

**KREN KİRİŞLERİNİN YORULMA ANALİZİ VE BİR GÜÇLENDİRME
UYGULAMASI**

Dursun GÜL

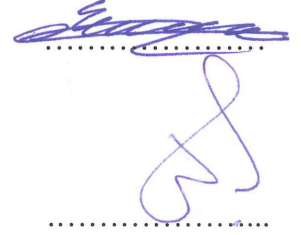
**Bülent Ecevit Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK
Nisan 2013**

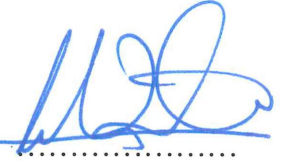
KABUL:

Dursun GÜL tarafından hazırlanan “KREN KİRİŞLERİNİN YORULMA ANALİZİ VE BİR GÜÇLENDİRME UYGULAMASI” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 24/04/2013

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Murat Emre KARTAL (BEÜ)



Üye : Doç. Dr. Mehmet Fatih ALTAN (HKÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Turhan BİLİR (BEÜ)

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./...../2013



Prof. Dr. Özden ÖZEL GÜVEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Dursun GÜL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KREN KİRİŞLERİNİN YORULMA ANALİZİ VE BİR GÜÇLENDİRME UYGULAMASI

Dursun GÜL

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Murat Emre KARTAL

Nisan 2013, 107 sayfa

Demir çelik tesisleri başta olmak üzere birçok sanayi tesisinde krenler, üretimi direkt etkileyen önemli görevler üstlenmiştir. Krenlerin ve krenlere mesnetlik eden yapıların hasara uğramasını önlemek üretim devamlılığı açısından önemli olduğu gibi çalışanların güvenliğini sağlamak açısından da önemlidir. Kren kirişleri, başta yorulma olmak üzere çelik yapı elemanlarının güvenliğini tehdit eden diğer faktörlerin etkisinde olup, detaylı analizlerinin yapılması gereken bir yapı elemanıdır.

Bu tez çalışmasında belli bir yükleme periyodundan sonra güçlendirilmiş, güçlendirildikten sonra belli bir süre hizmet sunmuş ve sonrasında göçmüş, tekrarlı yüklere maruz bir kren kirişinin yorulmaya bağlı hasarı incelenmiştir. Kren kirişlerinin göçmesine neden olabilecek; aşırı yükleme, ısı etkisi ve tasarım hataları gibi diğer nedenlerin üzerinde durularak kren kirişinin göçmesine ne ölçüde tesir ettikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada, örnek kren kirişi basit mesnetli kiriş kabul edilerek çözülmüş, maksimum moment değerinin olduğu bölgede kesit üzerinde kritik noktalar belirlenerek bu noktaların gerilme değerleri

ÖZET (devam ediyor)

hesaplanmıştır. Kiriş kesiti üzerinde belirlenen bu kritik noktaların AISC –LRFD 1997 ve TS EN 1993 1-9’da belirtilen yorulma kategorilerine göre yorulma hasar oranları bulunarak, her bir yükleme periyodu için yorulma miktarları ve ömür hesapları Palm-Migren kuralına göre değerlendirilmiştir. Eurocode ve AISC kodları dikkate alınarak yapılan yorulma analizi sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca klasik kiriş tasarımının ötesinde gelişmiş bir sonlu elemanlar yazılımı olan Ansys Workbench (Version 11.0) programı yardımı ile örnek kren kiriş modelinin güçlendirme öncesi ve sonrası statik ve termal analizleri ve buna bağlı olarak yorulma analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kren kirişleri, Yorulma analizi, Termal analiz, Yorulma ömür hesabı

Bilim Kodu: 624.03.01

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

FATIGUE ANALYSIS OF CRANE RUNWAY BEAMS AND A STRENGTHENING APPLICATION

Dursun GÜL

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Asst. Prof. Murat Emre KARTAL

April 2013, 107 pages

Cranes have important tasks that related with production directly in most of industrial plants, especially those producing iron and steel. It is important that protecting cranes and crane supporting structures from hazards and take precaution for crane supporting structures because of people safety and production maintenance. Crane supporting structures which subjected fatigue and other factors that threat steel structure members, must be analyzed separately.

In this study, fatigue damage of crane girder which subjected cyclic loading, strengthened after a loading period of time then worked some period of time and then collapsed, was studied. The other reasons such as, overloading, heat effect and design mistakes which cause failure of crane were investigated that what percent affected the failure. Numerical analysis was carried out that crane girder is simple supported beam and some critical stress points were selected and stress values were calculated at the section of maximum moment point. Fatigue evaluations of these critical points were fulfilled according to standards AISC –LRFD 1997

ABSTRACT (continued)

and TS EN 1993 1-9. For different periods of loading, fatigue ratios are combined according to Palm-Migren rule. Fatigue values were compared according to Eurocode and AISC. Crane girder was modeled and analyzed by using Ansys Workbench (Version 11.0) in addition to prior calculation. Analysis was made for two different situations such that before and after the modernization. Statically and thermal analysis cases were evaluated for each situation.

Keywords: Kren girders, Fatigue analysis, Thermal analysis, Fatigue life calculation

Science Code: 624.03.01

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tez aşamasına getirilerek tamamlanmasında bana yardımcı olan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Murat Emre KARTAL'a ve çalışmanın başlangıcında fikir vererek katkıda bulunan Sayın Hocam Doç. Dr. İsa YÜKSEL'e, ayrıca bu günlere gelmemde bana destek olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 ÇELİK KREN KİRİŞLERİ	5
2.1 KREN KİRİŞLERİNİN GENEL YAPISI	6
2.1.1 Tekil Yük Berkitmeleri	6
2.1.2 Ara Berkitmeler	7
2.1.3 Yatay Berkitmeler	7
2.1.4 Başlıklar ve Başlık Plakaları	7
2.1.5 Kren Rayı	7
2.1.6 Mesnet Durumları	7
2.2 KREN KİRİŞLERİNE ETKİ EDEN YÜKLER	8
2.2.1 Düşey Yükler	8
2.2.2 Yanal Yükler	9
2.2.3 Boyuna Yükler	10
2.2.4 Titreşimler	10
2.3 KREN YÜKLERİNİN KİRİŞ ÜZERİNDE OLUŞTURDUĞU GERİLMELER	11
2.3.1 Kiriş Gövdesinde Oluşan Düşey Basınç Gerilmeleri	11

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.3.2 Yerel Kesme Gerilmeleri	13
2.3.3 Teker Yüklerine Bağlı Oluşan Eğilme Gerilmeleri.....	13
2.4 KREN KİRİŞİNİN DIŞ YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI.....	14
2.4.1 Başlık Plağının Burkulması.....	14
2.4.1.1 Burulma Burkulması	14
2.4.1.2 Yanal Burkulma	15
2.4.1.3 Düşey Burkulma.....	17
2.4.2 Gövde Plağının Burkulması	18
2.4.2.1 Moment Burulması.....	18
2.4.2.2 Kayma Burkulması.....	19
2.4.2.3 Eğilmeli Kayma.....	20
2.4.3 Gövde Başlık Bağlantısında Yerel Buruşma.....	21
2.5 ÇELİK KREN KİRİŞLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI.....	21
2.5.1 Genel Esaslar	22
2.5.1.1 Sehime Bağlı Boyutlandırma	22
2.5.1.2 Momente Dayalı Boyutlandırma.....	22
2.5.1.3 Kesme Kuvvetine Göre Boyutlandırma	23
2.5.2 Rijitlik Elemanlarının Boyutlandırılması	23
2.5.2.1 Düşey Berkitme Aralığı	24
2.5.2.2 Berkitme Alanı ve Rijitliği.....	24
2.5.2.3 Berkitmelerde Konstrüktif Esaslar	25
2.5.2.4 Yatay Berkitmeler	25
2.6 BİRLEŞİM ARACI OLARAK KAYNAK	26
2.6.1 Ergitme Kaynağı	26
2.6.2 Kaynak Dikişleri	27
2.6.2.1 Küt Kaynak Dikişleri	27
2.6.2.2 Köşe Kaynak Dikişleri	28
2.6.2.3 Kaynak Dikişi Hesabı.....	29
2.6.2.4 Kaynak Dikiş Kalınlığının Tayini	29
2.7 KREN KİRİŞLERİNİN YORULMAYA BAĞLI HASARI	30
2.7.1 Yorulma.....	30

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.7.2 Yorulma Mekanizması ve Yorulmanın Fazları	31
2.7.2.1 Çatlak Başlangıcı.....	31
2.7.2.2 Çatlak Büyümesi	33
2.7.3 Yorulma ile İlgili Temel Kavramlar.....	34
2.7.3.1 S-N (Wöhler) Diyagramı.....	35
2.7.3.2 Goodman Diyagramı	37
2.7.3.3 Smith Diyagramı	39
2.7.3.4 Palmgren-Miner Kuralı	40
2.7.3.5 Yük Spektrumu Oluşturma ve Yağmur Akış Diyagramı Analizi	42
2.7.4 Yorulma Ömrüne Etkiyen Faktörler	43
2.7.4.1 Geometri	43
2.7.4.2 Yüzey Kalitesi	44
2.7.4.3 Malzeme Türü	44
2.7.4.4 Artık Gerilmeler	44
2.7.4.5 Yükleme Yönü ve İç Kusurlar	45
2.7.4.6 Sıcaklık.....	45
2.8 KREN KİRİŞLERİNDE YORULMAYA KARŞI ÖNLEMLER	46
2.8.1 Kren Kirişlerinin Yorulmaya Göre Tasarımı	46
2.8.1.1 AISC Kriterlerine Göre Tasarım	47
2.8.1.2 Eurocode-3'e Göre Tasarım	48
2.8.2 Konstrüktif Önlemler	52
2.8.2.1 Rijitlik Elemanları için Önlemler	52
2.8.2.2 Güçlendirme ve Onarım	53
BÖLÜM 3 SAYISAL UYGULAMA	55
3.1 KREN KİRİŞİNE TESİR EDEN YÜKLERİN BULUNMASI.....	57
3.1.1 Güçlendirme Öncesi Teker Yükleri	58
3.1.2 Güçlendirme Sonrası Kren Teker Yükleri	58
3.1.3 Kiriş Kendi Ağırlığı	59
3.1.4 Maksimum Moment Noktasının Tespit Edilmesi	59

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2 KESİTİN ANALİZİ.....	64
3.2.1 Güçlendirme Öncesi Gerilme Değerleri.....	66
3.2.2 Güçlendirme Öncesi Yorulma Hesabı.....	67
3.2.3 Güçlendirme Sonrası Gerilme Değerleri.....	68
3.2.4 Tahkikler	71
3.2.4.1 Emniyet Gerilmesi Hesabı	71
3.2.4.2 Başlık Plağı Burulma Tahkiki	71
3.2.4.3 Yanal Burkulma Tahkiki	72
3.2.4.4 Berkitmeler	73
3.2.4.5 Kayma Burkulması.....	74
3.2.4.6 Berkitmelerin Toplam Alanı	75
3.2.4.7 Gerekli köşe kaynağı	76
3.2.4.8 Tekil Yük Berkitmeleri	76
3.3 ANSYS SONLU ELEMENLAR PROGRAMI İLE YORULMA ANALİZİ	77
3.3.1 Analiz Yorulma Modülünün Bileşenleri	78
3.3.1.1 Yorulma Analiz Tipi	79
3.3.1.2 Yükleme Tipi.....	79
3.3.1.3 Ortalama Gerilme Etkisi.....	80
3.3.1.4 Çok Eksenli Gerilme Düzeltme Faktörü	80
3.3.1.5 Yük Faktörü.....	81
3.3.2 Ansys Yorulma Analiz Çıktı Özellikleri	81
3.3.2.1 Yorulma Ömrü	81
3.3.2.2 Yorulma Hasarı	81
3.3.2.3 Yorulma Güvenlik Faktörü	81
3.3.2.4 İki Eksenlilik Gösterimi	82
3.3.2.5 Yorulma Hassasiyeti	82
3.3.2.6 Yağmur-Akış Matrisi	82
3.4 ANSYS ANALİZ SONUÇLARI	82
3.4.1 Güçlendirme Öncesi Ansys Statik Analiz Sonuçları.....	82
3.4.2 Güçlendirme Öncesi Termal Analiz Sonuçları	87
3.4.3 Güçlendirme Öncesi Kiriş Analiz Sonuçları	89

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.4.4 Güçlendirme Sonrası Ansys Statik Analiz Sonuçları.....	92
3.4.5 Güçlendirme Sonrası Termal Analiz Sonuçları	95
3.4.6 Güçlendirme Sonrası Kirişin Genel Analiz Sonuçları	96
 SONUÇLAR	 101
 KAYNAKLAR.....	 105
 ÖZGEÇMİŞ	 107

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İçerisinde kren bulunan tipik bina kesiti	5
2.2 Kren kirişi genel yapısı	6
2.3 Maksimum yükleri elde etmek için yükleme durumu.....	9
2.4 Minimum yükleri elde etmek için yükleme durumu.....	9
2.5 Eksen sapması nedeni ile oluşan yatay yük durumları.....	10
2.6 Teker yükünün oluşturduğu düşey basınç	12
2.7 Basınç gerilmesinin dağılımı.....	12
2.8 Eksen kaçıklığına bağlı teker yükü etkisi.....	14
2.9 Basınç başlığı burkulması	15
2.10 Yanal burkulma	16
2.11 Basınç başlığının düşey burkulması	18
2.12 St 37 çeliğinin gövde narinliği moment ilişkisi.....	19
2.13 Yerel burulma	21
2.14 Küt kaynak dikişi	27
2.15 Kaynak dikiş kalınlıkları	29
2.16 Yorulmanın farklı evreleri ve alakalı faktörler	31
2.17 Kayma bantları oluşumu	33
2.18 Çatlak büyüme eğrisi.....	34
2.19 Periyodik yükleme.....	35
2.20 S-N grafiği (Wöhler grafiği).....	36
2.21 Goodman grafiği	37
2.22 Tam tersinir yükleme durumu	38
2.23 $\sigma_{alt}=0$ yükleme durumu.....	38
2.24 Statik yükleme durumu	39
2.25 Goodman grafiği	40
2.26 Smith diyagramı	40
2.27 Yağmur akış diyagramı analizi	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.28 Çekme etkisindeki delikli plakada gerilme dağılımı.....	43
2.29 AISC çizelge A.K 3.1 örnek.....	48
2.30 Yorulma detay kategorilerine göre S-N diyagramı	50
3.1 Bina kesitleri	55
3.2 Kiriş kesit özellikleri	56
3.3 Maksimum moment tespiti.....	60
3.4 Kiriş kesiti	65
3.5 Güçlendirilmiş kesit	69
3.6 Malzeme özellikleri.....	77
3.7 Analiz yükleme ve mesnet durumları.....	78
3.8 Sabit genlikli taban genliği sıfır olan yükleme durumu	79
3.9 Gerber ortalama gerilme diyagramı	80
3.10 Güçlendirme öncesi eş değer gerilmeler	83
3.11 Güçlendirme öncesi mesnet plakalarında oluşan gerilmeler.....	84
3.12 Güçlendirme öncesi kiriş çaprazlarında oluşan gerilmeler	84
3.13 Güçlendirme öncesi deformasyon	85
3.14 Güçlendirme öncesi yorulma.....	86
3.15 Güçlendirme öncesi termal etki için eş değer gerilmeler	87
3.16 Güçlendirme öncesi termal etki için deformasyon.....	87
3.17 Güçlendirme öncesi termal etki için yorulma	88
3.18 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için eşdeğer gerilmeler.....	89
3.19 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için deformasyon.....	90
3.20 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için yorulma	91
3.21 Güçlendirme sonrası eş değer gerilmeler	92
3.22 Güçlendirme sonrası deformasyon.....	93
3.23 Güçlendirme sonrası kiriş çaprazlarında oluşan gerilme	93
3.24 Güçlendirme sonrası yorulma	94
3.25 Güçlendirme sonrası termal etki için değer gerilme	95
3.26 Güçlendirme sonrası termal etki için deformasyon.....	95
3.27 Güçlendirme sonrası termal etki için yorulma	96
3.28 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için eş değer gerilmeler.....	97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.29 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için deformasyon.....	98
3.30 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için yorulma	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Küt kaynak dikişleri için emniyet gerilmeleri	28
2.2 Kaynak emniyet gerilmesi	28
2.3 AISC AK-3.1'den örnek	48
2.4 Eurocode yorulma detay tablosu örneği	49
2.5 Yorulma dayanımı için kısmi güvenlik faktörü, γ_{Mf}	51
3.1 Kren özellikleri	56
3.2 Yükleme bilgileri	57
3.3 Maksimum teker yükleri	59
3.4 Modernizasyon öncesi C-D aksları arası maksimum momentlerin tespiti	61
3.5 Kesite etkiyen yüklerin özet tablosu	62
3.6 Modernizasyon sonrası C-D aksları arası maksimum momentlerin tespiti	63
3.7 Kesite etkiyen yüklerin özet tablosu	64
3.8 Gerilme bölgelerinde gerilme değerleri	66
3.9 Eurocode ve AISC'ye göre hasar oranları	68
3.10 Güçlendirme sonrası gerilme bölgeleri gerilme değerleri	70
3.11 Eurocode ve AISC ye göre toplam hasar oranı	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_b	: Enine berkitme aralığı
a_k	: Kaynak kalınlığı
A_b	: Başlık plağı alanı
A_g	: Kiriş kesitinin gövde alanı
A_{st}	: Berkitme alanı
b	: Başlık plak genişliği
C	: Hasar oranı
C_b	: Bir katsayı
C_f	: AISC standartlarında çevrim sayısına göre verilen sabit
C_v	: Emniyet gerilmesi hesabında kullanılan bir katsayı
D	: Berkitme şekil katsayısı
d	: Kiriş başlıkları arası dıştan mesafe
E	: Elastisite modülü
e_{min}	: Vinç arabasının kirişe yaklaşabileceği minimum mesafe
e_y	: Teker yükünün kaçıklığı
f_b	: Titreşime bağlı büyütme faktörü
F_b	: Basınç başlığının enkesit alanı (cm^2)
F_{SR}	: N çevrim sayısını karşılayan gerilme aralığı
F_{TH}	: Sınır yorulma gerilme aralığı (sınırsız tasarım ömrü için)
$F_{z,Ed}$	: Teker tasarım yükü
G	: Kayma modülü
H	: Ray eksen kaçıklığına bağlı oluşan yanal kuvvet
h_w	: Gövde derinliği
I_s	: Berkitme rijitliği
I_t	: Kiriş başlığının burulması sabiti
$i_{x,y}$	: Basınç başlığı ve gövdenin basınç bölgesinin 1/3'ünün gövde eksenine göre atalet yarıçapı (cm)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

K	: h/t oranı
k	: Kayma gerilmesi hesabında kullanılan katsayı
K_t	: Konsantrasyon faktörü
L	: Vinç köprüsünün uzunluğu
l	: Kaynak uzunluğu
l_{eff}	: Yüken giriş üzerindeki etkili uzunluğu
M_p	: Kesit plastik moment gerilmesi
M_r	: Kesit moment kapasitesi
M_y	: Kesit elastik moment gerilmesi
$M_{1,2}$	: Kiriş mesnet noktası gerilmeleri
N	: Çevrim Sayısı
P	: Kesite etkiyen çekme veya basınç kuvveti
P_{max}	: Maksimum dikey yük
P_{min}	: Minimum dikey yük
Q_{max}	: Vincin maksimum yükü
S	: Gerilme aralığı
s	: Kirişin basınç başlığında dönmeye ve yanal deplasmana karşı mesnetleri arasındaki mesafe (cm)
t_b	: Kiriş kesitinde başlık kalınlığı
t_w	: Kiriş kesitinde gövde kalınlığı
t_{yb}	: Berkitme kalınlığı
T_d	: Yapı doğal periyodu
T_{ed}	: Teker yükünün oluşturduğu burulma momenti
T_f	: Yüke periyodu
$W_{x,y}$	: Mukavemet momenti
x_w	: Kren teker arası mesafe
Y	: Gövde çeliğinin akma sınırının berkitme çeliğinin akma sınırına oranı
z	: Kiriş gövde yüksekliği
α	: Krem kiriş rayı kaçıklık açısı
α_E	: Elastik uzama sayısı
α_t	: Isıl genleşme katsayısı
γ_{FF}	: Kısmi yük güvenlik faktörünü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

γ_{Mf}	: Kısmı dayanım güvenlik faktörünü
ΔK	: Gerilme şiddet faktörü aralığı
$\Delta\sigma_C$	: $N=2\times 10^6$ çevrim için gerilme kategorisi limiti
$\Delta\sigma_D$	: $N=5\times 10^6$ çevrim için gerilme kategorisi limiti
$\Delta\sigma_L$	: $N=10^8$ çevrim için gerilme kategorisi limiti
$\Delta\sigma_R$	: Yorulma dayanımı
ε	: Birim uzama
σ_a	: Akma sınırı
σ_{alt}	: Alt sınır gerilmesi
σ_B	: Yanal burkulma göz önüne alındığında basınç emniyet gerilmesi(kgf/cm ²)
σ_d	: Çekme dayanımı
σ_e	: Yorulma dayanım gerilmesi
σ_{em}	: Emniyet gerilmesi
σ_f	: Akma sınır gerilmesi
σ_g	: Genlik gerilmesi
σ_{maks}	: Maksimum gerilme
σ_{norm}	: Nominal gerilme
σ_o	: Ortalama gerilme
$\sigma_{oz,Ed}$	: Teker yükünün neden olduğu gerilme
σ_t	: Titreşim gerilmesi
σ_{ust}	: Üst sınır gerilmesi
σ_w	: Kaynak gerilmesi
τ_{em}	: Kesme emniyet gerilmesi
τ_{vs}	: Berkitme kesme gerilmesi aktarma miktarı

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Office (Amerikan Devlet Otoyolları ve Resmi Taşımacılık Birliği)
AISC	: American Institute of Steel Construction (Amerikan Çelik Yapılar Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing And Materials (Amerikan Malzeme Test Kurumu)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

CMAA : Crane Manufacturers Association of America (Amerika Vinç Tedarikçileri Topluluğu)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İçerisinde kren bulunduran endüstriyel yapıların tasarımı yapılırken, kren kirişleri tasarımı ayrıcalıklı olarak ele alınması gereken bir konudur. Krenlerin oluşturduğu kuvvetlerin karakteristik nitelikleri nedeni ile kren kirişlerinin tasarımında, diğer taşıyıcı çelik yapı elemanlarından farklı olarak ilave analiz ve tahkiklerin yapılması gerekmektedir. Özellikle içerisinde kren bulunan ve işlerin önemli bir kısmının krenler ile yapıldığı demir çelik üretimi yapan ağır endüstri tesislerinde kren kirişlerinin sağlamlığı daha da önem kazanır. Başta tekrarlı yükün neden olduğu yorulma etkisi olmak üzere, ısı, aşırı yükleme, korozyon veya tasarım ve imalat aşamasındaki hatalar da kren kirişlerinde çeşitli hasarlara neden olabilir. Bu hasarlar yapının göçmesi ile sonuçlanabilir, can ve mal kayıpları ile birlikte ciddi üretim kayıplarına neden olabilir.

Bu çalışmanın amacı tekrarlı yüklere maruz kalan kren kirişlerinin yorulmaya bağlı hasarlarını incelemek, hasar nedenlerini araştırmak, bu hasara etki eden diğer faktörlerin ne derece hasara etki ettiğini belirlemek, tasarım ve detaylandırmada dikkat edilmesi gereken hususları tespit etmektir. Ayrıca çalışmada ele alınan örnek bir kren kirişinin, kren kapasitesinin artırılmasına bağlı olarak güçlendirilmesi değerlendirilmektedir. Kiriş incelenirken hizmet sunduğu süre boyunca ne derece hasara uğradığı tespit edilerek, kapasite artırımından sonra yapılan güçlendirmenin ne kadar bir iyileştirme sağladığı tespit edilmektedir. ANSYS programı yardımı ile güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası olmak üzere iki ayrı dönem için analiz yapılmaktadır. Ansys programının yorulma modülü ile kiriş analizi yapılarak yorulmanın fazla olduğu bölgeler belirlenmekte ve hasar bilgileri elde edilmektedir. Güçlendirme öncesi ve sonrası başta kaynak detayları olmak üzere kritik bölgelerin AISC–LRFD 1997 ve TS EN 1993 1-9’da belirtilen yorulma kategorilerine göre hasar oranları kontrol edilmekte, kirişte gerilme dağılımları gözlemlenerek, sonuçlar değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın ağırlıklı üzerinde durduğu konu, tekrarlı yükün neden olduğu yorulma ve yorulmaya bağlı hasar durumlarıdır. Yorulmanın kısa tarihçesi araştırıldığında, yorulmanın yapısal bir hasar çeşidi olarak fark edilmesi 19. yüzyılın başlarında sürekli çevrimsel yüke maruz tren vagon akslarının ve demiryolu köprülerinin hasar nedenlerinin araştırılmaya başlaması ile olmaktadır. 1837 yılında Albert, yorulma hakkında ilk makaleyi yayınlamıştır. Rankine, tren vagon akslarındaki hasarların ve tren kazalarında yorulmanın önemine dikkat çekmiştir. 1860 yılında Wöhler ve Fairbairn, sistematik yorulma testleri yapmış, çevrimsel gerilme genliğinin maksimum gerilmeden daha önemli olduğunu belirtmiş ve “dayanıklılık limiti” kavramını ortaya atmıştır. Ewing, yorulmanın mikroskobik çatlaklar ile başladığını keşfetmiştir. Basquin, Wöhler’in deney neticelerini kullanarak S-N eğrileri oluşturmuştur. Miner, Palmgren’nin doğrusal hasar hipotezini kullanılabılır hale getirmiştir. Paris, yorulma çatlaklarının büyüme hızını tahmin amaçlı metotlar ileri sürmüş, Endo ve Matsuishi düzensiz rastgele yükler için yağmur akış metodu ile sayım algoritma tekniğini ortaya atmıştır (Url-1 2010).

