

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

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

H.Murat TANARSLAN

Eylül, 2007

İZMİR

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

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı

Anabilim Dalı

H.Murat TANARSLAN

Eylül, 2007

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

H.MURAT TANARSLAN, tarafından **YILDIRIM ERTUTAR**, Prof. Dr. yönetiminde hazırlanan “**CFRP ŞERİTLERLE KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN TERSİNİR-TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Yıldırım ERTUTAR

Yönetici

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof.Dr.Yıldırım ERTUTAR'a doktora çalışmamın her aşamasında verdiği desteğinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde ve çalışmamın her aşamasında emeği ve değerli katkılarıyla yanımda yer alan, beni kendisiyle tez çalışması yapmaya layık gören, her zaman öğrencisi olmaktan onur duyduğum, kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Sinan ALTIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında büyük emeği olan, Gökhan ŞAKAR'a, birlikte çalıştığımız Mesut Keleş'e, deneylerde yardımını esirgemeyen M.Emin KARA ve Yard.Doç.Dr.Özgür ANIL'a. Laboratuvar'da her türlü yardımını esirgemeyen laboratuvar sorumlusu Sayın Faruk OGÜN'e yürekten teşekkür ederim.

Desteğini her zaman hissettiğim sevgili eşime çalışmalarım süresince göstermiş olduğu sabırdan dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Beni gerek maddi gerekse manevi anlamda hep destekleyen, bu çalışmayı sonlandırmamda büyük bir etkisi olan hayatta olmasa bile hala yanımda olduğunu bildiğim canım anneme, hiç teşekkürün yetmeyeceğini bildiğim halde minnetlerimi sunuyorum.

H.Murat TANARSLAN

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

ÖZ

Son yıllarda betonarme yapı elemanların karbon fiber donatılı polimerlerle (CFRP) güçlendirilmesi yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Moment taşıma kapasitesi yeterli olan elemanların kesme dayanımlarındaki yetersizlik, elemanı gevrek kesme kırılmasına yönlendirmektedir. Bu durum yapının enerji tüketim kapasitesini ve sünekliliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmada, CFRP şeritlerin kesme donatısı olarak etkinliğini tespit etmek için on bir adet kesme donatısız betonarme kiriş tersinen tekrarlanan yükler altında test edilmiştir. Deney programında bir adet deney elemanı referans elemanı diğer 10 adet deney elemanı da düz şerit, U biçimli, L biçimli ve $\sqcap$ biçimli CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarıdır. CFRP şeritlerin yerleşim düzeni, CFRP şeritlerin uygulama şekli ve ankraj uygulaması çalışmanın değişkenleridir. Test sonuçları, bütün CFRP şerit düzenlemelerinin betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve enerji tüketimini önemli oranda artırdığını göstermiştir. En başarılı sonuç CFRP şeritlerin $\sqcap$ biçiminde uygulandığı deney elemanlarında elde edilmiştir. Deney elemanları sünek eğilme davranışı göstermiştir. Deney sonuçları, ACI-440 komite raporu, Chen ve Teng tarafından önerilen bağıntılar ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (DBYBHY, 2007) bağıntılarıyla hesaplanmış, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca deney elemanlarının ANSYS sonlu elemanlar programından elde edilen doğrusal olmayan analiz sonuçları, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar sözcükler : Betonarme kiriş, Güçlendirme, CFRP, Tersinen tekrarlanan yükleme, ANSYS.

THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, STRENGTHENED WITH CFRP STRIPS AGAINST SHEAR, UNDER CYCLIC LOAD

ABSTRACT

The method of strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has been a widely used technique in recent years. Although structures have sufficient moment carrying capacity, insufficient shear load carrying capacity diverts the structure to brittle shear failure. Thus decreases the ductility and energy consumption capacity of the structure significantly. To designate the efficiency of CFRP as shear reinforcement, eleven identical reinforced concrete (RC) beams, which were fabricated without stirrup, were tested under cyclic load in the experimental program. Ten shear deficient RC beams were strengthened with side bonded, U-jacketed, L jacketed and $\sqcap$ -jacketed CFRP strips and remaining one was tested with its virgin condition to serve as a reference. The type and arrangement of CFRP strips and the anchorage used to fasten the strips to the concrete are the variables of this experimental work. Test results confirmed that all CFRP arrangement differs from CFRP strip width and arrangement, improved the strength and energy consumption capacity significantly. The most successful results were obtained from the specimens in which $\sqcap$ -jacketed CFRP strips were used for strengthening. Specimens showed ductile flexural behavior. Experimental results were compared with the analytical approaches that were suggested by ACI-440 Committee report, Chen&Teng and Specification for Structures to be Built in Disaster Areas (SSBDA, 2007). Test results were also compared with the analytical results that were obtained from non-linear analysis of ANSYS program.

Key words: Reinforced concrete beam, Strengthening, Shear, CFRP, Cyclic Load, ANSYS

İÇİNDEKİLER

Sayfa

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

BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
--------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ – DENEY ELEMANLARI ve DENEY TEKNİĞİ	20
--	-----------

2.1 Genel	20
2.2 Deney Elemanları	21
2.3 Malzemeler	33
2.3.1 Donatı	33
2.3.2 Beton	34
2.3.3 . CFRP’nin özellikleri	36
2.3.4 . SİKADUR 330 ve SİKADUR 31 (Epoksi) Özellikleri	37
2.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi	38
2.5 CFRP şerit uygulaması	41
2.5.1 Mekanik ankrajlar	43
2.6 Deney Düzeni	46
2.3.1 Yükleme Düzeni.....	46
2.3.1 Ölçüm düzeni	49
2.7 Ölçümlerin Değerlendirilmesi	51
2.7.1 Kiriş deplasman ölçümü	51
2.7.1 Birim Deformasyonların hesaplanması	52

BÖLÜM ÜÇ – DENEYLER..... 53

3.1 Genel	53
3.2 Deney Elemanı-1	53
3.3 Deney Elemanı-2	59
3.2 Deney Elemanı-3	67
3.3 Deney Elemanı-4	75
3.2 Deney Elemanı-5	84
3.3 Deney Elemanı-6	92
3.2 Deney Elemanı-7	100
3.3 Deney Elemanı-8	109
3.2 Deney Elemanı-9	119
3.3 Deney Elemanı-10	128
3.2 Deney Elemanı-11	140

BÖLÜM DÖRT – DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 149

4.1 Dayanım ve Davranış	149
4.2 Enerji Tüketimi.....	167
4.3 Rijitlik.....	178
4.4 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkileri	183
4.4.1 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkisi Sonuçları	195
4.5 Deneysel Değişkenlerin Birim Deformasyon Davranışına Etkisi	196

BÖLÜM BEŞ – ANALİTİK ÇALIŞMA 206

5.1 Genel	206
5.2 Deney Elemanlarının Analitik Kesme Dayanımları	206
5.3 Deney elemanlarının ANSYS-Sonlu Elemanlar Programıyla Doğrusal Olmayan Bilgisayar Modellerinin Oluşturulması	215

5.4 Deney Sonuçlarının ANSYS-Sonlu Elemanlar Programı Sonuçlarıyla Karşılaştırılması.....	223
BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR ve ÖNERİLER	236
6.1 Sonuçlar.....	237
6.2 Öneriler.....	243
KAYNAKLAR	244
EKLER.....	250

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Genel

Dünyada yıkıcı deprem aktivitelerinin en çok görüldüğü bölgelerden biri olan Türkiye’de, son otuz yılda yeterli deprem güvenliği olmayan çok sayıda betonarme bina hasar görmüş veya yıkılmıştır. 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1998 Ceyhan, 1999 Marmara ve Düzce depremlerinin neden olduğu maddi kaybın yanı sıra can kayıpları, mevcut yapıların deprem güvenliğinin artırılmasını önemli bir mühendislik problemi haline getirmiştir. Türkiye’deki mevcut betonarme yapıların önemli bir bölümü, bu depremlerde hasar gören ya da göçen yapılardaki kusurlara sahiptir. Bu nedenle yeni deprem aktiviteleri gerçekleşmeden çeşitli yetersizliklere sahip bu yapıların deprem güvenliklerinin artırılması gerekmektedir.

Deprem kuvvetleri altında gerekli dayanım, rijitlik ve süneklik koşullarını sağlayamayan betonarme yapılar çeşitli yöntemlerle güçlendirilmektedir. Güçlendirme yöntemlerinin genel amacı eleman ya da sistemin dayanımını, sünekliğini ve rijitliğini istenilen düzeye getirmektir. Yapıda yatay deplasman koşulları yetersiz güçlendirilecek eleman sayısı fazla ve rijitlik sorunu varsa yapı, sistem düzeyinde güçlendirilmelidir. Eğer yapı deplasman ve rijitlik açısından yeterli ancak eleman bazında problemli ise yapının yetersiz elemanlarının güçlendirilmesi, amaçlanan güvenliğin sağlanması için uygun ve yeterli olacaktır. Betonarme yapının sistem düzeyinde ya da eleman bazında güçlendirilmesine karar vermek, tasarımcının bilgi birikimine ve becerisine bağlıdır.

Betonarme yapı elemanları yetersiz donatı, donatı korozyonu, eksik ve yanlış tasarım/imalat, kullanım değişikliği ve yapısal hasarlardan kaynaklanan nedenlerden dolayı önemli kesme problemleri ile karşı karşıyadır. Moment taşıma kapasiteleri yeterli olan yapı elemanlarının kesme dayanımlarındaki yetersizlik, elemanı gevrek kesme kırılmasına yönlendirmektedir. Kesme kırılmasının baskın olması, yapının enerji tüketim kapasitesini düşürmekte, sünekliğini önemli ölçüde azaltmakta ve yapı güvenliğini tehdit etmektedir. Bu gibi durumlarda kesme dayanımı yetersiz yapı elemanlarının güçlendirilmesi, yapı güvenliğinin sağlanması için gereklidir.

Son 30 yılda inşa edilen betonarme binaların büyük bir çoğunluğu 1975 Deprem Yönetmeliği'ne göre projelendirilmiştir. Projelendirilme aşamasında yeterli kesme güvenliği sağlanmış olsa bile yetersiz denetim koşulları, uygulama hataları ve malzeme yetersizlikleri betonarme kirişlerde önemli kesme problemlerine neden olmaktadır. Donatıyla kelepçeleme, betonarme katmanlar ile mantolama, karbon fiber donatılı polimer (CFRP) uygulaması ve çelik levhaların eleman dışından yapıştırılması kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi amacıyla ülkemizde tercih edilen başlıca teknikleridir. Bu teknikler arasında dıştan CFRP yapıştırılarak güçlendirme, tekniğin uygulama kolaylığı, uygulandığı elemanın geometrik boyutlarını değiştirmemesi, malzemenin korozyona karşı dayanıklılığı, düşük ağırlığı, kimyasal etkilere dayanıklılığı ve düşük bakım maliyeti nedeni ile son yıllarda tercih edilmektedir. Türkiye'de 2007 yılında yürürlüğe giren deprem yönetmeliği, CFRP malzemesini kullanılarak betonarme yapıların güçlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle CFRP malzemesinin güçlendirmede, malzemenin sahip olduğu özellikleri de göz önünde bulundurarak, doğru kullanılması önemlidir.

Deneyisel çalışmanın amacı, CFRP şeritlerin betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısının deneyel araştırılmasıdır. CFRP'nin kesme donatısı olarak etkinliğini belirlemek için deney elemanlarında kesme donatısı kullanılmamış, kesme çatlağı gelişimlerinin sadece CFRP şeritler tarafından karşılanması hedeflenmiştir. Çalışmada çeşitli genişlikteki CFRP şeritlerin ve bu şeritlerin eleman üzerindeki yerleşim düzenlerinin betonarme kirişlerin dayanım ve davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca CFRP şeritlerin betonarme kiriş elemanlara ankraj kullanılarak sabitlenmesinin elemanların dayanım ve davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

Deneyisel çalışma kapsamında 3/5 geometrik ölçekli 11 adet T-kesitli betonarme konsol kiriş üretilmiş, deprem kuvvetlerini benzeştiren tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Tersinir tekrarlanır yüklenen deney elemanlarında CFRP şeritlerin davranışı, deprem kuvvetleri altındaki CFRP şeritlerin davranışı ile özdeş olacağından, deney elemanları bu tip bir yükleme altında test edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları dayanım, davranış, rijitlik ve enerji tüketimi bakımından

yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır. CFRP şeritler üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerler, CFRP şeritlerin deney elemanlarının kesme dayanımına katkısını değerlendirebilmek için önemli veriler sunmaktadır. Bu nedenle deney elemanlarının birim deformasyon davranışları da çalışma kapsamında incelenmiştir. CFRP şeritlerin deney elemanlarının kesme dayanımına katkısı (ACI-440, 1996) komite raporu, (Chen ve Teng, 2003) in önerdiği bağıntılar ve (DBYBHY, 2007), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te verilen bağıntılarla hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca ANSYS Sonlu Elemanlar Programının onuncu sürümü kullanılarak deney elemanlarının doğrusal olmayan analizleri yapılmış, analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Literatürde kolon, kiriş, döşeme gibi betonarme yapı elemanlarının çeşitli yetersizliklerine karşı CFRP kullanılarak güçlendirilmesini konu alan çok sayıda araştırma bulunmaktadır.

Betonarme kirişlerin CFRP kullanılarak dayanımlarının artırılması ile ilgili çalışmalar, a) eğilme dayanımlarının artırılmasına, b) kesme dayanımlarının artırılmasına yönelik çalışmalar olmak üzere iki grupta toplanabilir. Betonarme kirişlerin CFRP kullanılarak kesme dayanımlarının artırılması ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Bu bölümde CFRP kullanılarak betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırılması için geçmişte yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Yetersiz kesme donatılı betonarme kirişler ile ilgili öncü çalışmalarda, CFRP uygulanarak kesme dayanımı artırılmış betonarme kirişlerin davranışı araştırılmış, CFRP uygulamasının betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının artırılmasındaki etkinliği incelenmiştir (Chajes ve diğer., 1995; Norris ve diğer., 1997; Triantafillou, 1998; Khalifa ve diğer., 1999). Daha sonra betonarme kirişlerin davranışlarını etkileyen değişkenler incelenmiştir. Araştırmalarda, beton basınç dayanımı, donatı akma dayanımı, çekme ve kesme donatısı oranı, kiriş kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı (a/d), CFRP'de ankraj uygulaması, CFRP malzemesinin oranı ve uygulama düzeni, CFRP sargı sayısı betonarme kirişlerin davranışlarını etkileyen değişkenler olduğu sonucuna varılmıştır (Kachlakev ve McCurry, 2000; Khalifa ve

Nanni, 2000; Li ve diğer., 2003; Taljsten ve Elfgren, 2000). CFRP kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerde, CFRP'nin uç bölgelerinden beton yüzeyinden ayrılması veya CFRP'nin kopması göçmeye neden olan iki ana davranıştır (Bousselham ve Chaallal, 2006; Chen ve Teng, 2003; Riyadh ve Riadh, 2006). Çalışmalarda bu göçme şekillerinin nedenleri ve engellemek için alınacak tedbirler de araştırılmıştır.

Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde CFRP'nin levha şeklinde betonarme kirişlerin yan yüzlerine yapıştırılması yaygın bir yöntemdir (Sato ve diğer., 1996; Sato ve diğer., 1997; Sato ve diğer., 1997; Taljsten, 2003; Adhikary ve Mutsuyoshi, 2004; Zhichao ve Cheng, 2005). Bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, betonarme kirişlerin kesme dayanımının artırılması için optimum bir CFRP oranının bulunduğu ve bu oranın üzerinde CFRP uygulanmasının betonarme kirişin kesme dayanımına katkı sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Ekonomi de göz önünde bulundurularak CFRP'nin levha şeklinde uygulanmasına alternatif uygulama biçim ve teknikleri araştırılmıştır. CFRP'nin şeritler halinde kullanılması, ekonomik olması ve uygulanmasındaki kolaylığı literatürde tercih nedeni olmuştur. Bu konuda literatürde yer alan ilk araştırmalarda CFRP şerit uygulamasının, kesme dayanımı yetersiz kirişlerin kesme dayanımlarının artırılmasındaki etkinliği araştırılmıştır (Diagana ve diğer., 2003; Keleş, 2005; Anil, 2006; Bencardino ve diğer., 2007; Jayaprakash ve diğer., 2007).

Daha sonra gerçekleştirilen çalışmalarda, CFRP şerit uygulamasının betonarme kirişlerin davranış ve göçme şekilleri üzerinde, dayanım ve rijitlik performansının artırılmasındaki etkileri incelenmiştir.

Deneyisel çalışmalarda, model kirişlerin tümü tekdüze yükler altında test edilmiş, depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yüklemeler altında CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerin performansları incelenmemiştir. Bu teknikle dayanımı artırılan ve tekdüze yükler altında test edilen betonarme kirişler, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasıyla genellikle çekme donatısı akma dayanımına ulaşmadan ya da ulaşmasından hemen sonra sünek davranış göstermeden

göçmektedir. İstenmeyen bu göçme şeklinin önlenmesi veya geciktirilmesi amacıyla CFRP şeritlerin uç bölgelerinde çeşitli ankraj düzenlemelerinin geliştirilmesine çalışılmıştır. Ancak bu konudaki çalışmalar çok sınırlı olup (Adhikary ve Mutsuyoshi, 2004; Khalifa ve diğer. 2002) geliştirilen ankrajların tersinir tekrarlanır yükleme altındaki davranışı konusunda da literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının artırılmasına yönelik geçmişteki çalışmalar kronolojik sıra içerisinde aşağıda verilmiştir.

Chajes ve diğer. (1995) Araştırmada 1200 mm uzunluğunda, a/d oranı 7 olan 12 adet T-kesitli betonarme kiriş, simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarında kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Deney elemanlarından 4 adedi referans elemanı olarak seçilmiştir. 8 deney elemanının kesme dayanımı, aramid lif donatılı polimer (AFRP), cam lif donatılı polimer (GFRP) ve grafit lif donatılı polimer (graphite) kullanılarak artırılmıştır. İki deney elemanının kesme dayanımı kiriş yan yüzüne yapıştırılan iki kat AFRP levha ile artırılmıştır. AFRP levhaların ilk katı kiriş eksenine paralel, ikinci katı kiriş eksenine diktir. Deney programında yer alan diğer deney elemanları AFRP ile güçlendirilen deney elemanlarıyla benzer şekilde güçlendirilmiş, bu elemanlarda AFRP yerine GFRP ve graphite kullanılmıştır. Deney programında yer alan son iki deney elemanının kesme dayanımı, kiriş eksenine ile 45 derece ve 135 derece açı yapan iki kat graphite levha ile artırılmıştır. Tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. GFRP, AFRP ve graphite ile güçlendirilen deney elemanlarının kesme dayanımında %60-%150 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır.

Norris, Saadatmanesh ve Ehsani (1997) Çalışmada 2440 mm uzunluğunda, 127x203 mm boyutlarında, 19 adet dikdörtgen kesitli betonarme eleman test edilmiştir. A/d oranı 3 olan, 13 deney elemanının eğilme dayanımı yetersizdir. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında tekdüze yükleme ile test edilmiştir. Kesme açıklığı boyunca 206 mm aralıkla Ø6'lık etriye bulunan 6 deney elemanının

kesme dayanımı yetersizdir. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında tekdüze 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, a) iki kat tek yönlü U biçimli levha, b) iki kat çift yönlü levha, c) kiriş yatay eksenini ile 45 derece açı yapan iki kat çapraz dokumalı levha ve U biçimli levha ile artırılmıştır. Deney elemanlarının kesme dayanımları ise, a) kirişin tek yönlü, tek katlı CFRP ile bohçalanmasıyla, b) 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 çatlağı nedeni ile kesmeden, iki kat çift yönlü U biçimli levha ile güçlendirilen betonarme kiriş ise eğilme kapasitesine ulaşarak göçmüştür. Kesme dayanımı artırılan kirişlerde göçme, kirişlerin boyuna donatı aktıktan sonra CFRP levhaların yapışma yüzeyinden ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. Eğilme dayanımı artırılan deney elemanlarında göçme, CFRP levhalarının yapışma yüzeylerinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarına göre CFRP uygulamalarında en fazla katkı, CFRP levhaların kesme çatlakları ile paralel uygulandığı açılı uygulamalarda elde edilmiştir.

Triantafillou (1998) Araştırmada 1000 mm uzunluğunda, a/d oranı 5 olan 11 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş, simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. 2 adet deney elemanı referans elemanı olarak seçilmiştir. 9 deney elemanının kesme dayanımı farklı düzende uygulanan CFRP levha ve şeritlerle artırılmıştır. Deney elemanlarının tümü CFRP levha ve şeritlerin yapışma yüzeylerinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlakları nedeni ile göçmüştür. Deney elemanlarının kesme dayanımında referans kirişlerine göre %45-%95 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır.

Kachlakev ve McCurry (2000) Araştırmada 4 adet, 6096 mm uzunluğunda, 305x762 boyutlarında köprü kirişi test edilmiştir. A/d oranı 5 olan betonarme kirişlerin kesme dayanımlarını artırmak için GFRP, eğilme dayanımı artırmak için CFRP kullanılmıştır. Tekdüze yüklenen deney elemanları simetrik iki tekil yük

altında test edilmiştir. Deney elemanlarından biri referans elemanı olarak seçilmiştir. Deney elemanlarının; a) CFRP levha kullanılarak sadece eğilme dayanımı, b) kiriş yan yüzlerine GFRP levha yapıştırılarak sadece kesme dayanımı, c) CFRP ve GFRP kullanılarak kesme ve eğilme dayanımı artırılmıştır. Güçlendirilen deney elemanlarının kesme dayanımında referans elemanına göre %150 oranında artış sağlanmıştır. Sadece eğilme ve sadece kesme dayanımı artırılan deney elemanları kesmeden göçmüştür. CFRP ve GFRP kullanılarak kesme ve eğilme dayanımı artırılan deney elemanı ise eğilmeden göçmüştür.

Khalifa ve Nanni (2000) Çalışmada 6 adet gerçek ölçekli betonarme T-kesitli kirişin kesme dayanımı CFRP kullanılarak artırılmıştır. Betonarme kirişlerin a/d oranı 3'tür. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının CFRP levha ile artırılması, davranış ve göçme şekillerinin incelenmesidir. Araştırmada ankraj uygulamasının betonarme kirişlerin davranış ve göçme şekillerine etkileri de incelenmiştir. Deney elemanlarının kesme dayanımları, a) U biçimli levha ile, b) kiriş yan yüzlerine yapıştırılan levha ile, c) eksenleri arasında 125 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde U biçimli şeritler ile, d) eksenleri arasında 125 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde düz şeritler ile, e) U biçimli levha ve levhanın uç bölgelerine uygulanan ankraj ile artırılmıştır. Referans elemanı kesmeden göçmüştür. U biçimli levha ve levhanın uç bölgelerine ankraj uygulanan deney elemanı eğilmeden, diğer deney elemanları ise CFRP levhanın yapışma yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlakları nedeni ile kesmeden göçmüştür. Deney elemanlarında farklı düzende uygulanan CFRP, deney elemanlarının kesme dayanımında %35-%145 aralığında değişen oranlarda artış sağlamıştır. Deney sonuçları American Concrete Institute (ACI-440 komite raporu)'dan elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Taljestena ve Elfgren (2000) Araştırmada 4500 mm uzunluğunda, 180x500 mm boyutlarında 8 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada elle

yatırma, püskürtme ve vakumla enjeksiyon CFRP uygulama tekniklerinin güçlendirme tekniği olarak farklılıkları incelenmiştir. Deney programında 3 adet deney elemanı referans elemanı olarak belirlenmiştir. Referans elemanları dışındaki deney elemanlarının kesme dayanımları, a) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan iki kat CFRP levhanın elle yatırma yöntemi ile yapıştırılmasıyla, b) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan iki kat CFRP levhanın püskürtme yöntemi ile yapıştırılmasıyla, c) kiriş yatay eksenine ile ± 45 derece açı yapan dört kat CFRP levhanın vakumla enjeksiyon yöntemi ile yapıştırılmasıyla, d) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan tek katlı CFRP levhanın elle yatırma yöntemi ile yapıştırılmasıyla, e) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan iki kat CFRP levhanın elle yatırma yöntemi ile yapıştırılmasıyla, f) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan tek katlı 80 mm genişliğinde CFRP şeritlerin elle yatırma yöntemi ile yapıştırılmasıyla, g) kiriş yatay eksenine ile 45 derece açı yapan tek katlı CFRP levhanın elle yatırma yöntemi ile yapıştırılmasıyla artırılmıştır. Son iki deney elemanı dışındaki tüm deney elemanları eğilme kapasitelerine ulaşmıştır. Son iki deney elemanı ise CFRP'nin yapışma yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. CFRP levha kullanılarak kesme dayanımı artırılan deney elemanlarında, referans elemanına göre %300 oranında dayanım artışı sağlanmıştır.

Li, Assih ve Delmas (2001) Çalışmada 1350 mm uzunluğunda, 200x130 mm boyutlarında, 5 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilmiştir. Betonarme kirişlerin a/d oranı 3'tür. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada farklı düzende CFRP levha uygulanmasının kesme dayanımına katkısı incelenmiştir. Deney elemanlarında kesme açıklığı boyunca 150 mm aralıkla Ø6'lık etriye bulunmaktadır. Bir deney elemanının sadece eğilme dayanımı, 5 deney elemanının ise önce eğilme dayanımı daha sonrada farklı düzende uygulanan CFRP levhalarla kesme dayanımı artırılmıştır. Deney elemanlarının kesme dayanımları, a) kiriş gövdesinin $30/200=h$ oranında CFRP levha ile kaplanmasıyla, b) kesme açıklığının $100/200=h$ oranında CFRP levha ile kaplanmasıyla, c) kiriş gövdesinin $100/200=h$ oranında CFRP levha ile kaplanmasıyla, d) kiriş gövdesinin $200/200=h$ oranında CFRP levha ile

kaplanmasıyla artırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, kiriş gövdesinde CFRP yapıştırılan bölge büyüdükçe elemanın rijitliği artmaktadır. Ancak deney elemanlarının dayanım ve rijitliğindeki artış, kiriş gövdesine yapıştırılan CFRP levhanın artış oranı ile doğru orantılı değildir.

Li, Diagana ve Delmas (2001) Araştırmada, 2700 mm uzunluğunda 130x280 mm boyutlarında, 14 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarında kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Çalışmada farklı düzende uygulanan CFRP'nin kesme dayanımına katkısı incelenmiştir. Deneyler, deney elemanlarının a/d oranına bağlı olarak 5 gruba ayrılmıştır. Deney elemanlarının a/d oranı çalışmanın değişkenidir. Her grupta bir referans elemanı bulunmaktadır. Gruplarda kesme açıklıkları sırasıyla 800mm, 400mm, 200mm, 100mm ve 800 mm'dir. Birinci grupta, deney elemanlarının yan yüzlerine d/2, 3d/4 ve d oranında CFRP levha yapıştırılmıştır. İkinci grupta deney elemanının 0.8x0.15 m² kısmına CFRP levha yapıştırılmıştır. 4 adet deney elemanından oluşan üçüncü grupta deney elemanlarının sırasıyla 0.8x0.150, 0.8x0.225, 0.8x0.280 m²'lik kısmına CFRP levha yapıştırılmıştır. Dördüncü grupta deney elemanının 0.8x0.150 m²'lik kısmına CFRP levha yapıştırılmıştır. Beşinci ve son grupta ise deney elemanının 0.8x0.225 m²'lik kısmına CFRP levha yapıştırılmıştır. Faydalı yüksekliğin tamamının CFRP ile kaplandığı deney elemanı dışında tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. Faydalı yüksekliğin tamamının CFRP ile kaplandığı deney elemanı ise eğilmeden göçmüştür. Deney sonuçlarına göre, betonarme kirişlerde CFRP yapıştırılan bölge büyüdükçe elemanlarının kesme dayanımları da artmaktadır.

Chaallal, Shahaw ve Hassan (2002) Araştırmada, 14 adet gerçek ölçekli betonarme T-kirişin kesme dayanımı çift yönlü CFRP kullanılarak artırılmıştır. Deneyler, deney elemanına kesme açıklığının 1/2'sinden uygulanan tekil yük altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, gerçek ölçekli betonarme kirişlerde a/d oranının dayanıma ve davranışa etkisini araştırmaktır. Çalışmada ayrıca betonarme kirişlerin sünekliğinin artırılması için gerekli CFRP miktarı ve katman

sayısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Araştırmada 140, 200, 400, 600 mm etriye aralığına sahip 4 farklı grup bulunmaktadır. Her grupta bir adet referans eleman ve bir, iki ve üç katman CFRP levha kullanılarak kesme dayanımı artırılmış betonarme kirişler bulunmaktadır. Deney sonuçlarına göre; deney elemanlarına uygulanan CFRP'lerin katman sayısı artıkça betonarme kirişlerin kesme dayanımları da artmaktadır. Betonarme kirişte CFRP miktarı ve kesme donatısı oranının artırılması deformasyonu sınırlandırmıştır. Çalışma sonunda güçlendirmede kullanılan CFRP ile kesme donatısı arasındaki oran grafik olarak ifade edilmiş, bu ilişkiyi tanımlayan analitik bağıntı sunulmuştur.

Khalifa ve Nanni (2002) Deney programında 3050 mm uzunluğunda, 150x305 mm boyutlarında 12 adet gerçek ölçekli betonarme kiriş simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin CFRP levha kullanarak kesme dayanımlarının artırılması amaçlanmıştır. Ayrıca kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), etriye oranı ve farklı düzende CFRP levha uygulamasının kesme dayanımının artırılmasında etkisi incelenmiştir. Aynı geometriye sahip deney elemanları iki grupta test edilmiştir. Birinci grupta 4 adet deney elemanı bulunmaktadır. Bu grupta, deney elemanlarının kesme açıklığı boyunca 100 mm aralıkla etriye bulunmaktadır. İkinci grupta 8 adet deney elemanı bulunmaktadır. Deney elemanlarının kesme açıklığının yarısında 100 mm aralıkla etriye diğer yarısında ise etriye bulunmamaktadır. Her iki grup kendi içerisinde a/d oranı 3 ve a/d oranı 4 olan iki ayrı gruba ayrılmıştır. Deney programında her bir grubun özelliğini taşıyan 1 adet deney elemanı, referans elemanı olarak belirlenmiştir. Diğer deney elemanlarının kesme dayanımları ise farklı düzende uygulanan CFRP levhalar ile artırılmıştır. Birinci grupta deney elemanlarının kesme dayanımları sırasıyla; a) U biçimli levha ve kiriş eksenine paralel yapıştırılan CFRP levha ile, b) kiriş yan yüzlerine iki kat, kiriş eksenine dik CFRP levha yapıştırılarak artırılmıştır. İkinci grupta yer alan ve a/d oranı 3 olan 4 adet deney elemanının kesme dayanımı sırasıyla; a) eksenleri arasında 125 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde U biçimli şeritlerle, b) eksenleri arasında 125 mm aralık bulunan 75 mm genişliğinde U biçimli şeritlerle, c) tek katlı U biçimli levha ile ve d) U biçimli levha ve kiriş eksenine

paralel yapıştırılan CFRP levha ile artırılmıştır. İkinci grupta yer alan ve a/d oranı 4 olan 2 adet deney elemanın kesme dayanımı ise, a) tek katlı U biçimli levha ve kiriş eksenine paralel yapıştırılan CFRP levha ile artırılmıştır. Deney sonuçlarına göre farklı düzende CFRP uygulanan betonarme kirişlerin kesme dayanımlarında %40-%138 arasında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, a/d oranının betonarme kirişlerin dayanımın ve davranışını etkileyen bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Diagana, Li, Gedalia ve Delmas (2003) Araştırmada 2200 mm uzunluğunda, 130x450 mm boyutlarında 10 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilmiştir. Deneyler, deney elemanına kesme açıklığının 1/2'sinden uygulanan tekil yük altında gerçekleştirilmiştir. CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan betonarme kirişler iki gruba ayrılmıştır. Her iki grupta da 40 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılmıştır. Birinci grupta yer alan 4 adet deney elemanının kesme dayanımı U biçimli şerit ile artırılmıştır. Birinci grupta iki adet deney elemanına yapıştırılan CFRP şeritler arasında 200 ve 250 mm aralık bırakılmıştır. İki deney elemanının kesme dayanımı, kiriş eksenine 45 derece açı yapan, eksenleri arasında 300 ve 350 mm aralık bulunan CFRP şeritlerle artırılmıştır. İkinci grupta deney elemanlarına CFRP şeritler, birinci grup ile aynı şekilde uygulanmıştır. İkinci grupta deney elemanları boğçalanmıştır. Tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. U biçimli şerit uygulanan deney elemanları, CFRP şeritlerin yapışma yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. İkinci grupta göçme, CFRP şeridin kopmasından sonra gövdede gelişen kesme çatlağı nedeni ile gerçekleşmiştir. Deney elemanlarının kesme dayanımları şerit genişliğine, şerit aralığına ve uygulama düzenine bağlı olarak farklılık göstermiştir.

Chen ve Teng (2003) Çalışmada, CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılmasıyla göçen betonarme kirişlerin kesme dayanımlarını kolay, doğru ve akılcı şekilde hesaplayacak analitik bir yöntem önerilmiştir. Bunun için önce mevcut yöntemlerin eksiklikleri belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen eksiklikleri giderecek bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin geçerliliğini belirlemek için literatürdeki deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Literatürde CFRP'nin beton yüzeyinden

ayrılmasıyla göçen 46 deney verisi toplanmıştır. Bunlardan 13 tanesi U biçimli şeritlerin kullanıldığı, 33 tanesi ise CFRP şeritlerin kiriş yan yüzlerine yapıştırıldığı deney elemanlarıdır. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılan yöntemden, deney sonuçlarıyla yakın değerler elde edilmiş ve tasarım aşamasında kullanılabilecek bir yöntem önerilmiştir.

Adhikary ve Mutsuyoshi (2004) Araştırmada 2600 mm uzunluğunda, 150x200 mm boyutlarında 8 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilmiştir. Betonarme kirişlerin a/d oranı 3'tür. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarında kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Deney elemanlarının kesme dayanımları; a) 100 mm genişliğinde kiriş eksenine paralel, b) 150 mm genişliğinde kiriş eksenine paralel iki kat, c) 150 mm genişliğinde kiriş eksenine dik, d) 150 mm genişliğinde birinci katı kiriş eksenine paralel ikinci katı kiriş eksenine dik, e) 200 mm genişliğinde birinci katı kiriş eksenine paralel ikinci katı kiriş eksenine dik, f) 150 mm genişliğinde kiriş eksenine dik U biçimli levha, g) 200 mm genişliğinde kiriş eksenine dik levha kullanılarak artırılmıştır. 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 fazladır. U biçimli levha uygulanan deney elemanının kesme dayanımı, CFRP levhaların sadece kirişin yan yüzlerine yapıştırıldığı deney elemanından %17 fazladır. Kesme açıklığı boyunca U biçimli levha yapıştırılan deney elemanının kesme dayanımında referans elemanına göre %119 oranında artış sağlanmıştır.

Adhikary, Mutsuyoski ve Ashraf (2004) Araştırmada 3500 mm uzunluğunda, 300x300 mm boyutlarında 9 adet kare kesitli betonarme kiriş, kesme açıklığının 1/2 sinden uygulanan tekil yük altında test edilmiştir. Deney elemanlarında kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Deneysel programda güçlendirme malzemesi olarak CFRP ve AFRP kullanılmıştır. Araştırmanın amacı, lif donatılı polimerlerin beton yüzeyinden ayrılmasıyla gerçekleşen göçmenin ankraj uygulanarak geciktirilmesi veya engellenmesidir. Deney elemanlarından biri referans

deney elemanı olarak seçilmiştir. 4 adet deney elemanı CFRP, 4 adet deney elemanı da AFRP kullanılarak güçlendirilmiştir. Lif donatılı polimerlerin cinsi, uygulama düzeni ve ankraj uygulaması çalışmanın değişkenleridir. Deney elemanları iki grupta incelenmiştir. Birinci grupta yer alan deney elemanlarının kesme dayanımları a) U biçimli levha ile, b) U biçimli levhanın kirişin üst yüzüne her iki yönde 80 mm uzatılması ile, c) U biçimli levhanın kirişin üst yüzüne her iki yönde 110 mm uzatılması ile, d) CFRP levha ile bohçalanması ile artırılmıştır. İkinci grupta deney elemanları, birinci grup ile aynı şekilde güçlendirilmiş fakat güçlendirme malzemesi olarak AFRP kullanılmıştır. Deney sırasında bohçalanan deney elemanları dışında tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. Bohçalanan deney elemanı eğilmeden göçmüştür. CFRP ve AFRP ile bohçalanan deney elemanlarının kesme dayanımı referans elemanına göre %118-%123 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır.

Islam, Mansur ve Maalej (2005) Çalışmada 2000 mm uzunluğunda, 120x800 mm boyutlarında 6 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilmiştir. Betonarme kirişlerin a/d oranı 2'dir. Deney elemanları simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Deney programında güçlendirme malzemesi olarak Wabo üreticisinin ürettiği MBrace 130, Sika üreticisinin ürettiği Sika Wrap 160C, NEFCOM üreticisinin ürettiği NEFMAC marka CFRP kullanılmıştır. Deney elemanlarının kesme dayanımları, a) kesme açıklığının iki kat MBrace 130 ile bohçalanmasıyla, b) kiriş yatay eksenini ile 45 derece açı yapan 50 mm genişliğinde Sika Wrap 160C'nin kiriş yan yüzlerine yapıştırılmasıyla artırılmıştır. Diğer 3 deney elemanında 500 mm uzunluğunda ve 300 mm genişliğinde CFRP levhalar kiriş yan yüzlerine, kesme açıklığı boyunca yapıştırılmıştır. Bu uygulamalarda NEFMAC marka CFRP levhaları kullanılmıştır. Deney elemanlarının tümü kesmeden göçmüştür. Farklı düzende CFRP uygulanan deney elemanlarının kesme dayanımında %45-%63 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır.

Zhichao, Cheng ve Thomas (2005) Deney programında 11 adet 152,4 x 228,6 mm boyutlarında betonarme dikdörtgen kesitli kiriş test edilmiştir. Betonarme kirişlerden 5 adedi 1220 mm uzunluğunda, 6 adedi 1830 mm

uzunluğundadır. Deney elemanlarının kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Deney elemanları a/d oranlarına göre iki farklı grupta test edilmiştir. Her grupta bir adet referans elemanı bulunmaktadır. Birinci grupta deney elemanları kesme açıklığının 1/2 sinden uygulanan tekil yük altında test edilmiştir. Bu grupta yer alan deney elemanlarının kesme dayanımları, a) eksenleri arasında 127 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kirişin yan yüzlerine yapıştırılmasıyla, b) kiriş yatay eksenini ile 45 derece açı yapan eksenleri arasında 127 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kiriş yan yüzlerine yapıştırılmasıyla, c) CFRP levhanın kirişin yan yüzlerine yapıştırılmasıyla, d) 40 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kiriş eksenine paralel, faydalı yüksekliğinin tam ortasına gelecek şekilde yapıştırılmasıyla artırılmıştır. İkinci grupta iki adet referans elemanı bulunmaktadır. Referans elemanlarından biri kesme açıklığının 1/2'sinden uygulanan tekil yük altında test edilmiştir. Güçlendirilen deney elemanları ve diğer referans elemanı ise simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Tüm yüklemeler tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. İkinci grupta deney elemanlarına CFRP, birinci grup ile aynı düzende uygulanmıştır. Birinci grupta deney elemanlarının kesme dayanımı referans elemanına göre %80 oranına artmıştır. Bu grupta kesme açıklığının tamamına CFRP levha yapıştırılan deney elemanı, CFRP levhanın kopmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. Diğer deney elemanları, CFRP şeritlerin yapışma yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. İkinci grup deney elemanlarının dayanımında referans elemanına göre %31 oranında artış sağlanmıştır. Deney elemanlarının göçme şekilleri birinci grup deney elemanları ile aynıdır.

Riyadh ve Riadh (2006) Çalışmada 2300 mm uzunluğunda, 140x260 mm boyutlarında 6 adet betonarme dikdörtgen kesitli kiriş test edilmiştir. Deney elemanlarının 4 adedi simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Referans ve 1 adet deney elemanı ise kesme açıklığının 1/3'ünden uygulanan 3 adet tekil yük altında test edilmiştir. Tüm yüklemeler tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada deney elemanlarının kesme ve eğilme dayanımları farklı düzende uygulanan CFRP şerit ve levhalar ile artırılmıştır. Deney elemanlarının dayanımları a) eksenleri arasında 200 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerle bohçalanarak, b) eğilme

bölgesine 3 kat CFRP levha yapıştırılarak, c) eğilme bölgesine 3 kat CFRP yapıştırıldıktan sonra eksenleri arasında 200 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerle bohçalanarak artırılmıştır. Referans elemanı kesmeden göçmüştür. 50 mm genişliğinde CFRP şerit ile bohçalanan deney elemanı eğilmeden göçmüştür. Deney elemanının kesme dayanımında referans elemana göre %14 oranında artış sağlanmıştır. Eğilme bölgesine 3 kat CFRP levha uygulanan deney elemanı kesmeden göçmüştür. Deney elemanının eğilme dayanımı referans elemana göre %62 oranında artmıştır. Kesme ve eğilme dayanımı CFRP şerit ve CFRP levha ile artırılan 3 deney elemanında göçme eğilme bölgesinde CFRP'nin kopmasıyla gerçekleşmiştir. Deney elemanlarının eğilme bölgesine CFRP uygulandıktan sonra CFRP şeritlerle bohçalanması CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılmasını engellemiştir. Deney elemanların dayanımında referans eleman göre %98 oranında artış sağlanmıştır.

Pellegrino ve Modena (2006) Çalışmada 4800 mm uzunluğunda, 150x300 mm boyutlarında 6 adet basit ve 6 adet sürekli kiriş tekdüze yükleme altında test edilmiştir. Deney elemanların a/d oranı 3'tür. Kesme donatısının kesme dayanımına katkısı tüm yönetmeliklerde, V_s parametresi ile tanımlanmıştır. Yönetmeliklerde, deney elemanlarının kesme kuvveti taşıma kapasitelerinin hesaplandığı eşitliklerde, CFRP ile kesme donatısının etkileşiminden elde edilen katkı tanımlanmamıştır. Çalışmada kesme donatısı ve CFRP'nin farklı yükleme düzenlerinde etkileşiminin ve etkileşimden dolayı elde edilen katkının belirlenmesi amaçlanmıştır. 4 adet deney elemanı, referans eleman olarak belirlenmiştir. Kesme açıklığı boyunca 170 mm aralıkla Ø8'lik etriye ve 200 mm aralıkla Ø8'lik etriye bulunan iki adet sürekli betonarme kirişin kesme dayanımını, CFRP ile artırılmıştır. Aynı etriye düzenine sahip iki adet basit betonarme kirişin kesme dayanımının artırılmasında da CFRP kullanılmıştır. Tüm kirişler tekdüze yüklenmiştir. 4800 mm uzunluğundaki kirişlerde ilk mesnet kiriş sol ucundan 400 mm uzaklıkta, ikinci mesnet ise kiriş sol ucundan 2400 mm uzaklıktadır. Sürekli kirişlerde ilk tekil yük kiriş sol ucundan 1650 mm uzaklıkta, ikinci tekil yük ise kiriş sol ucundan 3150 mm uzaklıkta uygulanmıştır. Basit betonarme kirişlerde tekil yük, kiriş sol ucundan 1150 mm uzaklıkta uygulanmıştır. 8 adet deney elemanının kesme dayanımı, farklı katmanda yapıştırılan

U biçimli CFRP levha ile artırılmıştır. Sürekli ve basit kiriş referans elemanları kesmeden göçmüştür. Kesme dayanımı artırılan tüm kirişler, CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlakları nedeni ile göçmüştür. Deney sonuçlarına göre CFRP'nin kesme dayanımına katkısı CFRP'nin uygulama düzenine ve uygulama şekline bağlı değildir. Betonarme kirişte bulunan kesme donatısının oranına bağlıdır. Çalışmada betonun, kesme donatısının ve CFRP'nin taşıdığı kesme kuvvetini belirlemek için yeni bir analitik model geliştirilmiştir.

Bousselhamo ve Chaallal (2006) Çalışmada 22 adet 4520 mm uzunluğunda T kesitli betonarme kiriş kullanılmıştır. Deney elemanlarından 11 adedi derin kiriş, 11 adedi ise narin kiriştir. Derin kirişlerin a/d oranı 1,5 narin kirişlerin a/d oranı ise 3,0'dür. Derin kirişlerde ilk mesnet kiriş sol ucundan 1232 mm uzaklığa, ikinci mesnet kiriş sol ucundan 4342 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Narin kirişlerde ilk mesnet kiriş sol ucundan 178 mm uzaklığa, ikinci mesnet kiriş sol ucundan 3288 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Deney elemanları tekdüze yükler altında test edilmiştir. Derin kirişlerde tekil yük kiriş sol ucundan 4342 mm uzaklıkta, narin kirişlerde ise tekil yük kiriş sol ucundan 1228 mm uzaklıkta uygulanmıştır. Çalışmada, CFRP katman sayısındaki değişimin, kesme donatısı oranının ve kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranının (a/d) kesme dayanımına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Derin ve narin betonarme kirişler etriye düzenine bağlı olarak 3 gruba ayrılmıştır. Gruplar, kesme donatısı bulunmayan, 175 mm aralıkla Ø8'lik etriye bulunan, 87,5 mm aralıkla Ø8'lik etriye bulunan elemanlardan oluşmaktadır. Her grupta 4 adet eleman bulunmaktadır. Deney elemanlarından biri referans deney elemanıdır. Diğer elemanların kesme dayanımı 0,5 katman, tek katman ve 2 katman U biçimli levha ile artırılmıştır. 0,5 katman bazı liflerin CFRP levhadan diğer liflere zarar vermeden çıkartılmasıyla elde edilmiştir. Referans derin kirişler kesmeden göçmüştür. CFRP levhalarla kesme dayanımı artırılan derin ve narin kirişler de kesmeden göçmüştür. Deney sonuçlarına göre derin kirişlerde narin kirişlere göre daha fazla dayanım artışı elde edilmiştir. Betonarme kirişlerdeki kesme çatlaklarının genişliğini ve açısını ancak kesme donatısının oranının etkilediği, CFRP oranının çatlak genişliği ve açı değişiminde etkili olmadığı görülmüştür. Ayrıca CFRP katman sayısındaki artışın kesme dayanımının artırılmasında katkı sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

Anıl (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. Diğer deney elemanında kesme açıklığı boyunca 75 mm aralıkla Ø6'lık etriye bulunmaktadır. Deney programında 2 adet referans eleman bulunmaktadır. 1. referansın kesme dayanımı eğilme dayanımından daha büyük tasarlanmıştır. 2. referansın kesme dayanımı yetersizdir ve hiçbir güçlendirme uygulanmadan test edilmiştir. 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 eksenine ile ± 45 derece açı yapan, eksenleri arasında 143 mm aralık bulunan 50 mm genişliğinde CFRP şeritlerle, d) kiriş yatay eksenine 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 eksenine ile 90 derece açı yapan U biçimli şeritler yapıştırılmıştır. U biçimli şeritler 285 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Dik şeritler çapraz şeritlerin birleşim bölgelerine yapıştırılarak o bölgeyi sargılamıştır. Elemanlarda CFRP şeritlerin alt ve üst uçlarında mekanik ankraj uygulanmıştır. CFRP şeritlerin alt ucunda 50x50x5 mm boyutlarında düz kare çelik levha, kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte 50x50x5 mm boyutlarında tablayla kiriş gövdesinin birleşim köşesinin yuvarlaklığında eşit kollu çelik levha kullanılmıştır. Referans elemanlardan ilki eğilmeden, ikincisi kesmeden göçmüştür. Eksenleri arasında 285 mm aralık bulunan kiriş yatay eksenine ile ± 45 derece açı yapan 50 mm genişliğinde CFRP şeritler ile kesme dayanımı artırılan deney elemanı, CFRP şeritlerin kopmasıyla kesmeden göçmüştür. Eksenleri arasında 285 mm aralık bulunan kiriş yatay eksenine ile ± 45 derece açı yapan 100 mm genişliğinde CFRP şeritler ile kesme dayanımı artırılan deney elemanında boyuna donatı akmıştır. Deney elemanı, boyuna donatının hemen altından kabuk betonun gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Eksenleri arasında 143 mm aralık bulunan kiriş yatay eksenine ile ± 45 derece açı yapan 50 mm genişliğinde CFRP şeritler ile kesme dayanımı artırılan deney elemanı kabuk betonun gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Son deney elemanı ise eğilme

kapasitesine ulaşmıştır. Deney elemanlarının kesme kapasitelerinde 1,79-2,19 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Çalışmada geliştirilen ankraj detayı tersinir tekrarlanır yükleme altında iyi bir performans sergilemiştir. Deney elemanlarında, kiriş tablası ve gövdesini bir arada tutan kesme donatısı olmamasına rağmen gövdenin tablayla kesiştiği kesitte uygulanan ankraj detayı başarı göstererek, CFRP şeritlerin uç bölgelerinden soyulmasını ve kiriş tabla ve gövdesinin ayrılmasına engellemiştir. Alt boyuna donatının hemen üstünde uygulanan ankrajlarda CFRP şeritlerin uçlarının soyulmasını engellemiştir.

Bencardino, Sperdea ve Swany (2007) Araştırmada 5000 mm uzunluğunda, 140x300 mm boyutlarında 4 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, CFRP ile güçlendirilen kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Deney elemanlarına ankraj uygulanmıştır. Ankrajlar, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını engelleyerek, güçlendirme malzemesiyle birlikte dayanıma katkı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Deney elemanlarının kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Boyuna donatıların kirişe yerleştirilmesindeki problemleri önlemek için yüklerin uygulanacağı noktalarda etriye yerleştirilmiştir. İki adet deney elemanı referans elemanı olarak belirlenmiştir. A/d oranı 6,9 olan referans elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. A/d oranı 3,4 olana referans elemanı ise 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 2 mm kalınlığında çelik etriyeler kullanılmıştır. Çelik etriyeler U biçimli CFRP şeritlerin üzerine epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Eğilme dayanımı artırılan deney elemanı kesmeden göçmüştür. Eğilme dayanımı artırıldıktan sonra U biçimli CFRP levhalarla güçlendirilen deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deney elemanı eğilme davranışı gösteren referans elemanına göre daha az sünek davranmıştır. Deneysel çalışmada, tasarlanan ankraj detayı ile kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişin eğilme kapasitesine ulaştığı görülmüştür.

Jayaprakash, Samad, Abbasovich ve Ali (2007) Araştırmada 2980 mm uzunluğunda, 120x340 mm boyutlarında 16 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş test edilmiştir. Deneyler, deney elemanına kesme açıklığının 1/2'sinden uygulanan tekil yük altında gerçekleştirilmiştir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarının kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Çalışmanın amacı, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının CFRP şeritler ile artırılması, davranış ve göçme şekillerinin incelenmesidir. Çalışmada ayrıca boyuna donatı oranının, a/d oranının, CFRP şerit aralığı değişiminin ve uygulama şeklinin güçlendirilen kirişlerin dayanım ve davranışları üzerine etkileri araştırılmıştır. Deney elemanları boyuna donatı oranlarına göre iki gruba ayrılmıştır. Her iki grup, a/d oranı 2,5 ve a/d oranı 4,0 olan elemanların bulunduğu iki ayrı gruba ayrılmıştır. Her grupta o gruba ait bir referans elemanı bulunmaktadır. Çalışmada CFRP şeritler iki ayrı düzende uygulanmıştır. Deney elemanlarından 6 tanesine güçlendirilmeden önce hasar verilmiş, onarılan kirişler CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Hasar görmemiş 6 adet deney elemanı da CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney programında, a) 3 adet deney elemanının kesme dayanımı, eksenleri arasında 230 mm aralık bulunan 80 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kesme açıklığına yapıştırılması ile, b) 3 adet deney elemanının kesme dayanımı, eksenleri arasında 280 mm aralık bulunan 80 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kesme açıklığına yapıştırılması ile, c) 2 adet deney elemanının kesme dayanımı, eksenleri arasında 230 mm aralık bulunan 80 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kirişin tamamına yapıştırılması ile, d) eksenleri arasında 280 mm aralık bulunan 80 mm genişliğinde CFRP şeritlerin kirişin tamamına yapıştırılması ile, e) 3 adet deney elemanının kesme dayanımı, kiriş yatay eksenine 45 derece açı yapan 80 mm genişliğinde CFRP şeritlerin, 280 mm aralıkla kiriş gövdesine yapıştırılması ile artırılmıştır. CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının kesme dayanımlarında %11-%139 arasında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Deney programında incelenen değişkenler, boyuna donatı oranı, a/d oranı, CFRP şerit aralığı değişimi ve uygulama şeklinin deney elemanlarının kesme dayanımına farklı oranlarda katkı sağladığı sonucuna varılmıştır. Deney elemanları CFRP şeritlerin kopmasından sonra gelişen kesme çatlakları nedeni ile kesmeden göçmüştür. Deney elemanlarında CFRP şeritler beton yüzeyinden ayrılmamıştır.

BÖLÜM İKİ

DENEY ELEMANLARI ve DENEY TEKNİĞİ

2.1 Genel

Mevcut betonarme yapılar tasarım veya yapım aşamalarında gerçekleşen çeşitli kusurlardan dolayı eğilme, genellikle de kesme sorunları ile karşı karşıyadır. Kesme kırılması, yapı elemanlarının beklenen sünek davranıştan uzak, düşük performans sergilemelerine neden olmaktadır. Buna karşın birçok betonarme yapı elemanı yetersiz kesme donatısı, mevcut kesme donatısında meydana gelen korozyon ve servis yüklerinin artması gibi nedenlerden dolayı kesme sorunları ile karşı karşıyadır.

Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin CFRP malzemesi kullanılarak güçlendirilmesi güncelliğini korumakta, ayrıca malzemenin kullanımı ve geliştirilmesi için araştırmalar da devam etmektedir. Günümüze kadar tekdüze yükler altında gerçekleştirilen çalışmalarda, CFRP'nin güçlendirme malzemesi olarak etkinliği ve güçlendirilen betonarme kirişlerin dayanım ve davranışları incelenmiştir. CFRP şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışlarının birçok değişkene bağlı olması nedeni ile güçlendirme tekniği üzerine daha fazla araştırma ve bilgi birikimine gereksinim duyulmaktadır.

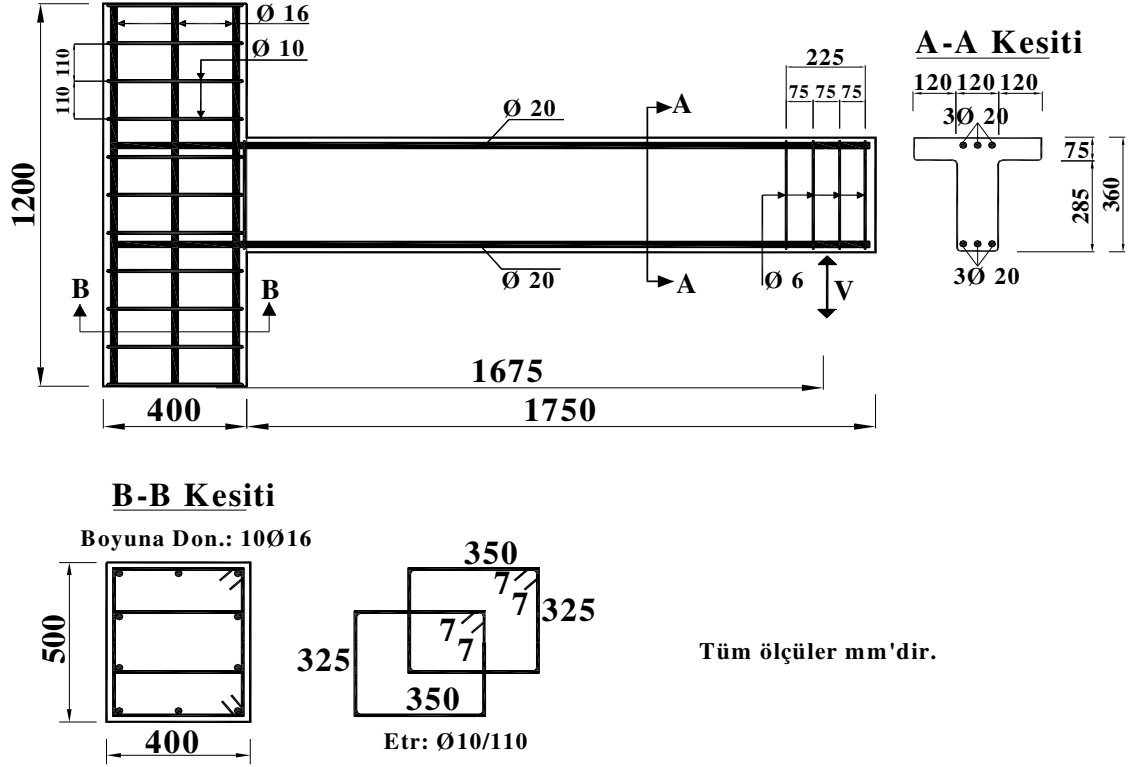
CFRP uygulanarak kesme dayanımı artırılmış betonarme kirişlerle ilgili öncü çalışmalarda CFRP, genellikle levha şeklinde uygulanmıştır. Bu araştırmalarda, betonarme kirişlerin kesme dayanımının artırılması için optimum bir CFRP oranının bulunduğu ve bu oranın üzerinde CFRP uygulanmasının betonarme kirişin kesme dayanımına katkı sağlamadığı sonucuna varılmış, bu nedenle daha ekonomik ve kolay uygulanan güçlendirme yöntemleri araştırılmıştır. Yeni yöntemde aranılan özellikleri taşıyan CFRP şerit uygulaması, çalışmalarda incelenmeye başlanmıştır. Literatürde bu konuyla ilgili bir kaç çalışma dışında deneysel bir çalışmaya rastlanmamıştır (Diagana ve diğer. 2003; Anil, 2006, Jayaprakash ve diğer., 2007).

Deney programında kullanılacak betonarme kirişlerin tasarımında ve seçilen değişkenlerde, çalışmanın ülkemizdeki bilgi birikimine katkı sağlaması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada çeşitli genişliklerdeki CFRP şeritlerin ve bu şeritlerin eleman üzerindeki yerleşim düzeninin betonarme kirişlerin dayanım ve davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca CFRP şeritlerin betonarme kiriş elemanlara ankraj kullanılarak sabitlenmesinin elemanların dayanım ve davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

2.2 Deney Elemanları

Deney elemanları bir betonarme binada kirişi temsil edecek şekilde seçilmiştir. Betonarme binalarda kiriş ve döşemenin bir döküm olması nedeni ile deney elemanları tablalı kiriş olarak tasarlanmıştır. Deney programında 3/5 geometrik ölçekli 11 adet T-kesitli betonarme konsol kiriş, deney elemanı olarak üretilmiştir. Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı düzenlemeleri özdeştir. 1750 mm uzunluğunda T-kesitli betonarme konsol kiriş, 400x500x1200 mm boyutlarında rijit bir betonarme bloğa mesnetlenmiştir. Kirişte tabla kalınlığı 75 mm, gövde yüksekliği 285 mm'dir.

Çalışmada CFRP şeritlerin betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısının araştırılması hedeflendiği için deney elemanlarında kesme donatısı kullanılmamıştır. Böylece deney elemanlarının kesme dayanımlarından kesme donatısının taşıdığı kesme kuvveti bileşeni çıkartılmıştır. Deney elemanlarında kesme çatlaklarının sadece CFRP şeritler tarafından karşılanması, CFRP'nin kesme donatısı olarak etkinliğinin daha açık ortaya konulması hedeflenmiştir. Kiriş boyuna donatıları kirişte simetrik yerleştirilmiştir. Kiriş altında ve üstünde 3'er adet 20 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Yükün uygulanacağı kiriş uç bölgesinde lokal çatlama ve kırılmaların önlenmesi amacıyla 6 mm çapında 75 mm aralıklı 4 adet etriye yerleştirilmiştir. Betonarme konsol kirişin mesnetlendiği dikdörtgen kesitli rijit betonarme blokta 10 adet 16 mm çapında nervürlü donatı, boyuna donatı olarak kullanılmıştır. Mesnedin boyuna donatıları 10 mm çapında nervürlü donatıdan üretilen etriyelerle 110 mm aralıkla sargılanmıştır. Deney elemanlarının boyutları ve donatı detayları Şekil 2.1'de verilmiştir.

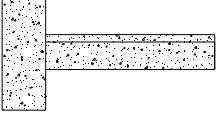
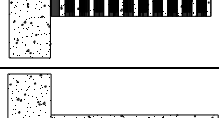
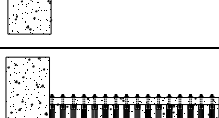
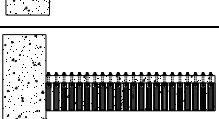
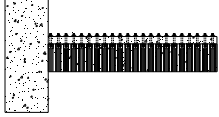
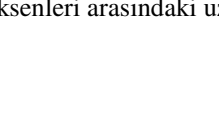


Şekil 2.1 Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı detayları

Deney programında 1 adet deney elemanı referans elemanı, diğer 10 adet deney elemanı da farklı düzende CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanıdır. Deney programında yer alan deney elemanları, CFRP şeritlerin geometrik özellikleri ve kiriş elemanlarda uygulama şekilleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Deney elemanlarında 50 mm ve 100 mm genişliğinde düz, L, U ve $\sqcap$ biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. Deney programının 2, 3, 4 ve 5 no’lu deney elemanlarında düz CFRP şeritler kiriş gövdesinin yan yüzlerine yapıştırılmıştır. 6 ve 8 no’lu deney elemanlarında kiriş gövdesini tabla altına kadar sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 7 ve 9 no’lu deney elemanlarında kiriş yan yüzünden kiriş tablasının altına kadar devam eden L biçimli şeritler kullanılmıştır. 10 ve 11 no’lu deney elemanlarında hem kiriş gövdesini sargılayan aynı zamanda kiriş tablasının altında devam eden $\sqcap$ biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. CFRP ile güçlendirilen 2, 3, 4 ,

5 ve 6 no'lu deney elemanında şeritler kiriş gövdesinin yan yüzlerine epoksi kullanılarak yapıştırılmış, CFRP şeritlerde ankraj kullanılmamıştır. Deney programının 7, 8, 9,10 ve 11 no'lu deney elemanların CFRP şeritlerinde mekanik ankraj kullanılmıştır.

Tablo 2.1 Deney Programı

Deney Elemanı		CFRP Uygulaması				
		W_f^1 (mm)	S_f^2 (mm)	Şerit Aralığı (mm)	Uygulama Şekli	Mekanik Ankraj
1		Referans				
2		50	110	60	Düz Şerit	Yok
3		50	80	30	Düz Şerit	Yok
4		100	130	30	Düz Şerit	Yok
5		100	160	60	Düz Şerit	Yok
6		50	110	60	U Şerit	Yok
7		50	110	60	L Şerit	Var
8		50	80	30	U Şerit	Var
9		100	160	60	L Şerit	Var
10		50	80	30	U Şerit	Var
11		100	130	30	U Şerit	Var

Not: ¹ W_f =CFRP şerit genişliği² S_f =Şerit eksenleri arasındaki uzaklık

Deney programında yer alan deney elemanlarına ilişkin detaylar aşağıda verilmiştir.

Deney Elemanı-1; Güçlendirilen deney elemanları ile karşılaştırmak için üretilmiş referans elemanıdır.

Deney Elemanı-2; Deney elemanında 50 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 16 adet CFRP düz şerit kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak 60 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 110 mm'dir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşimi ve detayları Şekil 2.2'de verilmiştir.

Deney Elemanı-3; Deney elemanında 50 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 22 adet CFRP düz şerit kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Deney elemanında şerit aralıkları 30 mm olup, Deney Elemanı-2'de kullanılan şerit aralıklarının yarısı kadardır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 80 mm'dir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.3'de verilmiştir.

Deney Elemanı-4; Deney elemanında şerit genişlikleri, Deney Elemanı-3'de kullanılan şerit genişliklerinin iki katıdır. Deney Elemanı-4'de 100 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 14 adet CFRP düz şerit kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak 30 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 130 mm'dir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.4'de verilmiştir.

Deney Elemanı-5; Deney elemanında 100 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 11 adet CFRP düz şerit kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak yapıştırılmıştır. Deney elemanında şerit aralıkları 60 mm olup, Deney Elemanı-4’de kullanılan şerit aralıklarının iki katıdır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 160 mm’dir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.5’de verilmiştir.

Deney Elemanı-6; Deney elemanında kiriş gövdesini sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 690 mm uzunluğunda 16 adet CFRP şerit kiriş gövdesine 60 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 110 mm’dir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.6’da verilmiştir.

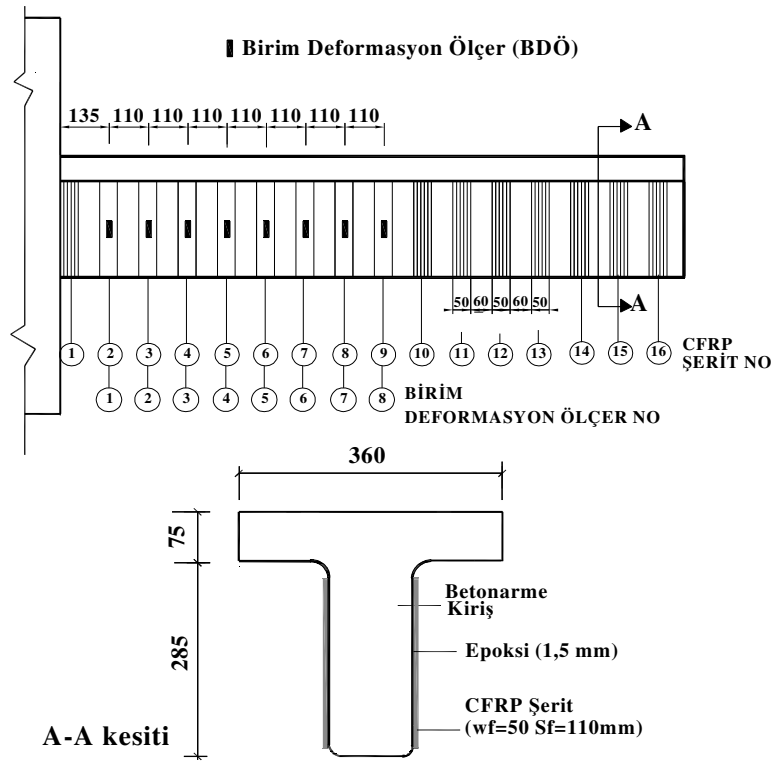
Deney Elemanı-7; Deney elemanında kiriş gövdesinin yan yüzeyinden başlayıp tablanın altında devam eden L biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 405 mm uzunluğunda 16 adet L biçimli CFRP şerit kiriş gövdesine simetrik olarak 60 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 110 mm’dir. CFRP şeritler kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte ve kiriş alt boyuna donatısının üstünden kiriş gövdesine bir adet mekanik ankraj ile sabitlenmiştir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.7’de verilmiştir.

Deney Elemanı-8; Deney elemanında kiriş gövdesini sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 690 mm uzunluğunda 22 adet U biçimli CFRP şerit kiriş gövdesine 30 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 80 mm’dir. U biçimli tüm CFRP şeritler kiriş gövdesine kirişin tablayla birleştiği kesitte uygulanan bir adet mekanik ankraj ile sabitlenmiştir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.8’de verilmiştir.

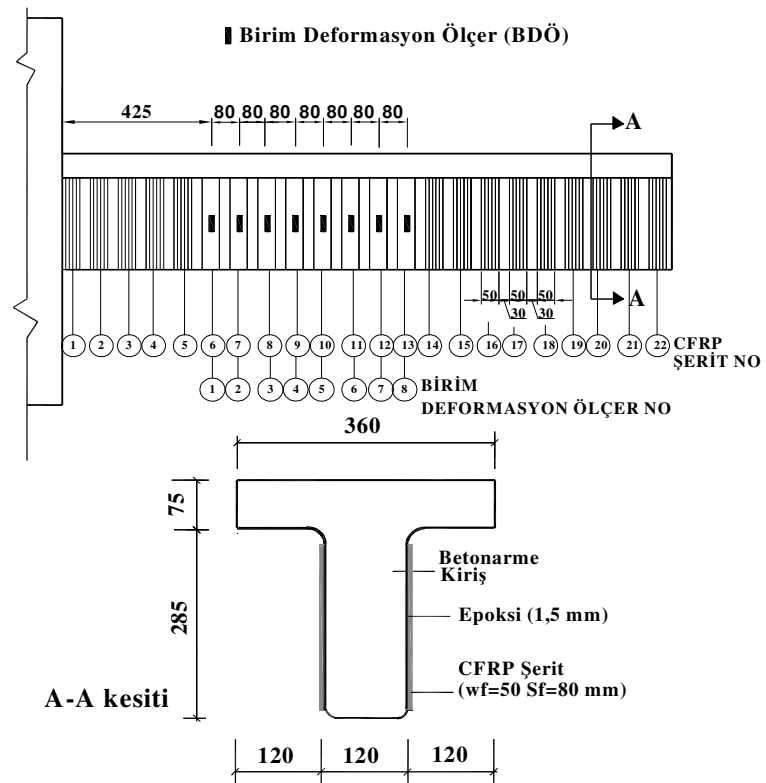
Deney Elemanı-9; Deney elemanında kiriş gövdesinin yan yüzeyinden başlayıp tablanın altında devam eden L biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. Deney elemanında şerit genişliği 100 mm olup, Deney Elemanı-7'nin şerit genişliğinin iki katıdır. 11 adet L biçimli CFRP şerit kiriş gövdesine simetrik olarak 60 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 160 mm'dir. Her şerit kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte ve kiriş alt boyuna donatısının üstünden kiriş gövdesine mekanik ankraj ile sabitlenmiştir. Tüm CFRP şeritlerde 2 adet yan yana ankraj kullanılmıştır. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.9'da verilmiştir.

Deney Elemanı-10; Deney elemanında tablanın altından başlayıp kirişin yan yüzlerinde devam eden ve kiriş gövdesinin alt yüzünü sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 930 mm uzunluğunda 22 CFRP şerit kiriş gövdesine 30 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 80 mm'dir. Tüm CFRP şeritler kiriş gövdesine, kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte uygulanan mekanik ankrajla sabitlenmiştir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.10'da verilmiştir.

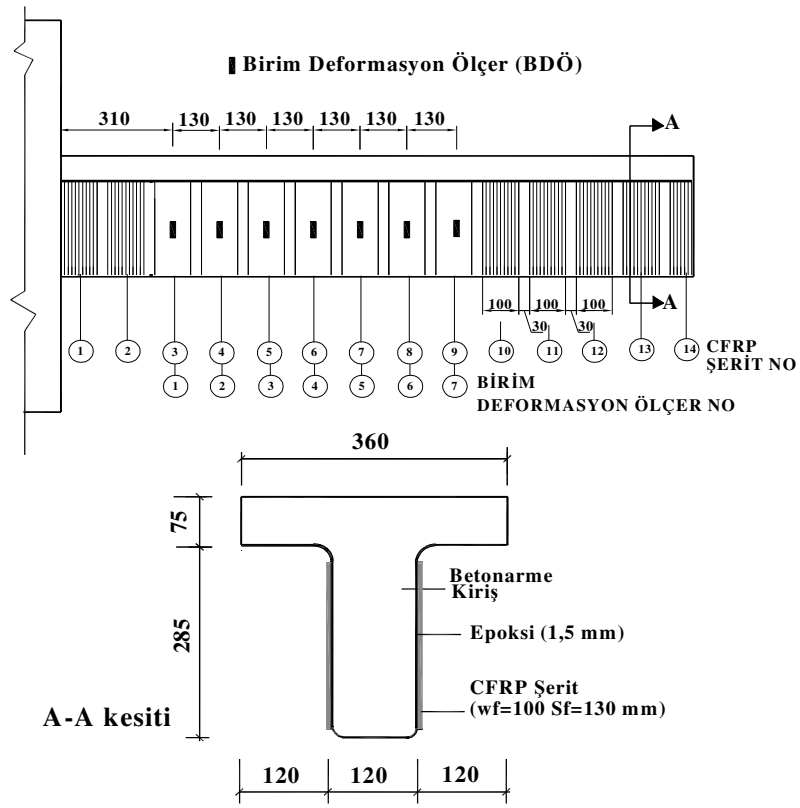
Deney Elemanı-11; Deney elemanında tablanın altından başlayıp kirişin yan yüzlerinde devam eden ve kiriş gövdesinin alt yüzünü sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. Deney elemanında şerit genişliği 100 mm olup, Deney Elemanı-10'nun şerit genişliğinin iki katıdır. 930 mm uzunluğunda 14 CFRP şerit kiriş gövdesine 30 mm aralıkla epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Şerit eksenleri arasındaki uzaklık 130 mm'dir. Tüm CFRP şeritler kiriş gövdesine, kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte yan yana uygulanan 2 adet mekanik ankrajla sabitlenmiştir. Deney elemanında CFRP şeritlerin yerleşim detayları Şekil 2.11'de verilmiştir.



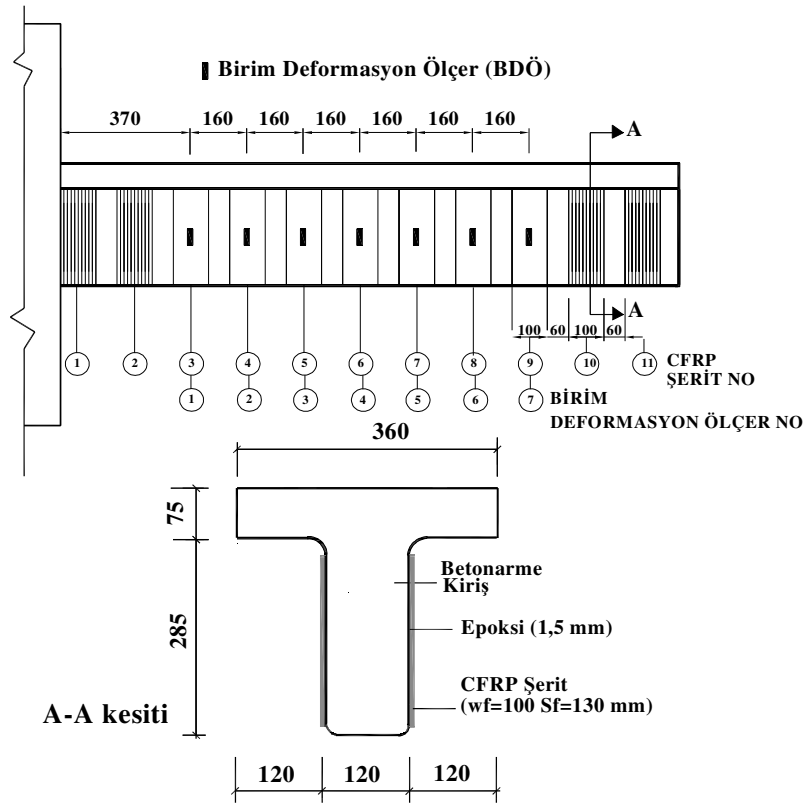
Şekil 2.2 Deney Elemanı-2'de CFRP şeritlerin yerleşim detayı



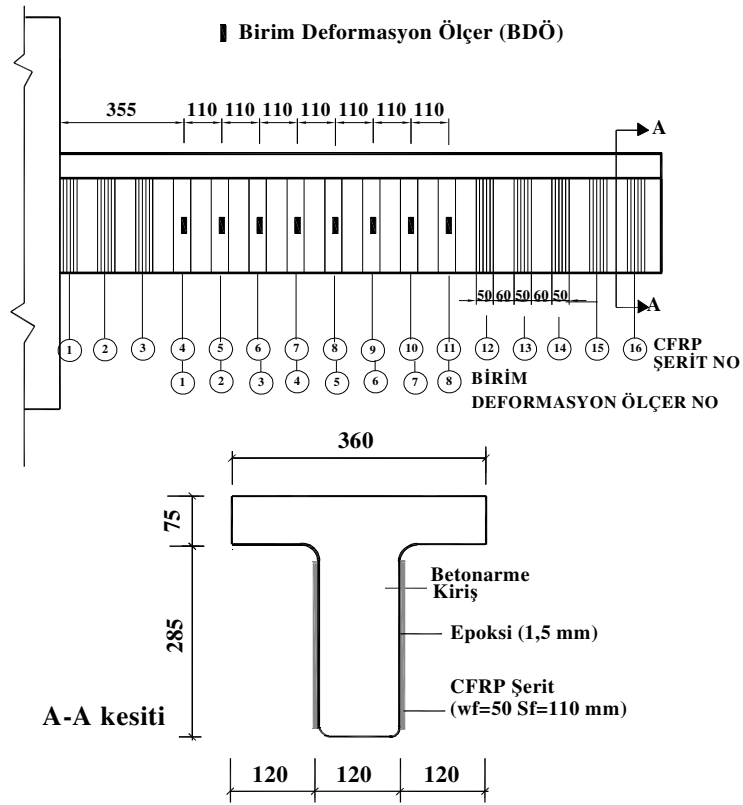
Şekil 2.3 Deney Elemanı-3'de CFRP şeritlerin yerleşim detayı



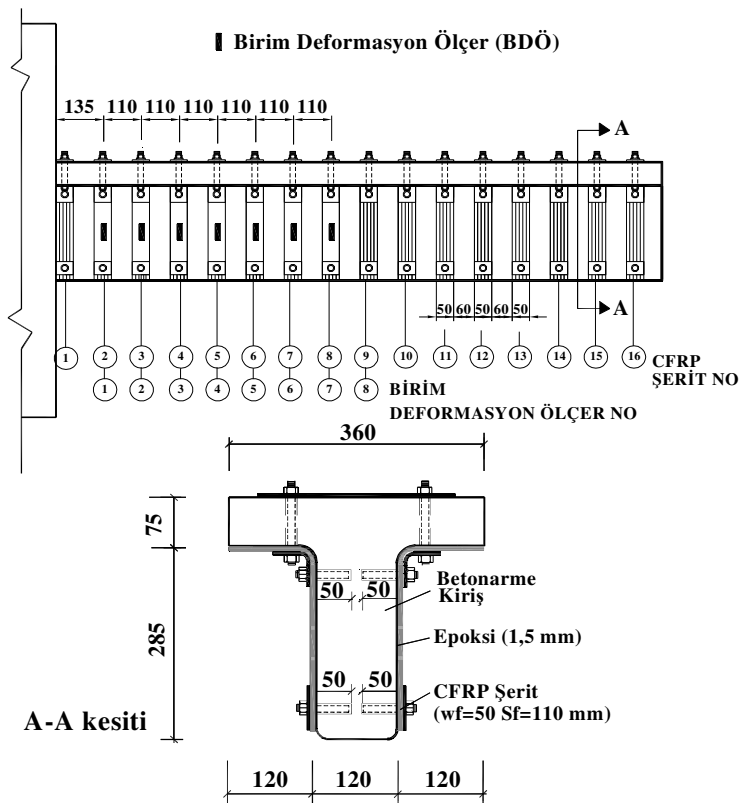
Şekil 2.4 Deney Elemanı-4’de CFRP şeritlerin yerleşim detayı



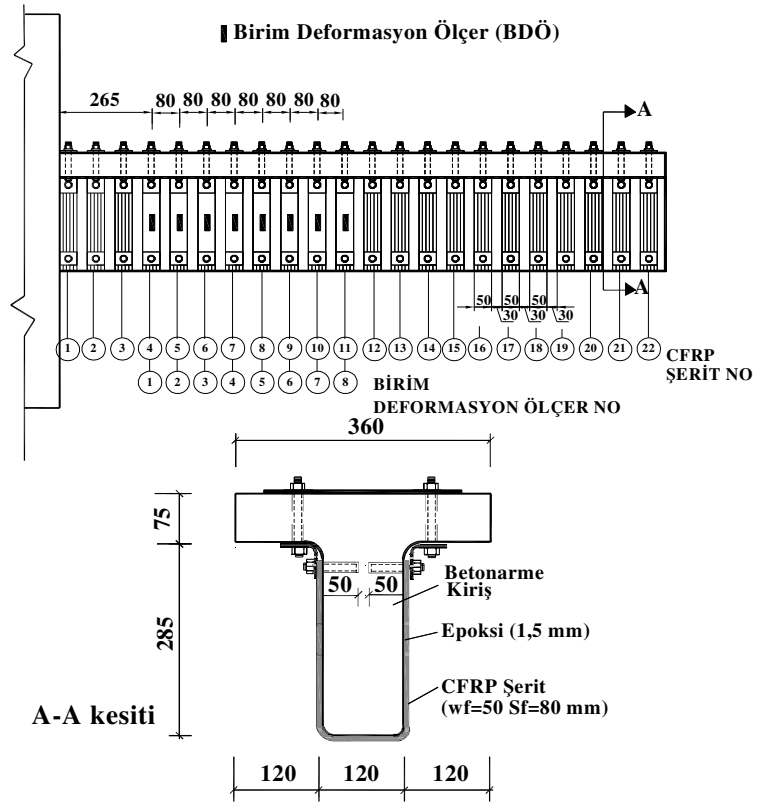
Şekil 2.5 Deney Elemanı-5’de CFRP şeritlerin yerleşim detayı



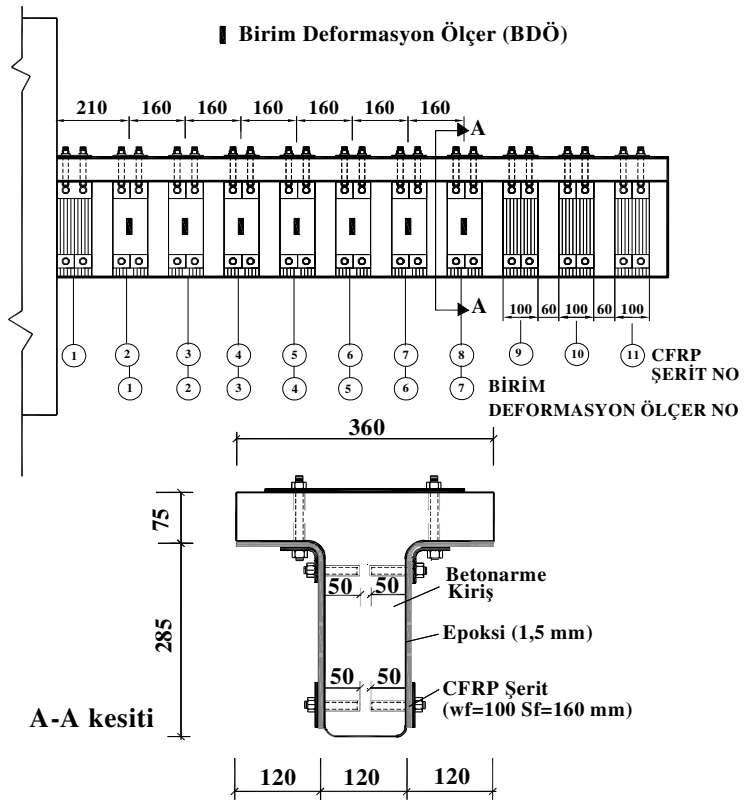
Şekil 2.6 Deney Elemanı-6’da CFRP şeritlerin yerleşim detayı



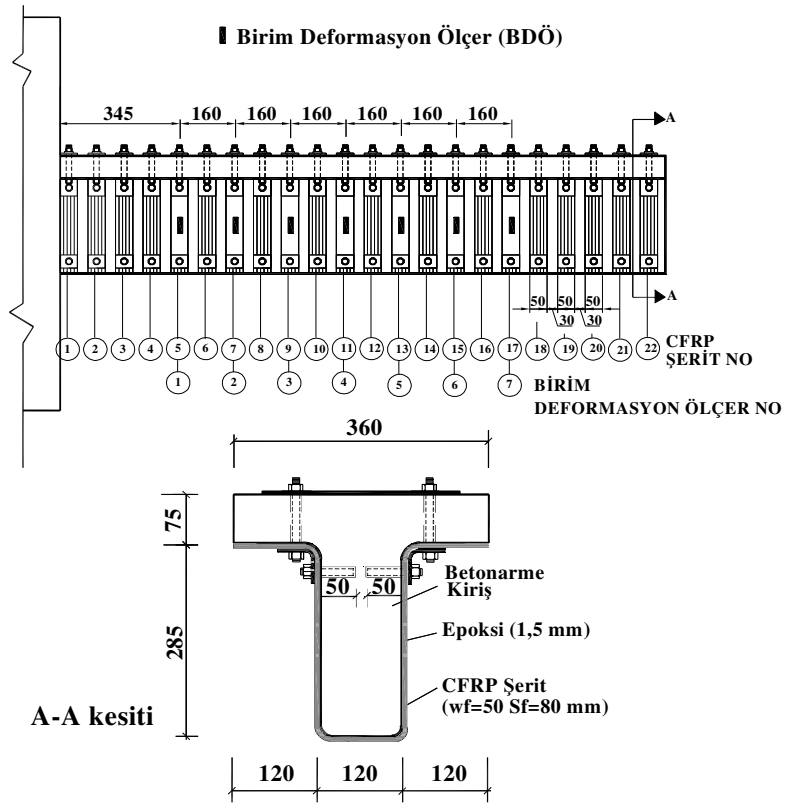
Şekil 2.7 Deney Elemanı-7’de CFRP şeritlerin yerleşim detayı



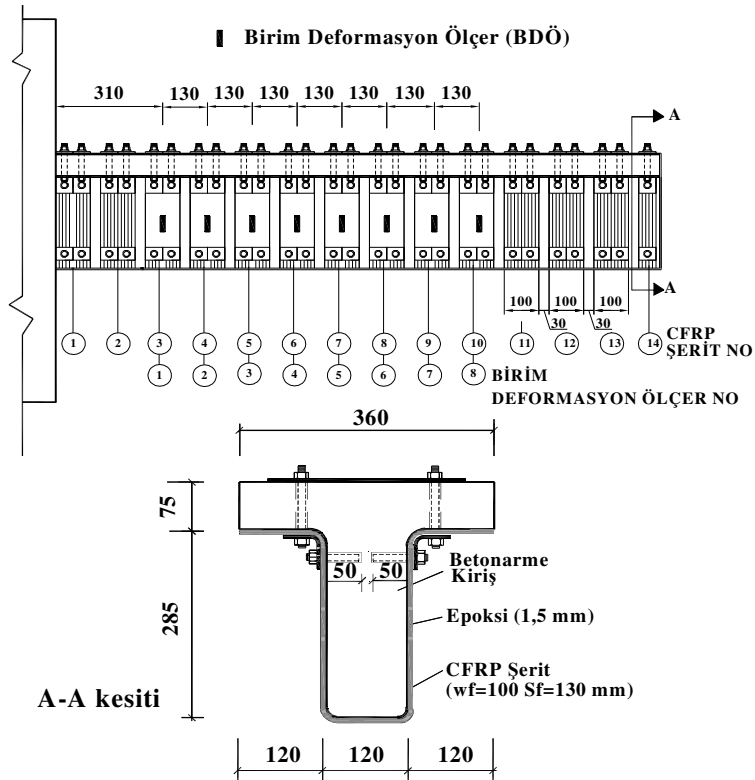
Şekil 2.8 Deney Elemanı-8’de CFRP şeritlerin yerleşim detayı



Şekil 2.9 Deney Elemanı-9’da CFRP şeritlerin yerleşim detayı



Şekil 2.10 Deney Elemanı-10'da CFRP şeritlerin yerleşim detayı



Şekil 2.11 Deney Elemanı-11'de CFRP şeritlerin yerleşim detayı

2.3 Malzemeler

Deney elemanlarının üretilmesinde donatı, beton ve CFRP malzemesi kullanılmıştır. Donatı ve beton malzemelerinin karakteristik özellikleri numuneler üzerinde laboratuarda gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde aynı özellikte beton ve bir seferde ve aynı üretimden temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. Deney elemanların kesmeye karşı güçlendirilmesinde SİKA firmasının ürettiği Sika Wrap 230C karbon lif donatılı polimer ve SİKADUR 330 epoksi kullanılmıştır.

