

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

**GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇELİK KİRİŞLERİN YORULMA ANALİZİ**

**HASAN CEM AKKAYA**

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

**DANIŞMAN  
YRD. DOÇ. DR. FATİH ALEMDAR**

**İSTANBUL, 2017**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇELİK KİRİŞLERİN YORULMA ANALİZİ

Hasan Cem AKKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 06.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

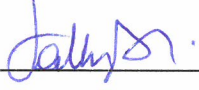
Yrd. Doç. Dr. Fatih ALEMDAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. Fatih ALEMDAR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güray ARSLAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Eren UÇKAN  
Boğaziçi Üniversitesi

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Bu tez çalışması sırasında öncelikle desteklerini her zaman arkamda hissettiğim, hayattaki en büyük destekçilerim annem Gülseren AKKAYA, babam İbrahim AKKAYA , Hazal AKKAYA'a ve Ömer Faruk KEREMOĞLU'na teşekkürlerimi borç bilirim. Bu çalışmanın başlamasına ön ayak olan, bilgisini esirgemeyen, günün her saatinde yardım edebilen değerli hocam, saygıdeğer danışmanım Yard. Doç. Dr. Fatih ALEMDAR'a, İhtiyacım olduğu her anda yardımlarını esirgemeyen, oda arkadaşım Araş. Gör. Metin KARSLIOĞLU'na, ve numunelerin temininde bana yardımcı olan değerli arkadaşım İnşaat Yüksek Mühendisi Ali YILDIZ'a ve deneyler sırasında bana yardım eden Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği öğrencilerinden Onur ÜLKÜ ve Mustafa Emre TURAN'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca TR10/15/YNK/0034 kodlu proje kapsamında, Yıldız Teknik Üniversitesi'ne tez kapsamında kullandığım deney makinasını temin eden İstanbul Kalkınma Ajansı'na teşekkürlerimi sunarım.

Kasım, 2017

Hasan Cem AKKAYA

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vi
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT .....	xiv
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti.....	1
1.2    Tezin Amacı.....	13
1.3    Hipotez.....	14
<b>BÖLÜM 2</b>	
KIRILMA MEKANİĞİ VE YORULMA .....	15
2.1    Kırılma Mekanizmasını Önemi .....	16
2.2    Gerilme Yığılması .....	17
2.3    Lineer Elastik Kırılma Mekanizması.....	18
2.4    Elasto-Plastik Kırılma Mekanizması.....	19
2.4.1    Çatlak Ucu Açılma Yer Değiştirilmesi (CTOD) Metodu .....	19
2.4.2    J-İntegrali Testi .....	20
2.5    Yorulma.....	21
2.5.1    Yorulmayla İlgili Temel Kavramlar .....	23
2.5.2    Yorulma Ömrünün Tahmini ve Nümerik Bir Örnek .....	25
2.5.3    Yorulmaya Karşı Tasarım Prensipleri.....	27

## BÖLÜM 3

ABAQUS PAKET PROGRAMI İLE KİRİŞLERİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ.....	29
3.1 Giriş .....	29
3.2 IPE120 Kirişinin Tasarımı.....	30
3.3 Çentikli IPE120 Kirişlerinin Modellenmesi.....	33
3.3.1 Part Modülü.....	33
3.3.2 Property Modülü .....	35
3.3.3 Assembly Modülü.....	36
3.3.4 Step, Interaction ve Load Modülleri.....	37
3.3.5 Mesh Modülü .....	38
3.3.6 Job Modülü.....	39
3.4 Güçlendirilmiş IPE120 Kirişlerinin Modellenmesi.....	39
3.5 Abaqus Paket Programının Doğrulama İşlemi.....	42
3.6 Analiz Sonuçlarının Gösterimi.....	47
3.7 Sonuçlar .....	55

## BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	57
4.1 Giriş .....	57
4.2 Dört Noktalı Eğilme Deneyi.....	59
4.3 Kullanılan Deney Cihazı Hakkında Genel Bilgi.....	59
4.4 IPE120 Kirişlerinin Hazırlanması .....	61
4.4.1 Yorulmuş IPE120 Kirişin Çelik Plaka İle Güçlendirilmesi.....	64
4.4.2 Yorulmuş IPE120 Kirişin CFRP İle Güçlendirmesi.....	67
4.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirmesi .....	71

## BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	84

## SİMGE LİSTESİ

---

a	Çatlak Boyu
$a_0$	İlk çatlak boyu
A	Genlik oranı
$A_g$	Toplam enkesit alanı
$A_w$	Gövde alanı
b	I profilin başlık genişliği
B	Kirişin başlık genişliği
C	Malzeme sabiti
$C_b$	Moment düzeltme katsayısı
$C_w$	Çarpılma sabiti
$C_{w1}$	Gövde kesme kuvveti dayanımı
$d_s$	Ark boyu
E	Elastisite modülü
$F_y$	Karakteristik akma gerilmesi
$F_u$	Karakteristik kopma gerilmesi
G	Profilin ağırlığı
h	Kiriş yüksekliği
$h_i$	Kiriş başlıkları arasındaki mesafe
$h_o$	Enkesit başlıklarının ağırlık merkezi arasındaki uzaklık
$I_x$	x-x eksenindeki atalet momenti
$I_y$	y-y eksenindeki atalet momenti
$i_x$	x-x eksenindeki atalet yarıçapı
$i_y$	y-y eksenindeki atalet yarıçapı
$i_{ts}$	Etkin atalet yarıçapı
J	Burulma sabiti
K	Gerilme yoğunluğu faktörü
$K_I$	Mod I de gerilme yoğunluğu faktörü
$K_{II}$	Mod II de gerilme yoğunluğu faktörü
$K_{III}$	Mod III de gerilme yoğunluğu faktörü
$L_b$	Stabilite bağlantısı ile desteklenmeyen elemanın uzunluğu
$L_p$	Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen uzunluk
$L_r$	Elastik olmayan yanal burulmalı burkulmada sınır uzunluk
m	Malzeme sabiti

M	Moment
$M_n$	Karakteristik eğilme momenti dayanımı
$M_p$	Plastik eğilme momenti dayanımı
$N_i$	Yorulma çatlığının ilk başladığı çevrim sayısı
$N_p$	İlk çatlğından sonra çatlğın yayılarak yapının çökmesine kadar çevrim sayısı
$N_t$	Toplam çevrim sayısı
R	Gerilme oranı
$S_x$	x-x ekseninde elastik mukavemet momenti
$t_f$	Kiriş başlık kalınlığı
$t_w$	Kiriş gövde kalınlığı
$T_i$	Eğriye dik yöndeki çekme gerilmesi faktörü
$u_i$	Deformasyon vektörü
$V_n$	Karakteristik kesme dayanımı
w	Genleme enerjisi yoğunluğu
W	Kirişin yüksekliği
$Z_x$	x-x eksenindeki plastik mukavemet momenti
$\lambda$	Enkesit narınlığı
$\lambda_p$	Kompakt narınlık sınırı
$\lambda_r$	Kompakt olmayan narınlık sınırı
$\Delta K$	Gerilme şiddeti faktörü farkı
$\Delta M$	Moment Farkı
$\Delta\sigma$	Gerilme aralığı
$\sigma$	Gerilme
$\sigma_{akma}$	Akma gerilmesi
$\sigma_g$	Gerilme genliği
$\sigma_{max}$	Maksimum gerilme
$\sigma_{min}$	Minimum gerilme
$\sigma_{ort}$	Ortalama gerilme

## KISALTMA LİSTESİ

---

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
DIC	Digital Image Correlation
EPKM	Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği
FRP	Fiber Reinforced Polymer
HM-CFRP	High Modülüs Carbon Fiber Reinforced Polymer
HSS	High Strength Steel
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OLM	Optical Light Microscope
SEM	Scanning Electron Microscopy
VCCT	Virtual Crack Closure Technique



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Gevrek ve Sünek Malzemelerin kırılma şekli[36] .....	16
Şekil 2.2 Basit çekme durumunda çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılmaları[1] .....	17
Şekil 2.3 Kuvvet altında oluşan üç farklı kırılma modu[1].....	18
Şekil 2.4 Çatlak ucunu çevreleyen rasgele çizilmiş kapalı eğri [41] .....	20
Şekil 2.5 Farklı yorulma yükleme tipleri [43] .....	24
Şekil 2.6 Yorulma Parametrelerini gösteren eğri [44] .....	24
Şekil 2.7 Eğilme etkisindeki çentikli kiriş [26] .....	26
Şekil 2.8 Uygulanan Momente göre Çevrim sayısı-çatlak boyu eğrisi .....	27
Şekil 3.1 IPE120 kirişin Moment ve Kesme Kuvveti Diyagramı.....	30
Şekil 3.2 I Profilin Ölçüm Noktalarının Gösterimi[31] .....	30
Şekil 3.3 Abaqus Programının Açılış Ekranı .....	33
Şekil 3.4 Create Part Penceresi .....	34
Şekil 3.5 IPE120 kirişinin oluşturulması .....	34
Şekil 3.6 IPE120 kirişinde partitionların oluşması ve çentik açma.....	35
Şekil 3.7 IPE120 kirişinde malzeme özelliklerinin atanması .....	36
Şekil 3.8 IPE120 kirişinde malzeme özelliklerinin atanmasından sonraki görünüşü .....	36
Şekil 3.9 IPE120 kirişinin hazırlanması .....	37
Şekil 3.10 Sabit ve Kayıcı Mesnet Atamaları .....	38
Şekil 3.11 Yük ve Mesnet Koşullarını Ataması .....	38
Şekil 3.12 Kiriş ve Berkitmelerin Meshleme İşlemi .....	39
Şekil 3.13 Çelik Plakalar(değerler mm cinsindedir.) .....	40
Şekil 3.14 Edit Cut Extrusion Penceresi.....	41
Şekil 3.15 Bulon için Create Part Penceresi .....	41
Şekil 3.16 15 cm Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş.....	42
Şekil 3.17 33 cm Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş.....	42
Şekil 3.18 51 cm Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş.....	42
Şekil 3.19 CFRP malzemesiyle ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş.....	42
Şekil 3.20 Yapıştırılacak Strain Gauge'nin Yerlerinin İşaretlenmesi .....	43
Şekil 3.21 Yüzeyin Strain Gauge Yapıştırmak için Hazı Hale Getirilmesi.....	43
Şekil 3.22 Strain Gauge'nin Yapıştırılması.....	44
Şekil 3.23 Tüm Strain Gauge'nin Yapıştırılması.....	44
Şekil 3.24 Strain Gauge Yapıştırma Planı .....	45
Şekil 3.25 Kontrol Kirişinin Analizi.....	45

Şekil 3.26 Statik Olarak Dört Noktalı Eğilme Deneyi.....	46
Şekil 3.27 Okunan Strain Değerleri .....	46
Şekil 3.28 (a) 1 mm çatlak , (b) 2mm çatlak , (c) 3 mm çatlak , (d) 4 mm çatlak , .....	48
Şekil 3.31 Çatlak Derinliğine Göre Gerilme Dağılımı Grafiği .....	48
Şekil 3.29 (a) 15 cm çelik , (b) 33 cm çelik plaka , (c) 51 cm çelik plaka , .....	50
Şekil 3.30 Güçlendirilmiş Kirişlerin Gerilme Dağılımı Grafiği .....	50
Şekil 3.31 Çekme Başlığındaki Verilen Hasarın Şematik Gösterimi.....	51
Şekil 3.32 Tasarlana Kirişte Açılan Çentiklerin Abaquse Girilmesi.....	51
Şekil 3.33 Kontrol Numunesinin Analiz Sonucu .....	52
Şekil 3.34 15 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu.....	52
Şekil 3.35 33 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu.....	53
Şekil 3.36 51 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu.....	53
Şekil 3.37 CFRP Malzemesi İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu .....	54
Şekil 3.38 Gerilme Değerleri Okunan Doğrultu .....	54
Şekil 3.39 Gerilme Değişimleri .....	55
Şekil 4.1 Deneyin Yükleme Hızı .....	58
Şekil 4.2 Instron 8803 Deney Cihazı.....	59
Şekil 4.3 Instron 8800 Kontrol İstasyonu .....	60
Şekil 4.4 Kontrol Numunesinin Hazırlanması.....	61
Şekil 4.5 Dört Noktalı Eğilme Deneyi İçin Yükleme Aparatı .....	61
Şekil 4.6 İlk Kontrol Numunesi .....	62
Şekil 4.7 Revize Edilen İlk Kontrol Numunesi.....	62
Şekil 4.8 İkinci Kontrol Numunesinin Verilen Hasar.....	63
Şekil 4.9 Çatlak Oluşumu ve İlerlemesini Belirlemek İçin Kullanılan Sprey .....	64
Şekil 4.10 15 cm Uzunluğunda Çelik Plaka Montajı .....	65
Şekil 4.11 15 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Deneyi .....	65
Şekil 4.12 15 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Göçmesi .....	65
Şekil 4.13 33 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Deneyi .....	66
Şekil 4.14 51 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Deneyi .....	66
Şekil 4.15 Çelik Plakalarla İle Güçlendirilmiş Kirişlerin Göçmesi.....	67
Şekil 4.16 30 cm Uzunluğunda Kullanılan CFRP malzemesi.....	67
Şekil 4.17 Yapıştırılacak Yüzeyin Hazırlanması.....	68
Şekil 4.18 Yapıştırıcının Teknik Özellikleri[33] .....	68
Şekil 4.19 Yapıştırıcının Karıştırılması.....	69
Şekil 4.20 CFRP şeridinin ilk katının yapıştırılması .....	70
Şekil 4.21 CFRP şeridinin tüm katmanlarının yapıştırılması.....	70
Şekil 4.22 CFRP Malzemesiyle Güçlendirilmiş Kirişin Sıyırılması.....	71
Şekil 4.23 C02 Numunesinin Çatlak İlerleme Eğrisi.....	73
Şekil 4.24 Güçlendirilmiş Numunelerin Çatlak İlerleme Eğrisi.....	73
Şekil 4.25 Amerikan Yönetmeliğine Göre Yorulma Kategorisinin Belirlenmesi[34] .....	74
Şekil 4.26 S-N Eğrisinde Deney Sonuçlarının Yerleştirilmesi.....	75
Şekil 4.27 Yorulma Testi Sırasında Elde Edilen Rijitlik Değişimleri.....	76

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2.1 Yorulma kırılması ilerlemesi toplam çevrim sayısı ( $\Delta M=1237.5$ kNcm) ....	27
Çizelge 2.2 Yorulma kırılması ilerlemesi toplam çevrim sayısı ( $\Delta M=2475$ kNcm) .....	27
Çizelge 4.1 Karışım Oranları[33] .....	69
Çizelge 4.2 Yorulma Test Parametreleri.....	71
Çizelge 4.3 Deney Sonuçları .....	72
Çizelge 4.4 C02 numunesine ait çatlak ilerleme değerleri.....	72

## GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇELİK KİRİŞLERİN YORULMA ANALİZİ

Hasan Cem AKKAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fatih ALEMDAR

Dünyada birçok çelik yapıda tekrarlı yüklemelerden dolayı hasar meydana gelmektedir. Bu hasarı gidermek için yapıyı yıkıp tekrar yapmak yerine güçlendirmek hem maliyet hem de süre açısından avantaj sağlamaktadır. Bu tez kapsamında, Çelik yapılar yönetmeliğindeki bulonlu ek levhaların bulon mesafeleri hasarlı çelik kiriş üzerinde tekrarlı yükleme altındaki performansları araştırılmıştır. Bunun yanında, aynı hasarlı kirişler CFRP ile güçlendirilmiştir ve yorulma performansları karşılaştırılmıştır. Toplamda 6 adet S275 malzemesinden IPE120 kirişlerinin; 2 adet kontrol numunesi, 3 adet bulonlu çelik plaka ve 1 adet CFRP ile güçlendirme numuneleri, yorulma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde çevrimsel yükleme altında dört noktalı eğilme düzeneği kullanılmıştır. Çevrimsel yükleme sabit genlikli, gerilme oranı 0,1 ve yükleme hızı 2 Hertz'dir. Ayrıca deney sırasında, ilk kırılma çevrimi sayısı ve belirli aralıklarla çatlak boyunun çevrime göre değişimi ve rijitlik değişimleri izlenmiştir. Deney sonuçları AASHTO da bulunan S-N grafikleri kullanılarak irdelenmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin sonlu elemanlar yöntemi (ABAQUS Paket Programı) kullanılarak simülasyonları yapılmıştır. Bu bölümde üç farklı durum; farklı çatlak derinliğine sahip, farklı güçlendirme metotları kullanarak ve aynı işlemleri çatlak geometrisini değiştirip modellenen kirişler için gerilme, gerinme ve yer değiştirme verileri kontrol edilmiştir. Bunun yanında parametrik bir çalışma da yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonunda çelik plakalarda bulonlar arasındaki mesafe arttıkça yorulma ömrü

artmaktadır. Ek levhası bulon delikleri şartnameye göre en kısa olduğu ile en uzun olduğu duruma göre yorulma ömrünü 1,5 ila 2,1 kat arasında uzatmaktadır. Fakat CFRP ile yapılan güçlendirme yorulma ömrünü 1,5 kat arttırmasına rağmen CFRP malzemesi ile çelik yüzeyleri arasında sıyrma probleminden dolayı iyi performans gösterememiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yorulma performansı, güçlendirme metodu, çelik plaka, CFRP malzemesi, hasar verilmiş çelik kirişler



**FATIGUE ANALYSIS OF STRENGTHENED STEEL BEAMS**

Hasan Cem AKKAYA

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Fatih ALEMDAR

Many steel structures around the world occur damage because of cyclic loading. To cope with this situation, It is more advantages to strengthen damaged steel structures than rebuilding damaged steel structures. In this study, The performance on pre-cracked steel beams under cyclic loading was investigated on bolt space of the bolted cover plate to Turkish Steel Structure Code. In addition, The pre-cracked steel beam was strengthened with CFRP and compared fatigue performance. Total six specimens were performed using IPE120 profile made of S275 steel material, two of those experiments were performed using unstrengthened specimens, three of them were performed using specimens strengthened with bolted steel plates, one of them was performed using specimen strengthened with CFRP patches. The four-point bending test installation was performed under cyclic loading. The cyclic loading had a constant amplitude, stress ratio was 0.1 and a loading rate was 2 Hertz. Furthermore, the number of initial crack cycles, the change crack length frequently and stiffness changes until fracture were observed during the experimental tests. Experimental results were analyzed using S-N graphs in AASHTO. The specimens used in the experiments were simulated using the finite element method (ABAQUS Packet Program). In this chapter, stress analysis is controlled stress, strain and displacement for three different cases; analyses of beams with different crack lengths, the pre-cracked beams strengthened with different strengthening methods and the crack geometry was changed. In addition, parametric study was practiced and compared results. At the end of this

study, as the distance between the bolts of bolted steel plates increases, the fatigue life increases. The shortest and longest to Turkish Code bolt space of the bolted cover plates were extended fatigue life between 1.5 and 2.1. Pre-cracked steel beam with strengthened with CFRP patches did not perform well due to the problem of debonding between CFRP material and steel surfaces, although it increased the fatigue life 1.5 times.

**Keywords:** Fatigue performance, Strengthened method, steel plates, CFRP materials, pre-crack steel beams



#### 1.1 Literatür Özeti

Mevcut yapılarda güçlendirme değişen kullanım şartları veya ikincil gerilme durumlarından dolayı oluşan kırılmalardan kaçınmak için kullanılan yaygın bir yoldur. Çelik yapıların onarımı için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlardan birisi FRP yapıştırarak diğer bir yöntem ise başka bir çelik plaka ile güçlendirmek bu çelik plaka ana elemana kaynaklamak veya bulonlamak suretiyle eklenmesidir. FRP katmanlarının kullanılması, korozyon direnci ve çekme dayanımı / ağırlık oranının yüksek olması gibi çeşitli avantajları vardır. Bu avantajların yanında yapıştırma yerinde FRP tipi, katman sayısı, yapışkan türü ve özel hususlar gibi güçlendirilmiş yapının kapasitesini etkileyen birçok faktör vardır.

Çelik levha ile güçlendirme de ise kullanılabilirliği , ucuzluğu, yeterli malzeme özellikleri (izotropik), çalışması kolay, yüksek süneklik ve yüksek yorulma kuvveti sayesinde popüler bir yöntemdir. Fakat ulaşım, taşıma, ağır plakaların kurulumu, korozyon ve sınırlı uzunlukta dağıtım gibi birçok dezavantajları mevcuttur.

İnşaat mühendisliği topluluğunda güçlendirme ve onarım önemli konulardan biridir. Yapı ömrünü tamamlamaya yakın çelik yapıların onarımı ve güçlendirilmesi genellikle iyileştirmeye ve hizmet ömrünün uzatılmasına yönelik ekonomik yöntemlerden biridir.

Çelik köprülerin ve yapıların güçlendirilmesinde geleneksel yöntemler tipik olarak sorunlu bölgeye bulonlu veya kaynaklı çelik plaka ek yapılarak kullanılmaktadır. Fakat yapılabirlik ve dayanıklılık sakıncaları genellikle bu geleneksel yöntemle ilişkilendirilir. Bu sakıncalardan dolayı karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) katmanların çelik



elemana yapıştırılması yenilikçi ve etkili bir güçlendirme tekniği olarak ortaya atılmıştır. Çok daha yüksek statik ve yorulma mukavemetine sahip ve korozyona karşı direnci yüksek olduğundan dolayı geleneksel güçlendirme yöntemlerine karşı bir alternatif oluşturur.

Çelik köprülerde meydana gelen sorunların bir kısmı yorulmadan kaynaklanır. Servis yükünün arttırma ihtiyacı, korozyon ve düzensiz bakım çalışmaları yorulmaya neden olabilmektedir.

Bir köprüyü ya da bir yapıyı yıkıp yeniden yapmak yerine her zaman ilk önce onarım ve tadilat yapılması düşünülmelidir. Çünkü onarım masrafları yeniden yıkıp yapma masrafından çok daha düşüktür. Buna ek olarak, onarım genellikle daha az zaman alır ve hizmet kesinti sürelerini azaltır. Çelik köprülerle ilgili sorunları hafifletmek için mevcut sınırlı kaynaklar göz önüne alındığında, yeni malzemeler ve maliyet-etkin teknikler benimseme ihtiyacı olabilmektedir.

Uzun süre kullanılan çelik köprülerde ortaya çıkan yorulma, güçlendirme tekniği olarak, genellikle yorulmaya dayanıksız kaynaklı birleşimlerde gerilme geçişlerini düzenlemek için fiber takviyeli polimerler (FRP) kullanılır. FRP'ler, yüksek mukavemet ve sertlik, düşük ağırlık, çatlak yayılımını yayma kabiliyeti ve çeşitli geometrilere kalıplanabilme özelliği nedeniyle çelik köprü yapımında genellikle kaynaklı bağlantıları güçlendirmek için ideal bir malzeme seçimi olabilmektedir. Çelik köprü bağlantılarına harici kaplama elemanları olarak FRP malzemeleri yapıştırmak, bir çatlak ucundaki veya daha önce kırılmış kaynaklı bağlantıda gerilme yığılmalarını azaltan alternatif bir gerilme yolu sağlayabilir. Daha düşük gerilme yığılması, yorulmaya dayanıksız detaylarda gerilme aralığındaki azalma ile orantılı olarak yorulma ömründeki artış ile birlikte hem çatlak başlama ömrü hemde çatlak üreme ömründe artışlar meydana getirebilmektedir.

Yorulma ömrü diyince akla gelen konulardan biri çatlaktır. Yorulma ömrü çatlak başlama ve çatlak çoğalması evrelerinin toplamıdır. O yüzden yorulmayı anlamak için kırılma mekaniğini teorik olarak iyi kavramamız gerekmektedir. Kırılma mekaniğinin teorik olarak anlatan piyasadaki kitaplardan biri Prof. Dr. Paşa YAYLA'nın Kırılma Mekaniği kitabıdır. Bu kitapta kırılma mekaniğinin insan sağlığı güvenliği, ekonomide ve

dünya literatüründe önemli bir yerde olduğunu, kırılma mekaniği ile ilgili kavramları, gerilme yığılması, lineer elastik ve elasto plastik kırılma mekaniğinin teorik altyapısını, kırılma mekaniğini anlamak için yapılan deneyleri, çatlak ilerleme mekanizmalarını ve yorulmanın temel kavramlarını ve mantığını hakkında temel kavramları içermektedir[1].

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Avrupa da sayısız köprü yeniden inşa edilmiştir; yol taşıtları trafikte görülen aşırı artışa bağlı olarak ulaşım ihtiyaçlarını karşılamak için 1960-1975 yıllarında yol ağları inşa edilmiştir. Ama servis koşullarının değişmesi, kazalar sonucu oluşan hatalar ve bakımın, çoğunlukla acil onarımlarla sınırlı olması köprülerde ve ulaşım ağındaki yapılarda yorulma çatlaklarının oluşmasına neden olmuştur. Bu hataları gidermek için güçlendirme ve onarım gelişmiş ve gelişmekte olan devletlerde çoğunlukla ilk yapılacak iş olarak düşünülmektedir. Gelişmiş devletler büyük paralar harcayarak yapıların hasar kaydını çıkartan raporlar oluşturmuşlardır. Bu raporlara göre, Avrupa'daki mevcut köprülerin yaklaşık% 50'sinin tamir edilmesi gerektiği ancak durumun ülkeye göre biraz değiştiği tahmin edilmektedir[2].

ABD Ulaştırma Bakanlığı Federal Karayolu İdaresi tarafından 2005 yılında yapılan rapor güncellemesinde, ABD'deki yaklaşık 200.000 çelik köprü arasında% 40'a yakınının "yapısal olarak yetersiz" veya "işlevselliğinden yoksun" olduğu tahmin edilmektedir. Bozulma araç çarpmaları, çevrimsel yükler veya çevresel koşullardan kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, Kanada'da köprülerin %40'ından fazlası 1970'lerden önce inşa edilmiş ve birçoğunun güçlendirilmesi veya onarımı gerekmektedir[3].

Japonya'da, verimli bir karayolu ağının kurulması için 2. Dünya Savaşı'ndan sonra inşa edilen köprüler bulunmaktadır; Bu köprüler yüksek ekonomik büyüme döneminde 1960-1980'lerde yoğun bir şekilde inşa edilmiştir. Bu köprülerde yapısal güvenliliği belirlemek için 2002'de yapılan çalışmalarda Japonca Şartnamesi güncellenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda köprü elemanlarının bozulmasında yorulmanın göz önüne alınmasının önemini açıkça belirtmektedir[4].

Bocciarelli ve diğerlerinin yaptığı çalışmada FRP malzemelerini kullanarak güçlendirilmiş çelik yapıların yorulma davranışı incelenmiştir. Sıyrıma problemi

yüzünden meydana gelen malzemenin sertliğinde azalma genel bir başarısızlık olarak görülmüştür. Deney sırasında çelik plakanın ile FRP malzemelerinin ara yüzeyinde meydana gelen sıyrılma başlangıcı ve ilerlemesi incelenmiştir. Bundan dolayı FRP ile güçlendirme metodunda dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri de yüzeydeki sıyrılmadır. Bu çalışma sonucundan gerilme-çevrim eğrileri tanımlanmış ve numunelerin yorulma davranışı, Eurocode 3'te tanımlanan kaynaklı detay kategorilerinin yorulma direnciyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, çelik levha ile CFRP plakası arasındaki yapıştırıcının yorulma direncinin, kaynaklı kaplama plakalarına göre daha üstün olduğunu ortaya koymuştur[5].

Son zamanlarda, birçok çelik köprü, korozyon, yorulma çatlaklarının genişlemesi ve düzenli yapılmayan bakımın bir sonucu olarak yapısal ve işlevsel gereklilikleri karşılamakta başarısız olmuştur. Çoğu durumda, bu tür zararlar yalnızca yapının belirli alanlarında ortaya çıkar ve yapıyı güçlendirme maliyeti bütün yapının değiştirilmesi maliyetinden çok daha az olacağı bilinmektedir. Geleneksel güçlendirme yöntemleri tipik olarak, çelik levhaların hasar gören yere kaynaklanması ve civata açılması işlemini içerir; bu durum, yapının ağırlığının artması, kaynak kusurlarının yorulma hassasiyeti, gerilme konsantrasyonu ve gerilmenin yeniden dağılması gibi birkaç dezavantaj getirir. Fiber takviyeli polimer (FRP), yüksek dayanım, iyi korozyon direnci ve geliştirilmiş yorulma performansı gibi yapısal bir malzeme olarak göze çarpan avantajlara sahiptir. Literatürde FRP, beton yapıların güçlendirilmesi ve onarımı için yaygın olarak uygulanmıştır. Fakat birçok araştırmacı, çelik yapıların onarımı ve güçlendirilmesinde FRP'nin kullanımını bir gereklilik olduğunu çalışmalarında söylemektedirler[6].

Mosaud ve diğerlerinin tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişlerin yapısal davranışlarını araştırmak için deneysel bir program yürütülmüştür. 120x175x2000mm boyutlarında toplam 8 eleman test edilmiştir. Bunlardan 6 sı güçlendirilmiş korozyona uğramış, biri güçlendirilmemiş korozyona uğramış, biri ise ne güçlendirilmiş ne de korozyona uğramış. İki farklı şekilde güçlendirilme işlemi yapılmıştır bunlardan ilki elemanı CFRP ile sarmak diğeri ise hem CFRP ile sarmak hemde eğilme dayanımını güçlendirmek şeklindedir. Üç numune tekil yükleme ile test edilmiş ve beş numune yorulmada test edilmiştir. Sonuçlar, çelik takviye korozyonu yaşayan RC kirişlerin güçlendirilmesi için CFRP levhalarının kullanılmasının, yapısal bütünlüğünü

koruyabilmesi ve bu kirişlerin yapısal davranışlarını geliştirebilen etkili bir teknik olduğunu göstermiştir[7].

Bir diğer çalışmada sadece kaynakla güçlendirme, CFRP plaklarının ve CFRP şeritlerinin yapıştırılması ile güçlendirme gibi üç farklı güçlendirme metodu kullanarak yapay olarak çentik atılmış kirişi incelemiştir. İki farklı CFRP malzemesi ve iki farklı epoksi malzemesi kullanılmıştır. CFRP plakları ve CFRP dokuma şeritleri ile güçlendirilmiş kirişler farklı kırılma modlarına sahip olduğu gözlenmiştir. Tek katman CFRP plaka ile güçlendirilmiş, kiriş yorulma ömrü bakımından sadece kaynakla güçlendirilmiş kirişten yaklaşık 7 kat daha iyi performans vermesine rağmen, 4 katman halinde yapıştırılmış CFRP dokuma şeritlerine göre yaklaşık 3 kat daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca yorulma yüklemeleri şartları altında kırık çoğalmasına karşı dayanıklılık CFRP plaklarında daha iyi performans gözlemlendiği sonucu çıkarılmıştır[8].

