

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KESMEYE KARŞI ANKRAJLI CFRP
LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ
BETONARME KİRİŞLERİN TERSİNİR-
TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**

Gökhan ŞAKAR

Eylül, 2008

İZMİR

**KESMEYE KARŞI ANKRAJLI CFRP
LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ
BETONARME KİRİŞLERİN TERSİNİR-
TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliğı Bölümü, Yapı Anabilim Dalı

Gökhan ŞAKAR

Eylül, 2008

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

GÖKHAN ŞAKAR, tarafından **PROF. DR. ÖMER ZAFER ALKU** yönetiminde hazırlanan “**KESMEYE KARŞI ANKRAJLI CFRP LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN TERSİNİR-TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Danışman

.....

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....

Tez İzleme Komitesi Üyesi

.....

Jüri Üyesi

.....

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli yardım ve önerileri ile bana ışık tutan Sayın hocam Prof.Dr. Ömer Zafer ALKU'ya bu aşamaya ulaşmamdaki tüm katkıları için teşekkür ederim. Deneysel çalışmanın ortaya çıkışında ve gerçekleşmesinde büyük emeği olan Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerin gerçekleşmesinde yardımlarını esirgemeyen H.Murat TANARSLAN ve birlikte çalıştığım Mesut KELEŞ'e, ayrıca Yağmur KOPRAMAN ve Özgür ANIL'a ve laboratuvar sorumlusu Faruk OGÜN'e yürekten teşekkür ederim.

Desteği ve gösterdiği sabırla tezin oluşumuna katkı koyan sevgili eşime ve bu güne gelmemi sağlayan aileme sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Gökhan ŞAKAR

KESMEYE KARŞI ANKRAJLI CFRP LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN TERSİNİR- TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

ÖZ

Kesme etkisine karşı yetersiz betonarme kirişleri güçlendirmek için, son on yılda karbon lif dokumalar tüm dünyada yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Güçlendirme işlemi yapının tamamının yada bazı elemanlarının yük taşıma, rijitlik, süneklik gibi özelliklerinin iyileştirilerek artırılması amacı taşımaktadır. Betonarme elemanlarda kesme kırılması ani ve gevrek olarak oluşmaktadır. Bu nedenle kesme kırılması tehlikeli olup istenmeyen bir durumdur. Bu çalışmada, CFRP levhaların kesme davranışını incelemek için sekiz kesme donatısız betonarme kiriş tersinir-tekrarlı yükler altında test edilmiştir. Bir adet deney elemanı referans olarak seçilmiş, diğer elemanlar yan yüzlere ve $\sqcap$ şeklinde uygulamalarla güçlendirilmiştir. Tüm elemanlarda CFRP levhalara ankraj uygulaması yapılmıştır. CFRP levha katman sayısı, uygulama şekli, uygulama açısı ve CFRP tipi çalışmanın değişkenleridir. Deney sonuçlarına göre tüm CFRP levha uygulamaları betonarme kirişlerin kesme dayanımını ve enerji tüketimini önemli oranda artırmıştır. Çift kat çift yönlü CFRP levhaların $\sqcap$ biçiminde uygulandığı deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deney sonuçları, ACI-440 komite raporu, Concrete Society TR55, Colotti ve diğerlerinin önerdiği bağıntılar ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (DBYBHY, 2007) ile bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: Kesme güçlendirmesi, CFRP, tersinir tekrarlanır yükleme, ankraj, betonarme kiriş.

THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH ANCHORAGED CFRP PLATES AGAINST SHEAR, SUBJECTED to CYCLIC LOADS

ABSTRACT

In the last decade carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has been commonly used for strengthening the shear deficient reinforced concrete beams the entire world. Strengthening is aimed to increase the structural characteristics such as shear strength, rigidity or ductility of the whole structure or a part of the structure. Shear failure is brittle and it becomes without advance warning. Therefore, it is dangerous and unwanted case. In this study, eight RC beams without transverse steel reinforcement have been tested under cyclic load to investigate shear behavior of CFRP plates. Seven specimens were strengthened with side bonded and U-jacketed CFRP plates and remaining one was chosen as a reference beam. Anchorages were applied all beams that strengthened CFRP plates. The variables of this work are number of CFRP ply, arrangement and inclination of CFRP and type of CFRP. According to test results, all CFRP arrangements of CFRP plates improved the strength and energy consumption capacity of the RC beams significantly. Specimen that strengthened with two ply bidirectional U-jacketed CFRP plates has reached its flexure capacity. Experimental results were compared with the analytical approaches that were suggested by ACI-440 Committee report, Concrete Society TR55 technical report, Colotti et al. and Specification for Structures to be Built in Disaster Areas (SSBDA, 2007).

Key words: Shear strengthening, CFRP, cyclic load, anchorage, reinforced concrete beam.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ..... 1

1.1 Genel	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	3
1.3 Geçmişte Yapılan Çalışmalar	4

BÖLÜM İKİ – MALZEMELER ve DENEY ELEMANLARI20

2.1 Lif Donatılı Polimerler Hakkında Genel Bilgi.....	20
2.1.1 Lif Donatılı Polimerlerin Özellikleri.....	21
2.1.2 Lif Donatılı Polimerlerin Avantajları ve Kullanım Alanları.....	21
2.1.3 Lif Donatılı Polimerlerin Çeşitleri.....	21
2.2 Deneysel Çalışma	23
2.2.1 Genel	23
2.2.2 Deney Elemanları	25
2.2.2.1 Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	27
2.2.2.2 Deney Elemanlarının Modellenmesi.....	30
2.3 Malzeme Dayanımları	32
2.3.1 Donatı.....	32
2.3.2 Beton.....	32
2.3.3 CFRP	34
2.3.4 Yapıştırma Malzemesi	35

2.4 Ankraj Uygulaması.....	36
2.5 Deney Düzeni.....	40
2.5.1 Yükleme Düzeni	40
2.5.2 Ölçüm Düzeni	43
2.6 Ölçümlerin Değerlendirilmesi	43
2.6.1 Kiriş Deplasman Ölçümü.....	43
2.6.2 Birim Deformasyonların Hesaplanması.....	45
BÖLÜM ÜÇ – DENEYLER.....	46
3.1 Deney Elemanı–1	46
3.2 Deney Elemanı–2	49
3.3 Deney Elemanı–3	57
3.4 Deney Elemanı–4	64
3.5 Deney Elemanı–5	70
3.6 Deney Elemanı–6	77
3.7 Deney Elemanı–7	84
3.8 Deney Elemanı–8	91
BÖLÜM DÖRT – DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	98
4.1 Dayanım ve Davranış	98
4.2 Enerji Tüketimi.....	108
4.3 Rijitlik.....	112
4.4 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkileri.....	115
4.5 Deneysel Değişkenlerin Birim Deformasyon Davranışına Etkileri	123
4.6 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkisi Sonuçları	128
BÖLÜM BEŞ – ANALİTİK ÇALIŞMA	130
5.1 Genel	130

5.2 Deney Elemanlarının Analitik Kesme Dayanımlarının Hesaplanması	130
BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR ve ÖNERİLER	145
6.1 Sonuçlar.....	145
6.2 Öneriler.....	148
KAYNAKLAR	149
EKLER.....	153

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Genel

Ülkemizin çok büyük bir kısmı birinci ve ikinci derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Buna karşılık bu bölgelerde bulunan yapılar yeterli deprem güvenliğine sahip değildir. Günümüze kadar yaşanan büyük depremlerde deprem güvenliği yetersiz olan bu yapılarda önemli hasarlar oluşmuştur. Yönetmeliklere uygun olarak yapılmamış olan bu yapıların ekonomik olma koşulu gözönünde bulundurularak onarımı veya güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu işlem yapılırken asıl amaç yapının mevcut yönetmeliklere uygun olarak deprem güvenliğinin sağlanabilmesidir.

Güçlendirme işlemi yapının tamamının yada bazı elemanlarının yük taşıma, rijitlik, süneklik gibi özelliklerinin iyileştirilerek artırılması amacı taşımaktadır. Güçlendirme uygulaması betonarme yapının ihtiyacına göre, yapının tümüne veya bazı elemanlarına yapılabilir. Bu karar projeyi yapan mühendisin bilgi birikimi doğrultusunda verilir.

Betonarme elemanlarda kesme kırılması ani ve gevrek olarak oluşmaktadır. Bu nedenle kesme kırılması tehlikeli olup istenmeyen bir durumdur. Eğilme kırılması ise sünek bir kırılma tipidir. Betonarme yapı elemanları çeşitli sebeplerden kesme dayanımı açısından yetersiz olabilmektedir. Bu nedenler; yetersiz kesme donatısı, donatı korozyonu, yapı kullanımında oluşan değişiklikler, tasarım veya yapım sırasında oluşan hatalar, yeni yönetmeliklere uyma zorunluluğu olarak sayılabilir. Bu yetersizlikler nedeni ile betonarme yapı elemanları kesmeye karşı güçlendirme gereksinimi duymaktadırlar. Projelendirme sırasında kesme güvenliği sağlanmış olsa bile denetim eksikliği, uygulama yanlışları ve malzeme dayanım yetersizliği nedeni ile betonarme kirişlerin kesme açısından yetersiz dayanıma sahip olduklarına sıkça rastlanmaktadır.

Kesme açısından yetersiz elemanlar için çeşitli güçlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Donatı ile kelepçeleme, betonarme katman ekleyerek mantolama, çelik levhaların eleman dışından yapıştırılması ve fiber donatılı polimer uygulamaları kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan yöntemlerdir. Literatürde bu teknikler ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ülkemizde de 2007 Deprem Yönetmeliği'ne CFRP ile yapı güçlendirmesi ile ilgili bir kısım eklenmiştir.

Lif donatılı polimerler üç farklı tiptedir. Bunlar karbon lifli, cam lifli ve aramid lifli polimerlerdir. Bu çalışmada Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) olarak isimlendirilen karbon lifli dokumalar kullanılmıştır. Dıştan uygulanan karbon lif uygulamaları diğer kesmeye karşı güçlendirme tekniklerine göre birçok avantaja sahiptir. Bunlar; güçlendirmenin uygulama kolaylığı, malzemenin yüksek dayanımına karşı oldukça hafif olması, yüksek korozyon dayanımı, farklı kesit şekillerinde kullanılabilmesi ve kesit boyutlarını çok az değiştirmesi, uygulama kolaylığı, düşük bakım maliyeti olarak sıralanabilir.

Literatür incelendiğinde karbon lif dokumalar ile eğilmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlere ait birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Buna rağmen, aynı konuya ait kesmeye karşı güçlendirme çalışmaları daha az sayıdadır. Buna ek olarak bu az sayıdaki çalışmada tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilen örneklerle rastlanmamıştır.

Çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler dışarıdan uygulanan levha şeklindeki karbon lif dokumalar ile güçlendirilmiştir. İki tip karbon lif dokuma kullanılmıştır. Bunlar tek yönlü ve çift yönlü dokumalardır. Deney elemanlarında, levha şeklindeki dokumaların kesitte farklı şekillerde uygulamaları yapılmıştır. Ayrıca lif dokumanın tipi, uygulama açısı, katman sayısı değiştirilerek örnekler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Lif dokumaya ankraj uygulaması yapılarak daha iyi bir güçlendirme yapılması amaçlanmıştır.

Analitik çalışma kapsamında, CFRP levhaların kesme dayanımlarına katkısı (ACI-440, 2001) komite raporu, (Concrete Society TR55, 2000), (Colotti vd., 2004) tarafından önerilen bağıntılar ve (DBYBHY, 2007), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te verilen bağıntılarla hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Kesme etkisine karşı yetersiz betonarme kirişleri güçlendirmek için, özellikle son on yılda karbon lif dokumalar tüm dünyada yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Güçlendirme işleminin asıl amacının yapı elemanının deprem etkilerine karşı dayanımını artırmak olduğu düşünüldüğünde, deprem etkisini dikkate alan deneysel çalışmaların önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Literatürde karbon lif dokumalar ile kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlere ait depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükleri içeren deneysel çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle, kesmeye karşı yetersiz betonarme kirişlerin deprem davranışının incelenmesi çalışma konusu olarak seçilmiştir.

Çalışma kapsamında karbon lif dokumanın levha şeklinde kirişlere uygulanması incelenmiştir. Uygulama T şeklindeki kesitte farklı yüzlere yapılmıştır. Ayrıca karbon lif dokumanın kesitteki uygulama açısı ve katman sayısı değiştirilmiştir. Tüm güçlendirilmiş kirişlerde karbon liflere ankraj uygulaması yapılmıştır. Karbon lif dokumanın kirişin dayanımına, rijitliğine, sünekliğine ve enerji tüketimine olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada sekiz adet T-kesite sahip betonarme kiriş kullanılmıştır. Bu kirişler konsol şeklinde rijit yükleme platformuna yerleştirilmiş ve depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir.

Deneysel çalışmanın değişkenleri karbon lif dokumanın uygulama biçimi, uygulama açısı, katman sayısı ve karbon lif dokumanın tipidir. Çalışmada tek yönlü ve çift yönlü karbon lif dokumalar kullanılmıştır. Çalışmada Sika firmasından temin

edilen SikaWrap 230C ve SikaWrap 130C malzemeleri kullanılmıştır. Karbon lif dokuma malzemesi aynı firmaya ait iki bileşenli Sikadur 330 epoksi esaslı doyurma reçinesi ile yüzeye uygulanmıştır. Ankraj uygulamalarında ise Sikadur 31 iki bileşenli epoksi reçine yapıştırıcı kullanılmıştır.

Deney elemanlarının bir tanesi güçlendirme uygulaması yapılmamış kontrol kirişi olarak seçilmiştir. Değişik karbon lif dokuma tipi, uygulama açısı, katman sayısı ve uygulama biçimine sahip bu kirişler ile bu değişkenlerin depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükler altında davranışları incelenmiştir.

Çalışma kapsamında kesmeye karşı karbon lif dokumalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deprem davranışı incelenmiştir. Karbon lif malzemesinin tipi, uygulama biçimi ve açısı değiştirilerek davranış üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Bu amaçla 3/5 geometrik ölçekli, T-kesitli 8 adet kiriş üretilmiştir. Bunlardan bir tanesi kontrol elemanı olup diğerleri güçlendirilmiş kirişlerdir.

Deney elemanlarından elde edilen veriler yardımı ile güçlendirilmiş kirişlerin dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketim değerleri saptanmıştır. Deney değişkenleri olarak seçilen karbon lif donatının tipi, uygulama biçimi, uygulama açısı ve katman sayısının kiriş davranışı üzerine etkileri irdelenmiştir. Referans eleman ile kıyaslamalar yapılarak bu değişimlerin boyutu ifade edilmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar yönetmelik ve çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konan ampirik ifadeler ile karşılaştırılmıştır. Güçlendirme tekniği ile ilgili çeşitli öneriler sunulmuştur.

1.3 Geçmişte Yapılan Çalışmalar

Literatürde bugüne kadar yapılmış olan kirişlerin dıştan uygulanan çeşitli malzemelerle güçlendirilmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. 1970 ortalarında çelik plakaların dışarıdan yapıştırılması ile başlayan bu süreç, FRP malzemelerin ortaya çıkması ve yaygın olarak kullanımı ile birlikte devam etmiştir

(Sharif ve diğer., 1995). Günümüzde FRP malzemelerin çelik levhalara göre birçok avantajı nedeni ile bu malzemenin güçlendirme malzemesi olarak kullanımı uluslararası boyutta yaygınlaşmıştır.

Konu ile ilgili çalışmaların büyük kısmı deneysel olup bazı çalışmalar analitiktir. Bazı çalışmalar ise hem deneysel hem de analitiktir. Lif donatılı polimerler 1980'lerden itibaren betonarme yapı elemanlarında kullanılmaya başlanmıştır.

Kesmeye karşı güçlendirme yapılacak betonarme bir kiriş, karbon lif donatının çeşitli şekillerde kullanımı ile güçlendirilmektedir. Karbon lifleri kirişin sadece yan yüzlerine uygulayarak, yan yüzlerle birlikte kirişin altına da sarılması sureti ile U şeklinde bir uygulama yapılarak veya kirişin bütün kenarlarını dönerek bohçalama yapılarak çalışmalar yapılmaktadır. Levha şeklinde bütün yüzeyi kaplama biçiminde (Sato ve diğer., 1997; Li ve diğer., 2003; Adhikary ve Mutsuyoshi, 2004; Wegian ve Abdalla, 2005) yada şeritler halinde yüzeyi geçmekle de güçlendirme işlemi yapılmaktadır. Şerit uygulaması çeşitli uygulama açıları ile, şerit genişliğini ve aralarındaki uzaklığı değiştirerek yapılmaktadır (Diagana ve diğer., 2003; Keleş, 2005; Anil, 2006; Anil, 2007; Bencardino ve diğer., 2007; Tanarlan, 2007). Benzer biçimde, levha şeklinde yüzey kaplamada uygulama açısı, lif dokuma tipi ve katman sayısı da değişken olarak seçilmektedir.

Betonarme kirişlerin güçlendirilmesine ait çalışmalar; eğilme dayanımının ve kesme dayanımının artırılmasına yönelik iki ana gruptur. Kesme dayanımının artırılmasına ait ilk çalışmalarda güçlendirilmiş kirişin davranışı ve CFRP'nin ne kadar etkin olduğu araştırılmıştır.

Lif dokumalar ile ilgili ilk çalışmalar malzemenin davranışını ve betonarmeye uygunluğunu araştırmaya yöneliktir (Chajes ve diğer., 1995; Arduini ve Nanni, 1997; Norris ve diğer., 1997; Triantafillou, 1998). Daha sonra yapılan çalışmalarda karbon lif donatılı kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını etkileyen faktörler incelenmiştir (Taljsten ve Elfgren, 2000; Raghu ve diğer., 2000; Kachlakev ve McCurry, 2000; Khalifa ve Nanni, 2000). Bu faktörler, beton basınç dayanımı,

kiriş donatısının akma dayanımı, eğilme ve kesme donatılarının oranları, kirişin kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), ankraj uygulaması olup olmaması, karbon lif dokumanın malzeme özellikleri, malzemenin uygulama biçimi ve katman sayısıdır. Çalışmalarda güçlendirilmiş kirişler, betonarme kirişlerin kesme davranışında görüldüğü gibi, bir ana kesme çatlağının yada birkaç farklı kesme çatlağının gelişimi ile göçmeye ulaşmıştır. İki farklı ana göçme modu görülmüştür (Ahmed ve diğer., 2001; Challal ve diğer., 2002; Teng ve diğer., 2004; Chen ve Teng, 2003). Birincisi, karbon lifin en fazla gerilme artışı gösteren kesitte kopması ve diğeri de karbon lif dokumanın beton yüzeyinden ayrılmasıdır. Beton yüzeyinden ayrılmayı engellemek amacı ile CFRP uygulamasının uç kısımlarına ankraj uygulamaları yapılmıştır. Bu konudaki çalışmalar sınırlı olup ankraj uygulamalarının tersinir-tekrarlı yükler altında davranışları incelenmemiştir (Adhikary ve Mutsuyoshi, 2004; Khalifa ve diğer., 2002).

Literatürde kesmeye karşı karbon fiber levhalar ile güçlendirilmiş ve tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiş çalışmalara ait örneklerle rastlanmamıştır. Aşağıda konuya ait çalışmalardan bazıları sunulmuştur.

Sharif ve diğerleri (1995)

Bu çalışma, çelik levhalarla kesmeye karşı güçlendirilmiş kirişleri içermektedir. Yetersiz kesme dayanımlı ve kesme hasarlı betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilmesi incelenmiştir. Kesme göçmesini engellemek ve sünek davranışı geliştirmek için çelik levhalar değişik tiplerde kullanılmıştır. Dört değişik tipte levhayla güçlendirme yapılmış olup şerit, U-tipi, kanat tipi ve ceket tipi levhalar iki bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılarak kirişlere yapıştırılmışlardır. Onarılan bütün kirişlerin dayanımları artmış ve azalan rijitlikler yeniden eski seviyelerine ulaşmıştır. Bunun yanında, kesme bölgeleri tamamen kaplanarak onarılan ve eğilmeden göçmeye ulaşan kirişlerin dışındaki kirişlerde, levhaların yüzeyden ayrılmasıyla göçme ani olmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Kesme hasarlı betonarme kirişler, kritik kesme bölgelerine epoksiyle dıştan yapıştırılan çelik levhalarla etkin bir şekilde onarılmıştır.
- Ceket levhalarla onarılan yani kesme bölgesi tamamen örtülen kirişler en yüksek dayanım artışını ve süneklik gelişimini göstermişlerdir.
- U-tipi, şerit ve kanat tipi levhalarla onarılan kirişlerin kesme dayanımı artmıştır. Fakat bu levhalar beton kabuğunu yırtarak ve ayırarak kirişin ani olarak göçmesine neden olmuştur.

Chajes ve diğerleri (1995)

Bu çalışmada 12 adet yetersiz kesme donatılı T-kesitli kirişten oluşan bir seri, dıştan uygulanan fiber dokumaların kullanımının etkilerinin incelenmesi için test edilmiştir. Aramid, cam ve grafit liflerden yapılmış dokumalar iki bileşenli epoksi ile T-kirişin iki yanına boydan boya yapıştırılarak uygulama yapılmıştır. Fiber dokuma malzemelerin seçilmesindeki amaç bu tür malzemelerin paslanmaz, yalıtkan ve genelde kimyasal maddelere dayanıklı olması ve manyetik olmamalarıdır. Deneyin amacına yönelik olarak kesmeye göre yetersiz tasarım yapılmış ve kesme donatısı kullanılmamıştır.

Çalışmada 1200 mm uzunluğunda ve a/d oranı 7 olan kirişler çift monotonik tekil yükleme altında test edilmiştir. Lif dokumalar 0° ve 90°'lik açılarla yerleştirilerek uygulama yapılmıştır. Kirişler eğilmede test edilmiş ve fiber dokuma uygulanan sekiz kirişin performansı, güçlendirme uygulanmayan dört adet kontrol kirişinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bütün kirişler kesmeden kırılmışlardır. Güçlendirilmiş kirişler malzeme ile beton yüzey arasında çok iyi aderans özellikleri göstermişlerdir. Fiber dokumalı kirişler için dayanımda % 60 ila % 150 oranında artış sağlanmıştır. Dokuma liflerinin uygulama biçiminin kesme kapasitesini etkilediği ortaya konmuştur. Testlerin hiçbirinde dokumalar beton yüzeyinden ayrılmamıştır. Ayrıca, fiber dokumaların kesme kapasitesinin yaklaşık olarak hesaplanmasında kullanılabilecek analitik ifadeler sunulmuştur.

Norris ve diğeri (1997)

Çalışmada 19 adet dikdörtgen kesitli betonarme eleman test edilmiştir. a/d oranı 3 olan, 13 deney elemanının eğilme kapasitesi düşüktür. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında monotonik yükleme ile test edilmiştir. Çalışmada tek yönlü, çift yönlü ve çapraz dokumalı üç çeşit CFRP kullanılmıştır. Kirişlerin kesme dayanımları tek yönlü CFRP kullanılarak, eğilme dayanımları ise çapraz dokumalı CFRP kullanılarak artırılmıştır. Deney elemanlarının eğilme dayanımları, iki kat tek yönlü U biçimli levha, iki kat çift yönlü levha, kiriş yatay eksenini ile 45° açı yapan iki kat çapraz dokumalı levha ve U biçimli levha ile artırılmıştır. Deney elemanlarının kesme dayanımları ise, kirişin tek yönlü, tek katlı CFRP ile bohçalanmasıyla ve kirişin çapraz dokumalı, tek katlı CFRP ile bohçalanmasıyla artırılmıştır. İki kat tek yönlü U biçimli levha ile güçlendirilen betonarme kiriş, CFRP levhanın bittiği noktadan yüke doğru gelişen kesme çatlakları nedeni ile kesmeden göçmüştür. İki kat çift yönlü U biçimli levha ile güçlendirilen kiriş ise eğilme kapasitesine ulaşarak göçmüştür. Kesme dayanımı artırılan kirişlerde kirişlerin boyuna donatısı aktıktan sonra CFRP levhaların yapışma yüzeyinden ayrılmasıyla göçme gerçekleşmiştir. Eğilme dayanımı artırılan deney elemanlarında ise CFRP levhalarının yapışma yüzeylerinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlakları nedeni ile göçme gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarına göre CFRP uygulamalarında en fazla katkı, CFRP levhaların kesme çatlaklarına paralel uygulandığı açılı uygulamalarda elde edilmiştir.

Taljsten ve Elfgrén (2000)

Bu çalışma karbon lif dokumalar ile farklı güçlendirme yöntemlerini ve uygulamalarını kapsamaktadır. Amaç, güçlendirmeden önceki ve sonraki kesme kapasitelerini irdelemek ve üç farklı uygulama biçimini karşılaştırmaktır. Toplam 8 adet 4500 mm uzunluğunda 180x500 mm en kesitli kiriş, simetrik çift tekil yük altında monotonik olarak test edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında üç farklı uygulama yöntemi incelenmiştir. Uygulanan üç farklı yöntem şunlardır:

Elle yatırma (A ve B sistemleri için), püskürtme,(C sisteminde) ve vakum enjeksiyonu(D sistemi için).

Toplam 8 kirişin üçü kontrol elemanı olarak seçilmiştir. Sisteme iki adet tekil yük uygulanmış ve bu iki yük arasındaki uzaklık değiştirilmiştir. Bütün elemanlarda karbon lif dokuma 45°'lik bir açı ile uygulanmıştır. Yalnız bir elemanda $\pm 45^\circ$ 'lik bir açı kullanılarak her iki diyagonal yönde uygulama yapılmıştır.

Deney sonucunda dayanımda, % 300 e varan artışlar sağlanmıştır. Vakum enjeksiyonu ve püskürtme yönteminin elle yapıştırma yöntemine göre uygulamada daha zor olduğu görülmüştür. İki deney elemanı CFRP'nin yüzeyden ayrılması sonucu kesmeden göçmüştür. Diğer elemanlar ise eğilme kapasitelerine ulaşmışlardır.

Raghu ve diğerleri (2000)

Bu çalışma CFRP ile güçlendirilen betonarme T-kesitli kirişlerin kesme davranışlarını ve kırılma modlarını incelemektedir. Deney programı bir hastanedeki 9 adet kiriş üzerinde uygulanmıştır. Karbon fiber dokuma U sargılama şeklinde yapılmış, ankrajlı ve ankrajsız güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Deney programında kullanılan 9 adet T-kesitli kiriş, aynı kesite ve donatı detayına sahiptir. Deney kirişlerinde tek ve çok katlı CFRP uygulaması ankrajlı ve ankrajsız olarak kirişlerin alt, yan ve üst yüzeylerine uygulanmıştır. Ankraj elemanı olarak cam fiber (GFRP) çubuklar kullanılmıştır. Deneyler sonucunda ankrajsız uygulamalar CFRP'nin sıyrılması ile göçme moduna ulaşırken, ankrajlı elemanlarda ankrajın kopması ile göçme modu gerçekleşmiştir.

Ankrajsız elemanlarda tek kat yerine iki kat CFRP uygulaması maksimum yükü çok az artırırken, deplasman kapasitesini düşürmüş dolayısıyla daha gevrek davranışa neden olmuştur.

Ankrajlı elemanlarda ise deplasman ve yük değerleri (maksimum değerler) bir ve iki kat CFRP uygulaması için yaklaşık olarak aynı değerleri vermiştir. Deneysel sonuçlardan çıkan kesme kuvveti değerleri Khalifa'nın ifade ettiği teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; kesme kapasitesini artırmak için U-sargılama şeklinde CFRP ile güçlendirilmiş elemanlar iyi sonuçlar vermiştir. Bu dayanım artışı %11-34 arasında olmuştur. CFRP tabaka sayısını artırmak kesme kapasitesinde büyük artışlara neden olmamıştır.

Khalifa ve Nanni (2000)

Bu çalışma çeşitli tiplerde CFRP uygulanmış örneklerin kesmeye karşı güçlendirilmesini kapsamaktadır. 6 adet birebir ölçekli basit mesnetli kiriş test edilmiştir. Bunlardan biri referans kiriş olup, diğerleri çeşitli karbon fiber dokuması uygulamaları ile güçlendirilmiştir. Çalışmadaki değişkenler; sargılama biçimi, CFRP miktarı, 90 ve 0° sargılama kombinasyonu ve CFRP'nin bitim noktası ankrajıdır. Sonuçlara göre en iyi kombinasyon U şeklinde sarılan ve ankrajlı tip olmuştur. Çalışmadaki deney programının amacı; örneklerin göçme modunu belirlemek, kesme dayanımını etkileyen bazı faktörleri test etmek ve yazarlar tarafından sunulmuş olan daha önceki tasarım yaklaşımlarını geliştirmek olarak sıralanabilir. Deney programında üç ana değişken karşılaştırılmıştır:

- CFRP miktarı ve dağılımı (bohçalama ve şerit) ile yapıştırma yüzeyi miktarı (yan yüzeyler ve U sargılama)
- Lif yönlerinin etkisi
- Ankraj biçimi

Teste tâbi tutulan olan 6 adet T-kesitli kiriş, dokumanın farklı uygulamaları ile denenmiştir. U sargılama yada şerit şeklinde uygulamalar yapılmış olup ankrajlı yada ankajsız bağlantılar yapılmıştır. Ayrıca çift yönlü CFRP uygulaması da gerçekleştirilmiştir. Kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı (a/d) 3 seçilmiştir. Basit kirişin ortasından tekil yükleme yapılmış ve 4 adet LVDT düşey deplasmanı ölçmek için yerleştirilmiştir. 10 adet deformasyon ölçer karbon fiber

dokumanın üzerine yerleştirilerek malzemenin deformasyonun saptanması amaçlanmıştır.

Deney sonucunda kirişin yan yüzeylerinde iki tabakanın üst üste yapıştırılması sonucu uygulanan çift yönlü FRP uygulaması kesme kapasitesinde bir artış gerçekleştirilmemiştir. Şerit şeklinde uygulanan CFRP, U-sargılama şeklindeki CFRP uygulaması ile yaklaşık aynı yükte göçmeye ulaşmıştır. Buradan literatürle de uyum sağlayan bir optimum CFRP miktarı formülasyonu elde edilmiştir. Ankrajlı U-sargılama uygulamasında ankrajsız olana göre oldukça fazla yük taşıma kapasitesi görülmüştür. Deplasman kapasitesi ve süneklik çok artmıştır. Bunun sonucunda göçme modu kesmeden eğilmeye geçmiştir.

Çalışmada iki olası göçme mekanizmasına göre model tanımlanmıştır. Birincisi, karbon fiber dokumanın kopması diğeri de beton yüzeyinden ayrılmasıdır. Buna göre deneysel sonuçlar ACI ve Eurocode yönetmelikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar tasarımın kabul edilebilir ve mantıklı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Deneysel program sonucunda güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımları % 35-145 arasında artmıştır. Sadece kirişin yan yüzlerine FRP uygulaması U şeklindeki uygulamaya göre daha az kesme dayanımı sağlamaktadır. Şerit şeklindeki CFRP uygulaması laboratuvar ortamında CFRP levha uygulaması kadar iyi sonuç verse de, yazar pratikte levha uygulamasını daha yararlı bulmaktadır.

Kachlakev ve McCurry (2000)

Çalışmada daha önceden inşa edilmiş ve kullanılmakta olan bir köprüdeki kirişlere eşdeğer 4 adet gerçek boyutta kiriş üretilmiştir. Bu kirişleri benzeştirecek biçimde kesme açısından yetersiz olan deney kirişlerinin bir tanesi kontrol elemanıdır. Diğer 3 kiriş ise farklı şekillerde uygulanan karbon ve cam fiber dokumalar ile güçlendirilmiştir. Çalışmada, çift yönlü olarak seçilen CFRP malzemesi eğilmeye karşı güçlendirmede, çift yönlü GFRP malzemesi de kesmeye karşı güçlendirmede kullanılmıştır.

Deney kirişleri dört noktalı eğilmeye tabi tutulmuş ve monotonik yükleme yapılmıştır. Deneyler sonucunda karbon fiber dokuma ile güçlendirilen kirişlerde önemli miktarda yük taşıma kapasitesi artışı görülmüştür. Kesme kuvvetini karşılaması düşünülen cam fiber dokumalar etriye gibi davranmıştır. Bu nedenle güçlendirilmiş kirişlerde oluşan maksimum deplasman kontrol kirişine göre %200 artış göstermiştir. Sadece eğilme bölgesinde CFRP uygulanan kirişler %31 daha fazla yük taşıırken, kesmeden göçmüşlerdir. Aynı biçimde, sadece kesme için GFRP ile güçlendirilen kirişlerde %31 yük artışı sağlanmış, ve bu kirişler eğilmeden göçmeye ulaşmıştır.

Ahmed ve diğerleri (2001)

Bu çalışmada karbon fiber dokumanın bitim yüzeyinde yada kabuk betonunda oluşan göçmeleri formüle etmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sunulan ifadeler deneysel veriler ve tasarım limitleri ile karşılaştırılmıştır. Yüzeydeki kayma gerilmesi ve maksimum deformasyon değerleri araştırılmıştır. Çalışmada yer alan ifadeler elde edilirken, karbon fiber uygulanmış uzunluk ve fiber dokumanın kesit alanı dikkate alınmıştır.

Çalışmada sunulan analitik modele göre, göçme modunda önemli olan parametre; beton ile güçlendirme elemanı arasındaki kayma gerilmesidir ve bu gerilme uç noktalarda maksimum değere ulaşır.

Deney programında 9 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş iki noktadan tekil yükleme ile test edilmiştir. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 2,5'dir. Kirişler iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup kirişler 2 kat CFRP ile güçlendirilmiştir. Deney değişkenleri; CFRP'nin bitiş noktası ile en yakın mesnet arasındaki uzaklıktır. İkinci grup kirişler 1, 2 ve 4 kat CFRP ile güçlendirilmiştir. Her iki grupta CFRP'nin genişliği ve uzunluğu aynıdır. Bu grupta değişken ise CFRP'nin kesit alanıdır. Yapılan deneyler sonucunda, CFRP'nin miktarı arttıkça eğilme göçmesinden başlayan, kabuk betonunun ezilmesine ve fiber dokumanın bitim noktasında kesilmesine giden modlar görülmüştür. CFRP uygulanmayan bölgenin boyu arttıkça

growth load (kesme çatlağı başladığında dokumanın uç kısmındaki yük) azalmıştır. Güçlendirme oranı arttıkça yük taşıma kapasitesi artmıştır. Bununla birlikte bu oran %8'i geçtiğinde verim azalmıştır. Kesitin çatlamasından sonra aynı yük düzeyinde güçlendirilen kirişlerdeki açıklık ortasındaki deplasman referans kirişe göre azalmıştır. Ayrıca CFRP miktarının (katman sayısı) artması elemanın yaptığı deplasmanı azaltarak daha gevrek bir davranışa neden olmuştur.

Maksimum yük açısından sunulan formülasyon deneysel sonuçlar dikkate alındığında oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Önceki çalışmaların ve sunulan çalışmanın ışığında dokumanın uç kısmındaki kesme çatlağının başlangıcına dayanan bir güvenlik faktörü önerilmektedir. Buna göre tasarım yükü “growth load” dan küçük olmalıdır. Deneyler göstermiştir ki bu çatlak başladığında, dokuma uygulanmayan uzunluğa ve kesme dayanımına bağlı olarak ani bir göçme görülebilmektedir.

Chaallal ve diğerleri (2002)

Bu çalışma betonarme T-kesitli kirişlerin çift yönlü karbon fiber dokumalar ile kesmeye karşı güçlendirilmesini incelemektedir. Çalışmanın amacı büyük ölçekli, düşük kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a/d) oranlarına sahip bu kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesindeki değişkenleri saptamaktır. Çalışma 4 farklı etriye aralığına sahip 4 seriden oluşmaktadır. Her seri referans elemanı ve 1, 2 ve 3 kat CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerden oluşmaktadır. Sonuçlara göre; CFRP katman sayısı arttıkça maksimum kesme kuvveti ve orta açıklık deplasmanı artmıştır. Çalışma ile optimum CFRP miktarı ve katman sayısı bulunmaya çalışılmıştır. Güçlendirilen kirişlerin sünekliğinin arttığı gözlenmiştir.

Deney programı çerçevesinde 14 adet gerçek ölçekli T-kesitli betonarme kiriş teste tabi tutulmuştur. Tek noktadan tekil yük uygulanarak yükleme yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, CFRP katman sayısı arttıkça maksimum kesme kuvveti artmıştır. Buna karşın en büyük etriye açıklığına sahip seride bu artış gerçekleşmemiştir. Bu sonuç optimum bir oranın var olduğunu göstermiştir. Ayrıca

CFRP katman sayısı arttıkça deformasyon miktarı azalmıştır. Karbon fiber dokumalar ile güçlendirilmiş elemanlar dokumanın betondan sıyrılması ve daha sonra yırtılması şeklinde göçme moduna ulaşmıştır.

ACI 318’de ifade edilen kesme kapasitesi formüllerinden çıkan sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırıldığında, teorik değerlerin %40–80 daha az olduğu görülmüştür. Buna göre CFRP miktarının kesmeye olan etkisi kiriş içindeki kesme donatısının oranına bağlıdır. CFRP ile güçlendirilen kirişlerdeki maksimum kesme kuvveti FRP katman sayısı ile doğru orantılı olarak artmış, fakat burada kesme donatısına da bağlı olan bir optimum oran olduğu gözlenmiştir.

Etkili CFRP miktarı toplam kesme oranının (etriye+CFRP) bir fonksiyonudur. Bu konuda yeni bir korelasyon geliştirilmiştir. CFRP düktiliteyi artırmıştır. Deneysel sonuçlara göre CFRP katman sayısı ile etriyenin optimum kombinasyonunda bu artış en büyük değere ulaşmıştır.

Khalifa ve Nanni (2002)

Çalışmada, kesmeye karşı yetersiz betonarme dikdörtgen kirişler karbon fiber levhalarla güçlendirilmiştir. Deney programında 12 adet birebir ölçekli basit mesnetli kiriş yer almaktadır. Deney elemanları etriye kullanılmış ve kullanılmamış elemanlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Bu gruplarda kendi içerisinde a/d oranına göre ikiye ayrılmıştır. Çalışmada değişken olarak, etriye miktarı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), karbon fiber levhanın miktarı ve kiriş üzerindeki dağılımı kullanılmıştır. Karbon fiber uygulama tipleri, U sargılama, kiriş eksenine paralel fiber uygulaması, 0 ve 90°’lik (2 kat) ve şerit biçimindedir. Deney sonuçlarına göre dıştan yapıştırılan CFRP levhaların kirişin kesme kapasitesini %40-%138 oranında arttırdığı görülmüştür. a/d oranının kesme davranışında önemli etkisi olduğu gözlenmiştir. Güçlendirilmiş etriyesiz kirişlerdeki kesme dayanımı artışının etriyeli olanlara göre daha fazla olduğu saptanmıştır.

Pellegrino ve Modena (2002)

Bu çalışma FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme kapasite hesabı modellerini daha iyi anlayabilmek amacını içermektedir. Deneysel programın amaçları, etriye içermeyen ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tasarım aşamalarını gözden geçirmek ve kesme donatısı ile FRP arasındaki etkileşim üzerinde durarak varolan formülasyonları daha ileri götürmektir.

Deney programı a/d oranı 3 olan 11 adet betonarme kiriş içermektedir. Referans eleman hariç bütün elemanların yan yüzeylerine güçlendirme uygulaması yapılmıştır ve bu güçlendirme oranı farklılık göstermiştir. Simetrik iki tekil yük uygulanmış ve monotonik yükleme yapılmıştır. Çalışma sonucunda FRP elemanların taşıdığı kesme kuvveti hesaplanırken kullanılan azaltma faktörü için yeni bir yaklaşım getirilmiştir.

Diagana ve diğerleri (2003)

Bu çalışmada dikdörtgen kesitli kesme açısından yetersiz betonarme kirişler CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme malzemesi dört değişik şekilde uygulanmıştır. Deney programı 2 kontrol elemanı ve 8 güçlendirilmiş eleman içerir. Şeritler düşey yada 45° açılı, U veya bohçalama biçimlidir. Çalışmanın amacı CFRP şeritlerin açıklığının ve sargılama biçiminin kesme kapasitesine etkilerini araştırmaktır.

Toplam 10 kiriş teste tabi tutulmuştur. Basit mesnetli olarak orta noktalarından yüklenen bu kirişlerde yük monotonik olarak artırılmıştır. Güçlendirilecek olan 8 kiriş iki gruba ayrılmıştır. İlk grup U biçimli şeritler ile güçlendirilmiştir. Bunlardan ikisi düşey şeritlerle, şerit aralığı 200 ve 250 mm olacak şekilde düzenlenmiştir. Diğer iki kiriş ise 45° açılı şeritlerle ve aralıkları 300 ve 350 mm biçiminde oluşturulmuştur. İkinci gruptaki kirişler bohçalama biçiminde uygulanan CFRP ile güçlendirilmiştir. Bu gruptaki şerit düzenlemeleri de aynı birinci gruptaki gibidir. Şerit genişliği 40 mm olarak belirlenmiştir.

CFRP şeritlerin maksimum yüke etkisi şerit aralığı ve kaplamanın biçimi ile değişmiştir. Bu yük şerit aralığı arttıkça azalmıştır. Bohçalama uygulamasında maksimum yük U sargılamaya göre çok daha fazla olmuştur. 45° açılı uygulamada, U şeklindeki sargılama bohçalamaya göre daha etkili olmuştur. U sargılamada 45° açılı uygulama düşey şeritlere göre maksimum yükte daha fazla artış sağlamıştır. Tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. U şerit uygulamasında deney elemanları CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. İkinci grupta göçme, CFRP şeridin kopmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile gerçekleşmiştir.

Şerit aralığı azaldıkça kirişin rijitliği artmaktadır. U-sargılama biçimindeki uygulamalarda, CFRP şeritlerin betondaki eğik çatlakları geciktirdiği ve bu çatlakların gelişimini azalttığı görülmüştür. Ayrıca eğimli şeritler düşeylere göre daha etkili olmuştur.

CFRP şeritlerin kesme kapasitesine etkisi şerit aralığı, uygulama biçimi ve dağılımı ile değişmiştir. Bohçalama şeklindeki düşey şeritli uygulamada maksimum kesme kapasitesi U şeklindeki uygulamaya göre çok daha fazla olmuştur. 45° açılı uygulamada, iki uygulama biçimi arasında fazla fark oluşmamıştır.

Teng ve diğerleri (2004)

Bu çalışma kapsamında, FRP malzemesinin kullanım yerleri, malzeme tipleri ve kullanım şekilleri özetlenmiştir. Sonra daha önceki çalışmalarda ifade edilen kırılma modları ve bunların ne şekilde gerçekleştiği ifade edilmiştir. FRP malzeme ile güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitelerinin bulunmasında kullanılan yöntemler ve ifadeler ayrıntılı olarak irdelenmiş ve bu hesap yöntemlerinin doğruluğu ele alınmıştır. Daha önce yapılmış 95 adet deneysel çalışmaya ait veriler ACI 440, FIB ve Concrete Society yönetmelikleri ile yazarların geliştirmiş olduğu ifadeler kullanılarak karşılaştırılmıştır. 95 adet deney verisi üç grupta toplanmıştır. Bunlar, a) bohçalama yada U tipi sargılama yapılan ve FRP'nin kopması ile göçme moduna ulaşan 50 adet kiriş, b) U tipi sargılama ile güçlendirilen ve FRP'nin beton

yüzeyinden ayrılması ile göçme moduna ulaşan 13 adet betonarme kiriş, c) FRP şeritlerle güçlendirilen ve yine beton yüzeyinden ayrılma ile göçen 32 adet kirişten oluşmuştur. Daha sonra ise FRP malzemelerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini hesaplamaya yönelik genel denklemler irdelenerek, beton, çelik ve FRP'nin aralarındaki etkileşimin bu denklemi nasıl etkileyeceği belirlenmiştir. Son olarak alternatif FRP ile kesme güçlendirmesi malzemeleri ele alınmış ve gelecekteki kullanım yerleri ve biçimleri sunulmuştur.

Adhikary ve Mutsuyoshi (2004)

Araştırma kapsamında 8 adet dikdörtgen kesitli, a/d oranı 3 olan betonarme kiriş test edilmiştir. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme monotonik olarak gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları etriyesizdir. Deney elemanları çeşitli genişlik ve uygulama tipinde CFRP levhalar ile güçlendirilmiştir. Tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. Deney sonuçlarına göre, CFRP levhaların kiriş eksenine paralel ve dik uygulandığı deney elemanının dayanımı, CFRP levhaların kiriş eksenine paralel uygulandığı deney elemanından %11 daha fazladır. U biçimli levha uygulanan deney elemanlarının kesme dayanımı, CFRP levhaların sadece kirişin yan yüzlerine yapıştırıldığı deney elemanlarından %17 daha fazladır. Kesme açıklığı boyunca U biçimli levha yapıştırılan deney elemanın kesme dayanımında referans elemanına göre %100'den fazla artış sağlanmıştır.

Anl (2006)

Çalışmada 6 adet 1750 mm uzunluğunda T-kesitli betonarme kiriş kullanılmıştır. Betonarme kirişlerin a/d oranı 5'dir. Deney elemanları tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. 5 adet deney elemanın kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Deney programında iki adet referans eleman bulunmaktadır. İlk referansın kesme dayanımı eğilme dayanımından daha büyüktür. İkinci referansın kesme dayanımı yetersizdir. Deney elemanlarının kesme dayanımları a) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan, eksenleri arasında 285 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerle, b) kiriş yatay eksenine ile ± 45 derece açı yapan, eksenleri

arasında 285 mm aralık bulunan 100 mm genişliğinde CFRP şeritlerle, c) kiriş yatay eksenini ile ± 45 derece açı yapan, eksenleri arasında 143 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerle, d) kiriş yatay eksenini ile ± 45 derece açı yapan, eksenleri arasında 285 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerle artırılmıştır. Bu deney elemanında uygulanan çapraz CFRP şeritlere 100 mm genişliğinde kiriş yatay eksenini ile 90 derece açı yapan U biçimli şeritler yapıştırılmıştır. Elemanlarda CFRP şeritlerin alt ve üst uçlarında mekanik ankraj uygulanmıştır. Referans elemanlardan ilki eğilmeden, ikincisi kesmeden göçmüştür. A grubundaki deney elemanı CFRP şeritlerin kopmasıyla kesmeden göçmüştür. B grubundaki elemanın boyuna donatısı akmıştır. Deney elemanı, boyuna donatısının hemen altından kabuk betonun gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. C elemanı kabuk betonun gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Son deney elemanı ise eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deney elemanlarının kesme dayanımlarında %79–119 kat artış sağlanmıştır. Çalışmada geliştirilen ankraj detayı tersinir-tekrarlanır yükleme altında başarılı olmuştur. Deney elemanlarında, kiriş tablası ve gövdesini bir arada tutan kesme donatısı olmamasına rağmen gövdenin tablayla kesiştiği kesitte uygulanan ankraj detayı başarı göstermiştir. Böylece CFRP şeritlerin uç bölgelerinin betondan ayrılması ve kiriş tabla ve gövdesinin birbirinden ayrılması engellenmiştir. Alt boyuna donatısının hemen üstünde uygulanan ankrajlarda CFRP şeritlerin uçlarının betondan ayrılmasını engellemiştir.

Mosallam ve Banarjee (2007)

Bu çalışmada CFRP dokumalarla onarılan ve güçlendirilen 9 adet betonarme kirişin davranışı ve kapasiteleri deneysel çalışma kapsamında irdelenmiştir. Üç farklı güçlendirme uygulaması yapılmıştır. Bunlar, karbon fiber ıslak epoksi uygulaması ile güçlendirme, cam fiber ıslak epoksi uygulaması ile güçlendirme ve önceden kür edilmiş karbon fiber şeritler ile güçlendirme. Üç kiriş referans olarak seçilmiş, üç eleman güçlendirilmiş ve üç eleman da onararak güçlendirmeye tabi tutulmuştur. Dikdörtgen kesitli olan deney örnekleri gerçek ölçekli olup a/d oranları 1,8 seçilmiştir. Deneyler sonucunda onarılan ve güçlendirilen deney elemanlarının kesme kapasiteleri referansa göre büyük oranlarda artmıştır. Analitik çalışma kapsamında çeşitli deneysel ifadeler ve yönetmeliklere göre bulunan kesme

kapasiteleri karşılaştırılmıştır. ACI-440 yönetmeliğinin a/d oranını hesap aşamasında dikkate almaması nedeni ile farklı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. En iyi sonucu Matthys ve Triantafillou'ya (Matthys ve Triantafillou, 2001) ait olan yaklaşımın verdiği ifade edilmiştir.

Bencardino ve diğerleri (2007)

Çalışmada dört adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş monotonik olarak uygulanan simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Çalışmada, CFRP ile güçlendirilen kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Deney elemanlarına ankraj uygulanmıştır. Ankrajlar, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını engellemişlerdir. Deney elemanlarında etriye bulunmamaktadır. İki adet deney elemanı referans elemanı olarak belirlenmiştir. a/d oranı 6,9 olan referans elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. a/d oranı 3,4 olan referans elemanı kesmeden göçmüştür. a/d oranı 3,4 olan iki deney elemanı CFRP kullanılarak güçlendirilmiştir. Deney elemanının sadece eğilme dayanımı artırılmıştır. Diğer deney elemanının önce eğilme dayanımı artırılmış daha sonra U biçimli CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılmıştır. Deney elemanında ankraj olarak U biçimli çelik etriyeler kullanılmıştır. Eğilme dayanımı artırılan deney elemanı kesmeden göçmüştür. Eğilme dayanımı artırıldıktan sonra U biçimli CFRP levhalarla güçlendirilen deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deneysel çalışmada tasarlanan ankraj detayı ile kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişin eğilme kapasitesine ulaştığı görülmüştür.

BÖLÜM İKİ

MALZEMELER ve DENEY ELEMANLARI

2.1 Lif Donatılı Polimerler Hakkında Genel Bilgi

Sentetik plastik malzemeler 1940'lerden itibaren yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kolay şekil alması, metallere göre düşük yoğunlukta olması, yüzey pürüzsüzlüğü ve korozyona karşı dayanımı gibi üstün özellikleri nedeni ile fazlaca kullanım alanı bulmuşlardır. Sertlik ve dayanımının düşük olması nedeni ile 1950'lilerden itibaren polimer esaslı kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Polimer kompozit malzemeler, yüksek dayanım, sertlik, aşınmaya karşı dayanım gibi özellikleri ile avantaj sağlamaktadır.

Kompozit malzemeler reçine (matriks) ve takviye bileşenlerden oluşur. Temel olarak reçine içine gömülmüş olan sürekli veya kırılmış biçimde elyaflardan oluşurlar. Bu bileşenler birbiri içinde çözülmez veya karışmazlar. Kompozit malzemede elyaf, sertlik ve dayanım gibi yapısal özellikleri sağlar. Reçine ise elyafı birbirine bağlar, yükün elyaflar arasında dağılımını ve dış etkenlere karşı dayanımını sağlar.

İnşaat mühendisliğindeki malzeme ihtiyacındaki gelişmelere bağlı olarak lif donatılı polimerler birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler;

- Mevcut yapıların onarım ve güçlendirme işlerinde,
- Betonarme yapı elemanlarında eğilme yada kesme donatısı biçiminde,
- Yeni bir yapı elemanı olarak,

kullanılmaktadır.

