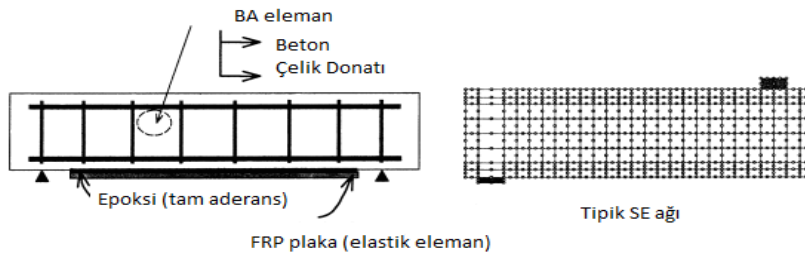
güçlendirilmiş kirişlerle kullanılabilecek bir SEY'in bulunması ve sonlu elemanlar çözümlemesinin nümerik çözüme oranla doğruluğunun hesaplanması amaçlanmıştır.

Sonlu elemanlar çözümlemesinde, beton modellenirken basite indirgenmiş gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi kullanılmıştır. Basitleştirilmiş eğride, eğrinin belli bir bölgesinden sonra betonun davranışının tamamen plastik olduğu varsayılmıştır. Bu modelde ANSYS'deki betonun basınç ezilmesi seçeneği kapatılmıştır. Böylece elemanda göçmenin beton çatlaklarının kontrolünde olması sağlanmıştır. FRP kompozitleri ise elastik malzemeler olarak ve FRP'lerdeki liflerin reçine matrisinin içinde homojen olarak dağıldığı, liflerin yükün uygulandığı doğrultuda olduğu, lifler ile reçine matrisi arasında tam aderans varsayımı yapılmıştır.

Jia tarafından yapılan sonlu eleman çözümleme sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, sonlu eleman çözümünden bulunan kapasitenin deneysel sonuçlardan daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni sonlu eleman çözümünde beton-donatı ve lif-reçine matrisi arasında tam aderans varsayımları olduğu belirtilmiştir.

2.3.3 Supaviriyakit vd. Sonlu Elemanlar Modeli

Supaririyakit vd.[11]'in yaptığı bu çalışmada FRP plakaları ile güçlendirilmiş betonarme kirişin lineer olmayan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Beton ve donatı çubukları, 8 düğümlü izoparametrik 2D betonarme (BA) elemanı olarak modellenmiştir. FRP plakası 8 düğümlü izoparametrik 2D elastik eleman olarak modellenmiştir. Epoksi FRP'nin düğüm noktalarını betonun düğümleriyle doğrudan bağlayarak modellenmiştir (Şekil 2.4). Epoksi için ayrı bir model oluşturulmamıştır. Yapılan analizden SEY'in yük-yer değiştirme ilişkisini, kirişin maksimum yük ve göçme modunu doğru şekilde öngördüğü bulunmuştur.



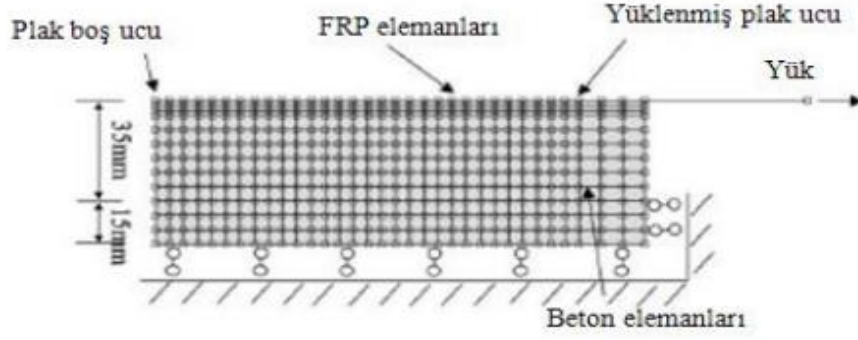
Şekil 2.4 Supaviriyakit vd. tarafından kullanılan sonlu elemanlar modeli

2.3.4 Gao vd. Sonlu Elemanlar Modeli

Gao ve arkadaşları [12], paspayı betonunun ayrılmasıyla meydana gelen göçme durumu için, FRP şeridinin bittiği noktanın en yakınındaki çekme donatısı civarında, betondaki gerilme yığılmalarını hesaba katarak, analitik bir ifade geliştirmişlerdir. Analitik ifade iki ana adımdan meydana gelmektedir. Birincisi; kompozit hareket durumunda FRP şeritlerindeki çekme gerilmelerinin belirlenmesidir. İkincisi; lokal gerilmelerin elde edilmesiyle beton dayanımının karşılaştırılmasıdır. Sonuçlar literatürdeki diğer deneysel verilerle karşılaştırıldığında sunulan modelin FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel yük taşıma kapasitelerine daha yakın tahminlerde bulunduğunu ortaya koymuştur. Tahmin edilenle ölçülen/öngörülen yük oranlarının daha makul değerlerde olduğunu göstermiştir.

2.3.5 Lu vd. Sonlu Elemanlar Modeli

Lu vd. [13] farklı kırılma modellerinin kullanımını araştırmışlar ve "non-coaxial rotating angle crack model (RACM)" adında yeni bir kırılma modeli sunmuşlardır (Şekil 2.5). FRP'lerin betonarme kirişlerden sıyrılmasını tahmin edebilmek için doğrusal olmayan sonlu elemanlar çözümlemelerini kullanmışlardır. Lu vd.'ne göre, doğrusal olmayan sonlu elemanlar çözümlemeleri kullanılırken, sıyrılma göçmesiyle ilgili tahminde bulunabilmek için iki yaklaşım bulunmaktadır. Birinci yaklaşım, FRP ile beton arasındaki ara yüz elemanlarının modellenmesidir. Bu tür modeller, ara yüzey davranışını doğrulamak ve tanımlamak için testlerle kullanılabilirler. Ancak, gerçek tahmin modeli değildir. İkinci yaklaşımda, ara yüz elemanları kullanılmadan modelleme yapılır. Bunun yerine sıyrılma, beton elemanların çatlamalarını ve kırılmalarını modelleyerek doğrudan simüle edilir. Bu yaklaşımın avantajı, ara yüz yapışma kayma modeline (bond-slip model) başvurmaksızın sıyrılma davranışının beton için uygun bir yapısal model kullanılarak tahmin edilebilmesidir. Ancak ANSYS, MSC.MARC veya ABAQUS gibi yaygın kullanılan sonlu eleman programlarında bulunan beton modelleri ile FRP'lerin sıyrılmasının tahmin edilebilmesi zor olacağından, "non-coaxial rotating angle crack model (RACM)" modeli kullanılmıştır.



Şekil 2.5 Lu vd. tarafından kullanılan sonlu elemanlar modeli [13]

RACM çatlak modelinde, (2.1-2) denklemleri betonun çekme ve kesme altındaki davranışını tanımlamaktadır.

$$\sigma_{nn} = f_t e^{\alpha_1 (\varepsilon_{nn} - \varepsilon_{cr})} \quad (2.1)$$

$$\eta = (\eta_1 - \eta_2) e^{-\alpha_2 (\varepsilon_{nn} - \varepsilon_{cr})} + \eta_2 \quad (2.2)$$

Eşitliklerde ε_{nn} çekme birim şekil değiştirmesini, $\varepsilon_{cr} = f_t / E_0$, çatlama birim şekil değiştirmesini, f_t çekme dayanımını ve $\alpha_1, \alpha_2, \eta_1, \eta_2$ gerçek çekme deneylerinden bulunan parametreleri göstermektedir. ($f_t = 3$ MPa, $E_0 = 30$ GPa, $\alpha_1 = 2800$, $\alpha_2 = 750$ veya 2000 , $\eta_1 = 0,4$; $\eta_2 = 0,001$)

Bu RACM çatlak modelinin zayıf noktası da bu parametrelerdir. Buna rağmen Lu vd. ve arkadaşları RACM'i kullanarak FRP ve beton arasındaki sonlu elemanlar çözümlenmesiyle çözülen çekme deneylerinin FRP sıyrılma göçmesiyle tutarlı olduğunu göstermiştir.

2.3.6 Alsayed Sonlu Elemanlar Modeli

Alsayed [14] çalışmasında çelik veya cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) çubuklarla takviye edilmiş 12 beton kiriş için öngörülen ve ölçülen yük-eğilme ilişkileri arasındaki karşılaştırmaların sonuçlarına yer vermiştir. Çalışmanın sayısal kısmı 3 adımdan oluşur: (i) Alsayed'in yaptığı çalışmanın bir parçası olarak geliştirilen kompozit bileşenlerin gerçek özelliklerini hesaplayan bilgisayar modeli, (ii) ACI (American Concrete Institute) yük-eğilme modeli ve (iii) literatürdeki mevcut FRP kompozitlerle güçlendirilmiş kirişler için modifiye edilmiş yük-eğilme modeli. Son iki model bir elektronik tabloda uygulanmıştır. Betonun eğilme sınırı ve nihai dayanımı, test kirişlerinin tasarımında kontrol parametreleridir.

Bilgisayar modeli, ölçülen servis ve tam yük eğilme eğrilerinin doğru bir şekilde öngörülmesini sağlar. Servis yükü eğilimi ve nihai bükülme mukavemeti tahminlerinde verilen hatalar sırasıyla % 10 ve % 1'den azdır. GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde, ACI modeli tarafından öngörülen servis yükü sapması % 70 oranında hatalıyken modifiye edilmiş modele göre tahmin edilen değer % 15'den daha az hatalıdır.

2.3.7 Masoud ve Soudki'nin FRP Çalışmaları

Masoud ve Soudki [15] çalışmalarında FRP kompozitlerle onarılan betonarme kirişlerde korozyon aktivitesinin değerlendirilmesi için yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarına yer vermiştir. Deneyler 152*254*3200 mm boyutlarına sahip on kiriş numunesi ile yapılmıştır. Bir numune referans olarak işlev görmesi için güçlendirilmemiş ve korozyona uğratılmamıştır. Üç numune korozyona uğramış ve tamir edilmemiştir. Kalan altı kiriş korozif ve FRP kompozitler ile güçlendirilmiştir. FRP tabakaları, ana donatı çubuklarının % 5,5 kütle kaybına maruz kaldıktan sonra uygulanmıştır. Güçlendirme sonrasında bazı numuneler performansını araştırmak için daha fazla korozyona bırakılmıştır. Deney sonuçları, korozyon potansiyelinin korozyon ilerlemesiyle azaldığını ve FRP ile güçlendirme, korozyon potansiyelinde, FRP sağlanmadığında gözlemlenenden daha yüksek bir azalma oranına neden olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, korozyona bağlı olarak ana donatı çubukların kütle kaybının FRP güçlendirilmesiyle %16'ya kadar düştüğünü ortaya koymuştur.

SIYRILMA TESTİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİ

3.1 Sıyırılma deneyi

100 mm çap 50 mm yüksekliğinde bir adet ve 100 mm çap 100 mm yüksekliğinde iki adet silindir beton numune sıyırılma deneyleri için dikkate alınmıştır. Birincisine 3 kat karbon lifli polimer kumaş, ikincisine 5 kat karbon lifli polimer kumaş, üçüncüsüne 7 kat karbon lifli polimer kumaş sarılarak sargı katman sayısının etkisi incelenmiştir. Deney ASTM D7522 standartlarına göre yapılmıştır.

ASTM D7522 Standardına göre yapılan deneyde şu malzemeler kullanılmıştır:

- 10 mm kalınlığında 100 mm çapında 3 adet dairesel çelik plaka
- 3 adet 10 cm çapında dairesel beton numune
- Master Brace SAT 4500 epoksi malzemesi (A Bileşeni + B Bileşeni)
- Karbon lifli polimer kumaş

Deneyde öncelikle numunelerin bir yüzü temiz ve kuru hale getirilmiştir. Sonrasında epoksi karışımı hazırlanmıştır. Burada kullanılan epoksi MasterBrace SAT 4500 lifli polimer sistemi için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcısıdır [16]. İki bileşenli, yüksek dayanımlı, solvent içermeyen, mavi renkli epoksi esaslı özel yapıştırıcıdır. FRP sistemi ile güçlendirilecek elemanlarda, karbon/cam lifli polimer malzemenin yüzeye yapıştırılması amacıyla kullanılır. Kolay uygulanabilir olması, mekanik dayanımlarının yüksek olması, düşük viskoziteye sahip olması sebebiyle tercih edilir. MasterBrace SAT 4500, karışım oranına göre kullanıma hazır setler

halinde temin edilir. Karışıma başlamadan önce, malzeme sıcaklıklarının +15 - +25°C arasında olduğu kontrol edilmelidir. Önce A bileşeni (epoksi reçine) 30 sn karıştırılmalı ve sonra B bileşeni (epoksi sertleştirici) tamamı ile A bileşeninin içerisine boşaltılmalıdır. Karışım, yaklaşık 300 dev/dk 'lık bir karıştırıcı ve uygun karıştırma ucuyla tabanında karışmamış malzeme kalmamasına dikkat ederek 2 - 3 dakika karıştırılmalıdır. Homojen bir karışım elde edildiğinden emin olunmalıdır. Epoksi karışımı oranı 3,75 kg Bileşen A ve 1,27 kg Bileşen B malzemesinden olacak şekilde hazırlanır. Karışımın yoğunluğu ise 1,02 kg/litre olmalıdır. Astarlanmış yüzeylere malzeme, 0,8 - 1 mm kalınlık elde edecek şekilde rulo ile sürülür. Malzeme henüz yaşken, uygun ölçülerde kesilmiş lifli polimer kumaşlar, FRP lifleri doğrultusunda gerilerek yüzeye yapıştırılır. Daha sonra rulo ile lifli polimer kumaşların lifleri doğrultusunda bastırılır. MasterBrace SAT 4500 'ün kumaş içine emdirilmesi ve yüzeyle arasında boşluk kalmaması sağlanır. İkinci kat yapıştırıcı yine rulo ile yüzeye yapıştırılmış olan lifli polimer kumaş üzerine lifleri doğrultusunda sürülmelidir. Çok katlı lifli polimer uygulamalarında, katlar arasında 700-800 gr/m² yapıştırıcı kullanılmalıdır. İlk kat için 1,8 kg/m², sonraki her kat fiber için 0,8 kg/m² epoksi kullanılır. Güneş ışığına maruz kalacak alanlarda malzemenin üzeri koruma altına alınmalıdır. Uygulama yapılırken ortam ve yüzey sıcaklığı +5°C ile +30°C arasında olmalıdır. Reçine esaslı sistemlerin çalışma ve reaksiyon süreleri, ortam ve zemin sıcaklığından, havadaki bağıl nemden etkilenir. Düşük sıcaklıklarda reaksiyon süresi yavaşlar, bu da çalışma zamanını uzatır. Aynı zamanda viskozite yükseldiğinden sarfiyat artar. Yüksek sıcaklıklar, kimyasal reaksiyonu artırır yukarıda belirtilen zamanlar buna bağlı olarak kısalır. Malzemenin tamamının kürünü tamamlaması için ortam ve zemin sıcaklığı +5°C 'nin altına düşmemelidir.