Bir diğer çalışmada farklı karbon ağırlığına sahip üç çelik alaşım üzerinde yorulma ömrü deneyleri gerçekleştirildi. Test sonuçları -0.5,0,0.25,0,5 olan dört farklı gerilme oranı sabit büyüklükte yük için elde edilmiştir ve test edilen numuneler farklı çentik geometrisi ve uzunluğuna sahiptir. Gerilme Ömrü yaklaşımı kullanılarak kontrol (referans) ve çentikli silindirik numuneler incelenmiş ve yorulma ömrü analizi deneysel olarak ve analitik kullanılarak elde edilmiştir. Bu araştırmada Kimyasal Kompozisyon Analiz Cihazı, Çekme Test Cihazı, Sertlik Ölçme Cihazı, Yorulma Test Cihazı, Optik Işık Mikroskopu (OLM) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) gibi farklı araçlar kullanılmıştır. Yorulma deneyleri oda sıcaklığında konsollu dönme-eğilme makinesinde gerçekleştirilmiştir. Hem nümerik araştırma hemde deney sonuçlarına dayanarak gerilme oranının etkisi yorulma ömrüne önemli derecede etki etmektedir. Sonuçlar, yük oranı arttıkça numunenin ömrünün arttığını bu nedenle deneysel ve sayısal çalışmalar arasında kabul edilebilir bir hata olduğunu göstermektedir[9].

Eğilme mukavemetini veya sertliğini arttırmak için çelik levhaları betonarme yapıların dış yüzeylerine yapıştırma tekniği, 1960'ların sonlarından beri dünya çapında kullanılmaktadır. Amerika'daki köprü tasarımı yüklem koşullarındaki son artışlar, hızlı, verimli ve dayanıklı güçlendirme yöntemlerine duyulan ihtiyacın daha önemli bir yere getirmiştir. Çoğu durumda dış çelik levha bağlantısı tatmin edici bir çözüm

sağlayabilirse de bazı dezavantajları vardır; Ağır plakaları sahada manipüle etme, potansiyel çelik korozyonu ve devam eden bakım ihtiyacı gibi. Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) levhalar uygulanması, paslanmaya karşı direnç, düşük ağırlık ve mükemmel mekanik dayanım da dâhil olmak üzere çelik üzerinde birçok avantaj sunar. Köprü tasarımındaki yeni gereklilikler, hızlı, verimli ve dayanıklı güçlendirme yöntemlerine duyulan ihtiyacın oluştuğu açıktır. Dış çelik plaka bağlantısı tatmin edici bir çözüm sağlar, ancak karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) korozyon direnci, düşük ağırlık ve yüksek mekanik mukavemet gibi ek avantajlar sunmaktadır. Çeliğe alternatif olarak CFRP kullanılan araştırma projesinin bir parçası konumunda CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yorulma performansı araştırılmıştır. Yapılan çalışmada kapsamında 5 tane betonarme kiriş test edilmiş; Bunların 2 si güçlendirilmemiş kirişler kalanları ise CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerdir. Üç yükleme seçeneği kullanılmıştır; 1-) Aynı yükleri hem plakalı, hem de plakasız kirişlere uygulanmıştır, 2-) Her iki kirişte donatılarla aynı gerilme aralığı verebilecek yüklemeler uygulanmıştır, 3-) Her kirişe kopma mukavemetinin aynı yüzdelik kısmı uygulanmıştır. Yorulma bilindiği gibi yapıların çökmesinde kırılmasında kullanılamaz hala gelmesinde önemli bir faktördür. Çelik çubukta benzer gerilme aralığı değerlerine sahip plakalı ve plakasız kirişler için aynı yorulma ömrünü beklemek mantıklı bir yaklaşım olabilme ihtimali bulunmaktadır[10].

Bir diğer çalışmada öngerilmeli karbon fiber takviyeli polimer katmanlarla güçlendirilmiş çekme çelik levhaların yorulma davranışını araştırmak için deneysel ve analitik bir çalışma yapılmıştır. Güçlendirilmiş numunelerin yorulma ömrünü tahmin etmek için basit bir kırılma mekaniği modeli önerilmiştir. Çift kenar çentikli örnekler yorulma yüklemesi tarafından ön kırılma oluşturulup ve daha sonra farklı öngerilme seviyelerine sahip CFRP katmanları tarafından güçlendirilmiştir. Uygulanan gerilme aralığı, CFRP sertliği ve ön gerilim seviyesinin çatlak büyümesine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ön gerilim seviyesinin artmasının hasar görmüş bir çelik levhanın yorulma ömrünü büyük bir miktara kadar uzattığını göstermektedir. En yüksek öngerilme seviyesine sahip CFRP, yorulma ömrünü % 25 daha yüksek yorulma yükü altında dört katına kadar uzatarak en iyi performansı göstermiştir. Teorik olarak, öngörülen sonuçlar deney sonuçlarıyla desteklenmiştir. Uygulanan gerilme aralığının ve

öngerilme seviyesinin yapışkanın sıyrılma davranışına ve ikincil çatlak yayılımına etkilerini araştırmak için parametrik bir analiz de yapılmıştır[11].

CFRP plakaları veya levhaları, mukavemet ve yorulma ömrünü artırmak için çelik numunelerdeki yorulmaya hassas ayrıntılara epoksi bağlanabilir. Karbon fiber takviyeli plastiklerin üstün mekanik ve yorulma özellikleri onları çelik kiriş köprülerinin onarımı ve güçlendirilmesi fikri son birkaç on yılda popülerleşmiştir. Yapılan çalışma da CFRP katmanları kopma dayanımının 1.5 katı gerilme aralığında 1 milyonun üzerinde çevrim sayısı yorulma yüküne dayanırlar[12].

Uzun süre yüke maruz kalan çelik kirişlerde yorulma hassas detayları yapı mühendislerinin göz önüne aldığı problemlerden biridir. Çelik elemanların tasarım özellikleri kritik gerilmeli alanlara karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP) katmanları epoksi ile yapıştırılarak önemli ölçüde geliştirilebilir. Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh'in yaptığı çalışmada, yorulma yüklemesi için çentikli çelik kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesine ilişkin bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. A36 S127x45 çelik kirişlerden oluşan toplamda 21 numune hazırlanmıştır ve test edilmiştir. Güçlendirilmemiş kirişlerde kontrol numuneleri olarak test edilmiştir. Çelik kirişler, 5 ila 10 Hz arasındaki yüklemme hızı ile dört nokta eğilme altında test edilmiştir. 69 ile 379 MPa arasındaki farklı sabit gerilme aralıkları düşünülmüştür. CFRP parçasının uzunluğu ve kalınlığı bütün güçlendirilmiş numunelerde aynı tutulmuştur. Kırılma için çevrim sayısına ek olarak her deney esnasında sertlik, çatlak başlama ve çatlak büyüme hızı izlenmiştir. Sonuçlar, sadece CFRP parçasının bir detayın yorulma ömrünü üç kattan fazla arttırdığı değil, aynı zamanda çatlak büyüme oranını önemli ölçüde düşürdüğünü gösterdiği bulunmuştur[13].

Yu Q.-Q. ve Wu Y.-F. yaptığı çalışmada farklı parçalı sistemler ve yüksek dayanımlı malzemeler kullanılarak kırıklı çelik kirişlerin yorulma davranışı üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu malzemeler arasında karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) katman, yüksek dayanımlı çelik (HSS) plaka ve SafStrip plaka bulunmaktadır. Yapıştırıcı ve mekanik ankraj bu üst bindirmeleri eklemek için seçilmiştir. Çatlak cephesinin yakınındaki gerilme dağılımını tespit etmek için bir dijital görüntü korelasyon (DIC) sistemi kullanılmıştır. Farklı güçlendirme düzenleri olan numuneler için farklı kırılma

modları gözlemlenmiştir. Deney sonuçları, güçlendirilmemiş kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, uygulanan bu güçlendirme malzemeleri önemli derecede çatlak yayılımını ertelediğini ve kırıklı çelik kirişlerin yorulma ömrünü uzattığını göstermiştir. Bu güçlendirme yöntemleri ile rijitlik değişimi ve çatlak ucu yer değiştirmesi azalmıştır. Çatlak yayılması çelik kirişin yarı yüksekliğine ulaştığında yorulma çevrimini temel aldığımızda Araldite 420 ile yapıştırılmış CFRP katmanları en iyi performans gösteren güçlendirme malzemesi olmuştur. Bu çalışma, çelik kirişlerin yorulma onarımı anlayışını genişletmekte ve güçlendirme yöntemi için bazı faydalı öneriler sunmaktadır[14].

Alemdar ve diğerlerinin yaptığı çalışmada çelik köprülerde kaynaklı bağlantılarda, önemli sayıda çelik köprüleri etkileyen, tekrarlayan bir sorun olan yorulma hasarını önlemek ve onarmak için çeşitli yöntemlerin performansını değerlendirmektedir. Deneysel testler ve Abaqus sonlu elemanlar paket programında yapılan analitik simülasyonlar, kaynaklı bağlantıların karbon fiberle güçlendirilmiş polimer (CFRP) kaplamalarla güçlendirildiği plaka numunelerin yorulma performansını araştırmak için uygulanmıştır. CFRP kaplamalarının bağlanmasından kaynaklanan kaynaklı bağlantıların yorulma-çatlak başlatma ömründeki değişimi değerlendirmek için numuneler, çevrimsel bir yüke maruz kalan üç noktalı eğilme ile yüklenmiştir. Test sonuçları CFRP kaplaması ve çelik arasındaki bağ sağlandığında gerilme yığılmasındaki azalma kaynaklı bileşimlerin yorulma ömrünü güçlendirilmemiş şekilde AASHTO yorulma tasarım kategorisinde E' den sonsuz yorulma ömrü aralığına uzatmak için yeterli olduğunu göstermiştir. Test sonuçları ayrıca, yapıştırıcı tabakanın yorulma mukavemetinin, yapıştırıcı tabakanın içinde havalandırma bezi materyali sokulmasıyla büyük ölçüde geliştirildiğini göstermiştir [15].

Kaan ve Alemdarın yaptığı çalışmada çelik köprü kirişlerinde kaynaklı bağlantıların yorulma performansını arttırmak amacıyla karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kaplama elemanları geliştirildi. 4 tane CFRP ile güçlendirilmiş numuneler ve üç kontrol numunesi olmak üzere yedi test numunesinin yorulma testleri, CFRP kaplamalarının kaynaklı bağlantıların yorulma çatlama başlatma ömrü üzerindeki etkisini ölçmek için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, CFRP ile güçlendirmenin, yüksek gerilme aralıklarında test edilen kaynaklı bağlantılar üzerindeki gerilme yığılmalarını önemli ölçüde azalttığını ve yorulma çatlama başlatma ömründe büyük bir artışa neden olduğunu göstermiştir.

Test edilen birleşimlerin yorulma çatlak ömrünü uzatması üzerine CFRP kaplama elemanlarının etkili olma seviyesi, öncelikle çevrimsel yükler altında yapıştırıcının mukavemetinden etkilendiği bulunmuştur. Ayrıca yapıştırıcının mukavemeti çelik ve CFRP katmanlarını bağlamak için kullanılan epoksi tabakalarının kalınlığına ve kimyasal birleşimine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Bir referans çerçevede olarak AASHTO yorulma tasarım eğrileri kullanarak, en uygun bir yapıştırıcı malzemesi kullanıldığında, kaynaklı bağlantıların CFRP katmanları ile güçlendirilmesi yorulma performansını kategori E den sonsuz yüksek gerilme aralığına kadar bir değişikliğe neden olduğu bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada yorulma yükü altında iyi performans ile sonuçlanan optimum bir yapıştırıcı tabaka tanımlanmıştır[16].

Nashwa Yossef'in yaptığı çalışmada güçlendirilmiş çelik kirişlerin davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Çelik levhalar ile güçlendirilmiş altı örnek üzerinde tam ölçekli testler mevcuttur. Test edilen tüm elemanlar IPE profilleridir. Bir ucu mafsallı diğer ucu kayıcı olmak üzere dört noktalı yükleme deneyi test edildi. Dört numune yüklemeden önce güçlendirilmiştir. Fakat kalan iki numune yeni bir kaynak tekniği kullanarak yükleme altında güçlendirme işlemi yapılmıştır. Yeni kaynak tekniği, kapak plakasının kaynağından önce sapmayı azaltmaya dayanmaktadır. Test parametreleri arasında, güçlendirme plakanın uzunluğunun değiştirilmesi, iki güçlendirme örneği ve üç ön yükleme seviyesi bulunmaktadır. Deneysel sonuçlar çelik plakanın uzunluğunun test edilen numunelerin taşıma kapasitesine etki ettiğini göstermiştir. Ek olarak; Nihai taşıma kapasitesi, kaynaklı plakanın alanından etkilenmiştir. Önerilen kaynak tekniği (yük altındayken çelik plakanın kaynaklanması için kullanılır), yük kapasitesini % 5.7'ye kadar artırmada ve maksimum deplasmanın % 30 azaltarak etkili olduğu bulundu[17].

Tall, Yüklü çelik kolonların güçlendirilmesine çalışmıştır. Kolonların, çelik plakalarının kaynağıyla güçlendirilebileceğini veya bir kaynak yayarak artık gerilme dağılımını değiştirerek güçlendirilebileceğini belirtmiştir. Artık gerilmelerin büyüklükleri ve dağılımları ile kaynaklı çelik plakalarının yönünü değiştirmiştir. Çelik sütunların flanşlara kaynak yapılmış çelik levhaları ile güçlendirilmesinin, kaynağın tek başına döşenmesine göre kolon dayanımını geliştirdiğini belirtmiştir. Wu ve arkadaşları kaynak yapılmış çelik plakaları ile geniş flanş çelik kolonların güçlendirilmesi davranışını açıklamak için 317 sonlu eleman modeli analiz etmiştir. Çalışma, kolon narinliğinin ve başlangıçtaki



düzensüzlüğün güçlendirilmiş kolonlar için önemli faktörler olarak kaldığını göstermektedir. Çelik plakalarının burkulma yönünün güçlendirilmiş kolonların mukavemetini etkilediği gözlenmiştir[19].

Aprile ve diğerlerinin yaptığı çalışmada ise eğilme açısından çelik ya da karbon fiber takviyeli plastik ince tabakalarla güçlendirilmiş betonarme numunelerin rijitliğini, yük kapasitesini ve kırılma modunu tahmin etme sorununu tartışmaktadır. Bu güçlendirme tekniklerinde en kritik konu plaka ayrıldığında yük kapasitesi aniden düşmekte ve kırılma modu tipik olarak gevrekleşmektedir. Betonun kırılma yayılımı ve donatının akması nedeniyle kiriş ile plaka arayüzünde önemli bir miktarda gerilme artışları meydana gelmektedir. Ayrılma, bağ kuvvetine yerel ulaşıldığında ortaya çıkar. Güçlendirilmiş kirişlerin davranışını doğru bir şekilde tanımlamak ve gerçekçi bir şekilde öngörmek için, yer değiştirmeye dayalı bir fiber kiriş modeli kullanılmıştır. Kiriş ile plaka arasındaki bağ kayması kirişte ve güçlendirme plakasında ayrı yer değiştirme alanları varsayarak dâhil edilir. Önerilen model, deneysel araştırmalarda gözlenen farklı kırılma modlarını doğrulamak ve araştırmak için kullanılır. Araştırma, kayma deformasyonlarının ihmal edildiği yüzeysel kirişlerle sınırlıdır. Plaka ayrılmasından dolayı kiriş yükleme kapasitesini ve kırılma modunu tahmin etmek için, plaka ile güçlendirilmiş kiriş arayüzünde gelişen bağ gerilmelerini düzgün bir şekilde tanımlayabilecek bir model kullanımı önemlidir[20].

Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh'in yaptıkları çalışmada statik yük altında CFRP levhaları ile onarılan hasarlı kompozit kirişlerin davranışı üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçları gösterilmektedir. W355 × 13.6 A36 çelik ve 75 mm kalınlık ile 910 mm genişliğindeki beton döşemelerden oluşan toplam üç büyük ölçekli kompozit kirişler hazırlanmış ve test edilmiştir. Hasar oranları %25, %50 ve %100 olacak şekilde numunelerinin çekme başlığı sırası ile 43, 86 ve 171mm kesilmiştir. %25 hasarlı kirişe 1 kat, %50 hasarlı kirişe 3 kat ve %100 hasarlı kirişe 5 kat CFRP üst üste yapıştırılmıştır. Kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde sırası ile %20, %80 ve %10 artış sağlanmıştır. Yapılan güçlendirme ile elastik rijitliklerde yine aynı sıra ile %91, %102 ve %86 oranında artış gözlenmiştir. Deney sonuçları nümerik olarak da karşılaştırılmıştır[21].

Türkiye de yapılan güçlendirme üzere betonarme üzerine birçok çalışma olmasına rağmen çelik ile güçlendirmede hala geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Çelik üzerinde yapılan tez çalışmalarında olan Ağcakoca'nın doktora tezinde I kesitli kompozit kirişlerin HM-CFRP ile güçlendirilmesi çalışmasında hem deneysel hem numerik hemde parametrik bir çalışması sunulmuştur. Ağcakocaya göre çelik betonarmeden daha güçlü bir malzeme olduğu için CFRP güçlendirme açısından tam bir verim sağlanamamaktadır. Bu yüzde CFRP'ye göre daha mukavemetli olan HM-CFRP ile ilgili çalışma yapmıştır. Bu çalışmanın amacı; çelik kirişlerin HM-CFRP ile güçlendirilmesi ile rijitlikte ve dayanımda mukavemet kazanmasını sağlamak, güçlendirilecek kirişte istenilen dayanım artışı için gerekli HM-CFRP miktarını bulmak ve çelik kesit ile HM-CFRP'nin birlikte çalışmasını sağlamak için gerekli faydalı bağlanma boyunu belirlemektir[22].

Mühendislik yapılarında yorulma çatlaklarının artması, yapıların yük taşıma kapasitesini düşürür ve sonunda kırılmaya neden olacaktır. Başlangıçtan kritik uzunluğa kadar bir çatlak büyümek için gerekli olan çevrim sayısı yorulma kırılma ömrü olarak söylenebilir. Joshua H. Melson'un master tezinde öncelikli olarak beş farklı metotla merkezi bir çatlağa sahip bir plakada yorulma ömrü üzerinde analitik çalışarak 7075-T6 alüminyum çeliği üzerinde 1969 da NASA'da yapılan deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Paris, Walker ve Forman yorulma çatlak büyüme modelleri deneysel verilere uyduğu gözlemlenmiştir. Tüm yorulma kırılma ömrü karşılaştırmaları için temel olarak analitik modeller kullanılmıştır. The Virtual Crack Closure Technique (VCCT) önceden tanımlanmış bir yol boyunca çatlak yayılımı için bir yöntem olarak seçilmiştir. Tüm sonlu elemanlar analizleri Abaqus 6-13.3'de yapılmıştır[23].

Güçlendirme plakalarının kullanıldığı yerlerden biri de moment aktaran birleşimlerdir. Güçlendirme plakaları ile takviye edilen çelik moment bağlantıları, Northridge depreminden bu yana hem laboratuvar testlerinde hem de yeni çelik moment çerçeve yapımında ABD'de çalışma konusu olmaktadır. Engelhardt ve Sabol'un yaptığı çalışmada, güçlendirme plakaları ile takviye edilmiş 12 büyük ölçekli bağlantı deney numunesi üzerine deneysel verileri sunmaktadır. 12 test örneğinden 10'u beklenenin üstünde performans göstermiştir ve çevrimsel yük altında büyük plastik rotasyonlar geliştirilmiştir[24].

Literatürde genellikle CFRP nin güçlendirme açısından üstün nitelikte olduğundan bahsedilmiştir. Ama CFRP nin kullanılmasını sınırlayan bir konuda CFRP plakalarının statik ve yorulma yükleri altında yapıştığı yerden sıyrılmasıdır. Lenwari vd. nin yaptığı çalışmada çelik kirişleri güçlendirmek için kullanılan kısmi uzunlukta, yapışkanla bağlanmış karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) levhaların yapışma kuvvetini ele almaktadır. Yapıştırılmış CFRP plakaları, plakanın ucundaki çok yüksek gerilme alanı nedeniyle statik ve yorulma yükleri altında ayrılma eğilimi göstermektedir. Bu gibi eğilimler CFRP plakalarının uygulanmasını sınırlamaktadır. Statik ve yorulma testleri, gerilme yoğunluğu faktörünün ayrılma mukavemeti üzerinde etkili olduğu göstermektedir. Plaka kalınlığı, plaka elastisite modülü, yapıştırıcı tabaka kalınlığı, yapışkanın elastisite modül ve yapıştırma açısı gibi parametrelerin gerilme yoğunluğu faktörleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır[25].

Yorulma ve kırılma mekaniğinin teorisini anlamada ve uygulamada bir altlık oluşturmak için kullanılacak en önemli kaynaklardan biri de Barson ve Rolfe'nin " Fracture and Fatigue Control in Structure; Application of Fracture Mechanics" kitabıdır. Bu kitapta yorulma da önemli bir parametre olan gerilme yoğunluk faktörünü değişik kırık geometrilerine göre ve gerilme aralığına göre matematiksel olarak hesapları göstermekte ve ayrıca yorulmaya etki eden faktörleri bölüm bölüm anlatmaktadır[26].

İnşaat Yüksek Mühendisi Barış GÜNEŞ'in hazırladığı doktora tezinde CFRP ile güçlendirilmiş çelik-betonarme kompozit kirişlerin yorulma davranışını incelemiştir. Bu çalışmada; yapısal yetersizliğe sahip, korozyonlu çelik-betonarme kompozit kirişli köprüler için karbon lifli polimerler (CFRP) ile güçlendirme yöntemi ve bu köprülerin maruz kalacağı statik ve çevrimsel yükleme altındaki yük-yerdeğiştirme ve yorulma davranışlarının incelenmesi ve iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda deneysel çalışma yapılmış, analitik model geliştirilmiş ve ilgili yönetmeliklere göre köprülerin servis durumları incelenmiştir[27].

Paris-Erdoğan 1963 yılında yaptıkları çalışmada yorulma ömrünün tahmininde önemli bir yere sahip olan çatlak ilerleme hızı ve gerilme şiddeti faktörüne bağlı bir önemli bir bağıntı ortaya koymuşlardır[28].

CFRP mekanik olarak diğer yapısal elemanlardan üstün olmasına rağmen, yapısal mekanik bakış açısından, CFRP ile güçlendirme etkinliği ve güvenliği ile ilgili önemli bir endişe, gevrek bir şekilde sıyrılma potansiyelinin meydana gelmesidir. Bu tür konular, tasarım sürecinde yeterince düşünülmedikçe güçlendirme uygulamasında etkinliğini önemli ölçüde azaltabilir. Son yıllarda, sıyrılma problemlerinin karakterizasyonu ve modellenmesi üzerinde araştırma çabalarının yoğunluğu olmuştur. O. Büyüköztürk ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, bu alanda hem betonarme hem çelik elemanlara uygulanan statik ve çevrimsel yükler altında yapılarda meydana gelen sıyrılma problemi hakkında ilerlemeler incelenmiştir[29].

## **1.2 Tezin Amacı**

Türkiye’de çelik yapılar artık birçok alanda kullanılmaktadır. Çelik malzemesi inşaat sektöründe üst geçit, köprü ve demiryolu gibi ulaşımda önemli konumunda olan yapılarda sıkça kullanılmaktadır. Ulaşım sisteminin aksamaması için bu tür yapıların yapısal güvenilirliği çok önemlidir. Bu yapılar depreme dayanıklı olarak iyi projelendirilse de belli bir süre sonra yorulma ya da çevresel etkilerden dolayı taşıma kapasitesinde azalmalar meydana gelmektedir. Bu durum göz önüne alınmadığı takdirde tarihte de örnekleri olduğu gibi felaketlere yol açabilir.

Türkiye’de yapılan tezlerde çok azında yorulma hakkında çalışmalara rastlanmıştır. Bu nedenle yorulma hakkında daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Bu tezde önce yorulma ve kırılma mekaniği hakkında bilgi verip bir sayısal örnek çözülerek kırılma mekaniğinin parametrelerinin yorulma üzerindeki etkisi hakkında fikir edinmeyi amaçlanmıştır. Sonraki bölümde literatürde kullanılan sonlu elemanlar paket programı Abaqus hakkında bilgi verilip deneyde kullanacağımız dört noktalı eğilme testi modellenmiştir. Yorulma açısından önemli gerilme değerlerini farklı koşullarda nasıl dağıldığını görmek amaçlanmıştır. Dördüncü bölümde ise deneysel çalışma yapılmış hasar görmüş bir kirişin yorulma yüklemesi altında kritik bir değere ulaştığında yapılan güçlendirme metodunun yorulma performansını nasıl etkilediğini gözlemlemek amaçlanmıştır. Sonuçlar kısmında yapılan tüm sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

### 1.3 Hipotez

Bu tez çalışması iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım analitik simülasyon kısmıdır. Sonlu elemanlar paket programı olan Abaqus programı kullanarak statik yükleme altında kirişin dört noktalı eğilme deneyi modellenmiştir. Yorulmaya ana nedenlerinden gerilme yığılmalarının çatlak boyuna, çatlak geometrisine ve farklı güçlendirme metotlarına göre değişeceği gözlenecektir. İkinci kısım olan deneysel kısımda çevrimsel periyodik yükleme altında hasarlı kirişlerde meydana gelen yorulma kırılmasının çelik plaka ve CFRP ile güçlendirme teknikleri kullanılarak yorulma performansının arttırılacağı düşünülmektedir. Çelik plakada bulonlar arasındaki mesafe arttıkça yorulma ömrü de artması düşünülmektedir. Bir takım üstün mekanik özelliklerinden dolayı CFRP malzemesinin çelik plakaya göre daha iyi bir performans göstermesi tahmin edilmektedir. Ancak CFRP deneylerinde yorulma yüklemesi altında görülen sıyrılmaya probleminin meydana geleceği düşünülmektedir.

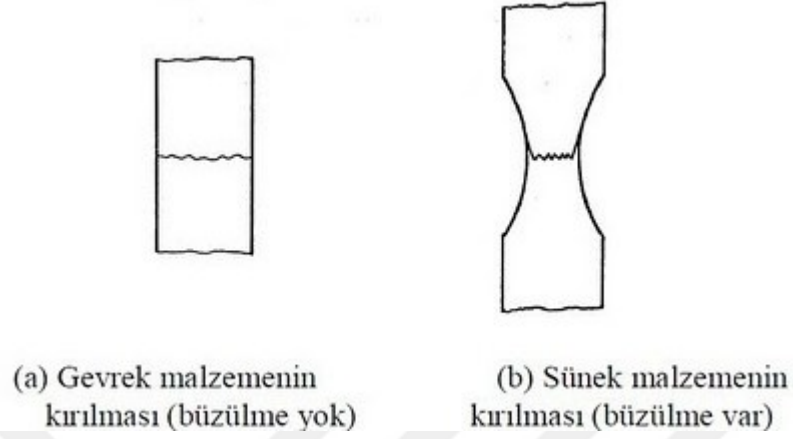
### KIRILMA MEKANIĞI VE YORULMA

Kırılma genel olarak belirli bir yük altında elemanın dayanamayıp iki ya da daha fazla parçalara ayrılması diye tanımlayabiliriz. Daha bir bilimsel bir tanımlamayı 1983'te Irwin yapmıştır. Irwin'e göre kırılma mekaniğinin tanımı şu şekildedir; Kırılma direncini, yüke ve malzeme yapısına göre ortaya koyan nicel yaklaşımdır[1].

Makine parçaları yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları ve diğer karmaşık ve pek de anlaşılamayan nedenlerden dolayı kırılabilir. Aynı hatanın tekrarı istenmiyorsa hasarın nedeninin anlaşılması oldukça önemlidir. Neredeyse mühendislikte belli bir amaç için kullanılan tüm malzemeleri gözle görülmeyecek en küçük boyutta olsalar da iç yapısında süreksizlik bulundurlar. Çalışma koşullarında içyapıda bulunan süreksizlikler çoğalarak birbirleri ile birleşirler ve gözle görünür bir hal alırlar. Bu şartlar altında bu elemanın yapısal bütünlüğü için mühendis çatlak veya çatlakların nasıl ve ne zaman daha da büyüyeceğini, ilerleyebileceğini ve parçanın bu şekilde hasara uğrayacağını bilmelidir. Bu soruları cevaplamaya yardımcı olan bilim dalı Kırılma Mekaniği olarak adlandırılmaktadır[1].

Kırılmanın meydana gelmesi iki aşamadan oluşur; İlk aşama süreksizliğin ortaya çıkması, İkinci aşama süreksizliğin ilerlemesi ve çoğalması olarak düşünülebilir. Genel olarak dört tür kırılmadan bahsedebiliriz. Bunlar gevrek kırılma, sünek kırılma, sürünme kırılması ve yorulma kırılmasıdır. Bu kırılma türlerinden kısaca değinecek olursak gevrek kırılma çok az veya hiçbir deformasyona uğramadan malzemenin 90°lik açıyla kırılmasına gevrek kırılma denir. Ani kırılma olarak da adlandırılır. Bundan dolayı en tehlikeli kırılma türü olarak düşünülür. Örnek olarak cam, seramik ve bazı metaller

gevrek olarak kırılırlar. Sünek kırılma ise gevrek kırılmanın tam tersi malzeme kırılmadan önce gözle görülebilir deformasyonlara uğraması genellikle 45 derecelik açı yaparak kırılması olayıdır. Örnek olarak metaller ve polimerleri verebiliriz.



Şekil 2.1 Gevrek ve Sünek Malzemelerin kırılma şekli[36]

Sürünme kırılmasına gelince yüksek sıcaklıklarda sabit gerilme veya sabit yük altındaki malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılması olayı olarak tarif edilebilir. Gözle görülmeyen süreksizlik açıdan sünek kırılmaya benzer ancak mikroskobik açıdan sürünmeler daha yüksek sıcaklıklarda olduğundan farklıdır[37].

Yorulma kırılması ise malzemeler elastik limit veya çekme dayanımı altında da olsa tekrarlı yüklere maruz kaldıklarında zamanla kırılırlar. Buna yorulma kırılması denir. Kırılma plastik deformasyon meydana gelmeden de oluşabilir. Bu durumda çatlakların her bir çevrimde biraz daha ilerlediği bilinmektedir[38].