2.3.1 Donatı

Test sonuçlarının sağlıklı değerlendirilebilmesi için deney elemanlarının üretilmesinde kullanılan donatıların bütün deney elemanlarında aynı dayanım ve özellikte olması gerekmektedir. Bu nedenle deney elemanlarında kullanılan donatılar bir seferde ve aynı üretimden alınmıştır. Donatıların özelliklerinin belirlenmesi için her çaptaki donatıdan üçer adet numune alınarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan DARTEC marka bilgisayar kontrollü çekme deneyi düzeneğinde yapılmıştır (Şekil 2.12). Çekme deneylerinden elde edilen gerilme–birim şekil değiştirme grafikleri EK-A’da verilmiştir. Deneyler sonucunda her gruptaki donatıların mekanik özellikleri arasında sapmaların çok az olduğu görülmüştür. Deney elemanlarının üretiminde kullanılan donatıların akma ve kopma dayanımları ortalama değerler olarak 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(düz)	275,0	417,0
10	S420(nervürlü)	304,2	443,1
20	S420(nervürlü)	414,0	687,9



Şekil 2.12 Donatı çekme deneylerinde kullanılan deney düzeneği

2.3.2 Beton

Deney elemanlarının betonları Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda hazırlanarak dökülmüştür. Beton karışımında 7-15 mm ve 0-7 mm dane çaplarında iki grup agrega kullanılmıştır. Kullanılan agrega için elek analizi yapılmıştır. 30 MPa beton basınç dayanımı elde etmek amacıyla 1m³ beton karışımında 0-7 mm dane çapındaki malzemedan %37 oranında, 7-15 mm dane çapındaki malzemedan %63 oranında bulunması gerektiği hesaplanmıştır. 1 m³ beton üretiminde 350 kg çimento kullanılmıştır. Deney elemanlarında çimento olarak KPÇ 32,5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,55'dir. 1 m³ betonun hazırlanması için karışım oranları Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 1 m³ beton için karışım oranları

Malzemeler	Ağırlık (kg)	Ağırlıkça oranı (%)
Çimento	400,00	0,17
Çakıl (7 - 15 mm)	1025,00	0,44
Kum (0 - 7 mm)	675,00	0,29
Su	220,00	0,10
Toplam	2320,00	100,00

Deney elemanlarının beton dökümü sırasında beş adet standart silindir numunesi alınmıştır. Alınan numunelere deney elemanı ile aynı şartlarda kür uygulanmıştır. Silindir numunelere kükürt başlığı yapıldıktan sonra deney elemanlarının testi ile aynı gün Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan beton presi kullanılarak test edilmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Beton silindir deneyi

Silindir numunelerinden elde edilen ortalama beton basınç dayanımları Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4 Deney elemanlarının beton basınç dayanımları

Deney Elemanı No	Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)
1	30,40
2	32,40
3	30,20
4	31,40
5	30,40
6	28,30
7	31,30
8	31,60
9	31,10
10	31,50
11	31,30

2.3.3 CFRP’nin özellikleri

Deneyisel çalışmada deney elemanlarının kesme dayanımlarını arttırmak için karbon lif donatılı polimer malzemesi (tek yönlü Sika Wrap 230C) kullanılmıştır. Sika Wrap 230C’nin üretici firma tarafından belirtilen özellikleri Tablo 2.5 verilmiştir.

Tablo 2.5 Sika Wrap 230C malzemesi özellikleri

Sika Wrap 230C Karbon Lifli Dokuma Malzemesi	
Lif Yapısı	%99 Ana doğrultuda,%1 Destekleyici doğrultuda lifli
Ağırlığı	220 gr/m ²
Kalınlığı	0,12 mm
Liflerin Çekme Dayanımı	4100 N/mm ²
Liflerin Elastisite Modülü	231000 N/mm ²
Kopmadaki Uzama	%1,7
Dokuma Uzunluğu	50 m
Dokuma Genişliği	600 mm

2.3.4 SİKADUR 330 ve SİKADUR 31 (Epoksi) Özellikleri

CFRP şeritlerin deney elemanlarına yapıştırılmasında Sikadur 330 (Epoksi) yapıştırıcı kullanılmıştır. Sikadur 330 iki bileşenli, suya dayanıklı, yüksek dayanımlı solventsiz yapıştırma harcıdır. Karışımında; yapıştırıcı madde olan epoksi reçinesi ve priz süresini düzenleyen sertleştirici bulunmaktadır. Sika Wrap sistemi ile uyumludur. Epoksi harcının hazırlanmasında bileşenler üretici firmanın önerdiği oranlarda kullanılmıştır. 4 birim reçine ve 1 birim sertleştirici dakikada 100 devirli bir karıştırıcıyla bir dakika süre ile karıştırılmış ve epoksi kullanıma hazır hale getirilmiştir. CFRP uygulamasından sonra epoksinin priz alması için deney elemanı bir hafta süre ile laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sikadur 330'un üretici firma tarafından belirtilen özellikleri Tablo 2.6 verilmiştir.

Tablo 2.6 Sikadur 330'un özellikleri

Sikadur 330 Doyurma Reçinesi	
Yoğunluk	1,31 kg/l
Karışım Oranı	A bileşeni(reçine) : B bileşeni(sertleştirici) =4:1
Uygulama Sıcaklığı	" +10 C° - +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)

Ankrajlar için Sikadur 31 (epoksi) yapıştırıcı kullanılmıştır. Sikadur 31 solventsiz, tiksotropik, 2 bileşenli epoksi reçine ve yüksek dayanımlı dolgu maddelerinden oluşmuş yapıştırma ve onarım harcıdır. Karışımında; yapıştırıcı madde olan epoksi reçinesi ve priz süresini düzenleyen sertleştirici bulunmaktadır. Epoksi harcının hazırlanmasında bileşenler üretici firmanın önerdiği oranlarda kullanılmıştır. 3 birim reçine ve 1 birim sertleştirici dakikada 100 devirli bir karıştırıcıyla bir dakika süre ile karıştırılmış ve epoksi kullanıma hazır hale getirilmiştir. Uygulamadan sonra epoksinin priz alması için deney elemanı üç gün süre ile laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sikadur 31'in üretici firma tarafından belirtilen özellikleri Tablo 2.7 verilmiştir.

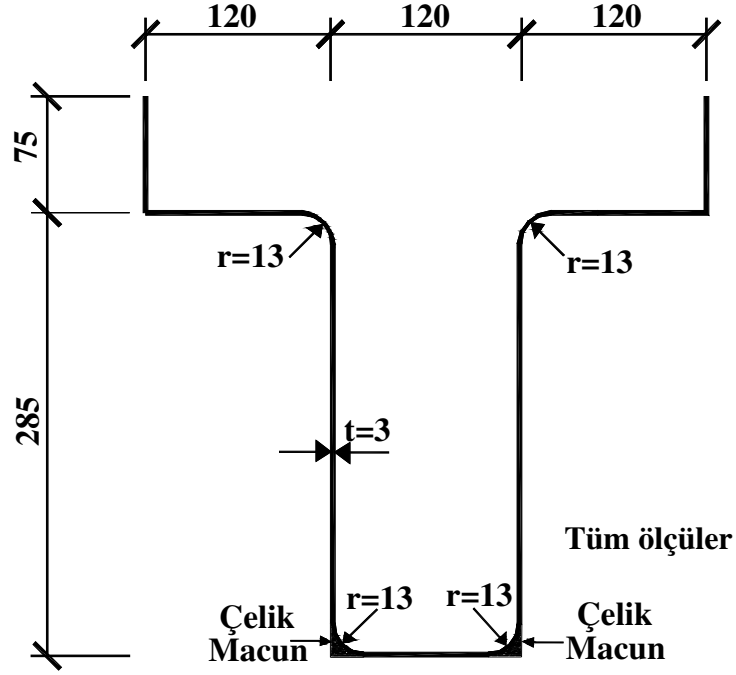
Tablo 2.7. Sikadur 31'in özellikleri

Sikadur 31 Epoksi Reçine	
Yoğunluk	1,65 kg/l
Karışım Oranı	A (reçine) : B (sertleştirici)=3:1
Uygulama Sıcaklığı	" +10 C° - +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
Young Modülü	8500 N/mm ²
Elastisite Modülü	4300 N/mm ²

2.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanları Yapı Mekaniği Laboratuvarında üretilmiştir. Deney elemanlarının üretimi, donatı kafesinin ve kalıbın hazırlanması, beton dökümü ve güçlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalardan sonra deney elemanları teste hazır hale gelmektedir.

Deney elemanlarının beton dökümünde çelik kalıp kullanılmıştır. Çelik kalıp 3 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılarak üretilmiştir. Kiriş ve mesnedin kalıpları ayrı ayrı hazırlandıktan sonra birleştirilmiştir. Bunun için önce kiriş mesnedi boyutlarında kesilen levhalar kaynakla birleştirilmiş ve kiriş mesnedi üretilmiştir. Daha sonra kiriş gövdesi hazırlanmıştır. Çelik kalıbın kiriş gövdesinin altına denk gelen her iki alt köşesi çelik macun kullanılarak yarıçapı 13 mm olacak şekilde yuvarlatılmıştır. Kalıpta aynı yuvarlatma kiriş gövdesi ile tablanın birleştiği üst köşelerde de yapılmıştır (Şekil 2.14). Böylece kiriş gövdesini sargılayacak şeritler için kiriş köşelerindeki keskin dönüşler önlenmiştir. Kalıbın kiriş gövdesi dışında bütün parçaları sökülebilen çelik levhalardan üretilmiştir. Çelik kalıbın bütün yüzeyleri kalıp dışından yatay ve düşey çelik profillerle güçlendirilmiştir.



Şekil 2.14 Çelik kalıp kesit detayı

Deney elemanlarının donatıları yapı mekaniği laboratuvarında hazırlanmıştır. Önce kiriş mesnet donatıları ve etriyeleri bükülerek hazırlanmıştır. Hazırlanan donatılar bağ telleri ile birbirine bağlanarak kiriş mesnedinin donatı kafesi oluşturulmuştur. Daha sonra kirişin üst ve alt donatısı hazırlanmıştır. Kiriş üst ve alt donatısı hazırlandıktan sonra yükleme kolonunun kiriş gövdesine mesnetlenmesinde kullanılacak 20 mm çapında çelik boru, kiriş mesnedinden 1675 mm uzaklıkta tablanın ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Yüklemin uygulandığı bölgede lokal çatlama ve kırılmanın önlenmesi için çelik borunun sağına ve soluna 2'şer adet $\Phi 6$ mm çapında etriye, 75 mm aralıkla yerleştirilmiş ve bağ telleri ile bağlanmıştır. Daha sonra kiriş ve mesnet donatıları da bağ telleri ile bağlanarak deney elemanının donatı kafesleri hazırlanmıştır.

Donatı kalıba yerleştirilmeden önce kalıp yağlanmıştır. Donatıların kalıp ile temasını önlemek için pas payı bırakılmıştır. Donatı kalıba yerleştirirken, donatının yağlanmış yüzeylere temas etmemesine dikkat edilmiştir. Laboratuvar'da çelik kalıp içine yerleştirilmiş beton dökümüne hazır iki adet kirişin donatı kafesi Şekil 2.15'de görülmektedir.



Şekil 2.15 Beton dökümüne hazır deney elemanları

Beton dökümünde 250 dm^3 'lük betoniyer kullanılmıştır. Beton dökümünde kullanılacak agregalar önceden kurutulmuştur. Beton hazırlanmasında karışım için belirlenen malzemeler betoniyer içine döküldükten sonra 4 dakika karıştırılmıştır. Bir seferde iki adet deney elemanının beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Deney elemanının betonu toplam 7 karışım yapılarak üretilmiştir.



Şekil 2.16 Beton dökümü tamamlanmış deney elemanları

Hazırlanan beton kalıba vibratör kullanılarak yerleştirilmiştir. Beş adet standart silindir numunesi alınmıştır. Şekil 2.16'da laboratuvar ortamında beton dökümü tamamlanmış iki adet kiriş görülmektedir. Beton dökümü tamamlanan deney elemanları laboratuvar ortamında korunmuştur. Beton dökümünden bir gün sonra kiriş kalıplarının yan yüzeyleri açılmış, aynı gün beton silindir numuneleri de kalıptan alınmıştır. Deney elemanı ve silindir numuneler ıslak çuvallara sarılmış, üzerleri naylonla örtülmüştür. Deney elemanı ile silindir numunelerine aynı şartlarda 28 gün kür uygulanmıştır.

2.5 CFRP şerit uygulaması

Kürü tamamlanan deney elemanlarının CFRP uygulamasına kiriş yüzey hazırlığı ile başlanmıştır. Deney elemanlarının beton yüzeyi taşlanmış ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Taşlama işlemi sona erdikten sonra beton yüzeyindeki artık maddeler basınçlı hava püskürtülerek temizlenmiştir. Daha sonra beton yüzeyi ıslak süngerle silinerek temizlenmiş ve tekrar basınçlı hava püskürtülerek tozdan arındırılmıştır. CFRP şeritlerin deney elemanında yapıştırılacağı yerler kiriş üzerinde işaretlenmiştir. Daha sonra CFRP şeritlerin beton yüzeyine yapıştırılmasında kullanılacak epoksi hazırlanmıştır. Epoksi için Sikadur 330 malzemesinin her iki bileşeni (reçine ve sertleştirici) dakikada 100 devirli bir karıştırıcıyla bir dakika süre ile karıştırılarak yapıştırmaya hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan epoksi yaklaşık 1,5 mm kalınlığında işaretlenen bölgelere sürülmüştür (Şekil 2.17). Daha sonra planlanan genişlikte ve boyda kesilen CFRP şeritler, lif yönlerinin bozulmamasına dikkat edilerek betonarme kirişe yapıştırılmıştır. CFRP şeritlere lifler doğrultusunda baskı uygulayarak epoksiye doyurulmuş, lifler arasından epoksinin yüzeye çıkması sağlanmıştır (Şekil 2.18). Daha sonra CFRP şeritlerin üzerine yaklaşık 1.5 mm kalınlığında epoksi lifler doğrultusunda tekrar sürülmüştür. Yüzey mala yardımı ile düzgün bir hale getirildikten sonra deney elemanı kuruması için bir hafta bekletilmiştir.



Şekil 2.17 Sikadur 330 (epoksi) uygulaması



Şekil 2.18 CFRP şeritlerin yapıştırılması

2.5.1 Mekanik ankrajlar

CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını önlemek amacıyla deney elemanlarında mekanik ankraj kullanılmıştır. CFRP şeritlerin uygulama şekline bağlı olarak mekanik ankrajlar deney elemanlarına iki farklı düzende uygulanmıştır. 8, 10 ve 11 no'lu deney elemanlarında kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte, 7 ve 9 no'lu deney elemanlarında kiriş alt boyuna donatısının üstünde ve kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte mekanik ankrajlar kullanılmıştır.

Kiriş alt boyuna donatısının üstünde mekanik ankraj olarak ortasına delik açılmış 50x50x5 mm boyutlarında düz kare çelik plaka kullanılmıştır. Kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte, tablayla kiriş gövdesinin birleşim köşesinin yuvarlaklığında, L biçiminde bükülmüş 50x50x5 mm boyutlarında çelik plaka kullanılmıştır. Ayrıca çelik plakaları kirişe sabitlemek için üstüne dış açılmış, dış dibi çapı 0,2 mm olan 10 mm çapında çelik çubuklar kullanılmıştır.

7 ve 9 no'lu deney elemanlarında kiriş alt boyuna donatısının hemen üstünde ve tablanın kiriş gövdesi ile birleştiği kesitte, 8, 10 ve 11 no'lu deney elemanlarında tablanın kiriş gövdesi ile birleştiği kesitte mekanik ankrajların uygulanacağı noktalar belirlenmiş ve işaretlenmiştir. Kiriş gövdesinde işaretlenen noktalar matkapla 12 mm çapında ve 50 mm derinliğinde delinmiştir. Kiriş tablasında işaretlenen noktalar boydan boya 12 mm çapında delinmiştir. Açılan tüm delikler basınçlı hava ile temizlenmiş tozdan arındırılmıştır. Daha sonra kiriş gövdesinde açılan deliklere çelik plakaları sabitlemek için kullanılacak üzerine dış açılmış çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Çelik çubuklar, CFRP şeritlerin yapıştırıldığı sırada CFRP liflerin sürekliliğine zarar vermeden yerleştirilmiştir. Çelik çubukların yerleştirileceği deliklere epoksi basınçla enjekte edilmiş, deliğin yüzeyinin tamamen harçla bulanması amacıyla $\phi 10$ mm çapındaki çelik çubuklar deliklere defalarca sokulup çıkartılmıştır. Daha sonra harçla bulanmış deliklere çelik çubuklar yerleştirilmiştir.

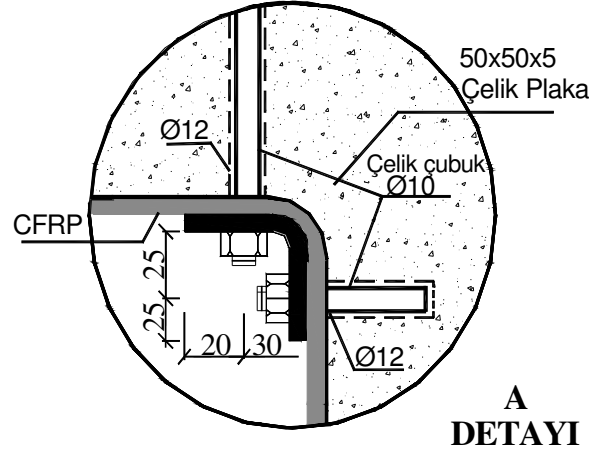
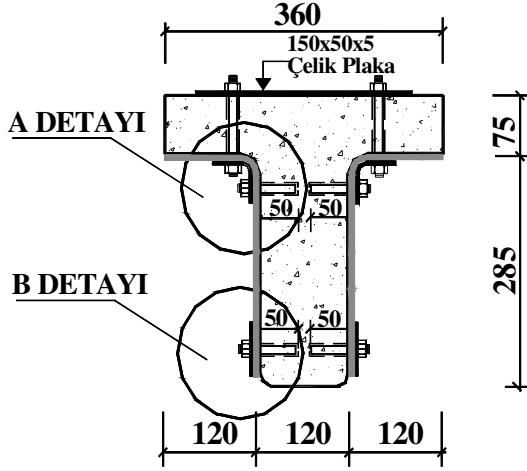
8, 10 ve 11 no'lu deney elemanlarında kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte L biçiminde bükülmüş çelik plakalar ankraj olarak kullanılmıştır. L biçiminde bükülmüş çelik plakalar ile CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasının engellenmesi ve tablanın kiriş gövdesi ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Çelik plakalar, kiriş gövdesine çelik çubuklar kullanılarak sabitlenmiştir. Plakalar kiriş tablasına, kiriş tablasında açılan deliklerden geçirilen 140 mm uzunluğunda $\phi 10$ mm çapında çelik çubuklar kullanılarak sabitlenmiştir. Çelik çubukları tablanın üst kısmına sabitlemek için 150x50x5 mm boyutlarında düz çelik levha kullanılmıştır (Şekil 2.19). Deney elemanlarına uygulanan mekanik ankrajın detayı Şekil 2.20'de verilmiştir.



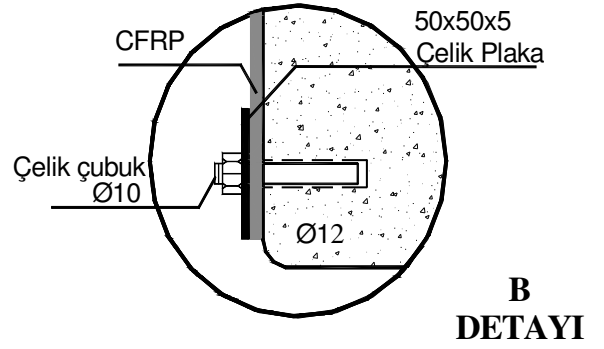
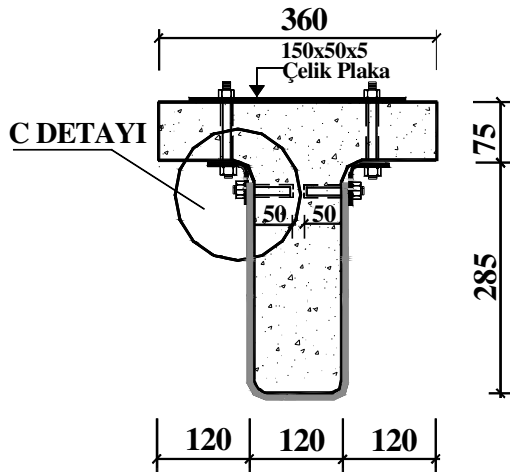
Şekil 2.19 Tablanın üstünde mekanik ankrajların görünümü

7 ve 9 no'lu deney elemanlarında kiriş alt boyuna donatısının üstünde mekanik ankraj olarak 50x50x5 mm boyutlarında düz kare çelik levha kullanılmıştır. Levha kiriş gövdesine kiriş alt boyuna donatısının üstüne yerleştirilen çelik çubuklar kullanılarak sabitlenmiştir. Kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte mekanik ankraj olarak 50x50x5 mm boyutlarında L biçiminde bükülmüş çelik plakalar kullanılmıştır. L biçiminde bükülmüş çelik plakalar kiriş gövdesine, çelik çubuklar kullanılarak sabitlenmiştir. Plakalar kiriş tablasına, kiriş tablasında açılan deliklerden geçirilen 140 mm uzunluğunda $\phi 10$ mm çapında çelik çubuklar kullanılarak sabitlenmiştir. Çelik çubukları tablaya sabitlemek için tablanın üst kısmında 150x50x5 mm boyutlarında düz çelik levha kullanılmıştır (Şekil 2.19). Deney elemanlarına uygulanan mekanik ankrajın detayı Şekil 2.20'de görülmektedir.

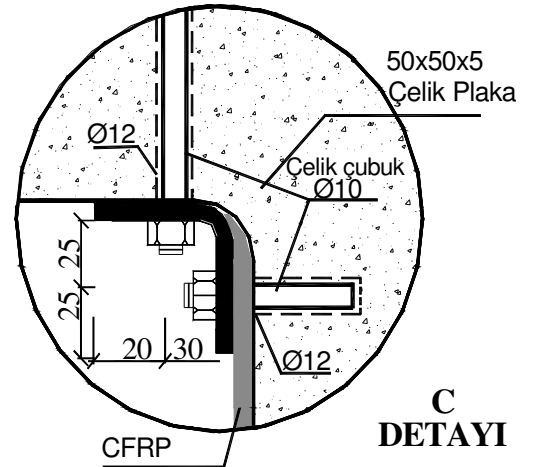
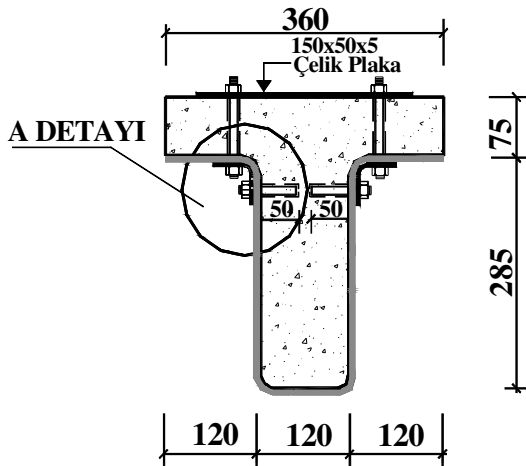
Deney Elemanı-7, Deney Elemanı-9



Deney Elemanı-8



Deney Elemanı-10, Deney Elemanı-11



Tüm Ölçüler mm'dir.

Şekil 2.20 Mekanik ankraj detayları

2.6. Deney Düzeni

2.6.1 Yükleme Düzeni

Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan deney platformunda gerçekleştirilmiştir. Deney platformu 400 mm kalınlığında rijit bir döşeme ve yükleme duvarından oluşmaktadır. Deney elemanı, kiriş mesnedine gömülen 45 mm çapında iki çelik borudan geçirilen 42 mm çapında yüksek dayanımlı çelik çubuklarla yükleme duvarına bağlanmıştır.

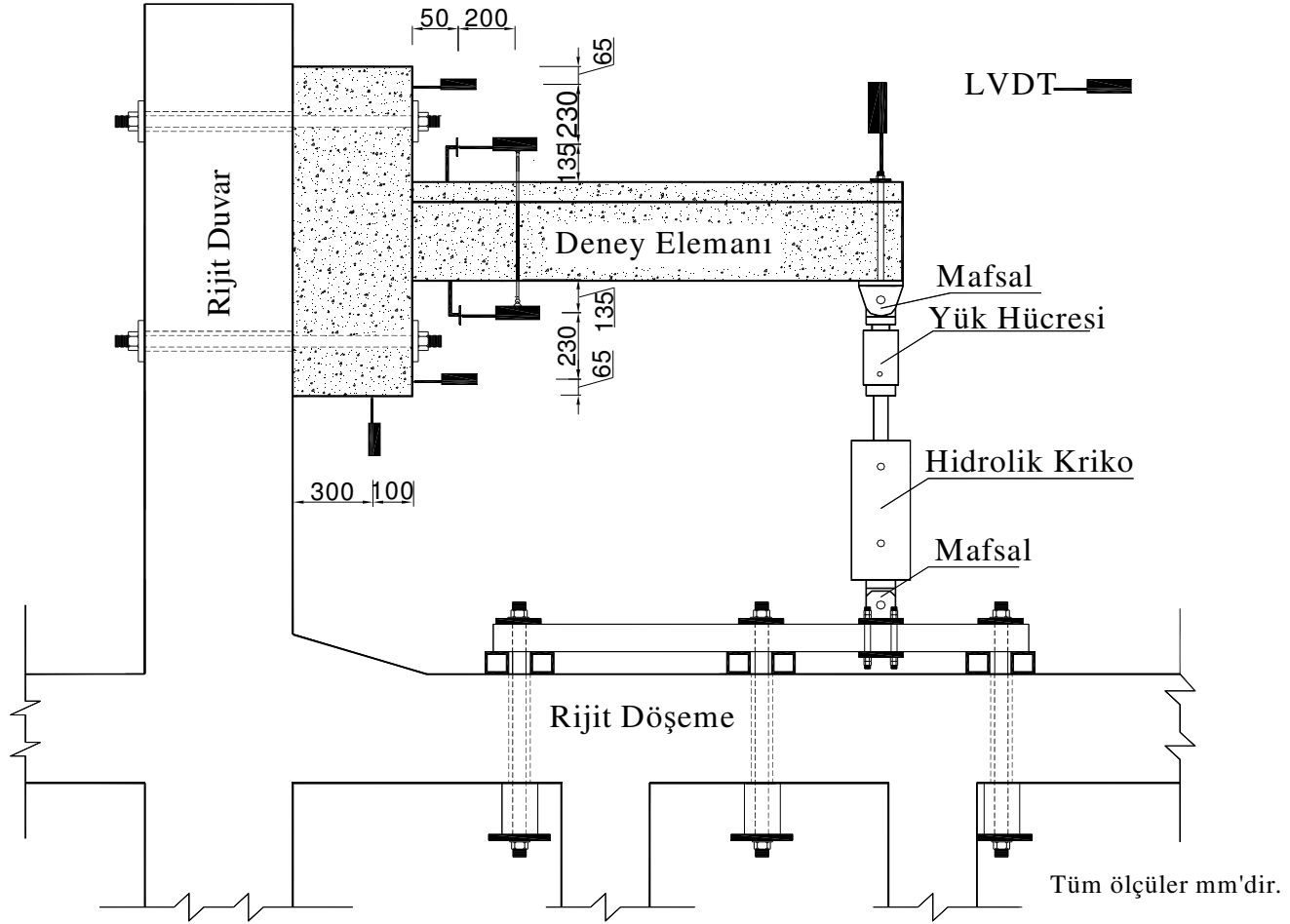
Deney elemanlarına yük, rijit döşeme ile deney elemanı arasında bulunan iki ucu mafsallı bir yükleme kolonu ile uygulanmıştır. Yükleme kolonunda iki mafsal arasında bir hidrolik kriko ve bir yük ölçme hücresi bulunmaktadır. 300 mm'lik genliği sahip hidrolik kriko, 500 kN basınç ve 250 kN çekme kapasitesine sahiptir. Hidrolik krikonun genliği deney elemanına ileri ve geri yönde deplasman yaptıracak şekilde her deneyden önce paylaştırılmıştır. Yük, 500 kN basınç, 300 kN çekme kapasitesine sahip yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Deney programı için üretilmiş yükleme kolonu, Şekil 2.21'de görülmektedir



Şekil 2.21 Yüklem kolonu

Yüklem kolonu deney elemanına, kiriş ucunda beton dökümü sırasında bırakılan 20 mm çapında delikten geçirilen 18 mm çapında yüksek dayanımlı çelik çubuk yardımıyla bağlanmıştır. Çelik çubuk yüklem kolonunun üst kısmında bulunan mafsala vidalanmıştır.

Deneylere yük kontrollü olarak başlanıp elemanın taşıdığı maksimum yükten sonra deplasman kontrollü devam edilmiştir. Yüklem, hidrolik pompa aracılığı ile mümkün olduğu kadar düzenli ve deney sırasında oluşan çatlak gelişimini gözleyecek hızda yapılmıştır. Deney elemanlarının yüklem düzeneği Şekil 2.22’de sunulmuştur



Şekil 2.22 Yükleme ve ölçüm düzeneği

4.6.2 Ölçüm düzeni

Deneyler sırasında deplasman ölçümleri için elektronik deplasman ölçüm aletleri LVDT (Lineer Variable Differential Transformer) ölçerler kullanılmıştır. Elektronik deplasman ölçüm aletleri 0.0001 mm'lik deplasman değişimlerini elektronik olarak ölçebilmektedir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında deplasman ölçümlerini düzenli olarak alan, bilgisayarın sabit hafızasına kaydeden ve istenilen deplasman ölçümünün yüke karşı grafiğini çizerek deneyin takibini kolaylaştıran bir yazılım mevcuttur. Deneylerde kiriş uç deplasmanı ile yükün değişimi bilgisayar ekranında grafik olarak deney süresince izlenmiştir.

Deney elemanlarının ölçümlerinde 6 adet LVDT kullanılmıştır. LVDT'lerle kirişin eğrilik ölçümleri, uç deplasmanı ve kiriş mesnedinin rijit kütle hareketleri ölçülmüştür. Uç deplasmanı, yükleme kolonunun hizasından ve kiriş tablası üzerinden düşey yerleştirilen 200 mm'lik LVDT ile ölçülmüştür. Deney elemanlarının kütle hareketleri için 50 mm ölçüm kapasiteli LVDT'ler kullanılmıştır. Kiriş gövdesine yakın bir bölgeden 2 adet LVDT kullanılarak eğrilik ölçümleri alınmıştır. Ancak eğrilik ölçümlerinde anlamlı veriler toplanamadığı için çalışmada sunulmamıştır. LVDT ölçüm aletlerinin yerleşim düzeni Şekil 2.22'de görülmektedir.

Deneyler sırasında CFRP şeritlerden birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Deney programında 120 ohm'luk 10 mm uzunluğunda standart birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerler yerleştirildikleri doğrultudaki mekanik hareketleri elektronik sinyallere dönüştüren deneysel ölçüm aletleridir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır.

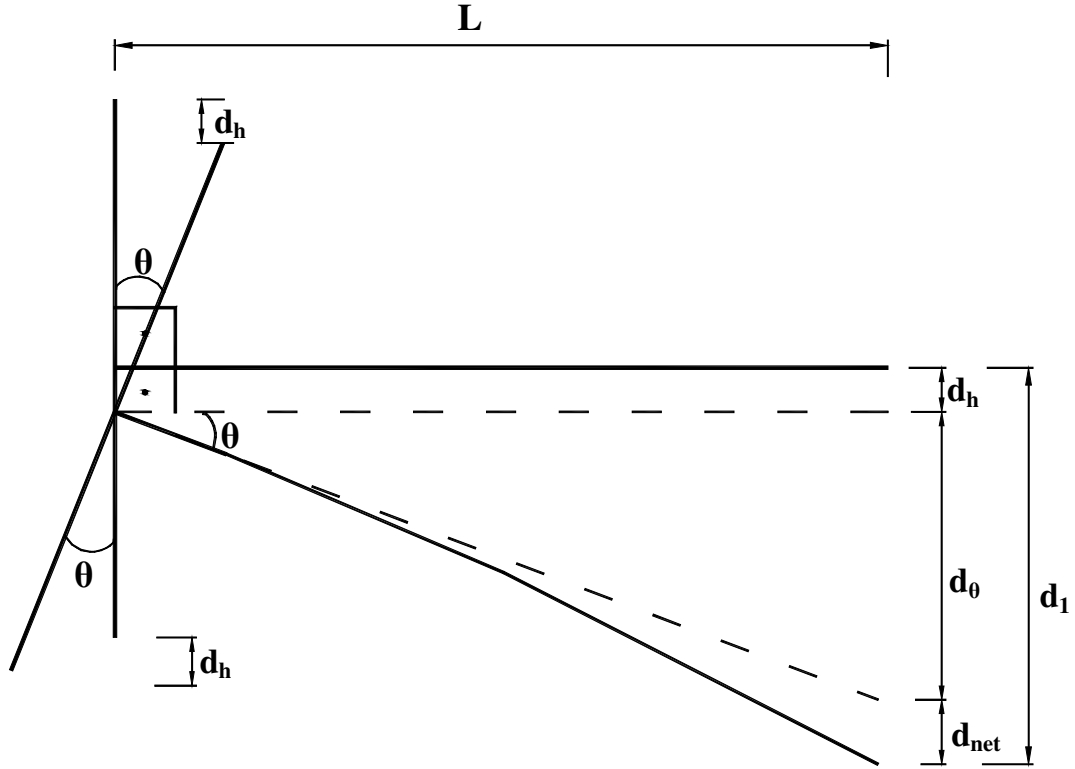
Birim deformasyon ölçerler kiriş gövdesinin yan yüzünde CFRP şeritlerin ortasına yerleştirilmiştir. Model kirişin sadece bir yan yüzünden ölçüm alınmıştır. Birim deformasyon ölçerler CFRP şeritlerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirildikten sonra yapıştırılmıştır. Yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerin dirençleri kontrol edilerek veri toplayıcıya bağlanmıştır.

Gerçekleştirilen ilk deneylerde kiriş gövdesinde çatlakların kiriş mesnedinden 300-1000 mm uzaklıkta yoğunlaştığı gözlenmiştir. Bu nedenle deneysel programda birim deformasyon ölçerler çatlakların yoğunlaştığı bu aralığa yerleştirilmiştir. Ayrıca deney elemanlarında farklı genişlikte ve farklı aralıkta CFRP şerit kullanılması birim deformasyon ölçüm düzenlerinin deney elemanlarında farklılık göstermesine neden olmaktadır. Deney elemanları için birim deformasyon ölçerlerin yerleşim düzenleri Şekil 2.2'den Şekil 2.11'e kadar sunulmuştur.

2.7. Ölçümlerin Değerlendirilmesi

2.7.1 Kiriş deplasman ölçümü

Kiriş uç deplasmanının hesaplanması için kullanılan deformasyon geometrisi Şekil 2.23’de verilmiştir. Kiriş uç net deplasmanı, deney elemanının mesnedinde ölçülen rijit kütle deplasmanları dikkate alınarak (2.3) no’lu bağıntı ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.23 Deney elemanının deformasyon geometrisi

Bağıntıda;

d_4, d_5, d_6 : Kiriş mesnet deplasmanları,

θ : Rijit dönme

d_1 : Ölçülen deplasman

d_h : Kiriş mesnedi rijit deplasmanı

d_θ : Dönmeden oluşan deplasman

d_{net} : Kiriş net deplasmanı

L : Kirişin boyu

h : Mesnette "d4" ve "d5" LVDT'leri arasındaki uzaklıktır.

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

$$d_0 = \frac{d_4 - d_5}{h} \cdot L \quad (2.2)$$

$$d_{net} = d_1 - d_h - d_0 \quad (2.3)$$

2.7.2 Birim Deformasyonların hesaplanması

Deneyler sırasında CFRP şeritlerden 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) no'lu bağıntı kullanılarak birim deformasyona dönüştürülmüştür.

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

V_o : Okunan mili volt değeri

V_i : Uygulanan gerilim

GF : Birim deformasyon faktörü (= 2)

$GAIN$: Kanal kazanç değeri (= 420)

ε : Birim deformasyon değeri

BÖLÜM ÜÇ

DENEYLER

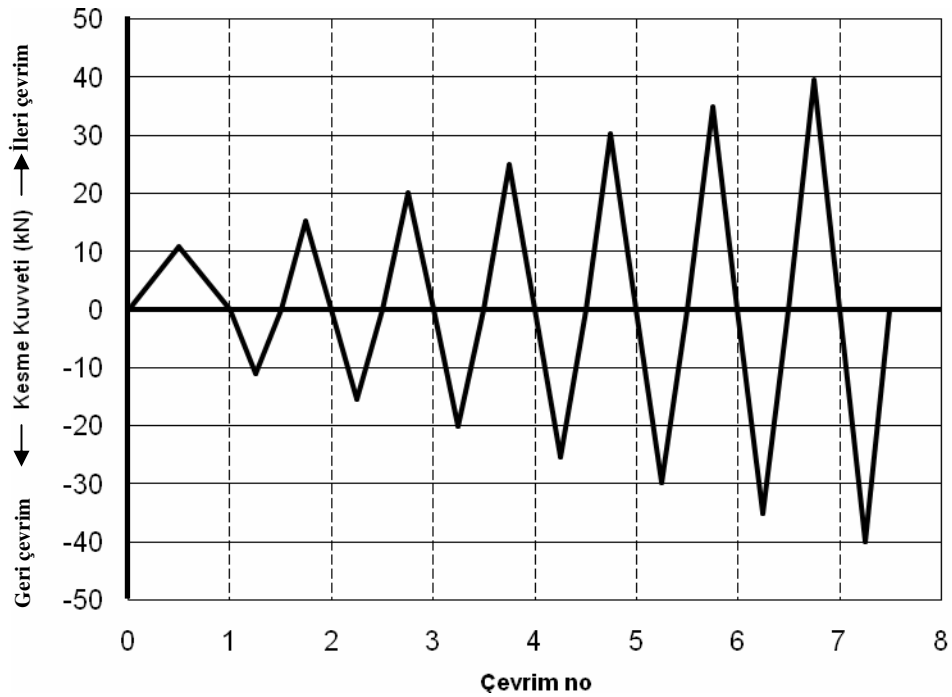
3.1 Genel

Bu bölümde, test sonuçları ve deneysel gözlemler ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Her deney elemanı için yük geçmişi grafikleri, yük-deplasman grafikleri, CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyon grafikleri ve çatlak haritaları verilmiştir.

Yük geçmişi grafikleri deney elemanına uygulanan yük rejimini göstermektedir. Her yarım çevrimde deney elemanına tatbik edilen maksimum yük değerleri bu grafiklerden görülmektedir. Deney elemanlarında gelişen çatlaklar ve göçme şekilleri deneyin anlatımı sırasında ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

3.2 Deney Elemanı-1

Deney Elemanı-1, referans deney elemanıdır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.1’de verilmiştir. Deney elemanına 7 tam yük çevrimi uygulanmıştır.

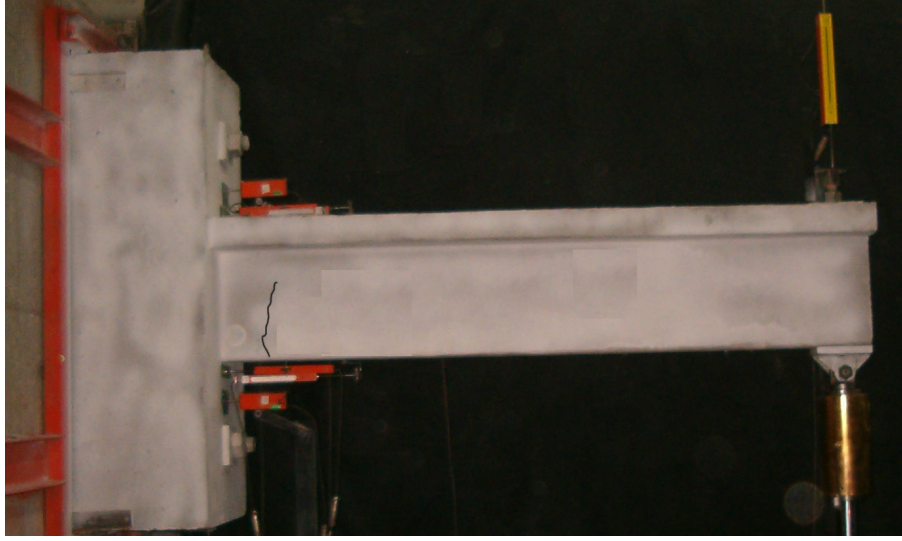


Şekil 3.1 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-1

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

1. çevrim

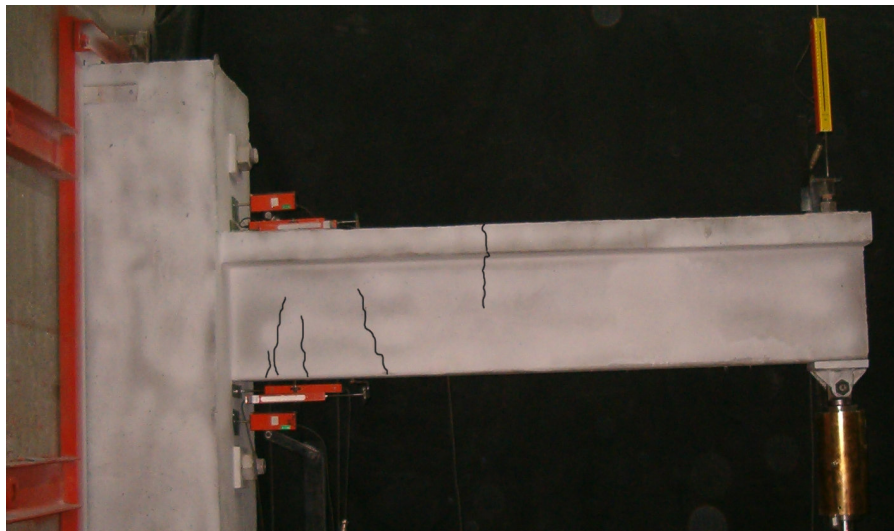
Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak, çevrimin ileri yükleme adımında 10,00 kN yük, 1,45 mm deplasman düzeyinde gelişmiştir.



Şekil 3.2 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-1

2. çevrim

15,00 kN yük, 2,26 mm deplasman düzeyinde kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında 15,41 kN yük, 2,83 mm deplasman ölçülmüştür. Geri yükleme adımında kiriş tablasında, mesnetten 750 mm uzaklıkta, kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir.



Şekil 3.3 İlk eğilme çatlakları, Deney Elemanı-1

4. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 25,00 kN yük, 4,30 mm deplasman ölçülmüştür. Bu yük seviyesinde kiriş gövdesindeki gelişen eğik çatlakların genişliği 0,30 mm seviyesindedir. Çevrimin geri yükleme adımında 25,33 kN yük, 5,88 mm deplasman ölçülmüştür. Bu adımda kiriş tablasında mesnetten 450 uzaklıkta eğilme çatlakları gelişmiştir.

5. çevrim

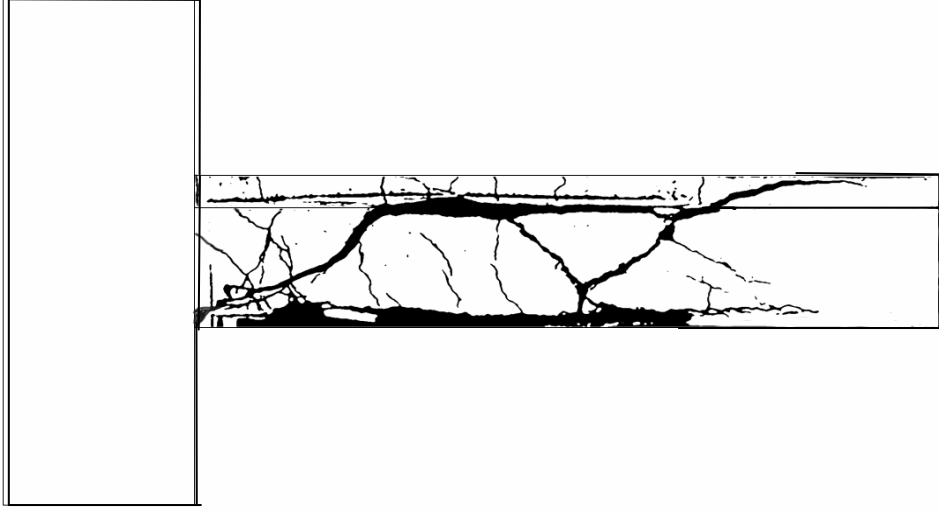
Bu çevrimin ileri yüklemesinde 30,36 kN yük, 5,55 mm deplasman ölçülmüştür. Maksimum yük düzeyinde kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlakların genişliği 0,50 mm, kiriş tablasında gelişen çatlakların genişliği ise 0,30 mm seviyesine ulaşmıştır. Mesnetten 710 mm uzaklıkta kiriş alt boyuna donatısına paralel gelişen çatlak, yükteki artışla bu kesitte gelişimine devam etmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında 29,76 kN yük, 7,41 mm deplasman ölçülmüştür.

6. çevrim

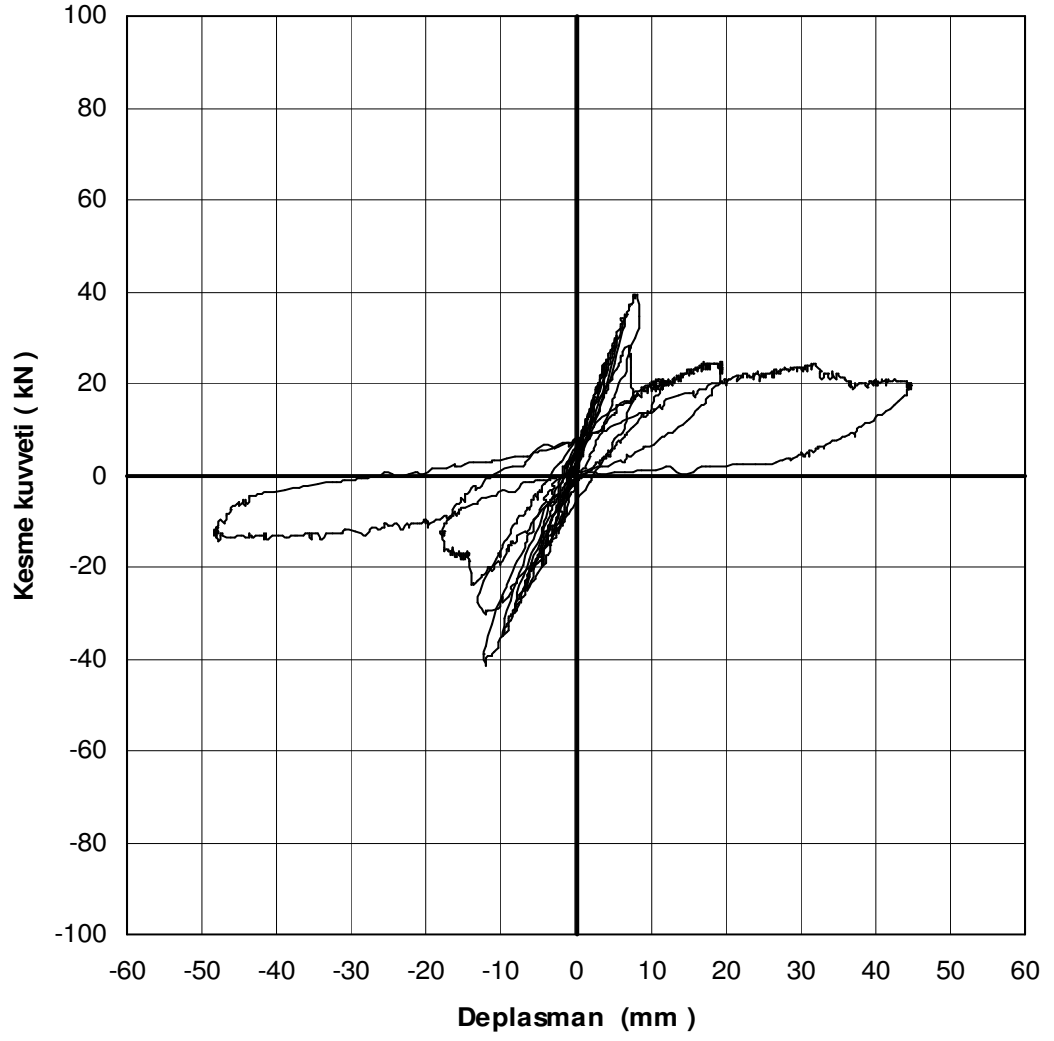
Çevrimin ileri yüklemesinde 35,00 kN yük düzeyinde 6,85 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında kirişin alt ucunda, kirişin mesnetle birleştiği kesitte, başlayan eğik çatlak kiriş tablasına kadar gelişmiştir. Yük 31,00 kN yük seviyesinde kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlakların genişliği 0,60 mm'ye ulaşmıştır.

7. çevrim

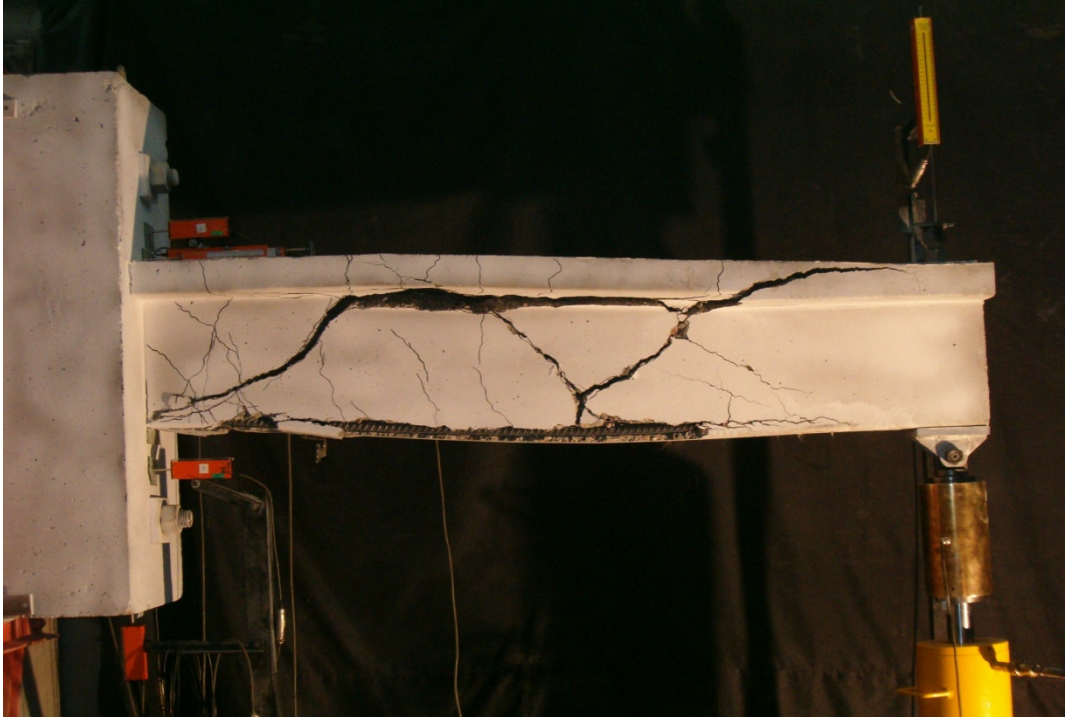
Çevrimin ileri yüklemesinde yük 39,52 kN, deplasmanda 8,71 mm seviyesindeyken gerçekleşen ani yük düşüşü nedeni ile ileri yükleme adımına son verilmiştir. Deney elemanının rijitliğinde de ani düşüş gerçekleşmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında kiriş gövdesinde çok sayıda yeni çatlak gelişmiştir. Gövdede gelişen kesme çatlaklarının genişliği 20,00 mm seviyesine ulaşmıştır. Kiriş kesmeden göçmüştür. Şekil 3.4'de deney sonunda deney elemanından elde edilen çatlak haritası verilmiştir.



Şekil 3.4 Çatlak haritası, Deney Elemanı-1



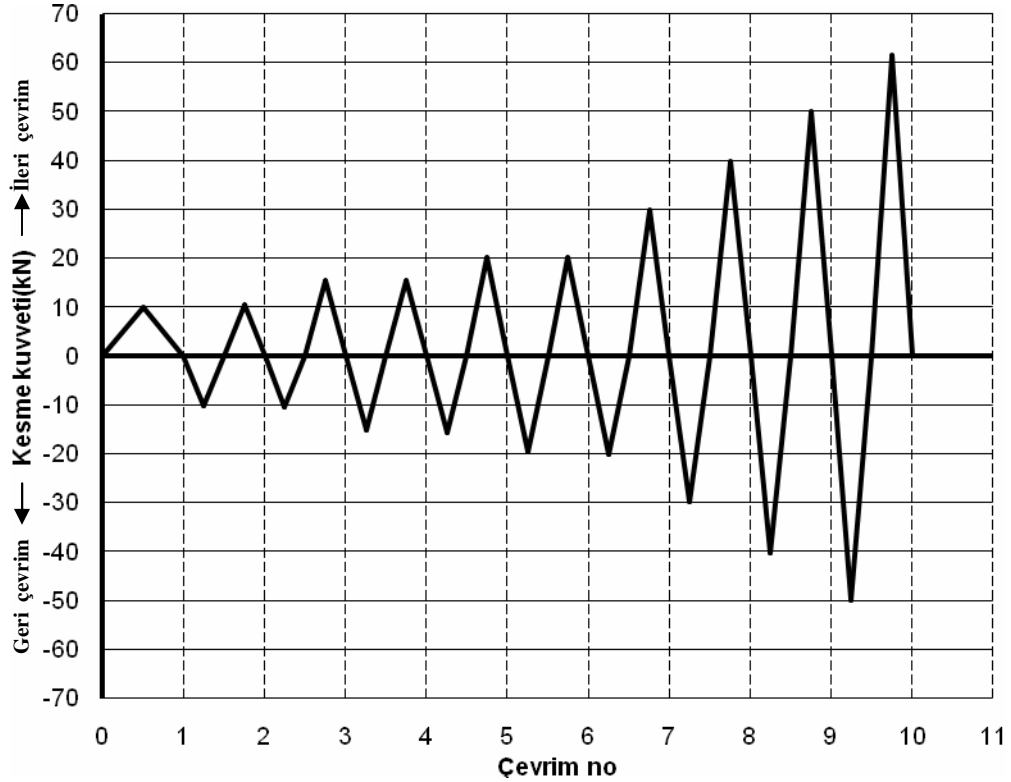
Şekil 3.5 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-1



Şekil 3.6 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-1

3.3 Deney Elemanı-2

Deney elemanında 50 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 16 adet düz CFRP şerit, kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak 60 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.7’de verilmiştir. Deney elemanına 9 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.7 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-2

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

3. çevrim

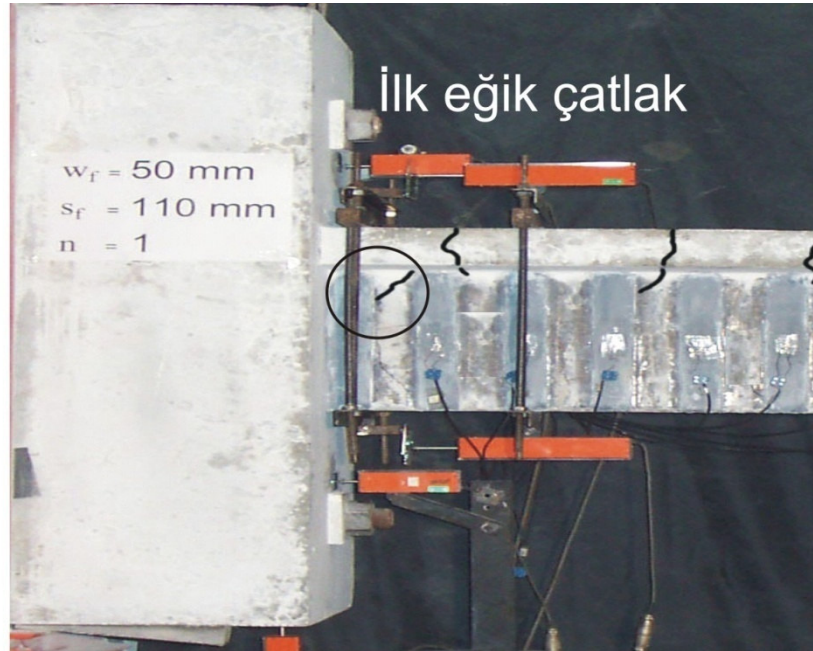
Bu çevrimin ileri yükleme adımında 15,10 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 2,86 mm ölçülmüştür. Deney elemanında ilk eğilme çatlağı kiriş tablasında, mesnetten 800 mm uzaklıkta gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte eğilme çatlağı gelişmiştir.

5. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 20,00 kN yük düzeyinde 4,41 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş alt yüzünde, kirişin mesnede birleştiği kesitte, eğilme çatlağı gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 19,49 kN yük, 4,40 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu çevrimde kiriş tablasında eğilme çatlaklarının sayısı ve genişlikleri artmıştır. Kiriş tablasında ölçülen çatlak genişliği 0,15 mm'dir.

7. çevrim

Bu çevrimin ileri yüklemesinde 29,87 kN yük düzeyinde ölçülen kiriş uç deplasmanı 6,86 mm'dir. 15,65 kN yük, 3,42 mm deplasman seviyesinde kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak, 1. ve 2. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir. Çatlak, 1 no'lu birim deformasyon değerinde ani olarak %15 oranında artışa neden olmuş, birim deformasyon 0,0002 mm/mm'ye ulaşmıştır. 7.çevrimin maksimum yük düzeyinde 2 ve 3 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0001 mm/mm ve 0,00002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 3.8 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-2

8. çevrim

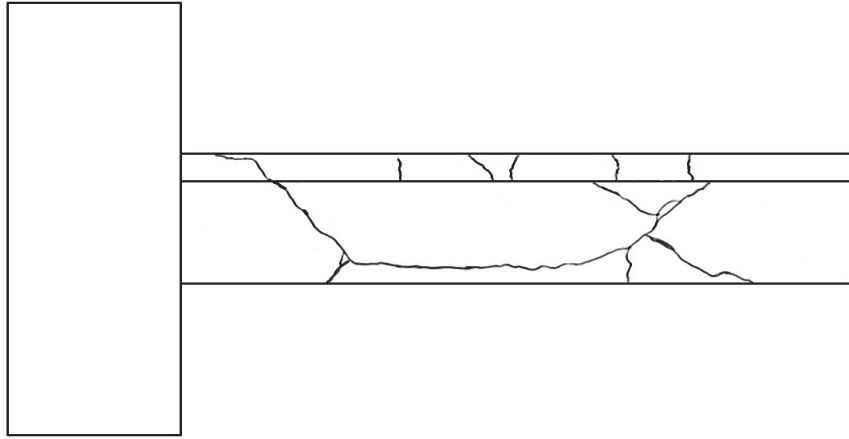
Bu çevrimin ileri yükleme adımında 39,72 kN yük düzeyinde ölçülen kiriş uç deplasmanı 9,76 mm'dir. Kiriş gövdesinde 2. ve 3. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Maksimum yük seviyesinde 2 ve 3 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %200 oranında artmış, birim deformasyon değerleri sırasıyla 0,0003 mm/mm ve 0,0001 mm/mm'ye ulaşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, tüm birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00008 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında 40,31 kN yük, 10,08 mm deplasman ölçülmüştür. 26,00 kN yük düzeyinde 1. ve 2. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır.

9. çevrim

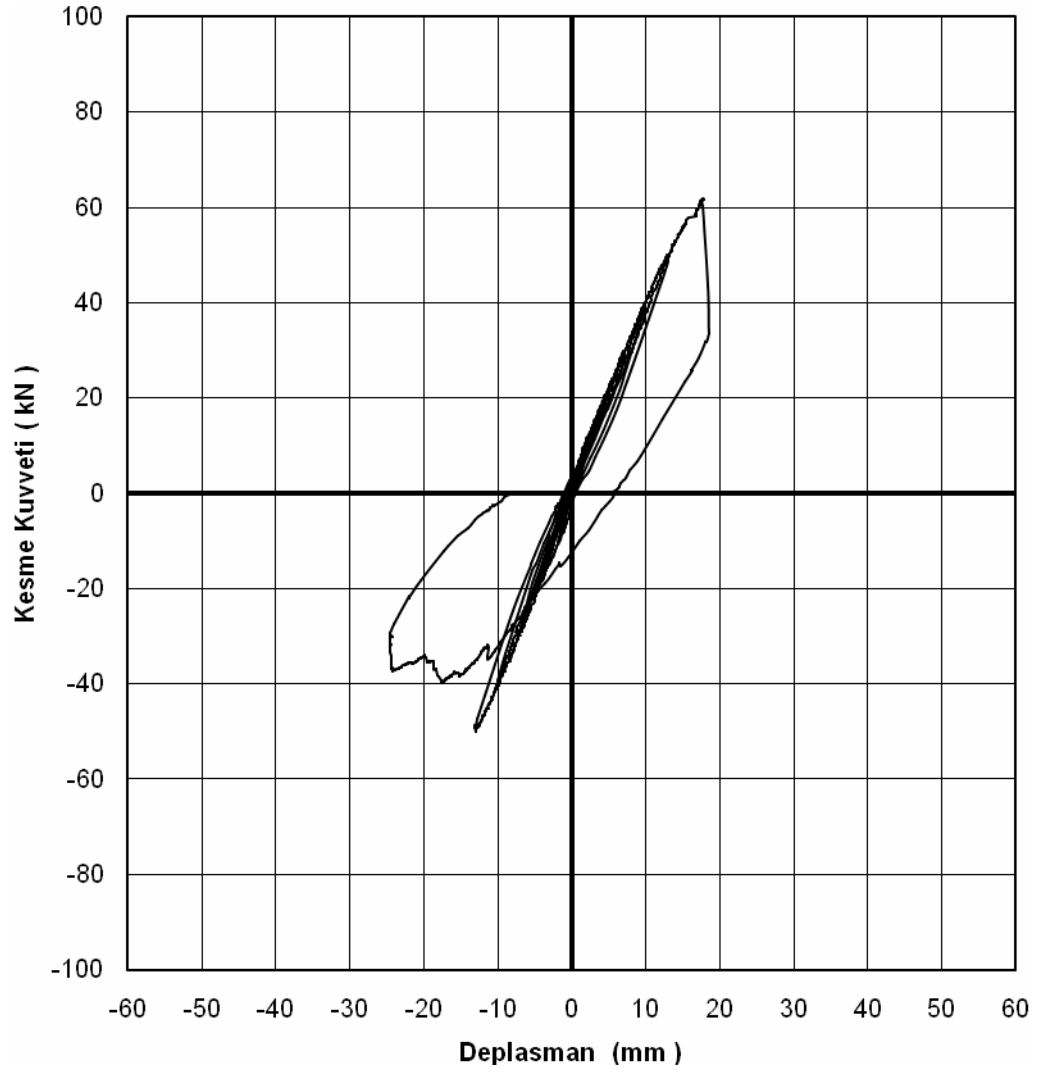
Çevrimin ileri yüklemesinde 50,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 12,86 mm'dir. 2. ve 3. CFRP şeritler arasında gelişen çatlak genişliği bu çevrimde artmış, 2 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %100 oranında artarak 0,0006 mm/mm'ye ulaşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 2 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,0002 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,000012 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında 50,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 13,43 mm'dir. Çevrimde, 5. ve 6., 8. ve 9. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Çatlaklar ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. 7 ve 8 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %100 oranında artmıştır. 1 ve 2, 2 ve 3 no'lu CFRP şeritler arasındaki çatlağın genişliğindeki artış, maksimum yük seviyesinde 1 ve 2 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %500 oranında artırmıştır. Birim deformasyon değerleri sırasıyla 0,0003 mm/mm ve 0,0001 mm/mm'ye ulaşmıştır. Bu çevrimde kiriş tablasında ölçülen çatlak genişliği 0,25 mm'dir. Kiriş gövdesinde ölçülen çatlak genişliği ise 0,10 mm'dir.

10. çevrim

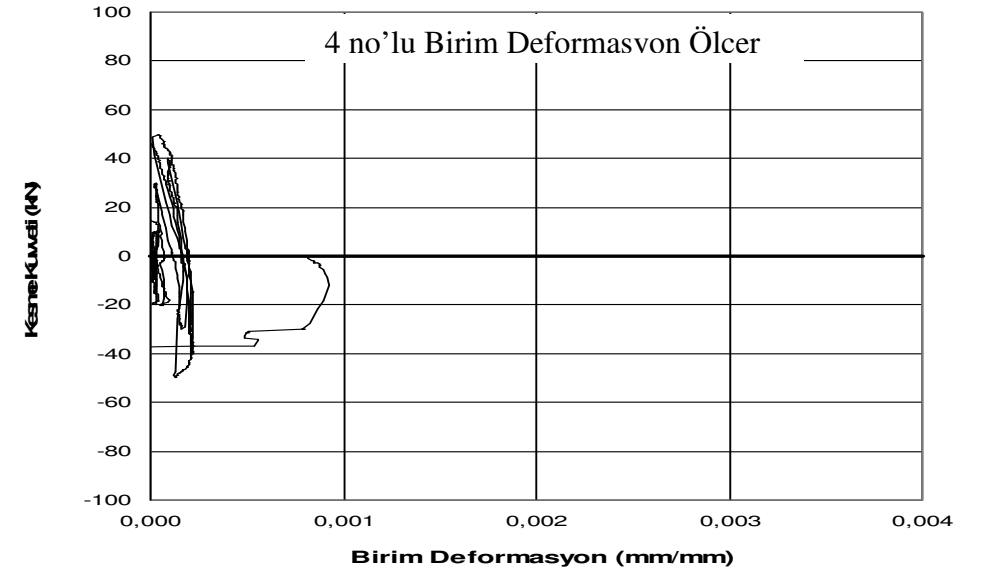
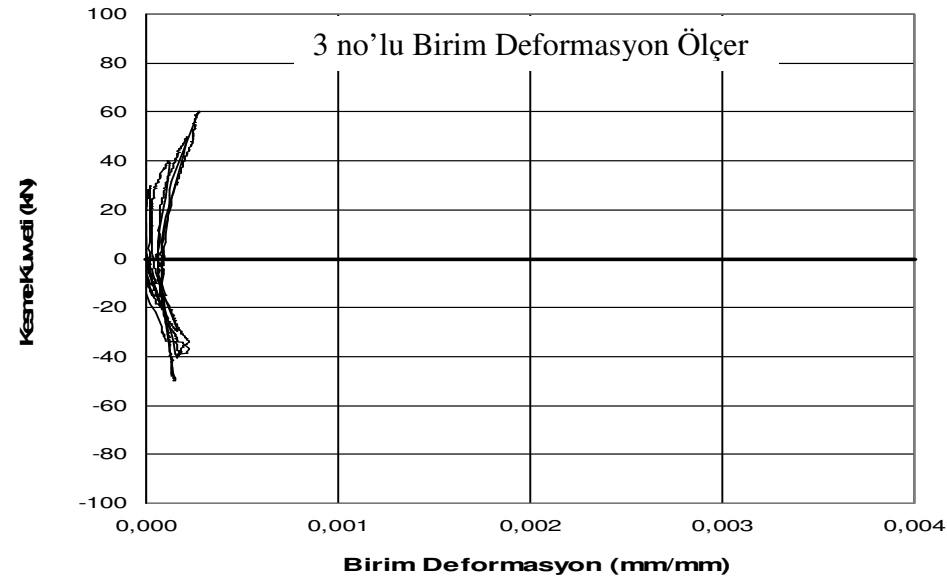
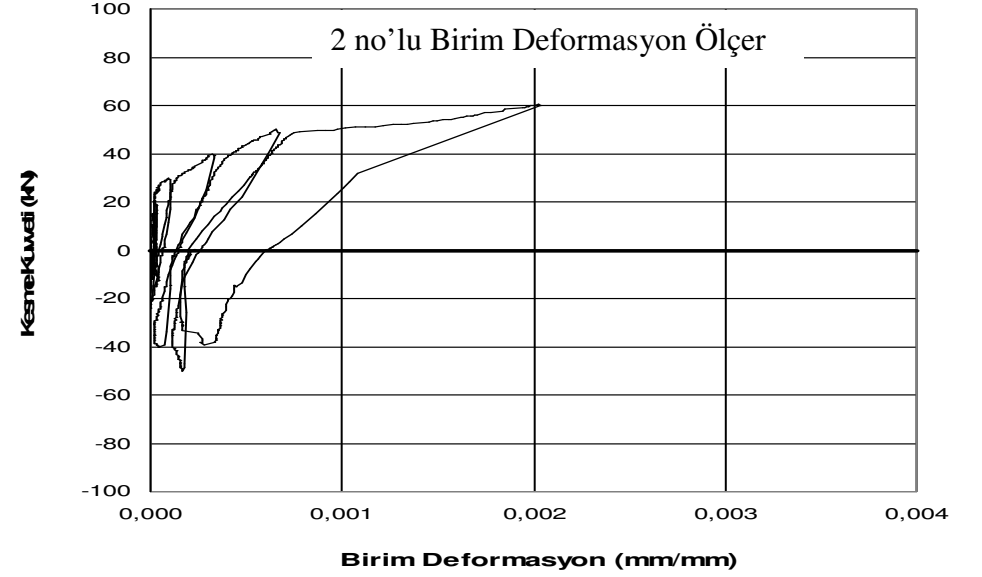
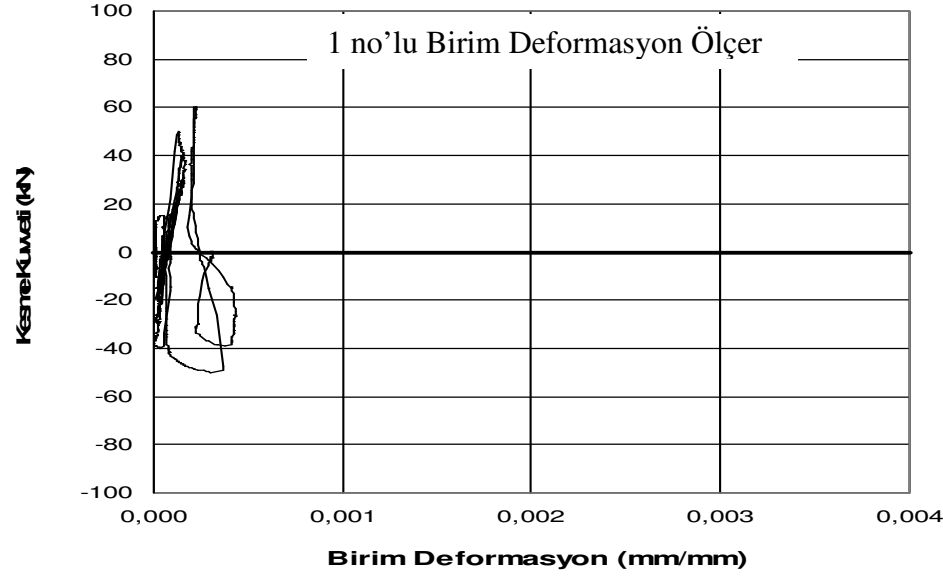
Çevrimde 65,00 kN yük düzeyine çıkılması planlanmıştır. Çevrimin ileri yüklemesinde 50,00 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlaklarının sayısı ve genişlikleri artmıştır. 58,00 kN yük düzeyinde 4 no'lu birim deformasyon değeri %50 oranında artmış, 60,00 kN yük düzeyinde aniden %20 oranında azalmıştır. 58 kN yük seviyesinde 2 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüş, diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 60,00 kN yük düzeyinde 5 no'lu CFRP şerit üst ucundan, beton yüzeyinden ayrılmıştır. 61,63 kN yük seviyesinde 7, 8 ve 9 no'lu CFRP şeritler alt uçlarından, beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrıldığı sırada 4. CFRP şeridin üst ucunda gelişen çatlak, 5, 6 ve 7 no'lu şeritleri diyagonal doğrultuda kesmiştir. Deney Elemanı-2, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlakları nedeni ile göçmüştür. Deney elemanında maksimum 0,002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



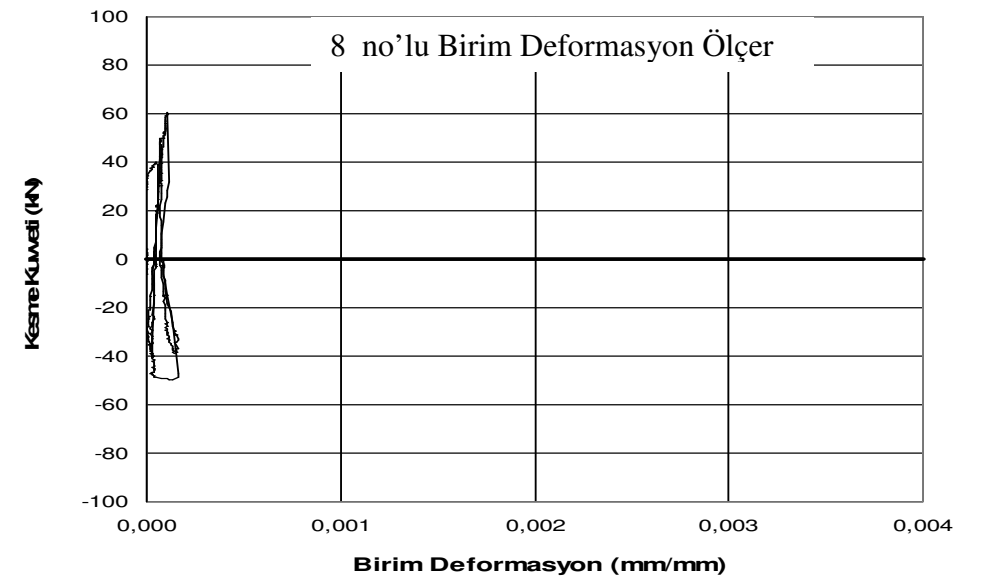
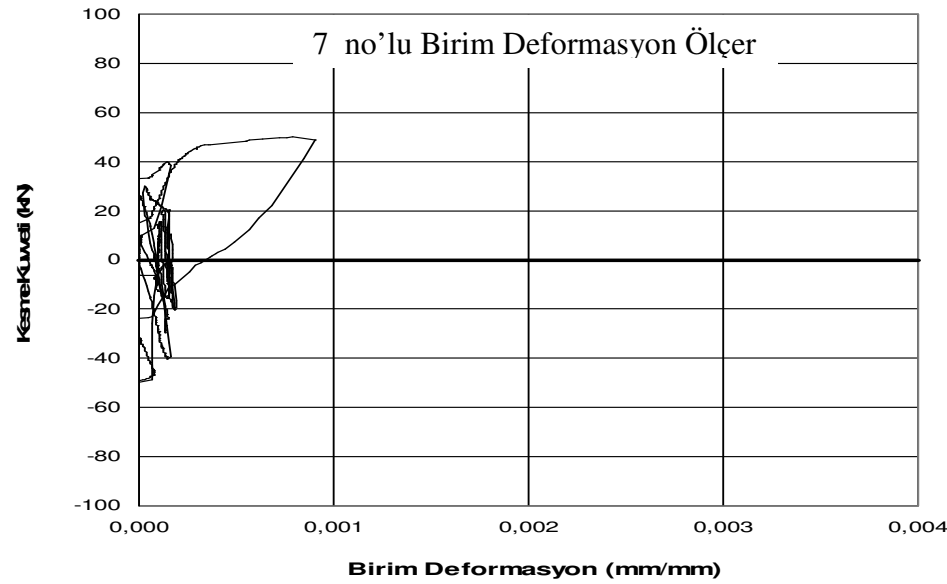
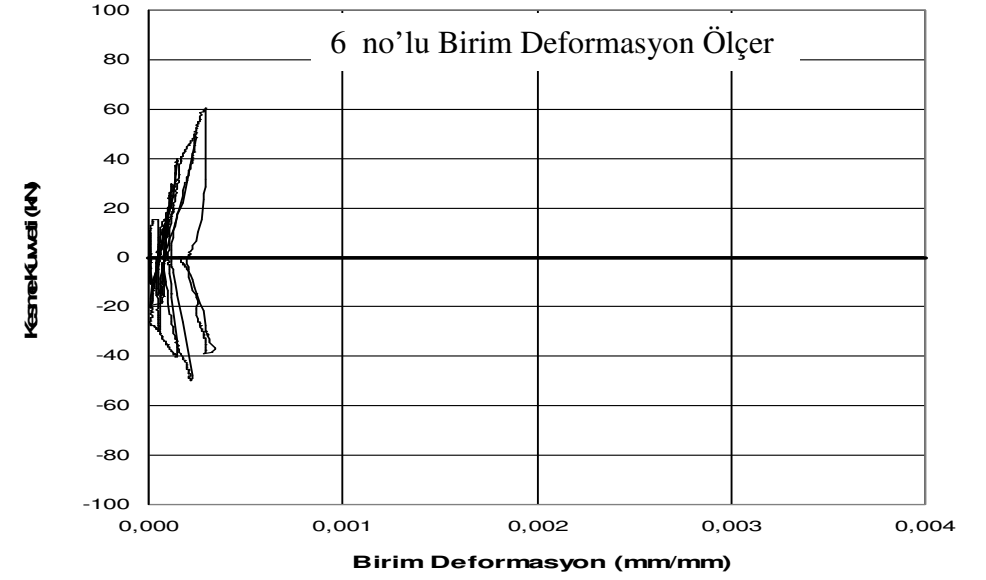
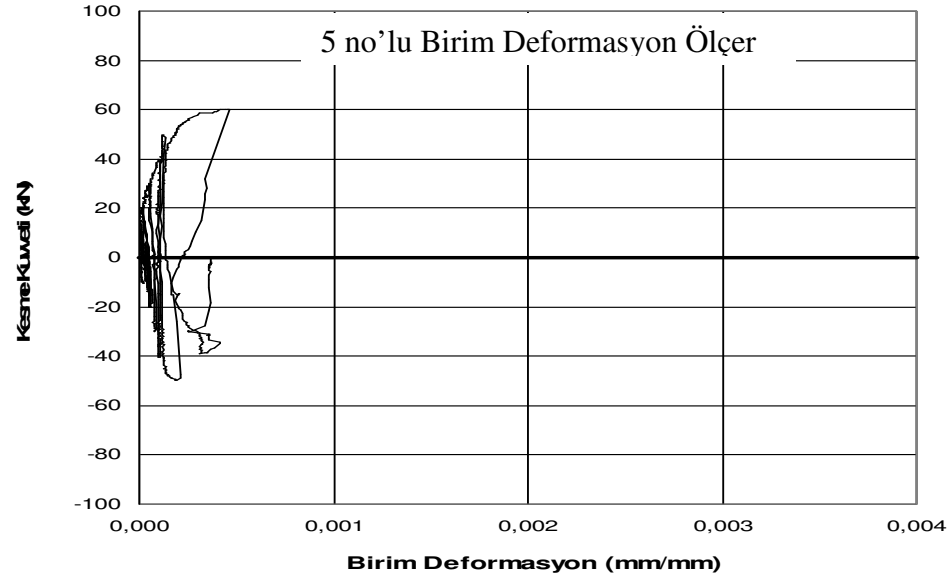
Şekil 3.9 Çatlak haritası, Deney Elemanı-2



Şekil 3.10 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-2



Şekil 3.11 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-2



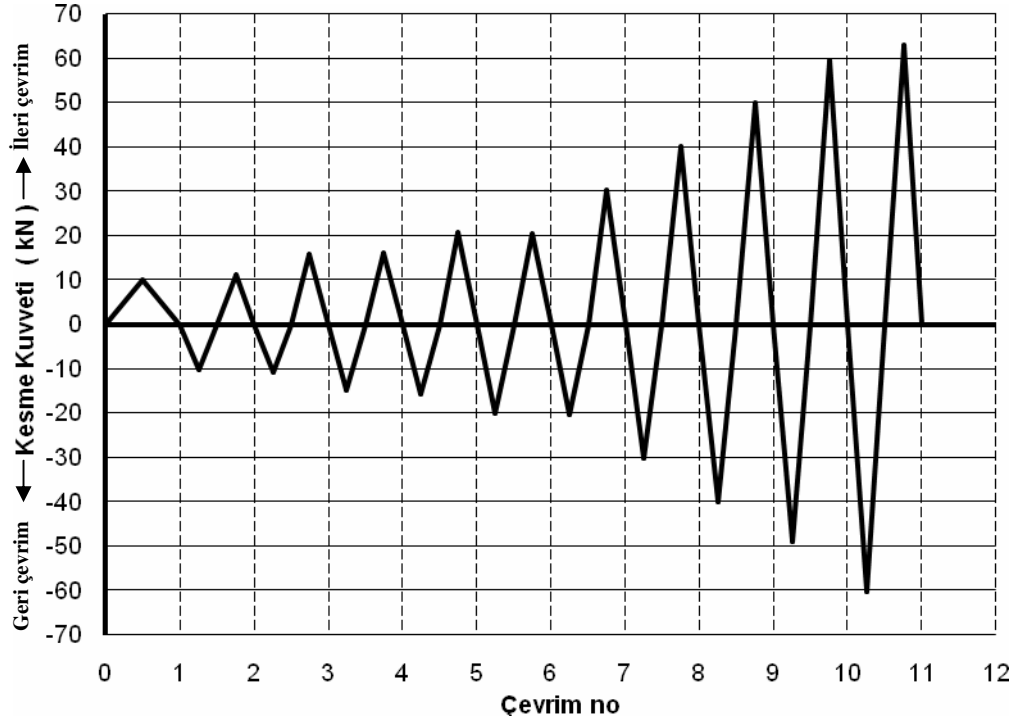
Şekil 3.12 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-2



Şekil 3.13 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-2

3.4 Deney Elemanı-3

Deney elemanında 50 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 22 adet CFRP düz şerit, kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak 30 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.14’de verilmiştir. Deney elemanına 10 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.14 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-3

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

1. çevrim

Bu çevrimin ileri yükleme adımı 10,07 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 1,43 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 10,00 kN yük düzeyinde kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte eğilme çatlağı gelişmiştir.

3. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 15,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 2,40 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 14,83 kN yük düzeyinde kiriş uç

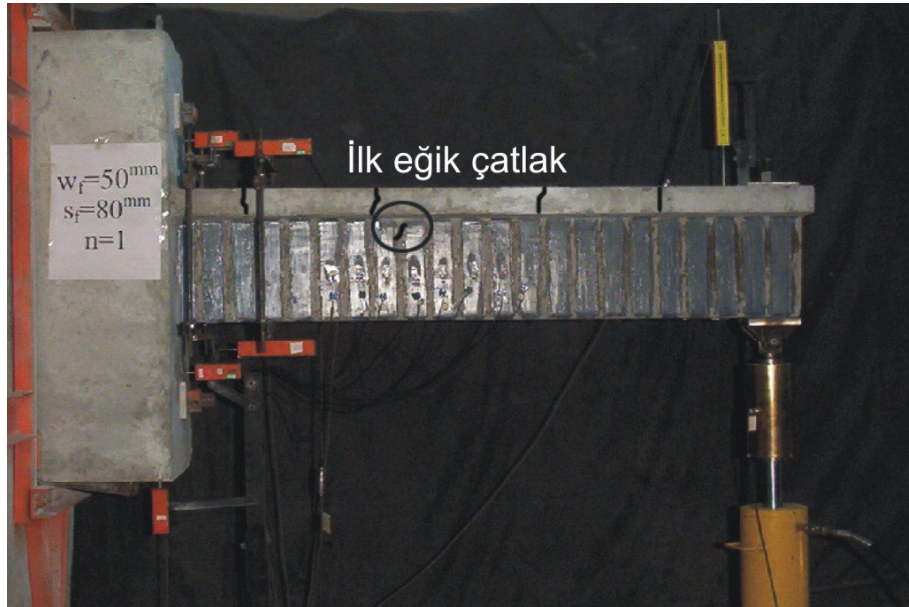
deplasmanı 2,90 mm'dir. Bu adımda kiriş tablasında mesnetten 250 mm uzaklıkta eğilme çatlakları gelişmiştir.

5. çevrim

20,00 kN yük düzeyine çıkılan çevrimin ileri yüklemesinde, kirişin mesnede birleştiği kesitte eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 20,13 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 4,15 mm'dir. Bu çevrimde kiriş tablasında önceki çevrimlerde gelişen eğilme çatlaklarının sayısı ve genişlikleri artmıştır. Kiriş tablasında ölçülen çatlak genişliği 0,10 mm'dir.

8. çevrim

Bu çevrimin ileri yüklemesinde 40,15 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 7,84 mm ölçülmüştür. Kiriş alt yüzünde gelişen çatlakların genişliği 0,20 mm'dir. Çevrimin geri yüklemesinde 40,15 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 10,08 mm'dir. Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak 8. ve 9. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir. Çatlak ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Bu çevrimde kiriş tablasında gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine ulaşmıştır. Tablada gelişen eğilme çatlaklarının genişliği 0,20 mm'dir.



Şekil 3.15 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-3

9. çevrim

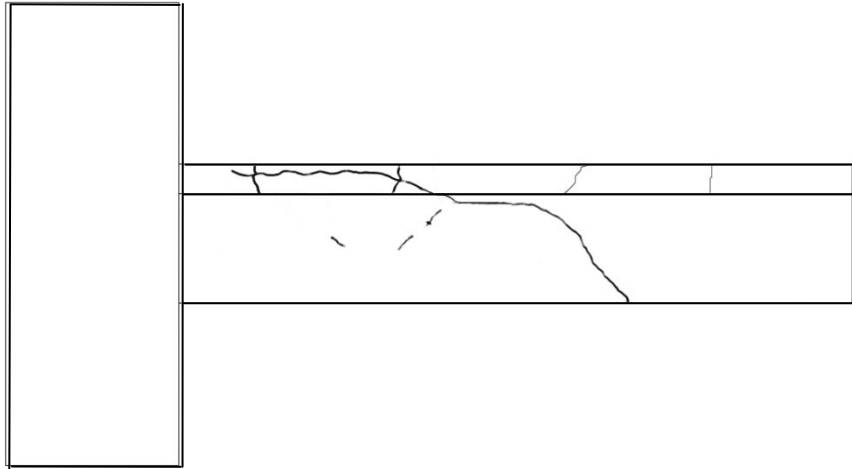
50,00 kN yük düzeyine çıkılan çevrimin ileri yüklemesinde, 33,00 kN yük düzeyinde, 13. ve 14. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak, 8 no'lu birim deformasyon değerini ani olarak %10 oranında artırmış, birim deformasyon 0,0004 mm/mm'ye ulaşmıştır. Çevrimin maksimum yük düzeyinde 8 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %120 oranında artmış, birim deformasyon 0,0009 mm/mm'ye ulaşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 7 ve 8 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0002 mm/mm ve 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00007 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında 49,05 kN yük düzeyinde, 12,99 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimde 7. ve 8. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak nedeni ile 2 ve 3 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %200 oranında artmış, sırasıyla 0,0004 mm/mm ve 0,0001 mm/mm'ye ulaşmıştır.

10. çevrim

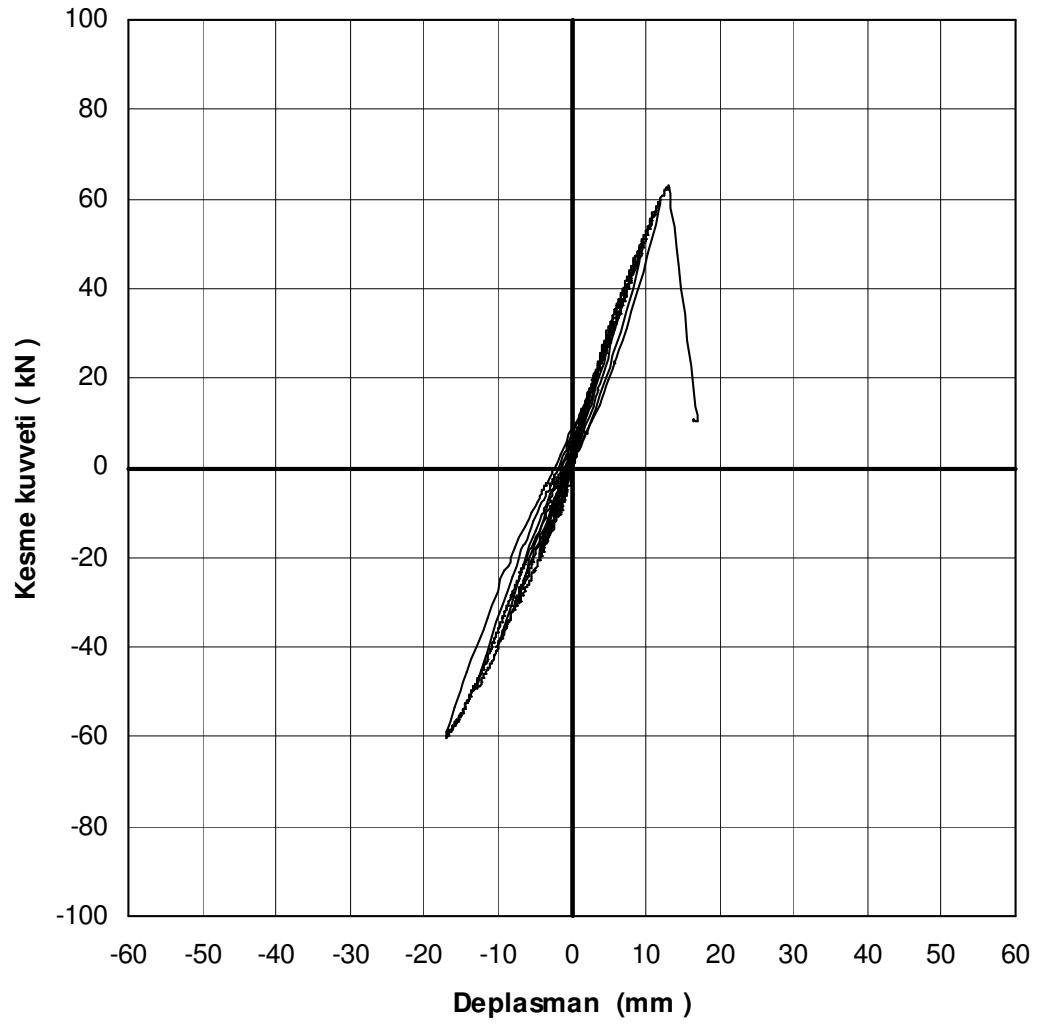
Çevrimin ileri yükleme adımında 59,57 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 13,04 mm'dir. 50,00 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinde gelişen çatlakların sayısında ve genişliklerinde artış gözlenmiştir. 55,00 kN yük düzeyinde 13. ve 14. CFRP şeritler, üst uçlarından, beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrıldığı sırada birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değişikliği gerçekleşmemiştir. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 1 ve 8 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,001 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00016 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında 60,17 kN yük düzeyinde 17,29 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Tablada gelişen çatlakların genişlikleri 0,25 mm'dir. 2 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,0015 mm/mm, diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

11. çevrim

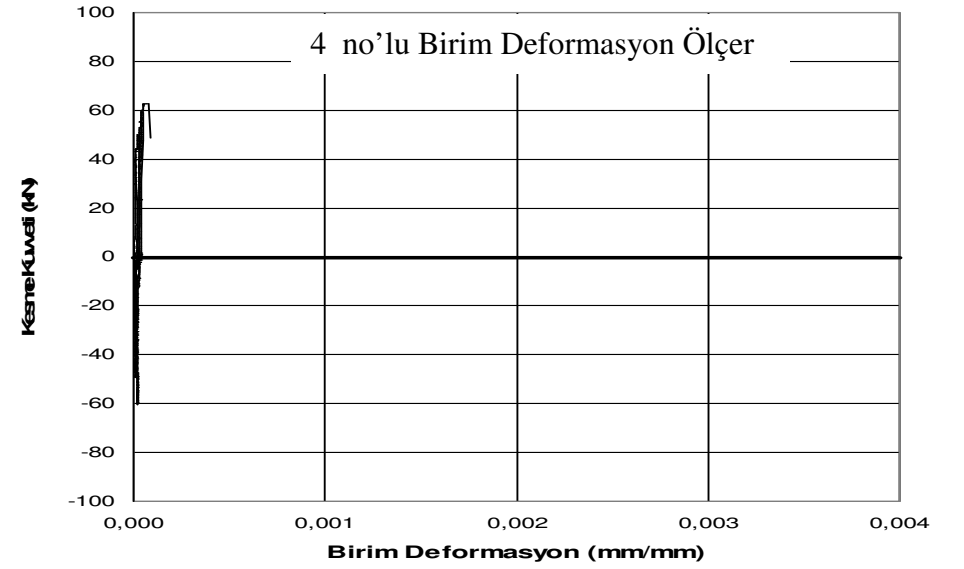
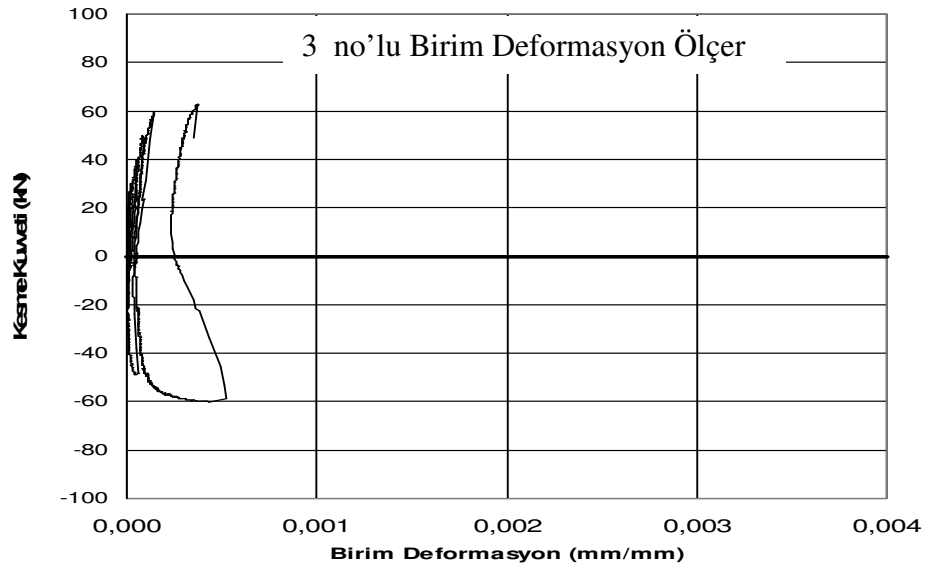
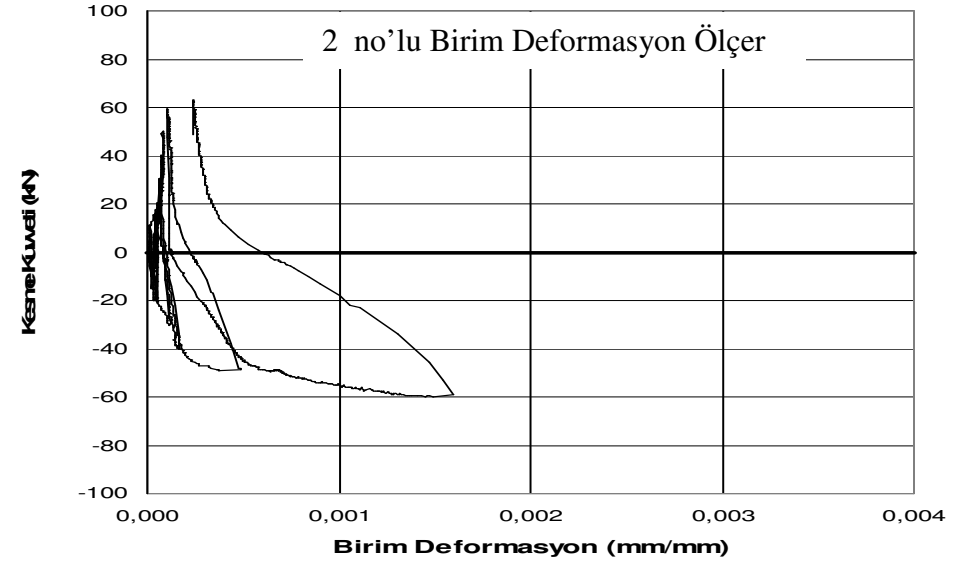
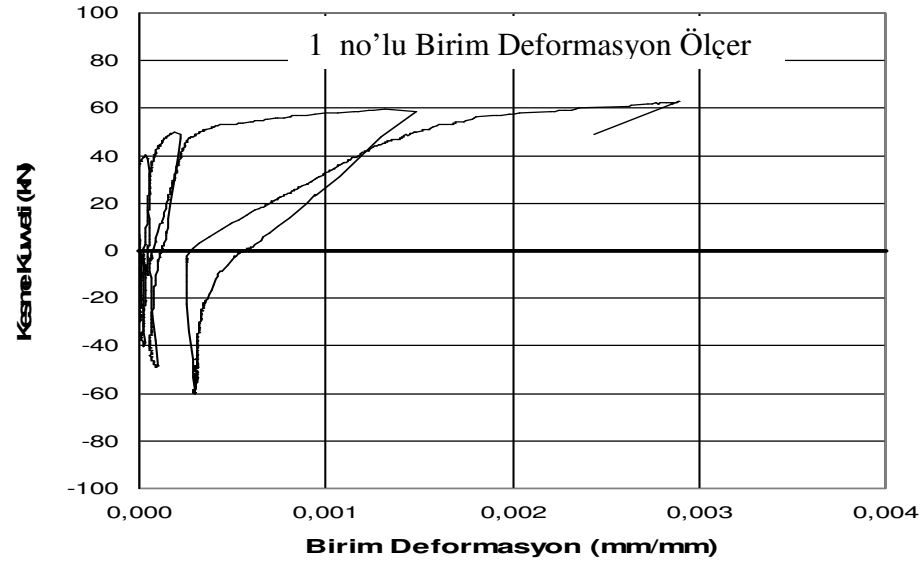
Çevrimde 70,00 kN yük düzeyine çıkılması planlanmıştır. 63,00 kN yük düzeyinde 1 ve 8 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0028 mm/mm ve 0,003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu yük düzeyinde, 13. CFRP şerit üst ucundan, 14. ve 15. CFRP şeritlerde alt uçlarından beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrıldığı sırada 8 no'lu birim ölçerde %20 oranında azalma gerçekleşmiştir. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra, 12. CFRP şeridin üst ucundan başlayan çatlak, 13. CFRP şeridi diyagonal doğrultuda keserek, 14. CFRP şeridin alt ucuna ulaşmıştır. Deney Elemanı-3, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile kesmeden göçmüştür.



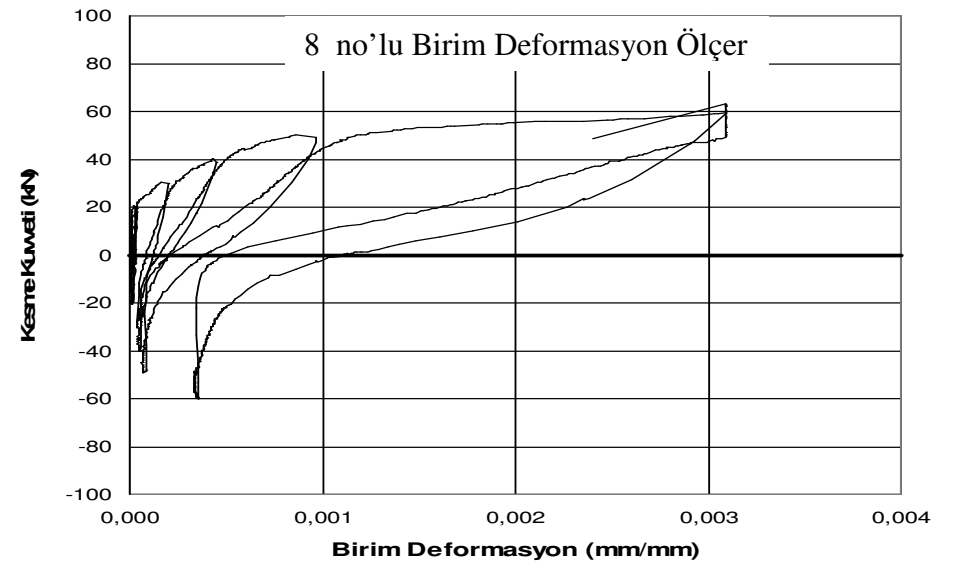
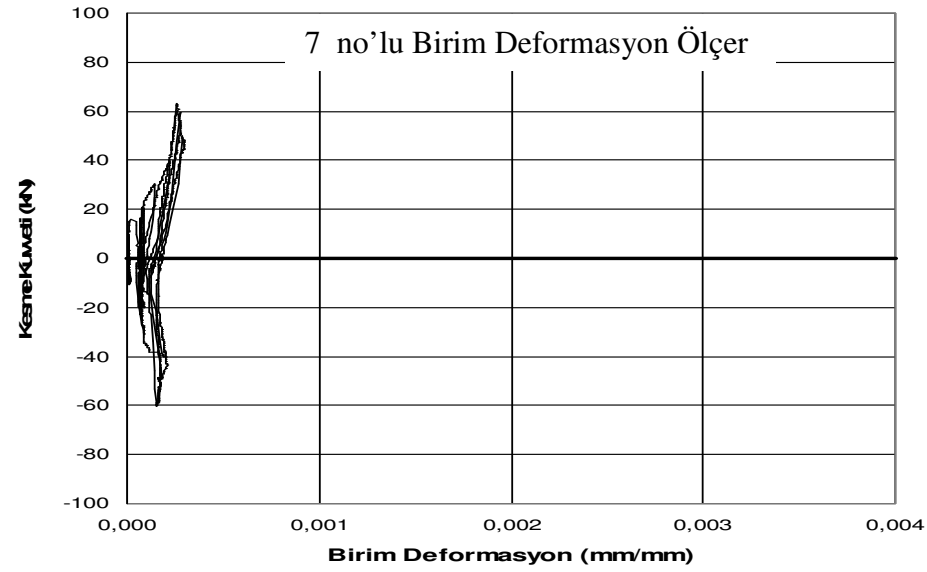
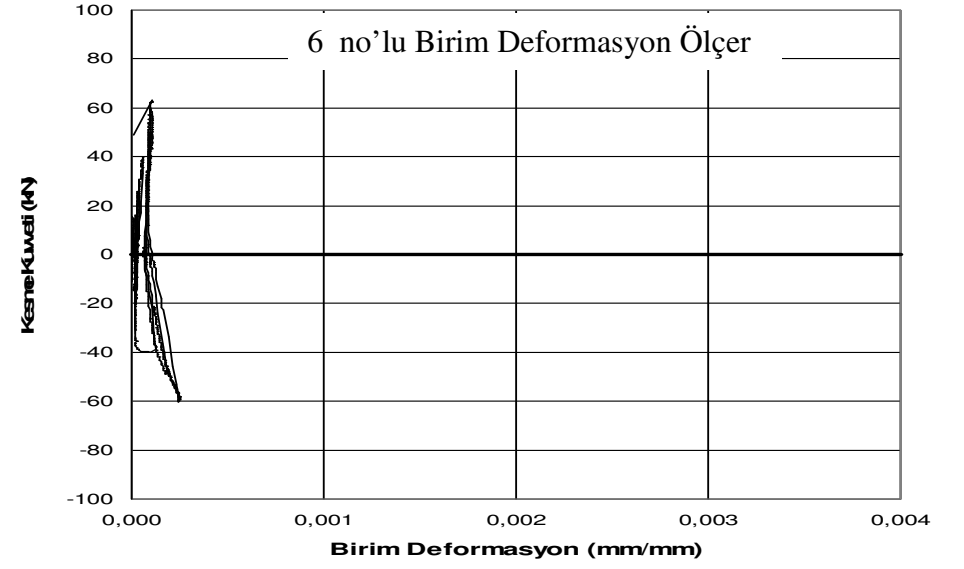
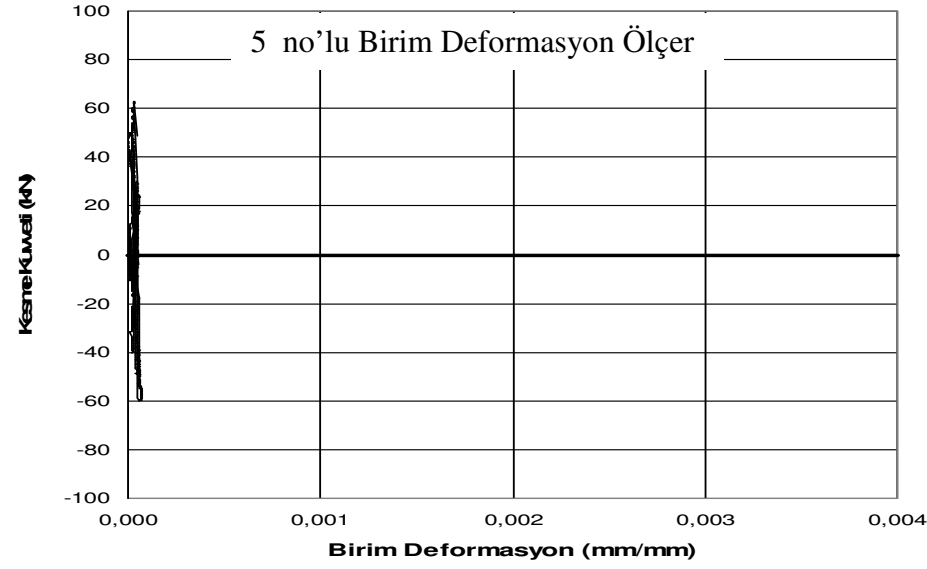
Şekil 3.16 Çatlak haritası, Deney Elemanı-3



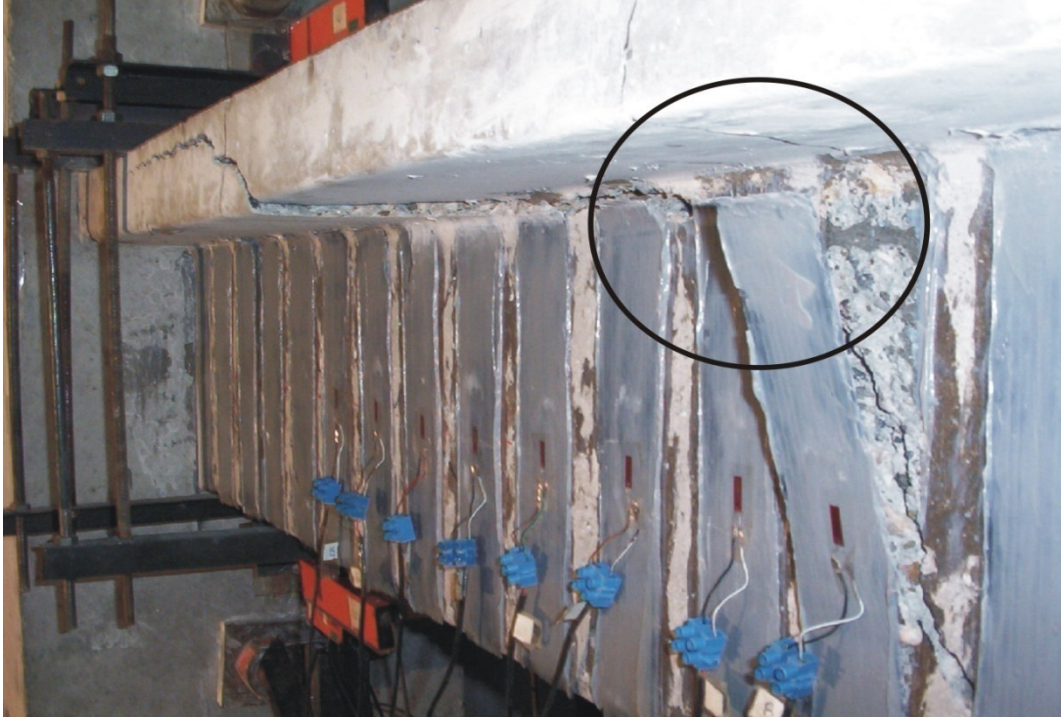
Şekil 3.17 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-3



Şekil 3. 18 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-3



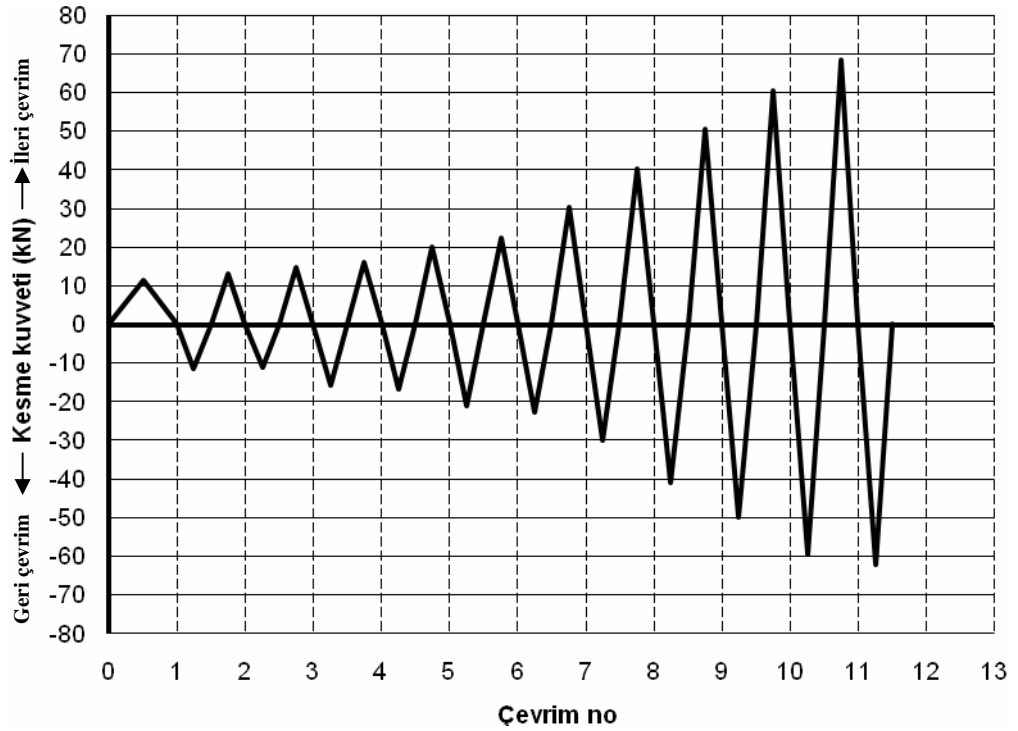
Şekil 3. 19 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-3



Şekil 3.20 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-3

3.5 Deney Elemanı-4

Deney elemanında 50 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 22 adet düz CFRP şerit, kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.21’de verilmiştir. Deney elemanına 11 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.21 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-4

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

2. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 12,92 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 2,15 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında kiriş tablasında, mesnetten 1100 mm uzaklıkta, kılcal düzeyde ilk eğilme çatlağı gelişmiştir.

4. çevrim

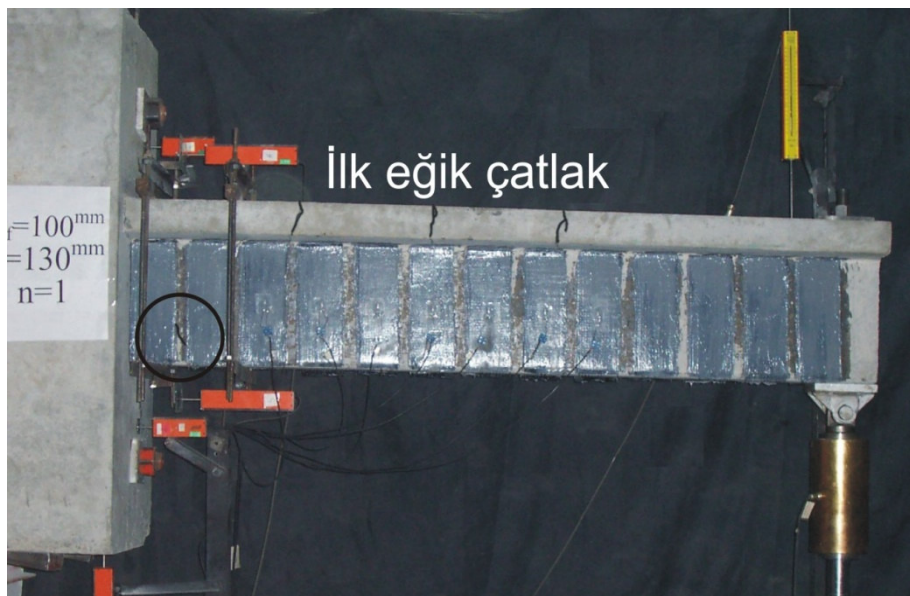
Çevrimin ileri yükleme adımında 15,89 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 2,92 mm'dir. 10,00 kN yük düzeyinde kiriş alt yüzünde, kirişin mesnede birleştiği kesitte, eğilme çatlağı gelişmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte eğilme çatlağı gelişmiştir.

7. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 30,30 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 6,03 mm ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzünde gelişen eğilme çatlaklarının genişliği 0,10 mm'ye ulaşmıştır. Çevrimin geri yükleme adımında maksimum 30,09 kN yük düzeyinde çıkılmıştır. Bu yük düzeyinde 6,36 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasında mesnetten 500 mm uzaklıkta eğilme çatlağı gelişmiştir. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,15 mm'dir.

8. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 40,25 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 8,51 mm'dir. Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak 1. ve 2. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir.



Şekil 3.22 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-4

Çevrimde 4. ve 5. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak, ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Bu yük seviyesine kadar kiriş gövdesinde gelişen tüm çatlaklar kılcal düzeyde olup, CFRP şeritler arasında gelişmiştir. Tablada gelişen eğilme çatlakların genişlikleri 0,20 mm'dir.

9. çevrim

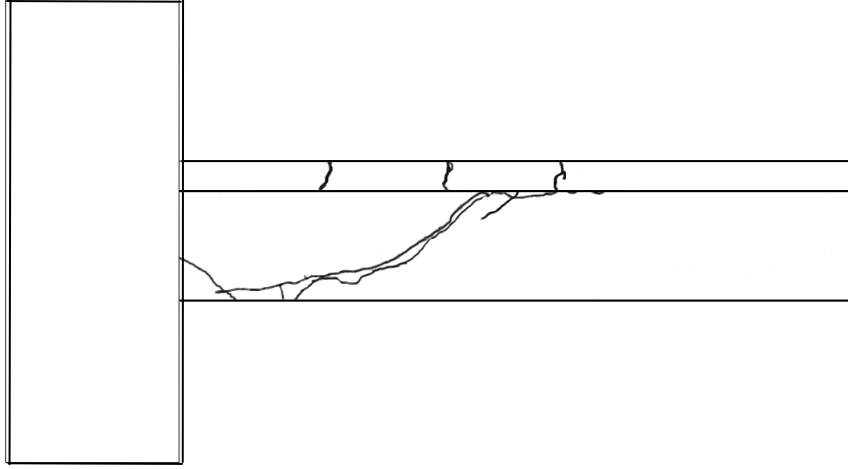
Çevrimin ileri yükleme adımında 50,44 kN yük düzeyinde, 11,13 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzünde kılcal düzeyde gelişen eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. Maksimum yük seviyesinde 5, 6 ve 7 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %110 oranında artmış, sırasıyla 0,0015 mm/mm, 0,0001 mm/mm ve 0,0003 mm/mm'ye ulaşmıştır. Çevrimin geri yüklemesinde 50,44 kN yük, 12,29 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür.

10. çevrim

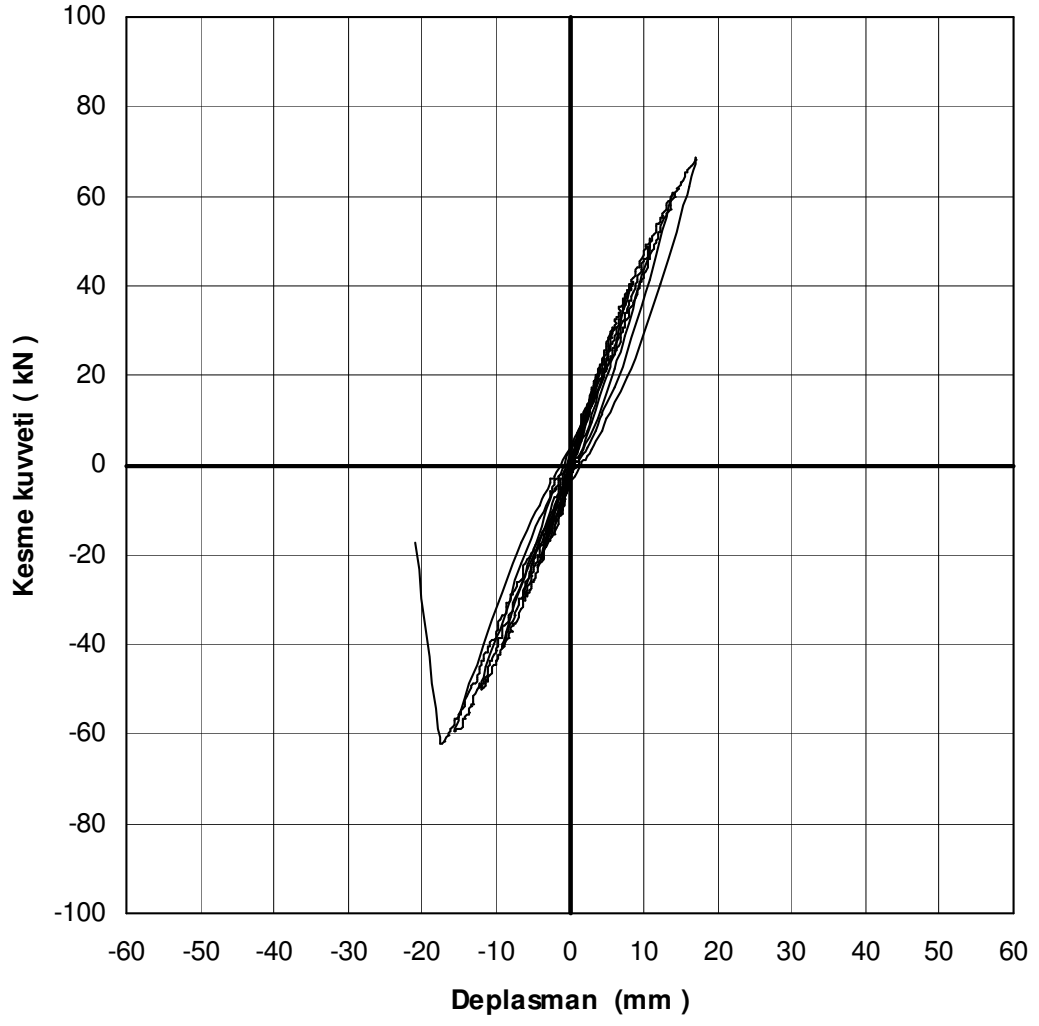
Çevrimin ileri yüklemesinde 60,65 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 14,59 mm ölçülmüştür. Bu çevrimde 2. ve 3. CFRP şeritlerin arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. Kiriş alt yüzünde ve kiriş gövdesinde gelişen çatlakların genişlikleri bu çevrimde artmıştır. Çatlakların genişliklerinin artması 2, 3, 5 ve 7 no'lu birim deformasyon değerlerini bir önceki çevrime göre %160 oranında artırmış, sırasıyla 0,0004 mm/mm, 0,0025 mm/mm, 0,0035 mm/mm ve 0,003 mm/mm'ye ulaşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 3 ve 5 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,0004 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00008 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında 59,53 kN yük, 16,04 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Tablanın kiriş gövdesi ile birleştiği kesitte, mesnetten 250 mm uzaklıkta başlayan çatlak, mesnetten 350 mm'ye kadar kılcal düzeyde gelişmiştir. Çatlak nedeni ile 5 no'lu birim deformasyon değeri ani olarak %130 oranında artmış, 0,0021 mm/mm'ye ulaşmıştır.

11. çevrim

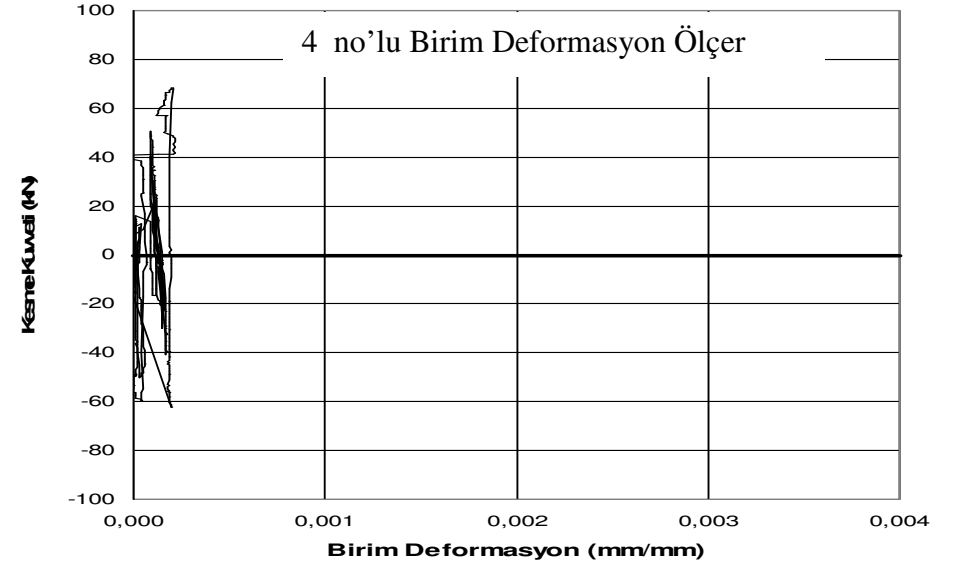
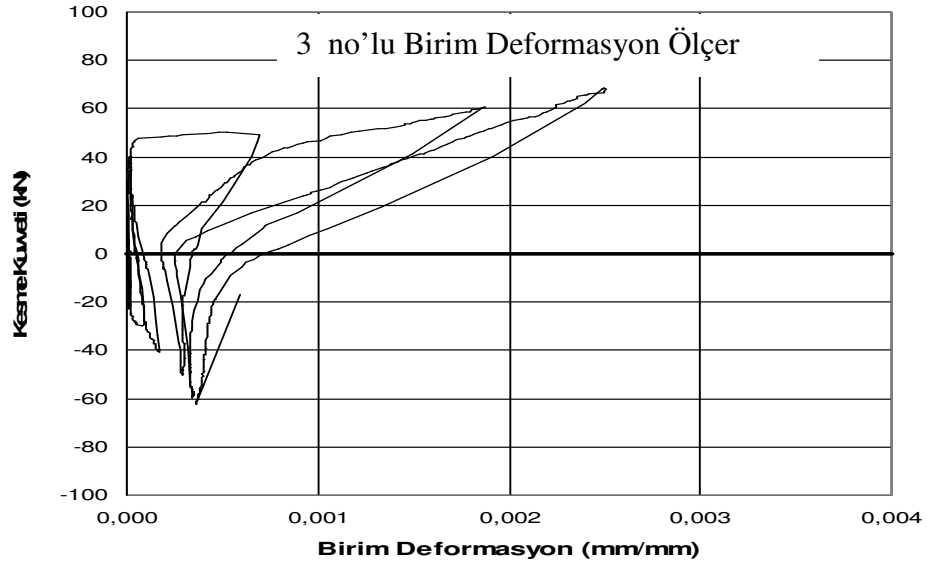
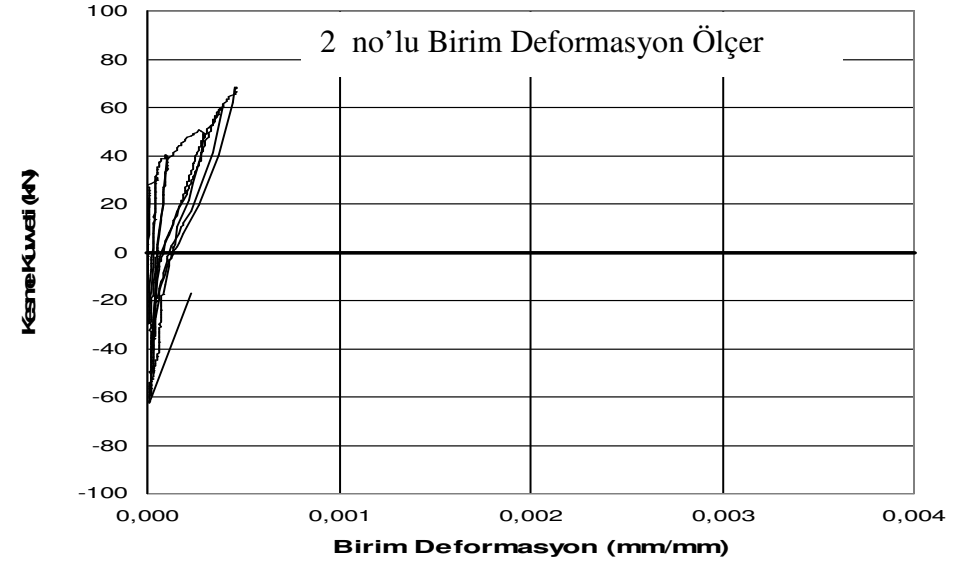
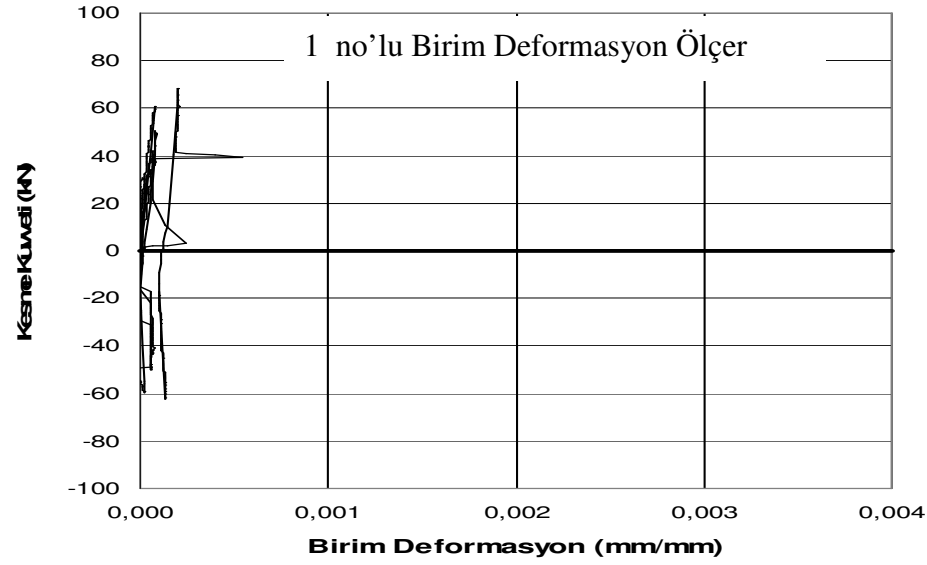
Bu çevrimde 70,00 kN yük düzeyine çıkılması planlanmıştır. 48,00 kN yük düzeyinde, 5 no'lu birim deformasyon ölçerde bir önceki çevrimin maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değeri ölçülmüştür. 50,00 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinin alt yüzündeki eğilme çatlaklarının sayısı ve genişliği artmış, kirişin mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,25 mm'ye ulaşmıştır. 68,00 kN yük düzeyinde 3, 5 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0023 mm/mm, 0,0035 mm/mm ve 0,0030 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde maksimum 0,0005 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 68,00 kN yük düzeyinde, 6. CFRP şerit alt ve üst ucunu beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeridin alt ve üst ucunun beton yüzeyinden ayrıldığı sırada 4 no'lu birim deformasyon değeri aniden %20 oranında düşmüştür. Bu sırada 3, 5 ve 7 no'lu birim deformasyon değerleri de sırasıyla 0,0019 mm/mm, 0,0032 mm/mm ve 0,0021 mm/mm'ye kadar azalmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde değişiklik gözlenmemiştir. İleri yükleme adımına 6. CFRP şeridin beton yüzeyinden ayrılması nedeni ile son verilmiştir. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 5 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,0013 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Geri yüklemede 63,00 kN yük düzeyinde 6. şeridin üst ucundan başlayan, 5. şeridi diyagonal doğrultuda keserek 4. şeridin alt ucuna ulaşan çatlak nedeniyle kiriş ani ve sesli olarak kesmeden göçmüştür. Çatlak, 4 no'lu CFRP şeridi alt ucundan, 6 no'lu CFRP şeridi de üst ucundan betonda bozunum yaratarak ayırmıştır. Ana kesme çatlağı geliştiği sırada tüm birim deformasyon değerlerinde %15 oranında ani düşüş gerçekleşmiştir.



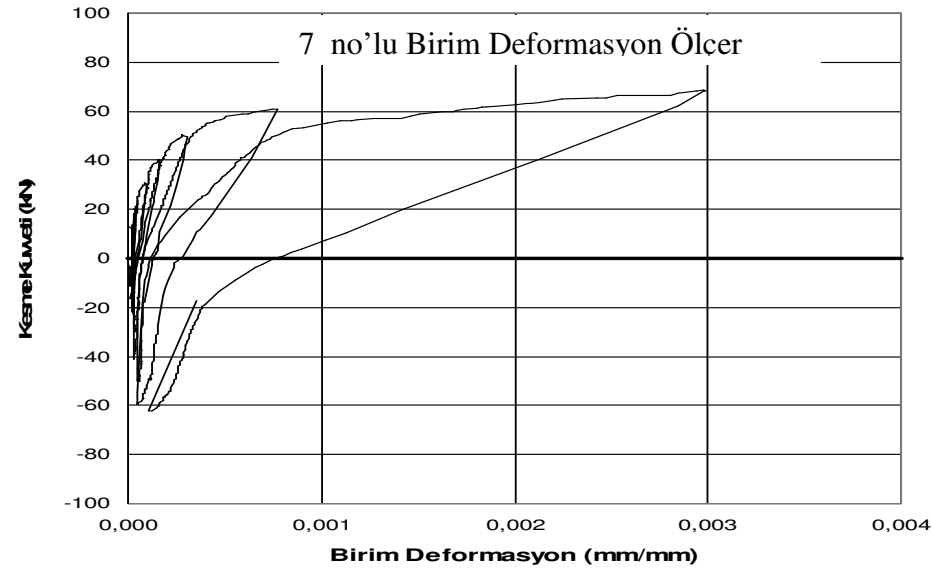
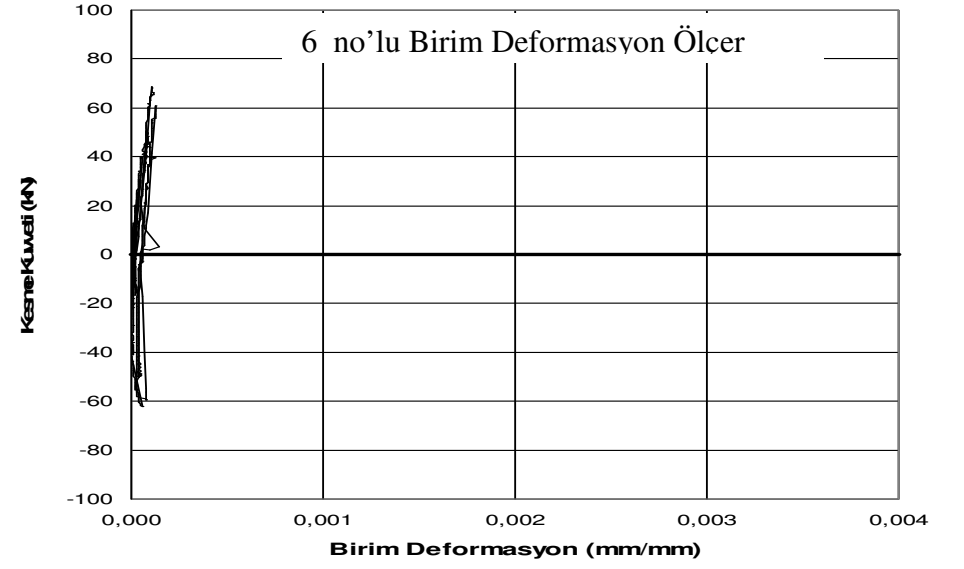
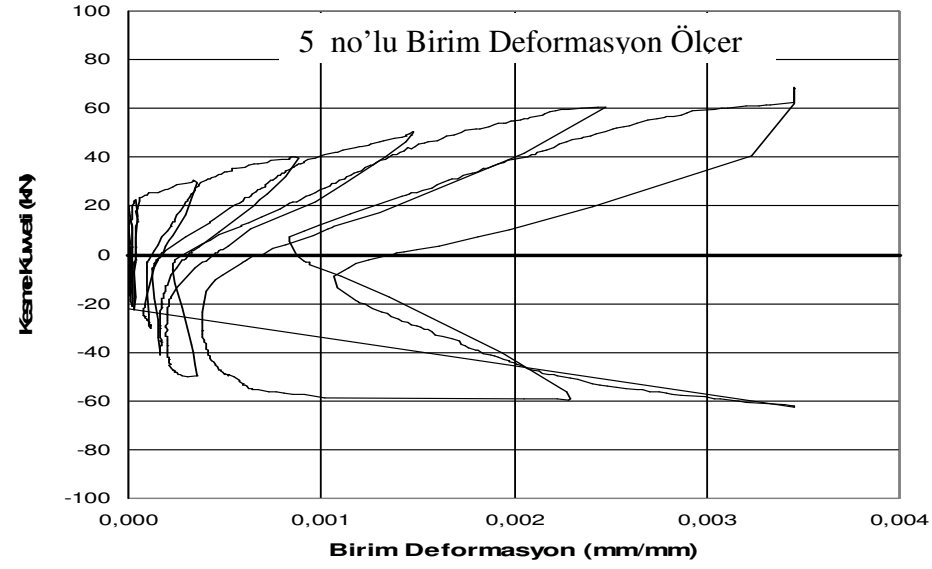
Şekil 3.23 Çatlak haritası, Deney Elemanı-4



Şekil 3.24 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-4



Şekil 3.25 Kesme kuvvet-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-4



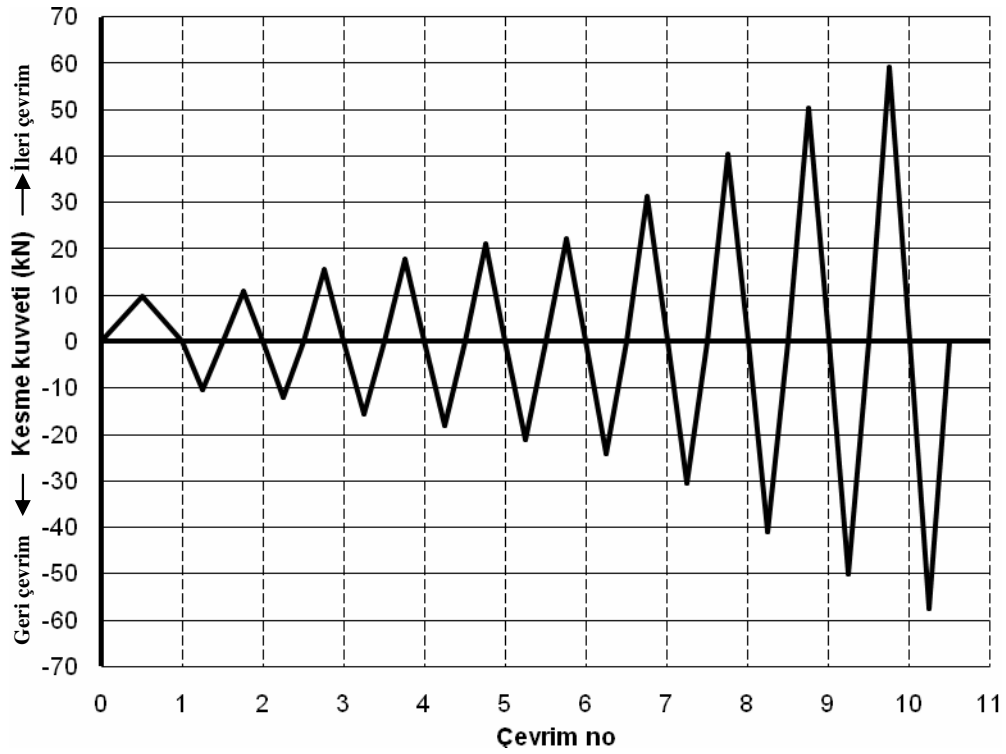
Şekil 3. 26 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-4



Şekil 3.27 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-4

3.6 Deney Elemanı-5

Deney elemanında 100 mm genişliğinde, 285 mm uzunluğunda 11 adet CFRP düz şerit, kiriş gövdesinin yan yüzlerine simetrik olarak yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.28’de verilmiştir. Deney elemanına 10 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.28 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-5

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

1. çevrim

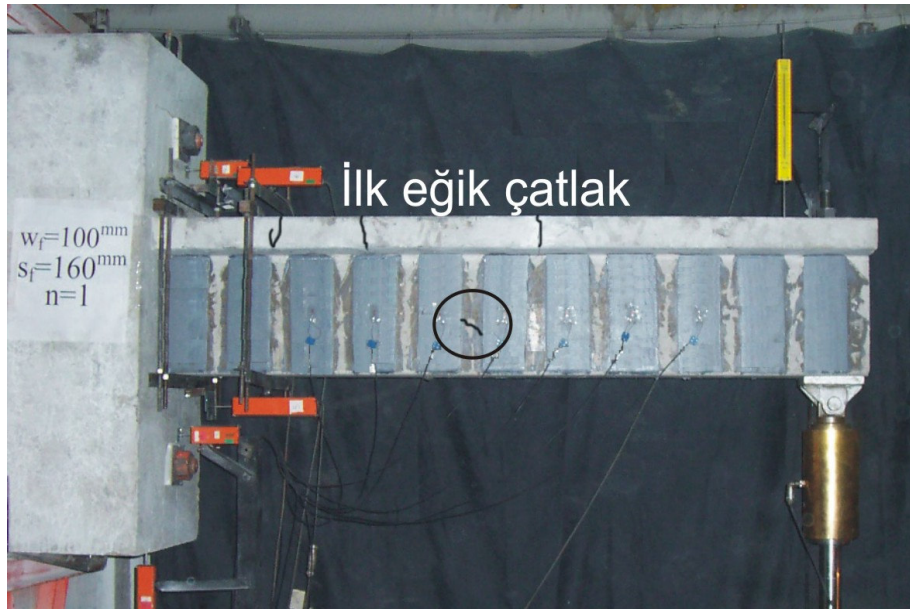
Bu çevrimde çıkılan maksimum yük 10,00 kN'dur. Çevrimin ileri yüklemesinde kiriş alt yüzünde, kirişin mesnede birleştiği kesitte, eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yükleme adımıyla kiriş tablasında ilk eğilme çatlakları, mesnetten 250 mm uzaklıkta kılcal düzeyde gelişmiştir.

3. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 15,68 kN yük düzeyinde 2,42 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzünde eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. 3, 4 ve 5 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %300 oranında artmış, sırasıyla 0,0005 mm/mm, 0,0001 mm/mm ve 0,0001 mm/mm'ye ulaşmıştır. Çevrimin geri yükleme adımında 15,68 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 3,41 mm ölçülmüştür.

4. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 17,79 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 3,01 mm ölçülmüştür. Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak 5. ve 6. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir. Çatlak, ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Bu çevrimin geri yükleme adımında 18,01 kN yük, 4,03 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür.



Şekil 3.29 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-5

6. çevrim

Bu çevrimde çıkılan maksimum yük 20,00 kN'dur. Kirişin mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,15 mm'ye ulaşmıştır. Çevrimin geri yükleme adımında 24,15 kN yük ve 5,76 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 18,00 kN yük düzeyinde kiriş tablasında eğilme çatlakları gelişmiştir. Kiriş tablasındaki çatlakların genişliğinin artması, 1, 3 ve 5 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %300 oranında artmış, sırasıyla 0,0007 mm/mm, 0,0007 mm/mm ve 0,0009 mm/mm'ye ulaşmıştır.

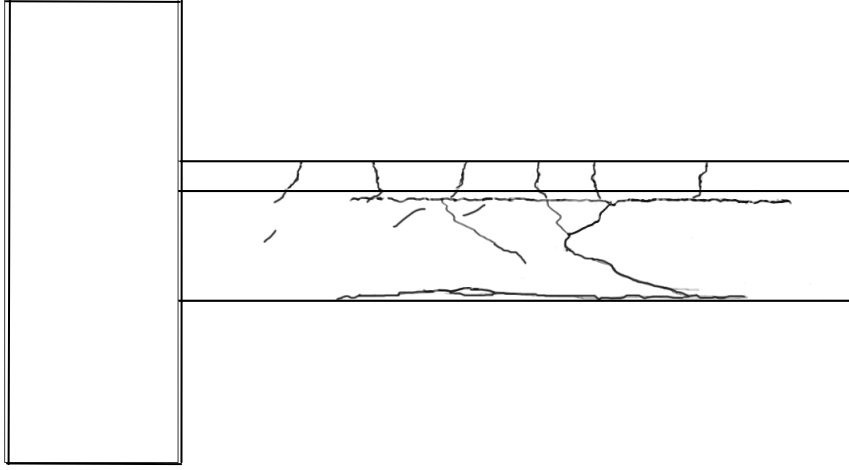
8. çevrim

Çevrimin geri yüklemesinde 40,59 kN yük, 10,28 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,20 mm'dir. Kiriş tablasında gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine ulaşmıştır. Çatlakların tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine ulaştığı sırada tüm birim deformasyon değerlerinde ani artış gözlenmiştir. Bu yük seviyesine kadar kiriş gövdesinde gelişen tüm çatlaklar kılcal düzeyde olup, CFRP şeritler arasında gelişmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında 6. ve 7. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. Tüm birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %80 oranında artmış, birim deformasyon değerleri ortalama 0,0011 mm/mm'ye ulaşmıştır.

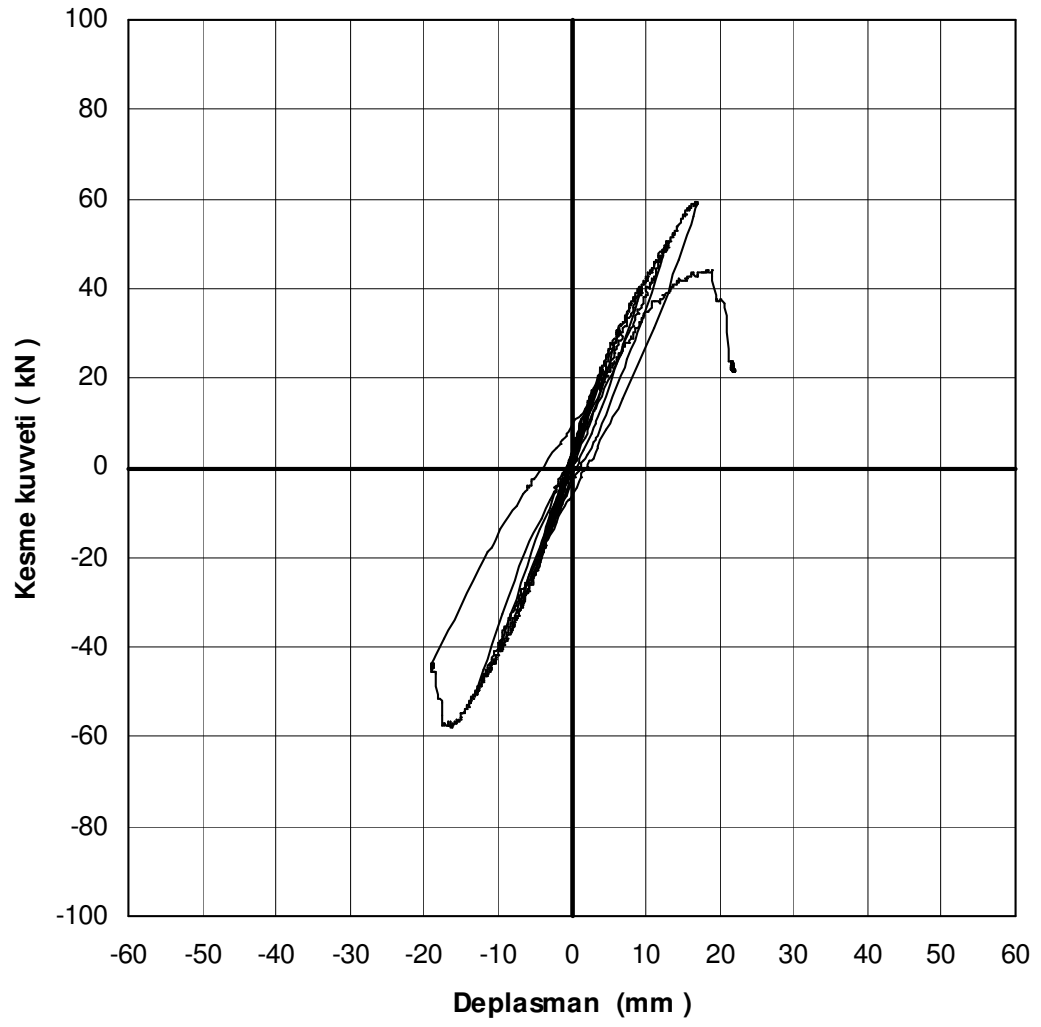
10. çevrim

Bu çevrimde 60,00 kN yük düzeyine çıkılması planlanmıştır. 55,00 kN yük düzeyinde 6. CFRP şerit alt ve üst ucundan beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeridin beton yüzeyinden ayrılması birim deformasyon değişimine neden olmamıştır. Maksimum yükte birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %100 oranında artmış, 2, 5 ve 6 no'lu birim deformasyon değerleri ortalama 0,0018 mm/mm'ye ulaşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 2, 3 ve 5 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,0011 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür.

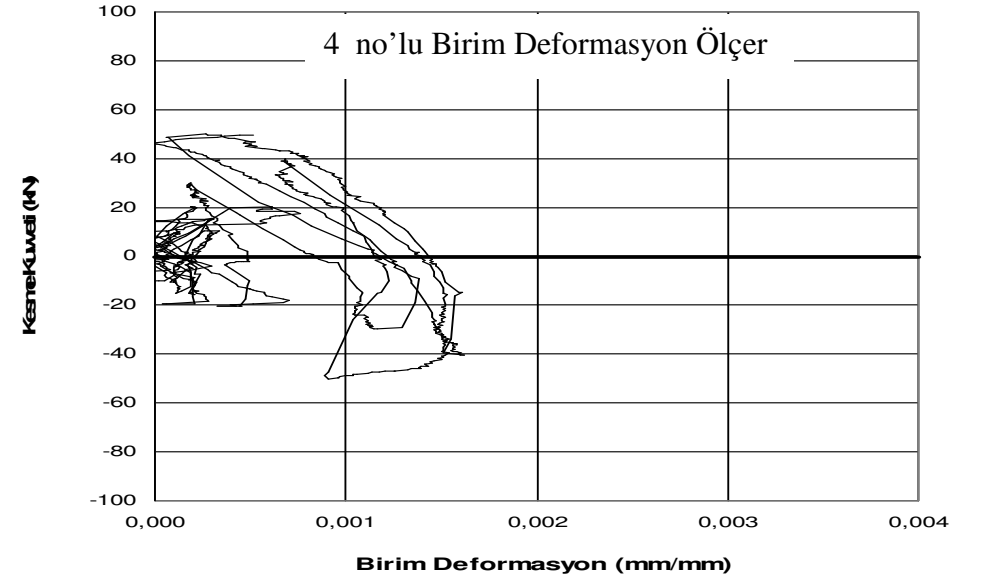
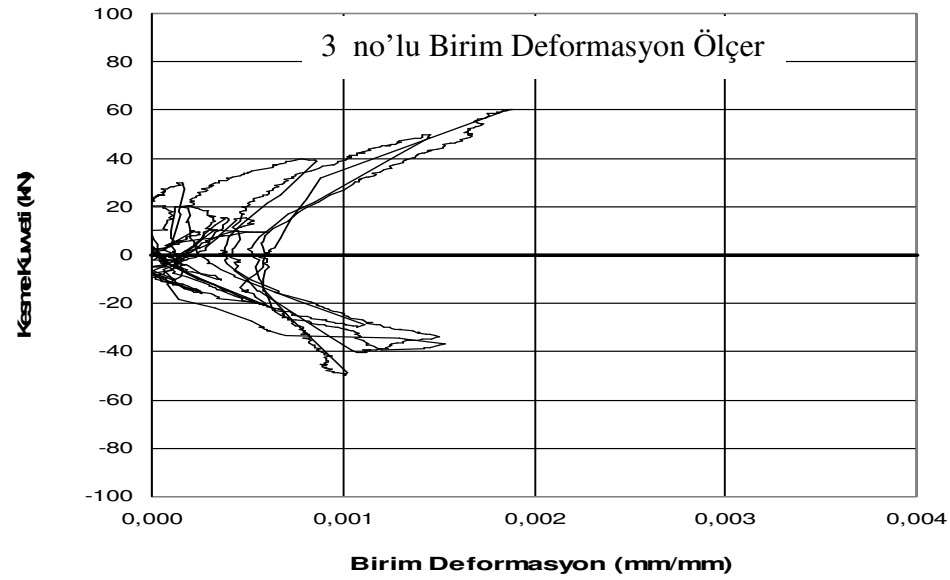
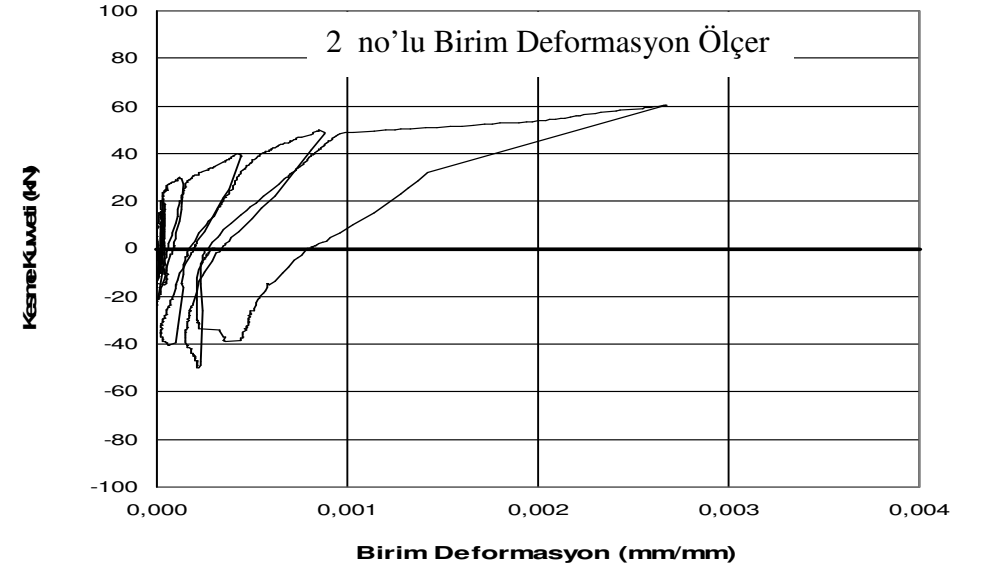
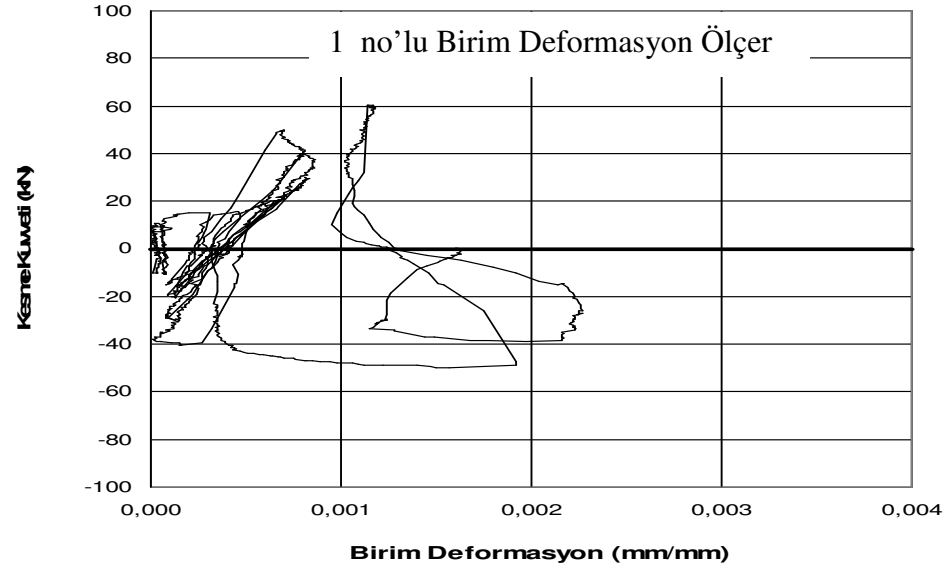
Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00012 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 58,00 kN yük düzeyinde, kiriş tablasının kiriş gövdesine birleştiği kesitte gelişen çatlak, 10. CFRP şeride kadar gelişmiştir. Kiriş tablasının gövdeden ayrılması nedeni ile kiriş kesmeden göçmüştür.



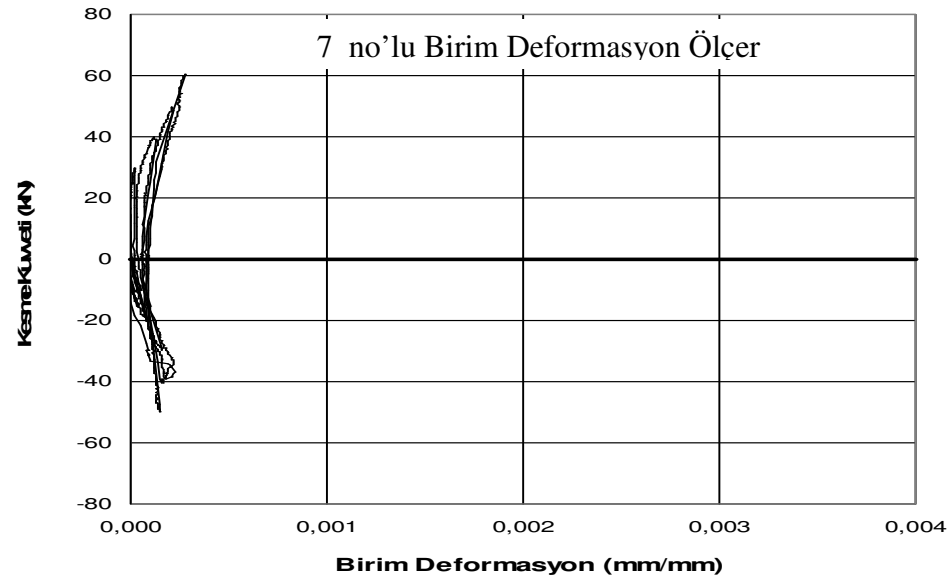
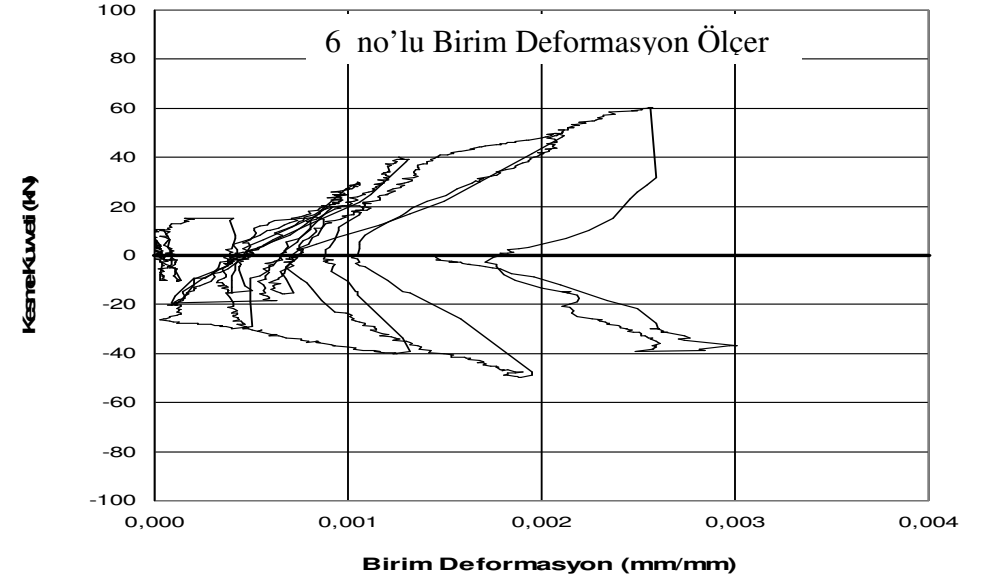
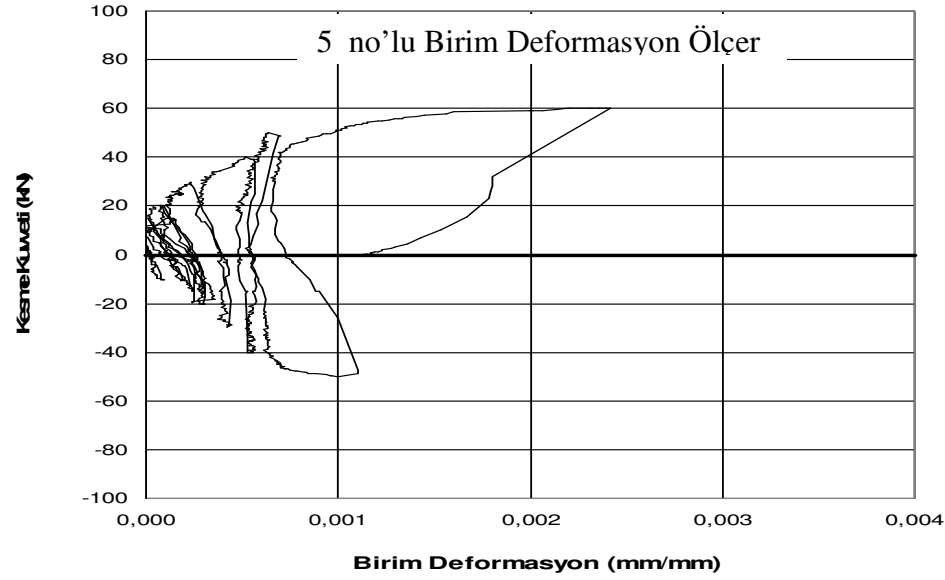
Şekil 3.30 Çatlak haritası, Deney Elemanı-5



Şekil 3.31 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-5



Şekil 3.32 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-5



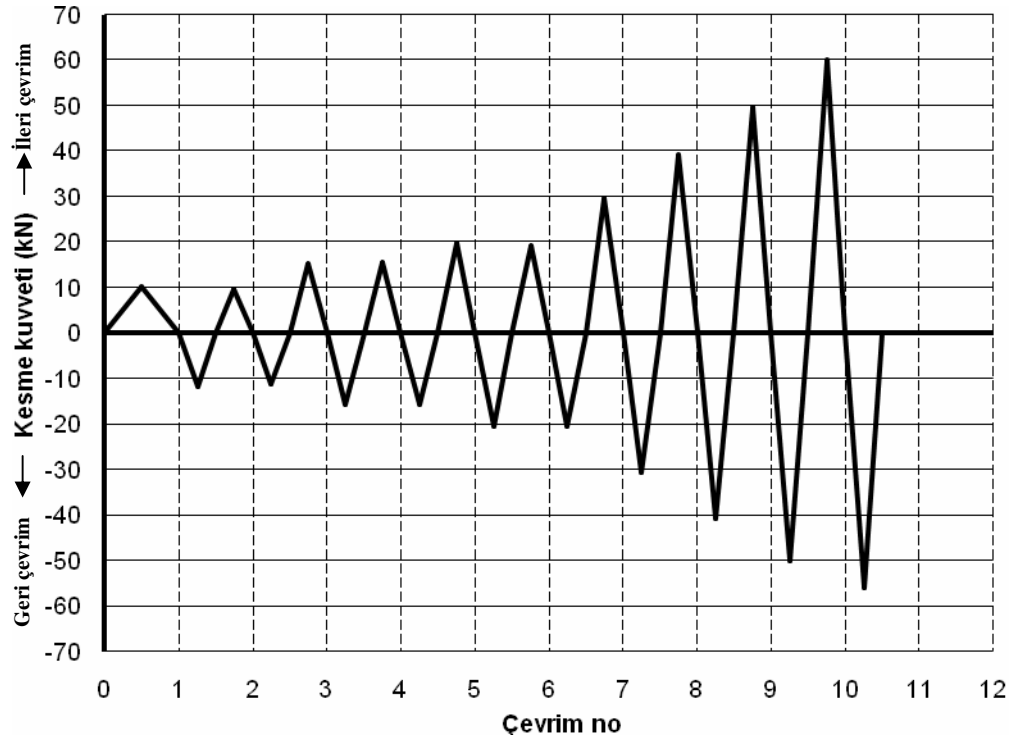
Şekil 3.33 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-5



Şekil 3.34 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-5

3.7. Deney Elemanı-6

Deney elemanında kiriş gövdesini sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 690 mm uzunluğunda 16 adet CFRP şerit kiriş gövdesine 60 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.35’de verilmiştir. Deney elemanına 10 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.35 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-6

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

1. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 10,17 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 1,83 mm ölçülmüştür. Kiriş alt yüzünde, kirişin mesnede birleştiği kesitte, eğilme çatlağı gelişmiştir. Çevrimin geri yüklenmesinde kiriş tablasında mesneden 500 mm ve 800 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir.

6. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 19,27 kN yük düzeyinde 4,08 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 10,00 kN yük düzeyinde mesnetten 300 mm uzaklıkta kiriş tablasında kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. 15,00 kN yük düzeyinde kiriş tablasında eğilme çatlaklarının sayısında ve genişliğinde artış gözlenmiştir.

7. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 29,66 kN yük düzeyinde, 6,73 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak, 3. ve 4. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir. Bu çevrimde tüm birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre % 70 artmış, birim deformasyon değerleri ortalama 0,0002 mm/mm'ye ulaşmıştır.



Şekil 3.36 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-6

Çevrimin geri yüklemesinde 30,51 kN yük, 7,10 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasında gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine ulaşmıştır. Çatlaklar ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır.

8. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 39,41 kN yük, 9,47 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimde 2. ve 3., 4. ve 5., 9. ve 10. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Kiriş gövdesinde gelişen çatlaklar ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Çevrimin geri yüklemesinde 40,68 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 10,39 mm ölçülmüştür. 30,00 kN yük düzeyinde tablada gelişen eğilme çatlaklarının sayısında ve genişliklerinde artış gözlenmiştir. Tablada gelişen eğilme çatlakların genişlikleri 0,20 mm'ye ulaşmıştır.