Tekrarlı yüklere maruz kalan çelik yapılar üzerine son 10 yıl içerisinde yapılan çalışmalar incelendiğinde; rastgele yükleme altında çelik yapılarda meydana gelen hasar birikimlerinin incelendiği çalışmada, kaynaklı birleşimlerin yorulma ömrü, hem deneysel hem de kırılma mekaniği analizleri ile belirlenmiştir. Çeşitli plaka numuneler, köprü, baca ve deniz yapılarının maruz kaldığı gerçekçi yükleme verileri altında test edilmiştir. Hem kırılma mekaniği analizi sonuçları hem yorulma testleri göstermiştir ki çelik yapıların yorulma analizinde kullanılan Miner kuralı muhafazakâr sonuçlar vermemektedir. Miner kuralının doğruluğu çekme ve basınç kuvvetleri altındaki yük dağılımına bağlı olduğu anlaşılmıştır (Agerskov 2010).

Krenlere mesnetlik yapan yapıların tasarımının yorulma kriterlerine göre ne şekilde olacağını, özellikle yorulmaya bağlı hasarlardan kaçınmak amacı ile detay ve tasarım kriterleri belirtilmiştir. 1999 yılından başlayarak günümüze kadar yayınlanmış AISC standartlarındaki yorulma kriterlerinin uygulanması ile açıklamalarda bulunulmuştur (Fisher and Van de Pas 2003).

Kaynak geometrileri üzerine yapılan çalışmada, lazer tarama yöntemi ile üç boyutlu gerçek geometrisi elde edilen kaynak numunesinin sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi yapılarak, kaynak doğrultusu boyunca gerilme yoğunlukları

bulunmaya çalışılmıştır. Hesap edilen gerilme yoğunluklarından kaynak uçlarında plastik deformasyonların olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yüzeydeki kırılma oluşumunun veya kaynaklı bileşimlerin kırılma şeklinin 3 boyutlu kaynak geometrisi üzerinden tahmin edilebileceğini göstermiştir (Hou 2003).

Eurocode-3 yönetmeliğinde verilen yorulma davranışı ve yorulma ömrünün tespiti için kullanılan ifadelerin incelendiği çalışmada, sayısal uygulama olarak kaynaklı birleşimin kullanıldığı kren kirişi incelenmiş ve kaynaklı birleşim detayları için yıllık hasar miktarı ile kaynaklı birleşimin yorulma ömrü Eurocode-3 yönetmeliğinde öngörülen yöntem ile hesaplanmıştır. Yapılan yorulma hesapları sonucu; sayısal uygulamada belirtilen kullanım durumuna göre incelenen tüm kaynaklarda oluşacak hasar miktarları ve yorulma davranışından dolayı hangi kaynağın muhtemelen en çok etkileneceği bu şekilde tespit edilmiş ve birleşimin kaynak detaylarının yorulma ömrü belirlenmiştir (Seçer 2007).

Mevcut bir endüstriyel çelik yapının kren kirişlerinin yorulma ömrü üzerine yapılan araştırmada; daha önceki kren operasyonlarını baz alarak bir yükleme spektrumu oluşturulmuş, kabuk ve çubuk elemanlardan oluşan detaylı sonlu elemanlar modeli, kren hareketi esnasındaki birim yer değiştirmeleri tespiti yönelik testler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda iyileştirilerek, kren kirişinin kalan yorulma ömrünün tespiti için iyileştirilmiş sonlu eleman modelinin nümerik analizi yapılmıştır. Sonuç olarak dikey berkitmelerin üst başlığa doğru sürekliliğinin yetersiz olması nedeni ile kren kirişinin yorulma ömrünü tamamladığı, bu problemin üstesinden gelebilmek amacı ile berkitmelerin başlıklara köşe kaynağı ile kaynaklanması önerisi geliştirilmiştir (Çağlayan vd. 2010).

16 Kasım 2006 Birleşik devletlerin Washington eyaleti Bellevue şehrindeki bir konut şantiyesinde vince bağlı bir yük yokken ve ihmal edilebilecek derecede rüzgârlı bir havada, mesai bitiminin sonunda meydana gelen kule vinç yıkılması kazası üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada yıkılma üzerine kapsamlı araştırma yapılmış ve çelik taşıyıcı sistemin temelindeki yorulma çatlakları üzerine yoğunlaşmıştır. Analiz 3 ana fazda gerçekleştirilmiş; genel sehim ve kuvvetlerin bulunması amacıyla yapının global modelinin oluşturulması, çatlakların başladığı bölgelerde daha hassas elasto-plastik gerilme analizi yapılması ve yorulma çatlak ilerlemesinin araştırılması amacı ile yorulma-kırılma mekaniği analizi. Bu çalışmaların sonucunda, yorulma çatlaklarının başlangıcının her iki enine kule destek kirişlerinin gövdesindeki berkitmelerde olduğu doğrulanmıştır (McDonald et al. 2011).

Çin'deki bir demir çelik tesisinde uç kısımları belli bir yarıçap nispetinde yuvarlatılmak sureti ile derinliği daraltılmış kren girişleri incelemiştir. Yuvarlatılmış uçlardaki gerilme yoğunlaşmalarını bulabilmek amacı ile sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analitik sonuçlar göstermiştir ki; yuvarlatma çapı yükseldikçe ve giriş derinliği azaltıldıkça gerilme yoğunluğu azalmaktadır (Tong et al. 2007).

Orman ürünleri endüstrisinde çalışan bir vincin yorulma ömrünün bulunulmaya çalışıldığı çalışmada, gerçek yorulma eğrileri kullanmış ve gerinim değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Yükleme çevrim sayısı hesaplanırken yağmur akış metodu kullanılmış ve bir yıllık ortalama yükleme verileri çıkarılmıştır. Yorulma analizleri göstermiştir ki; kren yorulma hasarları sistematik bir şekilde belirli bölgelerde meydana gelmekte ve herhangi bir rastgele hasarlanma durumu söz konusu olmamaktadır (Kopnov 2009).

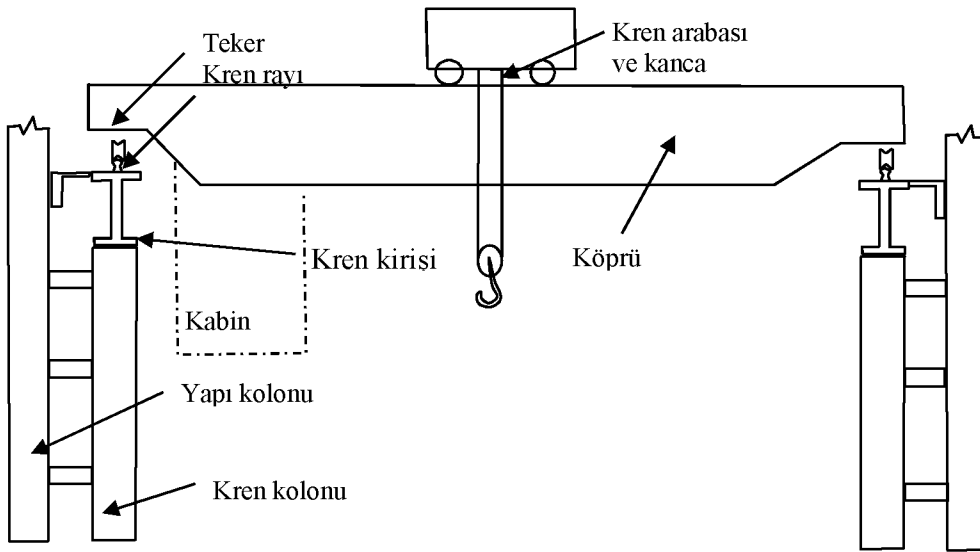
Sonlu elemanlar modeli oluşturulan ve tam tersinir yükleme altında test edilen numunelerin bir tarafını epoksi yama ile kaplanmış, yamadaki gerinim değerleri ve çatlak ilerlemesi gözlemlenmiş, yapılan yamanın düşük bir rijitliğe sahip olmasına karşın çatlak büyümesini yavaşlattığı ve yorulma ömrünü iki kat arttırdığını tespit edilmiştir. Yapılan bazı basit varsayımlarla beraber sonlu elemanlar modelinin deney sonucunu doğruladığı görülmüştür (Tsouvalis et al. 2009).

BÖLÜM 2

ÇELİK KREN KİRİŞLERİ

Kren kirişi, kren köprüsü ve kren arabasından oluşan hareketli mekanizmaya mesnetlik eden, üzerindeki raylar vasıtası ile krenin, kiriş eksenini yönünde hareketini sağlayan yapı elemanıdır. Kren kirişleri, kren rayları, ray bağlantıları, elektrik ekipmanlarının bağlantıları, kren durdurucusu, kolon bağlantı parçaları ve kiriş gövdesinden oluşan bütün bir sistem olarak değerlendirilir. Tüm bu unsurlar kren kiriş sisteminin tasarlanmasında ve detaylandırılması aşamasında beraber değerlendirilmelidir. Krenlerin düzgün bir şekilde çalışması kren kirişlerinin doğru tasarlanmasına ve detaylandırılmasına bağlıdır.

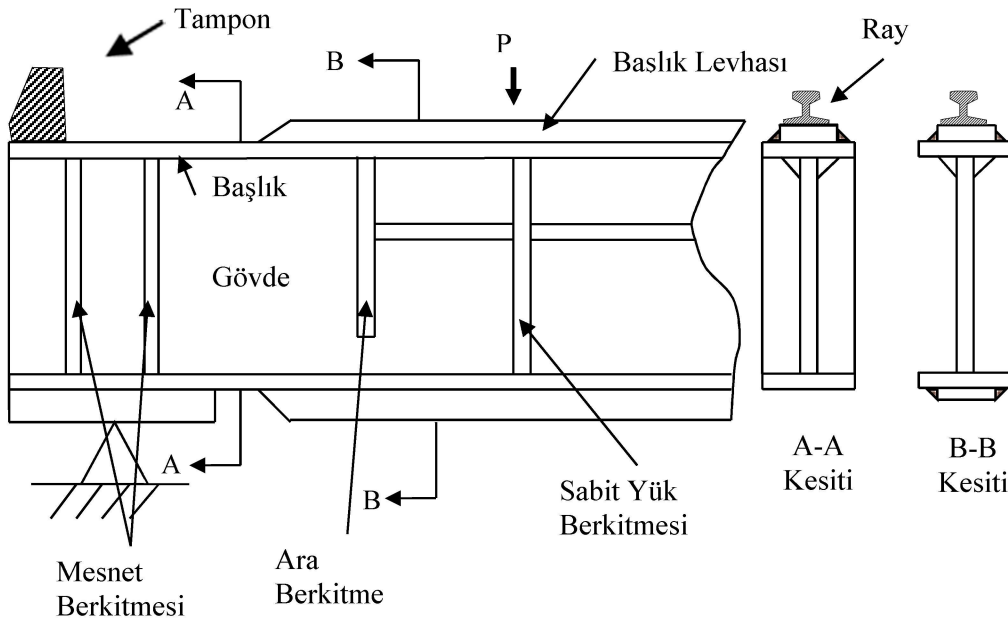
Krenler farklı tiplerde olmasına karşın tamamı bir kaldırma ünitesi, kaldırma ünitesinin enine hareketini sağlayan kren arabası ve bu iki mekanizmayı beraberce boyuna hareket ettiren kren köprüsünden teşkil edilmektedir. Böylelikle kaldırılacak yük üç farklı eksende hareket ettirilmiş olmaktadır. Şekil 2.1’de içerisinde kren bulunduran tipik bir yapı kesiti görülmektedir.



Şekil 2.1 İçerisinde kren bulunan tipik bina kesiti.

2.1 KREN KİRİŞLERİNİN GENEL YAPISI

Çoğu kren kirişi yapma kiriş olup çelik plaklardan oluşan alt başlık ve üst başlığın yine bir çelik plak olan gövdeye kaynaklanması ile teşkil edilir ve genellikle 'I' kesite sahiptir. Kren kirişlerinde kirişin rijitliğini artırarak yerel buruşmaları önlemek, yorulmaya karşı kirişin direncini artırmak amacıyla berkitmeler ve başlık levhaları da kullanılmaktadır (Şekil 2.2). Yapma çelik kirişlerin yapısal davranışı incelenirken, alt plak, üst plak ve gövde plağının davranışı, plak davranış esaslarına göre değerlendirilir. Kren kiriş davranışını daha iyi anlayabilmek için kren kirişini teşkil eden elemanları daha yakından incelemekte fayda vardır.



Şekil 2.2 Kren kirişi genel yapısı.

2.1.1 Tekil Yük Berkitmeleri

Tekil yükler altında ya da mesnet reaksiyonları üzerinde yer alırlar. Başlıca üç görevi yerine getirmek için kullanılırlar.

- Reaksiyon veya tekil yüklerin yerel etkisini gövdeye kesme etkisi olarak aktarmak,
- Yerel buruşmayı önlemek,
- Gövde burkulmasını kontrol etmek,

2.1.2 Ara Berkitmeler

Klasik yaklaşımda gövdede kayma ve basınç gerilmelerinden oluşabilecek burkulmaları önlemek, taşıma gücü yönteminde ise yük taşıyıcı eleman olarak kullanılırlar. Tekil yük berkitmelerinin aksine ara berkitmeler, yalnız gövdeyi takviye edip gövdedeki basınç yükünü aldıkları için başlıkların ucuna kadar uzatılmalarına gerek yoktur. Ara berkitmeler yalnız basınç başlığına bağlanır, çekme başlığına kadar uzatılmaz. Çekme başlığı ile berkitme arasında bir aralık bırakmakla, özellikle tekrarlanan yüklere maruz kirişin yorulma dayanımı artırılmış olur (Keyder 1990).

2.1.3 Yatay Berkitmeler

Derin gövdeli kirişlerde gövde stabilitesini artırmak ve estetik görünüm için kullanılırlar. Eğilmeye ve eğilmeli kaymaya zorlanan gövdede kullanıldığında burkulma dayanımını artırırlar (Keyder 1990).

2.1.4 Başlıklar ve Başlık Plakaları

Başlıklar ve başlık plakaları yatay yükleri aktarmak için üst plakaya yeterli kapasite sağlamak ve yeterli yatay burulma kararlılığı sağlamak için sıklıkla kullanılırlar.

2.1.5 Kren Rayı

Kren köprüsünün üzerinde hareket ettiği kren rayı, kren kiriş üst başlığına rijit veya boylamasına serbest hareket edebilir şekilde montaj edilir. Eğer ray, kren kiriş başlığının üzerine rijit bir şekilde kaynaklanma veya sıkılanmış cıvatalar ile sabitlenmiş ise kren kirişinin bir parçası olarak kabul edilebilir ve kirişin dayanımı tespit edilirken göz önünde bulundurulabilir.

2.1.6 Mesnet Durumları

Kren kirişlerinin mesnet edilme durumları basit kiriş şeklindedir. Basit kiriş seçilmesindeki temel neden hasara uğraması durumunda kirişin rahat tamir edilebilmesi ve değiştirilebilmesidir.

2.2 KREN KİRİŞLERİNE ETKİ EDEN YÜKLER

Kren yükleri yapı tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Tasarımın eksiksiz bir şekilde yapılabilmesi için bu yüklerin karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Eurocode EN 1991-3 kren yükleri ve makinelerin ürettiği kuvvetler ile ilgili kriterleri belirtmiştir. Krenlerin kendilerine has işlevleri ve özellikleri nedeni ile oluşturdukları yükler değerlendirirken aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulmalıdır;

- i. Krenin hareketi halinde, kaldırma mekanizmasının bir nesneye çarpması ya da fren yapması halinde oluşan çarpma kuvveti etkisi,
- ii. Birden fazla krenin, kiriş eksenı üzerinde hareket etmesi durumunda bu durumun gerçekçi bir olasılık içerisinde yansıtan yük kombinasyonu,
- iii. Hareketli vincin fren yapması, kaldırılan yüke tamamen dik kuvvet uygulanamaması, raydaki eksen kaçıklıkları nedeni ile kren kirişlerinde oluşan yatay yük etkisi,
- iv. Vinç durdurucusuna tam hızla çarpma durumundaki kuvveti etkisi,
- v. Vinç hareketi ve fren esnasında oluşabilecek boyuna kuvvetlerin etkisi,

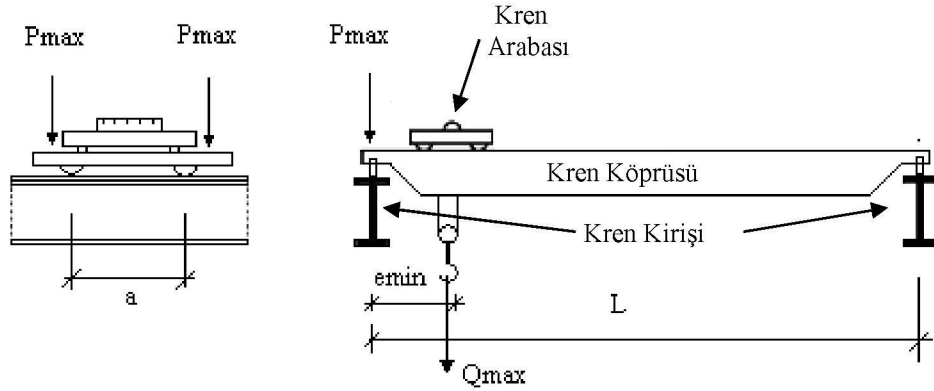
Kren yük etkileri, tasarıma aktarılırken bu yüklerin çoğunun dinamik etki olması ve olası aşırı yüklemelerin de olabileceği varsayılarak belirli katsayılar ile çarpılmaktadır. Bu katsayılar, standartlar ve tasarım kitaplarından temin edilmektedir.

2.2.1 Düşey Yükler

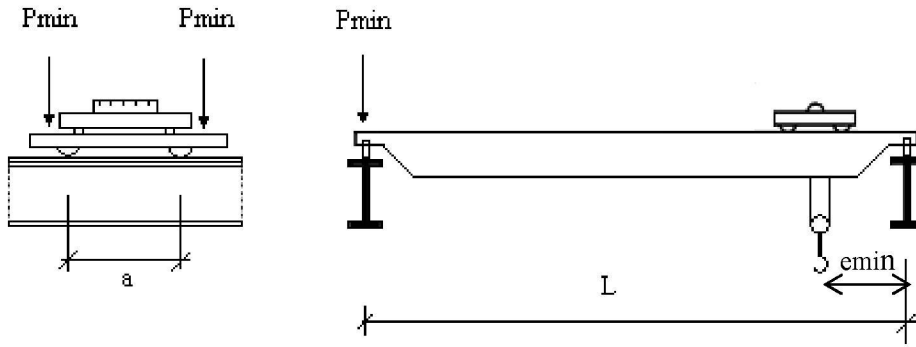
Hareketli kren köprüsünün tekerlerinden kiriş üzerine aktarılan yüküdür. Kren köprüsünün ağırlığı dâhil edilir. Her bir tekerden ne kadar yük aktarıldığı vinç katalog bilgileri arasında ya da standartlardan temin edilir. Düşey kren yükleri teker yükleri olarak da tanımlanır. Vinç arabası kren kirişine bitişik olduğunda ve kren yükleme kapasitesi tam dolu iken kaldırma yaptığında teker yükü maksimum olmaktadır (Şekil 2.3). Kren yüksüzken ve kren kirişine en uzak olduğu konumda minimum kuvvet oluşmaktadır (Şekil 2.4).

Düşey teker yükleri tipik olarak bir çarpma faktörü ile büyütülürler. Çarpma faktörü, yükün kaldırılırken ivmelenmesi ve tekerin ray üzerindeki bozukluklara bağlı zıplamalar neticesinde oluşan çarpmalar nedeni ile hesaba dâhil edilir. Cıvatalı ray birleşimleri kaynaklı birleşimlerden daha fazla darbe etkisi yaparlar. Birçok standartta, kabinden kumanda edilen

ve uzaktan kumanda edilen krenler için düşey yükler %25 oranında artırılır (Maccrimmon 2005).



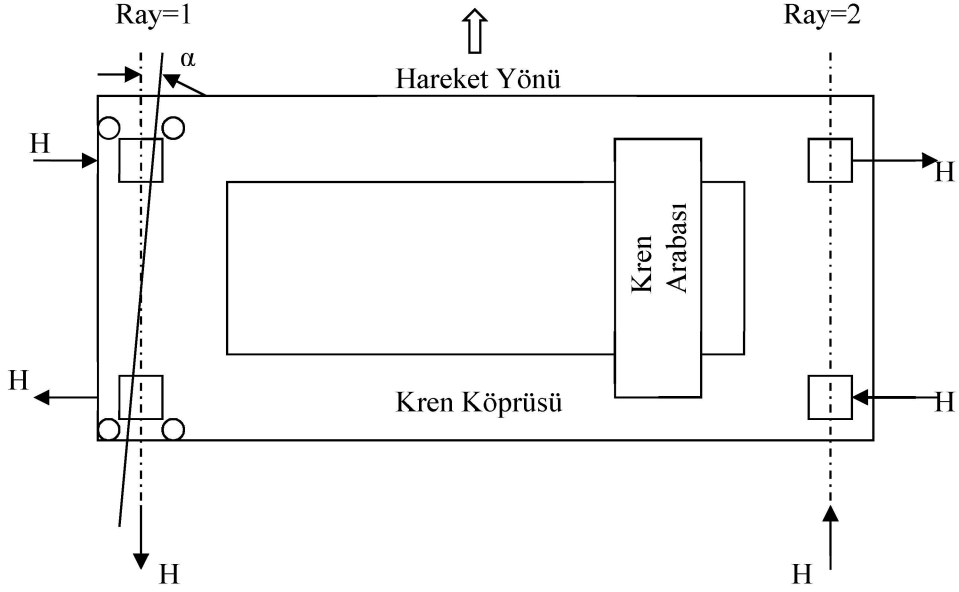
Şekil 2.3 Maksimum yükleri elde etmek için yükleme durumu (Eurocode 1-3 2002).



Şekil 2.4 Minimum yükleri elde etmek için yükleme durumu (Eurocode 1-3 2002).

2.2.2 Yanal Yükler

Kren yanal yük etkisi, kren tekerlerinden raya kısa süreli olarak etkiyen yatay yüküdür. Yanal etki, krenin ivmelenmesi veya fren yapmasından, kren arabasının durdurucuya çarpmasından, dikey olmayan kaldırma işleminden, yükün salınmasından veya raydaki eksenel kaçıklıklardan meydana gelebilir (Şekil 2.5). Yatay kren yükleri kren kirişlerine dik yönlü konumlandırılır ve rayların üstüne uygulanır. AISC-LRFD standartları ve çoğu yapı kodu yatay yükleri vinç arabası ve kaldırılan toplam yükün %20'si olarak kabul etmektedir.



Şekil 2.5 Eksen sapması nedeni ile oluşan yatay yük durumları (Eurocode 1-3 2002).

2.2.3 Boyuna Yükler

Boyuna kren yükleri, kren köprüsünün ivmelenmesi, yavaşlaması veya tampona çarpması ile oluşmaktadır. Çekiş kuvvetleri çelik teker ile ray arasındaki sürtünme kuvveti ile sınırlandırılır. Hidrolik veya yay tipi tampona çarpma ile oluşan kuvvet, kren çarpma hızı ve tamponun davranışının fonksiyonudur. Boylamasına kuvvetler vinç üreticisinden temin edilebilmektedir.

2.2.4 Titreşimler

Nadir olarak görülen bir problem olsa da, rezonans durumu söz konusu olabilir. Kren köprüsünün tekerleğindeki kusurlar istenmeyen frekansta kuvvetlerin oluşmasına neden olabilir. Oluşacak kuvvetler için olası büyütme, (2.1) eşitliği ile hesap edilir (Eurocode 1-3 2002).

$$f_b = 1 / (1 - (T_f / T_d)^2) \quad (2.1)$$

f_b : Büyütme faktörü

T_f : Kuvvet periyodu

T_d : Doğal periyod

2.3 KREN YÜKLERİNİN KİRİŞ ÜZERİNDE OLUŞTURDUĞU GERİLMELER

Kren kirişlerinin tasarımında, kren yüklerinin oluşturduğu aşağıda belirtilen iç kuvvetler ve momentlerin dikkate alınması gerekir.

- i. Düşey ve yatay etkilere bağlı olarak iki eksenli eğilme,
- ii. Boyuna yatay etkilere bağlı eksenel basınç ve çekme,
- iii. Kiriş kesitinin kesme merkezine göre enine yatay etkilere bağlı burulma,
- iv. Düşey etkilere ve yatay yanal etkilere bağlı düşey ve yatay kesme kuvvetleri,
- v. Teker yüklerine bağlı yerel etkiler,

2.3.1 Kiriş Gövdesinde Oluşan Düşey Basınç Gerilmeleri

Üst başlığa uygulanan teker yüklerine bağlı olarak kiriş gövdesinde oluşan yerel düşey basınç gerilmesi $\sigma_{oz, Ed}$, (2.2) eşitliği ile tespit edilmektedir (Eurocode 3 2007).