Deneyde 100 gr A Bileşeni ve 33,88 gr B Bileşeni olacak şekilde karışım mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak hazırlandı. Deneyde kullanılan MasterBrace FRP 300/50 CFH (Yüksek modüllü karbon lifli polimer kumaş) çok hafif ve kolay taşınabilir olması, iki yönde de istenilen ölçülerde kolayca kesilebilir olması, tek yönlü sürekli liflerden oluştuğu için eğilme ve kesmeye karşı yapılan güçlendirmelerde tasarım ve uygulama açısından büyük kolaylık sağlaması, yorulma dayanımı yüksek olması ve sünme değeri çok düşük olması sebebiyle tercih edilmiştir. MasterBrace FRP' ler için teknik özellikler Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 MasterBrace FRP'lerin teknik özellikleri [17]

	MasterBrace FRP 230/50 CFS	MasterBrace FRP 300/50 CFS	MasterBrace FRP 300/50 CFH	MasterBrace FRP 600/100 CFS
	230 g/m ²	300 g/m ²	300 g/m ²	600 g/m ²
Malzemenin Yapısı	Karbon	Karbon	Karbon	Karbon
Elastisite Modülü (N/mm ²)	230000	230000	340000	230000
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	4900	4900	4600	4900
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0,111	0,166	0,167	0,337
Toplam Lif Ağırlığı (g/m ²)	230	300	300	600
Kopmada Uzama (%)	2,1	2,1	1,4	2,1
Genişlik (mm)	500	500	500	500

Uygulama öncesinde karbon fiber kumaşlar numunelere göre kesilmiştir. Epoksi sürülmüş yüzeye lifleri doğrultusunda gerilerek yerleştirilir. Yapıştırıcının kumaş içine emilmesi için rulo ile lifler doğrultusunda bastırılarak hava boşlukları alınır. Daha sonra ikinci kat epoksi, lifli polimer kumaş yüzeyine rulo ile sürülür ve lifli polimer kumaşın iki kat yapıştırıcı arasında lamine olması sağlanır. Böylece 1. numuneye 3 kat, 2. numuneye 5 kat ve 3. numuneye 7 kat olacak şekilde kumaş rulo ile bastırılarak yapıştırıcı içinde lamine edilir. En üst kata 10 mm kalınlığında dairesel çelik plaka yerleştirilip kurumaya bırakılır.

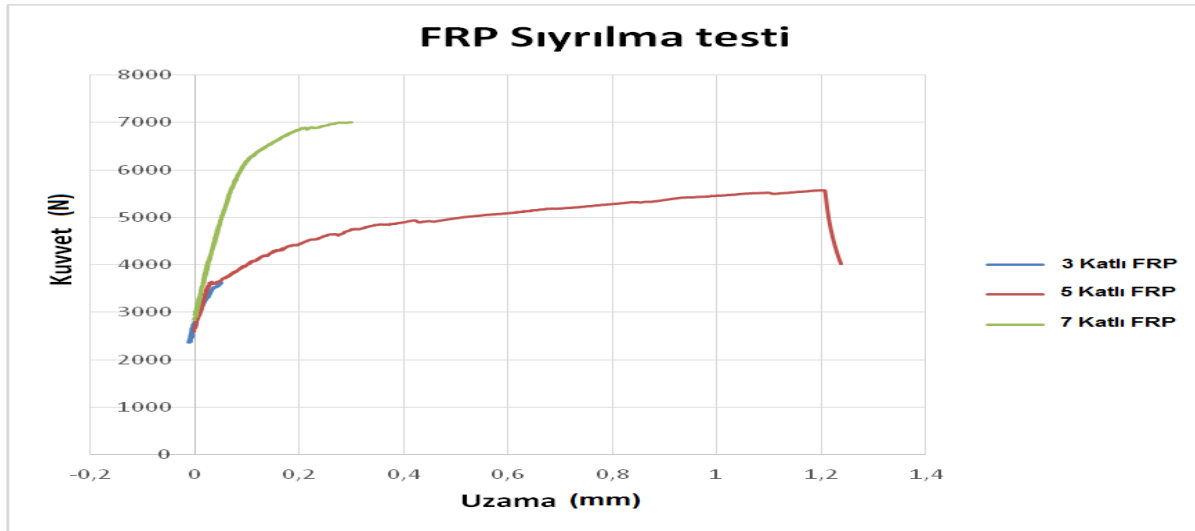
Daha sonra INSTRON test cihazına numune yerleştirilir, test yüzeyine normal kuvvet uygulanarak sıyrılma testine tabi tutulur (Şekil 3.1). Yapışma testi tutamağı dikkatli hizalanmalıdır. Bu durum simetrik olmayan yada karışık modda kopmanın önüne geçecektir.



Şekil 3.1 Numunenin cihaza yerleştirilmesi

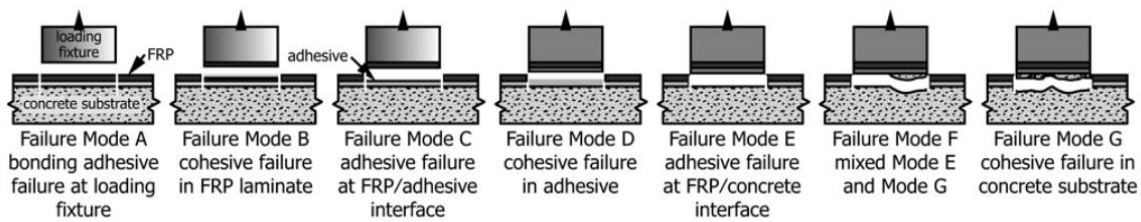
Yükleme ASTM D7522 Standardının 11.8 maddesine göre 1 MPa/dk uygulanmıştır. Ayrılma gerçekleşene kadar teste devam edilmiştir.

3 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 3600 N, 5 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 5550 N, 7 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 7000 N da kopma değerine ulaşmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Deney sonuçlarına göre elastik sınırı kopma grafiği

ASTM D7522 Standardına göre toplamda 7 tip kopma modu vardır. Bunlar A, B, C, D, E, F ve G tipi kopma modlarıdır (Şekil 3.3). Deney sonuçlarına göre; 3 katlı FRP ile güçlendirilen numune F tipinde, 5 ve 7 katlı FRP ile güçlendirilen numune B tipi kopmaya örnek verilebilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.3 Sıyırılma testine göre kopma modları [18]

B tipi kopma modu: FRP kompozitteki kohesif kopmayı gösterir. FRP kalınlığı yetersiz olduğunda, FRP nin epoksi emilimi yetersizliğinde yada çevresel faktörlere bağlı olarak bu kopma türü meydana gelir. B tipi kopma modu FRP katman sayısının uygun olmadığını gösterir.

F tipi kopma modu: E tipi ile G tipi arasındaki kopma modudur. G kopma modu beton katmanında meydana gelir. Bu kopma modunda betondaki kopmalar karışıktır. Eğer kopma yüzeyi betona ulaşırsa kopma yüzeyi düzleşir. Bu kopma tipine az rastlanır. G ve E kopma tipinin oranlarına göre ifade edilir. Deney sonucuna göre %50 E ve %50 G tipi kopma modu oluşmuştur.

G tipi kopma modu: Sistemde en zayıf nokta beton olmuştur. Beton numunesi zayıfsa, yüzeyin hazırlanmasında hatalar oluşmuşsa bu tip kopma modu gözlenir.

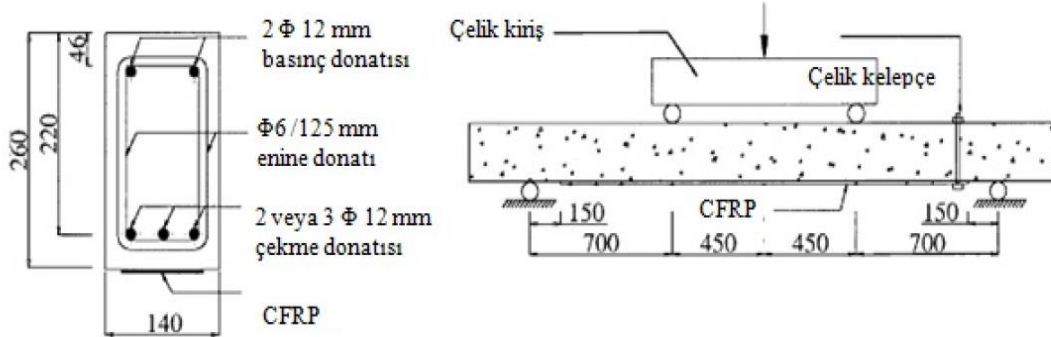


Şekil 3.4 Sırasıyla soldan F, B ve B tipi kopma modları

3.2 Sonlu Eleman Modelleri

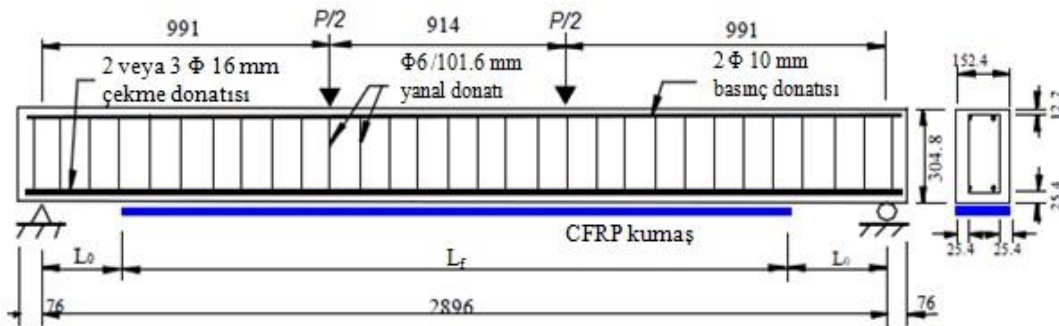
Tez çalışması kapsamında literatürde yapılan deneysel çalışmaların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için ANSYS Workbench Sonlu Elemanlar programı kullanılmıştır. Analizler "Static Structural" modülü ile yapılmıştır ve çözümlemede statik yükler dikkate alınmıştır. Pham ve Al-Mahadi ile Dong vd. araştırmacılarının yaptıkları test çalışmalarının ANSYS yazılımında sonlu elemanlar çözümlemesi oluşturulmuştur. Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarına ait deney numunelerinde açıklığı 2300 mm, genişliği 140 mm ve yüksekliği 260 mm olan betonarme kirişler kullanılmıştır. CFRP ile 2 kat güçlendirilen kirişlerde çekme donatısı olarak 12 mm çapında 2 veya 3 adet, basınç donatısı olarak 12 mm çapında 2 adet, 504 MPa dayanımına sahip çelik donatı kullanılmıştır. Enine donatı olarak 6 mm çapında 90 mm aralıklı, 423 MPa akma dayanımına sahip çelik donatı kullanılmıştır. Basınç dayanımı

kontrol kirişi için 57,7 MPa, CFRP uygulanan kirişler için ortalama 47,7 MPa'dır. Pham araştırmacısının CFRP uygulanmış tipik bir kiriş detayı Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Pham ve Al-Mahaidi'nin CFRP ile güçlendirilen kiriş detayı [19]