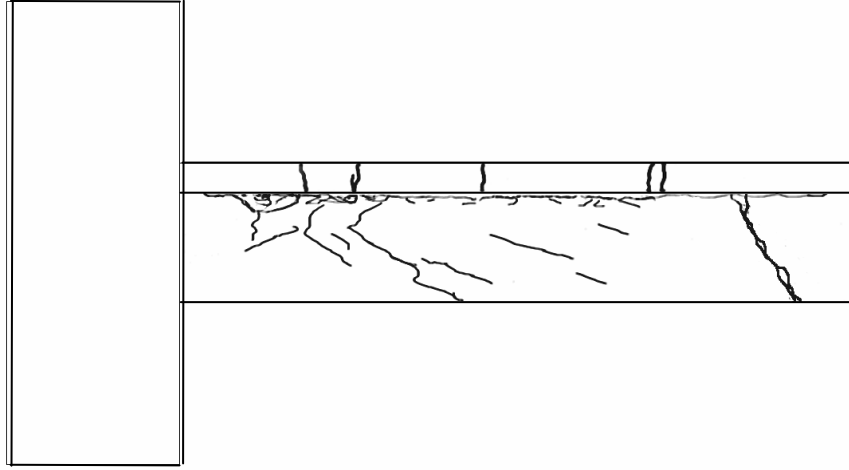
9. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 49,58 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 12,41 mm ölçülmüştür. 43,00 kN yük düzeyinde 6. ve 7. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak, 3 ve 4 no'lu birim deformasyon değerinin ani olarak %10 oranında artmasına neden olmuş, birim deformasyon değerleri sırasıyla 0,0008 mm/mm ve 0,0005 mm/mm'ye ulaşmıştır. İleri yüklemde kiriş gövdesinin alt yüzünde gelişen eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, tüm birim deformasyon ölçerlerde 0,0002 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Kiriş gövdesine dağılan çatlaklar nedeni ile tüm birim deformasyon ölçerlerde benzer birim deformasyon değerleri ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 50,00 kN yük, 13,73 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlaklarının genişliği 0,20 mm'dir. 43,00 kN yük düzeyinde kiriş tablasında gelişen eğilme çatlaklarının sayısı ve genişlikleri artmıştır. 49,00 kN yük düzeyinde, tablanın kiriş gövdesine birleştiği kesitte gelişen çatlak, mesnetten 710 mm'ye kadar kılcal düzeyde gelişmiştir.

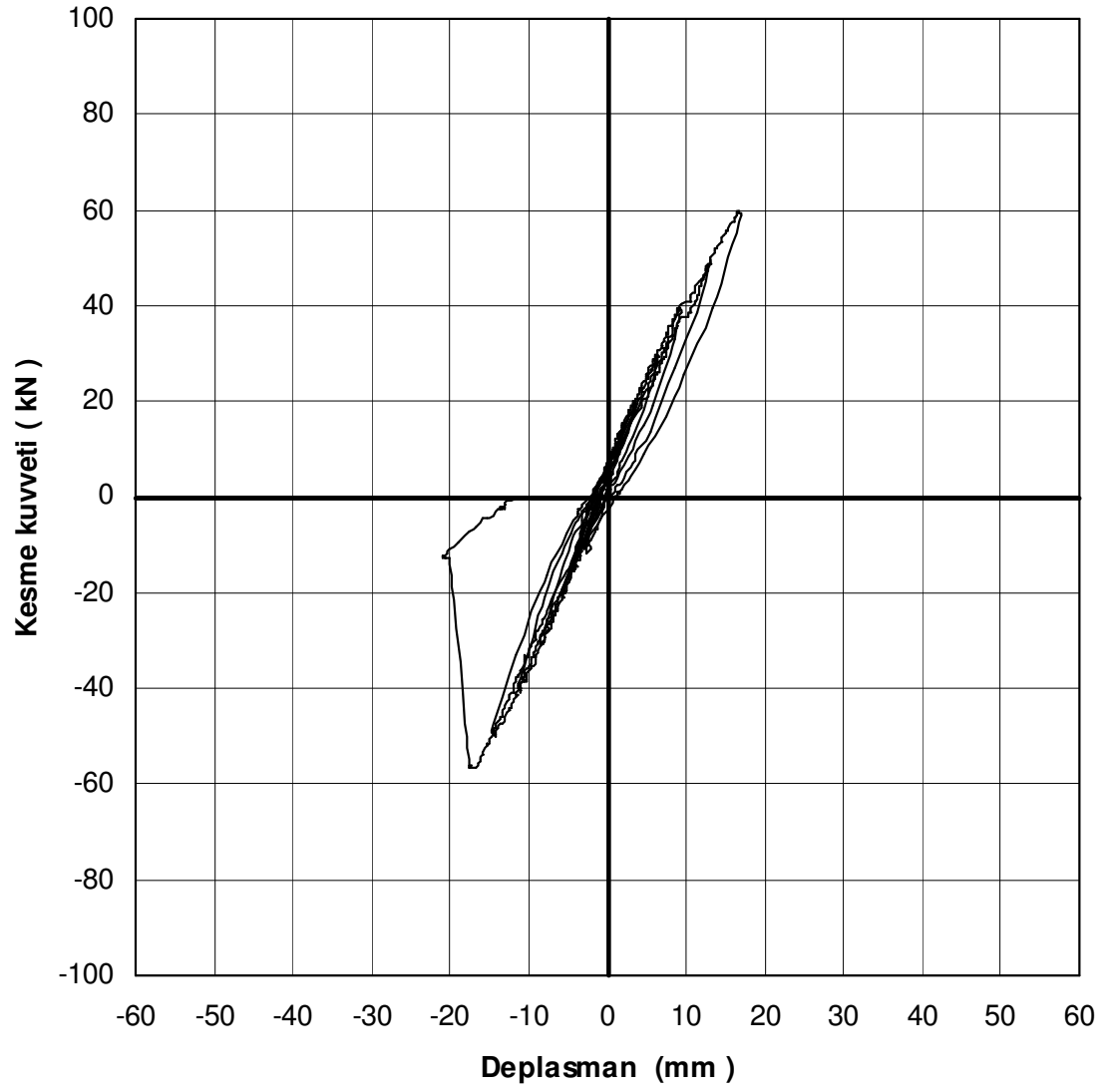
10. çevrim

Bu çevrimde çıkılan maksimum yük 60,01 kN'dur. Çevrimin ileri yükleme adımında 60,01 kN yük düzeyine kadar kirişte yeni çatlak gelişmemiştir. Birim deformasyon ölçerlerde doğrusal birim deformasyon artışı gerçekleşmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 55,93 kN yük seviyesinde 3 no'lu CFRP şerit üst ucundan, 7, 8 ve

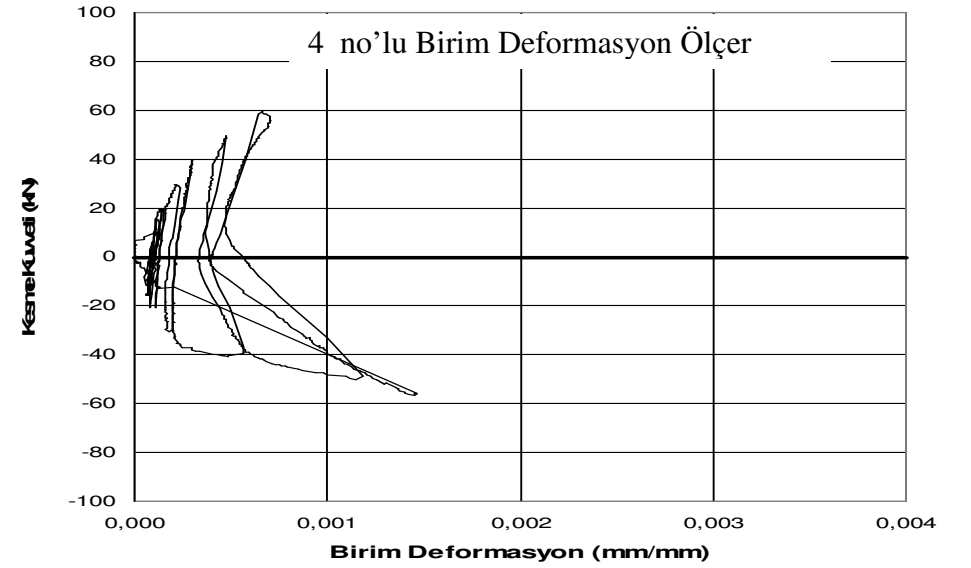
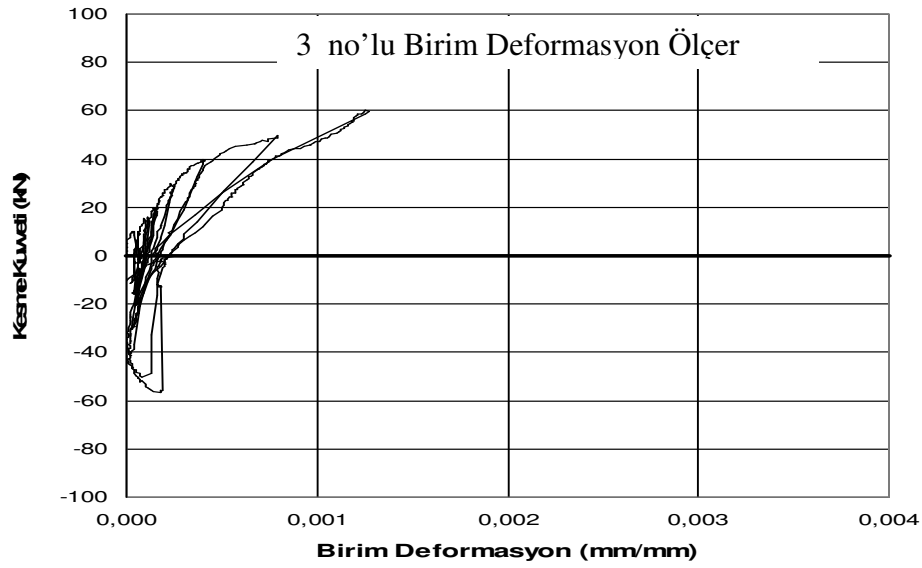
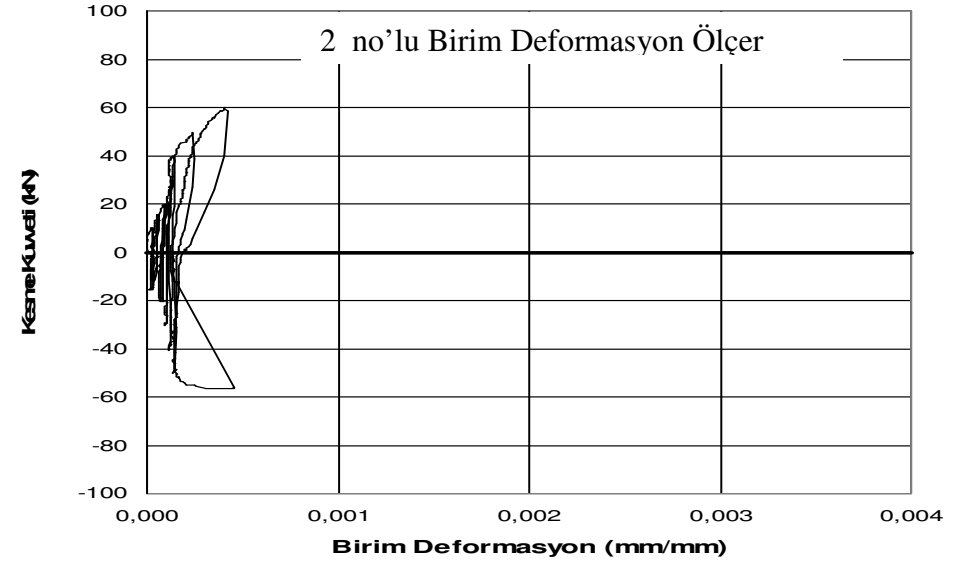
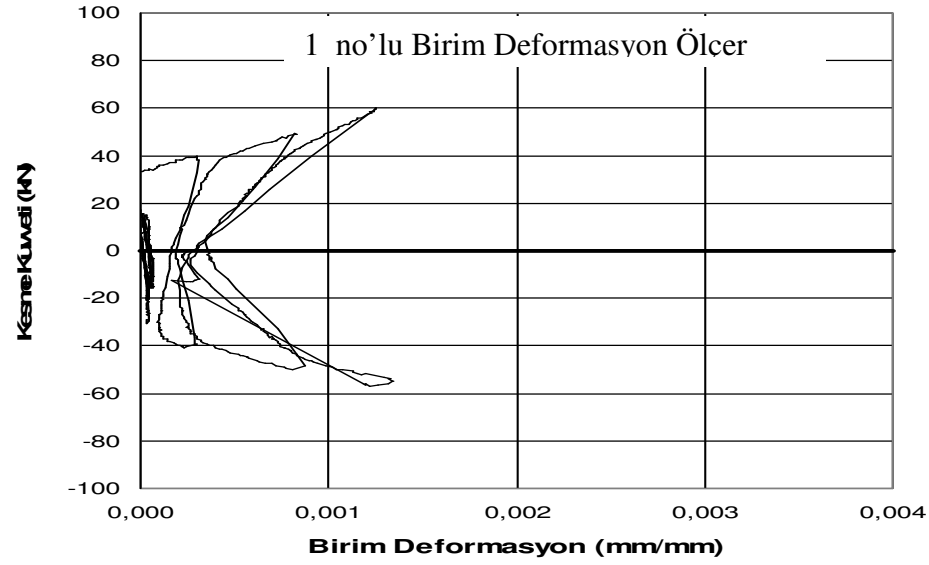
9 no'lu CFRP şeritlerde alt uçlarından beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile deney elemanı göçmüştür. Göçme sırasında tüm birim deformasyon değerlerinde ani olarak %200 oranında düşüş meydana gelmiştir. Deney elemanında maksimum 0,0016 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



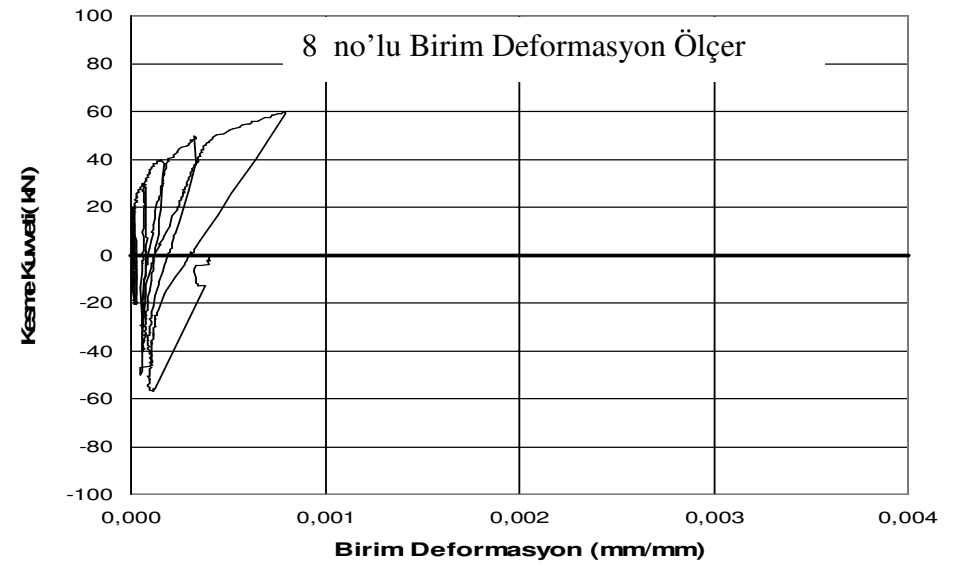
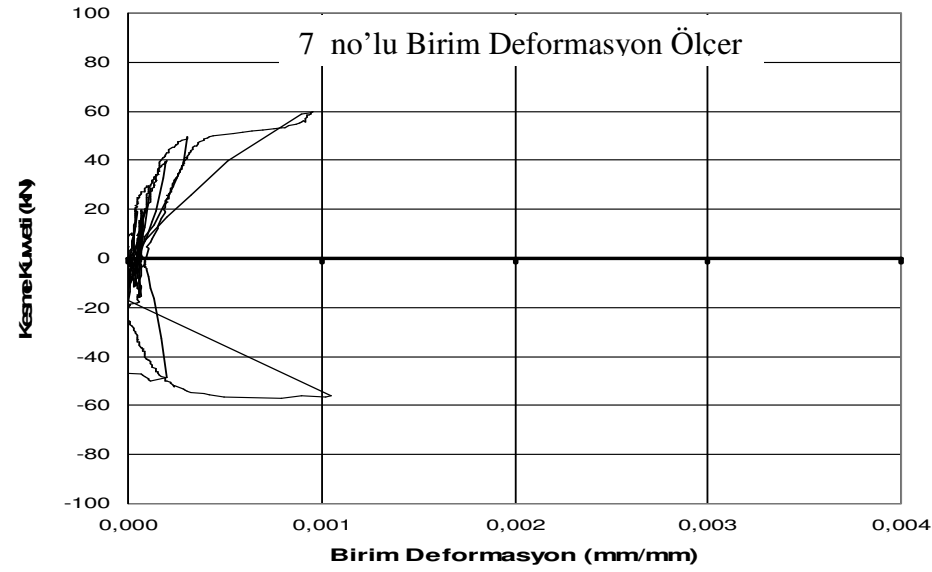
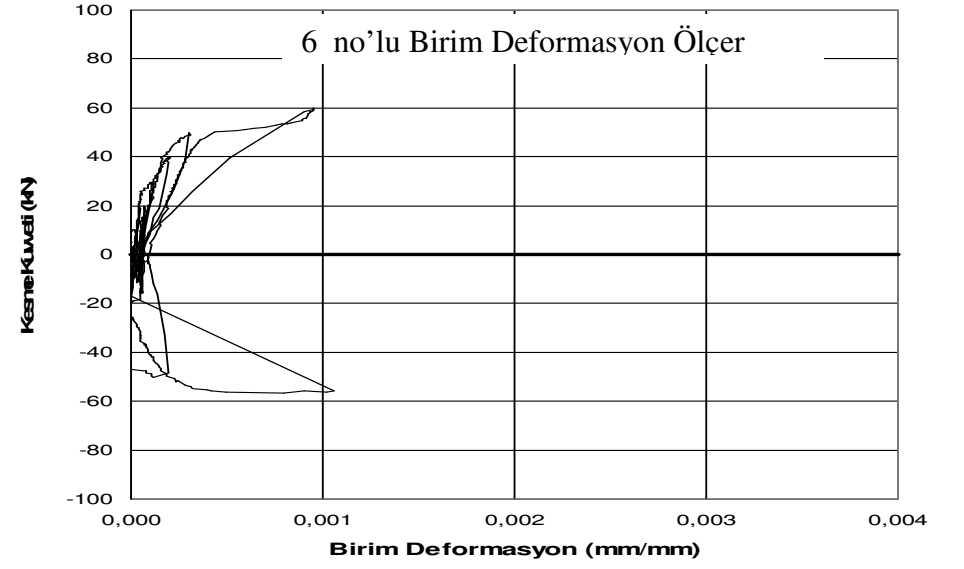
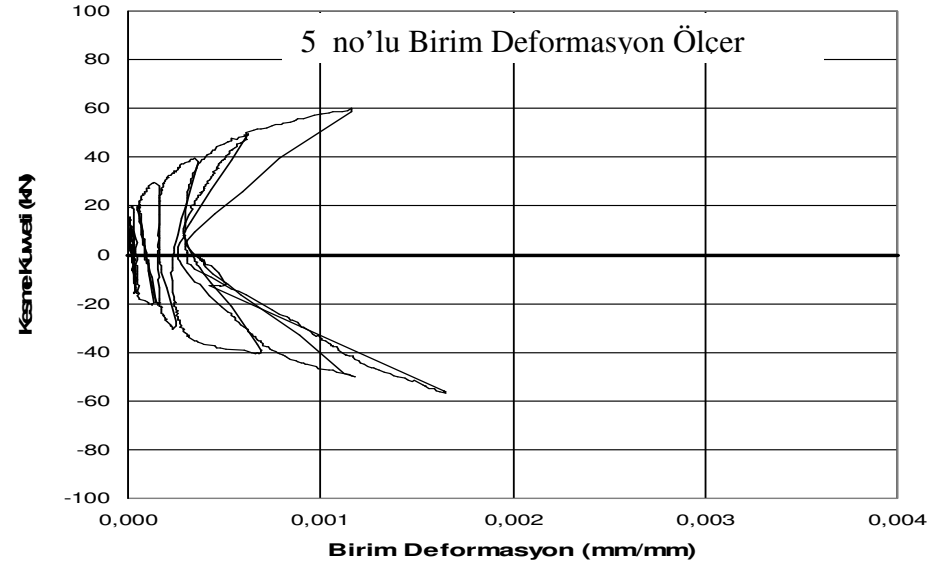
Şekil 3.37 Çatlak haritası, Deney Elemanı-6



Şekil 3.38 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-6



Şekil 3.39 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-6



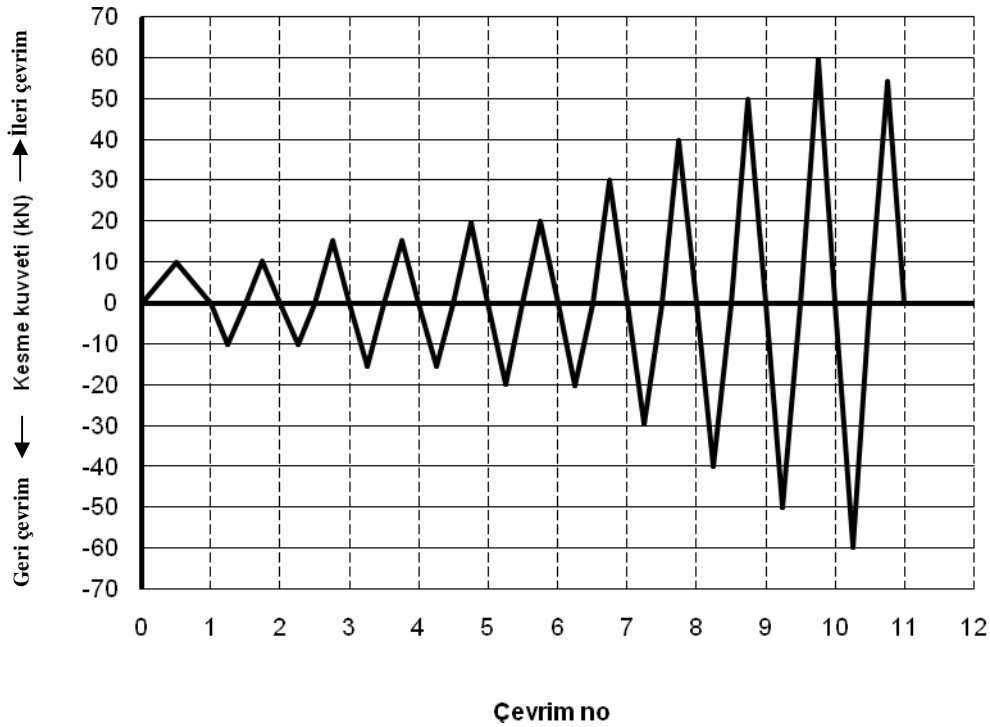
Şekil 3.40 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-6



Şekil 3.41 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-6

3.8 Deney Elemanı-7

Deney elemanında kiriş gövdesinin yan yüzünden başlayıp tablanın altında devam eden L biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 405 mm uzunluğunda 16 adet L biçimli CFRP şerit kiriş gövdesine simetrik olarak 60 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.42’de verilmiştir. Deney elemanına 10 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.42 Yük çevrim grafiği, Deney Elemanı-7

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

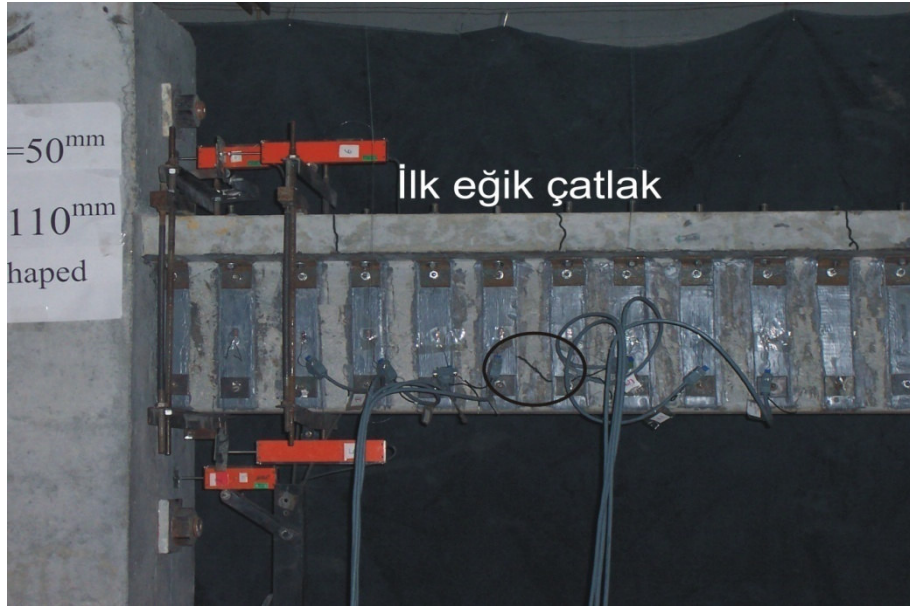
1. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 10,00 kN yük düzeyinde, 1,74 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu çevrimde kiriş gövdesinin alt yüzünde, mesnetten 500 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 9,99 kN yük düzeyinde 1,84 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür.

Kiriş tablasında mesnetten 400, 800 ve 1250 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir.

4. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 15,16 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 2,92 mm ölçülmüştür. Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak, 6. ve 7. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir. Çatlak ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır.



Şekil 3.43 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-7

Çevrimin geri yükleme adımında 15,32 kN yük, 3,22 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 10,00 kN yük düzeyinde kiriş tablasında gelişen eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. Kiriş tablasında gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine ulaşmıştır.

6. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 20,00 kN yük, 4,10 mm deplasman ölçülmüştür. Kiriş alt yüzünde, kirişin mesnede birleştiği kesitte, eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yükleme adımında 20,32 kN yük, 4,55 mm deplasman ölçülmüştür.

Tablada gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine doğru gelişim göstermiş, 3. ve 4. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlak gelişmiştir.

7. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 30,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 6,72 mm ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzündeki çatlak kiriş gövdesine doğru ilerleyerek, 1. ve 2. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlğa neden olmuştur. Çatlak nedeni ile 2 ve 3 no'lu birim deformasyon değerleri maksimum yük seviyesinde bir önceki çevrime göre %400 oranında artmış, sırasıyla 0,0004 mm/mm ve 0,0001 mm/mm'ye ulaşmıştır. Çevrimin geri yüklemesinde 29,64 kN yük, 7,16 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 4. CFRP şeridin alt ucundan başlayan eğik çatlak, 4. ve 5. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlğa neden olmuştur. Çatlak ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır.

8. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 39,68 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 10,00 mm ölçülmüştür. 30,00 kN yük düzeyinde 6. ve 7. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Önceki çevrimlerde 3. ve 4. CFRP şeritler arasında gelişen çatlak, 4. CFRP şeridin altından devam ederek, 4.ve 5. şeritler arasında yeni bir çatlak gelişimine neden olmuştur. Çatlak nedeni ile 4 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %60 oranında artmış, 0,0011 mm/mm'ye ulaşmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde doğrusal birim deformasyon artışı gerçekleşmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 39,97 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 9,98 mm ölçülmüştür. Bu çevrimde kiriş tablasında gelişen eğilme çatlaklarının sayısı ve genişlikleri artmıştır. 21,58 kN yük seviyesinde 3. ve 4. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlğının genişliği 0,20 mm'ye ulaşmıştır.

9. çevrim

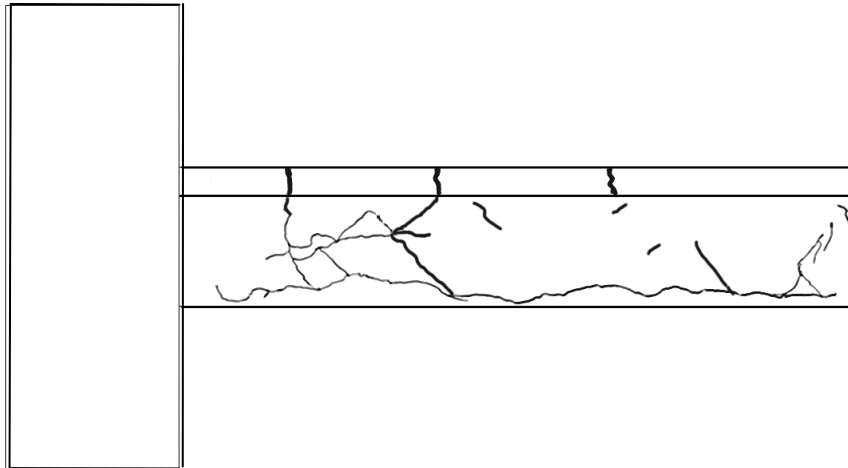
Çevrimin ileri yükleme adımında 49,67 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 13,54 mm ölçülmüştür. 35,00 kN yük düzeyinde 12. ve 13. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Çevrimde ayrıca 11. ve 12. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiş, 7 no'lu birim deformasyon değerinin ani olarak %83 oranında artmıştır. Birim deformasyon 0,0027 mm/mm'ye ulaşmıştır. Maksimum yük düzeyinde 4 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,0039 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 2 no'lu birim deformasyon ölçerlerde ise 0,0023 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 49,96 kN yük, 13,31 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,20 mm'ye ulaşmıştır.

10. çevrim

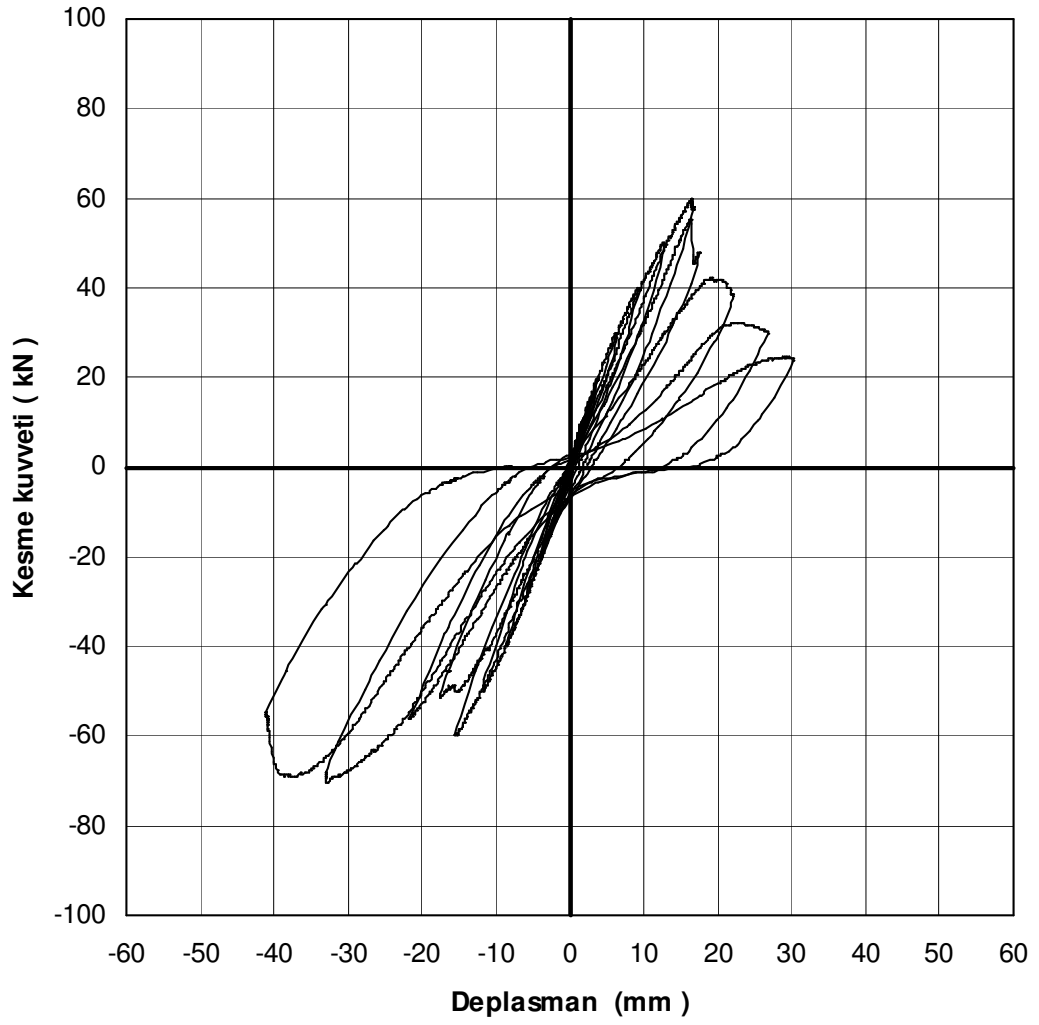
Çevrimin ileri yükleme adımında 59,66 kN yük düzeyinde, 17,70 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu çevrimde 8. ve 9. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Önceki çevrimlerde 4. ve 5. CFRP şeritler arasında gelişen eğik çatlak, bu çevrimde 5. CFRP şeridin altından devam ederek, 5. ve 6. CFRP şeritlerin üst ucuna ulaşmıştır. Bu çevrimde CFRP şeritlerin alt ucuna uygulanan ankrajların altında, mesnetten 350 mm uzaklıkta başlayan çatlak mesnetten 800 mm'ye kadar kılcal düzeyde gelişmiştir. Kiriş gövdesinde ve kiriş alt yüzünde gelişen çatlakların genişliği artmış, 2, 4 ve 7 no'lu birim deformasyon değerleri 0,004 mm/mm'yi, (ACI-440, 1996) komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 2 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,002 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00032 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 59,66 kN yük düzeyinde, 7 no'lu birim deformasyon değeri ani olarak %200 oranında artmış, 0,0048 mm/mm'ye ulaşmıştır. Maksimum yük düzeyinde 2 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerler, 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır.

11. çevrim

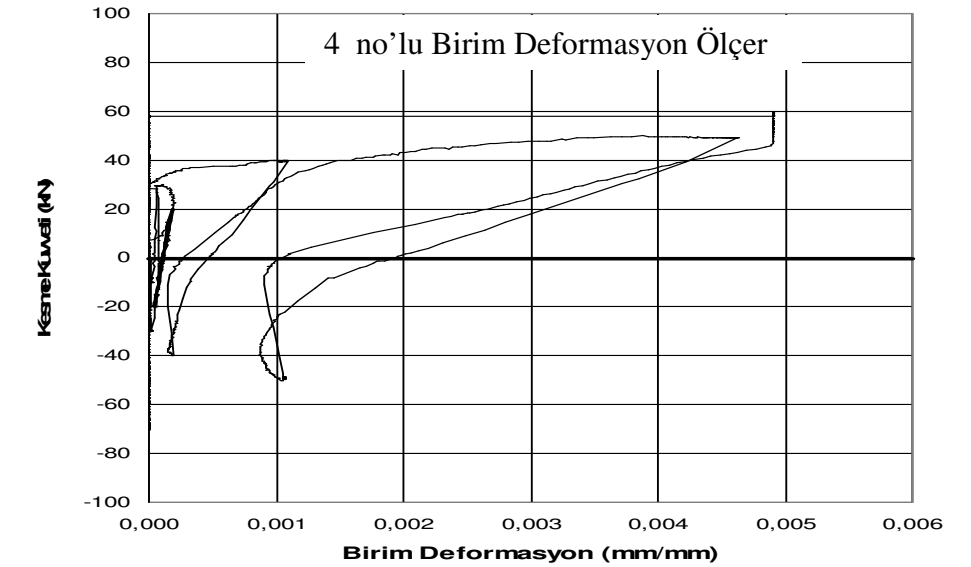
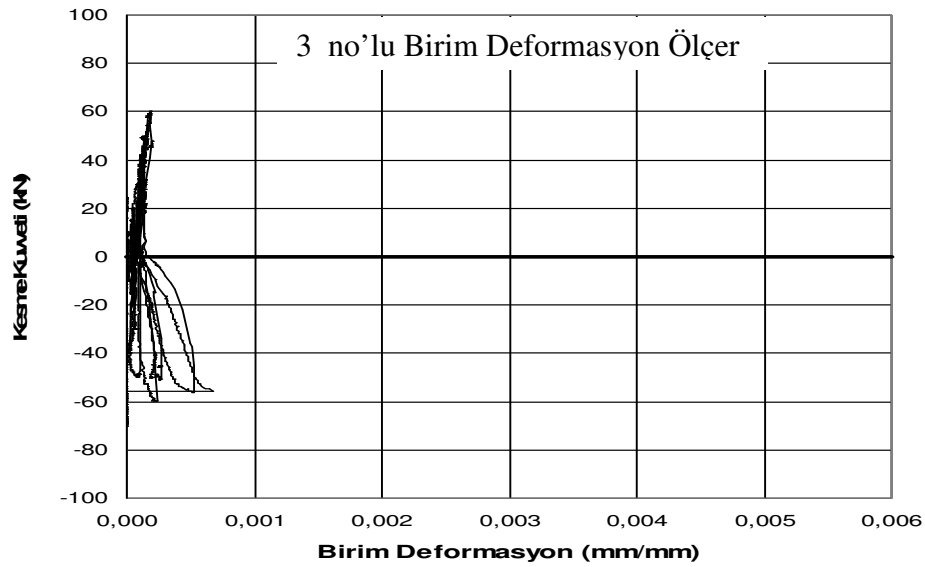
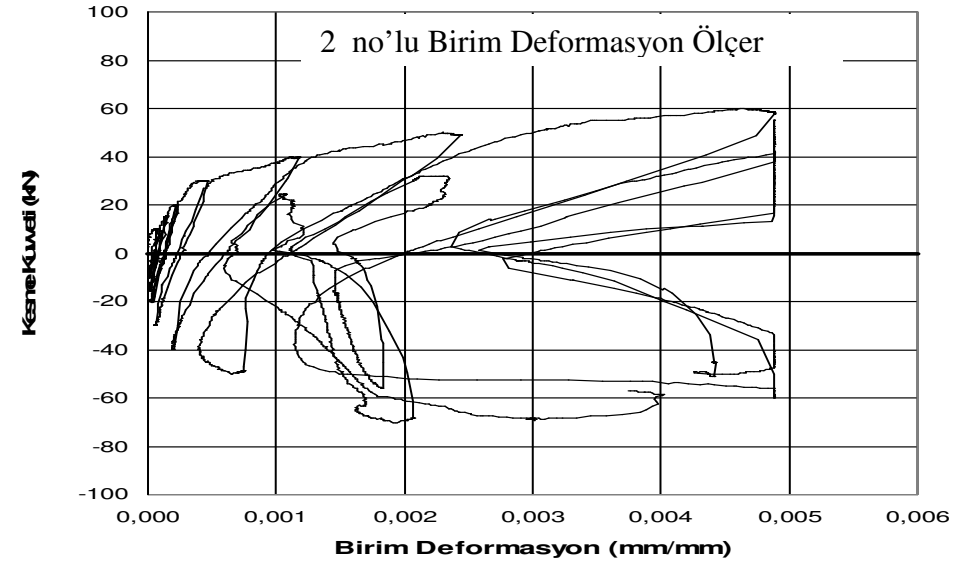
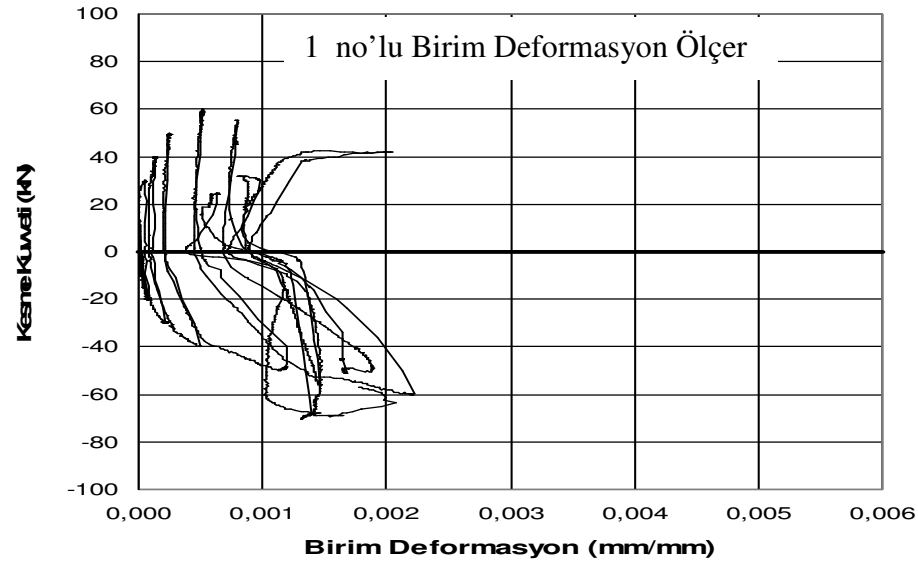
Bu çevrimde çıkılması planlanan maksimum yük 70,00 kN'dur. 17 kN yük düzeyinde 2 no'lu birim deformasyon ölçer, 19 kN yük düzeyinde de 7 no'lu birim deformasyon ölçer 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. Yükteki artışla 2 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerler ölçebilecekleri birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmıştır. 54,00 kN yük düzeyinde 4. CFRP şeridin üst ucundan başlayan çatlak, 5. CFRP şeridi diyagonal doğrultuda boydan boya keserek 6. CFRP şeridin alt ucuna ulaşmıştır. 6. CFRP şeridin alt ucuna ulaşan çatlak, ankrajların hemen altından, 10. CFRP şeride kadar gelişim göstermiştir. Deney elemanı, beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte CFRP şeritlerin yapışma yüzeylerinden ayrılmasının engellenmesi ve tablanın kiriş gövdesi ile ilişkilendirilmesi için yerleştirilen L biçiminde bükülmüş çelik plakalar, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını ve tablanın kiriş gövdesine birleştiği kesitte çatlak gelişimini engellemiştir.



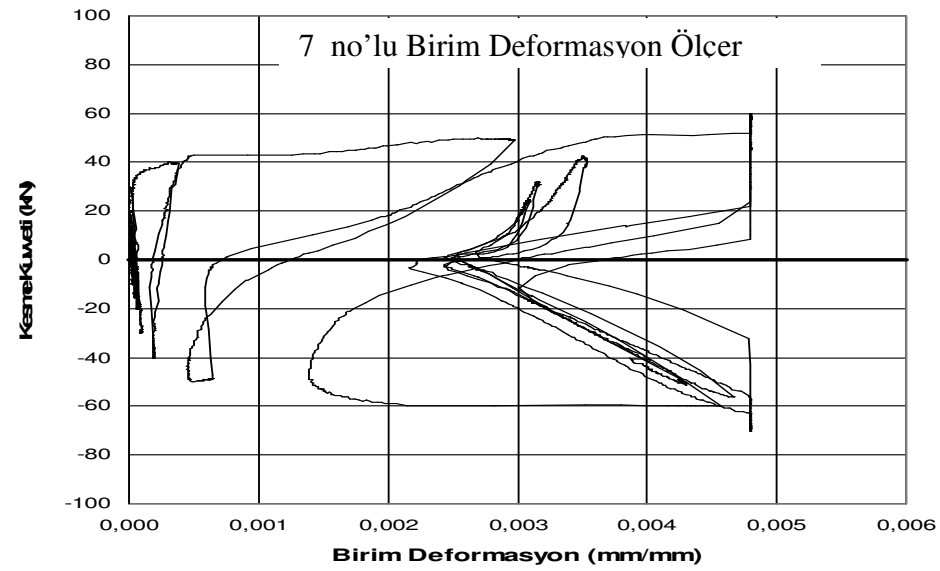
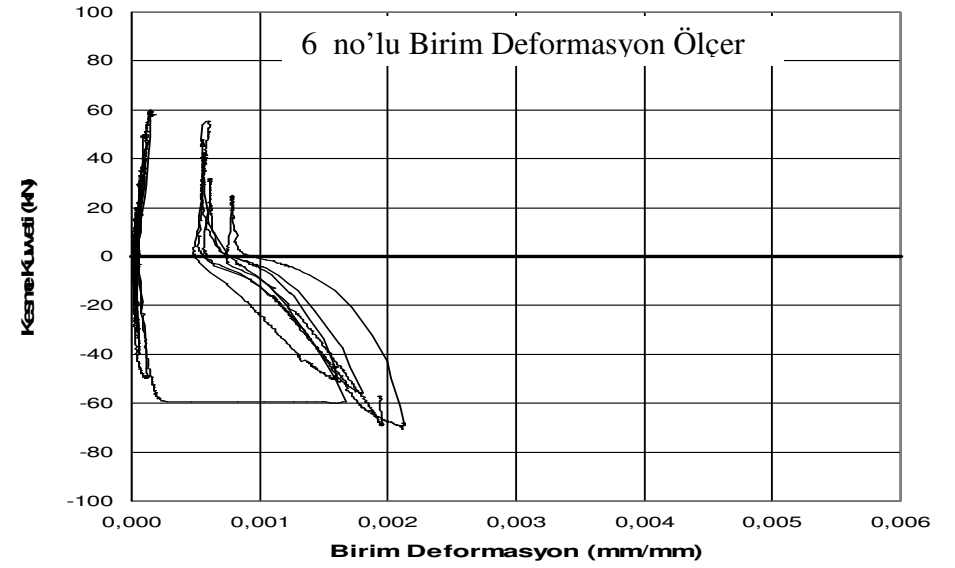
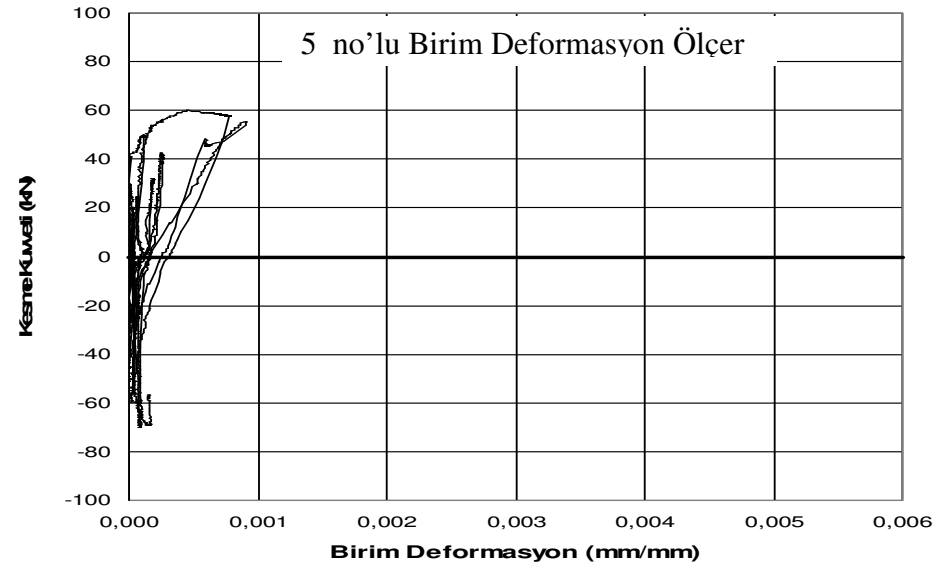
Şekil 3.44 Çatlak haritası, Deney Elemanı-7



Şekil 3.45 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-7



Şekil 3.46 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-7



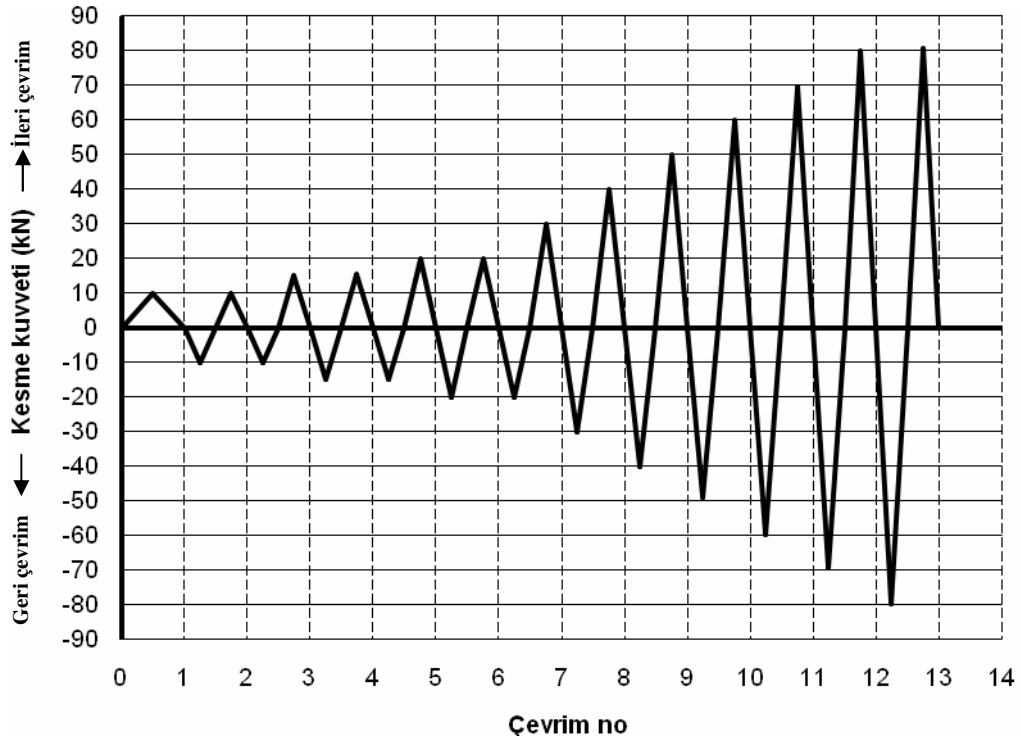
Şekil 3.47 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-7



Şekil 3.48 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-7

3.9 Deney Elemanı-8

Deney elemanında kiriş gövdesini sargılayan U biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 690 mm uzunluğunda 22 adet U biçimli CFRP şerit kiriş gövdesine 30 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.49’de verilmiştir. Deney elemanına 12 tam yük çevrimi uygulanmıştır. Deney sırasında 8 no’lu birim deformasyon ölçerden anlamlı veri elde edilememiştir.



Şekil 3.49 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-8

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

2.çevrim

Çevrimin geri yüklemesinde 10,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 2,35 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımı mesnetten 750 mm ve 1100 mm uzaklıkta, kiriş tablasında kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir.

8.çevrim

Çevrimin geri yüklemesinde 39,98 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 9,93 mm ölçülmüştür. Kiriş tablasında mesnetten 300 mm ve 1400 mm uzaklıkta, kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. 8. ve 13. CFRP şeritlerin üst ucunda bulunan ankrajlar betonda bozunum yaratarak, beton yüzeyinden ayrılmıştır.

9.çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımımda 50,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 14,34 mm ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzünde mesnetten 500 mm, 750 mm ve 850 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. 10,00 kN yük düzeyinde 6 no'lu birim deformasyon ölçerlerde, bir önceki çevrimin maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değeri ölçülmüştür. Birim deformasyon ölçerlerde 0,0008 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin maksimum yük seviyesinde 2, 6 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0006 mm/mm, 0,0015 mm/mm ve 0,0023 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 48,98 kN yük, 12,90 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimin maksimum yük seviyesinde 2, 4 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0003 mm/mm, 0,0004 mm/mm ve 0,0003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0001 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

10.çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımımda 60,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 17,68 mm ölçülmüştür. Bu çevrime kadar kiriş gövdesinde eğik çatlak gelişmemiştir. 40,00 kN yük düzeyinde tüm birim deformasyon ölçerlerde, bir önceki çevrimin maksimum yük seviyesindeki birim deformasyon değerleri ölçülmüştür. 6 ve 7 no'lu birim deformasyon değerleri sırayla 0,0016 mm/mm ve 0,0023 mm'dir. Diğer birim deformasyon değerleri ortalama 0,0002 mm'dir. Maksimum yük seviyesinde 6 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0018 mm/mm ve 0,0047 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde

ortalama 0,0003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 6 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0005 mm/mm ve 0,0012 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00012 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımıyla 59,64 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 17,40 mm ölçülmüştür. Kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak, 50,00 kN yük seviyesinde 8. ve 9. CFRP şeritler arasında gelişmiştir.



Şekil 3.50 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-8

Kiriş gövdesindeki ilk eğik çatlak, mesnetten 750 mm uzaklıkta kiriş tablasında gelişen eğilme çatlaklarının tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine gelişim göstermesi neden olmuştur. Çatlak gelişimi 4 no'lu birim deformasyon değerlerinde %300 oranında ani artış gerçekleştirmiş, birim deformasyon 0,0007 mm/mm'ye ulaşmıştır. Kiriş tablasında mesnetten 150 mm uzaklıkta kılcal eğilme çatlakları gelişmiştir. Tablada gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek, tablanın kiriş gövdesine birleştiği kesitte gelişim göstermiştir.

11. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 69,67 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 21,53 mm ölçülmüştür. Bu çevrimde 9. CFRP şeridin üst ucunda gelişen eğik çatlak, 10. CFRP şeridin altından devam ederek 10. ve 11. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlak gelişimine neden olmuştur. 7 no'lu birim deformasyon değerleri 43,00 kN yük seviyesinde 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. 60,00 kN yük düzeyinde 10. ve 11. no'lu CFRP şeritler arasında gelişen eğik çatlak 11. CFRP şeridi keserek 11. ve 12. CFRP şeritler arasında yeni bir çatlak gelişimine neden olmuştur. Birim deformasyon değerinin artmasıyla 7 no'lu birim deformasyon ölçer, ölçebileceği birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde yüke bağlı, doğrusal birim deformasyon artışı gözlenmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 69,31 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 22,01 mm ölçülmüştür. 18. CFRP şerit, üst ucundan, beton yüzeyinden ayrılmıştır. 17. ve 18. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir.

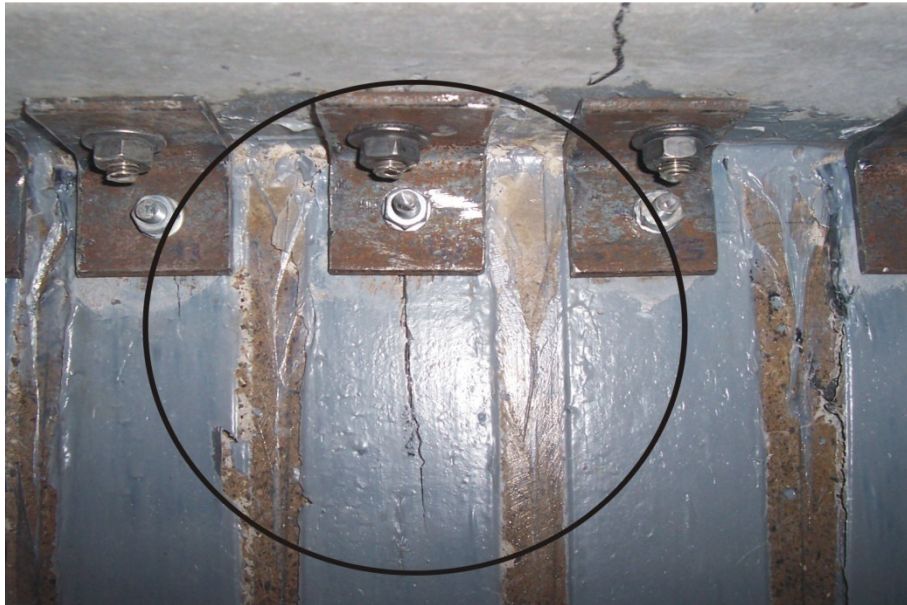
12. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 80,00 kN yük düzeyinde 26,45 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 11 no'lu CFRP şerit üst ucundan beton yüzeyinden tamamen ayrılmıştır. CFRP şeridin beton yüzeyinden ayrılmasından önce birim deformasyon ölçümü yapılamayan 7 no'lu birim deformasyon ölçerde ani olarak 0,0034 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 10. ve 11. CFRP şeritler arasında gelişen eğik çatlak genişliği 0,20 mm'ye ulaşmış, 7 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %500 oranında artmıştır. Birim deformasyon değerleri 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. 78,00 kN yük düzeyinde 7 no'lu birim deformasyon ölçer devre dışı kalmıştır. 16. CFRP şeridin üst ucunda gelişen eğik çatlak, 16. CFRP şeridin altından devam ederek 16. ve 17. CFRP şeritlerin arasına kadar gelişim göstermiştir. Çatlak ayrıca 17., 18. ve 19. CFRP şeritlerin altından devam ederek 20. CFRP şeridin alt ucuna ulaşmıştır. Çatlak eğimi ve genişliği özdeştir. Çevrimin geri

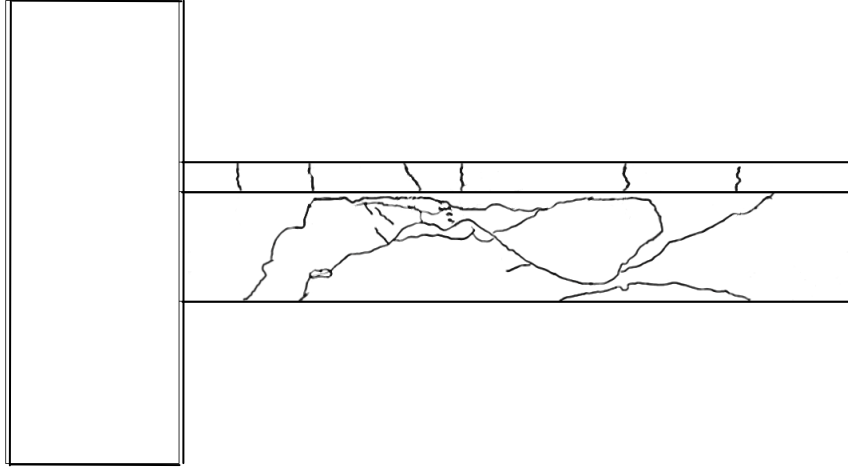
yüklemesinde 79,97 kN yük, 28,20 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinde gelişen çatlakların genişlikleri 0,10 mm'ye ulaşmıştır. 9. ve 10. CFRP şeritler arasında gelişen eğik çatlak, 10. CFRP şeridin altından devam ederek 10. ve 11. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlak gelişimine neden olmuştur.

13. çevrim

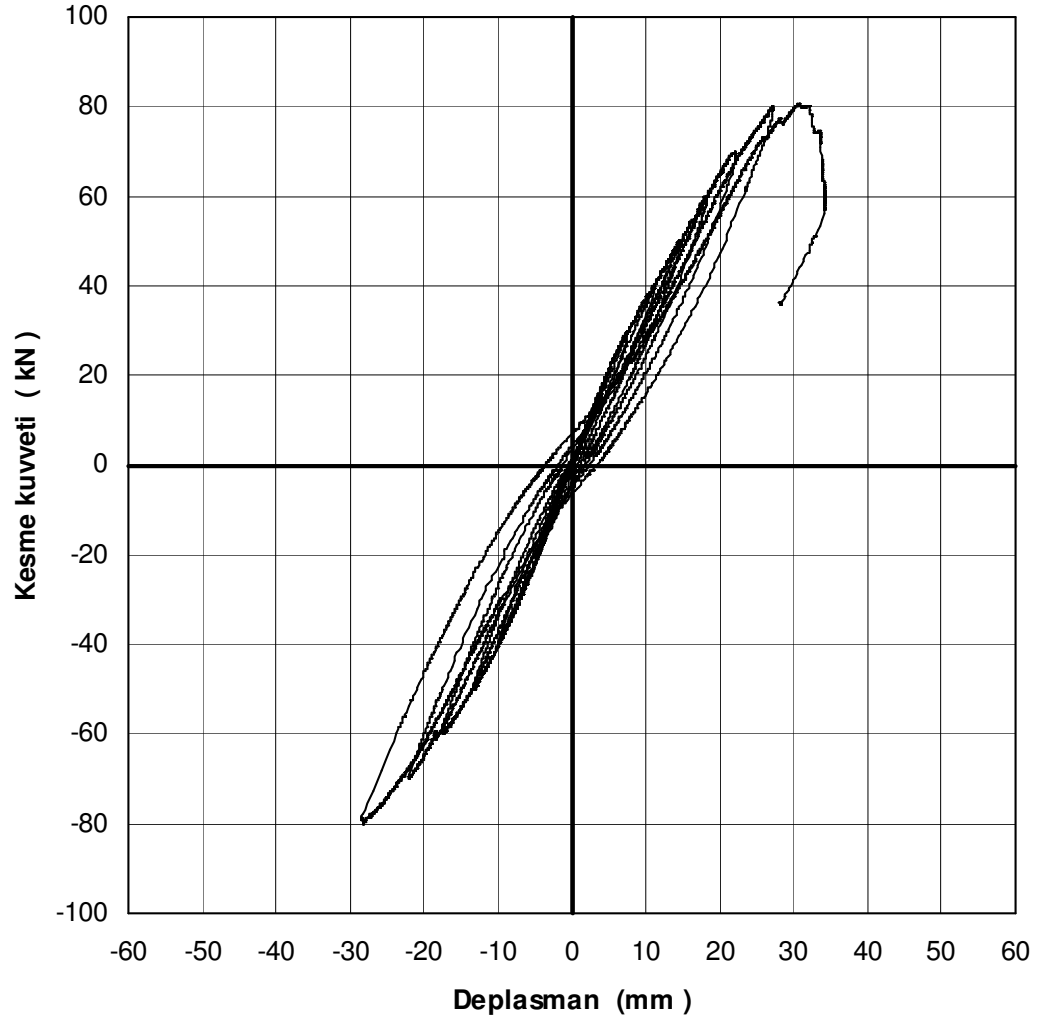
Bu çevrimde çıkılması planlanan maksimum yük 90,00 kN'dur. 44,00 kN yük düzeyinde 7 no'lu birim deformasyon ölçer, ölçebileceği birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmıştır. 79,00 kN yük seviyesinde 6 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde maksimum 0,0014 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimde 81,00 kN yük düzeyinde 14. ve 15. CFRP şeritler kopmuştur. 11., 12. ve 13. CFRP şeritler orta bölgelerinden beton yüzeyinden tamamen ayrılmıştır. Deney Elemanı-8, 14 ve 15 no'lu CFRP şeritlerin kopmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. 9. ,11. ve 14. CFRP şeritler üzerinde bulunan ankrajlar CFRP şeritleri, lifleri doğrultusunda yırtmıştır. Orta bölgelerinden beton yüzeyinden ayrılan CFRP şeritler yük boşaltıldığı sırada burkulmuştur. Ana kesme çatlağının genişliği 2,50 mm'ye ulaşmıştır. Kirişte gelişen diğer çatlaklar ise kılcal düzeydedir.

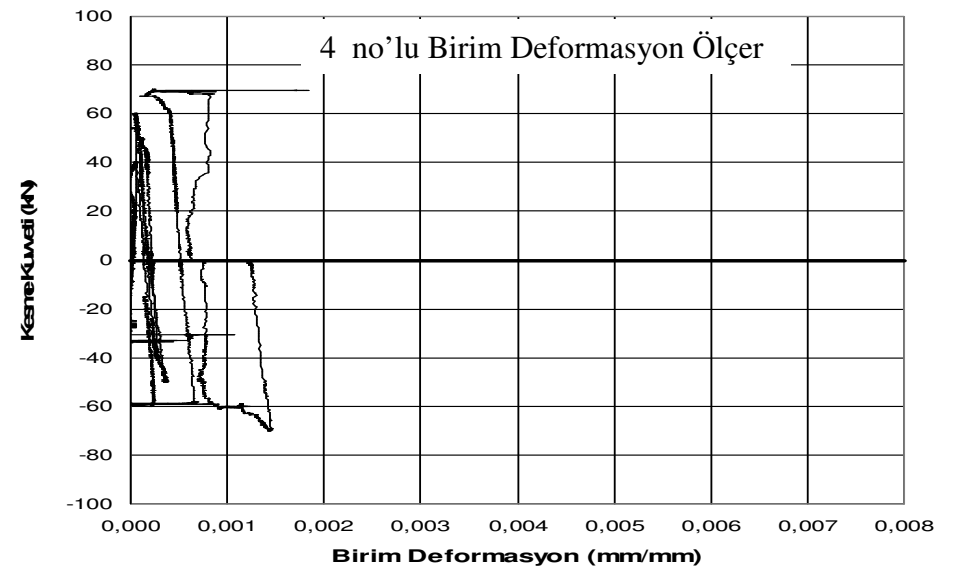
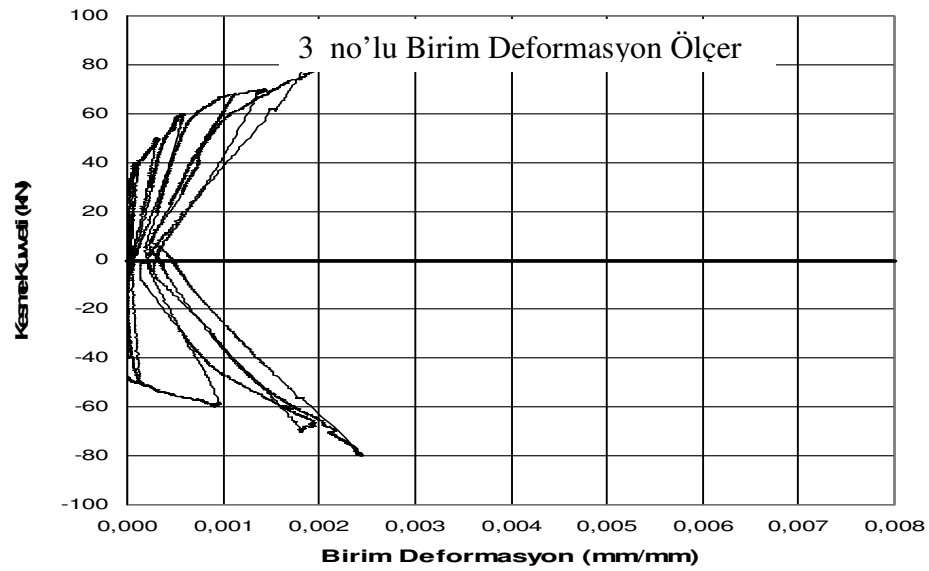
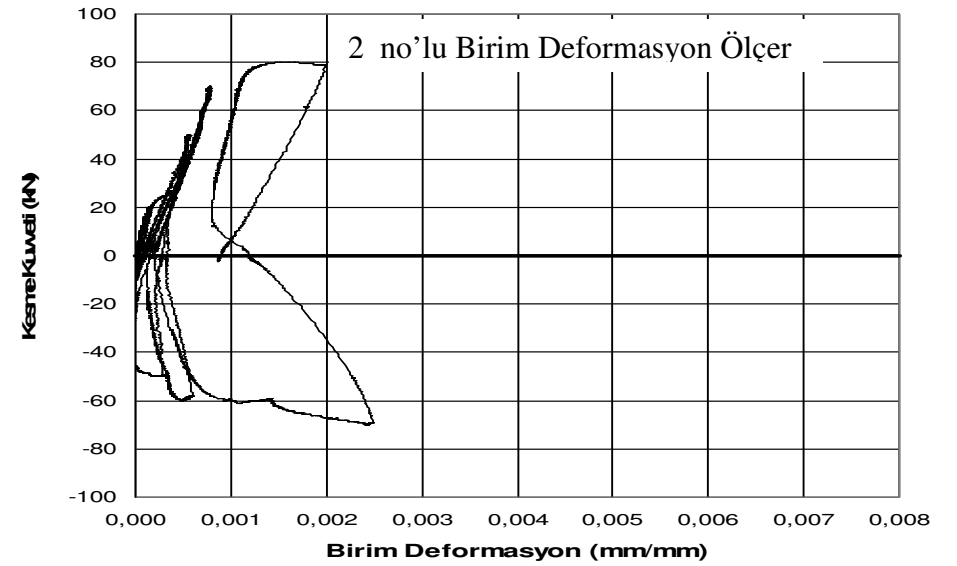
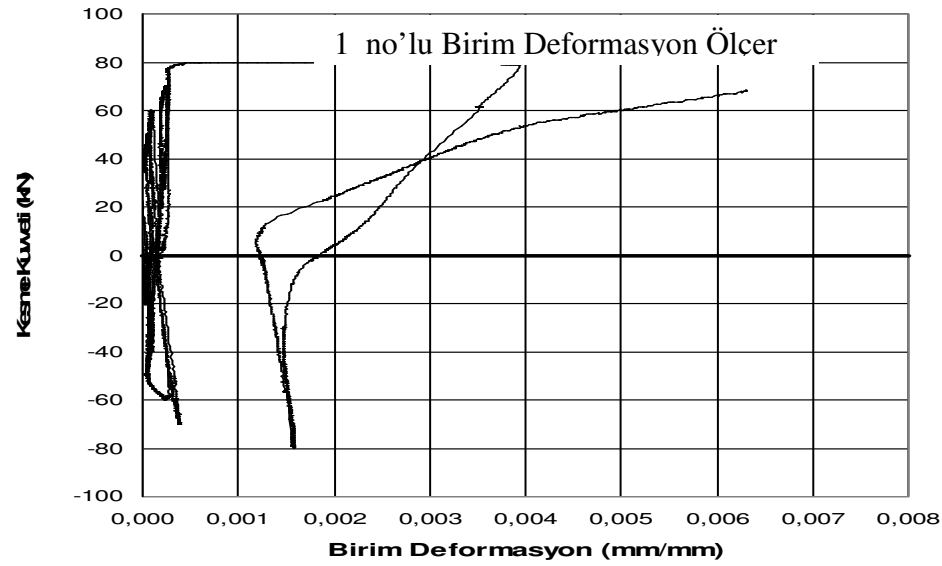


Şekil 3.51 Lifler doğrultusunda yırtılma, 11 no'lu CFRP şerit

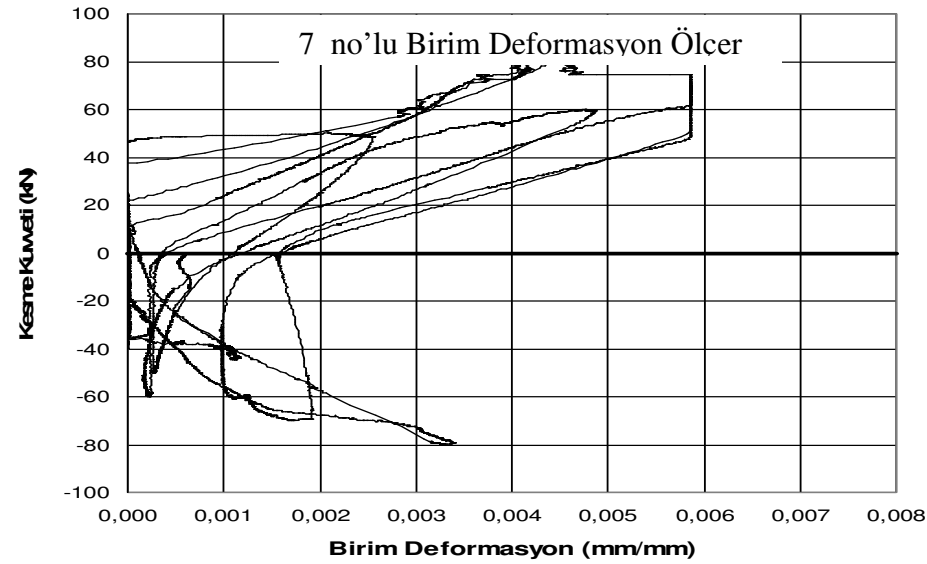
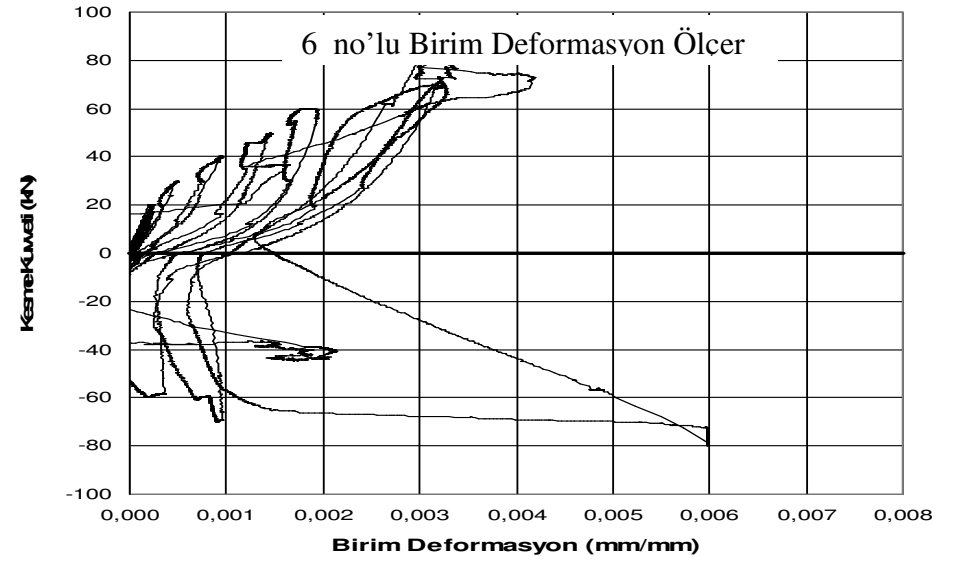
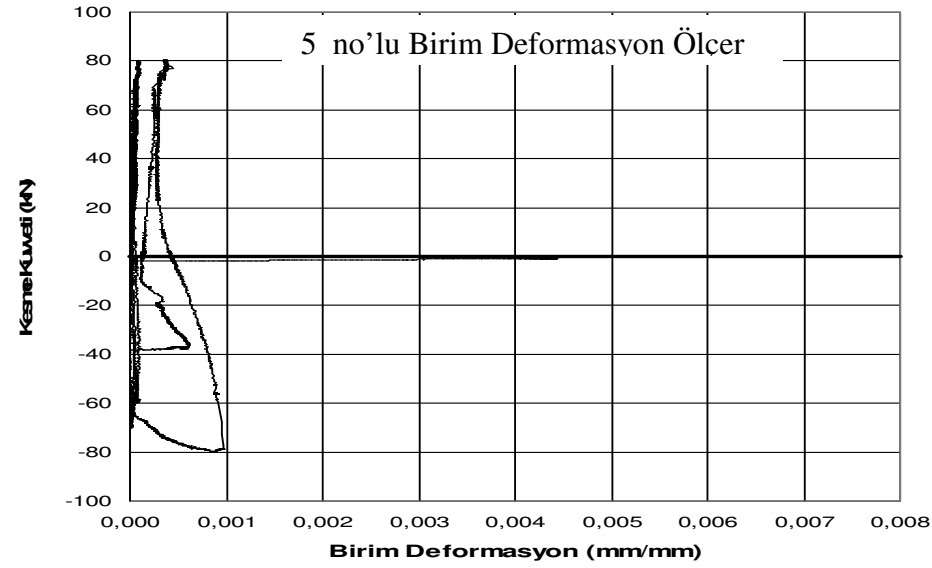


Şekil 3.52 Çatlak haritası, Deney Elemanı-8

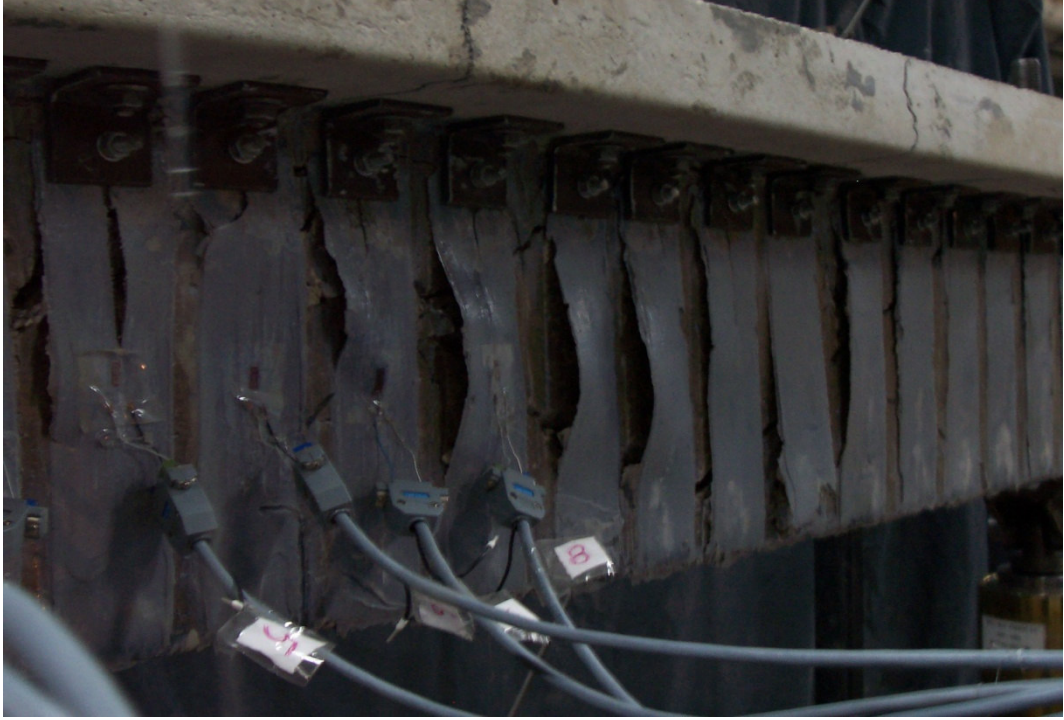




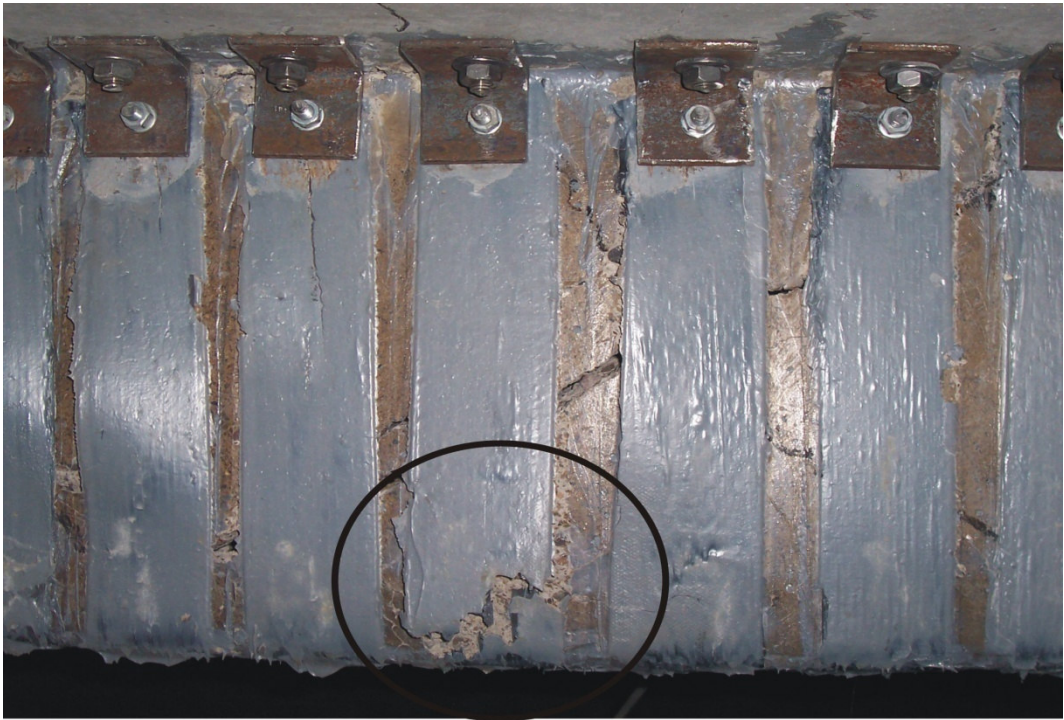
Şekil 3.54 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-8



Şekil 3.55 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-8



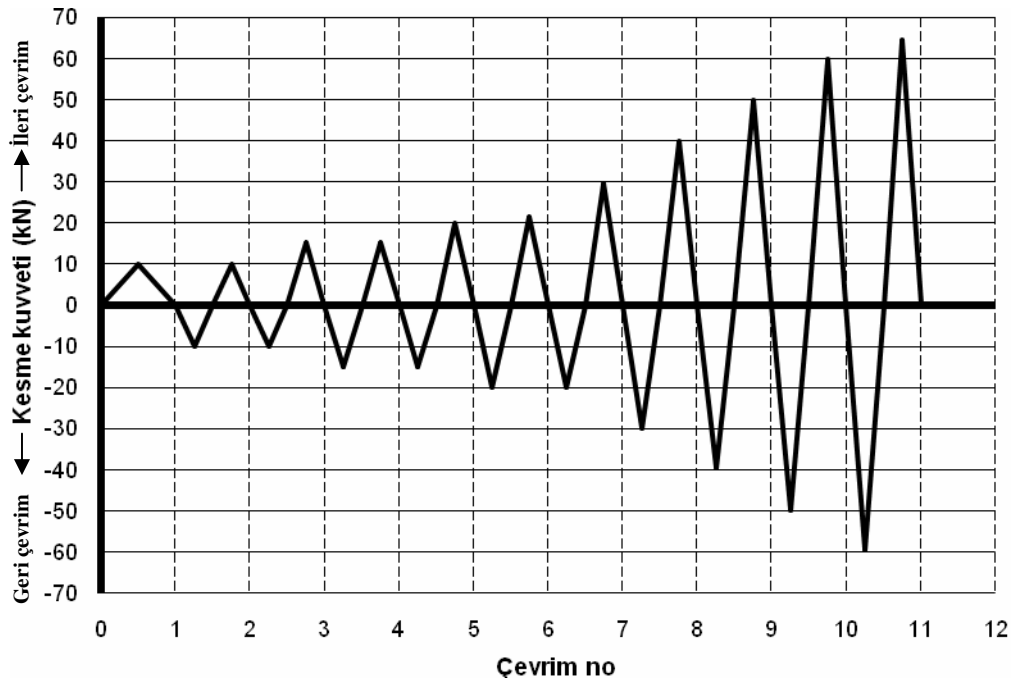
Şekil 3.56 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-8



Şekil 3.57 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-8

3.10 Deney Elemanı-9

Deney elemanında kiriş gövdesinin yan yüzlerinden başlayıp tablanın altında devam eden L biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 11 adet 100 mm genişliğinde L biçimli CFRP şerit kiriş gövdesine simetrik olarak 60 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.58’de verilmiştir. Deney elemanına 10 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.58 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı 9

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

1. çevrim

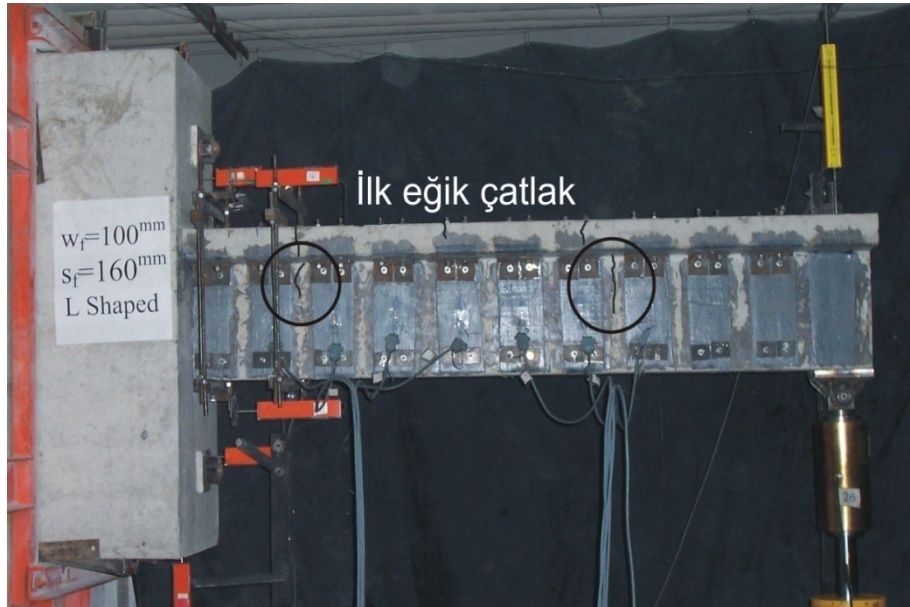
Çevrimin ileri yükleme adımında 10,00 kN yük düzeyinde 1,39 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde, kiriş tablasında, mesnetten 650 mm ve 1000 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir.