2.1.1 Lif Donatılı Polimerlerin Özellikleri

Lif donatılı polimerlerin elyaf geometrisi ve tipi belirleyici unsurdur. Bu malzeme, liflerin sıralı biçimde dizilmesi ile oluşur. Güçlendirme işlerinde kullanılan kompozit malzemenin biçimleri; cam elyaf ve polyester, karbon elyaf ve epoksi ve aramid elyaf ve epoksi şeklindedir. Bu bileşenler tek veya daha fazla katlı olarak kullanılabilirler. Lif donatılı polimerler lineer elastik davranış gösterirler. Çelik gibi sünek olmadıkları için betonarme elemanların sünekliğini sınırlandırır.

2.1.2 Lif Donatılı Polimerlerin Avantajları ve Kullanım Alanları

Dışarıdan uygulanan lif donatılı polimerler olumsuz çevre şartlarına dayanıklıdır. Korozyona uğramazlar. Bu özellikleri uygulandığı yapı elemanlarının ömrünü uzatmaktadır. Lif donatılı dokumaların betonarmeye göre avantajları şunlardır;

- Yüksek dayanım/yoğunluk oranı,
- Yüksek elastisite modülü/ağırlık oranı,
- Düşük yoğunluğu,
- Yorulmaya karşı dirençli olmaları,
- Uygulama kolaylığı,
- Uygulama maliyetinin düşük olması,
- Uygulandığı yapı elemanının boyutlarını çok az değiştirmesidir.

2.1.3 Lif Donatılı Polimerlerin Çeşitleri

Lif donatılı polimerler üç tipte üretilmektedir. Bunlar cam, aramid ve karbon fiber donatılı polimerlerdir.

Cam Lif Donatılı Polimerler

Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyumoksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Elyaflar üretim aşamasında dayanımlarının %50'sini

kaybetmelerine karşın oldukça yüksek dayanıma sahiptirler. Aramid ve karbon elyaflara göre yüksek dayanımlıdır.

Cam elyafın kullanım amacına bağlı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyafın çapı ve demetteki lif sayısı değişebilir. Elyaf biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanıklı hale getirilmesi için kimyasal maddeler ile kaplama işlemi yapılır. Elyaf ile reçinenin birbirine yapışması önemlidir. Bu sağlanmaz ise, birbirinden ayrılan elyaf ve reçine sertlik ve dayanım açısından yeterli performansı veremez.

Aramid Lif Donatılı Polimerler

Aramid ismi bir çeşit naylon olan aromatik poliamidden gelmektedir. Aramid elyafı daha çok ticari isimleri olan Kevlar ve Twaron olarak bilinir. Önemli özellikleri şunlardır;

- Düşük yoğunluktadır.
- Dayanımı yüksektir.
- Yüksek darbe dayanımına sahiptir.
- Aşınma dayanımı yüksektir.
- Kimyasal etkilere dirençlidir.
- Yorulma etkisine karşı dayanıklıdır.
- Kevlar elyafı polimerler cam elyafı polimere göre %35 daha hafiftir.

Karbon Lif Donatılı Polimerler

Cam elyafının metallere göre sertliğinin oldukça düşük olması nedeni ile karbon lifli elyaf üretimi başlamıştır. Karbon elyaflar epoksi reçineler ile birleştirildiğinde dayanım ve sertlik özellikleri çok fazla artmaktadır. Karbon lif dokumalar sürekli gelişim süreci göstermiştir. Bu nedenle, önceleri sadece belli alanlarda kullanabilen bu malzeme artık inşaat sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Piyasada iki biçimde bulunurlar. Bunlar, sürekli ve kırılmış elyaflardır.

Karbon elyafı iki malzemeden elde edilir. Bunlar zift ve poliakrilonitrildir (PAN). PAN esaslı karbon lif dokumalar yapı sektöründe daha çok kullanılmaktadır. Karbon elyafının diğer elyaflara göre en önemli avantajı düşük yoğunluğu ve çok yüksek elastisite modülüdür.

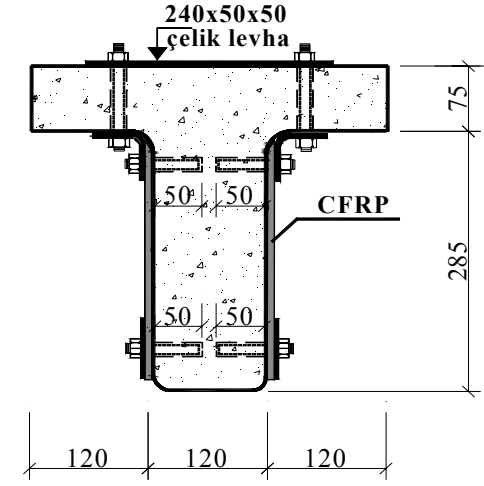
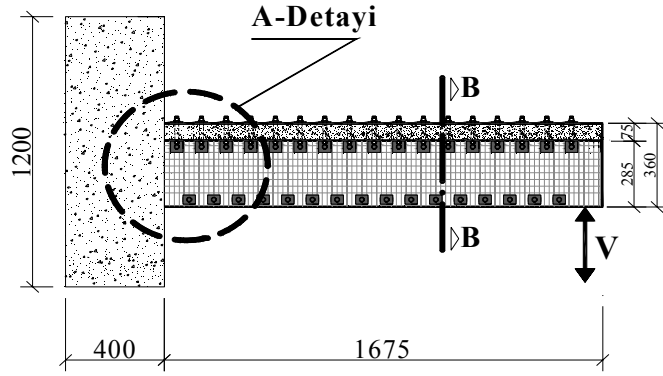
Kompozit malzemeler genelde iki yöntemle üretilir. Bunlardan ilki elle yatırma (hand lay-up) yöntemidir. Burada dokuma veya kırılmış elyafdan oluşan malzeme hazırlanmış kalıp üzerine elle yatırılır ve sıvı reçine malzemeye emdirilir. Bu üretimde reçine elyafa çok iyi emdirilmelidir. İşçiliği fazla bir yöntem olmasına rağmen küçük çaplı üretimler için uygundur. Diğer yöntem ise püskürtme (spray-up) yöntemidir. Bu yöntem elle yatırma yönteminin makineleşmiş biçimi olarak ifade edilebilir. Elyaf kalıp yüzeyine içine sertleştirici eklenmiş reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür.

2.2 Deneysel Çalışma

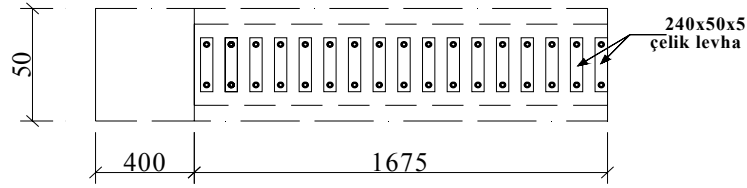
2.2.1 Genel

Betonarme yapılarda çeşitli nedenlerden kaynaklanan kesme problemleri ile sıkça karşılaşilmektedir. Bu tip yapı elemanları eğilme açısından yeterli kapasiteye sahip olsalar bile kesme dayanımlarının yetersizliği nedeni ile güçlendirme ihtiyacı duymaktadırlar. Bu tip elemanların deprem sırasındaki kesme kırılmaları ani ve yıkıcı olmaktadır. Güçlendirme işlemi yapılırken amaç, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, düktilitesini, deplasman kapasitesini mevcut durumunun üzerine çıkarmaktır. Bu çalışmada, dışarıdan levha şeklindeki karbon lifli donatılarla güçlendirilmiş yetersiz kesme dayanımına sahip kirişler incelenmiştir. Bu kirişler, tersinir-tekrarlanır düşey yükler altında test edilmiştir.

Deney elemanları 3/5 geometrik ölçekte ankastre kiriş olarak seçilmiştir. Deney elemanlarını ve ankraj yerleşimini gösteren çizim Şekil 2.1’de sunulmuştur. Deneyler laboratuarda bulunan rijit deney platformunda gerçekleştirilmiştir. Ankastreliği sağlayabilmek için kiriş, temel kirişinden platforma rijit bir şekilde bağlanmıştır.

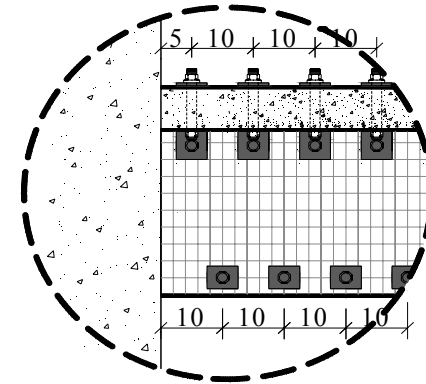


B-B Kesiti



Üst Görünüş

Ölçüler mm dir.



A-Detayı

Şekil 2.1 Deney elemanlarının görünüşleri ve ankraj yerleşimleri

Ayrıca temel kirişi deplasman ve dönmeyi minimuma indirmek amacı ile çelik bir çerçeve içine alınmıştır. Yükleme deney platformuna kurulan yükleme düzeneği yardımı ile uygulanmıştır.

Deneyler yapılırken davranışta ve dayanımda oluşan değişimler dikkatli bir biçimde izlenmiş ve kaydedilmiştir. Her deneyin anlatıldığı kısımdan sonra, elemana ait yük-deplasman (kesme kuvveti-kiriş uç net deplasmanı), deformasyon ölçerlere ait yük-birim deformasyon eğrileri verilmiştir. Deney anlatımı yapılırken, kiriş ucundan ölçülen toplam deplasmana ait deplasman değerleri ifade edilmiştir. Deney elemanlarına ait bazı fotoğraflar metin içerisinde sunulmuştur. Her yük çevrimine ait gelişmeler sırası ile açıklanmıştır. Ancak önemli bir gelişmenin gözlenmediği çevrimlerden bahsedilmemiştir. Deneyler, elemanların deney döşemesi üzerindeki konumlarına göre anlatılmıştır.

2.2.2 Deney Elemanları

Deney programı 8 adet kiriş içermektedir. Tüm deney elemanları geometri ve donatı açısından özdeştir. Deney programında test edilen kirişler Tablo 2.1’de sunulmuştur. 1 no’lu deney elemanı kontrol elemanı olarak seçilmiş ve güçlendirme yapılmamıştır. 2 no’lu eleman 45° açıya sahip 2 katlı ve tek yönlü karbon lifli dokuma levhalarla güçlendirilmiştir. Kirişin sadece yan yüzlerine uygulama yapılmıştır. 3 no’lu eleman kiriş eksenine dik (90°) ve kiriş eksenine paralel (0°), 2 katlı ve tek yönlü ve kiriş yan yüzlerine uygulanan karbon lifli dokuma ile güçlendirilmiştir. Deney elemanı-4 çift yönlü ve tek katlı malzeme ile güçlendirilmiş ve kiriş yan yüzlerine lif dokuma uygulanmıştır. 5. deney elemanı 120° ve 60° ’lik açı yapan 2 kat ve tek yönlü karbon fiber dokuma ile güçlendirilmiştir. Burada da kiriş yan yüzlerine uygulama yapılmıştır. 6 no’lu eleman çift yönlü ve çift kat lifli dokuma ile güçlendirilmiş, kiriş yan yüzlerine uygulama yapılmıştır. 7. deney elemanı çift yönlü ve tek katlı olarak güçlendirilmiştir. Tabla altı ve kiriş altını kapsayan sürekli bir levha şeklinde uygulama yapılmıştır. 8 no’lu deney elemanı çift yönlü ve çift katlı karbon lifli dokuma ile güçlendirilmiştir. 7 nolu elemanda olduğu gibi kiriş altını ve tabla altını da içeren bir uygulama düzeni yapılmıştır.

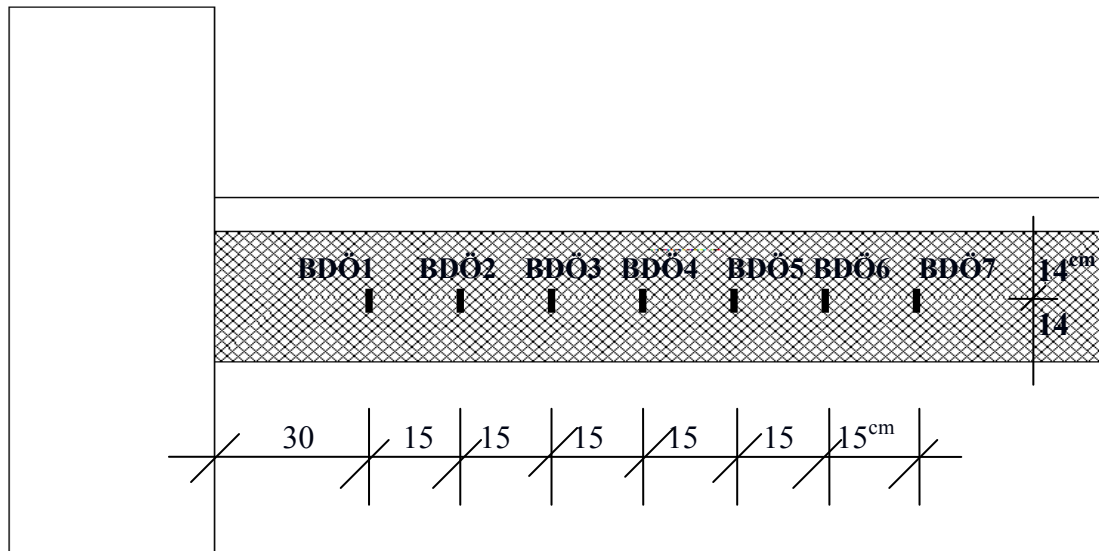
Tablo 2.1 Deney programı özeti

Deney eleman no	Uygulanan işlem	Güçlendirme tipi	Uygulama biçimi	Katman sayısı	Mekanik ankraj
1	Referans elemanı				
2	Güçlendirme	Tek yönlü CFRP, 135/45° uygulama	Yan yüzlere	n=2	Var
3	Güçlendirme	Tek yönlü CFRP 90/0° uygulama	Yan yüzlere	n=2	Var
4	Güçlendirme	Çift yönlü CFRP	Yan yüzlere	n=1	Var
5	Güçlendirme	Tek yönlü CFRP 120/60° uygulama	Yan yüzlere	n=2	Var
6	Güçlendirme	Çift yönlü CFRP	Yan yüzlere	n=2	Var
7	Güçlendirme	Çift yönlü CFRP	Uygulaması	n=1	Var
8	Güçlendirme	Çift yönlü CFRP	Uygulaması	n=2	Var

Deney elemanlarında CFRP üzerinden deformasyon ölçümleri almak amacı ile birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Her deney elemanında aynı özelliklere sahip deformasyon ölçerler kullanılmış ve aynı yerleşim düzeni ile deney elemanları üzerine yapıştırılmıştır. Bu yerleşime ait çizim Şekil 2.2’de sunulmuştur.

Tüm güçlendirilmiş deney kiriş elemanlarında ankraj uygulaması yapılmıştır. Bu kirişlerin gövdesinin üst kısmında 50 mm genişliğinde 50×50×5’lik korniyer parçaları ile ankraj işlemi yapılmıştır. Ayrıca bu ankraj tablaya da bağlanmıştır. Korniyer parçasının iki yüzünde de delik açılmıştır. Kiriş gövdesine açılan deliklere Sikadur31 malzemesi kullanılarak 10 mm çapında sonsuz dişli çubuklar yerleştirilmiştir. Sonra, tablayı boydan boya geçen delikler hazırlanmıştır.

Korniyerde açılan deliklerden 10 mm çapındaki ankraj çubukları geçirilmiş, pul ve bulon yardımı ile gövde ve tablaya sıkıca bağlanmıştır. 2,3,4,5 ve 6 no'lu deney elemanlarının üst ve alt kısmına ankraj yapılmıştır. 7 ve 8 no'lu elemanlarda ise karbon fiber dokuma kiriş altını da dolaştığı için sadece üst kısımlarda ankraj uygulaması vardır.



Şekil 2.2 Deney elemanlarında birim deformasyon ölçerlerin yerleşimi

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi kesmeye karşı güçlendirme işlemi yapılırken değişkenlerden biri karbon fiber dokumanın tipidir. Liflerin doğrultusu tek yönde yada her iki yönde olabilir. Buna göre tek yönlü ve çift yönlü karbon fiber dokumalar çalışmada kullanılmıştır. Başka bir değişken karbon lif dokumanın uygulama açısıdır. Tek yönlü karbon fiberler çeşitli açılarda uygulanarak farklılıklar gözlenmiştir. Katman sayısı da değiştirilerek güçlendirmeye etkisi incelenmiştir. Ayrıca dokumanın kesite uygulama şekli de değişken olarak incelenmiştir. Kiriş yan yüzlerine ve tabla ve kiriş altını dolaşan iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir.

2.2.2.1 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının üretimi donatıların hazırlanması ile başlamaktadır. Çok sayıda üretilen deney elemanlarına dıştan uygulanacak olan güçlendirme yönteminin hassas uygulama aşaması nedeni ile çelik kalıp kullanılmıştır. Üretilen deney

elemanlarının geometrik boyutlarının son derece hassas olması gerekliliği ve deney sürecini hızlandırmak amacı ile 2 adet çelik kalıp üretilmiştir. Temel kirişi ve kirişe ait donatılar birlikte hazırlanmıştır. Kirişte altta ve üstte 3 adet $\phi 20$ StIII nervürlü boyuna donatı kullanılmıştır. Sadece yükleme bölgesinde lokal ezilmeleri engellemek amacıyla $\phi 6$ StI etriye kullanılmıştır. Temel kirişi rijitliği sağlamak amacı ile 10 adet $\phi 20$ StIII boyuna donatı ile üretilmiş ve 10 cm aralıklarla çift kollu $\phi 10$ etriye kesme donatısı olarak kullanılmıştır. Şekil 2.3’de çelik kalıp içerisine yerleştirilmiş donatı resmi görülmektedir.



Şekil 2.3 Kalıp içerisinde görülen donatı resmi

Çelik kalıp 3 mm saçtan imal edilmiştir. Çelik korniyerler ile desteklenerek rijitliği artırılmıştır. Hazırlanan donatılar kalıba yerleştirilmeden önce çelik kalıp yağlanmıştır. Donatılar pas paylarına özen gösterilerek yerleştirilmiştir. Daha sonra temel kirişinin rijit döşemeye bağlanabilmesi için pvc borular yardımı ile temel kirişinde 2 adet boşluk bırakılmıştır. Aynı şekilde yükleme kolonunu kiriş içerisinden geçirebilmek için kiriş uç kısmında da pvc boru yardımı ile boşluk bırakılmıştır.

Beton döküm işlemi Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan 250 dm³ kapasiteli betoniye ile yapılmıştır. Beton dökümünden önce kullanılacak uygun granülometreye sahip agrega ve kum, gerekli görüldüğü zamanlarda kurutularak hazır hale getirilmiştir. Beton döküm işlemi sırasında her karışım için hesaplanan agrega, kum ve çimento konulduktan sonra gerekli su miktarı eklenmiş ve en az 5 dakika karıştırılarak hazır hale getirilmiştir. Beton kalıp içerisine yerleştirilirken vibratör kullanılmıştır.

Beton dökümünden sonra deney elemanlarının kalıp yan yüzleri 1 gün sonra açılmış ve deney elemanı ıslak tutularak küre başlanmıştır. Tüm deney elemanlarına laboratuvar ortamında 28 gün süre ile kür uygulanmıştır.

Daha sonra güçlendirme yapılacak deney elemanlarının yüzey hazırlığına başlanmıştır. Karbon fiber uygulamasına başlanmadan el aletleri yardımı ile beton yüzeyi taşlanmıştır. Böylece beton üst tabakası alınarak yüzey pürüzlendirilmiştir. Sonra yapıştırma yüzeyindeki tozlar basınçlı hava püskürtülerek temizlenmiştir. Islak sünger ile temizleme yapılarak yüzeyler yapıştırmaya hazır hale getirilmiştir. Uygun boylarda kesilip hazırlanan Sikawrap 230C güçlendirme malzemesi tozdan uzak bir ortamda saklanmıştır.

Bu hazırlıklardan sonra yapıştırma için kullanılacak epoksi esaslı Sikadur 330'un hazırlanmasına geçilmiştir. İki bileşenden oluşan bu malzeme karbon fiber dokuma ile tamamen uyumludur. İki bileşen önce kendi kaplarında karıştırılır. Sonra dörde bir oranında olması gereken iki bileşen hassas biçimde tartılarak ayrı bir kaba alınır. Burada yaklaşık 3 dakika karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. İki bileşenin karıştırılması ile malzemenin çalışma süresi başlamaktadır. Bu durumu gözönüne alarak epoksinin miktarı iyi ayarlanmalı ve az miktarda epoksi hazırlanmalıdır. Şekil 2.4'de Sikadur 330 uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.4 Sikadur 330 uygulaması

Hazırlanan Sikadur 330 temiz yüzeye mala yardımı ile yaklaşık $0,7-1,2 \text{ kg/m}^2$ olacak biçimde sürülür. Daha sonra yüzeye göre ayarlanmış karbon lif dokuma epoksinin üzerine oturtulur. Bu işlem yapılırken liflerin şeklinin ve doğrultusunun bozulmamasına dikkat edilir. Hafifçe lifler üzerine bastırarak ve lif doğrultusunda ilerleyerek epoksinin lifli dokumanın üzerine çıkması sağlanır. Sonra karbon lif dokumanın üzerine yaklaşık $0,5 \text{ kg/m}^2$ ölçüsünde epoksi bir kat daha uygulanır. Yüzey mala yardımı ile düzgün hale getirilir ve kurumaya bırakılır. İki kat uygulanan karbon lifli dokumalarda, yüzeye daha fazla epoksi uygulanmış, lifler doğrultusunda bastırılarak epoksinin dışarıya doğru taşması sağlanmıştır. Dışarı taşan malzeme yetersiz ise yüzeye ekleme yapılır. İkinci kat karbon lifler yüzeye uygulanır ve üzerine yaklaşık $0,5 \text{ kg/m}^2$ epoksi sürülerek yüzey düzeltilir.

2.2.2.2 Deney Elemanlarının Modellenmesi

Betonarme yapılarda kirişler döşeme ile birlikte çalışmaktadırlar. Betonarme hesaplar da bu kabule göre yapılmaktadır. Bu yüzden deney elemanları tablalı kiriş olarak seçilmiştir. Seçilen T-kesitli kiriş ankastre olarak düşünülmüş ve uç kısmında

2.3 Malzeme Dayanımları

2.3.1 Donatı

Deney elemanlarında kullanılan donatılar tek seferde satın alınarak donatı özelliklerindeki değişimler azaltılmıştır. Kullanılan her çaptaki donatıdan alınan üçer adet örnek çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi Dartec marka bilgisayar kontrollü çekme deneyi düzeneği ile yapılmıştır. Bu deneylere ait gerilme-deplasman grafikleri Ek A'da verilmiştir. Donatıların ortalama akma ve kopma dayanımları Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2 Donatı dayanımları

Donatı Çapı ϕ (mm)	Donatı Sınıfı	Akma Dayanımı f_{sy} (MPa)	Kopma Dayanımı f_{su} (MPa)
6	S220	275,0	417,0
10	S220	304,2	443,1
20	S420	414,0	687,9

2.3.2 Beton

Deney elemanlarının beton sınıfının C25 olması hedeflenmiştir. Bu amaçla beton karışımının su/çimento oranı 0,55 olarak seçilmiştir. Agrega olarak dere malzemesi kullanılmıştır. Betondaki çakıl malzemesi 7–15 mm dane çaplı, kum ise 0–7 mm dane çaplı seçilmiştir. Bu iki tür agrega için elek analizi yapılmış ve %60 çakıl, %40 kum oranı belirlenmiştir. Çimento olarak standart PKÇ 32,5 Portland Çimentosu kullanılmıştır. 1 m³ beton için karışım oranları Tablo 2.3 de verilmiştir.

Tablo 2.3 1 m³ beton için karışım oranları

Malzeme	Ağırlık (kg)	Ağırlık oranı (%)
Çimento	400	17
Çakıl	1025	44
Kum	675	29
Su	220	10
Toplam	2320	100

Deney elemanlarının üretimi sırasında her elemandan 5 adet standart silindir örneği alınmıştır. Bu örnekler deney elemanları ile aynı şartlarda kür yapılmıştır. Bu örnekler 28 gün sonunda, Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan beton presi kullanılarak kırılmıştır (Şekil 2.6). Standart silindir numunelere ait ortalama beton basınç dayanımı değerleri Tablo 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.6 Beton silindir deneyi

Tablo 2.4 Deney elemanlarına ait beton basınç dayanımları

Deney eleman no	Beton basınç dayanımı f_c (Mpa)
1	30,6
2	28,8
3	29.6
4	27,9
5	30.1
6	31,2
7	28.8
8	28,4

2.3.3 CFRP

Güçlendirmede kullanılacak karbon lifli malzemeler için SikaWrap 230C ve SikaWrap 160C malzemeleri kullanılmıştır. SikaWrap 230C lifleri tek doğrultuda olan, SikaWrap 160C ise çift yönlü liflere sahip karbon lif donatılı polimerlerdir. Bu iki malzeme, betonarme, yığma ve ahşap yapı elemanları için dışarıdan uygulamalı, tek doğrultulu, örülü ve karbon lifli güçlendirme malzemeleridir. Tablo 2.5’de karbon lif donatılı polimerlerin belirgin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5 SikaWrap 230C ve SikaWrap 160C malzemesi özellikleri

Lif Yapısı	%99 ana doğrultuda,%1 destekleyici doğrultuda lifli	%50 ana doğrultuda,%50 destekleyici doğrultuda lifli
Ağırlığı	220 gr/m ²	160 gr/m ²
Kalınlığı	0,12 mm	0,045 mm
Liflerin çekme dayanımı	4100 N/mm ²	3800
Liflerin elastisite modülü	231000 N/mm ²	230000 N/mm ²
Kopmadaki uzama	%1,7	%1,5
Dokuma uzunluğu	50 m	50 m
Dokuma genişliği	600 mm	600 mm

2.3.4 Yapıştırma Malzemesi

Dıştan uygulanacak karbon lifli dokumanın deney elemanlarına yapıştırılmasında epoksi esaslı doyurma reçinesi olan Sikadur 330 marka epoksi kullanılmıştır. Sikadur 330 iki bileşenli, suya dayanıklı, yüksek dayanımlı, solventsiz yapıştırma harcıdır.

Sikadur 330'un birçok kullanım alanı olup beton, taş, metal, ağaç ve yapı malzemelerinin için çok iyi bir yapıştırıcı maddedir. Uygulaması kolaydır. Uygulamadan önce, sonra ve kür sonrası neme dayanıklıdır. Yüksek mukavemete sahip ve devamlı yükler altında yüksek bir sünme dayanımı göstermektedir. Sika Wrap fiber dokumaları ile tamamen uyumludur. Tablo 2.6'da Sikadur 330'un bazı özellikleri sunulmuştur.

Tablo 2.6 Sikadur 330 malzemesi özellikleri

Yoğunluk	1,31 kg/l
Karışım Oranı	A/B =4/1
Uygulama Sıcaklığı	10 -35 C°
Çekme Mukavemeti	30 N/mm ² (+23 C° 7 gün kür aldıktan sonra)
Eğilmede Elastisite Modülü	3800 N/mm ² (+23 C° 7 gün kür aldıktan sonra)

Ankraj Uygulamasında Kullanılan Epoksi

Ankraj uygulaması yapılırken, gövdeye uygulanan ankrajların yapılışında yapıştırma harcı olarak Sikadur 31 malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme, tiksotropik, iki bileşenli epoksi reçine ve özel olarak seçilmiş yüksek dayanımlı dolgu maddelerinin bir kombinasyonundan oluşmuş yapıştırma ve tamir harcıdır. Malzeme özellikleri Tablo 2.7'de verilmiştir.

Bu malzeme beton, taş, seramik, harç, çelik, cam gibi birçok yüzeyde yapıştırma ve tesviye amaçlı kullanılır. Ayrıca beton tamiratında, çatlak kapamada ve ankraj işlerinde kullanılabilir. Malzemenin önemli özellikleri şunlardır:

- Uygulaması kolaydır,
- Kuru ve nemli yüzeylerde kullanılabilir,
- Yüksek sıcaklıklarda bile akma yapmadan uygulanabilir,
- Rötire yapmaksızın sertleşir,
- Betona ve diğer birçok malzemeye mükemmel yapışır,
- Erken yüksek dayanım sağlar,
- Yüksek aşınma ve kimyasal dayanıma sahiptir,
- Tiksotropik özelliği nedeniyle, tavanda, kolonda (baş üstü ve düşey uygulamalarda), uygulanabilme özelliği sağlar.

Sikadur 31 malzemesinin bazı teknik özellikleri Tablo 2.7’de sunulmaktadır.

Tablo 2.7 Sikadur 31 malzemesi özellikleri

Yoğunluk	1,65 kg/l
Karışım Oranı	A/B=3/1
Uygulama Sıcaklığı	10 -20 C°
Basınç Dayanımı	60-70 N/mm ²
Çekme Dayanımı	15-20 N/mm ²
Yapışma (Çeliğe)	15 N/mm ²
Yapışma (Betona)	3.0-3.5 N/mm ²
Elastisite Modülü	4300 N/mm ²

2.4 Ankraj Uygulaması

Karbon lifli dokuma levhaların yüzeyden ayrılması göçme modlarından birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrılmayı geciktirmek yada tamamen önlemek amacı ile ankraj yapılmaktadır.

Deney elemanlarında kiriş gövdesine ve tablaya ankraj uygulanmıştır. Gövdeye yapılan ankraj karbon fiber dokumanın beton yüzeyinden ayrılmasını zorlaştırmak, tablaya yapılan ankraj ise tabla ve gövdenin birbirinden ayrılmasını engellemek

amacı ile yapılmıştır. Her iki ankraj çelik korniyerler yardımı ile birbirine bağlanmıştır. Ankraj uygulamasının yapım aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

Ankraj elemanları uygun boyda kesilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Ankraj çubukları sonsuz dişli, yüksek dayanımlı ϕ 12 mm çapında çelik elemanlardır. Kiriş gövdesine, kiriş tablasının alt kısmının 2,5 cm altından ve kiriş alt kenarının 4,5 cm üzerinden matkap yardımı ile delikler açılmıştır. Gövdedeki deliklerin derinliği 5 cm'dir. Üst kısımdaki delikler kiriş başlangıç noktasından 5 cm uzaklıktan itibaren, alt uçtaki delikler ise 10 cm'den itibaren açılmıştır. Her ikisi için de delikler arası uzaklık 10 cm'dir. Böylece şaşırtmalı bir delik düzeni sağlanmıştır. Tablada ise yine tablayı boydan boya geçen delikler açılmıştır. Tüm delikler basınçlı hava ile temizlenmiştir.

Delik açma işlemi bittikten sonra Sikadur 31 malzemesi hazırlanmıştır. İki bileşenli malzeme karışım oranına özen gösterecek şekilde temiz bir kaba alınmıştır. Burada hava sürüklenmesini engelleyecek biçimde en az 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Homojen bir karışım olmasına özen gösterilmiştir. Hazırlanan epoksi açılan deliklere ankraj çubukları yardımı ile doldurulmuştur. Bu sırada ankraj çubukları deliklere sokup çıkartılarak hava boşlukları alınmış ve epoksinin deliği yeterince doldurması sağlanmıştır. Yüzeye çıkan fazla malzeme temizlenmiştir. Epoksinin prizini tamamlaması için deney elemanları bir hafta bekletilmiştir.

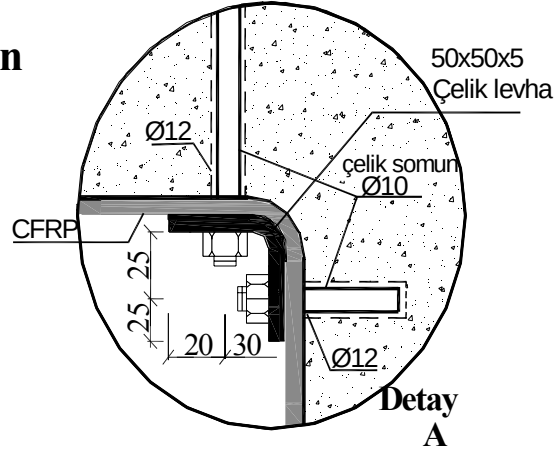
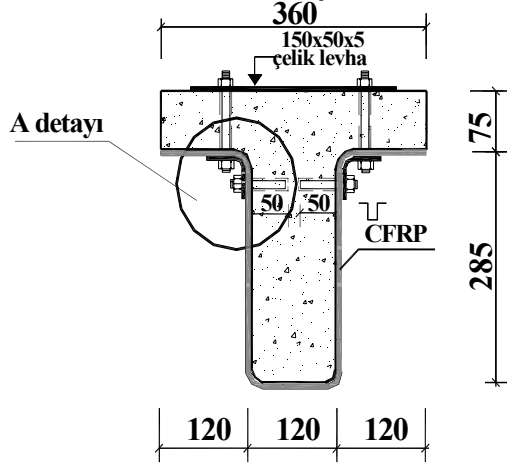
Hazırlanmış olan 50×50×5'lik ve 5 cm uzunluğundaki çok sayıda korniyer parçası kirişe açılan deliklere uyacak şekilde delinmiştir. Korniyer parçaları tablaya açılan deliğe ve gövde üstündeki ankraja uyacak şekilde yerleştirilerek, tabla üstünde karşılıklı gelen ankraj çubukları hazırlanan lamalar yardımı ile birbirine bağlanmıştır. Bu parçalar uygun boyda ve 5 cm genişliğinde, 3 mm kalınlığında çelik levhalardır.

Böylece tabla üstündeki deliklerden ve alt uçta korniyerdeki delikten ankraj çubukları geçirilmiştir. Diğer korniyer deliğinden ise gövdedeki ankraj çubuğu geçmektedir. Böylece birbirine bağlanan elemanlar pul ve bulon kullanarak sıkılmış ve sabitlenmiştir (Şekil 2.7). Ankraja ait detay Şekil 2.8'de verilmiştir.

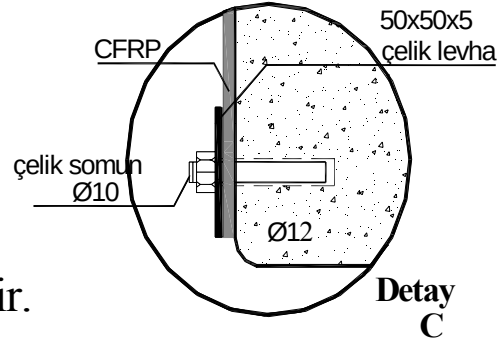
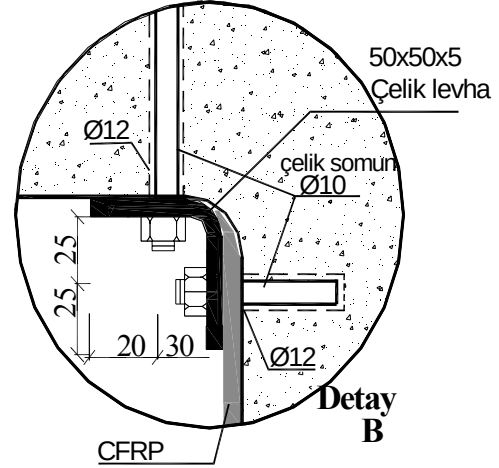
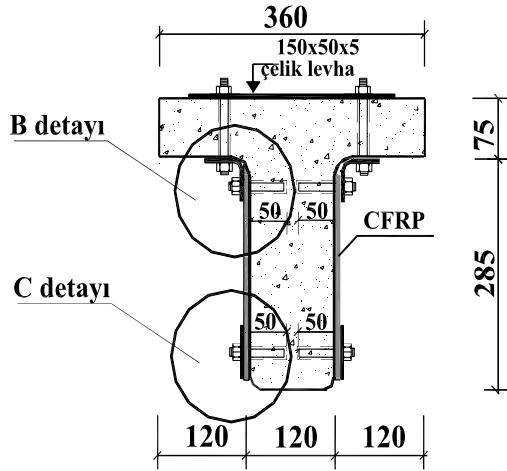


Şekil 2.7 Mekanik ankraj uygulaması

7 ve 8 nolu deney elemanları için



2-6 nolu deney elemanları için



ölçüler mm dir.

Şekil 2.8 Ankraj detayı

2.5 Deney Düzeni

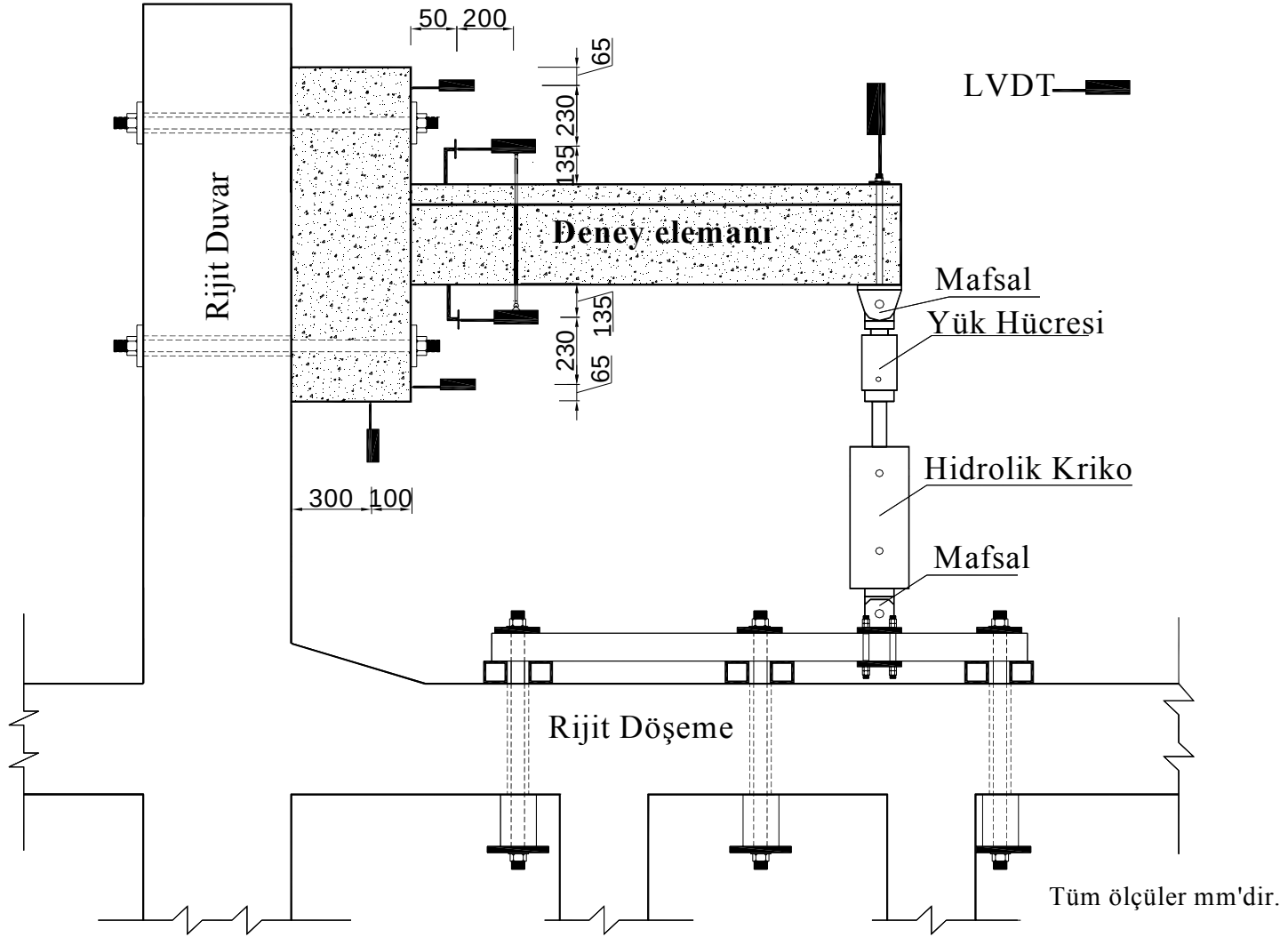
2.5.1 Yükleme Düzeni

Deneyler Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan rijit deney platformunda yapılmıştır. Bu platform 40 cm kalınlığında rijit bir döşeme ve rijit bir duvardan oluşmaktadır. Elemanlar platforma 80 cm aralıklı delikler yardımı ile bağlanabilmektedir. Tasarlanmış olan deney düzeneği Şekil 2.9'da sunulmuştur. Deney elemanı temel kirişinde bırakılan iki dairesel boşluğun içinden geçen ϕ 42 mm çapındaki yüksek dayanımlı çelik çubuklar yardımı ile rijit platforma sıkıca bağlanmıştır. Deney elemanının ankastre olarak çalışabilmesi için temel kirişi etrafına çelik bir kafes yapılmıştır.

Yükleme için, rijit platform ile deney elemanı arasında yükleme kolonu yapılmıştır. Bu eleman iki adet U50 profilin birbirine kaynaklanması sonucu oluşan kutu profil şeklindedir. Yükleme kolonu 3 noktadan ϕ 42 mm çapındaki yüksek dayanımlı çelik çubuklar yardımı ile rijit döşemeye bağlanmıştır. Yükleme kolonu altına kutu profiller konarak yerden yükseltilmiş ve yatay düzleme getirilmiştir. Daha sonra yükleme kolonu ve eleman arasına, alt ve üst uçlara, yükleme düzlemi içinde çalışan iki adet mafsal yerleştirilmiştir. Bu iki mafsalın arasına ise, 500 kN basınç, 250 kN çekme kapasiteli ve 300 mm hareket boyuna sahip bir hidrolik krikon yerleştirilmiştir. Ayrıca yüklemenin ölçülmesi için 600 kN basınç ve 300 kN çekme kapasiteli bir yük hücresi kullanılmıştır. Deney düzeneği için özel olarak üretilen hidrolik krikon basınca ve çekmeye çalışabilmektedir. Krikonun hareket boyu deney öncesinde çekme ve basınç için eşit olarak paylaştırılmıştır. Deney sırasında yükleme hidrolik krikoya bağlanmış olan el kontrollü pompa ile yapılmıştır.

Kirişin ucunda bırakılan boşluktan ϕ 20 mm çapında iki ucunda dış açılmış çelik çubuk geçirilmiştir. Bu çubuk kiriş üstünde kirişi ezmemesi için kullanılan 20 mm kalınlığında bir levha ve bulon yardımı ile mesnetlenmiştir. Kiriş alt ucunda ise, kiriş yüzeyine tam olarak oturan bir mafsal kullanılmıştır. Mafsalın ortasında çelik çubuğun dişli ucunun geçebildiği bir delik bulunmaktadır. Bu şekilde kirişin bu

noktasında rijit bir birleşim oluşturulmuştur. Yük hücresinin her iki ucunda dış açılmış uygun uzunlukta boşluklar bırakılmıştır. Bu uçlara özel olarak yaptırılan dişli parçalar yardımı ile hidrolik krik o alt uçtan mafsala, üst ucundan yükleme hücresine ve yükleme hücresi de üst ucundan kiriş altındaki mafsala bağlanmıştır. Alt uçtaki mafsala, bağlantı elemanı yardımı ile çelik bir levhaya oturtulmuş, bu çelik levha dört köşesinde açılan delikler ve altına konulan ikinci bir levha yardımı ile yükleme kolonuna sabitlenmiştir. Bu düzenek yardımı ile ankastre mesnetlenmiş kirişte, deney elemanının uç noktasından depremi benzeştirecek biçimde tersinir-tekrarlanır yükleme yapılabilmektedir. Her deney öncesinde yükleme düzeneğinin kiriş eksenine dikliği, hareket boyunun çekme ve basınca eşit paylaşımı kontrol edilmiştir. Yükleme ve ölçüm düzeneğine ait ayrıntılar Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 Yükleme ve ölçüm düzeneği

Deneylere yük kontrollü olarak başlanmış ve elemanın taşıdığı maksimum yükten sonra deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Yükleme, hidrolik pompa yardımı ile mümkün olduğu kadar dikkatli biçimde ve deney sırasında oluşan çatlak gelişimini gözleyecek bir hızda yapılmıştır.

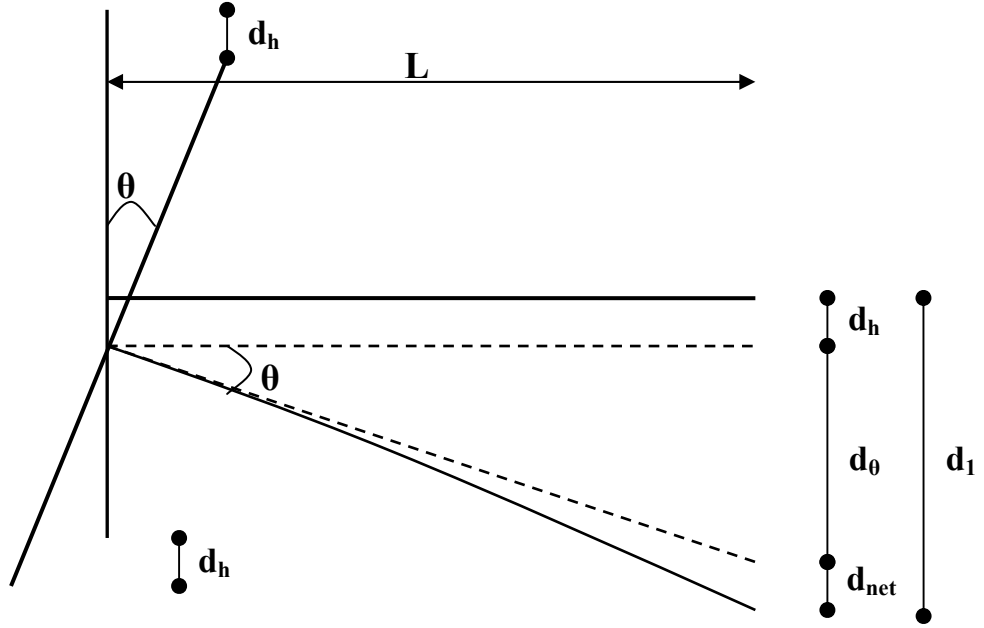
2.5.2 Ölçüm Düzeni

Deneylerde deplasman ölçümleri için LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) kullanılmıştır. Bu ölçüm aleti deplasman değişimlerini 10^{-4} mm hassasiyetinde elektronik olarak ölçebilmekte ve ölçümleri veri toplayıcı yardımı ile bilgisayar ortamına aktarabilmektedir. Bu veriler veri toplayıcı için özel olarak hazırlanan bilgisayar programı vasıtası ile sayısal ve grafiksel olarak eşzamanlı bir biçimde deney sırasında izlenebilmektedir. 6 adet LVDT deneylerde kullanılmıştır. LVDT ölçümleri ile kiriş uç nokta deplasmanı, rijit ötelenme ve moment-eğrilik ölçümleri alınmıştır. Birim deformasyon ölçerler (strain-gauge) kullanılarak dıştaki CFRP elemanları üzerinden deformasyon ölçümleri alınmıştır. Her deney elemanında deplasman ölçerler ve birim deformasyon ölçerler kiriş üzerinde aynı yere monte edilmiştir.

2.6 Ölçümlerin Değerlendirilmesi

2.6.1 Kiriş deplasman ölçümü

Kiriş uç deplasmanının hesaplanması için kullanılan deformasyon geometrisi Şekil 2.10'da verilmiştir. Kiriş uç net deplasmanı, deney elemanının mesnedinde ölçülen rijit kütle deplasmanları dikkate alınarak (2.3) no'lu bağıntı ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.10 Deney elemanının deformasyon geometrisi

(2.3) bağıntısında;

d_4, d_5, d_6 : Kiriş mesnet deplasmanlarını,

θ : Rijit dönmeyi,

d_1 : Ölçülen deplasmanı,

d_h : Kiriş mesnedi rijit düşey deplasmanını,

d_θ : Dönmeden oluşan deplasmanı,

d_{net} : Kiriş net deplasmanını,

L : Kirişin boyunu,

h : Mesnette “d4” ve “d5” LVDT’ler arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

$$d_h = d_6 \quad (2.1)$$

$$d_\theta = \frac{d_4 - d_5}{h} \cdot L \quad (2.2)$$

$$d_{net} = d_1 - d_h - d_\theta \quad (2.3)$$

2.6.2 Birim deformasyonların hesaplanması

Deneyler sırasında CFRP levhalar üzerinden birim deformasyon ölçümleri alınmıştır. Birim deformasyon ölçerler mekanik hareketleri elektronik sinyallere dönüştüren ölçüm aletleridir. Bu nedenle CFRP şeritlerde gerçekleşen birim deformasyonlar değişiklikleri mili volt cinsinden ölçülmüş, (2.4) bağıntısı yardımı ile birim deformasyona dönüştürülmüştür.

$$V_o = -\frac{GF \times \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \times \frac{\varepsilon}{2}} \right) \times V_i \times GAIN \quad (2.4)$$

Burada;

V_o : Okunan mili volt değerini,

V_i : Uygulanan gerilimi,

GF : Birim deformasyon faktörünü ($GF= 2$),

$GAIN$: Kanal kazanç değerini ($GAIN= 420$),

ε : Birim deformasyon değerini,

göstermektedir.

BÖLÜM ÜÇ

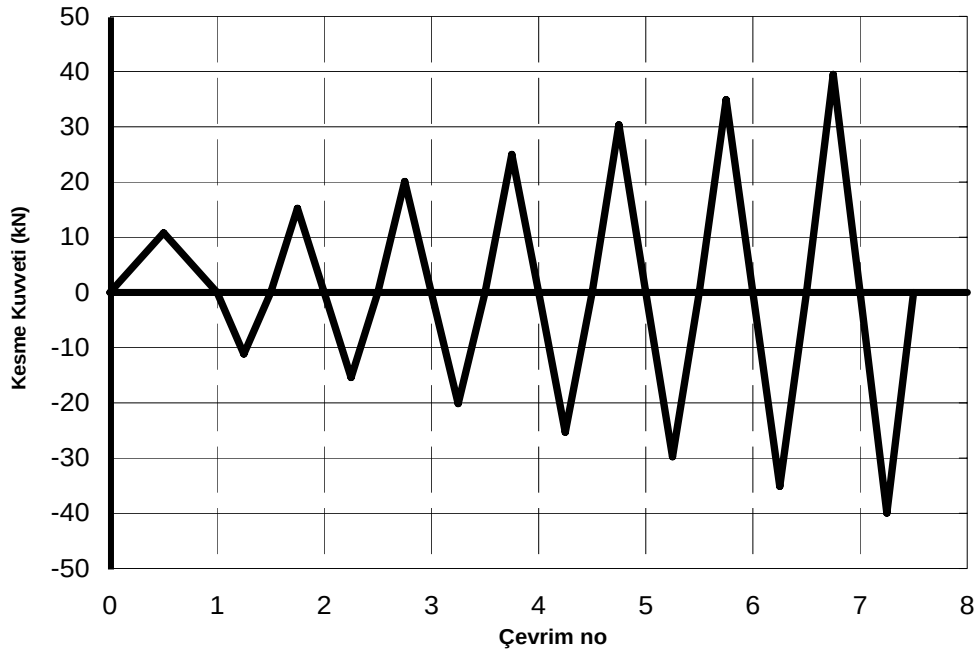
DENEYLER

Bu bölümde deney programında yer alan deneyler anlatılmıştır. Deneyler yapılırken davranışta ve dayanımda oluşan değişimler dikkatli bir biçimde izlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu değişimler ileri ve geri çevrim yükleme numaraları ile sunulmuştur. Her deneyin anlatıldığı bölümde, yük geçmişi grafikleri, yük-deplasman grafikleri (kesme kuvveti-kiriş uç net deplasmanı), deformasyon ölçerlere ait yük-birim deformasyon eğrileri verilmiştir. Yük-deplasman grafiklerinde rölatif deplasman eksenini de çizilerek elemanlar arasında daha iyi bir karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Deney anlatımı yapılırken, giriş ucundan ölçülen toplam deplasmana ait deplasman değerleri ifade edilmiştir. Deneylerin anlatımında ileri yükleme sırasında uygulanan yükten pozitif yükleme, geri yüklemeden ise negatif yükleme olarak bahsedilecektir. Deney elemanlarına ait bazı fotoğraflar metin içerisinde sunulmuştur. Her yük çevrimine ait gelişmeler sırası ile anlatılmıştır. Ancak önemli bir gelişmenin gözlenmediği çevrimlerden bahsedilmemiştir. Deneyler, elemanların deney döşemesi üzerindeki konumlarına göre anlatılmıştır.