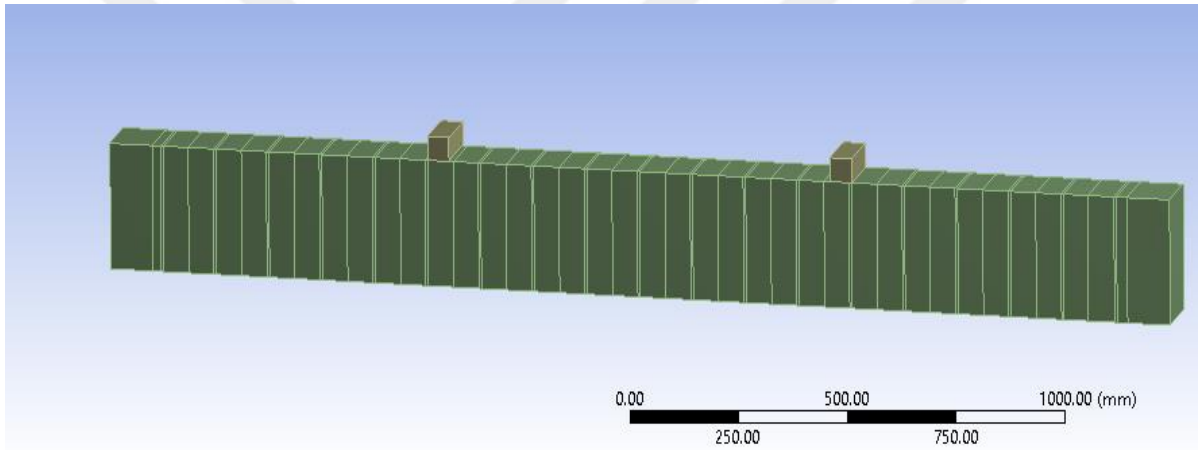
Dong vd.'ne ait deney numuneleri 3048 mm uzunluğunda, 152,4 mm genişliğinde ve 304,8 mm yüksekliğinde betonarme kiriş elemanlardır. Çekme donatısı olarak 16 mm çapında 2 veya 3 adet, basınç donatısı olarak 2 adet 10 mm çapında 410 MPa akma dayanımında çelik donatı kullanılmıştır. Enine donatı olarak 6 mm çapında 101,6 mm aralıklı 275 MPa akma dayanımında çelik kullanılmıştır. Dong vd.'nin çalışmasında bütün kirişlerin 28 günlük basınç dayanımları ortalama 38,2 MPa'dır. Kirişlerin güçlendirilmesinde 1 mm kalınlıkta yüksek dayanıma sahip tek doğrultulu CFRP kullanılmıştır. CFRP kumaşın çekme dayanımı 3450 MPa ve elastisite modülü 234500 MPa'dır. Kumaş, kiriş genişliğiyle aynı genişlikte fakat farklı uzunluklarda uygulanmıştır. CFRP sistem 960 MPa dayanıma ve 73100 MPa elastisite modülüne sahip toplam 2 mm kalınlıktadır. Dong'un CFRP uygulanmış kiriş detayı Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6 Dong araştırmacısının CFRP ile güçlendirilen kiriş detayı [20]

3.2.1 Geometrinin Oluşturulması

Beton kiriş, basınç donatıları, çekme donatıları, enine donatı ve CFRP 3 boyutlu modellenmesi için öncelikle 2 boyutlu ekseninde model oluşturulur ve derinlikleri belirlenerek "extrude" komutuyla hacim oluşturularak 3 boyutlu hale getirilir. Beton kiriş modelin en kesit geometrisi $146 \times 260 \text{ mm}^2$, kirişin boyu 2500 mm'dir. Model oluşturulurken CFRP kompozitin sonlu eleman noktaları beton elemanın sonlu eleman noktalarına yapıştırılmıştır. Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarına ait kirişlerin sonlu elemanlar modelinde epoksi tabakası modellenmemiştir. Enine ve boyuna donatılar yüzey alanı aynı kalacak şekilde kare olarak modellenmiştir. Yük alacak noktalar $50 \times 50 \times 140$ çelik plaka olarak modellenmiştir. Şekil 3.7'de iki katlı FRP kompozitle güçlendirilen beton kirişin geometrisi görülmektedir.



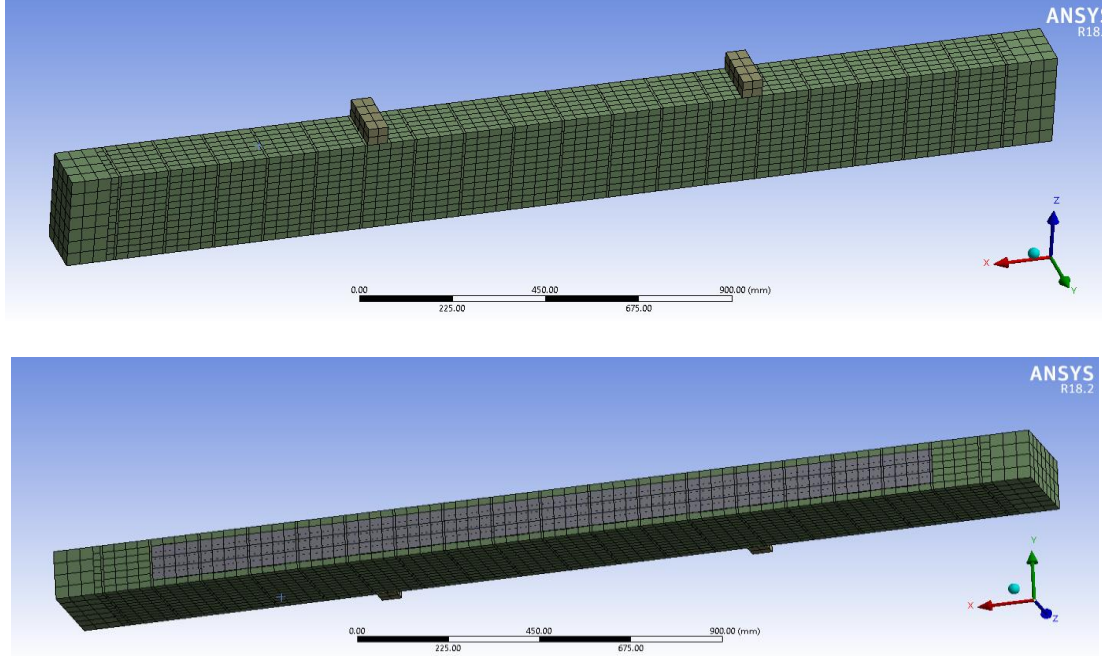
Şekil 3.7 ANSYS yazılımında geometrinin oluşturulması

3.2.2 Mesh: Elemanlara Ayırma İşlemi

Bu işlem mühendislik simülasyonlarının kritik kısımlarından biridir. Fazla eleman sayısı çözümlemeyi uzun sürede yaparken az eleman sayısı ise sağlıksız sonuçlar alınmasına sebep olur. ANSYS mesh işlemi kullanıcının dengeyi bulmasını ve olabildiğince hızlı olarak simülasyon için en doğru ağı oluşturmasını sağlar. Automatic, tetrahedrons, hex dominant, sweep, multizone gibi eleman tiplerinden biri seçilerek mesh işlemi yapılır. Analizin doğru sonuç vermesi için mesh'lemenin üniform dağılımda olmasına, eğrisel yüzeylerde eleman seçimine, yapının durumuna göre simetriden yararlanılmasına dikkat edilir.

ANSYS yazılımında eleman tipi "Multizone" seçilmiştir. İki parçanın temas yüzeylerindeki elemanların sayısının, çözüm hassasiyeti açısından daha fazla olmasında fayda vardır. Bunun

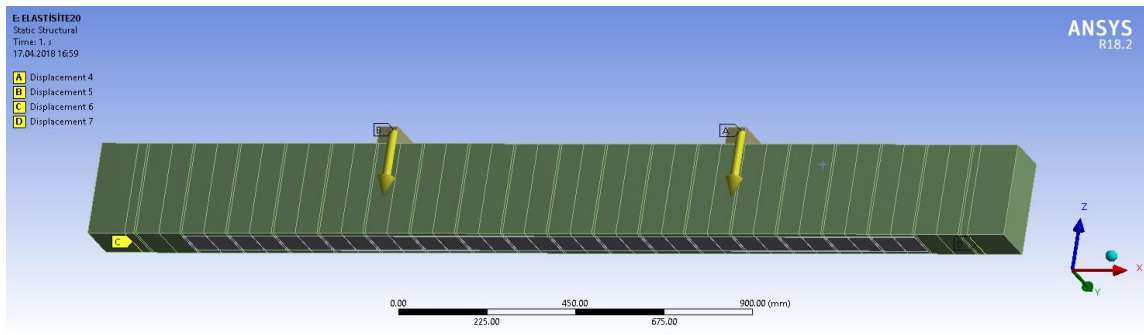
için "Body Sizing" boyutu boyuna donatı kesitinin ölçüsü olan 11 mm olarak seçilmiştir. Modelin sonlu eleman ağı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Modelde 100.249 adet düğüm noktası, 14.912 adet mesh elemanı vardır.



Şekil 3.8 Modelin sonlu eleman ağı (üstten ve alttan)

3.2.3 Mesnet ve Deplasman Koşullarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra sıradaki işlem mesnet koşulları ve yükün uygulanmasıdır. Yük için çelik plaka yüzeyine 'displacement' tanımlanmıştır. Literatürdeki Pham araştırmacısına ait modeli referans alınarak sistemin 30 mm deplasman yapmasına izin verilmiştir. Mesnetler 'displacement' komutuyla Y ve Z ekseninde sabit; X ekseninde harekete izin verecek şekilde "Free" tanımlanmıştır (Şekil 3.9).

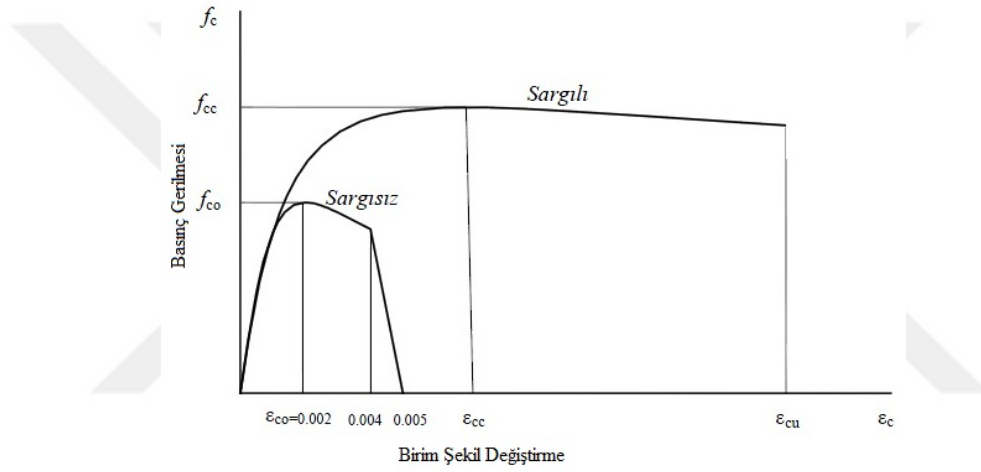


Şekil 3.9 Mesnet ve deplasmanların gösterilmesi

3.2.4 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.4.1 Beton Malzeme Modeli

Programın malzeme veri tabanından malzeme özellikleri beton için Lineer İzotropik malzeme ve Multilinear Isotropic malzeme tanımı yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin benzer sonuçlar vermesi için betona ait elastisite modülü, Poisson oranı, gerilme - birim şekil değiştirme ilişkisi doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. Gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi için Mander vd. [22]'nin önerdiği model kullanılmıştır (Şekil 3.10). Modellemede sargısız model dikkate alınarak (4.5) eşitliğindeki değerler kullanılmıştır.



Şekil 3.10 Betonun gerilme - birim şekil değiştirme modeli (Mander vd. [21])

Birim şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak basınç gerilmeleri (3.3)'deki eşitlikle bulunmuştur.

$$f_c = \frac{f_{co} x r}{r - 1 + x^r} \quad (3.1)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \quad (3.2)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (3.3)$$

Betonun maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,004 alınmıştır. Betonun basınç mukavemet değeri yapılan laboratuvar deneylerinden 47,7 MPa olarak ölçülmüştür. Bu

betona ait Elastisite modülü 34530 MPa olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülü ise çatlamış betonarme kesit hesabı yapılarak %20 düşürülerek 6906 MPa girilmiştir. Poisson oranı 0,2 alınmıştır. Beton için Multilinear Isotropic malzeme tanımı Şekil 3.11'deki gibidir.

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
	A	
1	Temperature (C)	
2		
*		
	B	C
1	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (Pa)
2	0	3.09E+06
3	0.0001	1.52E+07
4	0.0009	3E+07
5	0.0014	3.8E+07
6	0.0019	4.77E+07
7	0.0039	4.77E+07
*		

Şekil 3.11 Betonun multilinear isotropic malzeme tanımı

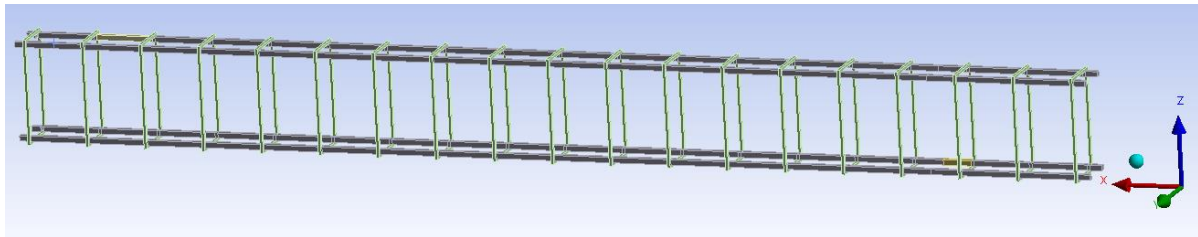
Betonun basınç ve çekme dayanımı davranışı farklı olduğu için Drucker - Prager beton modeli tanımlanmıştır. Tek eksenli basınç dayanımı 47,7 MPa; tek eksenli çekme dayanımı 0,5 MPa; çift eksenli basınç dayanımı 48 MPa olarak girilmiştir (Şekil 3.12).