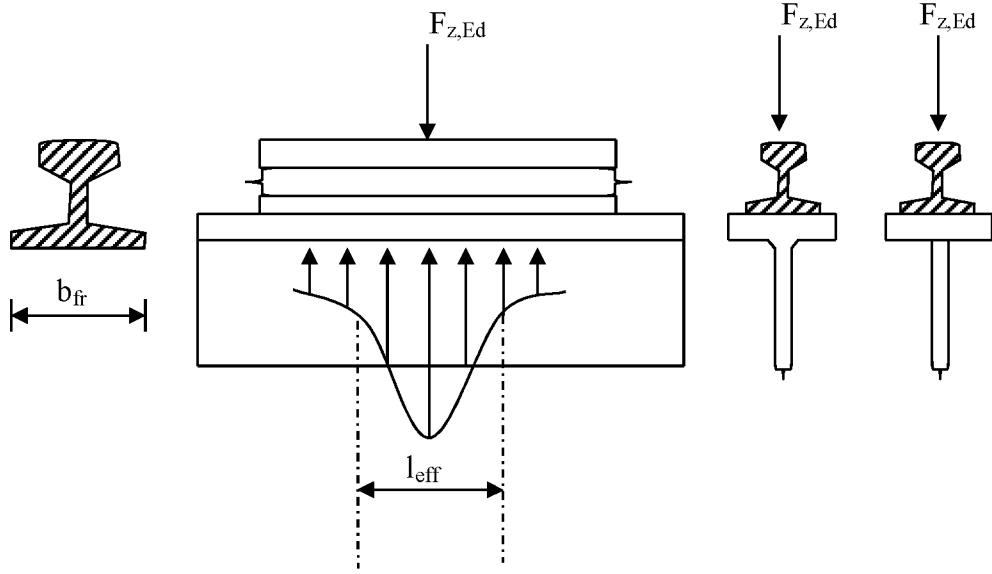
$$\sigma_{oz, Ed} = \frac{F_{z, Ed}}{l_{eff} \times t_w} \quad (2.2)$$

l_{eff} : TS EN 1993 -6 Tablo 5.1' den temin edilir.

t_w : Gövde kalınlığı

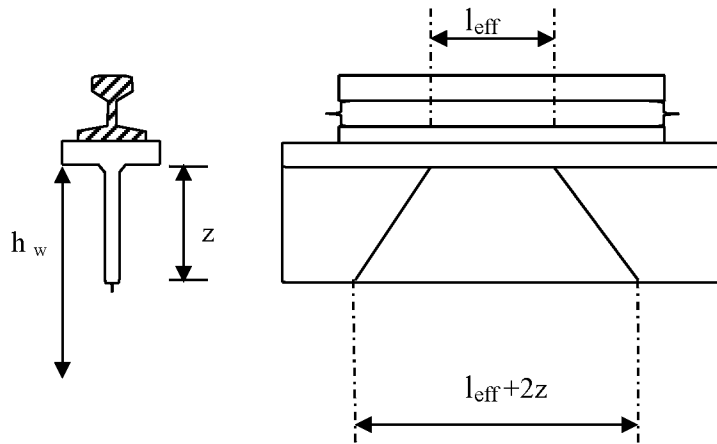
$F_{z, Ed}$: Düşey yük

Tekil teker yüküne bağlı olarak, yerel düşey gerilmenin etkili yükleme yapılan uzunluk l_{eff} üzerinde eşit bir şekilde dağıldığı kabul edilir (Şekil 2.6). Eğer tekil yükleri oluşturan komşu teker merkezleri arası mesafe x_w , yükleme yapılan uzunluk l_{eff} 'den kısa ise iki tekerden oluşan gerilmeler birleştirilmelidir (Eurocode 3 2007).



Şekil 2.6 Teker yükünün oluşturduğu düşey basınç.

Yerel düşey gerilmesi $\sigma_{oz,Ed}$ her teker yükünün etkili yüklenen uzunlukta l_{eff} 45° 'lik açı ile üst başlığın altından dağıldığı kabul edilerek gövdenin değişik seviyelerde hesap edilebilir (Şekil 2.7). Eğer toplam dağılma uzunluğu komşu tekerler arası mesafeden fazla ise, iki tekerden gelen yükler birleştirilir. Mesnetlerden uzakta, yerel düşey gerilme $\sigma_{oz,Ed}$ azaltma faktörü $(1 - (z/h_w)^2)$ ile çarpılarak bulunur. Burada h_w gövde derinliği ve z üst plakanın altına olan mesafedir.



Şekil 2.7 Basınç gerilmesinin dağılımı (Eurocode 1-3 2002).

2.3.2 Yerel Kesme Gerilmeleri

Yerel kesme gerilmesinin maksimum değeri $\tau_{oxz,Ed}$, söz konusu gövde seviyesindeki maksimum yerel düşey gerilme $\sigma_{oz,Ed}$ 'nin %20'sine eşit olduğu kabul edilebilir.

2.3.3 Teker Yüklerine Bağlı Oluşan Eğilme Gerilmeleri

Yatay kaçıklık e_y 'ye bağlı her bir teker yükü $F_{z,Ed}$ 'nin burulma momenti T_{Ed} , (2.3) eşitliği ile bulunmaktadır (Şekil 2.8). Enine rijitleştirilmiş gövdedeki, burulma momentine bağlı oluşan eğilme gerilmesi $\sigma_{T,Ed}$, (2.4) ve (2.5) eşitlikleri ile belirlenebilir (Eurocode 3 2007).

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} \times e_y \quad (2.3)$$

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6T_{Ed}}{a \times t_w^2} n \times \tanh(n) \quad (2.4)$$

$$n = \left[\frac{0.75 \times a_b t_w^3}{I_t} \times \frac{\left[\sinh\left(\pi \times \frac{h_w}{a_b}\right) \right]^2}{\sinh\left(\pi \times \frac{h_w}{a_b}\right) - 2\pi \times \frac{h_w}{a_b}} \right]^{0.5} \quad (2.5)$$

Burada;

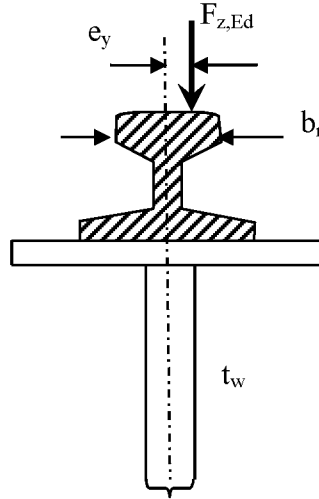
a_b : Enine berkitmelerin aralığı

h_w : Alt ve üst başlık arası derinlik

I_t : Başlık plağının burulma sabiti (ray rijit olarak başlığa bağlı ise, dahil edilir)

e_y : Teker yükünün kaçıklığı

t_w : Gövde kalınlığı



Şekil 2.8 Eksen kaçıklığına bağlı teker yükü etkisi.

2.4 KREN KİRİŞİNİN DIŞ YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI

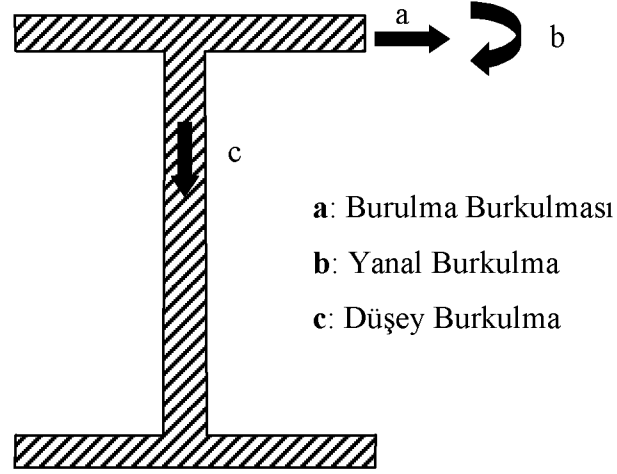
Dolu gövdeli kirişlerin tasarımları yapılırken başlık ve gövde plağının davranışı ayrı ayrı ele alınmaktadır. Başlık plağının moment dayanımı, gövde plağının ise eğilme, kayma ve eğilmeli kayma dayanımları dikkate alınmaktadır. Başlık plağının eğilme dayanımı yanal, yerel ve düşey burkulma ile sınırlıdır. Bu tip burkulmaların kontrolü halinde başlık gerilmeleri akma sınırına ulaşabilir, ancak taşıma gücüne yakın yüklemelerde kesit gerilme dağılımı doğrusal olmaktan çıkar. Başlık plağına kıyasla daha narin olan gövde daha az yük taşır, buna karşılık başlıkta bir gerilme artışı olur (Keyder 1990).

2.4.1 Başlık Plağının Burkulması

Eğilmeye zorlanan bir dolu gövdeli kirişte yükün giderek artırılması durumunda basınç başlığında, burulma burkulması, yanal burkulma, düşey yönde burkulma oluşabilir (Şekil 2.9).

2.4.1.1 Burulma Burkulması

Burulma burkulması yerel bir burkulmadır. Başlık plağının “ b/t ” oranına ve mesnetlendirilmesine bağlı olarak önlenabilir. “ b/t ” oranı öyle seçilmelidir ki, burkulma gerilmesi akma gerilmesine eşit ve hatta ondan büyük olsun. Burulma burkulmasının önlenmesi için (2.6) ve (2.7) eşitliklerinde belirtilen koşullar sağlanmalıdır.



Şekil 2.9 Basınç başlığı burkulması.

Ortadan mesnetlenmiş plaklarda;

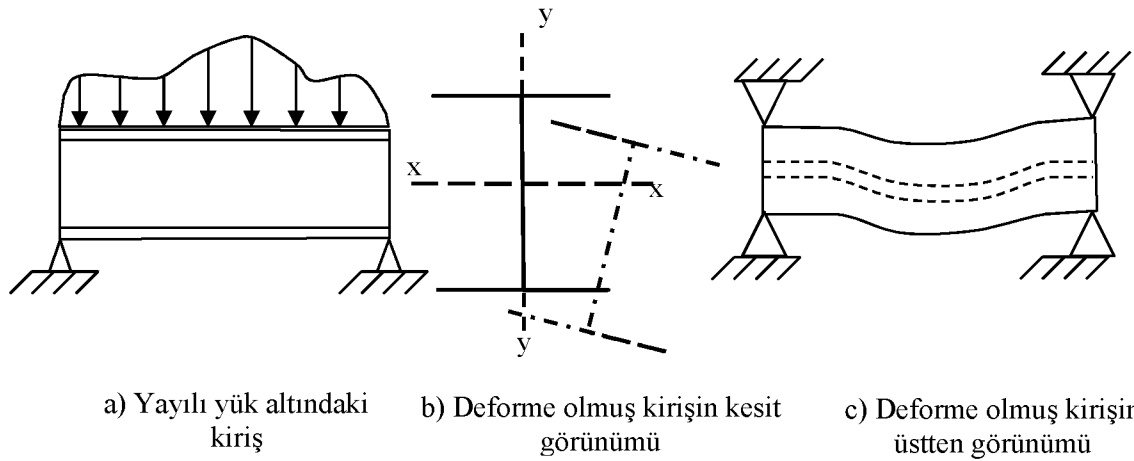
$$\frac{b}{t_b} \leq \frac{25.5}{\sqrt{\sigma_a}} \quad (2.6)$$

İki ucu mesnetlenmiş plaklarda;

$$\frac{b}{t_b} \leq \frac{64}{\sqrt{\sigma_a}} \quad (2.7)$$

2.4.1.2 Yanal Burkulma

Bir 'I' profili veya 'I' şeklinde dolu gövdeli kiriş kuvvetli yönünde yüklendiğinde üst yarısı basınca maruz kalacaktır. Yükün gittikçe arttığı ve yeterli yanıl desteğin bulunmaması halinde basınç gerilmeleri kritik bir değere ulaşacak ve basınç bölgesi bir kolon gibi burkulacaktır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Yanal burkulma.

Burkulma yönü, kirişteki çekme bölgesinin engellenmesi sonucu y-y eksenini etrafında olacaktır (Şekil 2-10.b). Yanal burkulma, yanal deplasman ile burulmayı da içerdiğinden “Yanal Burulma Burkulması” olarak da bilinmektedir. Yanal burkulma davranışı derin ve açık kesitlerde, basık kesitlere kıyasla farklıdır. Eksenel simetrisi olan ve gövde yönünde yüklenen kirişlerde ve büyük asal eksenine göre yüklenen ‘U’ kirişlerde daha kesin hesap yöntemleriyle belirlenmediği müddetçe (2.8) ve (2.9) eşitlikleri ile elde edilen gerilmelerden büyüğü emniyet gerilmesi olarak alınır. Yalnız bu değer $0.60\sigma_a$ değerini aşamaz.

$$\text{Eğer } \frac{s}{i_y} \leq \sqrt{\frac{3 \times 10^6 C_b}{\sigma_a}} \text{ i } \sigma_B = \left[\frac{2}{3} - \frac{\sigma_a \left(\frac{s}{i_y} \right)^2}{9 \times 10^7 \times C_b} \right] \sigma_a < 0.6 \sigma_a \quad (2.8)$$

$$\text{Eğer } \frac{s}{i_y} \geq \sqrt{\frac{3 \times 10^6 C_b}{\sigma_a}} \text{ i } \sigma_B = \frac{10^7 \times C_b}{\left(\frac{s}{i_y} \right)^2} \quad (2.9)$$

Eğer basınç başlığı dolu ve yaklaşık olarak dikdörtgen enkesite sahip ve enkesitin çekme başlığı enkesitinden daha küçük değilse (2.10) eşitliği kullanılır.

$$\sigma_B = \frac{840.000 \times C_b}{\frac{S \times d}{F_b}} \quad (2.10)$$

Bu formüllerde;

- s : Kirişin basınç başlığında dönmeye ve yanal deplasmana karşı mesnetleri arasındaki mesafe (cm)
- i_y : Basınç başlığı ve gövdenin basınç bölgesinin 1/3'ünün gövde eksenine göre atalet yarıçapı (cm)
- F_b : Basınç başlığının enkesit alanı (cm²)
- d : Başlıklar arası dıştan dışa mesafe (cm)
- σ_B : Yanal burkulma göz önüne alındığında basınç emniyet gerilmesi (kgf/cm²)
- σ_a : Basınç başlığının akma gerilmesi (kgf/cm²)
- C_b : Bir katsayıdır, (2.11) eşitliği ile hesaplanır.

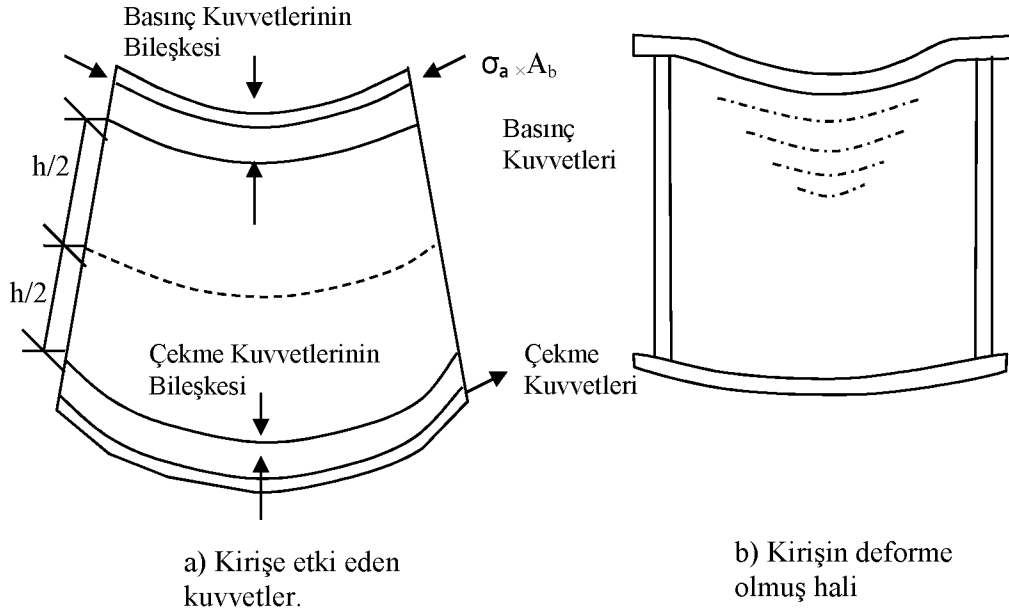
$$C_b = 1.75 + 1.05 \times \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \times \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2.3 \quad (2.11)$$

2.4.1.3 Düşey Burkulma

Dolu gövdeli kirişlerde eğilmeden ötürü basınç başlığında oluşan basınç kuvvetleri ve çekme başlığında oluşan çekme kuvvetlerinin düşey bileşkeleri gövdeyi etkiler. Gövde aşırı narin ise bu kuvvete direnemez ve burkulma meydana gelir. Başlık plağı düşey yönde gövdeye doğru Şekil 2.11'deki gibi burulur. Düşey burkulma diye adlandırılan bu durum ancak eğilme ve sehimin ileri safhasında olur. Gövdenin burularak eğilmemesi için gövde narinliği (2.12) eşitliği ile belirtilen koşulu sağlamalıdır.

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{975}{\sqrt{\sigma_a(\sigma_a + 1.2)}} \quad (2.12)$$

Bu formülden “ h/t_w ” oranı St37 için 340, St52 için 241 olarak sınırlandırılmıştır. Ancak bu formül berkitmesiz kirişler için olup, berkitme kullanılması halinde (2.13) eşitliği sağlanmalıdır.



Şekil 2.11 Basınç başlığının düşey burkulması.

$$\frac{a_b}{h} \leq 1 \text{ ise; } \frac{h}{t_w} \leq \frac{660}{\sqrt{\sigma_a}} \text{ veya } \frac{a_b}{h} \leq 1.5 \text{ ise; } \frac{h}{t_w} \leq \frac{530}{\sqrt{\sigma_a}} \quad (2.13)$$

Burada a_b berkitmeler arası uzaklıktır.

2.4.2 Gövde Plağının Burkulması

Gövde plağının kesme kuvvetlerini taşımaktan öteye az bir rolü olduğundan olabildiğince ince seçilmesi kesiti hafifletecektir. Narin seçilen gövdede moment, kayma ve ikisinin etkileşmesinden oluşabilecek burkulmalar görülmektedir. Ayrıca tekil yükler altında ya da mesnet reaksiyonları üzerinde gövde başlık bağlantısında yerel burulma tehlikesi vardır (Keyder 1990).

2.4.2.1 Moment Burulması

Eğilmeye zorlanan bir dolu gövdeli kirişin gövdesi, narinliğe bağlı olarak kirişin taşıma gücünü etkiler. Düşük " h/t_w " oranında bir gövde kesitin tüm liflerinin akma gerilmesine ulaşmasına izin verecek şekilde burkulmadan durabilir. Bu durumda kesit plastik moment kapasitesine ulaşır çelik fabrikalarının ürettiği geniş başlıklı I ve IP profillerinin çoğu plastik moment kapasitesine ulaşabilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Bunlar arasında en narin

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{205}{\sqrt{\sigma_{em}}} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{bem}' = \sigma_B \left[1 - 0.0005 \frac{A_g}{A_b} \left(\frac{h}{t} - \frac{200}{\sqrt{\sigma_B}} \right) \right] \quad (2.15)$$

19

eder. Burkulma ötesi dayanımın başka kaynağı burkulma alanında oluşan eğik çekme gerilmeleridir. Gövdedeki en büyük ortalama kayma gerilmesi (2.16) veya (2.17) eşitlikleri ile verilen değeri aşmamalıdır.

$$\tau_{em} = \frac{\sigma_a C_v}{2.89} \leq 0.4 \times \sigma_a ; \text{Eğer } C_v > 1.0 \text{ i se} \quad (2.16)$$

$$\tau_{em} = \frac{\sigma_a}{2.89} \left(C_v + \frac{1 - C_v}{1.15 \sqrt{1 + (a_b/h)^2}} \right) \leq 0.4 \times \sigma_a ; \text{Eğer } C_v \leq 1.0 \text{ i se} \quad (2.17)$$

Burada C_v ve k kayma gerilmesi hesabında kullanılan katsayılarıdır ve (2.18), (2.19), (2.20) ve (2.21) eşitlikleri ile hesaplanır.

$$C_v = \frac{3160 \times k}{\sigma_a \left(\frac{h}{t} \right)^2} ; \text{Eğer } C_v \leq 0.8 \text{ i se} \quad (2.18)$$

$$C_v = \frac{50}{\left(\frac{h}{t} \right)} \sqrt{\sigma_a} ; \text{Eğer } C_v \geq 0.8 \text{ i se} \quad (2.19)$$

$$k = 4 + \frac{5.34}{(a_b/h)^2} ; \text{Eğer } \frac{a_b}{h} \leq 1.0 \text{ i se} \quad (2.20)$$

$$k = 5.34 + \frac{4.0}{(a_b/h)^2} ; \text{Eğer } \frac{a_b}{h} \geq 1.0 \text{ i se} \quad (2.21)$$

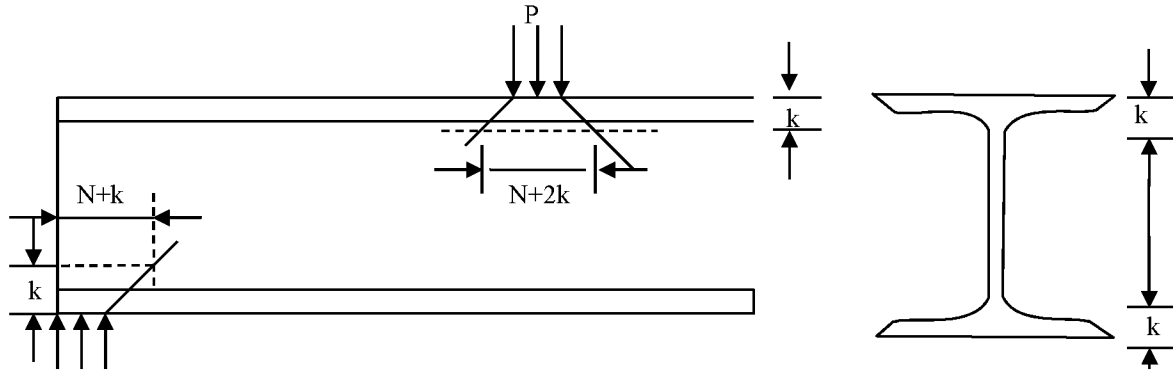
2.4.2.3 Eğilmeli Kayma

Dolu gövdeli kirişlerde kayma etkisi daima eğilme ile birlikte görülür. AISC'nin eğilmeli kayma durumlarında basınç emniyet gerilmesi için yarı ampirik olarak geliştirilen (2.22) eşitliği önerilmiştir.

$$\sigma_B = \left(0.825 - 0.375 \frac{\tau}{\tau_{em}} \right) \sigma_a \quad (2.22)$$

2.4.3 Gövde Başlık Bağlantısında Yerel Buruşma

Çelik profil ve dolu gövdeli kirişlerde tahkiki gerekli bir diğer konu da tekil yük altında yada mesnet üzerindeki gövdenin yerel buruşma tehlikesidir. Tekil yük ya da mesnet reaksiyonunun 45 derecelik bir açıyla yayıldığı kabul edilir (Şekil 2.13). Bu kesitteki gerilme, mesnette eşitlik (2.23), tekil yük altında ise eşitlik (2.24) ile bulunur.



Şekil 2.13 Yerel burulma.

AISC şartnamesi gereği akma gerilmesinin %75 aşmaması öngörülür;

$$\frac{R}{(N+k)t} \leq 0.75 \times \sigma_a \quad (2.23)$$

$$\frac{P}{(N+2k)t} \leq 0.75 \times \sigma_a \quad (2.24)$$

2.5 ÇELİK KREN KİRİŞLERİNİN BOYUTLANDIRILMASI

Kren kirişlerinin boyutlandırılması dolu gövdeli yapma kirişlerinin boyutlandırılmasına esasına göre yapılmaktadır. Dolu gövdeli kirişlerin boyutlandırılması işlevine ve yüklemesine bağlı olarak; sehim, moment ve kesme kuvveti kriterlerine göre yapılmaktadır. Karayolu ve demiryolu köprüleri ile kren kirişlerinde genel kiriş derinliğini sehim sınırı tayin ederken, kısa köprü kirişleri ile bina kirişlerinde ise maksimum moment değerine bağlı olarak optimum bir boyutlandırma yapmak mümkündür. Kısa açıklıklı fakat ağır yüklü kirişlerde ise boyutlandırmayı kesme kuvveti belirlemektedir (Keyder 1990).

2.5.1 Genel Esaslar

Boyutlandırma kiriş yüksekliğinin belirlenmesi ile başlar. Dolu gövdeli kirişlerde yükseklik genel olarak serbest açıklığın 1/10 - 1/25'i arasında değişir. Kiriş yüksekliğinden sonra “h/t_w” oranı belirlenir. “h/t_w” oranı gövdede berkitmelerin kullanılıp kullanılmayacağını belirleyecektir. Daha sonra sırasıyla başlık alanı, başlık levhalarının boyutları ek başlık levhaları boyutlandırılır. Gerilme, burkulma ve sehim tahkikleri ile boyutlandırma tamamlanır (Keyder 1990).

2.5.1.1 Sehime Bağlı Boyutlandırma

Köprü ve kren kirişlerinde, bina kirişlerine kıyasla daha az sehim olmasına müsaade edilir. Bina kirişlerinde kiriş açıklığını 1/300'üne kadar sehim olmasına müsaade edilirken, kren kirişlerinde ise açıklığın 1/800'üne kadar sehim olmasına müsaade edilir. Özellikle uzun açıklıklı kirişlerde yüksekliği, serbest açıklığın 1/10'una yakın seçmek avantajlı olacaktır.

2.5.1.2 Momente Dayalı Boyutlandırma

Sehim sınırlandırmasının çok katı olmadığı durumlarda maksimum moment değerine bağlı olarak hafif bir kesit seçimi yapmak mümkündür. Optimum boyutlamadaki işlemler aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- i. Gerekli mukavemet momenti W_x hesaplanır.

$$W_x = \frac{M}{\sigma_B}$$

- ii. Gerekli gövde alanı A_g hesaplanır.

$$A_g = \frac{V}{\tau_{em}}$$

- iii. K=h/t oranı seçilir. K oranının seçimi ara berkitmelerin gerekli olup olmadığını belirleyecektir

- iv. Kiriş yüksekliği h bulunur.

$$h = \left(\frac{3}{2} K \times W_x \right)^{\frac{1}{3}}$$

- v. Gövde kalınlığı t hesaplanır.

$$t = \frac{h}{K}$$

- vi. Yeni $K = h/t_w$ ve $A_g = h \times t$ bulunur.
 - vii. Başlık alanı A_b ve başlık levhasının boyutları seçilir.
- $$A_b = \frac{h^2}{2K}$$
- viii. Mukavemet momenti W_x hesaplanır gerilme ve diğer tahkikler yapılır.
 - ix. Seçilen kesit, gerekirse, tahkiklere uyum sağlayacak şekilde değiştirilir.
 - x. Tekil yük ve ara berkitmeler seçilir.