Tüm deney elemanlarında yükleme için aynı ilkelere dikkat edilmiştir. İlk çevrimlerde lineer-elastik bölge içerisinde kalacak yük adımları uygulanmıştır. Deney elemanının maksimum yük taşıma düzeyine kadar yaklaşık aynı oransal artımlarla ve aynı sayıda çevrim yapılmasına dikkat edilmiştir. Elemanların taşıyabildikleri maksimum yükten sonraki çevrimlerde deneye deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir.

3.1 Deney Elemanı-1

Deney elemanı-1 kontrol amacı ile üretilmiş referans deney elemanıdır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu grafiklerde kesme kuvvetinin pozitif işareti ileri çevrimleri, negatif işareti de geri çevrimleri temsil etmektedir.



Şekil 3.1 Deney elemanı 1'e ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

1. çevrim

Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak, çevrimin ileri yükleme adımında 10 kN yük, 1,45 mm deplasman düzeyinde gelişmiştir.

2. çevrim

15 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Geri yükleme adımında kiriş tablasında, mesnetten 75 cm uzaklıkta, kılcal düzeyde eğilme çatlağı gelişmiştir.

4. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 25 kN yükte 4,30 mm deplasman ölçülmüştür. Bu yük seviyesinde kiriş gövdesindeki gelişen eğik çatlakların genişliği 0,30 mm düzeyindedir. Geri yüklemde kiriş tablasında mesnetten 50 cm uzaklıkta eğilme çatlağı gelişmiştir.

5. çevrim

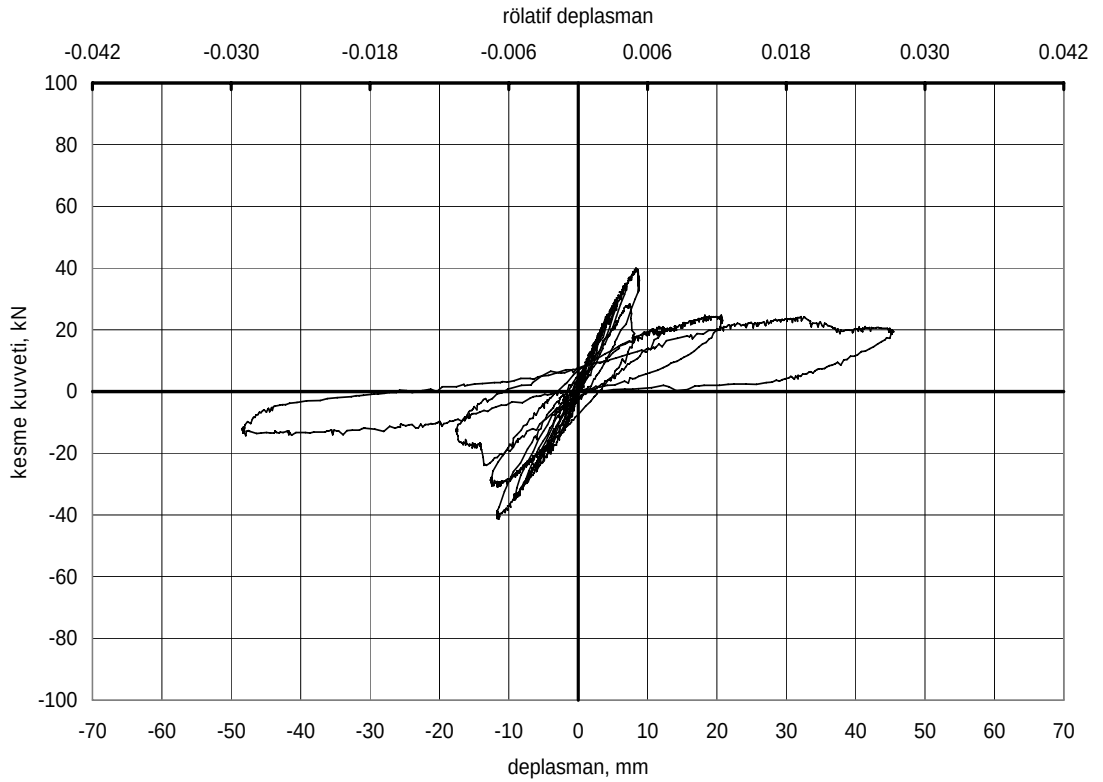
Mesnetten 70 cm uzaklıkta kiriş alt yüzüne paralel gelişen çatlak, yükteki artışla beraber kesitte gelişimine devam etmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında 30 kN yük, 7,50 mm deplasman ölçülmüştür.

6. çevrim

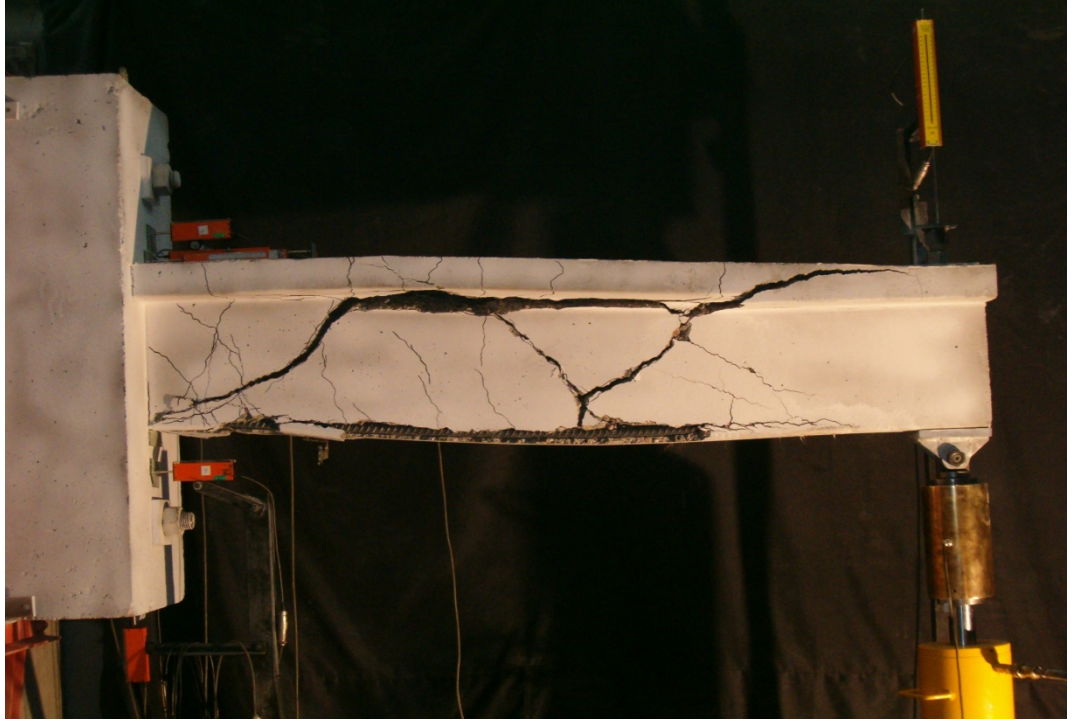
Çevrimin geri yükleme adımında kiriş alt ucunda, kirişin mesnetle birleştiği kesitte başlayan eğik çatlak kiriş tablasına kadar ilerlemiştir.

7. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde yük 39,52 kN, deplasmanda 8,72 mm düzeyinde iken gerçekleşen ani yük düşüşü nedeni ile ileri yükleme adımına son verilmiştir. Deney elemanının rijitliğinde de ani düşüş gerçekleşmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında kiriş gövdesinde çok sayıda yeni çatlak gelişmiştir. Gövdede gelişen kesme çatlaklarının genişliği 20 mm seviyesine ulaşmış ve kiriş kesmeden göçmüştür.



Şekil 3.2 Deney elemanı-1'e ait kesme kuvveti-deplasman grafiği

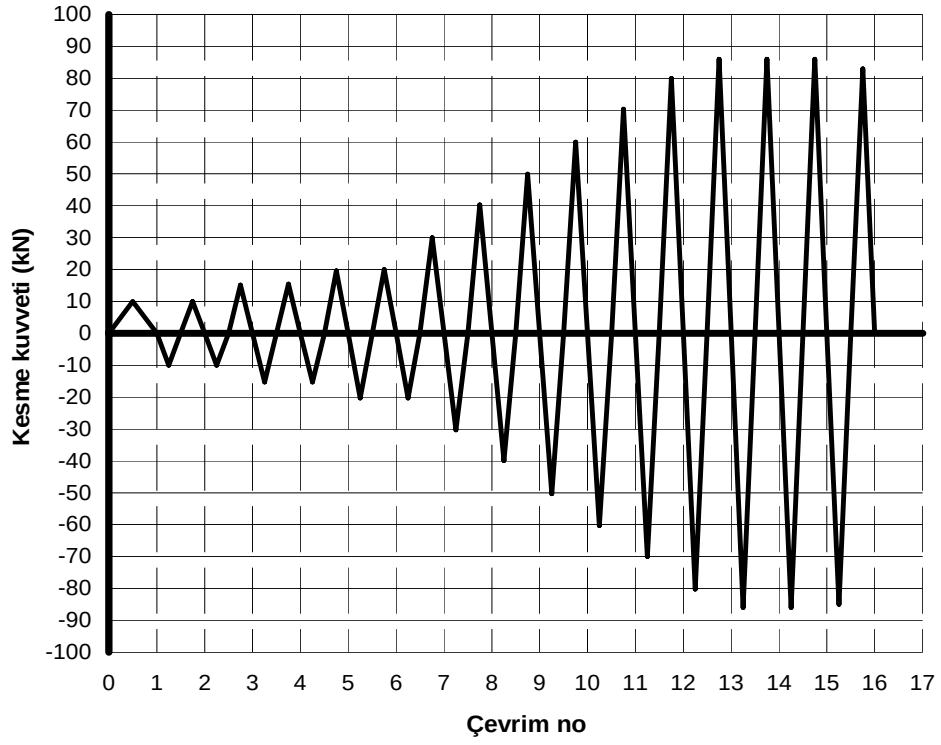


Şekil 3.3 Deney elemanı 1'in göçmeden sonraki görünüşü

3.2. Deney Elemanı-2

İki katlı ve tek yönlü karbon lif dokuma ile güçlendirilmiş elemandır. İlk kat karbon lifli dokuma katmanı yatayla 135° 'lik bir açı yapacak şekilde yapıştırılmıştır. İkinci kat ise yatayla 45° 'lik bir açı yapmaktadır. Bu şekilde olası kesme çatlakları doğrultusunda bir lif düzeni oluşturulmuştur. Karbon lifli levhalar sadece kiriş yan yüzeylerine yapıştırılmıştır. Kiriş gövdesinde altta ve üstte ankraj bulunmaktadır. İlk eğilme çatlakları 10 kN yük düzeyinde gerçekleşmiştir. 13. çevrimde ileri yüklemde ilk akma gözlenmiştir. Bu sırada yük 86 kN, deplasmanda 30 mm olarak ölçülmüştür. Bu noktadan sonra deneye deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir.

14. çevrimin ileri yüklemesi sırasında 83 kN yük düzeyinde, kiriş altında bulunan ankrajların altından kiriş gövdesi boyunca uzanan ve kabuk betonunu ayıran çatlakla birlikte göçme oluşmuştur. Göçme sonrasında üst kısımdaki ankrajlarda bir hasar oluşmamıştır. Ankrajlarda sıyrılma ya da gövdeden ayrılma görülmemiştir. Yükün düşmesi ve rijitliğin azalması ile deneye son verilmiştir.



Şekil 3.4 Deney elemanı-2'ye ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

1. çevrim:

Bu çevrimde çıkılan maksimum yük 10 kN'dur. Geri yükleme sırasında tabla üzerinde temel kirişinden 45 cm uzakta ve 95 cm uzakta ilk eğilme çatlakları gözlenmiştir.

3. çevrim:

Bu çevrimde 15 kN yük düzeyine çıkılmıştır. Geri yükleme sırasında, kirişin temel kirişine birleştiği yerde ve tabla bölgesinde ayrılma çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlaklar tabla üzerinde eğilme çatlakları olarak devam etmiştir. Bu yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 3,83 mm'dir.

4. çevrim:

Bu çevrimde de çıkılan en büyük yük 15 kN'dur. İleri yükleme sonrasında tabladaki kılcal düzeydeki çatlak sayısında artış gözlenmiştir.

7. çevrim:

Bu çevrimde maksimum yük 30 kN'dur. İleri yükleme adımı sonrasında tablanın alt kısmında kiriş gövdesine doğru gelişen ve temel kirişinden 40–45 cm uzakta eğilme çatlakları gelişmiştir. 7. çevrim geri yüklemesi sırasında tablanın üstünde gelişen eğilme çatlağı sayısında artış görülmüştür. Bu yük düzeyine kadar deformasyon ölçümlerinde aşırı bir artım gözlenmemiştir.

8. çevrim:

Bu çevrimdeki maksimum yük düzeyi 40 kN'dur. İleri yükleme sırasında kiriş altındaki eğilme çatlakları artmıştır. Bu çatlaklar temel kirişinden 40 cm ve 70 cm uzakta yoğunlaşmıştır.

9. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 50 kN'dur. İleri yüklemede kiriş altındaki eğilme çatlakları temele doğru ilerleme göstermişlerdir. Geri yükleme adımıyla kirişin temel kirişine bağlandığı bölgedeki ayrılma çatlağı genişliği yaklaşık 0,1 mm'dir. Rijitlik bu çevrime kadar her çevrimde çok az düşüş göstermiştir.

10. çevrim:

60 kN'a kadar çıkılan bu çevrimde, geri yüklemede temel kirişi ile kirişin birleşim bölgesindeki tabla bölgesindeki ayrılma çatlağı yaklaşık 0,5 mm genişliğe ulaşmıştır. Bu çevrimde eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Ayrıca kiriş gövdesi

altında oluşan eğilme çatlaklarının genişliği artarak yaklaşık 1 mm'ye ulaşmıştır. Temel kirişine yakın bölgede 3 adet eğilme çatlağı görülmüştür.

11. çevrim:

70 kN maksimum yüke çıkılan bu çevrimde, geri yükleme sırasında temel kirişi ile kirişin birleşim bölgesinde tabla kısmındaki ayrılma çatlağı 1,5 mm'ye ulaşmıştır. Bu çevrimde eğilme çatlağı genişlikleri 0,6-0,7 mm düzeyindedir.

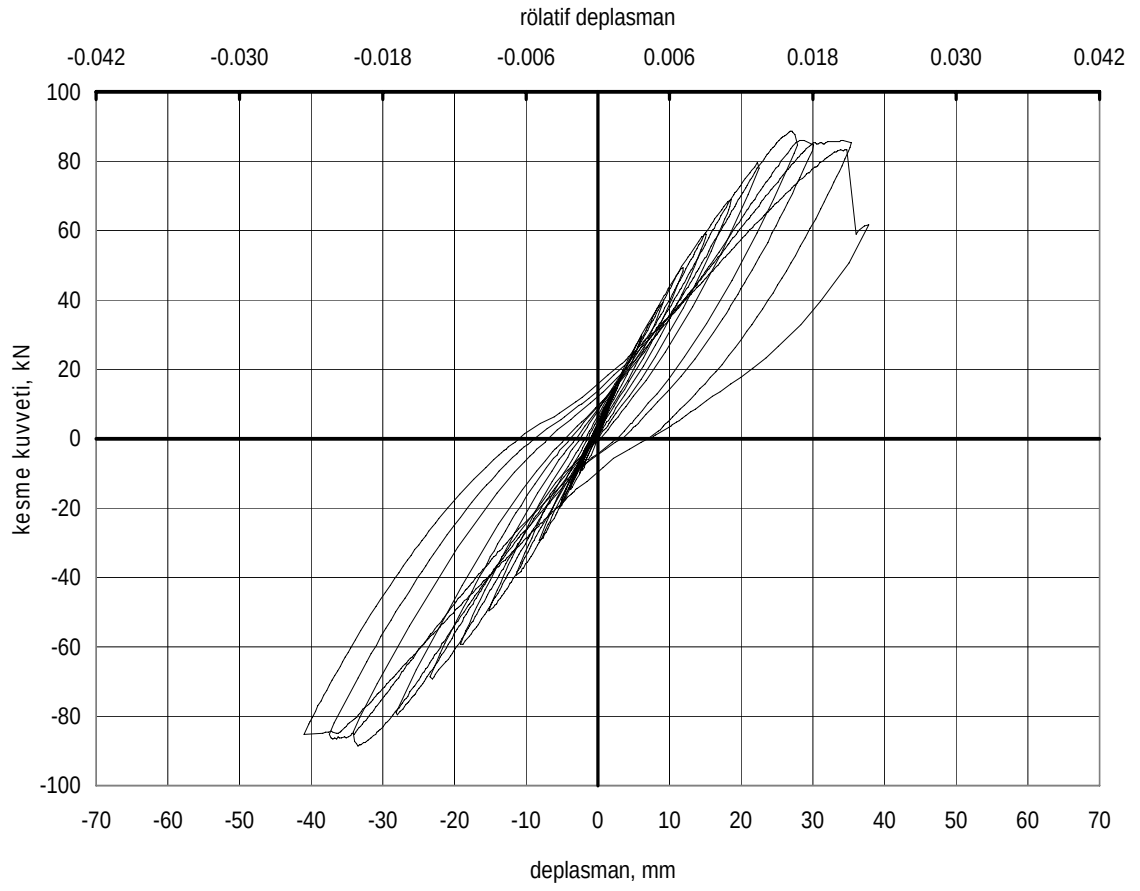
13. çevrim:

Bu çevrimde 90 kN yük düzeyine çıkılması hedeflenmiştir. İleri yüklemede 86 kN yük düzeyinde akma gözlenmiştir. Bu sırada kiriş uç deplasmanı 30 mm olarak ölçülmüştür. Bu çevrimden sonra rijitlik belirgin bir şekilde azalmış ve pekleşme etkisi ilk kez bu çevrimde görülmüştür. Aynı şekilde geri yükleme sırasında 86 kN yükte akma gözlenmiştir. Deplasman 35 mm olarak ölçülmüştür.

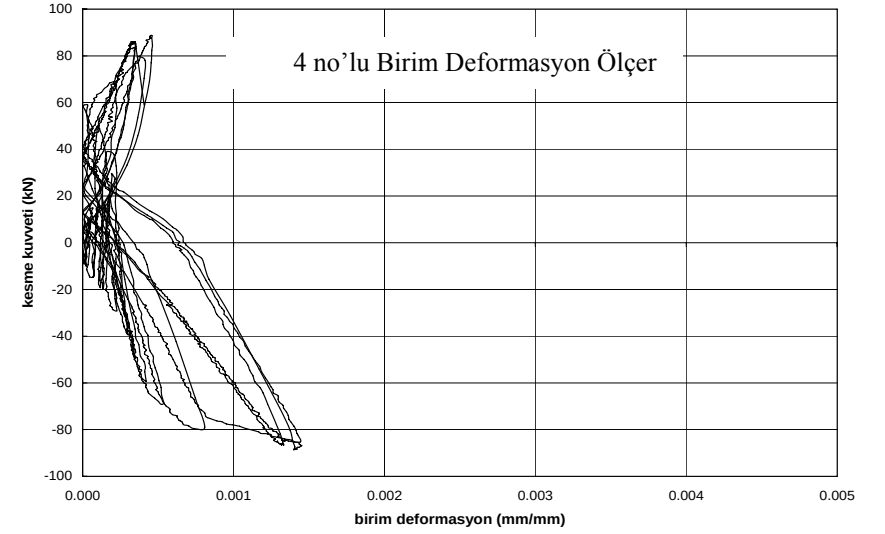
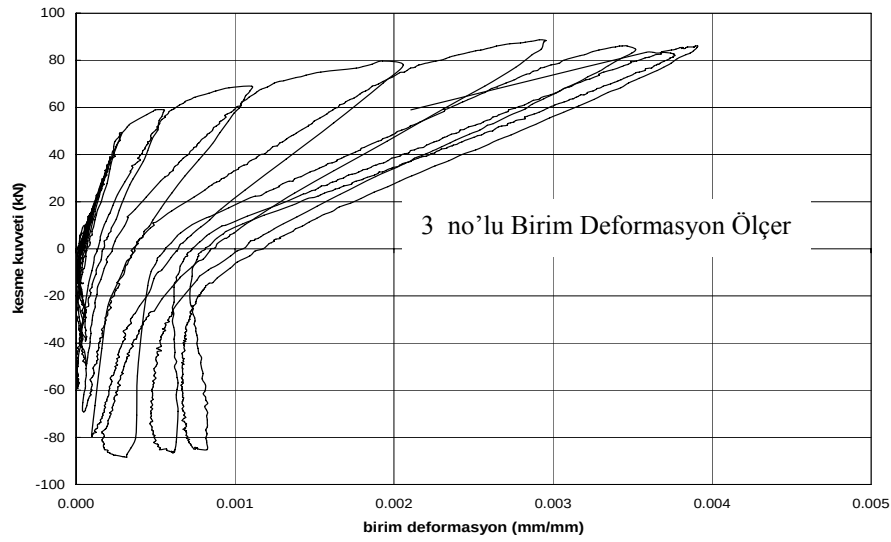
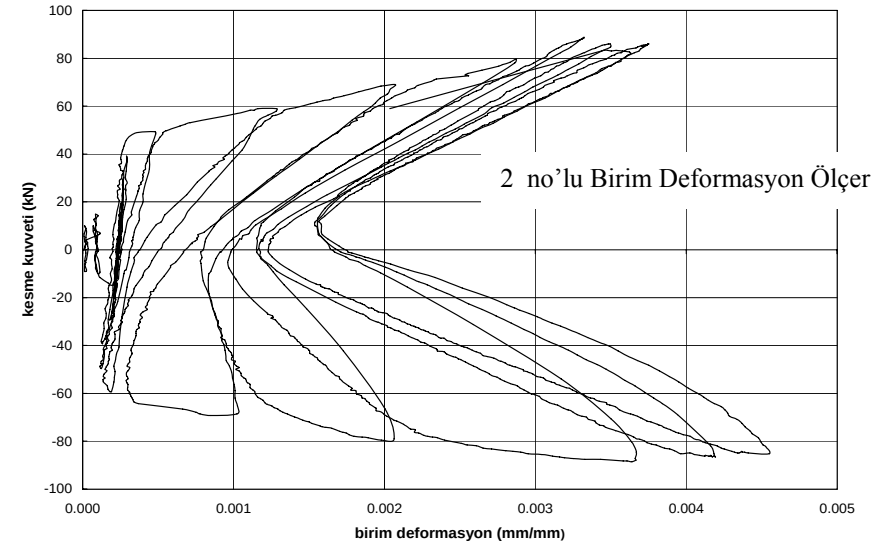
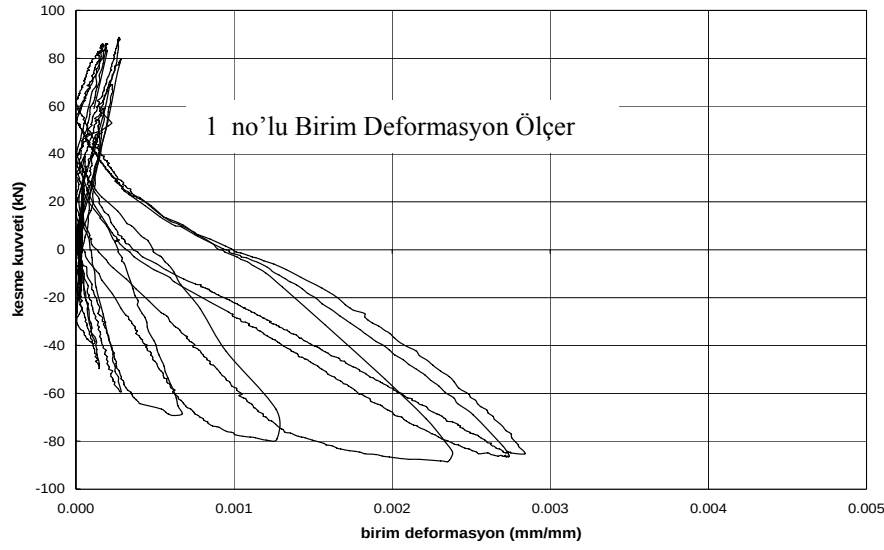
Akma gözlendikten sonra deneyde deplasman kontrolüne geçilmiştir. Deplasman değerleri 5 mm artırılarak deneye devam edilmiştir. Donatının aktığı yerler, kirişin temel kirişine birleştiği bölgede alt ve üst kiriş boyuna donatısının bulunduğu yerlerde olmuştur.

14. çevrim:

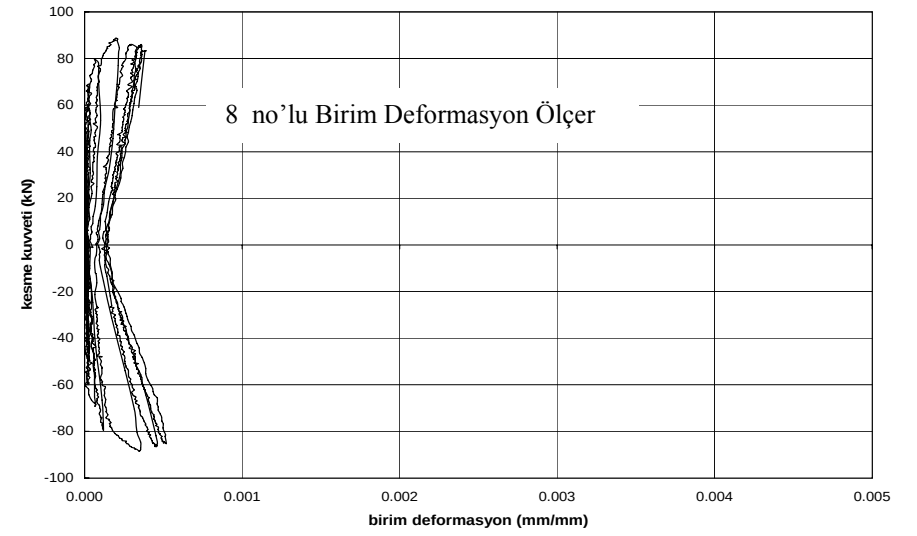
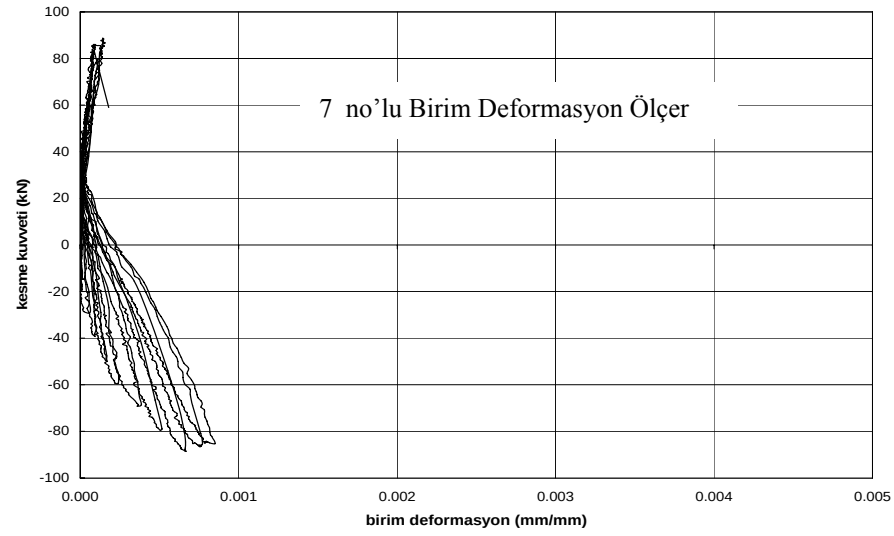
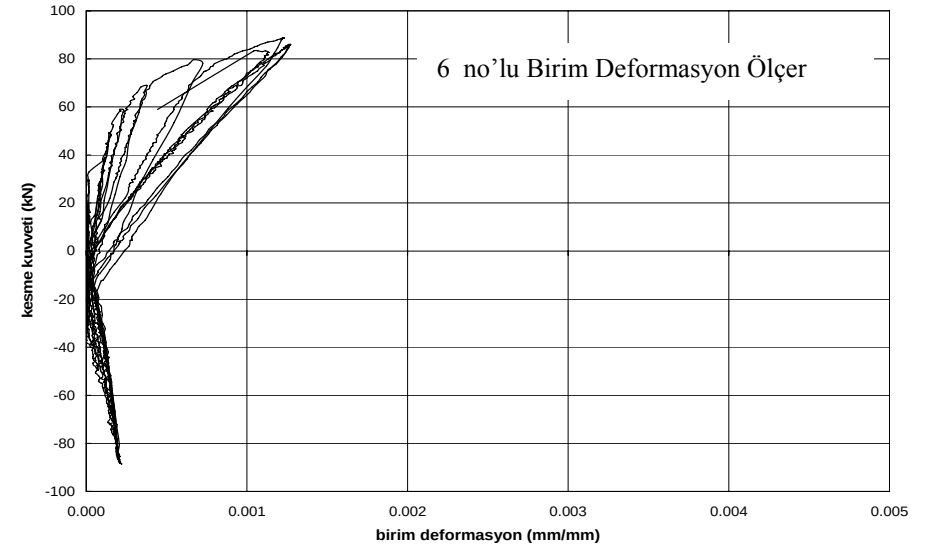
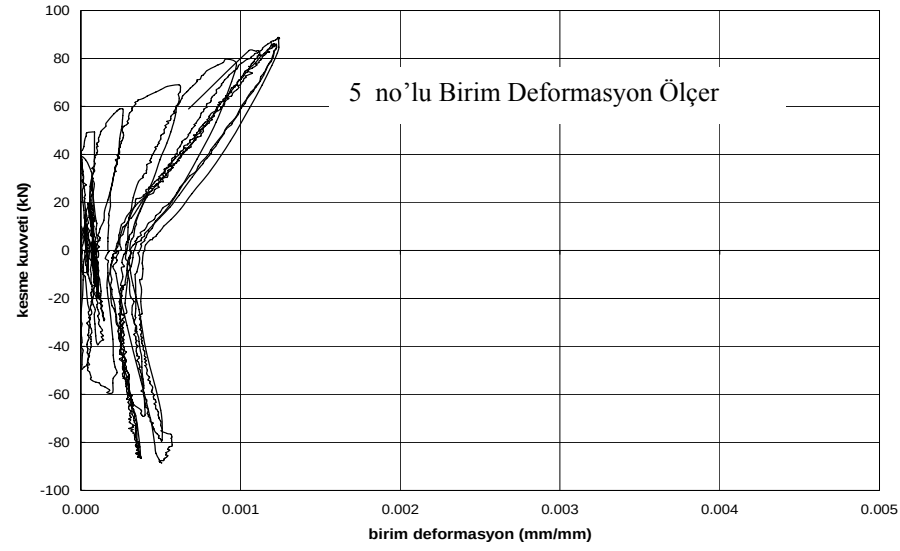
İleri yükleme yapılırken yaklaşık 83 kN yük düzeyinde, kiriş altında bulunan ankrajların altından kiriş gövdesi boyunca uzanan çatlakla birlikte göçme oluşmuştur. Göçme sonrasında üst kısımdaki ankrajlarda bir hasar oluşmamıştır. Ankrajlarda sıyrılma ya da gövdeden ayrılma görülmemiştir.



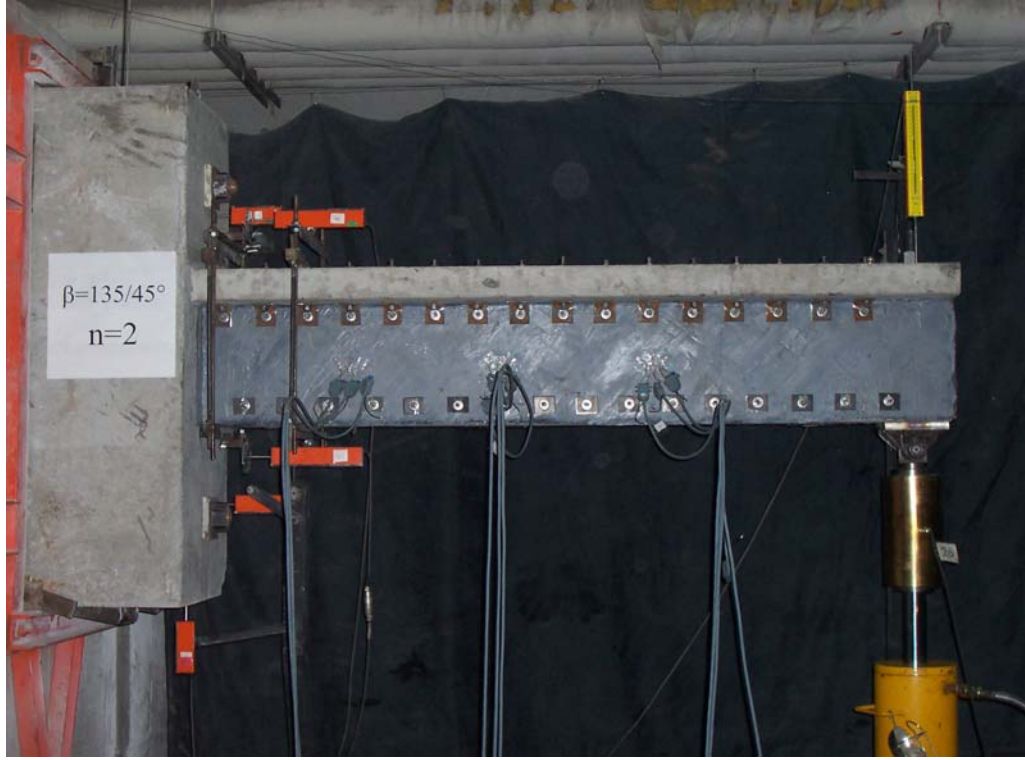
Şekil 3.5 Deney elamanı 2'ye ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.6 Deney elemanı 2'ye ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.7 Deney elemanı 2'ye ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.8 Deney elemanı 2'nin test başlangıcındaki görünümü

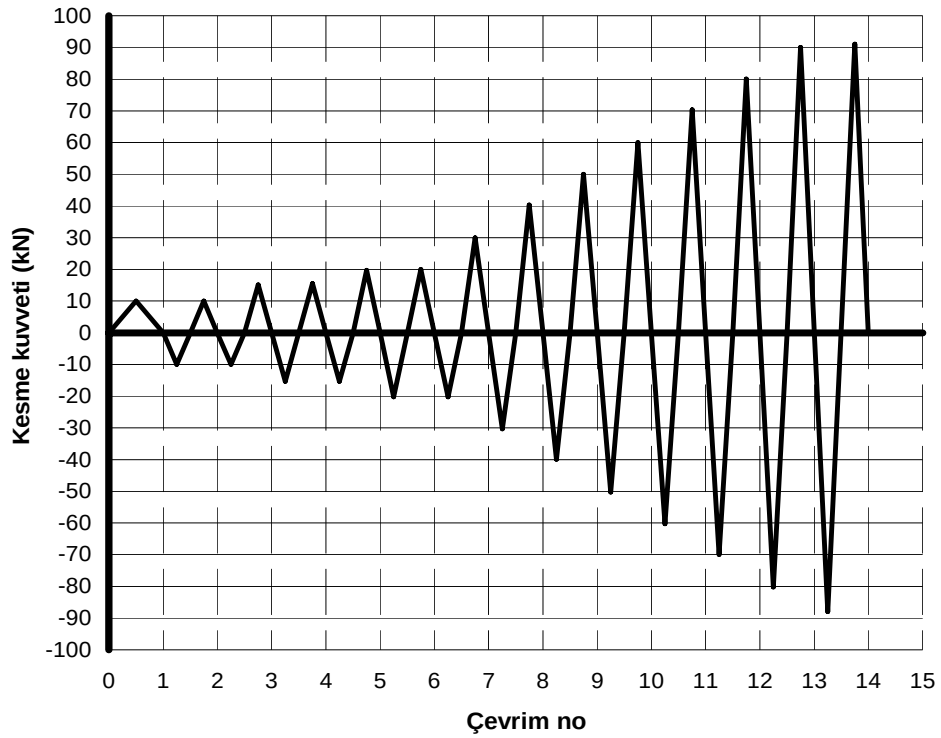


Şekil 3.9 Deney elemanı 2'nin kiriş alt yüzünde oluşan paralel ve dik çatlakların görünümü

3.3 Deney Elemanı-3

Bu deneyde iki kat, tek yönlü karbon lifli dokuma ile güçlendirme yapılmıştır. İlk katmanın lif doğrultusu yatayla 90° açı yapmaktadır. İkinci katman yatayla 0° açı yapmaktadır. Yani lif doğrultusu kiriş eksenine paraleldir. Kiriş gövdesinin yan yüzeylerine karbon lif uygulaması yapılmıştır. Ankrajlar kirişin altında ve üstünde yapılmıştır. İlk eğilme çatlağı 1. çevrimde ve 10 kN yük düzeyinde oluşmuştur. 13. çevrimin geri yüklemesinde 88 kN yük düzeyinde ve 33 mm uç deplasmanında akma gözlenmiştir.

Altındaki ankrajların büyük çekme kuvveti etkisi ile kiriş altındaki kabuk betonunu kiriş eksen boyunca ayırması ile göçme gerçekleşmiştir. Bu çatlak temel kirişinden başlayıp kiriş ortasına kadar gelmektedir. Göçme sonucunda yük düşmüştür. Çevrim bitirilip deneye son verilmiştir.



Şekil 3.10 Deney elemanı-3'e ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

1. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 10 kN'dur. Geri yüklemede kiriş tablasında temel kirişinden 55 cm uzakta ilk eğilme çatlağı gözlenmiştir.

5. çevrim:

Bu çevrimde maksimum yük 20 kN'dur. Geri yükleme sırasında tabladaki eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Bu yük düzeyine kadar rijitlikler ileri ve geri yüklemelerde aynı biçimde gözlenmiştir.

8. çevrim:

40 kN'a çıkılan bu çevrimde, ileri yükleme adımıyla tablanın alt kısmında çatlaklar görülmüştür (temel kirişinden 45 ve 75 cm uzakta). Ayrıca alt ankrajların kabuk betonunda ve kiriş gövdesinin altında çatlağa rastlanmamıştır. Çevrimin geri yüklemesinde eğrilik ölçüm bölgesinde tablada, genişliği 0,2 mm olarak ölçülen iki adet eğilme çatlağı belirlenmiştir. Temel kirişi ile kirişin birleştiği bölgedeki çatlaklar kılcal düzeydedir.

9. çevrim

Bu çevrimin en büyük yükü 50 kN'dur. İleri yüklemede kiriş gövdesi altında, temel kirişinden 35 ve 75 cm uzaklıklar arasında kiriş eksenine paralel gelişen çatlaklar gözlenmiştir. Ayrıca eğilme çatlaklarının sayısında artış görülmüştür.

10. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 60 kN'dur. Geri yükleme yapılırken tabla üstünde oluşan eğilme çatlağı sayısında artış görülmüştür.

11. çevrim:

70 kN maksimum yüke çıkılan bu çevrimde, ileri yüklemde kiriş gövdesi altındaki paralel çatlak ilerlemiştir (temel kirişinden yaklaşık 25 ve 75 cm uzaklıklar arasında).

12. çevrim:

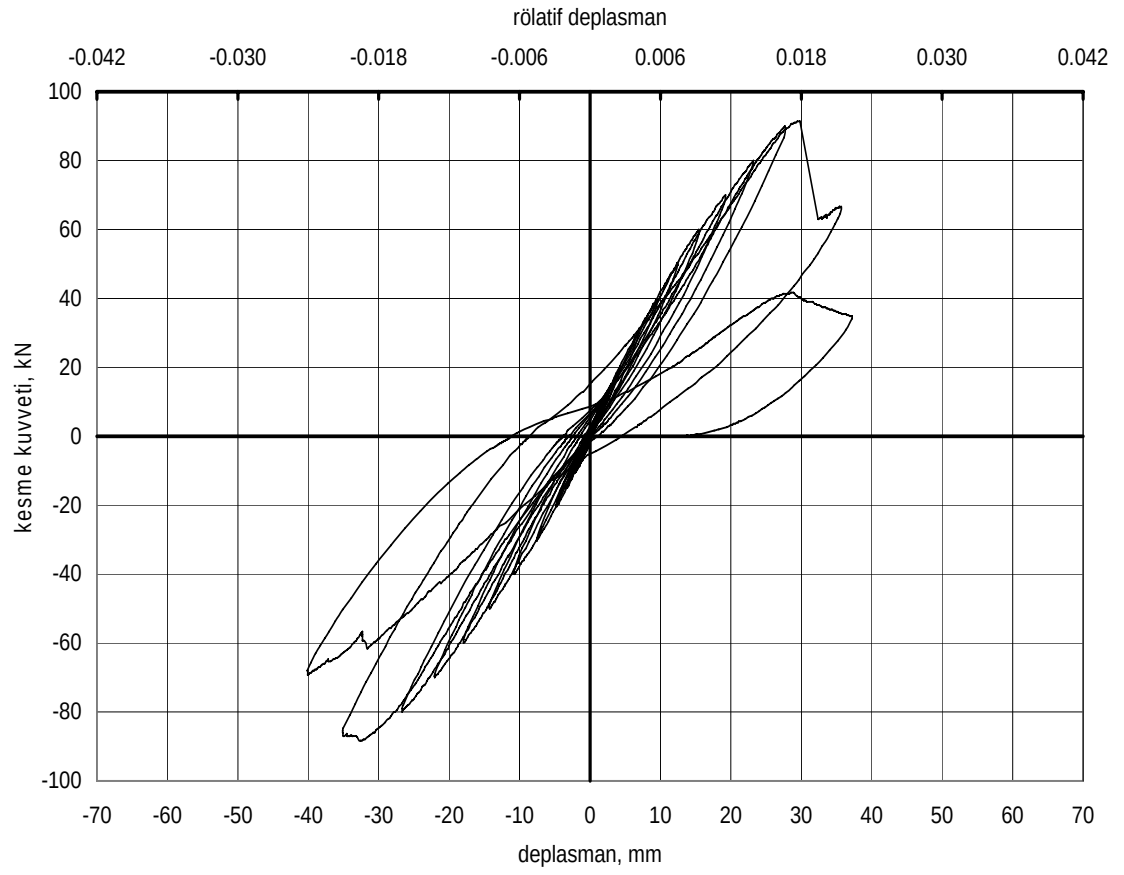
Bu çevrimin en büyük yükü 80 kN'dur. İleri yükleme sonrası temel kirişi ile kirişin birleştiği bölgedeki ayrılma çatlağı kiriş gövdesinin alt kısmında 0,3 mm genişliktedir.

13. çevrim:

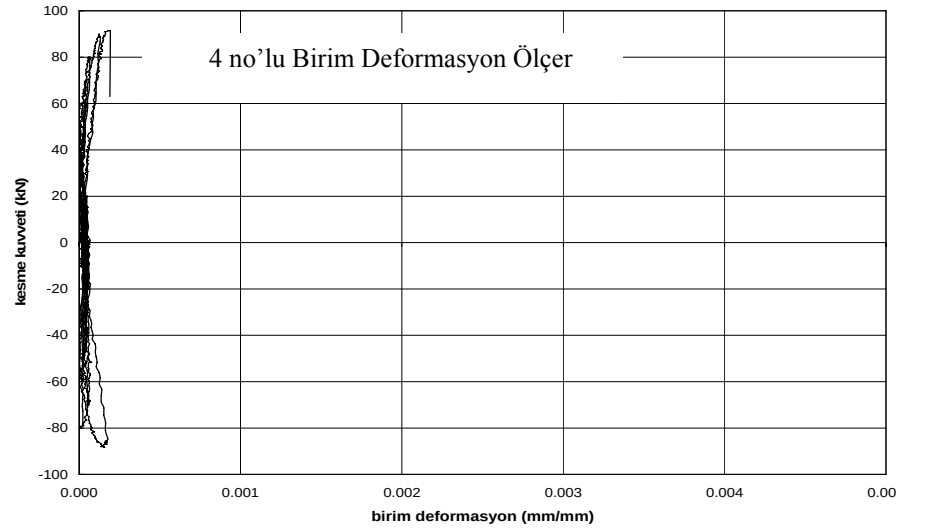
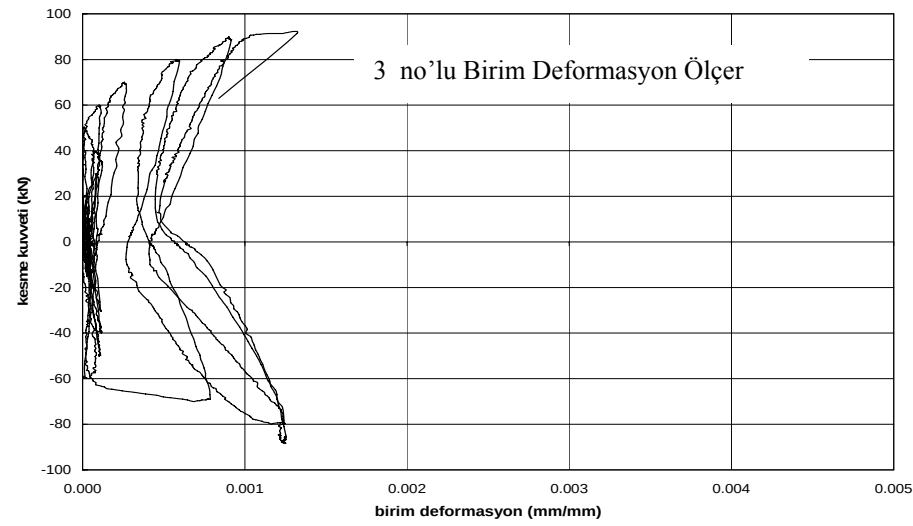
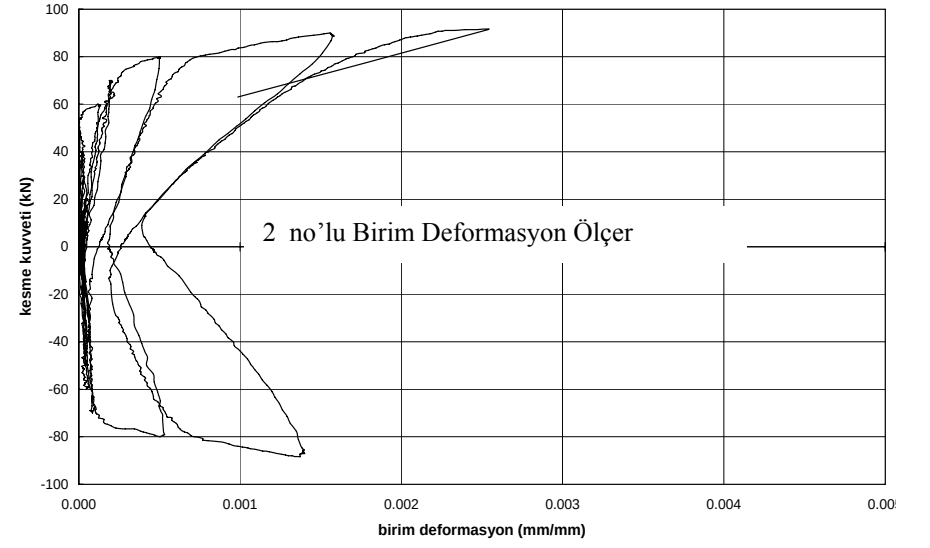
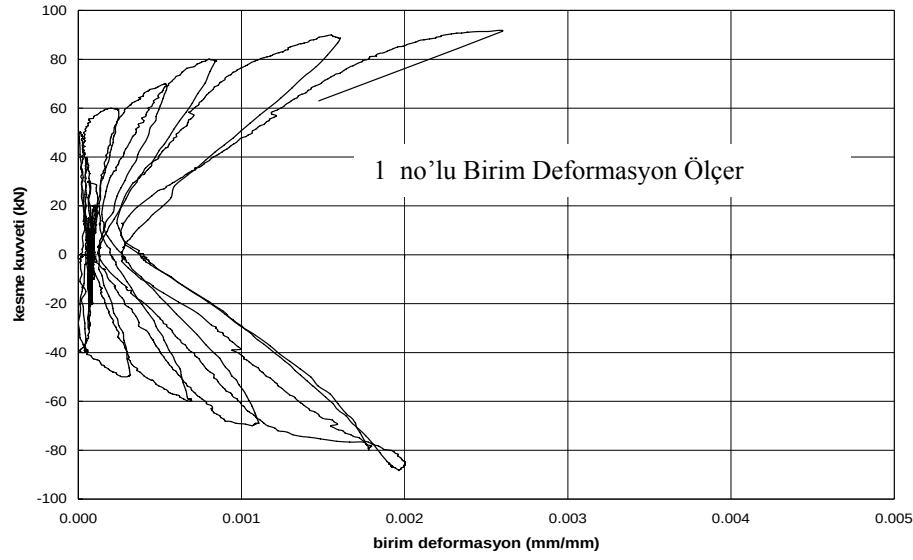
Bu çevrimin en büyük yükü 90 kN'dur. Çevrimin ileri yüklemesinde kiriş altındaki paralel çatlak temel kirişine doğru ilerlemiştir. Geri yüklemde 90 kN'a giderken 88 kN düzeyinde akma gözlenmiştir. Bu sırada uç deplasmanı 33 mm olarak ölçülmüştür. Tabla üzerindeki eğilme çatlakları yükleme kolonuna doğru ilerleme eğilimi göstermiştir. Bu çatlakların maksimum genişliği 0,6-0,7 mm'ye ulaşmıştır. Bu çevrimden sonra ileri yükleme yapılırken rijitlik azalmıştır ve pekleşme etkisi başlamıştır.

