

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK PROFİLLERİN BİRLEŞTİRİLMESİNDE CFRP MALZEMESİNİN KULLANILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş.Müh. Başar CANDAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ

Mayıs 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK PROFİLLERİN BİRLEŞTİRİLMESİNDE
CFRP MALZEMESİNİN KULLANILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Başar CANDAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 11 / 06 / 2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ
Jüri Başkanı


Doç. Dr. A. Necati YELGİN
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ramazan KAYIKÇI
Üye

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımı her aşamada izleyip değerlendirerek yön veren ve her türlü desteği sağlayan hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ'a, deneyin yapılmasında özveriyle çalışmamı destekleyen Yrd. Doç. Dr. Gazi ANIL'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca deney numunelerinin hazırlanmasında önemli katkılarını esirgemeyen Gözaydın Mühendislik San. ve Tic. Ltd. Şti. ve çalışanlarına, BASF-YKS'den Talat SİVRİOĞLU ve Engin Cüneyt SEYHAN'a, numunelerin elde edilmesini sağlayan Kürşat KÖKSOY'a, çalışmam boyunca sabır gösteren ve yardımcı olan çalışma arkadaşlarıma, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli aileme, sevdiklerime ve sevenlerime, bu çalışmada emeği geçen herkese minnetlerimi sunar, teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1 Konu ile İlgili Çalışmalar.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
BÖLÜM 2.	
MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Karbon Fiber Takviyeli Polimerler.....	5
2.1.1. Örgülü karbon lifli elyaflar.....	5
2.1.2. Karbon lifli plakalar.....	7
2.2. CFRP Yapıştırma Malzemeleri.....	8
2.2.1. Örgülü karbon lifli elyaflar için 2 bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçineleri	8
2.2.2. Karbon lifli plakalar için 2 bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçineleri.....	9
2.2.3. Astar malzemesi.....	10
2.3. Çelik.....	11

BÖLÜM 3.

DENEY PROGRAMI	13
3.1. Deneyde Kullanılan Makineler.....	13
3.1.1. 40 ton yük kapasiteli eğilme çerçevesi.....	13
3.1.2. Dijital veri kayıt cihazı (data logger).....	15
3.1.3. Yük hücresi (load cell)	15
3.1.4. LVDT (Linear Variable Differential Transformer)	16
3.1.5. Strain gauge.....	17
3.2. Deney Numuneleri.....	18
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	19
3.4. Deney Düzeneği.....	30
3.5. Deney Düzeneğini Oluşturan Elemanlar.....	32
3.6. Deney Düzeneğinin Hazırlanması.....	33
3.7. Deneyin Yapılması ve Sonuç Grafikleri.....	37
3.7.1. Deneyin yapılması.....	37
3.7.2. Sonuçlar.....	43
3.7.3. Sonuç grafikleri.....	45

BÖLÜM 4.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymers
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer
L240	: CFRP yapışma boyu 240 mm. olan numune
L320	: CFRP yapışma boyu 320 mm. olan numune
L400	: CFRP yapışma boyu 400 mm. olan numune
L480	: CFRP yapışma boyu 480 mm. olan numune
S.G.	: Strain Gauge

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Eğilme çerçevesi ve pompası.....	14
Şekil 3.2.	Dijital veri kayıt cihazı.....	15
Şekil 3.3.	Yük hücresi.....	16
Şekil 3.4.	LVDT.....	17
Şekil 3.5.	Strain gauge.....	18
Şekil 3.6.	Yüzeyin tel fırça ile temizlenmesi.....	20
Şekil 3.7.	Yüzeyin tiner yardımıyla silinmesi.....	21
Şekil 3.8.	CFRP'nin rulusunun ve ambalajının açılması.....	22
Şekil 3.9.	CFRP'nin işaretlenip kesilmesi.....	23
Şekil 3.10.	A ve B bileşenleri.....	24
Şekil 3.11.	Epoksi yapıştırıcı olan A bileşeni.....	25
Şekil 3.12.	Epoksi sertleştirici olan B bileşeni.....	25
Şekil 3.13.	İki bileşenin karıştırılması.....	26
Şekil 3.14.	Yapıştırma alanının belirlenmesi.....	27
Şekil 3.15.	İki bileşenli epoksi esaslı doyum reçinesinin sürülmesi.....	27
Şekil 3.16.	CFRP'nin yapıştırılması.....	28
Şekil 3.17.	İkinci kat yapıştırıcının sürülmesi.....	29
Şekil 3.18.	İkinci kat CFRP'nin yapıştırılması.....	29
Şekil 3.19.	Birleştirilmiş numune.....	30
Şekil 3.20.	Deney düzeneği.....	31
Şekil 3.21.	Deney düzeneğini oluşturan elemanlar.....	32
Şekil 3.22.	Mesnetlerin yerleştirilmesi.....	33
Şekil 3.23.	Orta noktalara aparatların yerleştirilmesi.....	34
Şekil 3.24.	Strain gaugelerin lehimlenmesi.....	35
Şekil 3.25.	Deneye hazır numuneler.....	36
Şekil 3.26.	Deneye hazır düzenek.....	37

Şekil 3.27.	Deney öncesi ve sonrası referans kirişi.....	38
Şekil 3.28.	Deney öncesi ve sonrası L240 kirişi.....	39
Şekil 3.29.	Deney öncesi ve sonrası L320 kirişi.....	40
Şekil 3.30.	Deney öncesi ve sonrası L400 kirişi.....	41
Şekil 3.31.	Deney öncesi ve sonrası L480 kirişi.....	42
Şekil 3.32.	Wheatstone köprüsü.....	43
Şekil 3.33.	Strain gaugeli wheatstone köprüsü.....	44
Şekil 3.34.	Dönme kapasitesi.....	47
Şekil 3.35	Üçgen benzerliği.....	48
Şekil 3.36.	Referans kirişinin uygulanan yük -net orta nokta deplasmanı grafiği.....	49
Şekil 3.37.	Referans kirişinin M/Mp – dönme grafiği.....	49
Şekil 3.38.	L240 kirişinin uygulanan yük -net orta nokta deplasmanı grafiği.....	50
Şekil 3.39.	L240 kirişinin M/Mp – dönme grafiği.....	50
Şekil 3.40.	L320 kirişinin uygulanan yük -net orta nokta deplasmanı grafiği.....	51
Şekil 3.41.	L320 kirişinin M/Mp – dönme grafiği.....	51
Şekil 3.42.	L400 kirişinin uygulanan yük -net orta nokta deplasmanı grafiği.....	52
Şekil 3.43.	L400 kirişinin M/Mp – dönme grafiği.....	52
Şekil 3.44.	L480 kirişinin uygulanan yük -net orta nokta deplasmanı grafiği.....	53
Şekil 3.45.	L480 kirişinin M/Mp – dönme grafiği.....	53

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Örgülü Karbon Lifli Elyafların Teknik Özellikleri	6
Tablo 2.2.	Karbon Lifli Plakaların Teknik Özellikleri.....	8
Tablo 2.3.	Örgülü Karbon Lifli Elyaflar için Doyurma Reçinelerinin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	9
Tablo 2.4.	Karbon Lifli Plakalar için Doyurma Reçinelerinin Fiziksel ve Teknik Özellikleri.....	10
Tablo 2.5.	Astar Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	11
Tablo 2.6.	IPN 120 Profilinin Teknik Özellikleri.....	12
Tablo 3.1.	Numunelerin Özellikleri.....	19
Tablo 4.1.	Sonuç Tablosu.....	54

ÖZET

Anahtar kelimeler: CFRP, çelik profiller, birleşim, moment-dönme kapasitesi,

Bu çalışmanın amacı çelik profillerde, plastik tasarım ilkelerinin de geçerli olabileceği yeni bir birleşim türü oluşturabilmektir. Bunun için birden fazla çelik profil, gevrek bir malzeme olan CFRP ile birleştirilerek 4 noktalı eğilme deneyine tabii tutulmuştur. Plastik tasarım için şartnamelerin öngördüğü moment-dönme kapasitesinin en az 3 olması durumu CFRP birleşimli profillerde araştırılmıştır. 4 adet farklı CFRP boyu ile oluşturulan 4 adet çelik kirişe ait moment-dönme grafikleri deneyler sonucunda oluşturulmuş ve arzu edilen dönme kapasitesi olan 3 değerine ulaşılmadığı gözlemlenmiştir. Deneylerde, göçmenin CFRP liflerinde olmadığı, çelik profille CFRP arasında bulunan yapıştırıcı vazifesi gören epoksida olduğu gözlemlenmiştir. Yazar geliştirilecek bir ankraj detayı ile bu sorunun üzerinden gelineceği ve liflerin çalıştırılması durumunda arzu edilen dönme kapasitesine ulaşılacağına inanmaktadır.

USING CFRP MATERIAL TO BONDING OF STEEL PROFILES

SUMMARY

Key Words: CFRP, steel profiles, connection, moment – rotate capacity

This study focus on to develop a new connection type which is based on plastic design principles. For this purpose two steel profiles are connected by a brittle material,CFRP, and tested under 4 point loading. Moment rotation capacity of minimum 3 is investigated on these CFRP connected beams. 4 steel beam specimen with 4 different length of CFRP are tested. Moment rotation capacity are calculated and it was observed that moment rotation capacity was not sufficient enough for plastic design. It was observed that the fracture was not on the CFRP fibers. The fracture of the connection was because of the debonding of the adhesive between CFRP and steel. It is the author believe that an anchorage detail for bonding CFRP to steel will increase the moment rotation capacity of this new type of connection.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Hızla gelişen teknolojinin inşaat sektörüne olan yansımaları sayesinde üretilen yapı malzemeleri sayısı ve çeşitliliği gün geçtikçe artmaktadır. Bunun doğal sonucu olarak yapı üretiminde kullanılan tekniklerde de yenilikler olmaktadır. Bilim adamları tarafından yapılan öngörülere göre, çağında çığır açmış yapı cinsi olan betonarme sistemler gibi, CFRP (Karbon fiber katkılı polimerik malzemeler - Carbon Fiber Reinforced Polimers) kullanılan sistemler de gelecekte standart sistemler haline dönüşecektir. CFRP kullanılmış sistemler, CFRP'nin hafiflik ve çekme dayanımı avantajlarını kullanarak hızla gelişecektir. Günümüzde CFRP, Japonya'da metro sistemlerinin, Amerika Birleşik Devletleri'nde de köprülerin güçlendirilmesinde verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, betonarme, ahşap, çelik yapı elemanlarının rijitliğinin artırılmasında, çekme dayanımları başta olmak üzere dayanımlarının artırılmasında ve sehimin azaltılmasını sağlayan çözümlerde yer almaktadırlar. Bu çalışmada, CFRP ile bağlanmış iki kirişin dört noktalı eğilme deneyi altındaki davranışı araştırılacaktır (bulunan dönme kapasitesi değerinin (R) uluslararası standartlarda bahsedilen minimum değerden büyük olması durumunda CFRP'li bağlantının kirişin sünekliğinde bir olumsuzluğa neden olmadığı sonucuna ulaşılabacaktır).

1.1 Konu İle İlgili Çalışmalar

Literatüre bakıldığında CFRP'nin bağlantı elemanı olarak kullanıldığı sistemleri araştıran bir çalışma bulunamadı. Çelik levhaların normal modüllü CFRP ile bağlanıp deneysel ve sonlu eleman analizinin yapıldığı çalışmada [1], iki çelik levha yapışkan ile birleştirilmiş ve farklı birleştirme uzunluklarıyla çift bağlı mafsal karbon fiber şeritlerin uygulaması araştırılmıştır. Numunelerin davranışı çökme modlarını ve yük kapasitelerini tahmin eden doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinin kullanılması ile daha ileri seviyede araştırılmıştır. Söz konusu çalışmada, CFRP

yapıştırılması için baskın yapışıklık bozulma modu, sonlu eleman modeliyle aynı şekilde bulunmuştur. Sonlu eleman analizlerinde öngörölmüş nihai yüklerin, deneysel değerler ile iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Başka bir çalışmada, bir çelik köprü kirişinin CFRP levhalar kullanılarak güçlendirilmesi üzerine bir araştırma yapılmıştır [2]. Çelik kirişlerin rehabilitasyonunda kompozit malzemelerin kullanılması, kısa vadede; istenilen değışikliklerin köprülere uygulanabilmesini, uzun vadede ise rehabilitasyon için cazip bir çözüm olarak ortaya çıkmasını sağlamıştır. Delaware Üniversitesinde yürütölen birkaç laboratuvar çalışması, CFRP levhalarının çelik köprü kirişlerini güçlendirmede verimli bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bahsedilen çalışmada güçlendirme ile alakalı fizibilite çalışması incelenmiş, var olan bir köprü kirişinin güçlendirilmesi yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda; bütün testler alışılmışın dışındaki bu rehabilitasyon prosedürünün ümit verici bir biçimde geliştiğini göstermiştir. Çelik köprü kirişlerinin çekme elemanlarına CFRP levhaların bağlaması rijitlik ve dayanımı arttırmıştır. Bununla birlikte, CFRP/çelik bağının değışken çevresel koşullarda ve metal yorulması altında durabilitesi incelenmiştir. Korozyon zararına uğramış köprü kirişlerinde rijitlikte ilk hale göre %10 ile %37 arasında bir rijitlik artışı sağlanmıştır. Özel CFRP levhaları ve yapışkanların kullanılması için, yapıştırma uzunluğu yaklaşık olarak 100 mm olarak bulunmuştur. Küçük ve büyük ölçekli örneklerde gerçekleştirilen malzeme yorulma testlerinde, sargı levha detaylarının yeterli malzeme yorulma dayanımına sahip olduğu bulunmuştur.

Mitsubishi Kimyasal FP Amerika Şirketi'nden araştırmacılar, çelik yapıları güçlendirmek için yüksek modüllü karbon fiber katkılı polimerik malzemelerin (CFRP) kullanılması üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir [3]. Bahsedilen çalışma, korozyondan dolayı kesit kaybı ve/veya yapının kullanımının veya isteklerin değışmesinden dolayı sıklıkla ihtiyaç duyulan rehabilitasyon olgusunda, yüksek modüllü karbon fiber katkılı polimerik malzemelerin (CFRP) kullanılması gibi yeni bir çözüm getirmiştir. Cep telefonu baz istasyonlarının antenleri gibi monopol kuleler üzerine Kuzey Carolina Devlet Üniversitesi İnşa Edilmiş Tesisler Laboratuvarları'nda yapılan testlerde, güçlendirilmemiş aynı monopole göre %25 elastiklikte rijitlik artışı gözlemlenmiştir.