Drucker-Prager		
Drucker-Prager Base		
Uniaxial Compressive Strength	47.7	MPa
Uniaxial Tensile Strength	0.5	MPa
Biaxial Compressive Strength	48	MPa

Şekil 3.12 Drucker - Prager beton modeli

3.2.4.2 Çelik Donatı Malzeme Modeli

Çelik donatı ve plakalar homojen ve izotropik bir yapıdadır. Boyuna donatı 11*11 mm², enine donatı 6*6 mm² kare kesitli olacak şekilde 2 boyutlu modellenmiştir. Daha sonra "extrude" komutuyla 3 boyutlu hale getirilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Çelik donatının geometrisi

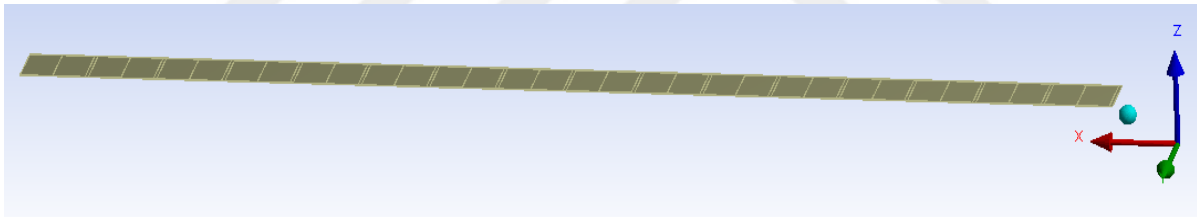
Modelde Elastisite modülü ve Poisson oranı lineer izotropik malzeme modeliyle; akma ve çekme dayanımları ise çok doğrulu izotropik çekmeli malzeme modeliyle yapılmıştır. Çelik için de Multilinear Isotropic malzeme tanımı yapılmıştır. Şekil 3.14'teki gibidir.

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
	A	
1	Temperature (C)	
2		
*		
	B	C
1	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (Pa)
2	0	5.04E+08
3	0.00595	5.04E+08
4	0.09795	5.99E+08
*		

Şekil 3.14 Çeliğin multilinear isotropic malzeme tanımı

3.2.4.3 CFRP Malzeme Modeli

Pham araştırmacısının modeline göre CFRP, 100*2000 mm olacak şekilde boyutlandırılmıştır. "Extrude" komutuyla 0,76 mm kalınlık tanımlanmıştır ve 3 boyutlu hale getirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 CFRP'nin geometrisi

CFRP için yeni bir malzeme tanımı yapıp sonrasında atama işlemi yapılmıştır. Elastik yapısal analizde izotropik malzeme için sadece Elastisite modülü ve Poisson oranı girilmesi yeterlidir. CFRP için Elastisite modülü 73100 MPa, Poisson oranı 0,3 girilmiştir. CFRP'ye ait girilen verilen şekil 3.16'da gösterilmiştir.

Properties of Outline Row 3: CFRP			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2770	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	2.3E-05	C ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	7.31E+10	Pa
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	6.0917E+10	Pa
11	Shear Modulus	2.8115E+10	Pa
12	Tensile Ultimate Strength	9.6E+08	Pa
13	Compressive Ultimate Strength	0	Pa
14	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular	
17	Specific Heat, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹
18	Isotropic Relative Permeability	1	
19	Isotropic Resistivity	Tabular	

Şekil 3.16 CFRP'nin malzeme tanımı

Çözümlemesi yapılan betonarme kirişlere ait malzeme özellikleri Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

Şekil 3.2'deki deney sonucundan elde edilen grafiğe göre 7 katlı CFRP sistem için en büyük çekme dayanımı (3.4) eşitliği ile;

$$\sigma_{\zeta} = 7000 / 7850 = 0,892 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

Elastisite modülü ise grafiğin eğiminden (3.5) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$E = [4000 - 3000] / [0,02579 - 0,00336] = 44583 \text{ MPa} \quad (3.5)$$

Analizlere YTÜ Yapı laboratuvarında yapılan deneylerden ulaşılan CFRP sisteme ait elastisite modülü 44.583 MPa alınarak devam edilmiştir.

Çizelge 3.2 Çözümlemesi yapılan kirişlere ait malzeme özellikleri

Malzeme	Malzeme özelliği	Pham'ın modeli için değerler	Dong'un modeli için değerler
Beton	Elastisite Modülü (MPa)	6906	6906
	Poisson oranı	0,2	0,2
	Çekme dayanımı (MPa)	3,95	3,95
	Basınç dayanımı (MPa)	47,7	38,2
Çelik Donatı	Elastisite Modülü (MPa)	192000	192000
	Poisson oranı	0,3	0,3
	Basınç donatısı	2φ12	2φ10
	Çekme donatısı	2φ12	2φ16
	Akma dayanımı (MPa)	504	410
	Maksimum akma dayanımı (MPa)	599	610

Çizelge 3.2 Çözümlemesi yapılan kirişlere ait malzeme özellikleri (Devamı)

	Sargı donatısı	φ6/125	φ6/101,6
Çelik Donatı	Akma dayanımı (MPa)	423	275
	Maksimum akma dayanımı (MPa)	576	400
CFRP	Elastisite Modülü (MPa)	73100	73100
	Poisson oranı	0,3	0,3
	Kopma dayanımı (MPa)	960	960
	Kat yüksekliği (mm)	0,38	2
	Kat genişliği (mm)	100	140
	Kat adedi	2	1
CFRP Sistem (laboratuvar sonuçları)	Elastisite Modülü (MPa)	44583	-
	Poisson oranı	0,22	-

3.3 Kontak bölgeler

İki parçanın temas yüzeylerindeki eleman sayısının çözüm hassasiyeti açısından önemi büyüktür. Bu nedenle yüzeyler arasına kontak tanımlanır. ANSYS Workbench'te "Connections" sekmesinin altında "Contacts" modülü bulunur. Burada sistemdeki kontak sayısı görülebilir. Modelde 734 adet kontak bölge bulunmaktadır .

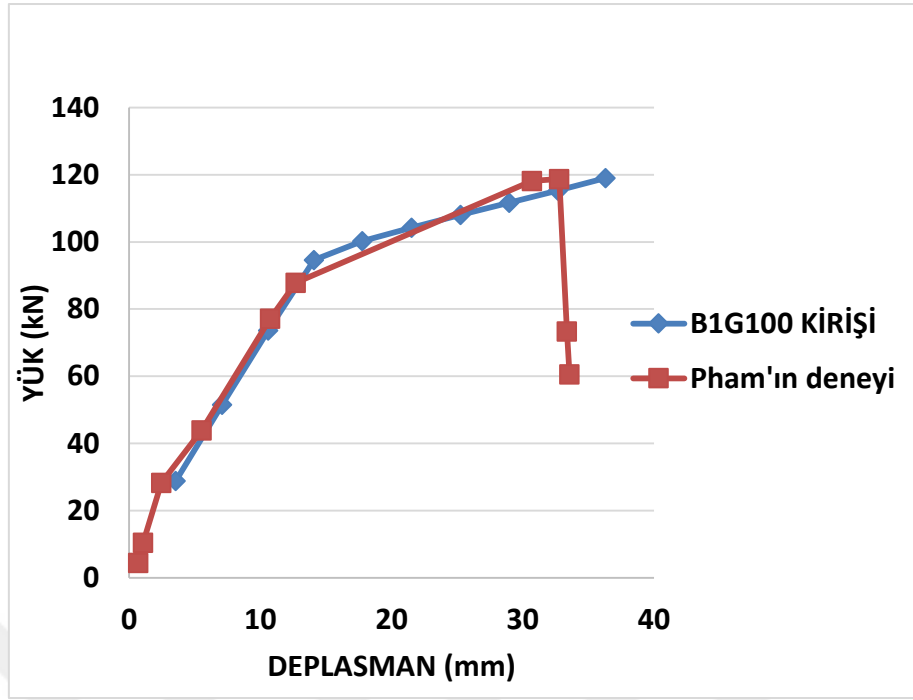
3.4 Parametrik Sonlu Eleman Analizleri

Referans alınan kirişin CFRP genişliği, CFRP kat adedi ve CFRP'nin yan yüzeyleri de sarmasına göre farklı kombinasyonları oluşturulmuştur. Pham araştırmacısına ait kirişin alt yüzeyine 100 mm CFRP tanımlanmıştır. Genişlik 80 mm'ye azaltılarak ve 140 mm'ye artırılarak CFRP genişliğinin deplasmana etkisi incelenmiştir. CFRP'nin kat adedi 3 kata ve 4 kata çıkarılarak 1,14 ve 1,52 mm kalınlıkta olan CFRP'nin betonarme kirişe etkisi incelenmiştir. CFRP ile betonun yapışma etkisini incelemek amacıyla CFRP beton kirişin yan yüzeylerine de farklı yüksekliklerde CFRP modellenmiştir. Kirişin yan yüzeyleri 86 mm (kiriş yüksekliğinin 1/3'ü), 130 mm (1/2'si) ve 172 mm (2/3'ü) yüksekliğinde CFRP ile sarılarak farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur.

SONLU ELEMEN ÇÖZÜMLEMELERİ

4.1 Referans Kirişin Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

Sonlu eleman çözümlemesi tamamlandıktan sonra sonuçlar ANSYS veritabanına işlenir. Bu sonuçların görsel ve zamana bağlı değişimi gözlemlenebilir. Modelin ANSYS çözümünden elde edilen Yük – Deformasyon eğrisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu ANSYS modelde CFRP malzemesinin elastisite modülü 73100 MPa olarak alınmıştır. Pham araştırmacısının referans alınan deney sonuçları ile ANSYS modelinin sonuçları benzer mertebede çıkmıştır. Pham araştırmacısının deneyinde S3b kirişinde açıklık ortasındaki yerdeğiştirme 32 mm ve göçme anındaki yük 120,45 kN iken ANSYS SEY analiz sonuçlarında açıklık ortasındaki yerdeğiştirme 32,57 mm ve göçme anındaki yük ise 134 kN'dur (Şekil 4.2). Daha sonra analizlere YTÜ Yapı Laboratuvarında yapılan sıyırılma deneyi sonucunda elde ettiğimiz deney sonuçları ile devam edilerek CFRP sistemin elastisite modülü 44583 MPa alınmıştır. Bu durumda yapılan SE analizinden göçme yük değeri 115,6 kN olarak elde edilmiştir. Bu değer referans kirişin laboratuvar sonuç değerinden yaklaşık %4 daha küçük çıkmıştır.



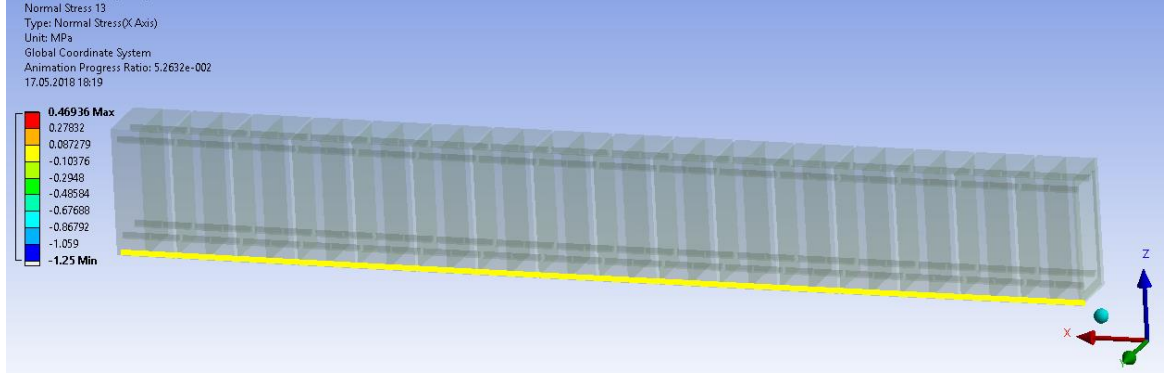
Şekil 4.1 ANSYS modelin ve Pham araştırmacısının yük – deformasyon eğrisi

"Solution" menüsünden numuneye ait toplam deformasyonlara ulaşılabilir. Şekil 4.2'de CFRP ile güçlendirilen sistemin toplam deformasyon dağılımı görülmektedir.