14. çevrim:

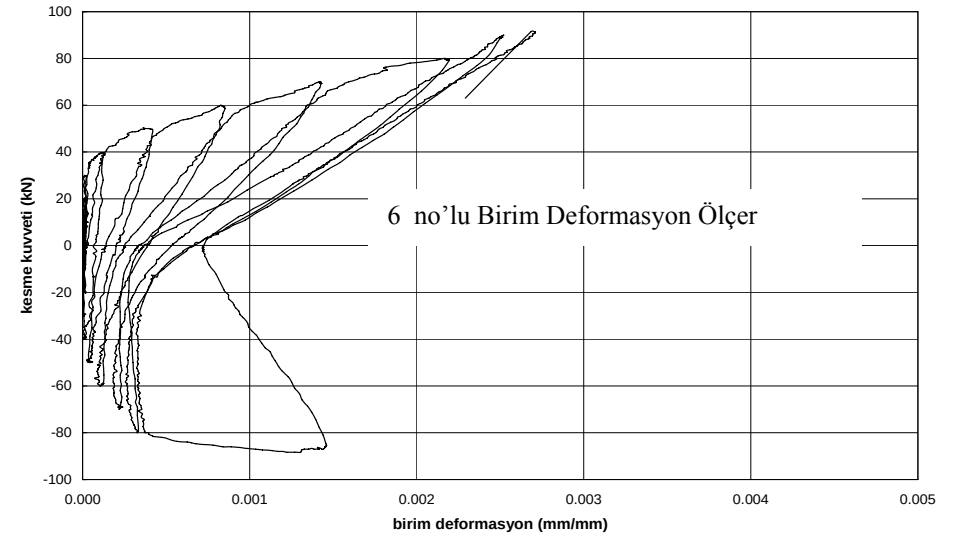
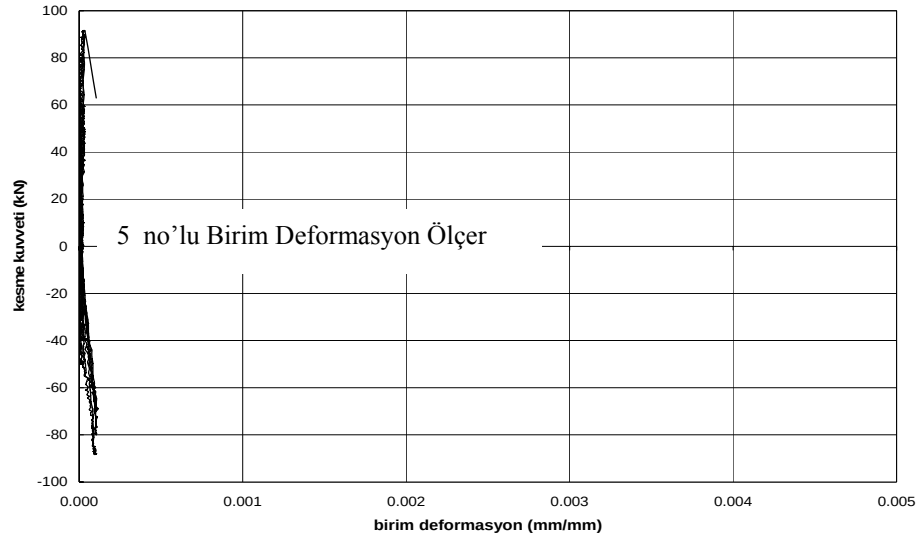
İleri yükleme yapılırken 91 kN yük düzeyinde, alttaki ankrajlar büyük çekme kuvveti etkisi ile kiriş altındaki kabuk betonunu kiriş eksenini boyunca ayırarak göçme gerçekleştirmiştir. Bu çatlak yaklaşık olarak temel kirişinden 95 cm uzaklığa kadar ulaşmaktadır. Göçme sonucunda yük 63 kN düzeyine gerilemiştir. Göçme anı deplasmanı yaklaşık 30 mm'dir.



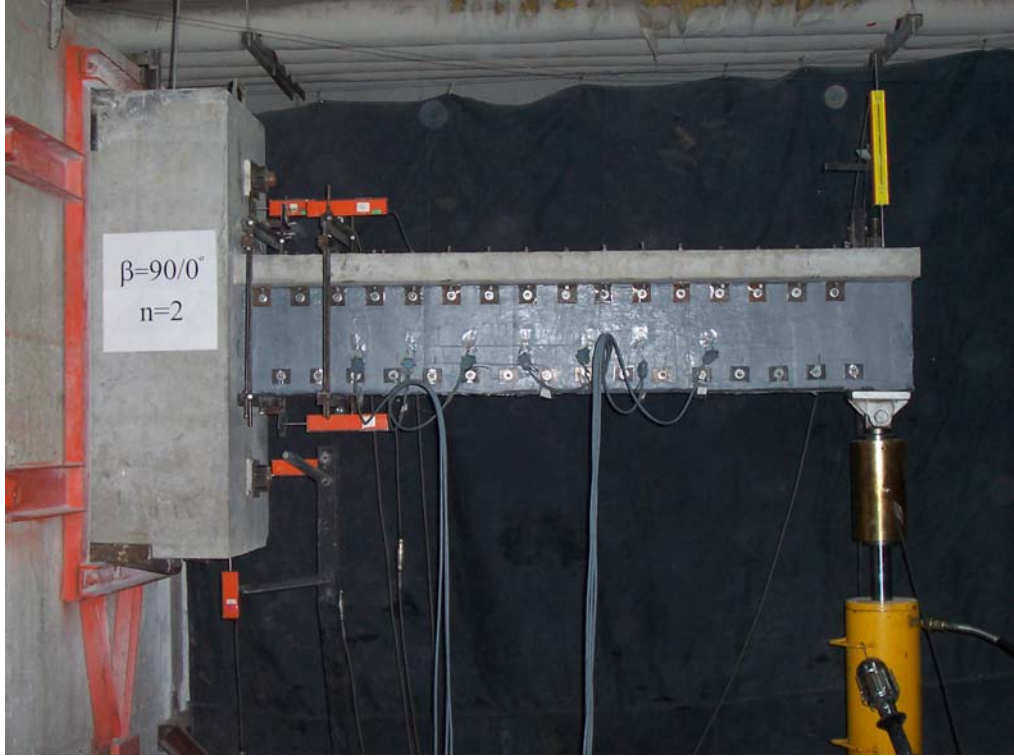
Şekil 3.11 Deney elemanı 3'e ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.12 Deney elemanı 3'e ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.13 Deney elemanı 3'e ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.14 Deney elemanı 3'ün test öncesi görünümü

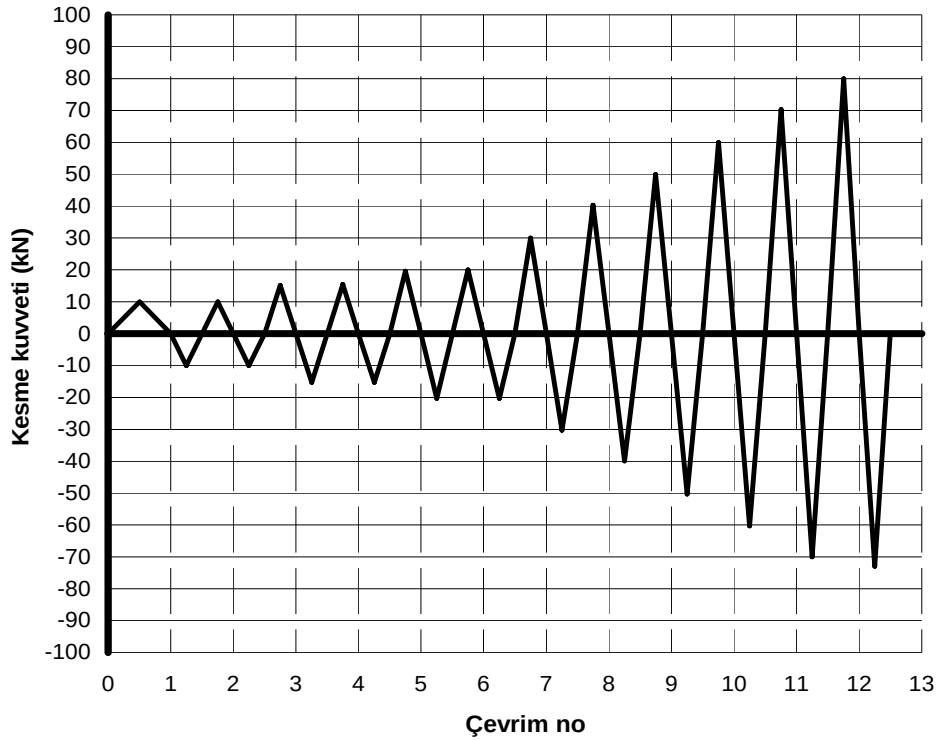


Şekil 3.15 Deney elemanı 3'ün yükleme ucunda oluşan dokumanın beton yüzeyinden ayrılmasına ait fotoğraf

3.4 Deney Elemanı-4

Bu deneyde tek kat ve çift yönlü karbon lifli dokuma uygulaması yapılmıştır. Kiriş gövdesinin yan yüzeylerine karbon lif uygulaması yapılmıştır. Ankrajlar kirişin altında ve üstünde yapılmıştır. İlk eğilme çatlağı 1. çevrimde ve 10 kN yük düzeyinde oluşmuştur. Bu deneyde akma gerçekleşmeden göçme moduna ulaşılmıştır.

73 kN yük düzeyinde, yükleme bölgesine yakın bir noktadan kirişin üstünden başlayarak gövdeyi yaklaşık 45° eğimle geçen kesme çatlağı karbon lifli levhayı aynı hat boyunca yırtarak kirişin göçmesine yol açmıştır. Ayrıca kiriş gövdesinin altında, yaklaşık kiriş ortasından temel kirişi bölgesine kadar olan kısımda, çekme donatısının altındaki kabuk betonu kiriş boyunca çatlamıştır.



Şekil 3.16 Deney elemanı-4'e ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

1. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 10 kN'dur. Geri yüklemede temel kirişinden 80 cm uzakta tabla üzerinde ilk eğilme çatlağı görülmüştür.

3. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 15 kN'dur. Geri yükleme adımımda tabla üzerinde temel kirişinden 40 cm uzaklıkta bir eğilme çatlağı daha oluşmuştur.

8. çevrim:

40 kN yük düzeyinde tekrarlanan bu çevrimde geri yükleme sonrasında tablada oluşan eğilme çatlakları sayısında artış gözlenmiştir.

9. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 50 kN'dur. Geri yükleme sırasında, tabladaki en geniş eğilme çatlağı temel kirişinden yaklaşık 80 cm uzaklıkta olup genişliği 0,4 mm mertebesinde dir.

10. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 60 kN'dur. İleri yükleme adımımda kiriş altında oluşan eğilme çatlakları yayılım göstermiştir. Temel kirişi ile kirişin birleştiği bölgedeki ayrılma çatlağı genişliği 0,2 mm'ye ulaşmıştır.

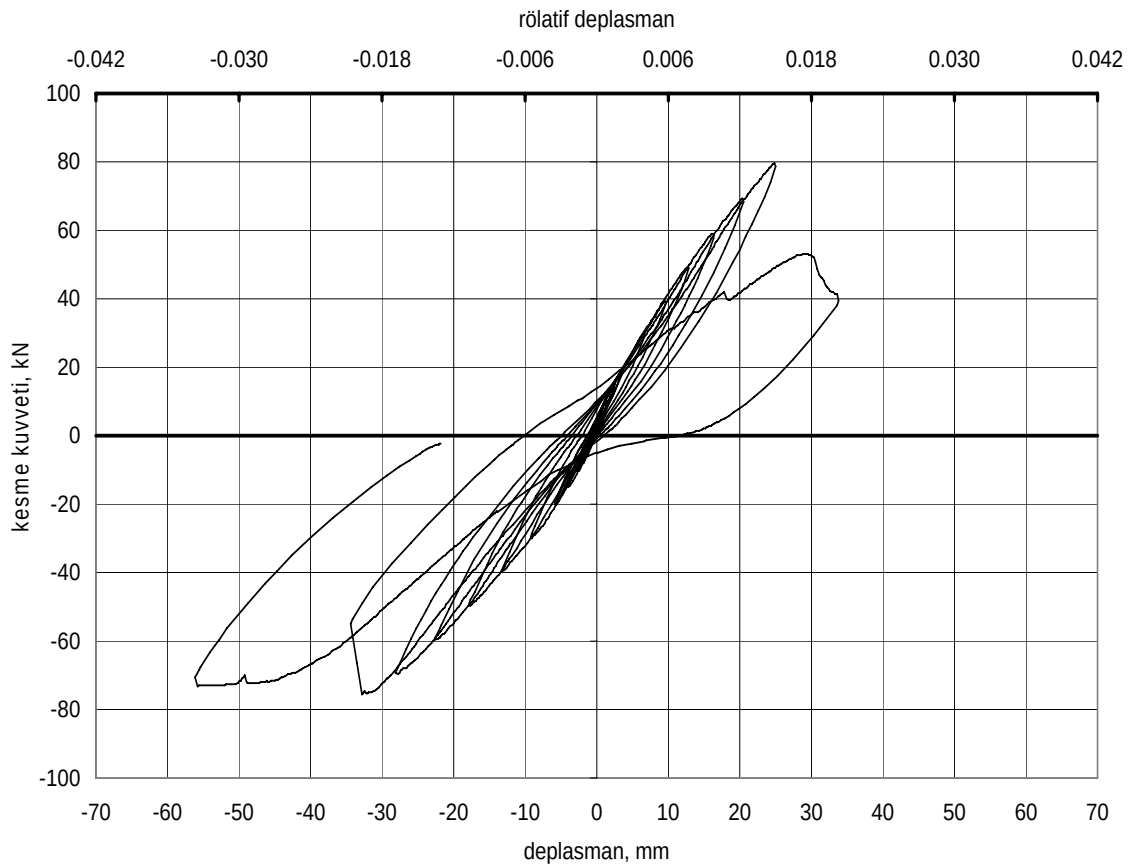
11. çevrim:

70 kN yük düzeyinde tekrarlanan çevrimin geri yüklemesinde, temel kirişinden 80 cm uzaklıktaki eğilme çatlağı genişliği 0,7 mm'ye ulaşmıştır.

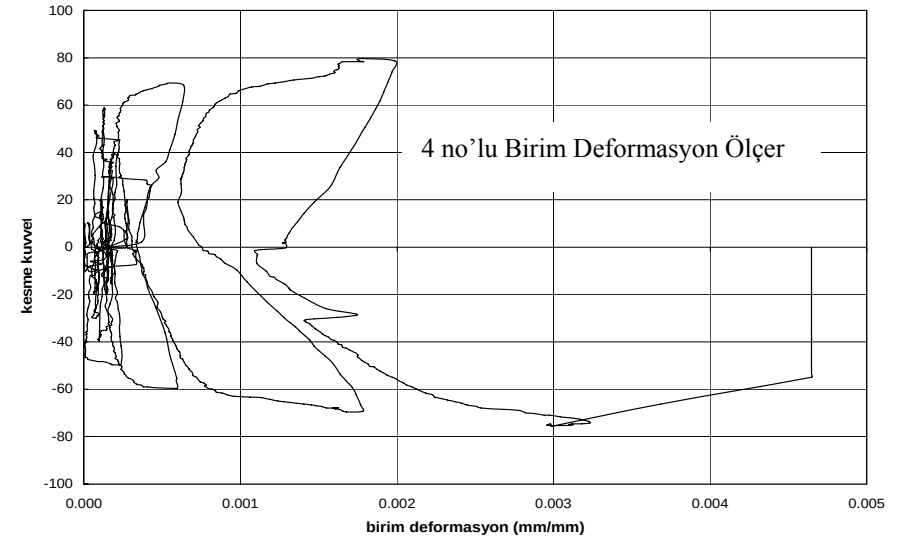
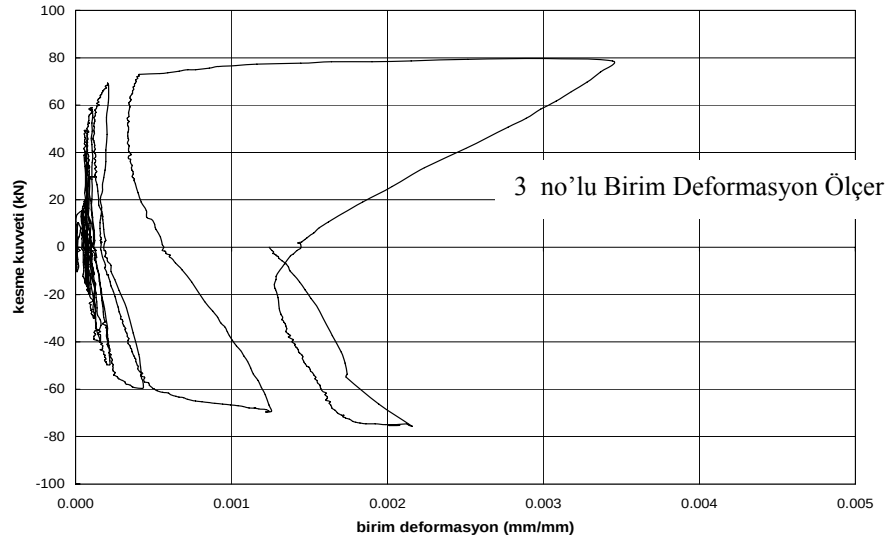
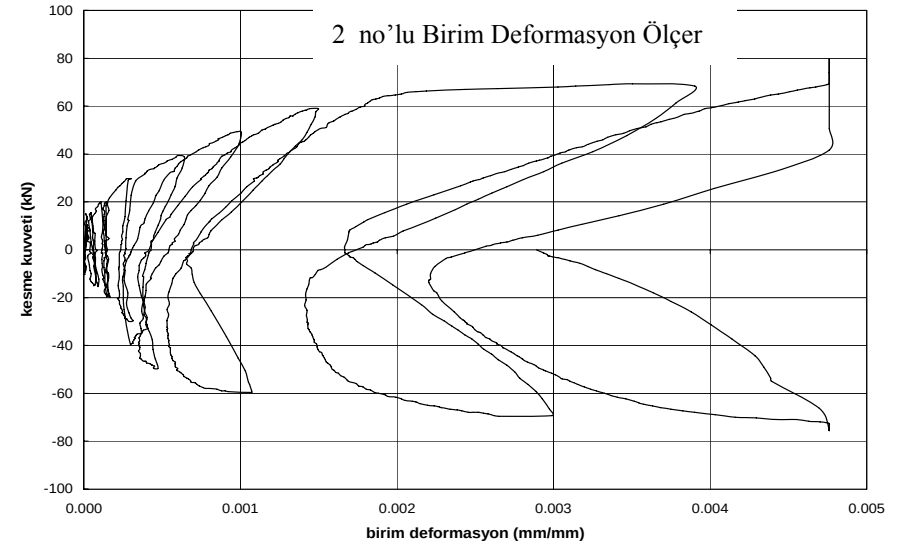
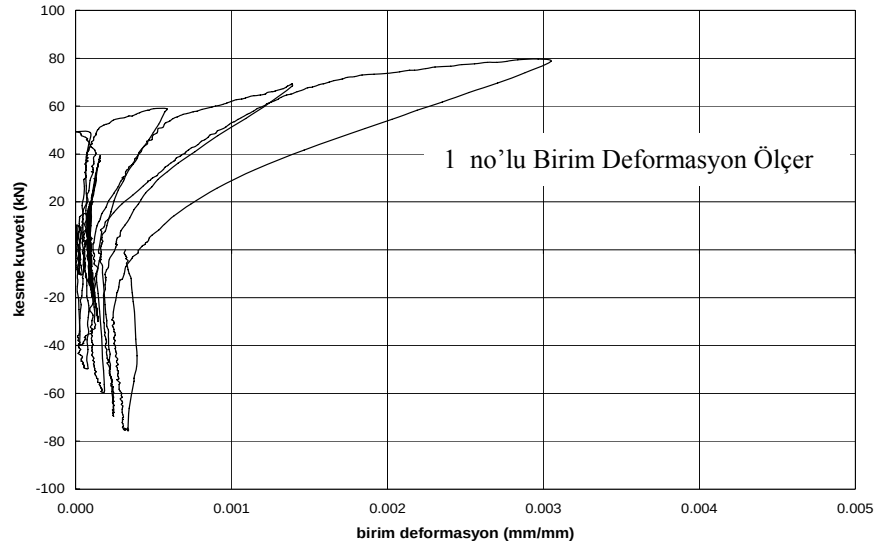
12. çevrim:

80 kN yük düzeyine gidilirken geri yükleme adımında, 73 kN yük düzeyinde, yükleme bölgesine yakın bir noktadan kirişin üstünden başlayarak gövdeyi yaklaşık 45° eğimle geçen kesme çatlağı CFRP'yi aynı hat boyunca yırtarak kirişin göçmesine yol açmıştır. Ayrıca kiriş gövdesinin altında, yaklaşık kiriş ortasından temel kirişi bölgesine kadar olan kısımda, çekme donatısının altındaki kabuk betonu kiriş eksenini boyunca gövdeden ayrılmıştır. Göçme anı deplasmanı yaklaşık 33 mm'dir.

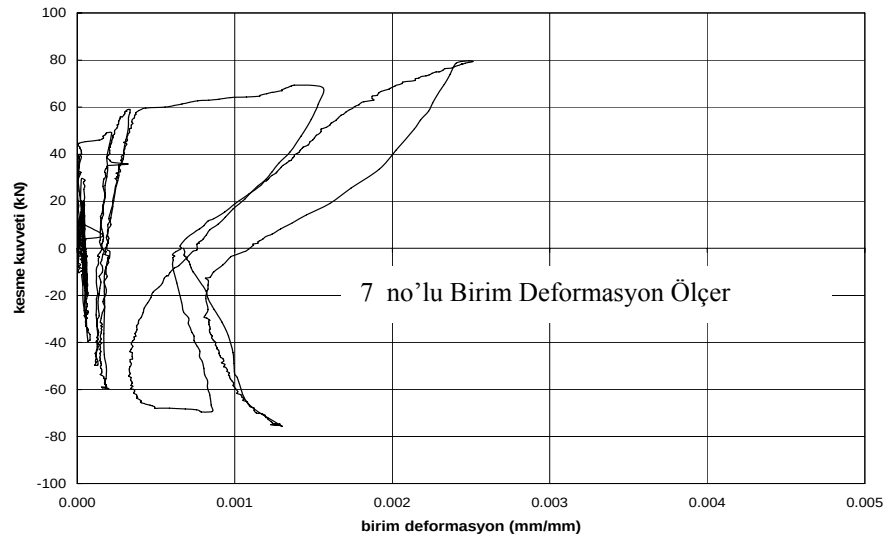
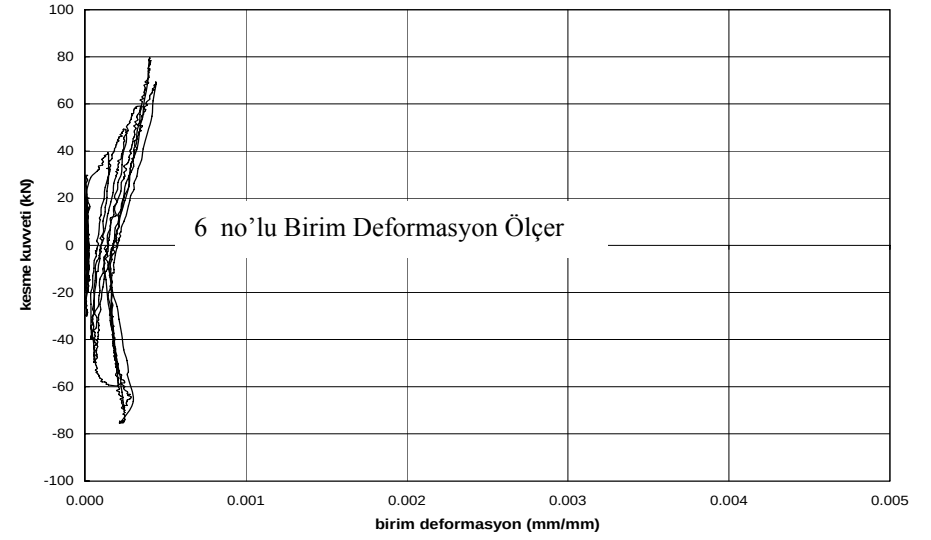
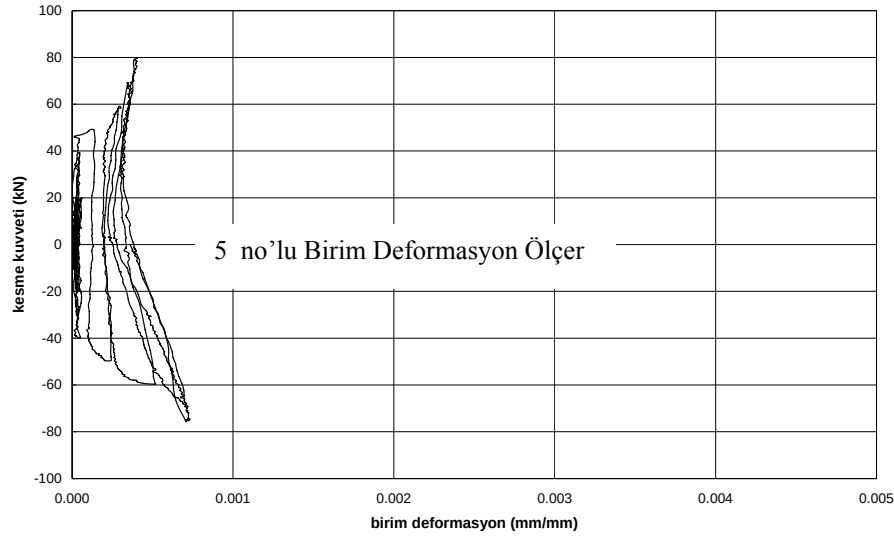
Tekrar kiriş ileri yükleme yapıldığında, kiriş ile temel kirişinin birleştiği bölgedeki CFRP yüzeyden ayrılmıştır. Kiriş bu noktadan itibaren yük almamaya başlamıştır. Rijitlik oldukça azalmış ve kiriş 53 kN yüke çıkabilmiştir.



Şekil 3.17 Deney elemanı 4'e ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.18 Deney elemanı 4'e ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.19 Deney elemanı 4'e ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.20 Deney elemanı 4'ün 1. ileri çevrim sonrası görünümü

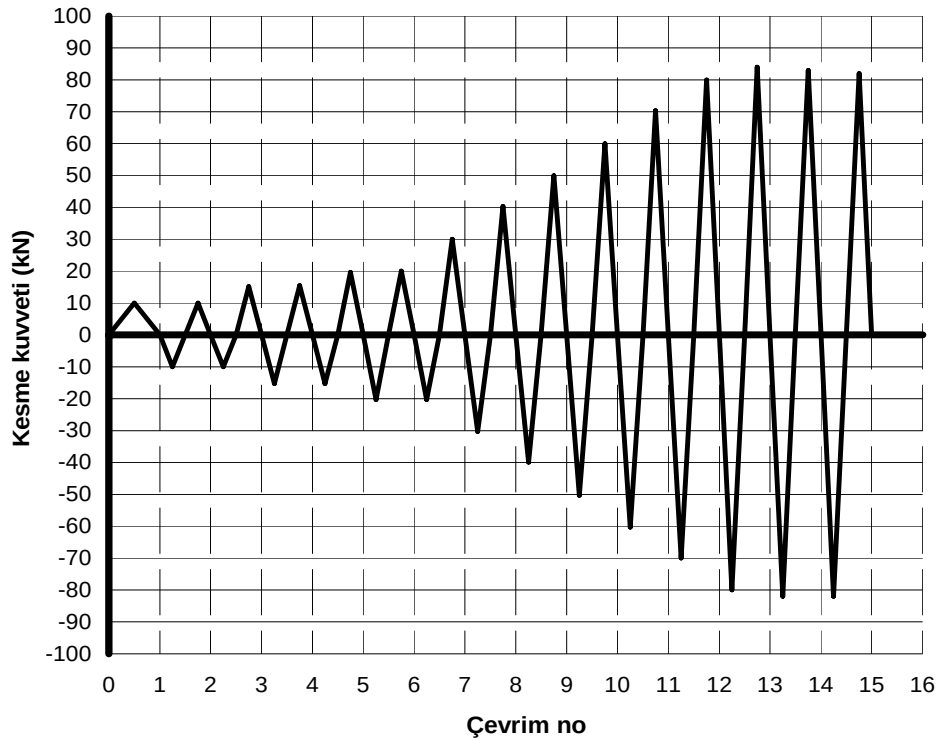


Şekil 3.21 Deney elemanı 4'de oluşan kesme çatlağı

3.5. Deney Elemanı-5

Bu deneyde iki kat, tek yönlü karbon lifli dokuma kirişe uygulanmıştır. İlk katmanın lif doğrultusu yatayla 120° açı yapmaktadır. İkinci katman yatayla 60° açı yapmaktadır. Kiriş gövdesinin yan yüzeylerine karbon lif uygulaması yapılmıştır. Ankrajlar kirişin altında ve üstünde yapılmıştır. İlk eğilme çatlağı 2. çevrimde ve 10 kN yük düzeyinde oluşmuştur. 13. çevrimin ileri yüklemesinde 84 kN yük düzeyinde ve 28 mm uç deplasmanında akma gözlenmiştir.

Çekme donatısının altındaki karbon lifli dokumanın yüzeyden ayrılması ile, tüm kiriş boyunca oluşan kabuk betonun ayrılması sonucu göçmeye ulaşılmıştır. Ayrıca kiriş–temel kirişi birleşim bölgesinde alt kısımda, karbon fiber levha beton yüzeyinden ayrılmış ve betonu kaldırmıştır. Bu çatlak kiriş eksenine paralel biçimde kiriş boyunca ilerlemektedir.



Şekil 3.22 Deney elemanı-5'e ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

2. çevrim:

10 kN yük düzeyinde tekrarlanan çevrimin geri yüklemesinde tablada, temel kirişinden yaklaşık 55 ve 100 cm uzaklıkta ilk eğilme çatlakları oluşmuştur.

4. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 15 kN'dur. Geri yükleme yapılırken tabladaki eğilme çatlağı sayısı artmıştır. Temel kirişinden 80 cm uzaklıktaki bölgede çatlak yoğunluğu gözlenmiştir.

7. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 30 kN'dur. Geri yükleme adımımda eğilme çatlakları tablanın alt kısmına doğru ilerlemiştir. Temel kirişinden 40-50 ve 70-80 cm uzaklıklar arasında kirişin alt kısmında kılcal çatlaklar görülmüştür.

8. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 40 kN'dur. Geri yükleme sonrasında tabladaki eğilme çatlakları sayısı artmıştır. Kiriş ile temel kirişinin birleştiği bölgedeki ayrılma çatlakları kılcal düzeydedir.

9. çevrim:

50 kN yük düzeyine çıkılan bu çevrimde kiriş altında oluşan kılcal eğilme çatlakları artmış ve temel kirişinden 25 cm uzaklığa kadar ilerlemişlerdir.

10. çevrim:

60 kN yük düzeyine çıkılan bu çevrimde ileri yüklemede birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı genişliği 0,3 mm'ye ulaşmıştır.

12. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 80 kN'dur. Geri yüklemede kiriş-temel kirişi birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı genişliği 1 mm'ye ulaşmıştır.

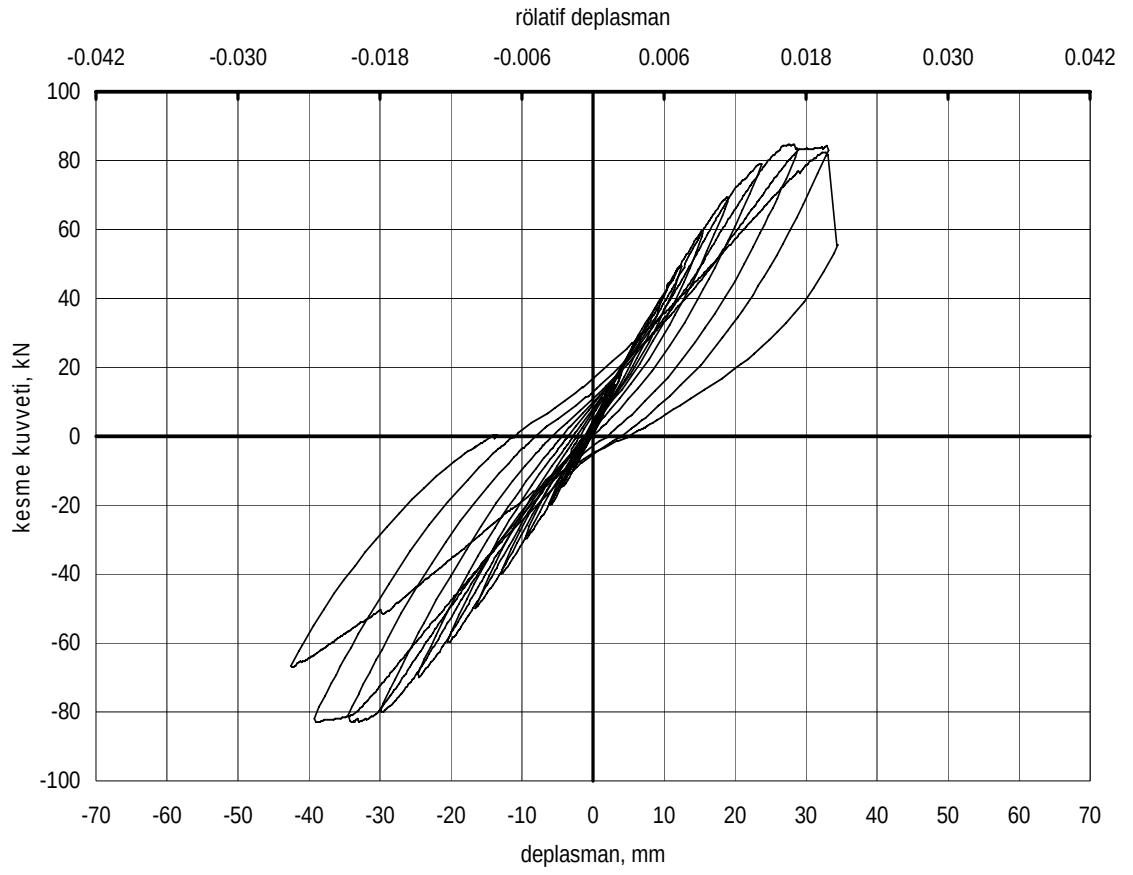
13. çevrim:

90 kN'a çıkılması hedeflenen bu çevrimde, ileri yüklemede 84 kN'da ve 28 mm uç deplasmanında iken boyuna donatı akmıştır. Aynı şekilde geri yüklemede, 82 kN da ve 33 mm uç deplasmanı seviyesinde boyuna donatı akmıştır. Bu çevrimde birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı 3 mm mertebesindedir.

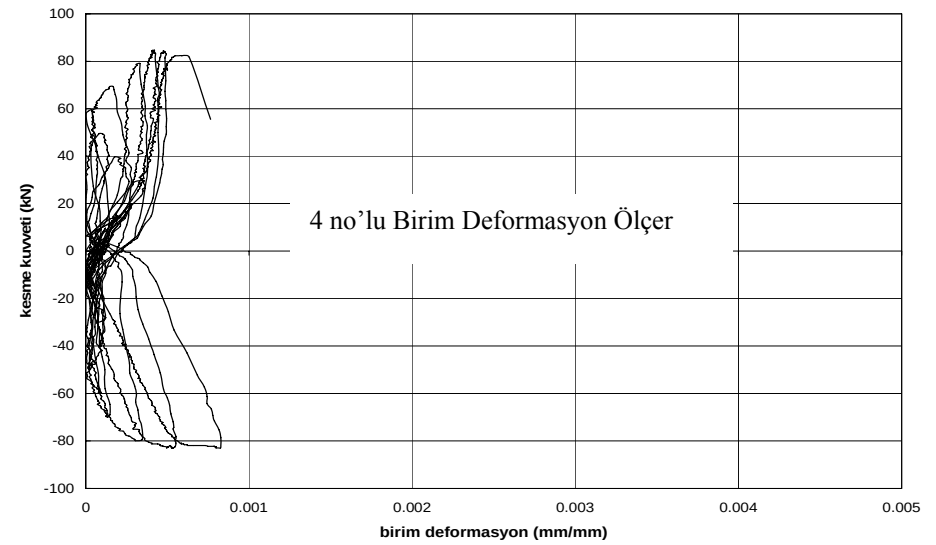
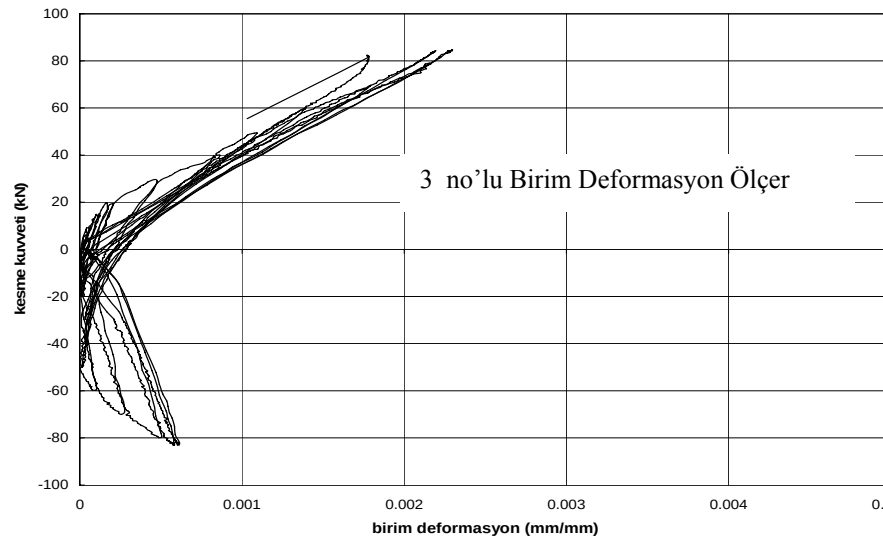
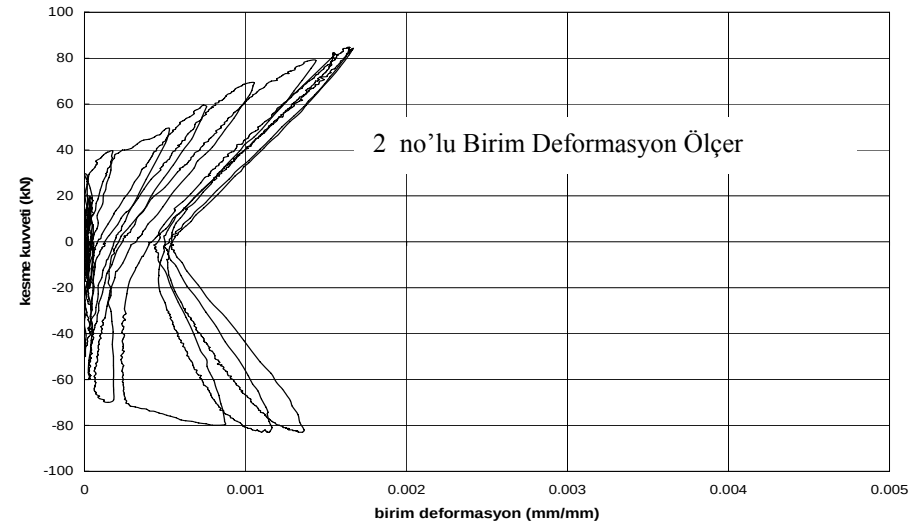
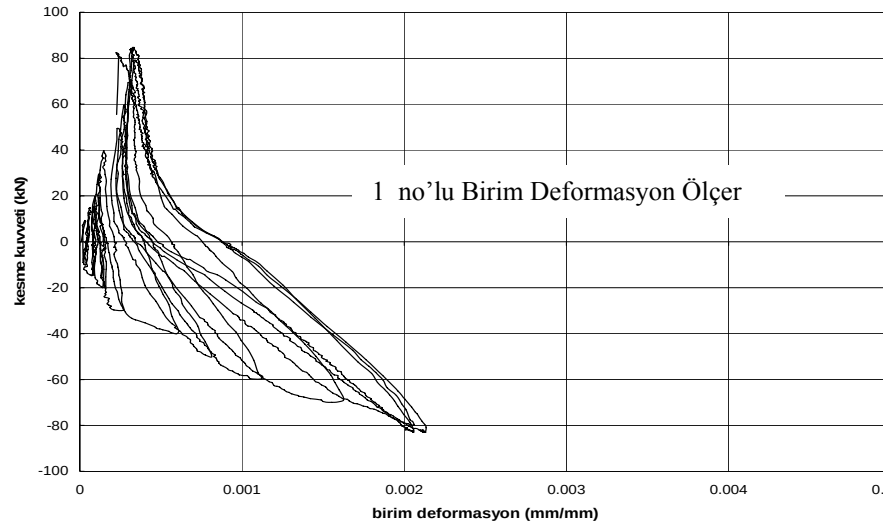
Bundan sonra deneye deplasman kontrollü devam edilmiş ve 5 mm deplasman artımları uygulanmıştır. Tekrar ileri yükleme yapılırken eğrinin oldukça yatarak eğiminin azaldığı yani rijitliğin düştüğü gözlenmiştir.

Bir çevrim uygulanmış ve ileri çevrimde 84 kN yük düzeyi ve 33 mm deplasmana ulaşılmıştır. Bu çevrimde ayrılma çatlağı genişliği 5 mm'ye çıkmıştır. Geri yüklemede 82 kN yük düzeyi ve 38 mm uç deplasmanına ulaşılmıştır.

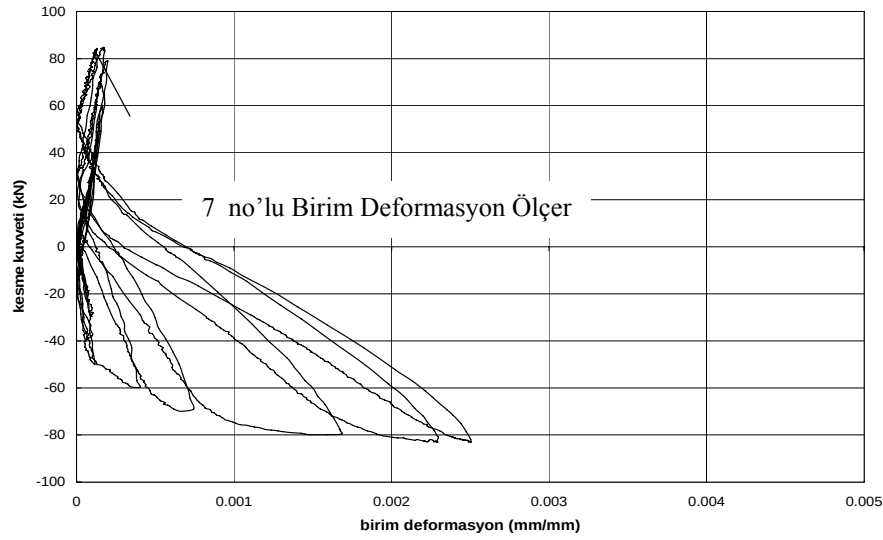
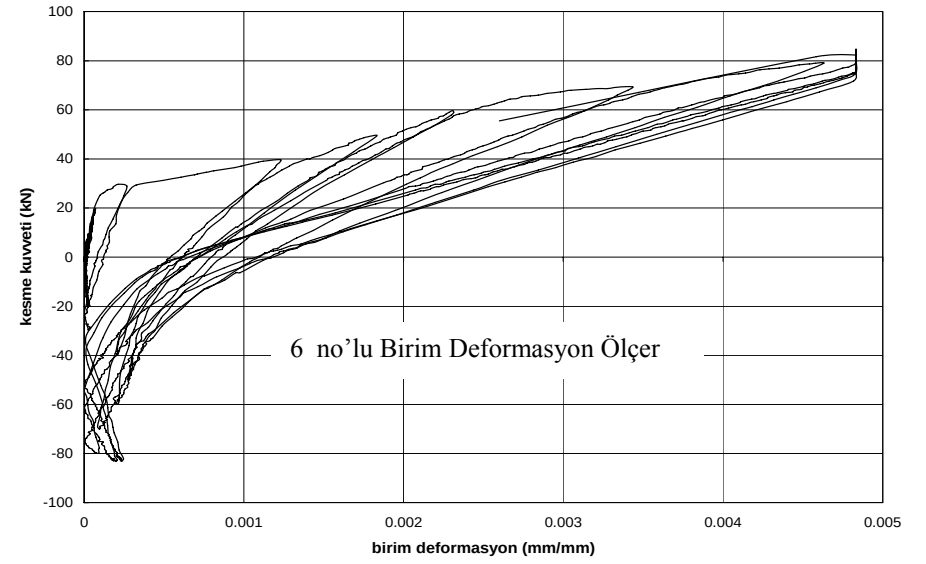
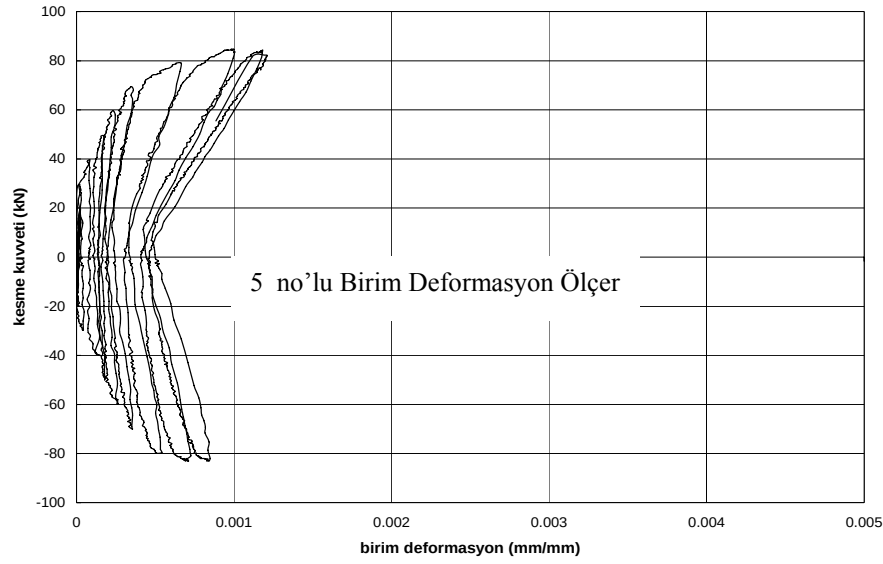
Tekrar ileri yükleme yapılırken 82 kN yük düzeyinde, çekme donatısının altındaki CFRP'nin yüzeyden kalkması ve tüm kiriş boyunca kabuk betonun gövdeden ayrılması sonucu göçmeye ulaşılmıştır. Kiriş-temel kirişi birleşim bölgesinde alt kısımda, CFRP beton yüzeyinden ayrılmış ve betonu kaldırmıştır. Bu çatlak kiriş eksenine paralel biçimde kiriş boyunca ilerlemektedir.



Şekil 3.23 5 no'lu deney elamanına ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.24 5 no'lu deney elamanına ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.25 5 no'lu deney elamanına ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.26 Deney elemanı 5'in 10. geri çevrim sonundaki görünüşü

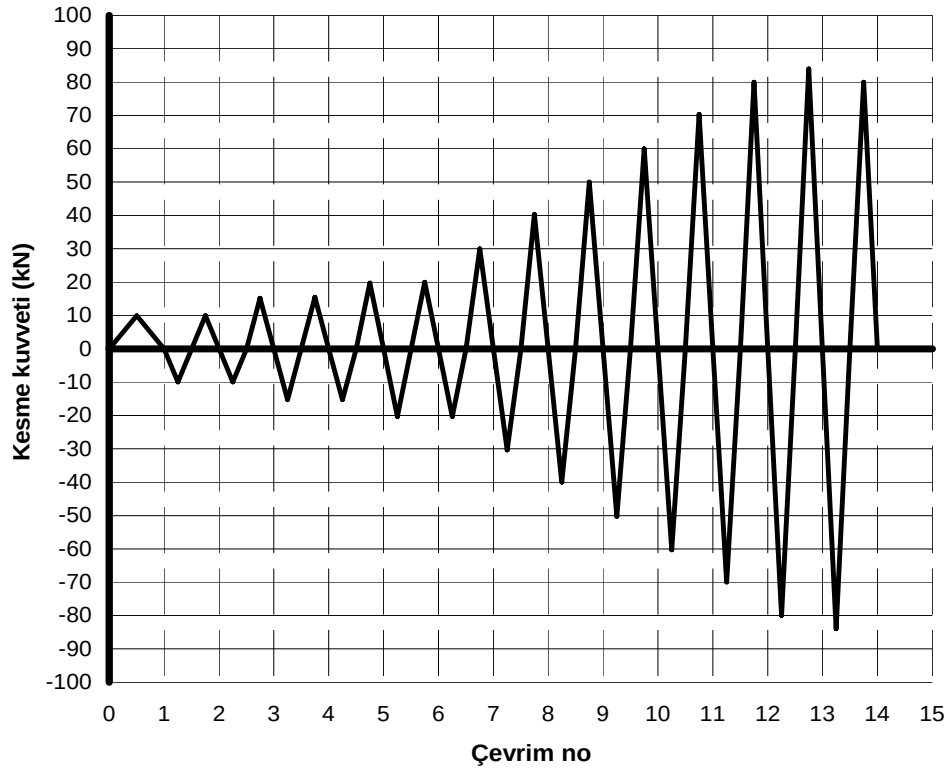


Şekil 3.27 Deney elemanı 5'in yükleme ucunda fiber dokumada oluşan ayrılma

3.6 Deney Elemanı-6

Bu deney elemanında iki kat, çift yönlü karbon lifli dokuma ile güçlendirme yapılmıştır. Uygulama kiriş gövdesinin yan yüzeylerine yapılmıştır. Ankrajlar kirişin alt ve üst uçlarında uygulanmıştır. İlk eğilme çatlağı 2. çevrimde ve 10 kN yük düzeyinde oluşmuştur. 13. çevrimin ileri yüklemesinde 84 kN yük düzeyinde ve 28 mm uç deplasmanında akma gözlenmiştir.

Çekme donatısının altındaki karbon lifli dokumanın yüzeyden ayrılması ile tüm kiriş boyunca oluşan kabuk betonun ayrılması gerçekleşmiştir. Sonraki çevrimde 72 kN yük düzeyinde yükleme kolonu yakınında fiber dokuma yırtılarak kopmuş ve göçme gerçekleşmiştir.



Şekil 3.28 Deney elemanı-6'ya ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

2. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 10 kN'dur. Geri yüklemede tabla üzerinde ilk kılcal düzeydeki eğilme çatlağı gözlenmiştir.

6. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 20 kN'dur. Geri yükleme yapılırken eğilme çatlaklarının sayısında artış olmuş ve bu çatlaklar tabla altına doğru ilerleme eğilimi göstermişlerdir.

7. çevrim:

30 kN yük düzeyine çıkılan bu çevrimde, ileri çevrimde kiriş altında kılcal düzeyde eğilme çatlağı gözlenmiştir. Geri çevrimde kiriş ile temel girişinin birleştiği bölgede 0,1 mm genişliğinde kılcal çatlak görülmüştür.

8. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 40 kN'dur. İleri yükleme sırasında kiriş alt yüzeyindeki eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. Geri yükleme adımıyla tabladaki eğilme çatlaklarının sayısı artış göstermiştir.

9. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 50 kN'dur. Geri çevrimde tabladaki eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. Bu çevrime kadar yük-deplasman eğrisinde rijitlikte herhangi bir azalma görülmemiştir.

10. çevrim:

60 kN yük düzeyinde gerçekleşen bu çevrimde, tabladaki eğilme çatlakları moment-eğrilik ölçüm bölgesine doğru ilerleme göstermiştir. Birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı genişliği ise 0,2 mm'ye ulaşmıştır.

11. çevrim:

70 kN yük düzeyine çıkılan bu çevrimde kiriş altındaki eğilme çatlakları artış göstermiştir. Geri ve ileri yükleme adımlarında rijitlikte az da olsa bir azalma gözlenmiştir.