Kuzey Caroline Devlet Üniversitesi'nden M. Dawood, E. Sumner ve S.Rizkalla ile Cambridge, Massachusetts'den D. Schnerch'in yapmış oldukları çalışmada [4]; HM CFRP materyallerin çelik-betonarme kompozit köprü kirişlerinin güçlendirilmesinde ve tamirinde etkin olarak kullanılabilceğini kanıtlamıştır. Değişken konfigürasyonların kullanıldığı deneysel program, çelik-betonarme kompozit kirişlerin elastik rijitliğini, akma yükünü ve son yük kapasitesini yüksek ve orta modüllü CFRP materyallerin arttırdığını da kanıtlamıştır. Ayrıca, CFRP'nin varlığı aşırı yüklenme durumundan kaynaklanan kalıcı yer değiştirmenin azalmasına yardımcı olmuştur. Bu araştırmadan elde edilen bulgular, çelik-betonarme kompozit köprü kirişlerinin güçlendirilmesinde HM CFRP materyallerinin analizini ve güvenli tasarımını kolaylaştıracak bir basitleştirilmiş tasarım prosedürünü belirlemiştir. Bahsedilen araştırma, HM CFRP materyallerin kullanımının çelik köprülerin güçlendirilmesi ve onarımı için verimli ve uygun maliyetli olduğunu göstermiştir.

İbrahim Ünal'ın [5] yapmış olduğu çalışmada, yüksek oranda aşınma ve deformasyona neden olan gerilmelere maruz metalik malzemelerin, yüksek aşınma dayanımı ve/veya deformasyon direncine sahip seramiklerle makro düzeyde kaplanması suretiyle kullanım ömürlerinin artırılması amaçlanmıştır. Seramiklerin metal üst yüzeyine birleştirme işlemi olarak oda sıcaklığında değişik bağlayıcıların kullanıldığı yapıştırma teknikleri uygulanmıştır. Çeşitli parametrelerin yapışma mukavemetine etkileri incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda , yapıştırma mukavemetinin iyi olabilmesi için düşük pürüzlülük gerektiği ve bir sınır değerinin olduğu tespit edilmiştir. Pürüzlülük değerleri azaldıkça yapıştırıcının birçok sayıda ve daha düşük alanlara tutunmaya çalışması gerekmektedir. Daha büyük pürüzlülük değerlerinde ise yapıştırıcı daha geniş alanda ve miktarda yüzeye tutunmaya çalışmaktadır.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, gevrek bir malzeme olan CFRP malzemesinin sünek bir malzeme olan çeliğe yapıştırılması sonucu çelik kirişin sünekliliği araştırılmıştır. Yürürlükte olan şartname ve kodlarda süneklilik kavramı oldukça önemli bir kavram olarak karşımıza

çıkılmaktadır. Yapılan bu çalışmada, iki adet çelik profil, CFRP ile birbirine yapıştırılarak 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda moment-eğrilik grafikleri elde edilmiş ve bu grafikler yardımıyla dönme kapasitesi değeri elde edilmiştir. Eğer dönme kapasitesi 3 ve üzeri olursa, bu birleşim türünün sünek olduğu söylenebilecektir.

Birinci bölümde, konu ile ilgili genel bilgi ile daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, deneyde kullanılan malzemeler tanıtılmış, bunların teknik özellikleri, çeşitleri, vb. özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, deneyde kullanılan makineler tanıtılmış, deney programı verilmiş, numunelerin hazırlanması hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiş, deney adım adım anlatılmış ve bunun sonucunda bulunan grafikler değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölümde, sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemeler tanıtılacak, teknik özellikleri, avantajları, kullanım alanları gibi konulara yer verilecektir.

CFRP ile çelik levhaların birleştirilmesini konu alan deneysel çalışmada kullanılan malzemeler; örgülü veya plaka halinde bulunan CFRP, CFRP'lerin özel yapıştırıcıları ve çeliktir.

2.1. Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP)

Uzay mühendisliği konusunda ulaşılan bilgilerin inşaat mühendisliğine aktarılması sayesinde bir çok çözüm yöntemi ortaya çıkmaktadır. CFRP'lere geleceğin klasik malzemeleri olarak bakılmaktadır. Şimdiye kadar uzay, havacılık, otomotiv sanayi ve sporda kullanılan CFRP, yapı mühendisliğinde de kullanılmaya başlanmıştır. CFRP, polyester reçine içinde gömülmüş 5-10 mikrometre çapında, çok ince karbon elyaflardan oluşmaktadır. CFRP' ler çelikten 5.2 defa daha hafiftir. Şu an için inşaat mühendisliğinde yaygın kullanımını engelleyen ana neden yüksek fiyatıdır (12 Euro/m). Ancak bugüne kadarki hızlı gelişmelere bakılacak olursa karbon fiber ile takviye edilmiş polimerik malzemelerin uygulamaları pek yakında daha ekonomik olacaktır. CFRP'ler piyasada örgülü karbon lifli elyaf ve karbon lifli plakalar olmak üzere iki çeşit olarak üretilmektedir. Bu çalışmada Mbrace Fiber C1-30 adlı örgülü karbon lifli elyaf kullanılmıştır.

2.1.1. Örgülü karbon lifli elyaflar

Betonarme, tuğla, çelik ve ahşap yapı elemanlarının eğilmede ve kesmede yük taşıma kapasitelerini arttırmak için kullanılırlar. Kullanım amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- a. Yapısal elemanların yük taşıma kapasitelerinin artırılması
- b. Yapı kullanım amacının değişmesi
- c. Yapı hasarlarının tamiri
- d. Deprem nedeniyle oluşan hasarların onarımı
- e. Standartların değişmesi sonucu yapıların buna uyum amacıyla güçlendirilmesi
- f. Servis özelliği ve süresinin artırılması
- g. Çarpma, patlama etkilerinin azaltılması (kaza veya terör etkisiyle)

Örgülü karbon lifli elyafların özellikleri ve avantajları ise şu şekilde sıralanabilir:

- a. Minimal ilave yük artışı sağlayan düşük birim ağırlığa sahiptirler (230 ile 430 g/m²)
- b. Yüzey geometrisinden bağımsız olarak uygulama imkânlarına sahiptirler (kirişler, kolonlar, bacalar, kazıklar, duvarlar, silolar)
- c. Dokumayı dengeli olarak bir arada tutabilmek amacıyla atkı lifleri ile üretilmişlerdir (ısıl proses)

Piyasada en çok bulunan örgülü karbon lifli elyafların teknik özellikleri Tablo 2.1. 'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Örgülü karbon lifli elyafların teknik özellikleri

	Mbrace Fiber C1-23	Mbrace Fiber C1-30	Mbrace Fiber C5-30	SikaWrap 200 C	SikaWrap 230 C	SikaWrap 300 C	SikaWrap 300 C 0/90 (VP)
Elastisite Modülü (MPa)	240.000	240.000	640.000	230.000	238.000	230.000	230.000
Çekme Dayanımı (MPa)	3.800	3.800	2.650	3.900	4.300	3.900	3.800
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0,117	0,176	0,190	0,110	0,131	0,166	0,083
Toplam Ağırlık (g/m ²)	230	330	430	200	230	300	320

2.1.2. Karbon Lifli Plakalar

Karbon lifli plakalar; betonarme, çelik ve ahşap elemanların eğilme dayanımlarını ve rijitliğini artırmak amacı ile kullanılan, ön üretilmiş, karbon lifli polimer şerit (laminant) malzemelerdir. Karbon lifli plakaların kullanım amaçları ve yerleri aşağıda sıralanmıştır:

- a. Döşeme ve kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin artırılması
- b. Artan aks yükleri dolayısıyla köprülerin kapasitelerinin artırılması
- c. Ağır makinelerin montajı
- d. Titreşimli yapıların stabilizasyonu
- e. Yapı kullanım amacının değişikliği
- f. Mevcut yapı elemanlarının zarar görmesi
- g. Çelik donatının korozyonu
- h. Araç çarpması
- i. Yangın
- j. Deprem
- k. Sehimin ve çatlak genişliğinin azaltılması gibi mevcut servis şartlarının iyileştirilmesi
- l. Duvar veya kolonların kaldırılması gibi mevcut yapısal sistemdeki değişiklikler
- m. Deprem ve tasarım yönetmelikleri gibi şartnamedeki değişiklikler

Bu karbon lifli plakaların özellikleri ve avantajları şunlardır:

- a. Korozyon riski yoktur
- b. Çok yüksek dayanımlara sahiptirler
- c. Çok hafif oldukları için yapıya ilave yük getirmezler
- d. Yüksek dayanım ve elastisite modülü kombinasyonları mevcuttur.

Karbon lifli plakaların teknik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Karbon lifli plakaların teknik özellikleri

	Mbrace Laminate LM10	Mbrace Laminate HM10	Sika CarboDur S	Sika CarboDur M	Sika CarboDur H
Elastisite Modülü (MPa)	165.000	210.000	165.000	210.000	300.000
Çekme Dayanımı (MPa)	1.300	1.650	3.100	3.200	1.500
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	1,4	1,4	1,2	1,4	1,4

2.2. CFRP Yapıştırma Malzemeleri

Örgülü ve laminant olarak üretilen CFRP’lerin, yapıştırılması için piyasada iki farklı yapıştırıcı türü bulunmaktadır. Bu çalışmada, MBT-Mbrace Adesivo markalı örgülü karbon lifli elyaflar için iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesi kullanılmıştır. Ayrıca, özellikle örgülü karbon lifli elyaflar için geliştirilmiş olan, yüzey hazırlama amaçlı kullanılan, astar malzemeleri de mevcuttur.

2.2.1. Örgülü karbon lifli elyaflar için 2 bileşenli epoksi esaslı doyurma (laminasyon) reçineleri

Bu yapıştırıcılar, epoksi esaslı, uygulama esnasında belirli oranlarda birbirine karıştırılarak kullanılan iki bileşenden meydana gelen, yüksek dayanımlı, solventsiz, örgülü karbon lifli elyaflar için geliştirilmiş özel yapıştırıcılardır.

Bu yapıştırıcıların özellikleri ve avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek mekanik dayanımlara sahiptirler
- Düşey ve baş üstü yüzeylere uygulanabilirler ve sarkma yapmazlar
- Macun kıvamında olup, kolay uygulanırlar

- d. Ciltte tahrişe yol açan ve uzun süre solunması tehlikeli olan solventi içermezler.

Piyasada bulunan örgülü karbon lifli elyaflar için, iki tür doyumma reçinelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıdaki Tablo 2.3’de özetlenmiştir:

Tablo 2.3. Örgülü karbon lifli elyaflar için doyumma reçinelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri

	Sikadur 330	MBT- Mbrace Adesivo
Çekme Dayanımı (MPa)	30	60
Karışım Yoğunluğu (kg/l)	1,31	1,05
Tam kürlenme süresi (+23°C’de)	7 gün	7 gün
Kimyasal Dayanım	Yok	Yok
Termal Dayanım	+50°C	+50°C

2.2.2. Karbon lifli plakalar için 2 bileşenli epoksi esaslı doyumma (laminasyon) reçineleri

Bu yapıştırıcılar da, epoksi esaslı, uygulama esnasında belirli oranlarda birbirine karıştırılarak kullanılan iki bileşenden meydana gelen, yüksek dayanımlı, solventsiz, karbon lifli plakalar için geliştirilmiş özel yapıştırıcılardır.

Bu yapıştırıcıların özellikleri ve avantajları örgülü karbon lifli elyaflar için olanlarla aynıdır. Piyasada bulunan iki tür karbon lifli plakalar için 2 bileşenli epoksi esaslı doyumma reçinelerinin fiziksel ve teknik özellikleri Tablo 2.4’de özetlenmiştir:

Tablo 2.4. Karbon lifli plakalar için doyumra reġinelerinin fiziksel ve teknik zellikleri

	Sikadur 30	MBT- Mbrace Laminate Adesivo
Çekme Dayanımı (MPa)	30	40
Karışım Yoğunluğu (kg/l)	1,65	1,58
Tam kürlenme süresi (+23°C'de)	7 gün	7 gün
Kimyasal Dayanım	Yok	Yok
Çalışma sıcaklığı (Min/Maks)	+5°C - +35°C	+5°C - +35°C

2.2.3. Astar malzemesi

Epoksi esaslı, iki bileşenli, düşük viskoziteli, örgülü karbon lifli elyaf sistemleri için özel olarak geliştirilmiş astar malzemesidir. Lifli polimer kumaşların yapıştırılacak yüzeylerinde kondisyon ve aderans arttırıcı astar malzemesi olarak kullanılırlar. Bu çalışmada astar malzemesi kullanılmamıştır.

Bu malzemelerin avantajları şu şekilde sıralanabilirler:

- Kolay uygulanırlar
- Düşük viskozitelidirler
- Mekanik dayanımları yüksektir
- Yapıştırılacak yüzeylerde yüksek aderans sağlarlar
- Ciltte tahrişe yol açan ve uzun süre solunması tehlikeli olan solventi içermezler.

Piyasada bulunan astar malzemesinin teknik özellikleri tablo 2.5.'de özetlenmiştir:

Tablo 2.5. Astar malzemesinin teknik özellikleri

	MBT-Mbrace Primer
Eğilme Dayanımı (MPa)	>20
Karışım Yoğunluğu (kg/l)	1,09
Tam kurlenme süresi (+20°C'de)	7 gün
Uygulanacak zeminin sıcaklığı (Min/Maks)	+5°C - +30°C

2.3. Çelik

Bu çalışmada kullanılan St 37 çeliğine ilişkin karakteristikler aşağıda özetlenmiştir:

Elastisite modülü	$E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$
Poisson sayısı	$\nu = 0,3$
Kayma modülü	$G = E / (2 (1 + \nu)) = 810.000 \text{ kg/cm}^2$
Lineer ısı katsayısı	$\alpha_t = 12 \times 10^{-6}$
Akma anındaki gerilme değeri	$\sigma_a = 2.400 \text{ kg/cm}^2$
H yüklemesindeki emniyet gerilmesi	$\sigma_{\text{çem}} = 1.440 \text{ kg/cm}^2$
HZ yüklemesindeki emniyet gerilmesi	$\sigma_{\text{çem}} = 1.656 \text{ kg/cm}^2$

Yapılarda kullanılan çelik malzeme, çeşitli kesit etkilerini ekonomik bir biçimde aktaracak, ayrıca, ekonomik kesit oluşturacak standart şekil ve boyutlarda pazarlanırlar ki, bu işlem sonucunda elde edilen ürünlere hadde ürünleri denir[6]. Deneylerde kullanılan St 37 çeliğinden imal edilmiş IPN 120 profilinin teknik özellikleri Tablo 2.6'da özetlenmiştir:

Tablo 2.6. IPN 120 profilinin teknik özellikleri

	IPN 120
Yükseklik (mm)	120
Başlık genişliği (mm)	58
Gövde kalınlığı (mm)	5,1
I_x (cm ⁴)	328
I_y (cm ⁴)	21,5
W_x (cm ³)	54,7
W_y (cm ³)	7,41
W_{Plx} (cm ³)	63,6
W_{Ply} (cm ³)	12,4
$M_p = W_{Plx} \times \sigma_a$ (tcm)	$63,6 \times 2,4 = 152,64$

BÖLÜM 3. DENEY PROGRAMI

Deney numuneleri Sakarya Üniversitesi Yapı Laboratuvarında hazırlanmış olup, deneyler Gazi Üniversitesi Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, araştırılan konuya ulaşmak için gerekli olan deneyde kullanılan makineler, deney düzeneği, deney programı, deneyde kullanılan numunelerin hazırlanması ve deney sonuç grafiklerine yer verilmiştir.