2.5.1.3 Kesme Kuvvetine Göre Boyutlandırma

Kesme kuvvetlerinin büyük olduğu durumlarda $K = h/t$ ve $A_g = h \times t$ alanı gerekli kesme alanını sağlamaz ise $t \geq (A_g/K)^{1/2}$ den daha büyük bir 't' değeri seçilir. Bu durumda "h/t" oranı ise eski K değerinden daha düşük çıkar. Hesaplamanın diğer basamakları bölüm 3.4.1.2'de belirtilen sırada devam eder. Son olarak gerekli tahkikler yapılır.

2.5.2 Rijitlik Elemanlarının Boyutlandırılması

Tekil yük berkitmeleri AISC yaklaşımında eksenel yüke maruz bir kolon olarak boyutlandırılır. Berkitmenin oluşturduğu kolon alanı olarak berkitme alanına ilave gövde alanının bir parçası dâhil edilir. Kolon olarak düşünülen tekil yük berkitmesi üst ve alt başlığa bağlanır. Kolon yüksekliği en fazla "3/4h" olarak alınır. Bunun nedeni başlık levhalarının daha kalın olup, kolon sınır şartlarının ankastre mesnete yakın olduğu kabulüdür.

Tekil yük berkitmesi hesabı, eksenel yük etkisinde sınır şartları ve yüksekliği belli bir kolon hesabı, ezilme ve yerel burkulma tahkiki içermektedir. Bina türü yapılarda "h/t_w" oranı 260'dan, köprü ve kren kirişleri "h/t_w" oranı 150'den az ise ve meydana gelen en büyük kayma gerilmesi (2.16) eşitliğinde verilen emniyetli kayma gerilmesini τ_{em} aşmıyorsa ara düşey berkitmelere gerek yoktur.

AASHTO standartlarında berkitmeleri görevi yük taşımak yerine burkulmayı önlemektir. Ara berkitmelerin yanı sıra yüksek "h/t_w" oranlı kirişlerde yatay berkitme kullanımı da öngörülmektedir. Ara berkitmeler standart çeliklerde (St 37) $90 < h/t < 340$ arasında, yatay berkitmeler ise "h/t_w" oranının 165'i aştığı durumlarda kullanılmaktadır (Keyder 1990).

2.5.2.1 Düşey Berkitme Aralığı

Berkitme aralıkları için yapısal açıdan ve montaj kolaylığı yönünden ampirik olarak (2.25) ve (2.26) eşitliklerinin sağlanması gerekir. “ $a_b/h > 3$ ” olduğunda berkitme etkinliğini kaybeder.

$$\frac{a_b}{h} \leq \left(\frac{260}{h/t} \right)^2 \leq 3.0 \quad (2.25)$$

Uç panellerdeki berkitme aralığı ‘ a_b ’ ve gövde yüksekliği ‘ h ’ den küçük olanı (2.26) eşitliğini sağlamalıdır.

$$a_b, h \leq \frac{92 \times t}{\sqrt{\tau}} \quad (2.26)$$

Kren kirişlerinde maksimum aralık uç berkitmelerde $h/2$ ’yi, ara berkitmelerde $1.5h$ ’i geçmemelidir.

2.5.2.2 Berkitme Alanı ve Rijitliği

Bir çift simetrik ara berkitmenin veya tek berkitmenin gövdenin ortasından geçen eksene göre enkesitinin atalet momenti $(h/50)^4$ ’den az olmamalıdır. Ara berkitmelerin alanı cm^2 cinsinden (eğer çift olarak yerleştirildiyse toplam alan) (2.27) eşitliğinde verilen değere eşit veya büyük olmalıdır.

$$A_{st} = \frac{1 - C_v}{2} \left(\frac{a_b}{h} - \frac{(a_b/h)^2}{\sqrt{1 + (a_b/h)^2}} \right) \times Y \times D \times h \times t \quad (2.27)$$

Bu eşitlikte ;

Y : Gövde çeliğinin akma sınırının berkitme çeliğinin akma sınırına oranı

D : Berkitme şekil katsayısı

Çift sağlanmış berkitme ise, $D = 1.0$

Tek taraflı köşebent berkitme ise, $D = 1.8$

Tek taraflı levha berkitme ise, $D = 2.4$

A_{st} : Berkitmenin alanı

Meydana gelen maksimum kayma gerilmeleri, emniyet gerilmesinden ne kadar az ise berkitmelerin alanı da aynı oranda azaltılabilir. Ara berkitmeler gövdeye en az her cm'de (2.28) eşitliğinde hesaplanan kuvveti aktaracak şekilde bağlanmalıdır. Bu gerekli transfer kuvveti ara düşey berkitmelerin her iki tarafında meydana gelen maksimum kayma gerilmesi emniyet gerilmesinden az ise, (τ_v/τ_{em}) oranında azaltılabilir. Bu azaltma mesnetlerde veya münferit yük altındaki düşey berkitmelerde yapılmamalıdır.

$$\tau_{vs}=h\sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{140}\right)^2} \quad (2.28)$$

2.5.2.3 Berkitmelerde Konstrüktif Esaslar

Tekil yük berkitmelerin aksine düşey berkitmelerin yalnız gövdeyi takviye edip gövdedeki basınç yükünü aldıkları için başlıkların ucuna kadar uzatılmasına gerek yoktur. Ayrıca düşey berkitmeler yalnız basınç başlığına bağlanır, çekme başlığına kadar uzatılmaz. Yapılan deneyler neticesinde başlığa bağlanmayan berkitmeli kirişlerin yorulma dayanımı, bağlananlarınkine oranla 1.78 kat daha yüksek çıkmıştır (Keyder 1990).

Berkitmeyi gövdeye bağlayan köşe kaynağı, çekme başlığını gövdeye bağlayan kaynaktan en az $4 \times t$ en çok $6 \times t$ aralığında mesafeden kesilmelidir. Berkitme genişliği en az $5+h/30$ cm veya başlık plağının dörtte biri kadar olmalıdır (Keyder 1990).

2.5.2.4 Yatay Berkitmeler

Yatay berkitmeler gövde burkulmasının önlenmesinde en etkin rolü oynar. Bu nedenle AASHTO gibi burkulmayı önlemeye yönelik yaklaşımlı standartlarda kullanımlarına geniş yer verilmiştir. Ayrıca deneyler yatay berkitmelerin kiriş yorulma dayanımını artırdığını göstermiştir.

Yatay berkitmeler gövde plağını rijitleştirerek burkulma yükünü yükseltir. Yapılan deneyler neticesinde $h/5$ yüksekliği moment için en ideal yükseklik olarak bulunmuştur. Kayma gerilmeleri ile zorlanan gövdelerde ise yatay berkitmenin en uygun konumu gövde yüksekliğinin yarısıdır. Eğilmeli kaymada ise berkitme, $h/2$ ile $h/5$ arası bir mesafeye yerleştirilmelidir (Keyder 1990).

Yatay berkitmenin düğüm noktası oluşturabilmesi ancak belli bir rijitliğe sahip olması ile mümkündür. AASHTO standartlarına göre yatay berkitme alanı gövde alanının 1/20'sinden az olmamalı, rijitliği en az (2.29) eşitliği ile hesaplanan değerde olmalıdır.

$$I_s = t^3 h \left[2.4 \left(\frac{a}{h} \right)^2 - 0.13 \right] \quad (2.29)$$

Kalınlık ise (2.30) eşitliğinde verilen değerden düşük olmamalıdır.

$$t_{yb} \geq \frac{b\sqrt{\sigma}}{18.5} \quad (2.30)$$

2.6 BİRLEŞİM ARACI OLARAK KAYNAK

Çelik yapı imalatında en yaygın kullanılan birleşim aracı olan kaynak; aynı veya benzer alaşımlı maddelerin ısı tesiri altında birleştirilmelerine verilen addır. Isıl derecesinin, metallerin ergime noktasına kadar yükseltilmesi veya plastik kıvam oluşturacak derecede oluşturulmasına göre; Ergitme kaynağı ve Basınç kaynağı olarak ikiye ayrılır. Normal çelik yapılarda genellikle ergitme kaynağı kullanılır.

2.6.1 Ergitme Kaynağı

Bu kaynakta ısı, elektrik enerjisi ile veya yanıcı bir gaz alevi ile sağlanır. Çelik yapılarda yük aktaran kaynaklı birleşimlerde genelde elektrikten faydalanılır. Eritme kaynağında birleştirilecek metallerin kaynaklanacak kısımları uç uca veya yan yana getirilerek 3000-5000 °C'de ısıtılarak eritilmesi sonucu kaynaklama işlemi yapılır. Burada elektrot eriyerek parçalar arasındaki boşluk veya köşeleri doldurur. Soğuma sonunda birleşme sağlanmış olur. Ergitme kaynağı, ergitme işleminde kullanılacak olan ısının temin edilmesi şekline göre “Gaz kaynağı” veya “Elektrik kaynağı” olmak üzere iki kısma ayrılır (Kaplan 2004).

Ergitme kaynağında, kullanılacak olan ısı bir yanıcı gaz kullanılarak sağlanıyorsa bu şekilde yapılan kaynağa “Gaz kaynağı” denilir. Gaz olarak asetilen ve oksijen karışımı kullanılır. Yaklaşık olarak 3000 °C'ye kadar ısı elde edilir. Bu işlem genelde çelik yapılarda ufak işlerde, daha ziyade çubuk ve levha kesme işlemlerinde kullanılır.

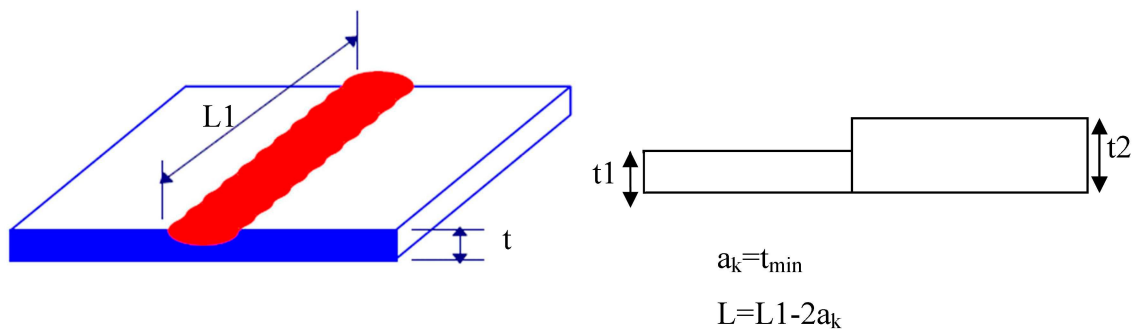
Elektrik kaynağı veya “Elektrik ark” kaynağı olarak adlandırılan kaynak çeşidi, günümüzde çelik yapılarda en fazla kullanılan kaynaklama şeklidir. Kaynak için gerekli olan ısı elektrik akımı ile sağlanır. Bu metot da elektrik arkı, esas malzeme ile elektrod adı verilen kaynak teli arasında meydana gelir. Sıcaklık 5000 °C’ye kadar çıkar. Kaynak için gerekli olan 16-40 voltluk gerilim ve 30-250 amperlik akım şiddeti şehir elektriğinden kaynak makinesi yardımı ile elde edilir.

2.6.2 Kaynak Dikişleri

Çelik yapılarda uygulanan elektrik kaynağı ile oluşturulan iki çeşit kaynak dikiş vardır. Bunlar küt kaynak dikişleri ve köşe kaynak dikişleridir.

2.6.2.1 Küt Kaynak Dikişleri

Aynı düzlemde bulunan iki çelik elemanın kaynaklanacak kenarlarının yan yana getirilip kaynaklanması sonucu oluşan kaynak dikişidir. Bu tür kaynak dikişinin oluşturulabilmesi için kaynaklanacak kenarların muhakkak önceden işlenmesi gerekir ki, bu işleme kaynak ağız açılması denir. Küt kaynak dikişleri açılan bu ağız kısmının şekline göre de ayrı isimlerle adlandırılırlar. Küt kaynak dikişleri yalnızca çekmeye çalışılırlar. Kesme ve eğilme gerilmeleri taşımazlar. Kaynak dikişleri kaynaklanacak levha kalınlıklarına bağlı olarak I, V, X, Y, K, U, şekillerinde yapılabilirler. Burada kullanılacak olan kaynak dikişi kalınlığı minimum levha kalınlığı kadar olmalıdır (Şekil 2.14). Küt kaynak dikişleri için kabul edilebilir gerilme değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.14 Küt kaynak dikişi.

Çizelge 2.1 Küt kaynak dikişleri için emniyet gerilmeleri.

	Gerilme	Çelik Cinsi			
		St 37		St 52	
		EY(H) (kgf/cm ²)	EIY(HZ) (kgf/cm ²)	EY(H) (kgf/cm ²)	EIY(HZ) (kgf/cm ²)
$\sigma_w = \frac{P}{a_k \times l} \leq \sigma_{em,w}$	Çekme	1100	1250	1700	1900
	Basınç	1400	1600	2400	2700
$\tau_w = \frac{P}{a_k \times l} \leq \tau_{em,w}$	Kayma	1100	1250	1700	1900

P :Kesite etkiyen çekme veya basınç kuvveti

a_k :Kaynak kalınlığı

l :Kaynak uzunluğu

2.6.2.2 Köşe Kaynak Dikişleri

İki çelik elemanını biri birine dik veya en az 60 derece açı oluşturan yüzeyleri arasına çekilen kaynak dikişi köşe kaynak dikişi olarak adlandırılır. Yüzeyler arasındaki açının 60 dereceden küçük olması durumunda yapılacak kaynak kordonunun yük aktarmadığı varsayılır. Köşe kaynak dikişi doğrultusu kuvvet doğrultusuna paralel ise yan dikiş, eğer kaynak dikişi doğrultusu kuvvet doğrultusuna dik ise alın dikişi adını alır. Bunlardan özellikle yan kaynak dikişlerinde kuvvet sapması çok olduğundan kaynak uçlarında gerilme artışları olur. Genellikle kayma gerilmesi oluşan bu dikişlerde gerilme yayılımı yine de düzgün yayılı kabul edilerek hesap edilir. Fakat kaynak uzunlukları sınırlı tutulur. Köşe kaynak dikişleri için kabul edilebilir gerilme değerleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Kaynak emniyet gerilmesi.

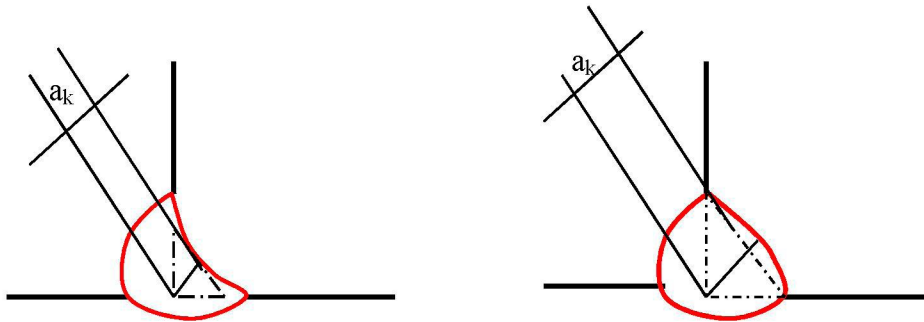
Kaynak Türü	Gerilme Türü	Çelik Cinsi			
		St 37		St 52	
		EY(H) (kgf/cm ²)	EIY(HZ) (kgf/cm ²)	EY(H) (kgf/cm ²)	EIY(HZ) (kgf/cm ²)
Küt Kaynak	Basınç	1400	1600	2400	2700
Köşe Kaynak	Basınç-Çekme	1100	1250	1700	1900
Tüm Kaynaklar	Kayma	1100	1250	1700	1900

2.6.2.3 Kaynak Dikişı Hesabı

Kaynak dikişlerinin hesabı (TS 3357 - Çelik Yapılarda Kaynaklı Birleşimlerin Hesap ve Yapım Kuralları) standardına uygun olarak yapılması gerekmektedir. Hesaplarda bu standartlarda kaynaklar için verilen minimum şartlar sağlanmalıdır. Kaynak hesaplarında problem, teşkil edilmesi düşünülen birleşimde kullanılması gerekli olan kaynak kalınlığının ve kaynak uzunluğunun hesaplanması gerekir. Hesaplanan bu kaynak alanı ile kesitin aktarması istenen kuvvetin emniyetli bir şekilde taşınmasının ve aktarılmasının sağlanması gerekmektedir.

2.6.2.4 Kaynak Dikiş Kalınlığının Tayini

Köşe kaynaklarının 'a_k' dikiş kalınlığı, dikiş içine çizilebilen ikizkenar üçgenin yüksekliği ile ifade edilir (Şekil 2.15). Küt kaynaklı dikişlerin 'a_k' kalınlığı ise birleştirilen parçaların kalınlığı en küçük olan levhanın kalınlığına eşittir.



Şekil 2.15 Kaynak dikiş kalınlıkları.

Hesaplarda küt kaynak dikişleri için kaynak kalınlığı olarak minimum levha kalınlığı $a = t_{\min}$ gibi kesin bir değer alınırken, köşe kaynaklarında ise belirli sınırlar içerisinde kalmak şartı ile isteğe bağlı olarak seçilmektedir. Uyulması gerekli bu sınırlar ise aşağıdaki gibidir.

$$\text{Yüksek yapılar için } 3.0 \text{ mm} \leq a_k \leq 0.7 t_{\min}$$

$$\text{Köprüler için } 3.5 \text{ mm} \leq a_k \leq 0.7 t_{\min}$$

2.7 KREN KİRİŞLERİNİN YORULMAYA BAĞLI HASARI

Kren kiriş hasarlarının büyük bir bölümü birleşimi kaynaklı veya bulonlu olsun kaynak, bulon ve ana metalin yorulma çatlağının neden olduğu problemlerdir. Problemler sadece kren kirişleri ile sınırlandırılmaz. Buna ilave olarak monoray veya diğer tip vinçlerin çapraz ve makasları da sayısız yorulma yüklemesine bağlı olarak hasara uğrarlar. Tüm kren sınıfları için yapının yorulmaya karşı yeterli direncinin olduğundan emin olmak amacıyla tekrarlı yüklere maruz kalan yapı bileşenleri ve detayları incelenmelidir. Yorulmaya karşı kontrolleri yapılmış yapı elemanın yorulma hasarına bağlı kaybı, yapı sisteminin bütünlüğünü olumsuz yönde etkilemektedir.

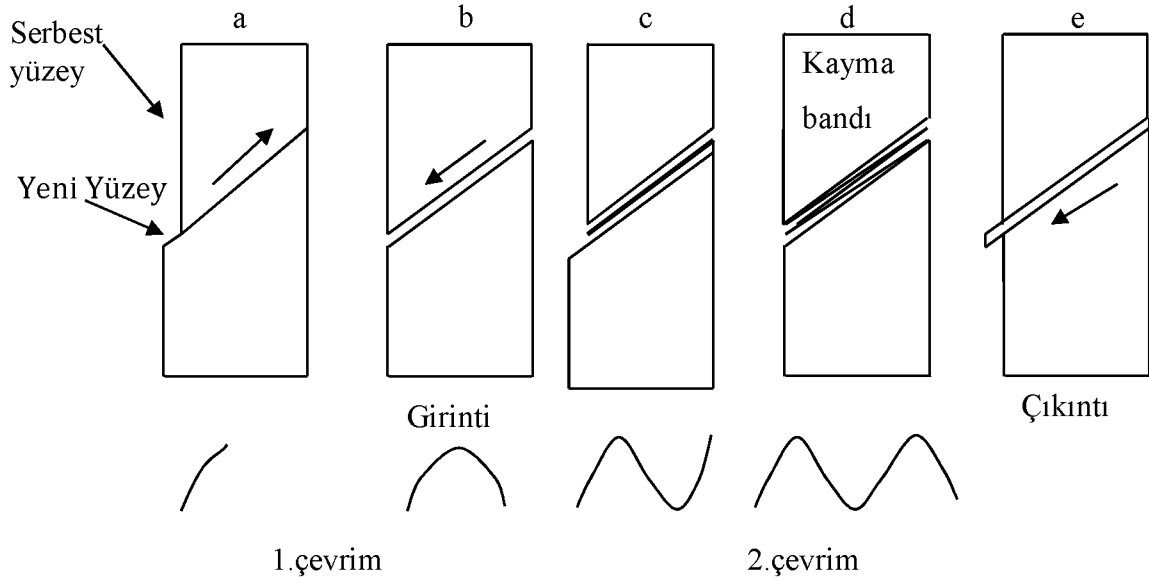
2.7.1 Yorulma

Çevrimsel olarak değişen gerilmeler malzemenin içyapısında bazı yıpranmalara sebep olur. Değişken gerilmelerin etkisi altında malzemenin içyapısındaki değişikliklere yorulma ve elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye de yorulma ömrü adı verilir. Elemanın ömrü genellikle çevrim sayısı ile tarif edilmektedir. Değişken zorlanmada kopma içyapıdaki veya dış yüzeydeki bir süreksizlik noktasından başlar. Eğer yükler belli bir eşik değerini geçerse yüzeyde mikroskobik çatlaklar oluşmaya başlar. Bu noktalar civarında malzeme yorulur ve bir çatlak meydana gelir. Zamanla bu çatlak derinleşir, sonunda malzemenin sağlam kesiti tarafından uygulanan yük taşınamaz ve sağlam bölgedeki gerilme mukavemet sınırını aşarak elemanın birden bire kırılmasına neden olur. Bu şekilde oluşan kırılma yüzeylerinde iki bölge görülmektedir. Kırılma yüzeyinin bir kısmı mat ve düz, diğer kısmı ise parlak ve tanelidir. Birinci bölge önceden meydana gelen ve zamanla büyüyen çatlağı göstermektedir. İkinci bölge ise birden bire kopan bölgedir.

Yorulma oluşumunu anlayabilmek için yorulma ömrünü ve yorulma çatlak büyümesini etkileyen malzeme yüzey kalitesi, artık gerilmeler ve korozyon gibi çeşitli etkilerin incelenmesi gerekir. Yorulma, genellikle çatlak başlangıç periyodu ve çatlak büyüme periyodu olarak iki safhadan oluşmaktadır. Çatlak başlangıç aşamasında mikro çatlakların oluşumu ve büyümesi söz konusudur ancak bu çatlaklar çıplak gözle görülmeyecek kadar küçüktür. Sonraki periyot malzemenin kırılma aşamasına kadar süren çatlak büyümesidir.

deformasyonlar bu olaya dâhildir. Yorulma akma gerilmesinin altındaki gerilme genliklerinde olur. Bu derece küçük gerilme seviyelerinde, malzemenin sınırlı sayıda taneciklerinde plastik deformasyon meydana gelir. Bu mikro plastiklik hali, malzeme yüzeyindeki tanelerde daha kolay olur. Çünkü çevreleyici malzeme sadece bir tarafta bulunur. Malzemenin diğer tarafı çevresel etkilere maruzdur. Sonuç olarak, yüzey tanelerindeki plastik deformasyon, yüzey altındakilere oranla daha az kısıtlandığı için daha düşük gerilme seviyelerinde olmaktadır. Döngüsel kayma döngüsel kesme kuvvetini doğurur. Mikro ölçekte kesme gerilmesi malzeme boyunca homojen olarak dağılmamıştır. Kristalografik kayma düzlemi üzerindeki kesme gerilmesi, tane büyüklüğü ve şekil, tanelerin kristalografik konumlanma ve malzemenin elastik anizotropiklik durumlarına bağlı olarak taneden taneye farklılık gösterir. Bu durumlar diğer yüzey tanelerine oranla malzeme yüzeyindeki bazı tanelerde döngüsel kayma yönünden daha elverişlidir. Eğer kayma yüzey tanesinde olursa, malzeme yüzeyinde kayma adımı oluşmaktadır (Şekil 2.17). Kayma adımının sonucunda yeni oluşan metal yüzeyi çevresel etkilere maruz kalır. Yeni yüzey, çoğu çevresel koşulda en çok da yapısal elemanlarda hemen oksit tabaka ile kaplanır. Bu çok ince tabakalar malzeme yüzeyine çok sıkı bağlanırlar ve kolaylıkla kaldırılamazlar. Diğer bir önemli husus şudur ki kayma bandı içerisindeki yükün yükseltilmesi ile oluşan kayma, kayma bantlarında pekleşmeye neden olmaktadır. Sonuç olarak yüklemenin kaldırılmasının ardından daha büyük kesme gerilmesi aynı kayma bandında fakat ters yönde oluşur. Ters kayma genelde aynı kayma bandında olur. Fakat döngüsel kayma tamamı ile tersine çevrilebilir bir süreç değildir. Bu sürecin neden tam tersinir olmadığı ile ilgili iki açıklama vardır. Birincisi; ince oksit tabakasının kayma yüzeyinden kaldırılamaması, ikincisi; kayma bandındaki pekleşmenin tam tersine çevrilebilir olmamasıdır (Schijve 2004).

Yorulma çatlak başlangıcı bir yüzey olgusudur. Kayma bantlarının oluşturduğu süreksizlikler, bir deliğin çentik etkisi veya diğer geometrik süreksizliklerin bazılarına bağlı olarak homojen olmayan gerilim dağılımları oluşturur. Homojen olmayan gerilme dağılımlarının nedeniyle maksimum gerilme yüzeyde oluşur. Bu nedenle yüzeydeki pürüzler, malzeme yüzeyindeki çatlak başlama olasılığını arttırmaktadır. Malzeme yüzeyinde meydana gelen ve benzer etkiye sahip, korozyon çukurları ve aşınma yorulmaları diğer yüzey durumlarıdır.



Şekil 2.17 Kayma bantları oluşumu (Schijve 2004).