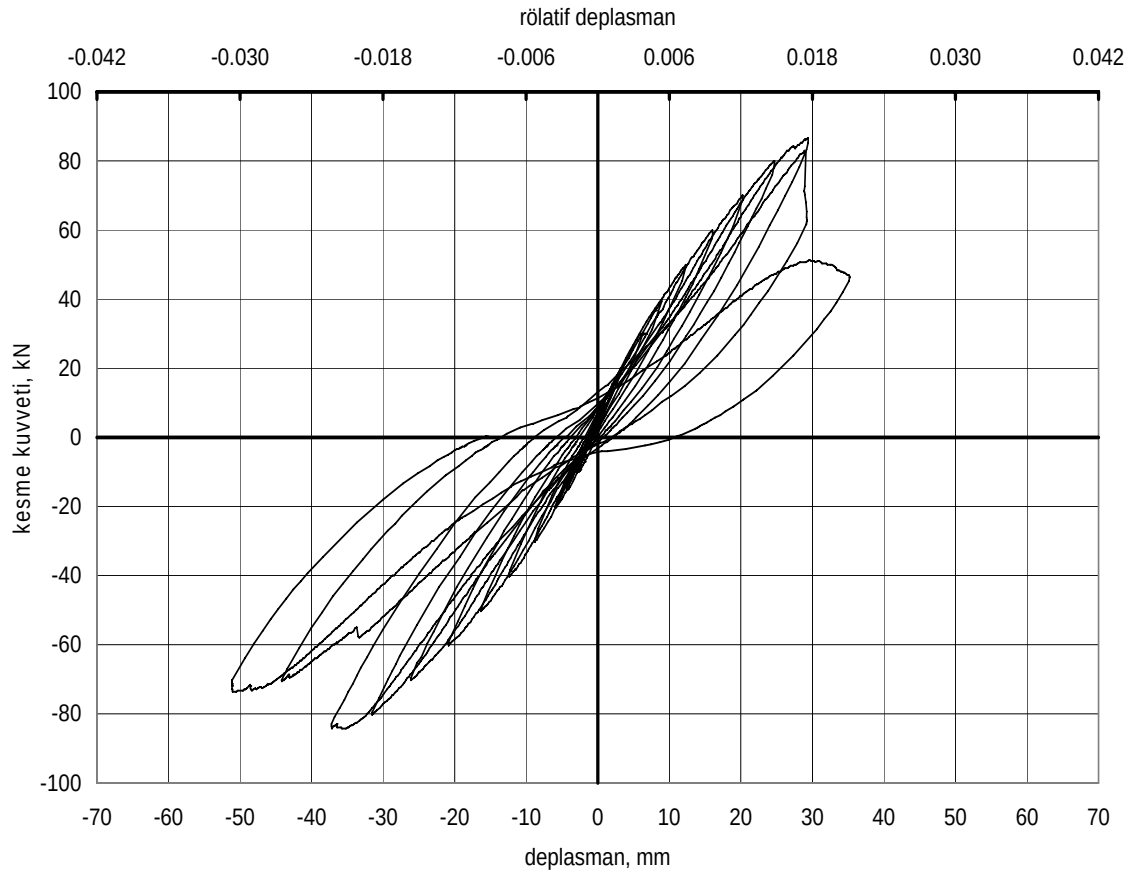
12. çevrim:

80 kN yük düzeyli bu çevrime başlarken bir miktar pekleşme etkisi gelişmiştir. Ayrıca birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı genişliği 0,4 mm'ye ulaşmıştır.

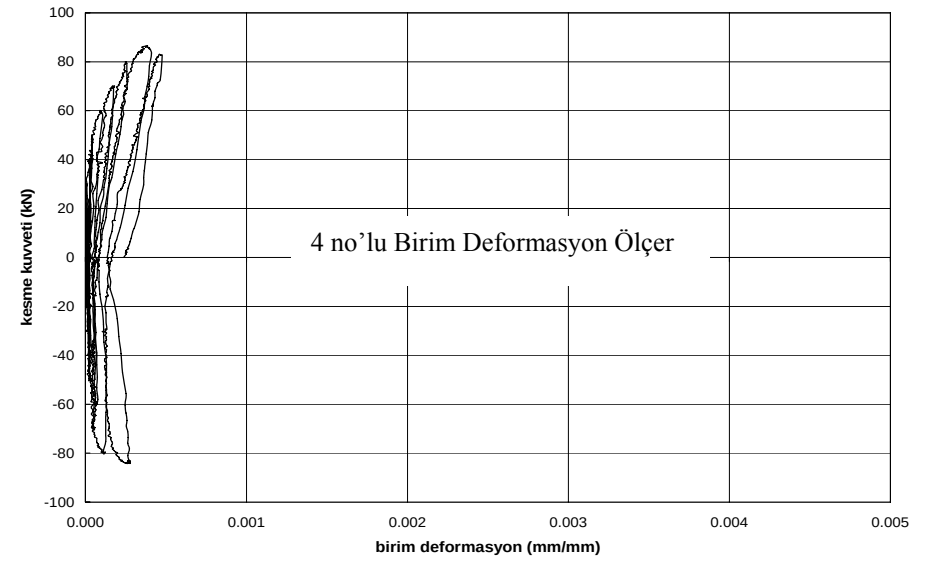
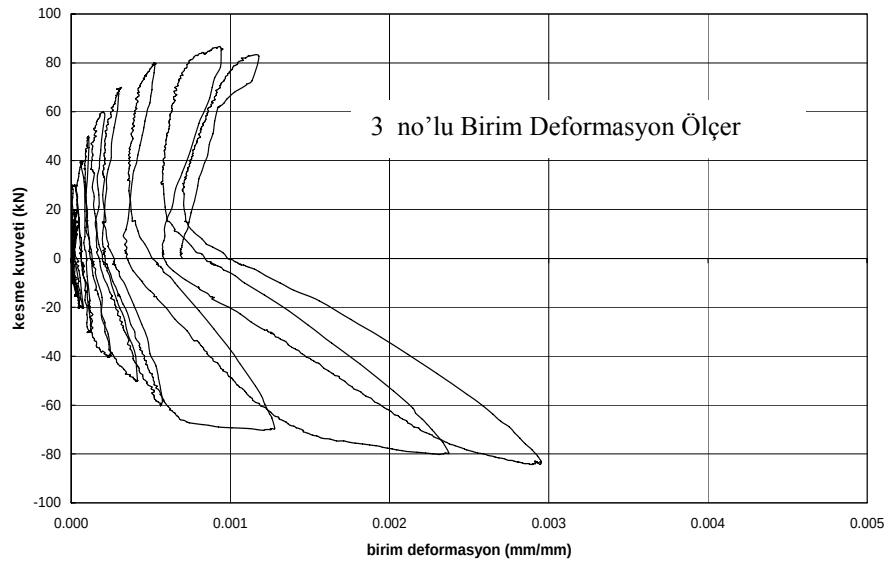
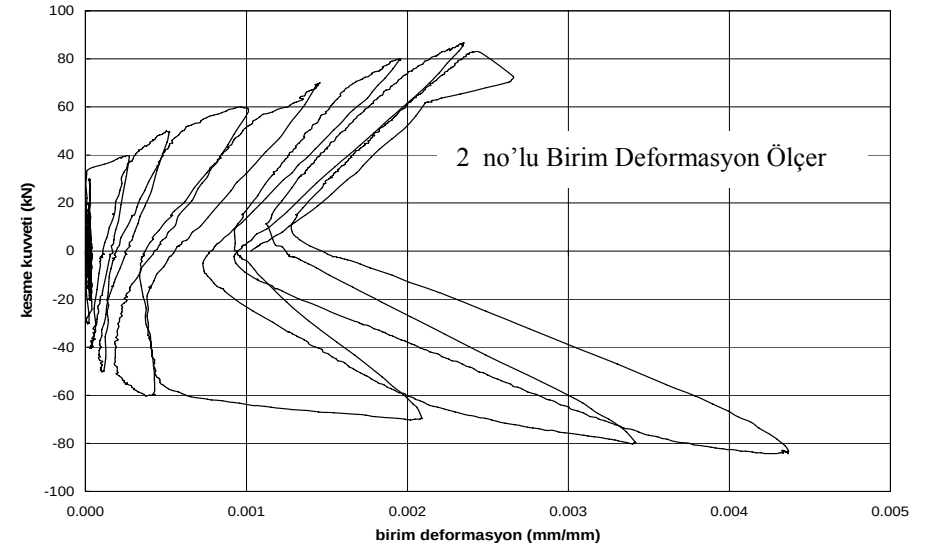
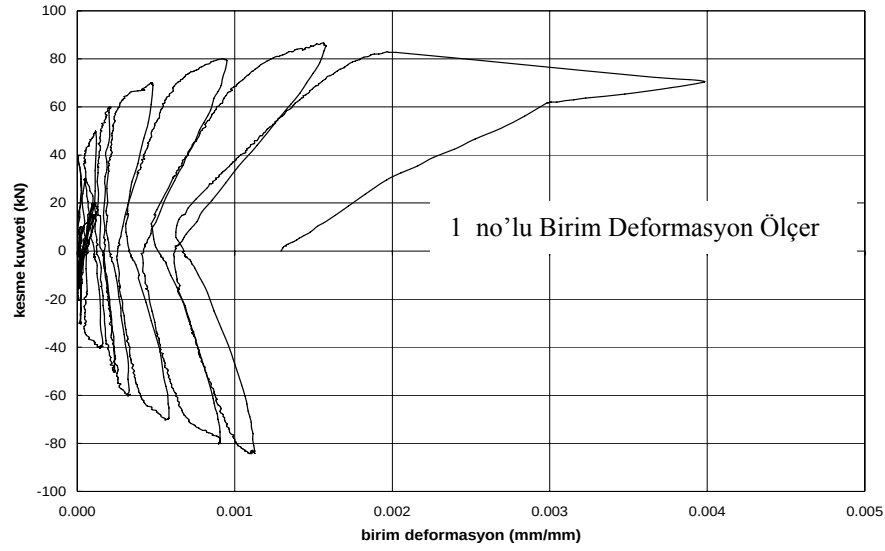
13. çevrim:

90 kN yüke çıkılması planlanan bu çevrimde, ileri yüklemede 84 kN yük düzeyinde ve 28,5 mm uç deplasmanında iken donatı akmıştır. Ayrılma çatlağı genişliği 0,6-0,7 mm mertebesinde dir. Geri yükleme yapılırken 84 kN yükte ve 35 mm deplasman seviyesinde donatı akmıştır.

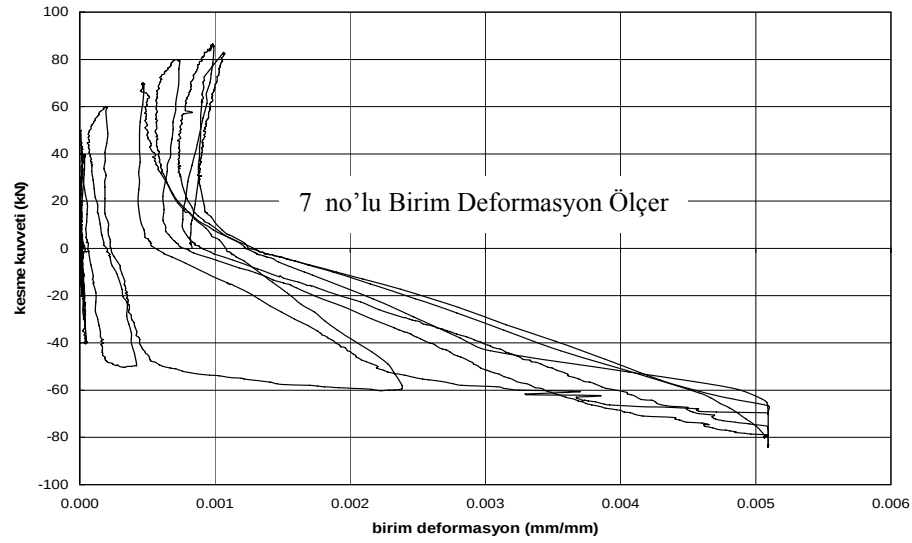
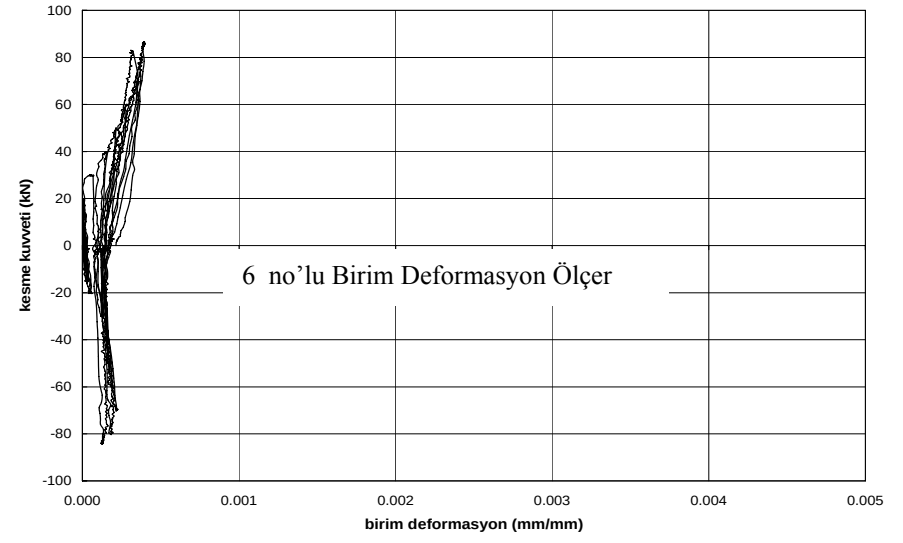
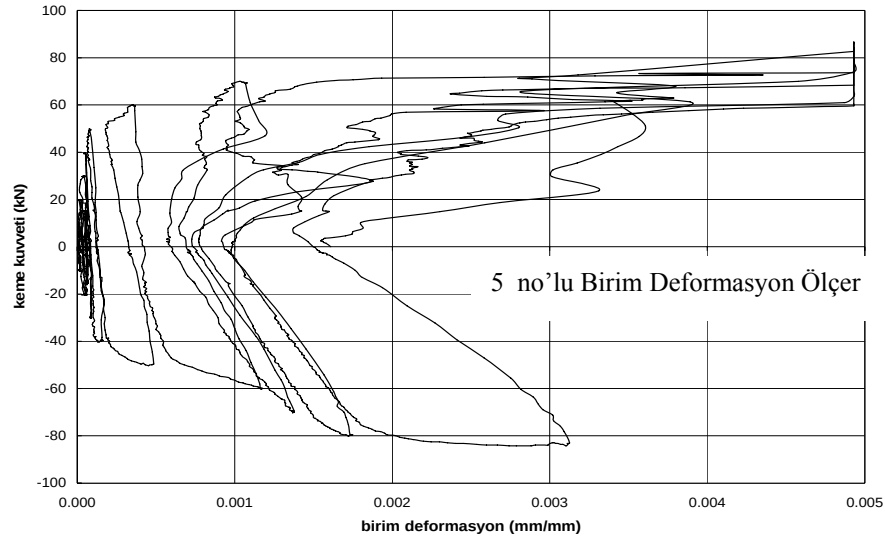
Bundan sonra deneye deplasman kontrollü devam edilmiştir. İleri yükleme yapılırken 80 kN mertebesinde kiriş altında eksene paralel çatlak oluşumu ile birlikte betonun gövdeden ayrılması gerçekleşmiştir. Alt ankrajların altındaki bölümde çekme donatısının altındaki kabuk betonu eksen boyunca ayrılmıştır. Geri yükleme yapılırken 72 kN'da yükleme kolonuna yakın bölgede gövde boyunca CFRP yırtılarak kopmuştur.



Şekil 3.29 Deney elemanı 6'ya ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.30 Deney elemanı 6'ya ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.31 Deney elemanı 6'ya ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



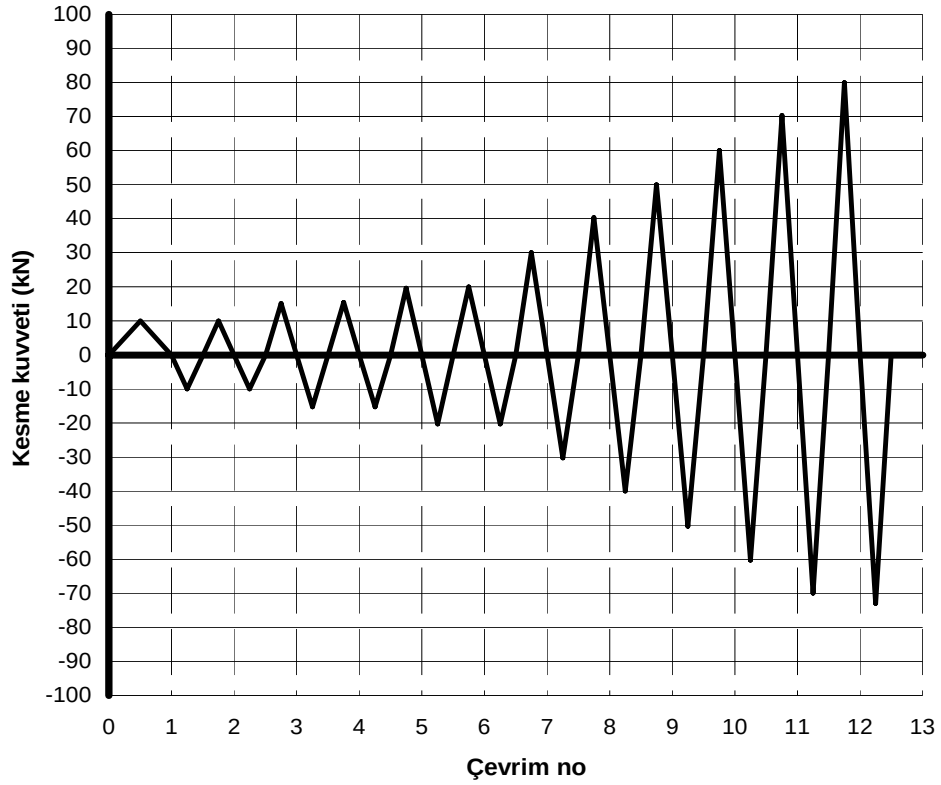
Şekil 3.32 Deney elemanı 6'nın kiriş alt yüzeyinde oluşan çatlaklar



Şekil 3.33 Deney elemanı 6'nın yükleme ucunda görülen dokumanın kopması

3.7. Deney Elemanı-7

Bu deneyde tek kat, çift yönlü karbon lifli dokuma ile güçlendirme yapılmıştır. Uygulama kiriş gövdesinin yan yüzeylerine ve tablanın altına Γ biçiminde yapılmıştır. Ankrajlar kirişin üst bölgesinde mevcuttur. Dokuma kiriş altını da dolaştığı için kiriş alt ucunda ankraj yoktur. İlk eğilme çatlağı 2. çevrimde ve 10 kN yük düzeyinde oluşmuştur. 72 kN yük düzeyinde bir önceki çevrimde oluşan CFRP'yi yırtan çatlak ankrajın altına kadar ilerlemiştir. 1 no'lu deformasyon ölçeri kesecek şekilde tablanın üstünden başlayan eğik çatlak kirişin alt kısmına kadar ilerleyerek CFRP yi yırtmış ve kiriş kesmeden kırılmıştır.



Şekil 3.34 Deney elemanı-7'ye ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

1. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 10 kN'dur. Geri yüklemede tablada ilk eğilme çatlağı gözlenmiştir.

3. çevrim:

Bu çevrimin en büyük yükü 15 kN'dur. Geri yükleme adımımda tablada, temel kirişinden 35, 65 ve 100 cm uzakta eğilme çatlakları görülmüştür.

4. çevrim:

15 kN yük düzeyine çıkılan bu çevrimde geri yükleme sırasında birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı 0,1 mm olarak gözlenmiştir.

8. çevrim:

40 kN yük düzeyinde tekrarlanan bu çevrimde geri yüklemede tabladaki eğilme çatlakları sayısı artış göstermiştir. Ayrıca birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı genişliği 0,2 mm'ye ulaşmıştır.

9. çevrim:

50 kN maksimum yük düzeyine sahip bu çevrimde geri yüklemede tabladaki eğilme çatlaklarının temel kirişine birleşim bölgesine de ilerlediği gözlenmiştir.

10. çevrim

60 kN yük düzeyli bu çevrimde geri yükleme sırasında tabladaki eğilme çatlağı sayısı artış göstermiştir. Özellikle temel kirişinden itibaren yaklaşık 15 ve 35 cm uzaklıktaki eğilme çatlağı genişlikleri artmıştır. Birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı genişliği 0,3 mm düzeyindedir.

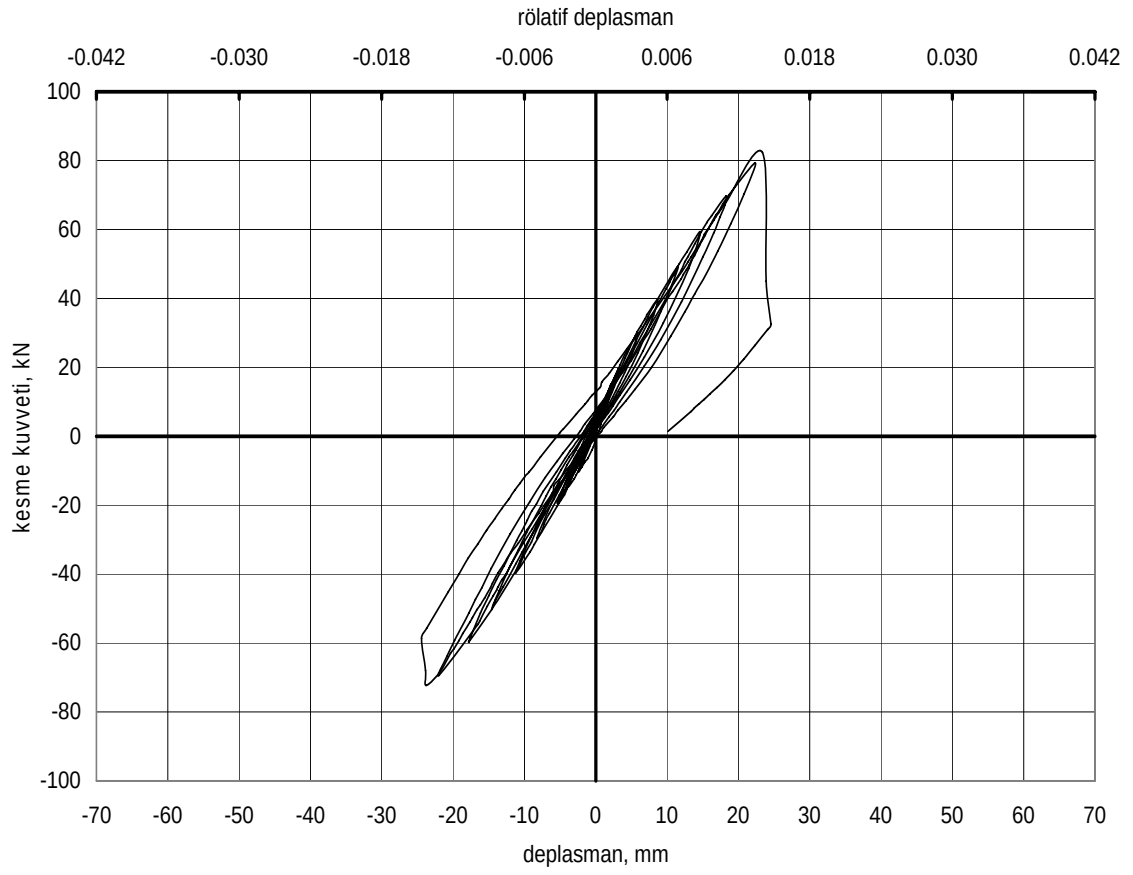
11. çevrim:

Bu çevrimde en büyük yük 70 kN'dur. Geri yükleme sırasında temel kirişinden 65 cm uzaklıkta ankraj üstündeki CFRP yırtılmıştır. Kiriş eksenine dik yönde ilerleyen bu çatlak CFRP'nin yırtılmasına neden olmuştur.

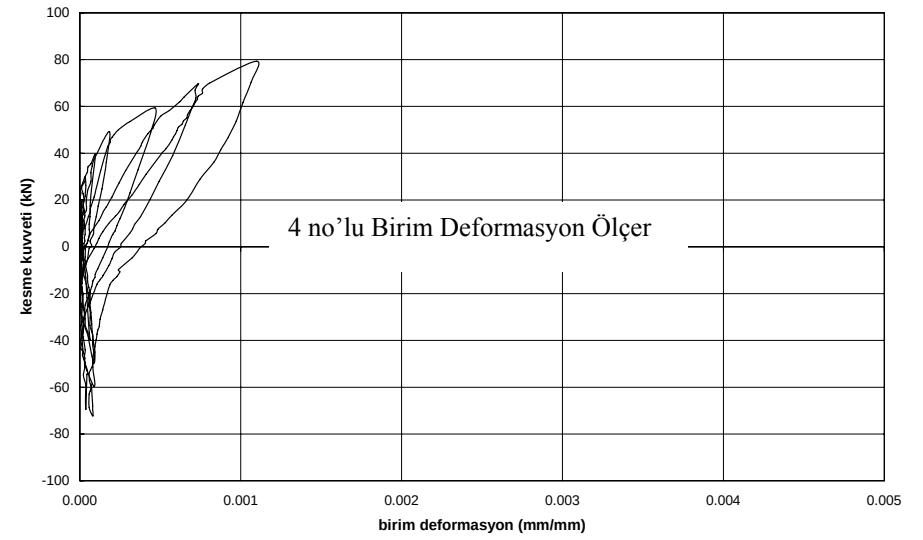
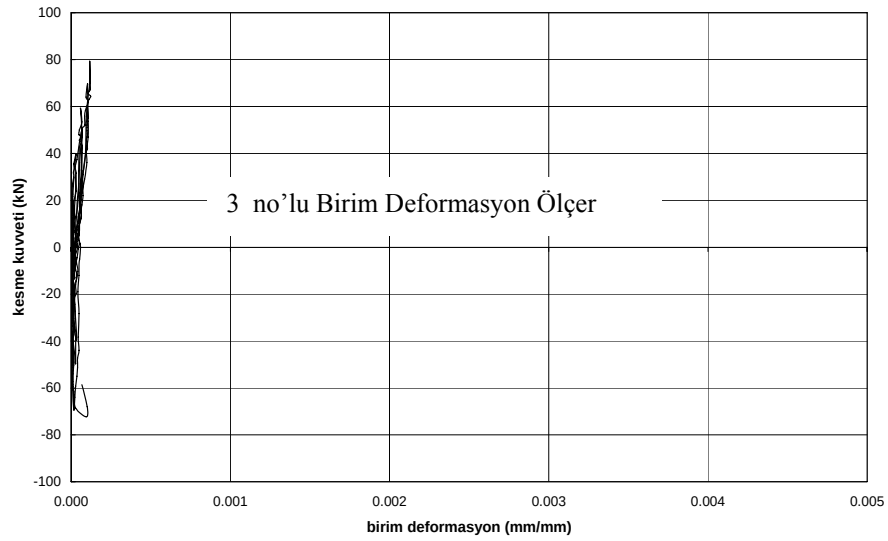
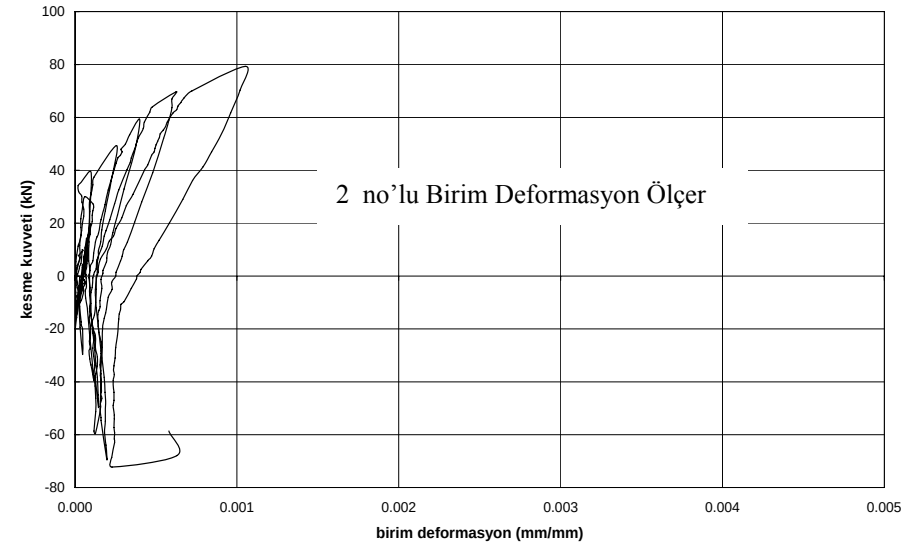
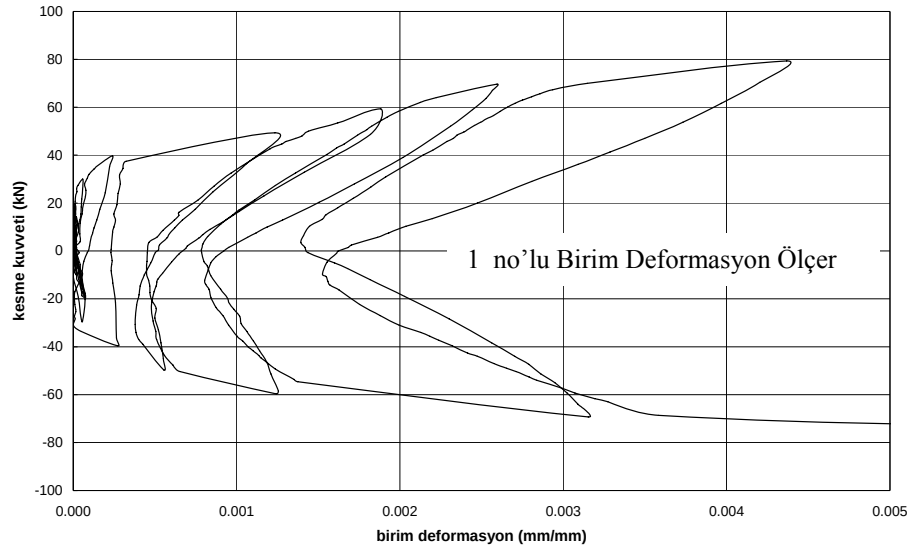
12. çevrim:

80 kN hedeflenen bu çevrimde geri yükleme yapılırken, 72 kN yük düzeyinde bir önceki çevrimde oluşan CFRP'yi yırtan çatlak ankrajın altına kadar ilerlemiştir. 1 no'lu deformasyon ölçeri kesecek şekilde tablanın üstünden başlayan eğik çatlak kirişin alt kısmına kadar ilerleyerek CFRP'yi yırtmış ve kiriş kesmeden kırılmıştır.

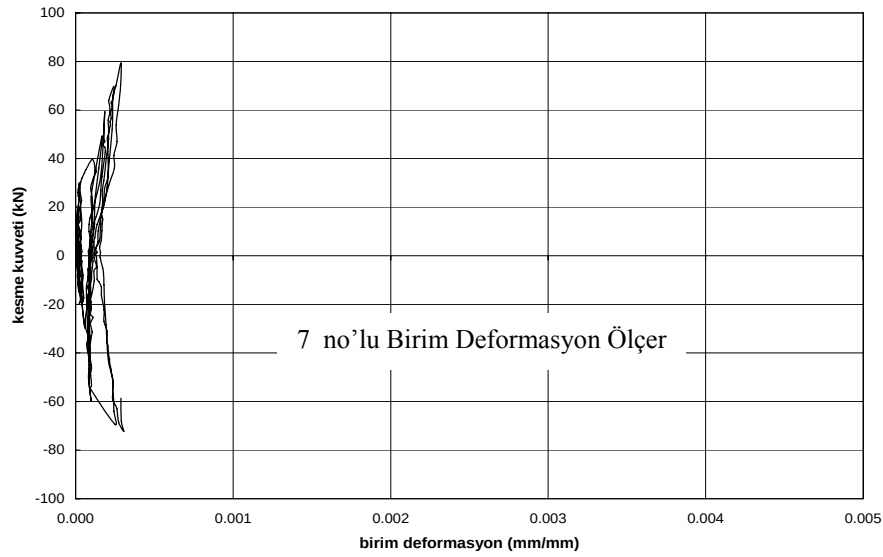
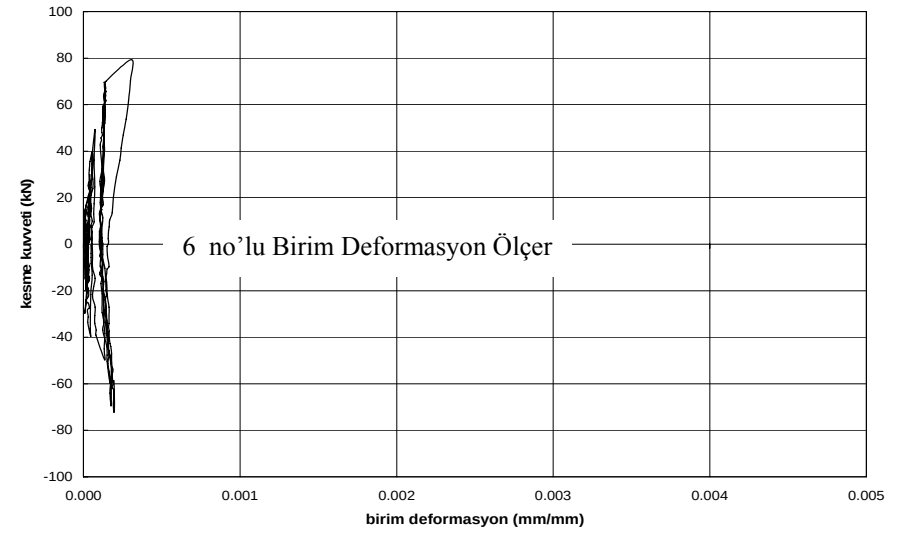
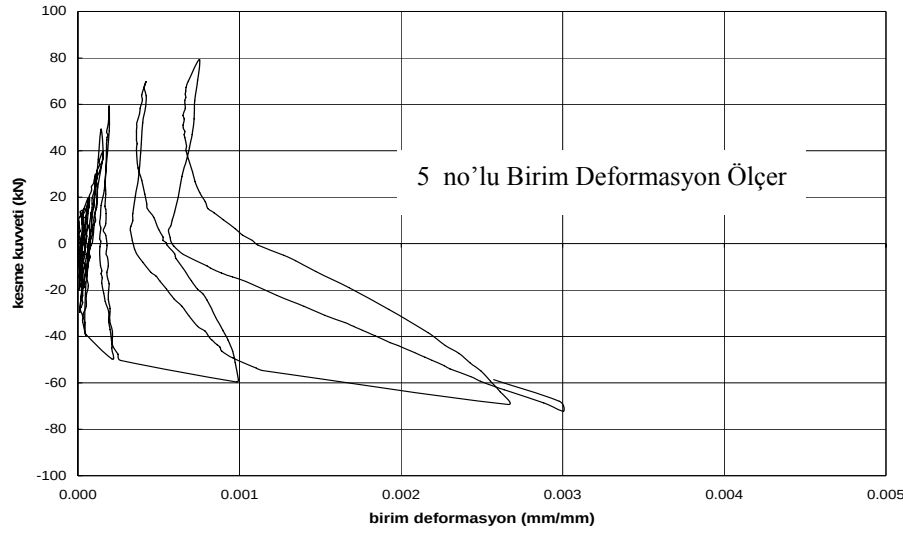
Bir sonraki çevrimde ileri yükleme yapılırken 81 kN yük düzeyinde bir önceki çevrimde oluşan eğik çatlak ilerleyip genişlemiş ve kirişin gevrek bir şekilde göçerek yük almamasına sebep olmuştur.



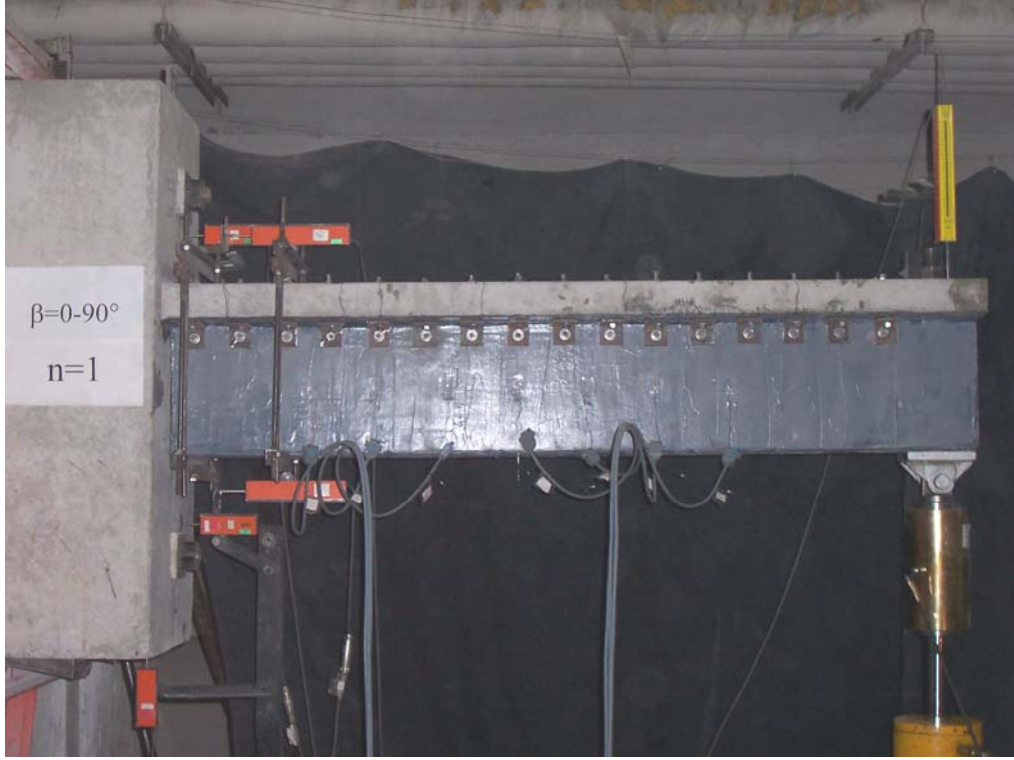
Şekil 3.35 Deney elemanı 7'ye ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.36 Deney elemanı 7'ye ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.37 Deney elemanı 7'ye ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



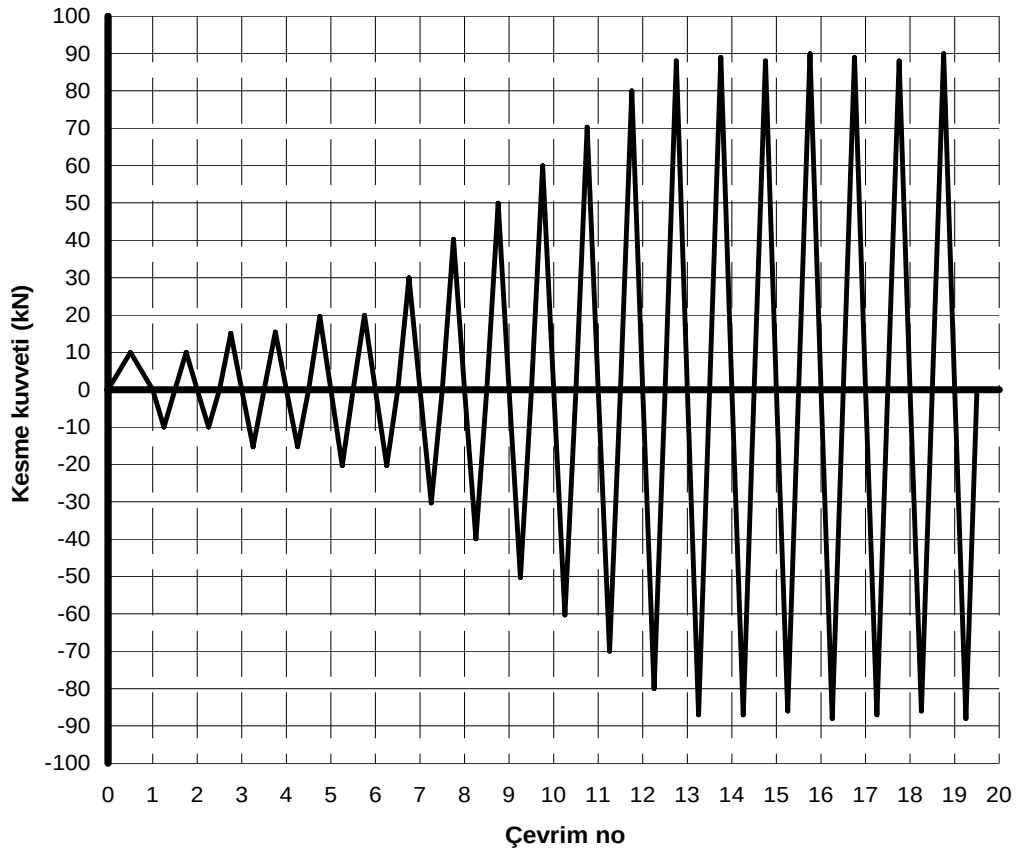
Şekil 3.38 Deney elemanı 7'nin ilk eğilme çatlaklarından sonraki görünümü



Şekil 3.39 Deney elemanı 7'nin deformasyon ölçerleri ve kesme çatlağı

3.8 Deney Elemanı-8

Bu deneyde iki kat, çift yönlü karbon lifli dokuma ile güçlendirme yapılmıştır. Uygulama kiriş gövdesinin yan yüzeylerine ve tablanın altına $\sqcap$ biçiminde yapılmıştır. Ankrajlar kirişin üst bölgesinde mevcuttur. Dokuma kiriş altını da dolaştığı için kiriş alt ucunda ankraj yoktur. İlk eğilme çatlağı 2. çevrimde ve 10 kN yük düzeyinde oluşmuştur. 13. çevrimde ileri yükleme yapılırken 88 kN’da ve 27 mm deplasmanda iken donatı akmıştır. Geri çevrimde ise 87 kN da ve 30 mm deplasman seviyesinde akma gerçekleşmiştir. Akma anında ulaşılan yük düzeyleri korunarak ileri çevrimde 62 mm, geri çevrimde 65 mm deplasmana çıkılmıştır. Plastik mafsallaşmanın tam olarak gerçekleştiği görülmüştür. Deney elemanı yalnızca plastik mafsal etrafında hareket etmektedir. Bu noktadan sonra deneye son verilmiştir.



Şekil 3.40 Deney elemanı-8'e ait kesme kuvveti-çevrim grafiği

2. çevrim:

10 kN yük düzeyli bu çevrimin geri yüklemesinde tablada ilk eğilme çatlakları görülmüştür. Çatlaklar, temel kirişinden yaklaşık 25 ve 130 cm uzakta gelişmişlerdir.

8. çevrim:

40 kN maksimum yüke çıkılan bu çevrimde, geri yüklemede temel kirişinden 50 cm uzakta tablada bir eğilme çatlağı oluşmuştur.

9. çevrim:

50 kN en büyük yüke sahip olan bu çevrimde, geri yükleme sırasında temel kirişinden yaklaşık 60 ve 80 cm uzakta tabla üzerinde eğilme çatlakları gözlenmiştir.

10. çevrim:

60 kN yük düzeyine sahip bu çevrimde geri yüklemede temel kirişinden 25 cm uzakta, tabladaki eğilme çatlağı genişlemiştir. Ayrıca temel kirişinden 110 cm uzaklıkta tabla üzerinde yeni bir eğilme çatlağı oluşmuştur. Birleşim bölgesindeki ayrılma çatlağı 0,1 mm genişliktedir.

11. çevrim:

Bu çevrimin maksimum yükü 70 kN'dur. Geri çevrimde ayrılma çatlağı 0,25 mm olarak gözlenmiştir. Birleşim bölgesinden 25 cm uzaktaki çatlak genişlemeye devam etmektedir. Bu çevrimlere kadar yük-deplasman eğrisinde belirgin bir rijitlik değişimi görülmemiştir.

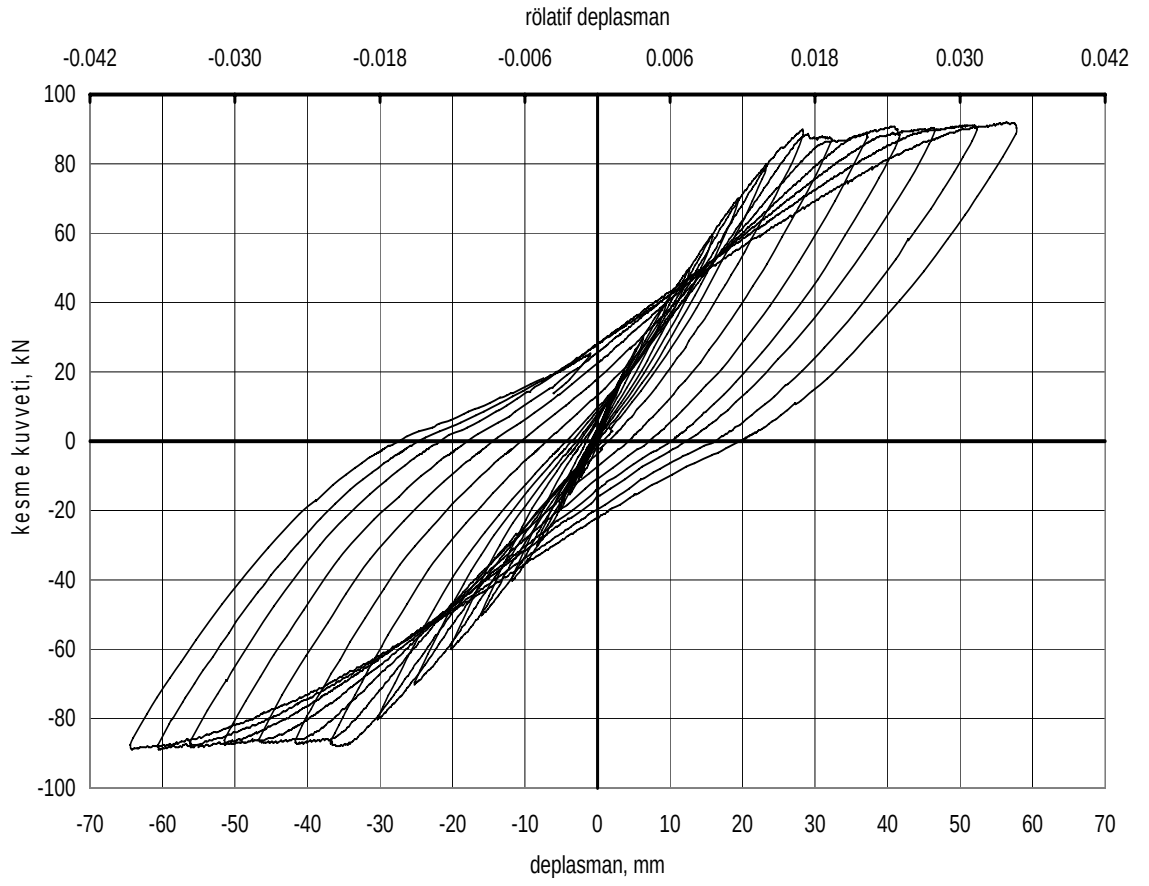
13. çevrim:

90 kN'a çıkılması hedeflenen bu çevrimde, ileri yükleme yapılırken 88 kN'da ve 27 mm deplasmanda iken donatı akmıştır. Geri çevrimde ise 87 kN'da ve 30 mm deplasman seviyesinde akma gerçekleşmiştir.

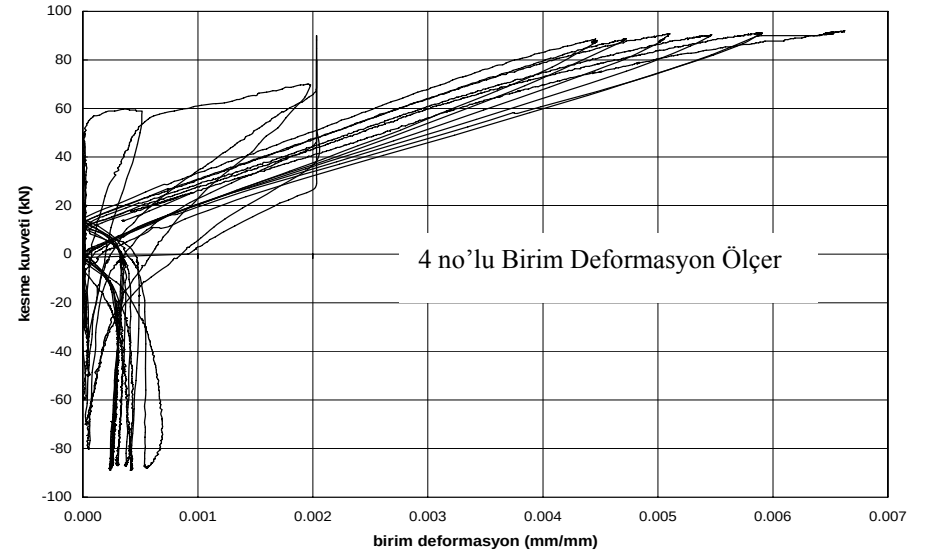
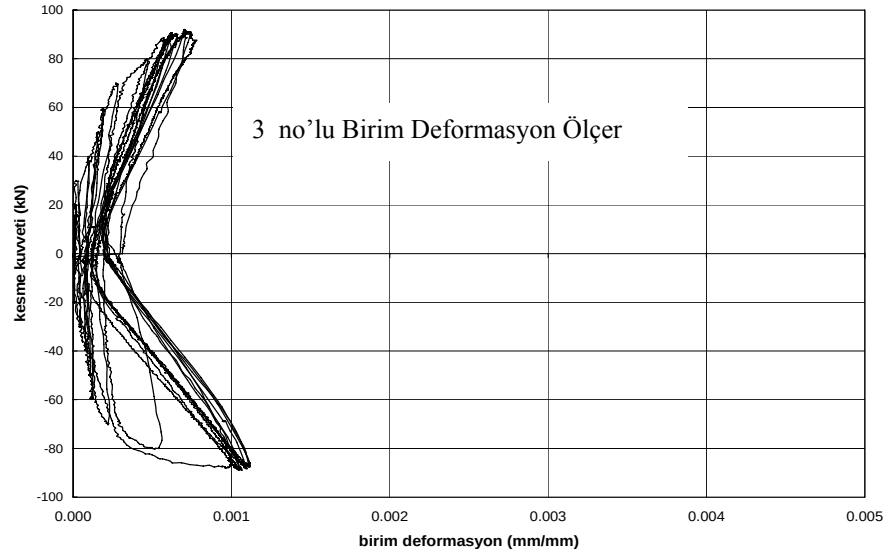
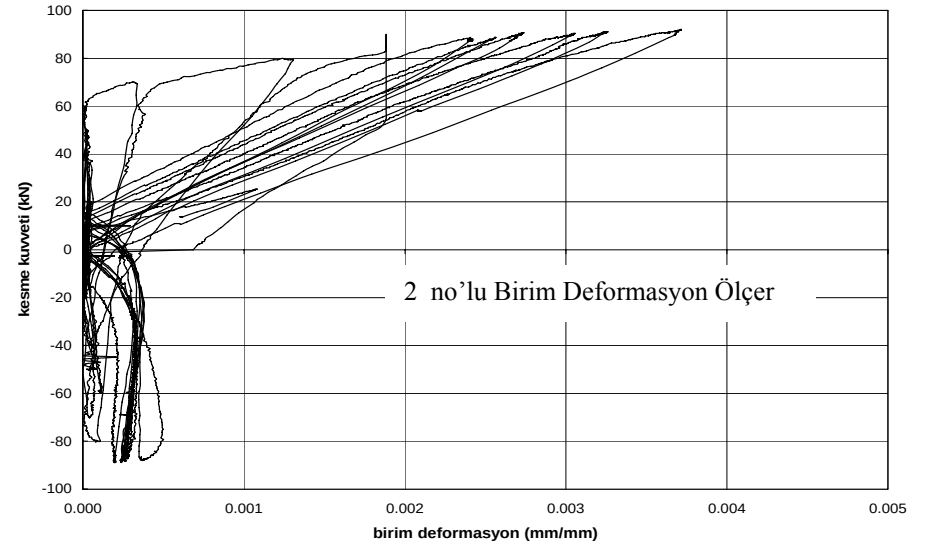
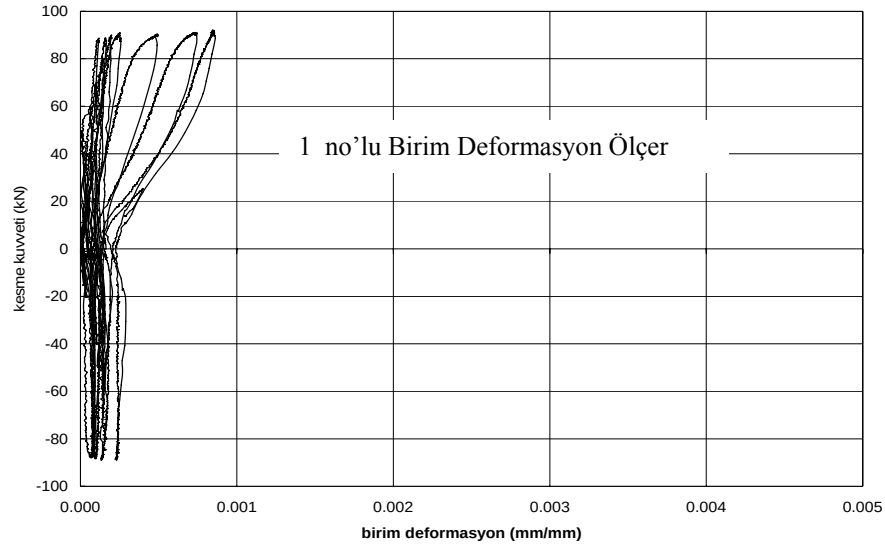
Akma gerçekleştikten sonra deplasman değerleri 5 mm artırılarak ileri ve geri çevrimlere devam edilmiştir. Bundan sonraki yük çevrimlerinde akma anındaki yük değerlerinde düşme görülmeden eleman deplasman yapmaya devam etmiştir.