## 2.1 Kırılma Mekaniğini Önemi

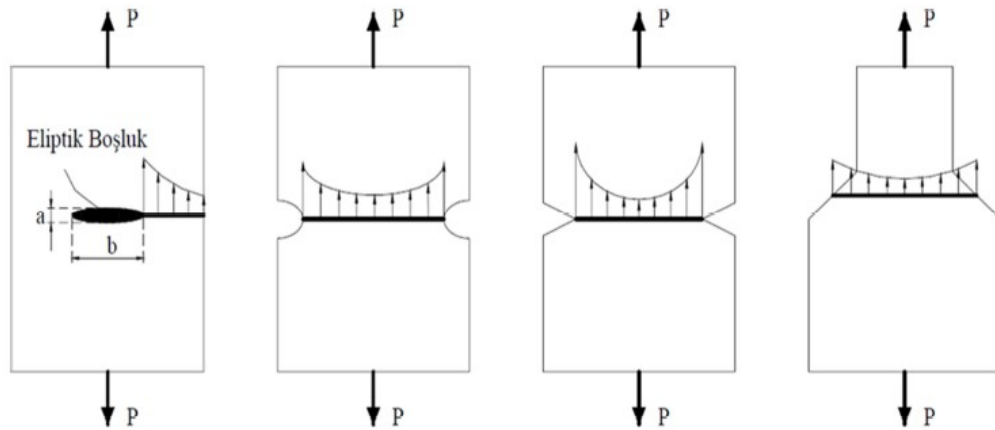
Kırılma mekaniği günümüzde iki yönden çok değer kazanmaktadır. Birincisi güvenlik açısından ikincisi ise ekonomiklik açısındandır. 1982 de Amerika Birleşik Devletler’inde yapılan bir araştırma sonucunda kırılmanın ABD ekonomisi için yıllık maliyeti yaklaşık 120 milyon dolar olduğu tesbit edilmiştir. Bu maliyet eğer kırılma mekaniğini tasarımda ön planda tutulup gerekli önlemler alındığında ve teknik personelin kırılma konusunda eğitildiği takdirde azaltılabılabileceği mümkündür.

İnsan hayatını korumak hepimizin öncelikli görevidir. Bir makine bir yapı tasarladığımız zaman her türlü güvenlik önlemlerini almayı düşünmek zorundayız.

Genel olarak yapının iç yapısından homojenliğinden kaynaklanan birçok olayda kırılma mekaniği ön plana çıkmaktadır. Örneğin İkinci Dünya Savaşında “Liberty” adlı gemilerin batmalarında kırılma mekaniği ve yorulmadan kaynaklı kırılma türü probleminden kaynaklandığı ortaya çıkmıştır[1].

## 2.2 Gerilme Yığılması

Malzeme yapısı ne kadar homojen olsa da kendi iç yapısında süreksizlikler bulundurulur. Ayrıca herhangi bir etkide örneğin vurma, çarpma darbe gibi bir takım faktörlerden dolayı homojenliğini kısmen ya da tamamen kaybedebilir. Kuvvet uygulanan elemanlarda hem iç kısımlarda hem de kenarlarda bir süreksizlik bulunabilir. Yükleme durumunda da bu elemanların kesitlerinde yavaş veya ani bir kesit değişimi olabilir. Bu gibi süreksiz elemanlarda oluşacak gerilmelerin düzgün dağılım göstermez. Parçaların imalatı sırasında oluşabilecek boşluk, çatlak, personel hatası, hesaplama hatası diğer birikintiler ile oluşması ihtimal gerilme düzensiz olarak dağılır. Bazı hallerde oluşacak gerilmeler, ortalama gerilmelerden farklı değerde olacaktır. Bazı bölgelerde gerilmeler maksimum değerine ulaşacaktır. İşte gerilmelerin ortalama değerinden ayrılarak bazı bölgelerde maksimum olmasına gerilme yığılması veya çentik etkisi denir[1].



Şekil 2.2 Basit çekme durumunda çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılması[1]



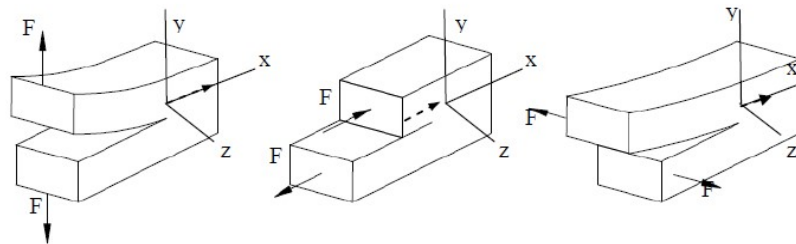
### 2.3 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği açısından incelenen elemanın mekanik özellikleri elastik bölgede kalması durumundan yazılacak her türlü denge denklemleri için elastisite teorisini kullanılması hareketle geliştirilen analizlere Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) olarak adlandırılır. Bu analiz aşamaları bir çatlak ucunun yakınlarında gerilme alanı büyüklüğü ve dağılımı, bir test numunesinin ya da yapısal elemanda uygulanan aksel gerilme ve bir çatlak ya da çatlak benzeri süreksizliğin boyutu, şekli ve yönünü kapsar.

Bu konunun temel prensibi çatlak ucunda oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan gerilmeye, çatlağın uzunluğuna ve yönüne bağlı olarak ifade edilmesidir. Buna göre, bir çatlağın ilerleyebilmesi iki şekilde hesaplanabilir, birincisi yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşma durumunda, ikincisi çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşma durumunda hesaplanır[1].

Bu iki metodun uygulanmasında enerji dengesi yaklaşımı ve gerilme şiddeti faktörü yaklaşımı olmak üzere iki yaklaşım bulunmaktadır.

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağlı hareketinin bilinmesi gerekir. Malzemelerde yükleme şekline bağlı olarak mevcut çatlaklar üç farklı şekilde ilerleyebilmektedir (Şekil 2.3). Bunlar; mod I (açılma modu), mod II (düzlem içi kayma modu) ve mod III (düzlem dışı kayma modu) olmak üzere adlandırılmaktadır. Bu kırılmalarda mod I ile ilgili gerilme şiddeti faktörüne  $K_I$ , mod II ile olanına  $K_{II}$ , mod III ile ilgili olanına da  $K_{III}$  adı verilir. Çatlak ilerlemesi, yükleme durumuna bağlı olarak, bu modlardan sadece birisiyle verilen türde olabileceği gibi farklı modların bir birleşimi şeklinde de ortaya çıkabilir. Bunlardan mod I, çekme altında olduğundan teknik olarak en önemlidir. Mod I çatlak ilerlemesi en sık rastlanan ve en fazla hasara neden olan çatlak ilerleme modudur[1].



Şekil 2.3 Kuvvet altında oluşan üç farklı kırılma modu[1]

I tip açılma modunda, iki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri xz düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip makaslama (yırtılma) modunda ise çatlak xy ve xz düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar. İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur. Çatlak ucundaki gerilme şiddet en gerilme faktörleri en genel ifadeyle her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir[39].

$$K_I = \sigma * \sqrt{\pi * a} \quad (2.1)$$

$$K_{II} \text{ ve } K_{III} = \tau * \sqrt{\pi * a} \quad (2.2)$$

Burada  $\sigma$  uygulanan gerilmeyi,  $\tau$  kayma gerilmesini,  $a$  için iki durum söz konusudur. İlki merkezi çatlak halinde yarı çatlak boyu, kenar çatlağı halinde tam çatlak boyu alınır.  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  ise gerilme yoğunluğu faktörüdür. Formülden anlaşılacağı üzere  $K$  değeri çatlak ucundaki gerilme şiddeti, uygulanan gerilme ve elemanın geometrik özelliklerine bağlıdır. Farklı çatlak geometrilerine göre farklı gerilme şiddeti faktörü hesaplanabilir.

## 2.4 Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği

LEKM'nin geçerli olmadığı durumlarda yani plastik şekil değiştirmenin önemli olduğu modellerde elastik kırılma mekaniği modeli (EPKM) geliştirilmiştir. LEKM'de lineer olmayan malzeme davranışından çatlak uçununun çok küçük bir bölgede analizden anlamlı sonuç vermektedir. Ama gerçekte bu durum bilimsel anlamda çok geçerli değildir. Bunu elemine etmek için farklı bir kırılma mekaniği modeli geliştirilmiştir. EPKM genelde plastik deformasyona uğrayan elemanlar için kullanılan bir analizdir. Bu analizde kullanılan iki önemli parametre vardır. İlki Çatlak ucu açılma mesafesi (CTOD) testi ikincisi ise J- İntegrali metodudur.

### 2.4.1 Çatlak Ucu Açılma Yer Değiştirmesi (CTOD) Metodu

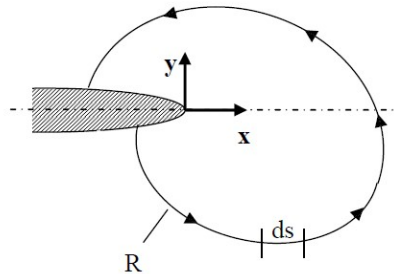
Kırılma tokluğu çatlak ilerlemeden malzeme dayanıklılığının yorumlanmasına kadar kırılma mekaniğinde çok kullanılan bir terimdir. Bu test de numunenin kırılmadan önce bazı plastik deformasyonların meydana gelebileceği zaman kullanılan bir nevi kırılma tokluğu testi denilebilir. CTOD kırılma mekaniğinde en çok kullanılan parametrelerden

biridir. CTOD'nin mantığı Wells tarafından 1963'te açıklanmıştır. Wells elastik gerilme yoğunluk faktörü(K) yaklaşımını elastik plastik akma sınır koşulları içerisinde CTOD yaklaşımını geliştirmiştir. Wells bu yaklaşımı geliştirirken Irwin'in plastik alan tahminini ve merkezi çatlak sonsuz levha için elastik şekil değiştirme çözümlerini kullanarak aşağıdaki formülü geliştirmiştir[40].

$$CTOD=\delta= \frac{4}{\pi} * \frac{K^2}{E * \sigma_{akma}} \quad (2.3)$$

#### 2.4.2 J-İntegrali Testi

Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi ciddi manada yapının güvenilirliğini ve birleşim elemanlarını tehdit etmektedir. Bu nedenle yapısal güvenilirlikte çatlakların etkisini değerlendirmek önem arz etmektedir. Bu değerlendirmeler için birçok parametreler kullanılmaktadır. En çok kullanılan parametre gerilme yoğunluğu faktörüdür. Bu parametre genellikle lineer elastik davranış gösteren malzemelerde doğru sonuç vermektedir. Sünek malzemelerde yani malzemenin elasto-plastik davranışının çok büyük olduğu durumlarda farklı parametrelerle bu etki dikkate alınmalıdır. Bu parametrelerden biri j-integrali parametresidir. Bu parametre CTOD testi sonucu elde edilen veriye alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu parametre çok büyük plastik deformasyonların ortaya çıktığı çatlak ucu bölgelerini çevreleyen gerilme ve gerinim alanlarını başarılı bir şekilde karakterize eder. Bu parametre sadece EPKM'nde değil LEKM'de de kullanılır. J- İntegrali ilk J.R. Rice tarafından araştırılmıştır. Rice göre çatlak ucunu çevreleyen keyfi şekilde çizilen bağımsız integral yolu hem enerji yayılım oranını hem de gerilme yoğunluk parametresini incelemekte kullanılır[41].



Şekil 2.4 Çatlak ucunu çevreleyen rasgele çizilmiş kapalı eğri [41]

Burada J integrali şu förmül ile hesaplanır;  $J = \int_R \left[ w \delta y - T_i \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x} \right\} \delta s \right]$  (2.4)

R=çatlağı saran rasgele eğri

w= genleme enerjisi yoğunluğu

$T_i$ =eğriye dik yöndeki çekme gerilmesi vektörü

$u_i$ =deformasyon vektörü

ds = ark boyu

## 2.5 Yorulma

Yorulma, yeterli sayıda gerilme dalglanmalarına oluştuktan sonra, kırılmalara neden olabilecek gerilme ve gerinim dalgalarına maruz kalan malzemelerin meydana getirdiği ilerleyen, lokalize ve kalıcı yapısal değişim olarak adlandırılabilir. Yorulma kırıkları, çevrimsel yükleme, çekme gerilmesi ve plastik gerilmenin eş zamanlı etkisiyle oluşur. Bu üç nedenden biri mevcut değilse, yorulma çatlamaşı başlamayabilir ve yayılmayabilir. Çevrimsel gerilme çatlamanın başlamasına neden olurken; Çekme gerilmesi, çatlak büyümesi (yayılım) üretir. Basınç gerilmesi yorulmaya neden olmaz, ancak sıkıştırma yükü malzemeyi yorabilir.

Yorulma süreci 3 aşamadan meydana gelir;

-Çatlak çekirdeklenmesine ve çatlamaşı yol açan başlangıç yorgunluğu hasarı

-Çatlak yayılımı

-Kırılmanın gerçekleşmesi

Yorulma kırılması, genelde, malzemenin statik akma mukavemetinin altında sürekli gerilmeye maruz kalması ile meydana gelir. Yorulma çatlakları, germinin en şiddetli olduğu bölgelerde başlar ve yayılır.

Birçok mühendislik malzemeleri homojen değildir ve süreksizlikler içerir; bu nedenle kusurlardan ve süreksizliklerden dolayı buralarda gerilme yığılmaları meydana gelir. Yorulma çatlakları bu gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde başlar ve yayılır. Çevrimsel yüklemenin etkisi altında, kusurlu bölgenin ucunda bir plastik bölge (veya

deformasyon bölgesi) oluşur. Yüksek deformasyonun bulunduğu bu bölge yorulma çatlakları için bir başlatma alanı haline gelir. Çatlak, uygulanan gerilme altında tam kırılma oluşana kadar materyal boyunca yayılır. Mikroskopik ölçekte yorulma sürecinin en önemli özelliği; Çevrimsel gerilmelerin etkisi altında bir veya daha fazla çatlakların çekirdeklenmesi, bunu takiben kalıcı kayma bantlarında veya tane sınırlarında çatlaklar oluşmasıdır.

Yorulma malzemenin dayanabileceği maksimum gerilmelerden daha küçük tekrarlı ya da düzenli veya düzensiz değişen gerilmelerin etkisiyle malzemede meydana gelen hasar olarak bir diğer tanımı yapılmaktadır. Malzemenin iç yapısındaki kusurlar nedeniyle bu kusurlar etrafında meydana gelen yerel gerilme birikintileri yorulmaya neden olur. Yorulmaya neden olan bir diğer konu ise çentik etkisidir. Malzemede bulunan çatlak, boşluk, çentik, ani kesit değişimleri etrafında biriken gerilmeler o bölgelerde yerel plastik deformasyonlara sebep olurlar. Böylece çentik meydana gelir ve ilerleyerek çatlakları ve tekrarlı yükler etkisinde yorulma kırılmalarını oluşturur. Ayrıca yorulmayı meydana getiren olaylar sadece dışarıdan uygulanan mekanik yükler değil, ısı genleşme ve büzülme sonucunda malzeme yapısında meydana gelen ısı gerilmelerde yorulmaya neden olabilmektedir. Bu sebeplerle birlikte malzemenin yüzey kalitesini bozan korozyonda yorulmayı arttırıcı sebepler arasında sayılabilir.

Mühendislik işlerinde yorulma hasarları genellikle köprüler özellikle çelik köprü elemanları nakliye işlerinde kullanılan makinalar, vinçler, denizlerde petrol arama için kullanılan makinalardaki çelik tel halatları bu çeşit zorlamaların etkisi altındadır. Raylar, her türlü nakil vasıta dingilleri, uçak kanatları, uçak gövdesi ve diğer elemanları yorulmaya problemleri ortaya çıkmaktadır.

Yorulmadan dolayı oluşan hasar yani kırılma gevrek bir kırılma türüdür. Bundan dolayı nerede, ne zaman kırılacağı belli olmayan bir kırılma türüdür. Mühendisler tasarım yaparken kullanacağı malzemenin yorulma dayanımı kriterine her zaman düşünmelilerdir.

Yorulma problemlerinden kaçınmak için;

-Numunede gerilme yığılmalarını azaltacak işlemler yapmak,

-Ani yüzey değişimlere neden olan darbe, damgalama, kesme gibi işlemlerde kaçınmak,

- Yüzey süreksizliğine sebep olacak işlemlerden kaçınmak,
- Üretim sırasında dekarbonize işlemi ya da ısıl işlemi numuneye uygulamak,
- Üretim sırasında ısıl işlem ya da kaynak işlemi uygularken meydana gelecek artık gerilmeleri azaltmak,
- Kimyasal tepkimelere, aşınmalara veya korozyona karşı önlemler alınırsa yorulma ömrünü arttırabiliriz[42].

### **2.5.1 Yorulmayla İlgili Temel Kavramlar**

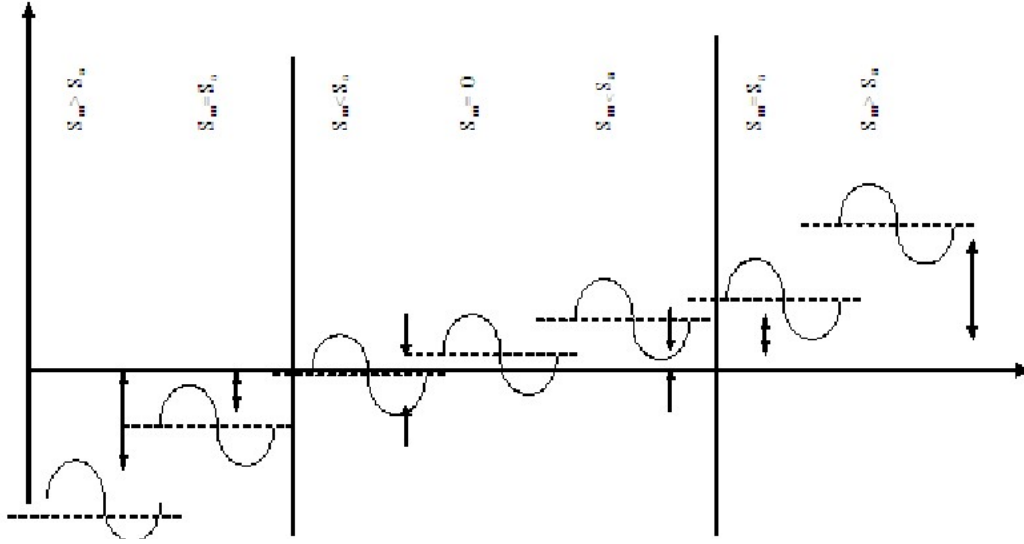
Çevrim(Cycle) gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçası ya da yük tekrarı sayısı olarak adlandırılır. Ayrıca birim zamanda malzemeye gelen yük tekrarı frekans diye adlandırılır. Frekansın birimi Hertzdir.

Yorulma sınırı: Yorulmadan kaynaklı hata olmaksızın malzemede uygulanmasına müsaade edilen gerilme olarak adlandırılır.

Yorulma dayanımı: Tekrarlı yük altında kalan malzemenin kaç çevrim sonucunda yorulmaya uğrayacağını söyleyen gerilmedir.

Yorulma ömrü : Tekrarlı yükler altındaki numunenin kırılmadan önce sağlıklı geçirdiği çevrim sayısıdır.

Yorulma durumunda üç tip çevrim bölgesinden bahsedebiliriz. İlk bölgede maksimum ve minimum gerilmeler basınç bölgesinde yani negatif tarafta olduğundan negatif bölge, İkinci bölgede gerilmeler hem çekme hem basma gölgesinde değiştiğinden alternatif bölge ve son bölge yani üçüncü bölge gerilmeler pozitif olduğundan pozitif çevrim bölgesi olarak adlandırılır.



Şekil 2.5 Farklı yorulma yükleme tipleri [43]

Gerilmeyle ilgili diğer parametreler formülleri ile birlikte aşağıda verilmiştir;

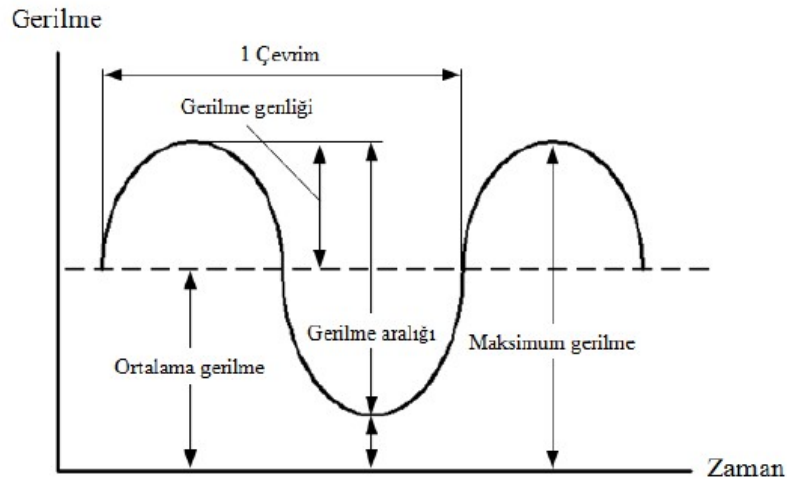
$$\text{Ortalama Gerilme: } \sigma_{\text{ort}} = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}) / 2 \quad (2.5)$$

$$\text{Gerilme aralığı: } \Delta\sigma = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}) \quad (2.6)$$

$$\text{Gerilme genliği: } \sigma_g = (\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}) / 2 \quad (2.7)$$

$$\text{Gerilme oranı: } R = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}} \quad (2.8)$$

$$\text{Genlik oranı: } A = \sigma_g / \sigma_{\text{ort}} \quad (2.9)$$



Şekil 2.6 Yorulma Parametrelerini gösteren eğri [44]

### 2.5.2 Yorulma Ömrünün Tahmini ve Nümerik Bir Örnek

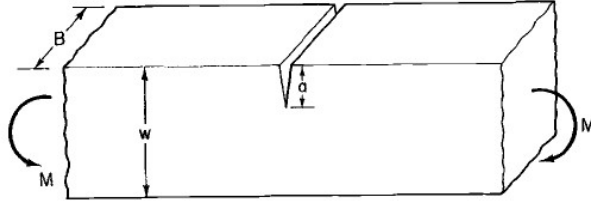
Yorulma ömrü diyince herhangi bir numunenin veya yapının yorulma ömrü, kırılmayı meydana getiren gerilme (gerinme) altında uygulanan çevrimlerinin sayısıdır. Bu sayı, gerilme seviyesi, gerilme durumu, çevrimsel dalga formu, yorulma ortamı ve malzemenin metalurjik durumu gibi birçok değişkenin bir sonucu olarak değişebilir. Numunedeki veya test koşullarındaki küçük değişiklikler yorulma davranışını önemli ölçüde etkileyebilir, bu da yorulma ömrünün analitik tahminini zorlaştırır. Bu nedenle, tasarımcı, mekanik test numunelerinin laboratuvar değerlendirmesinden ziyade servis esnasında benzer bileşenlere sahip olma deneyimine güvenmelidir. Bununla birlikte, laboratuvar testleri yorulma davranışını anlamada önemlidir ve kırılma mekaniği test numuneleri ile yapılan güncel çalışmalar tasarım kriterleri sağlamaya başlamıştır. Laboratuvar yorulma testleri çatlak başlatma veya çatlak yayılımı olarak sınıflandırılabilir. Çatlak başlatma testinde, numuneler veya parçalar yorulma çatlağının başlaması ve daha sonra kırılmaya neden olacak kadar geniş büyümesi için gerekli gerilme aralığı sayısına maruz kalır. Çatlak yayılım testinde, çevrim yüklemesi altında mevcut çatlakların çatlak büyüme oranlarını belirlemek için kırılma mekaniği yöntemleri kullanılır. Yorulma çatlama yayılımı, iyi bir çevredeki çevrimsel gerilmeler veya çevrimsel gerilmelerin kombine etkileri ve kötü bir çevre (korozyon yorgunluğu) ile ilerleyebilir.

Bilindiği gibi gerilme şiddeti faktörü uygulanan gerilme türüne ve çatlağın geometrisine bağlı olarak ifade edilir. Yorulma ömrünü gerilme şiddeti farkına bağlı olarak açıklayan Paris-Erdoğan bağıntısı;

$$\frac{\partial a}{\partial N} = C(\Delta K)^m \quad (2.10)$$

ile verilmektedir[28]. Burada C ve m malzeme ile ilgili sabitlerdir. Farklı yüklemelere ve farklı çatlak geometrilerine göre gerilme şiddeti faktörü hesaplayabiliriz. Biz deneyde dört noktalı eğilme deneyi test edeceğimiz ve kirişin alt başlığının orta kısmında çentik bulunduğundan dolayı eğilme etkisindeki kirişte çatlak bulunan duruma göre gerilme şiddeti faktörü hesaplayacağız.





Şekil 2.7 Eğilme etkisindeki çentikli kiriş [26]

$$K_I = \frac{6M}{B * (W - a)^{3/2}} * g\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.11)$$

şeklinde bulunur[26].

IPE120 kirişi için;

$a_0 = 0.1$  cm,  $B = 6.4$  cm,  $W = 12$  cm,  $\Delta a = 0.01$  cm  $L = 140$  cm  $a_1 = 0.11$  cm  $R = 0.1$  için

$M_{max} = 1375$  kNcm,  $M_{min} = 137.5$  kNcm  $\Delta M = 1237.5$  kNcm  $g\left(\frac{a}{W}\right) = 0.36$ [26]

$a_{ort} = 0.105$  cm

için (2.11) deki bağıntıdan verileri yerine koyarak  $\Delta K$  hesaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus formül ampirik formüldür verilerin inch ve kip.inch e çevrilmesi gereklidir.

1 cm = 0.3937008 inch 1 kN = 0,2248089438709618 kip eşittir. Gerekli dönüşümleri yaptıktan sonra (2.11) bağlantısından  $\Delta K = 9.317633406$  kip.in<sup>3/2</sup>

$C = 3.6 * 10^{-10}$  ve  $m = 3$  [26]

Bu veriler için çatlakın 0.1 cm den 0.2 cm ilerlemesi için geçen çevrim sayısı

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{C * (\Delta K)^m} \quad (2.12)$$

bağıntısından yaklaşık 135200 çevrim bulunur. Kirişin başlık kalınlığı 6.3 mm. Başlığın 6mm kadar çatlak ilerlemesi için geçen çevrim sayısı;

Çizelge 2.1 Yorulma kırılması ilerlemesi toplam çevrim sayısı ( $\Delta M=1237.5$  kNcm)

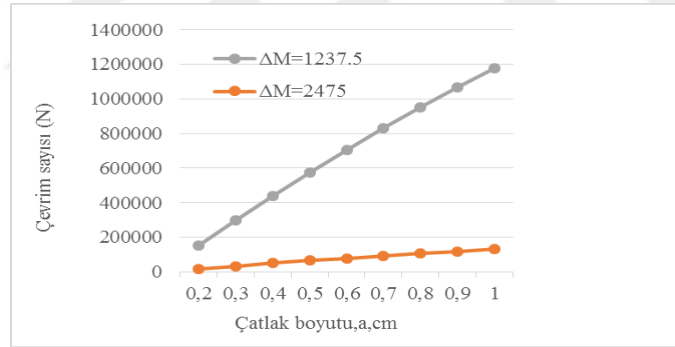
ao(cm)	a1(cm)	$\Delta N$	Ntotal
0.1	0.2	135190	135190
0.2	0.3	130132	265322
0.3	0.4	125222	390545
0.4	0.5	120457	511002
0.5	0.6	115834	626837

Kırık 6 mm ulaştığında yaklaşık 630000 cycle yapmış olacaktır. Aynı işlemleri  $\Delta M=2475$  kNcm için tekrarladığımızda çevrim sayısı;

Çizelge 2.2 Yorulma kırılması ilerlemesi toplam çevrim sayısı ( $\Delta M=2475$  kNcm)

ao(cm)	a1(cm)	$\Delta N$	Ntotal
0.1	0.2	16898	16898
0.2	0.3	16266	33165
0.3	0.4	15652	48818
0.4	0.5	15057	63875
0.5	0.6	14479	78354

yaklaşık 80000 e düşmektedir.



Şekil 2.8 Uygulanan Momente göre Çevrim sayısı-çatlak boyu eğrisi

Çizelge 2.1 de görüldüğü gibi moment aralığı ne kadar düşükse çatlak ilerleme hızı o kadar düşük yorulma ömrü o kadar azdır. Sayısal analizde de anlaşıldığı gibi çatlak boyu arttıkça ilerleme hızı artmakta ve yorulma ömrü düşmektedir. O yüzden bir malzeme ne kadar homojense yorulma ömrü o kadar fazladır.

### 2.5.3 Yorulmaya Karşı Tasarım Prensipleri

Yorulmaya karşı tasarım prensipleri 4 ana grupta toplanabilir.

Bunlardan ilki sonsuz 6m6r tasarımıdır. Uygulanan gerilme malzemeni yorulma dayanımının altında olduğu i6in malzemede 6atlak oluşmaz.

İkinci grup güvenli 6m6r tasarımıdır. İlk tasarım kriterinden farklı olarak bu grupta tasarlanan elemanın 6atlak oluşması bakımından 6mr6 vardır. Tasarlanan 6m6r boyunca hata kabul etmez. Genellikle tasarım yaparken 6ok y6ksek emniyet gerilmeleri kullanılır. Bu 6mre g6re tasarlanan yapılara 6rnek olarak k6pr6ler ve sağlık yapıları denilebilir.

66nc6 grup tasarım ise emniyetli hasar tasarımıdır. Bu tasarım amacında can güvenliğini korumak s6z konusudur. Bu tasarımda oluşabilecek herhangi bir hata felakete sebep olmadan 6nce giderilir. Bu tasarım prensibi genelde u6ak ve uzay sanayisinde kullanılır.

D6rd6nc6 grup tasarımda Hasara Toleranslı Tasarımdır. Bu yaklaşımda gerek 6retimde gerekse kullanım sırasında yorulma sonucu oluşan 6atlaklar g6z 6n6ne alınıp kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak 6atlakların periyodik kontroller sonucu tespit edilmelerinden 6nce 6atlağın daha b6y6k hasara neden olacağı prensibine dayanıp, o par6anın değişmesini 6ng6rmektir. Bu kritere 6rnek basın6lı kaplardır[1].