3.1. Deneyde Kullanılan Makineler

Deneyi gerçekleştirmek için, 40 ton kapasiteli eğilme çerçevesi, Enerpac pompa, dijital veri kayıt cihazı (data logger), yük hücresi (load cell) ve strain gauge'ler kullanılmıştır. Tüm bu veri toplama donanımlarından alınan sayısal veriler, veri toplama yazılımı aracılığı ile kullanabileceğimiz grafikleri bize sunmuştur.

3.1.1. 40 ton yük kapasiteli eğilme çerçevesi

Eğilme çerçevesi, UNP 300 profillerinden iki sıra kolon ve kiriş elde edilip, birleştirilmesiyle meydana getirilmiştir. Eğilme çerçevesi, teraziye alınabilen ayaklara sahiptir. 40 ton yük altında sehim yapmayacak şekilde orta noktasından da desteklenmiştir. Eğilme çerçevesine entegre olarak Enerpac marka pompaya sahiptir. Bu pompa tek yönlü olup basınç kuvveti vermektedir. Pompaya kuvvet kas gücüyle verilmekte ve verilen değer yük hücresi yardımıyla bilgisayardan görülebilmektedir. Şekil 3.1'de eğilme çerçevesi ve pompası gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Eğilme Çerçevesi ve Pompası

3.1.2. Dijital veri kayıt cihazı (Data logger)

Çok kanallı dijital veri kayıt (Data Logger) sistemleri ile, DC-AC voltaj , DC akım, direnç, köprü (yük hücresi - load cell), basınç, nem, termistör, IC sıcaklık sensörleri, frekans, sayıcı ve dijital durum gibi birçok sinyal uzun süre kayıt altına alınabilir, eş zamanlı görüntülenebilir, uzaktan izlenebilir ve kontrol edilebilir [7]. Şekil 3.2’de gösterilen bu çalışmada kullanılmış dijital veri kayıt cihazı 8 kanallı olup; 3 kanalı ile sağ ve sol mesnetler ile orta noktadaki çökmeler, 1 kanalı ile uygulanan kuvvet ve 4 kanalı ile birim boy deformasyonlar kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.2. Dijital Veri Kayıt Cihazı

3.1.3. Yük hücresi (Load cell)

Yük hücreleri gerek endüstride gerekse laboratuvar çalışmalarında yük ölçümü için sıklıkla kullanılırlar. Silindir tipi yük hücreleri oldukça kalındırlar ve yüksek kapasiteli basma yüklerini ölçmek gerektiği durumlarda kullanılırlar. 100 ton ve 200

tonluk kapasitelerde olabilirler. Bu çalışmada kullanılan yük hücresi silindirik tipte, CAS marka ve 100 ton kapasitelidir [8].

Tipik uygulama alanları şöyle sıralanabilirler:

- a) Yüksek tonajlı basma yüklerinin olduğu durumlarda
- b) İnşaat, Makine, Maden, Metalürji, Jeoloji, Kimya Mühendisliği laboratuvarlarında statik deneylerde
- c) Arge laboratuvar deneylerinde
- d) Üretim ve depolama tesislerindeki her türlü ağırlık ölçümünde



Şekil 3.3. Yük Hücresi

3.1.4. LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

LVDT, 125 mikron ile 250 milimetre arasında lineer pozisyon değişimi ve boyut ölçümü uygulamalarında kullanılan lineer pozisyon sensörüdür. LVDT ölçüm

teknolojisinin en büyük avantajlarından biri uzun ömürlü olması, ağır sanayi ortamlarında yıllarca bozulmadan çalışabilmesidir.

Özellikle çok düşük deplasmanların önem kazandığı malzeme bilimi testlerinde, inşaat, makine, maden, metalürji, jeoloji, kimya mühendisliği laboratuvarlarında statik deneylerde, 1 mikrometreden daha düşük hassasiyetli ölçümlerde, arge laboratuvar deneylerinde, üretim tesislerinde üretim verilerinin aktarımı ve test odaları gibi yerlerde uygulama alanı bulurlar (Şekil 3.4).

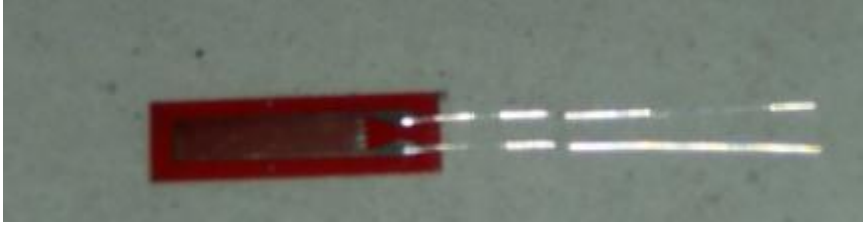


Şekil 3.4. LVDT

3.1.5. Strain gauge

Strain gaugeler, metalik iletkenlerin gerilmeye maruz bırakıldığında elektriksel dirençlerinin değişmesinden hareket eden prensibe sahiptirler. [9] Mesela tel, gerilmeye maruz bırakıldığında, çapının daralmasıyla birlikte boyunda uzama meydana gelir. Bu da telin iç direncini değiştirerek gerilme algılamasını büyütür. Temelde tüm strain gaugeler, mekanik hareketi, elektriksel işarete çevirmeye göre

dizayn edilirler. Strain gaugeler, kuvvet altındaki deformasyonu mekanik, optik, akustik, pnomatik ve elektriksel olarak 5 farklı şekilde ölçebilirken, bu çalışmada kullanılan strain gauge elektriksel tipte olmaktadır. Bu tip strain gaugeler, uygulanan yüke karşı elektriksel direnç üreterek iletkenin boyundaki mikroskobik değişimi ölçmektedir. Strain gaugeler, bu değişimi veri toplama birimine mV cinsinden vermekte, veri toplama yazılımı da, bu elektriksel değeri mm cinsine dönüştürmektedir. Bu çalışmada, 16 mm uzunluğunda ve 120 ohm direnç değerine sahip olan strain gaugeler kullanılmıştır. Şekil 3.5'te bu çalışmada kullanılan strain gaugenin resmi verilmiştir.



Şekil 3.5. Strain Gauge

3.2. Deney Numuneleri

Deneyde kullanılacak olan numuneler St37 çeliğinden imal edilmiş INP 120 profili olup, bir referans numunesi ve 4 ayrı numune olmak üzere toplam 5 tanedir. 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulacak olan numuneler, INP 120 profillerinin 3 katlı CFRP'nin, örgülü karbon lifli elyaflar için iki bileşenli epoksi esaslı doyumurma reçineleri ile kafa kafaya birleştirilmesinden oluşmuşlardır. Referans numunesi 1200 mm olmakla birlikte, diğer 4 numuneyi oluşturan her bir INP 120 profili 600 mm uzunluğundadır. Bu aynı tip iki profil CFRP ile birleştirilerek 1200 mm uzunluğunda kiriş elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kirişler 1200 mm uzunluğunda olup, CFRP'nin bağ uzunluğu toplamda 240 mm'den 480 mm'ye kadar, 80 mm'lik artışlarla değiştirilerek 4 adet numune elde edilmiş ve bunlar 1200 mm uzunluğundaki INP 120 profili ile kıyaslanılmışlardır. 4 ayrı numunede değişken olan özellik ise CFRP'nin numune üzerindeki toplam boyu olan L'dir. Tablo 3.1'de deneyde kullanılan numunelerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Numunelerin Özellikleri

Numune Adı	L (Toplam CFRP Boyu) (mm)	Numune Boyu (mm)	CFRP Kat Adedi
Referans	0	1200	0
L240	240		3
L320	320		3
L400	400		3
L480	480		3

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Numunelerin hazırlanmasına ilk önce INP 120 profilinin yüzey temizliği ile başlanmıştır. Örgülü karbon lifli elyaflar için iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinelerinin, CFRP ile çelik arasında aderansı sağlayabilmek için, yapıştırılacak kısımdaki çelik yüzeyinde yağ, kir, pas, boya gibi, aderansı olumsuz etkileyebilecek etmenlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bunun için ilk önce Şekil 3.6'da görüldüğü gibi ucunda çelik tel bulunan matkap yardımıyla, çelik yüzey parlatılmadan ve zarar verilmeden temizlenmiş, daha sonrasında da bu kısım Şekil 3.7'deki gibi selülozik tiner yardımıyla silinmiştir. Herhangi bir olumsuz etmen kalmayınca kadar bu işlem tekrarlanmıştır.



Şekil 3.6. Yüzeyin Tel Fırça ile Temizlenmesi



Şekil 3.7. Yüzeyin Tiner Yardımıyla Silinmesi

50 m'lik rulolar halinde satışa sunulan CFRP, liflerine zarar vermeyecek biçimde açılıp, koruyucu ambalajından çıkarılmıştır. İstenilen boyda, liflerinin doğrultusuna dik olacak biçimde önce cetvel yardımıyla işaretlenmiş ve daha sonra makas yardımıyla liflerin yapısının bozulmamasına dikkat edilerek kesilmiştir (şekil 3.8-9.).



şekil 3.8. CFRP'nin Rulosunun ve Ambalajının Açılması



Şekil 3.9. CFRP'nin İşaretlenip Kesilmesi

Örgülü karbon lifli elyaflar için iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesinin A bileşeni 3,73 kg, B bileşeni 1,27 kg'lık kutular halinde, karıştırma oranına uygun olarak 5 kg'lık set olarak satışa sunulmuştur. A bileşeni epoksi reçine iken, B bileşeni epoksi sertleştiricidir. Epoksi sertleştirici olan B bileşeni solunmamalıdır, çünkü zehirleyicidir. Bu iki bileşen karıştırıldığında hem endotermik hem de ekzotermik olan bir reaksiyon başlar. Bu yüzden iki bileşen karıştırıldığında en kısa sürede kullanılmalıdır. Ortam ne kadar sıcak olursa reaksiyonlar o kadar hızlı gerçekleşir. Bu nedenle yapıştırma işleminin oda sıcaklığında veya daha düşük sıcaklığa sahip ortamda (15-25 °C) gerçekleştirilmesi, iki bileşenin karıştırıldıktan sonra kullanılabilme süresini arttıracaktır. Karıştırıldıktan sonra yeni oluşan bileşen yayvan bir kaba dökülmelidir. Bu bileşeni uygulamak için kadife rulo gibi tüy bırakmayan ve dayanıklı rulolar kullanılmalıdır. Şekil 3.10-13'de bu çalışmada iki bileşenin karıştırılması sırasında yapılan işlemler gösterilmiştir.



Şekil 3.10. A ve B Bileşenleri



Şekil 3.11. Epoksi Yapıştırıcı Olan A Bileşeni



Şekil 3.12. Epoksi Sertleştirici Olan B Bileşeni



Şekil 3.13. İki Bileşenin Karıştırılması

Yüzey hazırlığı yapıldıktan, CFRP kesildikten ve özel yapıştırıcı hazırlandıktan sonra profillerin birleştirilmesine geçilmiştir. Profillerde işaretleme yapıldıktan sonra, örgülü karbon lifli elyaflar için iki bileşenli epoksi doyurma reçinesi yaklaşık 1 mm kalınlığında kadife rulo ile yerçekimin aksi yönde yani aşağıdan yukarıya doğru sürülür. CFRP, liflerinin çalışacağı doğrultuda yapıştırılır. Bu aşamada, CFRP ile yapışkanına, CFRP'nin lifleri doğrultusunda kuvvet uygulanarak yapıştırıcının tüm lifleri kaplaması sağlanır. Bu işlem yapılırken CFRP'nin liflerinin doğrultusuna dik veya ona yakın kuvvet kullanmamaya özen gösterilmelidir. Zaman geçirilmeden iki bileşenli doyurma reçinesi sürülür ve bu işlem 3. katın sonuna kadar tekrarlanır. Şekil 3.14-19'da bu çalışmada yapılan işlemler gösterilmiştir. Flanşların alt kısımları yağlanmış çita parçaları ile sıkıştırılması yapıştırıcının kıvamını almasına kadar geçecek sürede CFRP'nin sarkmasını önleyecektir.