17. çevrimin ileri yüklemesinde ve deplasman 52 mm iken birleşim bölgesinde tabla altındaki CFRP yaklaşık 15 cm boyunca beton yüzeyinden ayrılmıştır.

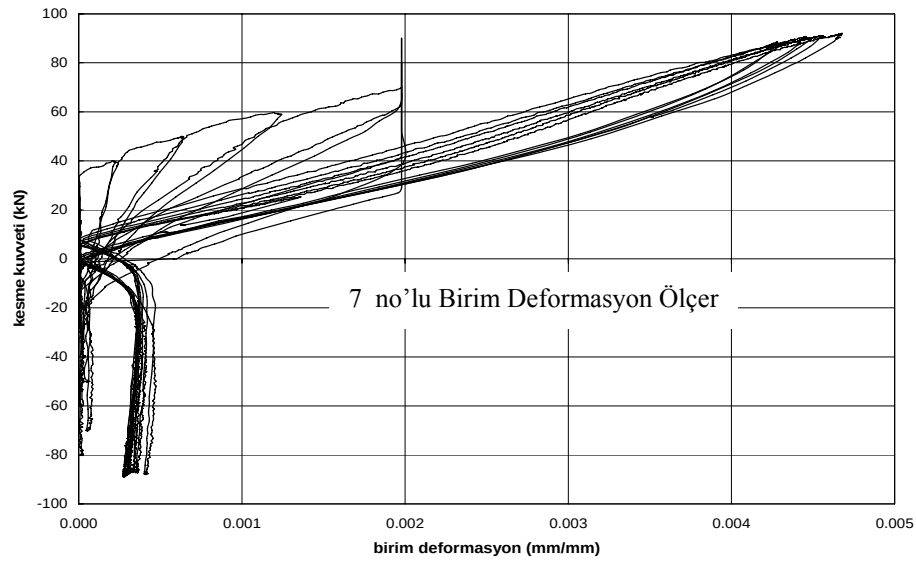
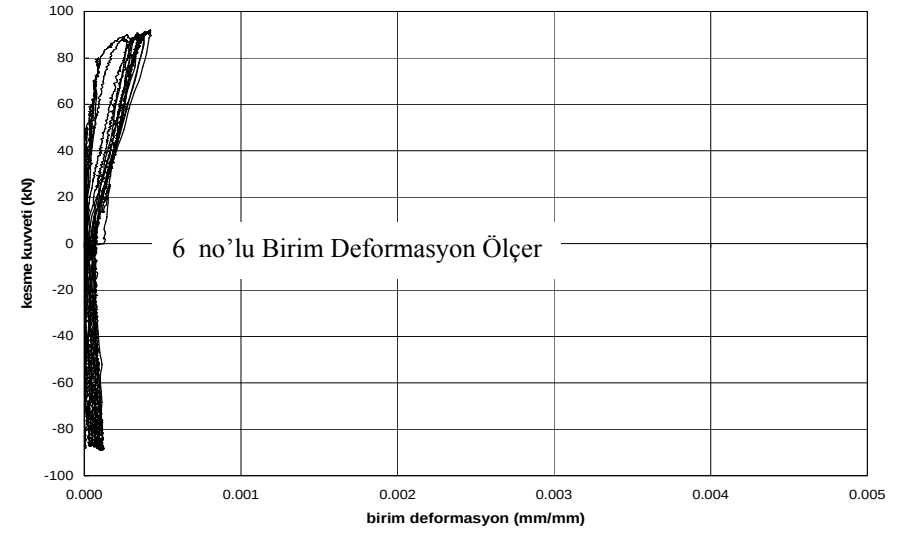
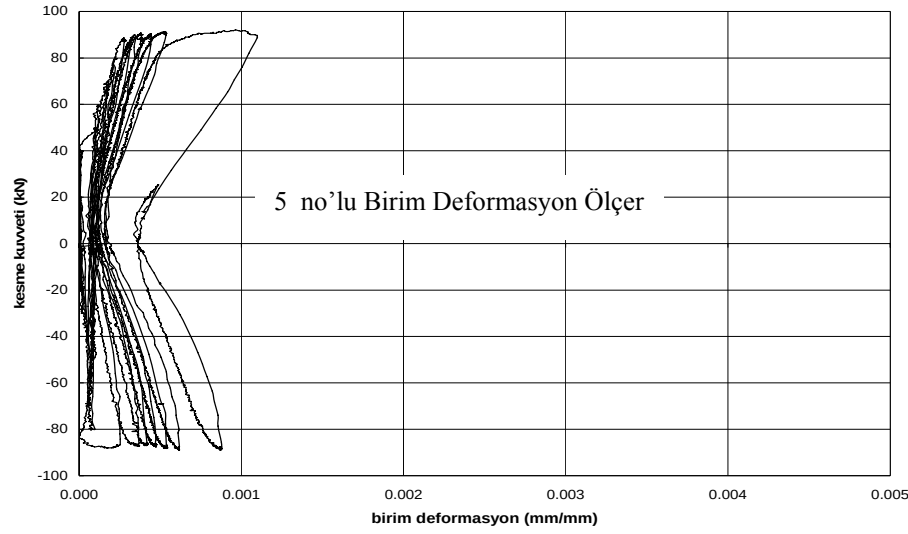
Akma anında ulaşılan yük düzeyleri korunarak ileri çevrimde 62 mm, geri çevrimde 65 mm deplasmana çıkmıştır. Plastik mafsallaşmanın tam olarak gerçekleştiği görülmüştür. Deney elemanı yalnızca plastik mafsal etrafında hareket etmektedir. Bu noktadan sonra deneye son verilmiştir.



Şekil 3.41 Deney elemanı 8'e ait kesme kuvveti-deplasman grafiği



Şekil 3.42 Deney elemanı 8'e ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.43 Deney elemanı 8'e ait kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri



Şekil 3.44 Deney elemanı 8'in 4. ileri çevrimdeki görünüşü



Şekil 3.45 Deney elemanı 8'in birleşim bölgesinde tabladaki ayrılma çatlağı

BÖLÜM DÖRT

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deney sonuçları dayanım, davranış, rijitlik ve enerji tüketimi açısından irdelenmiştir. Ayrıca deney elemanlarının kesme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri incelenmiştir. Deney sonuçları, CFRP levhaların tipine (tek yönlü-çift yönlü CFRP), uygulama biçimine, katman sayısına ve kesit üzerindeki uygulama yerine bağlı olarak gruplanmış ve bu değişkenlerin farklılıkları araştırılmıştır.

4.1 Dayanım ve Davranış

Dayanım güçlendirme etkisinin görülebileceği en önemli parametredir. Çalışmada deney elemanlarının kesme dayanımlarını değerlendirmek için, yük çevrimlerinde deney elemanına uygulanan maksimum yük değerlerinin birleştirilmesi ile elde edilen zarf eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca bu eğri yardımı ile deney elemanlarının deplasman değerleri de karşılaştırılmıştır.

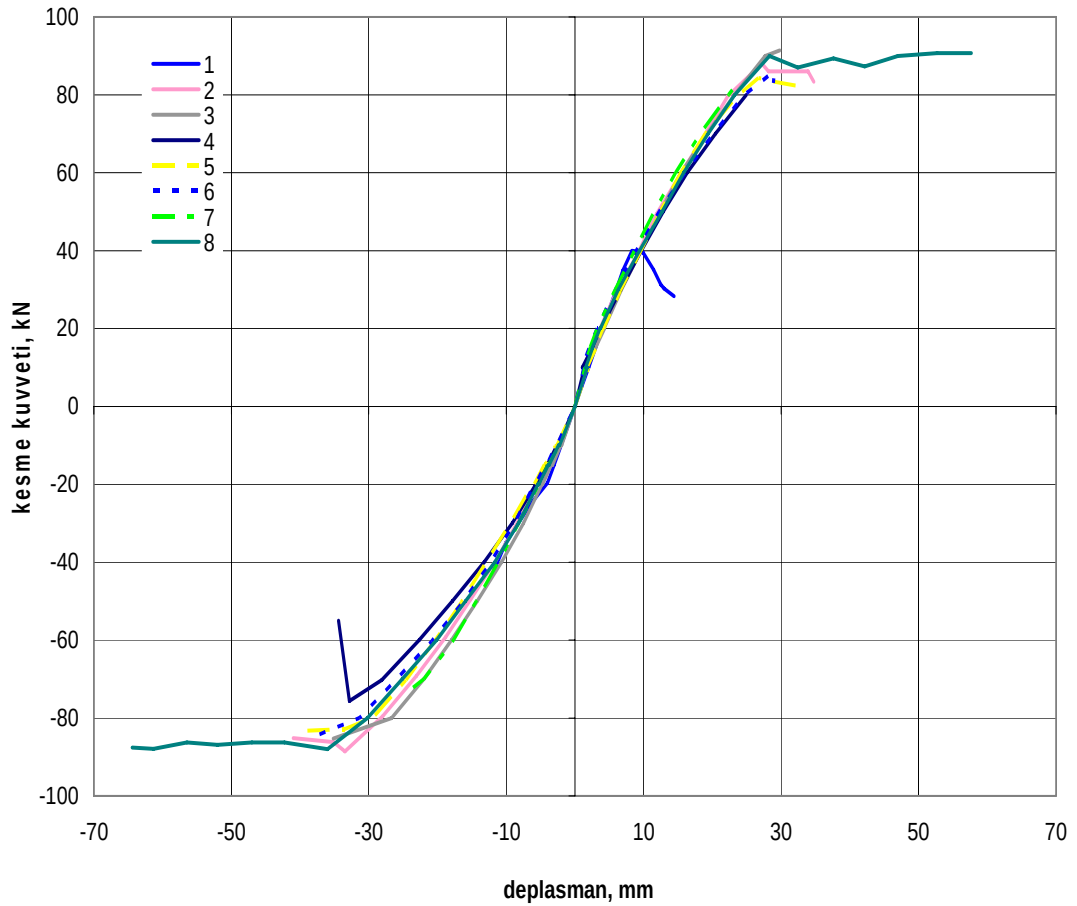
Güçlendirilen deney elemanlarının dayanımları, referans elemana göre 2,02-2,32 kat artmıştır. En az artış deney elemanı 4’de, en çok artış da deney elemanı 3’de görülmüştür.

Deney elemanlarında iki göçme tipi gözlenmiştir. Bunlar beton kabuk bölgesinin yüzeyden ayrılması ile gelişen kesme çatlağı ile oluşan göçme ve CFRP levhada oluşan yırtılma ardından oluşan göçme mekanizması tipleridir.

Deney elemanı 2, 3, 5, ve 6 beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. CFRP levhalar, kiriş alt boyuna donatısını çepeçevre sargılayamadıkları için, yani etriye davranışı gösteremediği için göçme gerçekleşmiştir. Ayrıca ankrajlardan kiriş alt boyuna donatısının üstüne aktarılan çekme kuvvetleri bu kesitte gerilme yığılmasına yol açmıştır. Bu elemanlarda 2,10-2,32 kat dayanım artışı sağlanmıştır.

Deney elemanı 4 ve 7 CFRP levhanın yırtılmasını takiben oluşan kesme çatlakları nedeni ile göçmeye ulaşmışlardır. CFRP levhada oluşan gerilmeler lif doğrultusundaki dayanımı aştığı için kopma gerçekleşmiştir. Bu iki elemanda dayanım artışı 2,01-2,02 mertebesinde dir.

Deney elemanı 2, 3, 5, ve 6'nın kiriş boyuna donatıları akmıştır. 4. ve 7. deney elemanlarında donatıda akma gerçekleşmemiştir. Bu elemanların tümü kesmeden göçmüştür. 8. deney elemanı ise eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Elemanlara ait zarf eğrisi Şekil 4.1'de görülmektedir. Deneyler ileri yükleme (pozitif eksen) ile başlayıp geri yükleme ile devam etmiştir.



Şekil 4.1 Deney elemanlarına ait zarf eğrisi

Deney elemanlarının moment taşıma kapasitelerinin, hesaplanan moment taşıma kapasitelerine oranlanmasıyla elde edilen değerler Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Maksimum eğilme momenti değerleri

Deney Elemanı No	Mu hesaplanan (kNmm)	Mu deneysel (kNmm)	<u>Deneyssel</u> Hesaplanan
1	131,7	66,2	0,50
2	127,9	148,3	1,16
3	129,3	153,1	1,18
4	126,8	133,5	1,05
5	130,5	141,3	1,08
6	133,1	142,9	1,07
7	127,9	137,9	1,08
8	127,1	151,9	1,20

Deney elemanlarının moment taşıma kapasiteleri referans elemana göre % 55-70 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Güçlendirme uygulanmış deney elemanlarında en az artış deney elemanı 4’de, en çok artış ise deney elemanı 8’de kaydedilmiştir.

Tablo 4.2’de deney elemanlarının ileri ve geri çevrimde elde edilen maksimum kesme kuvveti ve bu değere karşılık gelen deplasman değerleri ve göçme tipleri verilmiştir.

Tablo 4.2 Deney elemanlarının maksimum kuvvet ve deplasmanları

Deney Elemanı No	İleri Çevrimdeki		Geri Çevrimdeki		Göçme Mekanizması
	Maksimum Kesme Kuvveti (kN)	Maksimum Kesme Kuvvetinde Deplasman (mm)	Maksimum Kesme Kuvveti (kN)	Maksimum Kesme Kuvvetinde Deplasman (mm)	
1	39,52	10,50	39,49	11,43	Kesme
2	88,33	27,20	87,89	33,69	Eğilme+Kesme
3	91,38	29,80	86,00	35,13	Eğilme+Kesme
4	79,67	24,84	75,61	32,80	Kesme
5	83,00	33,18	81,93	39,24	Eğilme+Kesme
6	85,33	29,42	83,27	37,20	Eğilme+Kesme
7	79,33	22,35	72,28	23,80	Kesme
8	91,72	57,29	88,26	64,40	Eğilme

Güçlendirilen deney elemanlarının kesme dayanımlarının, referans deney elemanının kesme dayanımına oranları ve göçme tipleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

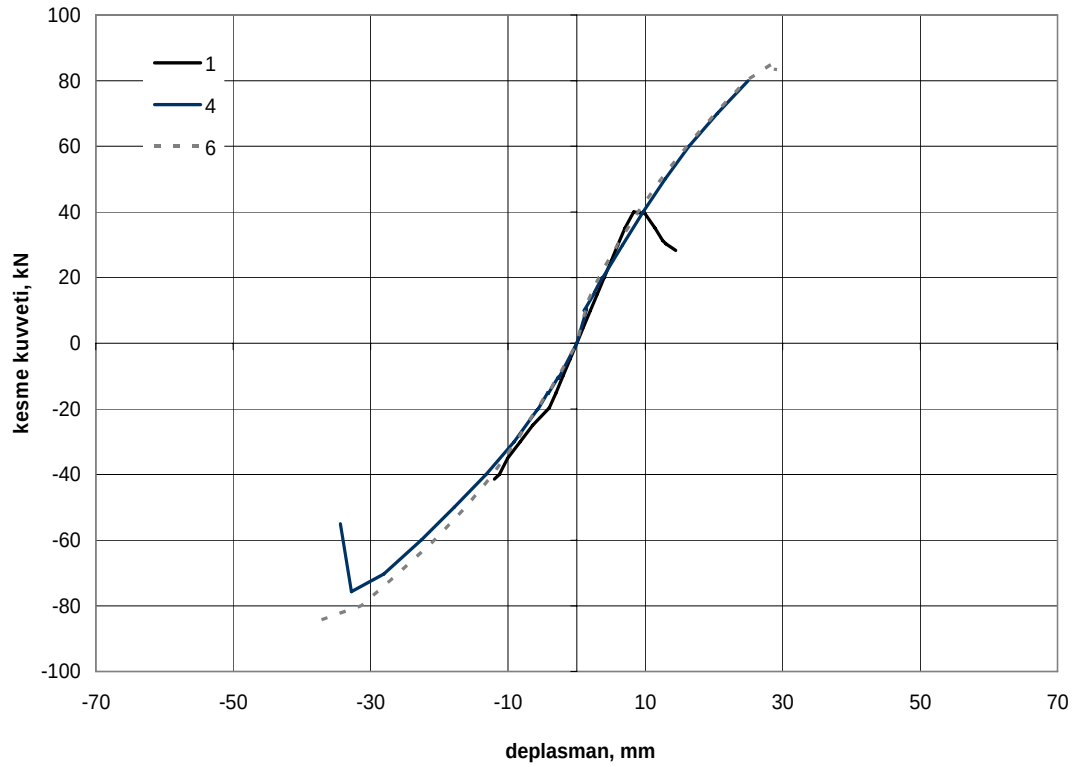
Tablo 4.3 Maksimum kesme kuvveti değerleri

Deney Elemanı No	Maksimum kesme kuvveti (kN)	Maksimum kesme kuvveti Referans kesme kuvveti
1	39,52	1,00
2	88,33	2,24
3	91,38	2,31
4	79,67	2,02
5	83,00	2,10
6	85,33	2,16
7	79,33	2,01
8	91,72	2,32

Deney elemanları deneysel çalışmanın değişkenleri olarak belirlenen CFRP levhaların katman sayısı, CFRP levhaların uygulama şekli, CFRP uygulama açısı ve CFRP tipini içeren biçimde gruplandırılmış, değişkenlerin dayanım ve davranışa katkıları irdelenmiştir.

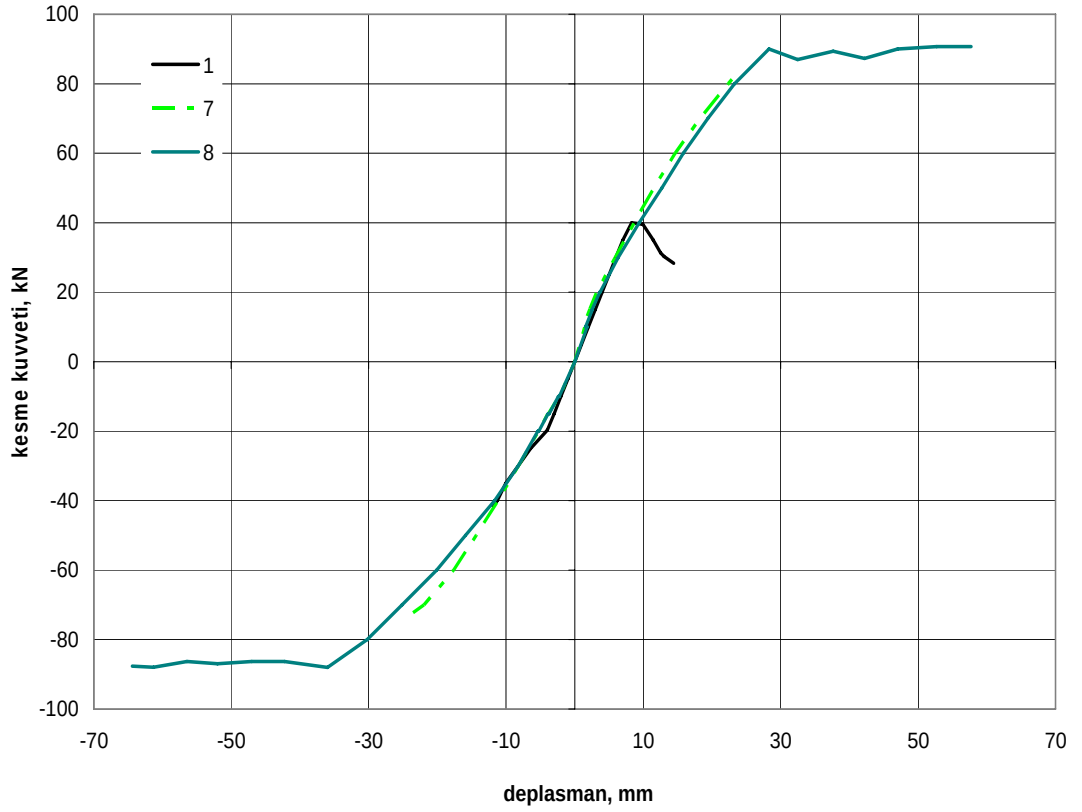
CFRP katman sayısındaki değişim

Deney elemanlarının kesme dayanımları tek ve çift kat CFRP levhalar kullanılarak artırılmıştır. 4 ve 6 no’lu deney elemanları tek ve çift katlı çift yönlü CFRP levhalarla güçlendirilen kirişlerdir. Deney elemanı 4, 79,67 kN kesme kapasitesine sahip ve en büyük yük düzeyinde 24,84 mm deplasman yapmıştır. Referans elemana göre 2,02 kat dayanıma sahiptir. Deney elemanı 6 ise, 85,33 kN kesme kuvvet taşıma kapasitesine sahiptir ve bu yük düzeyinde 29,42 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanının kesme kuvveti taşıma kapasitesi referans deney elemanından 2,16 kat fazladır. Her iki deney elemanı kesmeden göçmüştür. Deney elemanı 6, deney elemanı 4’den 1,07 kat fazla dayanıma sahiptir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Deney Elemanı-4 ve 6'nın zarf eğrileri (katman sayısı değişimi)

Deney elemanı 7 ve 8 tek ve çift kat çift yönlü Γ şeklindeki güçlendirme biçimine sahiptir. Deney elemanı 7'nin en büyük kesme kuvveti değeri 79,33 kN ve bu değerdeki deplasman değeri 22,35 mm'dir. 8 no'lu deney elemanı ise 91,72 kN maksimum kesme kuvveti ve 57,29 mm deplasman değerine sahiptir. Deney elemanları referans elemandan sırasıyla 2,01 ve 2,32 kat daha fazla dayanıma sahiptir. Deney elemanı 8, deney elemanı 7'den 1,16 kat fazla dayanıma sahiptir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Deney Elemanı-7 ve 8'in zarf eğrileri (katman sayısı değişimi)

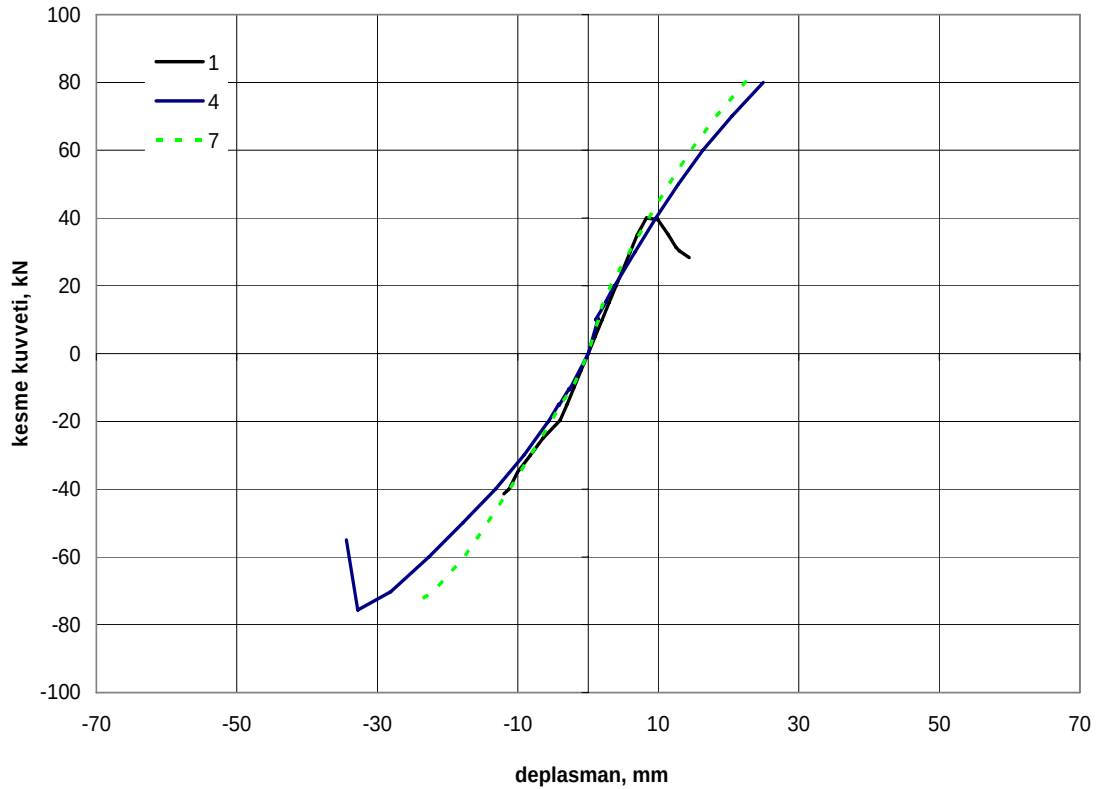
CFRP levhalarla güçlendirilen kirişlerde uygulanan katman sayısının artması kesme kuvveti kapasitesini artırmıştır. U şeklinde güçlendirme şeklinde katman sayısının artması, yan yüzlere uygulamaya göre daha fazla dayanım artışı sağlamıştır. Eklenen bir kat CFRP çatlak gelişimini geciktirmiş ve kesme kuvvet kapasitesini artırmıştır.

CFRP katman sayısının artması ile elemanların göçme biçimi değişmiştir. 4 ve 7 no'lu deney elemanları kesmeden göçmüştür. Bu iki elemenda CFRP'yi yırtan kesme çatlaklarının gelişmesi ile göçme gerçekleşmiştir. Deney elemanı 6, boyuna donatıları aktıktan sonra, takip eden çevrimde kabuk betonunun yüzeyden ayrılması ile göçmüştür. 8 no'lu deney elemanı ise eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Bu elemenda mesnet bölgesinde plastik mafsall oluşumu net bir biçimde gözlenmiştir.

Uygulama şeklindeki değişim

Deneysel çalışmada CFRP levhaların etkinliğinin uygulama biçimi ile olan değişimini incelemek için iki farklı uygulama biçimi kullanılmıştır. Bunlar yan yüzlere yapılan ve kiriş ve tabla altını da kapsayan Γ biçimindeki uygulamadır.

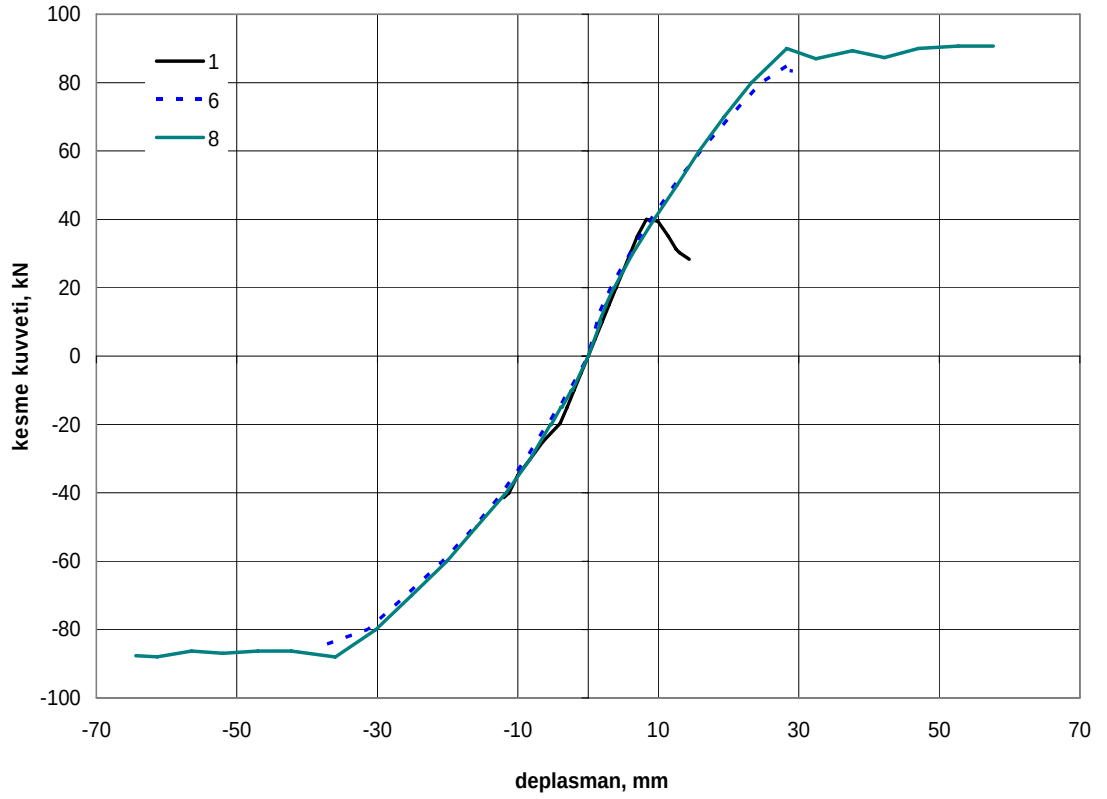
Maksimum yükte 24,84 mm deplasman yapan 4 no’lu deney elemanı, 79,67 kN dayanıma sahiptir. Γ biçimli levhaların kullanıldığı 7 no’lu deney elemanı, deney elemanı 4’den %1 daha az dayanıma sahiptir. En büyük yükteki deplasmanı 22,35 mm’dir. Her iki elemanda tek katlı çift yönlü CFRP ile güçlendirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Deney Elemanı-4 ve 7'nin zarf eğrileri (uygulama şeklindeki değişim)

Deney elemanı-6 ve 8 çift kat çift yönlü CFRP levhalar ile güçlendirilmiştir. Deney elemanı-6'nın yan yüzlerine CFRP uygulanmış, 8 no’lu deney elemanında ise Γ biçimli levha uygulaması yapılmıştır. Deney elemanlarının kesme dayanımları referans elemana göre sırasıyla 2,16 ve 2,32 kat artmıştır. Maksimum yükteki deplasmanları ise 29,42 ve 57,29 mm’dir. Uygulama şeklinin değişmesi ile 8 no’lu

deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Bu nedenle deney elemanının deplasman düzeyi oldukça artmıştır (Şekil 4.5).



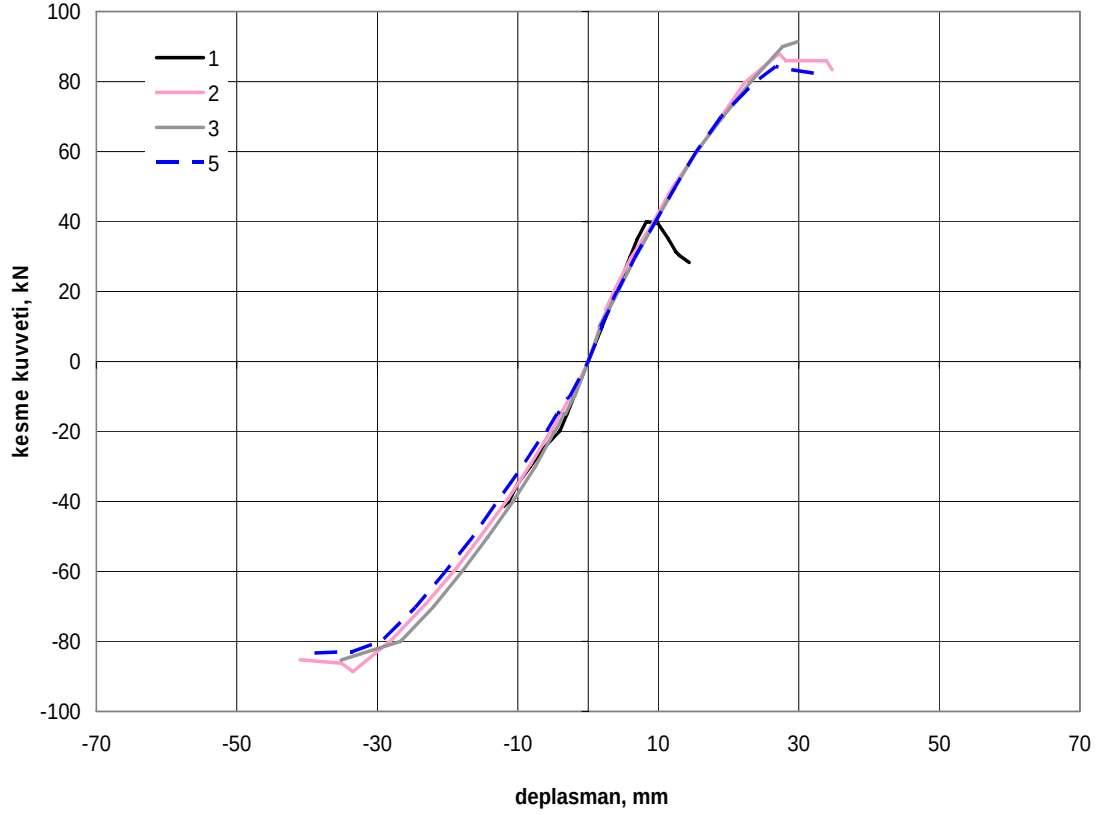
Şekil 4.5 Deney Elemanı-6 ve 8'in zarf eğrileri (uygulama şeklindeki değişim)

Deneysel çalışmada aynı özelliklere sahip elemanların göçme şekilleri CFRP uygulama şekline göre farklılık göstermektedir. Yan yüzlere uygulama yapılan 4 ve 7 no'lu deney elemanlarında CFRP'nin yırtılması ile gelişen kesme çatlağı ile birlikte göçme moduna ulaşılmıştır. $\sqcap$ şeklinde uygulama yapılan deney elemanlarından 6 no'lu deney elemanı beton pas payından donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Aynı uygulama biçimine sahip 8 no'lu deney elemanının boyuna donatıları akmış ve kiriş eğilme kapasitesine ulaşmıştır.

Uygulama açısı değişimi

Çalışmada tek yönlü CFRP levhalar, 2 no'lu deney elemanında kiriş eksenine ile 45° açı yapacak şekilde, 5 no'lu deney elemanında da 60° açı yapacak biçimde

uygulanmıştır. Deney elemanı-3 ise 0 ve 90°'lik uygulama açısına sahip CFRP levhalarla güçlendirilmiştir. Bu elemanlara ait zarf eğrileri Şekil 4.6'da sunulmuştur.



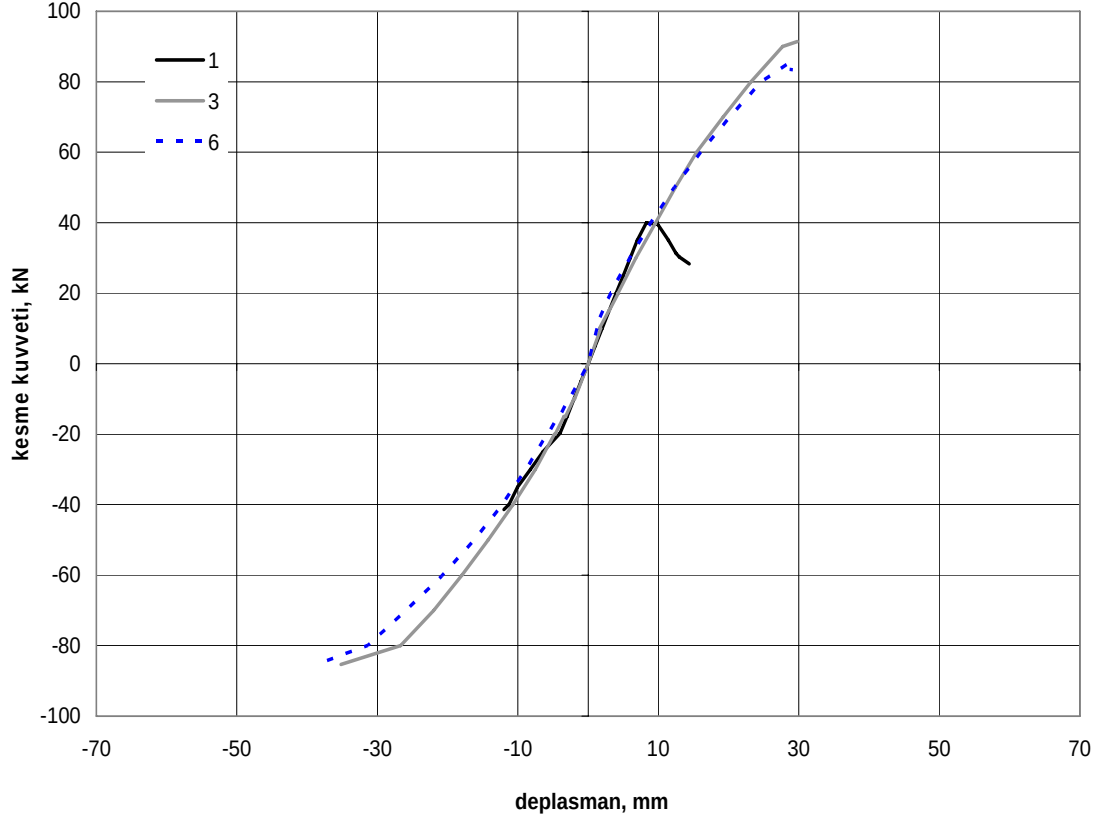
Şekil 4.6 Deney Elemanı-2,3 ve 5'in zarf eğrileri (uygulama açısındaki değişim)

Uygulama açısı farklı olan deney elemanları içerisinde en büyük dayanım deney elemanı-3'e aittir. Bu elemanın dayanımı 2. deney elemanından 1,03 kat, 5. deney elemanından 1,10 kat fazladır. 0-90° uygulama açılı deney elemanı 60° ve 45°'lik uygulama açısına sahip deney elemanlarından daha fazla dayanım göstermiştir. Kiriş eksenine paralel uygulanan katman başarılı olmuş, çatlak gelişimini geciktirerek dayanımı artırmıştır. Maksimum yükte en büyük deplasman ise 33,18 mm ile 5 no'lu deney elemanında gerçekleşmiştir. Her üç elemanda beton pas payından donatıya kadar olan beton tabakasının yüzeyden ayrılması ile göçmüştür.

CFRP tipi değişimi

Deney programında tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki tip CFRP kullanılmıştır. Deney elemanı-3 çift yönlü CFRP'yi benzeştirecek şekilde birbirine

dik yapıştırılmış (0-90°) iki katlı tek yönlü CFRP levhalar ile güçlendirilmiştir. 6 no'lu deney elemanı da çift katlı ve çift yönlü CFRP ile güçlendirilmiştir. Her iki elemenda da kiriş yan yüzlerine uygulama yapılmıştır. Bu iki elemana ait zarf eğrileri Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 Deney Elemanı-3 ve 6'nın zarf eğrileri (CFRP tipi değişimi)

Tek yönlü CFRP ile güçlendirilen 3 no'lu deney elemanı 6. deney elemanından 1,07 kat fazla dayanıma sahiptir. Maksimum yük düzeyinde birbirine çok yakın deplasman yapmış olan bu iki eleman aynı göçme moduna sahiptir. Her iki eleman beton pas payı ile boyuna donatı arasındaki katmanın yüzeyden ayrılması sonucu göçmeye ulaşmıştır. Çift yönlü CFRP'yi benzeştiren 3 no'lu deney elemanının bu sonuçlar ışığında dayanım açısından başarılı sonuç verdiği görülmüştür.

4.2. Enerji Tüketimi

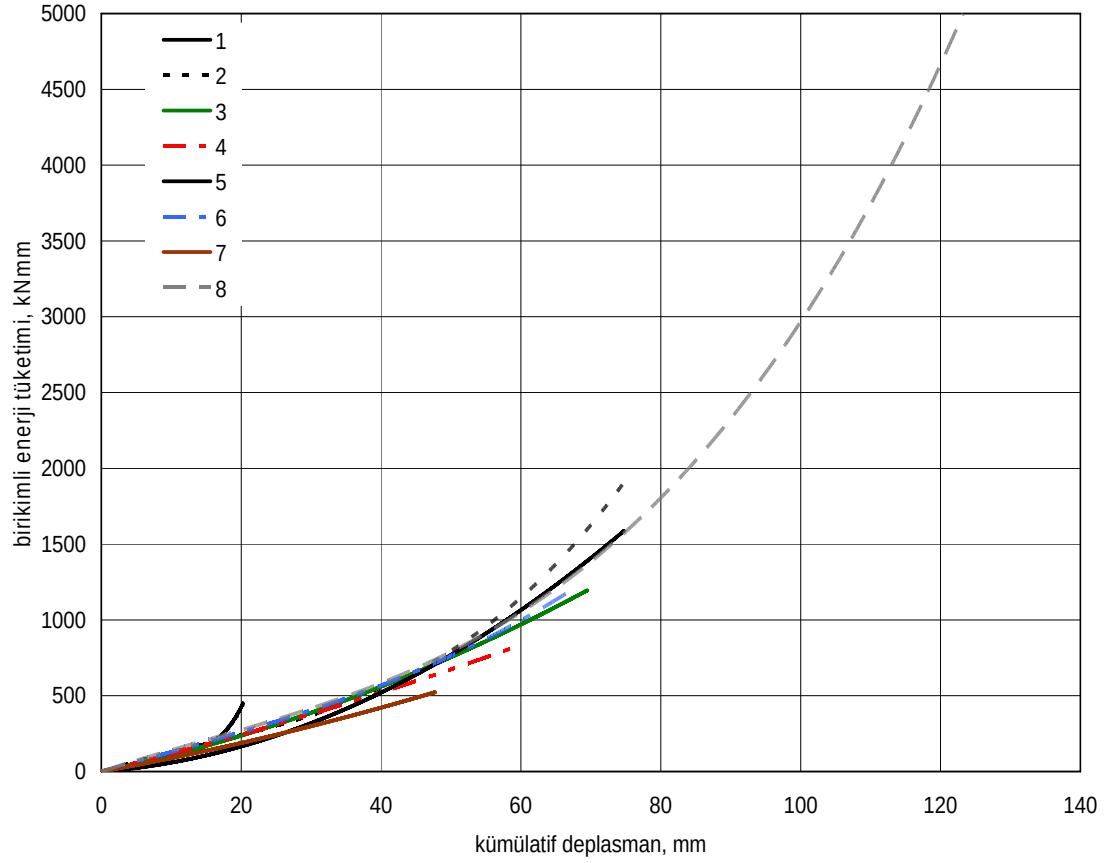
Enerji tüketimi, deney elemanlarına uygulanan her yük çevrimi için kesme kuvveti-deplasman grafiklerinde oluşan kapalı alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Her

çevrimde tüketilen enerjinin kümülatif olarak toplanmasıyla deney elemanının birikimli enerji tüketimi elde edilmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.4 Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim değerleri

Deney Eleman No	Kümülatif Enerji Tüketimi (kNmm)	$\frac{E_{(n)}}{E_1}$
1	480,25	1,00
2	1997,41	4,15
3	1219,08	2,54
4	817,43	1,70
5	1681,48	3,50
6	1226,83	2,55
7	529,91	1,10
8	4946,35	10,30

Deney elemanı-1 en az enerji tüketen elemandır. Güçlendirme uygulaması yapılmamış olan referans eleman 480,25 kNmm enerji tüketerek göçmüştür. 4 no'lu deney elemanı da oldukça az enerji tüketerek göçmüştür. Tek kat CFRP ile güçlendirilen bu iki eleman rijit davranış göstermiş, daha az deplasman yapmış ve enerji yutma kapasiteleri az olmuştur. Ayrıca bu iki eleman CFRP levhanın kopması ile gelişen kesme çatlağı sonucu göçmüştür. En büyük enerji yutma kapasitesine sahip eleman deney elemanı-8'dir. 4946,35 kNmm enerji yutan bu eleman referans elemandan 10,30 kat fazla enerji tüketmiştir. Eğilme kapasitesine ulaştığı için diğer elemanlara göre daha fazla deplasman yapmıştır. Bu değerlere ek olarak deney elemanlarının birikimli enerji tüketimi-kümülatif deplasman grafiği Şekil 4.8'de sunulmuştur. Bu grafikte her çevrimde ileri ve geri yüklemede elde edilen deplasman değerleri toplanmış ve o çevrimde tüketilen toplam enerjiye karşılık grafikte işaretlenmiştir. Göçme anına kadar bu değerler birleştirilerek her eleman için eğriler oluşturulmuştur. Deneysel programın değişkenleri dikkate alınarak enerji tüketimi açısından irdelemeler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.8 Deney elemanlarının birikimli enerji tüketimi-kümülatif deplasman eğrileri

CFRP katman sayısındaki değişim

Tek kat çift yönlü CFRP levhalar ile güçlendirilen 4 no'lu deney elemanı, referans elemandan %70 fazla enerji tüketmiştir. Aynı elemanın çift katlı uygulaması olan deney elemanı-6 ise referans elemandan %155 fazla enerji yutmuştur.

Tek kat çift yönlü Γ şeklinde uygulama biçimine sahip 7 no'lu deney elemanı 529,91 kNm enerji tüketmiştir. Bu değer referans elemanın enerji tüketiminin 1,10 katıdır. Çift katlı uygulama biçimi ise referans elemandan 10,30 kat fazla enerji yutmuştur.

Katman sayısının iki katına çıkması ile birim kesit alanında güçlendirme oranı artmaktadır. Çatlak sayısı ve genişliği azalmakta dolayısıyla dayanım ve enerji

tüketimi artmaktadır. Katman sayısı iki katına çıkan 8 no'lu deney elemanı 7. elemandan 9,34 kat fazla enerji yutmuştur.

Uygulama şeklindeki değişim

Deney elemanı-4 ve deney elemanı-7 referans elemandan sırasıyla 1,70 ve 1,10 kat daha fazla enerji tüketmişlerdir. Tek kat çift yönlü CFRP ile güçlendirilen bu iki elemandan yan yüzlere uygulama yapılmış olan daha çok enerji tüketmiştir. Γ şeklinde uygulama yapılan eleman daha az deplasman yapmış, giriş ve tabla altını kaplayan CFRP nedeni ile enerji tüketme kapasitesi sınırlı kalmıştır. Her iki eleman da CFRP'nin kopması sonucu gelişen kesme çatlağı ile göçmüştür.

6 ve 8 no'lu deney elemanları referans elemana göre sırasıyla 2,55 ve 10,30 kat enerji tüketmişlerdir. Çift kat çift yönlü CFRP uygulaması yapılan bu iki elemanda Γ şeklinde uygulama enerji yutma miktarını oldukça fazla artırmıştır. 8 no'lu elemanın boyuna donatıları akmış ve eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deney elemanı-8, 6. deney elemanından 4,03 kat fazla enerji tüketmiştir.

Uygulama şekli değişimi deney elemanlarının kesme dayanımını doğrudan etkileyen bir değişkendir. Bununla birlikte yan yüzler yerine Γ şeklinde uygulama yapılan 8 no'lu elemanda eğik çatlaklar tüm kesme açıklığına yayılmış, belli bir kesitte yoğunlaşmamıştır. Böylece bu eleman eğilme kapasitesine ulaşmış ve en fazla enerji tüketen deney elemanı olmuştur.

Uygulama açısı değişimi

Deney elemanı-2, 3 ve 5 referans elemandan 4,15, 2,54 ve 3,50 kat fazla enerji tüketmişlerdir. Bu elemanlar içerisinde en çok enerjiyi 45° açılı eleman, en az enerjiyi 0-90° açılı eleman yutmuştur. Muhtemel kesme çatlakları yönünde lif uygulaması yapılmış deney elemanı-2 en çok deplasmanı yapmış ve daha fazla enerji yutabilmiştir. 2 no'lu eleman, deney elemanı-3'den %64 fazla enerji tüketmiştir. Her

üç elemanda boyuna donatı akmış fakat daha sonraki çevrimlerde pas payından donatıya kadar olan bölgedeki betonun yüzeyden ayrılması ile göçmüştür.

CFRP tipi değişimi

Deney elemanı-3 ve 6 referans elemandan 2,54 ve 2,55 kat fazla enerji tüketmişlerdir. İki elemanın enerji yutma kapasiteleri birbirine çok yakındır. Çift yönlü CFRP'yi benzeştiren 3 no'lu deney elemanı dayanım, deplasman kapasitesi ve enerji tüketme açısından 6. deney elemanı ile benzer özellikler göstermiştir. Ayrıca her iki elemanda beton kabuk bölgesindeki ayrılma ile göçme moduna ulaşmışlardır.

4.3. Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri kesme kuvveti-deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlik belirlenen yük düzeyinde grafiğin orijine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir. Rijitlikler başlangıç ve maksimum yük düzeyinde hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanının ilk eğilme çatlağının oluştuğu yük düzeyinde hesaplanmıştır. Maksimum yük düzeyindeki rijitliklerin karşılaştırılmasında, ileri ve geri çevrimde elde edilen rijitliklerin ortalaması kullanılmıştır. Tablo 4.5'de deney elemanlarının ileri ve geri yükleme adımları için rijitlikleri ve rijitliklerin ortalama değerleri verilmiştir.

Tablo 4.5 Deney Elemanlarının Rijitlik Değerleri

Deney Eleman No	Başlangıç (kN/mm)	Maksimum Yük (kN/mm)	1 nolu elemana oranlar	
			Başlangıç	Maksimum Yük
1	4,47	3,69	-	-
2	4,07	3,30	0,91	0,90
3	4,91	3,07	1,10	0,83
4	4,00	3,21	0,89	0,87
5	3,75	2,98	0,84	0,81
6	3,79	2,90	0,85	0,79
7	4,20	3,52	0,94	0,95
8	4,63	3,15	1,04	0,85

Deney programındaki en küçük başlangıç rijitliği 5 nolu deney elemanına aittir. En büyük başlangıç rijitliğine ise 3 nolu deney elemanı sahiptir. Deney elemanının başlangıç rijitliği referans elemandan %10 daha büyüktür. 3 ve 8 nolu deney elemanları referansa göre daha büyük başlangıç rijitliğine sahiptir. Güçlendirilmiş deney elemanlarının tamamının maksimum rijitliği referans elemanından daha azdır. Çünkü bu elemanlarının dayanımı artarken deplasman kapasiteleri de oldukça fazla artmıştır.

Deney programındaki en büyük maksimum yük rijitliğine deney elemanı-1 sahiptir. En küçük maksimum yük rijitliği 6 no'lu deney elemanına aittir. Bu rijitlik değeri referans elemana göre %21 daha azdır.

Katman sayısı değişiminin rijitliğe olan etkisini incelemek için deney elemanı-4 ile 6 ve deney elemanı-7 ile 8 karşılaştırılmıştır. Deney elemanı-4, deney elemanı-6'dan başlangıç rijitliğinde %6, maksimum yük rijitliğinde %11 daha fazladır.

Deney elemanı-7'nin başlangıç rijitliği deney elemanı-8'den %10 az, maksimum yük rijitliği %12 fazladır.

Katman sayısı arttıkça elemanların başlangıç rijitliği artmıştır. Deneylerde uygulanan yük düzeyi arttıkça gövdede gelişen çatlakların sayısının ve genişliğinin artması ile maksimum yük düzeyindeki rijitlikler azalmıştır. İki kat CFRP ile güçlendirilen 6 ve 8 no'lu deney elemanlarının maksimum yük rijitlikleri tek kat CFRP ile güçlendirilen elemanlardan daha azdır.