### ABAQUS PAKET PROGRAMI İLE KİRİŞLERİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

#### 3.1 Giriş

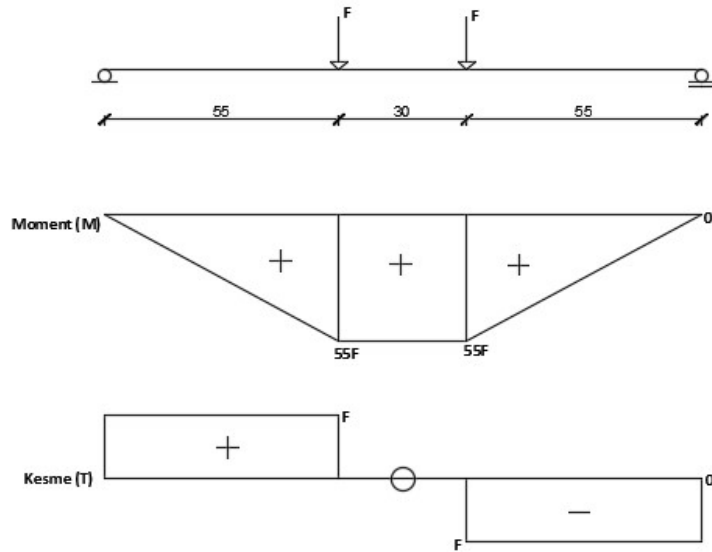
Teknolojinin gelişmesi ile karmaşık parçaları belirlenen koşullar altında çözülmesi daha basit küçük parçalara bölüp çözmek genel olarak sonlu elemanlar mantığını ifade etmektedir. Bu yöntem sayesinde lineere ya da lineer olmayan yapı problemleri çözülebilmektedir, izotrop veya izotrop olmayan ve süreksizlik içeren malzemeler tanımlanabilmektedir. Ayrıca zaman açısından da bu yöntem sayesinde tasarruf sağlanır. Piyasa da sonlu elemanlar analizi yapabilen birçok paket programı mevcuttur. Kullanımı diğerlerine göre daha basit ve kolay olan ve yüksek sonuç doğruluğu birçok projede ispatlanan Abaqus sonlu elemanlar paket programı bu tez çalışması kapsamında kullanılmıştır.

Bu bölümde öncelikle IPE120 kirişinin kapasitesi 2016 da yürürlüğe giren Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları göre belirlenmiştir.[30] Taşıyacağı maksimum kuvvet bulunduktan sonra IPE120 kirişi Abaqus paket programı kullanılarak modellenmiştir. Bu bölümde iki ayrı konu incelenmiştir. İlk modelleme çatlak boyunun arttığı zaman çentikte gerilme dağılımının değişimi irdelenmiştir. Kirişin orta kısmında boydan boya bir çatlak açılmıştır. Bu çatlak içinde bir yol seçip oradaki gerilmeler Abaqus programından alınmıştır. İkincisi de çatlak boyu sabit aynı yol üzerindeki gerilmelerin bulonla birleştirilmiş çelik plaka ile güçlendirme ve CFRP ile güçlendirme yöntemlerinin etkisiyle nasıl dağıldığı incelenmiştir. Üçüncü modelleme çatlak

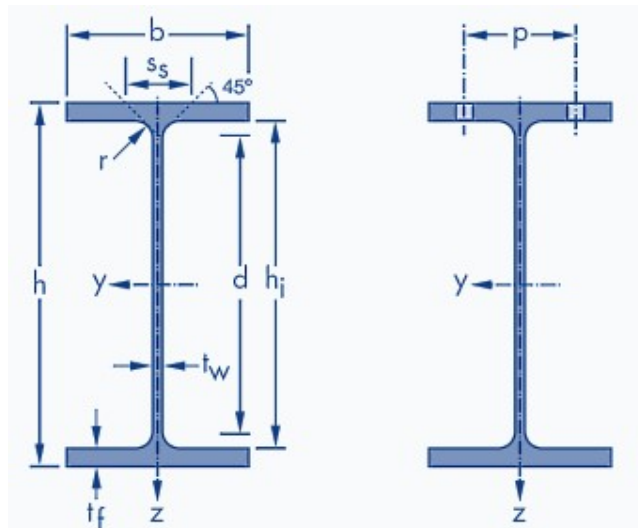
geometrisinin değistirilmesi ile meydana gelen gerilme dağılımının g¼clendirme tekniklerine g¼re dağılımı incelenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 3.2 IPE120 Kirişinin Tasarımı

IPE120 kirişinde d¼rt noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır. elik Yapıların Tasarım ve Yapım Kurallarına g¼re kapasitesi aşağıdaki gibi bulunur;



şekil 3.1 IPE120 kirişin Moment ve Kesme Kuvveti Diyagramı



şekil 3.2 I Profillerin ¼lm Noktalarının G¼sterimi[31]

IPE120 kirişinin boyutları ve malzeme özellikleri;

$G = 10.4 \text{ kg/m}$	$d = 9.34 \text{ cm}$	$j = 1.74 \text{ cm}^4$
$h = 12 \text{ cm}$	$I_x = 317.8 \text{ cm}^4$	$C_w = 890 \text{ cm}^6$
$b = 6.4 \text{ cm}$	$S_x = 53 \text{ cm}^3$	$F_y = 27.5 \text{ kN/cm}^2$
$t_w = 0.44 \text{ cm}$	$i_x = 4.9 \text{ cm}$	$E = 20000 \text{ kN/cm}^2$
$t_f = 0.63 \text{ cm}$	$I_y = 27.7 \text{ cm}^4$	$F_u = 43 \text{ kN/cm}^2$
$A = 13.2 \text{ cm}^2$	$i_y = 1.45 \text{ cm}$	
$h_i = 10.74 \text{ cm}$	$Z_x = 60.73 \text{ cm}^3$	

Yanal burulmalı burkulma için kompaktlık kontrolü yapılmıştır. Gövde ve başlıklar için için Yönetmelik Tablo 5.1B e göre;

$$\lambda = \frac{h_i}{t_w}, \quad \lambda_p = 3.76 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{10.74}{0.44} = 24.41 \quad \lambda_p = 3.76 * \sqrt{\frac{20000}{27.5}} = 101.4 \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ olduğundan gövde kompaktır.}$$

$$\lambda = \frac{b}{2t}, \quad \lambda_p = 0.38 * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{6.4}{2 * 0.63} = 5.08, \quad \lambda_p = 0.38 * \sqrt{\frac{20000}{27.5}} = 10.25 \quad \lambda \leq \lambda_p \text{ olduğundan başlıklar kompaktır.}$$

Bu durumda başlıklar kompakt , gövde kompakt koşuluna göre karakteristik eğilme momenti hesaplanıp, en küçüğü alınacaktır. Bu hesaplar Yönetmelik 9.2 göre yapılacaktır.

İlk olarak akma sınır durumuna göre karakteristik eğilme momenti hesaplarız;

$$M_n = M_p = F_y * Z_x \quad (3.3)$$

$$M_n = M_p = 27.5 * 60.73 = 1670.075 \text{ kNcm}$$

Yanal burulmalı burkulma için sınır durumunu hesapladığımız zaman;

Lb=140 cm

$$L_p = 1.76 * i_y * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (3.4)$$

$$L_p = 1.76 * 1.45 * \sqrt{\frac{20000}{27.5}} = 68.82 \text{ cm}$$

$$L_r = 1.95 * i_{ts} * \frac{E}{0.7 * F_y} * \sqrt{\frac{J * c}{S_x * h_o} \sqrt{\left(\frac{J * c}{S_x * h_o}\right)^2 + 6.76 * \left(\frac{0.7 * F_y}{E}\right)^2}} \quad (3.5)$$

$$i_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y * C_w}}{S_x} \quad (3.6)$$

$$i_{ts}^2 = \frac{\sqrt{27.7 * 890}}{53} \text{ burdan } i_{ts} = 1.72 \text{ cm}$$

Çift simetri I profillerde c= 1.00

h<sub>o</sub> = enkesit başlıklarının ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık = 12-0.63 =11.37 cm

$$L_r = 1.95 * 1.72 * \frac{20000}{0.7 * 27.5} \sqrt{\left(\frac{1.74 * 1}{53 * 11.37}\right)^2 + 6.76 * \left(\frac{0.7 * 27.5}{20000}\right)^2}$$

L<sub>r</sub> = 285.41 cm L<sub>p</sub><L<sub>b</sub><L<sub>r</sub> için

$$M_n = C_b * \left[ M_p - (M_p - 0.7 * F_y * S_x) * \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right) \right] \leq M_p \quad (3.7)$$

C<sub>b</sub> = 1 için denklem 3.7 ya göre M<sub>n</sub>= 1456.52 kNcmdir. Bu hesap yükleri altında berkitme bulunmaması durumunda bulunan değerdir. Yük etkime noktalarında burulma problemini elemine etmek için yük etkime noktalarına berkitme kaynatılmıştır. Böylelikle L<sub>b</sub> 140 cm den 30 cm ye ve 55 cm ye düşürülmüş bu durum L<sub>p</sub> den küçük olduğu için M<sub>n</sub> = M<sub>p</sub> =1670.075 kNcm dir. Maksimum moment M<sub>max</sub>=55F olduğundan 1670.075/55 yaklaşık 30 kNdur. Kirişin yaklaşık taşıyabileceği maksimum yük 30 kNdur.

Kesme kuvveti etkisi altında taşıyabileceği maksimum kuvveti hesaplırsak;

$$V_n = 0.6 * F_y * A_w * C_{w1} \quad (3.9)$$

$$A_w = h \cdot t_w = 12 \cdot 0.44 = 5.28 \text{ cm}^2$$

$$d/t_w \leq 2.24 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{için } C_{w1} = 1 \quad (3.10)$$

$$9.34/0.44 = 21.23 < 2.24 \cdot \sqrt{\frac{20000}{27.5}} = 60.41 \text{ olduğundan } C_{w1} = 1 \text{ alınır.}$$

$$V_n = 0.6 \cdot 27.5 \cdot 5.28 \cdot 1 = 87.12 \text{ kN}$$

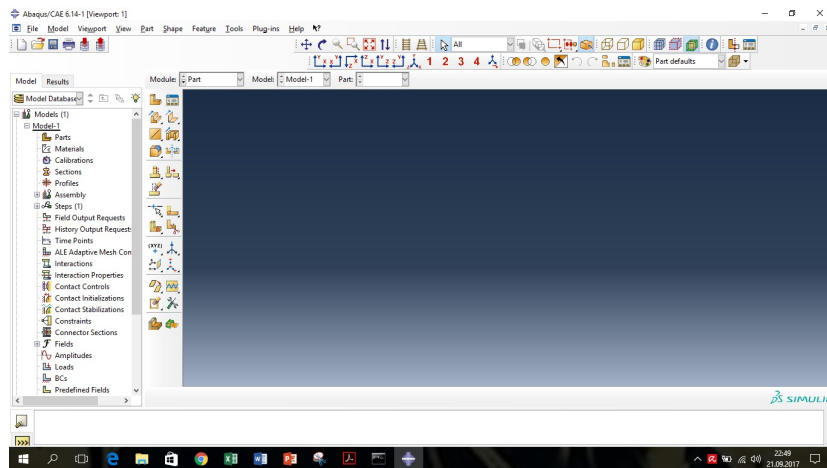
$$V_{n\max} = F = 87.12 \text{ kN}$$

### 3.3 Çentikli IPE120 Kirişlerinin Modellenmesi

Türk Çelik Yönetmeliği sınır şartlarını kullanarak çelik kirişin tasarımı yapılmıştır[30]. Bu tasarıma göre bu kiriş yük etkime noktalarında başlıklar arasında burkulmayı önlemek için berkitmeler konulmuştur. Ayrıca mesnet noktalarında da dikey berkitmeler kaynatılmıştır. Bu bölümde deney için tasarlanan kirişin Abaqus sonlu elemanlar paket programında nasıl modellendiği adım adım anlatılmıştır.

#### 3.3.1 Part Modülü

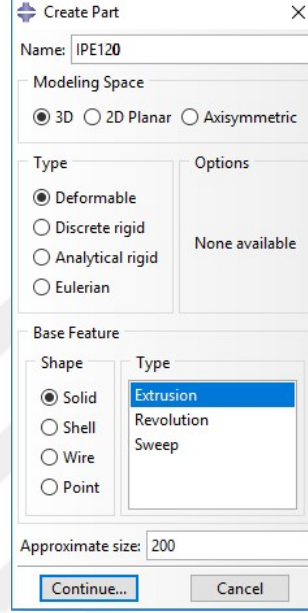
Bu modülde numunemiz ile ilgili geometrik olarak her işlemi bu bölümde programa tanıtırız. Ayrıca numunemiz ile ilgili her türlü düzeltme işlemlerini de bu modülden yapılmaktadır.



Şekil 3.3 Abaqus Programının Açılış Ekranı

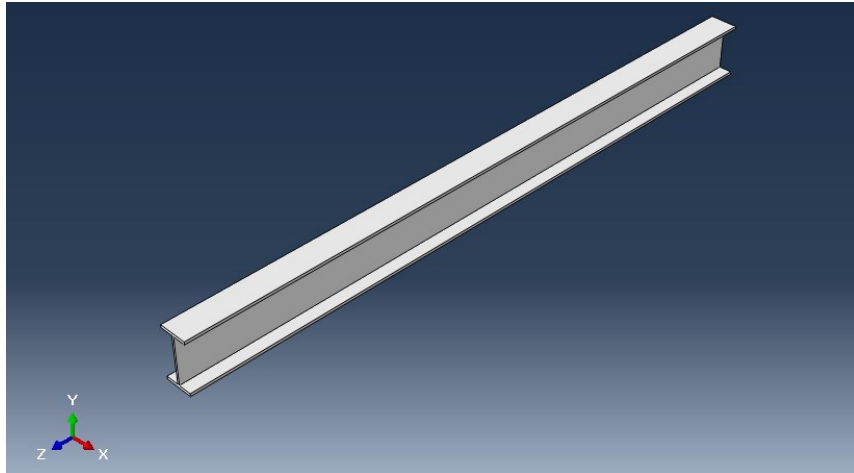


Şekil 4.1 den de görüldüğü gibi açılış ekranında bir çizim ekranı, sol kısımda model verilerinin girildiği modüllerin olduğu kısım var. İster burdan teker teker tıklayarak modüllere geçip modüller oluşturulabilir. İsterde çizim ekranının hemen sol üstünde Modüle kısmında istediğimiz modüle girip burdan işlemimizi tamamlıyoruz. Bu kısımda 2 tane part tanımlayacağız. Biri IPE120 kirişi, diğeri ise berkitmelerdir. Part sekmesinin üstüne tıklayıp Create part penceresini açıyoruz.



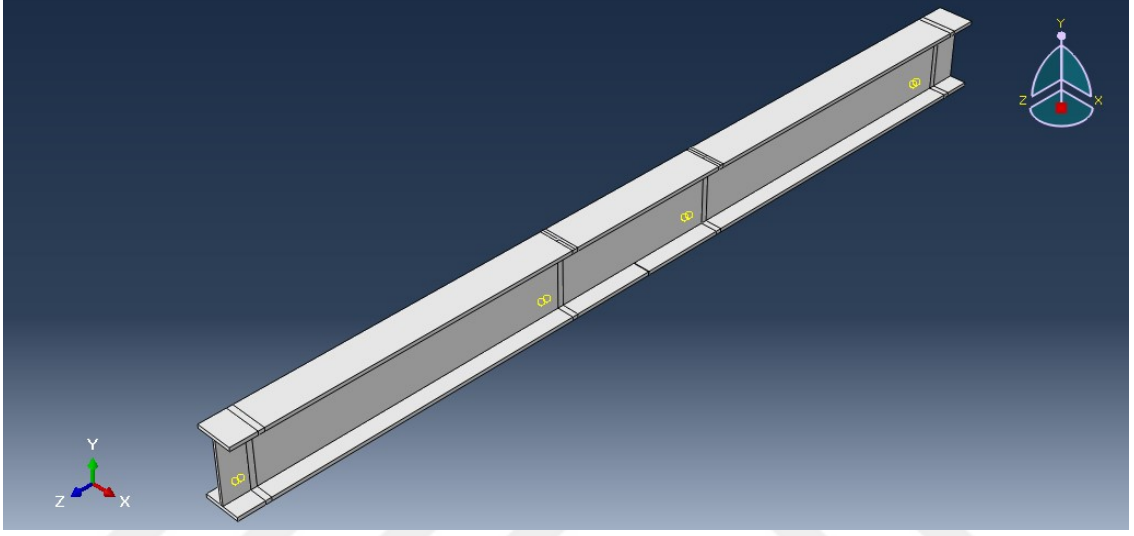
Şekil 3.4 Create Part Penceresi

Name IPE120 yazıp solid elemanı seçip continue basıyoruz. Çıkan çizim ekranında IPE120 nin ister koordinat girerek isterse rasgele I profil çizip ölçüleri değiştirerek I profili oluşturuyoruz. Done diyip kirişin uzunluğunu giriyoruz.



Şekil 3.5 IPE120 kirişinin oluşturulması

Kirişi oluşturduktan sonra dört noktalı eğilme deneyi için partition oluşturmamız gereklidir. Önce Tools menüsünden Datum kısmından koordinatlara göre datum noktası atayıp, o noktalardan create partition sekmesine tıklayıp point normal seçeneği ile yani bir nokta ve doğru seçtiğimizde ona dik olarak partitionlar oluşturmaktadır. Son olarak tam orta kısmından çentik açma için Parts modülünden Create Cut : Extrude ikonuna tıklayıp keseceğimiz yüzeyi seçip kirişin tam orta noktasından 0.1 cm boyunda başlık uzunluğu boyunca bir parça çıkartıyoruz.

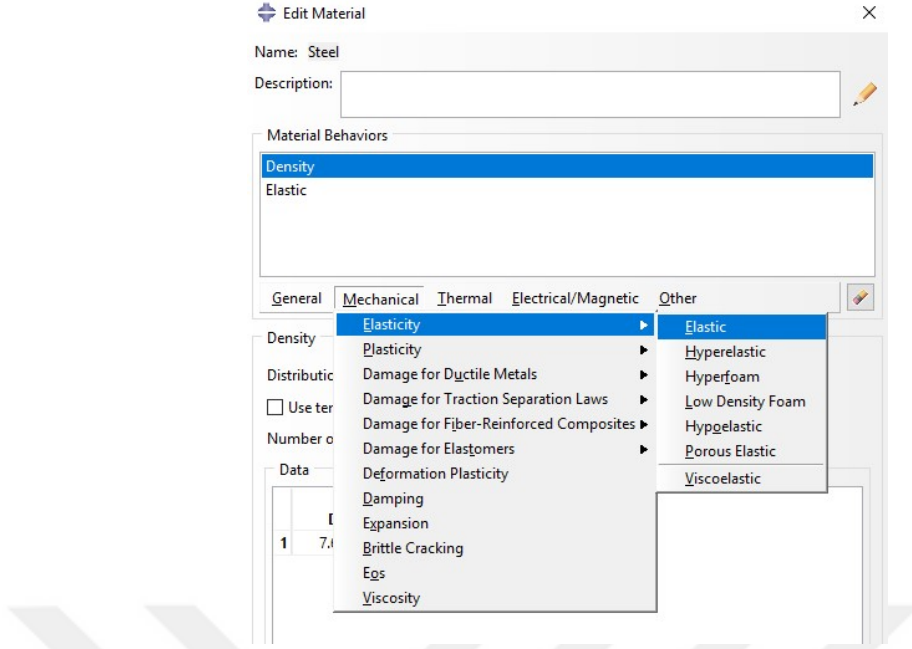


Şekil 3.6 IPE120 kirişinde partitionların oluşması ve çentik açma

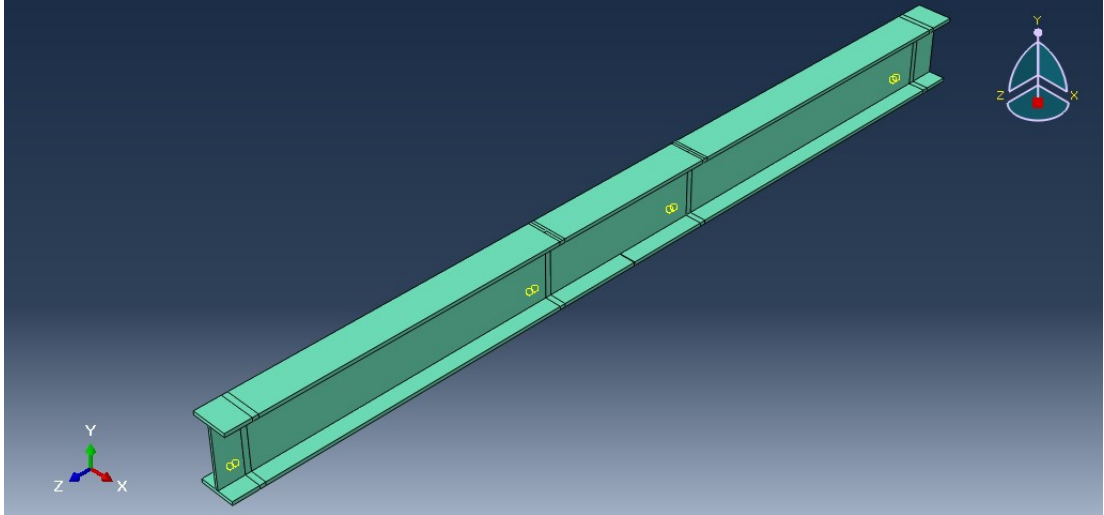
Aynı işlem adımlarını berkitmeler için tanımlayıp berkitme partını oluşturuyoruz.

### 3.3.2 Property Modülü

Abaqus paket programında malzemenin mekanik özelliklerinin tanımlandığı modüldür. Modellediğimiz kirişin mekanik özelliği elastik olarak tanımlanmıştır. Elastisite modülü  $20000 \text{ kN/cm}^2$ , poisson oranı 0.3, kütle yoğunluğu ise  $7.69 \cdot 10^{-5}$  olarak girilmiştir. Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra create section sekmesine tıklayıp sectionu homojen ve solid olarak atadıktan sonra assign section sekmesiyle numunelere malzeme özellikleri atanmaktadır.



Şekil 3.7 IPE120 kirişinde malzeme özelliklerinin atanması

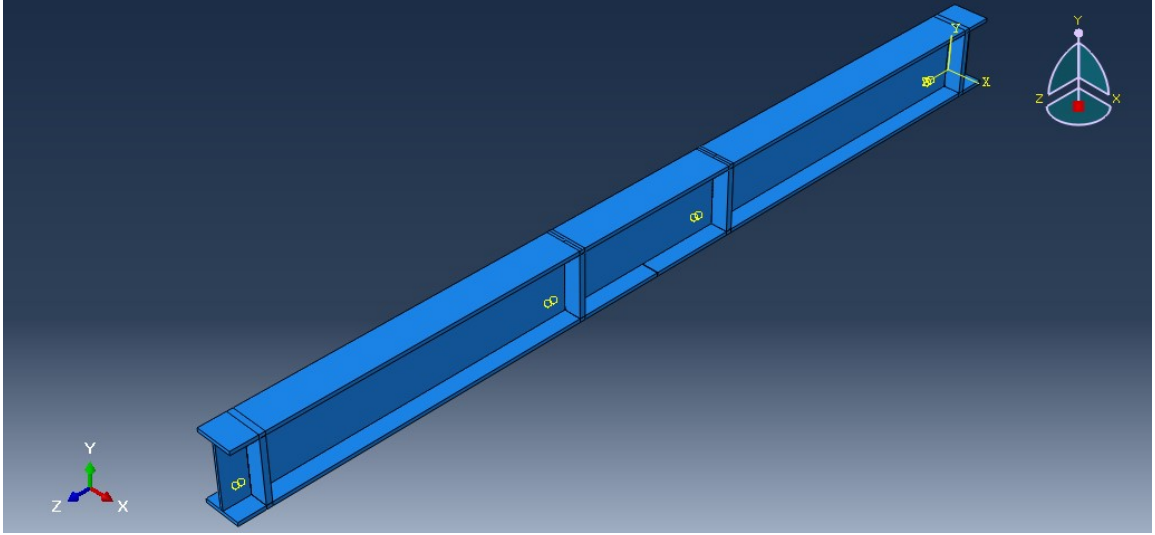


Şekil 3.8 IPE120 kirişinde malzeme özelliklerinin atanmasından sonraki görünüşü

Aynı adımları berkitme içinde yapıp malzeme özelliklerini berkitmeler içinde atıyoruz.

### 3.3.3 Assembly Modülü

Bu kısımda ayrı ayrı part olarak hazırladığımız parçaları birleştirme işlemi yapılır. IPE120 kirişleri ile berkitmeler bu kısımda birleştirilerek analize hazır hale gelir. Bu kısımda partlar create intance ikonuna tıklayarak hangi parttan kaç tane çağırılmak istiyorsa o kadar part ekleyebiliriz. Biz kendi numunemiz için 1 tane IPE120 kirişi ve 8 tane berkitme çağırılıp birleştirilmiştir.



Şekil 3.9 IPE120 kirişinin hazırlanması

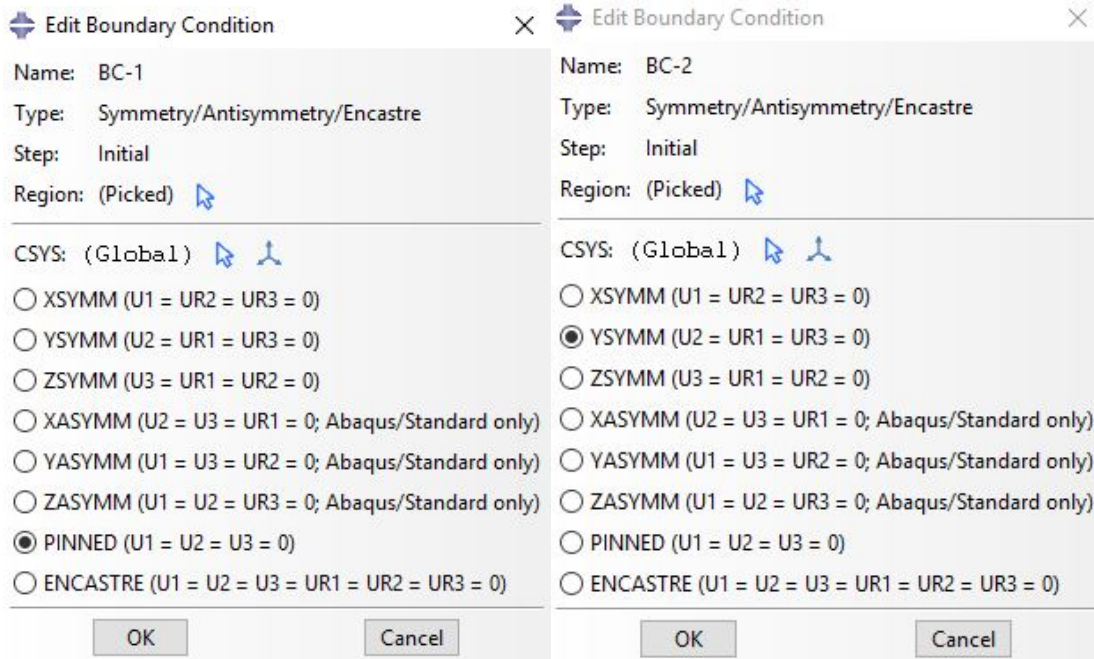
### 3.3.4 Step, Interaction ve Load Modülleri

Bu bölümde sisteme uygulanan yüklerin ne kadar adımda, ne kadar artımda ve nasıl bir özellikte olacağı tanımlanmaktadır. Yani istenilen şartlarda analiz adımları oluşturulmaktadır. Başlangıçta Initial adımı otomatik olarak tanımlanmıştır. Mesnet koşulları genelde bu adımda verilir. Bu modülde bulunan Field Output Create ile analiz sonucunda istenilen veriler çağırılabilir. Bu çalışma kapsamında Initial adımına ek olarak Step-1 adımı oluşturulmuştur.

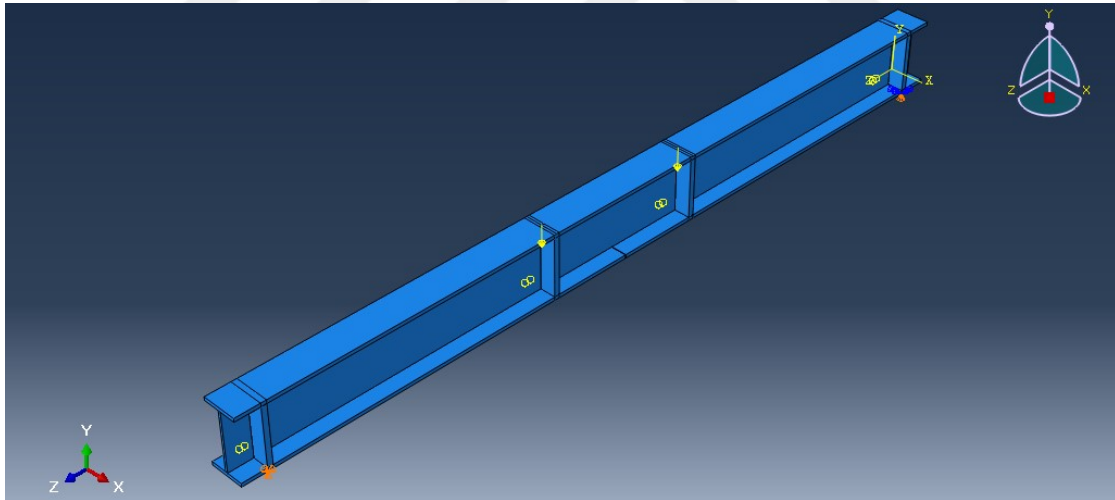
Interaction modülü Abaqus programının en önemli modülleri arasındadır. Bu modülde bir modelin ya da bir modelin bir bölgesi ile çevresi arasındaki mekanik ve termal etkileşimlerin tanımlandığı bölümdür. Ayrıca bir modelin yüzeyleri arasında constraintsleri yani yüzeyleri arasındaki hareket ilişkileri tanımlandığı bölümdür. Biz bu modelde berkitme ve kiriş arasındaki yüzey etkileşimleri yüksek mukavemette bir bağlama şekli olan Tie Constrains ile tanımlanmıştır. Bu tanımlama yapılmadan önce kirişlerde yüzeyler için partition oluşturulmuştu. Bu partitionlarda kalan yüzeyleri ve berkitmenin yüzeyi surface ile tanımlanmış. Tie Constrains atarken kolaylık sağlamıştır. Tie Constrains atarken surface to surface bölümü seçilmiştir.

Load modülünde yük ve mesnet koşulları ( Boundry Conditions) tanımlanır. Yük tanımlanırken Load ikonuna tıklayıp Step-1 seçip Concenterated force yi seçip y yönünde -30 kN giriyoruz. Belirlenen 2 noktaya bu işlem yapılır. Yine bu modülde

create boundry conditions ikonuna tıklayıp bu sefer Initial adımını seçip bir sabit değeri kayıcı mesneti tanımlıyoruz.