Şekil 3.14. Yapıştırma Alanının Belirlenmesi



Şekil 3.15. İki Bileşenli Epoksi Esaslı Doyurma Reçinesinin Sürülmesi



Şekil 3.16. CFRP'nin Yapıştırılması



Şekil 3.17. İkinci Kat Yapıştırıcının Sürülmesi



Şekil 3.18. İkinci Kat CFRP'nin Yapıştırılması

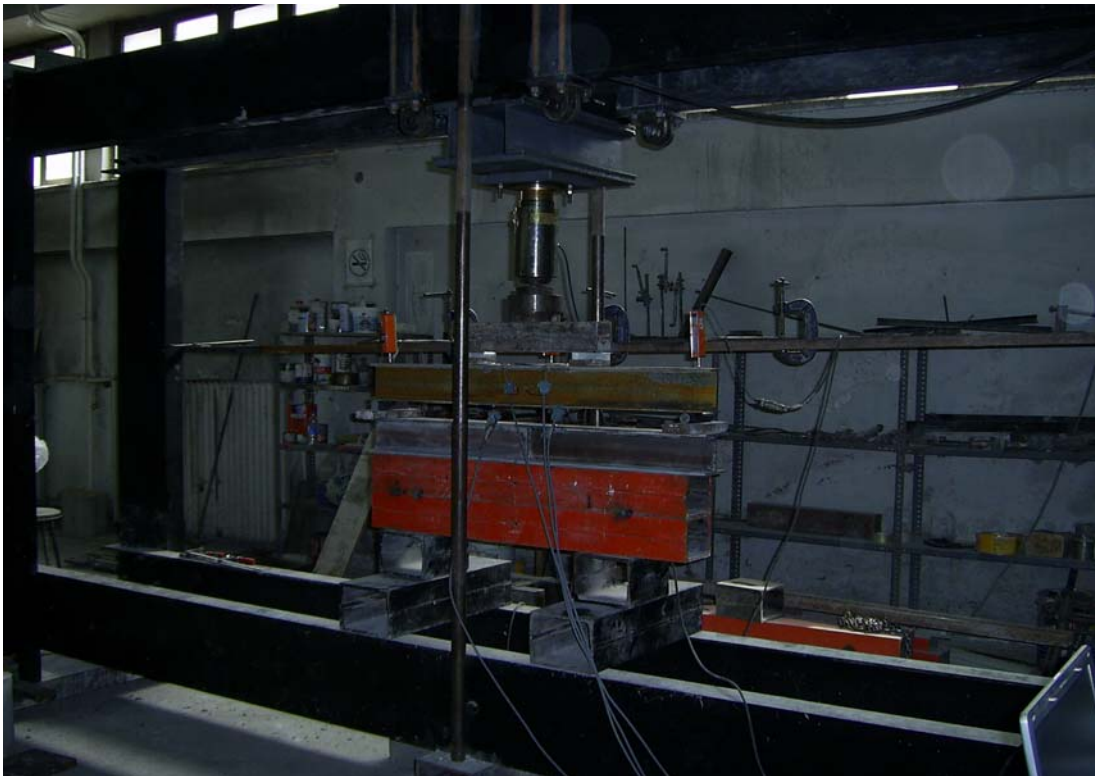
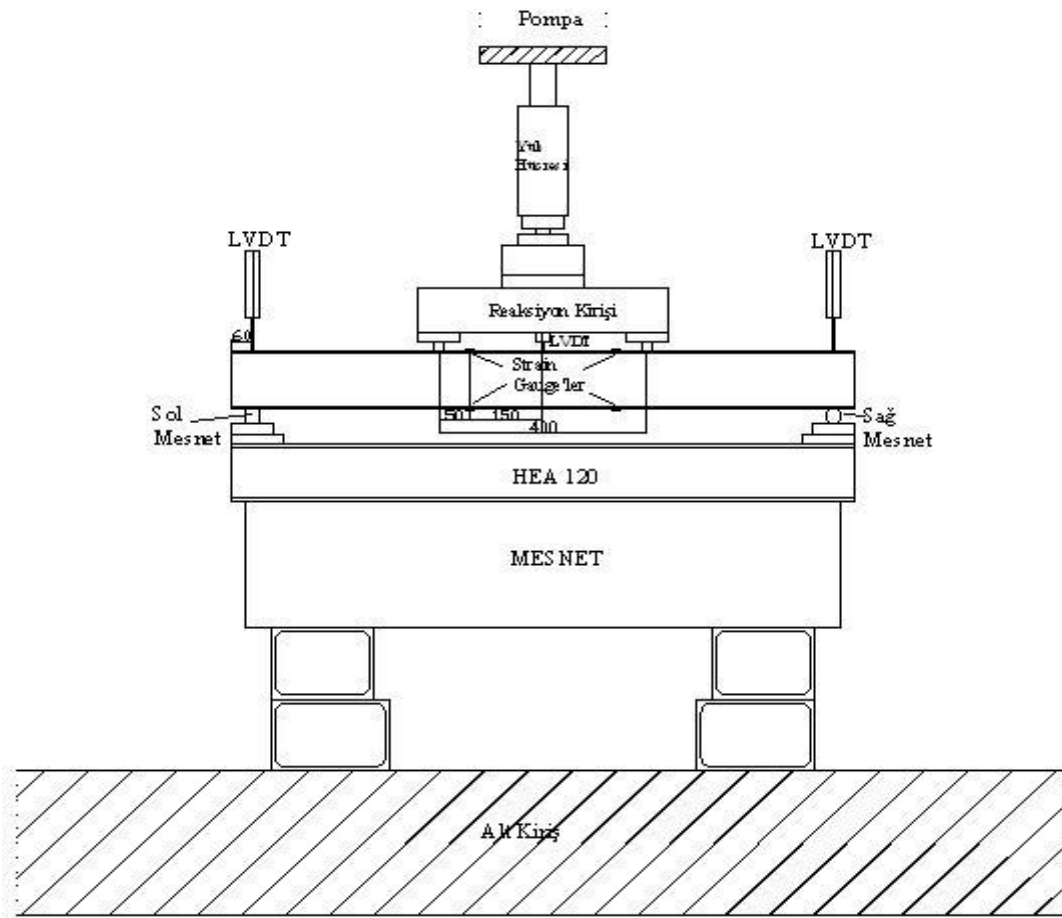


Şekil 3.19. Birleştirilmiş Numune

Bu çalışmada kullanılan örgülü karbon lifli elyaflar için iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesi, tam mukavemetini $+23^{\circ}\text{C}$ 'de 7 günde almaktadır. Bu süre ortam sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda daha da kısaltılmakta, düşük olduğu durumlarda ise daha da artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan numuneler deney gününe kadar 16 gün beklemişlerdir.

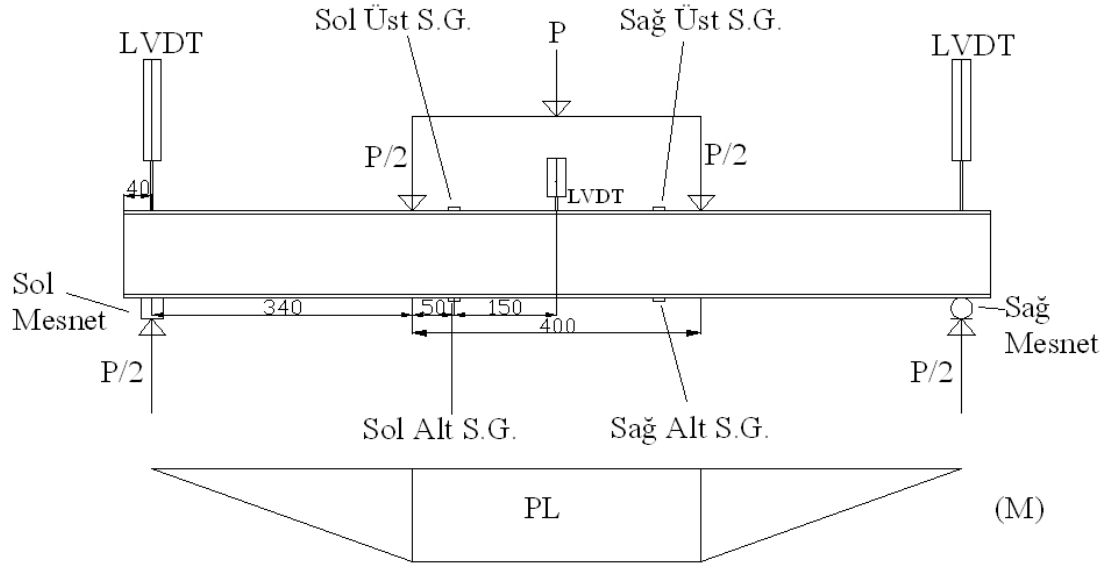
3.4. Deney Düzenegi

Şekil 3.20'de, hazırlanan deney düzenegi gösterilmiştir. Mesnet araları 1080 mm., reaksiyon kirişi mesnet açıklığı 400 mm.'dir. Sol ve sağ mesnetlerin akslarının üzerlerinde bulunan LVDT'lerin kiriş başından ve sonundan olan mesafeleri, mesnetlerinin mesafeleri ile eşit olup 60 mm'dir. Strain gaugeler maksimum momentin en yüksek olduğu kısımda ve yükün etkidiği noktalardan 50'şer mm. içeridedir. Orta nokta deplasmanını ölçen LVDT kirişin tam orta noktasına konulmuştur.



Şekil 3.20. Deney Düzenegi

3.5. Deneý Düzenegini Oluřturan Elemanlar



Őekil 3.21. Deneý Düzenegini Oluřturan Elemanlar

Őekil 3.21. 'de deneý düzenegini oluşturan elemanlar gsterilmiştir. Dört noktalı eğilme deneýinde, pompanın uyguladığı P kuvveti, reaksiyon kirişinin alt yüzünde bulunan mesnetler vasıtasıyla, deneýi geręekleřtirilen kirişe $P/2$ 'lik eřit kuvvetler uygulamaktadır. Kiriřin sol ve saę mesnetlerinde reaksiyon kuvveti olarak yine eřit $P/2$ kuvvetleri oluşmaktadır. Bu çalışmada, moment-dönme diyagramı ile kuvvet-net orta nokta deplasmanı diyagramlarının çizilmesi hedeflendiğinden ilk önce orta noktadaki deplasmanı ölçmek için, orta noktaya LVDT konulmuştur. Saę ve sol mesnetteki deplasmanlar ise, herhangi bir burulma sonucu oluşacak hataları ortadan kaldırmak amacıyla konulmuşlardır. Deneý sırasında bu mesnetlerde herhangi ölçümler kaydedilirse, bu iki mesnet değerinin ortalaması, orta nokta deplasmanında okunan değerden çıkarılarak kalibrasyon yapılmış olunacaktır.

Moment-dönme diyagramının çizilmesi aşamasında, öncelikle dönmeleri hesaplayabilmek için, momentin maksimum olduğu kısma strain gaugeler yerleştirilmiştir. Üst başlığa ve alt başlığa, reaksiyon kirişinden $P/2$ 'lik kuvvetlerin etkidiği noktadan 50 mm. mesafeye yerleştirilen strain gaugeler, kontrol amaçlı olarak simetrik olarak da yerleştirilmişlerdir. Bu üst ve alt başlığa yerleştirilen strain gaugelerden elde edilen değerler kullanılarak dönme miktarı hesaplanacaktır.

3.6. DeneY Düzeneğinin Hazırlanması

DeneY düzeneğinin hazırlanmasına mesnetlerin yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Mesnetlerden biri kayıcı, biri de sabit mesnet olarak belirlenmiş ve yerleştirilmiştir. İki mesnet arasındaki net açıklık 1080 mm'dir (şekil 3.22).



şekil 3.22. Mesnetlerin Yerleştirilmesi

Mesnetlerin yerleştirilmesinden sonra, orta nokta çökmelerini okuyabilmek amacıyla kirişlerin orta noktalarına epoksi esaslı yapıştırıcı yardımıyla aparatlar yapıştırılmıştır. Bu aparatlara LVDT yerleştirilerek orta noktadaki deplasman ölçülebilmıştir (şekil 3.23).



Şekil 3.23. Orta Noktalara Aparatların Yerleştirilmesi

Eğilme çerçevesi ve aparatlarla ilgili hazırlıklar tamamlandıktan sonra strain gaugelerin montajına geçilmiştir. İlk önce strain gaugeler ambalajlarından çıkarılmış ve uçları Şekil 3.24’te gösterildiği gibi iki bakır kabloya lehimlenmiştir. Bundaki amaç, strain gaugelerle veri toplama biriminin iletişimini sağlayan ve aynı zamanda Wheatstone Köprüsünü tamamlayan kabloya bağlantısını sağlamaktır.



Şekil 3.24. Strain Gaugelerin Lehimlenmesi

Numunelerin üzerine strain gaugelerin yapıştırılacağı kısımlar, iki noktadan yükün etki edeceği bölümler, orta nokta ile sağ ve sol mesnetlerde ölçüm alınacak yerler işaretlenmiştir. Bu işlemi takiben strain gaugeler belirlenen yerlere yapıştırılmış ve yapıştırıldıktan sonra çalışıp çalışmadıkları avometre yardımıyla kontrol edilmiştir.

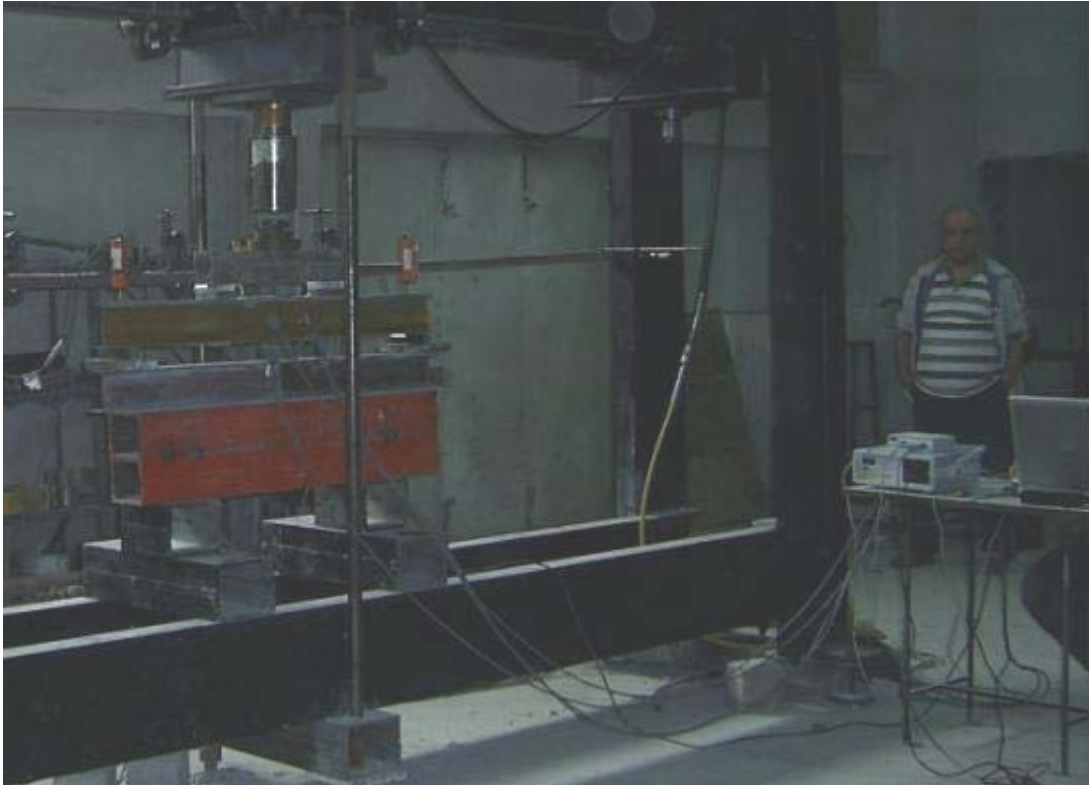
Tüm bu işlemler sonucunda eğilme çerçevesine koyulmaya hazır hale getirilen numuneler Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Deneye Hazır Numuneler

Eğilme çerçevesine yerleştirilen numunelerin üst başlıklarına reaksiyon kirişinden yükün etkiyeceği kısımlara biri hareketli biri sabit olmak üzere, iki dolu gövdeli kesite sahip eleman yerleştirilmiştir. Bu elemanların üzerine reaksiyon kirişi yerleştirilmiş ve yük hücresi ile reaksiyon kirişi arasına dairesel ve mafsallı aparatlar

yerleştirilerek düzenek hazır hale getirilmiştir. Sağ ve sol mesnetlerdeki düşey deplasmanı ölçmek için, mesnetlerin eksenlerine dik doğrultuda, numunelerin üst başlıklarına LVDT'ler yerleştirilmiştir. Orta noktadaki düşey deplasmanı ölçmek için de, yapılan aparata LVDT'nin ucu yerleştirilmiştir. Yük hücresi, sağ, sol ve orta noktadaki düşey deplasmanı ölçen LVDT'ler, 4 noktada bulunan strain gaugeler, veri toplama birimine özel kabloları vasıtasıyla bağlanmıştır. Veri toplama birimi, veri toplama yazılımıyla entegre hale getirilmiş, sistem çalıştırılmış, kontroller yapılarak deneye hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.26'da deneye hazır hale getirilen düzeneğin resmi verilmiştir.