2. çevrim

Bu çevrimde çıkılan maksimum yük 10,00 kN'dur. Çevrimin geri yükleme adımında kiriş tablasında mesnetten 330 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 9,99 kN yük, 2,35 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte eğilme çatlakları gelişmiştir.

3. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 15,16 kN yük, 2,92 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu adımda kiriş gövdesinin alt yüzünde, mesnetten 450 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde kiriş tablasında mesnetten 320 mm ve 1120 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlakları gelişmiştir. Kiriş tablasında gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine gelişim göstermiştir.



Şekil 3.59 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-9

8. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 39,68 kN yük, 10,24 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinde 3. ve 4., 5. ve 6. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. 3 no'lu birim deformasyon değeri ani olarak %400 oranında artmış, 0,0008 mm/mm'ye ulaşmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde doğrusal birim deformasyon artışı gerçekleşmiştir. Bu çevrimin geri yüklemesinde 39,63 kN yük, 11,57 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasında, mesnetten 750 mm uzaklıkta gelişen eğilme çatlağı tablayı çevreleyerek 5. ve 6. CFRP şeritler arasına gelişim göstermiştir.

9. çevrim

Bu çevrimin ileri yükleme adımında 49,67 kN yük, 13,37 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzünde gelişen eğilme çatlaklarının sayısında artış gözlenmiştir. 2. ve 3. CFRP şeritler arasında gelişen eğik çatlak 3 no'lu CFRP şeridin alt ucuna, ankraja doğru gelişim göstermiştir. Çatlak nedeni ile 3 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %270 oranında artmış, 0,002 mm/mm'ye ulaşmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0006 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 1 no'lu birim deformasyon ölçerinde 0,0007 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 49,96 kN yük, 15,15 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu adımda 4. ve 5. CFRP şeritler arasında çok sayıda eğik çatlak gelişmiştir. Çatlaklar nedeni ile 3 ve 4 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0017 mm/mm ve 0,0002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

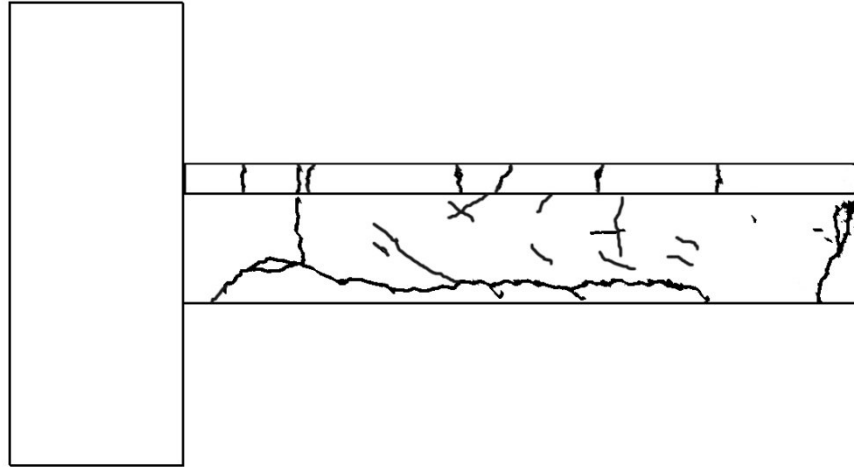
10. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 59,66 kN yük, 16,96 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 3. ve 4. CFRP şeritler arasında gelişen eğik çatlak, 3. CFRP şeridin altından devam ederek 2. ve 3. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişimine neden

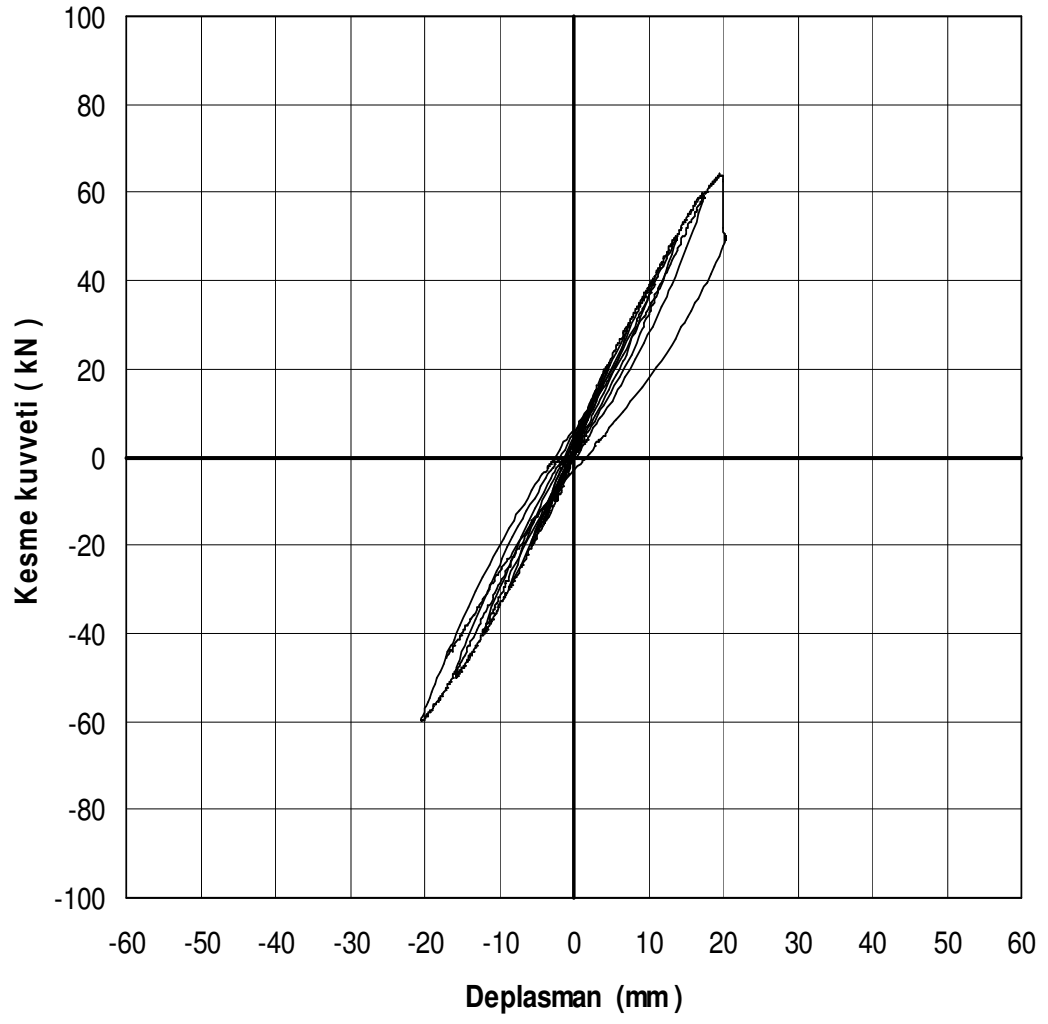
olmuştur. 2 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %500 oranında artmış, 0,0033 mm/mm'ye ulaşmıştır. Bu çevrimde 7. ve 8., 8. ve 9. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 2 ve 3 no'lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0014 mm/mm ve 0,0013 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 59,62 kN yük, 19,75 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimde 2. ve 3. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde eğik çatlak gelişmiştir. 1 no'lu birim deformasyon ölçer 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. Kiriş gövdesinde gelişen çatlakların genişliğinin artmasıyla birim deformasyon değerleri de bir önceki çevrime göre %50 oranında artmıştır.

11. çevrim

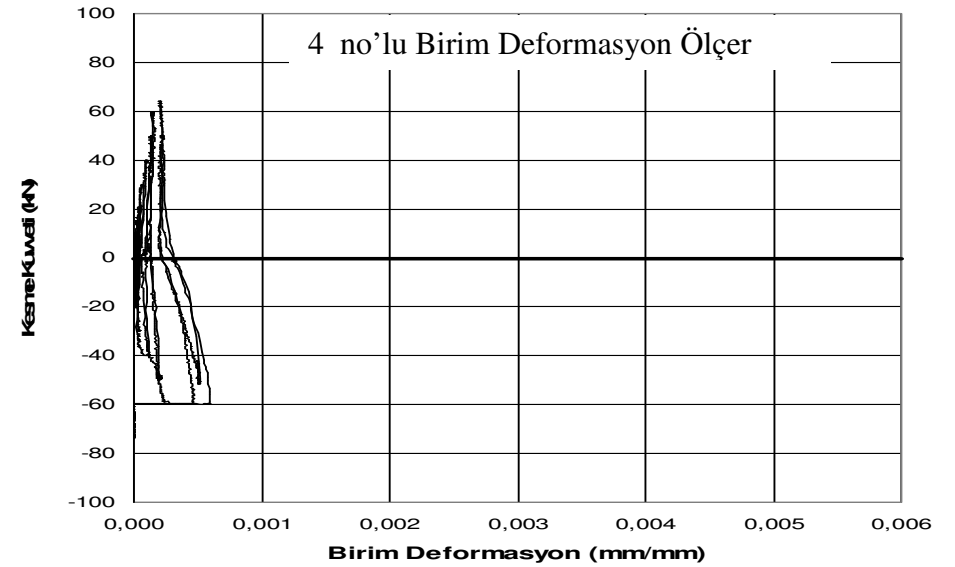
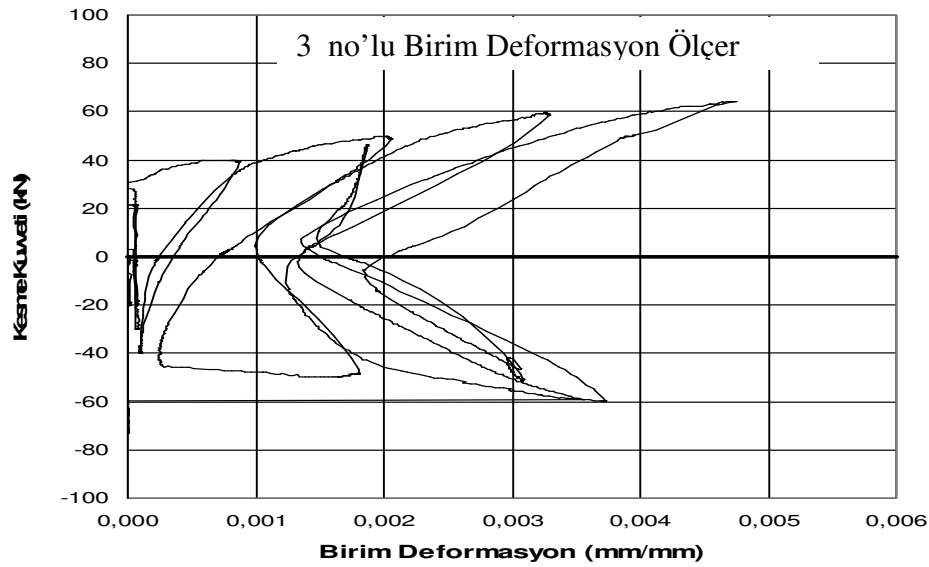
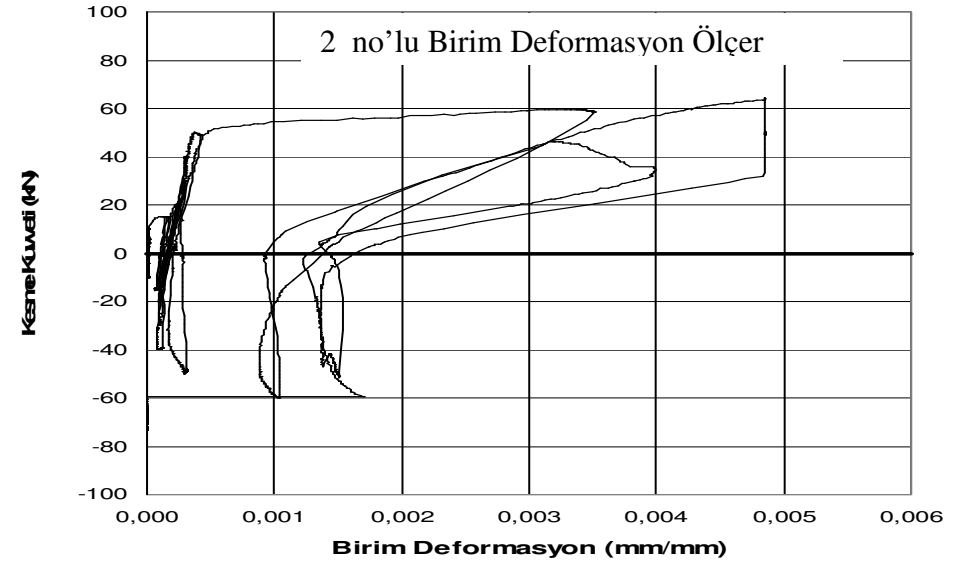
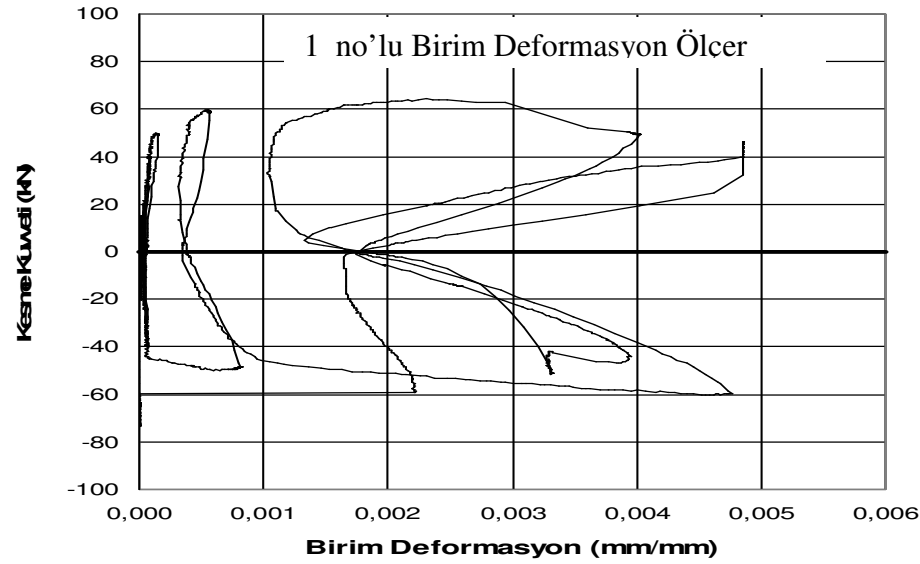
Çevrimde çıkılması planlanan yük 70,00 kN'dur. 2. ve 3. CFRP şeritler arasında gelişen çatlağın genişliği 0,25 mm düzeyine ulaşmıştır. 2 no'lu birim deformasyon ölçer, 63,47 kN yük seviyesinde ölçebileceği birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmıştır. 4. CFRP şeritte ankrajların altından başlayan çatlak, 8. CFRP şeride kadar gelişim göstermiştir. Deney elemanı, beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Göçme anında 1 no'lu birim deformasyon değeri ani olarak 0,0029 mm/mm'den 0,0036 mm/mm'ye yükselmiştir. Çatlak gelişimi anında diğer birim deformasyon ölçerlerde ani birim deformasyon düşüşü gerçekleşmiştir.



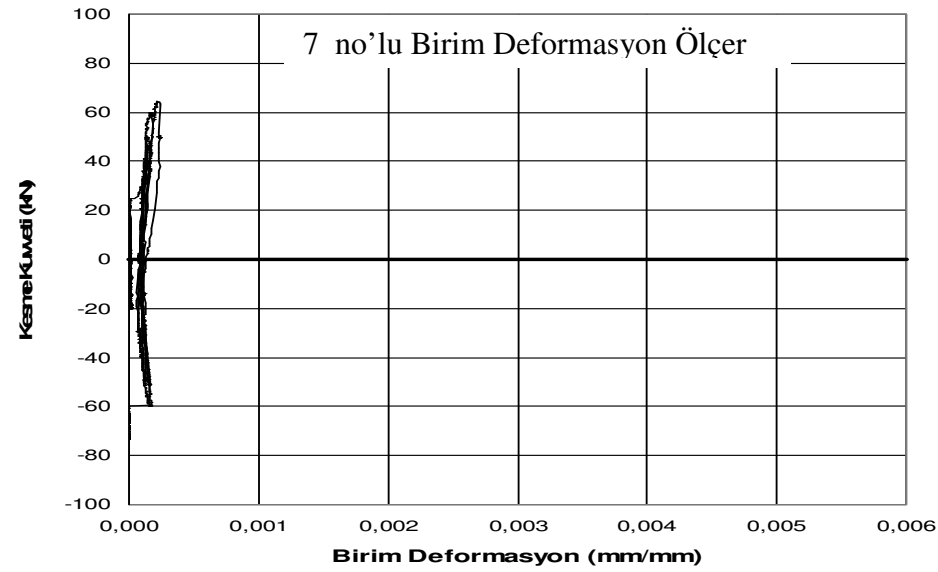
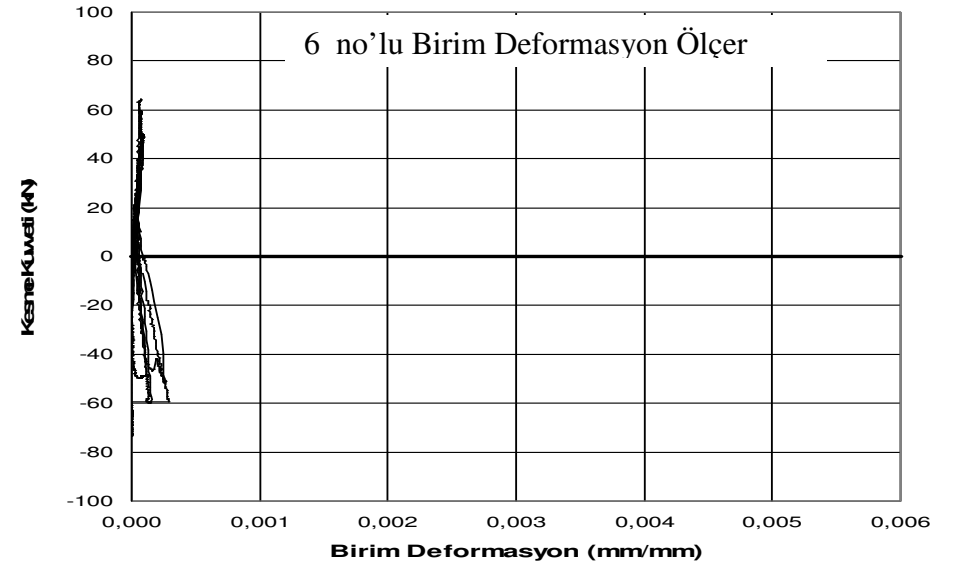
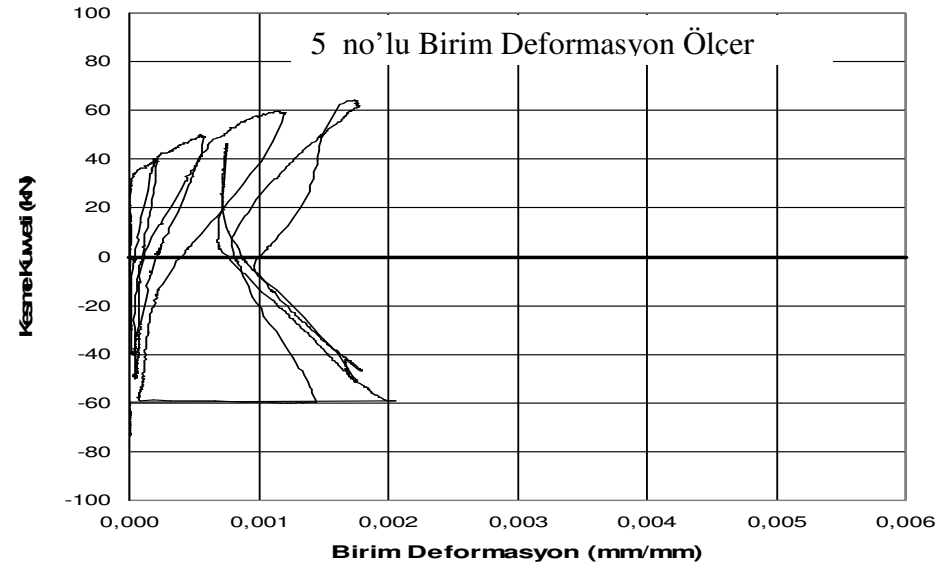
Şekil 3.60 Çatlak haritası, Deney Elamanı-9



Şekil 3.61 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-9



Şekil 3.62 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-9



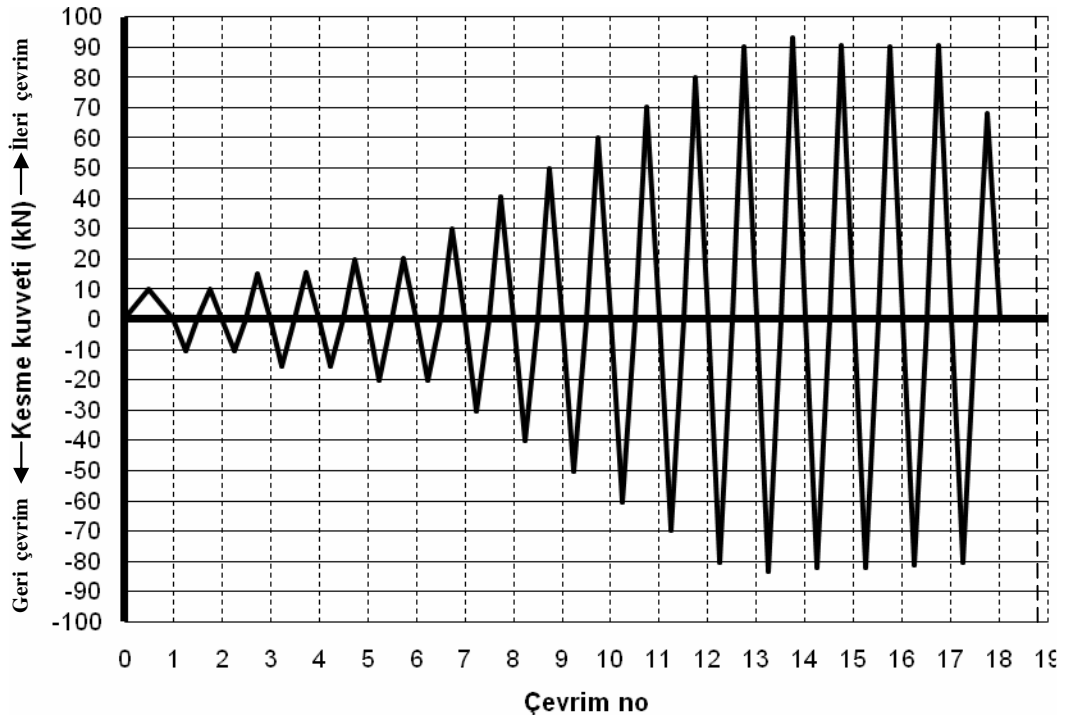
Şekil 3.63 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-9



Şekil 3.64 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-9

3.11 Deney Elemanı-10

Deney elemanında tablanın altından başlayıp kirişin yan yüzlerinde devam eden ve kiriş gövdesinin alt yüzünü sargılayan $\sqcap$ biçimli CFRP şeritler kullanılmıştır. 50 mm genişliğinde, 930 mm uzunluğunda 22 CFRP şerit kiriş gövdesine 30 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.65’de verilmiştir. Deney elemanına 17 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.65 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-10

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

2.çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 10,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 1,39 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemede, kiriş tablasında, mesnetten 350 mm uzaklıkta kılcal düzeyde ilk eğilme çatlakları gelişmiştir.

5.çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 19,68 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 3,23 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 20,32 kN yük, 5,74 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasında mesnetten 450 ve 900 mm uzaklıkta kılcal eğilme çatlakları gelişmiştir.

8.çevrim

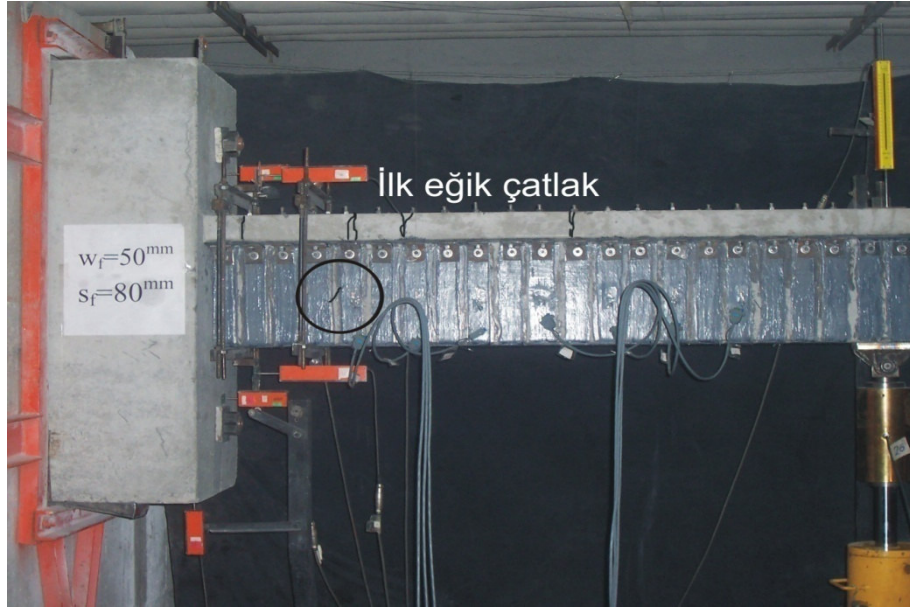
Çevrimin ileri yükleme adımında 40,33 kN yük düzeyinde, 8,11 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş gövdesinin alt yüzünde mesnetten 500 mm uzaklıkta kılcal düzeyde eğilme çatlağı gelişmiştir. Çatlak nedeni ile 2 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %700 oranında artmış, 0,0014 mm/mm'ye ulaşmıştır. Diğer birim deformasyon değerleri doğrusal artmıştır. Çevrimin geri yüklemesinde 39,97 kN yük, 12,03 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu adımda mesnetten 150 mm ve 350 mm uzaklıkta gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine gelişim göstermişlerdir. Çatlaklar, 35,00 kN yük düzeyinde CFRP şeritleri lifleri doğrultusunda kılcal düzeyde yırtarak, ankrajlara kadar gelişmiştir.

9.çevrim

50,00 kN yük düzeyine çıkılan çevrimin geri yükleme adımında, mesnetten 900 mm uzaklıkta gelişen eğilme çatlağı tablayı çevreleyerek kiriş gövdesinde gelişim göstermiştir. Çatlak, CFRP şeridi lifleri doğrultusunda kılcal düzeyde yırtmıştır. Çevrimin geri yüklemesinde 50,29 kN yük, 15,82 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,20 mm'ye ulaşmıştır.

10.çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 60,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 14,11 mm ölçülmüştür. 40,00 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak 4. ve 5. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir.



Şekil 3.66 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-10

4. ve 5. CFRP şeritler arasındaki gelişen eğik çatlak, 5. CFRP şeridin altından devam ederek 5. ve 6. CFRP şeritler arasında yeni bir çatlak gelişimine neden olmuştur. Çatlağın eğimi ve genişliği özdeştir. Çatlak nedeni ile 1 no'lu birim deformasyon değeri bir önceki çevrime göre %700 oranında artmış, 0,0011 mm/mm'ye ulaşmıştır. 2 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,0041 mm/mm birim deformasyon ölçülmüş, diğer birim deformasyon değerleri yüke bağlı olarak doğrusal artmıştır. Çevrimin geri yüklemesinde 60,29 kN yük, 20,27 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 54,00 kN yük düzeyinde 13. ve 14. CFRP şeritler arasında yeni bir eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak gelişimi 5 no'lu birim deformasyon değerlerinin aniden %210 oranında artmasına ve 0,0014 mm/mm değerine ulaşmasına neden olmuştur. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,25 mm'ye ulaşmıştır. Maksimum yük seviyesinde 1 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,0038 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

11. çevrim

70,00 kN yük düzeyine çıkılan çevrimin ileri yükleme adımı 17. ve 18. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Tüm birim deformasyon ölçerlerde yüke bağlı, doğrusal birim deformasyon artışı gözlenmiştir. 1 no'lu birim deformasyon değeri 65,00 kN yük seviyesinde 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmış, birim deformasyon ölçer yükteki artışla bu çevrimde devre dışı kalmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0038 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 1 no'lu birim deformasyon ölçerde 0,0011 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 69,94 kN yük, 25,18 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Bu adımda mesnetten 1150 mm uzaklıkta, tablada, kılcıl eğilme çatlağı gelişmiştir. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,30 mm'ye ulaşmıştır. Geri yükleme sırasında tekrar ölçüm yapabilen 1 no'lu birim deformasyon ölçer, 56,00 kN yük düzeyinde bir kez daha devre dışı kalmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde yüke bağlı, doğrusal birim deformasyon artışı gözlenmiştir.

13. çevrim

Bu çevrimde çıkılması planlanan maksimum yük 90,00 kN'dur. Çevrimde kiriş gövdesinde yeni çatlak gelişmemiştir. 50,00 kN yük düzeyinde 1 no'lu, 70,00 kN yük düzeyinde 3 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerler, ölçebilecekleri birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmışlardır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde en fazla 0,0034 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 1, 2, 3, 5 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde 0,0014 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0004 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımı 33,00 kN yük düzeyinde 1 no'lu birim deformasyon ölçer, 79,00 kN yük düzeyinde de 3 no'lu birim deformasyon ölçer, ölçebileceği birim deformasyon değerinden büyük birim

deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmıştır. Bu çevrimin geri yüklemesi sırasında yük 83,00 kN, kiriş uç deplasmanı da 34,14 mm düzeyinde iken kiriş üst boyuna donatısı akmıştır. Donatının aktığı sırasında birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değişikliği gerçekleşmemiştir.

14. çevrim

İleri çevrimde 60,00 kN yük düzeyinde 1 no'lu birim deformasyon ölçer, 50,00 kN yük düzeyinde 3 no'lu birim deformasyon ölçer, 88,00 kN yük düzeyinde 5 no'lu birim deformasyon ölçer, 60,00 kN yük düzeyinde 7 no'lu birim deformasyon ölçer, ölçebileceği birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı kalmıştır. Çevrimde, 11. ve 13. CFRP şeritler beton yüzeyinden ayrılmıştır. 11. ve 13. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması, 4 ve 5 no'lu birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değişime neden olmamıştır. Çevrimin ileri yükleme adımında yük 93,00 kN, kiriş uç deplasmanı da 29,19 mm iken kiriş alt boyuna donatısı akmıştır. Donatının aktığı sırasında birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değişikliği gerçekleşmemiştir. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 1, 2, 3, 5 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0017 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0005 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu çevrimden sonra deneye deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Her çevrimde kiriş uç deplasmanı yaklaşık 5,00 mm arttırılmıştır. Deney elemanına üç tam yük çevrimi daha uygulanmıştır. Bu çevrimlerde kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlakların sayısında ve genişliklerinde artış gözlenmiştir. Kiriş gövdesinde gelişen eğik çatlakların genişlikleri 0,20 mm'ye ulaşmıştır. 4. ve 5. CFRP şeritler beton yüzeyinden ayrılmıştır. Çevrimlerde birim deformasyon değişikliği gözlenmemiştir. Kirişin birim deformasyon davranışı, önceki çevrimler ile özdeştir.

18. çevrim

Bu çevrimde 2 ve 4 no'lu CFRP şeritler lifleri doğrultusunda yırtılmıştır. Yükteki artışa rağmen 1 no'lu birim deformasyon ölçerlerde birim deformasyon artışı gözlenmemiştir.



Şekil 3.67 Lifler doğrultusunda yırtılma, 2 ve 4 no'lu CFRP şeritler

2 no'lu birim deformasyon ölçer, 50,00 kN seviyesinde 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. 60,00 kN yük düzeyinde 2, 3, 4, 5 ve 6 no'lu CFRP şeritler orta bölgelerinden beton yüzeyinden ayrılmıştır. CFRP şeritler beton yüzeyinden ayrıldıktan sonra 68,00 kN yük düzeyinde, 2. CFRP şeridin üst ucundan başlayan 3., 4. ve 5. CFRP şeritleri diyagonal doğrultuda boydan boya keserek ve 6. CFRP şeridin alt ucuna ulaşan diyagonal kesme çatlağı nedeni ile kiriş kesmeden göçmüştür.

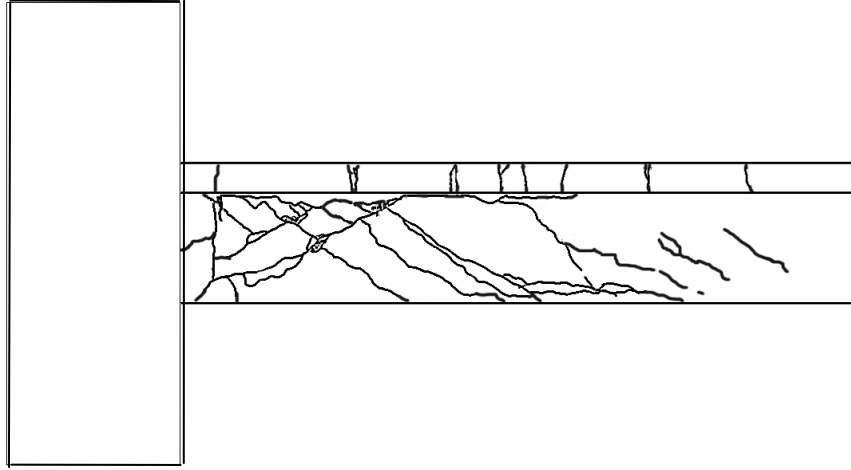


Şekil 3.68 CFRP şeritler orta bölgelerinden beton yüzeyinden ayrılmış

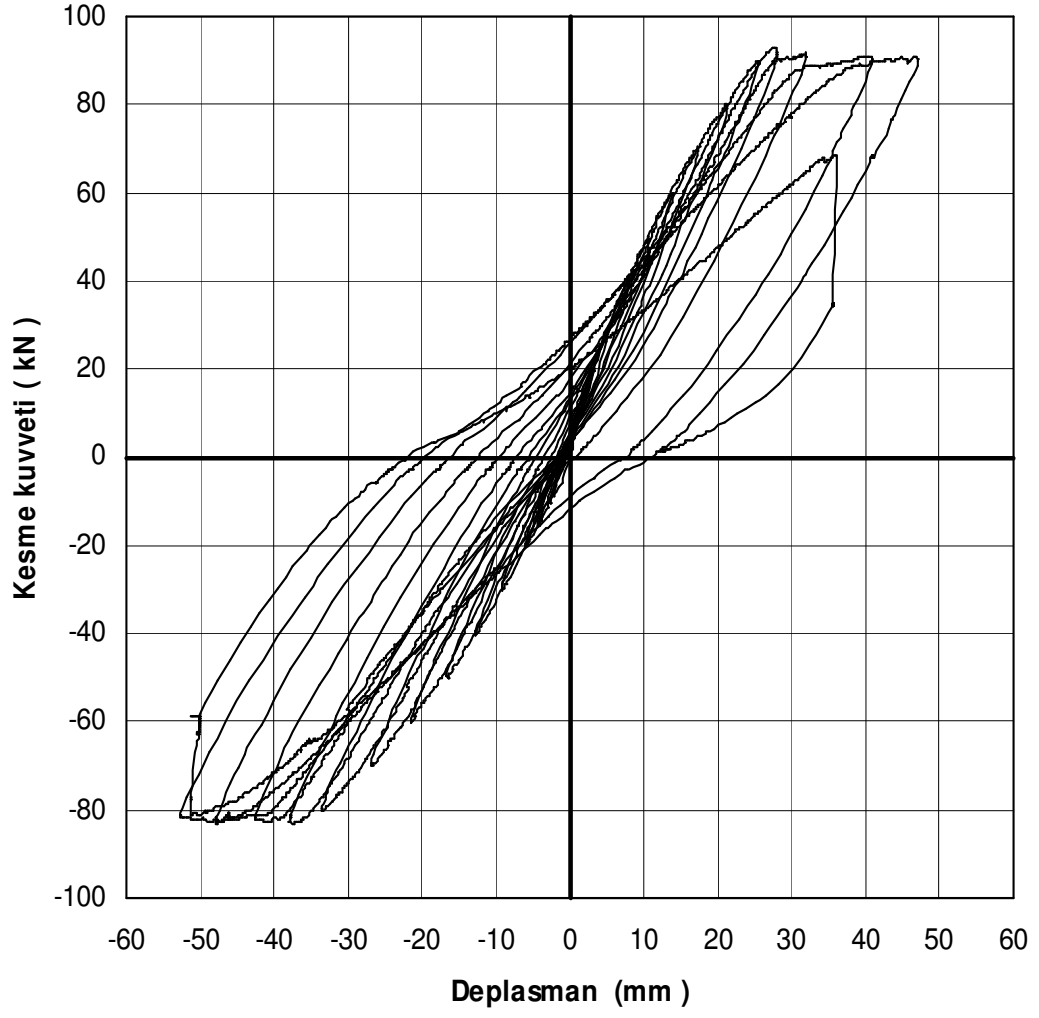


Şekil 3.69 CFRP şeritlerde kopma

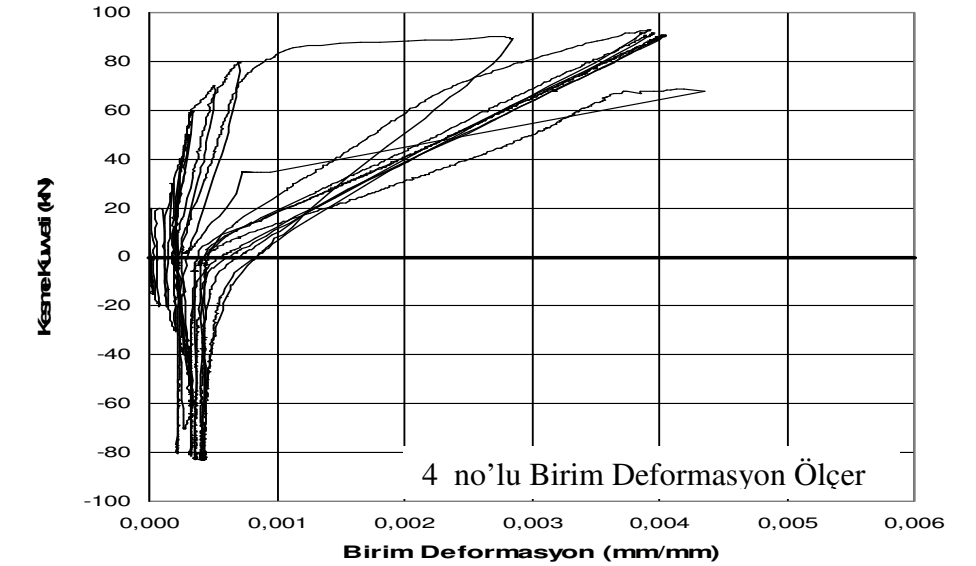
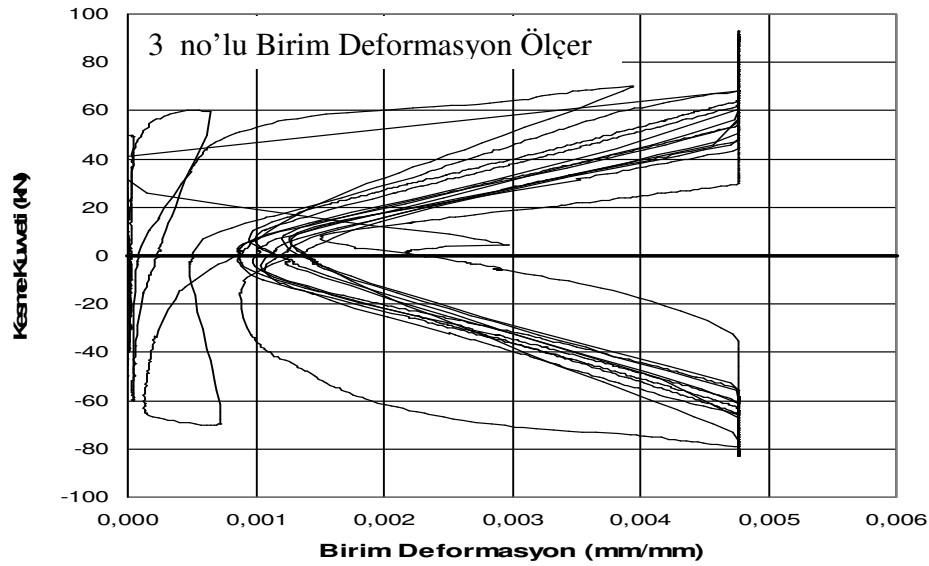
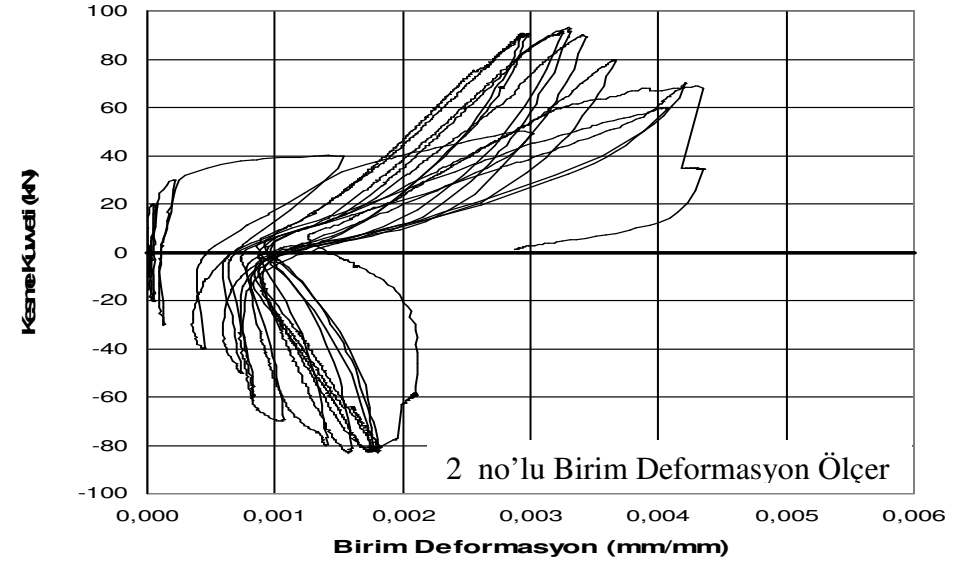
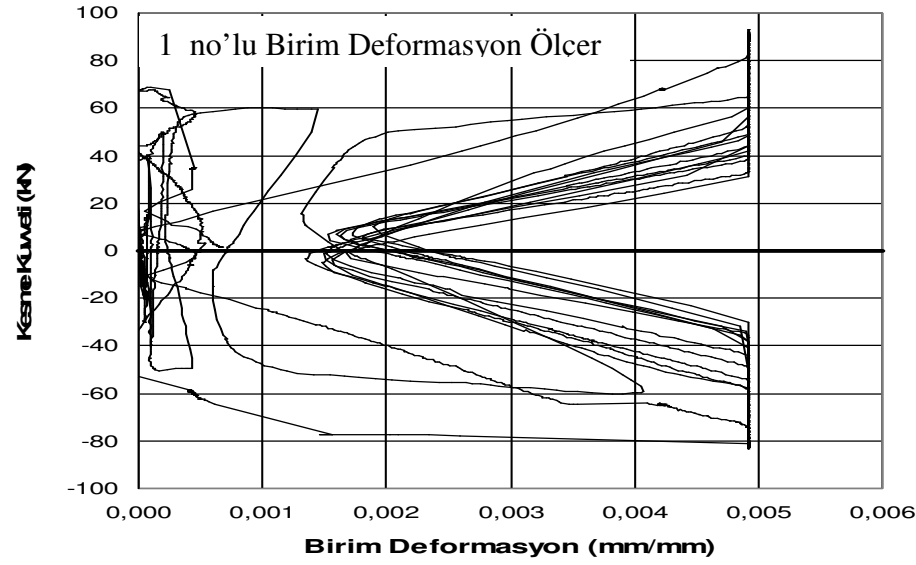
Ana kesme çatlağının aderans çatlağıyla birleştiği kesitte, 11'den 15. Şeride kadar tüm CFRP şeritler kopmuştur.



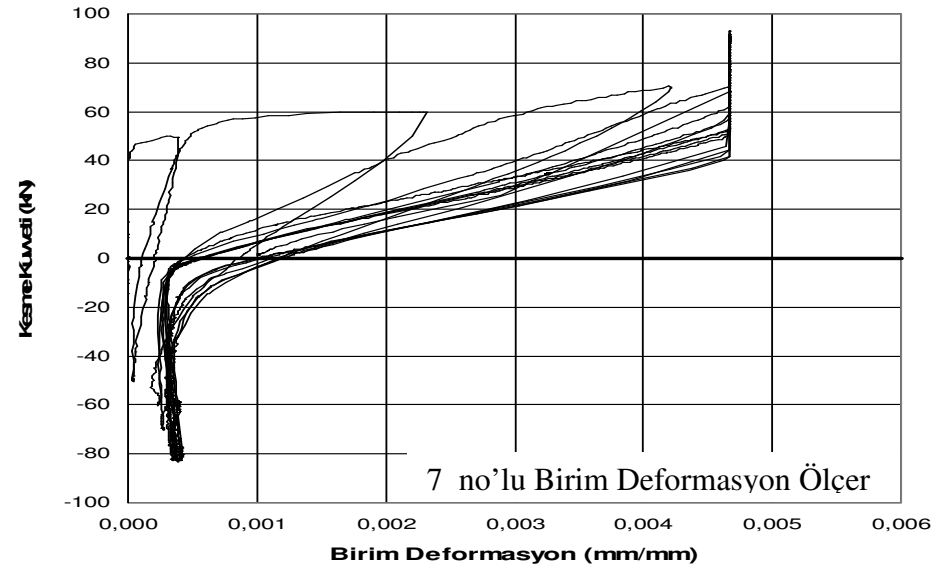
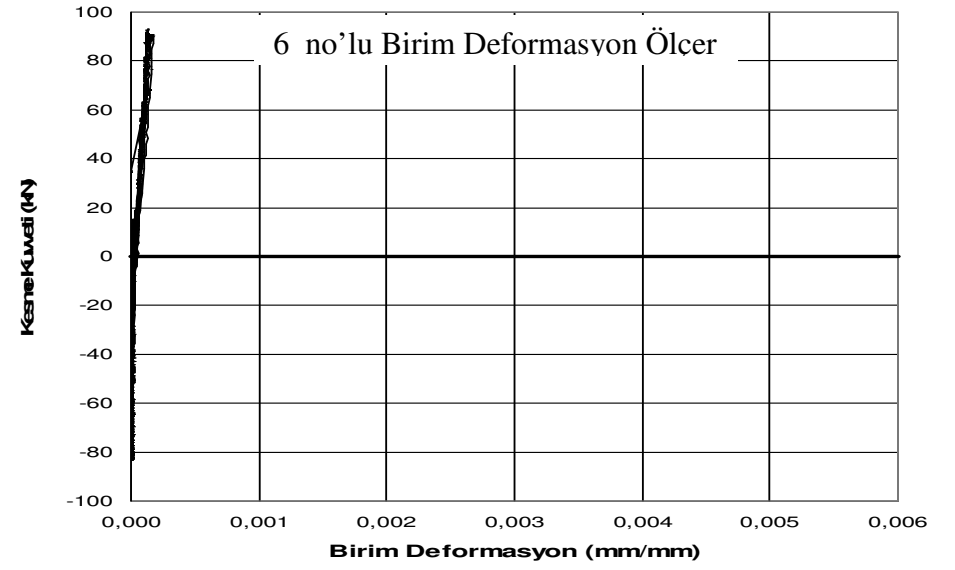
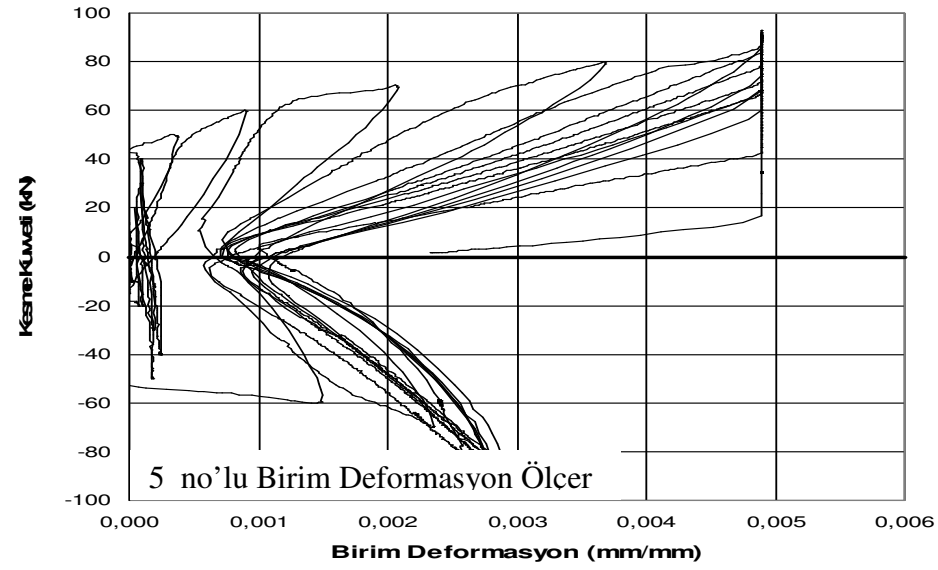
Şekil 3.70 Çatlak haritası, Deney Elemanı-10



Şekil 3.71 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, Deney Elemanı-10



Şekil 3.72 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-10



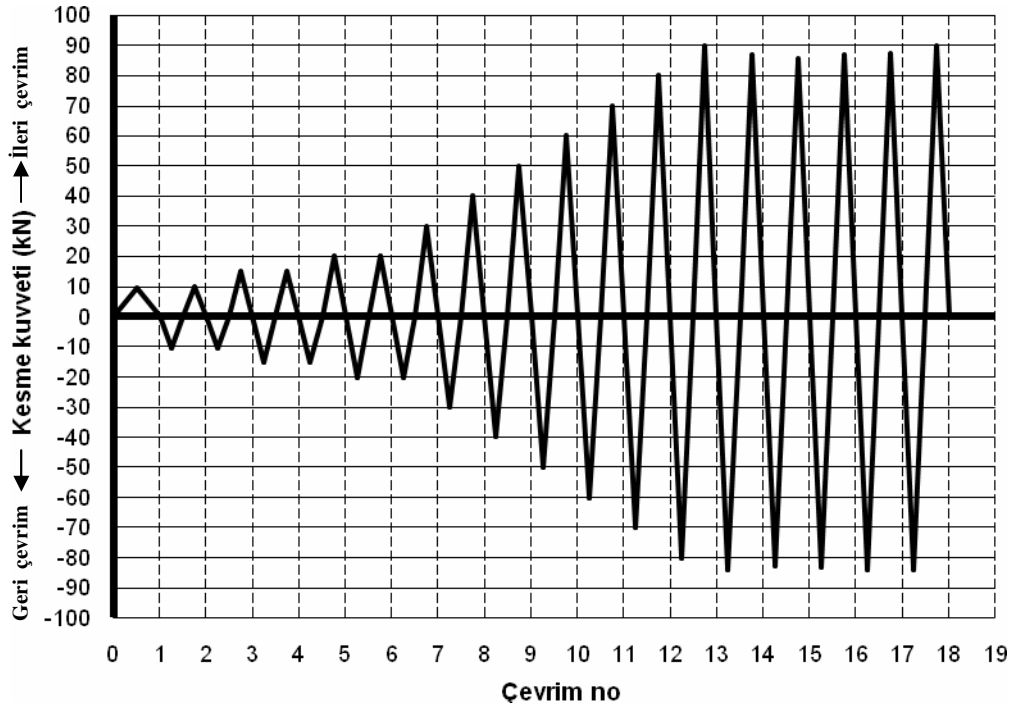
Şekil 3.73 Kesme kuvveti-birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-10



Şekil 3.74 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-10

3.12 Deney Elemanı-11

Deney elemanında tablanın altından başlayıp kirişin yan yüzlerinde devam eden ve kiriş gövdesinin alt yüzünü sargılayan 100 mm genişliğinde $\sqcap$ biçimli CFRP şeritler, kiriş gövdesine 30 mm aralıkla yapıştırılmıştır. Deney elemanına uygulanan yük geçmişi Şekil 3.75’de verilmiştir. Deney elemanına 17 tam yük çevrimi uygulanmıştır.



Şekil 3.75 Kesme kuvveti-çevrim grafiği, Deney Elemanı-11

Deney sırasında önemli gözlemlerin yapıldığı yük çevrimleri aşağıda özetlenmiştir.

1. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 9,64 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 1,59 mm ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında kiriş tablasında, mesnetten 1100 mm uzaklıkta kılcal düzeyde ilk eğilme çatlağı gelişmiştir.

2. çevrim

Çevrimin ileri yüklemesinde 10,00 kN yük düzeyinde 1,49 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimin geri yükleme adımında, kiriş tablasında, mesnetten 200, 650 ve 1600 mm uzaklıkta kılcal eğilme çatlakları gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte eğilme çatlakları gelişmiştir.

8. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 40,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 9,24 mm ölçülmüştür. 3. ve 4. CFRP şeritler arasında 4. CFRP şeride paralel çatlak gelişmiştir. Çevrimin geri yüklemesinde 39,97 kN yük, 10,95 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Kiriş tablasında gelişen eğilme çatlakları tablayı çevreleyerek kiriş gövdesine gelişim göstermiştir.

10. çevrim

Çevrimin ileri yükleme adımında 60,00 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 15,75 mm ölçülmüştür. Deney elemanında yük boşaltıldığında, tüm birim deformasyon ölçerlerde 0,00024 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Çevrimin geri yüklemesinde 60,29 kN yük düzeyinde kiriş uç deplasmanı 18,37 mm ölçülmüştür. 50,00 kN yük düzeyinde kiriş tablasında gelişen eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. Kiriş tablasında, mesnetten 200 mm uzaklıkta, gelişen eğilme çatlaklarının genişliği 0,20 mm seviyesine ulaşmıştır. Çatlakların genişliğinin artmasıyla, 1 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %150 oranında artmış, 0,003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Kiriş tablasında mesnetten 500 ve 800 mm uzaklıkta kılcal eğilme çatlakları gelişmiştir. 3 ve 5 no'lu birim deformasyon değerleri bir önceki çevrime göre %150 oranında artmıştır. 3 ve 5 no'lu birim deformasyon ölçerinde sırasıyla 0,0008 mm/mm ve 0,0012 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

11. çevrim

Bu çevrimde çıkılan maksimum yük 70,00 kN'dur. Bu yük seviyesinde 19,75 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. 55,00 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinin alt yüzünde, mesnetten 380 mm uzaklıkta eğilme çatlağı gelişmiştir. Deney elemanında yük boşaltıldığında, tüm birim deformasyon ölçerlerde 0,00036 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. 45,00 kN yük düzeyinde kiriş gövdesinde ilk eğik çatlak 2. ve 3. CFRP şeritler arasında kılcal düzeyde gelişmiştir.



Şekil 3.76 İlk eğik çatlak, Deney Elemanı-11

Çatlak gelişimi 1 no'lu birim deformasyon değerinin ani artmasına neden olmuş, birim deformasyon değeri 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde yüke bağlı, doğrusal birim deformasyon artışı gözlenmiştir.

12. çevrim

Bu çevrimde çıkılması planlanan maksimum yük 80,00 kN'dur. Bu yük seviyesinde 23,70 mm deplasman ölçülmüştür. 5. ve 6. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 4 ve 5 no'lu birim

deformasyon ölçerde 0,001 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00044 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu çevrimin geri yükleme adımımda 80,27 kN yük, 27,64 mm kiriş uç deplasmanı ölçülmüştür. Çevrimde 1. ve 2., 4. ve 5. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir.

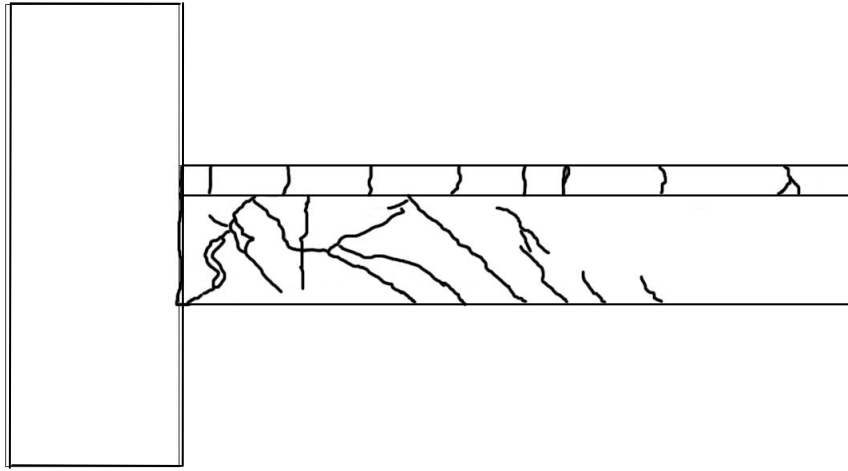
13. çevrim

90,00 kN yük düzeyine çıkılan çevrimin ileri yüklemesinde, 70,00 kN yük düzeyinde 5. ve 6. CFRP şeritler arasında eğik çatlak gelişmiştir. Çatlak, ani birim deformasyon artışına neden olmamıştır. Kiriş gövdesinde gelişen tüm çatlaklar kılcal düzeydedir. Maksimum yük seviyesinde 1, 4 ve 5 no'lu birim deformasyon ölçerler 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. Deney elemanında yük boşaltıldığında, 1, 4 ve 5 no'lu birim deformasyon ölçerde ortalama 0,0016 mm/mm kalıcı birim deformasyon ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,00052 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu çevrimin geri yükleme adımımda yük 84,00 kN , kiriş uç deplasmanı da 28,01 mm iken kiriş üst boyuna donatısı akmıştır. Donatının aktığı sırasında birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değişikliği gerçekleşmemiştir. Kiriş tablasının mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,25 mm'ye ulaşmıştır.

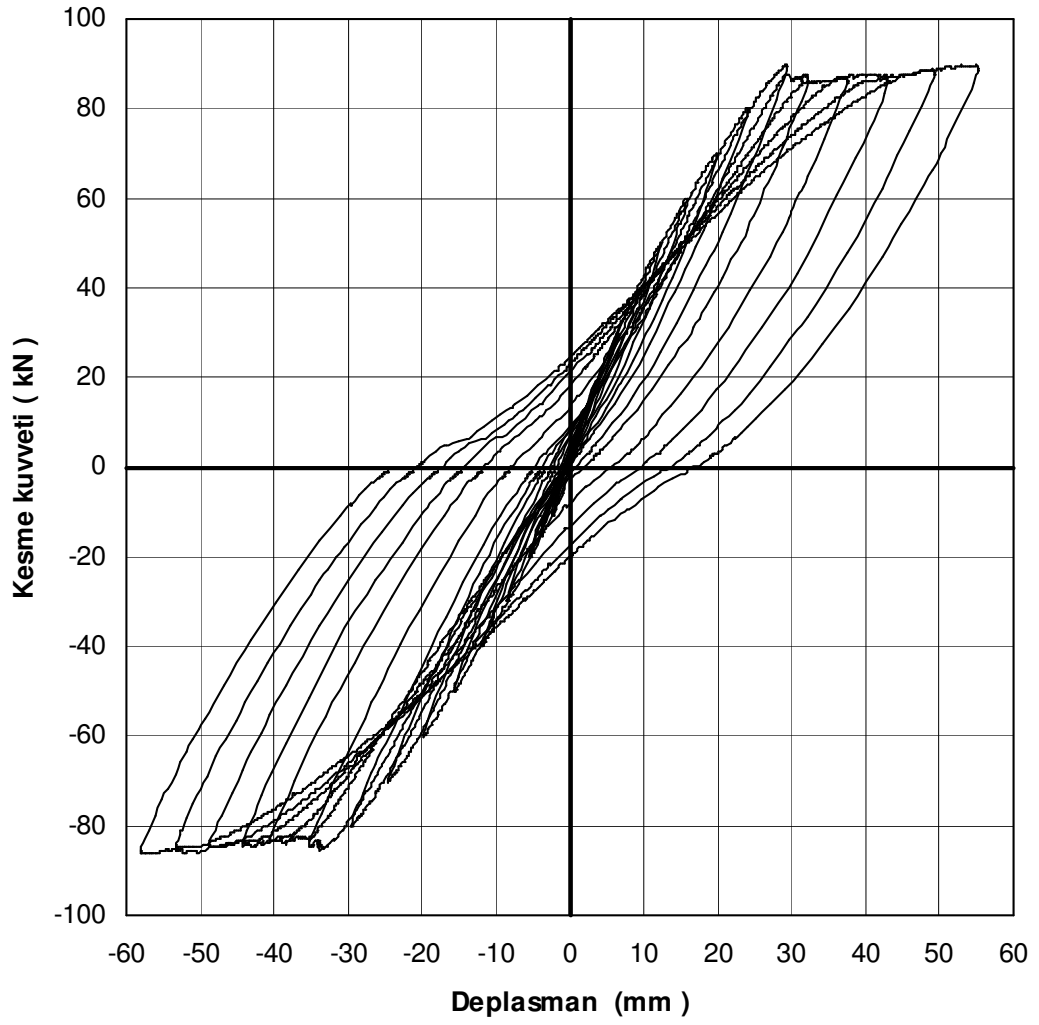
14. çevrim

42,00 kN yük seviyesinde 1 no'lu birim deformasyon değeri 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır. 87,00 kN yük düzeyinde, kiriş uç deplasmanı 28,73 mm iken kiriş alt boyuna donatısı akmıştır. Akma gerçekleşmeden 1, 4 ve 5 no'lu birim deformasyon değerleri 0,004 mm/mm'yi, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini, aşmıştır. Donatının aktığı sırasında birim deformasyon ölçerlerde, birim deformasyon değişikliği gerçekleşmemiştir. Kirişin mesnede birleştiği kesitte gelişen eğilme çatlağının genişliği 0,40 mm'ye ulaşmıştır. Bu çevrimden sonra deneye deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Her çevrimde kiriş uç deplasmanı yaklaşık 5,00 mm arttırılmıştır. Deney elemanına dört tam yük çevrimi daha

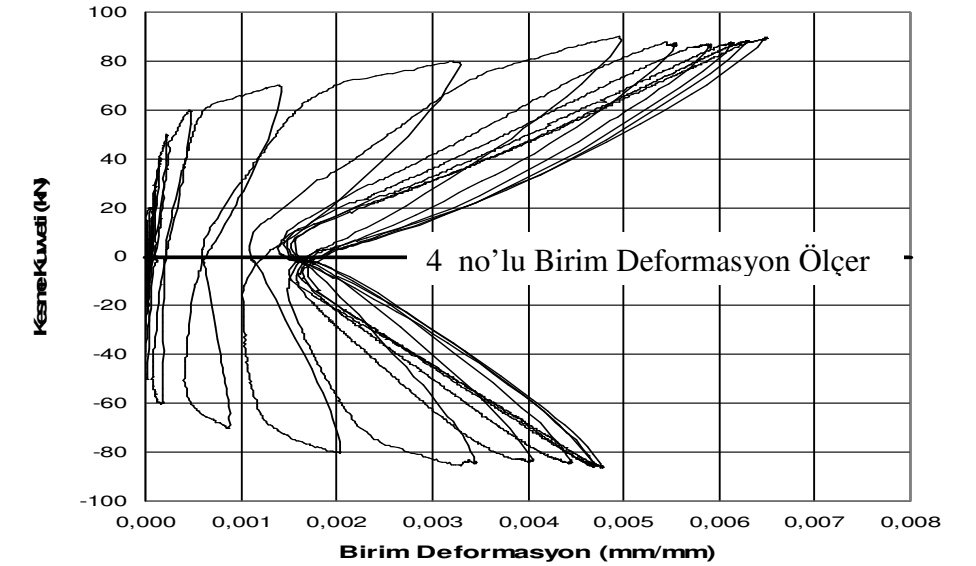
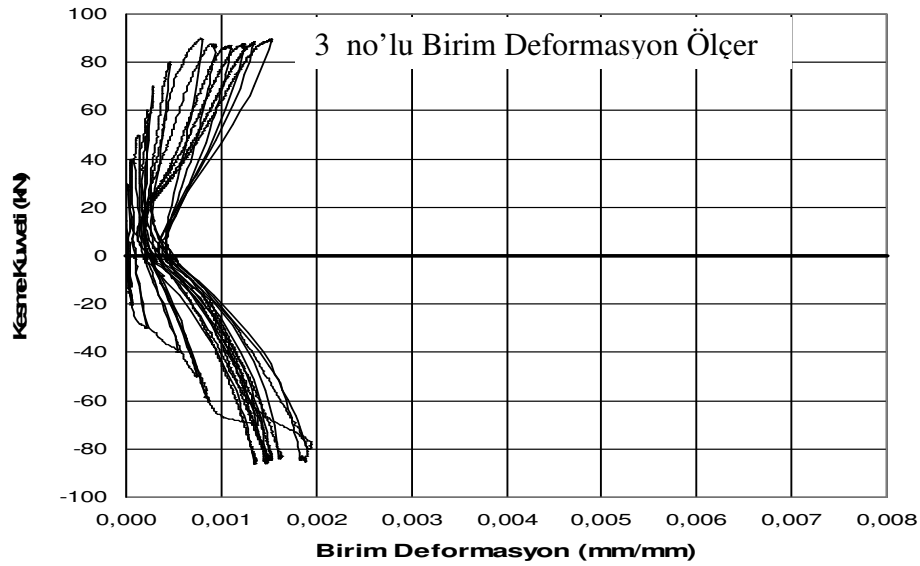
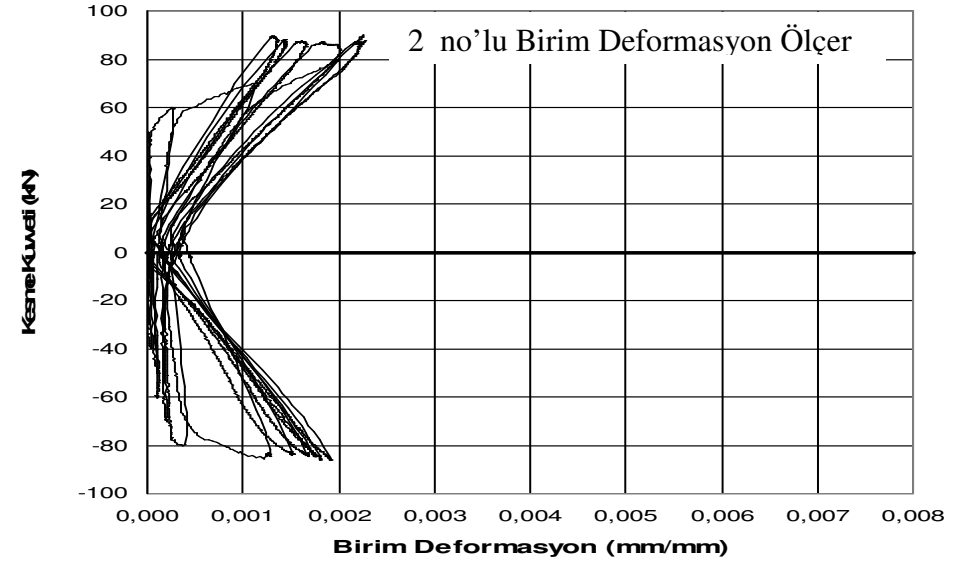
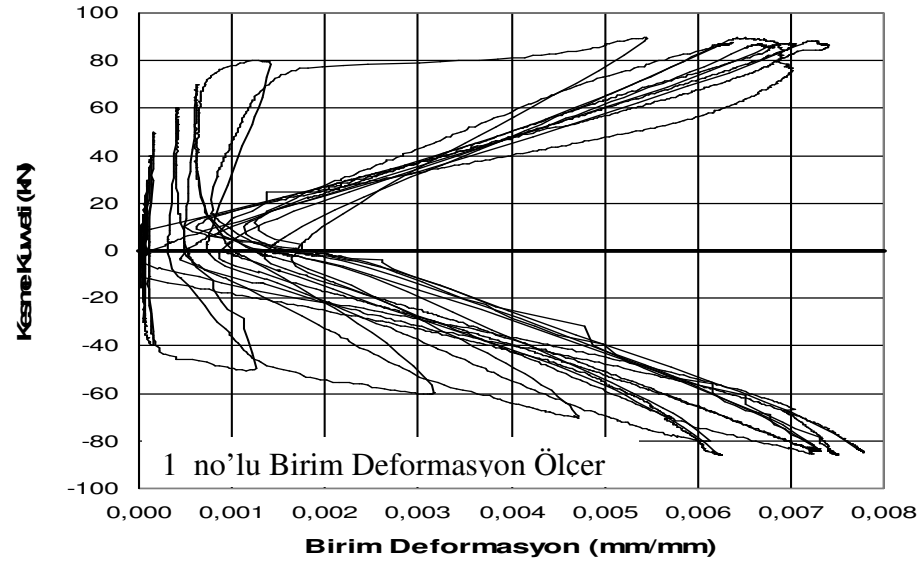
uygulanmıştır. evrimlerde kiriş gövdesinde, tablada ve kiriş gövdesinin alt yüzünde kılcal düzeyde çatlaklar gelişmiştir. evrimlerde gelişen çatlaklar, birim deformasyon değerlerinin bir önceki çevrime göre %4 oranında artmasına neden olmuştur. Deney elemanında maksimum moment bölgesinde plastik mafsall gelişmiştir. Deney elemanı ileri yüklemede 52,01 mm, geri yüklemede 58,09 mm deplasman gerçekleştirmiştir. Deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır.



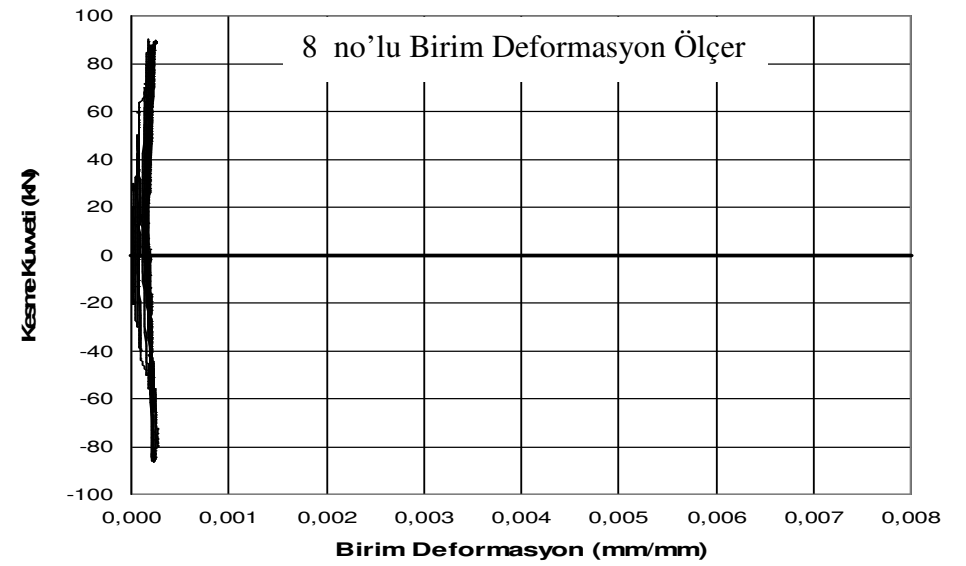
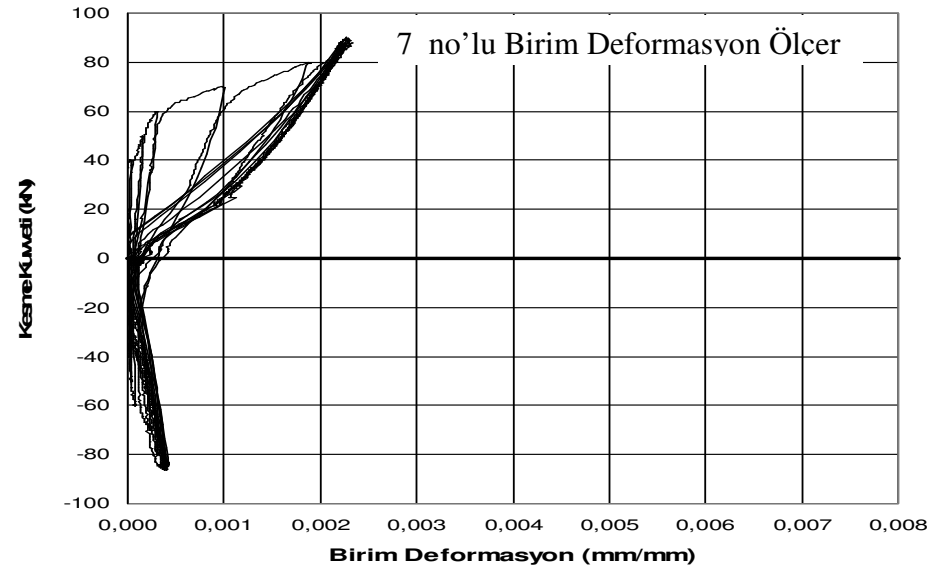
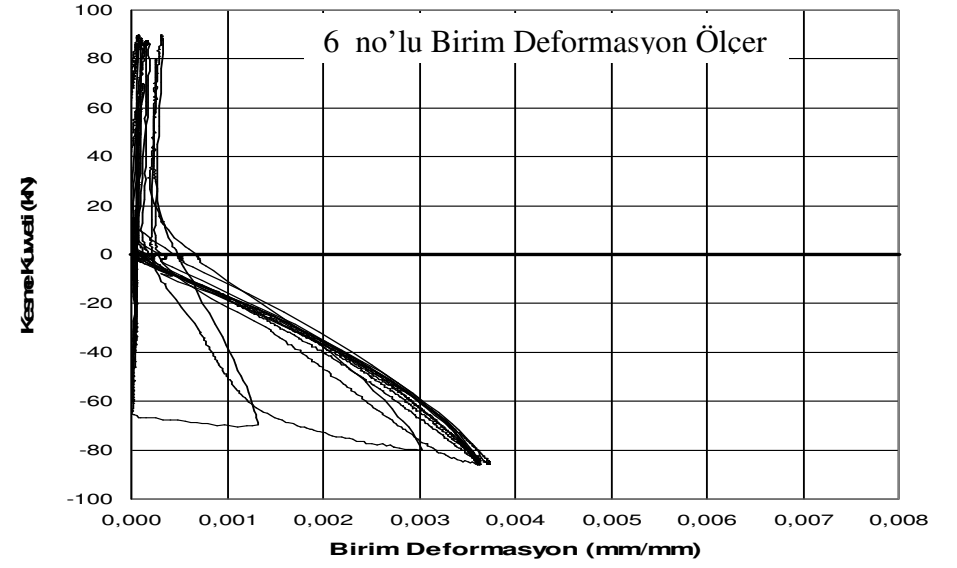
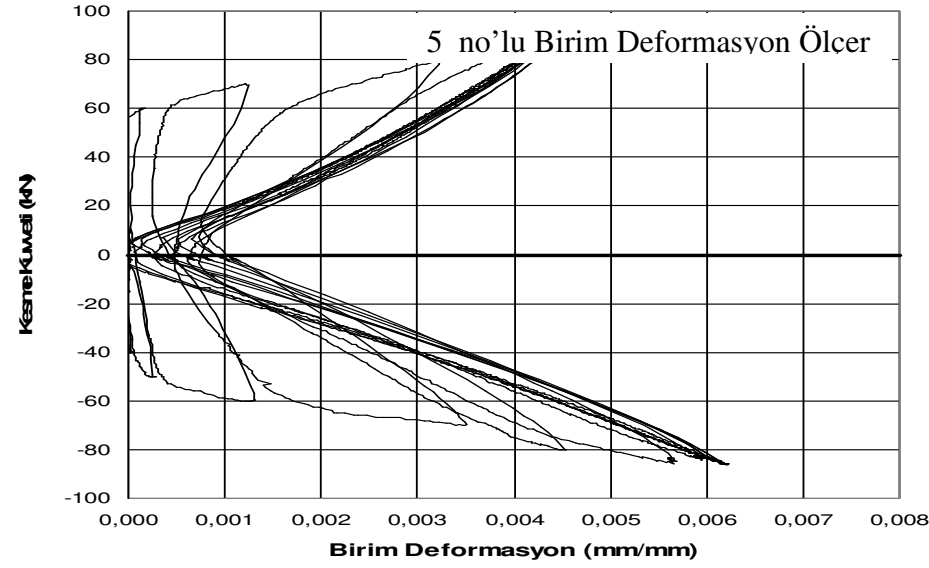
şekil 3.77 çatlak haritası, Deney Elemanı-11



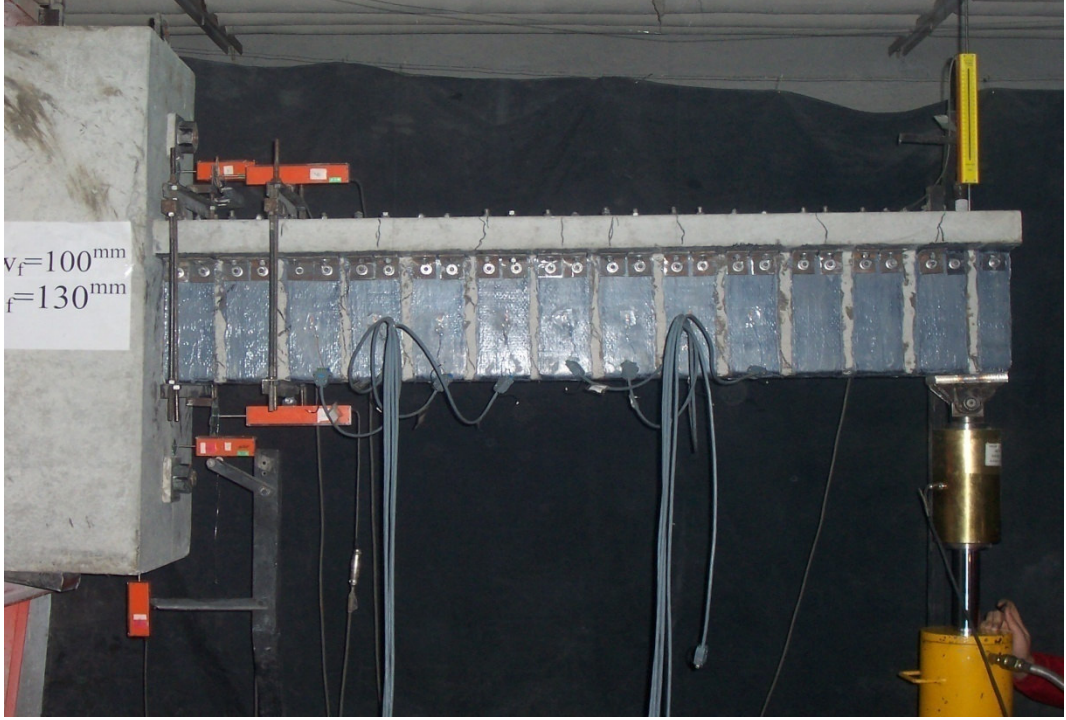
Şekil 3.78 Kesme kuvveti-deplasman grafiği, , Deney Elemanı-11



Şekil 3.79. Kesme kuvveti -birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-11



Şekil 3.80 Kesme kuvveti -birim deformasyon grafikleri, Deney Elemanı-11



Şekil 3.81 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-11



Şekil 3.82 Göçmeden sonra, Deney Elemanı-11

BÖLÜM DÖRT

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deney sonuçları; dayanım ve davranış, rijitlik ve enerji tüketimi başlıkları altında değerlendirilmiştir. Ayrıca deney elemanlarının kesme kuvveti-birim deformasyon ilişkileri de incelenmiştir. Deney sonuçları, CFRP şeritlerin yerleşim düzenindeki değişimin incelendiği deney elemanları, CFRP şeritlerin uygulama şeklindeki değişimin incelendiği deney elemanları ve ankraj uygulamasının katkısının incelendiği deney elemanları gruplandırılarak, irdelenmiştir.

4.1 Dayanım ve Davranış

Dayanım, güçlendirme yöntemi ile elde edilen katkının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Çalışmada deney elemanlarının kesme dayanımlarını değerlendirmek için, her yarım yük çevriminde deney elemanına uygulanan maksimum yük değerlerinin birleştirilmesi ile elde edilen zarf eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki deplasman değerleri de karşılaştırılmıştır.

CFRP şerit uygulanan deney elemanlarının kesme dayanımlarında, referans elemanına göre 1,49-2,36 kat aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda en küçük kesme dayanımı Deney Eleman-5’de, en büyük kesme dayanımı Deney Elemanı-10’da elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, deney elemanlarında farklı göçme şekilleri gözlenmiş olup, deney elemanlarının göçme şekilleri ve göçme nedenleri aşağıda özetlenmiştir.

Deney Elemanı-2, 3, 4 ve 6, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. CFRP şeritlerin uç bölgelerinde yığılan gerilmenin betonun ya da epoksinin kayma dayanımını aşması, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasına neden olmuştur. Deney Elemanı-2, 3, 4 ve

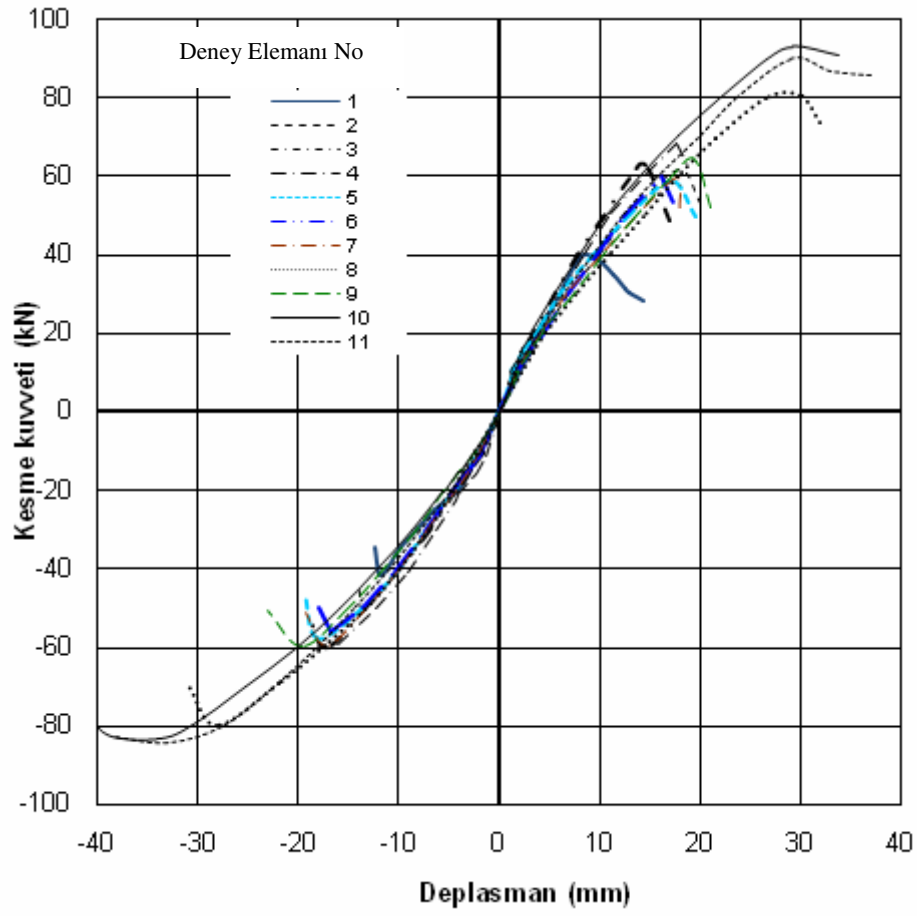
6'nın kesme dayanımında, referans elemana göre en az 1,52, en fazla 1,73 kat artış sağlanmıştır.