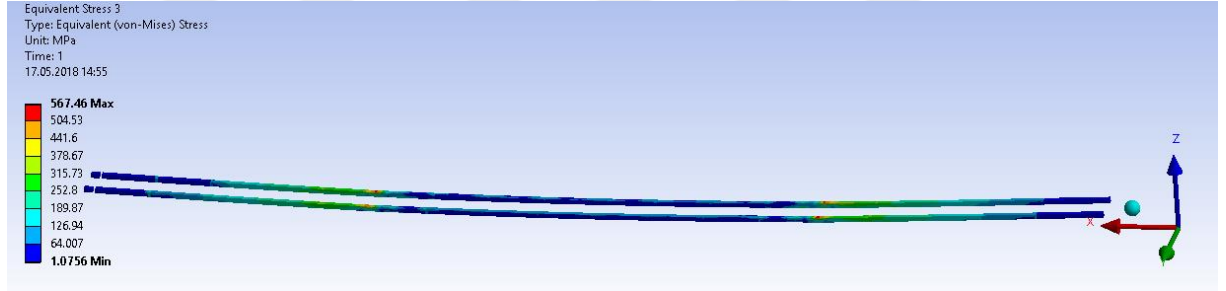
Şekil 4.2 Toplam deformasyon dağılımı

Şekil 4.3'te de beton kirişin çekme bölgesindeki normal gerilme dağılımı yer almaktadır. Görüldüğü üzere betonun tek başına çekme dayanımı düşüktür. Kirişin içine çelik donatı yerleştirilerek bu özelliği iyileştirilir. CFRP ile sarılarak da çekme dayanımı kat kat artırılmış olur.



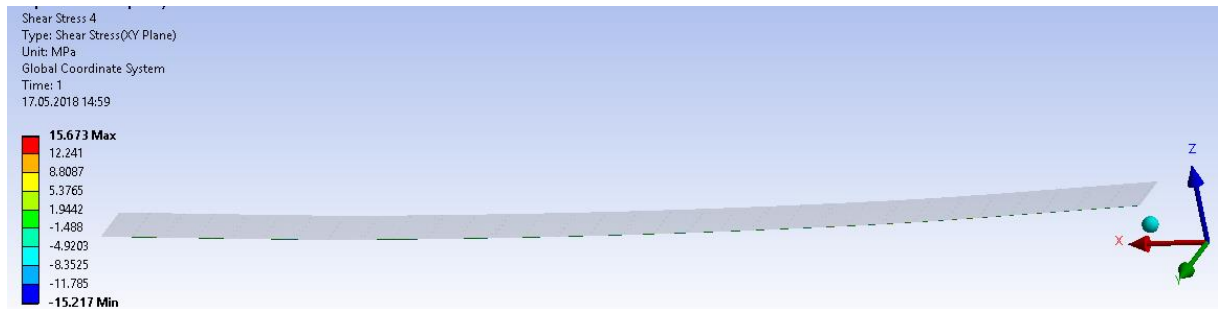
Şekil 4.3 Beton kirişin normal gerilme dağılımı

Şekil 4.4'te ise boyuna donatıların von-Mises stress değerlerinin 567,46 MPa olduğu görülmektedir. Bu değer boyuna donatının teorik akma dayanımı olan 504 MPa'dan büyüktür. Maksimum dayanıma ulaştığı yerler ise kirişin mesnet bölgesi civarındadır.



Şekil 4.4 Boyuna donatıların dayanım dağılımı

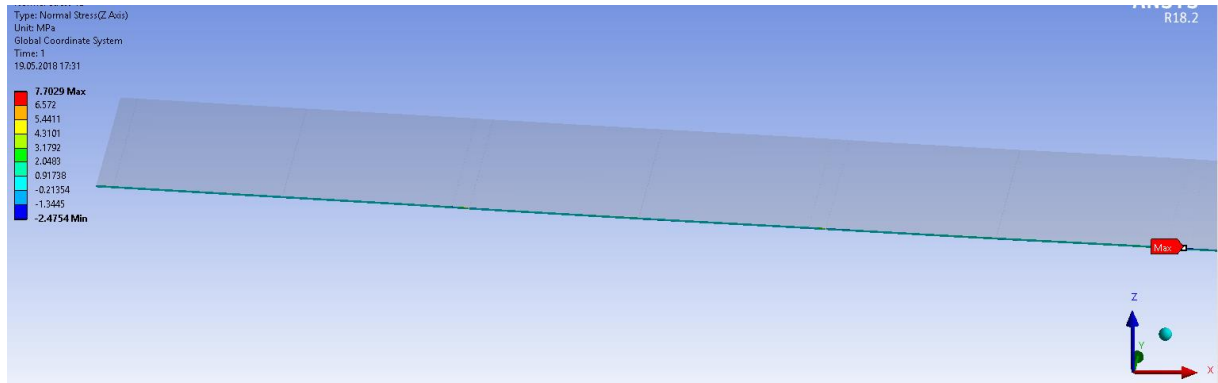
Şekil 4.5'de CFRP'ye ait XY düzlemindeki kayma gerilmesi dağılımı gösterilmiştir. Maksimum kayma gerilmesine 15,673 MPa'da ulaşmıştır. Maksimum kayma gerilmesine ulaştığı noktalar CFRP'nin uç noktalarıdır.



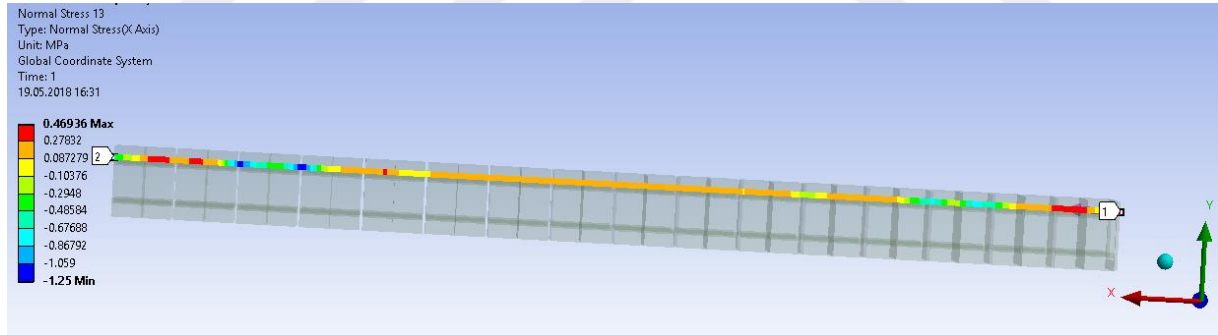
Şekil 4.5 CFRP'nin kayma gerilmesi dağılımı

Şekil 4.6'da CFRP'ye ait Z eksenli gerilme dağılımı gösterilmiştir. SE analizden elde edilen gerilme değerlerinin YTÜ Laboratuvarında ASTM D7522 standardına göre yapılan deney

sonucunda CFRP sisteme ait bulunan kopma dayanım (0,892 MPa) değerini aştığı ve beton yüzeyinden tamamen ayrıldığı tespit edilmiştir. Betonun CFRP ile arayüzündeki normal gerilme dağılımı Şekil 4.7’de verilmiştir. Ayrıca, betonun çekme bölgelerinde oluşan gerilmeler beton çekme kapasitesi sınır değeri olan 0,5 MPa’ı aşmış ve betonda kopmalar meydana gelmiştir. Bu bölgeler mesnet ve yükleme plakalarının arasında oluşmuştur. Pham araştırmacısının laboratuvar deneylerinde de CFRP sistemin koptuğu ve betonda ayrılımların olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.8'de Pham araştırmacısının laboratuvar deneylerinden S3b beton kirişine ait kopmaların olduğu görsel yer almaktadır.



Şekil 4.6 CFRP sistemin Z eksenindeki gerilme dağılımı



Şekil 4.7 Betonun CFRP ile arayüzündeki normal gerilme dağılımı



Şekil 4.8 Pham araştırmacısının S3b beton kirişine ait kopmalar [18]

4.2 Deneysel Sonuçlar ile Parametrik Sonlu Eleman Çözümlemelerinin Karşılaştırılması

Pham araştırmacısının referans alınan kirişleri, özelliklerine göre gruplandırılmış ve adlandırılmıştır. Betonun alt yüzeyindeki CFRP'nin genişliğine, kat adedine ve kirişin yan yüzeylerini sarmasına göre sırasıyla B1, B2 ve B3 şeklinde gruplar oluşturulmuştur. G sembolüyle gösterilen kirişler CFRP'nin 80, 100 ve 140 mm genişlikte olduğunu göstermektedir. K sembolüyle gösterilen kirişler CFRP'nin 2, 3 ve 4 katlı olduğunu göstermektedir. H sembolüyle gösterilen kirişler ise betonarme kirişin alt yüzünün tamamını kaplayan ve CFRP'nin yan yüzeylerdeki yüksekliği 86, 130 ve 172 mm olduğunu göstermektedir. BD olarak adlandırılan kiriş ise Dong araştırmacısının deneysel çalışmasından dikkate alınan kirişi göstermektedir.

4.2.1 Yük Taşıma Kapasiteleri

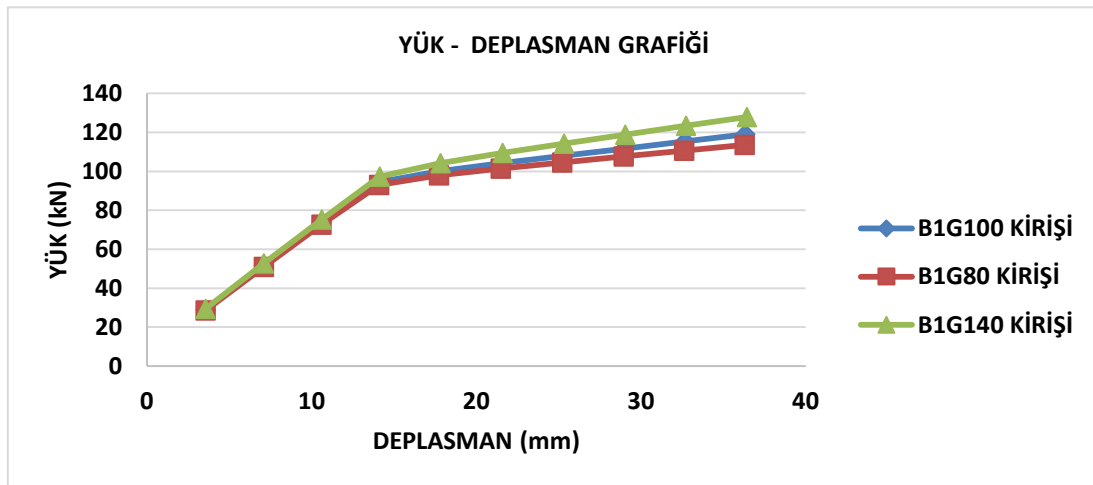
Parametrik analizlere ait sonlu eleman programından hesaplanan yük ve deplasman değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. CFRP'nin genişliğinin artırılmasıyla betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi artmıştır. B1G80 kirişinin yük taşıma kapasitesinin %5 azaldığı görülmektedir. B1G140 kirişinin ise yük taşıma kapasitesinin %7 arttığı görülmektedir (Şekil 4.9). Kirişin yük taşıma kapasitesi ile CFRP kat adedi arasında da doğrusal bir ilişki gözlemlenmiştir. B2K3 kirişinde yük artışı %6, B2K4 kirişinde yük artışı %16,5 olmuştur (Şekil 4.10).

Çizelge 4.1 Çözümlemesi yapılan kirişlere ait yük ve deplasman değerleri

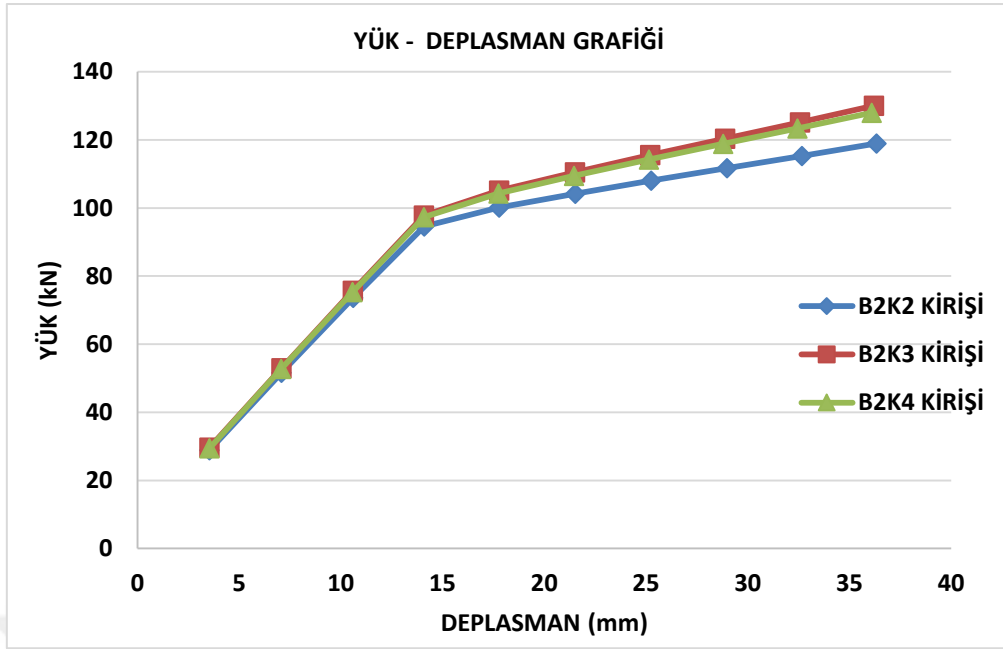
Kiriş Adı	Yük (kN)	Deplasman (mm)
B1G80	110,72	32,619
B1G100	115,342	32,678
B1G140	123,426	32,738
B2K2	115,342	32,678
B2K3	125,196	32,568
B2K4	134,514	32,456
B3H86	157,49	32,365
B3H130	164,203	32,489
B3H172	167,22	32,615
BD	166	32

CFRP'nin betonun yan yüzeylerini sarması durumunda, kirişin alt yüzeyine sarılan CFRP ile karşılaştırıldığında kirişte ciddi yük taşıma artışına neden olduğu görülmektedir. Yan yüzeylerdeki CFRP yüksekliğinin 86 mm olduğu durumda %27 oranında taşıma kapasitesi artmıştır. CFRP yüksekliğinin 130 mm olduğu durumda %33, CFRP yüksekliğinin 172 mm olduğu durumda %36 oranında taşıma kapasitesi artmıştır (Şekil 4.11).