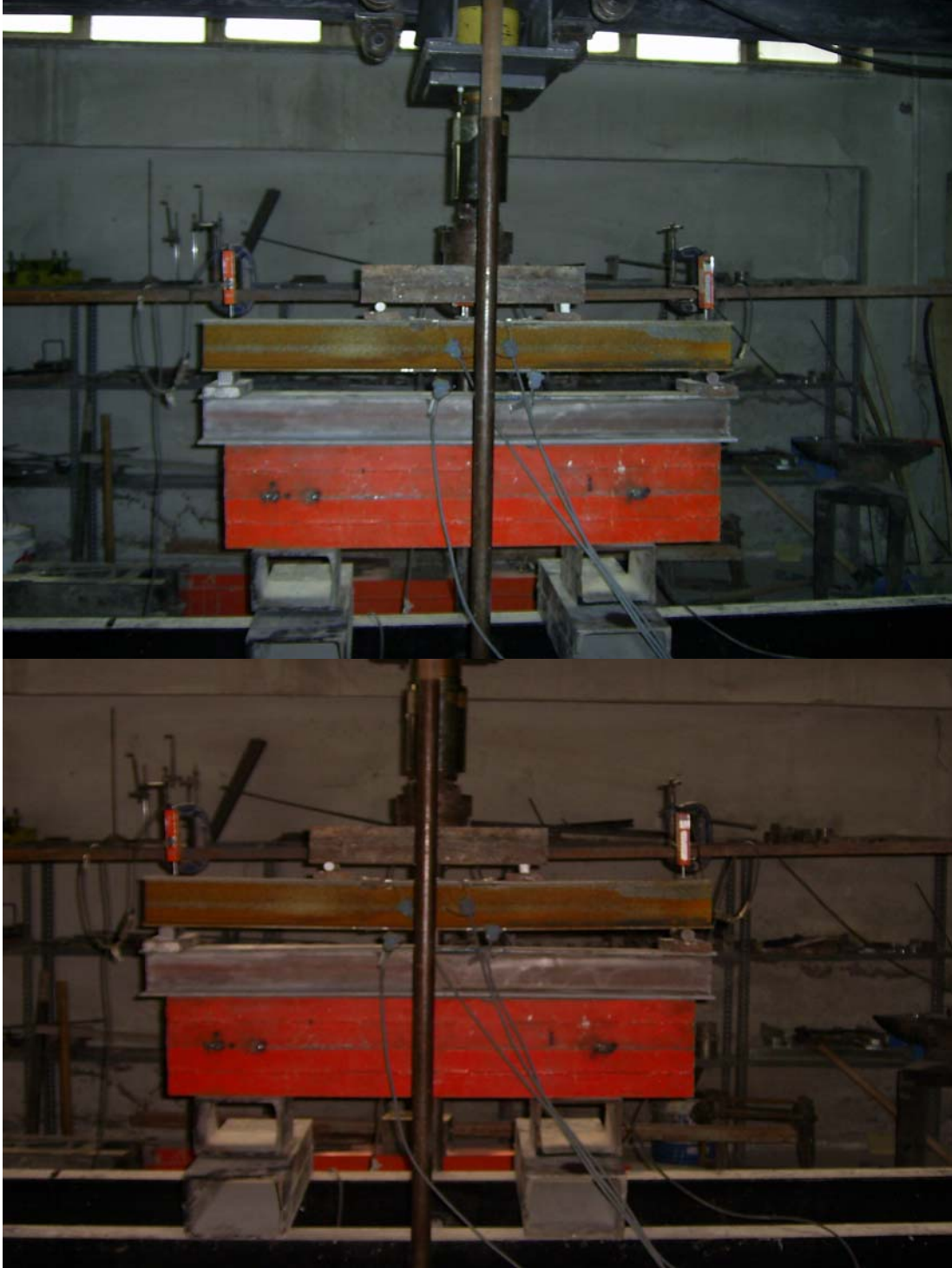
Şekil 3.26. Deneye Hazır Düzenek

3.7. Deneyin Yapılması ve Sonuç Grafikleri

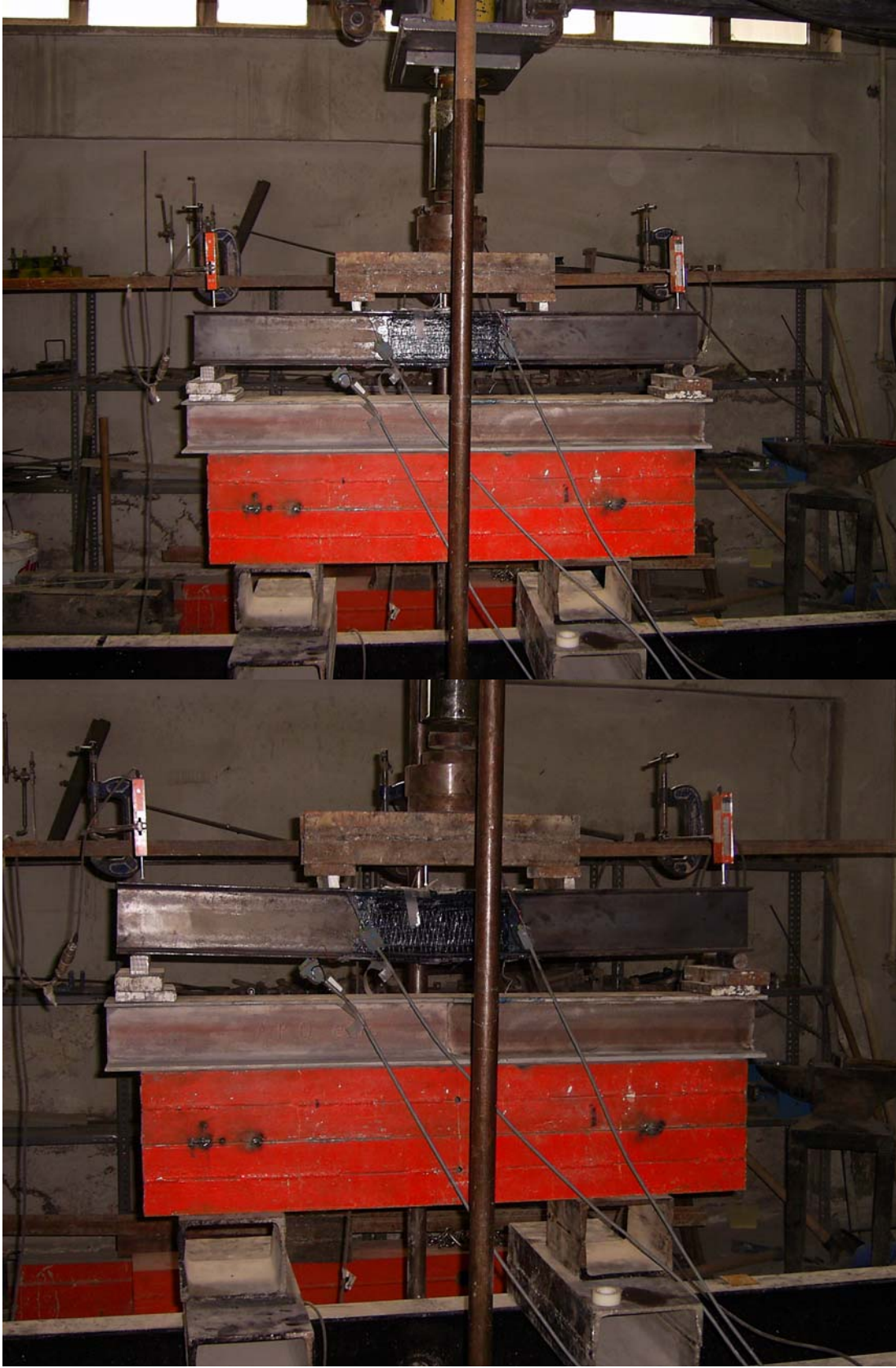
3.7.1. Deneyin yapılması

Yukarıda tanımlanan hazırlıklardan sonra deneyin yapılmasına geçilmiştir. Veri toplama sistemi, sistemin dengeye ulaşması için 30 dakika süresince çalıştırılmıştır.

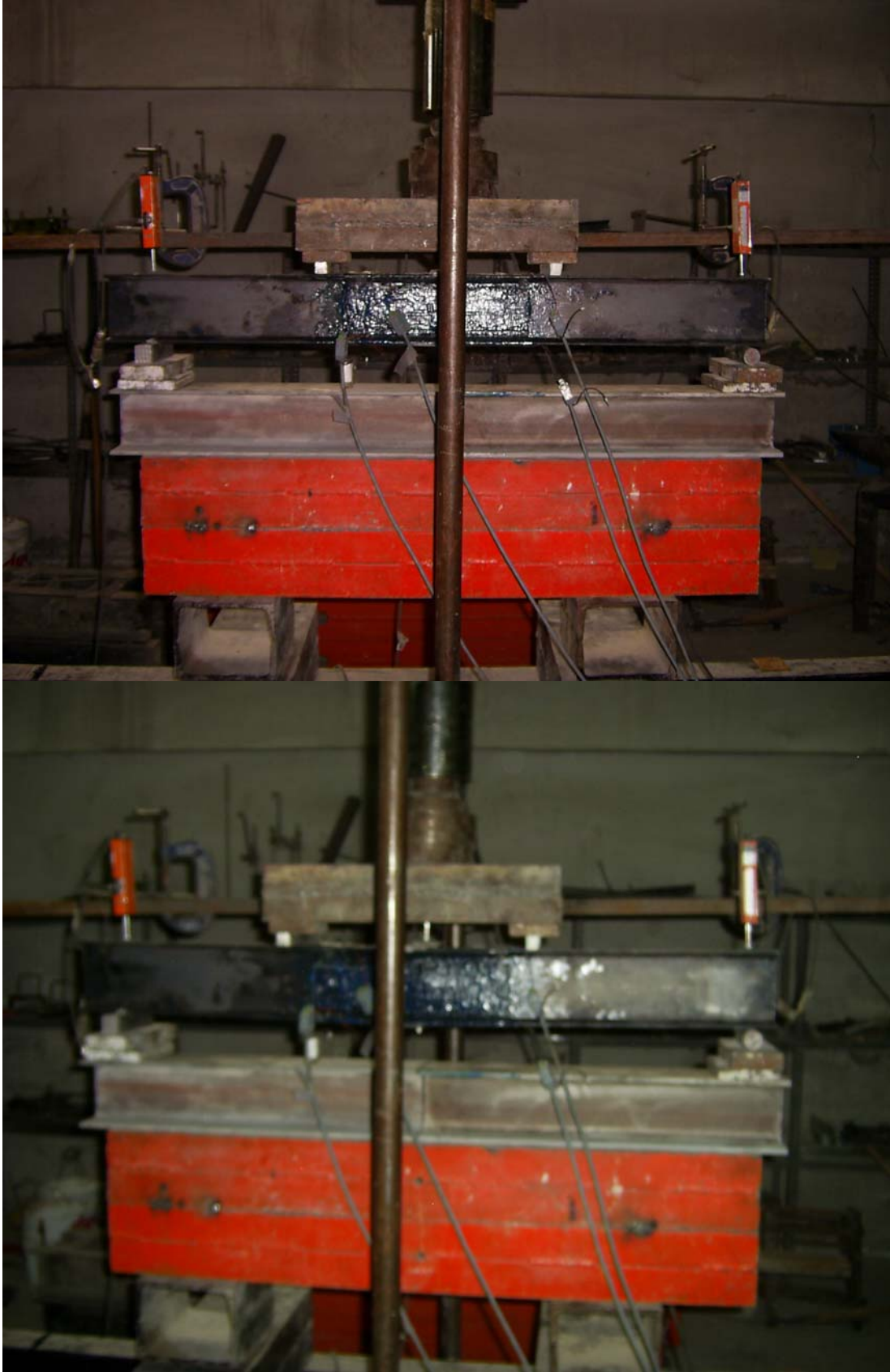
Daha sonra deney, referans kirişinden başlanarak, sırasıyla L240, L320, L400 ve L480 kirişleriyle yapılmıştır. Yükleme elle, sabit hızla yapılmış ve veri toplama sistemiyle saniyede 8 okuma alınarak grafikler oluşturulmuştur. Aşağıda her bir kiriş numunesinin, deney öncesi ile deney sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.27. Deney Öncesi ve Sonrası Referans Kirişi



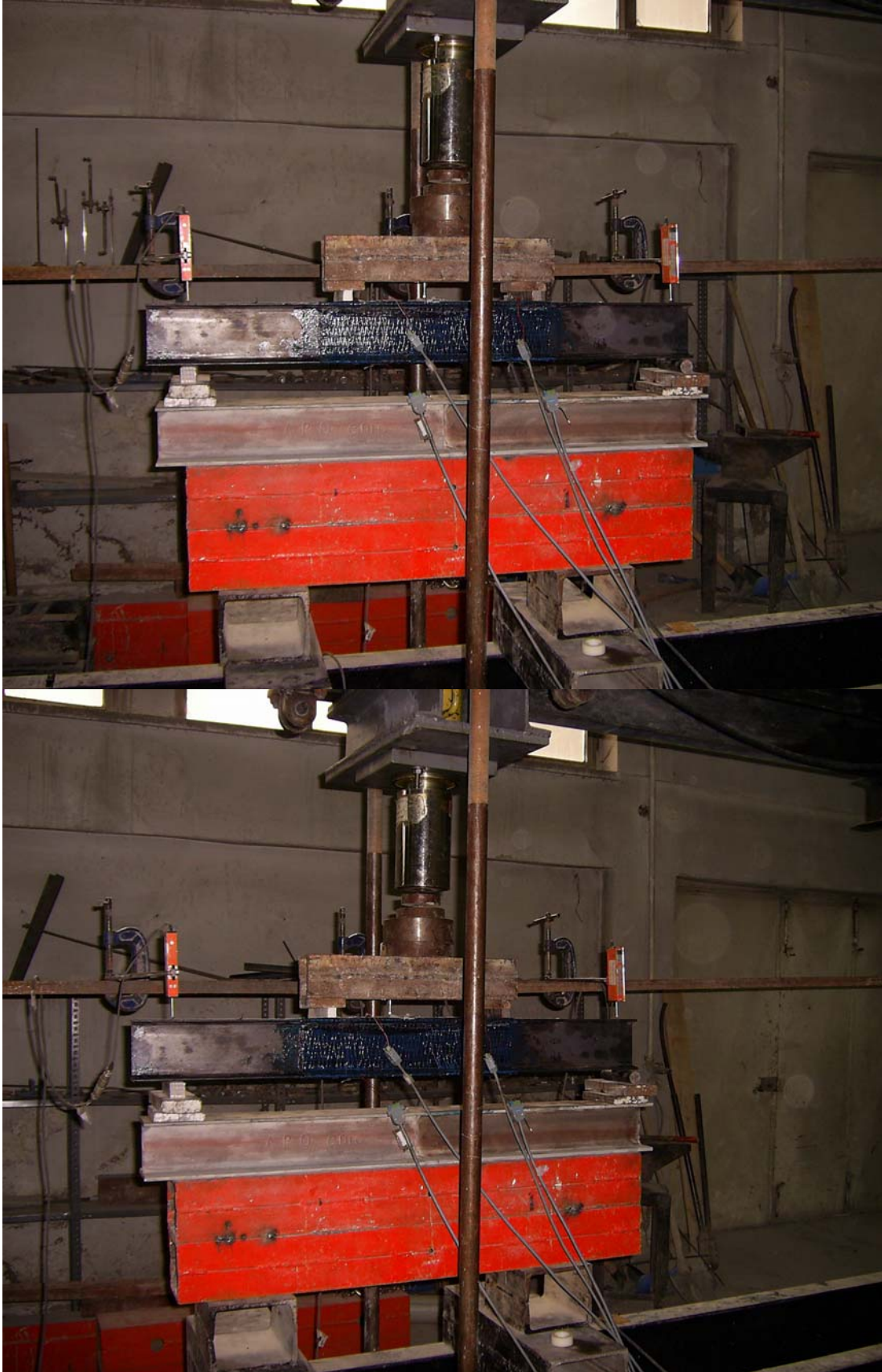
Şekil 3.28. Deney Öncesi ve Sonrası L240 Numunesi



Şekil 3.29. Deney Öncesi ve Sonrası L320 Numunesi



Şekil 3.30. Deney Öncesi ve Sonrası L40 Numunesi



Şekil 3.31. Deney Öncesi ve Sonrası L480 Numunesi

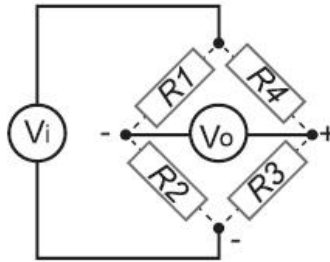
3.7.2. Sonuçlar

Veri toplama sisteminden elde edilen ham veriler yükü, sol, sağ ve orta nokta deplasmanını ve sağ alt/st ile sol alt/st strain değerlerini göstermektedir. Öncelikle bu ham verilerin kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir.