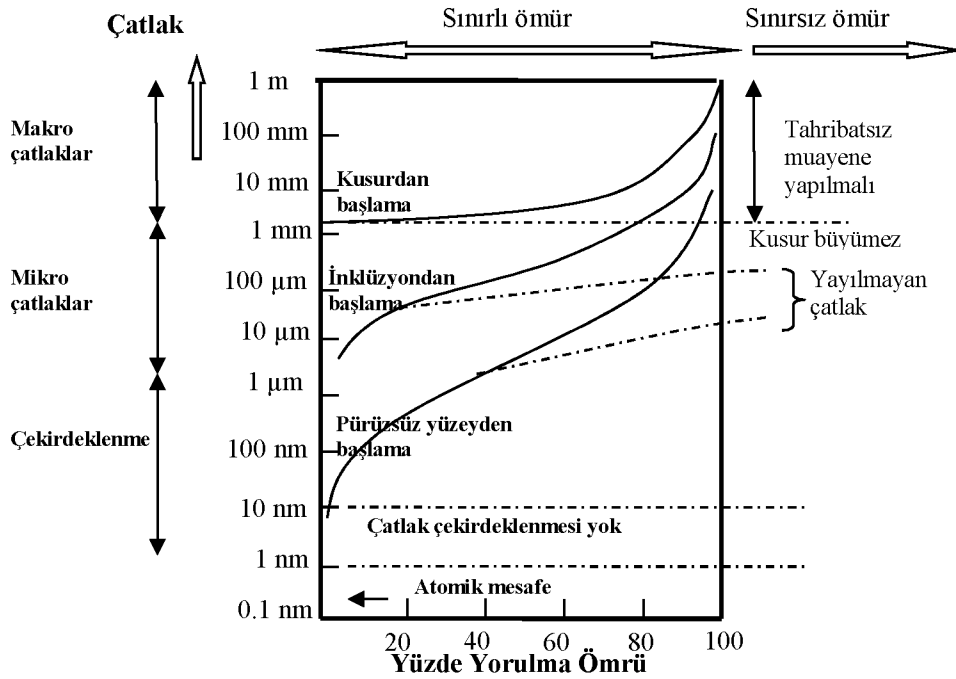
2.7.2.2 Çatlak Büyümesi

Mikro çatlak büyümelerinin, serbest yüzey durumlarından etkilenmesinin sonlanması ile çatlak başlangıç periyodunun tamamlandığı kabul edilir. Bunun anlamı, eğer malzemenin çatlak büyüme direnci kendiliğinden çatlak büyüme oranını kontrol ediyorsa çatlak büyüme periyodu başlamıştır. Başlangıç periyodundan çatlak büyüme periyoduna geçişteki mikro çatlağın büyüklüğü malzemeden malzemeye önemli farklılıklar göstermektedir. Başlangıç evresinden çatlak büyüme evresine geçiş, mikro çatlakların büyüyerek mikro yapısal bariyerleri aşmasına bağlıdır ve bu bariyerler tüm metallerde aynı değildir.

Çatlak başlangıç periyodu, ilk mikro çatlak büyümesini içine alır. Büyüme oranı hala düşük olduğu için, başlangıç periyodu yorulma evresinin önemli bir kısmını kapsamaktadır. Şekil 2.18'deki grafik çatlak büyüme gelişimini tüketilen yorulma ömrünün yüzde fonksiyonu şematik olarak gösterir. Bu grafikte 'n' yorulma çevrimlerinin sayısı ve 'N' kırılmaya kadarki gereken yorulma çevrim sayısı olmak kaydıyla " n/N " yüzde yorulma ömrü x-ekseninde verilmiştir. Şekil 2.18'in en altındaki eğri, mikro çatlaklarının malzemenin pürüzsüz yüzeyindeki başlangıcını temsil etmektedir. Aynı zamanda Şekil 2.17 ile temsil edilen kayma bantları oluşumundan başlayan yorulma çatlakları bu eğri ile temsil edilebilirler. Ortadaki eğri bir iç inklüzyon noktasından başlayan çatlak başlangıcını temsil eder. Üst eğri ise kaynaklanmış birleşimlerdeki hasarlar gibi bulunmaması gereken malzeme kusurları ile

başlayan çatlakları temsil eder.

Grafikte dikey eksen çatlak uzunluğunu 1 nanometreden 1 metreye kadar logaritmik ölçekte göstermektedir. Mikro çatlaklar pürüzsüz serbest yüzeylerden başlayarak mikron altında uzunluklarda olabilirler ($<1\mu\text{m}$). Bununla birlikte, inklüzyonlarda çekirdeklenen çatlaklar, inklüzyon boyutuna benzer boyutta başlayacaktır. Bu boyut hala mm altında bir aralıktır. Sadece makro kusurlardan başlayan çatlaklar belirlenebilir makro çatlak büyüklüklerine başlangıçta sahiptirler. Şekil 2.18’de verilen alttaki iki çatlak eğrisi yorulma evresinin önemli bir kısmının çatlak boyutu 1 mm’nin altında yani görülemeyecek büyüklükte iken olduğunu göstermektedir. Kesikli hat, çatlağın her zaman kırılmaya kadar büyümeyeceği olasılığını gösterir. Bu, malzeme içinde çatlak büyümesini engelleyen bariyerler olduğu manasına gelir.



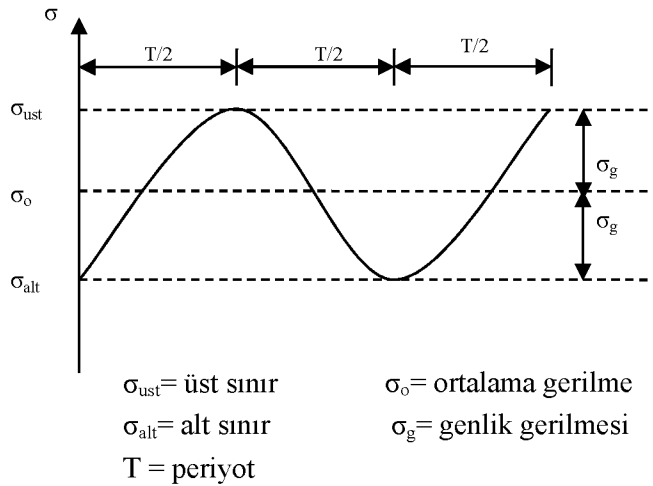
Şekil 2.18 Çatlak büyüme eğrisi (Schijve 2004).

2.7.3 Yorulma ile İlgili Temel Kavramlar

Geçmişten günümüze malzemelerin yorulma ömrünü tespiti yönelik çeşitli grafik ve formüller geliştirilmiştir. Bu grafikler ve formüller defalarca yapılan deney ve gözlemlere neticesinde oluşturulmuş olup, başlıcaları; S-N ya da Wöhler Diyagramı, Goodman Diyagramı, Smith Diyagramı ve Miner kuralıdır.

2.7.3.1 S-N (Wöhler) Diyagramı

Malzemelerin yorulma ömürleri ve yorulma limitleri hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla, Wöhler veya S-N diyagramı olarak da bilinen grafiklerden faydalanılır. Bu grafikler, deneyler ile malzemelere belli bir genlik gerilmesi uygulanarak ve dayandığı çevrim yük sayıları tespit edilerek oluşturulmuşlardır. Bu deneylerde numunelere genellikle sinüzoidal yük uygulanır (Şekil 2.19). Uygulanan yüke bağlı olarak genlik gerilmesi $\sigma_g = (\sigma_{ust} - \sigma_{alt})/2$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Yükleme sonucunda kırılmanın olduğu N tekrar sayısı ölçülür. Elde edilen bu değerlere göre σ_g -N eğrisi çizilir. Gerilme büyüklüğüne karşılık gelen çevrim sayısı logaritmik-x ekseninde gösterilir. Bu eğri S-N veya Wöhler eğrisi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.20).



Şekil 2.19 Periyodik yükleme.

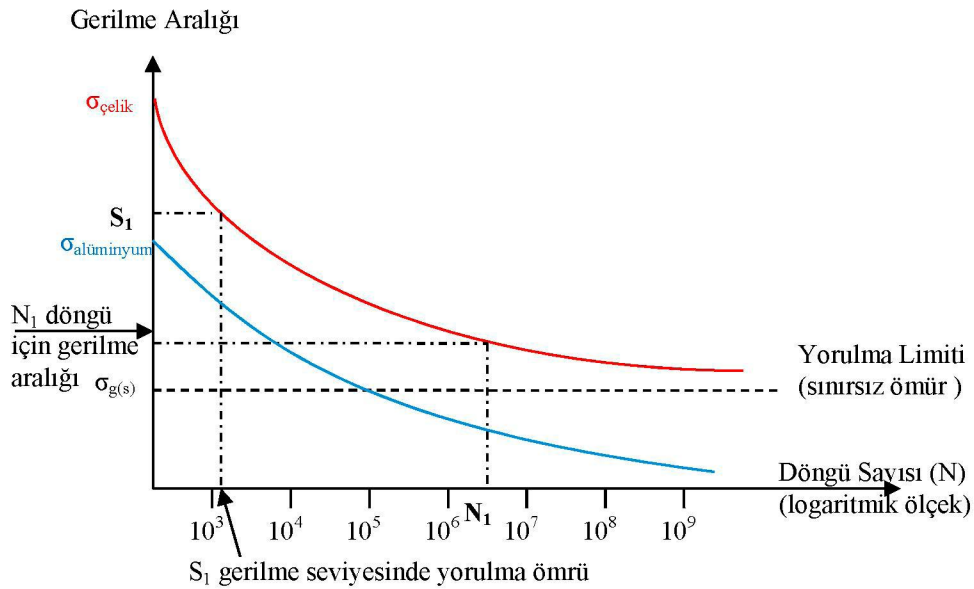
Deneyler göstermiştir ki, σ_g genlik gerilmesi azaldıkça, malzemenin kırılmaya kadar geçen yükleme sayısı 'N' artmakta, bir başka deyişle aynı yükleme sayısındaki yorulma mukavemeti artış göstermektedir. Periyodik yüklemede σ_{alt} ve σ_{ust} sınır değerlerinin farklı işaretli olması yani cismin devirli olarak basınç ve çekme gerilmelerinin etkisi altında kalması durumunda cismin yorulması kolaylaşır. Gerilme değerleri dinamik bir yükleme için önemli sınırlardır ve aralarında (2.31), (2.32), (2.33) ve (2.34) eşitlikleri ile verilen bağıntılar vardır.

$$\sigma_o = (\sigma_{ust} + \sigma_{alt})/2 \quad (2.31)$$

$$\sigma_g = (\sigma_{ust} - \sigma_{alt})/2 \quad (2.32)$$

$$\sigma_{u,maks} = \sigma_o + \sigma_g \quad (2.33)$$

$$\sigma_{u,min} = \sigma_o - \sigma_g \quad (2.34)$$



Şekil 2.20 S-N grafiği (Wöhler grafiği) (Ün 2007).

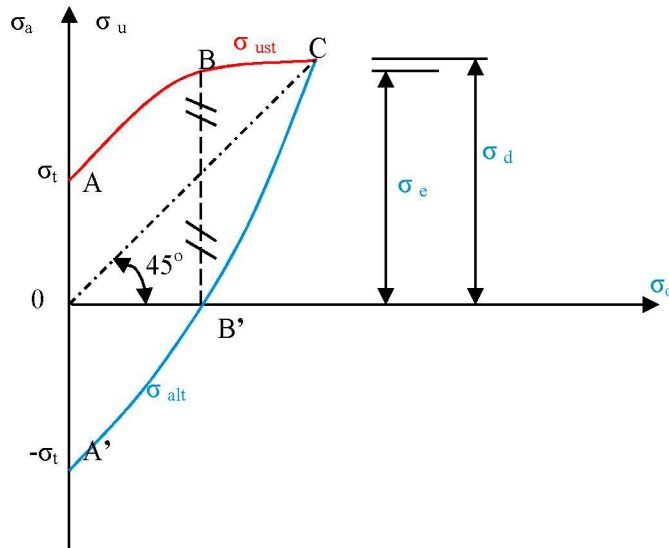
Wöhler eğrisi demir esaslı malzemelerde $10^6 - 10^7$ tekrar sayılarında yatıklaşmaya başlarken hafif metallerin veya alaşımların (alüminyum alaşımları) yorulma eğrilerinde bir yataylaşma olmayıp sürekli düşme eğilimindedirler. Demir esaslı malzemelerde eğrinin yataylaştığı ve altına inmediği bu sınır değere, sürekli dayanım gerilmesi, yorulma limiti veya süresiz yorulma dayanımı adı verilir. Bu gerilme değerinin altında malzeme yükleme sayısına bağlı olmaksızın sürekli dayanır. Demir esaslı malzemelerde pratik bir bilgi olarak yorulma limiti yaklaşık çekme dayanımının yarısıdır. Hafif metallerin veya alaşımlarının yorulma limiti olmayıp böyle malzemeler için yorulma dayanımı veya sürekli yorulma dayanımı tanımı yapılır. Genellikle $N=10^8$ döngüsel yükleme sayısına karşıt gelen gerilme değeri malzemenin yorulma dayanımı olarak alınır. Bu tür malzemeler için yorulma gerilmelerinin çekme gerilmesinin üçte biri kadar olduğu kabul edilir. Yorulma limiti göstermeyen bir diğer malzeme ise betondur. Betonun yorulma dayanımı statik dayanımının %55'idir. Gerilme genliği sabit tutularak yapılan deneylerde elde edilen kırılma tekrar sayısı farklılıklar gösterir.

Bundan dolayı Wöhler eğrisi çizilirken istatistikî ortalama alınır. Literatürde verilen yorulma değerleri genellikle %50 kırılma ihtimali olan değerlerdir (Ün 2007).

2.7.3.2 Goodman Diyagramı

Sürekli dayanım gerilmesi σ_g , σ_o ortalama gerilmesi ile birleşince (2.33) ve (2.34) eşitlikleri ile belirtilen σ_{ust} (üst sınır değeri) ve σ_{alt} (alt sınır değeri) gibi iki sınır gerilme elde edilir. Bunlara malzemenin sürekli dayanım sınırları denir. Malzemeyi bu iki sınır arasında değişken yüklerde, yükleme sayısı ne kadar olursa olsun koparmak mümkün değildir. Sürekli dayanım sınırlarının dışındaki hallerde cisim sonlu bir N sayısından sonra mutlaka geçer, diğer bir deyişle cismin kuvvetlere karşı gösterdiği dayanıklılık belirli bir yükleme sayısı içindir.

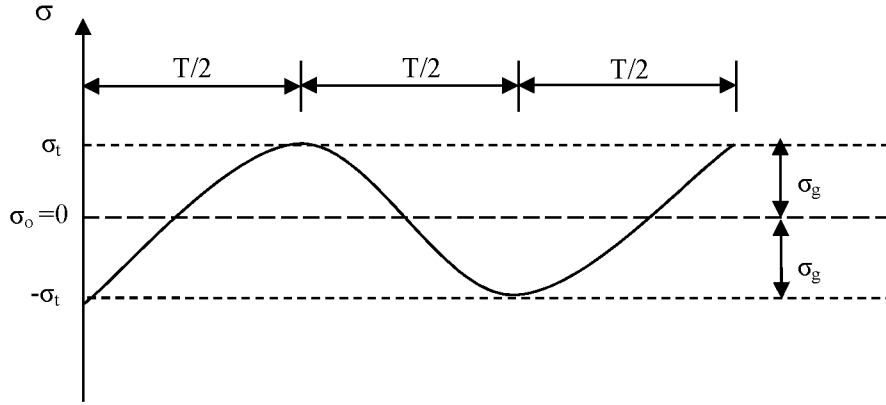
Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi sürekli dayanım sınırları belirli bir ortalama gerilme için bulunmuştur. Bu ortalama gerilme σ_o , değiştirilecek olursa asimptotik genlik gerilmesi ve dolayısıyla cismin sürekli dayanım sınırları, σ_{ust} ve σ_{alt} da değişecektir. Bu bağıntıdaki dikkat edilmesi gereken nokta, ortalama gerilme arttıkça asimptotik genlik gerilmesinin azalmasıdır. Bir cismin sürekli dayanım sınırlarını ortalama gerilme değerine bağlı olarak gösteren grafiğe Goodman grafiği denilmektedir (Şekil 2.21). Goodman grafiği üzerinde bir kaç tipik noktayı incelemekte fayda vardır.



Şekil 2.21 Goodman grafiği.

(A,A') noktaları ile belirtilen kısımda eleman tam tersinir yükler altındadır. σ_t 'ye cismin titreşim dayanımı denir ve bu değer akma sınırının çok altındadır. Yükleme durumu Şekil 2.22'deki gibidir ve (2.35) eşitliği ile verilen bağıntılar vardır.

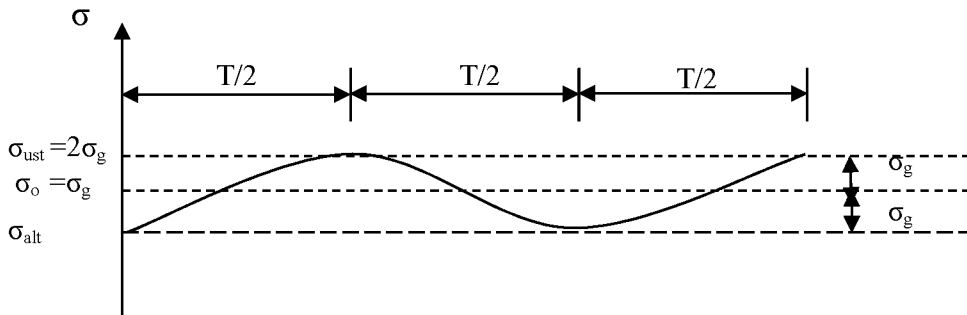
$$\sigma_o=0 \text{ ve } \sigma_{ust}=-\sigma_{alt}=\sigma_t \quad (2.35)$$



Şekil 2.22 Tam tersinir yükleme durumu.

(B,B') noktalarında alt sınır değeri sıfırdır ve üst sınır değerine malzemenin eşik dayanımı denir. σ_e değeri aynı zaman $N=\infty$ değerine de karşıt gelen $\sigma_{alt}=0$ halindeki yorulma dayanım değeridir. Çelikte bu değer akma sınırından küçük olmakla beraber çok yakındır. Yükleme durumu Şekil 2.23'deki gibidir. Gerilme değerleri arasında (2.36) eşitliği ile verilen bağıntılar vardır.

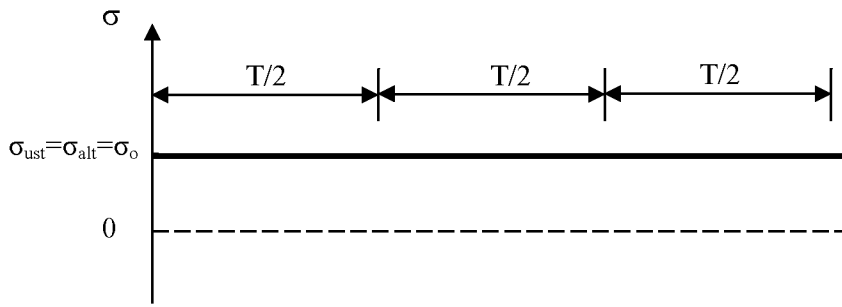
$$\sigma_{alt}=0 \text{ ve } \sigma_{ust}=2\sigma_g=2\sigma_o=\sigma_e \quad (2.36)$$



Şekil 2.23 $\sigma_{alt}=0$ yükleme durumu.

Son olarak iki sınır eğrinin birbirlerini kestiği C noktasına gelince, bu durum için yük değişimi söz konusu değildir. Malzeme sabit gerilme altındadır. Bu gerilmeyi süresiz olarak taşıyabilir ve bu gerilmeye malzemenin direnme sınırı denir. Bu değer, yük altında sünme olayı yok sayılırsa cismin statik dayanımına eşittir. Sünme olayı göz önünde bulundurulursa bu değer daha da düşer. Yükleme durumu Şekil 2.24'deki gibi olup, gerilme değerleri arasında (2.37) eşitliği ile verilen bağıntılar vardır.

$$\sigma_{alt} = \sigma_{ust} = \sigma_d = \sigma_o \text{ ve } \sigma_g = 0 \quad (2.37)$$



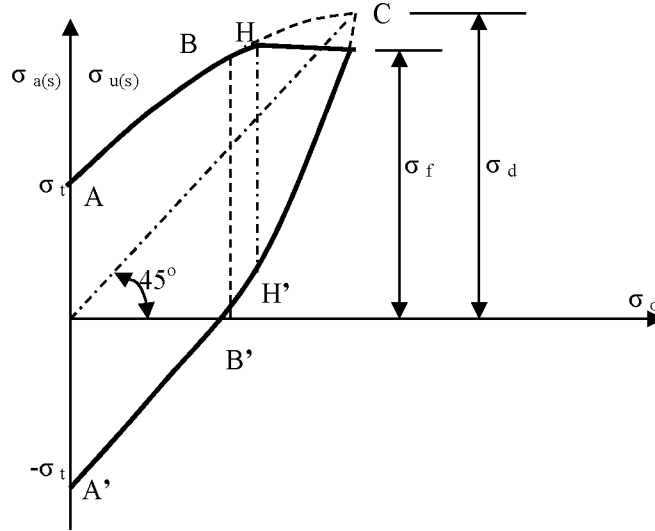
Şekil 2.24 Statik yükleme durumu.

Ortalama gerilmenin basınç olması halinde sürekli dayanım eğrileri şeklin soluna uzatmak gerekir. Çelik gibi çekme ve basınçta aynı davranışı gösteren cisimlerde diyagramlar orijinale kıyasla simetriktr (Ün 2007).

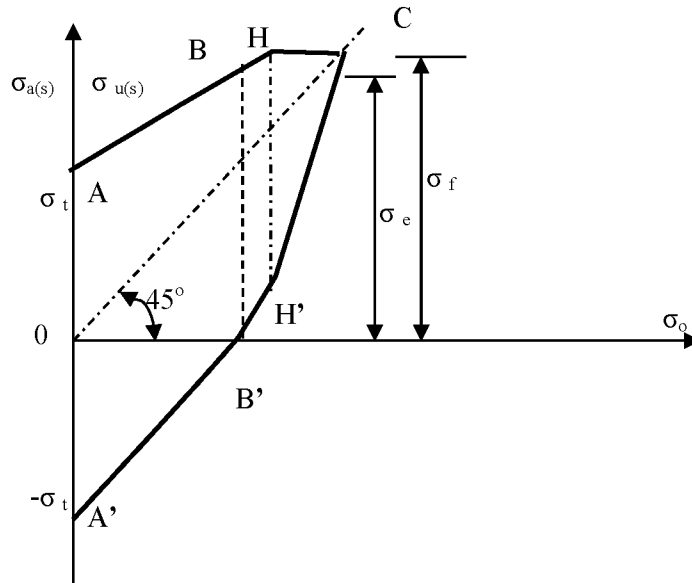
2.7.3.3 Smith Diyagramı

Plastik şekil değiştirmeleri önemli olan malzemelerde, sürekli dayanım sınırlarına ait eğrileri veren Goodman diyagramında bazı değişiklikler yapmak gerekir. Örneğin çelik gibi malzemelerde, sınır gerilmeler akma değerine ulaşınca, çatlakların doğması yorulmadan çok plastik şekil değiştirmeden olur. Bu gibi durumlarda sürekli dayanım sınırları akma gerilmesiyle sınırlandırılmaktadır, diğer bir deyişle akma gerilmesinden daha büyük değerler sınır olarak alınamaz. Böyle bir sınırlama σ_f (akma sınırı) ile gösterilmiştir (Şekil 2.25). Plastik şekil değiştirme yeteneği fazla olan bir cismin sürekli dayanım sınır eğrilerini, o malzemenin birkaç karakteristik değerine bağlı olarak bir takım doğrularla yaklaşık olarak simgelemek mümkündür.

Örneğin, çeliğin σ_t titreşim dayanımı, σ_e eşik dayanımı ve σ_f akma sınırı ise bu üç değere bağlı olarak sürekli dayanım diyagramı Şekil 2.26'da görüldüğü gibi çizilebilir. Bu kabule bağlı olarak çizilen yeni çizime Smith diyagramı denir.



Şekil 2.25 Goodman grafiği (Ün 2007).



Şekil 2.26 Smith diyagramı (Ün 2007).

2.7.3.4 Palmgren-Miner Kuralı

İlk defa 1924 yılında A.Palmgren tarafından ileri sürülen kuralı 1945 yılında M.A Miner popüler hale getirmiştir. Bu kurala göre 'k' adet farklı yüklemenin her biri (n_i/N_i) oranında hasarı, yorulma hasarına ilave eder. Bu her bir etkinin hasarı, söz konusu gerilmenin

uygulandığı çevrim sayısının ‘ n_i ’, malzemenin S-N grafiğindeki gerilme değerine denk gelen çevrim sayısına ‘ N_i ’ oranıdır. Bu oranların her birinin toplamı ile toplam yorulma hasarı (2.38) eşitliği ile bulunur.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = C \quad (2.38)$$

Burada C birikimli hasar değeri olup, deneyler sonucunda 0.7 ile 2.2 değerleri arasında değişmektedir. Genellikle tasarım amaçlı olarak C 1.0 kabul edilir.