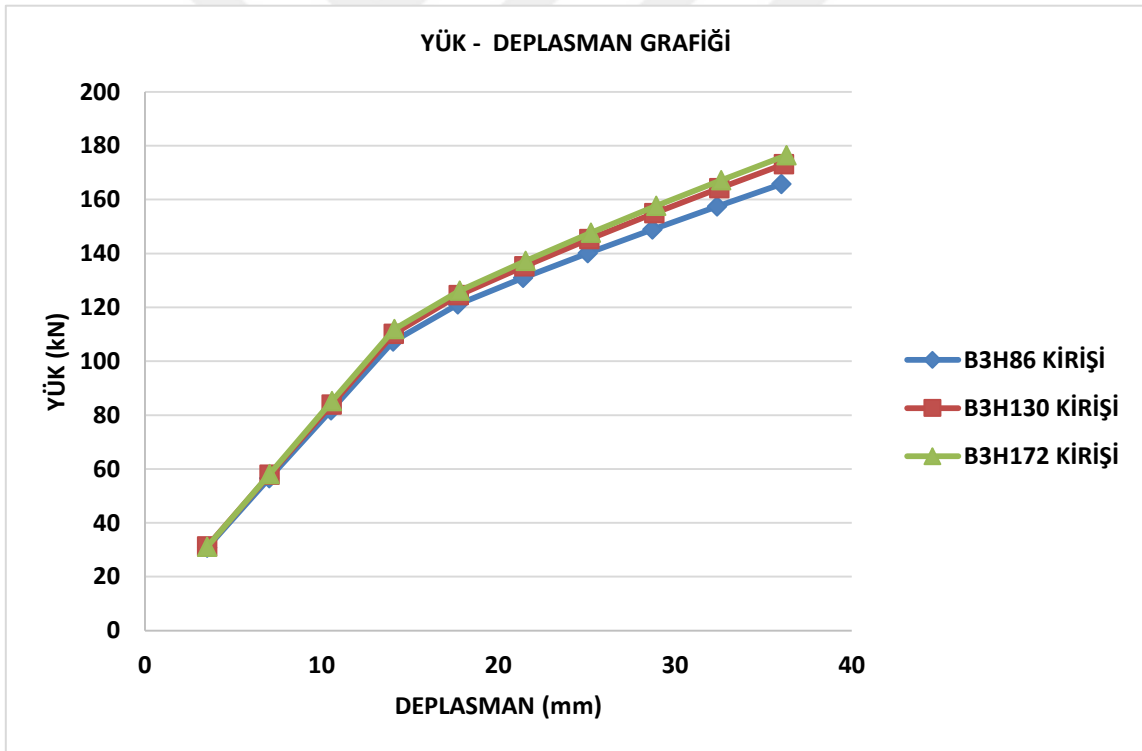
Çözümlemesi yapılan BD kirişinin de deney sonuçları ile tutarlı olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.12'de BD kirişine ait yük - deplasman grafiği yer almaktadır. Dong araştırmacısının deney sonucuna göre göçme anındaki yük 148,20 kN ve açıklık ortası yer değiştirme 31,86 mm'dir [2].



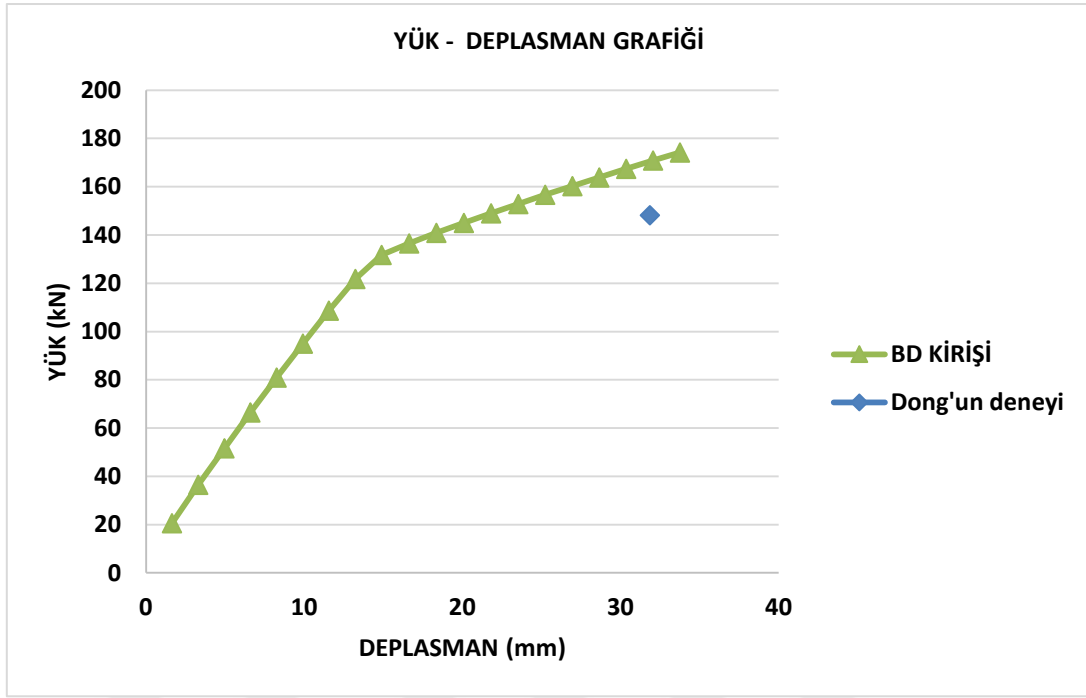
Şekil 4.9 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliklerine göre yük - deplasman grafiği



Şekil 4.10 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre yük - deplasman grafiği



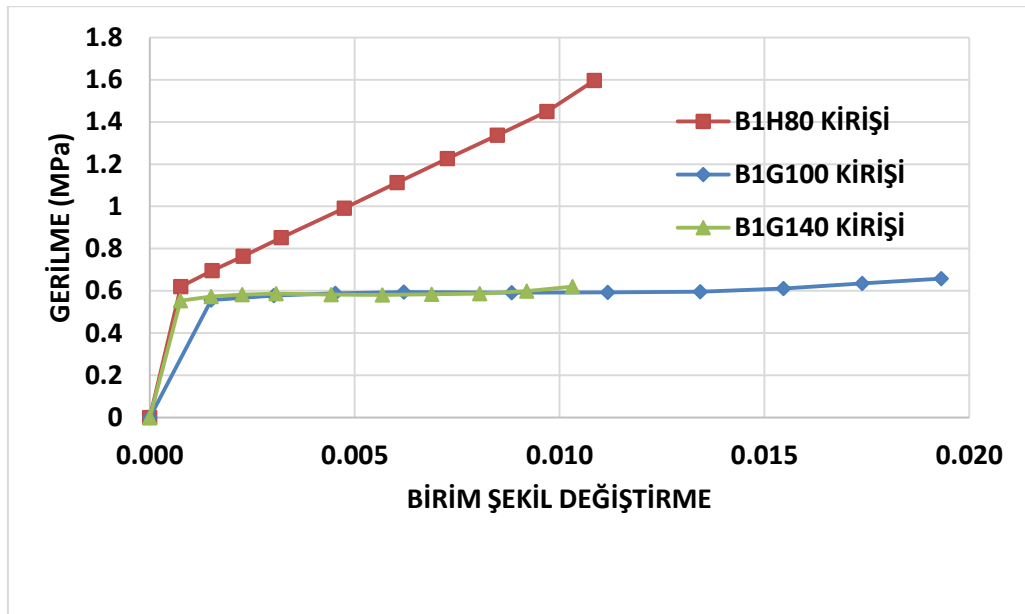
Şekil 4.11 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre yük - deplasman grafiği



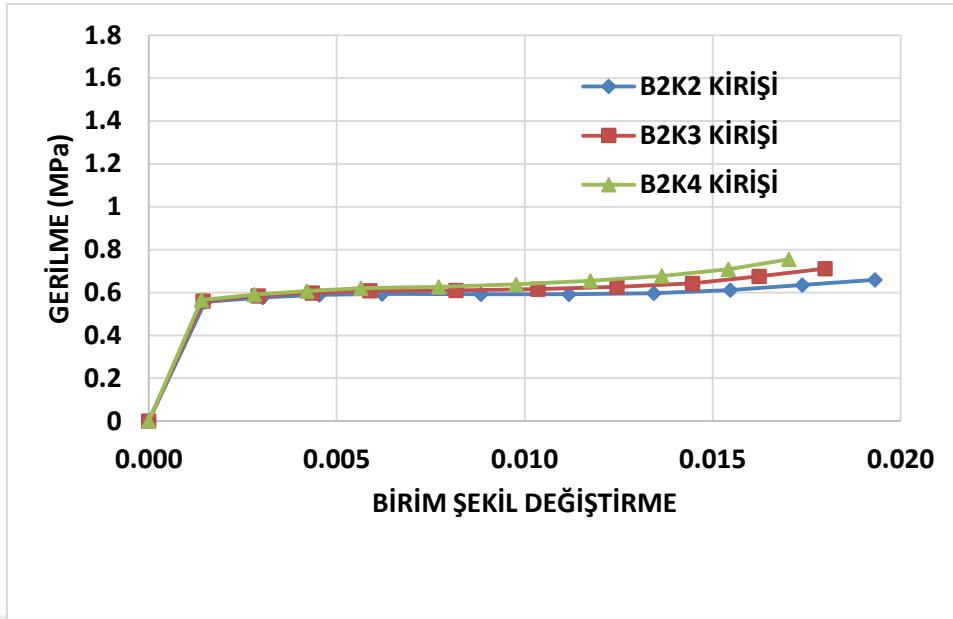
Şekil 4.12 Çözümlemesi yapılan BD kirişinin yük - deplasman grafiği

4.2.2 Betonun Gerilme - Birim Şekil Değiştirmesi

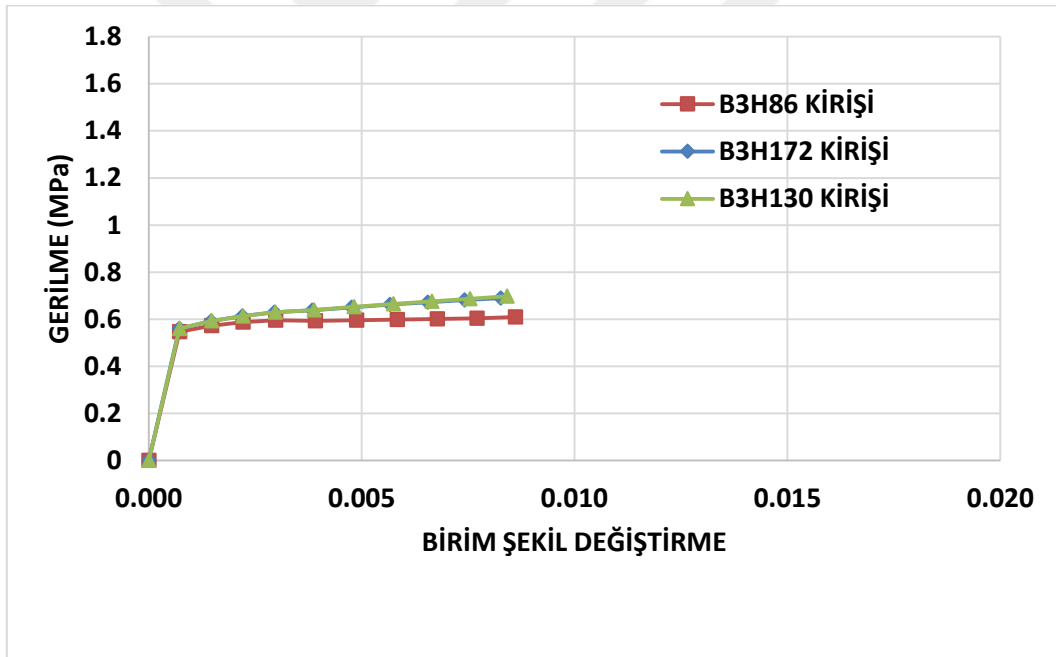
Beton kirişin çekme bölgesindeki maksimum gerilme - birim şekil değiştirme değişimi Şekil 4.13 - 15'te yer almaktadır. Birim şekil değiştirme değeri, elastik ve plastik birim şekil değiştirme değerinin toplamı şeklinde alınmıştır.