Öncelikle, uygulanan yükün (P), reaksiyon kuvvetleri olan kuvvetlere ($P/2$) dnstrlmesi için yarısının alınması gerekmektedir. Moment hesaplamalarında kullanılacak bu reaksiyon kuvvetleri ($P/2$) her bir okuma için hesaplanmıştır. Bu kuvvetlere, başlangıç anında veri toplama biriminin kaydettiği değer ilave edilerek düzeltilmişlerdir. Veri toplama biriminin kaydettiği veriler de kN cinsindedir.

“Kuvvet-Net Orta Nokta Deplasmanı” grafiklerinin çizilmesi için net orta nokta deplasmanının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için, deney süresince sol ve sağ mesnetlerde meydana gelen dönmeler sonucu oluşan, kme değerlerinin ortalaması $((\text{Sol mesnet kmesi} + \text{Sağ mesnet kmesi}) / 2)$ hesaplanmalı ve bu değer, orta noktadaki deplasmandan çıkarılmalıdır. Veri toplama birimi olan LVDT’lerden gelen verilerin birimi mm olduğu için, hesaplanan değerler grafiklerde direk kullanılabilir.

Veri toplama birimlerinden olan strain gaugelerden gelen verilerin birimi mV’tur. Bu verileri, formüllerde kullanabilmek için birimsiz gerilme değerine dnstrlmesi gerekir. Mikro düzeyde gerilimleri olebilmek için strain gaugeler, wheatstone köprüsü (şekil 3.32) olarak adlandırılan prensipten yararlanırlar. Bu köprü, dört dirençten oluşur ve bu bir V_i gerilimi ile uyarılır.

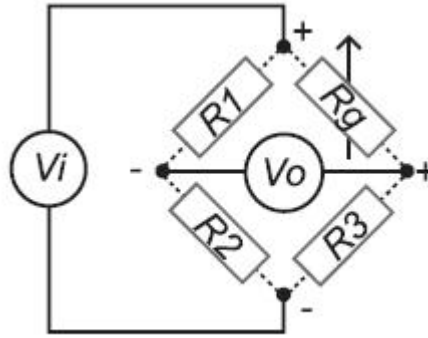


şekil 3.32. Wheatstone Köprüsü

Köprünün orta bacakları arasındaki gerilim farkı V_0 aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir:

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3+R_4} - \frac{R_2}{R_1+R_2} \right] \times V_i$$

Eğer $R_1/R_2 = R_3/R_4$ olursa V_0 gerilimi 0 olur. Bu halde köprü dengededir. Eğer dengelenmiş bir köprünün herhangi bir bacağına direnç değişimi olursa köprü dengesi bozulur ve direnç değişimiyle orantılı olarak bir gerilim farkı oluşur. Şekil 3.33'deki köprünün R_4 yerine bir strain gauge takılır ve $R_1=R_2$, $R_3=R_g$ olacak şekilde direnç değerleri değiştirilirse, köprü çıkışında gerilimle doğru orantılı bir gerilim farkı elde edilir.



Şekil 3.33. Strain Gaugeli Wheatstone Köprüsü

R_g değerindeki strain gaugenin direnç değişimi $\Delta R = R_g \times GF \times \epsilon$ olacaktır. Buna göre çeyrek köprü bağlanmış strain gaugenin çıkışta oluşturacağı gerilim farkı gerilim cinsinden yazılırsa aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$V_0 = - \frac{GF \times \epsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \times \frac{\epsilon}{2}} \right) \times V_i \text{ (volt)}$$

Ayrıca, köprü çıkışı bir fark yükseltici devresiyle yükseltirse, mV mertebesinde olan köprü çıkış gerilimi Volt mertebesine yükseltilmiş olur. Bu durumda yukarıdaki

denkleme bir de analog sinyal işleme devresinden gelecek kazanç faktörünü eklemek (GAIN) gerekir. Bu halde yeni formül aşağıdaki gibi olur:

$$V_o = - \frac{GF \times \epsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \times \frac{\epsilon}{2}} \right) \times V_i \times GAIN(\text{volt})$$

Birçok mühendislik ölçümü çalışmasında kalibrasyon ve referans alma zorunluluğu olduğu için tek strain gaugeden gelen bilginin doğru olarak gerinim bilgisine çevrilebilmesi için strain gaugenin gerinim oranı (GF), köprü ikaz gerilimi (V_i) ve analog sinyal işleme devresi kazanç faktörünün tam olarak bilinmesi gerekir. Tipik olarak $GF=2$, $V_i = 5 \text{ V}$ ve $GAIN = 500$ alınırsa aşağıdaki formül elde edilir:

$$V_o = - 1250 \left(\frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \right) (\text{volt})$$

Bu sayede çıkış voltajı ölçülerek, herhangi bir kalibrasyon yapılmaksızın strain gauge üzerindeki gerinim hesaplanabilir. Yukarıdaki denklemden elde edilen gerinim değerini $\mu\epsilon$ cinsinden elde etmek için sonucu 1×10^6 ile çarpmak gerekir [10]. Deney sırasında strain gaugelerden elde edilen mV cinsinden değerleri aşağıdaki son şekli elde edilmiş formül yardımıyla kullanabileceğimiz değerlere çevirmiş oluruz.

$$\epsilon = \frac{V/1000}{V/1000 + 1250}$$

3.7.3. Sonuç grafikleri

Sonuçlar “Kuvvet – Net Orta Nokta Deplasmanı” grafiği ve “Moment – Dönme” grafiği olmak üzere iki tip grafikte, her bir numune için verilmiştir.

Kuvvet- Net Orta Nokta Deplasmanı grafiği elde edilip kalibre edilmiş uygulanan yük ve net orta nokta deplasmanı değerlerinden yararlanılarak çizilmiştir.

Moment – Dönme grafiğinin çizilmesine geçilmeden önce moment dönme kapasitesi tanımlanmalıdır. Moment dönme kapasitesi [11], yani dönme kapasitesi, burkulmadan önce kesit içindeki şekil değıştirme kapasitesini ölçen bir metottur [12]. Literatürde dönme kapasitesi ile ilgili değışik tanımlar vardır.

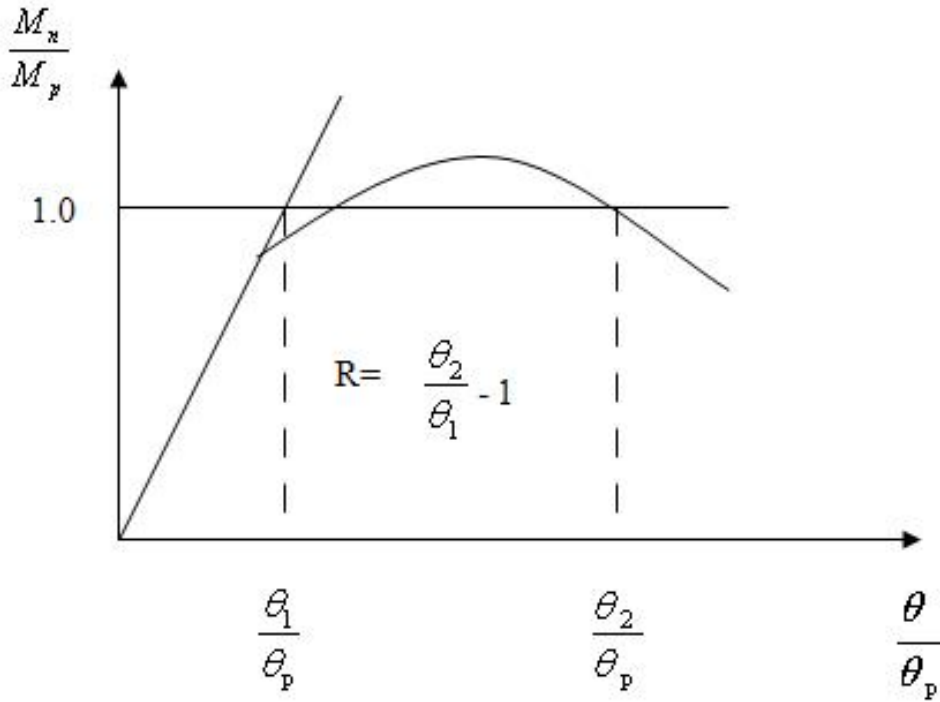
Lay ve Galambos ' a göre [13] dönme kapasitesi $R_h = \Theta_h / \Theta_p$ eşitliğıyle tanımlanır. Burada Θ_p , esnek moment M_p 'nin ilk elde edildiğı elastik dönmedir. Ve Θ_h ise momentin M_p 'ye yaklaştığı noktadaki esnek dönmedir.

Kemp [14] rotasyon kapasitesine $R_{hm} = \Theta_{hm} / \Theta_p$ şeklinde alternatif bir tanım önermiştir. Burada Θ_{hm} esnek momentin moment dönme eğrisinde maksimum momente sahip olduğu noktadır. Kemp bu tanımı, açılma aralığında dönmeyi doğru olarak ölçmekteki güçlüklerden dolayı önermiştir.

ASCE [15] tarafından hazırlanan ve günümüzde benimsenen tanıma göre dönme kapasitesi: $R = (\Theta_2 / \Theta_1) - 1$ şeklindedir. Burada Θ_2 moment kapasitesi M_p 'nin;

$M - (\Theta / \Theta_p)$ çizimindeki, açılma anındaki değıerine yaklaştığındaki moment kapasitesidir ve Θ_1 elastik eğilmez kirişte tam esnek kapasiteli teorik dönmedir.

Bu sünek tepki ölçümü, şekilde grafiksel olarak açıklanmıştır. Sismik olmayan çelik inşa parçalarında $R=3$ değıeri uygun yapısal süneklik değıeridir (AISC 1999) .

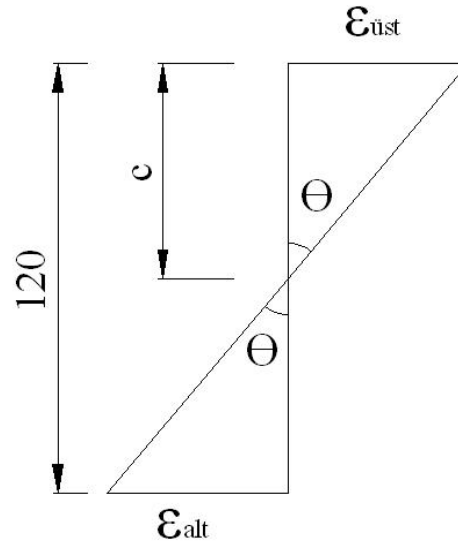


Şekil 3.34. Dönme Kapasitesi

Bu grafiğin çizilebilmesi için öncelikle Şekil 3.21’de gösterildiği gibi sabit moment kolu ile (340 mm) kesme kuvveti çarpılıp moment ($M = P/2 \times 340$) her bir okuma için hesaplanmıştır.

Deneyde kullanılan kiriş numunelerinin hepsinin yüksekliği birbirine eşit ve 120 mm’dir. Ancak dönme hesaplanırken hassas ve doğru işlem yapmak adına, deney süresince kirişteki deformasyondan dolayı tarafsız eksenin yeri değiştiğinden bir formüle bağlamak gerekmektedir. Bu da Şekil 3.35’te gösterilen üçgenlerin benzerliğinden şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\frac{c}{\varepsilon_{alt}} = \frac{120}{\varepsilon_{alt} + \varepsilon_{ust}}$$



Şekil 3.35. Üçgen Benzerliği

Buradan c;

$$c = \frac{120 \times \varepsilon_{ust}}{\varepsilon_{ust} + \varepsilon_{alt}}$$

olarak bulunur. Paydadaki değerler, mutlak değerleri alınarak toplanmıştır. Tarafsız eksene olan mesafe bulunduktan sonra, dönme miktarı olan θ 'nın tanjantı, yine yukarıdaki üçgenden yararlanılarak şu formülle bulunabilir:

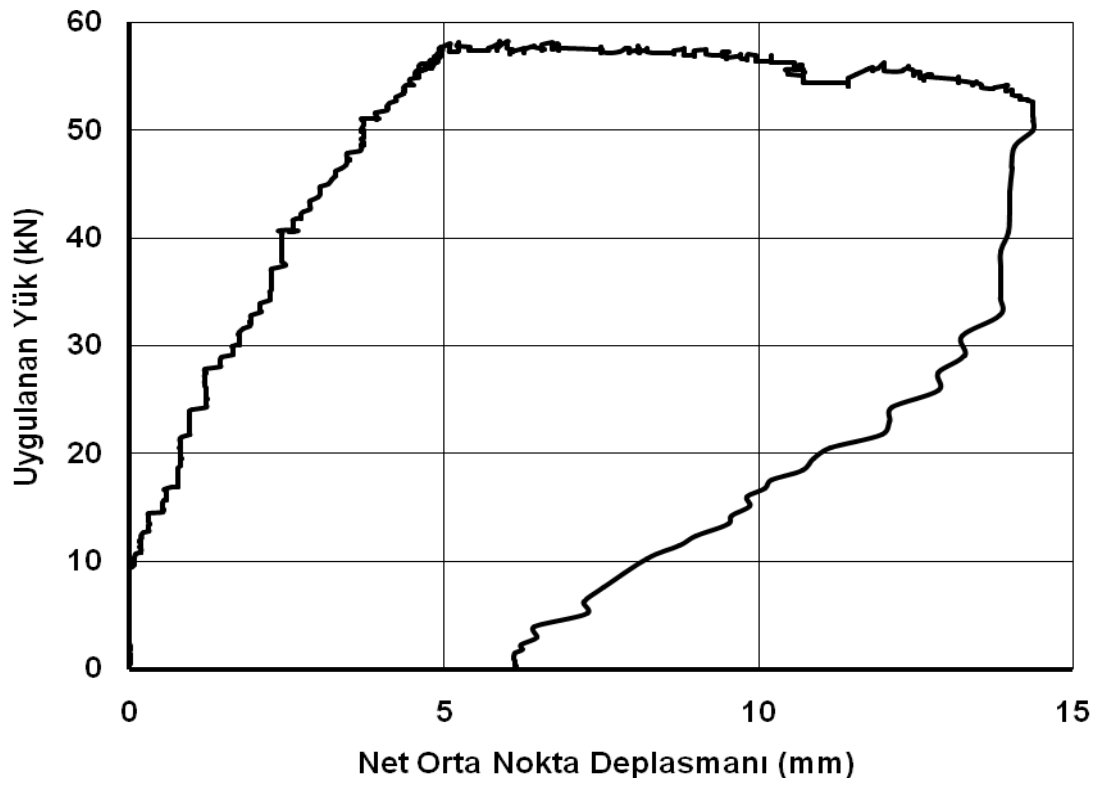
$$\tan \theta = \frac{\varepsilon_{ust}}{c}$$

Bu değer arctanjantı alınarak da radyan cinsinden açı değeri bulunmuş olur. Kontrol amaçlı için de strain gauge değerlerinin alt ve üst ile sağ ve sol değerleri kullanılmış ve karşılaştırılmışlardır.