Şekil 3.10 Sabit ve Kayıcı Mesnet Atamaları

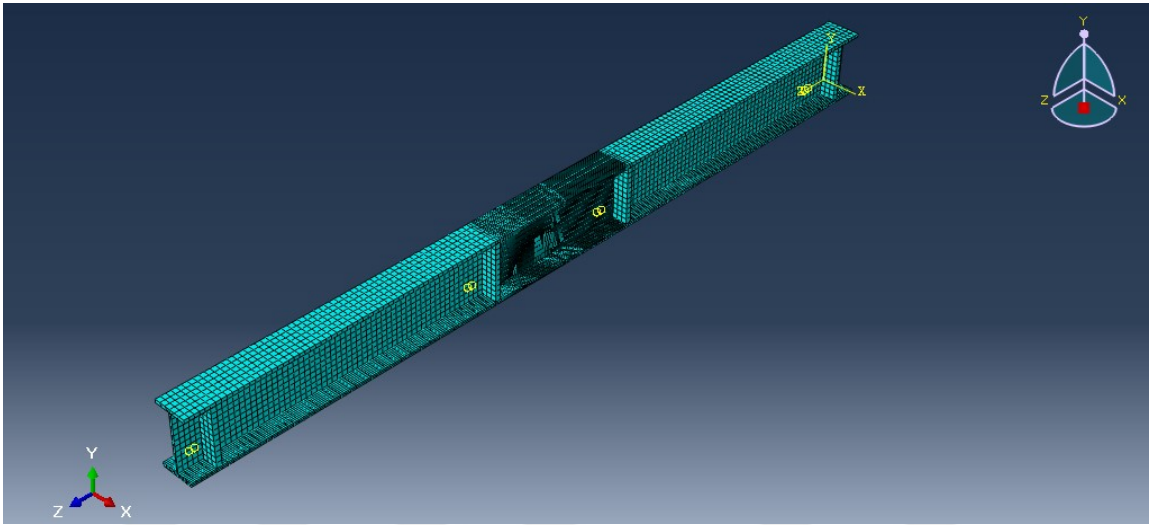


Şekil 3.11 Yük ve Mesnet Koşullarını Ataması

### 3.3.5 Mesh Modülü

Sonlu elemanlar simülasyonunun diyince akla gelen , sonlu elemanlar topluluğunu kullanarak yapının gerçek geometrisini ayırmaktır. Her bir sonlu elemana mesh denir. Buradaki amaç diferansiyel denklemin çözümünü daha basit bir hale getirmektir. Bundan dolayı sonlu elemanlar yönteminde elde edilecek sonuçların yaklaşım doğruluğu, ağ içersinde kullanılan eleman tipine ve eleman sayısına bağlıdır. Abaquste

modelleme yaparken mümkün olduğu kadar üç boyutlu analizler için için altı yüzlü (tuğla şeklinde) elemanlar kullanmak daha çok işimize yararmaktadır, çünkü bunlar en düşük maliyetle ve zamanda en iyi sonucu verirler. Ayrıca Hex elemanların mekanik davranışı, gerilme geçişleri diğer tipteki mesh elemanlarına göre daha iyidir. Bu nedenle, bu çalışmada mümkün olduğu kadar altı yüzlü geometriye sahip elemanlar kullanılmıştır. Gerilmelerin yoğun olduğu bölgelerde ve sonucu daha fazla etkileyen kısımlarda meshin element boyutları düşürülmüştür.



Şekil 3.12 Kiriş ve Berkitmelerin Meshleme İşlemi

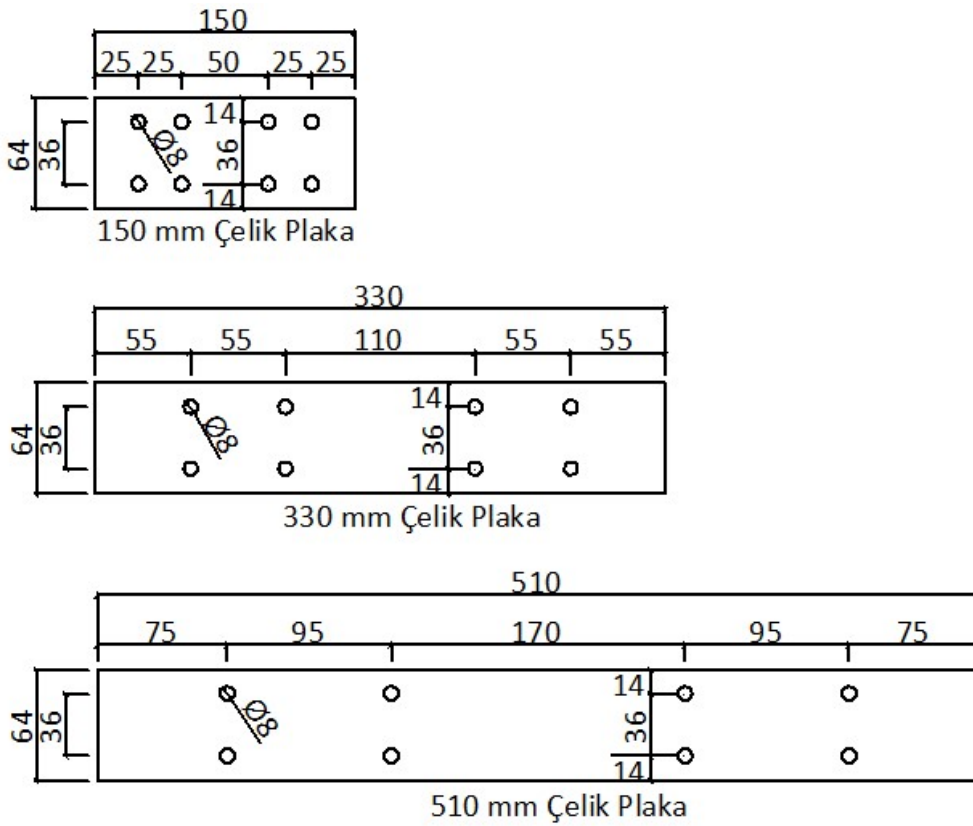
### 3.3.6 Job Modülü

Tüm işlemler tamamlandıktan sonra, tüm kontaklar ve yüzeysel etkileşimler tanımlandıktan sonra analizi başlatmak için kullanılan modüldür. İçerik çubuğu kısmında Modüle alanında Job modülünü seçiyoruz. Job managerde job tanımlayıp submit diyip analizi başlatıyoruz. Sonuçları model ağacında job kısmına gelip sağ tıklayıp result diyip sonuçları görülür.

### 3.4 Güçlendirilmiş IPE120 Kirişlerinin Modellenmesi

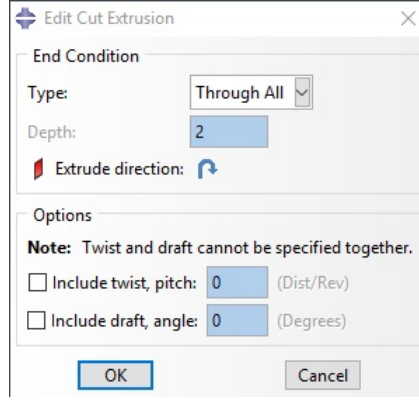
Güçlendirme olarak iki farklı metod seçilmiştir. Bunlardan ilki bulonla birleştirilmiş çelik plaka ile güçlendirilmiştir. Çelik plakanın boyutlarını Türk Çelik Yönetmeliği'ni de verilen maksimum ve minimum bulon aralıklarını esas alarak 15cm, 33 cm ve 51 cm uzunluğundaki çelik plakalar ile güçlendirilmiştir[30]. Çelik plakaların et kalınlığı 1 cm'dir. IPE120 çeliğine maksimum M8 bulonu kullanılabilir. Tasarımı yaparken çentiğin

bulunduğu orta noktası ile çelik plakanın orta noktası kesiştirilmiştir. 8 tane 6.8 kalitesinde bulon kullanımıştır. Bulonlar arasındaki minimum mesafe 3d kadar olmalıdır. Bulon çapı 8 mm olduğundan minimum aralık 24mm olmalıdır. Maksimum mesafe ise  $14t_{min}$  ya da 200 mm den büyük olmamalıdır. Kirişin başlığının et kalınlığı 6.3 mm ve plakanın et kalınlığı 10 mmdir. Buna göre  $t_{min}=6.3$ mm dir. Maksimum bulon arası uzunluk  $14*6.3$  yaklaşık 90 mm dir. Bulonun plakanın kenarlarına uzaklığı minimum 14 mm , maksimum  $12*t_{min}$  ya da 150 mm dir. Bu formüle göre bulonun kenarlara maksimum uzaklığı  $12*6.3 = 75.6$  mm dir. Bu koşullar altında bulon deliklerinin yerleri tasarlanmıştır.[30]



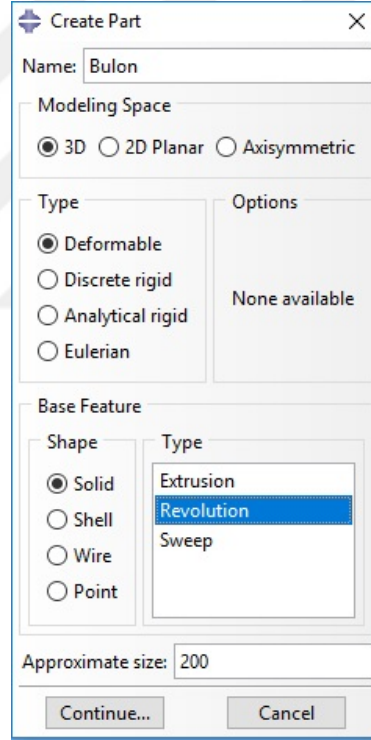
Şekil 3.13 Çelik Plakalar(değerler mm cinsindedir.)

Boyutlarını belirlediğimiz çelik plakaların Abaqus paket programında modellendi. İlk başta part modülünden plakaların boyutları girildi. Sonra yine part modülünde Create part Extrude butonuna tıklayıp çelik plakanın yüzeyini seçip çizim ekranına giriyoruz. Bulon çapı 8 mm dir. Daireleri içip Done tuşuna basıyoruz. Çıkan pencerede Through All seçip plaka boyunca bulon deliklerinin açılmasını sağlıyoruz.



Şekil 3.14 Edit Cut Extrusion Penceresi

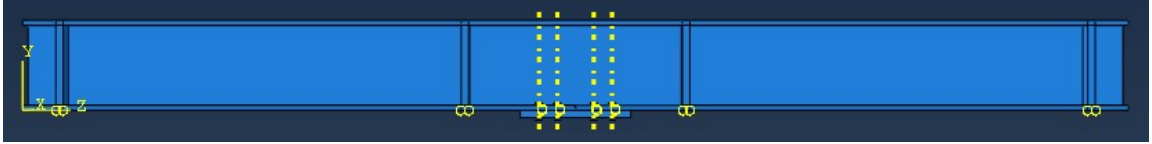
Çelik plakaları hazırladıktan sonra bulon çizimine geçiyoruz. Bulon çizimi Create Part kısmında çelik plaka ve kirişlerden farklı olarak Type kısmında Revolution kısmını seçiyoruz.



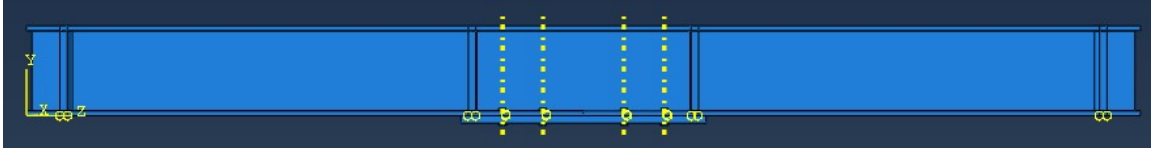
Şekil 3.15 Bulon için Create Part Penceresi

Bulon modelleri oluşturduktan sonra Assembly modülünde numunelerin birleştirmesi yapılmıştır. CFRP'nin modellenmesi çelik plakalardan farklı olarak yeni bir material partından yeni bir malzeme tanımlayarak 3 mm plaka olarak modellenmiştir. Boyu 30 cm olarak düşünülmüştür. Kiriş yüzeyi ile CFRP nin yüzeyi arasındaki kontak Constrain kısmından Tie Contact seçilerek yüzeyler seçilmiş iki yüzey çok sağlam bir şekilde bağlanmıştır.

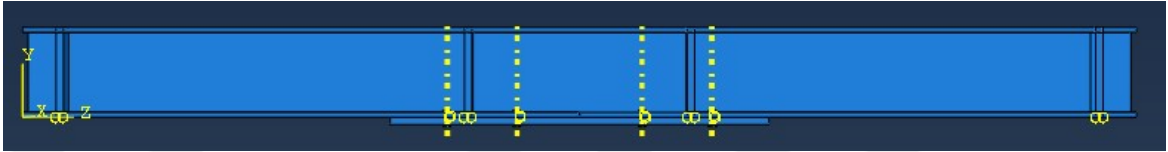




Şekil 3.16 15 cm Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş



Şekil 3.17 33 cm Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş



Şekil 3.18 51 cm Çelik Plaka ile Güçlendirilmiş Çelik Kiriş



Şekil 3.19 CFRP malzemesiyle Güçlendirilmiş Çelik Kiriş

### 3.5 Abaqus Paket Programının Doğrulama İşlemi

Abaqus paket programıyla yaptığımız modelin doğru sonuç verdiğini kontrol etmek için deneyimizle paralel olarak hiçbir işlem uygulanmamış çentik açılmamış bir kirişte dört noktalı statik deney sonucunda kirişin belli bölgelerine yapıştırdığımız strain gaugelerden okuduğumuz strain değerleri ile Abaquste analiz sonucu alacağımız strain değerlerinin yüzde 95 civarında tutması istenilen bir sonuçtur. İlk strain gaugeleri yapıştıracağımız noktaları belirledik. Kirişin 3 tane çekme bölgesine bir tane basınç bölgesine olmak üzere toplamda tane strain gauge yapıştırılmıştır.



Şekil 3.20 Yapıştırılacak Strain Gauge'nin Yerlerinin İşaretlenmesi

Kirişin üzerindeki işaretlediğimiz yerleri önce kaplamayı kaldırmak için spiral ile kazıdık. Oluşan yüzeyi kirden ve üzerindeki yağı temizlemek için önce asit ile tek yönde silecek şekilde peçete ile temizliyoruz. Sonra nötrülatör ile yüzeyi yine tek yönde siliyoruz.



Şekil 3.21 Yüzeyin Strain Gauge Yapıştırmak İçin Hazı Hale Getirilmesi

Kiriş üzerinde koordinat eksenlerini çizip Strain Gauge'nin koordinat eksenleri ile çakışacak şekile getiriyoruz. Strain gaugenin arka yüzeyine güçlü bir yapıştırıcı sürülmüştür. Bu yapıştırıcıyı sürerken ne çok fazla ne çok az strain gaugenin tüm

alanında ince bir katman olacak şekilde sürülmüştür. Sonra strain gauge temizlenen bölgeye yapıştırılmıştır. Bir ya da 2 dakika strain gauge üzerine bastırıp iyi bir şekilde yapıştırılması sağlanmıştır.



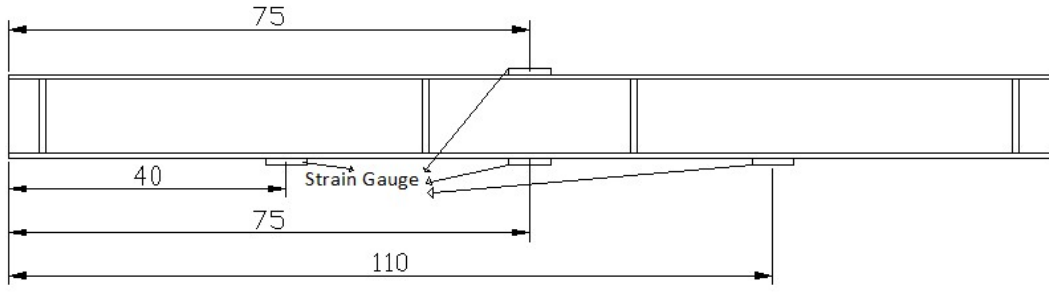
Şekil 3.22 Strain Gauge'nin Yapıştırılması

Kalan üç strain gaugeyi aynı hassasiyetle yapıştırılmıştır.



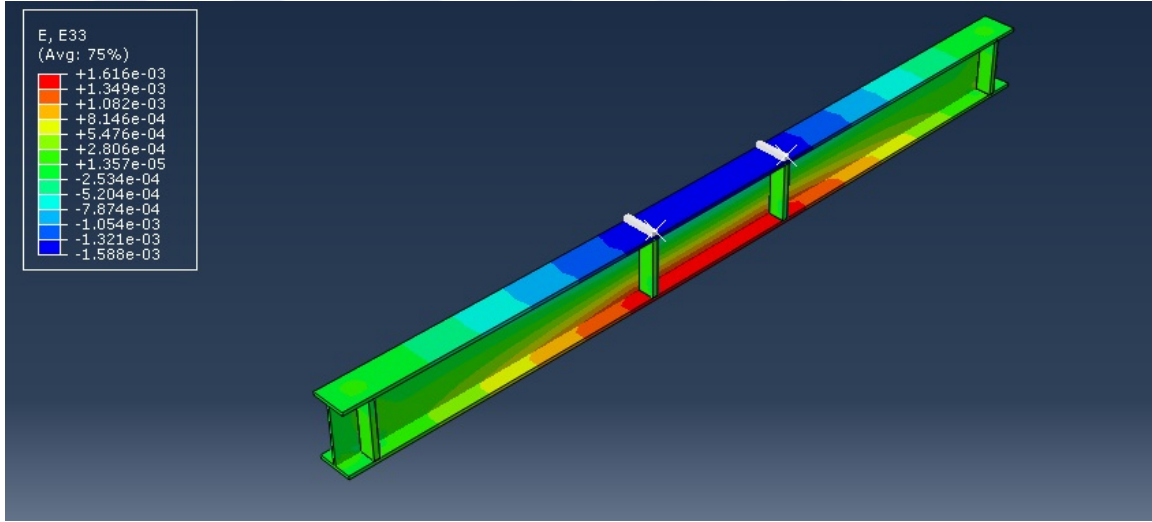
Şekil 3.23 Tüm Strain Gauge'nin Yapıştırılması

Strain gaugeler yapıldıktan sonra kiriş dört noktalı statik yükleme sonucunda çekme ve basınç başlıklarında oluşan straini bulmak için Instron makinesine yerleştirilmiştir. Strain gaugenin kablolarının verileri okumak için data loggera bağlanmıştır.



Şekil 3.24 Strain Gauge Yapıştırma Planı

Data logger'a bağlanan strain gaugelerden basınç başlığında ve çekme başlığının ortasında bulunan 2 strain gauge den okuma yapılamamıştır. Bu iki strain gaugenin yapıştırmasında ya da test için taşırken herhangi bir zarar verildiğinden dolayı veri okuması yapılamamıştır. Daha önce kirişin taşıma kapasitesi 30 kN bulunmuştur. Dört noktalı deneyde bu değer kirişe yük olarak verilmiştir.

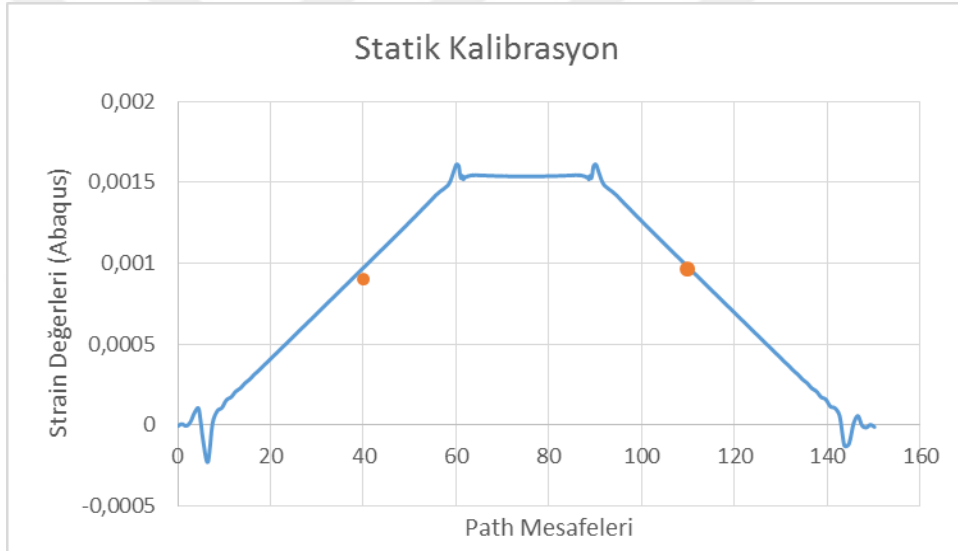


Şekil 3.25 Kontrol Kirişinin Analizi

Bu analiz sonucunda çekme başlığındaki değerleri okumak için çekme başlığının orta noktasından boyuna kadar bir path oluşturup, o path boyunca değerleri grafik halinde çizdiriyoruz.



Şekil 3.26 Statik Olarak Dört Noktalı Eğilme Deneyi

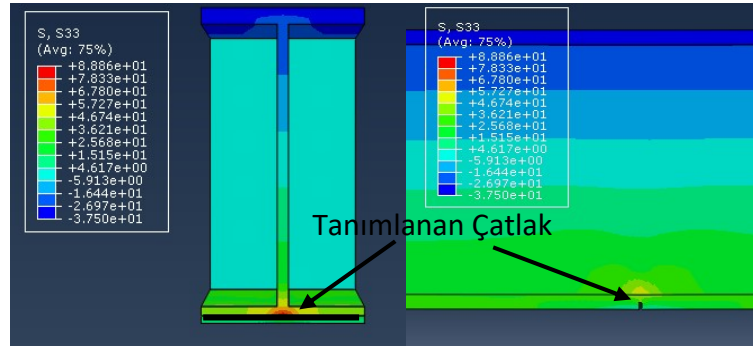
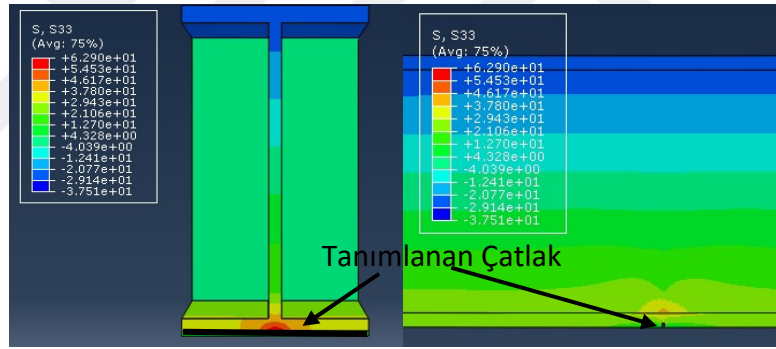
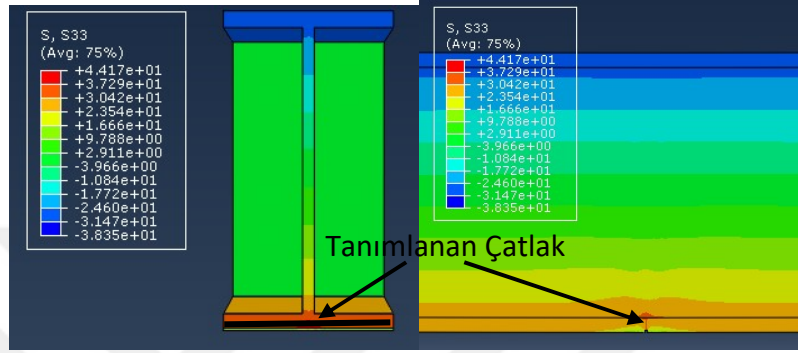


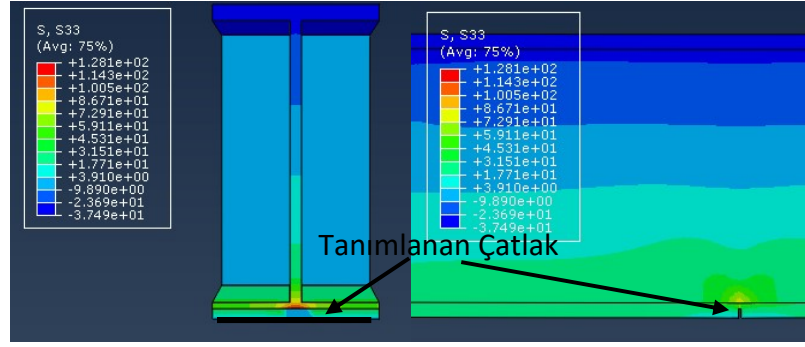
Şekil 3.27 Okunan Strain Değerleri

Strain gaugelerden okunan değerleri grafikte karşılaştırdığımız zaman 40 cm uzaklığındaki strain değeri yaklaşık yüzde 95 doğru iken, 110 cm mesafedeki strain gaugeden okunan strain değeri yaklaşık yüzde 99 yakınsamıştır. Bu nedenle Abaquste yaptığımız analizleri doğru olarak değerlendirebiliriz.

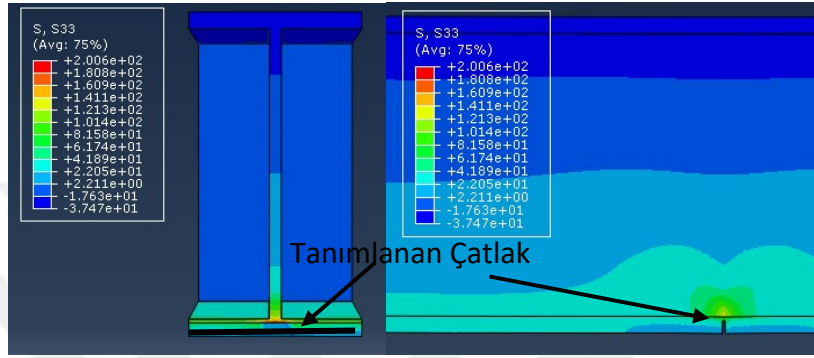
### 3.6 Analiz Sonuçlarının Gösterimi

İlk modelleme çatlak uzunluğunun arttığı gerilme dağılımına etkisini Abaqus paket programında görmek için kirişin orta noktasında nümerik çalışmanın yapıldığı gibi boyuna 1 mm uzunluğunda bir yarık açılmıştır. Sonra analiz yapıp bu çatlakın bulunduğu kısımdan gerilme değerlerine yine path seçilerek bakılmıştır. Aynı işlemleri 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm açılarak gerilme dağılımındaki değişiklik incelenmiştir.



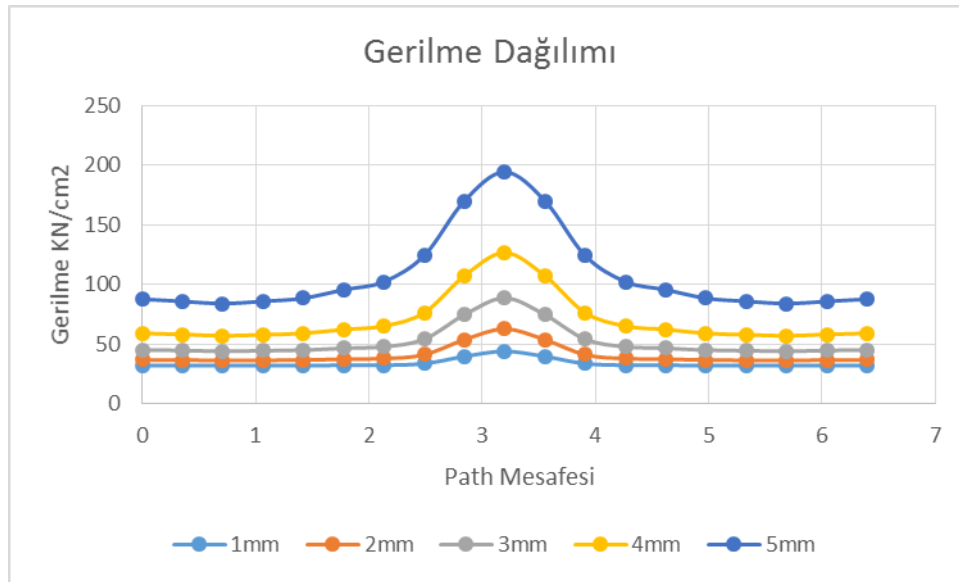


(d)



(e)

Şekil 3.28 (a) 1 mm çatlak , (b) 2mm çatlak , (c) 3 mm çatlak , (d) 4 mm çatlak ,  
(e) 5 mm çatlak

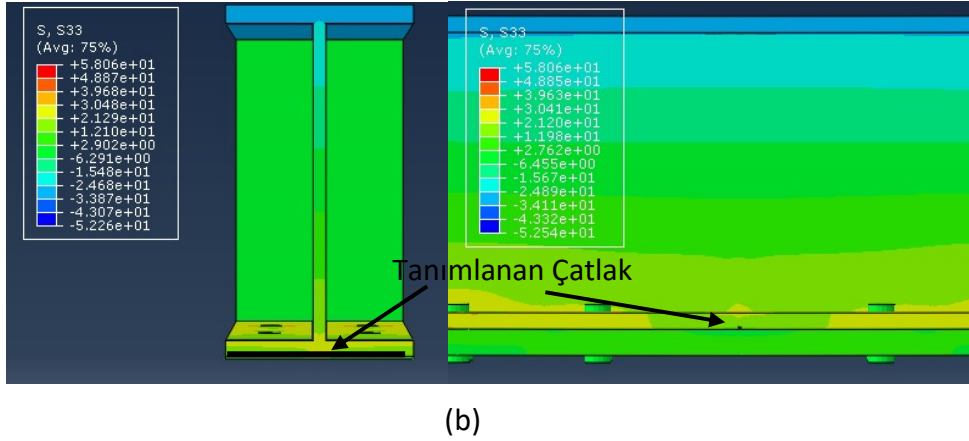
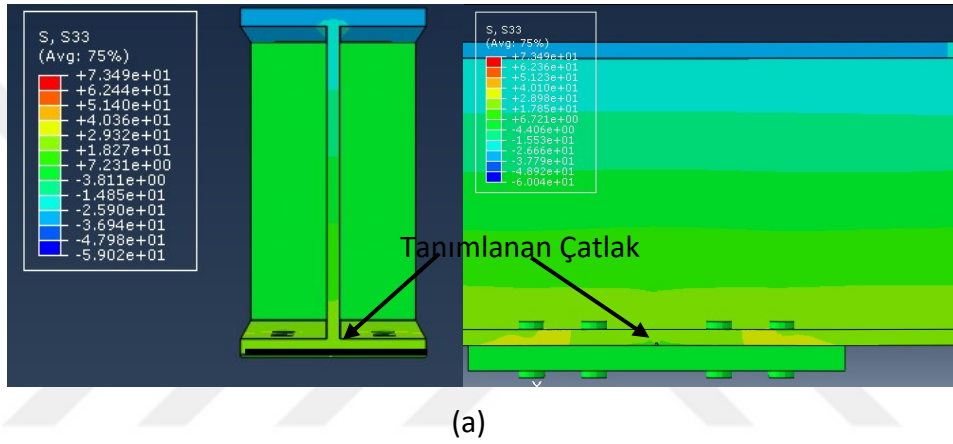


Şekil 3.31 Çatlak Derinliğine Göre Gerilme Dağılımı Grafiği

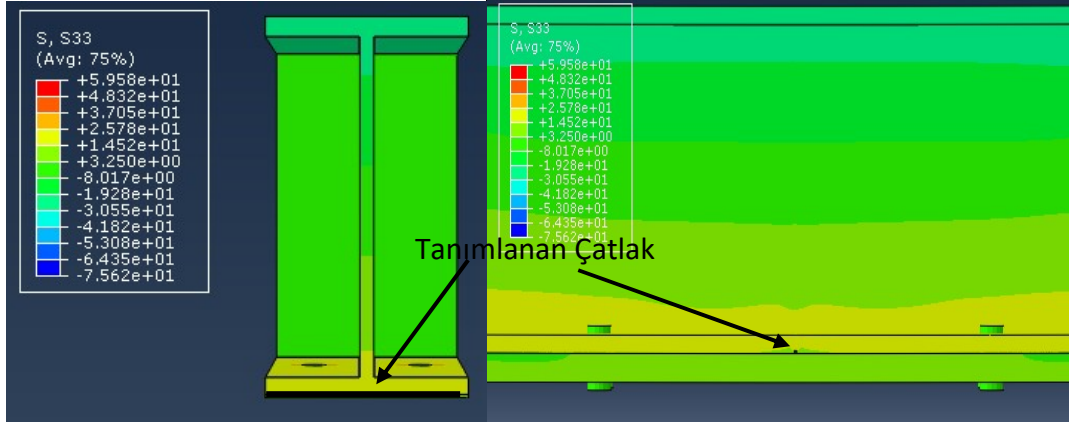
Şekilde de anlaşılacağı gibi çatlak boyu ne kadar derinleşirse gerilme o kadar artmaktadır. 1 mm çatlak derinliğinde yaklaşık 44 kN/cm<sup>2</sup> lik maksimum bir gerilme

meydana gelirken, çatlak derinliği 5 mm ye ulaştığında aynı bölgede okunan değer yaklaşık 4 katına yani 200 kN/cm<sup>2</sup> ye çıkmaktadır.