Şekil 4.13 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliklerine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği

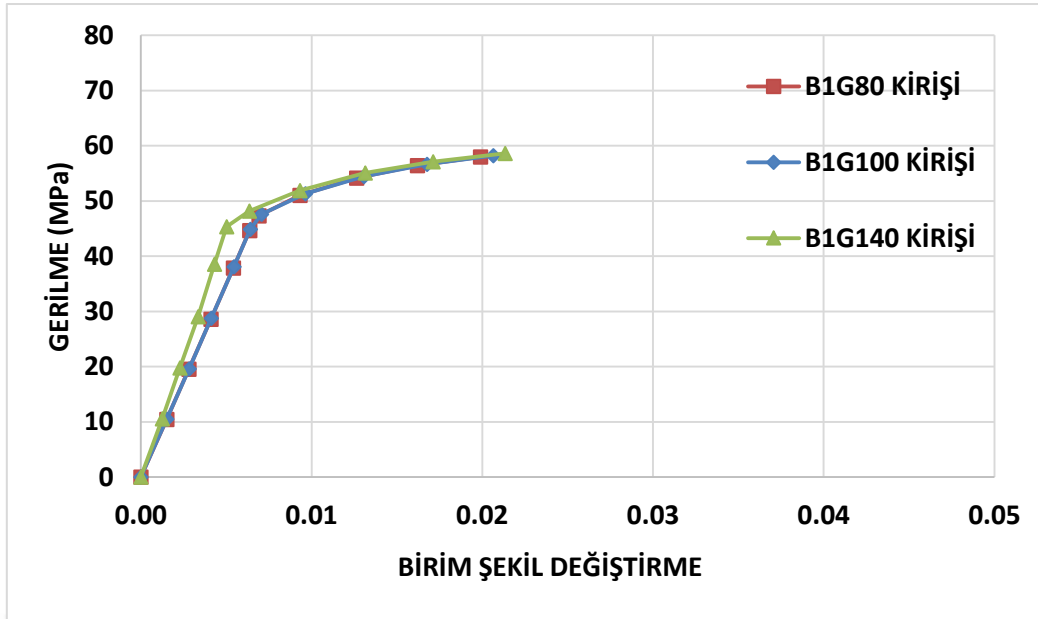


Şekil 4.14 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği

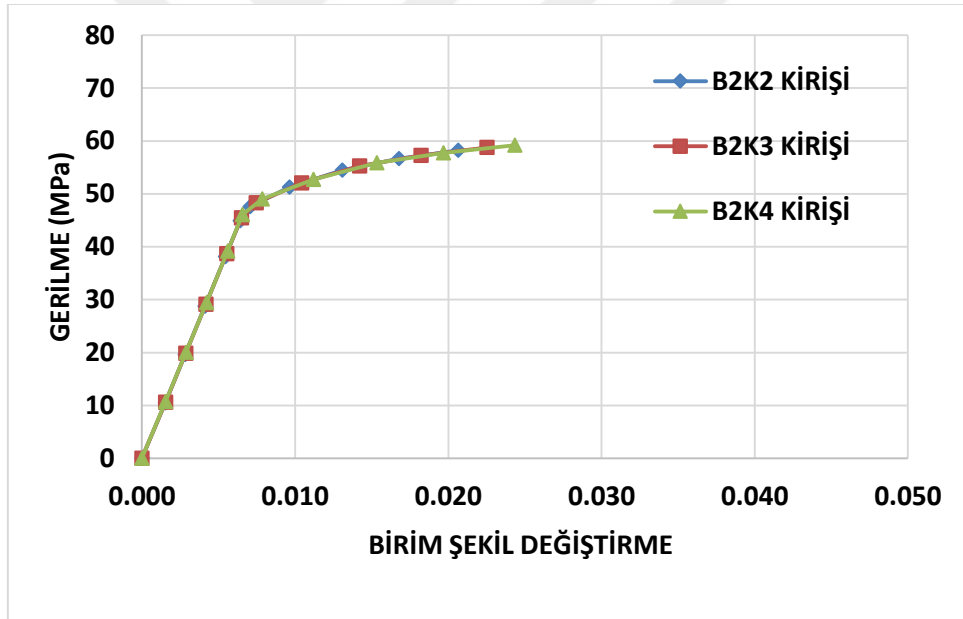


Şekil 4.15 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği

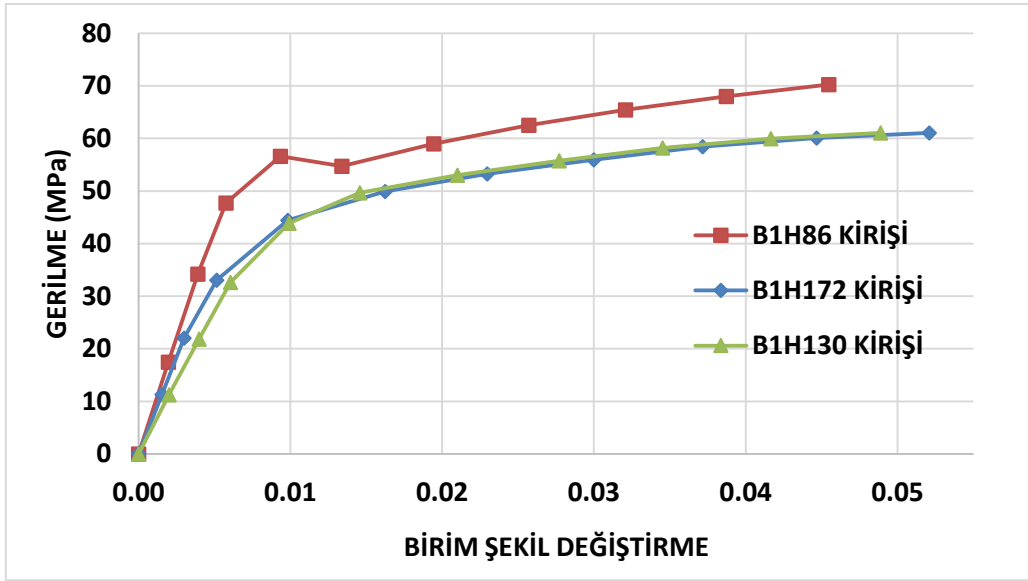
Beton kirişin basınç bölgesindeki maksimum gerilme - birim şekil değiştirme değişimi Şekil 4.16 - 18'de yer almaktadır. Birim şekil değiştirme değeri, elastik ve plastik birim şekil değiştirme değerinin toplamı şeklinde alınmıştır.



Şekil 4.16 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliklerine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği



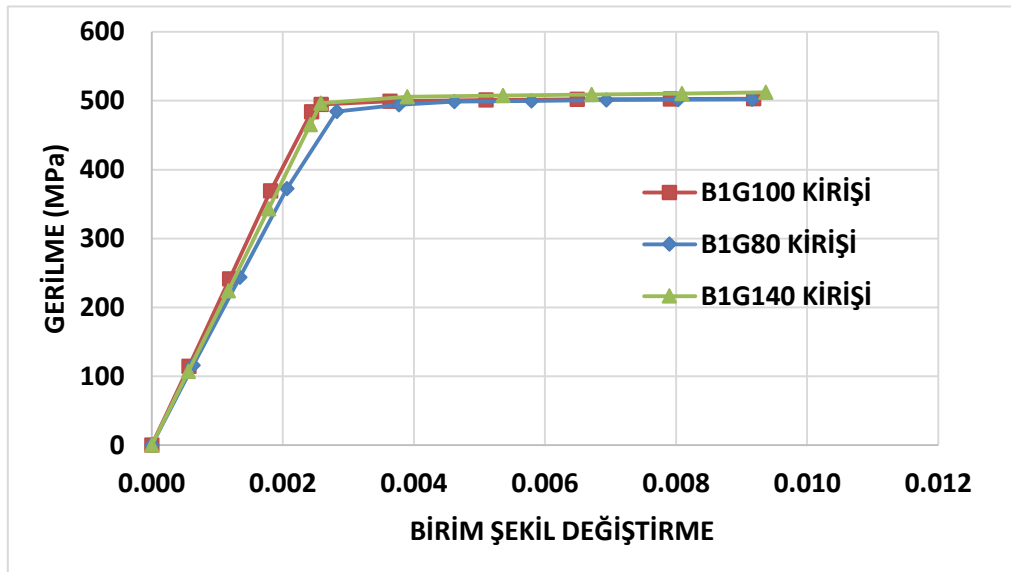
Şekil 4.17 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği



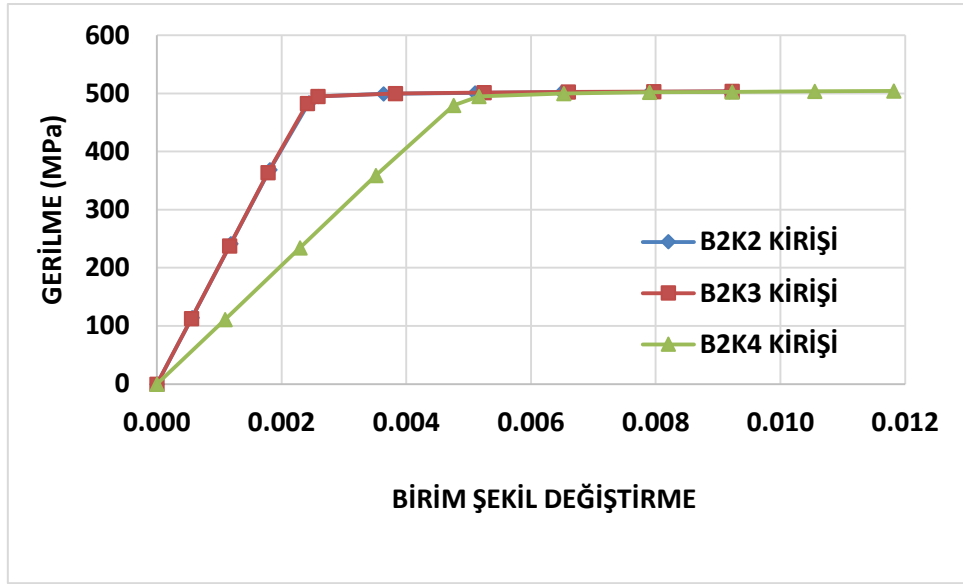
Şekil 4.18 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre gerilme - birim şekil değiştirme grafiği

4.2.3 Boyuna Donatıdaki Gerilmeler

Şekil 4.19 - 20'de boyuna donatının gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Boyuna donatıdaki maksimum gerilme, akma sınırını aşmıştır. Birim şekil değiştirme değeri, elastik ve plastik birim şekil değiştirme değerinin toplamı şeklinde alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre CFRP'nin genişliği ve kat adedi arttıkça gerilme değerinin arttığı tespit edilmiştir.

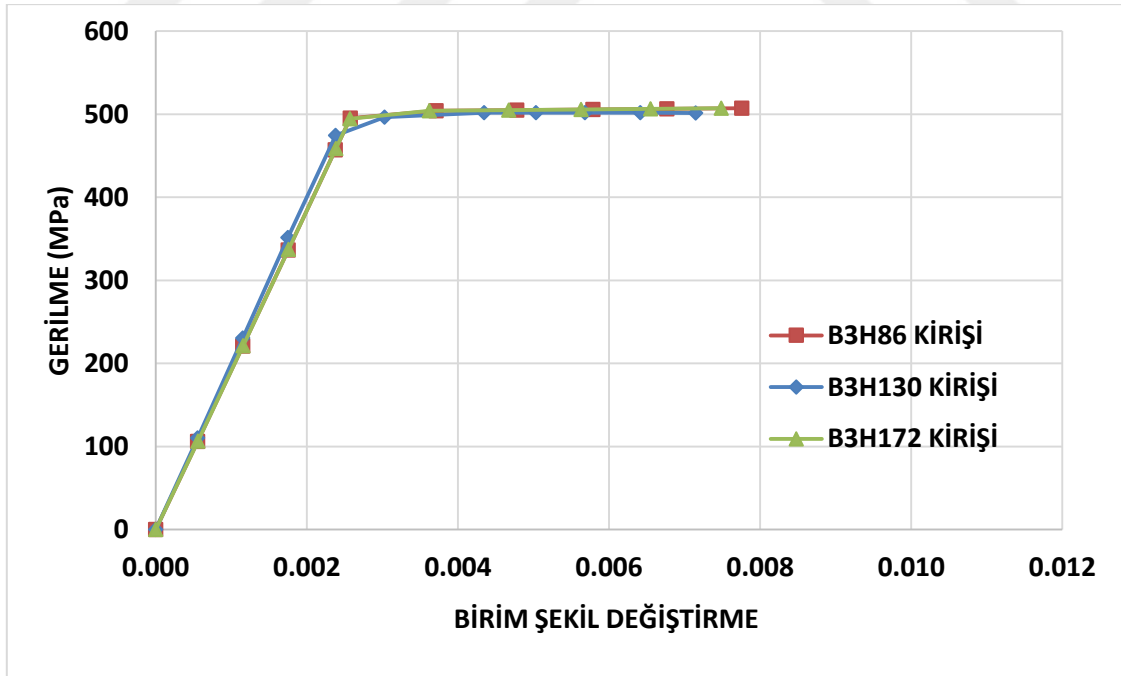


Şekil 4.19 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP genişliğine göre boyuna donatılarının gerilme – birim şekil değiştirme grafiği



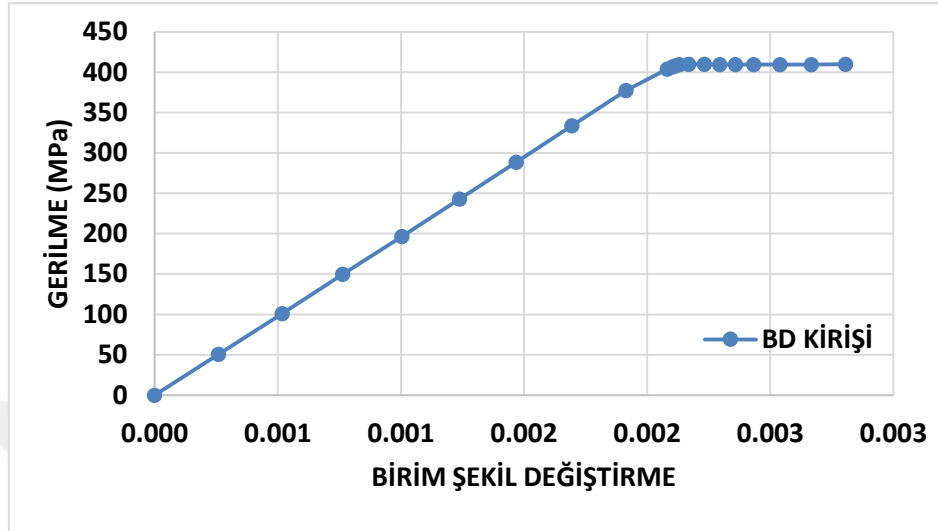
Şekil 4.20 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP kat adedine göre boyuna donatılarının gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

CFRP'nin yan yüzeyleri sardığı durumda boyuna donatıdaki gerilme davranışı Şekil 4.21'de görülmektedir. Yan yüzeylerin CFRP ile sarıldığı durumda boyuna donatıdaki maksimum gerilme değeri, akma dayanımını geçmiştir. Gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.21 Çözümlemesi yapılan kirişlerin CFRP'nin yan yüzeyleri sarmasına göre boyuna donatılarının gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

Çözümlemesi yapılan BD kirişinin boyuna donatılarının gerilme - birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.22'de yer almaktadır. Kirişin boyuna donatıları akma sınırı olan 410 N/mm^2 gerilme değerini aşmıştır.