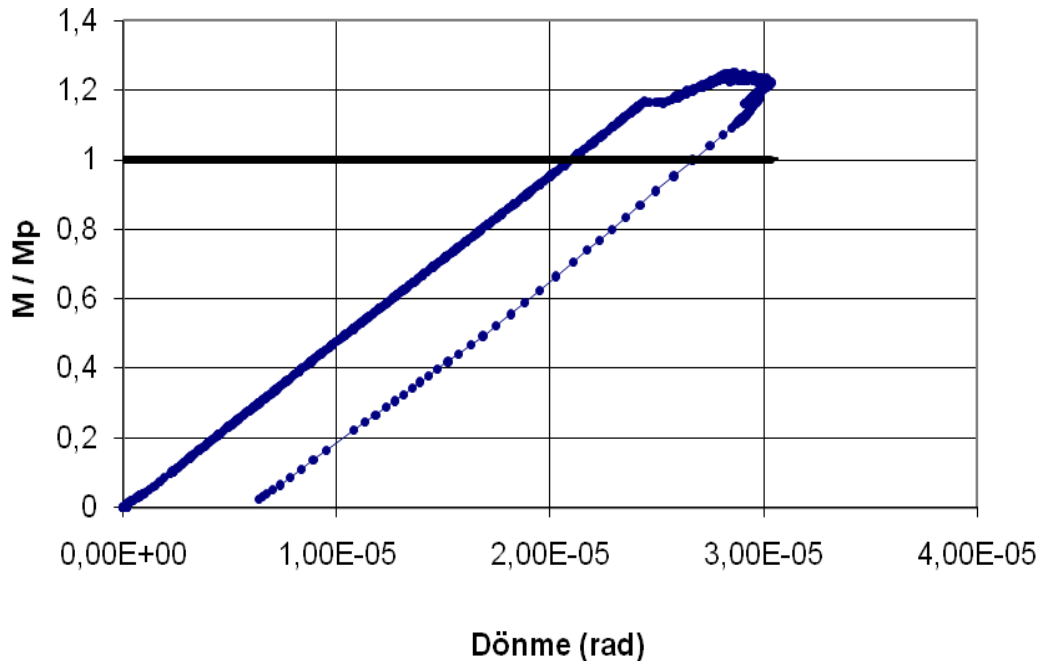
Moment – Dönme grafiğinin çizilebilmesi için son olarak plastik moment değeri M_p 'nin hesaplanması gerekmektedir. Bu ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$M_p = W_{pl} \times F_y = 63,6 \text{ cm}^3 \times 2,4 \text{ t/cm}^2 = 152 \text{ tcm} = 14,896 \text{ kNm}$$

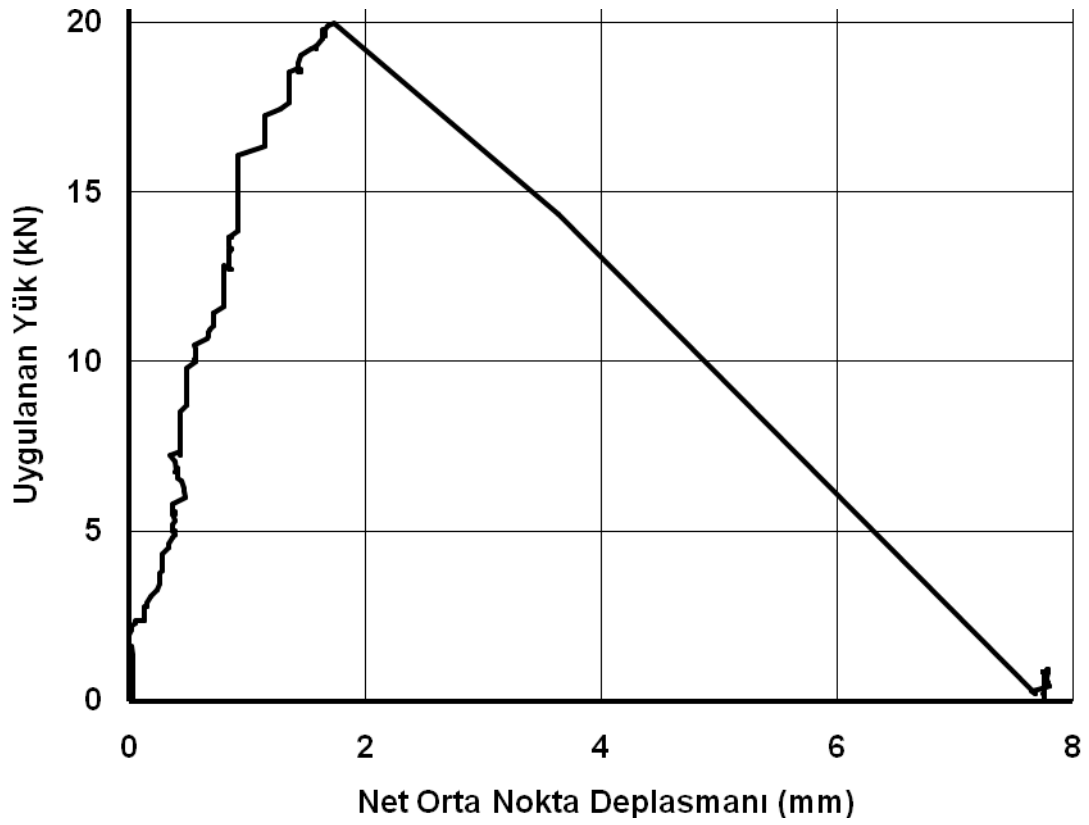
$M/M_p = 1$ olduğu noktalar oluşturulan grafiklerde gösterilmiştir. Bu doğrunun eğriyi kestiği ilk nokta θ_1 ve ikinci nokta θ_2 olmuştur. Bu değerler kullanılarak dönme kapasitesi değeri hesaplanmıştır. Aşağıda her bir numune için grafikler verilmiştir.



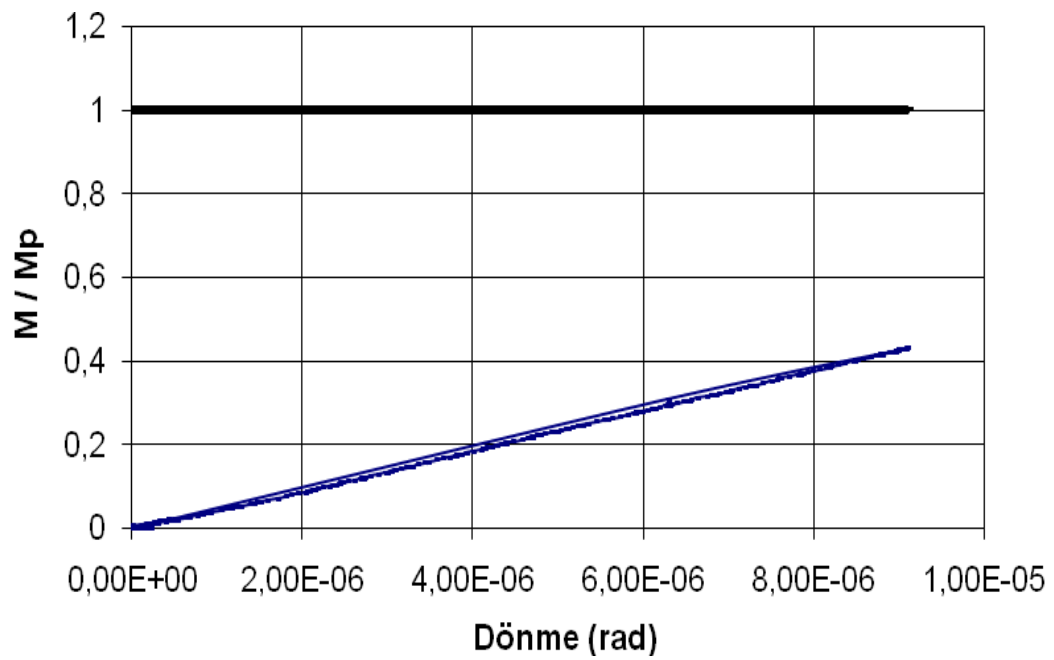
Şekil 3.36. Referans Kirişinin Uygulanan Yük-Net Orta Nokta Deplasmanı Grafiği



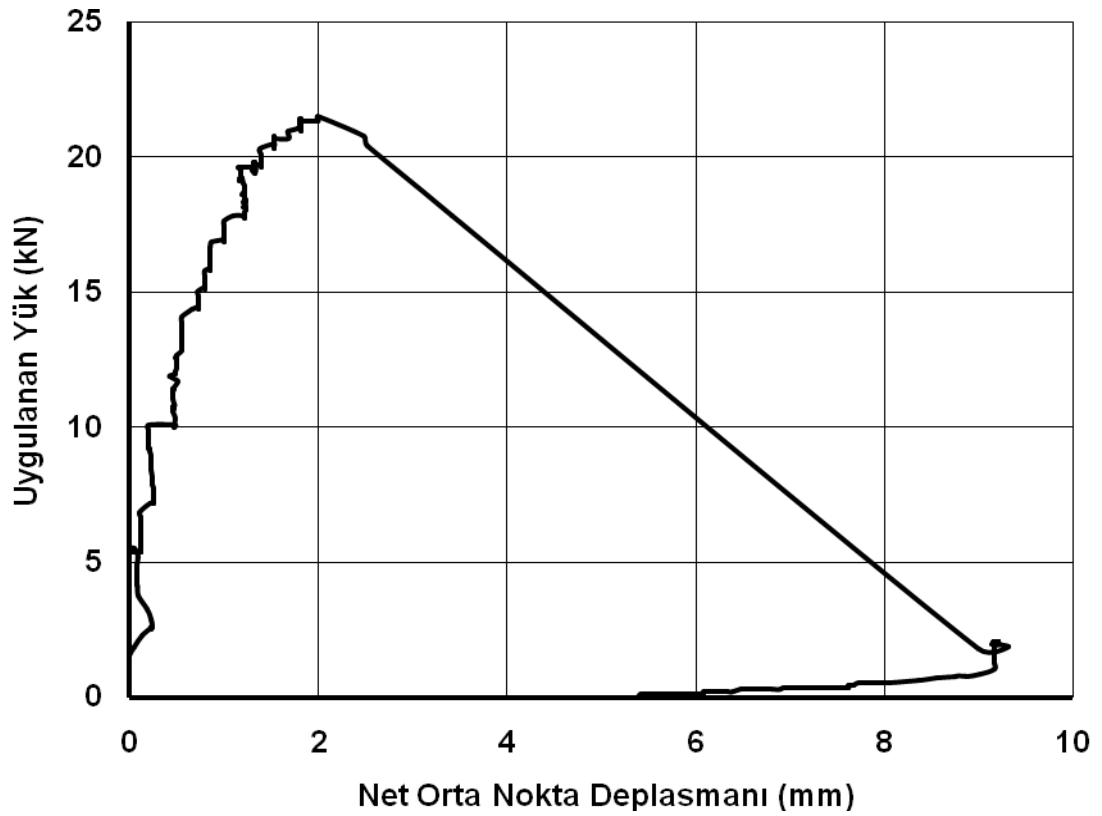
Şekil 3.37. Referans Kirişinin M/Mp – Dönme Grafiği



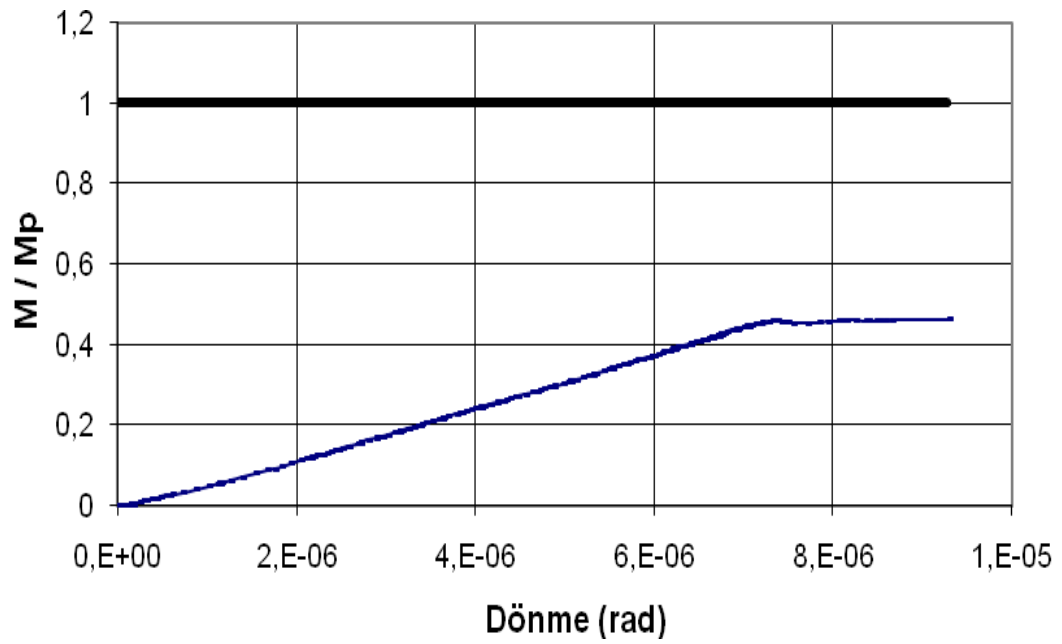
Şekil 3.38. L240 Kirişinin Uygulanan Yük-Net Orta Nokta Deplasmanı Grafiği