Deney Elemanı-5, kiriş tablasının kiriş gövdesinden ayrılmasıyla göçmüştür. Kiriş gövdesinin tablaya birleştiği kesitte yığılan gerilme, kesme donatısı ile karşılanamamış, bu kesitte gelişen çatlak kiriş tablasını gövdeden ayırmıştır. Deney elemanının kesme dayanımında, referans deney elemanına göre 1,49 kat artış sağlanmıştır.

Deney Elemanı-7 ve 9, beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. CFRP şeritler, kiriş alt boyuna donatısını konvansiyonel bir etriye gibi sargılayamamış ayrıca ankrajlardan kiriş alt boyuna donatısının hemen üstüne aktarılan çekme kuvvetleri bu kesitte yığılmıştır. Bu nedenle beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölge gövdeden ayrılmıştır. Deney Elemanı-7 ve 9'un kesme dayanımında referans deney elemanına göre sırasıyla 1,52 ve 1,63 kat artış sağlanmıştır.

Deney Elemanı-8, 14 ve 15 no'lu CFRP şeritlerin kopmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. CFRP şeritler, lifleri doğrultusundaki dayanımlarından daha büyük gerilmeye maruz kalarak kopmuştur. Deney elemanının kesme dayanımında referans deney elemanına göre 2,04 kat artış sağlanmıştır.

Deney Elemanı-11 eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deney Elemanı-10, Deney Elemanı-11'den farklı olarak kiriş boyuna donatıları aktıktan sonra kesmeden göçmüştür. Deney elemanlarının kesme dayanımında referans deney elemanına göre sırasıyla 2,36 ve 2,27 kat artış sağlanmıştır. Deney elemanlarının zarf eğrileri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Deney elemanlarının zarf eğrisi

Deney elemanlarının moment taşıma kapasitelerinin, hesaplanan moment taşıma kapasitelerine oranlanmasıyla elde edilen tablo, Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Maksimum eğilme momenti değerleri

Deney Elemanı No	Mu hesaplanan (kNmm)	Mu deneysel (kNmm)	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Hesaplanan}}$
1 (Referans)	131,4	66,21	0,50
2	135,6	103,54	0,76
3	131,0	105,74	0,81
4	133,5	115,05	0,86
5	131,4	99,34	0,76
6	126,9	98,64	0,78
7	131,1	100,23	0,77
8	133,9	135,53	1,01
9	132,9	108,07	0,81
10	133,7	156,41	1,17
11	133,3	150,30	1,13

Deney elemanlarının moment taşıma kapasitelerinde referans deney elemanına göre %26-%63 aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Güçlendirilen deney elemanlarının moment taşıma kapasitesinde en düşük artış Deney Elemanı-2 ve 5’de, en yüksek artış ise eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-10’da elde edilmiştir.

Tablo 4.2’de deney elemanlarının ileri ve geri çevrimde elde edilen maksimum kesme kuvveti ve maksimum kesme kuvvetindeki deplasman değerleri verilmiştir. Tabloda ayrıca, kirişlerin göçme mekanizmaları da görülmektedir.

Tablo 4.2 Deney sonuçlarının özeti

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	61,63	17,75	49,95	13,43	Kesme
3	62,94	14,56	60,17	17,29	Kesme
4	68,48	17,73	62,29	17,95	Kesme
5	59,13	17,04	57,63	17,14	Kesme
6	60,01	16,20	55,93	16,82	Kesme
7	60,00	17,39	60,00	17,30	Kesme
8	80,67	29,89	79,97	28,20	Kesme
9	64,33	20,04	59,62	23,03	Kesme
10	93,10	29,19	83,27	39,10	Eğilme+Kesme
11	90,00	29,04	84,27	37,13	Eğilme

Güçlendirilen deney elemanlarının kesme dayanımlarının, referans deney elemanının kesme dayanımına oranlanmasıyla elde edilen tablo, Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 Maksimum kesme kuvveti değerleri

Deney Elemanı No	V _u (kN)	$\frac{V_{u(n)}^1}{V_{u(1)}}$
1 (Referans)	39,52	1,00
2	61,63	1,56
3	62,94	1,59
4	68,48	1,73
5	59,13	1,49
6	60,01	1,52
7	60,00	1,52
8	80,67	2,04
9	64,33	1,63
10	93,10	2,36
11	90,00	2,27

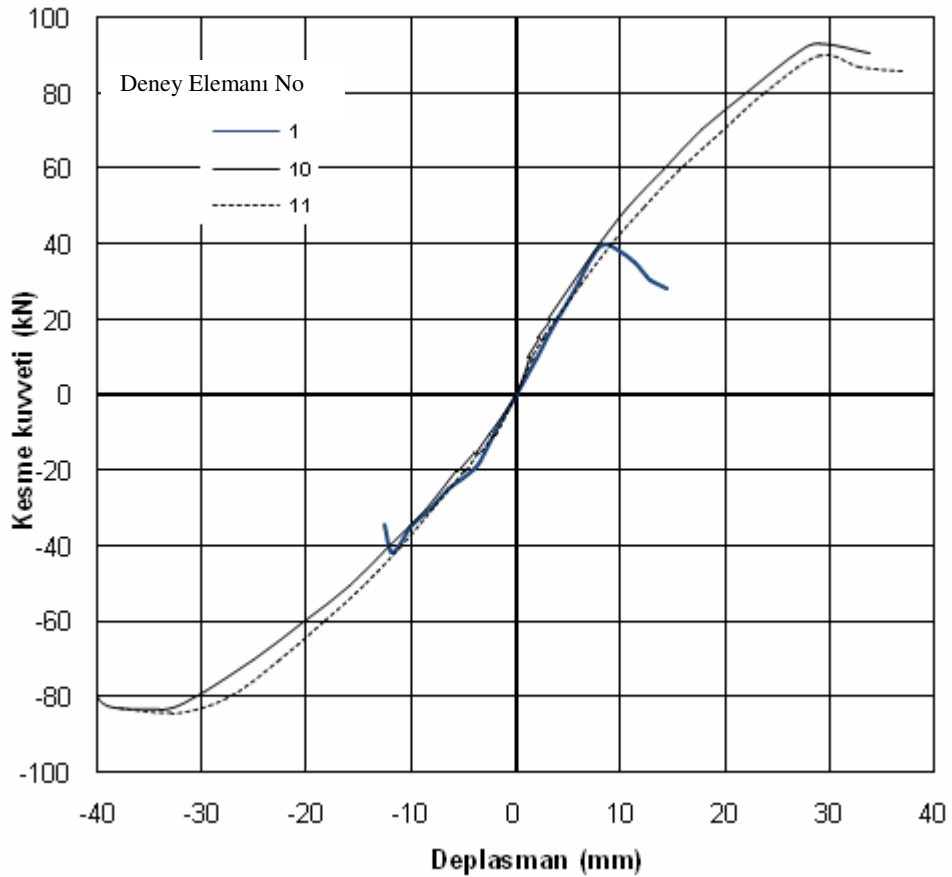
Not: ¹ V_{u(n)} = n numaralı deney elemanının kesme kuvveti değeri

Deney elemanları, deneysel çalışmanın değişkenleri olarak belirlenen CFRP şeritlerin yerleşim düzenindeki değişim (şerit genişliği ve şerit aralığı değişimi), CFRP şeritlerin uygulama şekli ve ankraj uygulamasını destekleyecek şekilde gruplandırılmış, değişkenlerin dayanım ve davranışa katkıları incelenmiştir.

CFRP Şerit genişliğindeki değişim

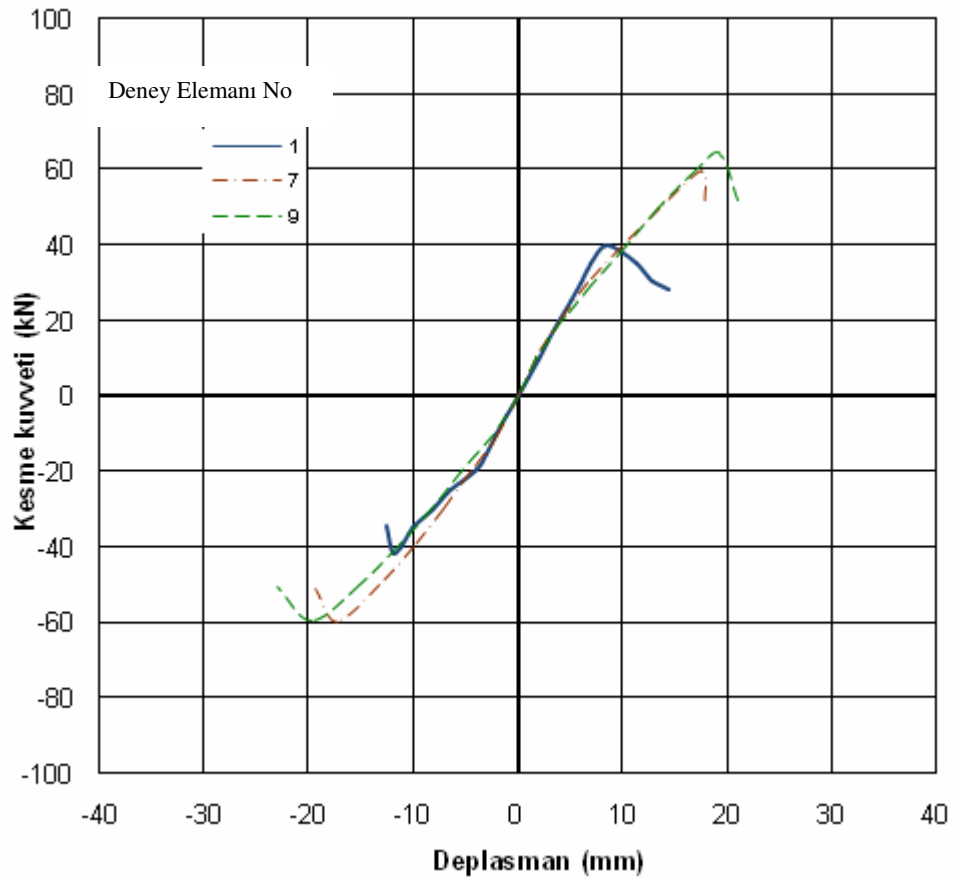
Deney elemanlarının kesme dayanımları 50 ve 100 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılarak artırılmıştır. Şerit genişliğindeki değişimin deney elemanların dayanım ve davranışına etkisini incelemek için Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilen zarf eğrileri kullanılmıştır.

⌒ biçimli CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan Deney Elemanı-10 ve Deney Elemanı-11, kesme dayanımı en büyük deney elemanlarıdır. Kesme kuvveti taşıma kapasitesi 93,10 kN olan 10 no'lu deney elemanı maksimum yük düzeyinde 29,19 mm deplasman gerçekleştirmiştir. Deney elemanının kesme kuvveti taşıma kapasitesi referans deney elemanından 2,36 kat fazladır. 100 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılarak kesme dayanımı artırılan Deney Elemanı-11, referans elemanından 2,27 kat fazla dayanıma sahiptir. Dayanımı, Deney Elemanı-11'den 1,09 kat fazla olan Deney Elemanı-10, kesmeden göçmüştür. Maksimum yük düzeyinde 29,04 mm deplasman yapan Deney Elemanı-11 ise eğilme kapasitesine ulaşmıştır (Şekil 4.2).



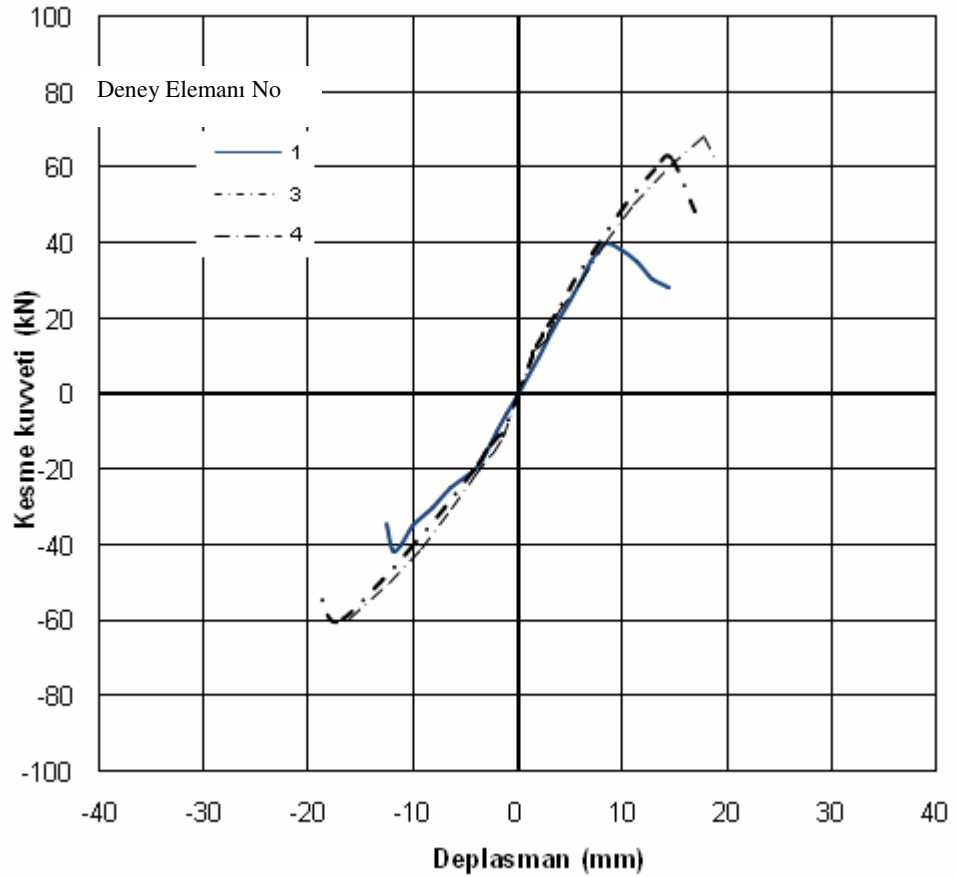
Şekil 4.2 Deney Elemanı-10 ve 11'in zarf eğrileri (şerit genişliğindeki değişim)

Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-9'un kesme dayanımları, farklı genişlikte uygulanan L biçimli CFRP şeritlerle artırılmıştır. 50 mm şerit genişliğine ve 60,00 kN dayanıma sahip 7 no'lu deney elemanının dayanımı, Deney Elemanı-9'dan %11 oranında azdır. Göçme noktasına kadar sırasıyla 17,39 ve 20,04 mm deplasman gerçekleştiren deney elemanlarında, referans elemanına göre sırasıyla 1,52 ve 1,63 kat dayanım artışı sağlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Deney Elemanı-7 ve 9'un zarf eğrileri (şerit genişliğindeki değişim)

Düz CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan 4 no'lu deney elemanı 68,48 kN kesme kuvveti taşımıştır. Deney elemanında, referans elemanına göre 1,73 kat dayanım artışı sağlanmıştır. Aynı CFRP uygulama şekline sahip Deney Elemanı-3'ün kesme dayanımını, 50 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılarak artırılmıştır. Deney elemanın kesme dayanımında, referans elemanına göre 1,59 kat artış sağlanmıştır. 50 mm CFRP şerit genişliğinin 100 mm'ye yükseltilmesiyle deney elemanının kesme dayanımı 1,14 kat artmıştır. Deney elemanları göçme noktasına kadar sırasıyla 14,56 ve 17,73 mm deplasman gerçekleştirmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Deney Elemanı-3 ve 4'un zarf eğrileri (şerit genişliğindeki değişim)

CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarında, CFRP şerit genişliğinin artmasıyla kiriş gövdesinde CFRP şerit yapıştırılan bölge büyümekte, dolayısıyla deney elemanlarının kesme kuvveti taşıma kapasiteleri artmaktadır. 50 mm şerit genişliğinin iki katına çıkartılması, deney elemanlarının kesme dayanımında 1,11-1,14 kat aralığında değişen oranlarda artış sağlamıştır.

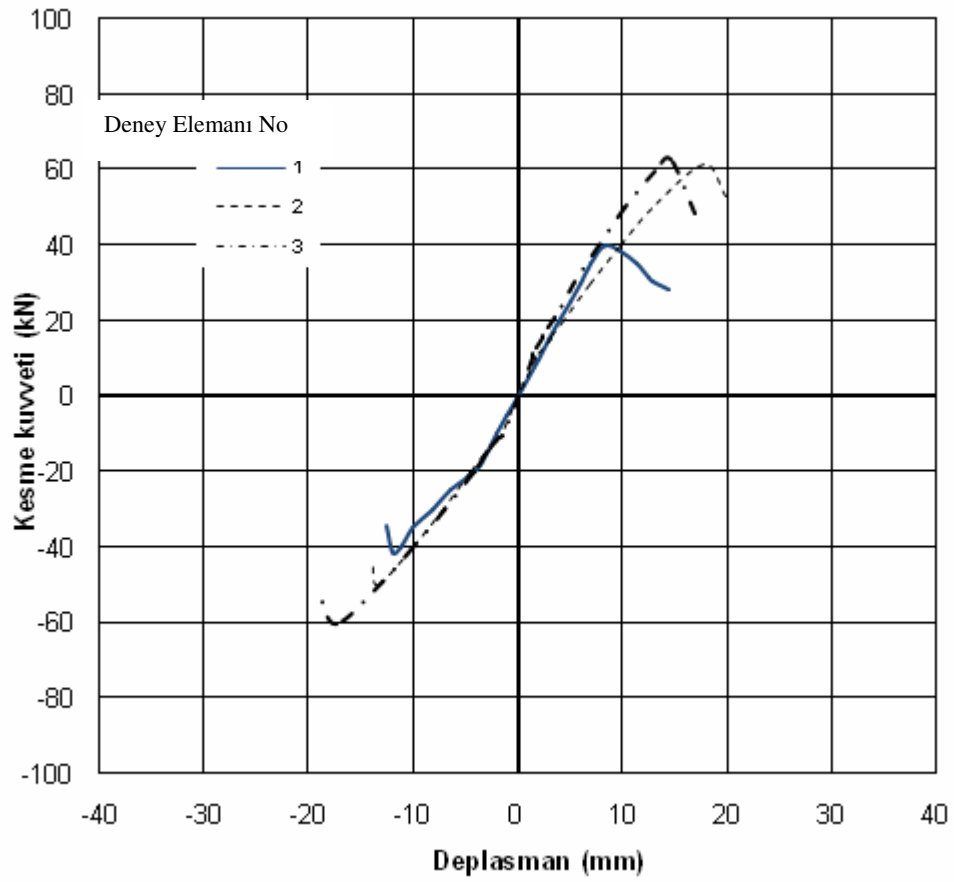
Elemanlarda, ilk eğik çatlaklar CFRP şeritler arasında gelişmekte, çatlaklar CFRP şeritler ile kesiştiğinde gelişimleri sona ermektedir. Ancak yük düzeyi yükseldikçe çatlağın CFRP şeritle kesiştiği kesitteki dayanım azalmakta, çatlak gelişimine bu kesitte, CFRP şeridin altında devam etmektedir. CFRP şerit genişliği artıkça, CFRP şeritlere aktarılan eğik çekme gerilmeleri daha fazla lif tarafından karşılanmakta böylece çatlak gelişimine devam edememektedir. CFRP şerit genişliği çatlak gelişimini engelleyecek büyüklükte değilse çatlak CFRP şeridin altından gelişerek, ilerlemekte, gelişimine bu kesitte devam etmektedir. Yük düzeyi yükseldikçe kiriş, zayıflayan bu kesitte gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmektedir.

CFRP şerit genişliğinin artmasıyla deney elemanlarının göçme şekilleri değişmiştir. 50 mm şerit genişliğine sahip 10 no'lu deney elemanında şeritler arasında çok sayıda eğik çatlak gelişmiştir. Kirişin boyuna donatıları aktıktan sonra deplasman kontrollü çevrimlerde gelişimi engellenemeyen çatlaklar bir kesitte konsantre olarak deney elemanının kesmeden göçmesine neden olmuştur. Dayanımı 10 no'lu deney elemanından %9 oranında küçük olan Deney Elemanı-11'de artan yüklere rağmen, CFRP şeritler eğik çekme gerilmelerini Deney Elemanı-10'a göre daha etkin paylaşmış, kesme çatlağı gelişimleri kılcal düzeyde kalmıştır. Deney elemanı eğilme kapasitesine ulaşmıştır.

CFRP Şerit Aralığı Değişimi

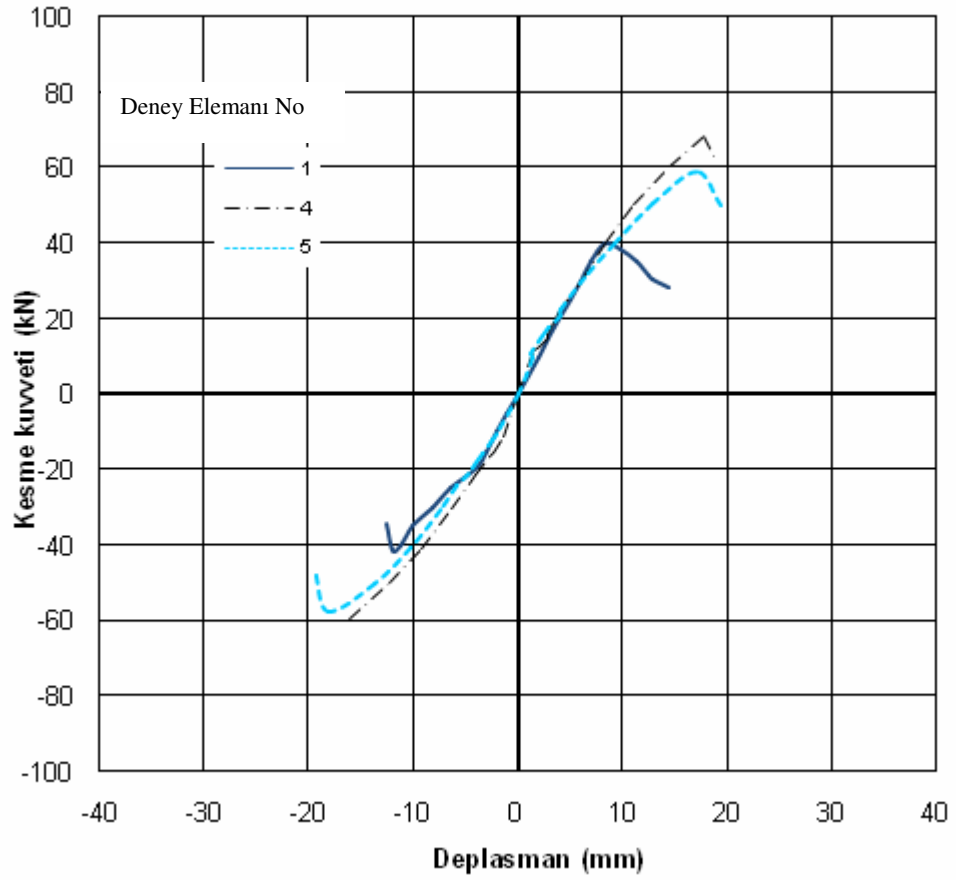
CFRP şeritler arasında 30 ve 60 mm aralık bırakılmıştır. Şerit aralığı değişiminin deney elemanlarının dayanım ve davranışına etkisini incelemek için Deney Elemanı-2, Deney Elemanı-3 ile, Deney Elemanı-4, Deney Elemanı-5 ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da sunulan zarf eğrileri kullanılmıştır.

Düz CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan 3 no'lu deney elemanı 62,94 kN kesme kuvveti taşımıştır. Deney elemanının şeritleri arasında 30 mm aralık bulunmaktadır. Dayanımı 3 no'lu deney elemanından %3 oranında az olan Deney Elemanı-2'nin kesme dayanımında, referans elemanına göre 1,56 kat artış sağlanmıştır. Deney elemanları göçme noktasına kadar sırasıyla 17,75 ve 14,56 mm deplasman gerçekleştirmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Deney Elemanı-2 ve 3'ün zarf eğrileri (Şerit aralığı değişimi)

Deney Elemanı-4 ve Deney Elemanı-5'in kesme dayanımları düz CFRP şeritlerle artırılmıştır. Deney elemanlarında referans elemanına göre sırasıyla 1,73 ve 1,49 kat dayanım artışı sağlanmıştır. 60 mm CFRP şerit aralığının 30 mm'ye düşürülmesiyle, deney elemanının dayanımında 1,24 kat artış sağlanmıştır. Deney elemanları maksimum yük düzeyinde referans deney elemanından sırasıyla %120 ve %130 oranında fazla deplasman gerçekleştirmiştir (Şekil 4.6).



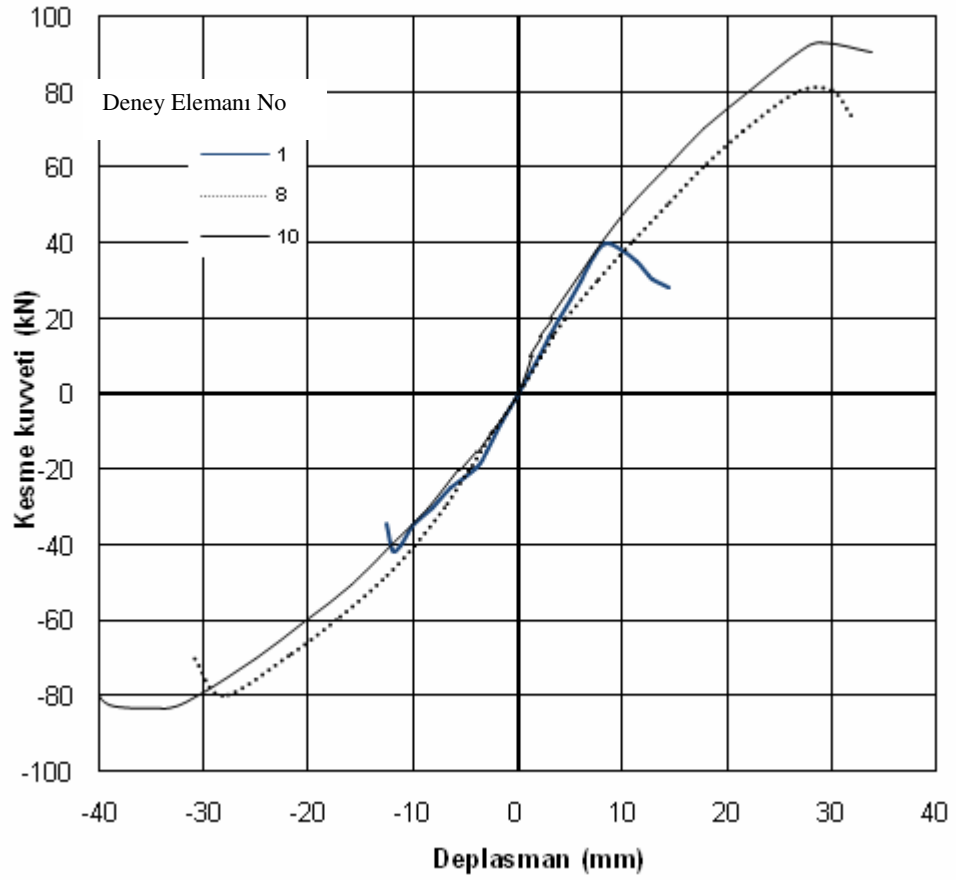
Şekil 4.6 Deney Elemanı-4 ve 5'in zarf eğrileri (Şerit aralığı değişimi)

CFRP şeritler arasında gelişen çatlak, CFRP şeritlerle kesişmezse artan yükler altında genişliği artmakta, gelişimine devam etmektedir. Çatlak yeteri kadar geliştikten sonra CFRP şeritlerle kesiştiğinde şerit, çatlak gelişimini engelleyecek dayanımı gösterememektedir. Bu nedenle CFRP şeritler çatlakların gelişimini engelleyecek sıklıkta yapıştırılmalıdır. Yeterli sıklıkta CFRP şerit yapıştırıldığında eğik çekme gerilmeleri CFRP şeritlerle etkin paylaşılmakta, çatlakların düşük yük düzeyinde bir kesitte konsantre olmaları engellenmekte ve çatlak gelişimleri kılcal düzeyde kalmaktadır. Buna göre CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan deney elemanlarında CFRP şerit aralığı azaldıkça gövdede güçlendirilmiş bölge büyümekte, dolayısıyla deney elemanlarının kesme kuvveti taşıma kapasiteleri artmaktadır. 60 mm CFRP şerit aralığının 30 mm'ye düşürülmesi ile deney elemanlarının kesme dayanımlarında 1,03-1,24 kat aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır.

CFRP Şeritlerin Uygulama Şekli

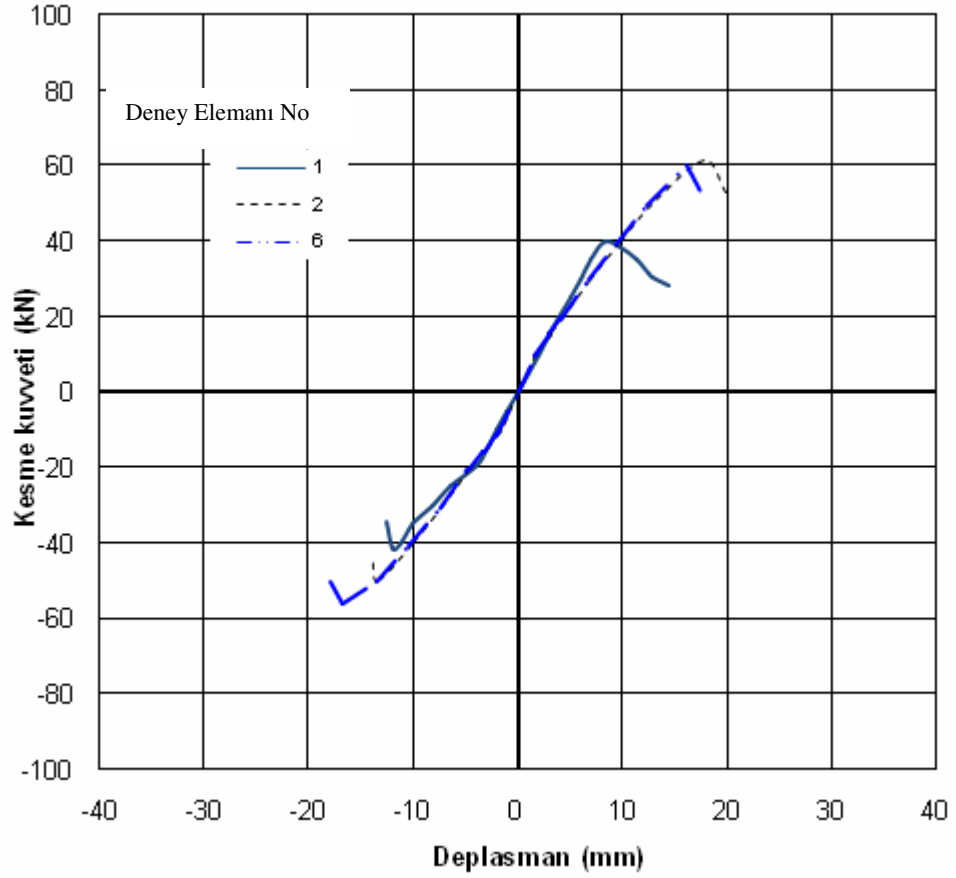
Çalışmada, deney elemanlarının kesme dayanımlarını artırmak için CFRP şeritler farklı şekillerde uygulanmıştır. CFRP şerit uygulama şeklindeki değişimin deney elemanlarının dayanım ve davranışına etkisini incelemek için Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sunulan zarf eğrileri kullanılmıştır

Maksimum yük düzeyinde 29,89 mm deplasman gerçekleştiren 8 no'lu deney elemanı 80,67 kN dayanıma sahiptir. Deney Elemanı-10'da CFRP şeritlerin kirişin yan yüzüne, tablanın altına ve kiriş gövdesinin alt yüzüne yapıştırıldığı U biçimli CFRP şeritlerin kullanılmış, uygulama şeklindeki değişimle elemanın kesme dayanımı Deney Elemanı-8'e göre %31 oranında artmıştır. Maksimum yük düzeyinde 29,19 mm deplasman gerçekleştiren Deney Elemanı-10'un kesme dayanımı referans elemanına göre 2,36 kat artmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Deney Elemanı-8 ve 10'nun zarf eğrileri (Uygulama şeklindeki değişim)

Deney Elemanı-6, U biçimli CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Deney Elemanı-2, düz CFRP şeritlerin kiriş yan yüzlerine yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Deney elemanlarının dayanımları ve göçme şekilleri benzerlik göstermiştir. Deney elemanları kesme dayanımları referans elemanına göre sırasıyla 1,56 ve 1,52 kat artmıştır. İki farklı CFRP şerit uygulamasında göçme, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. Deney elemanları maksimum yük düzeyinde 17,75 ve 16,20 mm deplasman gerçekleşmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Deney Elemanı-2 ve 6'nın zarf eğrileri (Uygulama şeklindeki değişim)

Çalışmada, aynı özelliklere sahip (uygulama düzeni ve ankraj) deney elemanlarının göçme şekilleri, CFRP şeritlerin uygulama şekline göre farklılık göstermiştir. L şerit uygulanan deney elemanlarında göçme, beton pas payından donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. U biçimli şeritlerin uç bölgelerine ankraj uygulanan deney elemanında göçme, CFRP şeritlerin kopmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile gerçekleşmiştir. ̢ biçimli şerit ile güçlendirilen deney elemanlarının boyuna donatıları akmış, deney elemanları eğilme kapasitelerine ulaşmıştır.

L şeklindeki şeritler eğik çekme gerilmelerini karşılamada etkin katkı sağlamış, elemanda çatlak gelişimleri kılcal düzeyde kalmıştır. Ancak CFRP şeritlerin kiriş alt boyuna donatısını konvansiyonel bir etriye gibi sargılayamaması

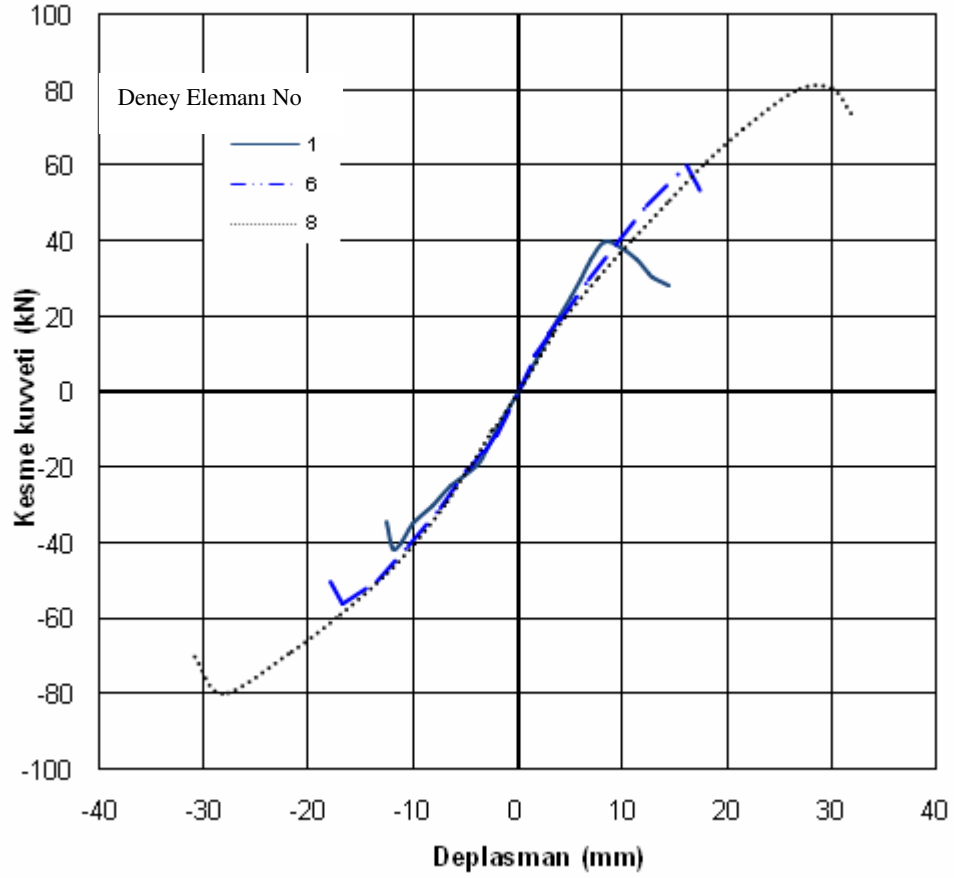
ve ankrajlardan kiriş alt boyuna donatısının hemen üstüne aktarılan çekme kuvvetlerinin bu kesitte yığılması, beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasına ve kirişin göçmesine neden olmuştur.

CFRP şeritlerin uygulama şekli, deney elemanlarının dayanım ve davranışlarını doğrudan etkilemiştir. U biçimli şerit yerine, Γ biçimli CFRP şeritlerin uygulandığı 10 no'lu deney elemanında, uygulama şeklindeki değişim ile eğik çatlaklar tüm kesme açıklığına yayılmış, belli bir kesitteki CFRP şeritler tarafından karşılanmak zorunda kalmamıştır. Böylece CFRP şeritler kopmadan kesme dayanımına daha fazla katkı sağlamış, deney elemanının dayanımında %31 oranında artış sağlanmıştır. Deney elemanı eğilme dayanımına ulaşmıştır.

CFRP Şeritlerde Ankraj Uygulaması

Deneyel programda CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını önlemek amacıyla kiriş alt boyuna donatısının üstünde ve kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte mekanik ankrajlar kullanılmıştır. Ankraj uygulamasının deney elemanlarının dayanım ve davranışına etkisi Şekil 4.9'da verilen zarf eğrileri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca ankraj uygulamasında elde edilen katkının belirlenmesi için, ankraj uygulanan ve uygulanmayan deney elemanları, genel bir değerlendirme ile karşılaştırılmıştır.

U biçimli CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan Deney Elemanı-8'de CFRP şeritlerin uç bölgesinde ankraj uygulanmıştır. Aynı düzende CFRP uygulanan Deney Elemanı-6'da ise ankraj uygulanmamıştır. Kesme kuvveti taşıma kapasitesi 80,67 kN olan 8 no'lu deney elemanı maksimum yük düzeyinde 29,89 mm deplasman gerçekleştirmiştir. Deney elemanının kesme kuvveti taşıma kapasitesi referans deney elemanından 2,04 kat fazladır. Dayanımı, Deney Elemanı-6'dan %35 oranında fazla olan Deney Elemanı-8 eğilme kapasitesine ulaşmak üzereyken kesmeden göçmüştür. Maksimum yük düzeyinde 16,20 mm deplasman gerçekleştiren Deney Elemanı-6 ise eğilme kapasitesinin %22 altında kesmeden göçmüştür (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Deney Elemanı-6 ve 8'in zarf eğrileri (Ankraj uygulaması)

Ankraj uygulanmayan deney elemanları 2, 3, 4, 5 ve 6'nın dayanım ve davranışı, ankraj uygulanan deney elemanları 7, 8, 9, 10 ve 11'den farklıdır. Deney Elemanı-2, 3, 4 ve 6, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile göçmüştür. Deney Elemanı-5, kiriş tablasının gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Göçme şekillerini engellemek ya da geciktirmek amacıyla CFRP şeritlerin uç bölgelerinde mekanik ankraj kullanılmıştır.

Ankraj uygulanmayan elemanlarda CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra çatlak, CFRP şeritlerle kesişmediği için hızla gelişerek kirişin ani olarak kesmeden göçmesine neden olmaktadır. Geliştirilen ankraj detayı tersinir tekrarlanır yükleme altında iyi bir performans sergilemiş, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını ve kiriş tablasının kiriş gövdesinden ayrılmasını

engellemiştir. Böylece eğik çekme gerilmeleri CFRP şeritlerle daha etkin paylaşılmış, çatlak gelişimleri kılcal düzeyde kalmıştır. Ankraj uygulanan deney elemanları daha yüksek dayanım göstermiştir.

Deney Elemanı-6 ve 8'e uygulanan yük düzeyi artıkça CFRP şeritler arasında çok sayıda eğik çatlak gelişmiştir. Çatlaklar zayıf buldukları kesitte konsantre olmuş, bu kesitte eğik çekme gerilmeleri artmıştır. Ankraj uygulanmayan Deney Elemanı-6'da yığılan gerilmeyi karşılayamayan CFRP şeritler beton yüzeyinden ayrılmıştır. Deney Elemanı-8'de yığılan gerilmeler, ankraj uygulaması ile beton yüzeyinden ayrılması engellenen CFRP şeritler tarafından karşılanmıştır. CFRP şeritler kirişin kesme dayanımına, dayanımları kadar katkı sağlamış, lifleri doğrultusundaki dayanımlarından fazla gerilmeyi karşılamak zorunda kalan CFRP şeritler kopmuştur. CFRP şeritlerin kopmasından sonra gelişimine devam eden çatlak ve aynı kesitte aniden gelişen yeni çatlaklar, kirişin kesmeden göçmesine neden olmuştur. Düşük yük düzeyinde CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması Deney Elemanı-6'nın, ankraj uygulanan elemandan %35 oranında az dayanım göstermesine neden olmuştur. Deney elemanın davranışı, CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkı sağlayabilmesi için uç bölgelerine ankraj uygulanması gerektiğini göstermiştir.

Ankraj uygulanmayan deney elemanları arasında referans elemana göre en düşük dayanım 59,13 kN ile Deney Elemanı-5'de elde edilmiştir. En yüksek dayanım ise Deney Elemanı-4'den elde edilmiştir. Deney elemanının dayanımı, referans elemanından 1,73 kat fazladır. Ankraj uygulanan deney elemanları arasında en düşük dayanıma 7 no'lu deney elemanı sahiptir. Deney Elemanı-7'nin dayanımı referans elemanından 1,51 kat fazladır. En yüksek dayanıma 10 no'lu deney elemanı sahiptir. Deney Elemanı-10'nun dayanımı referans elemanından 2,36 kat fazladır. Ankraj uygulanmayan elemanlardan elde edilen en yüksek dayanım, eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-11'in ancak %31'i oranındadır.

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 birikimli olarak toplanmasıyla deney elemanının birikimli enerji tüketimi elde edilmiştir. Deney elemanlarının enerji tüketimleri göçmede hesaplanmıştır (Tablo 4.4).

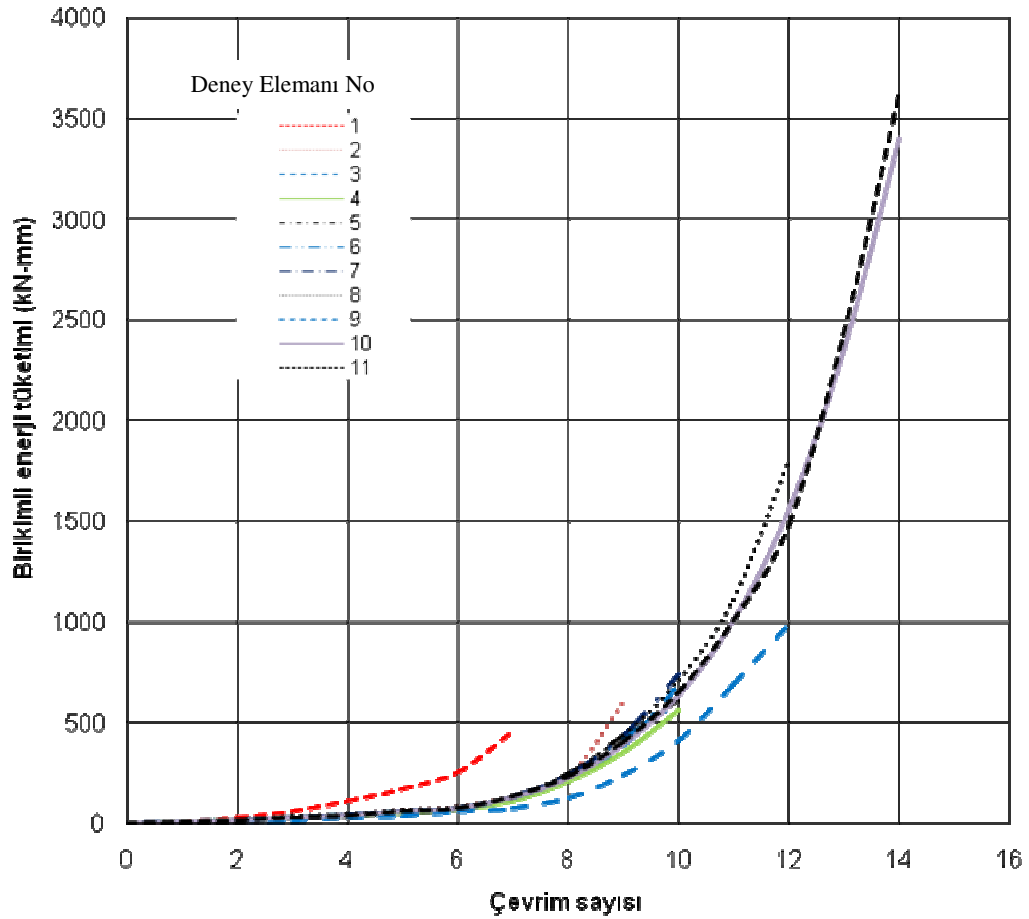
Tablo 4.4 Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim değerleri

Deney Eleman No	Kümülatif Enerji Tüketimi (kNmm)	$\frac{E_{(n)}^1}{E_1}$
1	459,63	1,00
2	601,12	1,31
3	692,67	1,51
4	783,02	1,70
5	613,37	1,33
6	603,37	1,31
7	740,12	1,61
8	1810,10	3,93
9	990,61	2,15
10	3404,93	7,41
11	3626,58	7,89

Not: $^1 E_{(n)} = n$ numaralı deney elemanının enerji tüketimi

Deney elemanlarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması için birikimli enerji tüketim grafikleri oluşturulmuştur. Grafiklerde düşey ekseninde birikimli enerji tüketimleri, yatay ekseninde çevrim sayıları verilmiştir. Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim grafikleri Şekil 4.10'da sunulmuştur.

Deney programında en az enerjiyi Deney Elemanı-1 tüketmiştir. Referans elemanı eğilme kapasitesinin %50 altında kesmeden ani olarak 459,63 kNmm enerji tüketerek göçmüştür. CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanları içerisinde en düşük enerjiyi 601,12 KNmm ile 2 no'lu deney elemanı tüketmiştir. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması enerji tüketimi açısından olumsuz davranış sergilemiştir. Deney elemanı referans elemanından ancak 1,31 kat fazla enerji tüketmiştir. En fazla enerjiyi eğilme kapasitesine ulaşan 11 no'lu deney elemanı tüketmiştir. 11 no'lu deney elemanı 3626,58 kNmm enerji tüketmiştir. Deney elemanı referans elemanından 7,89 kat enerji tüketmiştir. Güçlendirilen diğer deney elemanları, Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-11 arasında enerji tüketmişlerdir.

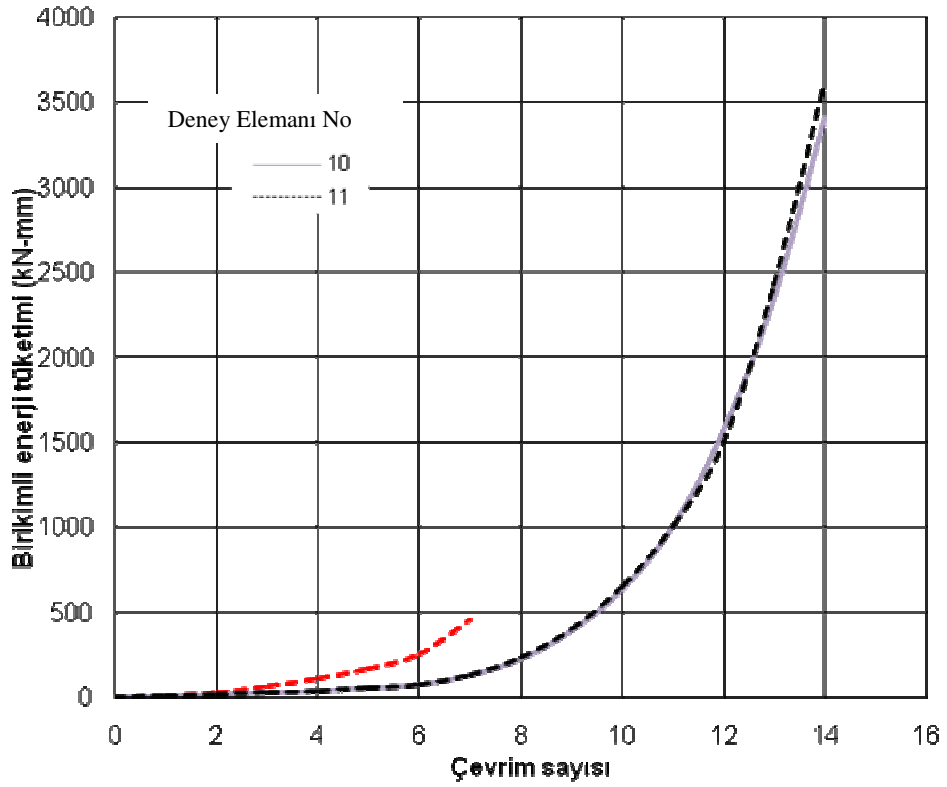


Şekil 4.10 Deney elemanları birikimli enerji tüketim grafikleri

Şerit genişliğindeki değişim,

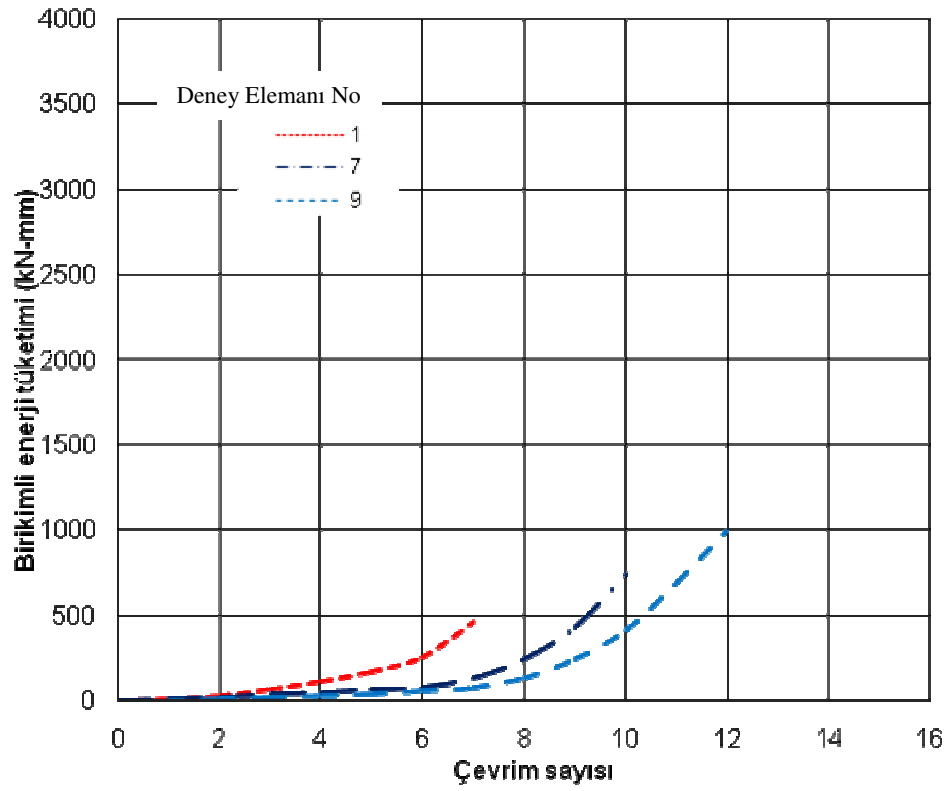
Deney elemanlarının kesme dayanımlarını artırmak için iki farklı genişlikte CFRP şerit kullanılmıştır. Şerit genişliklerindeki değişimin enerji tüketimine etkisini değerlendirmek için Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'de sunulan grafikler kullanılmıştır.

Deney Eleman-10 ve Deney Eleman-11, referans elemanına göre sırasıyla 7,41 ve 7,89 kat fazla enerji tüketmiştir. 100 mm şerit genişliğine sahip Deney Eleman-11, enerji tüketimi 3404,93 kNmm olan Deney Eleman-10'dan %6 oranında fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.11).

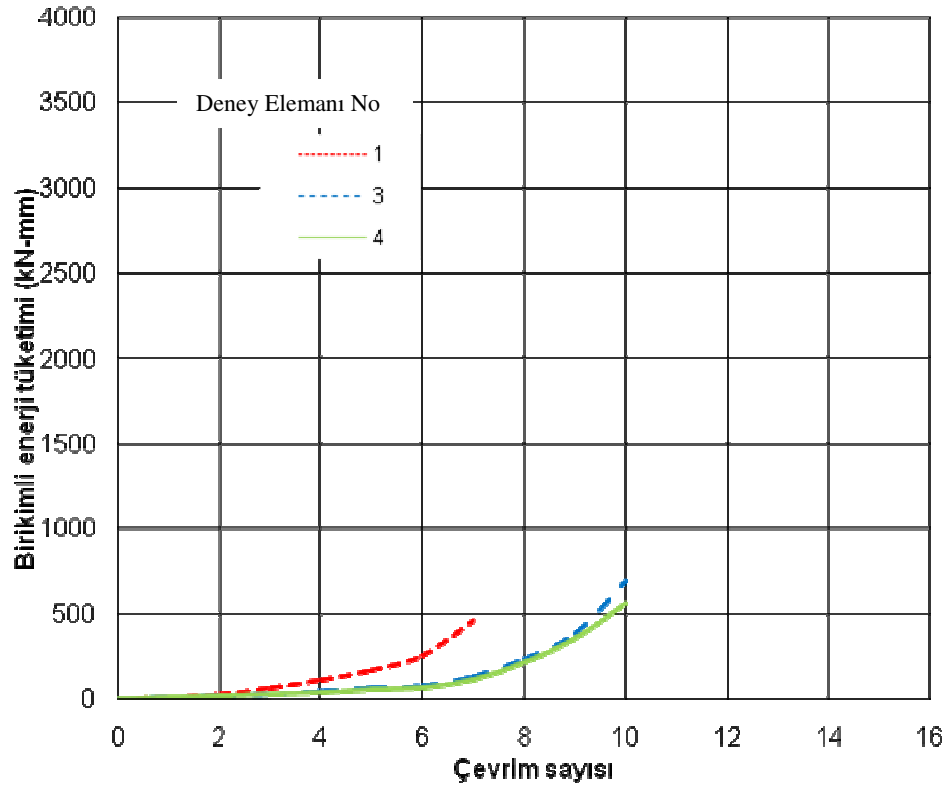


Şekil 4.11 Deney Elemanı-10 ve 11'in enerji tüketim eğrileri (şerit genişliğindeki değişim)

Deney Elemanı-9 maksimum yük düzeyinde 990,61 kNmm enerji tüketmiştir. Deney Elemanı-9, Deney Elemanı-7'den %33 oranında, referans elemanından 2,15 kat fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Deney Elemanı-7 ve 9'un enerji tüketim eğrileri (şerit genişliğindeki değişim)



Şekil 4.13 Deney Elemanı-3 ve 4'ün enerji tüketim eğrileri (şerit genişliğindeki değişim)

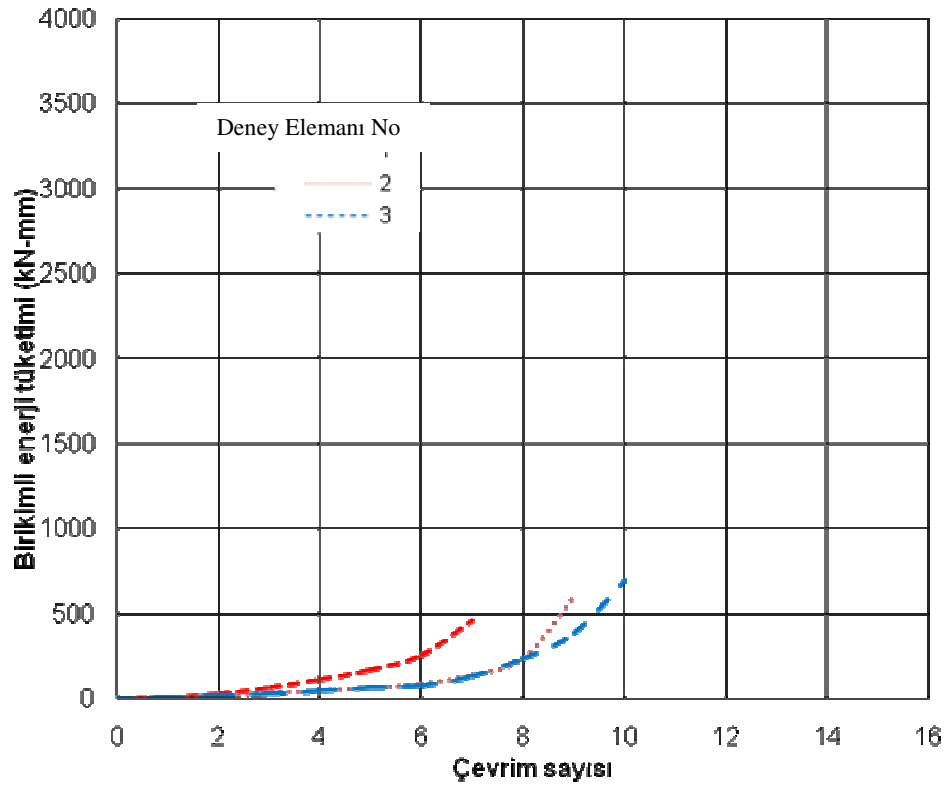
Deney Elemanı-3 ve 4 referans elemanına göre sırasıyla 1,51 ve 1,70 kat fazla enerji tüketmiştir. 100 mm şerit genişliğine sahip Deney Elemanı-4, enerji tüketimi 692,67 kNmm olan Deney Elemanı-3'den %13 oranında fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.13).

CFRP şerit genişliğinin artmasıyla giriş gövdesinde CFRP şeritlerin uygulandığı bölge büyümektedir. Güçlendirilen bölgenin büyümesi ile eğik çekme gerilmeleri CFRP şeritlerle daha etkin paylaşılmakta, çatlak gelişimleri kılcal düzeyde kalmaktadır. Dayanımı artan elemanların enerji tüketimleri de artmaktadır. 50 mm şerit genişliğinin iki katına çıkartılması, deney elemanlarının enerji tüketimlerinde %6-%33 aralığında değişen oranlarda artış sağlamıştır.

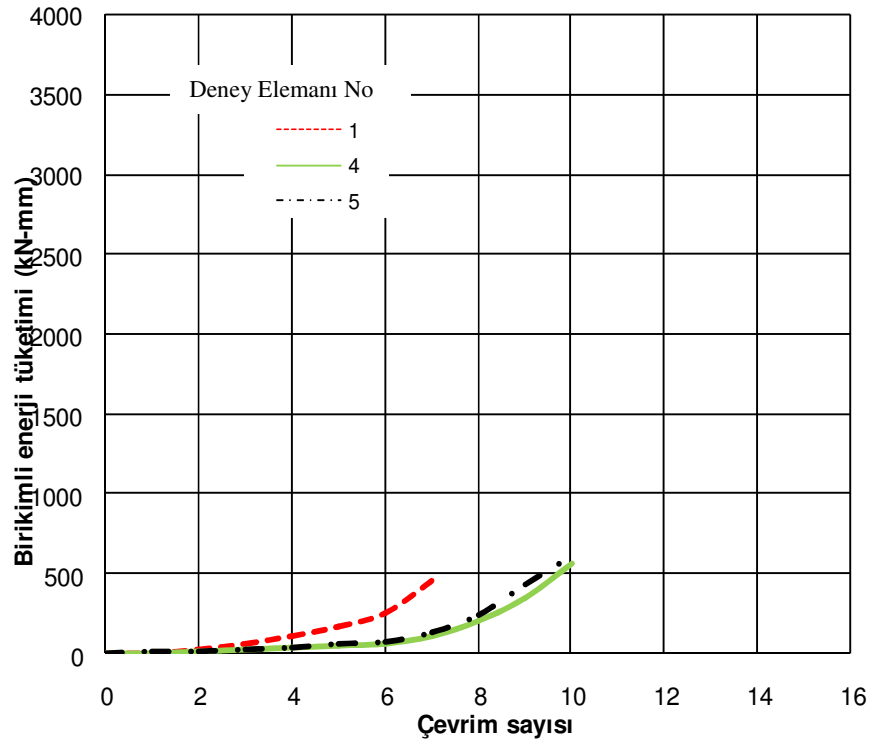
Şerit aralığı değişimi,

Deney elemanlarının kesme dayanımları artırmak için yapıştırılan CFRP şeritler arasında 30 ve 60 mm aralık bırakılmıştır. Şerit aralığında ki değişimin enerji tüketimine etkisinin incelenmek için çizilen birikimli enerji tüketim grafikleri Şekil 4.14 ve 4.15'de sunulmuştur.

Deney Elemanı-2 ve 3, referans elemanına göre sırasıyla 1,31 ve 1,51 kat fazla enerji tüketmiştir. Şeritleri arasında 30 mm mesafe olan Deney Elemanı-3, enerji tüketimi 601,12 kNmm olan Deney Elemanı-2'den %15 oranında fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Deney Elemanı-2 ve 3'ün enerji tüketim eğrileri (Şerit aralığı değişimi)



Şekil 4.15 Deney Elemanı-4 ve 5'in enerji tüketim eğrileri (Şerit aralığı değişimi)

Deney Elemanı-4 ve 5, referans elemanına göre sırasıyla 1,70 ve 1,33 kat fazla enerji tüketmiştir. Şeritleri arasında 30 mm mesafe olan Deney Elemanı-4, enerji tüketimi 613,37 kNmm olan Deney Elemanı-5'den %37 oranında fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.15).

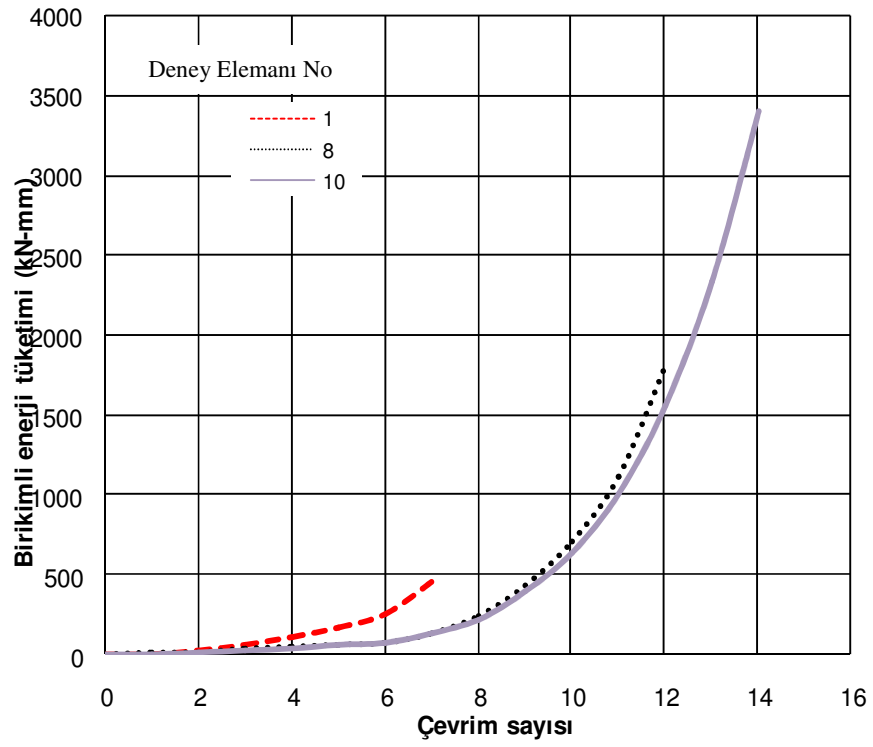
CFRP şeritlerle kesme dayanımı artırılan deney elemanlarında, CFRP şerit aralığı artıkça güçlendirilmemiş bölgede büyümekte, düşük yük düzeyinde gövdede gelişen çatlaklarının sayısı ve genişlikleri artmaktadır. Bir kesitte konsantre olan çatlaklar, kirişin daha düşük dayanım göstererek göçmesine neden olmaktadır. Dayanımı azalan kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri de azalmaktadır. 30 mm şerit aralığının 60 mm'ye yükseltilmesi ile, deney elemanlarının enerji tüketimleri %15-%37 aralığında değişen oranlarda azalmıştır.

Uygulama şekli,

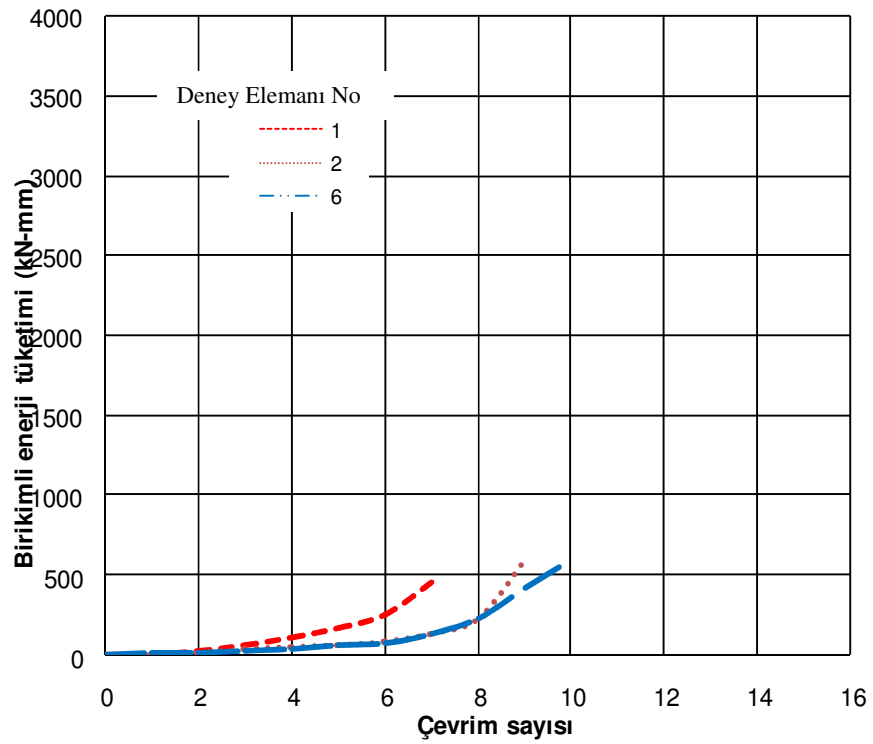
Deney elemanlarının kesme dayanımlarını artırmak için CFRP şeritler farklı şekillerde uygulanmıştır. Uygulama şekillerinde ki değişimin deney elemanlarının enerji tüketimleri üzerindeki etkisini incelemek için Şekil 4.16 ve 4.17'de sunulan grafikler kullanılmıştır.

Deney Elemanı-8 ve Deney Elemanı-10 referans elemana göre sırasıyla 3,93 ve 7,41 kat fazla enerji tüketmiştir. $\sqcap$ biçimli CFRP şerit uygulanan 10 no'lu deney elemanı 3404,93 kNmm enerji tüketmiştir. Deney Elemanı-10, U biçimli CFRP şeritlerin uygulandığı 8 no'lu deney elemanına göre 1,89 kat fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.16).

Deney Elemanı-6, U biçimli CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Deney Elemanı-2, CFRP şeritlerin kirişin yan yüzlerine yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden düşük yük düzeyinde ayrılmasıyla göçen deney elemanları, referans elemana göre 1,31 kat fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.16 Deney Elemanı-8 ve 10'un enerji tüketim eğrileri (Uygulama şeklindeki değişim)



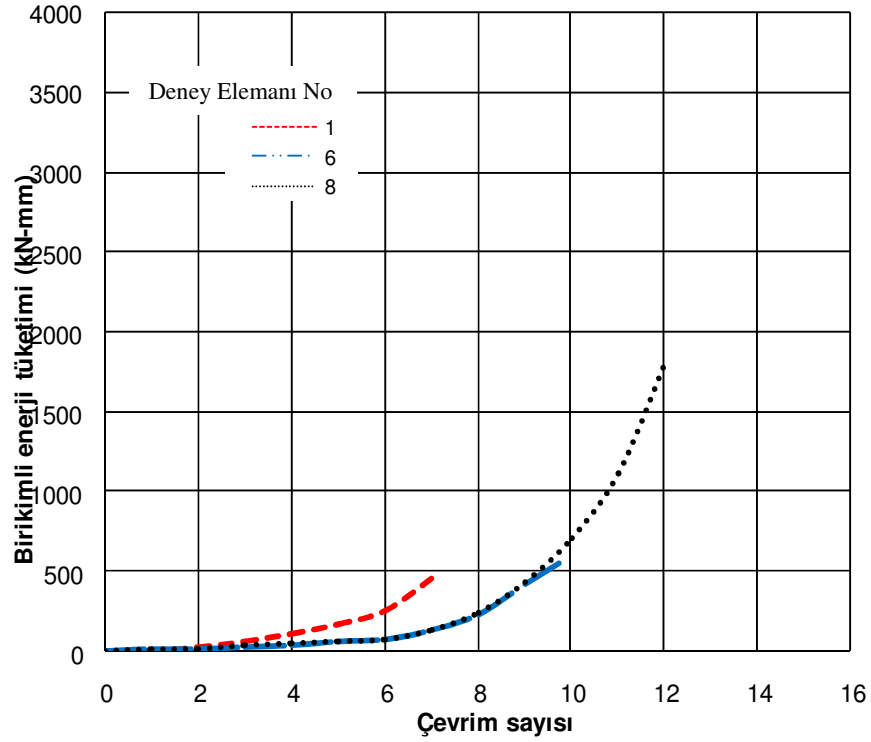
Şekil 4.17 Deney Elemanı-2 ve 6'nın enerji tüketim eğrileri (Uygulama şeklindeki değişim)

Uygulama şekli deney elemanlarının kesme dayanımlarını doğrudan etkileyen bir değişkendir. Çalışmada, deney elemanlarının göçme şekilleri uygulama şekline bağlı olarak farklılık göstermiştir. U biçimli şerit yerine, $\sqcap$ biçimli CFRP şeritlerin uygulandığı 10 no'lu deney elemanında, uygulama şeklindeki değişim ile eğik çatlaklar tüm kesme açıklığına yayılmış, belli bir kesitteki CFRP şeritler tarafından karşılanmak zorunda kalmamıştır. Böylece CFRP şeritler kopmadan kesme dayanımına daha fazla katkı sağlamış, deney elemanının dayanımı %31 oranında artmıştır. Dayanımı artan deney elemanının enerji tüketim kapasitesi de 1,89 kat artmıştır.

Ankraj uygulaması,

CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasının önlenmesi amacıyla kiriş alt boyuna donatısının üstünde ve kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte mekanik ankraj kullanılmıştır. Ankraj uygulamasının deney elemanların enerji tüketimleri üzerindeki etkisini incelemek için Şekil 4.18'de sunulan grafikler kullanılmıştır. Ayrıca ankraj uygulanan ve uygulanmayan elemanlar için genel değerlendirme Şekil 4.19'da sunulmuştur.

Deney Elemanı-6, U biçimli CFRP şeritlerin kiriş gövdesine epoksi tabanlı yapıştırıcı kullanılarak yapıştırıldığı deney elemanıdır. Deney elemanında ankraj uygulanmamıştır. Deney Elemanı-8'in uygulama şekli Deney Elemanı-6 ile aynıdır. Deney elemanına ankraj uygulanmıştır. Deney Elemanı-6 ve Deney Elemanı-8 referans elemana göre sırasıyla 1,31 ve 3,93 kat fazla enerji tüketmiştir. Deney Elemanı-8, ankraj uygulanmayan 6 no'lu deney elemanına göre 3,00 kat fazla enerji tüketmiştir (Şekil 4.18).

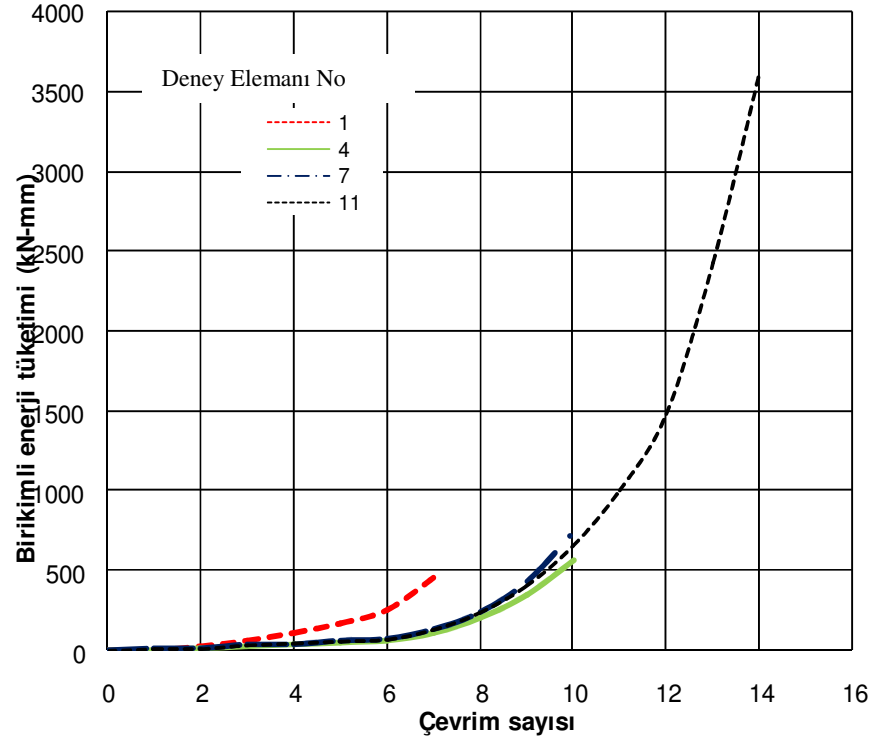


Şekil 4.18 Deney Elemanı-6 ve 8'in enerji tüketim eğrileri (Ankraj uygulaması)

CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması ve kiriş tablasının kiriş gövdesinden ayrılmasının engellenmesiyle eğik çekme gerilmeleri, CFRP şeritlerle daha etkin paylaşılmış, çatlak gelişimleri kılcal düzeyde kalan deney elemanları daha yüksek dayanım göstermiştir. Dayanımı artan deney elemanlarının enerji tüketimleri de artmıştır.

Ankraj uygulanmayan deney elemanları 2, 3, 4, 5 ve 6'nın birikimli enerji tüketimleri, ankraj uygulanan deney elemanları 7, 8, 9, 10 ve 11'den farklıdır. Ankraj uygulanmayan deney elemanları arasında referans elemana göre en az enerjiyi 601,63 kNmm ile Deney Elemanı-2 tüketmiştir. En yüksek enerjiyi ise Deney Elemanı-4 tüketmiştir. Deney elemanının enerji tüketimi, referans elemanından 1,70 kat fazladır. Ankraj uygulanan deney elemanları arasında en düşük enerjiyi 7 no'lu deney elemanı tüketmiştir. Deney Elemanı-7'nin enerji tüketimi referans elemanından 1,61 kat fazladır. En yüksek enerjiyi 11 no'lu deney elemanı tüketmiştir. Deney Elemanı-11'in enerji tüketimi referans

elemanından 7,89 kat fazladır. Ankraj uygulanmayan elemanlar tarafından tüketilen en yüksek enerji, eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-11'in ancak 4,64'ü oranındadır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Ankraj uygulamasının enerji tüketimine etkisi

4.3. Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri kesme kuvveti-deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlik, belirlenen yük düzeyinin grafiğin orijinine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir. Rijitlikler başlangıç ve maksimum yük düzeyinde hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanının testinde ilk eğilme çatlağının olduğu yük düzeyi için hesaplanmıştır. Deney elemanlarına uygulanan ileri ve geri yükleme adımlarında ulaşılan maksimum yük düzeyi için maksimum yük rijitlikleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Maksimum yük düzeyindeki rijitliklerin karşılaştırılmasında, ileri ve geri çevrimde elde edilen rijitliklerin aritmetik 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			(K _n ¹ /K ₁) Oranı	
		İleri Çevrim (kN/mm)	Geri Çevrim (kN/mm)	Ortalama (kN/mm)	Başlangıç	Maksimum Yük
1	4,47	3,76	3,62	3,69	-	-
2	5,02	3,47	3,72	3,60	1,12	0,98
3	5,18	4,32	3,48	3,90	1,16	1,06
4	5,47	3,86	3,47	3,67	1,22	0,99
5	4,86	3,47	3,36	3,42	1,08	0,93
6	4,82	3,62	3,33	3,47	1,07	0,94
7	4,98	3,43	3,47	3,45	1,11	0,93
8	5,61	2,70	2,84	2,77	1,26	0,75
9	5,30	3,21	2,59	2,90	1,19	0,79
10	5,77	3,19	2,13	2,66	1,29	0,72
11	5,87	3,10	2,28	2,69	1,31	0,73

Not: ¹ K_n = n numaralı deney elemanının rijitliği

Deney programındaki en küçük başlangıç rijitliğine Deney Elemanı-1 sahiptir. Deney elemanının başlangıç rijitliği 4,47 kN/mm'dir. En büyük başlangıç rijitliğine 5,87 kN/mm ile eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-11 sahiptir. Deney elemanının başlangıç rijitliği referans elemandan 1,31 kat daha büyüktür. Düz şerit kullanılarak kesme dayanımı artırılan deney elemanları, Deney Elemanı-4 dışında benzer başlangıç rijitliğine sahiptir. Deney Elemanı-4'ün başlangıç rijitliği referans elemanından 1,22 kat büyüktür. Deney Elemanı-2, 3, 5, 6 ve 7'nin başlangıç rijitliği ise referans elemandan en az 1,07, en fazla 1,16 oranında büyüktür. Deney Elemanı-8, 9 ve 10'un başlangıç rijitlikleri sırasıyla referans elemanından 1,26, 1,19 ve 1,29 kat büyüktür. Dayanımı artan deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri de artmıştır.

Deney programındaki en büyük maksimum yük rijitliğine Deney Elemanı-3 sahiptir. Deney Elemanı-3 maksimum yük düzeyinde referans deney elemanından 1,06 kat daha rijittir. Deney programında en küçük maksimum yük rijitliğine eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-10 sahiptir. Deney elemanın maksimum yük düzeyindeki rijitliği referans deney elemanından %28 oranında daha azdır.

Şerit genişliğindeki değişimin rijitliğe olan katkısını incelemek için Deney Elemanı-10, Deney Elemanı-11 ile, Deney Elemanı-7, Deney Elemanı-9 ile ve Deney Elemanı-3, Deney Elemanı-4 ile karşılaştırılmıştır. Deney Elemanı-11'in başlangıç rijitliği Deney Elemanı-10'dan %2, maksimum yük rijitliği ise %1 oranında fazladır. Deney Elemanı-7'nin başlangıç rijitliği Deney Elemanı-9'dan %8 oranında azdır. Maksimum yük rijitliği ise %14 oranında fazladır. Deney Elemanı-4'ün başlangıç rijitliği Deney Elemanı-3'den %6 oranında fazladır. Maksimum yük düzeyindeki rijitliği ise Deney Elemanı-3'den %7 oranında azdır.

CFRP şeritlerin genişliğinin artmasıyla dayanımı artan deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri de artmıştır. 50 mm şerit genişliğinin iki katına çıkartıldığı deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri 1,02-1,08 kat aralığında değişen oranlarda artmıştır. Elemanlara uygulanan yükün düzeyi yükseldikçe gövdede gelişen

çatlakların sayısı artmış, bu nedenle elemanların maksimum yük düzeyindeki rijitlikleri azalmıştır. 100 mm şerit genişliğine sahip deney elemanlarının maksimum yük rijitlikleri, 50 mm şerit genişliğine sahip deney elemanlarına göre %14 oranında az, %1 oranında fazladır.

Şerit aralığı değişiminin rijitliğe olan katkısını değerlendirmek için Deney Elemanı-2, Deney Elemanı-3 ile Deney Elemanı-4, Deney Elemanı-5 ile karşılaştırılmıştır. Deney Elemanı-3'ün başlangıç rijitliği Deney Elemanı-2'den %4, maksimum yük rijitliği ise %8 oranında fazladır. Deney Elemanı-4'ün başlangıç rijitliği Deney Elemanı-5'den %14 oranında fazladır. Maksimum yük düzeyinde Deney Elemanı-4, Deney Elemanı- 5'den %6 rijittir.

Deney elemanlarının şerit aralığı azaldıkça dayanımları artmaktadır. Dayanımı artan deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri artmakta, göçme gerçekleşinceye kadar gelişen çatlaklar ise elemanların maksimum yük düzeyindeki rijitliklerini azaltmaktadır. 60 mm şerit aralığının yarıya indirilmesi ile deney elemanlarının başlangıç rijitliği 1,04-1,14 kat artmış, maksimum yük rijitliği ise %6-%8 oranında azalmıştır.

Uygulama şeklindeki değişimin rijitliğe olan katkısını değerlendirmek için Deney Elemanı-8, Deney Elemanı-10 ile Deney Elemanı-2, Deney Elemanı-6 ile karşılaştırılmıştır. Deney Elemanı-8'in başlangıç rijitliği Deney Elemanı-10'dan %3 oranında azdır. Her iki deney elemanın maksimum yük düzeyinde benzer rijitlik göstermiştir. Deney Elemanı-8, Deney Elemanı-10'dan %3 oranında daha rijit davranmıştır. Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-6 benzer başlangıç ve maksimum yük rijitliğine sahiptir. Maksimum yük rijitliği 3,60 kN/mm olan 2 no'lu deney elemanı, Deney Elemanı-6'dan %5 daha rijittir.

Çalışmada, deney elemanlarının göçme şekilleri uygulama şekline göre farklılık göstermiştir. Düşük yük düzeyinde, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması veya beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla

göçen deney elemanlarında, referans elemanına yakın başlangıç ve maksimum yük rijitliği elde edilmiştir. Uygulama şeklindeki değişimle eğilme kapasitesine yaklaşan elemanlarda, referans elemandan büyük başlangıç rijitliği, referans elemandan küçük maksimum yük rijitliği elde edilmiştir.

Ankraj uygulamasının rijitliğe olan katkısını incelemek için Deney Elemanı-6 ve Deney Elemanı-8 karşılaştırılmıştır. Deney Elemanı-8'in başlangıç rijitliği, Deney Elemanı-6'dan %19 oranında fazladır. Deney Elemanı-6, maksimum yük düzeyinde deney elemanı 8'den %19 daha rijittir.