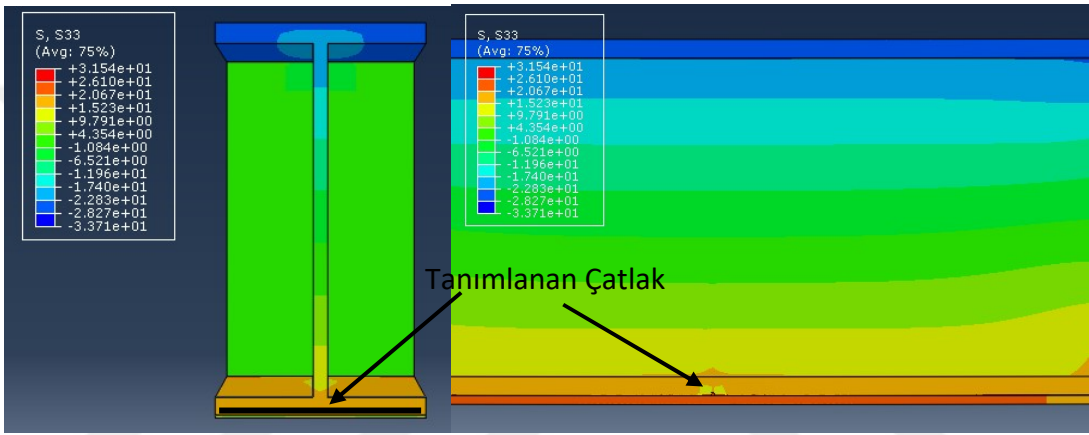
İkinci modelleme tipi de 1 mm çatlak bulunan kirişi çelik plakalar ve CFRP malzemesiyle güçlendirdiğimiz zaman aynı bölgede oluşacak gerilme dağılımı incelenmiştir. Bu bölgedeki oluşan gerilme dağılımları yorulma için önemli bir faktördür. Eğer yorulma belirli bir seviyenin altına düştüğü zaman çatlak olan bölgede herhangi bir kırık başlangıcı gözlenmeyebilir. İlk modelde görüldüğü gibi hasar bulunan bölgede gerilmeler çok fazla çıkmaktadır. Eğer müdahale edilmezse kırık ilerler ve kirişin ömrü kırık hızına bağlı olarak düşecektir.





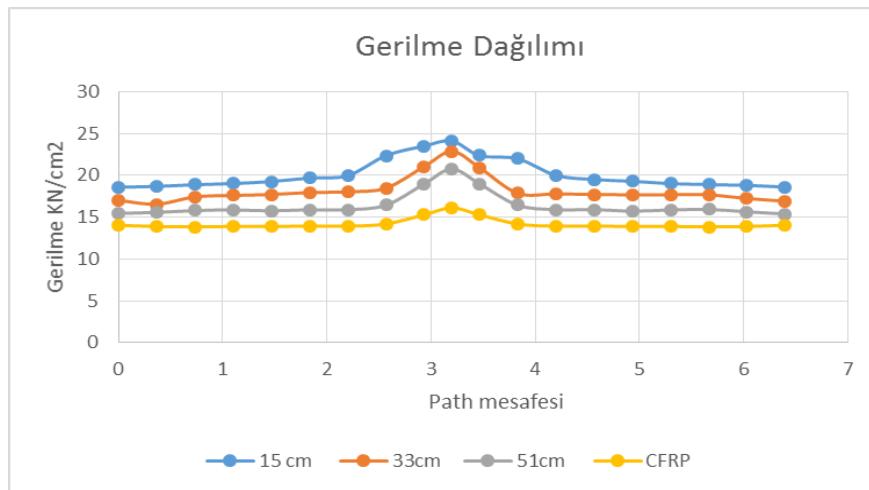


(c)



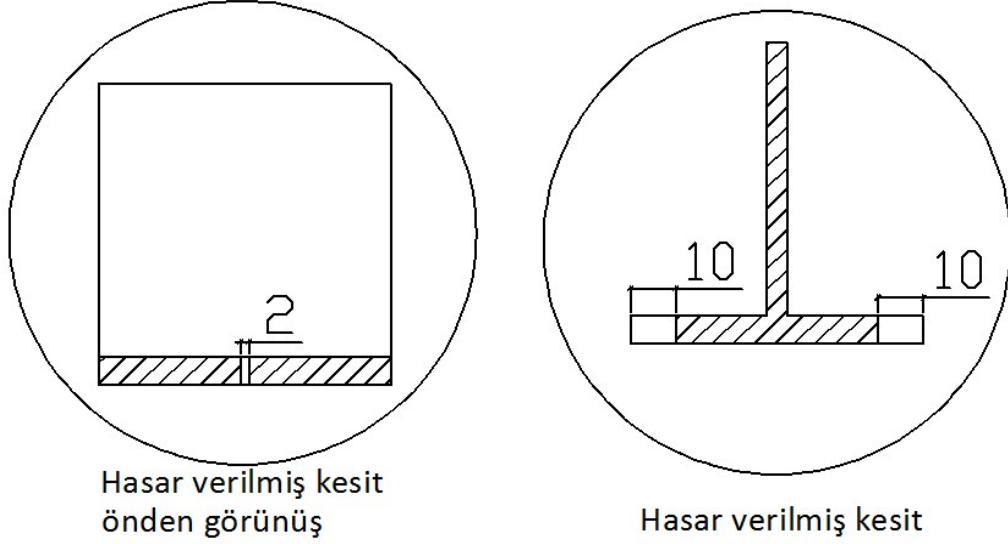
(d)

Şekil 3.29 (a) 15 cm çelik , (b) 33 cm çelik plaka , (c) 51 cm çelik plaka ,  
(d) CFRP malzemesi ile güçlendirilmiş kirişlerin gerilme dağılımı



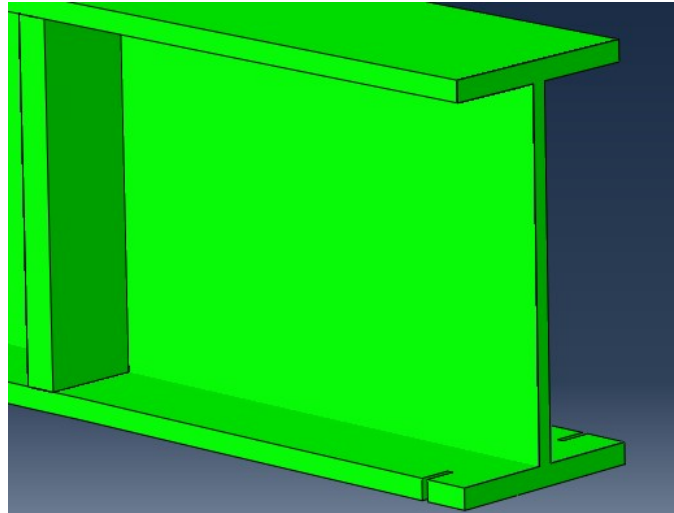
Şekil 3.30 Güçlendirilmiş Kirişlerin Gerilme Dağılımı Grafiği

Üçüncü model tasarımı profilin çekme başlığında başlık kalınlığında gövdeye doğru 10 mm uzunluğunda 2 mm eninde bir yarık açılarak, yarık çevresindeki gerilme dağılımına bakılmıştır.

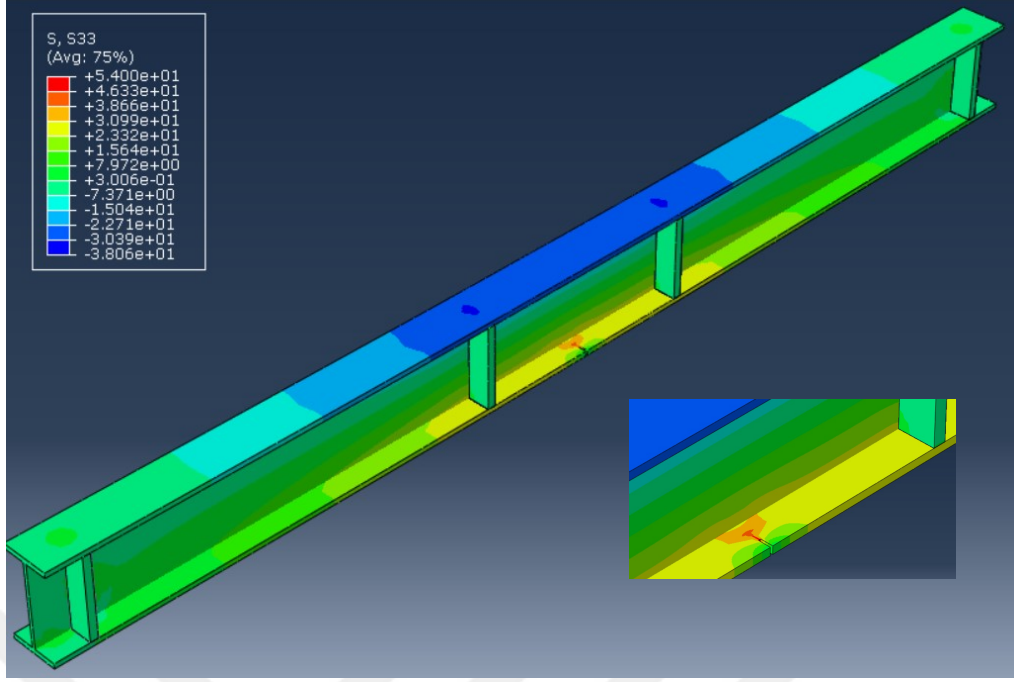


Şekil 3.31 Çekme Başlığındaki Verilen Hasarın Şematik Gösterimi

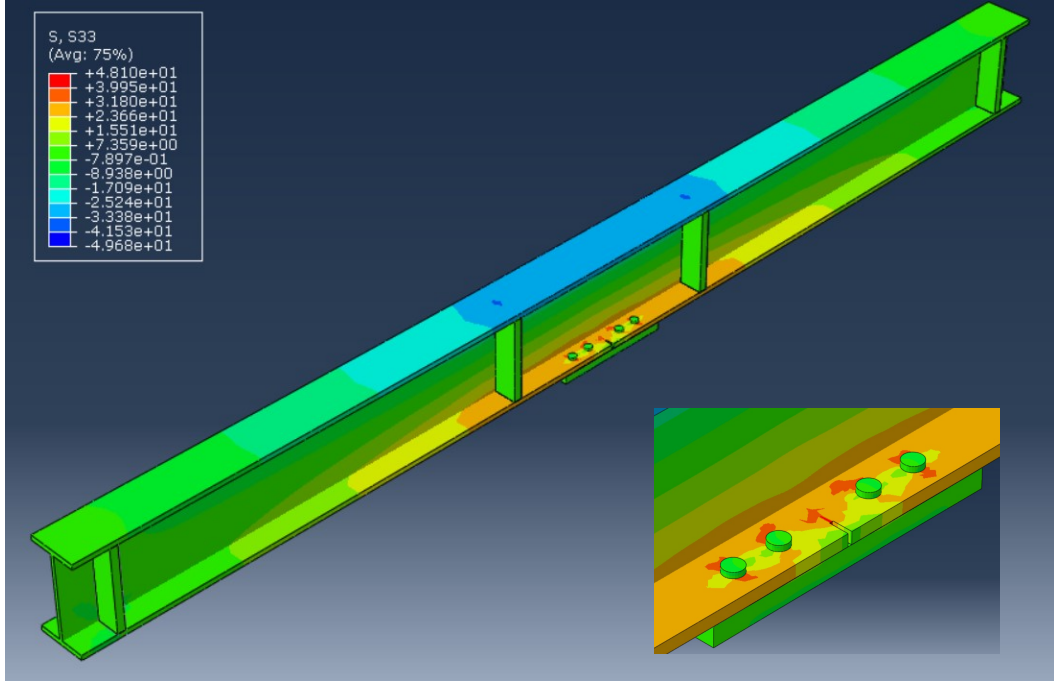
Bu bölümde anlatılan analiz edilmiş kirişlerde revize yapılarak çatlağın kiriş başlığı boyunca açılan çatlak kaldırılıp şekil 3.33 de görüldüğü gibi kirişin en çok zorlandığı açıklık ortasında gövdeye doğru bir çentik açılmıştır. Abaqus programında revize edilmiş kirişlerin analizi yapılmış ve kritik bölgede bir yol seçip, bu yolda bulunan gerilmeler karşılaştırılmıştır.



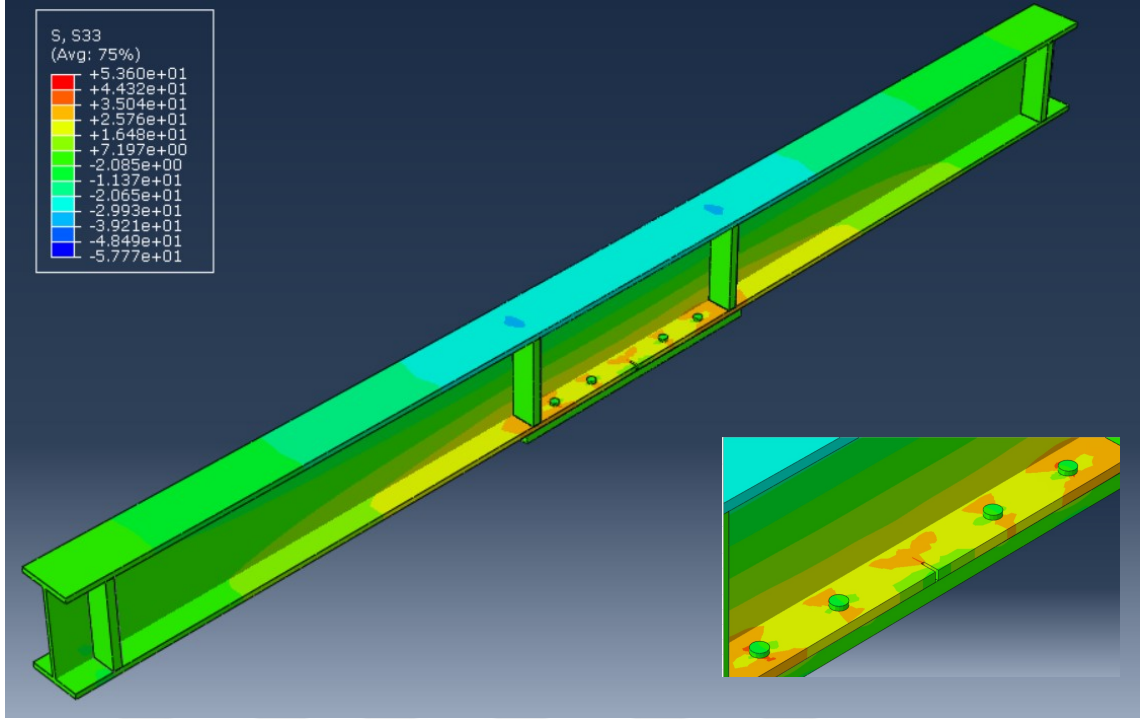
Şekil 3.32 Tasarlana Kirişte Açılan Çentiklerin Abaquse Girilmesi



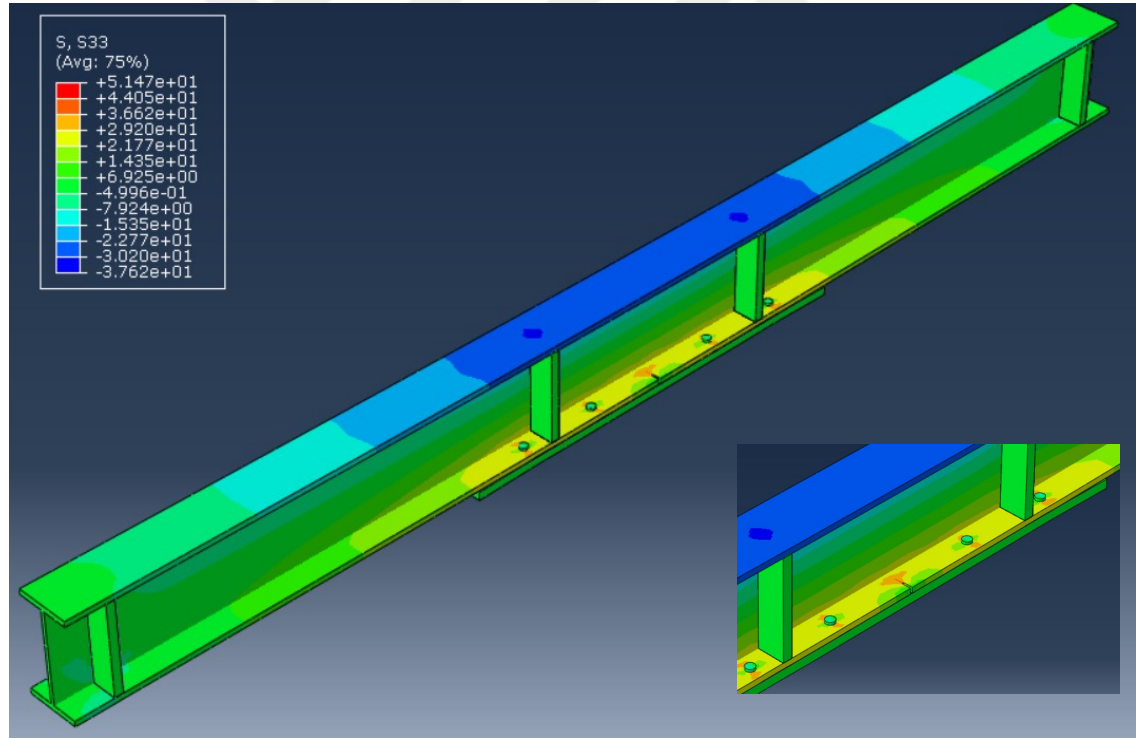
Şekil 3.33 Kontrol Numunesinin Analiz Sonucu



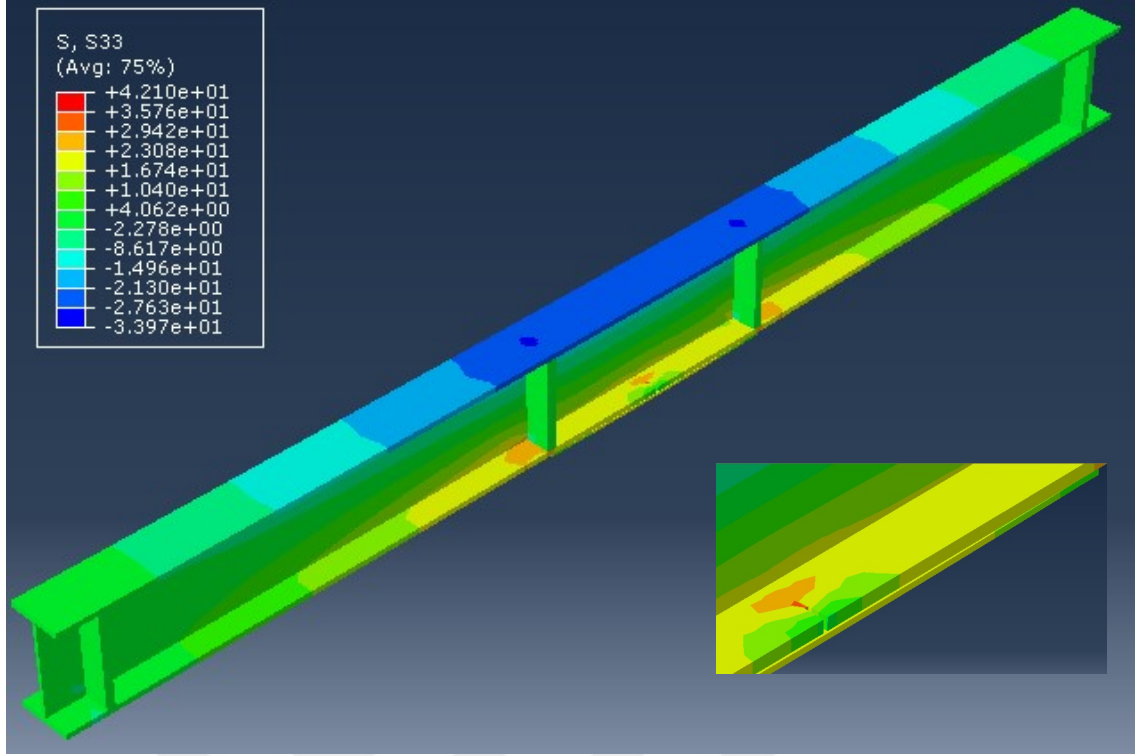
Şekil 3.34 15 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu



Şekil 3.35 33 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu



Şekil 3.36 51 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu

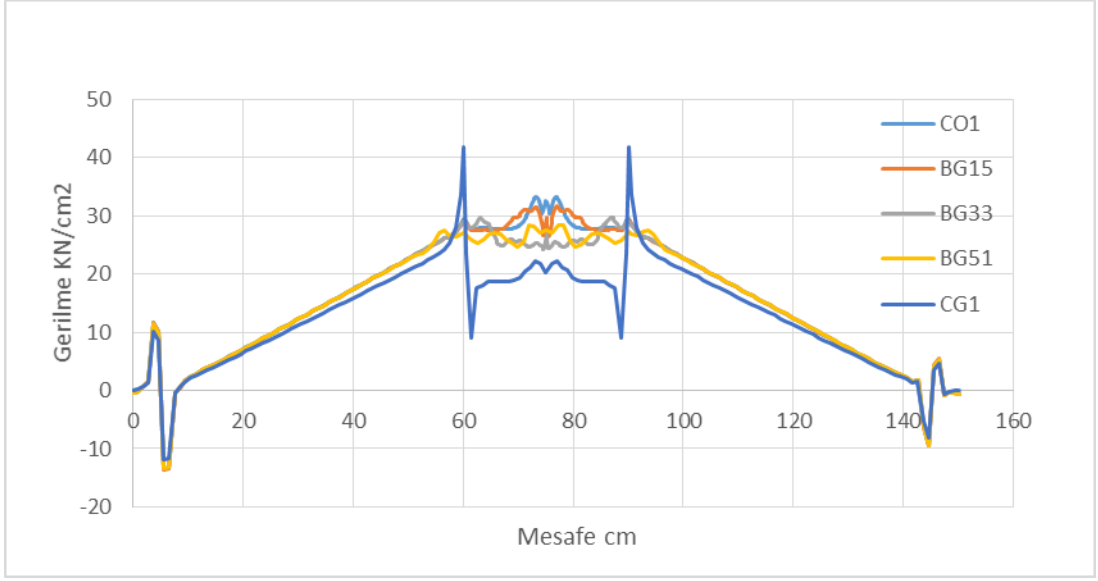


Şekil 3.37 CFRP Malzemesi İle Güçlendirilmiş Numune Analiz Sonucu

Görüldüğü gibi analiz sonucunda eğilme yönünde kirişte meydana gelen gerilme dağılımları bulunmuştur. Yorulma genellikle çekme gerilmelerinin olduğu bölgede gerçekleşmektedir. O yüzden alt başlıkta kirişin boydan boya bir yol seçilip gerilme değerleri alınabilir.



Şekil 3.38 Gerilme Değerleri Okunan Doğrultu



Şekil 3.39 Gerilme Değişimleri

Şekil 3.39 da görüldüğü üzere çentik etrafında meydana gelen gerilme yaklaşık 33 kN/cm<sup>2</sup> dir. Tasarlanan kiriş çelik plaka ile güçlendirildiği zaman gerilme 29 kN/cm<sup>2</sup> den 26 kN/cm<sup>2</sup> e düşmektedir. Gerilme yığılmasında en iyi sonucu CFRP malzemesi ile analiz sonucunda görüyoruz yaklaşık 20 kN/cm<sup>2</sup> lik bir gerilme çentik etrafında oluşmaktadır.

### 3.7 Sonuçlar

Yapılan analizler sonucunda farklı çatlak boylarında ve güçlendirme metotlarında gerilme dağılımının nasıl etkilendiği görülmüştür.

Yapılan ilk modellemede çatlak boyunun artışı gerilmede muazzam bir artış göstermiştir. 1 mm çatlakta 44 kN/cm<sup>2</sup> lik gerilme oluşmuşken çatlak boyu derinlemesine 5 mm çıktığında gerilme seçilen yol doğrultusunda tam orta noktada yaklaşık 4 kat artmış 200 kN/cm<sup>2</sup> çıkmıştır. Bu durum göstermiştir ki ;çatlak çentiğinin olduğu bölgede başlayacaktır ve çatlak boyu arttıkça yorulma ömründe çok hızlı bir düşüş gerçekleşecektir.

Çelik plaka ile güçlendirme ve CFRP malzemesiyle güçlendirme çentikte meydana gelen gerilmeyi önemli derecede düşürmüştür. 1 mm çatlakta gerilme 44 kN/cm<sup>2</sup> iken 15 cm plaka yerleştirildiğinde yaklaşık 24 kN/cm<sup>2</sup> ,33 cm çelik plaka yerleştirildiğinde 23 kN/cm<sup>2</sup> ,51 cm çelik plaka yerleştirildiğinde gerilme 22 kN/cm<sup>2</sup> düşmüştür. CFRP

modellendiğinde gerilme aynı bölgede 16 kN/cm<sup>2</sup> kadar düşmüştür. Burdan da anlaşıldığı üzere gerilme dağılımında CFRP malzemesi çelik plakaya göre daha iyi bir sonuç vermektedir.

Yapılan üçüncü analizde çentik çevresinde meydana gelen gerilme akma dayanımından büyüktür. Güçlendirme tekniklerinden çelik plaka ile güçlendirme çentik etrafında meydana gelen gerilme yüzde 10 ila 15 arasında düşürmüştür. CFRP malzemesinde ise yaklaşık yüzde 40 lık bir gerilme azalması meydana gelmiştir. Fakat CFRP malzemelerinin uç kısımda aşırı gerilme yükselmesi görülmüştür.

Çelik plaka boyunun artması gerilme dağılımında önemli ölçüde etkilememiştir.

Bulonlu birleşimlerde bulonda ve çelik plaka da önemli derece fazla gerilme meydana gelmiştir. Çelik plaka ve kirişin başlık bölgesinin birleşim yerlerinde uç bulonlarda önemli derecede basınç meydana gelmiştir. Bu durum yorulma yüklemesi altında kiriş kapasitesini önemli derecede yitirdiğinde kesmeden yırtılma problemi yaşayabileceğini göstermektedir.

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1 Giriş

Yorulma, tekrarlı dalgalı yüklerin neden olduğu ve korozyon olarak bilinen kötü çevre koşullarının varlığı içinde eklenerek artan ve sonunda yapıda çökmeye neden olan bir süreçler topluluğu denilebilir. Normalde elastik bölgede gerilme dalgalanmalarına maruz kalan bileşenlerde yorulma hasarı, yerel gerilmelerin malzemenin akma gerilmesini aştığı gerilme bölgelerinde oluşması beklenir. Belirli bir sayıda çevrimsel yüklemekten sonra, artarak biriken hasar, plastikleşmeye başlayan bölgelerde bir çatlak veya çatlamanın başlatılmasına ve daha sonra yayılmasına neden olur. Bu işlem çoğu durumda bileşenlerin kırılmasına neden olabilir. Gerilme yoğunluğu ne kadar fazla ise, yorulma çatlağı başlatma süresi de o kadar kısalmaktadır. Yorulma çatlağının ilk başladığı çevrim sayısına  $N_i$  çatlağın yayılarak yapının çökmesine neden olan çevrim sayısına  $N_p$  dersek;

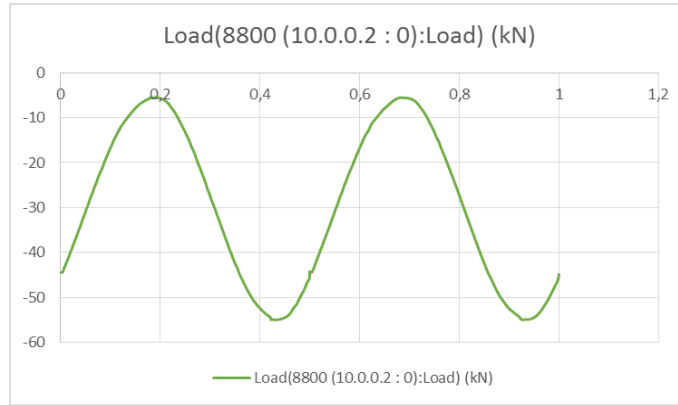
Toplam Yorulma Ömrü;  $N_t = N_i + N_p$  olarak bulunur. (4.1)

Bünyesinde herhangi bir çatlak barındıran bir yapı elemanın yorulma yüklemesi altında yorulma çatlağının başlaması ve yayılması daha kolay ve daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Birçok parametre yapısal bileşenlerin yorulma performansını etkiler. Örneğin yapı elemanında yükleme sonucu meydana gelen gerilme, yapının geometrisi, yapı elemanın malzeme özellikleri ve çevresel etkiler yorulma analizinde dikkate alınması gereken parametrelerdir. Gerilme parametresi gerilmenin meydana geldiği alan, gerilme aralığı, gerilme oranı, sabit ve değişken çevrimsel yüklemeler, bu



yüklemelerin hızı ve maksimum gerilmeyi içerir. Yapının geometrisinden bahsettiğimiz zaman yapı da yorulmaya neden olacak delik, çentik aklımıza gelir. Bunlara ek olarak sıcaklık ve korozyon yorulmayı etkileyen çevresel etkilerdir. Yapısal bileşenlerin yorulma davranışını etkileyen en önemli faktör, yerel gerilmelerin veya gerinimdeki dalgalanmalardır. Sonuç olarak, yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırmak için en etkili yöntem genellikle, gerilme konsantrasyonunun şiddetini ve uygulanan eksenel gerilmenin şiddetini azaltarak gerçekleştirilir. Çoğu durumda, gerilme yoğunluğunun şiddetindeki bir azalma, bulonlu birleşimlerde delik çapını azaltmak ve kaynaktaki süreksizliklerin boyutunu en aza indirgeyerek kolayca başarılabilir. Ayrıca mekanik olarak üstün özellikteki bir takım malzemeleri hasarlı bölgeye yapıştırmak gerilme yoğunluğunun azalmasına ve bu durumda yorulma ömrünün önemli derecede artmasına yardımcı olmaktadır.