Pratikte hareketli parçalara karışık rastgele, büyük ve küçük yükler tesir eder. Yani parçalara uygulanan yükler her zaman sabit genlikli olmayıp, farklı zaman aralıklarında farklı genlik gerilmelerine sahiptir. Böyle durumlarda söz konusu parçayı uygulanan yükler etkisinde güvenli bir şekilde değerlendirebilmek için;

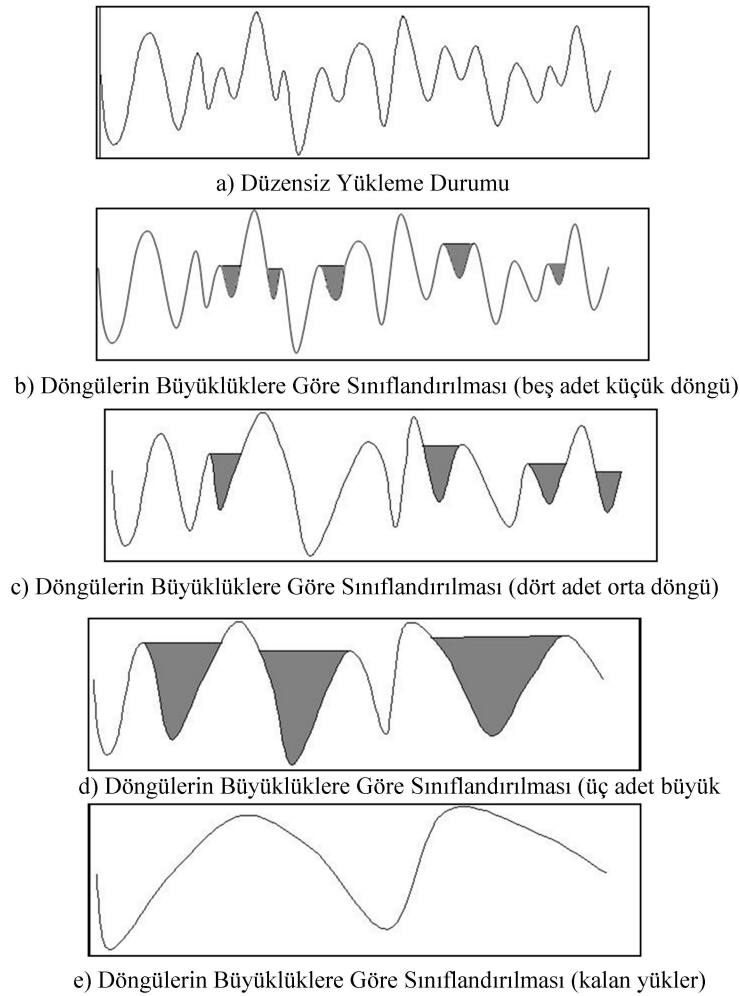
- i. Karışık yükleme yağmur akış analiz metodu kullanarak basit yüklemeye çevrilir.
- ii. Yağmur akış analizinde faydalanarak yorulma hasar spektrumu oluşturmak amacıyla bir histogram oluşturulur.
- iii. Her gerilme seviyesinde S-N grafiğindeki değeri tespit ederek birikimli hasar tespit edilir.
- iv. Miner kuralı kullanılarak her bir etki birleştirilir.

Miner kuralını çoğu durumda kullanışlı yaklaşımlar sunması karşın, bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlamalar şöyledir.

- i. Yorulma doğasında var olan olasılık bu kuralda yansıtılmaz
- ii. Bazı durumlarda düşük gerilme döngülerini takip eden yüksek gerilmeler tahmin edilenden daha çok hasara neden olabilir.
- iii. Artık basınç gerilmelerine neden olan aşırı veya yüksek yükleme gerilmeleri dikkate almaz.
- iv. Yüksek gerilmeyi takip eden düşük gerilme artık basınç gerilmelerinin varlığı nedeni ile daha az hasara neden olabilir.

2.7.3.5 Yük Spektrumu Oluşturma ve Yağmur Akış Diyagramı Analizi

Bir yapının yk spektrumu o yapı hakkında zamana bağlı yükleme değerleri hakkında bilgi verir. Yapının şekil 2.27.a'deki gibi zamana bağlı bir $P(t)$ yüküne maruz bırakıldığı bir durumda yüklemelerin daha basit hale getirilerek sınıflandırılması analizi kolaylaştıracaktır. Bunu başarmanın yollarından biri ise yağmur akış diyagramı analiz metodunu kullanmaktır. Bu metoda göre eğriye çizilen yatay çizgiler ile yükleme eğrisi birçok alt çevrimlere bölünür. Alt yükleme döngülerine ayrılan her bir çevrim gerilmelerine göre sınıflandırılır. Her bir gerilme sınıfının sayısı belirlenir. Söz konusu gerilme sınıfları için malzemenin dayanım sayısı S-N diyagramından tespit edilerek analiz işlemi Miner kuralına göre gerçekleştirilebilir.



şekil 2.27 Yağmur akış diyagramı analizi.

2.7.4 Yorulma Ömrüne Etkiyen Faktörler

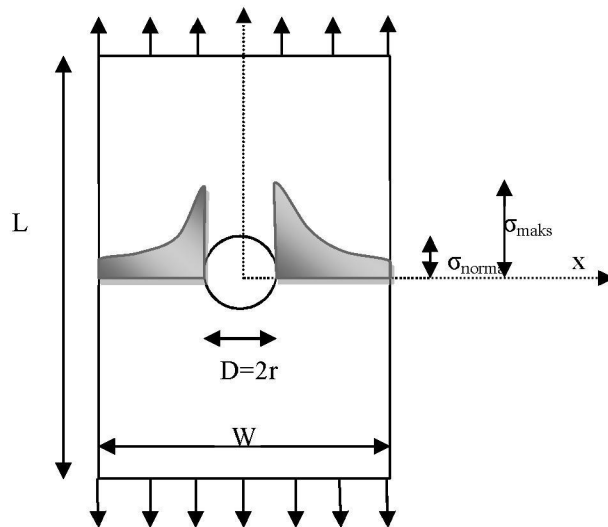
Malzemenin yorulmasını etkileyen birçok faktör bulunur. Bu faktörlerin başlıcaları; geometri, yüzey durumu, malzeme çeşidi, yükleme yönü, artık gerilmeler ve sıcaklık olarak sıralanabilir.

2.7.4.1 Geometri

Bir yapıda, delik veya çentik gibi geometrik düzensizliklerin olması kaçınılmazdır. Geometrik düzensizlikler bir gerilme yoğunlaşma oranı ile homojen olmayan gerilme dağılımlarına neden olurlar. Teorik yoğunlaşma faktörü K_t , düzensizlik kökündeki maksimum gerilmenin, gerilme konsantrasyonu olmaması halinde oluşacak normal gerilmeye oranı olarak tanımlanır ve (2.39) eşitliği ile hesaplanır.

$$K_t = \sigma_{\text{maks}} / \sigma_{\text{normal}} \quad (2.39)$$

Gerilme yoğunlaşmasının şiddeti düzensizlik konfigürasyonun geometrisine bağlıdır. Kare delikler ve keskin köşeler yüksek lokal gerilme değerlerinin oluşmasına dolayısıyla yorulma çatlaklarını başlamasına neden olabilir. Yuvarlak delik ve yumuşak geçişler yorulma ömrünün uzatılması hususunda önemlidir (Şekil 2.28). Yorulma problemleri ile karşılaşmamak için mümkün olduğunca gerilme yoğunlaşmaları azaltılmalıdır.



Şekil 2.28 Çekme etkisindeki delikli plakada gerilme dağılımı.

2.7.4.2 Yüzey Kalitesi

Yorulma genellikle malzemenin serbest yüzeyinde başlar. Bunun sonucu olarak yüzey tabakası durumu yapının yorulma davranışı yönünden en önemli etkiye sahip faktördür. Yüzeydeki korozyon çukurları, aşınma korozyonu, çukur ve çentik durumları yaygın bilinen yorulma problemlerinin kaynağıdır. Malzeme yüzey durumları, yorulma çatlak çekirdek oluşumunda önemlidirler ve çatlak başlangıç periyodunu etkileyen ana unsurdurlar. Malzeme yüzeyinin pürüzlü olması, mikroskobik gerilme yoğunlaşmalarına neden olacağı için yorulma mukavemetini azaltacak etki yapar.

Her üretim süreci, kendine has karakteristik metal yüzeyi oluşturur. Yüzeyin yorulma mukavemetini ve malzemenin korozyon direncini artırmak yada malzemenin görünümünü iyileştirmek amacıyla malzeme yüzeylerine kumlama tavlama gibi çeşitli işlemler uygulanabilir.

2.7.4.3 Malzeme Türü

Yorulma ömrü, döngüsel yükleme altındaki davranışta olduğu gibi, malzemenin malzemeye değişir. Örneğin kompozit ve polimer malzemeler metallerden önemli bir şekilde ayrılırlar. Malzemelerde bu farklılığa neden olan temel faktör malzemelerin kristal yapısı, tane büyüklük ve şekil özellikleridir. Mikro çatlak ilk büyümesi kayma bandı boyunca büyüme eğilimindedir. Bundan dolayı malzemenin kristalografik özelliği, başlangıç periyodunda malzemenin mekanik davranışı üzerinde etkiye sahiptir.

2.7.4.4 Artık Gerilmeler

Tanım olarak artık gerilme, yük uygulanmadan bir yapıda, parçada veya plakada bulunan gerilme dağılımıdır. Bir dış kuvvetin yokluğunda artık gerilmeler bazen iç kuvvetler olarak tanımlanabilir. Artık çekme gerilmesi ve artık basınç gerilmesi daima beraber bulunur. Bir dış kuvvet olmadığında, artık çekme gerilmesi artık basınç gerilmesi ile dengelenmek zorundadır. Basınç artık gerilmesi yorulma davranışını iyileştirirken çekme artık gerilmesi yorulma dayanımı üzerinde olumsuz etkisi vardır.

Artık gerilmelerin yorulmanın haricinde etkileri de vardır. Çekme artık gerilmelerinin korozyona hassas malzemeler için çok zararlı olduğu iyi bilinmelidir. Ayrıca malzemelerin artık gerilmeleri açığa çıkacak şekilde işlenmesi malzemenin çarpılmasına ve kasılmasına neden olur. Artık gerilmelerin başlıca oluşum nedenleri; ısı veya mekanik deformasyon içeren kaynak, üretim süreçleri, kumlama, homojen olmayan plastik deformasyonlar olarak sıralanabilir.

2.7.4.5 Yükleme Yönü ve İç Kusurlar

Metal olmayan inklüzyonların oluşturduğu problemler, çelik üretiminin başlangıcından itibaren hem üreticilerin hem de kullanıcıların dikkatini çekmiştir. Metal olmayan inklüzyonlar genellikle oksit ya da sülfid bileşikler şeklinde indirgenme reaksiyonları sonucunda oluşur. Bu inklüzyonlar özellikle inklüzyon kümeleri, tokluk, süneklik ve yorulma mukavemetini önemli ölçüde düşürürler.

Genellikle sıcak haddelenmiş çeliklerin özellikleri, boyuna ve enine yönlerde farklıdır. Çünkü haddeleme aşaması, anizotropik mikro yapının oluşumuna ve inklüzyonların uzamasına neden olur. Bundan dolayı yorulma özelliklerinin boyuna ve enine incelenmesi gerekir. Bazı çelik türlerinde yapılan deneyler neticesinde boyuna haddelenen malzemenin enine yöndeki yorulma mukavemeti boyuna yönüne oranla %50 oranında düşük çıktığı gözlenmiştir. Çelik üzerinde yapılan deneylerde; yükleme yönünün yorulma dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Yükleme haddeleme yönü ile aynı olduğunda yani inklüzyonun boyuna uzadığı yöne paralel olması halinde sıcak haddelenmiş çelikte yorulma mukavemeti maksimumdur. Haddeleme yönüne dik bir kuvvet uygulandığında ise yorulma mukavemeti minimuma düşmektedir (Ma et al. 2010).

2.7.4.6 Sıcaklık

Malzeme özellikleri sıcaklığa bağlıdır. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve elastisite modülü sıcaklık artışı ile beraber düşer. Dolayısıyla yorulma özellikleri de ısı ile etkilenir. Yüksek sıcaklığın malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, malzemenin yaşlanma, yeniden yapılanma ve yeniden kristalleşme özelliklerinin değişimi ile ilişkilidir. Genel olarak bu prosesler malzemenin plastik deformasyonunun daha kolay olmasını sağlar.

Çeşitli malzemeler için belli bir sıcaklık üzerinde yorulma limiti önemli bir ölçüde düştüğü yapılan deneyler neticesinde görülmüştür. Diğer taraftan yorulma dayanımı çok düşük sıcaklıklarda, oda sıcaklığındaki yorulma dayanımına oranla 2-3 kat arttığı gözlenmiştir (Schijve 2004).

2.8 KREN KİRİŞLERİNDE YORULMAYA KARŞI ÖNLEMLER

Normal endüstriyel yapılar ile içerisinde kren bulunduran yapılar arasındaki en büyük fark krenlerin oluşturduğu tekrarlı yüklerdir. Krenlere ve kaldırma ekipmanlarına mesnetlik eden yapıların, güvenilir ve kullanılabilir bir şekilde tasarlanması ve detaylandırılabilmesi için özellikle yorulma yönünden özel ilgi gerekmektedir.

2.8.1 Kren Kirişlerinin Yorulmaya Göre Tasarımı

Çoğu yapı standardında, yapısal detayın yorulma performansını etkileyen ana faktörler, detayın doğası, detayın maruz kaldığı gerilme aralığı ve yükleme çevrim sayısı olarak belirtilir. Yapı detaylarının yorulmaya karşı duyarlılığı değişkendir ve genellikle dünya genelindeki yorulma standartları belirli bir sayıda detay kategorisine sahiptirler. Her kategori sabit genlikli müsaade edilen yorulma gerilme aralığı ve yorulma çevrim sayısı ilişkisine sahiptir. Bunlar S-N eğrileridir.

Yapının herhangi bir elemanı, krenin kaldırma veya giriş boyunca hareket sayısından daha az ya da daha çok sayıda tekrara maruz kalabilir. Bu nedenle çevrim sayısının değerlendirmesi dikkat gerekmektedir. Örneğin, kren giriş gövdesinin üst başlık ile birleşiminde merkezi kaymış bir ray tarafından düzlem dışı eğilme oluşturuluyorsa, her tekerin geçişi esnasında n , bir vinçteki teker sayısı ve kren geçiş sayısı N olmak üzere $N \times n$ sayıda tekrarlı yükleme oluşur. Özellikle konsol girişler dikkate alındığında, kren tekerleri arasındaki mesafeye bağlı olarak kısa açıklıklı kren girişleri için dahi krenin tek geçişi birden fazla yük çevrimine neden olur. Diğer taraftan, kren kaldırma ve hareketleri değişik açıklıklar arasında dağıldığında, söz konusu kaldırma sayısından daha az tekrara maruz kalır.

Kren girişleri gibi kaynaklı yapılarda yorulma nedeni ile oluşan çatlaklar genel olarak diğer detaylardan ziyade kaynaklı birleşimlerden başlar. Bunun temel nedeni olarak; birçok kaynak yönteminde ortaya çıkan metalürjik süreksizlikler gösterilebilir. Buna ilave olarak kaynak

bölgelerindeki yüzey pürüzlülüğü ve geometrisi nedeni ile gerilme yığılmalarına imkan sağlaması yorulmanın kaynaklarda başlamasının diğer nedenleridir (Seçer 2007).

2.8.1.1 AISC Kriterlerine Göre Tasarım

AISC LRFD standartlarında, yorulma ile ilgili kurallar bulunmaktadır. Bu kurallar veritabanı, gerçek birleşimler üzerine yapılan çevrimsel testleri temel alır. Her detay için farklı bir gerilme kategorisi ve yorulma sabiti tanımlıdır. AISC’de seçilen tasarım ömrü için, çeşitli durumlar ve gerilim kategorilerine ait eşitlikler bulunur. İlk olarak, potansiyel çatlak başlangıç noktası tanım ile belirlenir ve figürler AISC (A.K 3.1) tablosundan gösterilir. Tablodaki stres kategorisine göre ilgili formüle detay sabiti C_f ve uygulanan çevrim sayısı N yerlerine konarak müsaade edilen tasarım gerilme aralığını F_{SR} hesaplanır. Gerilme kategorilerine göre eşitlikler aşağıda verilmiştir (AISC LRFD 1999).

a) Gerilme kategori durumları A, B, B', C, D, E ve E' için tasarım gerilme aralığı F_{SR} , (2.40) eşitliği ile bulunur.

$$F_{SR} = \left(\frac{327 \times C_f}{N} \right)^{0.333} \geq F_{TH} \text{ (metrik)} \quad (2.40)$$

b) Gerilme kategori durumları F için tasarım gerilme aralığı F_{SR} , (2.41) eşitliği ile bulunur.

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f \times 11 \times 10^4}{N} \right)^{0.167} \geq F_{TH} \quad (2.41)$$

C_f : Detay sabit (AISC LRFD çizelge A-K3.1)

N : Tasarım ömründeki gerilme aralığı çevrim sayısı

F_{TH} : Sınır yorulma gerilme aralığı veya sınırsız tasarım ömrü için maksimum gerilme aralığı

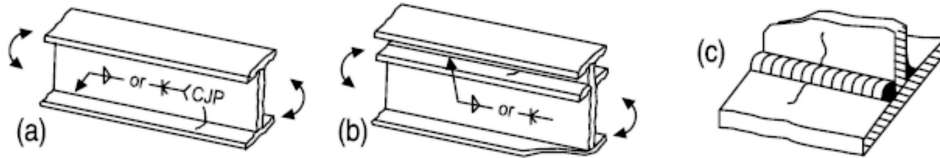
AISC çizelge A-K3.1’de her gerilme kategorisi için sınır tasarım gerilme F_{TH} içerir (Çizelge 2.3) ve (Şekil 2.29). AISC’ye göre eğer hareketli yük gerilme aralığı AISC-LRFD çizelge A-K3.1’de verilen eşik gerilme aralığından F_{TH} düşük ise ilgili detay için yorulma kontrolü yapmaya gerek yoktur. Ayrıca uygulanan yük çevrim sayısı 2×10^4 den az ise de yorulma

dayanımı kontrolünü yapmaya gerek yoktur. AISC tarafından sunulan formüller ve kurallar normal korozyon koşullarının olduğu yapılar için veya uygun korozyon koruması yapılmış yapılar için olup, sıcaklığın 150°C altında olması halinde geçerlidir (AISC LRFD 1999).

Çizelge 2.3 AISC çizelge AK-3.1'den örnek.

TABLO A-K3.1 YORULMA TASARIM PARAMETRELERİ				
Tanım	Gerilme Kategorisi	Sabit C_f	Sınır Gerilme F_{TH}	Potansiyel Çatlak Başlangıç Noktası
3.1 Eksiz baz metal ve kaynak metalin tam nüfuz eden sürekli boyuna birleştiren kaynaklar, geri oyularak ve iki tarafından kaynaklanmış veya sürekli köşe kaynakları	B	120×10^8	110 MPa	Yüzeyde veya kaynak ucundan uzaktaki iç kaynak süreksizlik noktalarında

3.1



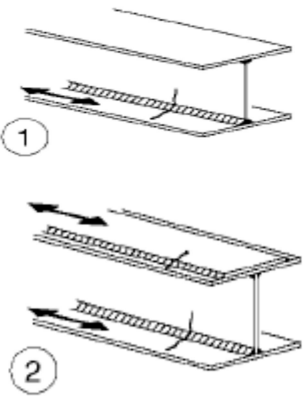
Şekil 2.29 AISC çizelge A.K 3.1 örnek.

2.8.1.2 Eurocode-3'e Göre Tasarım

Eurocode 3 yönetmeliğinde yorulma hesaplarının yapılması amacıyla uygulamada sık rastlanan bazı birleşim tipleri için AISC standartlarındaki benzer çeşitli birleşim detayı yorulma kategorileri tespit edilmiştir. Birleşim detayı yorulma kategorileri Eurocode yönetmeliğinde yorulma bölümünün son kısmında birleşimler için hazırlanmış, detaylı açıklamalar ile birlikte tablolar halinde verilmiştir (Çizelge 2.4). Yorulma dayanımının incelenmesi için Eurocode 3 yönetmeliğinde 14 farklı detay kategorisi belirlenmiştir. Bu detaylar Şekil 2.30 da gösterildiği şekilde S-N eğrileri olarak temsil edilebildikleri gibi (2.42)

eşitliği ile de ifade edilebilmektedir. Her kategori, yorulma döngüsü 2 milyon ($N=2 \times 10^6$) karşılık gelen $\Delta\sigma_c$ referans değeri ile temsil edilmektedir (Seçer 2007).

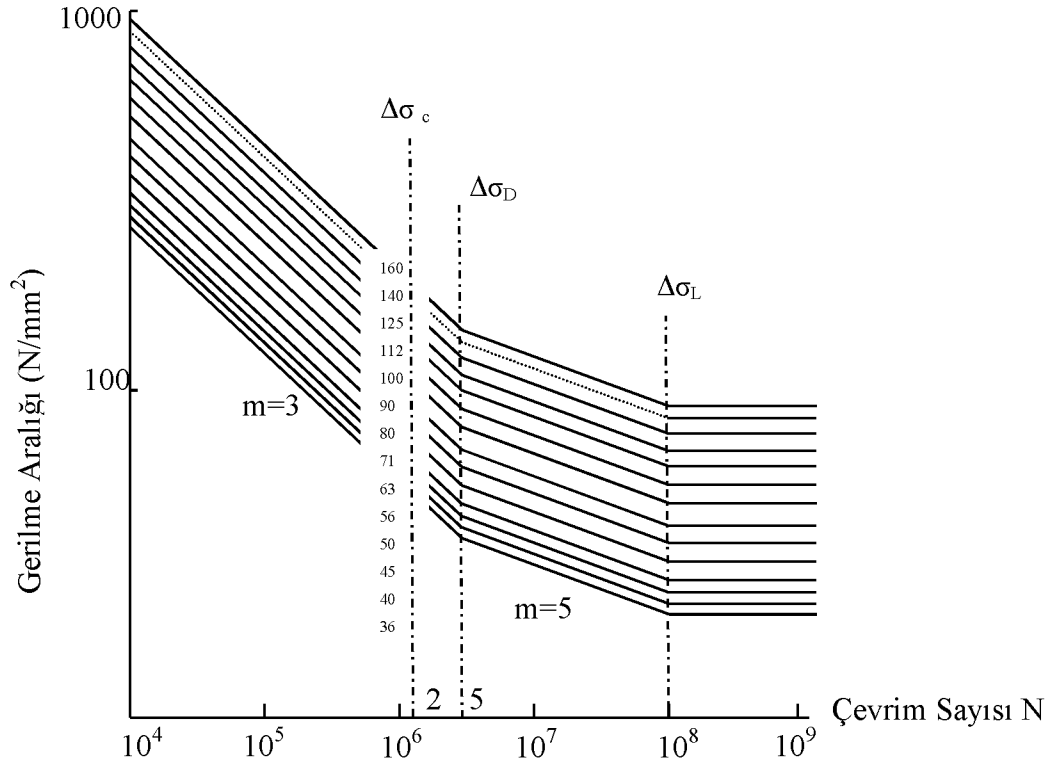
Çizelge 2.4 Eurocode yorulma detay tablosu örneği.

Detay Kategorisi	Yapısal Detay	Tanım	Gereksinimler
125		<u>Sürekli Boyuna Kaynaklar :</u> 1) Her iki taraftan otomatik küt kaynak yapılmış. 2) Otomatik köşe kaynağı.	<u>Detaylar 1) ve 2)</u> Tamiratın bir uzman tarafından yapıldığı ve kontrol edildiği durumlar hariç, kaynakta süreksizlik müsaade edilmez

Eurocode 3'e göre yorulma hesapları yapılırken iki kavramdan daha faydalanılmaktadır. Bu kavramlardan ilki sabit yorulma limiti büyüklüğü, $\Delta\sigma_D$ olup yorulma analizinin yapılması gereken gerilme aralığının sınırlarını göstermektedir. Sabit genlikte yorulma için döngü sayısı limiti $N_D=5 \times 10^6$ 'dır. Diğer önemli kavram ise, kesme sınır değeridir. $\Delta\sigma_L$ tasarım spektrumundaki gerilme aralığı için alt sınır olup toplam zarara katkıda bulunmayan kısmı temsil eder. Bu değere karşılık gelen döngü sayısı $N_L=10^8$ 'dir. Kesme sınır değerinin ileride olmasının nedeni değişken genlikte yükleme olması durumunda yorulma limitinin altındaki gerilmeler ile zarara sebep olabilme ihtimalinin bulunmasıdır. Ayrıca daha büyük genlikteki döngülerin çatlağın gelişimine yardımcı olacağı unutulmamalıdır (Seçer 2007).

$$\log N = \log a - m \log (\Delta\sigma_R) \quad (2.42)$$

Eşitlik (2.42)'de $\Delta\sigma_R$ yorulma dayanımını, N gerilme döngüsü sayısını, m yorulma eğrisi eğimini vermektedir. 'loga' ifadesi ise sabit bir değer olup ilgili eğim değerlerine göre değişmektedir



Şekil 2.30 Yorulma detay kategorilerine göre S-N diyagramı.

Eurocode 3 yönetmeliğinin yorulma hesabı kısmına göre; kaynaklı birleşimin aşağıda verilen Eşitlik (2.43-45) koşullarından herhangi birini sağlaması durumunda yorulma tahkiki yapmaya gerek kalmamaktadır. Eşitlik (2.43) ile en büyük nominal gerilme aralığı $\Delta\sigma$, (2.44) eşitliği ile ise toplam döngü sayısı N için sınırlar belirtilmiştir. Sabit genlikli eşdeğer yorulma limiti $\Delta\sigma_D$ değeri verilen bir detay için ise en büyük gerilme aralığı $\Delta\sigma$, (2.45) eşitliği ile verilen durumu sağladığında söz konusu detay içinyorulma tahkikine gerek yoktur.

$$\gamma_{FF}\Delta\sigma \leq 26/\gamma_{Mf} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2.43)$$

$$N \leq 2 \times 10^6 \left[\frac{36/\gamma_{Mf}}{\gamma_{FF}\Delta\sigma_{E,2}} \right]^3 \quad (2.44)$$

$$\gamma_{FF}\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \quad (2.45)$$

Burada; $\Delta\sigma_{E,2}$ denk sabit genlikli gerilme aralığını (N/mm^2), γ_{FF} uygulanan yük seviyeleri ile yüklerin oluşturduğu gerilmeler için öngörölmüş kısmi yük güvenlik faktörünü, γ_{Mf} ise

yorulma dayanımı için verilmiş olan ve Çizelge 2.5’de sunulan kısmi dayanım güvenlik faktörünü ifade etmektedir.

Çizelge 2.5 Yorulma dayanımı için kısmi güvenlik faktörü, γ_{MF} .