Uygulama şekli değişiminin rijitlikle olan ilişkisini irdelemek için deney elemanları 4 ve 7 ile deney elemanları 6 ve 8 karşılaştırılmıştır. Deney elemanı-4'ün başlangıç rijitliği deney elemanı-7'den %5, maksimum rijitliği ise %10 daha fazladır. Deney elemanı-6 ise başlangıç rijitliğinde 8.deney elemanından %22 azdır. Maksimum yük düzeyinde deney elemanı-8 deney elemanı-6'dan %9 daha rijittir.

Uygulama şeklinin Γ şeklinde yapılması dayanımı artırmıştır. Dayanımı artan deney elemanlarının başlangıç rijitliği artmakta, gelişen çatlaklar nedeniyle maksimum yük rijitliği daha küçük değerler almaktadır.

Uygulama açısı değişiminin rijitliğe olan etkisini görmek için deney elemanı-2, 3 ve 5 karşılaştırılmıştır. En yüksek başlangıç rijitliği 4.91 kN/mm değeri ile 3 no'lu deney elemanına aittir. En düşük başlangıç rijitliği değeri ise deney elemanı-5'indir. Bu elemanlar referans elemandan başlangıç rijitliğinde sırasıyla 0,91, 1,10, 0,84 kat fazla değerler almıştır. Maksimum yük rijitliğinde en büyük değer deney elemanı-2'ye, en küçük değer ise deney elemanı-5'e aittir. Deney elemanları referans elemana göre maksimum yük düzeyinde sırasıyla 0,90, 0,83 ve 0,81 kat rijittir.

Deney programının en yüksek dayanım değerine sahip 2 no'lu deney elemanı en yüksek başlangıç rijitliğine de sahiptir. Bu üç eleman arasında en küçük maksimum rijitlik değeri ise en fazla deplasmanı yapan 5 no'lu deney elemanına aittir.

CFRP tipinin rijitlikle olan değişimini incelemek için deney elemanı-3 ve 6 karşılaştırılmıştır. Deney elemanı-3'ün başlangıç rijitliği, deney elemanı-6'dan %30 daha fazladır. Maksimum yük düzeyinde ise bu fark %6'dır. Tek yönlü CFRP ile güçlendirilen deney elemanı-3'ün, çift yönlü CFRP ile güçlendirilen deney elemanı-6 dan, başlangıç ve maksimum rijitliği fazladır. Her iki elemanın göçme modları aynı olup, beton pas payının altındaki kabuk bölgesinin yüzeyden ayrılması ile göçmüşlerdir.

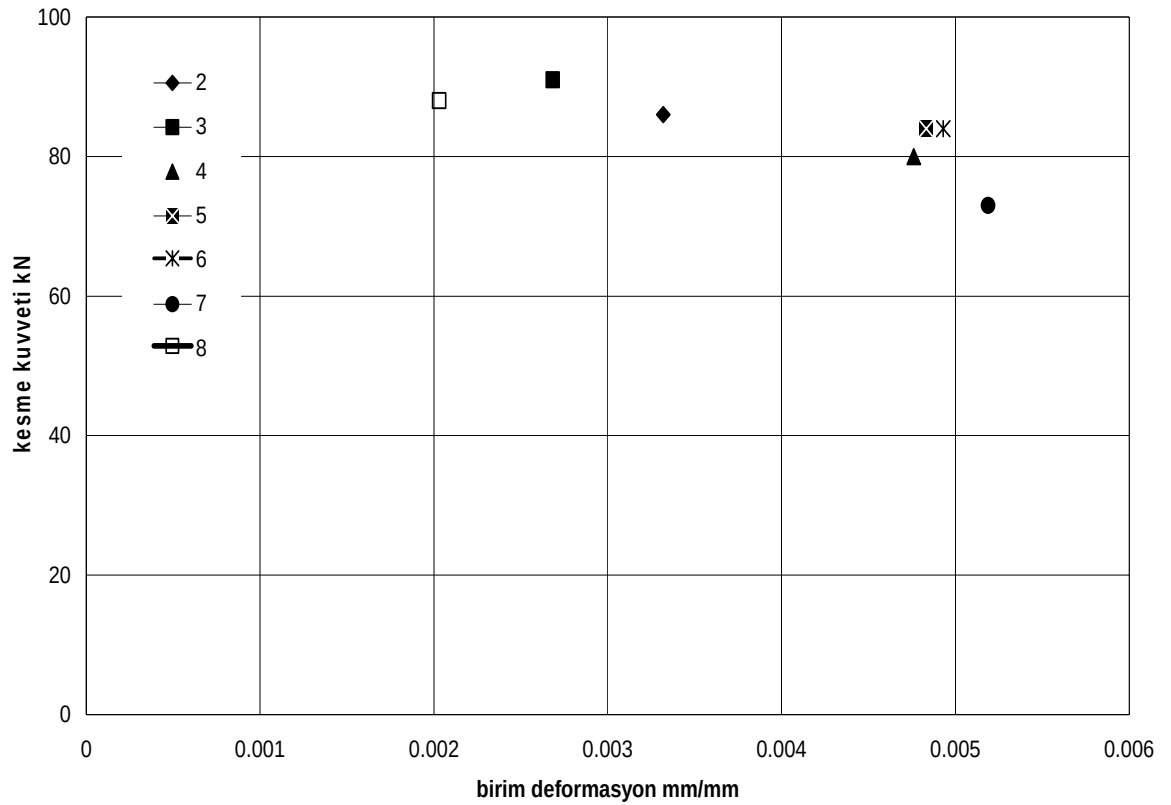
4.4 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkileri

Birim deformasyon ölçerler yardımı ile CFRP üzerinde ölçülen birim deformasyon değerleri, CFRP levhaların kesme dayanımına hangi oranda katkı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle CFRP levhaların kesme dayanımına katkısını görmek için deney elemanlarının birim deformasyon davranışları incelenmiştir. Değerlendirmede maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılmıştır (Şekil 4.9).

Eğilme kapasitesine ulaşan 8 nolu deney elemanı en düşük birim deformasyona sahiptir. En büyük değer ise 7 nolu deney elemanındadır.

2, 3, 5, 6 nolu deney elemanları beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Deney elemanlarında sırasıyla 0,0033, 0,0027, 0,0048 ve 0,0049 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

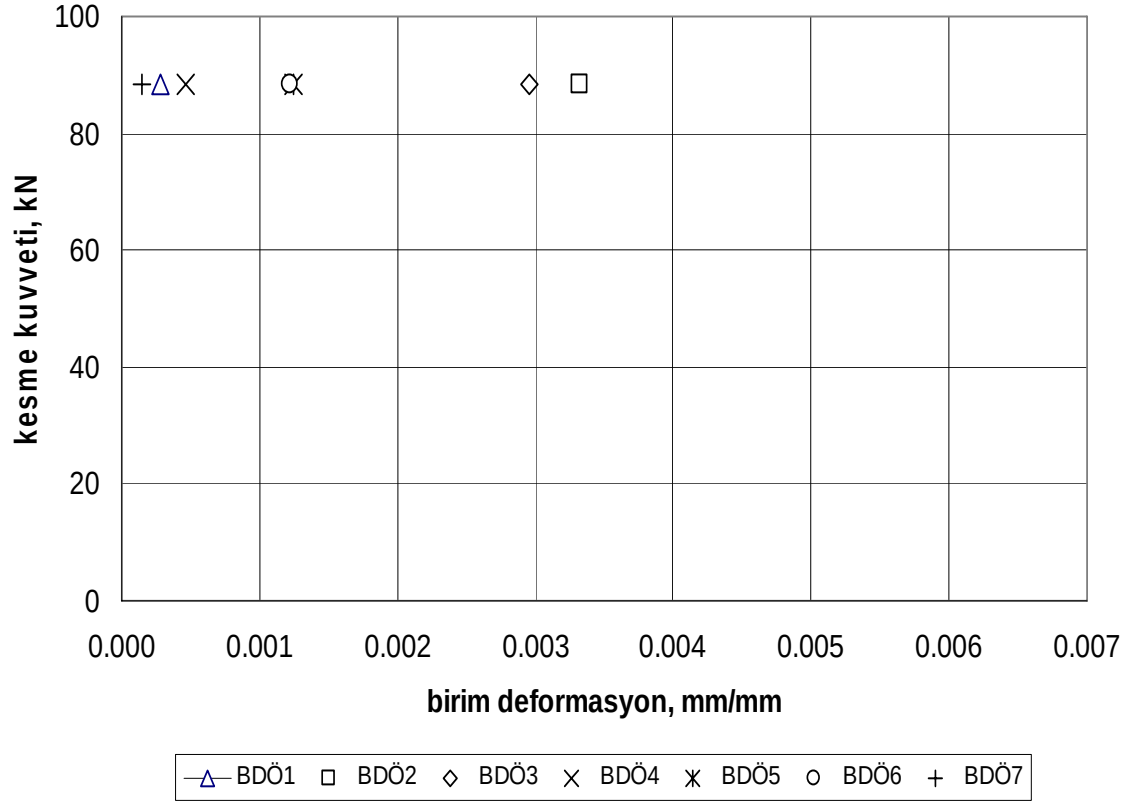
4 ve 7 nolu deney elemanları, CFRP levhanın lifleri doğrultusundaki dayanımlarından büyük gerilmelere maruz kalarak kopmasıyla göçmüştür. Deney elemanının birim deformasyon değerleri sırası ile 0,0048 ve 0,0052 mm/mm'dir. Bu değerler ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini %20 ve %30 oranında aşmıştır. Eğilme kapasitesine ulaşan 8 nolu deney elemanının birim deformasyon değeri 0,002 mm/mm'dir ve ACI-440 maksimum değerinin ancak yarısıdır.



Şekil 4.9 Deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-2

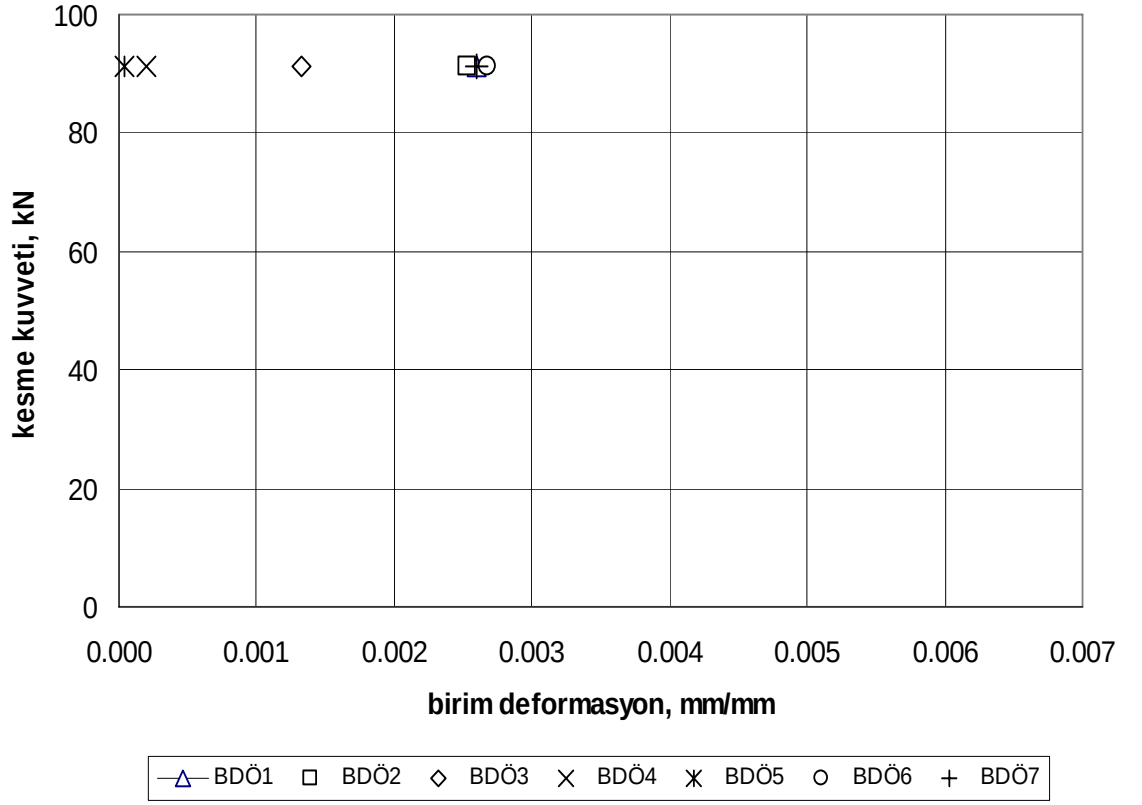
Deney sırasında ölçülen birim deformasyon değerleri kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 4.10'da sunulmuştur. Burada maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılmıştır. Ölçülen en büyük birim deformasyon değeri 2 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,0033 mm/mm olarak ölçülmüştür. En küçük değer ise 7 no'lu birim deformasyon ölçerdeki 0,00015 mm/mm değeridir. Çatlakların kılcal düzeyde kaldığı bu bölgede ölçülen birim deformasyon değeri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %4'ü kadardır.



Şekil 4.10 Deney elemanı-2 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-3

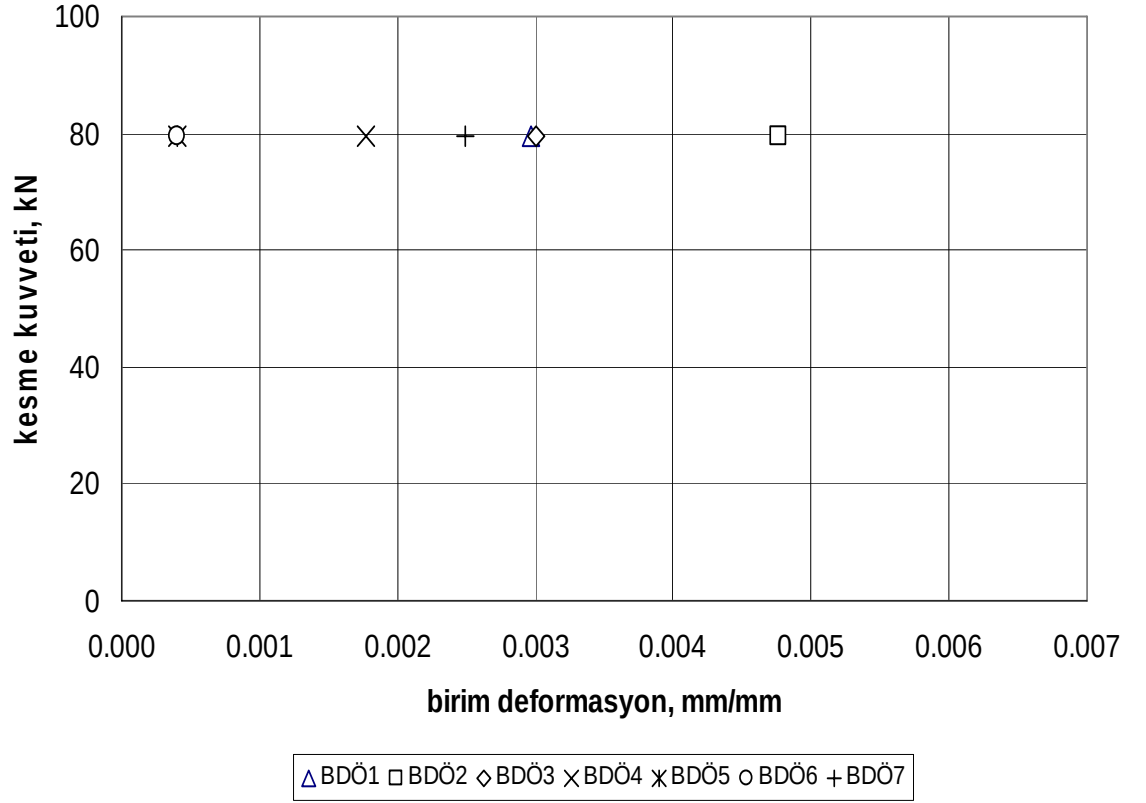
Deney elemanı-3'ün test sırasında kaydedilen birim deformasyon-kesme kuvveti eğrileri Şekil 3.10 ve 3.11'de verilmiştir. Bu eğrilen maksimum yük düzeyindeki değerleri dikkate alınarak elde edilen grafik ise Şekil 4.11'de sunulmuştur. 1, 2, 6 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde gelişen kesme çatlakları etkisi ile 0,0025 mm/mm düzeyinde değerler okunmuştur. 4 no'lu deformasyon ölçerde en küçük değer 0,00004 mm/mm ile ölçülmüştür. Bu değer ACI-440 komite raporunda verilen kalıcı deformasyon değerinin %1'idir.



Şekil 4.11 Deney elemanı-3 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-4

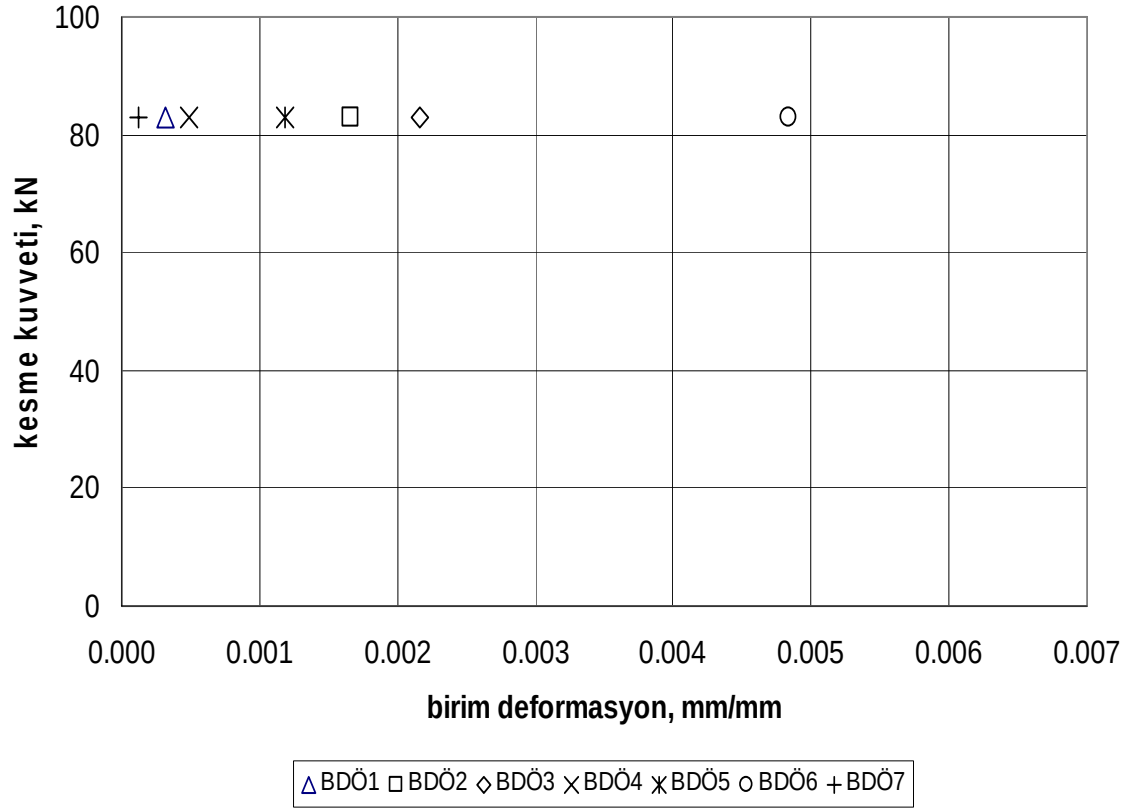
Deney sırasında kaydedilen maksimum birim deformasyon değerleri ile oluşturulan grafik Şekil 4.12’de sunulmuştur. Grafikten görüldüğü üzere kesme çatlağı üzerindeki BDÖ2 0,0048 mm/mm değerine ulaşmıştır. Şekil 3.15’de bu birim deformasyon ölçerin eğrisinde doyumluk değerine ulaştığı ve 0,0048 mm/mm’den sonra ölçüm alamadığı görülmüştür. 5 ve 6 no’lu BDÖ’ler 0,0004 mm/mm değerinde olup BDÖ2 değerinin %8’i kadardır. CFRP levhanın yırtıldığı kesitteki 7 no’lu deformasyon ölçerde 0,0025 mm/mm değeri ölçülmüştür. Bu değer ACI-440 komite raporundaki kalıcı uzamanın %63’ü düzeyindedir.



Şekil 4.12 Deney elemanı-4 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-5

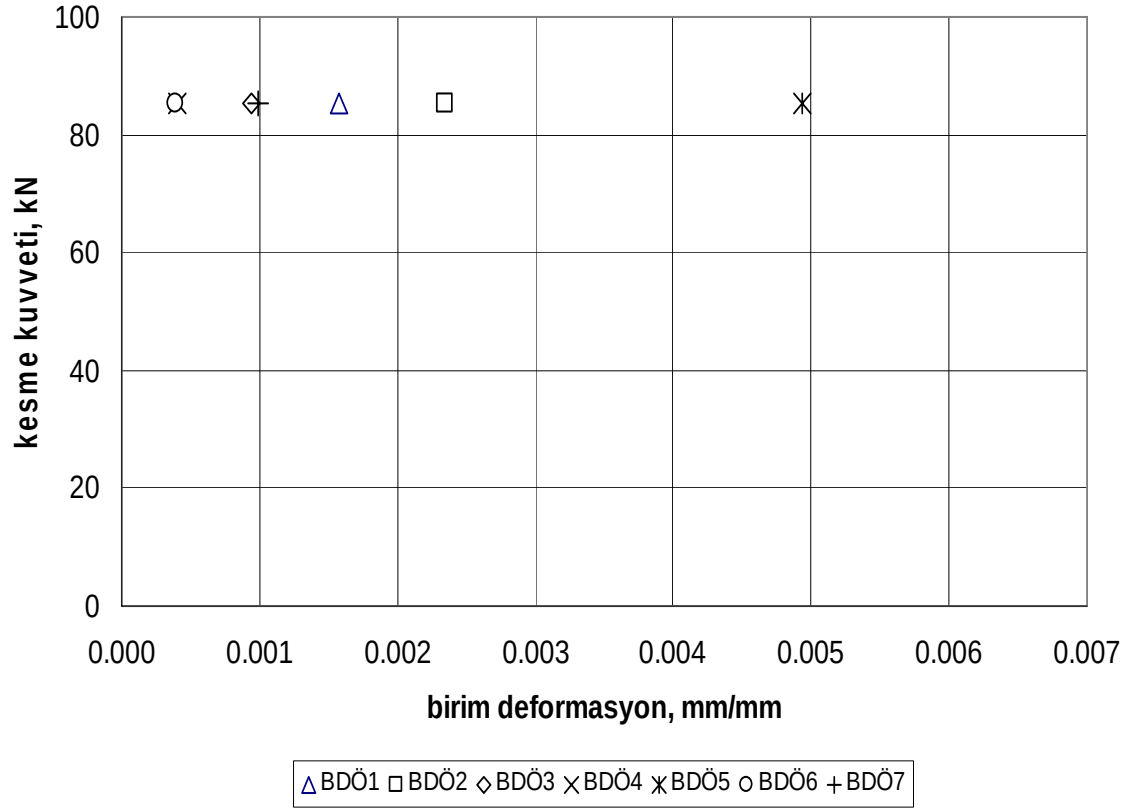
Deney verileri yardımı ile oluşturulan ve maksimum birim deformasyonları gösteren grafik Şekil 4.13’de sunulmuştur. Birim deformasyon ölçerler içerisinde en büyük değer 0,0048 mm/mm ile BDÖ6’da ölçülmüştür. Diğer BDÖ’ler birbirine yakın değerler almıştır. En küçük değer 0,0001 mm/mm ile BDÖ7’de ölçülmüş olup BDÖ6’daki değer %2’si kadardır. BDÖ6’da okunan değer ACI-440 komite raporundaki kalıcı uzama değerini %20 aşmıştır.



Şekil 4.13 Deney elemanı-5 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-6

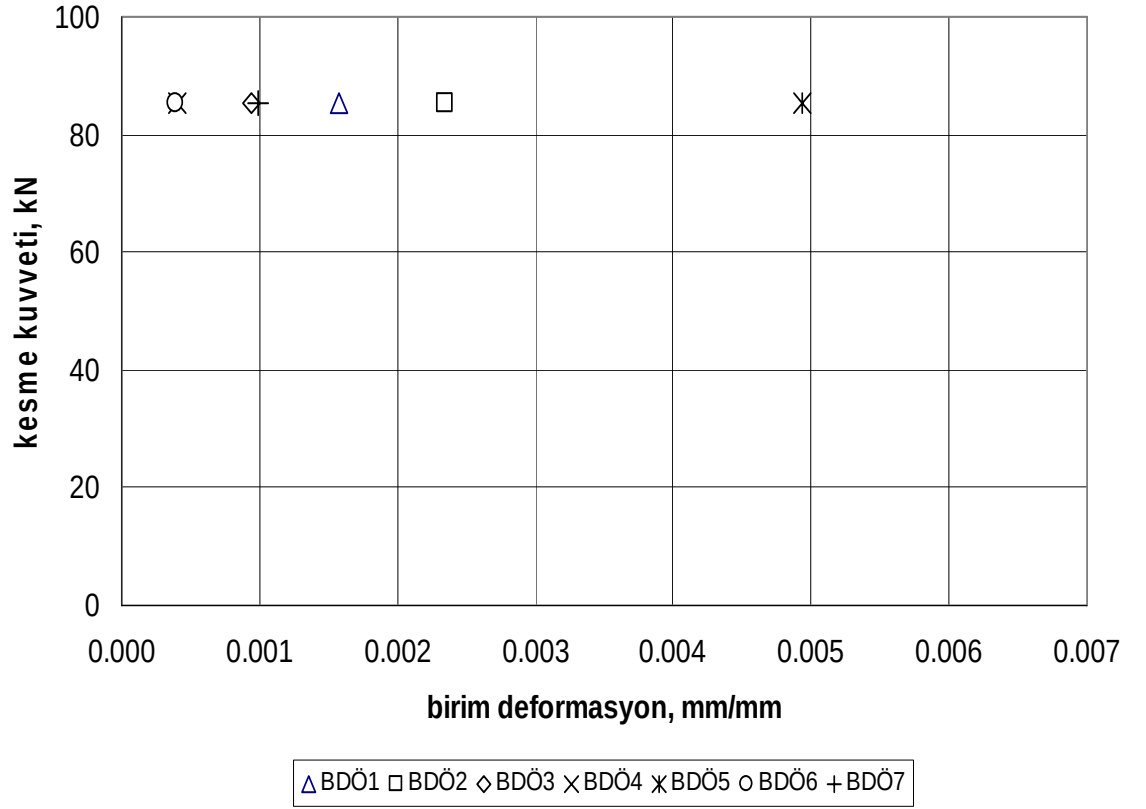
Maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri dikkate alınarak çizilen grafik Şekil 4.14’de sunulmuştur. En büyük deformasyon değeri BDÖ5’de 0,0049 olarak ölçülmüştür. En küçük deformasyonlar 0,0004 değeri ile BDÖ4 ve BDÖ6’da görülmüştür. Deney elemanında belli bir kesitte yoğunlaşmayan, kesme açıklığı boyunca yayılan çok sayıda eğik çatlak gelişmiştir. BDÖ5 dışındaki ölçerlerde ortalama 0,0015 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.14 Deney elemanı-6 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-7

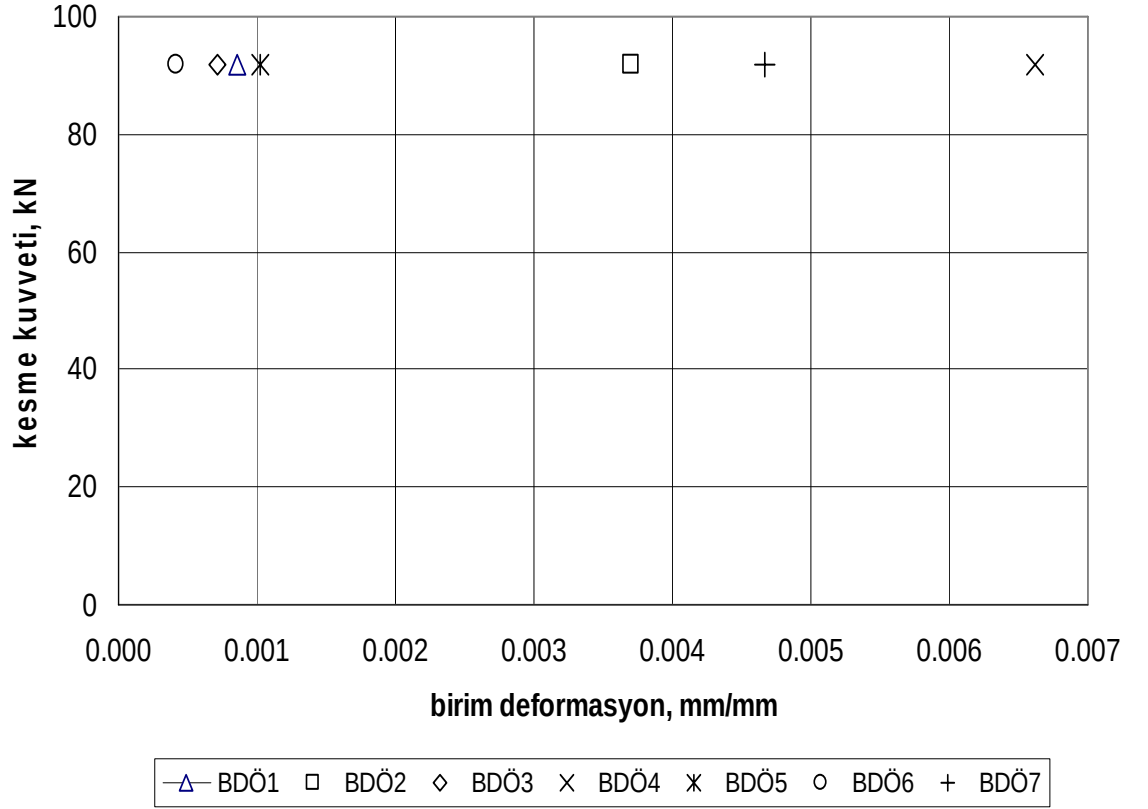
Deney elemanına ait kesme kuvveti-birim deformasyon eğrileri Şekil 3.30 ve 3.31’de sunulmuştur. Eğrilerin maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 4.15’de verilmiştir. Deney elemanında 1 no’lu BDÖ 0,0044 mm/mm değerini almıştır. Deney sırasında yırtılan CFRP ile oluşan çatlak bu deformasyon ölçer üzerinden geçmiştir. Diğer BDÖ’ler 0,0001 ile 0,0011 mm/mm arasında değerler almışlardır. BDÖ1 diğer ölçerlerden en az 4 kat fazla değer almış ve ACI-440 komite raporundaki kalıcı uzama değerini %10 aşmıştır.



Şekil 4.15 Deney elemanı-7 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-8

Deney elemanı-8'in maksimum yük düzeyindeki deformasyon değerleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Eğilme kapasitesine ulaşan bu elemanda boyuna donatıların akmasından sonra bazı deformasyon ölçerlerde yüksek değerler ulaşılmıştır. BDÖ4 0,0066 mm/mm ile en yüksek değerdir. BDÖ6'da ise 0,0004 mm/mm ile minimum değeri almıştır. İki değer arasında 16,5 kat fark vardır. BDÖ4'deki değer ACI-440 komite raporu kalıcı uzama değerini %65 aşmıştır.



Şekil 4.16 Deney elemanı-8 için maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri

4.5 Deneysel Değişkenlerin Birim Deformasyon Davranışına Etkileri

Deneysel değişkenlerin elemanlara etkisini irdelemek amacıyla aynı yük düzeyinde birim deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Deney elemanlarında ilk çatlak gelişiminin gözlemlendiği 10 kN düzeyinde birim deformasyonlar değerlendirilmiştir. 70 kN yük düzeyine kadar benzer davranış göstermeleri nedeni ile bu yük düzeyinde ve maksimum, göçme ve varsa akma anlarındaki deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. İrdemeler yapılırken ACI-440 komite raporu kalıcı uzama değeri olan 0,004 baz alınmıştır.

Daha önceki bölümlerde incelenen deneysel değişkenler birim deformasyonlar açısından da değerlendirilmiştir. Farklı yük düzeylerinde oluşturulan kesme kuvveti-birim deformasyon tabloları Tablo 4.6 - Tablo 4.12 arasında sunulmuştur.

Katman sayısı değişimi

Deneysel alışma kapsamında tek ve çift katlı CFRP levhalar kullanılmıştır. Katman sayısı değişiminin birim deformasyon değerlerine olan etkilerini gösteren tablolar bölüm sonunda verilmiştir.

10 kN yük düzeyinde deney elemanı-4 ve 6'da ACI-440 komite raporunda belirlenen kalıcı uzama değerinin %1'i mertebesinde birim deformasyonlar ölçülmüştür. 70 kN yükte 4 no'lu deney elemanında maksimum 0,0035 mm/mm, 6 no'lu deney elemanında ise maksimum 0,0015 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. En büyük yükte deney elemanı-6, deney elemanı-4'ten %4 daha fazla deformasyon yapmıştır. Deformasyonların geneline bakıldığında deney elemanı-4'n daha fazla sayıda deformasyon lerinin daha büyük değerler aldıkları görülmektedir. Boyuna donatının akmadığı ve CFRP'nin yırtılması ile göçen 4. deney elemanında çatlakların daha büyük kesite yayıldığı ve daha geniş olduğu birim deformasyon davranışı ile doğrulanmıştır.

Deney elemanı-7 ve 8'e ait birim deformasyon değerleri Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'de sunulmuştur. 10 kN yükte deney elemanlarında en fazla 0,0003 mm/mm deformasyon ölçülmüştür. 70 kN yük düzeyinde deney elemanı-7'de en fazla 0,0026 mm/mm, deney elemanı-8'de 0,0032 mm/mm deformasyon ölçülmüştür. Maksimum yükte 7 no'lu deney elemanı ACI-440 komite raporundaki kalıcı uzamayı %9, deney elemanı-8 ise %66 aşmıştır. Her iki deney elemanında bu yük düzeyinde bir deformasyon ölçerde 0,004 açılmış, diğer ölçerler oldukça düşük değerler almıştır.

Uygulama şekli değişimi

Kiriş yan yüzlerine yapılan uygulama ve ̢ şeklinde uygulama olmak üzere iki farklı tipte CFRP levha uygulaması yapılmıştır. Bu tip deney elemanlarına ait birim deformasyon tabloları bölüm sonunda verilmiştir.

Deney elemanı-4 ve deney elemanı-7, 10 kN yükte en fazla 0,00007 mm/mm deformasyon yapmışlardır. 70 kN yükte deney elemanı-4 ve 7 de sırasıyla 0,0035 ve 0,0026 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Maksimum yük düzeyinde ve göçme yükünde, deney elemanı-4’de 2 no’lu deformasyon ölçer, deney elemanı-7’de ise 1 no’lu birim deformasyon ölçer ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır.

6. ve 8. deney elemanlarında 10 kN yükte sırasıyla ACI-440 komite raporu kalıcı uzama değerinin %1’i ve %8’i mertebesinde deformasyonlar ölçülmüştür. 70 kN yük düzeyinde, deney elemanı-6’da gelişen çatlaklara rağmen ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %37’si oranında birim deformasyon ölçülmüştür. Bu yük seviyesinde deney elemanı-8’de, 6 no’lu deney elemanından 1,36 kat fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Maksimum yük düzeyinde deney elemanlarında sırasıyla 0,0049 mm/mm ve 0,0066 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

Yan yüzlere levha uygulaması yapılmış 4 no’lu deney elemanında 1, 2, 3 ve 4. BDÖ’ler 0,004 mm/mm değerini aşmış ve kopma anında büyük değerler almışlardır. U şeklinde uygulama yapılmış 7 no’lu deney elemanında ise 1. BDÖ 0,004 mm/mm değerini aşmıştır. Kiriş ve tabla altına CFRP uygulanmayan 4. deney elemanı daha fazla deformasyon yapmış ve çatlaklar daha büyük bir kesite yayılmıştır.

Uygulama açısı değişimi

Uygulama açısı değişiminin birim deformasyon davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deney elemanı-2, 3 ve 5 incelenmiştir. 10 kN yükte deney elemanlarında ACI-440 komite raporu kalıcı uzama değerinin %3’ü uzama gerçekleşmiştir. 70 kN yükte deney elemanı-2’de 0,0021 mm/mm, deney elemanı-3’de 0,0014 mm/mm, deney elemanı-5’de 0,0034 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Tüm değerler 0,004 mm/mm kalıcı uzama değerinin altındadır. Üç deney elemanında da çatlaklara yakın olan bir deformasyon ölçer büyük değerler alarak 0,004 mm/mm değerini aşmış diğer deformasyon ölçerler 0,001 mm/mm

düzeyinde değerler almışlardır. Göçme modları da aynı olan bu elemanların birim deformasyon davranışları da benzerlik göstermiştir.

CFRP tipi değişimi

CFRP tipi değişiminin birim deformasyona katkısını irdelemek için deney elemanı-3 ve 6 ele alınmıştır. 10 kN yükte deney elemanlarında en fazla 0,0001 mm/mm deformasyon ölçülmüştür. 70 kN yükte deney elemanı-3’de 0,0014 mm/mm ve deney elemanı-6’da 0,0015 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Akma anında deney elemanlarının deformasyon değerleri birbirine yakın olup ACI-440 komite raporu kalıcı uzama değerinin %50’si düzeyindedir. Maksimum yükte deney elemanı-6, deney elemanı-3’e göre 1,84 kat fazla deformasyon yapmıştır.

Deney elemanı-3’ün tüm deformasyon ölçerleri deney süresince 0,004 değerini aşmamıştır. Kiriş eksenine paralel ve dik yönlü iki kat CFRP ile güçlendirilen bu elemanda kiriş eksenine paralel katman çatlak gelişimini ve genişliğini sınırlandırarak birim deformasyonların düşük mertebelerde kalmasını sağlamıştır. Deney programının en fazla dayanıma sahip olan bu elemanı birim deformasyon davranışı açısından da başarılı olmuştur.

Tablo 4.6 Deney elemanı-2’nin birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)							
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7	B.D.Ö.8
10	0,00003	0,00007	0,00006	0,00004	0,00003	0,00000	0,00001	0,00001
70	0,00023	0,00207	0,00110	0,00022	0,00061	0,00038	0,00006	0,00003
86 (akma)	0,00026	0,00321	0,00264	0,00043	0,00117	0,00108	0,00014	0,00017
88,33 (Maksimum yük)	0,00028	0,00332	0,00296	0,00046	0,00124	0,00122	0,00015	0,00021
83,33 (göçme)	0,00020	0,00345	0,00358	0,00035	0,00105	0,00104	0,00009	0,00038

Tablo 4.7 Deney elemanı-3'ün birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)						
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7
10	0,00010	0,00005	0,00004	0,00003	0,00002	0,00001	0,00002
70	0,00054	0,00020	0,00026	0,00004	0,00001	0,00143	0,00124
88,33 (akma)	0,00196	0,00137	0,00125	0,00016	0,00010	0,00130	0,00193
91,38 (Maksimum yük)	0,00260	0,00254	0,00132	0,00019	0,00004	0,00268	0,00260
86,65 (göçme)	0,00219	0,00213	0,00100	0,00016	0,00002	0,00267	0,00252

Tablo 4.8 Deney elemanı-4'ün birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)						
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7
10	0,00002	0,00002	0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001
70	0,00139	0,00350	0,00020	0,00054	0,00035	0,00044	0,00138
79,67(Maksimum yük)	0,00297	0,00476	0,00301	0,00178	0,00040	0,00040	0,00249
73 (göçme)	0,00030	0,00476	0,00180	0,00323	0,00072	0,00025	0,00124

Tablo 4.9 Deney elemanı-5'in birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)						
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7
10	0,00005	0,00001	0,00007	0,00012	0,00001	0,00003	0,00003
70	0,0003	0,00105	0,00179	0,00017	0,00035	0,00344	0,00016
84(akma)	0,00034	0,00163	0,00229	0,00040	0,00099	0,00483	0,00018
84,33 (Maksimum yük)	0,00032	0,00167	0,00219	0,00047	0,00118	0,00483	0,00013
81,67 (göçme)	0,00024	0,00156	0,00178	0,00064	0,00112	0,00458	0,00013

Tablo 4.10 Deney elemanı-6'nın birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)						
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7
10	0,00004	0,00000	0,00004	0,00002	0,00001	0,00000	0,00001
70	0,00048	0,00146	0,00031	0,00018	0,00104	0,00036	0,00046
84 (akma)	0,00140	0,00226	0,00082	0,00033	0,00493	0,00039	0,00094
85,33 (Maksimum yük)	0,00156	0,00235	0,00093	0,00038	0,00493	0,00040	0,00098
73 (göçme)	0,00389	0,00265	0,00110	0,00045	0,00281	0,00034	0,00092

Tablo 4.11 Deney elemanı-7'nin birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)						
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7
10	0,00002	0,00007	0,00001	0,00001	0,00001	0,00000	0,00000
70	0,00260	0,00062	0,00010	0,00074	0,00042	0,00013	0,00024
79,33(Maksimum yük)	0,00437	0,00105	0,00012	0,00110	0,00075	0,00031	0,00029
73 (göçme)	0,00519	0,00023	0,00010	0,00008	0,00300	0,00020	0,00031

Tablo 4.12 Deney elemanı-8'in birim deformasyon değerleri

Kesme kuvveti (kN)	Birim deformasyon(mm/mm)						
	B.D.Ö.1	B.D.Ö.2	B.D.Ö.3	B.D.Ö.4	B.D.Ö.5	B.D.Ö.6	B.D.Ö.7
10	0,00003	0,00030	0,00001	0,00002	0,00001	0,00000	0,00001
70	0,00011	0,00032	0,00027	0,00196	0,00018	0,00007	0,00198
88 (akma)	0,00019	0,00188	0,00068	0,00203	0,00033	0,00021	0,00198
91,72 (Maksimum yük)	0,00085	0,00371	0,00071	0,00662	0,00102	0,00042	0,00467

4.6 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkisi Sonuçları

Deney elemanlarının birim deformasyon davranışlarının değerlendirilmesi ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Çatlakların yoğunlaştığı bölgelerde deney elemanlarının en yüksek deformasyon değerleri ölçülmüştür.
- Çatlakların belli bir kesitte yoğunlaşmadığı, kesitin geneline yayıldığı elemanlarda birbirine yakın deformasyon değerleri ölçülmüştür.
- Kiriş eksenine paralel uygulanan CFRP katmanı çatlak gelişimini sınırlandırarak deformasyon düzeyinin düşük miktarlarda olmasını sağlamıştır.
- Eğilme kapasitesine ulaşan deney elemanında birim deformasyon değerleri 0,004 mm/mm değerini %50'den fazla aşmasına rağmen kiriş göçmemiştir.

- CFRP levhaların yırtıldığı deney elemanlarında yırtılma anında ani birim deformasyon düşüşleri gerçekleşmiştir.
- Tüm deney elemanlarında belli bir yük seviyesine kadar birim deformasyon değerleri birbirine yakın ve düşük değerler almıştır.

BÖLÜM BEŞ

ANALİTİK ÇALIŞMA

5.1 Genel

Bu bölümde deney elemanlarının kesme dayanımları (ACI-440, 2001) komite raporu, (Concrete Society, 2000) TR55, (Colotti vd.,2004) nin çalışmasındaki bağıntılar, ve (DBYBHY, 2007), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikte verilen bağıntılar yardımı ile hesaplanarak deneysel kesme dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

5.2 Deney Elemanlarının Analitik Kesme Dayanımlarının Hesaplanması

CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısı tüm yönetmeliklerde aynı ifade ile verilir. Burada CFRP'nin katkısı kesme donatısının ve çatlamamış betonun katkısına eklenerek toplam kesme dayanımı bulunur.

$$V=V_c+V_s+V_f \quad (5.1)$$

(5.1) bağıntısında V_c betonun kesme dayanımına katkısı, V_s kesme donatısının kesme dayanımına katkısı ve V_f CFRP'nin kesme dayanımına katkısıdır. Deney elemanları kesme donatısına sahip olmadığı için kesme dayanımı hesabına betonun ve CFRP levhaların katkısı dikkate alınmıştır. Betonun kesme dayanımı (5.2) denklemi ile bulunmuştur:

$$V_c= 0,65 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (5.2)$$

Bu denklemde;

f'_c : Betonun karakteristik basınç dayanımı,

b_w : Kiriş gövde genişliği,

d : Kiriş faydalı yüksekliğidir.

ACI 440 komite raporu

CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı, ACI-440 komite raporunda sunulan aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Çatlamamış betonun katkısı bu değere eklenerek deney elemanlarının toplam kesme dayanımları elde edilmiştir. ACI-440 komite raporunda CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı (5.3) denklemi ile bulunur:

$$V_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin\beta + \cos\beta) \cdot d_f}{s_f} \quad (5.3)$$

burada;

V_f : CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı

β : CFRP levhaların yatay eksenle yaptığı açı

d_f : Etkili CFRP levha uzunluğu

s_f : CFRP şeritlerin, eksenden eksene aralıkları

f_{fe} : CFRP'deki etkili gerilme

n : CFRP sargı sayısı

t_f : CFRP levha kalınlığı

w_f : CFRP şerit genişliğidir.

(5.3) bağıntısındaki f_{fe} ifadesi,

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} \cdot E_f \quad (5.4)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. (5.4) no'lu bağıntıda;

E_f : CFRP'nin elastisite modülü,

ε_{fe} : CFRP'nin etkili birim deformasyon değeridir. Levha şeklindeki uygulamalarda w_f ifadesi,

$$w_f = s_f \cdot \sin\beta \quad (5.5)$$

ile bulunur. ε_{fe} terimi ise,

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu} \cdot k_v \quad (5.6)$$

ifadesinden elde edilmektedir. (5.6) no'lu bağıntıda;

ε_{fu} : CFRP'nin tasarım kopma birim deformasyon değeri,

k_v : Yapışmaya bağlı bir katsayıdır. k_v katsayısı,

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (5.7)$$

bağıntısından elde edilmektedir. Bu denklemde;

k_1 : Betonun basınç dayanımına bağlı değişiklik katsayısı,

k_2 : CFRP uygulama şekline bağlı değişiklik katsayısı,

L_e : CFRP'nin aktif uzunluğudur.

(5.7) bağıntısındaki k_1 ve L_e terimleri,

$$L_e = \frac{23,300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (5.8)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (5.9)$$

şeklinde bulunur. k_2 katsayısı CFRP levhalar elemanın yan yüzlerine yapıştırıldığı durumda (5.11) bağıntısı ile, CFRP levhalar U biçiminde uygulandığı durumda (5.10) bağıntısı ile hesaplanır.

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & U \text{ biçimli} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{yan yüz uygulaması} \end{cases} \quad (5.10)$$

(5.11)

Concrete Society TR55 teknik raporu

CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı, Concrete Society TR55 teknik raporunda ifade edilen bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Çatlamamış betonun katkısı bu değere eklenerek deney elemanlarının toplam kesme dayanımları elde edilmiştir. Concrete Society TR55 teknik raporunda CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı (5.12) denklemi ile bulunur:

$$V_{rf} = \frac{1}{\gamma_{mF}} \frac{A_{fs} (E_{fd} \epsilon_{fe}) \sin \beta (1 + \cos \beta) d_f}{s_f} \quad (5.12)$$

$$\gamma_{mF} = \gamma_{mf} \cdot \gamma_{mm} \quad (5.13)$$

burada;

γ_{mF} : Kısmi güvenlik faktörü,

γ_{mf} : CFRP için 1,4 alınacak malzeme katsayısı,

γ_{mm} : Uygulama biçimine göre 1,1 ile 2,2 arasında değişen katsayıdır.

$$A_{fs} = 2t_f w_{fe} \quad (5.14)$$

A_{fs} : Gövdedeki CFRP alanı olup levha uygulaması için (5.14) denklemi ile tanımlanır.

$$w_{fe} = \begin{cases} d_f - L_e & U \text{ biçimli} \\ d_f - 2L_e & \text{yan yüz uygulaması} \end{cases} \quad (5.15)$$

w_{fe} : Etkili FRP genişliği,

d_f : FRP'nin etkili derinliği,

L_e : Etkili yapışma uzunluğudur. L_e ifadesi (5.16) denklemi ile tanımlanır:

$$L_e = \frac{461,3}{(t_f E_{fd})^{0,58}} \quad (5.16)$$

$$E_{fd} = \frac{E_f}{\gamma_{mE}} \quad (5.17)$$

E_f : FRP'nin elastisite modülü,

E_{fd} : FRP'nin tasarım elastisite modülü (kN/mm²),

γ_{mE} : Kısmi güvenlik faktörü olup CFRP için 1,1'dir. Ayrıca;

β : CFRP levhaların yatay eksenle yaptığı açı,

s_f : CFRP şeritlerin eksenden eksene aralıkları,

t_f : CFRP levha kalınlığı olarak ifade edilmiştir.

Etkili FRP birim deformasyonu olarak tanımlanan ε_{fe} değeri aşağıdaki üç değer en küçüğü alınarak (5.12) denkleminde yerine konacaktır.

$$\varepsilon_{fe} = \begin{cases} \varepsilon_{fu} \left[0,5622(\rho_f E_{fd})^2 - 1,2188(\rho_f E_{fd}) + 0,778 \right] \\ 0,0042 \left[(0,835 f_{cu})^{2/3} w_{fe} \right] / (E_{fd} t_f)^{0,58} d_f \\ 0,004 \end{cases} \quad (5.18)$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{mf}} \quad (5.19)$$

ε_{fu} : FRP'nin tasarımda kullanılacak en büyük birim deformasyon değeri,

ε_{fk} : FRP'nin karakteristik göçme birim deformasyon değeri,

f_{cu} : Betonun küp basınç dayanımı (N/mm²),

ρ_f : FRP donatı oranı (levhalar için $2t_f/b_w$) olarak tanımlanmıştır.

Colotti ve diğerleri

CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı, Colotti vd.'nin geliştirdiği denklemler ile hesaplanmış, çatlamamış betonun katkısına eklenerek deney elemanlarının kesme dayanımları elde edilmiştir. Yazarın ampirik olarak ifade ettiği bağıntılarda CFRP'nin kesme dayanımına katkısı aşağıda sunulmuştur. Colotti vd. kesme donatısını iki ana bileşende toplamıştır:

$$\varphi = \varphi_i + \varphi_e \quad (5.20)$$

φ_i : Kesme donatısından gelen donatı oranı,

φ_e : FRP ile oluşan donatı oranıdır.

$$\varphi_e = \min \left(\frac{w_f d_f}{b s_f f'_c}, \tau_u, \frac{2 w_f t_f}{b s_f f'_c} \right) \quad 2 \text{ yada } 3 \text{ kenarı güçlendirilmiş kirişler için} \quad (5.21)$$

burada;

t_f : CFRP levha kalınlığı,

w_f : CFRP şerit genişliği,

d_f : Etkili CFRP levha uzunluğu,

s_f : CFRP şeritlerin, eksenenden eksene aralıkları,

b : Kiriş genişliği,

f'_c : Betonun basınç dayanımıdır.

CFRP'nin kirişin kesme kapasitesine katkısı aşağıdaki formülle bulunur:

$$V = \left(\frac{\tau}{f'_c} \right) b d_v f'_c \quad (5.22)$$

τ : Nominal kesme gerilmesi,

d_v : Etkili kesme derinliğidir (0,9d).

$\left(\frac{\tau}{f'_c} \right)$ terimi göçme durumlarına göre bulunan değerlerin en küçüğü olarak (5.22)

denkleminde yerleştirilecektir.