Ankraj uygulanan elemanların başlangıç rijitlikleri artmıştır. Ankraj uygulanmayan deney elemanları arasında referans elemana göre en küçük başlangıç rijitliğine 4,82 kN/mm ile Deney Elemanı-6 sahiptir. En yüksek başlangıç rijitliğine ise Deney Elemanı-4 sahiptir. Deney elemanının başlangıç rijitliği, referans elemanından 1,22 kat fazladır. Ankraj uygulanan deney elemanları arasında en küçük başlangıç rijitliğine 7 no'lu deney elemanı sahiptir. Deney Elemanı-7'nin başlangıç rijitliği referans elemanından 1,11 kat fazladır. En yüksek başlangıç rijitliğine ise 11 no'lu deney elemanı sahiptir. Deney Elemanı-11'in başlangıç rijitliği referans elemanından 1,31 kat fazladır. Ankraj uygulanmayan elemanlar için elde edilen en yüksek başlangıç rijitliği, eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-11'in ancak %83'si oranındadır.

Ankraj uygulamasıyla dayanımı artan elemanlar daha yüksek yük düzeyine kadar yüklenmiş bu nedenle elemanlarda gelişen çatlak sayısı da artmıştır. Kiriş gövdesinde gelişen çatlakların sayısının artması elemanların maksimum yük düzeyindeki rijitliklerinin azalmasına neden olmuştur. Ankraj uygulanmayan deney elemanları arasında referans elemana göre en küçük maksimum yük rijitliğine 3,42 kN/mm ile Deney Elemanı-5 sahiptir. En yüksek maksimum yük rijitliğine Deney Elemanı-3 sahiptir. Deney elemanının maksimum yük rijitliği, referans elemanından 1,06 kat fazladır. Ankraj uygulanan deney elemanları arasında en küçük maksimum yük rijitliğine 10 no'lu deney elemanı sahiptir. Deney Elemanı-10'un

maksimum yük rijitliği referans elemanından %28 oranında azdır. En yüksek maksimum yük rijitliğine ise 7 no'lu deney elemanı sahiptir. Deney Elemanı-7'nin maksimum yük rijitliği referans elemanından %7 oranında azdır. Ankraj uygulanmayan elemanlar için elde edilen en yüksek maksimum yük rijitliği, eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-10'dan %44 oranında fazladır.

4.4 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkileri

Eğik çatlaklarla kesişen CFRP şeritlerde ölçülen birim deformasyon değerleri, CFRP şeritlerin kesme dayanımına hangi oranda katkı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısını değerlendirmek için deney elemanlarının birim deformasyon davranışları incelenmiştir. Değerlendirmede maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılmıştır.

CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasıyla göçen Deney Elemanı-6'da deney programının en düşük birim deformasyon değeri ölçülmüştür. En büyük birim deformasyon, eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-11'de ölçülmüştür.

Deney Elemanı-2, 3, 4 ve 6, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması nedeni ile göçmüştür. Deney elemanlarında, (ACI-440, 1996) komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin en az %40'ına, en fazla %86'sına ulaşan birim deformasyon değerleri ölçülmüştür.

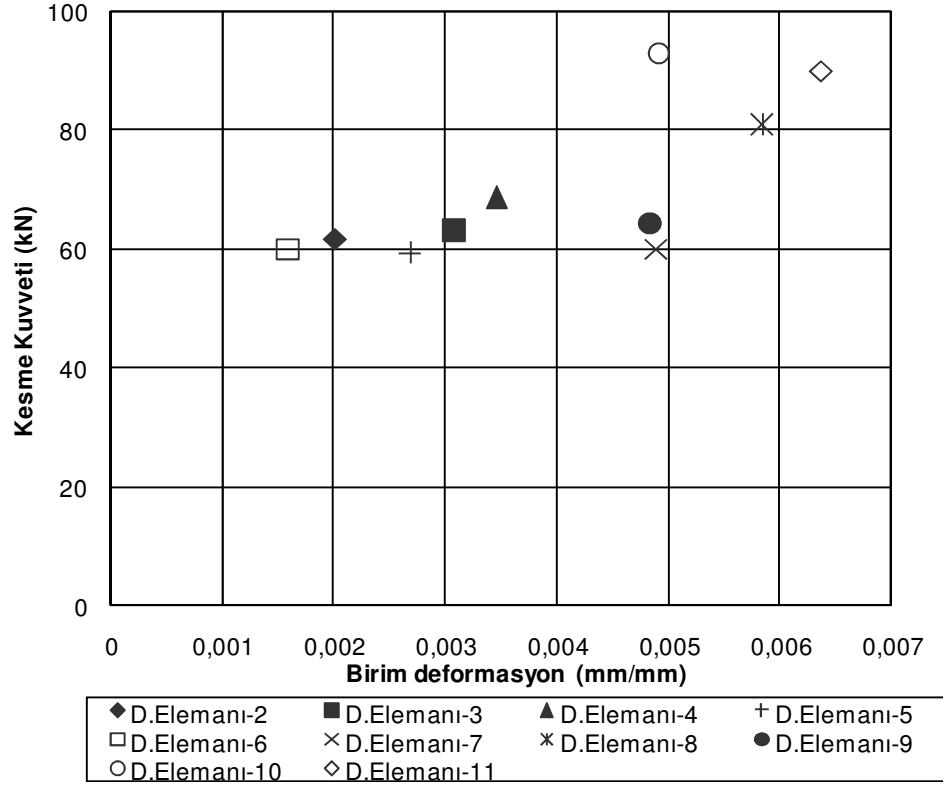
Deney Elemanı-5, kiriş tablasının gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Deney elemanında 0,0024 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

Deney Elemanı-7 ve 9, beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Deney elemanlarında sırasıyla 0,0053 ve 0,0048 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

Deney Elemanı-8'de CFRP şeritler, lifleri doğrultusundaki dayanımlarından büyük gerilmelere maruz kalarak kopmuştur. Deney elemanının birim deformasyon değerleri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini %50 oranında aşmış, 0,0059 mm/mm'ye ulaşmıştır.

Deney Elemanı-10 ve 11 eğilme kapasitesine ulaşmıştır. Deney elemanlarının birim deformasyon değerleri sırasıyla, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini %22 ve %98 oranında aşmıştır. Deney elemanlarının maksimum yük

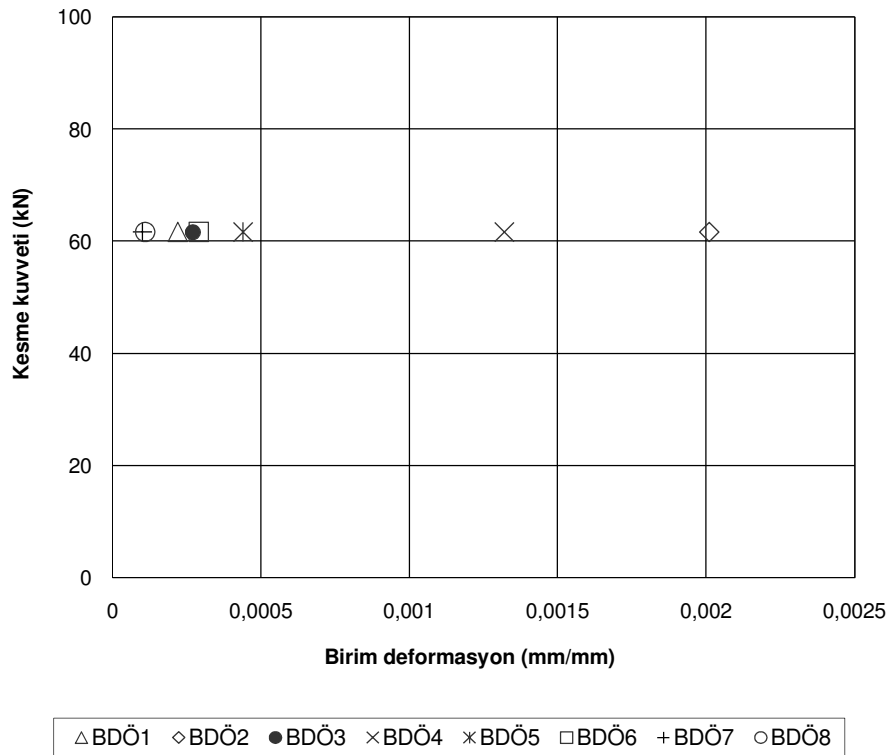
düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik, Şekil 4.20’de sunulmuştur.



Şekil 4.20 Deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri

Deney Elemanı-2,

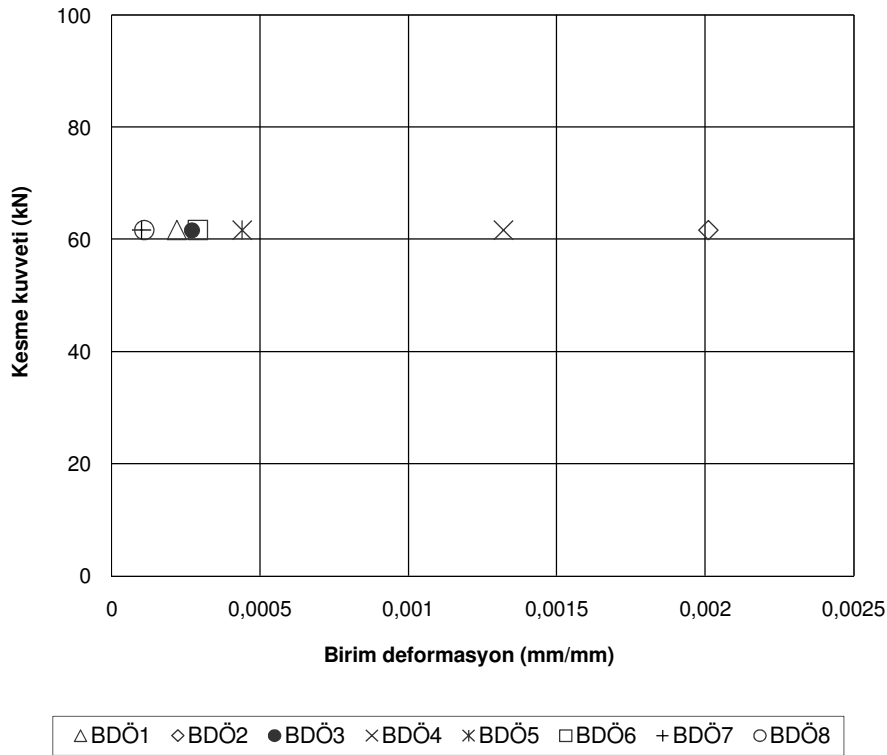
Test sırasında ölçülen birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik, Şekil 4.21’de sunulmuştur. Şekilde maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri dikkate alınmıştır. Deney elemanında çatlakların konsantre olduğu 3 ve 6 no’lu CFRP şeritler arasında en büyük 0,002 mm/mm, en küçük 0,00027 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Çatlakların kılcal düzeyde kaldığı bölgede ölçülen en büyük birim deformasyon değeri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %7’si oranındadır. Bu bölgede ortalama 0,00029 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.21 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-2

Deney Elemanı-3,

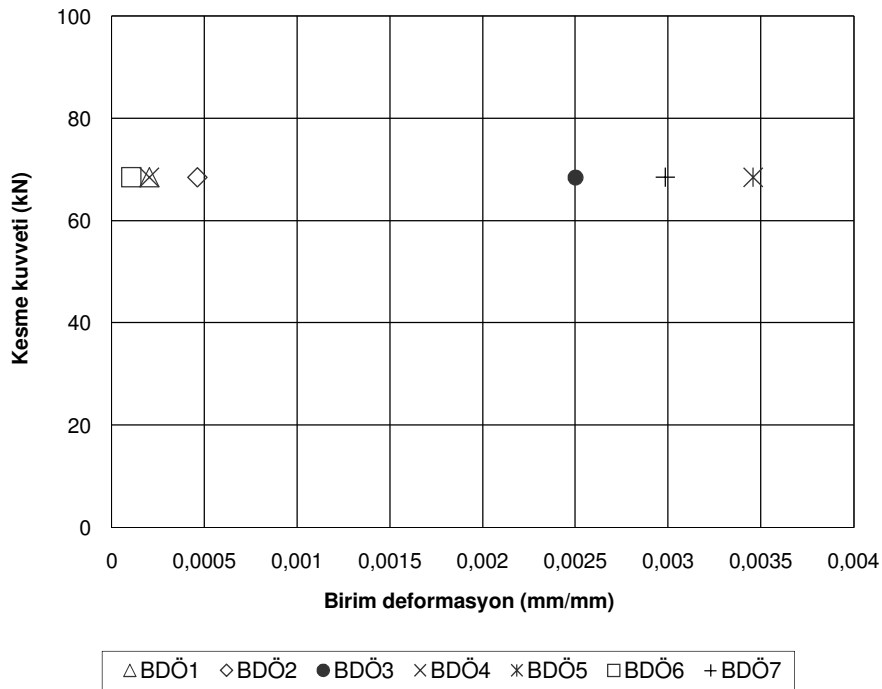
Deney elemanının test sırasında ölçülen birim deformasyon-kesme kuvveti eğrileri Bölüm 3’de, Şekil 3.18 ve 3.19’da sunulmuştur. Eğrilerin maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik, Şekil 4.22’de verilmiştir. Deney elemanında en büyük birim deformasyon, betonarme kirişin göçmesine neden olan çatlağın gelişimine başladığı 13 no’lu CFRP şeritte ölçülmüştür. Birim deformasyon ölçerde 0,0031 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 6 no’lu CFRP şeridin her iki yanında, aralıkta gelişen çok sayıda eğik çatlak, 1 no’lu birim deformasyon ölçerde 8 no’lu birim deformasyon ölçere benzer, 0,00275 mm/mm birim deformasyon ölçülmesine neden olmuştur. Diğer deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.22 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-3

Deney Elemanı-4,

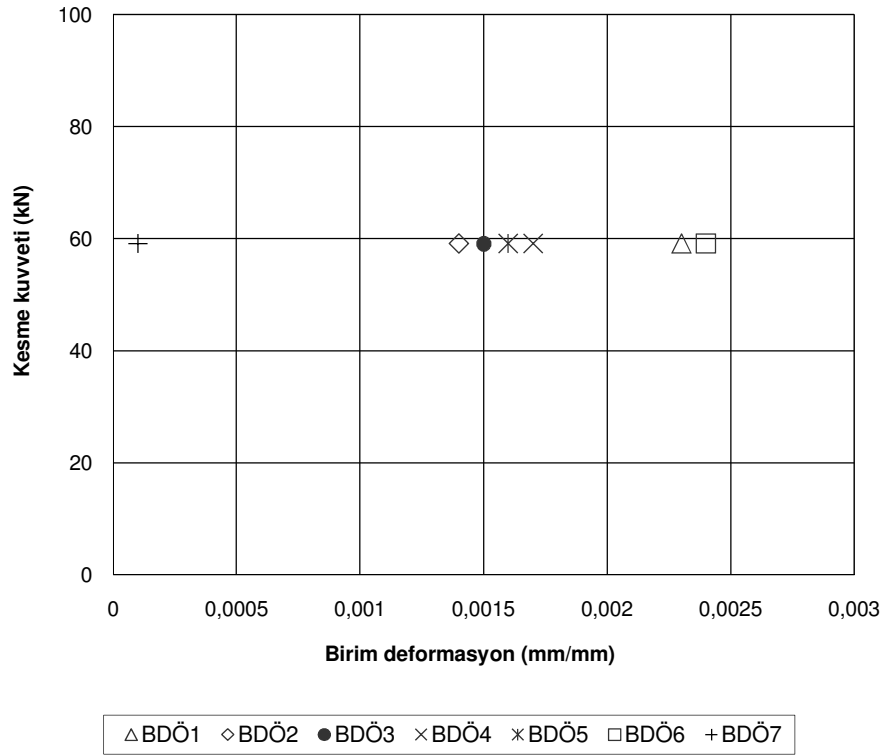
Deney elemanının maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik, Şekil 4.23’de verilmiştir. Birim deformasyon değerleri için Bölüm 3’de, Şekil 3.25 ve 3.26’da sunulan birim deformasyon-kesme kuvveti eğrileri kullanılmıştır. Deney elemanında çatlaklar 5 ve 7 no’lu CFRP şeritler arasında konsantre olmuştur. Bu bölgede ölçülen en büyük birim deformasyon ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %86’sı oranındadır. Çatlakların konsantre olduğu bölgede en küçük birim deformasyon 6 no’lu şeritte ölçülmüştür. ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %5 oranında birim deformasyon ölçülen 6 no’lu CFRP şerit, 68 kN yük düzeyinde alt ve üst uçlarından beton yüzeyinden ayrılmıştır. 5 no’lu CFRP şeridin iki yanında, aralıktaki, gelişen çatlaklar, 3 no’lu birim deformasyon ölçerde 5 ve 7 no’lu birim deformasyon ölçerlere benzer, 0,0025 mm/mm birim deformasyon ölçülmesine neden olmuştur. Çatlakların kılcal düzeyde kaldığı bölgede ise ortalama 0,0003 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.23 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-4

Deney Elemanı-5,

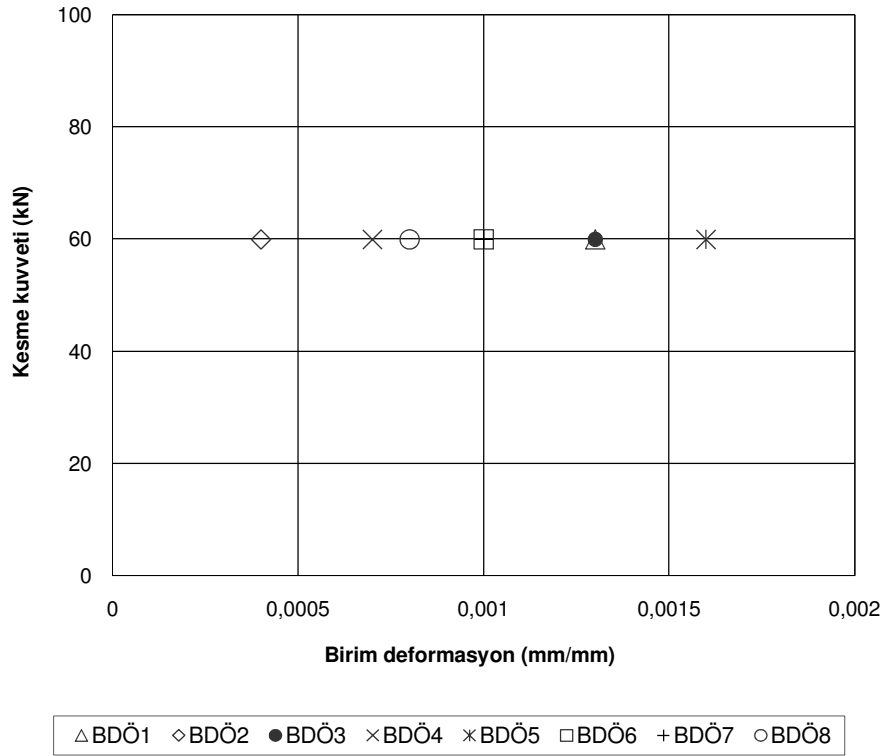
Maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri dikkate alınarak çizilen grafik, Şekil 4.24’de sunulmuştur. Deney elemanında 2 ve 4 no’lu şeritler arasında, kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte, çok sayıda kılcal çatlak gelişmiştir. Bu bölgede 1 ve 2 no’lu birim deformasyon ölçerlerde sırasıyla 0,0024 mm/mm ve 0,0014 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında en küçük birim deformasyon 7 no’lu birim deformasyon ölçerlerde, diğer birim deformasyon ölçerlerden 15 kat az, 0,0001 mm/mm ile ölçülmüştür. Diğer deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0015 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.24 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-5

Deney Elemanı-6,

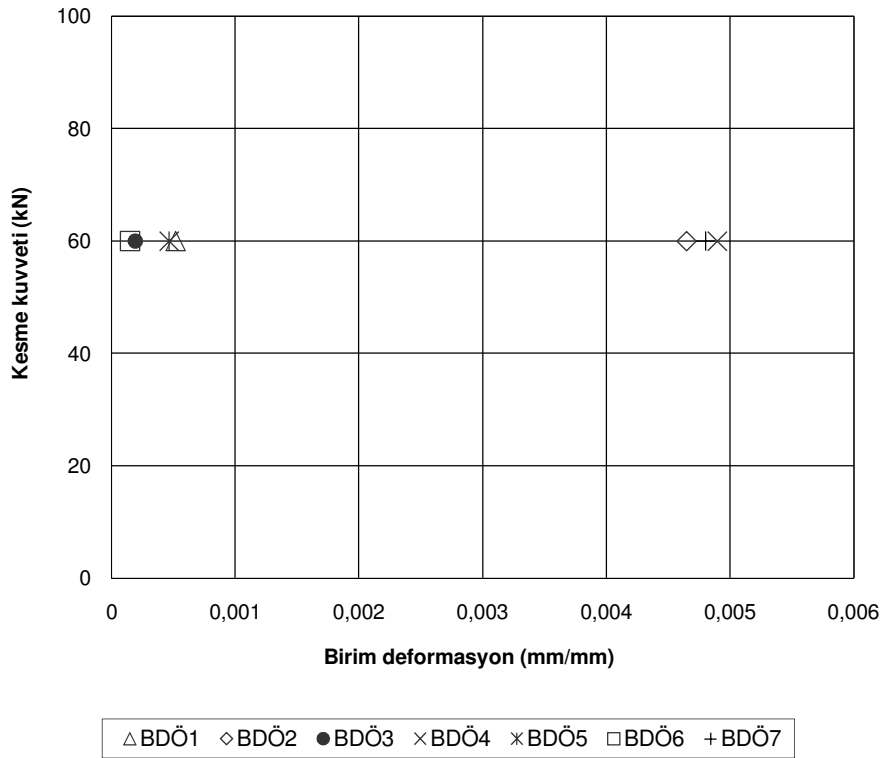
Deney elemanının test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik, Şekil 4.25’de sunulmuştur. Deney elemanında belli bir kesitte konsantre olamayan, tüm kesme açıklığına yayılan çok sayıda eğik çatlak gelişmiştir. En küçük birim deformasyon 2 no’lu birim deformasyon ölçerde 0,0004 mm/mm ile ölçülmüştür. En büyük birim deformasyon 5 no’lu birim deformasyon ölçerde, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %40 oranında ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,001 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Birim deformasyon değerleri, CFRP şeritlerin çatlak gelişimi engelleyecek veya geciktirecek yeterli katkıyı sağlayamadığını göstermektedir.



Şekil 4.25 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-6

Deney Elemanı-7,

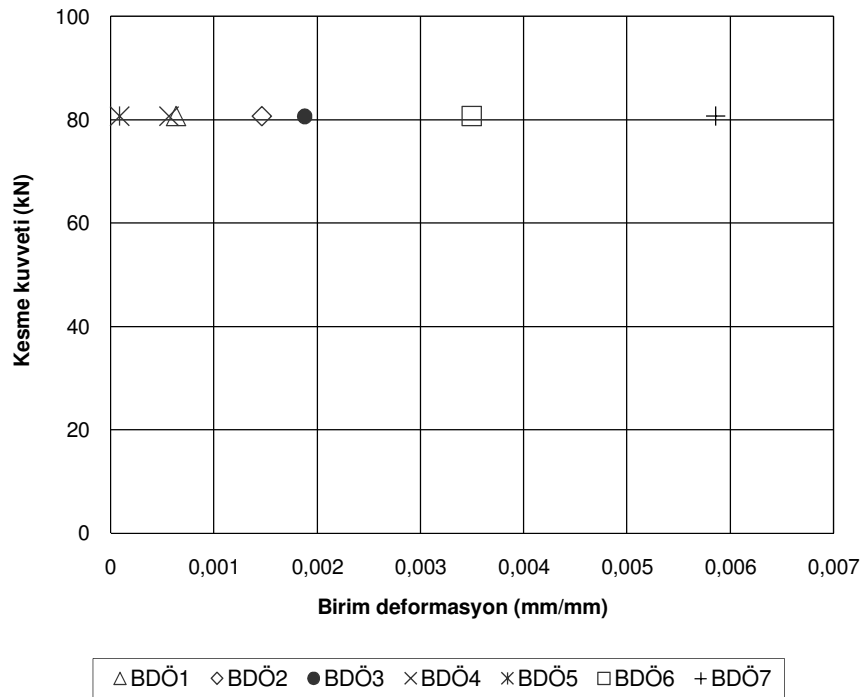
Deney elemanının test sırasında elde edilen birim deformasyon-kesme kuvveti eğrileri Bölüm 3’de, Şekil 3.46 ve 3.47’de sunulmuştur. Eğrilerin maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak elde edilen grafik, Şekil-4.26’da verilmiştir. Deney elemanında çatlaklar 3 ve 6 no’lu CFRP şeritler arasında konsantre olmuştur. Bu bölgede 3 ve 5 no’lu CFRP şeritlerde, 4 ve 6 no’lu CFRP şeritlerden ortalama 10,26 kat fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Bu bölgede ölçülen en büyük birim deformasyon ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinden %33 oranında fazladır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0005 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında en küçük birim deformasyon, elemanın göçmesine neden olan çatlağın gelişimine başladığı 4 no’lu CFRP şeritte ölçülmüştür.



Şekil 4.26 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-7

Deney Elemanı-8,

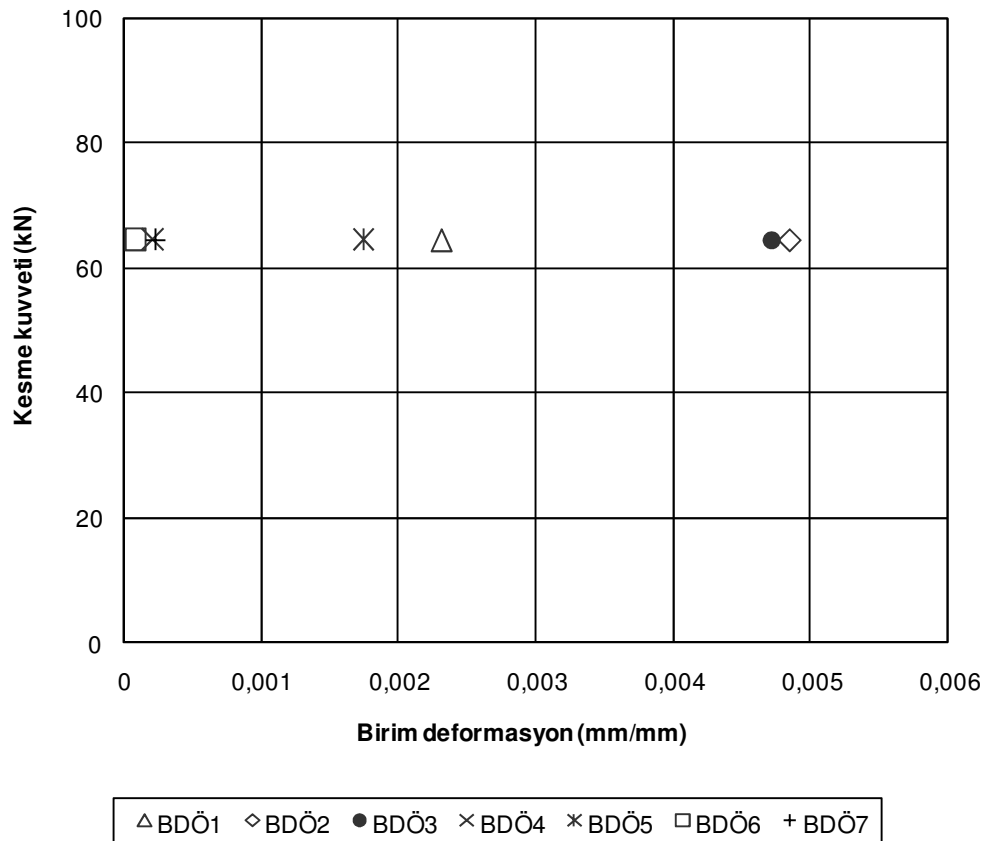
Şekil 4.27’de maksimum yük düzeyinde ölçülen birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik verilmiştir. Deney elemanında eğik çatlaklar 10 ve 15 no’lu CFRP şeritler arasında konsantre olmuştur. Çatlakların konsantre olduğu bölgede 6 no’lu birim deformasyon ölçerde ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %87’si oranında, 7 no’lu birim deformasyon ölçerde ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinden %46 fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında en küçük birim deformasyon 5 no’lu birim deformasyon ölçerde, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin % 2 oranında ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ortalama 0,0021 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney sırasında 11, 12 ve 13 no’lu CFRP şeritler orta bölgelerinden beton yüzeyinden ayrılmış, 14 ve 15 no’lu CFRP şeritler ise kopmuştur. Bu şeritler üzerinde birim deformasyon ölçer bulunmadığından şeritler orta bölgelerinden ayrıldığı ve koptuğu sıradaki birim deformasyon davranışları incelenememiştir. 9, 11 ve 14 no’lu CFRP şeritler üzerinde bulunan ankrajlar CFRP şeritleri, lifleri doğrultusunda yırtmıştır. 9 no’lu CFRP şerit üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçer yırtılma sırasında %8 oranında düşmüştür.



Şekil 4.27 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-8

Deney Elemanı-9,

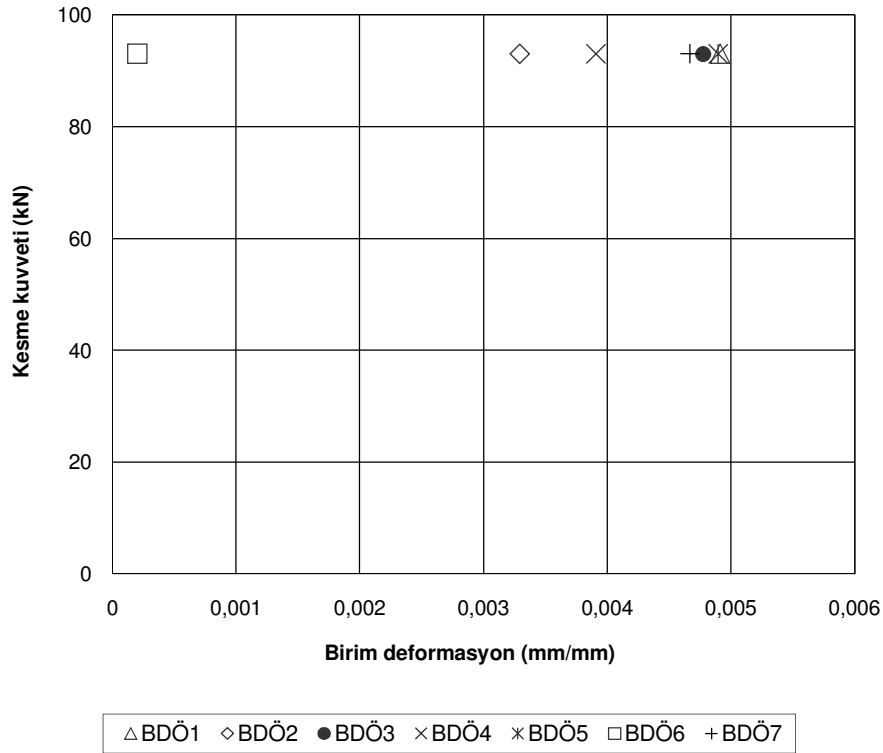
Deney elemanının test sırasında ölçülen birim deformasyon-kesme kuvveti eğrileri Bölüm 3’de, Şekil 3.62 ve 3.63’de sunulmuştur. Eğrilerin maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak elde edilen grafik, Şekil 4.28’de verilmiştir. Deney elemanında eğik çatlaklar 2 ve 3 no’lu CFRP şeritler arasında konsantre olmuştur. Bu bölgede deney elemanı için en büyük birim deformasyon 0,0048 mm/mm ile 2 no’lu birim deformasyon ölçerden elde edilmiştir. Aynı bölgede bulunan 3 no’lu birim deformasyon ölçerde 0,0047 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Deney elemanında en küçük birim deformasyon, 6 no’lu birim deformasyon ölçerde 0,00007 mm/mm ile ölçülmüştür. Diğer birim deformasyon ölçerlerde 0,00022 mm/mm-0,0047 mm/mm aralığında değişen birim deformasyon değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.28 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-9

Deney Elemanı-10,

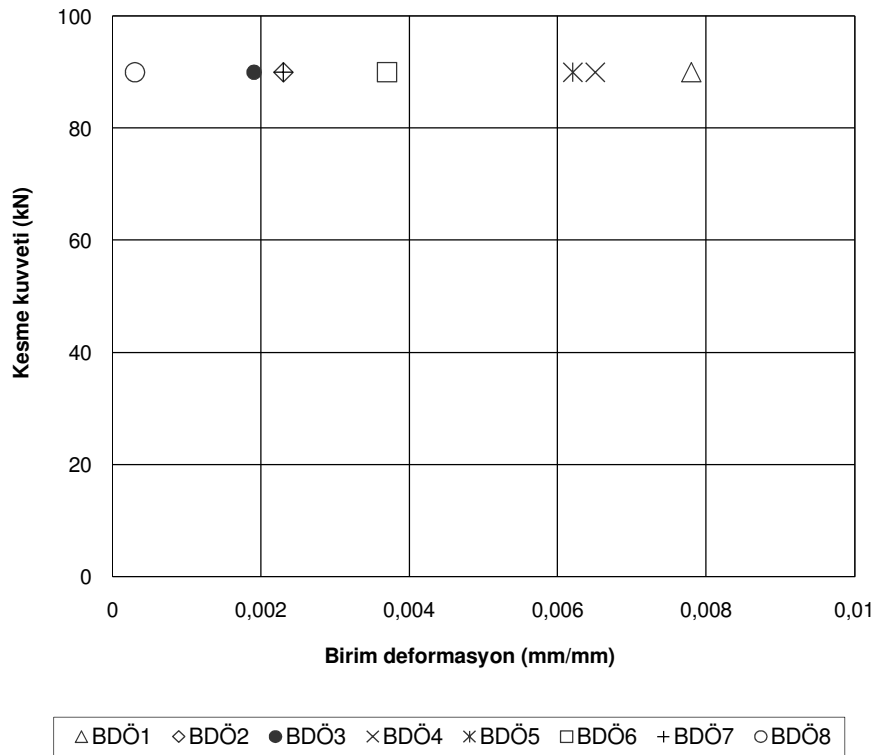
Deney elemanının maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri kullanılarak çizilen grafik, Şekil 4.29’da verilmiştir. Deney elemanı boyuna donatıları aktıktan sonra 4 ve 9 no’lu CFRP şeritler arasında gelişen çok sayıda çatlağın bu kesitte konsantre olması nedeni ile kesmeden göçmüştür. Çatlakların konsantre olduğu bölge ile çatlakların kılcal düzeyde kaldığı bölgenin birim deformasyon davranışları benzerlik göstermiştir. Çatlakların konsantre olduğu bölgede 0,0033-0,0049 mm/mm aralığında değişen birim deformasyon ölçülmüştür. 6 no’lu birim deformasyon ölçerden sağlıklı veri alınamamıştır. Diğer birim deformasyon ölçerlerde ise en küçük 0,0039 mm/mm, en büyük 0,0049 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.29 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-10

Deney Eleman-11,

Deney elemanının ölçülen maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değerleri dikkate alınarak çizilen grafik, Şekil 4.30'da sunulmuştur. Deney elemanında, kesme çatlakları 1 ve 2 no'lu ve 4 ve 5 no'lu CFRP şeritler arasında konsantre olmuştur. Bu bölgede ölçülen en küçük birim deformasyon, diğer bölgelerde ölçülen en büyük birim deformasyon değerlerinden %68 oranında büyüktür. Deney elemanında ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinden %98 oranında fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Çatlakların kılcal düzeyde kaldığı bölgelerde ortalama 0,002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 4.30 Maksimum yükte ölçülen birim deformasyon değerleri, Deney Elemanı-11

4.4.1 Deney Elemanlarının Kesme Kuvveti-Birim Deformasyon İlişkisi Sonuçları

Deney elemanların birim deformasyon davranışlarının değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Ankraj uygulanmayan deney elemanlarında en küçük birim deformasyon, beton yüzeyinden ayrılan CFRP şeritlerde ölçülmüştür.
- Ankraj uygulanmayan deney elemanlarında en büyük birim deformasyon, elemanın göçmesine neden olan çatlak gelişimine başladığı şeritte ölçülmüştür.
- Ankraj uygulanan deney elemanlarında en küçük birim deformasyon, deney elemanın göçmesine neden olan çatlak gelişimine başladığı şeritte ölçülmüştür.
- Çatlakların konsantre olduğu bölgede, deney elemanı için en büyük birim deformasyon değerleri ölçülmüştür.
- Ankrajların CFRP şeritleri lifleri doğrultusunda yırttığı sırada ani birim deformasyon düşüşleri gerçekleşmiştir.
- Çatlakların belli bir kesitte konsantre olmadığı, tüm kesme açıklığına yayıldığı elemanlarda, benzer birim deformasyon değerleri ölçülmüştür.

4.5. Deneysel Değişkenlerin Birim Deformasyon Davranışına Etkisi

Deneysel değişkenlerin birim deformasyon davranışlarına etkisini değerlendirmek için özdeş yük düzeylerinde birim deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Deney elemanlarında ilk çatlakların gözlemlendiği 10 kN ve 20 kN düzeyindeki birim deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır. 50 kN yük düzeyine kadar deney elemanlarının birim deformasyon davranışları benzerdir, bu nedenle bu yük düzeyinden, maksimum yük düzeyine kadar çevrimler karşılaştırılmıştır. Birim deformasyon davranışlarının değerlendirilmesinde (ACI-440, 1996) komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değeri (0,004) referans alınmıştır.

Deney elemanları deneysel çalışmanın değişkenleri, CFRP şeritlerin yerleşim düzenindeki değişim (şerit genişliği ve şerit aralığı değişimi), CFRP şeritlerin uygulama şekli ve ankraj uygulamasını destekleyecek şekilde gruplandırılmıştır. Deney elemanların belirlenen yük düzeyleri için oluşturulan kesme kuvveti-birim deformasyon tabloları, Tablo 4.6'dan Tablo 4.15'e kadar sunulmuştur.

Şerit genişliğindeki değişim,

Deneysel çalışmada, deney elemanlarının kesme dayanımları artırmak için 50 ve 100 mm genişliğinde CFRP şeritler kullanılmıştır. Şerit genişliğindeki değişiminin deney elemanlarının birim deformasyon davranışına etkisini değerlendirmek için bölüm sonunda sunulan tablolar kullanılmıştır.

20 kN yük düzeyinde Deney Elemanı-10 ve 11'de ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %2'si oranında birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük düzeyinde, 10 no'lu deney elemanında maksimum 0,0029 mm/mm, Deney Elemanı-11'de ise 0,0002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 60 kN yük düzeyinde Deney Elemanı-10'da, 0,0041 mm/mm birim deformasyon ölçülmüş, Deney Elemanı-11'de ise ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %11'i oranında birim deformasyon ölçülmüştür. Deney Elemanı-10'un

70 kN yük seviyesinde ulaştığı birim deformasyon değerine Deney Elemanı-11, 90,00 kN yük düzeyinde ulaşmıştır.

Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-9'un kesme dayanımları, farklı genişlikte L biçimli şeritlerle artırılmıştır. Şerit genişliğindeki değişimin birim deformasyon davranışına etkisini incelenmek için oluşturulan tablolar, Tablo 4.11 ve Tablo 4.13'de sunulmuştur. 20 kN yük düzeyinde deney elemanlarında, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %6'sı oranında birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük seviyesinde Deney Elemanı-9'da 0,0019 mm/mm birim deformasyon ölçülmüş, 7 no'lu deney elemanında ise %200 oranında daha fazla birim deformasyon ölçülmüştür. 60 kN yük seviyesinde Deney Elemanı-7'de ölçülen birim deformasyon ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini %22 oranında aşmıştır. Deney Elemanı-9'da ise ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %79 oranında birim deformasyon ölçülmüştür. Deney Elemanı-7'nin 60 kN yük düzeyinde ulaştığı birim deformasyon değerine Deney Elemanı-9, 64,33 kN yük düzeyinde ulaşmıştır.

20 kN yük düzeyinde deney elemanlarında, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %3'ü oranında birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük seviyesinde, deney elemanlarında sırayla 0,0009 mm/mm ve 0,0015 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 60 kN yük düzeyinde, Deney Elemanı-4'de 0,0024 mm/mm, Deney Elemanı-3'de ise %26 oranında daha fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Deney Elemanı-3'den dayanımı %14 büyük olan Deney Elemanı-4'ün birim deformasyon değeri, %12 oranında daha fazladır.

Şerit aralığı değişimi,

CFRP şerit aralığı değişiminin deney elemanlarının birim deformasyon davranışına etkisini değerlendirmek için, bölüm sonunda sunulan tablolar kullanılmıştır.

20 kN yük düzeyinde Deney Elemanı-2 ve 3'te ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %3'ü oranında birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük düzeyinde deney elemanlarının maksimum birim deformasyon değerleri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %20'sine ulaşmıştır. Deney Elemanı-3'ün dayanımı Deney Elemanı-2'den %3 oranında fazla, maksimum yük düzeyindeki birim deformasyon değeri de %36 oranında büyüktür.

Deney Elemanı-4 ve 5'in birim deformasyon davranışlarının değerlendirmek için Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'da sunulan tablolar kullanılmıştır. 20 kN yük düzeyinde deney elemanlarında sırasıyla 0,00004 mm/mm ve 0,00002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük düzeyinde 60 mm şerit aralığı bulunan Deney Elemanı-5'de 0,00056 mm/mm birim deformasyon ölçülmüş, 4 no'lu deney elemanında ise %260 oranında daha fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Maksimum yük düzeyinde Deney Elemanı-5'de 0,0024 mm/mm birim deformasyon ölçülmüş, Deney Elemanı-4'te ise %45 daha fazla birim deformasyon ölçülmüştür.

CFRP şerit uygulamalarında amaç, çatlak gelişimlerini kılcal düzeyde tutarak elemanın eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Güçlendirilen deney elemanlarında CFRP şerit yerleşim düzeni (CFRP şerit genişliğinin artması veya CFRP şerit aralığının azalması) çatlak gelişimlerini ertelemiş, bu nedenle CFRP şeritler kesme dayanımına daha yüksek yük düzeyinde katkı sağlamıştır. Gelişen çatlaklar CFRP şeritlerle kesiştiğinde, çatlak gelişimini engellemek için etkin katkı sağlayan şeritlerde gerilmeler, yüklerle doğrusal artan birim deformasyon olarak gözlenmiştir.

Yük düzeyi yükseldikçe çatlak nedeni ile dayanımı azalan şerit beton yüzeyinden ayrılmakta, eğer çatlak şeridi beton yüzeyinden ayıramazsa gelişimine şerit altında devam etmektedir. Bu durumda, CFRP ile beton arasındaki bağ korunursa kesme dayanımına katkı sağlayan şeritte birim deformasyon artacak, bağda bozunma gerçekleşmişse birim deformasyon bu aşamadan sonra sabit kalacak ancak eleman, bu zayıf kesitten göçecektir.

50 mm genişliğinde CFRP şerit ile güçlendirilen Deney Elemanı-10'da 60 kN yük düzeyinde birim deformasyon değerleri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır. Bu yük düzeyinde Deney Elemanı-11'de ise ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %11'i seviyesinde birim deformasyon ölçülmüştür. Birim deformasyon davranışları incelendiğinde, CFRP şerit genişliği artıkça, şeritlerin kesme dayanımına yüksek yük düzeyinde katkı sağladığı görülmüştür.

Şeritleri arasında 60 mm aralık bulunan deney elemanlarında CFRP şeritler arasında gelişen çatlaklar, yeteri kadar geliştikten sonra CFRP şeritlerle kesişmiş, gelişen çatlağın ilerlemesini engelleyecek dayanımı gösteremeyen CFRP şeritler daha düşük yük düzeyinde beton yüzeyinden ayrılmıştır. Bu nedenle şeritleri arasında 60 mm aralık bulunan deney elemanlarında CFRP şeritler, kesme dayanımına daha az katkı sağlamıştır. CFRP şeritler, 30 mm şerit aralığına sahip Deney Elemanı-4'ün kesme dayanımına, 60 mm şerit aralığına sahip Deney Elemanı-5'den %45 oranında fazla katkı sağlamıştır.

Uygulama şekli,

Deney elemanlarının kesme dayanımları artırmak için CFRP şeritler farklı şekillerde uygulanmıştır. Uygulama şeklindeki değişimin birim deformasyon davranışına etkisini incelemek için Deney Elemanı-8, Deney Elemanı-10 ile karşılaştırılmıştır. 20 kN yük düzeyinde deney elemanlarında, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %5'i oranında birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük düzeyinde Deney Elemanı-8 ve Deney Elemanı-10'da sırasıyla 0,0023 mm/mm ve 0,0030 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 70 kN yük düzeyinde Deney Elemanı-10'da 1, 3 ve 7 no'lu deformasyon ölçerler, Deney Elemanı-8'de ise 7 no'lu birim deformasyon ölçer ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır. Deney Elemanı-10'da, 70 kN yük düzeyinden sonra 1, 3, 5 ve 7 no'lu birim deformasyon ölçerler, ölçebilecekleri birim deformasyon değerinden büyük birim deformasyona maruz kalarak devre dışı

kalmıştır. Bu nedenle 70 kN yük seviyesinden sonra birim deformasyon davranışları sağlıklı karşılaştırılamamıştır.

Uygulama şeklinin kesme dayanımına katkısını değerlendirmek için, Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-6'nın birim deformasyon davranışları karşılaştırılmıştır. 20 kN yük seviyesinde deney elemanlarının birim deformasyon değerleri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %4'üne ulaşmıştır. 50 kN yük düzeyinde, Deney Elemanı-2'de gelişen çatlaklara rağmen ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %21'i oranında birim deformasyon ölçülmüştür. Bu yük seviyesinde Deney Elemanı-6'da, 2 no'lu deney elemanından 3,5 kat büyük birim deformasyon ölçülmüştür. Maksimum yük düzeyinde deney elemanlarında sırasıyla 0,0020 mm/mm ve 0,0016 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür.

CFRP şeritlerin uygulama şekli deney elemanlarının davranışlarını doğrudan etkileyen bir değişkendir. U biçimli CFRP şeritlerle güçlendirilen 8 no'lu deney elemanında çatlaklar gerilmenin bir kesitte yığılmasına neden olmuştur. Çatlak gelişimini engellemek için katkıda bulunan 7 no'lu şeritte birim deformasyon değeri, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerini aşmıştır. Yük düzeyi yükseldikçe çatlağın gelişimini engelleyemeyen şerit, dayanımından büyük gerilmeye maruz kalarak kopmuştur. Deney Elemanı-10'da ise çatlaklar uygulama şeklindeki değişimle kesme açıklığına yayılmıştır. Böylece gerilme bir kesitteki CFRP şeritler tarafından karşılanmak zorunda kalmamış, CFRP şeritler kopmadan deney elemanlarının kesme dayanımına daha fazla katkı sağlamıştır.

Ankraj uygulaması,

Deney programında CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını önlemek amacıyla kiriş alt boyuna donatısının üstünde ve kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte mekanik ankrajlar kullanılmıştır. Ankraj uygulamasının birim deformasyon davranışına katkısı Tablo 4.10 ve Tablo 4.12'de sunulan tablolar kullanılarak değerlendirilmiştir.

20 kN yük düzeyinde deney elemanlarında, ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %5'i oranında birim deformasyon ölçülmüştür. 50 kN yük seviyesinde Deney Elemanı-6'da ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %20'si oranında birim deformasyon ölçülmüş, 8 no'lu deney elemanında ise Deney Elemanı-6'dan 2,75 kat daha fazla birim deformasyon ölçülmüştür. CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması dayanımın açısından olumsuz davranış sergilemiş deney elemanının birim deformasyon değerleri ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin oldukça altında kalmıştır. Deney Elemanı-6, 60,01 kN yük düzeyinde maksimum 0,0016 mm/mm birim deformasyon seviyesine ulaşarak göçmüştür. Deney Elemanı-8'de ise ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinden %46 büyük birim deformasyon ölçülmüştür. Ankraj uygulanan deney elemanında CFRP şeritler, lifleri doğrultusundaki dayanımından büyük gerilmelere maruz kalarak kopmuştur.

Ankraj uygulanmayan deney elemanlarında en büyük birim deformasyon, Deney Elemanı-4'de ölçülmüştür. Deney elemanında maksimum yük düzeyinde ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinin %86'sı oranında birim deformasyon ölçülmüştür. Ankraj uygulanan deney elemanlarında en düşük birim deformasyon 9 no'lu deney elemanında ölçülmüştür. Deney elemanında maksimum yük düzeyinde ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinden %21 oranında büyük birim deformasyon ölçülmüştür. Ankraj uygulanmayan elemanlardan elde edilen en büyük birim deformasyon değeri, ankraj uygulanan deney elemanlardan elde edilen en düşük birim deformasyon değerinden %35 oranında azdır. Birim deformasyon davranışları, CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkı sağlayabilmesi için uç bölgelerine ankraj uygulanması gerektiğini göstermiştir.

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	0,000004	0,000001	0,000045	0,000046	0,000003	0,000003	0,000101	0,000028
20	0,000124	0,000023	0,000019	0,000084	0,000017	0,000111	0,000126	0,000012
50	0,00013	0,00065	0,00021	0,00004	0,00012	0,00024	0,00079	0,00007
61,63 (Maksimum yük seviyesi)	0,00022	0,00201	0,00027	0,00132	0,00044	0,00029	0,0001	0,0001

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	B.D.Ö.8
10	0,000055	0,000012	0,000002	0,000010	0,000002	0,000002	0,000005	0,000007
20	0,000068	0,000059	0,000007	0,000044	0,000051	0,000031	0,000082	0,000028
50	0,00019	0,00008	0,00008	0,00002	0,00001	0,00010	0,00028	0,00086
60	0,00132	0,00010	0,00014	0,00004	0,00003	0,00010	0,00027	0,00309
62,94 (Maksimum yük seviyesi)	0,00275	0,00024	0,00037	0,00005	0,00003	0,00010	0,00026	0,00309

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	0,000009	0,000012	0,000006	0,000040	0,000014	0,000009	0,000004
20	0,000002	0,000007	0,000015	0,000118	0,000038	0,000033	0,000045
50	0,000082	0,000267	0,000478	0,000087	0,001473	0,000082	0,000279
60	0,000075	0,000394	0,001874	0,000082	0,002435	0,000124	0,000741
68,48 (Maksimum yük seviyesi)	0,000202	0,000461	0,002498	0,000202	0,003456	0,000106	0,002983
-63 (Göçme)	0,00014	0,00002	0,00036	0,00019	0,00346	0,00006	0,00011

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	0,000018	0,000010	0,000004	0,000007	0,000005	0,000002	0,000001
20	0,000002	0,000088	0,000032	0,000013	0,000039	0,000019	0,000003
50	0,000110	0,000157	0,000556	0,000028	0,000469	0,000073	0,000004
59,13 (Maksimum yük seviyesi)	0,0023	0,0014	0,0015	0,0001	0,0016	0,0024	0,0001

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	B.D.Ö.8
10	0,000046	0,000036	0,000061	0,000126	0,000023	0,000058	0,000058	0,000030
20	0,000029	0,000099	0,000151	0,000146	0,000049	0,000035	0,000035	0,000008
50	0,000823	0,000238	0,000789	0,000473	0,000621	0,0008	0,0005	0,000329
60,01 (Maksimum yük seviyesi)	0,0013	0,0004	0,0013	0,0007	0,0016	0,001	0,001	0,0008

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	0,000014	0,000079	0	0,000035	0,000002	0,000005	0,000007
20	0,000002	0,000216	0,000056	0,000174	0,000016	0,000037	0,000014
50	0,000244	0,002303	0,000132	0,003889	0,000111	0,000107	0,002695
60,00 (Maksimum yük seviyesi)	0,000516	0,004650	0,000189	0,004898	0,000465	0,000149	0,004803
59,66 (Göçme)	0,0008	0,0049	0,0002	0,0053	0,00091	0,00055	0,0048

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	0,000011	0,000053	0,000011	0,000025	0,000019	0,000120	0,000014
20	0,000031	0,000143	0,000025	0,000033	0,000023	0,000204	0,000002
50	0,000058	0,000538	0,000299	0,000101	0,000025	0,001453	0,002262
60	0,000089	0,000705	0,000574	0,000039	0,000042	0,001773	0,004734
70	0,000238	0,000773	0,001433	0,000361	0,000068	0,003229	0,005848
80,67 (Maksimum yük seviyesi)	0,0039	0,0019	0,0018	0,00062	0,000087	0,0035	0,0059

Tablo 4.13 Deney elemanı 9'un 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	0,000014	0,000016	0,000016	0,000007	0,000005	0,000016	0,000007
20	0,000047	0,000256	0,000051	0,000047	0,000002	0,000023	0,000002
50	0,000128	0,000374	0,001974	0,000130	0,000551	0,000081	0,000132
60	0,000549	0,003321	0,003258	0,000142	0,001142	0,000079	0,000165
64,33 (Maksimum yük seviyesi)	0,0023	0,0048	0,0047	0,0002	0,0017	0,00007	0,0002

Tablo 4.14 Deney elemanı 10'un 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	0	0	0	0,000010	0,000002	0
20	0	0,000072	0	0,000079	0,000053	0,000056	0
50	0,000195	0,002905	0,000002	0,000302	0,000321	0,000072	0,000302
60	0,001072	0,004070	0,000551	0,000335	0,000893	0,000110	0,002111
70	0,004914	0,004216	0,003935	0,000510	0,002074	0,000116	0,004208
80	0,004914	0,003647	0,004772	0,000700	0,003679	0,000123	0,004666
90	0,004914	0,003403	0,004772	0,002751	0,004895	0,000121	0,004666
93,00 (Akma)	0,004914	0,003293	0,004772	0,003908	0,004895	0,000126	0,004666
68 (Göçme)	0,0002	0,0043	0,0048	0,0044	0,0049	0,00013	0,0047

Tablo 4.15 Deney elemanı 11'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	B.D.Ö.8
10	0,000026	0,000005	0	0,000007	0	0,000016	0	0,000010
20	0,000053	0,000007	0	0,000068	0	0,000053	0	0,000019
50	0,000160	0,000010	0,000126	0,000226	0	0,000072	0,000153	0,000060
60	0,000411	0,000253	0,000223	0,000461	0,000128	0,000090	0,000289	0,000070
70	0,000619	0,001132	0,000290	0,001407	0,001211	0,000126	0,000977	0,000140
80	0,001284	0,001993	0,000453	0,003211	0,003235	0,000265	0,001879	0,000153
90	0,005453	0,002258	0,000789	0,004950	0,004353	0,000311	0,002266	0,000179
87 (Akma)	0,0064	0,0023	0,0009	0,0055	0,0045	0,00016	0,0023	0,00019

BÖLÜM BEŞ

ANALİTİK ÇALIŞMA

5.1. Genel

Bu bölümde deney elemanlarının (ACI-440, 1996) komite raporu, (Chen ve Teng, 2003) in önerdiği bağıntılar ve (DBYBHY, 2007), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te verilen bağıntılarla hesaplanan kesme dayanımları, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca ANSYS-Sonlu Elemanlar Programının onuncu sürümü kullanılarak deney elemanlarının doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiş, doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edilen zarf eğrileri ve birim deformasyon değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

5.2. Deney Elemanlarının Analitik Kesme Dayanımları

CFRP ile güçlendirilen elemanlarının kesme dayanımları tüm yönetmeliklerde, kesme donatısının ve çatlamamış betonun kesme dayanımına katkısına, CFRP'nin katkısının eklenmesi ile elde edilmektedir.

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

(5.1) bağıntısında V_f , CFRP'nin kesme dayanımına katkısı, V_c , betonun kesme dayanımına katkısı, V_s ise kesme donatısının kesme dayanımına katkısıdır. Deneysel çalışmada deney elemanları kesme donatısız tasarlanmıştır. Bu nedenle deney elemanların analitik kesme dayanımları, betonun taşıdığı kesme kuvvetine CFRP şeritlerin katkısının eklenmesi ile elde edilmiştir. Betonun kesme dayanımına katkısı,

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

bağıntısıyla hesaplanmıştır. Bağıntıda;

f_c' : Betonun karakteristik basınç dayanımı

b_w : Kiriş gövde genişliği

d : Kiriş faydalı yüksekliğidir.

ACI 440 komite raporu

CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı, ACI-440 komite raporunda sunulan bağıntı ile hesaplanmış, çatlamamış betonun katkısına eklenerek deney elemanlarının kesme dayanımları elde edilmiştir. ACI-440 komite raporunda CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı,

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

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bağıntıda;

V_f : CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı

β : CFRP şeritlerin yatay eksenle yaptığı açı

d_f : Etkili CFRP şerit uzunluğu

s_f : CFRP şeritlerin, eksen den eksene aralıkları

f_{fe} : CFRP'deki etkili gerilme

n : CFRP sargı sayısı

t_f : CFRP şeritlerin kalınlığı

w_f : CFRP şerit genişliğidir.

(5.3) bağıntısındaki f_{fe} ifadesi,

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

şeklinde hesaplanmaktadır. (5.4) no'lu bağıntıda;

E_f : CFRP'nin elastisite modülü

ε_{fe} : CFRP'nin etkili birim deformasyon değeridir. ε_{fe} terimi,

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu} \cdot k_v \quad (5.5)$$

ifadesinden elde edilmektedir. (5.5) no'lu bağıntıda;

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

k_v : Beton ile CFRP arasındaki bağ katsayısıdır. k_v katsayısı,

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (5.6)$$

bağıntısından elde edilmektedir. Bağıntıda;

k_1 : Betonun basınç dayanımına bağlı değişiklik katsayısı

k_2 : CFRP uygulama şekline bağlı değişiklik katsayısı

L_e : CFRP şerittin aktif uzunluğudur.

(5.6) no'lu bağıntıda bulunan k_1 ve L_e terimleri,

$$L_e = \frac{23,300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (5.7)$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (5.8)$$

şeklinde elde edilmektedir. k_2 , CFRP şeritlerin uygulama şekline bağlıdır. CFRP şeritler elemanın yan yüzlerine yapıştırıldığı durumda k_2 , (5.10) no'lu bağıntı ile, CFRP şeritler U biçiminde uygulandığı durumda k_2 , (5.9) no'lu bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & U \text{ biçimli} \end{cases} \quad (5.9)$$

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

Chen&Teng

CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı, Chen&Teng'in geliştirdiği bağıntı ile hesaplanmış, çatlamaş betonun katkısına eklenerek deney elemanlarının kesme dayanımları elde edilmiştir. Chen&Teng'in deneye dayalı geliştirdiği bağıntılarda CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı,

$$V_f = 2.f_{fe}.t_f \cdot \frac{h_{fe} \cdot (\sin\beta + \cos\beta)}{s_f} \quad (5.11)$$

ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda;

V_f : CFRP şeritlerin kesme kuvveti taşıma kapasitesi

β : CFRP şeritlerin yatay eksenle yaptığı açı

s_f : CFRP şeritlerin, eksenden eksene aralıkları

f_{fe} : CFRP şeritteki etkili gerilme

h_{fe} : CFRP'nin etkili uzunluğu

t_f : CFRP şeritlerin kalınlığıdır.

(5.11) bağıntısındaki h_{fe} terimi,

$$h_{fe} = d_{fl} - d_{ft} - (h - 0,9.d) \quad (5.12)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (5.12) no'lu bağıntıda tanımlanan d_{fl} terimi, CFRP'nin alt ucunun kiriş basınç bölgesine uzaklığıdır. Aynı bağıntıda tanımlanan d_{ft} terimi ise CFRP'nin üst ucunun kiriş basınç bölgesine uzaklığıdır.

(5.11) no'lu bağıntıdaki f_{fe} terimi,

$$f_{fe} = D_f \cdot \sigma_{f,max} \quad (5.13)$$

ifadesinden elde edilmektedir. Bağıntıdaki D_f terimi, kritik çatlakı kesen CFRP'nin gerilme dağılımını düzenleyen katsayıdır. $\sigma_{f,max}$ terimi ise kritik çatlakı kesen CFRP'nin maksimum tasarım gerilmesidir.

Kirişte göçme CFRP şeritlerin kopmasıyla gerçekleşiyorsa, D_f ,

$$D_f = \frac{1 + \zeta}{2} \quad (5.14)$$

bağıntısından elde edilir. Bağıntıdaki ζ terimi,

$$\zeta = \frac{d_{f_t}}{0,9.d + d_{f_t} + h} \quad (5.15)$$

ifadesinden elde edilmektedir. (5.13) no'lu bağıntıdaki $\sigma_{f,max}$,

$$\sigma_{f,max} = \begin{cases} 0,8.f_f / \gamma_f & f_f / E_f \leq \varepsilon_{max} \\ 0,8.\varepsilon_{max}.E_f / \gamma_f & f_f / E_f \geq \varepsilon_{max} \end{cases} \quad (5.16)$$

şeklinde elde edilmektedir. (5.16) bağıntısında,

f_f : CFRP'nin kopma dayanımı

E_f : CFRP'nin elastisite modülüdür.

(5.16) bağıntısında bulunan ε_{max} , CFRP için %1.5'dur. γ_f terimi güçlendirme malzemesinin kopmaya karşı kısmi emniyet katsayısıdır ve CFRP için 1,25'dir.

Göçme CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasıyla gerçekleşiyorsa, $\sigma_{f,max}$,

$$\sigma_{f,max} = \min\left(\frac{f_f}{\gamma_f}, \frac{0,3}{\gamma_b} \cdot \beta_w \cdot \beta_L \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \sqrt{f_c'}}\right) \quad (5.17)$$

ifadesinden elde edilir. Bağıntıda γ_h terimi, CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılmasına karşı kısmi emniyet katsayısıdır, CFRP için $\gamma_h=1,25$ 'dir. Bağıntı (5.17) de bulunan β_L terimi,

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \lambda \geq 1 \\ \sin \frac{\pi \cdot \lambda}{2} & \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (5.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. λ terimi ise,

$$\lambda = \frac{L_{\max}}{L_e} \quad (5.19)$$

ifadesinden elde edilir. (5.19) no'lu bağıntıda L_e ,

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{0,8 \cdot f_c}}} \quad (5.20)$$

ifadesinden elde edilir. Aynı bağıntıda bulunan $L_{\max}$ terimi ise,

$$L_{\max} = \begin{cases} \frac{h_{fe}}{\sin \beta} & \text{Yan yüz uygulaması} \\ \frac{h_{fe}}{2 \cdot \sin \beta} & \text{U şerit uygulaması} \end{cases} \quad (5.21)$$

şeklinde elde edilir. (5.13) no'lu bağıntıda kullanılan D_f terimi,

$$D_f = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos(\pi \cdot \lambda / 2)}{\sin(\pi \cdot \lambda / 2)} & \lambda \geq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda} & \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (5.22)$$

ifadesinden elde edilmektedir. (5.17) no'lu bağıntıda β_w ,

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f / (s_f \cdot \sin \beta)}{1 + w_f / (s_f \cdot \sin \beta)}} \quad (5.23)$$

bağıntısından elde edilir.

Bağıntılarda bulunan w_f , CFRP şerit genişliğidir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik

CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı, 2007 yılında yürürlüğe giren DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmış, çatlamamış betonun katkısına eklenerek deney elemanlarının kesme dayanımları elde edilmiştir. DBYBHY'de CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı,

$$V_f = \frac{2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot w_f \cdot E_f \cdot \epsilon_f \cdot d}{S_f} \quad (5.24)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bağıntıda;

V_f : CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı

E_f : CFRP'nin elastisite modülü

d : Elemanın faydalı yüksekliği

s_f : CFRP şeritlerin, eksenenden eksene aralıkları

ϵ_f : CFRP etkin birim uzama sınırı

n_f : CFRP sargı sayısı

t_f : CFRP şeritlerin kalınlığı

w_f : CFRP şeridin genişliğidir.

(5.24) no'lu bağıntıdaki ϵ_f ifadesi,

$$\epsilon_f \leq 0,004 \quad (5.25)$$

$$\epsilon_f \leq 0,50 \cdot \epsilon_{fu}$$

şeklinde elde edilmektedir. ϵ_{fu} ifadesi CFRP kopma birim uzamasıdır.

Deney elemanlarının DBYBHY, ACI-440 komite raporu ve Chen&Teng'in geliştirdiği deneye dayalı bağıntılar kullanılarak hesaplanan analitik kesme dayanımlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığı tablo, Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Hesaplanan kesme dayanımlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırılması

Deney Elemanı No:	ACI 440 (kN)	Chen & Teng (kN)	DBYBHY (kN)	Deneyse l (kN)	Deneysel/Hesaplanan		
					AC I 440	Chen ve Teng	DBYBHY
2	56,40	68,60	75,76	61,63	1,09	0,90	0,81
3	57,60	71,80	84,91	62,94	1,09	0,88	0,74
4	61,70	76,20	94,92	68,48	1,11	0,90	0,72
5	57,80	72,10	85,06	59,13	1,02	0,82	0,70
6	56,20	69,80	72,69	58,71	1,04	0,84	0,81
7	55,30	68,00	74,96	59,66	1,08	0,88	0,80
8	64,50	78,20	85,95	80,67	1,25	1,03	0,94
9	58,50	72,80	85,58	64,33	1,10	0,88	0,75
10	64,40	78,10	85,88	93,10	1,44	1,19	1,08
11	68,40	81,60	94,85	90,00	1,32	1,10	0,95

Ankraj uygulanmayan deney elemanları, Deney Elemanı-2, 3, 4, 5 ve 6'nın ACI-440 komite raporu ile hesaplanan analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %2-%11 aralığında değişen oranlarda küçük hesaplanmıştır. 7 ve 9 no'lu deney elemanında ankraj uygulamasına rağmen düşük yük düzeyinde gerçekleşen göçme, analitik kesme dayanımlarının test sonuçlarıyla benzerlik göstermesine neden olmuştur. Deney elemanlarının analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %8 ve %10 oranında küçük hesaplanmıştır. Analitik olarak hesaplanan kesme dayanımları ile deney sonuçları arasında en büyük fark ankraj uygulanan deney elemanları, Deney Elemanı-8, 10 ve 11'de elde edilmiştir. Ankraj uygulamasının kesme dayanımına katkısı dikkate alınmadan geliştirilen bağıntılar, analitik kesme dayanımlarının deney sonuçlarından %25-%44 oranında küçük hesaplanmasına neden olmuştur.

Ankraj uygulanmayan deney elemanları, Deney Elemanı-2, 3, 4, 5 ve 6'nın Chen&Teng'in bağıntısıyla hesaplanan analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %10-%18 oranında daha büyük hesaplanmıştır. Deney Elemanı-7 ve 9'un analitik kesme dayanımları deney sonuçlarından %12 oranında büyük hesaplanmıştır. En başarılı sonuç ankraj uygulanan deney elemanları, Deney Elemanı-8, 10 ve 11'de elde edilmiştir. Deney elemanlarının analitik kesme dayanımları, deney sonuçlarından 1,03-1,19 arasında değişen oranlarda küçük hesaplanmıştır.

Ankraj uygulanmayan deney elemanları, Deney Elemanı-2, 3, 4, 5 ve 6'nın DBYBHY'de verilen bağıntılar ile hesaplanan analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %21-%30 aralığında değişen oranlarda büyük hesaplanmıştır. 7 ve 9 no'lu deney elemanında ankraj uygulamasına rağmen düşük yük düzeyinde gerçekleşen göçme, analitik kesme dayanımlarının test sonuçlarından %20 ve %25 oranında büyük hesaplanmasına neden olmuştur. Analitik olarak hesaplanan kesme dayanımları ile deney sonuçları arasında en başarılı sonuç ankraj uygulanan deney elemanları, Deney Elemanı-8, 10 ve 11'de elde edilmiştir. Deney elemanlarının analitik kesme dayanımları, deney sonuçlarından en az %8 oranında küçük, en fazla %6 oranında büyük hesaplanmıştır.

5.3 Deney Elemanlarının ANSYS-Sonlu Elemanlar Programıyla Doğrusal Olmayan Bilgisayar Modellerinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz, betonarme elemanların davranışlarının tahmin edilmesinde başarılı bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak geliştirilen programlar içerisinde ANSYS–Sonlu Elemanlar Programı, malzeme tanımlanmasındaki başarısından dolayı literatürde tercih edilmektedir (Barbosa ve Ribeiro, 1998; Ashour ve Morley, 1993).

Betonarme elemanlarını oluşturan malzemelerden donatı, homojen ve izotropik bir malzemedir. Beton ise agrega, çimento, kum ve katkılardan oluşan heterojen ve anizotropik bir malzemedir (Ersoy ve Özcebe, 2001). Farklı özelliklere sahip beton ve donatının yük altındaki farklı davranışları, betonarme elemanlarda doğrusal olmayan davranışa neden olan faktörlerdendir. Bu nedenle literatürde, Beton ve çeliğin çekme ve basınç kuvvetleri altındaki davranışlarını gerçekçi yansıtan malzeme modelleri geliştirilmiştir.

Çalışmada doğrusal olmayan analiz için yapılan yaklaşım ve varsayımlar aşağıdaki gibidir (Thomas ve Ramaswamy, 2006; Santhakumar ve Chandrasekaran, 2006):

- Epoksinin çekme ve basınç kuvvetleri altında benzer davranış sergilediği kabul edilmiştir.
- Beton ile donatı arasında tam bağ kurulduğu kabul edilmiş, bu nedenle beton ve donatı arasında yeni bir eleman, yay tanımlanmamıştır.
- Beton ve donatının malzeme modelleri ve rijitlikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır.
- Donatı sadece eksenel yük taşıyacak şekilde modellenmiştir.
- Epoksinin sahip olduğu yüksek kayma dayanımı nedeni ile beton ile CFRP arasında tam bağ kurulduğu kabul edilmiş, beton ve CFRP arasında yeni bir eleman, yay tanımlanmamıştır.

Malzeme özelliklerinin ANSYS-Sonlu Elemanlar Programında tanıtılması

ANSYS-Sonlu Elemanlar Programında beton, çekmede çatlayan, basınçta ezilen ve plastik deformasyon yapabilen Solid65 katı modeli kullanılarak tanımlanmıştır (Fanning, 2001). Modelde, betonun lineer davranışı için elastisite modülü (E_c) ve poisson oranı (ν), plastik davranışı için Hognestad modeline uygun gerilme-şekil değiştirme eğrisi tanımlanmıştır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Betonda göçme (William ve Warnke, 1974) modeli ile belirlenmiş, çatlak kesme transfer katsayısı (β_t), kapalı çatlak kesme transfer katsayısı (β_c), tek eksenli çekme dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı (f_c), iki eksenli basınç dayanımı, hidrostatik gerilme durumu, ambient hidrostatik gerilme durumu altında iki eksenli basınç dayanımı, ambient hidrostatik gerilme durumu altında tek eksenli basınç dayanımı ve çatlamış durum için rijitlik çarpanı parametreleri kullanılarak tanımlanmıştır.

William&Warnke modelini tanımlayan parametreler, betonun göçme sırasındaki davranışını belirleyecek şekilde özenle seçilmiştir. Çatlak yüzeyleri arasında kesme kuvveti transferi, kesme transfer katsayısı yardımıyla belirlenmektedir. Kesme transfer katsayısı 0,0-1,00 aralığında tanımlanmaktadır. Katsayı 0,0 seçildiğinde çatlağın düzgün yüzeyli bir çatlak olduğu ve yüzeyler arasında kesme kuvveti transferinin gerçekleşmediği kabul edilmektedir. Katsayı 1,0 seçildiğinde çatlağın pürüzlü olduğu ve kesme kuvveti transferi sırasında kayıp olmadığı kabul edilmektedir. Yüzeyler arasında kuvvet transferi olmaması yakınsama hatalarına neden olacağından çalışmada kesme kuvveti transfer katsayısı 1,0 seçilmiştir (Yavuzer, 2005).

Betonun tek eksenli çekme dayanımı (5.26) no'lu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_t = 0,35\sqrt{f_c} \quad (5.26)$$

Deney elemanlarının tek eksenli basınç dayanımları, betonun karakteristik basınç dayanımı kullanılarak elde edilmiştir. Analitik çözümde yakınsama hatalarını engelleyebilmek için betonun ezilmesi ihmal edilmiştir. Betonda gerçekleşecek ezilmeyi ihmal edebilmek için, betonun tek eksenli basınç dayanımı analiz sırasında -1,0 tanımlanmıştır (Fanning, 2001).

İki eksenli basınç dayanımı, hidrostatik gerilme ve hidrostatik gerilmeye bağlı iki eksenli basınç dayanımı ve hidrostatik gerilmeye bağlı tek eksenli basınç dayanımları program tarafından otomatik seçilmektedir. Analiz sırasında parametrelerin otomatik belirlenmesi için, parametreler programda 0,0 atanmıştır (Yavuzer, 2005).

Donatı, tek eksenli basınç ve çekme elemanı olan Link 8 elemanı kullanılarak tanımlanmıştır. Link 8, yorulma, sünme, burkulma ve plastik deformasyon yapabilen 3 boyutlu çubuk elemanıdır (Fanning, 2001). Donatının elastik davranışı elastisite modülü ve poisson oranı, plastik davranışı ise donatının akma dayanımı (f_y) ve pekleşme bölgesinin eğimi kullanılarak tanımlanmıştır.

CFRP göçme noktasına kadar doğrusal davranış gösteren, her doğrultuda farklı özelliğe sahip gevrek bir malzemedir. CFRP'nin sahip olduğu özellikleri tanımlamak için Solid 46 katı modeli kullanılmıştır (Kachlakev ve diğer., 2001; Chandrasekaran ve diğer, 2006). Katı model, 250 farklı katmana sahiptir ve her katmanda o katmanın özelliğini tanımlanmaktadır. Katmanların poisson oranı, elastisite modülü ve kayma dayanımı ile malzemenin kopma dayanımı ve her katmanının kalınlığını da tanımlanmaktadır. Doğrusal olmayan analizde kullanılan malzeme özelliklerine örnek olması için seçilen deney elemanı, Deney Elemanı-2'nin malzeme özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir. Solid 65, Solid 46 ve Link 8 elemanlarının geometrisi ve yerleşim düzeni Ek-B'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Deney Elemanı-2'nin malzeme özellikleri

Malzeme No.	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri			
1	Solid 65	Lineer İzotropik Pekleşmeli			
		Ex(Mpa)		2,75+E4	
		PRXY		0,30	
		Multilineer İzotropik Pekleşmeli			
		1.Nokta		0,0003	7,75
		2.Nokta		0,0008	18,31
		3.Nokta		0,0010	21,71
		4.Nokta		0,0013	25,94
		5.Nokta		0,0017	29,93
		6.Nokta		0,0023	32,40
		7.Nokta		0,0032	27,54
		Beton			
		Shrcf-Op		1	
		Shrcf-CI		1	
		UnTensSt(Mpa)		1,99	
		UnCompSt(Mpa)		-1	
		BiCompSt		0	
		HydroPrs		0	
		BiCompSt		0	
		UnTensSt		0	
		TenCrFac		0	
2	Link 8	Lineer İzotropik			
		EX(Mpa)		2,1E5	
		Bilinear İzotropik Pekleşmeli			
		Fy(Mpa)		414	
		Tan.Mod.		0	
3	Solid 46	CFRP			
			xy	xz	yz
		E(MPa)	62000	4800	4800
		v	0,22	0,22	0,30
		G(MPa)	3270	3270	1860
		TenSt(MPa)	958	599	99,97
		Katman (mm)	0,12		

Hognestad beton modeli,

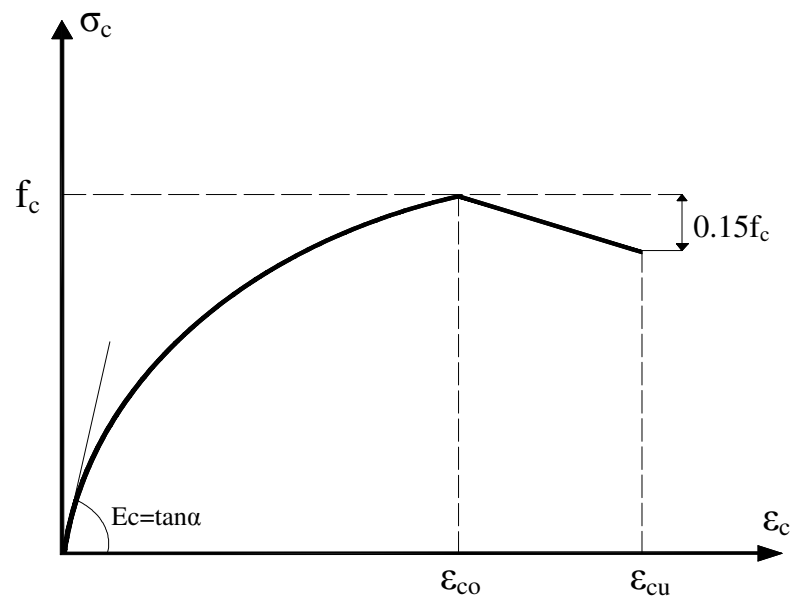
Betonun plastik davranışı, Hognestad beton modeli ve modele uygun gerilme-şekil değiştirme eğrisi kullanılarak tanımlanmıştır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Gerilme-şekil değiştirme eğrisi, tepe noktasına kadar ikinci derece parabol, tepe noktası aşıldıktan sonra doğrusaldır. Eğrinin tepe noktasına kadar olan parabolün denklemi,

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2 \cdot \epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (5.27)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Eğrinin tepe noktasında maksimum gerilme düzeyine karşılık gelen birim deformasyon değeri,

$$\epsilon_{co} = \frac{2 \cdot f_c}{E_c} \quad (5.28)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Modelde, maksimum gerilme beton karakteristik basınç dayanımının %85'i olarak belirlenmektedir. Hognestad beton modeline uygun tipik σ - ϵ eğrisi Şekil 5.1'de verilmiştir.

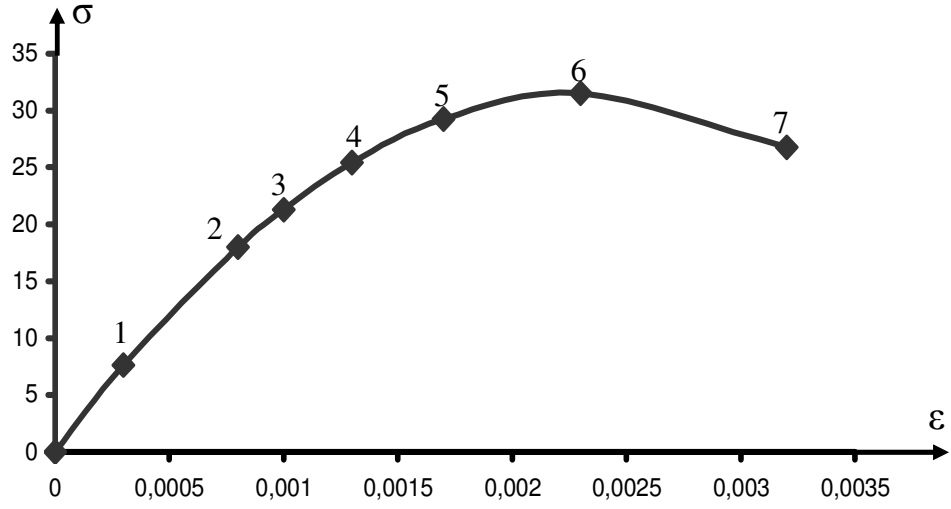


Şekil 5.1 Hognestad beton modeline uygun tipik σ - ϵ eğrisi

Modelde betonun elastisite modülü,

$$E_c = 12680 + 460.f_c \quad (5.29)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Hognestad beton modelinde kullanılan σ - ϵ eğrilerine örnek olması için seçilen deney elemanı, Deney Elemanı-2'nin (5.27) ve (5.28) no'lu bağıntılar kullanılarak çizilen σ - ϵ eğrisi Şekil 5.2'de sunulmuştur.

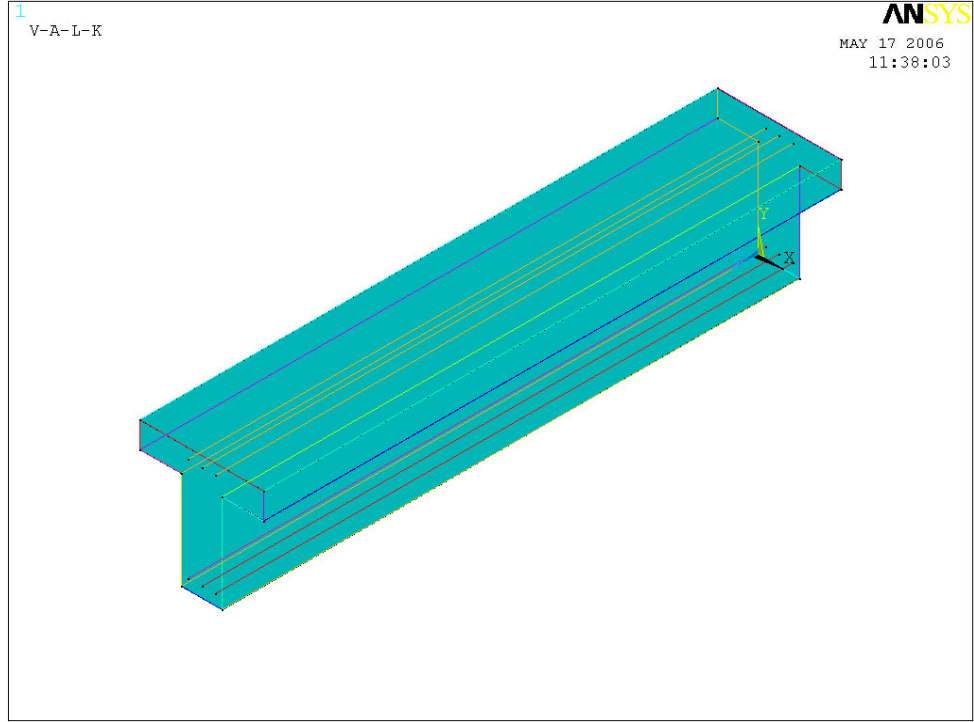


Şekil 5.2 Hognestad beton modeline uygun σ - ϵ eğrisi, Deney Elemanı-2

Tüm deney elemanları için Hognestad beton modeline uygun gerilme-şekil değiştirme eğrileri, (5.27) ve (5.28) no'lu bağıntılar kullanılarak elde edilmiştir.