Bu bölümde bir önceki bölümde Abaqus paket programında modellenen kirişin deneysel çalışması yapılacaktır. Kirişin orta kısmında 1 mm çentik açılarak yorulmaya maruz bırakılacaktır. Deney Instron deney cihazına konulmuştur. Bu kirişe taşıma kapasitesine yakın 27.5 kN yük verilerek çentiğin orta kısmında akma dayanımından fazla gerilme oluşturulmuştur. Dört noktalı eğilme deneyi olduğundan Instron makinesinden 55 kN luk yük verilmiştir. Gerilme oranı (R) = 0.1 alınmıştır. Bu durumda maksimum yük 55 kN, minimum yük 5.5 kN olmuştur. Yükleme hızı 2 Hzdir. Sabit bir yükleme şeklinde yükleme yapılmıştır. 2 tane kiriş kontrol numunesidir. Kırılana kadar yüklenmiştir. 3 tane çelik plaka ile güçlendirilmiş kirişin yorulma analizi yapılmıştır. 1 tane de CFRP malzemesiyle güçlendirerek yorulma ömründeki artış incelenmiştir.



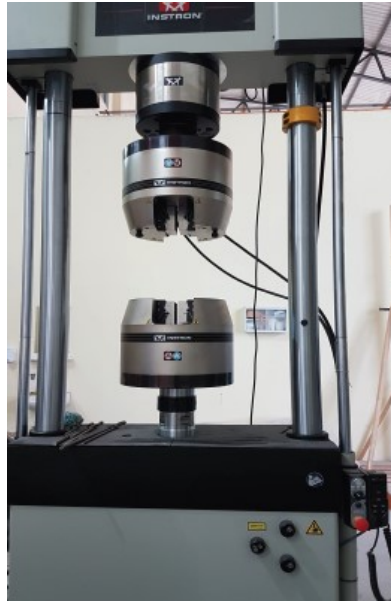
Şekil 4.1 Deneyin Yükleme Hızı

#### 4.2 Dört Noktalı Eğilme Deneyi

Dört noktalı eğilme deneyi, gerilme, düzlem eğilme ve burulma gibi yaygın olarak kullanılan diğer mekanik test yöntemleri ile karşılaştırıldığında, malzemelerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için birtakım avantajlarına sahiptir. Bu avantajlardan ilki, yükleme noktaları arasında eşit üniform bir yalnızca eğilme momenti meydana getirerek, numunenin yüzeyinde üniform bir şekilde maksimum çekme gerilmesi meydana getirir. İkincisi ise deneyi yapmak için özel bir tutamaç hazırlama ihtiyacı duyulmaz. Genelde numune hazırlaması basittir. Üçüncü olarak, numunenin monte edilmesi ve sökülmesi, dört noktalı eğilme deneyinde oldukça kolaydır, bu durum, aksenal bir yorulma testinde önemli bir parametre olan yüksek sıcaklık testleri için özellikle uygundur. Bu avantajlardan dolayı, yorulma çalışmalarında, özellikle uygulanan üniform çekme gerilmeleri altında kısa yorulma kırık başlangıcı ve erken büyüme hızına sahip numuneler için, uygun bir test metodudur.

#### 4.3 Kullanılan Deney Cihazı Hakkında Genel Bilgi

Yapılan yorulma deneyleri Instron 8803 modelinde yapılmıştır. Instron 8803 modeli statik ve dinamik testler için zorlu koşulları sağlayan, yüksek dayanıma sahip, yorulma testi için 500 kN'a kadar yükleme seviyesine çıkabilen, servo hidrolik özelliği olan bir deney cihazıdır. Bu modelle genelde kırılma mekaniği deneyleri yapılmaktadır[32].



Şekil 4.2 Instron 8803 Deney Cihazı

Instron 8803 deney cihazında deneyleri başlatmak ve deney verilerini saklamak ve kontrol etmek için bir kontrol istasyonu bulunur. Bu kontrol istasyonu Instron 8800 diye adlandırılmıştır. Instron 8800, Instron'un çekirdek sistemiyle üretilmiş servo hidrolik bir kontrolistasyonu olup, hem statik hem de dinamik testlere uygun olarak tasarlanmıştır. Gerekli hassasiyet için tüm veri dönüştürücüleri otomatik olarak tanımlanabilir ve kalibre edilebilmektedir. 19bit'lik veri çözünürlüğüne sahip olup, her daim tam kapasite çalışabilmekte ve böylece veri kalitesini bir standarda bağlamaktadır. Deney süresince, numunenin değişen karakteristik özelliklerine dair kontrol parametrelerine tam uyum sağlar, değişimi yüksek kalibrasyon yeteneği ile optimize edebilir[32].

Bu kontrol sisteminin içerisinde deneylere uygun olarak çeşitli yazılım sistemleri mevcuttur. Bu deneyde kullandığımız yazılım sistemi WaveMatrix™ Dinamik Test Yazılımı sistemidir. Yorulma yüklemesini bu yazılım sayesinde deney cihazına tanıtılmaktadır.



Şekil 4.3 Instron 8800 Kontrol İstasyonu

#### 4.4 IPE120 Kirişlerinin Hazırlanması

2016 da yürürlüğe giren Çelik Yapıların Tasarımı ve Yapım Kuralları göre tasarımından sonra bir çelik firması aracılığıyla çelik kirişler sipariş verilmiştir. Labaratuara gelen kirişler boyutları kontrol edilip teslim alınmıştır. İlk iki deney numunesi kontrol numunesi olarak test edilmiştir. Nümerik çalışması yapılan örnek gibi çelik kirişin alt başlığının ortasından boydan boya 1 mm derinliğinde bir hasar çelik hızır yardımıyla verilmiştir.



Şekil 4.4 Kontrol Numunesinin Hazırlanması

Dört noktalı deney için labaratuarda yükleme aparatı hazırlanmıştır. Berkitmeler arası 30cm dir. Berkitmelerin hemen üzerine gelecek şekilde başlık genişliğinde çelik numunelerle çelik levha üzerinde kaynatılmıştır.



Şekil 4.5 Dört Noktalı Eğilme Deneyi İçin Yükleme Aparatı

Hazırlanan kontrol numunesi Instron deney cihazına konulup maksimum yük 55 kN, minimum yük 5.5 olacak şekilde Instron kontrol cihazından ayarlayıp ilk deney başlatılmıştır.



Şekil 4.6 İlk Kontrol Numunesi

Yüklemeye hızı saniyede 2 Herzdir. Bu Kontrol numunesi kırık başlangıcı hasar verilen bölgede yaklaşık 400000 çevrimde meydana gelmiştir. 2. Bölümde ampirik formülde hesaplanan yaklaşık değer 630000 çevrimdir. Bu değerler bizim labaratuvar şartları ve diğer hususlar dikkate alındığında uzun bir zaman almaktadır. Bu yüzden çevrim sayısını düşürmek için kirişe farklı bir hasar çeşiti düşünülmüştür. Kiriş yine alt başlığın orta noktasında, her iki başlıkta, başlık kalınlığında 10 mm e 2 mm lik bir yarık açılmıştır.

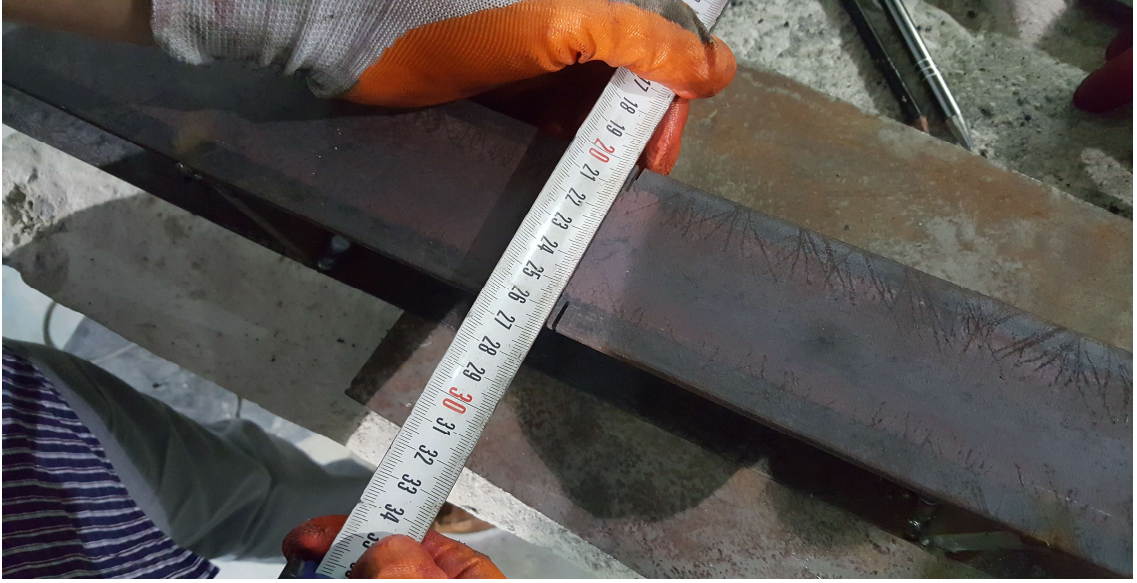


Şekil 4.7 Revize Edilen İlk Kontrol Numunesi

Yeni hasar verilip tekrar dört noktalı eğilme deneyi başlatılmıştır. Yeni hasarlı kontrol numunesinde yaklaşık 2000 çevrimsel yüklemde ilk kırık meydana gelmiştir.

İlk kırık başlangıcından sonra kırığın ilerlemesi çok hızlı olmuştur. Kirişin tamamen kırılması yani kullanılmaz hale gelmesi yaklaşık 15200 çevrimde meydana gelmiştir.

İlk kontrol numunesi göçtükten sonra ikinci kontrol numunesini deney cihazına yerleştirmek için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.8 İkinci Kontrol Numunesinin Verilen Hasar

Kesikler hazırlanıp ikinci kontrol numunesini de deney cihazına yerleştirip ilk numunede olduğu gibi aynı yükleme koşulları altında deney başlatılmıştır. Kırık başlangıcı kesilen yerlerin civarında her iki tarafta da yaklaşık 2500 çevrimde başladığı gözlemlenmiştir. Kırık gövdeye doğru ilerlemiştir. İkinci kontrol numunesi göçme durumuna kadar çevrimsel yüklenmiş gerekli notlar alınmıştır. Çatlak oluşumunu ve çatlak ilerlemesini kırmızı renge ve yüksek görünümüne sahip, metal malzemelerde kullanılan, deney sırasında kritik yüzeye sıkılarak süreksizleri belirlemek için penetrant sprey kullanılmıştır.



Şekil 4.9 Çatlak Oluşumu ve İlerlemesini Belirlemek İçin Kullanılan Sprey

İkinci kontrol numunesi kırıldıktan sonra alınan notlar akabinde 4000 çevrimde 4 mm çatlak uzunluğu tespit edilmiştir. 4000 çevrim bizim için kritik değer kabul edilip güçlendireceğimiz tüm numuneler aynı şekilde hasar verildikten sonra 4000 çevrime kadar yüklenmiş ve çatlak uzunlukları ölçülmüştür. Yorulmaya maruz bırakılan ve yorulma çatlaklarının başladığı bu numuneler üzerinde güçlendirme yapılmaya karar verilmiştir. İki tip güçlendirme metodu tahkik edilmiştir. İlki bulonla birleştirilmiş çelik plakalar ile güçlendirme, ikincisi ise CFRP ile güçlendirme metotları kullanılmış ve deney sonuçları tartışılmıştır.

#### **4.4.1 Yorulmuş IPE120 Kirişin Çelik Plaka İle Güçlendirilmesi**

Çelik plaka ile güçlendirme yöntemi geleneksel güçlendirme yöntemi diye adlandırılır. Çelik plakalar kaynaklı ya da bulonlu bir şekilde hasarlı bölgeye yerleştirilir. Kaynak ve bulon numunede hasar görmüş olan bölge dışında kaynak yerlerinde ısıdan dolayı, bulon deliklerinden dolayı buralarda gerilme birikmesine neden olabilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan çelik plakanın cinsi S235 dir. Akma dayanımı  $23,5 \text{ kN/cm}^2$  dir. Bulonlar 6.8 cinsinden akma dayanımları  $48 \text{ kN/cm}^2$  dir. İlk başta 15 cm uzunluğundaki çelik plakanın bulon deliklerini açıp deneyi yapmaya hazır hale getiriyoruz. Kullanılan bulon öngermesiz bulon olduğundan bulonları Çelik Yapıların Tasarımı ve Yapım Kurallarını yönetmeliğinde tanımlanan birleşen yüzeyleri birbirine tam temas sağlayacak şekilde tork anahtarı ile yeteri kadar döndürülür[30].



Şekil 4.10 15 cm Uzunluğunda Çelik Plaka Montajı

Yorulmuş kiriş 15 cm çelik plaka ile güçlendirdikten sonra deney düzeneğine taşınmıştır. Göçme işlemi gerçekleşene kadar çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur.



Şekil 4.11 15 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Deneyi

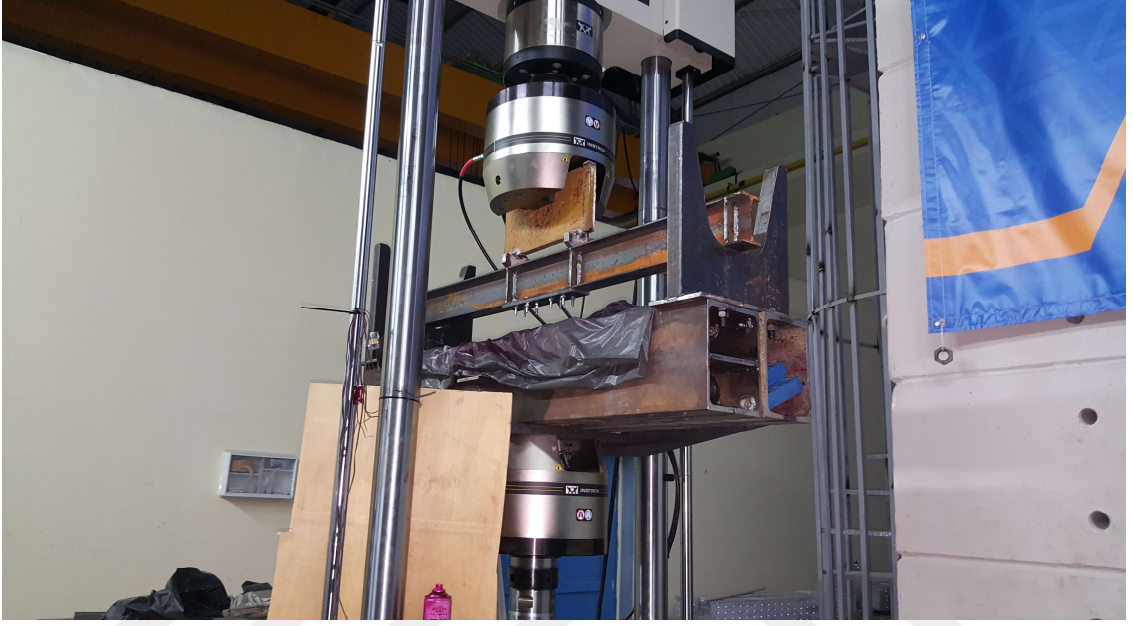


Şekil 4.12 15 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Göçmesi



Şekillerde de görüldüğü gibi kırığın doğrultusu güçlendirmemiş numunedeki gibi yine gövdeye doğru genişlemektedir. Bulonlar belli bir noktadan sonra kesmeden dolayı kırılmaktadırlar.

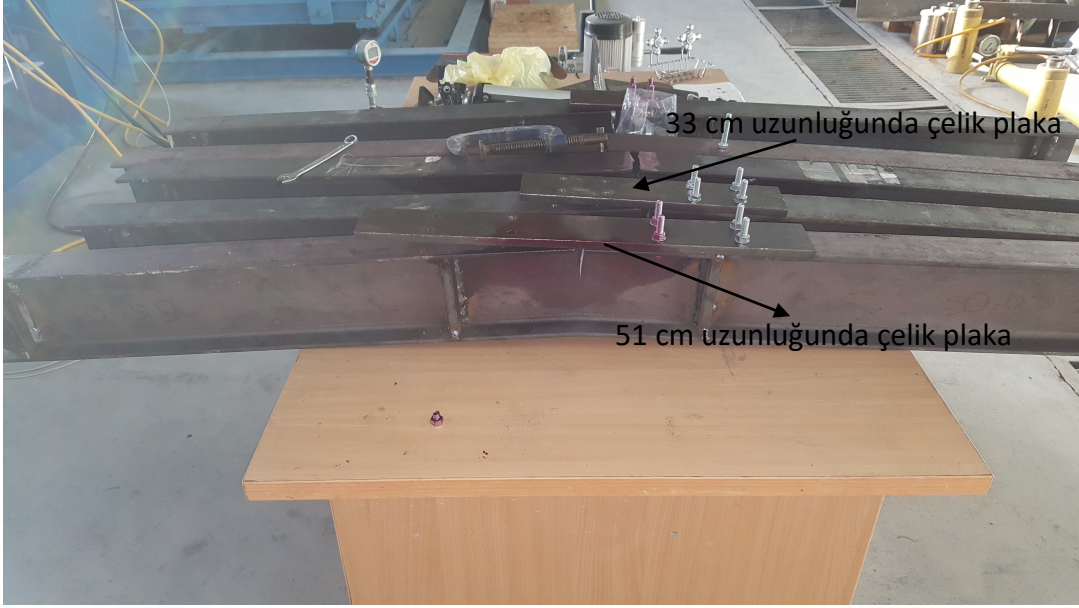
Aynı uygulamaları 33 cm ve 51 cm uzunluğunda çelik plakalar ile güçlendirme yapıp kiriş göçme durumuna gelene kadar çevrimsel yüklemeleri yapmıştır.



Şekil 4.13 33 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Deneyi



Şekil 4.14 51 cm Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Kirişin Deneyi



Şekil 4.15 Çelik Plakalarla İle Güçlendirilmiş Kirişlerin Göçmesi

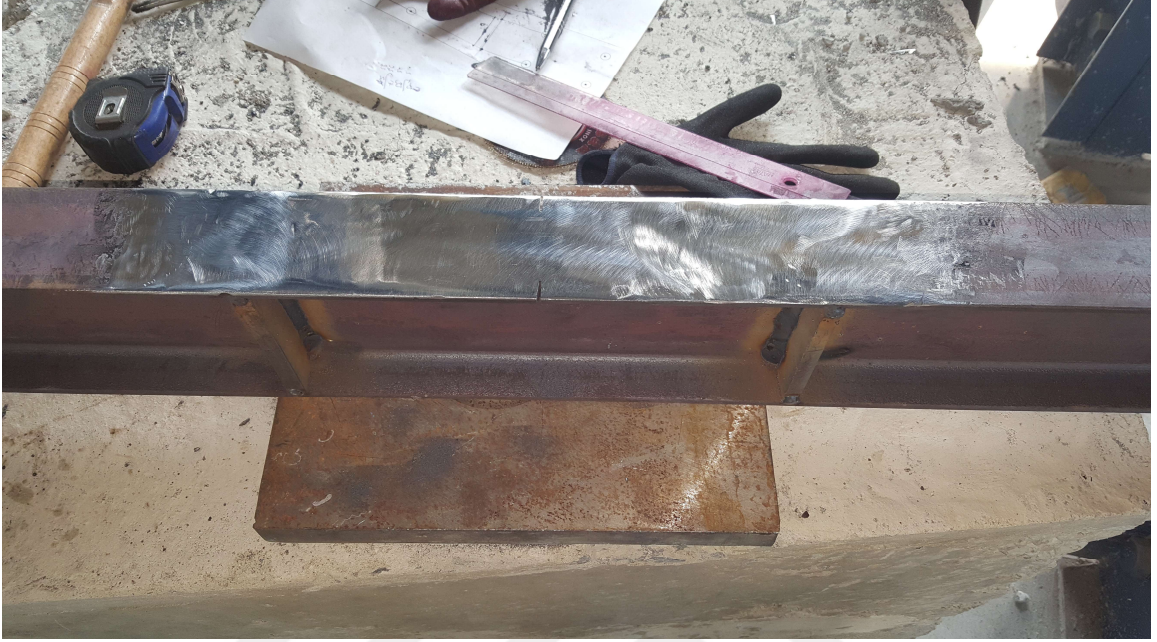
#### 4.4.2 Yorulmuş IPE120 Kirişin CFRP İle Güçlendirmesi

Son yirmi yılda, fiber-güçlendirilmiş polimer (FRP) kompozitleri, yüksek mukavemet ağırlık oranı ve yüksek korozyon direnci gibi benzersiz avantajlarından dolayı, inşaat mühendisliği uygulamalarında giderek kabul görmüştür. Ayrıca taşınması ve uygulaması çelik plakaya göre kolay olduğundan yapıda kullanım aksamalarını azaltır. Ayrıca çelik plakanın uygulanmasının zor olduğu yerlere FRP laminatları kolayca uygulanabilir. Bu tez kapsamında yorulma çatlak oluşturulmuş bir çelik kirişin hasar gören bölgesine 0.17 cm kalınlığında 30 cm uzunluğunda 3 katlı CFRP malzemesi yapıştırılmıştır.



Şekil 4.16 30 cm Uzunluğunda Kullanılan CFRP malzemesi

CFRP malzemesini yapıştırmadan önce malzemeyi yapıştırılacak yüzeyin kaplaması spiral yardımıyla kaldırılır ve yüzeyde yağdan ve kirden temizlenerek özel yapıştırıcıyı sürmek için hazır hale getirilir.



Şekil 4.17 Yapıştırılacak Yüzeyin Hazırlanması

Yapıştırıcı için daha önce Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Lavabatuvarında güçlendirme deneylerinde kullanılmış ve iyi sonuçlar alınmış MasterBrace Sat 4500 isimli iki bileşenli lifli polimer için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcısıdır. Bu yapıştırıcının özellikleri; Hazırlanan yüzeye sürülmesi kolaydır, Mekanik olarak yüksek değerlere sahiptir, düşük viskoziteye sahiptir, solvent içermez. [33]

#### TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Malzemenin Yapısı <b>MasterBrace® SAT 4500</b> Bileşen A <b>MasterBrace® SAT 4500</b> Bileşen B	Epoksi Reçine Epoksi Sertleştirici	
Renk	Mavi	
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre	
Viskozite	1500-2500 mPa.s	
*Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>60 N/mm <sup>2</sup>	LX ↑ ↓
*Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	>50 N/mm <sup>2</sup>	
Yapışma Dayanımı (Betona) (7 gün)	>3,0 N/mm <sup>2</sup>	
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5°C +30°C	
Kullanma Süresi (+20°C)	30 dak.	
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20°C)	Min. 48 saat Maks. 7 gün	
Tam Kurlenme Süresi (+20°C)	7 gün	

\*Tipik değerler: +23°C'de, %50 bağıl nem koşullarında 4x4x16 cm harç prizmasında yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklar süreleri kısaltır, düşük sıcaklıklar uzatır.

Şekil 4.18 Yapıştırıcının Teknik Özellikleri[33]

Çizelge 4.1 Karışım Oranları[33]

MasterBrace Sat 4500	Bileşen A	Bileşen B
Karışım Miktarı	3,73 kg	1,27 kg
Karışım Yoğunluğu	1,02 kg/litre	

Çizelge 4.1 e göre hesaplanan değerlere göre küçük bir kabın içerisinde iki bileşenden oranları miktarında alıp yaklaşık 20 dakika karıştırılmıştır. Karışım homojen bir hale geldiğinden emin olduktan sonra karıştırma işlemi sonlandırılmıştır.



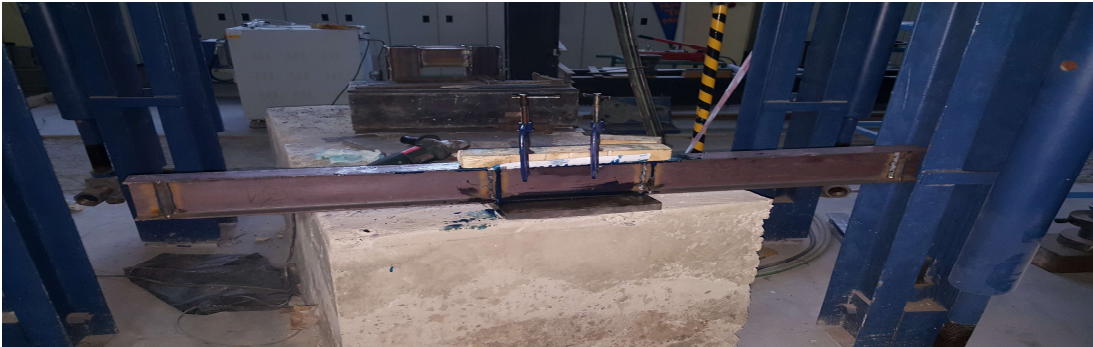
Şekil 4.19 Yapıştırıcının Karıştırılması

Karışım hazırlandıktan sonra rulo yardımı ile karışım temizlenmiş yüzeye kalınlığı 0,8-1 mm olacak şekilde tüm yüzeye oluşturulan karışım sürülmüştür. Yapıştırıcının üzerine 30 cm uzunluğunda kestiğimiz CFRP şeritlerini yerleştirilmiştir. CFRP şeritlerinin her bir bölgesinin yapıştırıcıyı emmesini sağlamalıyız. CFRP şeridi ile yüzey arasında herhangi bir hava baloncuğu oluşmamasına dikkat edilmiştir.



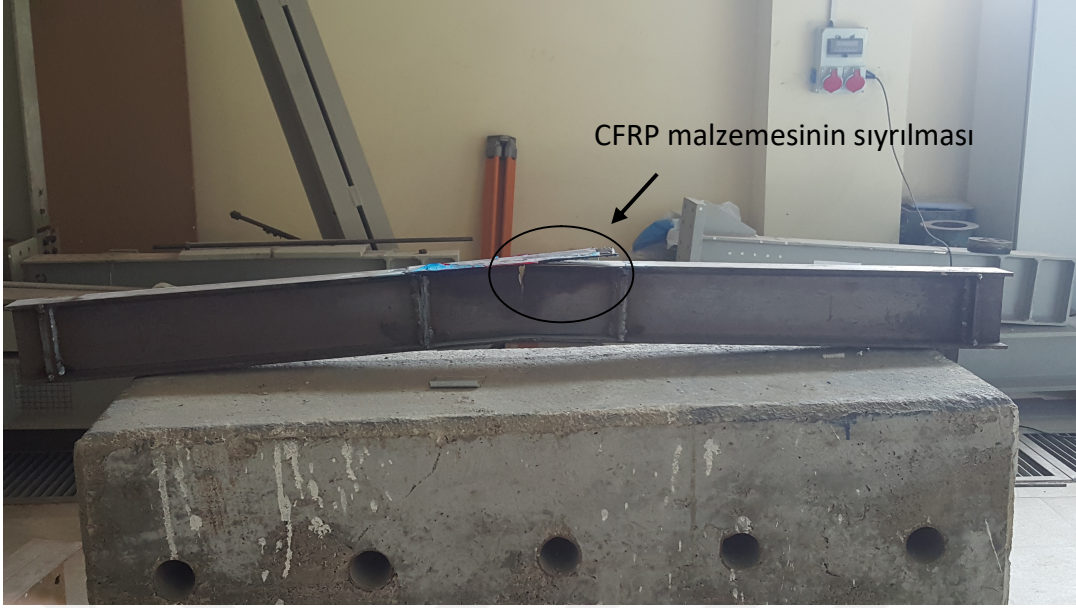
Şekil 4.20 CFRP şeridinin ilk katının yapıştırılması

CFRP şeridinin ilk katının yapışmasını sağladıktan sonra polimer kumaşın lifleri doğrultusunda rulo ile tekrar yaklaşık 1 mm lik bir yapıştırıcı katman oluşturuldu. Sonra 2. Katman CFRP şeridini yerleştirildi. 2. katmanı yerleştirdikten sonra tekrar yapıştırıcı tabakasını oluşturup 3. ve son katmanı yerleştirildi. CFRP şeritlerinin lifli kumaşlarının yapıştırıcıyı emdiğinden emin olundu. Sonra ahşap bir eleman ile sabitleştirilip 36-48 saat kuruması için beklenildi.



Şekil 4.21 CFRP şeridinin tüm katmanlarının yapıştırılması

Yaklaşık 48 saat sonra CFRP yapıştırılmış olan kiriş numunesini alıp deney cihazına yerleştirip aynı koşullar altında deneyi başlatılmıştır. Deney devam ederken CFRP şeritlerinin yapıştırıcı üzerinde dikey doğrultuda kırıklar meydana gelmiştir. CFRP şeritinde sıyrılma meydana gelmiştir. CFRP li numune yaklaşık 22200 çevrimden sonra göçmüştür.



Şekil 4.22 CFRP Malzemesiyle Güçlendirilmiş Kirişin Sıyrılması

#### 4.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirmesi

İkisi kontrol numunesi olmak üzere toplamda 6 tane kirişin yorulma performansı incelenmiştir. Bu kirişlerden 3 ü farklı boylarda bulonla birleştirilmiş çelik plakalar ile güçlendirilmiş olup, 1 kiriş CFRP malzemesiyle güçlendirilmiştir.