Göçme durumu 1 için;

$$\frac{\tau}{f'_c} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,5(\sqrt{1+\alpha^2} - \alpha) - \varphi\alpha & 0 \leq \varphi \leq \varphi_0 = \frac{\sqrt{1+\alpha^2} - \alpha}{2\sqrt{1+\alpha_2}} \\ \sqrt{\varphi(1+\varphi)} & \varphi_0 \leq \varphi \leq 0,5 \\ 0,5 & \varphi > 0,5 \end{array} \right\} \quad (5.23)$$

Göçme durumu 2 için;

$$\varphi \leq \varphi_0 \text{ ise } \frac{\tau}{f'_c} = \begin{cases} 0,5 \left(\sqrt{4\eta(1-\eta) + \alpha^2} - \alpha \right) & \eta \leq 0,5 \\ 0,5 \left(\sqrt{1 + \alpha^2} - \alpha \right) & \end{cases} \quad (5.24)$$

burada;

$$\alpha = \frac{a}{d_v} \text{ ve } \eta = \frac{A_{sl} f_{ly}}{b d_v f'_c} \text{ dir.} \quad (5.25)$$

a : Kesme açıklığı,

α : Kesme açıklığının etkili kesme derinliğine oranı,

A_{sl} : Toplam boyuna donatı alanı,

f_{ly} : Boyuna donatının akma dayanımıdır.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik

CFRP levhaların kesme dayanımına katkısı, 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te (DBYBHY) verilen denklem kullanılarak hesaplanmış, çatlamamış betonun katkısına eklenerek deney elemanlarının kesme dayanımları elde edilmiştir. DBYBHY'de CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı şu denklemle ifade edilmiştir:

$$V_f = \frac{2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot w_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot d}{S_f} \quad (5.26)$$

V_f : Lifli polimerin kesme kuvveti dayanımına katkısı,

E_f : Lifli polimerin elastisite modülü,

d : Kesitin faydalı yüksekliği,

S_f : Lifli polimer şeritlerin eksenenden eksene aralığı,

ε_f : Lifli polimerin etkin birim uzama sınırı,

n_f : Lifli polimer sargı sayısı,

t_f : Bir tabaka lifli polimer için etkili kalınlık,

w_f : Lifli polimer şeridin genişliğidir.

Levha şeklindeki uygulamalarda $w_f = s_f$ alınacaktır. Bağntıdaki ε_f ifadesi;

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &\leq 0,004 \\ \varepsilon_f &\leq 0,50 \cdot \varepsilon_{fu} \end{aligned} \quad (5.27)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ε_{fu} lifli polimerin kopma birim uzamasıdır.

Deney elemanlarının ACI-440 komite raporu, Concrete Society TR55 teknik raporu, Colotti ve diğerlerine ait bağıntılar ve DBYBHY kullanılarak hesaplanan analitik kesme kuvveti değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığı tablo, Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Analitik kesme dayanımlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

Deney no	ACI-440 kN	Concrete Society kN	Colotti vd. kN	DBYBHY kN	Deneysel kN	Deneysel/Hesaplanan			
						ACI- 440	Concrete Society	Colotti vd.	DBYBHY
2	97,29	82,96	87,95	149,41	88,33	0,91	1,06	1,00	0,59
3	76,22	69,91	89,27	119,25	91,38	1,20	1,31	1,02	0,77
4	50,16	56,61	86,40	71,38	79,67	1,59	1,41	0,92	1,12
5	109,84	97,78	90,07	174,01	83,00	0,76	0,85	0,92	0,48
6	70,19	64,15	91,78	101,63	85,33	1,22	1,33	0,93	0,84
7	60,20	57,31	87,95	72,08	79,33	1,32	1,38	0,90	1,10
8	75,74	69,96	87,27	99,51	91,72	1,21	1,31	1,05	0,92

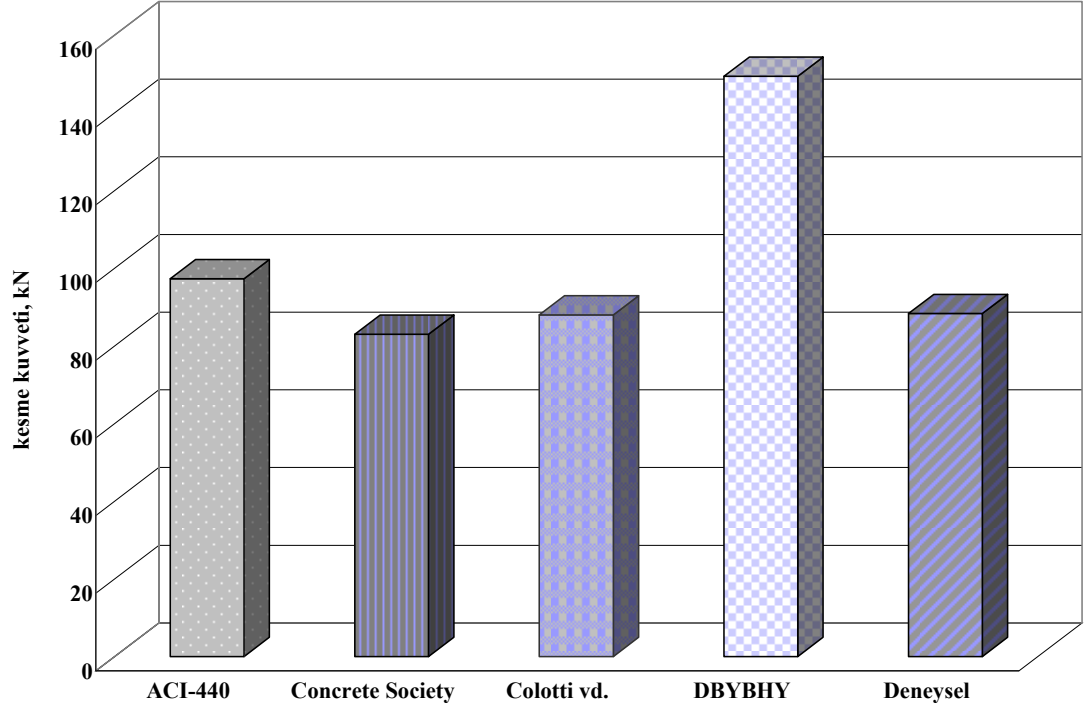
ACI-440 komite raporu ile hesaplanan kesme dayanım değerleri, tek yönlü CFRP ile güçlendirilen 2 ve 5 no'lu deney elemanlarında deneysel değerlerden daha yüksektir. Çift yönlü CFRP levhalarla güçlendirilen diğer deney elemanlarında ise deneyde bulunan değerler yüksek çıkmıştır. Bu elemanlarda hesaplanan ve deneysel değer arasındaki en büyük fark %59 ile deney elemanı-4 de gerçekleşmiştir. Hesap aşamasında ankraj ve a/d etkisinin denklemlerde yer almaması teorik ve deneysel değerlerin farklı bulunmasında etkindir. Ayrıca çift yönlü CFRP'nin kalınlık değerinin az olması hesap sonucu bulunan kesme değerlerinin küçük çıkmasına neden olmuştur. Bu yüzden en küçük kesme dayanım değeri tek yönlü ve tek katlı yan yüzlere CFRP uygulanmış elemanda hesaplanmıştır.

Concrete Society TR55 teknik raporu ile bulunan kesme dayanımları deneysel sonuçlardan % 6-41 aralığında farklıdır. Deney elemanı-5 dışındaki elemanlarda bulunan analitik kesme dayanım değerleri deney sonuçlarından düşüktür. Tek yönlü CFRP ile güçlendirilen deney elemanlarında analitik ve deneysel sonuç farkları daha azdır. ACI-440'da olduğu gibi denklemlerde ankraj ve a/d etkisinin bulunmaması deneysel ve analitik sonuçların farklı çıkmalarına yol açmaktadır. Deney elemanı-2 ACI-440 sonuçlarında olduğu gibi deney kesme dayanımı ile çok yakın sonuç vermiştir. Yönetmeliklerde verilen ideal CFRP düzenini temsil eden bu deney elemanı analitik hesap sonucunda da gerçeğe yakın sonuç vermiştir.

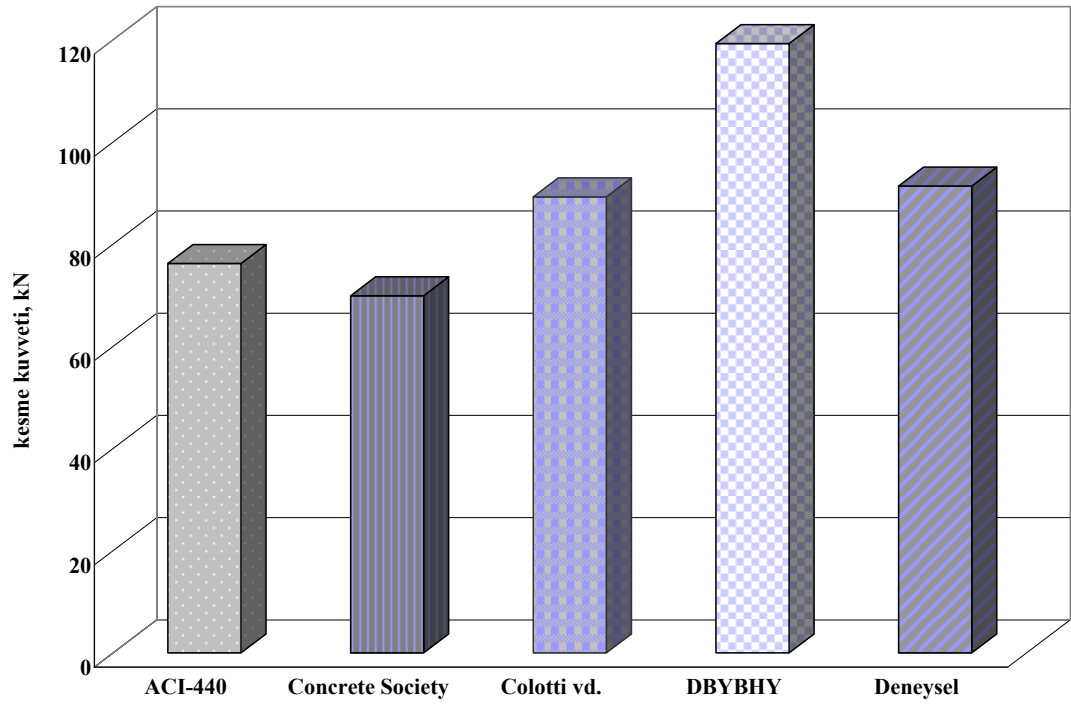
Colotti vd.'nin çalışmasında yer alan ifadelere göre bulunan kesme dayanım değerleri deney sonuçlarından % 0-10 farklıdır. İncelenen hesap yöntemleri arasında en yakın sonuçlar bu çalışmada bulunmuştur. Tek yönlü ve çift yönlü CFRP uygulamalarında aynı düzeyde deneysel sonuçlara yakın değerler elde edilmiştir. Hesap aşamasında a/d oranı CFRP'nin etkili birim deformasyon değerinin bulunmasında kullanılmıştır. Bu nedenle deneysel ve analitik sonuç farkları azalmıştır. En başarılı sonuçlar 2 ve 3 no'lu deney elemanlarında görülmüştür.

DBYBHY'de verilen bağıntılar ile hesaplanan analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %8-%52 aralığında değişen oranlarda farklı hesaplanmıştır. En büyük fark 5 no'lu deney elemanındadır. En yakın deneysel ve analitik sonuç ise eğilme

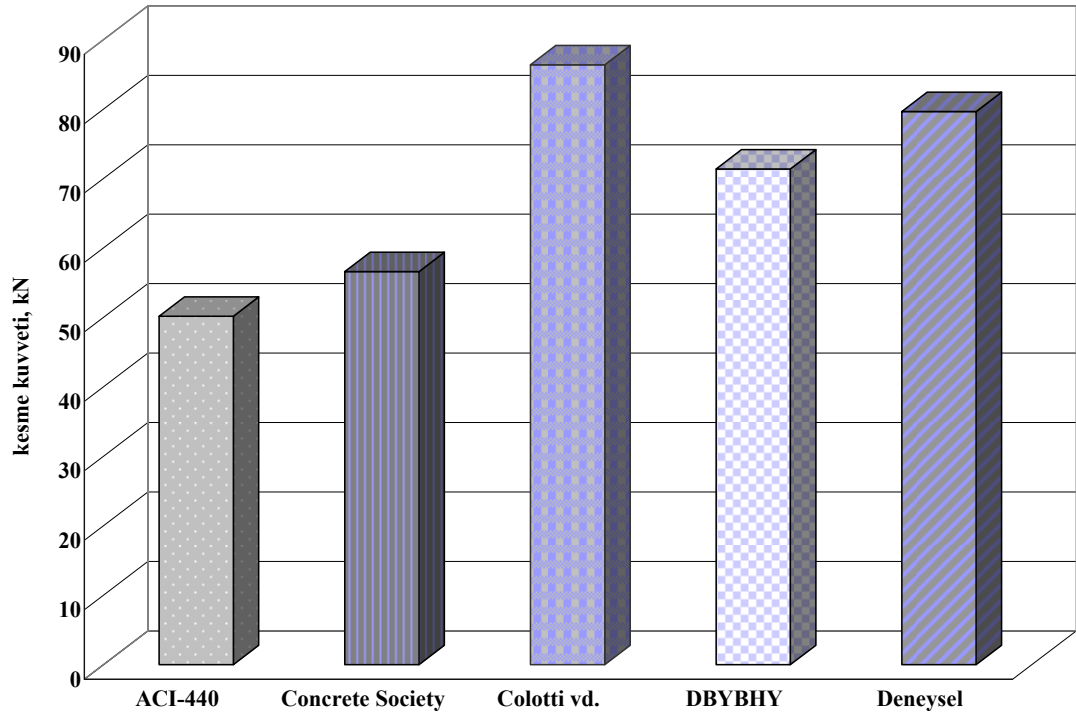
kapasitesine ulaşan deney elemanı-8’de bulunmuştur. DBYBHY kesme dayanımı hesap formülünün genel içerikli olması ve CFRP’nin birim deformasyon değerinin her elemanda 0,004 alınması sonucu analitik değerler deneysel değerlere göre oldukça farklı hesaplanmıştır. Bölüm sonunda deney elemanlarına ait deneysel ve analitik sonuçları karşılaştıran grafikler Şekil 5.1 ve Şekil 5.7 arasında sunulmuştur.



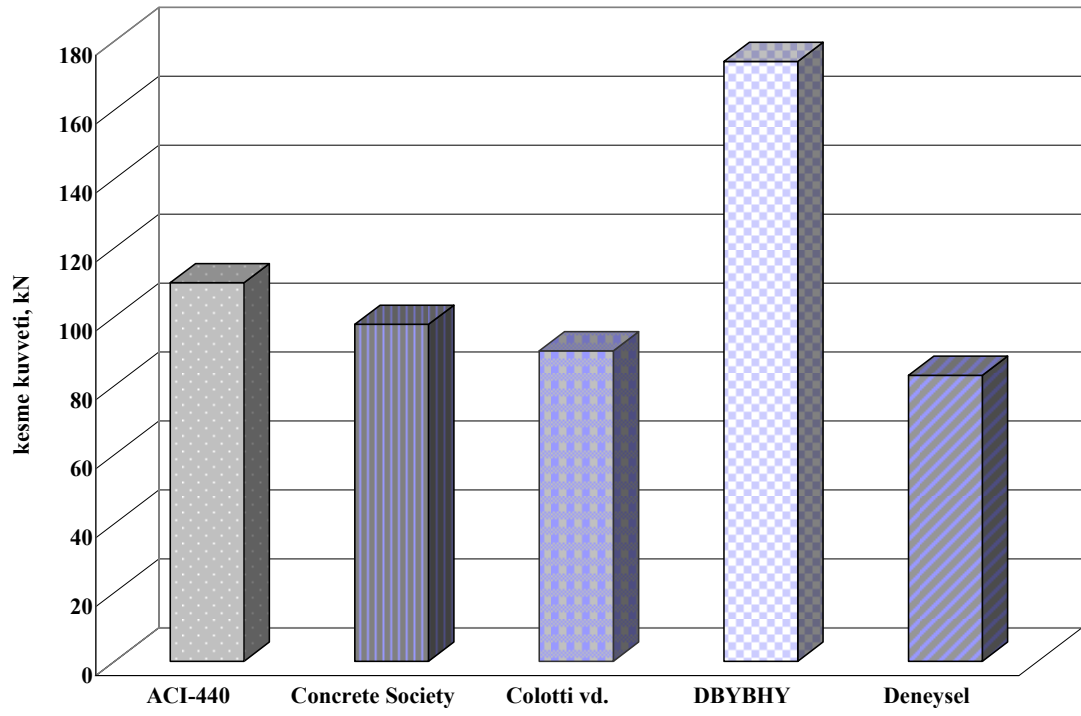
Şekil 5.1 Deney elemanı-2’ye ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



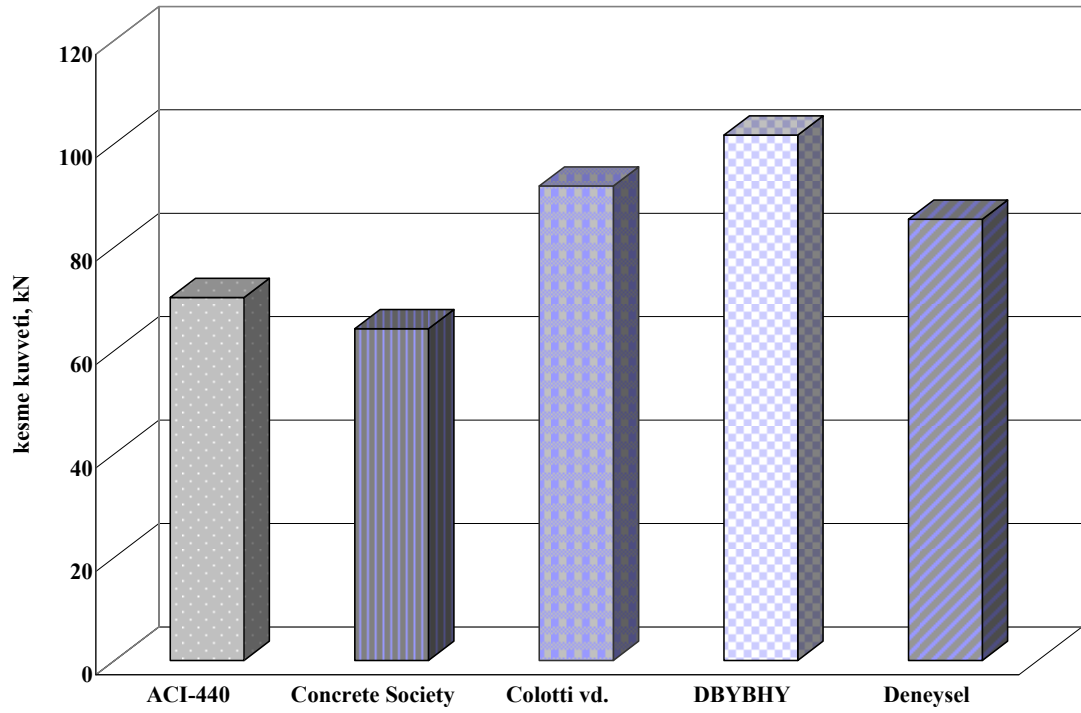
Şekil 5.2 Deney elemanı-3'e ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



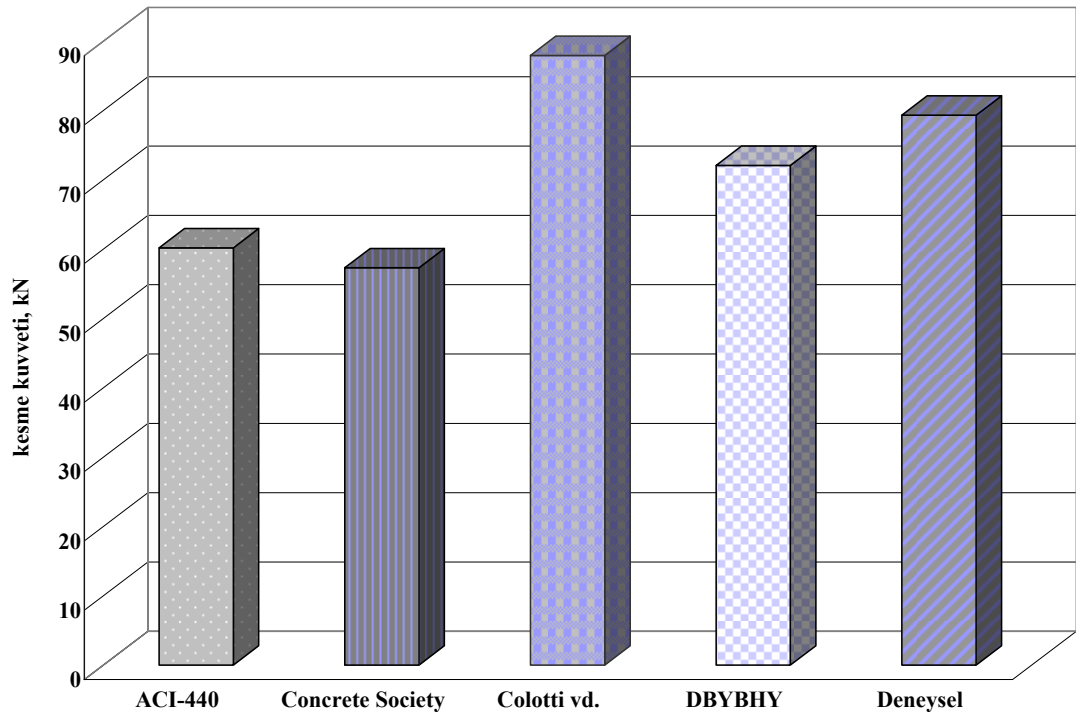
Şekil 5.3 Deney elemanı-4'e ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



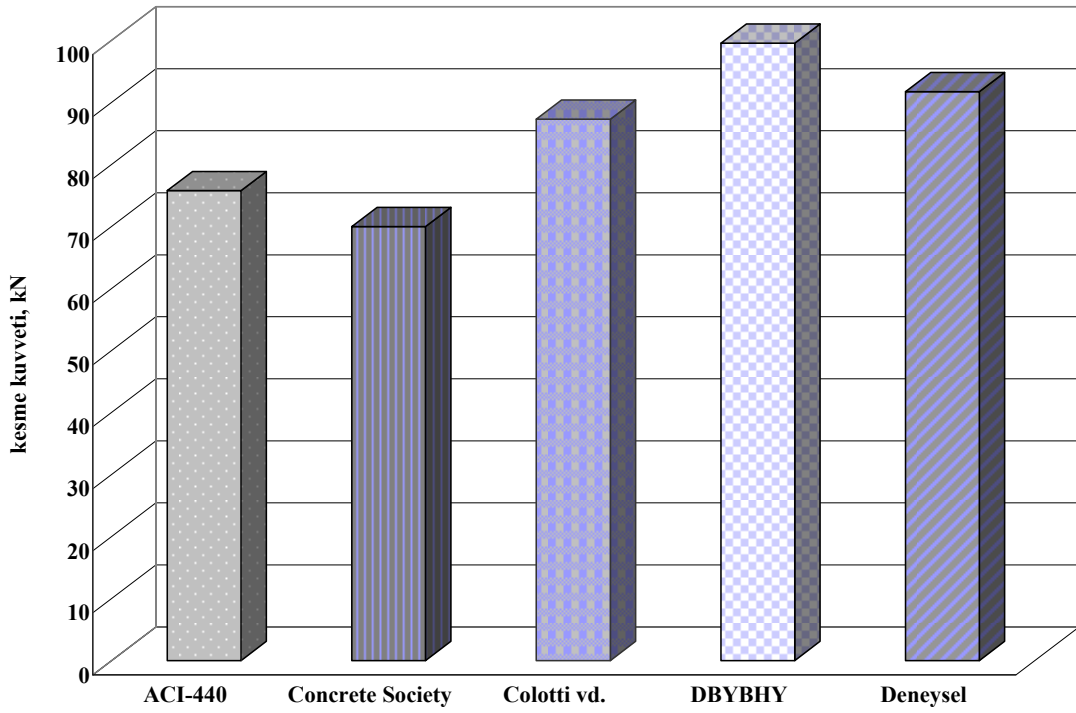
Şekil 5.4 Deney elemanı-5'e ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.5 Deney elemanı-6'ya ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.6 Deney elemanı-7'ye ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 5.7 Deney elemanı-8'e ait hesaplanan kesme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Kesme açısından yetersiz olan betonarme yapı elemanları farklı yöntemlerle onarılmakta ve güçlendirilmektedir. CFRP ile betonarme elemanların güçlendirilmesi, malzemenin sahip olduğu önemli avantajlar nedeni ile özellikle son on yılda çok sayıda kullanım alanı bulmuştur.

Sunulan tez çalışmasında CFRP levhalarla kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışları incelenmiştir. Dört deney değişkeni irdelenmiştir. Bunlar CFRP levhaların katman sayısı, uygulama şekli, uygulama açısı ve CFRP tipidir. Bu değişkenler dayanım, rijitlik, süneklik ve birim deformasyon davranışı açısından deney elemanları gruplandırılarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 3/5 geometrik ölçekli T-kesitli betonarme kiriş kullanılmıştır. Deney elemanları ankastre kiriş olarak deney platformuna yerleştirilerek test edilmiştir. Böylece konsol kirişte oluşan sabit kesme kuvveti irdelemede kolaylık sağlamıştır. CFRP malzemesinin kesme dayanımına katkısını tam olarak görmek için elemanlarda kesme donatısı kullanılmamıştır. Deney elemanları depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir. Bir deney elemanı referans olarak seçilip güçlendirilmemiştir. Diğer kirişler farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Deneyler ve sonuçları deney değişkenleri ve davranış açısından irdelenmiştir. Yönetmelikler ve araştırmacıların önerdiği bağıntılar doğrultusunda analitik kesme dayanımları hesaplanmış ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

6.1 Sonuçlar

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda ana hatları ile sunulmuştur:

- CFRP levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımları referans elemana göre 2,02–2,32 kat artış göstermiştir. Başlangıç rijitlikleri referans elemana göre genelde artış göstermemiştir. Bunun nedeni elemanların yük taşıma kapasitesi ile birlikte deplasman düzeyinin de artmasıdır.

- CFRP katman sayısının artırılması dayanımda 1,07-1,16 kat artışa sebep olmuştur. Ayrıca iki kat CFRP levhalar ile güçlendirilen elemanların başlangıç rijitliği de artmıştır. En önemli değişim göçme modunda sağlanmıştır. Tek kat CFRP ile güçlendirilen iki eleman CFRP levhada oluşan yırtıkla birlikte gelişen kesme çatlağı ile ani olarak göçmüştür. Çift kat CFRP levhaya sahip kirişler ise boyuna donatının altındaki kabuk betonunun yüzeyden ayrılması ile göçmeye ulaşmış, bir tanesi de eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Ayrıca tek kat CFRP'ye sahip elemanların boyuna donatısı akmamış diğer elemanlara göre daha rijit davranmışlardır.
- Tek kat CFRP ile güçlendirilen kirişlerde uygulama biçiminin değişerek yüzey alanının artırılması ancak %7 dayanım artışı sağlamıştır. Her iki elemanda CFRP'nin yırtılması ile göçmüştür. Tek kat CFRP oluşan gerilme artışı ile oluşan deformasyon artışına karşı koyamamış, malzemenin maksimum uzaması aşıldınca yırtılma gerçekleşmiştir. Elemanların deplasman kapasiteleri oldukça sınırlıdır.
- Uygulama açısının değişimi elemanların dayanımlarında çok büyük değişimler getirmemiştir. Bu elemanlar içerisinde en büyük dayanıma 0-90°'lik uygulama açılı eleman sahiptir. Bu elemanda kiriş eksenine paralel uygulanan katman başarılı olmuş, çatlak gelişimini geciktirerek dayanımı artırmıştır.
- Çalışmada CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılmasını engellemek veya geciktirmek için kiriş gövdesinin uç bölgelerinde, kiriş alt boyuna donatısının üstünde ve kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte mekanik ankrajlar kullanılmıştır. Geliştirilen ankraj detayları tersinir tekrarlanır yükleme altında iyi bir performans sergilemiştir. Ankrajlar, CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılarak soyulmasını engellemiştir. Kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitteki ankraj detayı tabla ile kiriş gövdesinin kesme etkisi ile birbirinden ayrılmasına engel olmuştur.
- Beton pas payından donatıya kadar olan bölgenin koparak kiriş gövdesinden ayrılmasıyla göçen deney elemanlarında CFRP, sadece yan yüzlere uygulanması

nedeniyle kiriş kesme donatısı gibi sargılayamamıştır. Böylece ankrajlardan kiriş alt boyuna donatısının hemen üstüne aktarılan çekme kuvvetleri bu kesitte gerime yığılması oluşturarak beton pas payının kiriş gövdesinden ayrılmasına neden olmuştur.

- Deney değişkenleri olan CFRP katman sayısı, uygulama şekli, uygulama açısı ve CFRP tipi deney elemanlarının davranışlarını farklı oranlarda değiştirmiştir. Katman sayısının artırılması ile diğer değişkenlerden daha fazla iyileştirme sağlanmıştır. Bu katkı dayanım artışı ile birlikte göçme modlarını da değiştirmiştir.
- Uygulama biçiminin Γ şeklinde olması tek başına yeterli katkı sağlamamıştır. Ancak bu uygulama ile birlikte CFRP levhanın iki kata çıkarılması en başarılı deney sonucunu getirmiştir. Bu elemanda boyuna donatılar akmış ve kiriş eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Mesnet bölgesinde plastik mafsalları oluşumu net biçimde gözlenmiş, eleman göçmeden büyük deplasmanlar yapmıştır.
- Eğilme kapasitesine ulaşan 8 no'lu deney elemanı hariç çift yönlü CFRP ile güçlendirilen kirişlerde birim deformasyon değerleri maksimum yükte ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır. Deney elemanı-8 ise en küçük birim deformasyon değerine sahiptir.
- Çatlakların yoğunlaştığı bölgelerde deney elemanlarının en yüksek deformasyon değerleri ölçülmüştür. Çatlakların belli bir kesitte yoğunlaşmadığı, kesitin geneline yayıldığı elemanlarda birbirine yakın deformasyon değerleri ölçülmüştür. Tüm deney elemanlarında belli bir yük seviyesine kadar birim deformasyon değerleri birbirine yakın ve düşük değerler almıştır.
- Colotti vd.'nin çalışması ile hesaplanan kesme dayanımları deneysel değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Çalışmada a/d oranının dikkate alınması sonuç farklarını çok düşürmüştür.

- DBYBHY’de verilen bağıntıda, CFRP uygulama şekli ve ankraj uygulamasının kesme dayanımına katkısı ile CFRP’nin beton yüzeyinden ayrılmasıyla gerçekleşen göçmenin dayanıma etkisi dikkate alınmamıştır. Bu nedenle deney elemanlarının analitik kesme dayanımları, deney sonuçlarından %8-52 farklıdır.
- Bu çalışma ile T-kesitli kesme donatısız CFRP levhalarla güçlendirilen betonarme kirişlerin tersinir-tekrarlanır yükleme altında davranışları incelenmiş, varolan veri eksikliğini giderme adına öncü bir çalışma ortaya konmuştur.

6.2 Öneriler

Çalışma sonucunda yapılmalarının faydalı olduğu düşünülen öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Farklı a/d oranlarıyla kesmeye karşı CFRP güçlendirilmesi yapılmış betonarme kirişler incelenmelidir.
- Değişik beton ve donatı dayanımına sahip betonarme kirişler CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilerek irdelenmelidir.
- Kesme donatısına sahip kirişlerde de CFRP’nin etkinliği araştırılmalıdır.
- CFRP’den farklı FRP malzemelerinin aynı tip yükleme altında davranışları araştırılmalıdır.
- Beton kabuk bölgesinin gövdeden ayrılmasını engellemek için farklı bir ankraj detayı geliştirilip teste tabi tutulmalıdır.
- FRP çubuklar gibi yeni gelişen fiber malzemelerin de etkinliği ve davranışları deneysel olarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 440 (1996). State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures. *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, 68 .
- ACI, American Concrete Institute, Committee 318,(1995). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95), Michigan, ,USA, 131-170.
- Adhikary, B, B., Mutsuyoshi, H., Ashraf, M., (2004). Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage. *ACI Structural Journal*, September-October, 660-516.
- Ahmed, O., Van Gemert, D., Vandewalle, L., (2001). Improved model for plate-end shear of CFRP strengthened RC beams. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 3-19.
- Anil, O. (2006). Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to Cyclic load. *Cement and Concrete Composites*, 28, 638-649
- Anil, O. (2007). Strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using CFRP composites subjected to cyclic load. *Construction and Building Materials*, Article in Press.
- Bencardino, F, Spadea, G, Swamy, R.N. (2007). The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 1997-2006.
- Chaallal, O., Shahawy, M., Hassan, M., (2002). Performance of reinforced concrete T-girders strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer fabric. *ACI Structural Journal*, May-June, 335-343.

- Chajes, M. J., Januska, T. F., Mertz, D. R., Thomson, T. A., Finch, W. W. (1995). Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics. *ACI Structural Journal*. 92 (3), 295-303.
- Chen, J. F., Teng, J. G., (2003). Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP rupture. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129(5), 615-625
- Chen, J. F., Teng, J. G., (2003). Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 17(1), 27-41
- Colotti V., Spadea G., Swamy R. N., (2004). Analytical model to evaluate failure behavior of plated reinforced concrete beams strengthened for shear. *ACI Structural Journal*, 101(6), 755-764.
- Concrete Society Technical Report 55, (2000). Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials, The Concrete Society, Crowthorne, UK.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2007). *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Diagana, C., Li, A., Gedalia, B., Delmas, Y., (2003). Shear strengthening effectiveness with CFF strips. *Engineering Structures*, 25, 507-516.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001). *Betonarme (2. Baskı)*: Evrim Yayınevi.
- Kachlakev, D., McCurry, C.C. (2000). Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. *Composites: Part B*, 31, 445-452.

- Keleş, M. (2005). *Betonarme kirişlerde açılı CFRP şeritlerin kesmeye katkısı*,. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, (Yön: Ö.Anıl).
- Khalifa, A., Nanni, A. (2000). Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites. *Cement and Concrete Composites*, 22, 165-174.
- Khalifa, A., Nanni, A., (2002). Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. *Construction and Building Materials*, 16, 135-146.
- Li, A., Assih, J., Delmas, Y., (2003). Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets. *Journal of Structural Engineering*, 127(4), 374-380.
- Mosallam, A. S., Banerjee, S., (2007). Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened with FRP composite laminates. *Composites: Part B*, 38 , 781-793.
- Norris, T.; Saadatmanesh, H.; and Ehsani, M. (1997). Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903-911.
- Pellegrino, C., Modena, C., (2002). Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 104-111.
- Pellegrino, C., Modena, C., (2006). Fiber reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams: Experimental study and analytical modeling. *ACI Structural Journal*, September-October, 720-728.

- Raghu, A., Myers, J. J., Nanni, A. (2000). An Assessment of In-Situ FRP Shear and Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Joists. *Advanced Technology in Structural Engineering*, 46(5), 177-187.
- Sato, Y., Katsumata, H., Kobatake, Y. (1997). Shear strengthening of existing reinforced concrete beams by CFRP sheet. In Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. *Proceedings of the Third Symposium*, Japan, 1, 507-514.
- Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Hussain, M. (1995). Strengthening of shear damaged RC beams by external plate bonding of steel plates. *Magazine of Concrete Research*, 47, 329-334.
- Taljsten, B., Elfgren, L., (2000). Strengthening concrete beams for shear using CFRP materials: evaluation of different application methods. *Composites: Part B*, 33, 87-96.
- Tanarşlan, H. M. (2007). *CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tersinir-tekrarlı yükler altında davranışı*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora tezi, (Yön: Y. Ertutar).
- Teng, J. G., Lam, L., Chen J, F., (2004). Shear strengthening of RC beams with FRP composites. *Prog. Structure Eng. Materials*, 6, 173-184.
- Triantafillou, T.C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy- bonded FRP composites. *ACI Structural Journal*, 95(2), 107-115.
- TS 500, (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Wegian, F. M., Abdalla H. A., (2005). Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers. *Composite Structures*, 71, 130-138.

EKLER

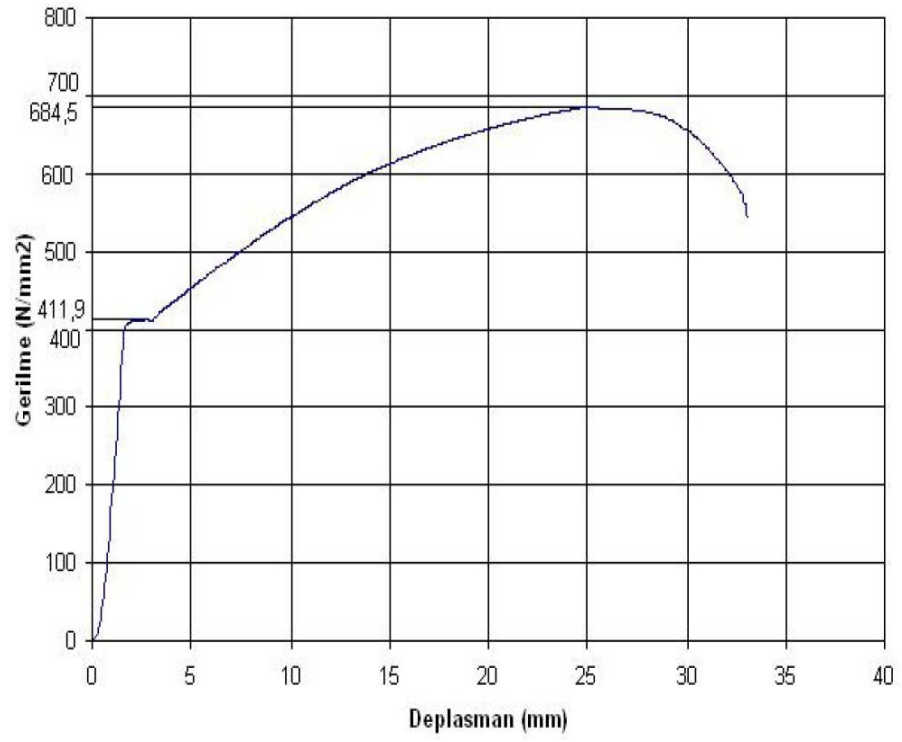
EK-A**DONATI GERİLME-BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME GRAFİKLERİ**

Deneysel çalışmada kullanılan donatıların testleri Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan bilgisayar kontrollü DARTEC marka eksenel çekme aletinde gerçekleştirilmiştir (Resim Ek-A). Tüm deneylerde yükün uygulanma hızı sabit tutulmuştur.

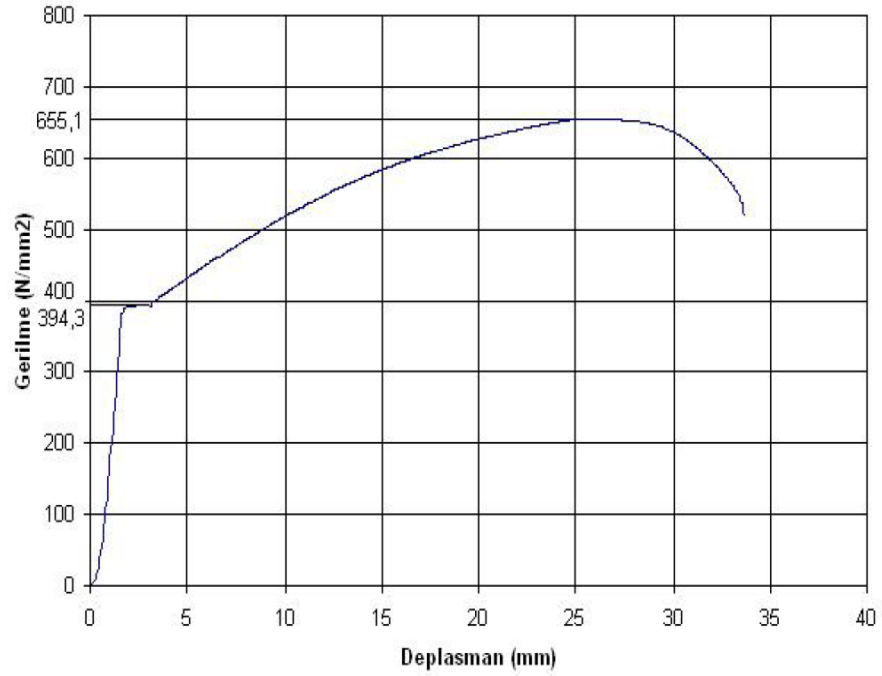
Gerçekleştirilen testlerde $\Phi 20$ ve $\Phi 10$ mm'lik nervürlü, $\Phi 6$ mm'lik düz donatılardan alınan üçer adet numuneye uygulanan çekme deneyinde elde edilen sonuçlar Şekil Ek-A.1-A.9'a arasında sunulmuştur.



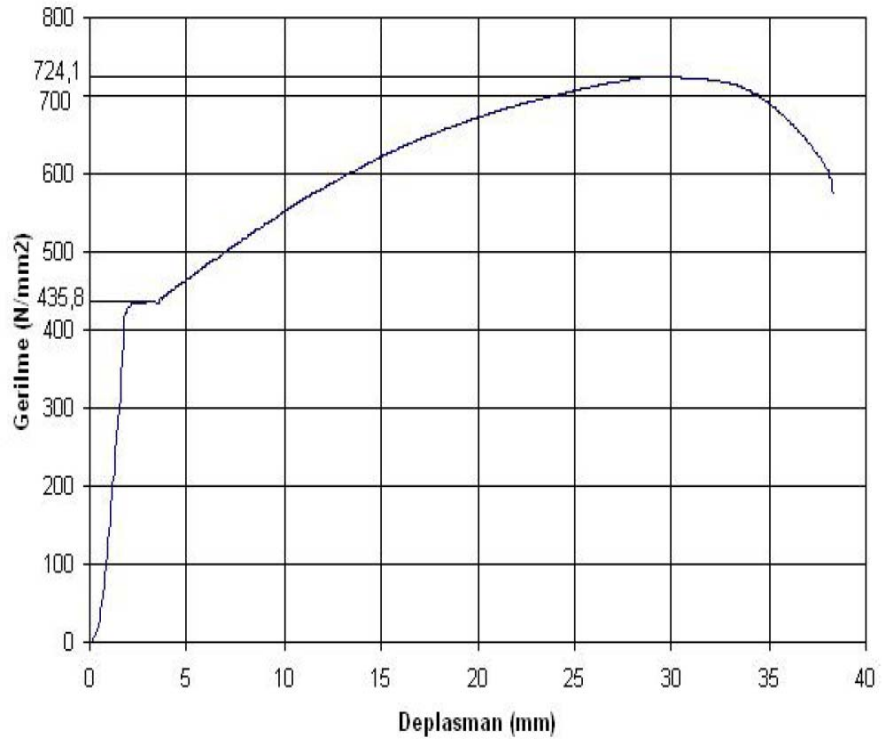
Şekil Ek-A1 Çekme deneyinde kullanılan deney düzeneği



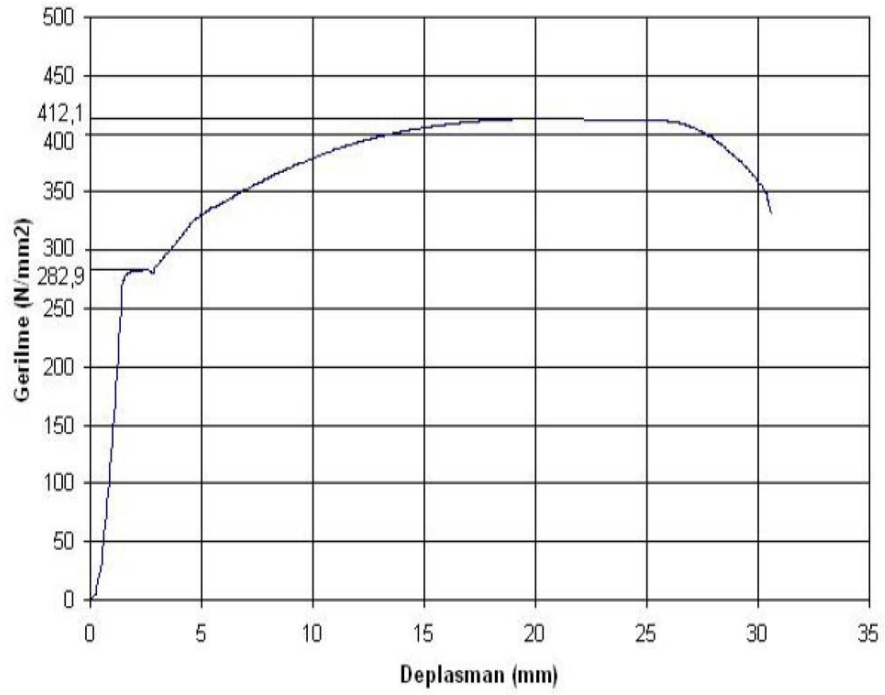
Şekil Ek-A.2 Çekme deneyi sonucu (Ø 20)



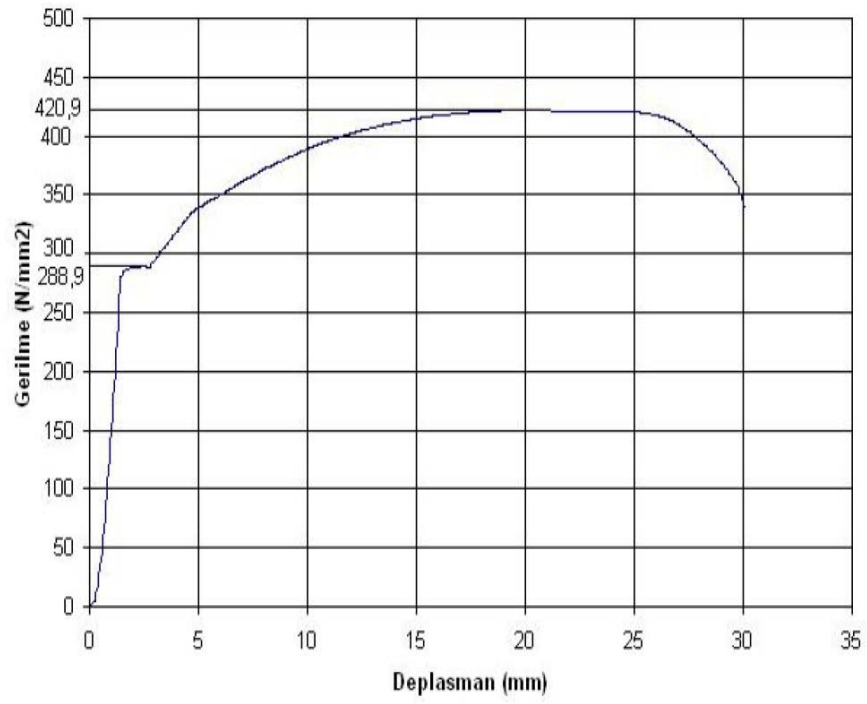
Şekil Ek-A.3 Çekme deneyi sonumu (Ø 20)



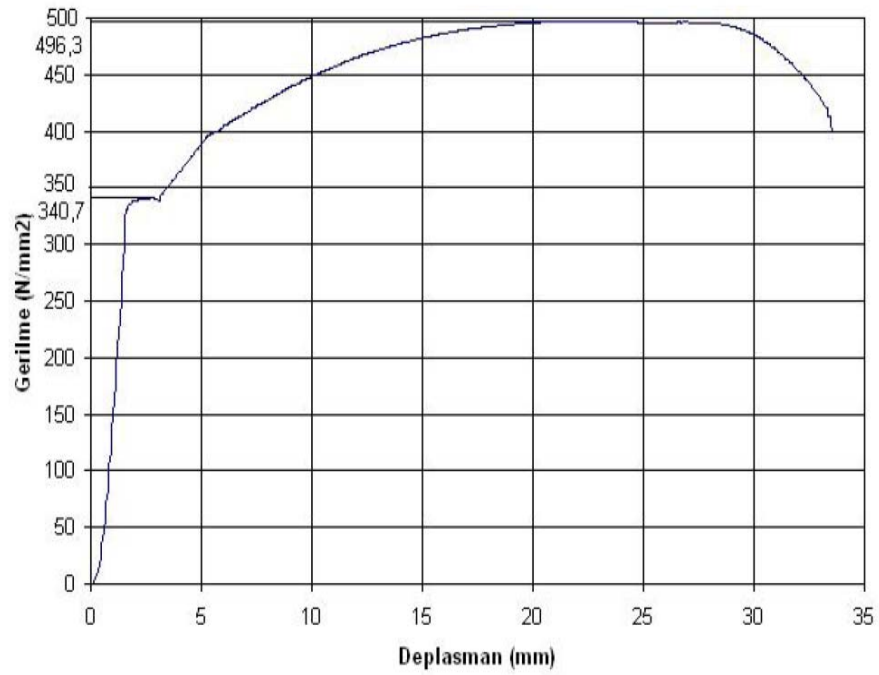
Şekil Ek-A.4 Çekme deneyi sonucu (Ø 20)



Şekil Ek-A.5 Çekme deneyi sonucu (Ø 10)



Şekil Ek-A.6 Çekme deneyi sonucu (Ø 10)



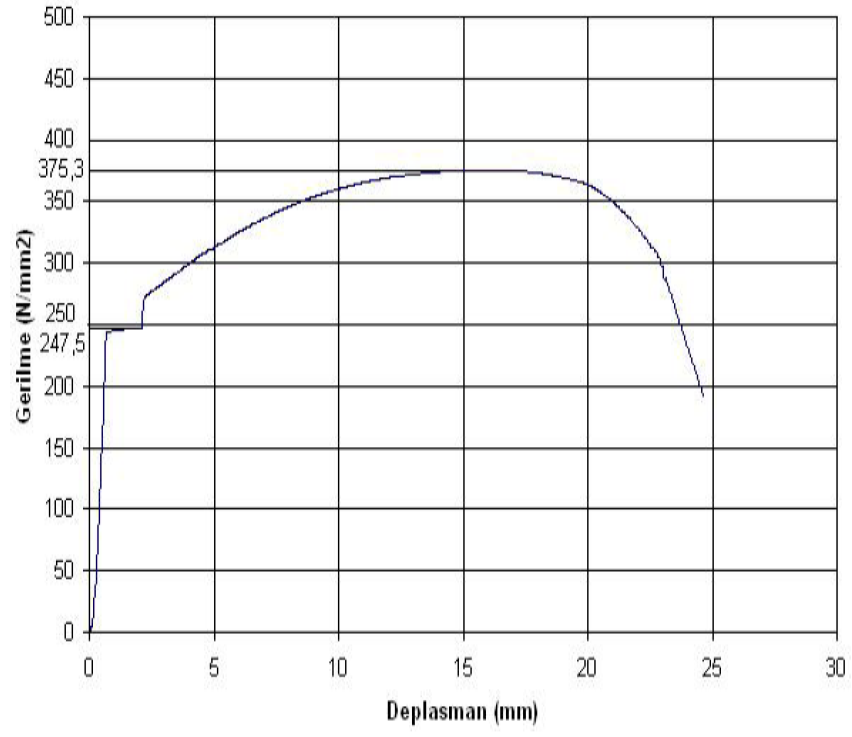
Şekil Ek-A.7 Çekme deneyi sonucu (Ø 10)



Şekil Ek-A.8 Çekme deneyi sonucu (Ø 6)



Şekil Ek-A.9 Çekme deneyi sonucu (Ø 6)



Şekil Ek-A.10 Çekme deneyi sonucu (Ø 6)