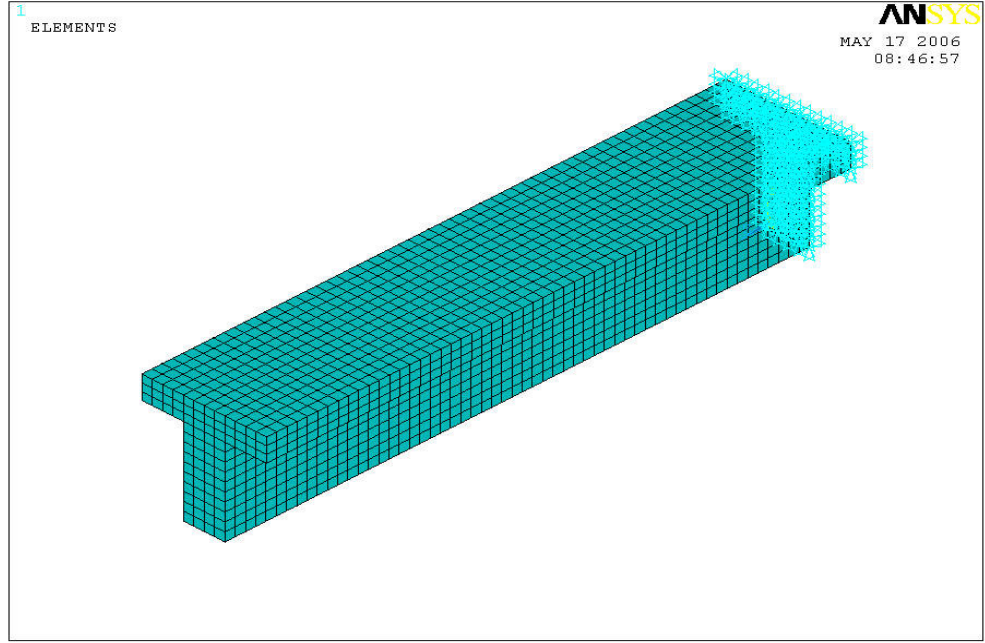
Betonarme elemanların modellerinin kurulması ve analizi

Malzeme özellikleri tanımlanan betonarme deney elemanlarında donatı, betondan ayrıık çubuk eleman olarak tanımlanmıştır (Fanning, 2001). Donatı ve beton birbirlerine düğüm noktalarından bağlanmış, böylece donatı ve beton aynı düğüm noktalarını ve sınır koşullarına paylaşmıştır. Analiz için modellenen tipik betonarme kiriş, Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 Tipik betonarme kirişin beton ve donatı şeması

Analiz sonucunun yakınsaması için elemanlar yakınsamaya olanak sağlayacak şekilde küçük parçalara (meshing) bölünmelidir. Çalışmada modellenen betonarme elemanlar bu ilke dikkate alınarak küçük parçalara bölünmüştür. Tabla ile kiriş gövdesinin birleşim yüzeyindeki gerilme yoğunluğu dikkate alınarak, bu bölgedeki eleman sayısı arttırılmıştır. Küçük parçalara bölünmüş tipik betonarme kiriş, Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4 Küçük parçalara bölünmüş tipik betonarme kiriş

Deney elemanları, deneysel çalışmayla özdeş yüklenmiştir. Doğrusal olmayan modellerin çözümünde Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır (Tavarez, 2001; Fanning, 2001; Zhao ve diğer., 2004). Newton-Raphson yöntemi, her yük artışı için sistemin rijitlik matrisini doğrusal olmayan davranışı da dikkate alarak oluşturan doğrusal bir iterasyon yöntemidir. Çözüme başlamadan önce yöntem, denge dışı yük vektörünü belirler. Belirlenen denge dışı yük vektörü ile Newton-Raphson iterasyon sonucunun hangi oranda yakınsadığı program tarafından kontrol edilir. Yakınsama istenilen seviyede değilse denge dışı yük vektörü ve rijitlik matrisi tekrar oluşturulur ve sistem baştan çözülür. Doğrusal iterasyon, sonuç yakınsayınca kadar tekrarlanır.

5.4 Deney Sonuçlarının ANSYS-Sonlu Elemanlar Programı Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Bu bölümde deney elemanlarının ANSYS-Sonlu Elemanlar Programından elde edilen zarf eğrileri, deney sonuçlarından elde edilen zarf eğrileri ile karşılaştırılmış, sonuçlar yorumlanmıştır. Tablo 5.4’de deney elemanlarının analitik kesme dayanımları ve başlangıç rijitlikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur.

Tablo 5.4 Deney sonuçlarının doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

Deney Elemanı No:	Dayanım			Başlangıç Rijitliği		
	Deneysel (kN)	Analitik (kN)	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Analitik}}$	Deneysel (kN/mm)	Analitik (kN/mm)	$\frac{\text{Deneysel}}{\text{Analitik}}$
1	39,52	41,90	0,94	4,47	4,90	0,91
2	61,63	78,75	0,78	5,02	5,12	0,98
3	62,94	82,68	0,76	5,18	5,26	0,98
4	68,48	86,82	0,79	5,47	5,34	1,02
5	59,13	80,65	0,73	4,86	5,20	0,93
6	60,01	79,27	0,76	4,82	5,14	0,94
7	60,00	81,32	0,74	4,98	5,18	0,96
8	80,67	85,51	0,94	5,61	5,31	1,06
9	64,33	82,48	0,78	5,30	5,17	1,03
10	93,10	87,31	1,07	5,77	5,33	1,08
11	90,00	87,90	1,02	5,87	5,39	1,09

Deney elemanlarının analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından en az %7 oranında küçük, en fazla %37 oranında büyük hesaplanmıştır. Analitik ve deneysel sonuçlar arasında en büyük fark Deney Elemanı-5’dedir. Kiriş tablasının gövdeden düşük yük düzeyinde ayrılmasıyla gerçekleşen göçme, deney elemanının dayanımının analitik çözümünden %27 oranında küçük elde edilmesine neden olmuştur. Deney elemanlarının test sonuçlarından elde edilen başlangıç rijitlikleri ile analitik çözümünden elde edilen başlangıç rijitlikleri benzerlik göstermiştir. Deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri, test sonuçlarından 0,91-1,09 kat aralığında değişen oranlarda farklı hesaplanmıştır.

Deney elemanlarının doğrusal olmayan çözümleri sonucunda elde edilen maksimum birim deformasyon değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış, Tablo 5.5’de sunulmuştur.

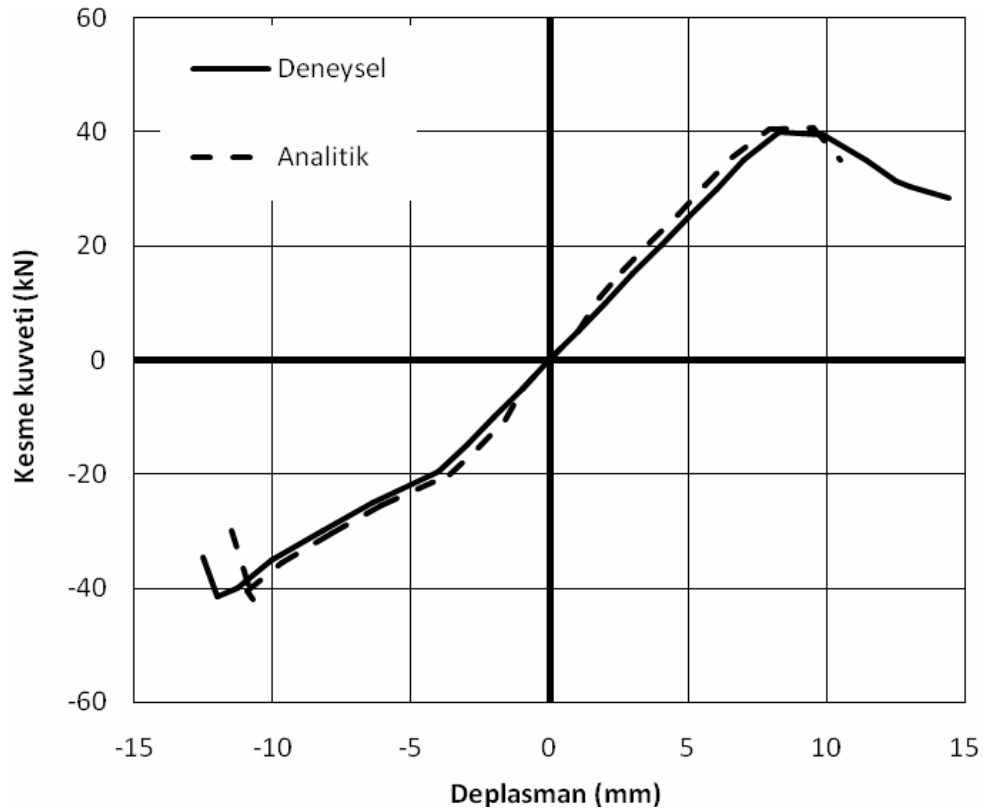
Tablo 5.5 Deney sonuçlarının doğrusal olmayan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

Deney Elemanı No:	Maksimum Birim Deformasyon Ölçülen CFRP Şerit No	Maksimum Birim Deformasyon		
		DeneySEL (mm/mm)	Analitik (mm/mm)	$\frac{\text{DeneySEL}}{\text{Analitik}}$
2	2.Şerit	0,0020	0,0051	0,39
3	8.Şerit	0,0031	0,0057	0,54
4	5.Şerit	0,0035	0,0059	0,59
5	6.Şerit	0,0024	0,0052	0,46
6	5.Şerit	0,0016	0,0049	0,33
7	4.Şerit	0,0053	0,0051	1,04
8	7.Şerit	0,0059	0,0056	1,05
9	2.Şerit	0,0048	0,0052	0,92
10	3.Şerit	0,0048	0,0057	0,84
11	1.Şerit	0,0064	0,0059	1,08

CFRP ile beton arasında tam bağ kurulduğu kabulüne dayanan analitik çözümlerde göçme, kirişin eğilme kapasitesine ulaşmasıyla ya da kiriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile gerçekleşmiştir. Ankraj uygulanmayan deney elemanları test sırasında, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden veya kiriş tablasının kiriş gövdesinden ayrılmasıyla göçmüştür. Test ve analitik çözümdeki farklı göçme şekilleri, deney elemanlarının birim deformasyon davranışlarını değiştirmiştir. Ankraj uygulanmayan deney elemanları, Deney Elemanı-2, 3, 4, 5 ve 6’nın analitik birim deformasyon değerleri, test sonuçlarından %41-%67 aralığında değişen oranlarda büyük hesaplanmıştır. Ankraj uygulanan elemanların test sırasında ölçülen birim deformasyon değerleri ile analitik çözümden elde edilen birim deformasyon değerleri benzerlik göstermiştir. Deney elemanlarının analitik birim deformasyon değerleri ile deney sonuçları arasında 0,84-1,08 kat aralığında değişen oranda fark vardır.

Deney Elemanı-1

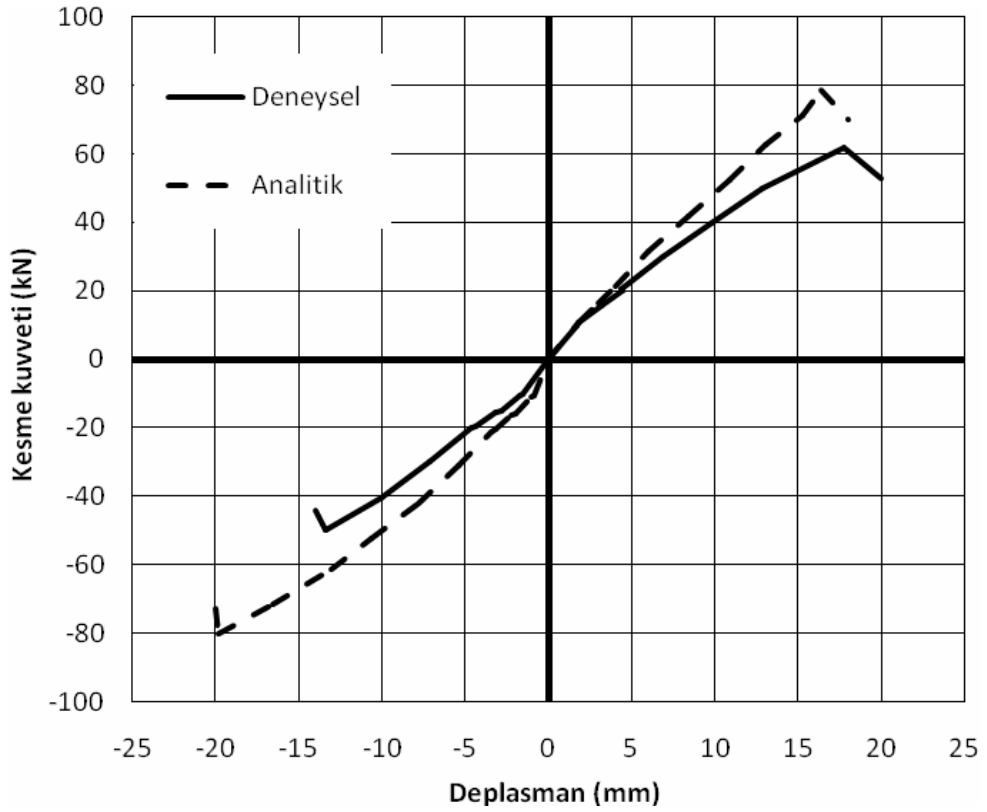
Deney elemanının hesaplanan kesme dayanımı, deney elemanının dayanımından %6 oranında daha büyüktür. Analitik başlangıç rijitliği, testten elde edilen başlangıç rijitliğinden %9 oranında büyük hesaplanmıştır. ANSYS-Sonlu Elemanlar Programıyla homojen bir malzeme olarak tanımlanan beton, heterojen bir malzemedir. Ayrıca doğrusal olmayan bilgisayar modelinde kırışlerde gelişebilecek rötre çatlakları tanımlanmamıştır. Bu nedenle analitik çözümlerde deney elemanları, test sonuçlarından daha rijit davranmıştır. Deney elemanının zarf eğrisi, doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edilen zarf eğrisi ile birlikte Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-1

Deney Elemanı-2

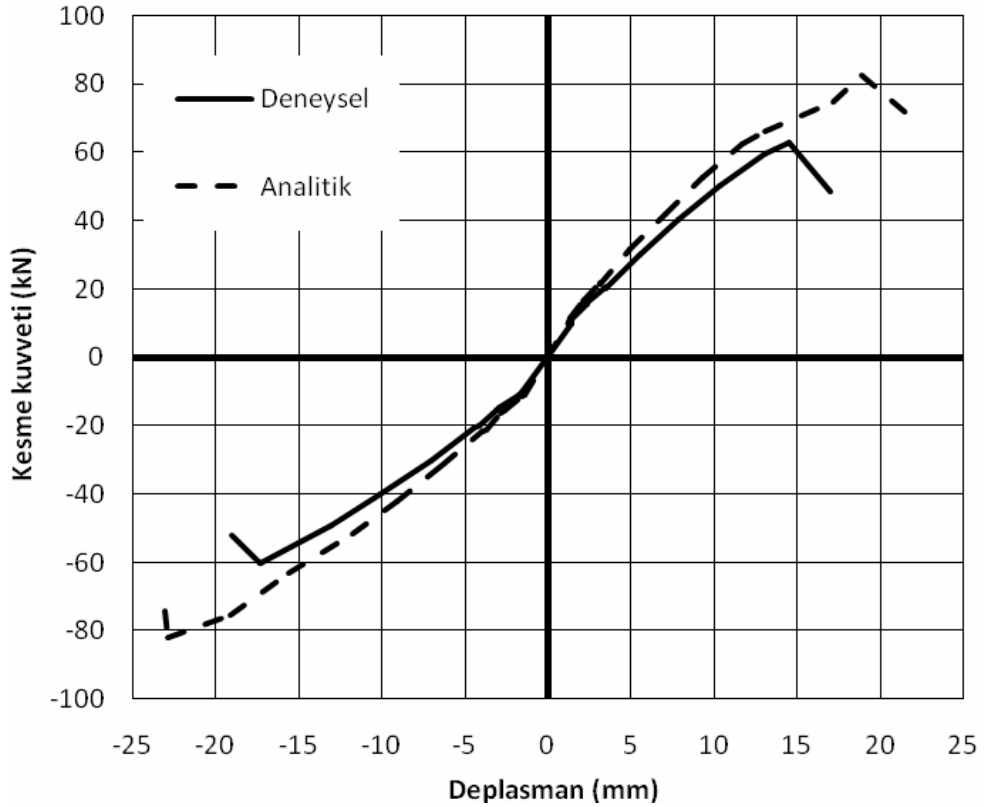
Deney elemanının doğrusal olmayan analizi sonucunda elde edilen kesme dayanımı, testten elde edilen kesme dayanımından %22, başlangıç rijitliği ise %2 oranında büyük hesaplanmıştır. Test sırasında deney elemanı, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması nedeni ile göçmüştür. Doğrusal olmayan bilgisayar modelinde göçme, kiriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile gerçekleşmiştir. Elemanların farklı göçme şekilleri birim deformasyon davranışlarını da etkilemiştir. Doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edilen maksimum birim deformasyon, test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyon değerinden %61 oranında daha büyüktür.



Şekil 5.6 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-2

Deney Elemanı-3

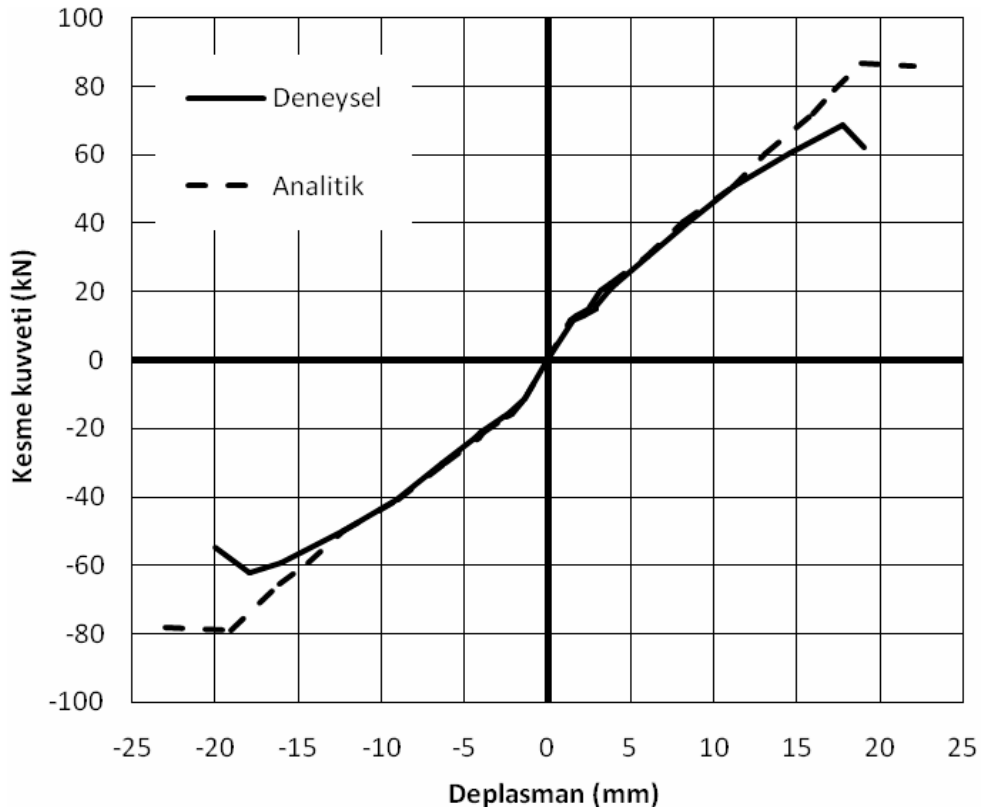
Doğrusal olmayan analiz sonucunda deney elemanının kesme dayanımı ve başlangıç rijitliği, deney sonuçlarından sırasıyla %24 ve %2 oranında büyük hesaplanmıştır. Analitik olarak elde edilen zarf eğrisi 20 kN yük düzeyine kadar test sonucuyla benzerlik göstermiştir. Test sırasında CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması nedeni ile göçen deney elemanı doğrusal olmayan bilgisayar modelinde, giriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile göçmüştür. Farklı göçme şekilleri deney elemanlarının birim deformasyon davranışlarında da farklılığa neden olmuştur. Analitik çözümde maksimum 0,0057 mm/mm birim deformasyon elde edilirken, test sırasında analitik çözümde %46 oranında küçük birim deformasyon ölçülmüştür.



Şekil 5.7 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-3

Deney Elemanı-4

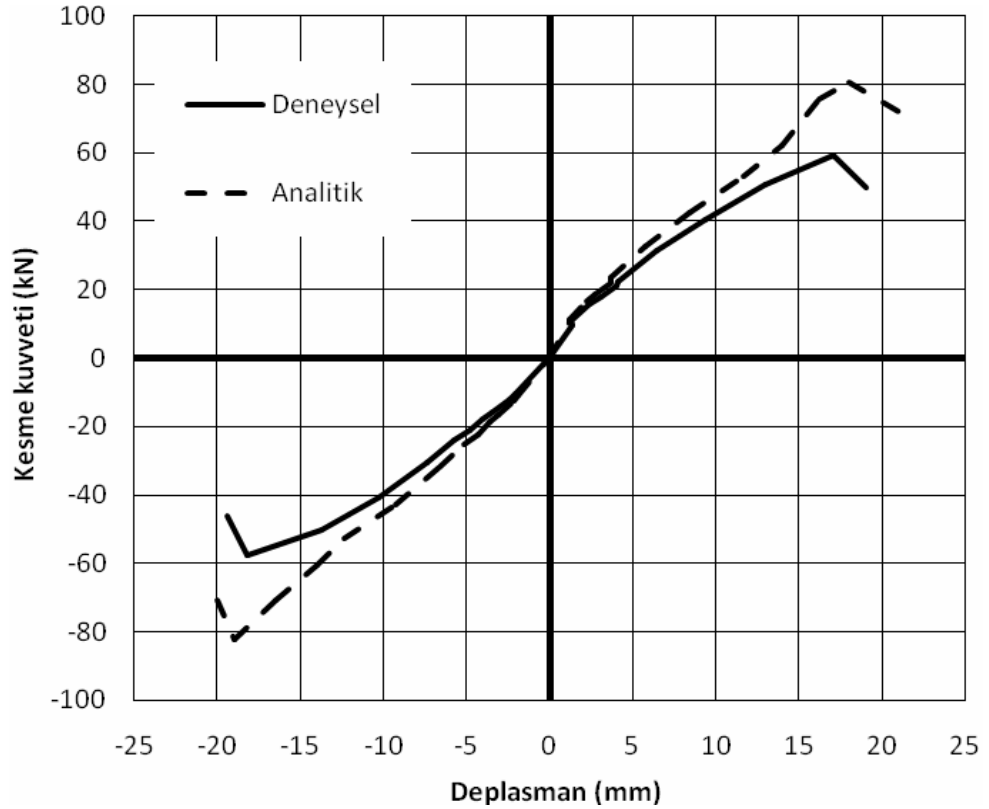
Deney elemanının zarf eğrisi doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edilen zarf eğrisiyle birlikte Şekil 5.8’de verilmiştir. Elemanın analitik kesme dayanımı, testten elde edilen kesme dayanımından %21 oranında daha büyük hesaplanmıştır. Deney elemanın analitik başlangıç rijitliği ise %2 oranında küçük hesaplanmıştır. 50 kN yük düzeyine kadar analitik çözümden ve deneyden elde edilen zarf eğrileri benzerlik göstermiştir. Bu yük düzeyinden sonra analitik çözümde deney elemanı daha rijit davranmıştır. Analitik çalışmadan elde edilen maksimum birim deformasyon değeri, testten elde edilen maksimum birim deformasyon değerinden %41 oranında büyüktür. Deney elemanı analitik çözümde eğilme kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 5.8 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-4

Deney Elemanı-5

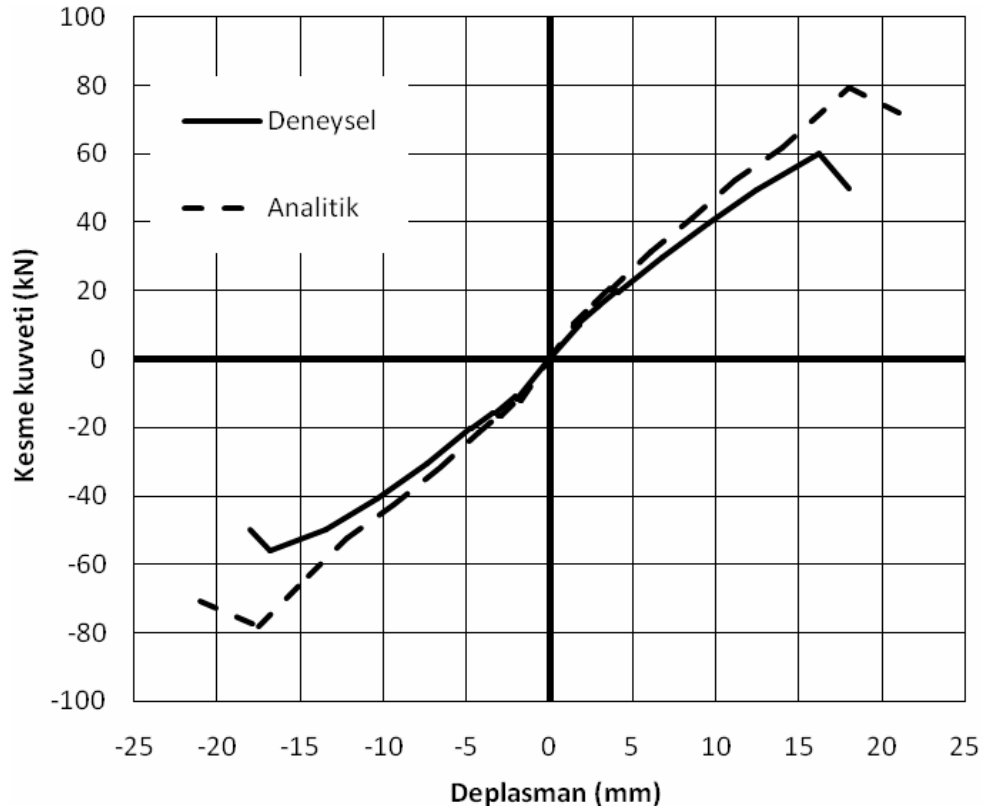
Deney elemanının analitik zarf eğrisi ve testten elde edilen zarf eğrisi Şekil 5.9'da sunulmuştur. Deney elemanının doğrusal olmayan bilgisayar modelinden elde edilen kesme dayanımı, test sonuçlarından %27 oranında daha büyük hesaplanmıştır. Analitik çözümden elde edilen başlangıç rijitliği ise %7 oranında büyüktür. Test sırasında kiriş tablasının gövdeden ayrılmasıyla göçen deney elemanı doğrusal olmayan bilgisayar modelinde, kiriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile göçmüştür. Analitik çalışmada elde edilen maksimum birim deformasyon, testte ölçülen maksimum birim deformasyon değerinden %54 oranında büyüktür.



Şekil 5.9 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-5

Deney Elemanı-6

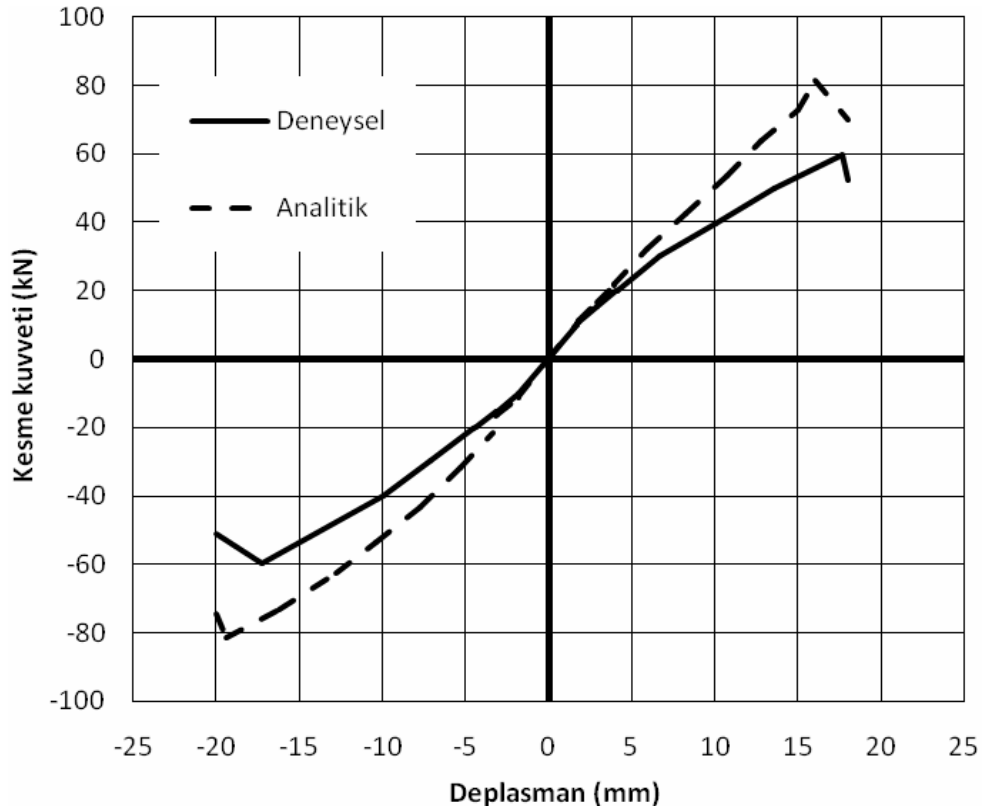
Deney elemanının zarf eğrisi, doğrusal olmayan analizden elde edilen zarf eğrisi ile birlikte Şekil 5.10'da sunulmuştur. Deney elemanının doğrusal olmayan analizi sonucunda elde edilen dayanım ve başlangıç rijitliği, test sonuçlarından sırasıyla %24 ve %6 oranında büyük hesaplanmıştır. Deney elemanı test sırasında, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması nedeni ile göçmüştür. Doğrusal olmayan bilgisayar modelinde göçme, kiriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile gerçekleşmiştir. Test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyon, analitik çalışmadan elde edilen birim deformasyon değerinden %67 oranında küçüktür.



Şekil 5.10 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-6

Deney Elemanı-7

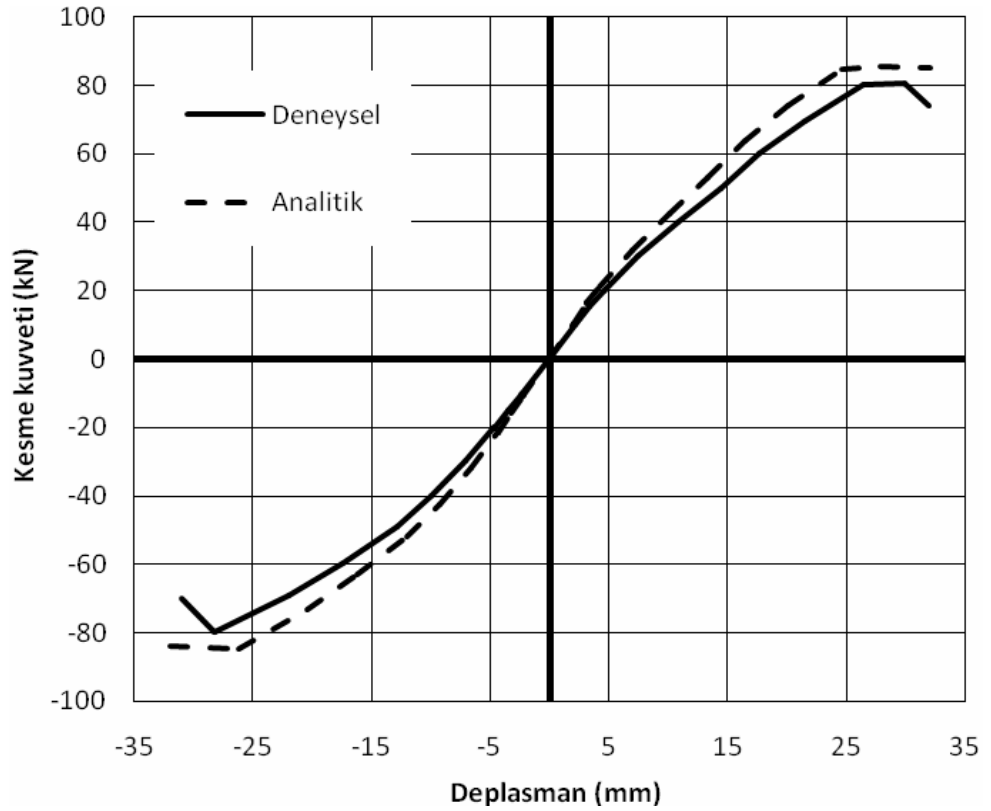
Deney Elemanı-7, beton pas payından donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla göçmüştür. Doğrusal olmayan bilgisayar modelinde göçme, kiriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile gerçekleşmiştir. Deney elemanının kesme dayanımı, analitik kesme dayanımından %26 oranında küçük elde edilmiştir. Deney elemanın analitik başlangıç rijitliği ise test sonucundan %4 oranında büyük hesaplanmıştır. Analitik ve deneysel çalışmada farklı göçme şekillerine sahip deney elemanlarının birim deformasyon davranışları benzerdir. Analitik çalışmada elde edilen maksimum birim deformasyon, test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyon değerinden %4 oranında küçüktür.



Şekil 5.11 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-7

Deney Elemanı-8

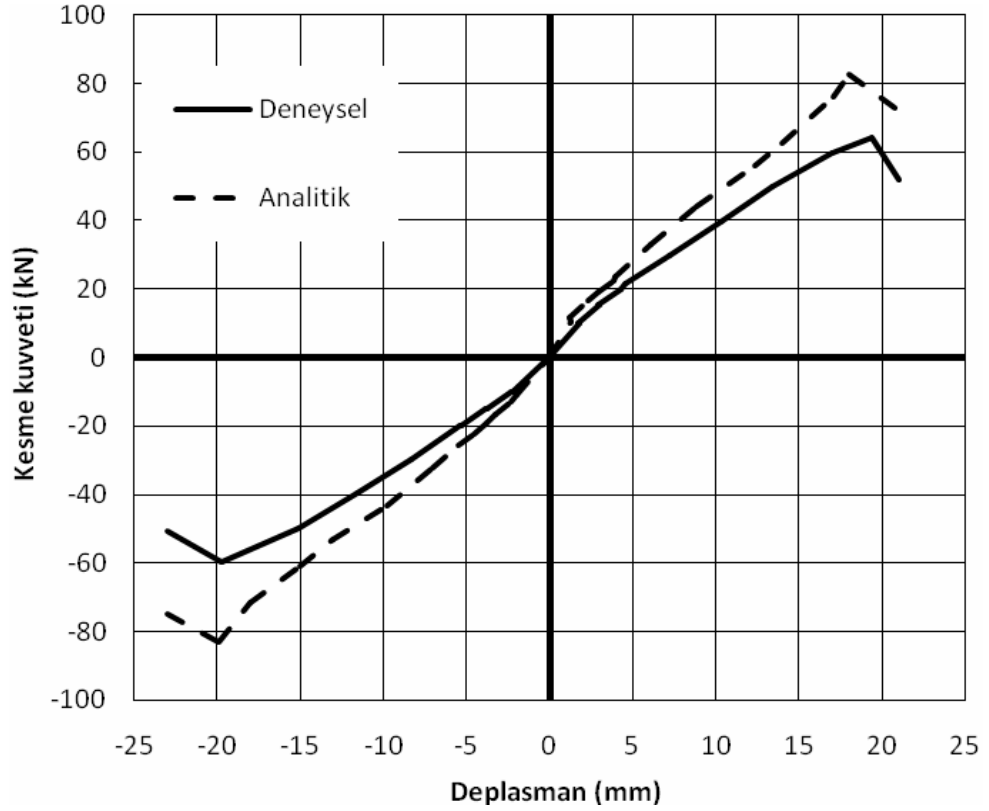
Deney elemanının analizinden elde edilen zarf eğrisi ve testten elde edilen zarf eğrisi Şekil 5.12’de sunulmuştur. Deney elemanının doğrusal olmayan analizinden elde edilen kesme dayanımı ve başlangıç rijitliği, teste göre sırasıyla %6 oranında büyük, %6 oranında küçük hesaplanmıştır. Analitik çalışmadan elde edilen maksimum birim deformasyon, test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyondan %5 oranında küçük elde edilmiştir. Test sırasında CFRP şeritlerin kopması nedeni ile göçen deney elemanı, doğrusal olmayan bilgisayar modelinde eğilme kapasitesine ulaşmıştır.



Şekil 5.12 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-8

Deney Elemanı-9

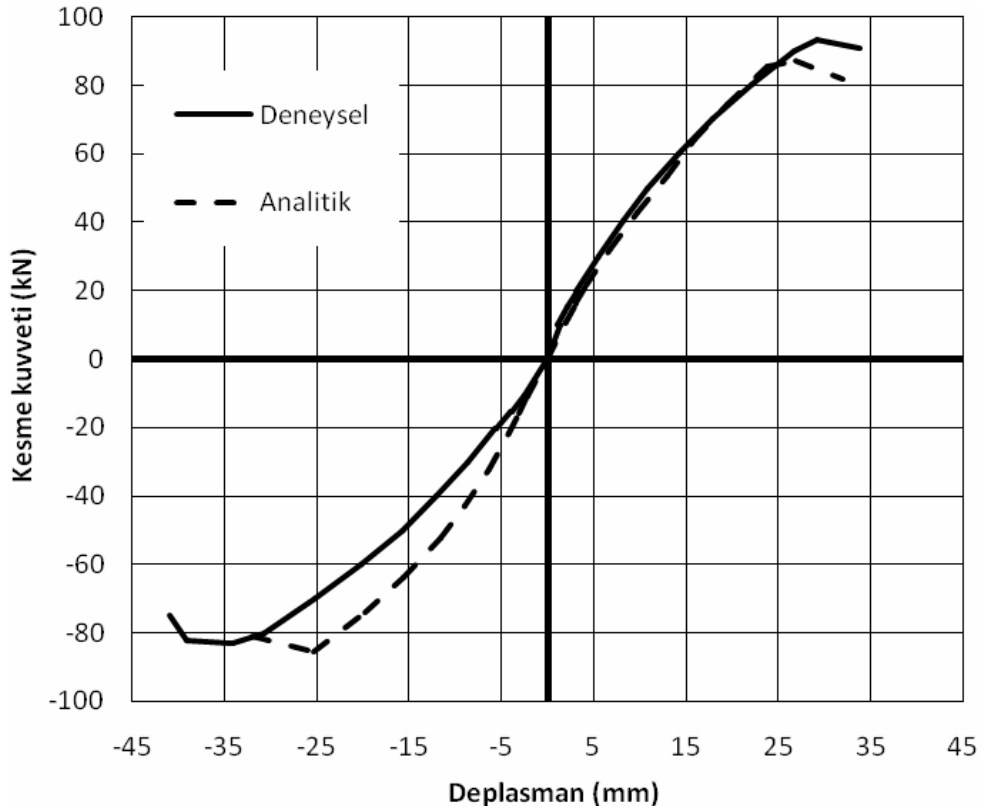
Analitik çözümde kiriş gövdesinde gelişen çok sayıda eğik çatlak nedeni ile gerçekleşen göçme, test sırasında beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. Deney elemanının doğrusal olmayan analizinden hesaplanan kesme dayanımı, test sonucundan %22 oranında büyük elde edilmiştir. Deney elemanının analitik başlangıç rijitliği test sonucundan %3 oranında küçük hesaplanmıştır. Deney elemanının analitik birim deformasyon değeri, testten ölçülen birim deformasyon değerinden %8 oranında büyük hesaplanmıştır.



Şekil 5.13 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-9

Deney Elemanı-10

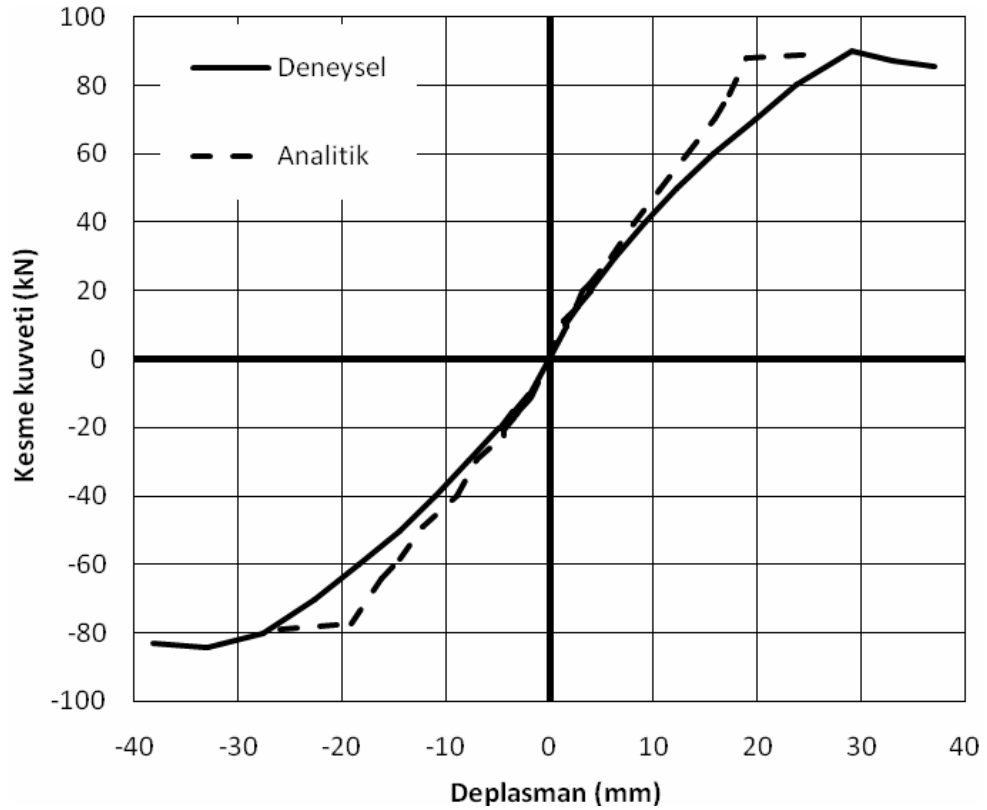
Elemanın analitik kesme dayanımı, testten elde edilen kesme dayanımından %7, analitik başlangıç rijitliği de %8 oranında küçük hesaplanmıştır. Deney sırasında CFRP şeritlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerler okuyabilecekleri maksimum birim deformasyon değerinden fazla birim deformasyona maruz kalarak ölçüm yapamamıştır. Bu nedenle deneysel ve analitik birim deformasyon değerleri birbirlerinden farklıdır. Deney elemanının maksimum analitik birim deformasyon değeri 0,0057 mm/mm'dir. Test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyon, analitik birim deformasyon değerinden %16 oranında küçüktür.



Şekil 5.14 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-10

Deney Elemanı-11

Deney elemanının zarf eğrisi, doğrusal olmayan bilgisayar modelinden elde edilen zarf eğrisi ile birlikte Şekil 5.15’de sunulmuştur. 40 kN yük düzeyine kadar analitik çözümünden ve testten elde edilen zarf eğrileri benzerlik göstermiştir. Bu yük seviyesinden sonra analitik çözümde deney elemanı daha rijit davranmıştır. Deney elemanının doğrusal olmayan analizinde hesaplanan dayanım ve başlangıç rijitliği, test sonuçlarından sırasıyla %2 ve %9 oranında küçük elde edilmiştir. Deney elemanının test sırasında ölçülen maksimum birim deformasyon değeri analitik çalışmadan elde edilen maksimum birim deformasyon değerinden %8 oranında büyüktür.



Şekil 5.15 Zarf eğrileri, Deney Elemanı-11

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Deprem kuvvetleri altında gerekli dayanım, rijitlik ve süneklik koşullarını sağlayamayan betonarme yapılar çeşitli yöntemlerle güçlendirilmektedir. Bu yöntemlerden CFRP uygulamaları, sahip olduğu avantajlardan dolayı, betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde son yıllarda tercih edilmektedir.

Yapılan tez çalışmasında CFRP şeritlerin betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısı araştırılmıştır. Araştırmada üç değişken incelenmiştir. Bu değişkenler CFRP şeritlerin yerleşim düzeni, CFRP şeritlerin uygulama şekli ve ankraj uygulamasıdır.

Deneysel çalışma kapsamında 3/5 geometrik ölçekli T-kesitli betonarme konsol kiriş kullanılmıştır. CFRP'nin kesme donatısı olarak etkinliğini belirlemek için deney elemanlarında kesme donatısı kullanılmamış, kesme çatlağı gelişimlerinin sadece CFRP şeritler tarafından karşılanması hedeflenmiştir. 11 adet deney elemanı tersinir tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Deney programında 1 adet deney elemanı kontrol amaçlı üretilmiştir. Diğer deney elemanları farklı düzende CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Deney sonuçları deneysel değişkenler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Araştırmacıların önerdiği ve yönetmelik denklemleri kullanılarak deney elemanlarının kesme dayanımları hesaplanmış ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca ANSYS Sonlu Elemanlar Programının onuncu sürümü kullanılarak deney elemanlarının doğrusal olmayan analizleri yapılmış, doğrusal olmayan analiz sonucunda elde edilen zarf eğrileri ve birim deformasyon değerleri, test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

6.1 Sonuçlar

Deneyssel çalışmada test edilen 11 adet deney elemanından elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Betonarme kirişlerin yan yüzlerini tamamen kaplamayan CFRP şerit uygulaması, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için etkili bir yöntemdir. CFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarının kesme dayanımı referans elemanına göre 1,49-2,36 kat aralığında değişen oranlarda artmıştır. Başlangıç rijitliği de referans deney elemanına göre 1,07-1,31 kat aralığında değişen oranlarda artmıştır.
- 50 mm şerit genişliğinin iki katına çıkartılması, deney elemanlarının kesme dayanımında 1,11-1,14 kat aralığında değişen oranlarda artış sağlamıştır. CFRP şerit genişliğinin artması deney elemanlarının başlangıç rijitliklerini 1,02-1,08 kat artırmıştır. Göçme gerçekleşinceye kadar gövdede gelişen çok sayıda çatlak, deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki rijitliklerini referans elemana göre azaltmıştır.
- 60 mm şerit aralığının yarıya indirilmesi ile düşük yük düzeyinde gövdede gelişen çatlakların sayısı ve genişliği azalmış, deney elemanlarının kesme dayanımları 1,03-1,24 aralığında değişen oranlarda artmıştır. Dayanımı artan deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri 1,04-1,14 kat arasında değişen oranlarda artmış, maksimum yük düzeyindeki rijitlikleri ise azalmıştır.
- CFRP şeritlerin uygulama şekli, betonarme kirişlerin dayanım ve davranışını önemli oranda etkilemiştir.  biçimli şeritlerle güçlendirilen 10 no’lu deney elemanı, U biçimli CFRP şeritlerle güçlendirilen 8 no’lu deney elemanından %31 daha fazla dayanıma sahiptir. Uygulama şeklindeki değişimle dayanımın artması başlangıç rijitliğini 1,03 kat artırmış, daha yüksek dayanıma ulaşmasına rağmen gövdede gelişen çatlaklar maksimum yük düzeyindeki rijitlikliğini %3 oranında azaltmıştır.

- Ankraj uygulanmayan düz şerit uygulamalarında göçme, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden veya kiriş tablasının kiriş gövdesinden ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. Ankraj uygulanmayan U biçimli şerit uygulamasında deney elemanı, düz şerit uygulanan deney elemanlarıyla benzer şekilde göçmüştür.
- CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılması dayanımı olumsuz etkilemiştir. Çalışmada, CFRP şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını engellemek veya geciktirmek için CFRP şeritlerin 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 şeritlerin beton yüzeyinden ayrılmasını engellemiştir. Kiriş gövdesinin tablayla birleştiği kesitte uygulanan ankraj, tablayı kiriş gövdesi ile ilişkilendirmiştir.
- Ankraj uygulanan Deney Elemanı-8, ankraj uygulanmayan Deney Elemanı-6'dan %52 daha fazla dayanıma sahiptir. Ankraj uygulanan elemanın dayanımının artması başlangıç rijitliğini 1,19 kat artırmış, daha yüksek dayanıma ulaşmasına rağmen gövdede gelişen çatlaklar, maksimum yük düzeyindeki rijitlikliğini %19 oranında azaltmıştır.
- Ankraj uygulanan deney elemanlarında, CFRP şeritlerin uygulama şeklinin değişmesiyle elemanların göçme şekilleri de değişmiştir. L biçimli şerit uygulanan deney elemanlarında göçme, beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla gerçekleşmiştir. U biçimli şeritlerin uç bölgelerinde ankraj uygulanan deney elemanında göçme, CFRP şeritlerin kopmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile gerçekleşmiştir. ̢ biçimli şerit ile güçlendirilen deney elemanlarının boyuna donatıları akmış, deney elemanları eğilme kapasitelerine ulaşmıştır.

- Beton pas payından donatıya kadar olan bölgenin koparak kiriş gövdesinden ayrılmasıyla göçen Deney Elemanı-7 ve Deney Elemanı-9'da CFRP şeritler, uygulama şekli nedeniyle kiriş konvansiyonel bir etriye gibi sargılayamamıştır. Ayrıca ankrajlardan kiriş alt boyuna donatısının hemen üstüne aktarılan çekme kuvvetleri bu kesitte yığılarak beton pas payının kiriş gövdesinden ayrılmasına neden olmuştur.
- Ankraj uygulanmayan elemanlar arasında en küçük başlangıç rijitliğine 4,82 kN/mm ile Deney Elemanı-2 sahiptir. Ankraj uygulanan elemanlar arasında en küçük başlangıç rijitliğine 4,98 kN/mm ile Deney Elemanı-8, en büyük başlangıç rijitliğine ise 5.87 kN/mm ile Deney Elemanı-11 sahiptir.
- Ankraj uygulamasıyla dayanımı artan elemanlar daha yüksek yük düzeyine kadar yüklenmiş bu nedenle elemanlarda gelişen çatlak sayısı da artmıştır. Bu nedenle elemanların maksimum yük düzeyindeki rijitlikleri azalmıştır. Buna göre Deney Elemanı-3 maksimum yük düzeyinde referans deney elemanından 1,06 kat daha rijit, eğilme kapasitesine ulaşan Deney Elemanı-10 ise referans deney elemanından %28 daha az rijittir.
- CFRP şerit genişliği, şerit aralığı ve uygulama şekli değişimi kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin dayanımlarını farklı oranda etkileyen değişkenlerdir. Şerit aralığının azaltılmasıyla deney elemanlarının dayanımında, şerit genişliklerinin artırılmasından daha fazla katkı sağlanmıştır. CFRP şeritlerin uygulama şeklindeki değişim, dayanımda artış sağlamakla birlikte kirişlerin göçme şekillerini de etkilemiştir. CFRP şeritlerin uç bölgelerine uygulanan ankraj ise deney elemanlarının davranış ve göçme şekillerini doğrudan etkilemiştir.

- Güçlendirilen deney elemanlarında CFRP şerit yerleşim düzeni (CFRP şerit genişliğinin artması veya CFRP şerit aralığının azalması) çatlak gelişimlerini ertelemiş bu nedenle CFRP şeritler kesme dayanımına daha yüksek yük düzeyinde katkı sağlamıştır. CFRP şerit yerleşim düzeni çatlak gelişimleri ile birlikte elemanın birim deformasyon davranışını da etkilemiştir.
- U biçimli CFRP şeritin uygulandığı elemanda, bir kesitte konsantre olan çatlaklar 7 no'lu birim deformasyon ölçerin, Deney Elemanı-10'da ise kesme açıklığına dağılan çatlaklar 1, 3 ve 7 no'lu deformasyon ölçerlerin ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerlerini aşmasına neden olmuştur. CFRP şeritlerin uygulama şekli deney elemanlarında çatlak gelişimlerini ve birim deformasyon davranışlarını etkilemiştir.
- Ankraj uygulanmayan deney elemanı, Deney Elemanı-6'da 0,0016 mm/mm birim deformasyon, ankraj uygulanan Deney Elemanı-8'de ise ACI-440 komite raporunda öngörülen kalıcı uzama değerinden %46 fazla birim deformasyon ölçülmüştür. Birim deformasyon davranışları, CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkı sağlayabilmesi için uç bölgelerine ankraj uygulanması gerektiğini göstermiştir.
- Deney elemanlarında ankrajların CFRP şeritleri lifleri doğrultusunda yırtması, yapışma yüzeyinde meydana gelen deformasyon ve eğik çatlakların yük boşaltılmasına rağmen kapanamayacak büyüklüğe ulaşması CFRP şeritlerde kalıcı deformasyonlara neden olmuştur. Yük boşaltıldığında birim deformasyon ölçerlerde ölçülen değerler, CFRP şeritlerdeki kalıcı deformasyon seviyesini göstermektedir.
- Güçlendirilen deney elemanları arasında en düşük enerjiyi 601,12 KNmm ile 2 no'lu deney elemanı, en fazla enerjiyi 3626,58 kNmm ile eğilme kapasitesine ulaşan 11 no'lu deney elemanı tüketmiştir. Güçlendirilen diğer deney elemanları, Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-11 arasında enerji tüketmişlerdir.

- Ankraj uygulanmayan deney elemanlarının ACI-440 komite raporu ile hesaplanan analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %2-%11 arasında değişen oranlarda küçük hesaplanmıştır. 7 ve 9 no'lu deney elemanlarının analitik kesme dayanımları test sonuçlarıyla benzerlik göstermiş, test sonuçlarından %8-%10 oranında küçük hesaplanmıştır. Ankraj uygulamasının kesme dayanımına katkısını dikkate alınmadan geliştirilen bağıntılar, Deney Elemanı- 8, 10 ve 11'in analitik kesme dayanımlarının, test sonuçlarından %25-%44 aralığında değişen oranlarda küçük hesaplanmasına neden olmuştur.
- Ankraj uygulanmayan deney elemanlarının Chen&Teng'in bağıntılarıyla elde edilen analitik kesme dayanımları deney sonuçlarından %10-%18 oranında, Deney Elemanı-7 ve 9'un analitik kesme dayanımları ise deney sonuçlarından %12 oranında büyük hesaplanmıştır. Deney Elemanı-8, 10 ve 11'in analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından 1,03-1,19 arasında değişen oranlarda küçük hesaplanmıştır.
- DBYBHY'de verilen bağıntıda, CFRP uygulama şekli ve ankraj uygulamasının kesme dayanımına katkısı, CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılmasıyla gerçekleşen göçmenin dayanıma etkisi dikkate alınmamıştır. Bu nedenle deney elemanlarının hesaplanan analitik kesme dayanımları, test sonuçlarından %21-%30 aralığında değişen oranlarda büyük hesaplanmıştır. En başarılı sonuç ankraj uygulanan elemanlarda elde edilmiştir. Ankraj uygulanan elemanlarının analitik kesme dayanımları, deney sonuçlarından en az %8 oranında küçük, en fazla %6 oranında büyük hesaplanmıştır. Buna göre, yönetmelik denkleri ile gerçekleştirilen tasarımlarla, uygulamaların benzerlik gösterebilmesi için CFRP şeritlerin uç bölgelerine ankraj uygulanmalıdır.
- ANSYS-Sonlu Elemanlar Programıyla yapılmış olan analizlerde, beton homojen bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Analizlerde ayrıca gelişebilecek rötre çatlakları tanımlanmamıştır. Bu nedenle deney

elemanlarının analitik zarf eğrileri, test sonuçlarından daha rijit elde edilmiştir.

- CFRP şeritlerle güçlendirilen elemanlarının ANSYS-Sonlu Elemanlar Programıyla hesaplanan kesme dayanımları, test sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Ankraj uygulanmayan elemanların doğrusal olmayan analizi ile elde edilen kesme dayanımları, deney sonuçlarından en fazla %27 oranında büyük hesaplanmıştır. Ankraj uygulanan elemanlarda ise bu fark 0,74-1,07 kat aralığında değişen oranlardadır.
- Deney elemanlarının doğrusal olmayan analizi sonucunda elde edilen başlangıç rijitlikleri, test sonuçlarından en az %9 oranında küçük, en fazla %9 oranında büyük hesaplanmıştır.
- Deney elemanlarının farklı göçme şekilleri, birim deformasyon davranışlarını da etkilemiştir. Ankraj uygulanmayan deney elemanlarının doğrusal olmayan analizinden elde edilen birim deformasyon değerleri, deney sonuçlardan en az %41 oranında büyük hesaplanmıştır. Ankraj uygulanan elemanlarda bu fark 0,84-1,08 kat aralığında değişen oranlardır.
- Bu Çalışma T kesitli betonarme kirişlerin depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yükleme altında davranışını belirlemeye yönelik bir adım olmuş, literatürde deneysel veri eksikliğini gidermeye çalışmıştır.

6.2 Öneriler

Betonarme kirişlerin CFRP şeritlerle kesme dayanımının artırılması ile ilgili yapılmış deneysel ve analitik araştırma sonucunda ortaya konulan öneriler aşağıda sunulmuştur.

- CFRP malzemesinin, kesme donatısıyla etkileşimi incelenmelidir.
- Hasarlı kirişlerin CFRP şeritlerle onarılması, deneysel bir çalışmayla incelenmelidir.
- CFRP şeritlerle güçlendirilen farklı (a/d) oranında betonarme kirişlerinin performansları incelenmelidir.
- CFRP şeritlerle güçlendirilen elemanlarda, beton ve donatı dayanımlarının elemanların performansına etkileri incelenmelidir.
- Beton pas payından boyuna donatıya kadar olan bölgenin gövdeden ayrılmasıyla gerçekleşen göçme şeklini engelleyecek yeni bir ankraj detayı geliştirilmelidir. Geliştirilen yeni ankraj detayı test edilmelidir.

KAYNAKLAR

- ACI, American Concrete Institute, Committee 318,(1995). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95), *Michigan, Michigan*, USA, 131-170, (1995).
- ACI Committee 440 (1996). State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures. American concrete institute, Detroit, Michigan, 68 .
- Adhikary, B, B., Mutsuyoshi, H., (2004). Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets. *Journal of Composites for Construction, ASCE* ,May-June, 258-264.
- 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.
- Anil, O. (2006). Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to Cyclic load. *Cement and Concrete Composites*, 28, 638-649
- ANSYS, ANSYS Manual Set, (2005). ANSYS INC., South point, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA
- Ashour, A, F, Morley, C, T. (1993). Three dimensional nonlinear finite element modeling of reinforced concrete structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 15, 443-467
- Barbosa, F, Ribeiro, G, O, (1998). Analysis of reinforced concrete structures using nonlinear concrete model. *Computational Mechanics*.

- 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.
- Bousselham, A, Chaallal, O. (2006). Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer-an experimental study. *ACI Structural Journal*, 339-347
- Canadian Standards Association., (2002). Design and construction of building components with fiber-reinforced polymer. CSA-S806-02, Rexdale, Ontario, Canada, 2002 pp.
- 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 J.* 92 (3), 295-303.
- Chen, JF, Teng, JG., (2003). Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP rupture. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129(5), 615-625
- Chen, JF, Teng, JG., (2003). Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 17(1), 27-41
- Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik (2007). *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, Ankara.
- Diagana, C., Li, A., Gedalia, B., Dlemas, Y., (2003). Shear strengthening effectiveness with CFF strips. *Engineering Structures*, 25, 507-516.

Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001). *Betonarme (2. Baskı)*: Evrim Yayınevi

Fanning, P, (2001). Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4, 111-119.

fib-TG9.3., (2001). Design and use of externally bonded fiber polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. Bulletin 14, 138.

Islam, M, R., Mansur, M, A., Maalef, M., (2005). Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems. *Cement Concrete Composites*, 27(3), 413-420.

Jayaprakash, J, Samad, A.A.A, Abbasovich, A.A.A, Ali, A.A.A. (2007). Shear capacity of precracked and non precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips. *Construction and Building Materials*, Article in Press.

Kac, R, Chandrasekaran, E, (2006). Analysis of Retrofitted reinforced concrete shear beams using carbon fiber composites. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4, 66-74.

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.

Kachlakev, D, I, Miller, T, Yim, S Chansawat, K, Potisuk, T. (2001). Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates. *California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA and Oregon State University, Corvallis, OR for Oregon Department of Transportation, May.*

- Keleş, M. (2005). *Betonarme kirişlerde açılı CFRP şeritlerin kesmeye katkısı*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi (Yön: Ö.Anıl).
- Khalifa, A., Tumialan, G., Nanni, A. and Belarbi, A. (1999). Shear strengthening of continuous RC beams using externally bonded CFRP sheets. *American Concrete Institute, Proc., 4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS4)*, Baltimore, MD, 995-1008.
- 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.
- Li. A., Diagana, C., Delmas, Y., (2001). CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams. *Engineering Structures*, 23, 1212-1220.
- 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.
- Pallegirino, 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.

- Ritchie, P.; Thomas, D.; Lu, L.; and Conneley, G., (1991). External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. *ACI Structural Journal*, 88(4), 490-500.
- Riyadh, A., Riadh, A., (2006). Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP strips. *Composite Structures*, 75, 457-464.
- Santhakumar, R, Chandrasekaran, E, (2006). Analysis of retrofitted reinforced concrete shear beams using carbon fiber composites. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 4, 66-74.
- Sato, Y.; Ueda, T.; Kakuta, Y.; and Tanaka, T. (1996). Shear reinforcing effect of carbon fiber Sheet attached to side of reinforced concrete beams, *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M.M. El-Badry, 621-627.
- Sato, Y., Ueda, T., Kakuta, Y., Tanaka, T. (1997). Ultimate shear capacity of reinforced concrete beams with carbon fiber sheets. In: Nonmetallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the Third Symposium*, Japan, 1, 499-506.
- 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.; Basunbul, I.; Baluch, M.; and Ghaleb, B., (1994). Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates. *ACI Structural Journal*, 91(2), 160-168.
- Taljsten, B., Elfgrén, L., (2000). Strengthening concrete beams for shear using CFRP materials: evaluation of different application methods. *Composites: Part B*, 33, 87-96.

- Taljsten, B., (2003). Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 17, 15-26.
- Tavarez, F, A , (2001). *Simulation of behavior of composite grid reinforced concrete beams using explicit finite element methods*. Madison, Wisconsin:University of Wisconsin-Madison. Master's Thesis.
- Thomas, J, Ramaswamy, A, (2006). Finite element analysis of shear critical prestressed SFRC beams. *Computers and Concrete*, 3(1), 65-77.
- 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
- Willam, K,J, Warnke, E,P (1974). Constitutive model for triaxial behaviour of concrete. Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, International Association of Bridge and Structural Engineering Conference, Bergamo, Italy, 174
- Yavuzer, M. (2005). *Monotonik yükleme altında dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile nonlinear analizi*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi (Yön: Ö.Anıl).
- Zhao, Z. Z., Kwan, A, K, H, He, X,G. (2004). Non-linear finite element analysis of deep reinforced concrete coupling beams. *Engineering Structures*, 26, 13-25.
- Zhichao, Z., Cheng, T., (2005). Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates. *Journal of Composites for Construction*, ASCE , March-April, 158-169.

Ekler

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

Deneyisel çalışmada kullanılan donatıların testleri Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan bilgisayar kontrollü DARTEC marka bir eksenel çekme aletinde gerçekleştirilmiştir (Resim Ek-A). Deneyde kullanılan deney düzeneği bilgisayar kontrollü olduğu için tüm deneylerde yükün uygulanma hızı sabit tutulmuştur.

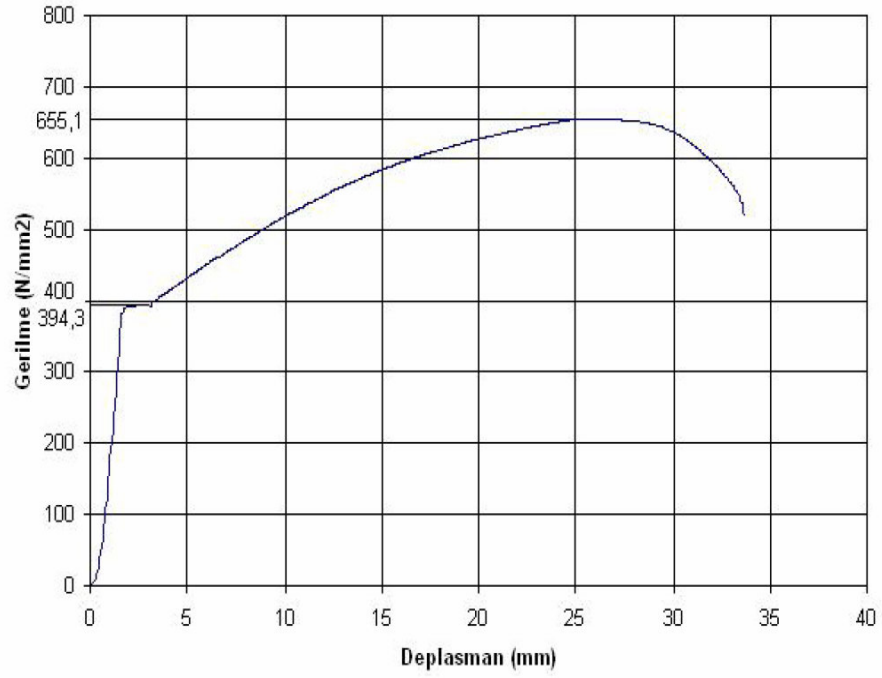
Gerçekleştirilen testlerde $\Phi 20$ ve $\Phi 10$ mm'lik nervürlü, $\Phi 6$ mm'lik düz donatılardan alınan numuneler üçer adet numuneye uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil Ek-A.1-A.9'a kadar sunulmuştur.



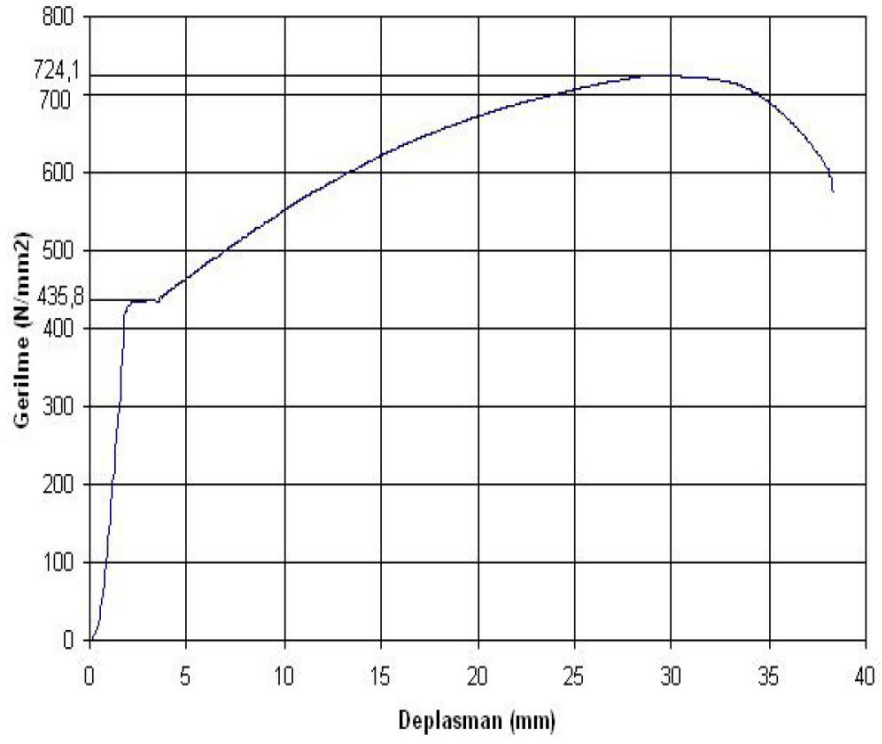
Resim Ek-A Çekme deneyinde kullanılan deney düzeneği



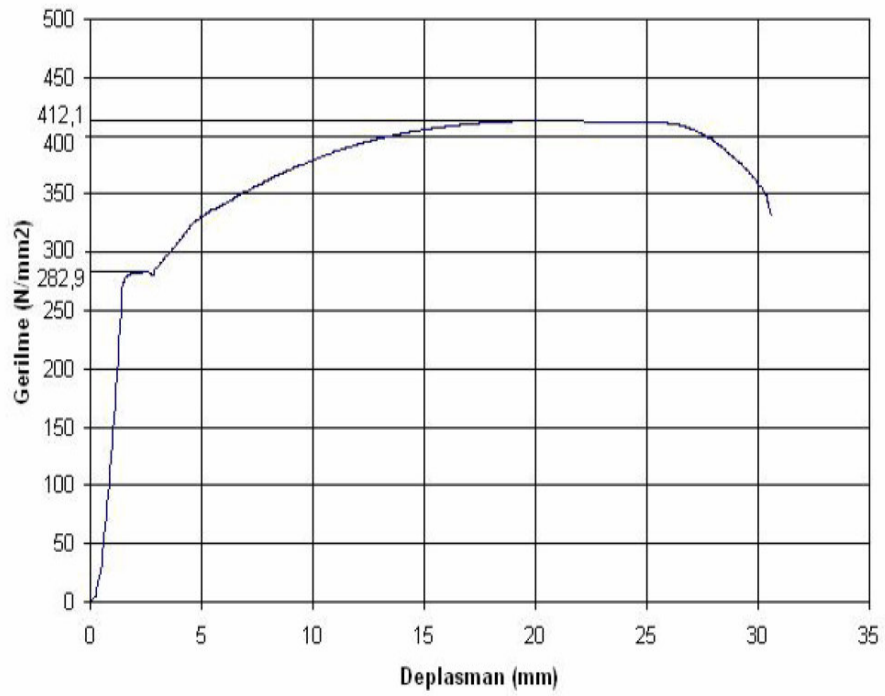
Şekil Ek-A.1 Çekme deneyi sonucu (Ø 20)



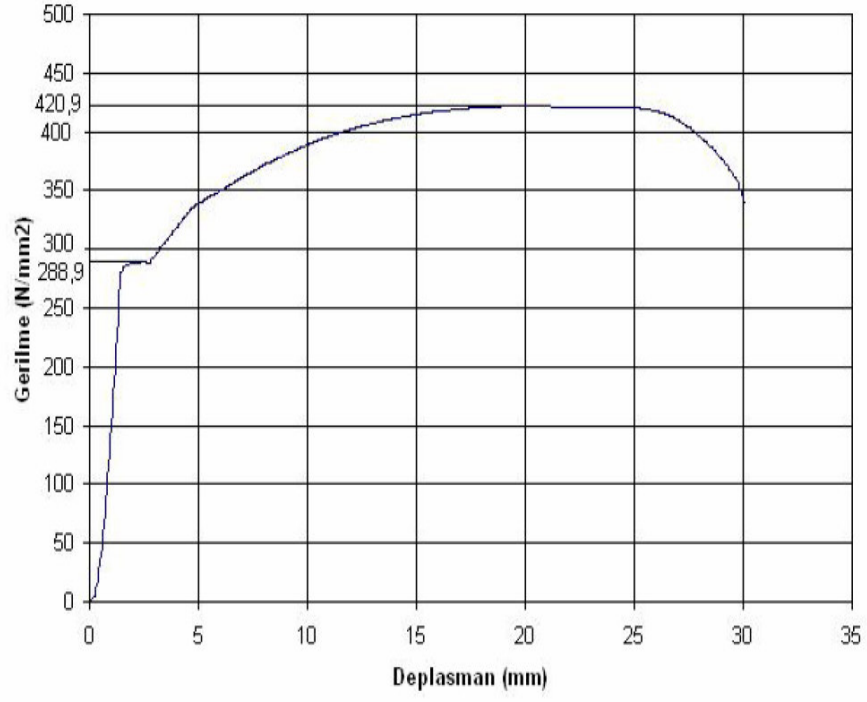
Şekil Ek-A.2 Çekme deneyi sonucu (Ø 20)



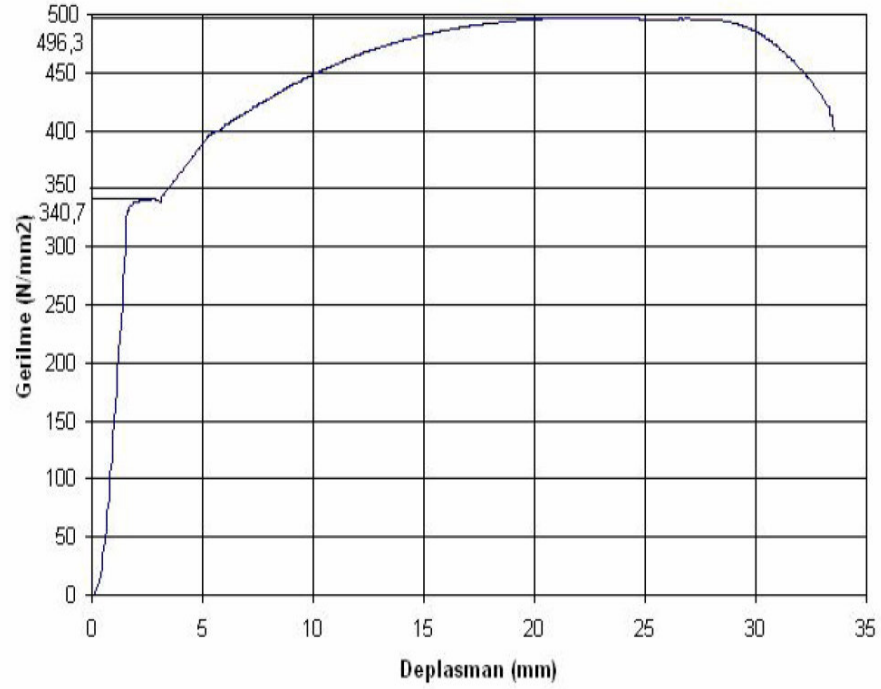
Şekil Ek-A.3 Çekme deneyi sonucu (Ø 20)



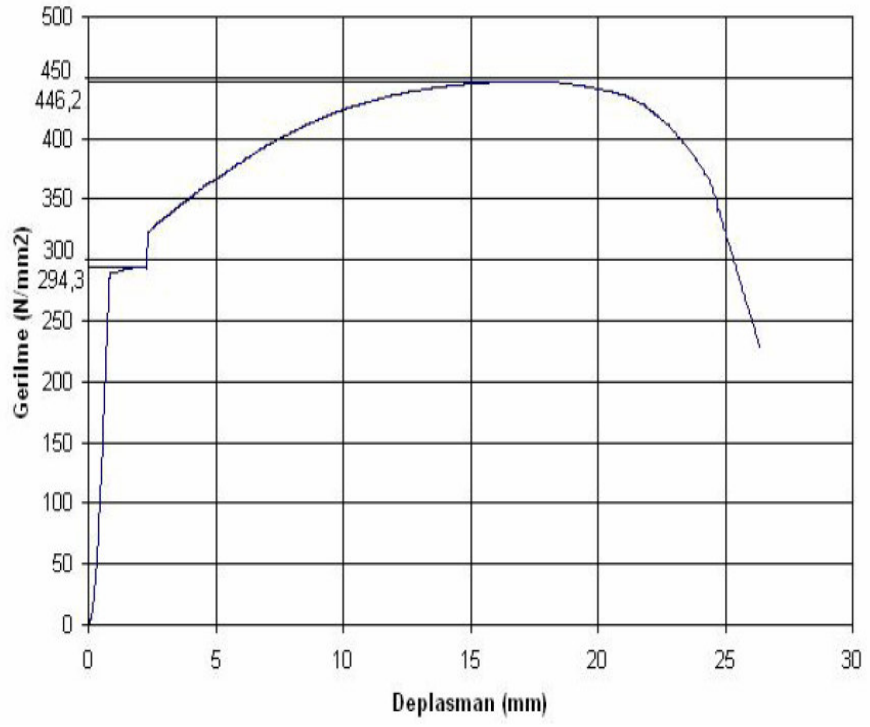
Şekil Ek-A.4 Çekme deneyi sonucu (Ø 10)



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



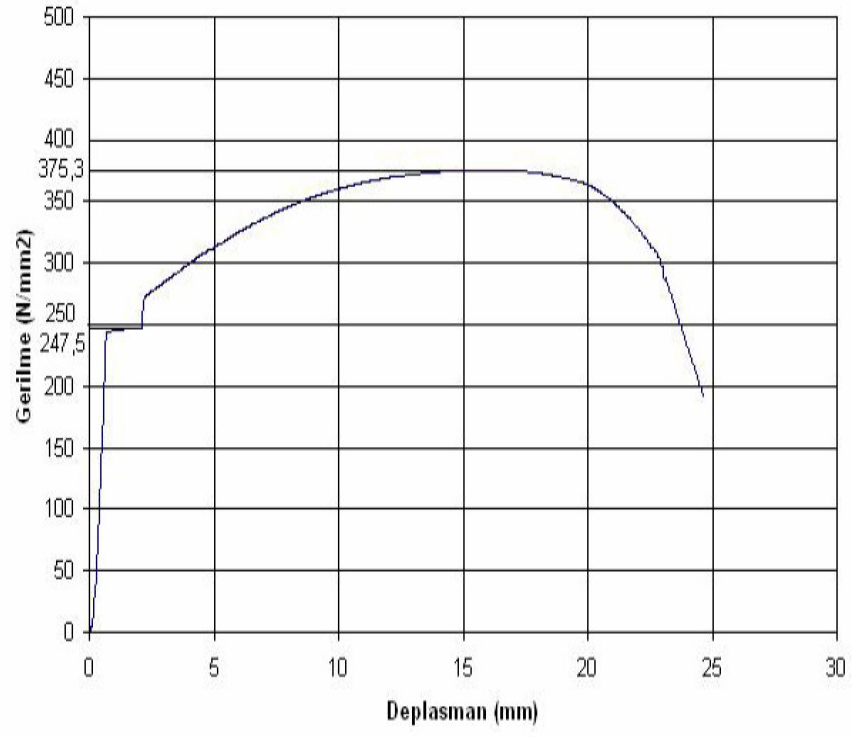
Şekil Ek-A.6 Çekme deneyi sonucu (Ø 10)



Şekil Ek-A.7 Çekme deneyi sonucu (Ø 6)



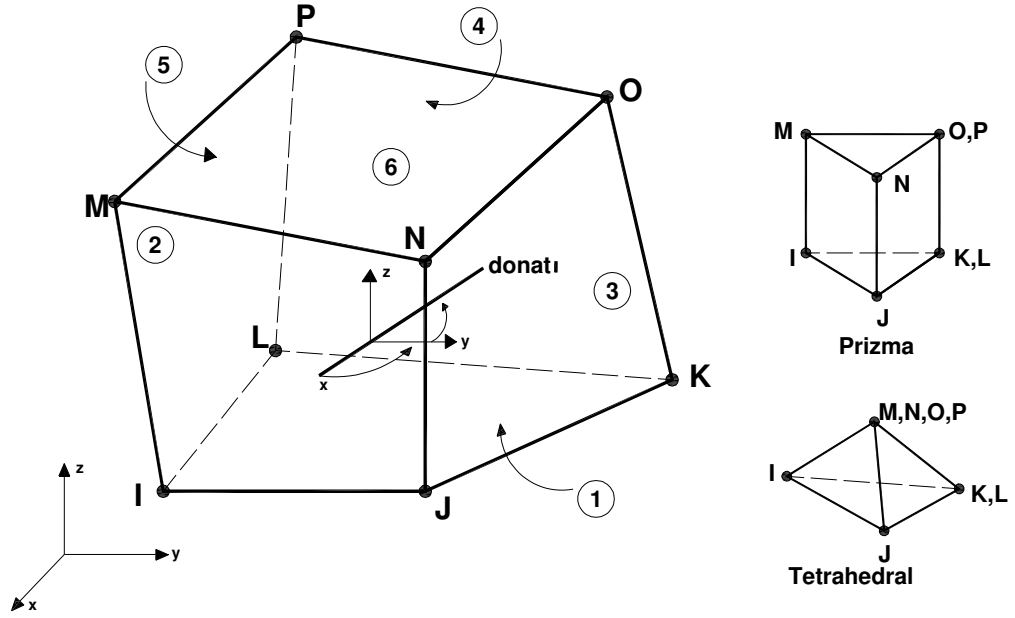
Şekil Ek-A.8 Çekme deneyi sonucu (Ø 6)



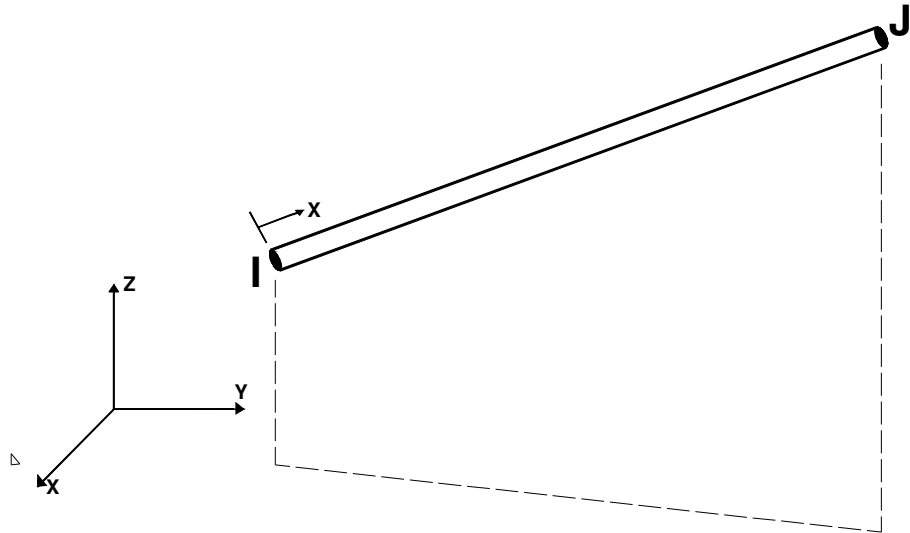
Şekil Ek-A.9 Çekme deneyi sonucu (Ø 6)

EK-B

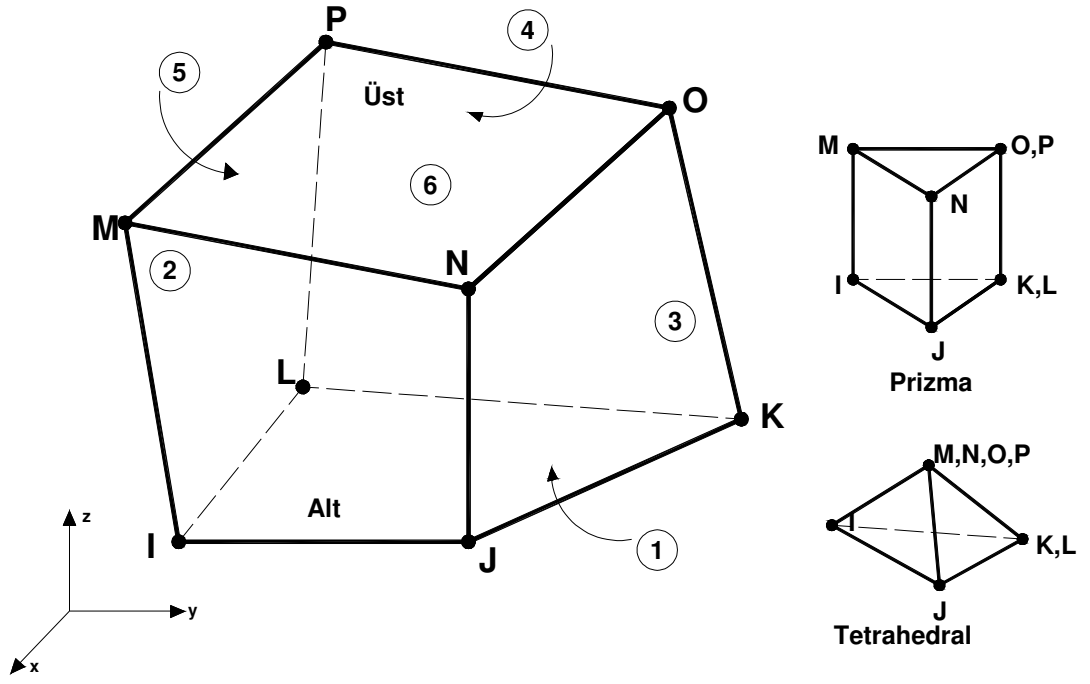
Solid 65, Solid 46 ve Link 8 elemanlarının geometrisi ve yerleşim düzeni



Şekil Ek-B.1 Solid65 katı modeli



Şekil Ek-B.2 Link 8 elemanı



Şekil Ek-B.3 SOLID 46 katı modeli