Denetim ve Ulaşılabilirlik	Göçme Açısından Güvenli Elemanlar	Göçme Açısından Güvenli Olmayan Elemanlar
Ulaşılabilir Birleşim Detayları	1.00	1.25
Ulaşılabilirliği Zayıf Birleşim Detayları	1.15	1.35

Diğer durumlarda yorulma belirleme kriteri olarak genel prensibi eşitlik (2.46) ile verilen hesaplamadır.

$$\gamma_{FF}\Delta\sigma=\Delta\sigma_R/\gamma_{MF} \quad (2.46)$$

Eşitlik (2.46) ifadesinde; $\Delta\sigma$ nominal gerilme aralığını ve $\Delta\sigma_R$ ilgili detay için toplam N gerilme döngüsü için gerekli yorulma dayanımını ifade etmektedir. Değişken genlikli yükleme durumları için yorulma hesabı Palgren – Miner kuralına göre toplam hasar üzerinden yapılmaktadır. Eğer değişken gerilmenin sebep olduğu maksimum gerilme aralığı sabit yorulma genliğinden daha yüksek olursa (2.47) eşitliğinde verilen formül ile toplam hasar incelemesi yapılması gerekmektedir (Eurocode 3 2005).

$$D_d=\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}; D_d \leq 1 \quad (2.47)$$

Burada; n_i tasarım ömrü içerisindeki $\Delta\sigma_i$ gerilme aralığındaki döngü sayısını, N_i ise bahsedilen kaynak detayı için γ_{FF} , γ_{MF} , $\Delta\sigma_i$ gerilme, aralığındaki ömrü için döngü sayısını göstermektedir.

Eurocode 3 yorulma hesapları için sıklıkla kullanılan yöntem, sabit genlikli yorulma limiti $\Delta\sigma_D = 5$ milyon döngü olan yöntemdir. Eşitlik (2.48), (2.49) ve (2.50) döngü sayısı N_i ’nin hesaplanmasında kullanılır. Eşitlik (2.50)’dan anlaşılacağı üzere kesme limiti altındaki gerilme değerleri için yorulma davranışı ihmal edilmektedir.

$$N_i = 5 \times 10^6 \left[\frac{(\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf})}{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i} \right]^3 ; \text{Eğer } \gamma_{Ff}\Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \text{ ise} \quad (2.48)$$

$$N_i = 5 \times 10^6 \left[\frac{(\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf})}{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i} \right]^5 ; \text{Eğer } \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} > \gamma_{Ff}\Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_L/\gamma_{Mf} \text{ ise} \quad (2.49)$$

$$N_i = \infty; \text{Eğer } \gamma_{Ff}\Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L/\gamma_{Mf} \text{ ise} \quad (2.50)$$

2.8.2 Konstrüktif Önlemler

Kren kiriş hasarlarının başlıca nedenlerinin yorulma ve yorulmaya neden olan tasarım hataları olduğu bilinmektedir. Yorulma olasılığı olan detaylar, ilgili standarda göre detaylandırılmalı, yorulmaya neden olabilecek gerilme yoğunlaşmaları oluşturan geometrilerinin kullanılmasında kaçınılmalıdır. Özellikle, sıklıkla karşılaşılan kaynaktaki yorulma çatlaklarını önüne geçebilmek amacıyla uygun kaynak teknikleri kullanılmalı imkan dahilinde tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak testlere tabi tutulmalıdır.

2.8.2.1 Rijitlik Elemanları için Önlemler

Yorulma çatlakları genellikle tekil yük berkitmeleri için, berkitme ile kiriş üst plakası arasındaki birleşim yerinde olur. Çatlaklar berkitme ile üst plakanın alt kenarının köşe kaynağında oluşur. Her kren tekerinin geçişi köşe kaynaklarında kesme gerilmesi oluşturur. AISC'ye göre berkitmeler, üst plakaya tam nüfuz eden kaynaklar ile birleştirilmelidir. Berkitmenin altı alt plakaya uydurulmalı veya köşe kaynağı yapılmalıdır. Tüm berkitmeler sürekli olmalıdır.

Ara berkitmelerin de, tekil berkitmelerdeki nedenlerden dolayı üst başlığa nüfuz kaynağı ile birleştirilmesi gerekir. Ara berkitmeler çekme plakasına kadar uzatılmaz, kısa tutulur. Berkitmelerin çekme plağına bitişik olarak sonlandığı yerde yorulma kontrollerinin yapılması gerekmektedir.

Dikkat edilmelidir ki kanal başlığı veya başlık plakası, kiriş üst plakası ile %100 uyumlu olmaz. Standartlarda sunulan toleranslar geniş başlıklı elemanların boyları boyunca biraz

başlık sapmalarına müsaade eder veya hafifçe bükülür veya boylamasına burulur. Kren kirişlerinin bu boşluklardan geçişi kanal başlığı üst başlık arasındaki kaynağı sıkıştırma eğilimindedir. Bundan ötürü başlık plakaları veya kanallar ağır tonajlı krenlerde kullanılmamalıdır. Kanal başlığın veya plakanın üst plakaya kaynağı sürekli veya aralıklı olabilir.

Kren kolon ucu başlık plakası, kiriş sonundaki dönmeleri kısıtlamayacak şekilde detaylandırılmalıdır. Eğer kiriş başlık plakasının bulonları, kolon başlıkları arasına yerleştirilirse, kiriş sonu dönmeleri kolon başlık ve bulonlar arasındaki kuvvet çifti oluşturur. Bu detaylandırmanın bulon hasarına neden olduğu bilinmektedir. Tercih olarak, kiriş başlık plakası, kolon ucuna dıştan bulonlanmalıdır. Kolon uç plakası, kolon başlığının dışından bulonlar ile kirişe doğru uzatılmalıdır. Kolon başlık plakası aşırı kalın olmamalıdır çünkü bu detay, kiriş uç dönme özelliğini bozduğu bilinmektedir. Kirişi kolon uç plakasına bağlayan bulonlar, sürüklenme ve tampon kuvvetlerini boyuna kren çaprazlarına aktaracak kadar kuvvetli olmalıdır. Ayrıca, kirişin kolon üzerinde doğrultusunun ayarlanabilmesi için kolon uç plakasında büyük ölçekli delikler veya ayar yapılmasına olanak sağlayan slotların kullanılması düşünülmelidir.

Kren kirişleri sürekli kirişler şeklinde tasarlanmamalıdır. Kolon mesnetlerinin oturması, yükselmesi ve yorulmanın neden olabileceği problemleri göz önünde bulundurulmalıdır. Sürekli kirişlerin güçlendirilmesi ve değiştirilmesinin zorluğu vardır. Basit mesnetli kirişlerin uçları kısıtlanmamalı ve kirişin gövde düzlemi içinde dönebilmelidir. 20 metreden uzun açıklıklı kirişler kavis verilerek kullanılmalıdır.

2.8.2.2 Güçlendirme ve Onarım

Kren kirişlerinde bir hasar söz konusu olduğunda, bir inceleme planı belirlenmelidir. Onarım ve değişim metotları, tasarımcının yeteneklerine göre değişiklik gösterir. Göz önünde bulundurulması gerekenler aşağıda belirtilmiş olmakla beraber kısıtlandırılmış değildir.

- i. Fiziksel hasarın derecesi ve doğası,
- ii. Bozulmanın derecesi, korozyon gibi,
- iii. Yapı malzemesi,
- iv. Kaynak edilebilirlik,

- v. Mevcut detaylar,
- vi. Kalan yorulma ömrü,
- vii. İnşaatın ve değişimin kolaylığı,
- viii. Beklenen gelecekteki kullanım durumları,
- ix. Benzer durumlardaki geçmiş performans,

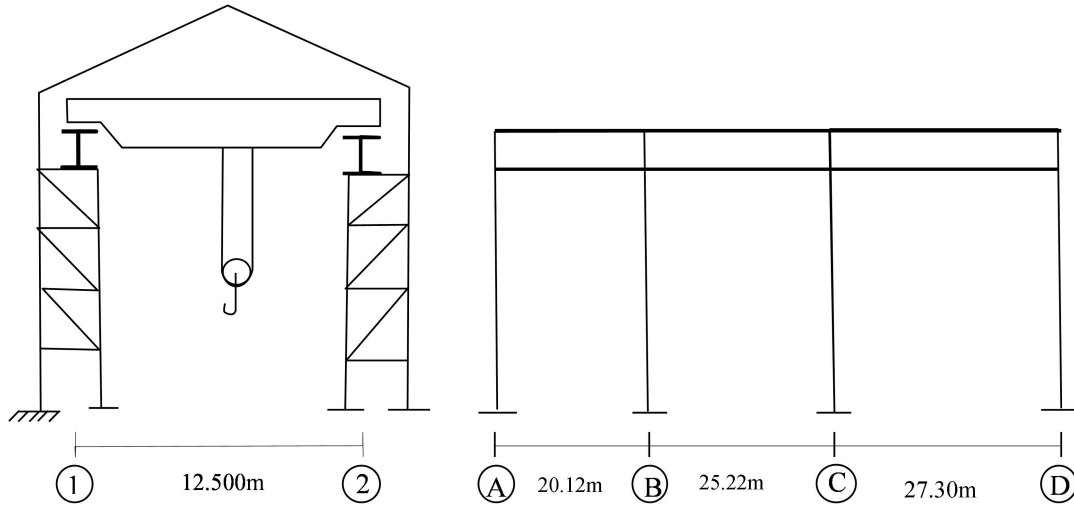
Muhtemel kren kiriş hasarları için aşağıdaki metotlar kullanılabilir.

- i. Dikey berkitmeler kullanmak,
- ii. Yatay berkitmeler kullanmak,
- iii. Yanal takviye eklemek,
- iv. Alt başlığa bayrak eklemek,
- v. Üst başlığa bayrak eklemek,
- vi. Kirişi köprü makası şeklinden yeniden düzenlemek,
- vii. Yeni kolonlar inşa etmek.

BÖLÜM 3

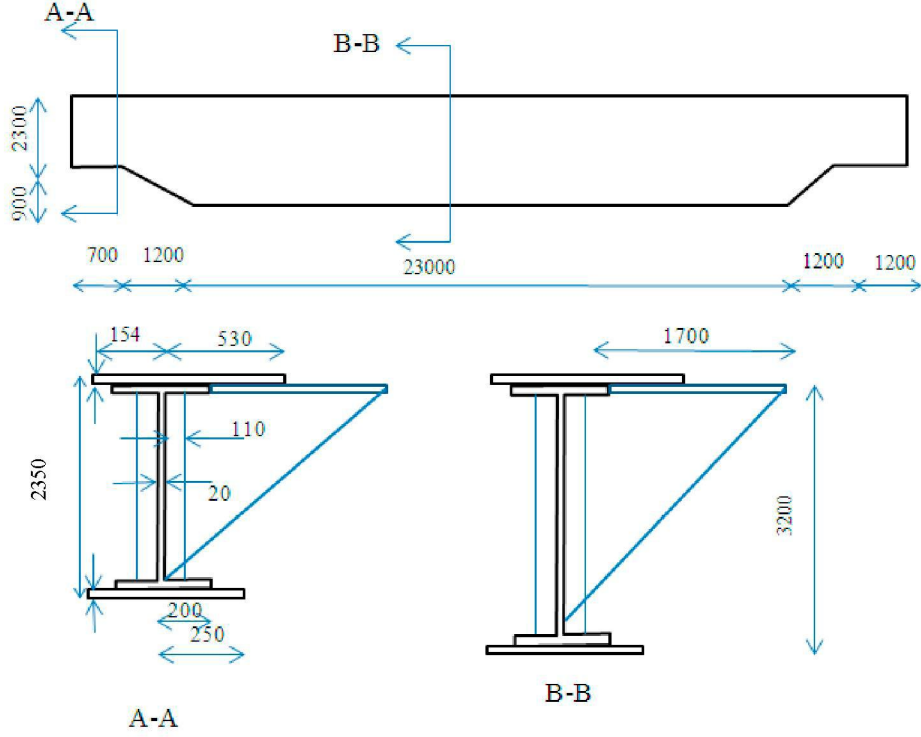
SAYISAL UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde bir fabrika içerisindeki mevcut bir krenin üretim artışına bağlı kapasitesinin arttırılmasından dolayı kren kirişinin güçlendirilmesi öncesi ve güçlendirme sonrası detaylı analizi yapılmaktadır. Kren, 1965 yılından 1993 yılına kadar hizmet vermiş, 1993 yılındaki modernizasyon nedeni ile güçlendirilmiş 2009 yılına kadar hizmetini sürdürmüştür. Bina kesiti Şekil 3.1, vinç özellikleri Çizelge 3.1 ve zaman içindeki yükleme bilgileri Çizelge 3.2’de verilmektedir.



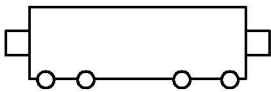
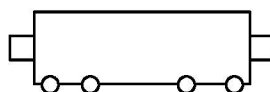
Şekil 3.1 Bina kesitleri.

Analiz için açıklığı en fazla olan C-D aksları arasındaki kiriş seçilmiştir. Kirişe ait kesit özellikleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Kiriş kesit özellikleri.

Çizelge 3.1 Kren özellikleri.

	Güçlendirme Öncesi (150 Ton)	Güçlendirme Sonrası (165 Ton)
Arabanın Ağırlığı (ton)	53	53 +6
Teker Sayısı ve Tekerler Arası Mesafe (mm)	8 1200 ; 9540 ; 1200 	8 1200 ; 9540 ; 1200 
Toplam Kanca Yüğü Kapasitesi (ton)	150 (Ana) 40 (İkinci)	165 (Ana) 40 (İkinci)
Köprü Ağırlığı (ton)	62	62+26
Kren Test Yüğü (ton)	225 187.5	225 187.5
Kren Hızı (m/dak)	49	49
Toplam Kren Yüğü	113	113
Maksimum Teker Yüğü	56	61.2

Güçlendirme sonrasında kren kapasitesi 150 tondan 165 tona çıkartılmış, tekerlerinden kiriş aktarılan yük 56 tondan 61.6 tona çıkmıştır. Yükleme bilgileri üretim verileri baz alınarak hesaplanmıştır. Senelik toplam ve birikmiş toplam sefer sayıları dolayısıyla yükleme sayıları Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Yükleme bilgileri.

Yıl	Yıllık Yükleme Sayısı (N)	Kümülatif Toplam	Yıl	Yıllık Yükleme Sayısı (N)	Kümülatif Toplam
1965	1307	1307	1991	16216	230003
1966	2707	4013	1992	15082	245085
1967	3720	7733	1993	14681	259766
1968	4553	12286	1994	16437	276202
1969	4889	17176	1995	17782	293985
1970	5854	23030	1996	21343	315328
1971	4063	27093	1997	23369	338697
1972	6733	33827	1998	21975	360672
1973	4764	38591	1999	22460	383132
1974	6799	45389	2000	20656	403788
1975	6937	52326	2001	25625	429413
1976	7061	59387	2002	24927	454340
1977	5196	64583	2003	26578	480918
1978	5666	70249	2004	26074	506992
1979	7439	77687	2005	26666	533658
1980	7439	85126	2006	26958	560616
1981	7668	92794	2007	26778	587394
1982	9221	102015	2008	26825	614219
1983	12275	114290	2009	31972	646191
1984	12275	126565			
1985	12615	139180			
1986	12620	151800			
1987	13151	164951			
1988	15129	180079			
1989	16780	196859			
1990	16928	213787			

3.1 KREN KİRİŞİNE TESİR EDEN YÜKLERİN BULUNMASI

Maksimum gerilme değerleri en büyük teker yükleri baz alınarak hesaplanmaktadır. Bundan dolayı öncelikle teker yükleri hesaplanmıştır. Maksimum teker yükleri sayısal olarak hesaplanacağı gibi kren kiriş bilgilerini veren ilgili tablodan da alınabilir.

3.1.1 Güçlendirme Öncesi Teker Yükleri

Kren ve taşıdığı yükün ağırlığı tekerler ve ray vasıtası ile kirişe aktarılır. Kren teker yükleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Tekerlerden kirişe aktarılan yük, düşey, yatay ve boyuna olmak üzere üç farklı ekseninde etki eder. Üç farklı ekseninde etki eden ve hesaplarda kabul edilen teker yükleri burada hesaplanmaktadır.

Düşeyde tesir eden kuvvet, darbe etkisi nedeni ile teker yükünün %25 oranında artırılması ile elde edilmektedir. Yanal etki, kaldırılan yükün %20’si, boyuna tesir eden yük ise teker yükünü %10’dur.

$$P_{\max}=56 \times 1.25=70 \text{ tf}$$

Yanal İtke Kuvvetleri = Kaldırılan yükün %20’sidir.

$$V_{\max}=[53+150] \times 0.2 \times \frac{1}{8}=5.1 \text{ tf/teker}$$

Çekiş Yüğü = Maksimum teker yükünün %10’udur.

$$N_{\max}=70 \times 0.1=7 \text{ tf/teker}$$

3.1.2 Güçlendirme Sonrası Kren Teker Yükleri

Güçlendirme sonrası kren teker yükleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Düşey yük darbe etkisi nedeni ile %25 oranında arttırılmaktadır. Yanal etki, kaldırılan yükün %20’si boyuna tesir eden yük ise teker yükünü %10’dur.

$$P_{\max}=1.25 \times 61.2=76.5 \text{ tf}$$

Yanal İtke Kuvvetleri = Kaldırılan yükün %20’sidir.

$$V_{\max}=(53+165) \times 0.2 \times \frac{1}{8}=5.6 \text{ tf/teker}$$

Çekiş Yüğü = Maksimum teker yükünün %10’udur.

$$N_{\max}=76.5 \times 0.1 = 7.7 \text{ tf/teker}$$

Çizelge 3.3’de modernizasyon öncesi ve sonrası tekerlerden kirişe etki eden yükler özet olarak verilmektedir.

Çizelge 3.3 Maksimum teker yükleri.

	Modernizasyon Öncesi	Modernizasyon Öncesi
$P_{\max, \text{düşey}} \text{ (tf)}$	70	76.5
$V_{\text{yanal}} \text{ (tf)}$	5.1	5.6
$N \text{ (tf)}$	7	7.65

3.1.3 Kiriş Kendi Ağırlığı

Kiriş ray, cıvata ve teşkil edildiği plakaların ağırlığı nedeni ile kendi yayılı ağırlığının etkisindedir.

Toplam yayılı yük şu şekilde hesaplanır.

$$q_{\text{kiriş}} = 0.816 \text{ tf/m}, \quad q_{\text{ray}} = 0.101 \text{ tf/m}, \quad q_{\text{cıvata}} = 0.103 \text{ tf/m}$$

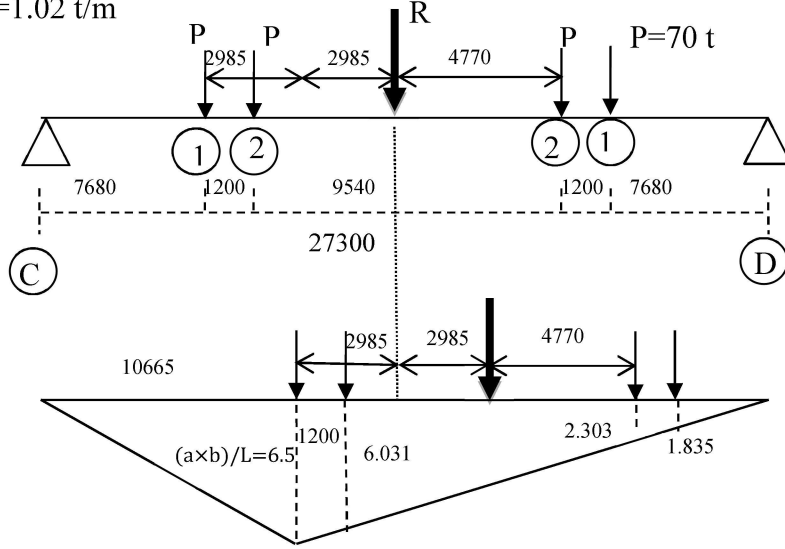
$$q = q_{\text{kiriş}} + q_{\text{ray}} + q_{\text{cıvata}}$$

$$q = 0.816 + 0.101 + 0.103 = 1.02 \text{ tf/m}$$

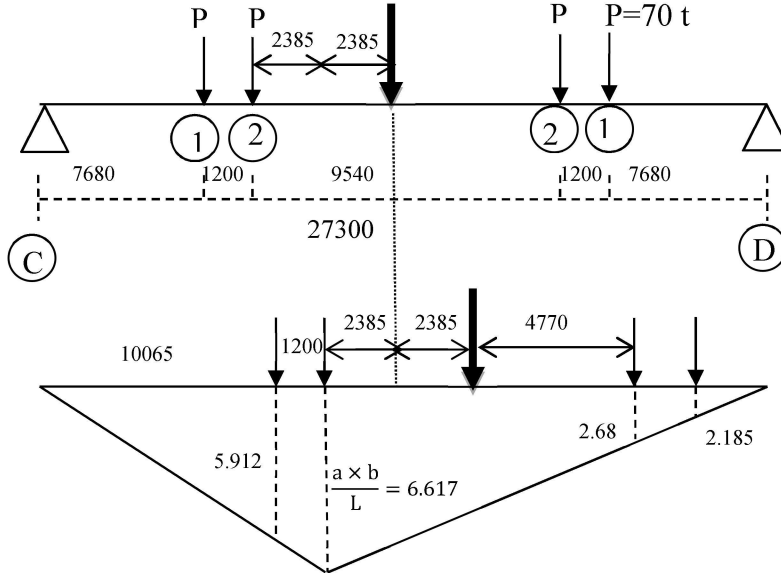
3.1.4 Maksimum Moment Noktasının Tespit Edilmesi

Maksimum moment değeri bulunurken tesir çizgileri yöntemi kullanılmıştır. Maksimum moment teker yüklerinin birinin altında olacaktır. Yapılan hesaplarda 2 no’lu tekerin mesnetten 11.265 m. uzakta olduğu durumda, 2 no’lu tekerin olduğu yerde maksimum moment oluşmaktadır (Şekil 3.3).

$q=1.02 \text{ t/m}$



a) '1' noktası için maksimum moment hesabı



b) '2' noktası için maksimum moment hesabı

Şekil 3.3 Maksimum moment tespiti.

$$M_1 = P \times 6.50 + P \times 6.03 + P \times 2.30 + P \times 1.84 + q \times \frac{27.3 \times 6.5}{2} = 1257 \text{ tfm}$$

$$M_2 = P \times 5.912 + P \times 6.617 + P \times 2.68 + P \times 2.185 + q \times \frac{27.3 \times 6.617}{2} = 1310 \text{ tfm}$$

Maksimum moment ikinci durumda '2' noktasında mesnetten 11.625 m uzakta oluşur.

Çizelge 3.4’de kiriş gövdesinde maksimum eğilme momentlerini ve kesme kuvvetini veren yükleme durumları ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.4 Modernizasyon öncesi C-D aksları arası maksimum momentlerin tespiti.

DURUM	YERLEŞİM	$M_{x,y}$ - maks (tfm)
Kren çalışırken Y eksenindeki maksimum moment	$q=1.02 \text{ tf/m}$	$M_x = 1310 \text{ tfm}$
Kren çalışırken X eksenindeki maksimum moment		$M_y = 97.4 \text{ tfm}$
Kren çalışırken maksimum mesnet reaksiyonları (X ekseninde)	$q=1.02 \text{ tf/m}$	$V_c = 245.6 \text{ tf}$

Kiriş y-ekseni etrafında etki eden moment kesitte eksenel yüklerin oluşmasına neden olacaktır. Kiriş çaprazlarının gövdeye mesafesi 3m olduğu düşünüldüğünde eksenel kuvvet basitçe aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$P = \frac{M_y}{h} = \frac{97.4}{3} = 32.5 \text{ tf (yanal kuvvetlerin oluşturduğu eksenel kuvvet)}$$

Toplam 4 adet tekerin boyuna oluşturduğu eksenel kuvvet dördünün toplamı şeklinde olacaktır.

$$\sum N = 7 \times 4 = 28 \text{ tf (teker yüklenme nedeni ile oluşan kuvvet)}$$

Rüzgar yükleri de hesaba dahil edilmelidir.

$$P_{\text{rüz}} = \frac{(0.06 \times 3) \times (27.3)^2}{8} = 16.8 \text{ tf (rüzgar yükü } 60 \text{ kg/m}^2, 3\text{m kiriş derinliği)}$$

Çizelge 3.5’de kiriş gövdesinde teker yükleri ve rüzgar yüküne bağlı oluşan x ve y eksenlerine göre eğilme momentleri ile kesme ve eksenel kuvvet değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 Kesite etkiyen yüklerin özet tablosu.

M_x	M_y	$N_{\text{sür}}$	$P_{\text{rüzgar}}$	V_{yanal}
1310 tfm	97.4 tfm	28 tf	16.8 tf	32.5 tf

Çizelge 3.6’da ise modernizasyon sonrasında kiriş gövdesinde maksimum eğilme momentlerini ve kesme kuvvetini veren yükleme durumları ve değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.6 Modernizasyon sonrası C-D aksları arası maksimum momentlerin tespiti.

DURUM	YERLEŞİM	M _{maks}
Kren çalışırken Y eksenini etrafındaki maksimum moment	q=1.02 tf/m P P P P=76.5 tf 10065 1200 9540 1200 5295 27300 C D	M _x = 1425 tfm
Kren çalışırken X eksenini etrafındaki maksimum moment	V V=5.6 tf V V 10065 1200 9540 1200 5295 27300 C D	M _y = 133 tfm
Kren çalışırken mesnet reaksiyonları (X eksenini)	q=1.02 tf/m P P=76.5 tf P P 1200 9540 1200 15360 27300 C D	V _c = 265.9 tf

Kiriş y-ekseni etrafında etki eden momentin kesitte oluşturduğu eksenel kuvvet, toplam boyuna etki eden eksenel kuvvet ve rüzgar yüküne bağlı oluşan kuvvet, modernizasyon öncesinde hesap edildiği gibi hesaplanır.

$$P = \frac{M_y}{h} = \frac{133}{3} = 44.3 \text{ tf (yanal kuvvetlerin oluşturduğu eksenel kuvvet)}$$

$$\sum N = 7.7 \times 4 = 30.08 \text{ tf (teker sürüklenmesi nedeni ile oluşan kuvvet)}$$

$$P_{\text{rüz}} = \frac{(0.06 \times 3) \times (27.3)^2}{8} = 16.8 \text{ tf (rüzgar yükü } 60 \text{ kg/m}^2 \text{ , 3m kiriş derinliği)}$$

Çizelge 3.7’de modernizasyon sonrasında kiriş gövdesinde teker yükleri ve rüzgar yüküne bağlı oluşan x ve y eksenlerine göre eğilme momentleri ile kesme ve eksenel kuvvet değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 Kesite etkiyen yüklerin özet tablosu.