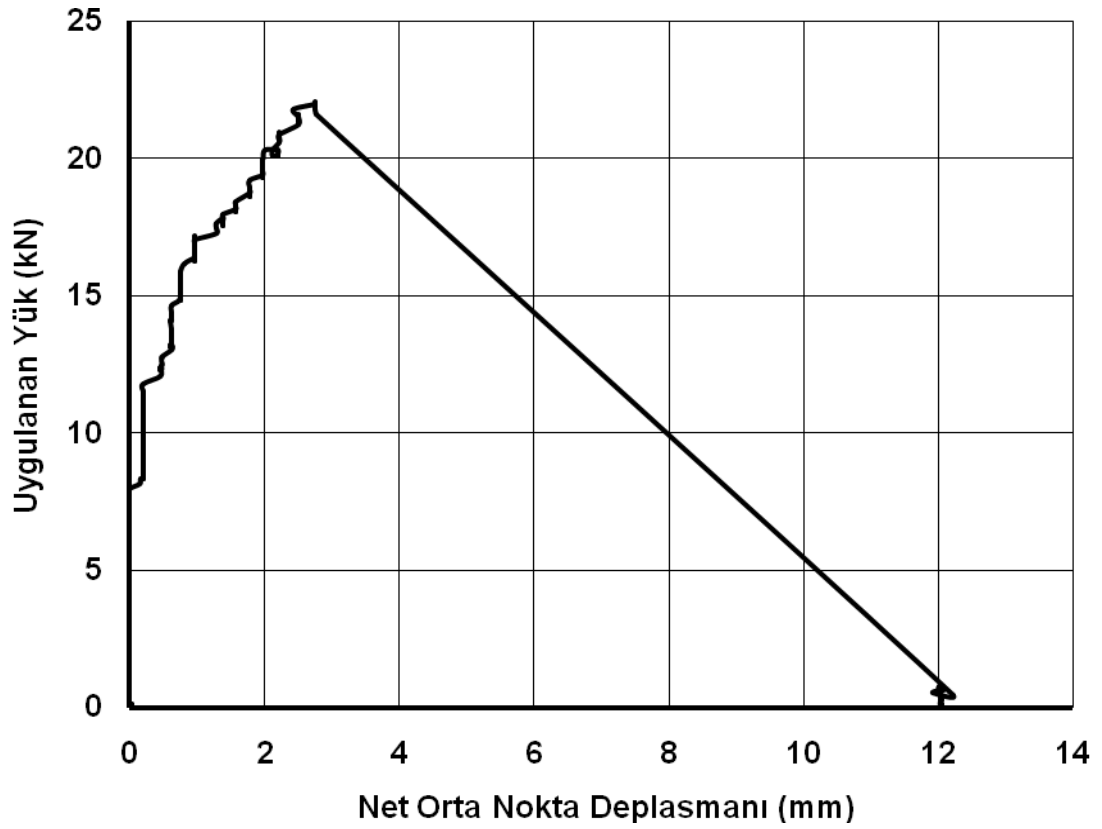
Şekil 3.39. L240 Kirişinin M/Mp – Dönme Grafiği



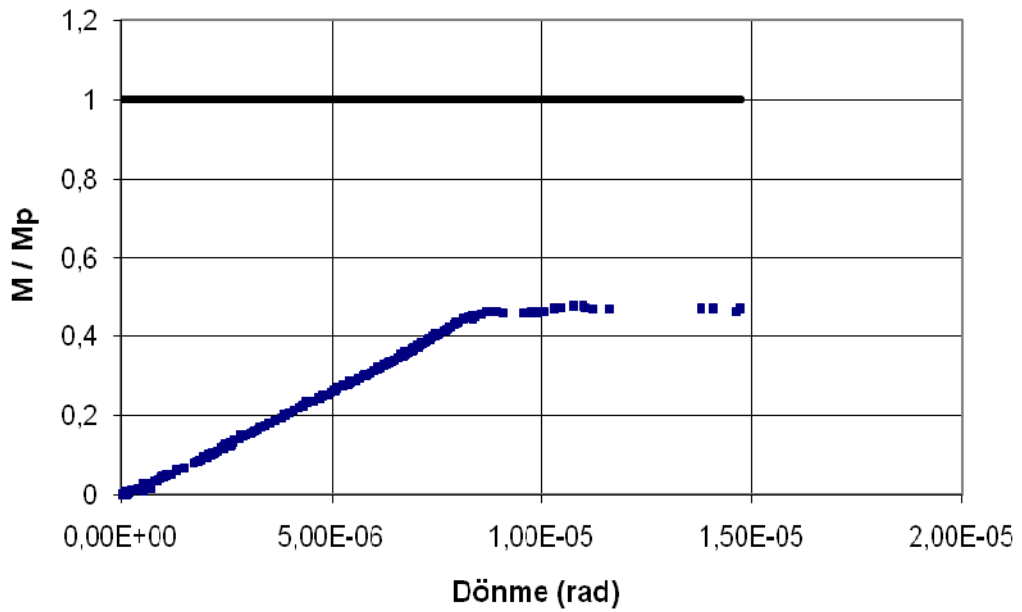
Şekil 3.40. L320 Kirişinin Uygulanan Yük-Net Orta Nokta Deplasmanı Grafiği



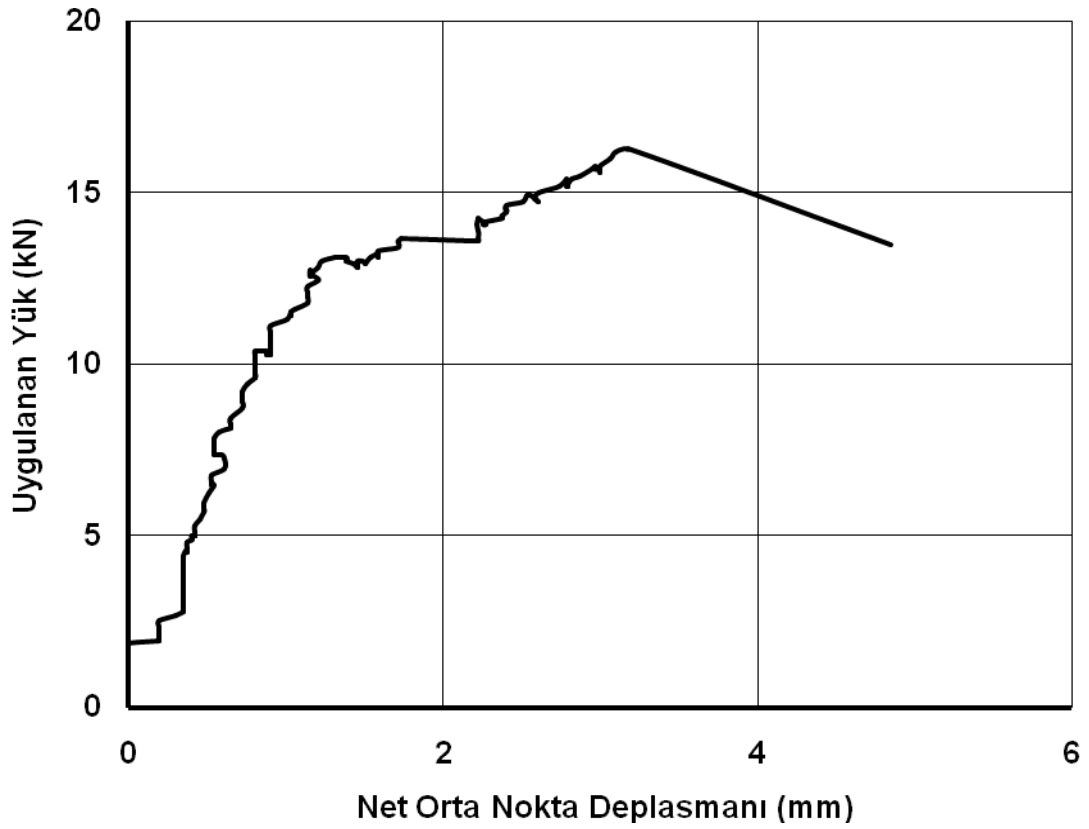
Şekil 3.41. L320 Kirişinin M/Mp – Dönme Grafiği



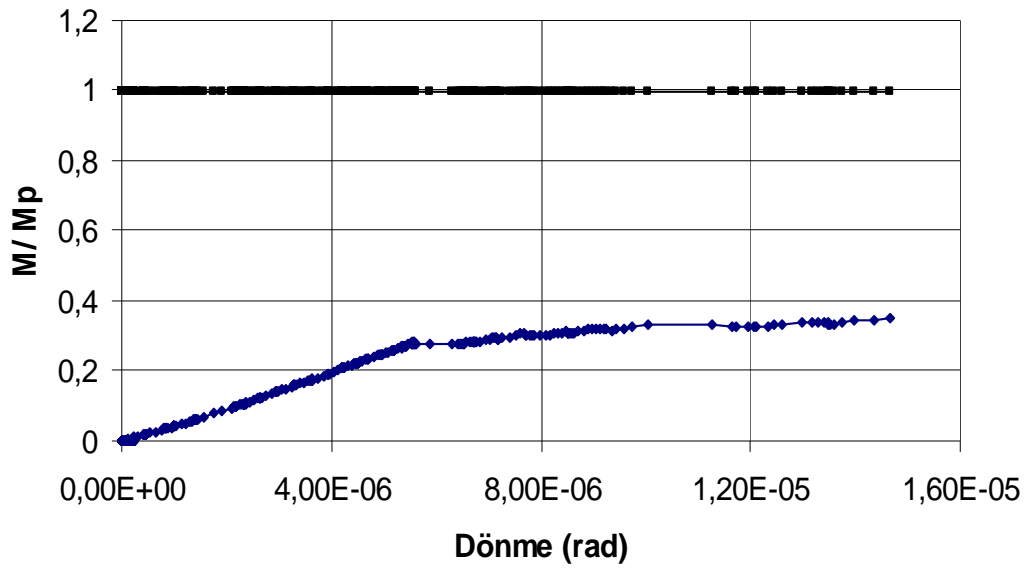
Şekil 3.42. L40 Kirişinin Uygulanan Yük-Net Orta Nokta Deplasmanı Grafiği



Şekil 3.43. L40 Kirişinin M/Mp – Dönme Grafiği



Şekil 3.44. L480 Kirişinin Uygulanan Yük-Net Orta Nokta Deplasmanı Grafiği



Şekil 3.45. L480 Kirişinin M/Mp – Dönme Grafiği

BÖLÜM 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tablo 4.1. Sonuç Tablosu

Numune Adı	Kırılma Yüğü(kN)	Yüzde Değişim (L240'a Göre)	Net Orta Nokta Deplasmanı (mm)	Yüzde Değişim (L240'a Göre)
Referans	55,94	-	14,37	-
L240	20,00	100	1,75	100
L320	21,15	105,75	1,99	113,71
L400	22,08	110,4	2,75	157,14
L480	17	85	3.1	177,14

Deney sonuçlarına bakıldığında orta nokta deplasmanı, CFRP bindirme boyu artırıldığında artmaktadır. Elemanların taşıyabilecekleri maksimum düşey yükte ise artma görülmektedir. Ancak L480 elemanında ilk göçme meydana geldikten sonra yüklemeye devam edilmediğinden bu artış izlenememektedir. Deneylerde kopma anında liflerde bir kopmanın gözlemlenmediği ancak yapışkanın çelik yüzeyinden sıyrılmasıyla göçmenin gerçekleştiği görülmüştür. Tüm elemanlarda plastik moment kapasitesine ulaşmadığı gözlemlenmiştir.

Yeni bir birleşim elemanı olarak düşünülen CFRP'li birleşimin istenilen dönme kapasitesine ulaşmadığı, birleşimin CFRP liflerinde kopmalar meydana gelmeden yapışkanın yenilmesiyle olduğu deneylerde gözlemlenmiştir. Bağlantılı deney elemanlarının, tek parça bir profille karşılaştırılması aslında aşırı güvenli bir yaklaşımdır.

Bu çalışma sonucunda, plastik tasarım yapılabilmesi için dönme kapasitesinin $R=3$ olma şartı hiç bir numunede sağlanamamıştır. Yani CFRP bağlantılı bir birleşim de plastik tasarım ilkelerinin kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Daha fazla deney yapılarak elastik sınırlar içerisinde tasarım kuralları geliştirilebilir. Ancak bu çalışmanın amacı plastik tasarım ilkelerinin geçerli olup olamayacağını sorgulamaktır. Ayrıca CFRP elemanının çeliğe değişik şekillerde ankrajı yapılarak, yapışkanın yenilmeden, liflerin çalışması sağlanırsa daha olumlu sonuçlar elde edileceğine inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] FAWZIA, S., AL-MAHAIDI, R., ZHAO, X-L., Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP. Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Vic. 3800, Australia, 2006
- [2] MILLER, T.C., CHAJES, M.J., MERTZ, D.R., HASTINGS, J.N, Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 6, November/December, 2001
- [3] SCHNERCH, D., STANFORD, K., LANIER, B., DAWOOD, M., SUMNER, E., RIZKALLA, S., Use of high modulus carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for strengthening steel structures.
- [4] DAWOOD, M., DUMNER, E., RIZKALLA, SCHNERCH, D., Strengthening steel bridges with new high modulus CFRP materials.
- [5] ÜNAL, İ., Seramik metal soğuk birleştirmeler ve performanslarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, SAÜ FBE, pp.40,61, Eylül 2007
- [6] ODABAŞI, Y., Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları. pp. 142-143., 2000
- [7] <http://www.marmatek.com/urunler/veri-toplama-sistemleri/data-logger>, Mart 2008
- [8] <http://www.tdg.com.tr>, Mart 2008
- [9] http://www.bilimfeneri.gen.tr/kitaplik/isik_hucreleri.html, Nisan 2008
- [10] TEKNİK DESTEK GRUBU, Gerinim Pulu Katoloğu, 2000
- [11] AKTAŞ, M., Minor Axis Flexure and Combined Loading Response of I-Shaped Steel Members, UMI, pp. 4-5, 2004.
- [12] SALMON C.G., JOHNSON J.E., Steel Structures:Design and Behavior, 4th Edition, Harper Collins Publishers, Inc. New York, New York, USA, 1996
- [13] LAY, M.G., GALAMBOS T.U., Inelastic Steel Beams under Uniform Moment, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 32, No. ST2, pp.207-228, 1965

- [14] KEMP A.R., Introduction of Plastic Local and Lateral Buckling, Journal of Structural Engineering, Vol. 14, No.10, 1985
- [15] ASCE, Plastic Design in Steel, A Guide and Commentary, American Society of Civil Engineers, New York, New York, p.80, 1971

ÖZGEÇMİŞ

Başar CANDAN, 18.02.1982'de Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Karasu'da tamamladı. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden, 2006 Ocak'ta Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden, 2007 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme Bölümü'nden mezun oldu. 2005 yılında Ata Yapı Denetimi A.Ş.'de Yardımcı Kontrol Mühendisi olarak başladığı kariyerini, sahibi ve kurucu müdürü olduğu Adakent Yapı Denetim Ltd. Şti.'nde sürdürmektedir.