Çizelge 4.2 Yorulma Test Parametreleri

Numune	Eğilme Yüğü (min, max) kN	$\sigma$ (min, max) (Mpa)	$\Delta\sigma$ (Mpa)	Gerilme Oranı
C01	5.5; 55	36.6; 366	329.4	0.1
C02	5.5; 55	36.6; 366	329.4	0.1
BG15	5.5; 55	36.6; 366	329.4	0.1
BG33	5.5; 55	36.6; 366	329.4	0.1
BG51	5.5; 55	36.6; 366	329.4	0.1
CG1	5.5; 55	36.6; 366	329.4	0.1

C01= Kontrol kirişi 1, C02= Kontrol kirişi 2 , BG15= Bulonla Kullanarak 15 cm lik plaka Güçlendirilmiş Kiriş, BG33= Bulonla Kullanarak 33 cm lik plaka Güçlendirilmiş Kiriş, BG51= Bulonla Kullanarak 51 cm lik plaka Güçlendirilmiş Kiriş ve CG1= CFRP malzemesiyle Güçlendirilmiş Kiriş

Yapılan deney sonucunda numunelerdeki toplam çevrim sayısı çizerge 4.3 te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Deney Sonuçları

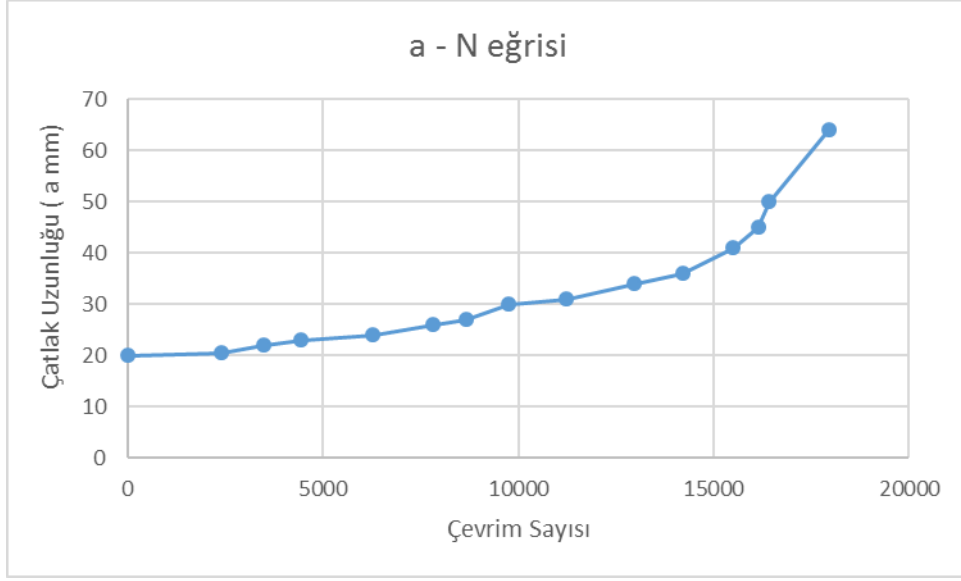
Numune	Toplam Çevrim Sayısı
C01	15508
C02	17945
BG15	26612
BG33	29573
BG51	38008
CG1	25489

Kirişte çatlak ilerlemesi iki mevcut koşula bağlıdır. İlki kırışte var olan kusur, diğeri ise gerilme yığılmalarıdır. Bu çatlak ilerlemesi üç bölgeye ayrılır. Bu bölgeler çatlak başlangıcı, kararlı durum ve kırılma bölgeleridir. Çizelge 4.4 te C02 numunesine ait çatlak ilerleme değerleri verilip grafiğı çizilmiştir.

Çizelge 4.4 C02 numunesine ait çatlak ilerleme değerleri

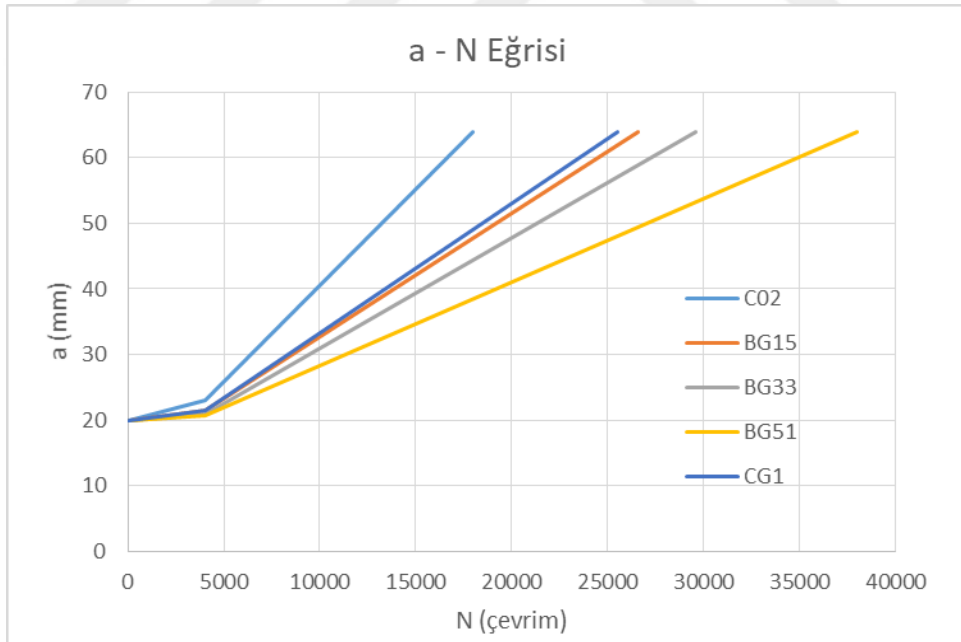
Çevrim Sayısı (N)	Çatlak Uzunluğu (a mm)
0	20
2390	20.5
3460	22
4435	23
6280	24
7825	26
8650	27
9760	30
11230	31
12965	34
14200	36
15500	41
16135	45
16422	50
17945	64

Bu değerlere göre çatlak uzunluğu-çevrim sayısı eğrisi şekil 4.26 te gösterilmiştir. Çatlak başlangıcı her zaman kestiğimiz uçlarda başlamıştır. Bütün deney örneklerinde çatlak başlangıçları 2000 ila 3000 çevrim arasındadır. Çatlak yatay olarak diğeri uca doğru yayılmıştır. Kiriş başlığı ve gövdesindeki eğimli bölgeye geldiğinde(30cm) hem gövdeye doğru hemde yatay olarak ilerlemeye devam etmiştir. İki kesik uçtaki çatlak birleşmeye yaklaşık 10 mm kalıncaya kadar kararsız durum yanı çatlak yayılımındaki kararlı durum bitmiş ve kararsız duruma geçip hızlı bir şekilde kırılmıştır.



Şekil 4.23 C02 Numunesinin Çatlak İlerleme Eğrisi

Güçlendirilmiş numunelerde çatlak ilerlemesi yapılan güçlendirme metotlarından dolayı adım adım izlenememiştir. Her numune 4000 çevrime kadar yorulduğundan dolayı 4000 çevrimdeki çatlak uzunluğu bilinmektedir. Güçlendirilmiş numunelerdeki çatlak uzunluğu- çevrim eğrisi Şekil 4.24 de verilmiştir.



Şekil 4.24 Güçlendirilmiş Numunelerin Çatlak İlerleme Eğrisi

Şekil 4.24 de anlaşılacağı üzere güçlendirilmiş numuneler çatlak uzunluğunun kararsız bölgedeki ilerlemesini yavaşlatmıştır. BG15 ve CG1 numuneleri benzer bir eğri meydana getirmişlerdir. En iyi sonucu BG51 numunesinden elde edilmiştir.



Amerikan yönetmeliği 2016'a göre yorulma tasarım parametrelerini belirlemek için belirli özelliklere göre kategorilere ayrılmıştır. Bizim deney numunemizin bu sınıflandırmaya göre B gerilme kategorisine girmektedir[34].

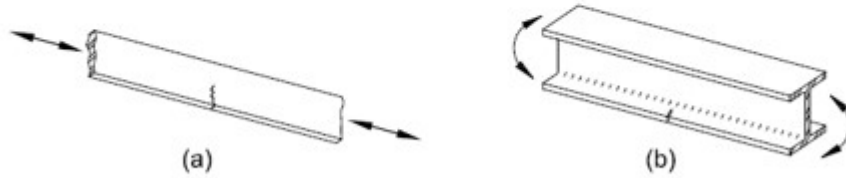
**TABLE A-3.1  
Fatigue Design Parameters**

Description	Stress Category	Constant $C_f$	Threshold $F_{TH}$ ksi (MPa)	Potential Crack Initiation Point
<b>SECTION 1—PLAIN MATERIAL AWAY FROM ANY WELDING</b>				
1.1 Base metal, except noncoated weathering steel, with as-rolled or cleaned surfaces; flame-cut edges with surface roughness value of 1,000 $\mu\text{in.}$ (25 $\mu\text{m}$ ) or less, but without reentrant corners	A	25	24 (165)	Away from all welds or structural connections
1.2 Noncoated weathering steel base metal with as-rolled or cleaned surfaces; flame-cut edges with surface roughness value of 1,000 $\mu\text{in.}$ (25 $\mu\text{m}$ ) or less, but without reentrant corners	B	12	16 (110)	Away from all welds or structural connections

Illustrative Typical Examples

**SECTION 1—PLAIN MATERIAL AWAY FROM ANY WELDING**

1.1 and 1.2

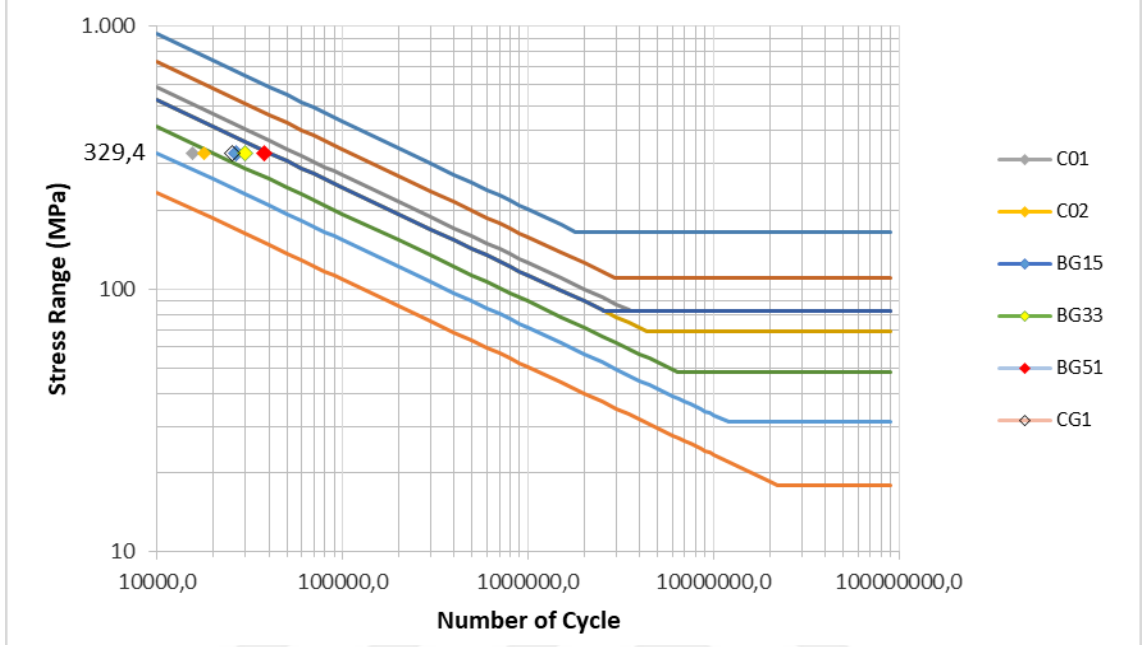


Şekil 4.25 Amerikan Yönetmeliğine Göre Yorulma Kategorisinin Belirlenmesi[34]

Yorulma kategorisini belirledikten sonra AASTHO'da bulunan yorulma için tasarım eğrisinde yani S-N eğrisinde gerilme farkı-çevrim sayısını kesiştirdiğimizde B eğrisinin üstünde her nokta için deney numunemiz yorulma bakımından güvenli anlamını taşımaktadır.

AASHTO hükümlerine göre yorulma için 8 tane detay kategorileri tanımlanmıştır. Bunlar A, B, B', C, C', D, E, E' olarak adlandırılır. Bu eğride dikey eksen gerilme aralığını, yatay eksen çevrim sayısını çeşitli detaylara göre vermektedir. Bu detayların Amerikan yönetmeliğinde belirlenmiştir. A kategorisinde bulunan elemanlar yorulmaya karşı en

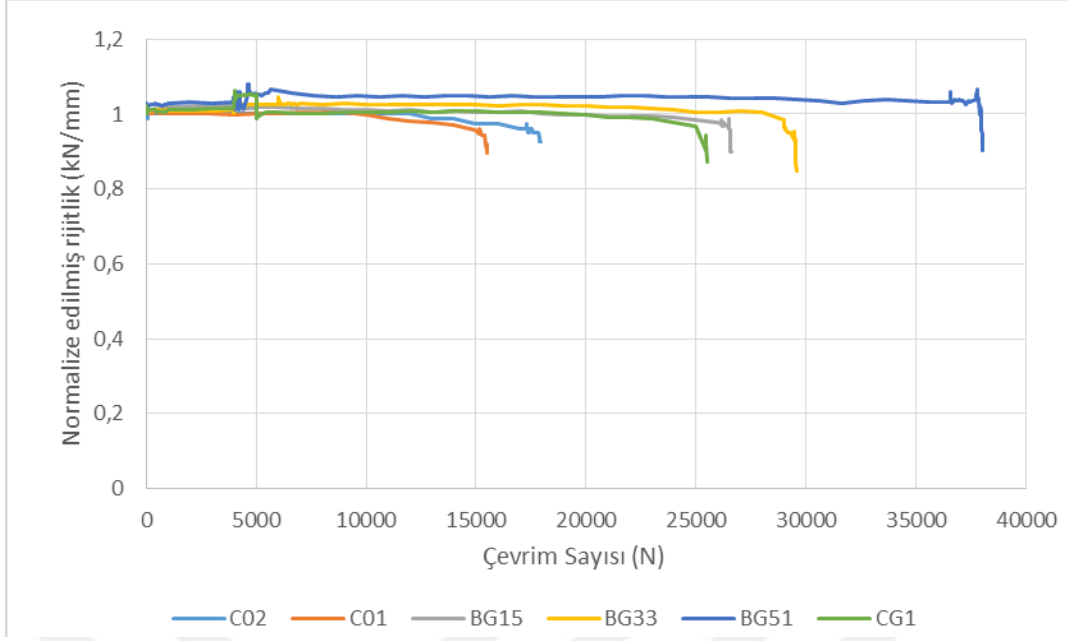
iyi performans gösteren, E kategorisindekiler ise en kötü sonuç verenler olarak adlandırılabilir[35]. Şekil 4.26 de deney sonuçlarını AASHTO tasarım eğrisinde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.26 S-N Eğrisinde Deney Sonuçlarının Yerleştirilmesi

Şekil 4.26 de görüldüğü gibi güçlendirilmemiş deney numuneleri E ve D eğrileri arasında yorulma direncine sahiptir. Çelik plaka ve CFRP malzemesiyle güçlendirilmiş deney numunelerinde yorulma performansı D ile C' arasına yükselmiştir.

Maksimum ve minimum yük oranlarının orta açıklıktaki deplasmana bölünmesiyle elde edilen rijitlik değişimi kirişin yorulma ömrü boyunca büyük bir zamanda sabit kalmıştır. Kiriş orta açıklıkta başlık tamamen kırıldığında kirişin rijitliğinde azalmalar meydana gelmiştir ve kısa bir çevrimsel yüklemeye sonra kiriş tamamen kırılmıştır. Normalize edilmiş rijitlik değişimi- çevrim sayısı eğrileri Şekil 4.27 da deney verilerinden elde edilmiştir.



Şekil 4.27 Yorulma Testi Sırasında Elde Edilen Rijitlik Değişimleri

Deney verileninden elde edilen sonuçlara göre güçlendirmemiş kirişlerde rijitlik yaklaşık yüzde 8'luk bir kayıptan sonra kırılma meydana gelmiştir. Çelik plaka ile güçlendirilmiş kirişlerde rijitliklerdeki ani değişim yaklaşık yüzde 15'lik kayıptan sonra meydana gelmiştir. CFRP şeritleriyle güçlendirilmiş kirişte ise rijitlik yaklaşık yüzde 13'luk bir kayıptan sonra kırılma meydana gelmiştir. Bu rijitlikte düşme deformasyonda artışa neden olur ki bu durum kırılma öncesinde önemli bir uyarı mekanizması sayılabilir.

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Metallerde yorulma, tekrarlayan gerilme yükleri altında çatlakların başlatılması ve büyümesini kapsayan bir süreçtir. Çatlak büyümesinin yeterince uzun süre devam etmesine izin verilirse, kırılmamış kesit yeterince azaltıldığında elemanın göçmesi ortaya çıkabilir, böylece eleman çatlak için dengesiz bir modda uzanan iç kuvvetleri artık taşıyamaz. Yorulma işlemi statik yükleme altında kırılmaya yol açan gerilmeden daha düşük bir gerilmenin katlanmış etkisi sonucu yapı elemanında kırılmanın meydana gelmesidir. Yorulma kırılmasına neden olan olağan durum, çok sayıda çevrimsel yükün uygulanmasıdır.

Yapıların tasarımı ve detaylandırılmasında, çatlama eğilimli olabilecek ayrıntılar en aza indirilmeli veya mümkünse kaçınılmalıdır. Yapılar, başlangıçtaki kusurların boyutunu sınırlandırmak için hem imalat sırasında hem de servis sırasında herhangi bir çatlak büyümesini saptamak için çatlaklara karşı denetlenir. Fakat çatlak ya da çatlak benzeri süreksizler imal edilmiş çelik elemanlarda bulunması kaçınılmaz bir durumdur. Bu yüzden mühendisler çelik yapı yaparken bu durumu göz önünde bulundurup projesini ona göre tasarlaması önemlidir. İşlenmiş bir çelik yapının yorulma davranışı, kaynaklı bağlantılarda veya mevcut çatlaklar veya çatlak benzeri süreksizliklerin varlığı sebebiyle meydana gelen gerilme yoğunluğu ile kontrol edilir.

Yorulmadan dolayı meydana gelen kırılma, inşaat mühendisliğinde özellikle çelik yapılar alanında çok sık meydana gelen kırılma türüdür. Gerilmenin yoğun olduğu bölgelerde yorulma yüklemesi çatlak başlangıcına ve çatlak ilerlemesine neden olabilir.

Yapı ömrünü tamamlamaya yakın çelik yapılar, ömrünü uzatmak için onarılacak yorulma kusurlarını ortaya çıkarır. Buna ek olarak, yeni çıkan yönetmelikler tarafından gerekli olan yükleme durumu artışı nedeniyle güçlendirilmesi gerekebilir. Yukarıdaki sebeplerden ötürü, çevrimsel yüklemeye tabi tutulan eski çelik yapıların güçlendirilmesi için etkin güçlendirme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen konulardan biri geleneksel yöntem olan bulonla birleştirilmiş çelik plaka ile güçlendirilmiş kirişin, çelik plakanın uzunluğunun artması ile yorulma bakımından etkisidir. İkinci güçlendirme tekniği mekanik özellikleri çelik plakaya göre daha üstün olan CFRP malzemesi ile güçlendirme yapılmıştır.

Bu çalışmanın analitik simülasyonunu sonlu elamanlar programı olan Abaqus'te modellendiğinde çatlak ya da çentik bulunan bölgede, yani sorunlu dediğimiz gerilme yığılmalarının çok olduğu bölgede, gerilme yığılmalarını düşüren gerilme iletimleri en iyi olan güçlendirme tekniği CFRP malzemesi olduğu anlaşılmıştır. Fakat CFRP katmanlarının en uç kısımlarında bulunan yüksek gerilmeler deneysel kısımda sorun olabileceği hakkında fikir vermiştir.

Çelik levha boyu sorunlu bölgede gerilme yığılmalarını yeterli miktarda düşürmemektedir. Ayrıca bulonlu bölgelerde biriken aşırı gerilmeler deneysel kısımda bulonla ilgili bir hata vereceği anlaşılmaktadır.

AASHTO tasarım eğrilerine göre güçlendirilmemiş kirişlerin yorulma direnci E ve D eğrileri arasında çıkmıştır. Bu numuneler güçlendirildikten sonra yorulma direnci bir basamak artarak D ve C' eğrileri arasına yükselmiştir. Bu ilk bakışta pozitif bir çıktı olmasına rağmen deney numunemizin tasarım sınıfı olan B eğrisinin üzerine geçemediği için tasarım bakımından sonsuz güvenlikte bir tasarım ömrüne sahip değildir.

Rijitlikteki değişme güçlendirilmemiş numunelerde yüzde 8 den sonra kırılma meydana gelirken güçlendirilmiş numunelerde CFRP de yüzde 13, çelik plaka ile güçlendirmede yüzde 15 e kadar düşmüştür. Bu rijitlikteki düşme daha çok deformasyon yapacağı anlamında gelmektedir. Bu durum önemli bir uyarı sisteminin gelişmesi anlamına gelmektedir.

Bu çalışmanın deneysel kısmında bulonlu birleşim için minimum ve maksimum mesafeler göz önüne bulundurularak çelik levhaların boyutlarına karar verilmiştir. Dene sonuçlarında minimum mesafeler alınarak buluna çelik levha boyutu 15 cm yorulma ömrünü yaklaşık 1.5 kat arttırmıştır. Maksimum mesafeler hesaplanarak bulunan çelik plaka boyu 51 cm lik çelik plaka yorulma ömrünü yaklaşık 2.12 kat arttırmıştır. Burdan çıkarılan sonuç bulonlar arasındaki mesafe arttıkça yorulma ömrü artmaktadır.

CFRP katmanlarının yapıştırması ile yorulma ömründe yaklaşık 1.5 kat artım sağlamıştır. Fakat yapıştırıcı tabakası gerilmeye dayanamamış CFRP malzemesi çelik yüzeyden sıyrılarak malzemenin verimli kullanılması sağlamamıştır.

CFRP malzemesi ile çelik arasındaki yük iletimini sağlayacak yapıştırıcının belirlenmesi için pisayada kullanılan yapıştırıcılar araştırılabilir ya da sıyırma deneyleri yapıp en iyi performans gösteren yapıştırıcı ile yorulma dayanımı tekrar test edilebilir.

Tüm numunelerde tek bir gerilme farkı altında deneyler yapılmıştır. Bu gerilme farkı 329.4 MPa gibi yüksek bir değere sahiptir. Farklı gerilme farkları altında deneyler yapıp güçlendirme tekniklerinin gerilme farkı etkisi incelenebilir.

Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı yaklaşık 0.8-1 mm olarak seçilmiştir. Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı arttırılıp deney yapılabilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Yayla P., (2007). Kırılma Mekaniği, Birinci Baskı, Çağlayan Yayınevi, İstanbul.
- [2] Radomski W., (2002). Bridge Rehabilitation, Birinci Baskı, Imperial College Press, London
- [3] Yenilikçi yapılar için akıllı algılama (ISIS) Kanada araştırma ağı. Çözüm odaklı araştırma. Yıllık rapor 2000/01
- [4] Fukui J., Masahiro S., ve Matsui K., (2005). "Performance-based specifications for Japanese highway bridges." Proceedings of the ninth international conference on structural safety and reliability (ICOSSAR), 20–23 Haziran 2005, Rome
- [5] Bocciarelli, M., Colombi, P., Fava, G., ve Poggi, C., (2009). "Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates", Composite Structures, 87: 334-343
- [6] Wu G., Wang, H-T., Lui, H-Y., ve Ren, Y., (2012). " Experimental Study on the Fatigue Behavior of Steel Beams Strengthened with different Fiber-Reinforced Composite Plates", Journal of Composite For Construction, 16(2): 127-137
- [7] Mosaud, S., Soudki, K., ve Topper, T., (2001). "CFRP-Strengthened and Corroded RC beams with under monotonic and fatigue loads" , Journal of Composite For Construction, 5(4): 228-236
- [8] Jiao, H., Mashiri, F., ve Zhao, X., (2012). "A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets" Thin-Walled Structures, 59: 144-152
- [9] Bader, Q., ve Njim, E., (2014). "Effect of Stress Ratio and V Notch Shape on Fatigue Life in Steel Beam", International Journal of Scientific and Engineering Research, 5(6): 1145-1154
- [10] Barnes, A.R., ve Mays, C.G., (1999). " Fatigue Performance of Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates" , Journal of Composite For Construction, 3(2): 63-72

- [11] Huawen, Y., Ummenhofer, T., Shizhang, Q., ve Plum, R., (2010). "Fatigue Performance of Tension Steel Plates Strengthened with Prestressed CFRP Laminates" , Journal of Composite For Construction, 14(5): 609-615
- [12] Lorenzo, L., ve Hahn, H. T., (1986). "Fatigue Failure Mechanisms in Unidirectional Composites" , Composite Materials : Fatigue and Fracture, American Society for Testing and Materials, 210-232
- [13] Tavakkolizadeh, M., ve Saadatmanesh, H., (2003). "Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch" , Journal of Structural Engineering , 129(2): 186-196
- [14] Yu, Q.-Q., ve Wu, Y.-F., (2017). "Fatigue Strengthening of Cracked Steel Beams with Different Configurations and Materials" , Journal of Composite Constructure, 21(2): 1-12
- [15] Alemdar, F., Matamoros, A., Bennett, C., Barrent-Gonzales, R., ve Rolfe, T. S., (2012). "Use of CFRP Overlays to Strengthen Welded Connections under Fatigue Loading" , Journal of Bridge Engineering , 17(3): 420-431
- [16] Kaan, N., B., Alemdar, F., Bennett, C., Matamoros, A., Barrent-Gonzales, R., ve Rolfe, T. S., (2012). "Fatigue Enhancement of Welded Details in Steel Bridges Using CFRP Overlay Elements" , Journal of Composite Construction, 16(2) : 138-149
- [17] Yossef, N., (2015). "Strengthening Steel I-Beams by Welding Steel Plates before or While Loading" , International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT) , 4 (7) : 545-550
- [18] Tall, I., (1989). "The Reinforcement of Steel Columns," Engineering Journal, 26: 33-37
- [19] Wu, Z., ve Grondin, G., Y., (2002). "Behavior of Steel Columns Reinforced with Welded Steel Plates.," Structural Engineering Report no. 250. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta., 2002.
- [20] Aprile, A., ve diğerleri, (2001). "Role of bond in RC beams strengthened with steel and FRP plates" , Journal of Structural Engineering , 127(12):1445-1452
- [21] Tavakkolizadeh, M., ve Saadatmanesh, H., (2003). "Repair of Damaged Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets" , Journal of Composite For Construction, 7: 311-322
- [22] Ağcakoca, E., (2012). I Kesitli çelik betonarme kompozit kirişlerin HM-CFRP ile onarımı ve güçlendirilmesi yönelik metot geliştirilmesi, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- [23] Melson, H. J., (2014). Fatigue Crack Growth Analysis with Finite Element Methods and a Monte Carlo Simulation, Master Tezi, Virginia Tech University, Blacksburgs, VA
- [24] Engelhardt, D. M. , ve Sabol A. T., (1998). "Reinforcing connections of steel moment with cover plates: limitations and benefits" , Engineering Structures, 20 : 510-520



- [25] Lenwari, A., Thepchatrri, T., ve Albrecht, P., (2006). "Debonding Strength of Steel Beams Strengthened with CFRP Plates" , Journal of Composite for Constructure, 10(1): 69-78
- [26] Barsom, M. J., ve Rolfe, T. S., (1999). Fracture and Fatigue Control in Structures: Application of Fracture Mechanics, 3. Edition, ASTM, Philadelphia
- [27] Güneş, B., (2013). Karbon Lifli Polimerler (CFRP) İle Güçlendirilmiş Çelik-Betonarme Kompozit Kirişlerin Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] Paris, P., ve Erdoğan, F., (1963). " A critical analysis of crack propagation laws" , Journal of Basic Engineering, 85(4): 528-533
- [29] Büyüköztürk, O., ve diğerleri., (2003). " Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites" , Construction and Building Materials, 18(1): 9-19
- [30] T.C. Resmi Gazete, Çelik Yapıların Tasarımı ve Yapım Kuralları Hakkında Yönetmelik. (29614), 04.02.2016, 95-120
- [31] Özce Demir, Avrupa I profilleri, [www.ozcedemir.com.tr/ipe\\_avrupa\\_i\\_kirisler](http://www.ozcedemir.com.tr/ipe_avrupa_i_kirisler), 16 Eylül 2017.
- [32] Dinamik ve Yorulma Test Sistemleri, Instron Test Sistemleri, <http://www.instron.com.tr/tr-tr/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems>, 3 Kasım 2017
- [33] BASF Yapı Kimyasalları, MasterBrace SAT 4500, <https://www.master-builders-solutions.basf.com/tr-tr/products/masterbrace/1686>, 3 Kasım 2017
- [34] AISC 360-16, (2016). Specification for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago.
- [35] AASHTO, (2000). Standart Specification for Highway Bridges, AASHTO, 16. Baskı, Washington, D.C.
- [36] inplod, gevrek ve sünek malzemeler nedir?, <http://www.inplod.com/t/sunek-ve-gevrek-malzeme-nedir/21859/>, 10 Ocak 2017.
- [37] Hoşgör, K., (2010). Köşe Kaynağı İle Birleştirilmiş Silindirik Elemanın Kırılma Mekanikliği Açısından Duyarlılık Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [38] Arıcan, E., (2006). "Bir Gaz Türbinli Motor Fan Diskinde Yorulma Kaynaklı Çatlak İlerlemesini İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [39] Uğuz A., (1996). Kırılma Mekanikğine Giriş, Birinci Baskı, Uludağ Üniversitesi Yayınları, Bursa.
- [40] Zhu,X. ve Joyce J.A., (2012). "Review of fracture toughness(G,K,J,CTOD,CTOA) testing and standardization", Engineering Fracture Mechanics, 85: 1-46.
- [41] Rice, J.R., (1968). "A path independent Integral and Approximate Analysis of strain concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, 35:379-386.

- [42] Boardman, B., (1990). "Fatigue Resistance of Steel", ASM Handbook Committee, 1: 673-688
- [43] Kılıç, E., (2008). "14NiCr10-14NiCr14 çeliklerin uygulanacak sementasyonda işleme bağlı olarak yorulma özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [44] Karacaer, Y., (2008). "Cam Kumaş Takviyeli Delikli SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Hasan Cem AKKAYA  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20.10.1989 , Bakırköy/ İstanbul  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : [hasancemakkaya@hotmail.com](mailto:hasancemakkaya@hotmail.com)

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Çift Lisans	Harita Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Yeşilköy Anadolu Lisesi	2008

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016-1017	Kırklareli Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2017-hala	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## **YAYINLARI**

### **Bildiri**

1- Akkaya H.C., Alemdar F., "Fatigue Performance of Steel Beams Strengthened with Steel Plates and CFRP Materials", INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SCIENCE AND ARTS, İSTANBUL, TÜRKİYE, 13-15 Eylül 2017, vol.1, no.0, pp.267-271