Şekil 4.22 Çözümlemesi yapılan BD kirişinin boyuna donatılarının gerilme – birim şekil değiştirme grafiği

Boyuna donatıdaki gerilme - birim şekil değıştirme grafikleri Şekil 4.19-21'de gösterilmiştir. Referans alınan kirişin yük taşıma kapasitesi sabit tutularak boyuna donatıdaki gerilmelerde ayrıca incelenmiş ve Çizelge 4.2'de verilmiştir. CFRP genişliğinin ve kat adedinin artması durumunda donatıdaki gerilmelerin azaldığı ve akma dayanımına daha geç ulaştığı gözlemlenmiştir. CFRP malzemenin kiriş yan yüzeylerine uygulanması durumunda da donatıdaki gerilmeler azalmıştır.

Çizelge 4.2 Çözümlemesi yapılan kirişlerin referans kirişe göre donatıdaki gerilme değerleri

Kiriş Adı	Referans Yük (kN)	Donatıdaki gerilme (kN)
B1G80	110	478
B1G100	110	454
B1G140	110	399
B2K2	115	483
B2K3	115	436
B2K4	115	413
B3H86	123,4	411
B3H130	123,4	406
B3H172	123,4	405

4.2.4 CFRP Birim Şekil Değiştirme Değerleri

ACI 440 [22]' ye göre beton maksimum birim şekil değiştirmesine ulaşmadan FRP'deki birim şekil değiştirme maksimum değere ulaşırsa, $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$, FRP kopması meydana gelir. FRP'nin kopma birim uzaması (4.1) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} \quad (4.1)$$

Eşitlikte f_{fu} FRP'nin maksimum çekme dayanımını, E_f 'de FRP'nin elastisite modülünü temsil etmektedir.

Eğer betonarme sistem FRP'deki yükleri karşılayamazsa FRP sıyrılması meydana gelebilir. Bu göçme durumunu engellemek için (4.2) eşitliği ile FRP'deki etkili birim şekil değiştirme sıyrılmanın meydana geldiği birim şekil değiştirme düzeyi ile sınırlandırılır.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \quad (4.2)$$

Burada, f_c betonun basınç dayanımını, n FRP kat adedini ve t_f de FRP kumaş/plaka kalınlığını temsil etmektedir.

Çözümlemesi yapılan kirişlerin göçme şekliyle ilgili fikir sahibi olabilmek için kirişlerin göçme anında CFRP'deki birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. (4.1) ve (4.2) eşitlikleri ile CFRP'deki birim şekil değiştirme değerleri kopma ve sıyrılma göçme durumlarına göre hesaplanmış ve Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Sonuçlardan elde edilen verilere göre beton maksimum birim şekil değiştirme değerine ulaşmadan, FRP'deki birim şekil değiştirme değeri maksimum kopma sınır değerine ulaşmış ve beton yüzeyinden ayrılmıştır.

Çözümlemesi yapılan kirişlerde CFRP genişliği ve kat adedi arttıkça birim şekil değiştirme azalmaktadır. CFRP'nin betonun yan yüzeylerini sardığı durumlarda yan yüzeylerdeki CFRP yüksekliği arttıkça birim şekil değiştirme değerleri arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır. Tüm durumlarda birim şekil değiştirme değerleri kopma sınır değerini aşmaktadır. Bu da CFRP'nin beton yüzeyinden ayrıldığını göstermektedir.

Çizelge 4.3 CFRP birim şekil değıştirme değeri

Kiriş Adı	ANSYS	ACI 440 (Sıyrılma)	Kopma
B1G80	0,0119	0,0153	0,00002
B1G100	0,0118	0,0153	0,00002
B1G140	0,0111	0,0153	0,00002
B2K2	0,0119	0,0153	0,00002
B2K3	0,0109	0,0125	0,00002
B2K4	0,0104	0,0109	0,00002
B3H86	0,0333	0,0153	0,00002
B3H130	0,0378	0,0153	0,00002
B3H172	0,0327	0,0153	0,00002



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemini kullanarak LP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, plastik (doğrusal olmayan) analizleri yapılmıştır. Pham ve Al-Mahaidi ile Dong vd. araştırmacılarının yaptığı deneyler dikkate alınarak ANSYS programında SE modeli oluşturulmuştur. CFRP'nin genişliği, kat adedi ve kirişin CFRP ile yan yüzeyleri sarması değişkenlerine bağlı olarak yük - yerdeğiştirme grafikleri elde edilmiştir.

Pham araştırmacısının deneyinde kirişte göçme anındaki yük 120,45 kN ve açıklık ortasındaki yerdeğiştirme 32 mm iken ANSYS SEY analiz sonuçlarında göçme anındaki yük ise 134 kN ve açıklık ortasındaki yerdeğiştirme 32,57 mm'dir. YTÜ Yapı Laboratuvarında yapılan sıyrılma deneyi sonucunda elde edilen deney sonuçlarına göre CFRP sistemin elastisite modülü 44583 MPa olarak hesaplanmıştır. CFRP sistemin malzeme özellikleri bu hesaba göre değiştirilmiştir. Bu durumda yapılan SE analizinden göçme yük değeri 115,6 kN olarak elde edilmiştir. Bu değer referans kirişin laboratuvar sonuç değerinden yaklaşık %4 daha küçük çıkmıştır.

- CFRP genişliği arttırıldığında kiriş göçme yükünde artış meydana gelmiştir. CFRP genişliği ile betonarme kirişin mukavemeti arasında doğru orantı olduğu söylenebilir. CFRP genişliği arttıkça, çekme donatısının akma dayanımına daha geç ulaştığı gözlemlenmiştir. CFRP genişliği arttırıldığında betonarme kirişin sünekliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- CFRP kat adedi arttırıldığında kiriş göçme yükünde artış meydana gelmiştir. CFRP kat adediyle güçlendirilmiş betonarme kirişin mukavemeti arasında doğru orantı olduğu

ama sünekliliği ile ters orantılı olduğu olduğu söylenebilir. CFRP kat adedi arttıkça, çekme donatısının akma dayanımına daha geç ulaştığı ve CFRP malzemenin çekme etkisine katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

- CFRP genişliği ve kat adedi arttıkça CFRP'nin birim şekil değiştirme değeri azalmaktadır. CFRP'nin yan yüzeyleri sardığı durumda CFRP yüksekliği arttıkça CFRP'nin birim şekil değiştirme değeri arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır. Kopma değerini aşan CFRP'nin, beton yüzeyden ayrıldığı araştırmacıların yaptıkları deney sonuçları ile de gözlemlenmiştir.
- Betonarme kirişin çekme bölgesindeki gerilme - birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Çekme bölgesindeki incelenen beton elemanda, aynı gerilme altında birim şekil değiştirmelerin CFRP genişliğinin ve kat adedinin artması durumunda arttığı görülmüş ve durum kirişin sünekliliğini azaltmıştır. Gerilme değerleri maksimum çekme kapasitesini aşmış ve betonarme kirişlerin çatladığı ve parça kopmaları meydana geldiği görülmüştür. Bu durum deneysel sonuçlar ile uyum göstermiştir.
- Betonarme kirişin basınç bölgesindeki beton elemanda, CFRP genişliğinin ve kat adedinin artması durumunda aynı gerilme altında birim şekil değiştirme değerleri azalmaktadır. Gerilme değerleri beton malzemenin maksimum basınç dayanım değerini aşmıştır ve ezilmeler meydana gelmiştir.
- Boyuna donatının gerilme - birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Oluşturulan eğrilerin birbirine yakın olduğu ve teorik boyuna akma dayanım değerini aştığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Murtazaoğlu, S., (2013). Karbon Esaslı Lifli Polimerler (CFRP) ile Güçlendirilmiş Betonarme Kolonlarda Sargılı Beton Basınç Dayanımının Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 5-7.
- [2] Demirer, A. E., (2011). Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Sonlu Eleman Plastik Çözümlmeleri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 7-32.
- [3] Ceritli, Y., (2006). Depremde Hasar Görmüş Yapıların Mantolama ve Perdelerle Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 23.
- [4] Yapısal Güçlendirmede Epoksi Kartuş Uygulaması, <http://miraselin.com/yapi-guclendirme/>, 01.03.2018.
- [5] DowAska Hayat Kurtaran Güçlendirme Teknolojisi, <http://www.dowaksa.com/dowaksa-hayat-kurtaran-yapi-guclendirme-teknolojisini-yalovada-gerceklestirdigi-deprem-simulasyonunda-basariyla-sergiledi/>, 02.05.2018.
- [6] Pitilakis, K., (2018), Recent Advances in Eartquake Engineering in Europe, Springer, Thessaloniki.
- [7] Sayın, B., Manisalı, E., (2009). "Lif Takviyeli Plastik Levhalar ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Arayüz Gerilmelerini Etkileyen Parametreler", İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [8] Büyüköztürk, O., Güneş O., Karaca E., (2003). "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strenghtened using FRP composites", Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institue of Technology, Cambrige, 9-11.
- [9] Kachlakev, D., (2001). "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP laminates", Final Report SPR 316, Civil Construction and Environmental Engineering Department, Oregon State University, Corvallis.

- [10] Jia, M., (2003). Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composite Sheets, MS thesis, The School of Graduate Studies of University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama.
- [11] Supaviriyakit, T., Pornpongsaroj, P. and Pimanmas, A., (2004). "Finite Element Analysis of FRP-Strengthened RC Beams", Journal of Science and Technology, 26 (4): 497-507.
- [12] Gao, B., Leung, C.K.Y. and Kim, J.K., (2005). "Prediction of Concrete Cover Separation Failure for RC Beams Strengthened With CFRP Strips", Engineering Structures, 27 (2): 177-189.
- [13] Lu, X. Z., Jiang, J. J., Teng, J. G., Ye, L. P., (2005), "Finite Element Simulation of Debonding in FRP -to- Concrete Bonded Joints", Department of Civil Engineering, Tsinghua University, The Honh Kong, 413-415.
- [14] Alsayed, S.H. (1998). "Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. Cement & Concrete Composites", (20): 1-11, Department of Civil Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia.
- [15] Masoud, S. & Soudki, K. 2006. "Evaluation of Corrosion Activity in FRP Repaired RC Beams, Cement & Concrete Composites", (28): 969-77.
- [16] BASF MasterBrace® FRP (FIB) Lifli Polimer Sistemi için Geliştirilmiş Epoksi Yapıştırıcı
- [17] BASF MasterBrace® FRP Tek Yönlü Polimer Kumaş
- [18] ASTM D7522 /D7522M, (2015). Standard Test Method for Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete Substrate, ASTM, West Conchohocken.
- [19] Pham H., Al-Mahaidi R., "Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites", (2004) Elsevier, Monash University, Australia, 618-620.
- [20] Dong Y., Zhao M. and Ansari F., (2002). "Failure Characteristics of Reinforced Concrete Beams Repaired With CFRP Composites", Proceeding of the Third International Conference on Composites in Infrastructure, 10-12 June 2002, San Francisco, California.
- [21] Mander, J. B., Priestley, M.J.N. and Park, R., (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Division, 114(8): 1804-1826.
- [22] ACI 440, (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute Committee 440, ACI 440, Miami.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nasibe İNKAYA
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.03.1993, Afyonkarahisar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : nasibe.03@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Kocatepe Anadolu Lisesi	2011

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017 - Halen	AKM Yapı Taah. San. Tic. A.Ş.	İnşaat mühendisi
2016 - 2017	Buf Design Proje Tasarım Uygulama	İnşaat mühendisi
2015 - 2016	Asya İnşaat A.Ş.	İnşaat mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Fırat Alemdar Z. ve İnkaya N., (2018) “Finite Element Analysis of Strengthened Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Polymers”, International Conference on Civil and Environmental Engineering, 24-27 Nisan 2018, İzmir.