M_x	M_y	$N_{\text{sür}}$	$P_{\text{rüzgar}}$	V_{yanal}
1425 tfm	133 tfm	30.08 tf	16.8 tf	44.3 tf

3.2 KESİTİN ANALİZİ

Kiriş kesiti Şekil 3.4’deki gibi bir verilmektedir. Kesit, IHE 360 kirişinin yarısından üst başlık ve çeşitli kalınlıklarda çelik plakalar ile alt başlık, gövde, berkitmeler oluşturularak teşkil edilmiştir. Kesit üzerinde belirlenen 5 farklı kritik detay için gerilme değerleri bulunacaktır. Gerilme değerlerinin bulunabilmesi için öncelikli olarak kesitin atalet momentleri, ağırlık merkezi, alanı gibi özelliklerin ve söz konusu bölgelerin mukavemet moment değerleri W_x ve W_y bulunması gerekmektedir.

T-Kesit Özellikleri (üst başlık için kullanılan IHE 360):

$$F=159 \text{ cm}^2 \quad I_x=3390 \text{ cm}^4 \quad I_y=9760 \text{ cm}^4 \quad h=197.5 \text{ cm} \quad e_x=4.1 \text{ cm}$$

Kesit alanı:

$$F=159+70 \times 2.5+292.75 \times 2+40 \times 3+50 \times 2=1139.5 \text{ cm}^2$$

$$\bar{x} = \frac{70 \times 25 \times (35-17)}{1139.5} = 2.3 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} I_{yy} &= (1/12) \times 2 \times 50^3 + 50 \times 2 \times L61^2 + (1/12) \times 3 \times 40^3 + 40 \times 3 \times L61^2 + (1/12) \times 292.75 \times 2^3 + 292.75 \times 2 \times L61^2 \\ &+ 9760 + 159 \times L61^2 + (1/12) \times 2.5 \times 70^3 + 2.5 \times 70 \times (18-2.3)^2 + 2 \times (0) + 2 \times (2 \times (1/12) \times 15 \times 3^3 + 15 \times 3 \times 15.3^2 + \\ &15 \times 2 \times 10.7^2 + 2 \times (1/12) \times 3 \times 15^3 + 15 \times 3 \times (15.4+7.5+2.3)^2 + 15 \times 3 \times (15.4+7.5-2.3)^2) \\ I_{yy} &= 293.277 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

3.2.1 Güçlendirme Öncesi Gerilme Değerleri

Eşitlik (3.1) kullanılarak her bir gerilme bölgesindeki gerilmeler tespit edilir. Yanal kuvvetler ve sürüklenme hareketi neticesinde oluşan eksenel kuvvetlerin basınç başlığı tarafından karşılanacağı varsayılmaktadır.

$$\sigma = M_x / W_x + M_y / W_y + P / A_t + P_b / A_b \quad (3.1)$$

Çizelge 3.5'deki yük değerleri ve (3.1) eşitliği kullanılarak, belirlenen 5 farklı nokta için gerilme değerleri bulunur. Çizelge 3.8'de her bir kritik nokta için gerilme değerleri ve yorulma kategorisi Eurocode ve AISC'ye göre verilmiştir.

Çizelge 3.8 Gerilme bölgelerinde gerilme değerleri.

	W _x	W _y	σ	Detay kategorisi (EUROCODE)	Detay kategorisi (AISC)
1	118.768	3.309	1.35	160	A
2	118.768	8.413	1.32	160	A
3	120.794	9.154	1.30	125	B
4	139.601	34.924	1.14	100	B'
5	106.741	34.924	1.25	100	B'

3.2.2 Güçlendirme Öncesi Yorulma Hesabı

Eurocode-3'e göre '1' noktasının yorulma miktarı (2.48) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$N_i = 5 \times 10^6 \left[\frac{(\Delta \sigma_D / \gamma_{MF})}{\gamma_{FF} \Delta \sigma_i} \right]^3 = 5 \times \left[\frac{(117 / 1.0)}{1.0 \times 135} \right]^3 = 3.22 \times 10^6$$

'1' noktasının 135 MPa gerilme değeri altında dayanabileceği yükleme sayısı 3.22×10^6 'dır.

Kiriş güçlendirileceği zamana kadar 250000 kez yüklendiğinden '1' noktası için yorulma miktarı

$$C = \frac{n_i}{N_i} ; \frac{250000}{3220000} = \%7.8$$

AISC göre '1' noktasının yorulma miktarı (2.40) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{SR} = \left(\frac{327 \times C_f}{N} \right)^{0.333} \geq F_{TH} ; N = \frac{327 \times 2.5 \times 10^{10}}{135^3} = 3.29 \times 10^6$$

'1' noktasının 135 MPa gerilme değeri altında dayanabileceği yükleme sayısı AISC'ye göre 3.29×10^6 Yorulma miktarı Miner kuralı ile aynı şekilde bulunur.

$$C = \frac{n_i}{N_i} ; \frac{250000}{3290000} = \%7.6$$

Diğer noktalar içinde yorulma ömrü ve hasar miktarı benzer yol ile hesaplanır. Seçilen 5 farklı noktaya ait yorulma ömür ve hasar miktarları Çizelge 3.9'da verilmektedir.

Çizelge 3.9 Eurocode ve AISC'ye göre hasar oranları.

Kritik gerilme bölgeleri		σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	Açıklama
Gerilme Değerleri		135	132	130	114	125	Kritik gerilme bölgelerinde maksimum gerilme genlikleri
Eurocode Sınıflandırması	σ_C	160	160	125	100	100	Detay Kategorisi
	σ_D	117	117	93	74	74	Sabit yorulma limiti için gerilme genliği $N=5 \times 10^6$
	σ_L	64	64	51	40	40	Kesme limiti için gerilme genliği $N=1 \times 10^8$
Dayanabileceği çevrim sayısı	$N_D (10^6)$	3.22	3.47	1.82	1.36	1.04	Gerilme bölgesinin dayanabileceği yükleme çevrimi
Hasar Oranı(%)	N_i/N_D	7.8	7.2	13.7	18.3	24.0	Gerilme bölgesinin % hasarı N_i/N_D
AISC Sınıflandırması	Detay	A	A	B	B'	B'	Detay Kategorisi
	F_{TH}	165	165	110	83	83	Gerilme genlik eşik değeri
	$C_f (10^9)$	25	25	12	6.1	6.1	Detay yorulma sabiti
Dayanabileceği çevrim sayısı	$N_i (10^6)$	3.29	3.54	1.78	1.34	1.02	Gerilme bölgesinin dayanabileceği yükleme çevrimi
Hasar Oranı(%)	N_i/N_D	7.6	7.1	14.1	18.6	24.4	Gerilme bölgesinin % hasarı N_i/N_D

3.2.3 Güçlendirme Sonrası Gerilme Değerleri

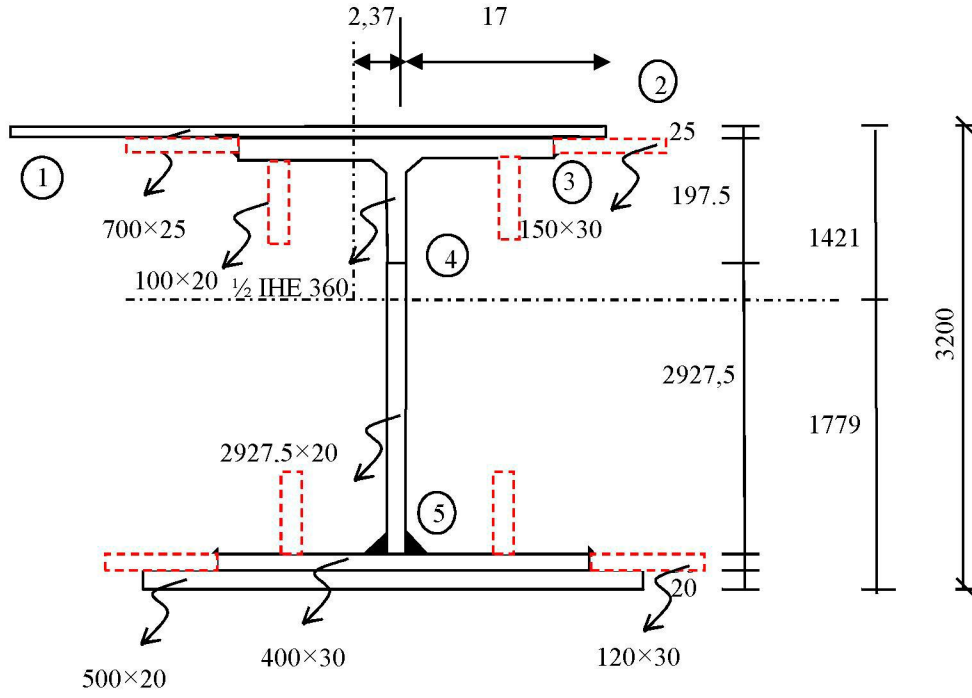
Kren kapasitesinin artırılması ile beraber kren başlık plakalarına Şekil 3.5’de kesikli çizgiler ile belirtilen ilave plakalar ile güçlendirme yapılmaktadır.

T-Kesit Özellikleri(üst başlık için kullanılan IHE 360):

$$F=159 \text{ cm}^2 \quad I_x=3390 \text{ cm}^4 \quad I_y=9760 \text{ cm}^4 \quad h=197.5 \text{ cm} \quad e_x=4.1 \text{ cm}$$

Kren Kiriş Özellikleri:

$$F=159+70 \times 2.5+292.75 \times 2+40 \times 3+50 \times 2+12 \times 2 \times 2+15 \times 2 \times 2+10 \times 2 \times 4=1327.5 \text{ cm}^2$$



Şekil 3.5 Güçlendirilmiş kesit.

$$\bar{y} = \frac{50 \times 2 \times 1 + 40 \times 3 \times 3.5 + 292.75 \times 2 \times 151.38 + 159 \times 313.4 + 70 \times 2.5 \times 318.75 + 2 \times 12 \times 3 \times 3.5 + 2 \times 10 \times 2 \times 10 + 2 \times 10 \times 2 \times 309.5 + 2 \times 15 \times 3 \times 315.8}{1327.5} = 177.9 \text{ cm}$$

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \times 50 \times 2^3 + 176.9^2 \times 100 + \frac{1}{12} \times 40 \times 3^3 + 40 \times 3 \times (177.9 - 3.5)^2 + \frac{1}{12} \times 2 \times 292.75^3 + 2 \times 292.75 \times (177.9 - 151.38)^2 + 3390 + 159 \times (313.4 - 177.9)^2 + \frac{1}{12} \times 70 \times 2.5^3 + 70 \times 2.5 \times (318.75 - 177.9)^2 + 2 \times \frac{1}{12} \times 12 \times 3^3 + 12 \times 3 \times (177.9 - 3.5)^2 + 2 \times \frac{1}{12} \times 2 \times 15^3 + 2 \times 15 \times 2 \times (177.9 - 8)^2 + 2 \times \frac{1}{12} \times 15 \times 3^3 + 2 \times 15 \times 3 \times (142.1 - 4)^2 + 2 \times \frac{1}{12} \times 2 \times 15^3 + 2 \times 2 \times 15 \times (142.1 - 10.5)^2 =$$

$$I_{xx} = 22.400.048 \text{ cm}^4$$

$$x = \frac{70 \times 25 \times (35 - 17)}{1327.5} = 2.37 \text{ cm}$$

$$I_{yy} = 293.268 \text{ cm}^4$$

Çizelge 3.10'da belirlenen 5 farklı kritik nokta için gerilme değerleri ve detay kategorileri verilmektedir.

Çizelge 3.10 Güçlendirme sonrası gerilme bölgeleri gerilme değerleri.

	W _x	W _y	σ	Detay kategorisi EUROCODE	Detay kategorisi AISC
1	157.683	5.792	1.17	160	A
2	157.683	15.140	1.15	160	A
3	160.508	16.504	1.13	125	B
4	186.967	67.109	1.00	100	B'
5	129.523	67.109	1.12	100	B'

Çizelge 3.11'de 5 farklı noktaya ait güçlendirme sonrası yorulma ömrü, hasar miktarı ve toplam hasar miktarları verilmektedir.

Çizelge 3.11 Eurocode ve AISC ye göre toplam hasar oranı.

Gerilme Bölgesi		σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	Kritik gerilme bölgeleri
Gerilme Değerleri		117	115	113	100	112	Kritik gerilme bölgelerinde maksimum gerilme genliği
Eurocode Sınıflandırması	σ_c	160	160	125	100	100	Detay Kategorisi
	σ_D	117	117	93	74	74	Sabit yorulma limiti için gerilme genliği $N=5 \times 10^6$
	σ_L	64	64	51	40	40	Kesme limiti için gerilme genliği $N=1 \times 10^8$
Dayanabileceği çevrim sayısı	$N_D(10^6)$	5.0	5.0	3.0	2.0	10	Gerilme bölgesi yükleme çevrimi
Hasar Oranı(%)	N_i/N_D	13.0	11.9	23.4	31.8	44.6	Gerilme bölgesinin % hasarı N_i/N_D
AISC Sınıflandırması	Detay	A	A	B	B	D	Detay Kategorisi
	F_{TH}	165	165	110	69	69	Gerilme genlik eşik değeri
	$C_f(10^9)$	25	25	12	4.4	4.4	Detay yorulma sabiti
Dayanabileceği çevrim sayısı	$N_i(10^6)$	5.10	5.39	2.70	1.45	1.04	Gerilme bölgesinin dayanabileceği yükleme çevrimi
Hasar Oranı(%)	N_i/N_D	7.8	7.4	14.8	27.6	38.6	Gerilme bölgesinin % hasarı N_i/N_D
Toplam Hasar (%)	Eurocode	20.8	19.1	37.2	50.1	68.6	
	AISC	15.4	14.5	28.8	46.2	63.0	

3.2.4 Tahkikler

Seçilen kiriş kesitinin güvenli olup olmadığını tespit etmek amacı ile bir takım statik tahkikler ve boyutlandırmalar yapmak gerekmektedir. Bu tahkikler ve boyutlandırmalar başlık plağının burkulma ve yanal burulma tahkikleri ile berkitmelerin boyutlandırılmasıdır.

3.2.4.1 Emniyet Gerilmesi Hesabı

St 37 çeliği için emniyet gerilmesi $\sigma_{em} = 0.6 \times \sigma_a$, bu değer;

$$\sigma_{em} = 2.44 \times 0.6 = 1.44 \text{ tf/cm}^2$$

h/t_g oranına bağlı olarak σ_{em} gerilmesinde azaltma yapılması gerekip gerekmediği kontrol edilmelidir.

$$h/t_g \geq \frac{200}{\sqrt{\sigma_{bem}}} \Rightarrow ; \sigma_{bem}' = \sigma_B \left[1 - 0.0005 \times \frac{A_g}{A_b} \left(\frac{h}{t} - \frac{200}{\sqrt{\sigma_{bem}}} \right) \right]$$

$$\frac{h}{t_g} = \frac{3085}{20} = 154.25 < \frac{200}{\sqrt{1.44}} = 167$$

Olduğundan emniyet gerilmesi azalması yoktur.

3.2.4.2 Başlık Plağı Burulma Tahkiki

Başlık plağında burkulmanın oluşup oluşmayacağını kontrol için (2.6) Eşitlik kullanılmaktadır.

Üst başlık:

$$\frac{b}{t} = \frac{70}{6.5} = 10.8 \leq \frac{25.5}{\sqrt{2.4}} = 16.4 \text{ üst başlıkta burulma yok.}$$

Alt başlık:

$$\frac{b}{t} = \frac{50}{5.0} = 10 \leq \frac{25.5}{\sqrt{2.4}} = 16.4 \text{ alt başlıkta burulmak yok.}$$

3.2.4.3 Yanal Burkulma Tahkiki

Yanal burkulma söz konusu olduğunda kiriş üst kısmı basınç altındaki bir kolon gibi davranış gösterecek. Bu durumda basınç emniyet gerilmesi hesabı için (2.8) ve (2.9) eşitlikleri kullanılmaktadır. Ancak buradan hesaplanan basınç emniyet gerilmesi $0.6 \times \sigma_a$ 'dan küçük olamaz.

Basınç kuvvetinden etkilenen basınç başlığının alan ve atalet moment değerleri şu şekilde bulunmaktadır.

Basınç başlığı alanı:

$$A_b + \frac{1}{6} A_g = 70 \times 2.5 + 4 \times 30.8 + \frac{1}{6} \times (308.5 \times 2) + 2 \times 12 \times 3 + 2 \times 10 \times 2 = 513.3 \text{ cm}^2$$

Basınç başlığı atalet momenti:

$$I_b = \frac{1}{12} \times 2.5 \times 70^3 + 70 \times 2.5 \times 15.63^2 + \frac{1}{12} \times 4 \times 30.8^3 + 30.8 \times 4 \times 2.37^2 + \frac{1}{12} \times \left(\frac{308.5}{6}\right) \times 2^3 + (308.5 \times 2) \times 2.76^2 = 123598.9 \text{ cm}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{123598.9}{401.3}} = 17.6 \quad ; \quad \lambda = \frac{s}{i} = \frac{270}{17.6} = 15.4$$

$$C_b = 1.75 + 1.05 \times \frac{M_1}{M_2} + 0.3 \times \left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \leq 2.3 ; C_b = 1.75$$

$$\lambda_{kr} = \sqrt{\frac{30.000 \times C_b}{\sigma_a}} = \sqrt{\frac{30.000 \times 1.75}{2.4}} = 147.9$$

$$\lambda \leq \lambda_{kr}; \sigma_B = \left[\frac{2}{3} - \frac{\sigma_a \left(\frac{s}{i_y} \right)^2}{9 \times 10^7 \times C_b} \right] \sigma_a \leq 0.6 \sigma_a, \left[\frac{2}{3} - \frac{2.400 \times (15.4)^2}{9 \times 10^7 \times 1.75} \right] \times 2.4 = 1.59$$

$$\sigma = \frac{840.000 \times C_b}{\frac{s \times d}{F_b}} = \frac{840.000 \times 1.75}{\frac{270 \times 308.5}{401.3}} = 5.26$$

σ_B , $0.6 \times \sigma_a$ 'dan büyük olamayacağı için; $\sigma_B = 1.44 \text{ tf/cm}^2$

3.2.4.4 Berkitmeler

Kayma burkulmasının tahkikinde de berkitme bilgilerini ihtiyaç olacağından önce berkitme aralık mesafesine bulmak gerekmektedir. Bunun için (2.26) eşitliği kullanılır. Öncelikle kesme gerilmesi hesaplanır.

Mesnetlerde kesme gerilmesi:

$$\tau = \frac{V}{A_w} = \frac{265.9}{225 \times 2} = 0.59 < 0.4 \times 2.4 = 0.96 \text{ t/cm}^2$$

Mesnetlerde berkitmeler arası mesafe:

$$a = 92 \times \frac{2}{\sqrt{0.59}} = 239 \text{ cm, mesnetlerde berkitmeler arası mesafe 120 cm seçilebilir.}$$

Ara berkitmeler için mesafe (2.25) eşitliği ile bulunur.

$$\frac{a}{h} \leq \left(\frac{260}{h/t} \right)^2 \leq 3.0; \left(\frac{260}{308.5/2} \right)^2 = 2.84$$

$a = 2.84 \times 308.5 = 876 \text{ cm, ara berkitmeler için mesafe 240 cm seçilebilir.}$

3.2.4.5 Kayma Burkulması

Kayma burkulması tahkiki mesnetlerde ve açıklıklarda ayrı ayrı yapılır. Eşitlik (2.16) ve (2.17) ile hesaplanır. Bu eşitliklerde kullanılan katsayıların hesabında ise (2.18-20) eşitlikleri kullanılır.

i) Mesnetlerde kesme emniyet gerilmesi:

$$\frac{a}{h} \leq 1.0 \Rightarrow k = 4.0 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}; \quad k = 4.0 + \frac{5.34}{\left(\frac{120}{225}\right)^2}; \quad k = 4.0 + \frac{5.34}{0.53^2} = 22.8$$

$$C_v < 0.8 \Rightarrow C_v = \frac{3160 \times k}{\sigma_a (h/t)^2}; \quad \frac{3160 \times 22.8}{2.4 \times (225/2)} = 2.37 > 0.8$$

$$C_v > 1.0 \Rightarrow \tau_{em-1} = \frac{C_v \times \sigma_a}{2.89} \leq 0.4 \times \sigma_a; \quad \frac{2.37 \times 2.4}{2.89} = 1.97 \text{ t/cm}^2 > 0.96 \text{ tf/cm}^2$$

$$\tau_{em,mesnet} = 0.96 \text{ t/cm}^2$$

$$\tau = V/A_w = 265.9 / (225 \times 2) = 0.59 < \tau_{em,mesnet} \text{ kayma burkulması gerçekleşmez.}$$

ii) Açıklıkta kesme emniyet gerilmesi;

$$\frac{240}{308.5} = 0.78 < 1.0 \Rightarrow k = 4.0 + \frac{5.34}{0.78^2} = 12.8$$

$$C_v < 0.8; C_v = \frac{3160 \times k}{\sigma_a (h/t)^2}; \quad \frac{3160 \times 12.8}{2.4 \times (308.5/2)^2} = 0.71 < 0.8$$

$$C_v \leq 1.0; \tau_{em} = \frac{\sigma_a}{2.89} \left(C_v + \frac{1 - C_v}{1.15 \times \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \leq 0.4 \times \sigma_a$$

$$\tau_{em,açıklık} = \frac{2.4}{2.89} \left(0.8 + \frac{1 - 0.8}{1.15 \times \sqrt{1 + (0.78)^2}} \right) = 0.75 \text{ t/cm}^2 \leq 0.4 \times \sigma_a = 0.96 \text{ t/cm}^2$$

$$\tau = V/A_w = 269.5/(308.5 \times 2) = 0.44 < \tau_{em,açıklık} = 0.75 \text{ açıklıkta kayma burkulması gerçekleşmez.}$$

3.2.4.6 Berkitmelerin Toplam Alanı

Berkitmeler emniyetli bir şekilde görevlerini yerine getirebilmesi için yapısal açıdan boyutlarının belli bir oranda olması gerekir. Berkitme genişliklerinin bulunabilmesi için eşitlik (2.27) kullanılır.

$$A_{st} = \frac{1-C_v}{2} \left\{ \frac{a}{d_w} - \frac{(a/d_w)^2}{\sqrt{1+(a/d_w)^2}} \right\} \times Y \times D \times d_w \times t_w$$

$$Y=1, D=1, C_v=0.71, a/d_w = 0.78$$

$$A_{st} = \frac{1-0.71}{2} \left\{ 0.78 - \frac{(0.78)^2}{\sqrt{1+(0.78)^2}} \right\} \times 1 \times 1 \times 308.5 \times 2.0 = 26.86 \text{ cm}^2$$

Berkitme genişliği:

$$b = \frac{A_{st}}{2 \times t} = \frac{26.86}{2 \times 2} = 6.72 \text{ cm, kalınlık 2 cm kabulü ile } \square \text{ genişlik 14.4 cm olarak } \square \text{ edilir.}$$

Eşitlik (2.30) verilen kalınlık kriteri de ayrıca sağlanmaktadır.

$$\frac{b}{t} = \frac{14.4}{2} = 7.2 < 16 \text{ uygundur.}$$

Berkitme atalet momentinin $(h/50)^4$ değerinden büyük olması gerekir, berkitmenin atalet momenti I_b ,

$$I_b = (14.4 \times 2 + 2)^3 \times 2 / 12 = 4897 \text{ cm}^4$$

$$I_s = \left(d_w / 50 \right)^4 = (308.5 / 50)^4 = 1449 \text{ cm}^4$$

$I_b > I_s$, sağlanmaktadır.

3.3 ANSYS SONLU ELEMENLAR PROGRAMI İLE YORULMA ANALİZİ

Bu bölümde kren kirişi gelişmiş bir sonlu elemanlar programı olan ANSYS Workbench (Version 11.0) programı ile incelenmiştir. Kiriş modellenirken gövde ve başlık plakaları kabuk eleman, kirişin yatay ekseninde stabilitesini sağlayan çaprazlar çubuk eleman, köşe kaynakları ise katı eleman olarak modellenmiştir. Tüm elemanlar akma dayanımı 250 MPa poisson oranı 0.3, elastisite modeli 200000 MPa olan yapısal çelik olarak tanımlanmıştır. Malzemenin diğer özellikleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Modelin liner elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Kiriş uçlarının üzerine oturduğu kolon bağlantı plakaları ankastre mesnetli, kiriş uçlarında bağlantı cıvata delik yüzeyleri kolon başlığı üzerine ankastre mesnetli olacak şekilde tanımlanmış, kirişe yatayda rijitlik sağlayan yatay çapraz elemanlarının mesnet tarafları basit mesnetli şekilde modellenmiştir. Teker yükleri düşey, yatay ve boyuna yükleri temsil edecek şekilde x, y, z yönünde ve noktasal yük vektörleri olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.7).

☐ Young's Modulus	2,e+005 MPa	
☐ Poisson's Ratio	0,3	
☐ Density	7,85e-006 kg/mm	
☐ Thermal Expansion	1,2e-005 1/°C	
☐ Alternating Stress		
☐ Strain-Life Parameters		
☐ Tensile Yield Strength	250, MPa	
☐ Compressive Yield Strength	250, MPa	
☐ Tensile Ultimate Strength	460, MPa	
☐ Compressive Ultimate Strength	0, MPa	

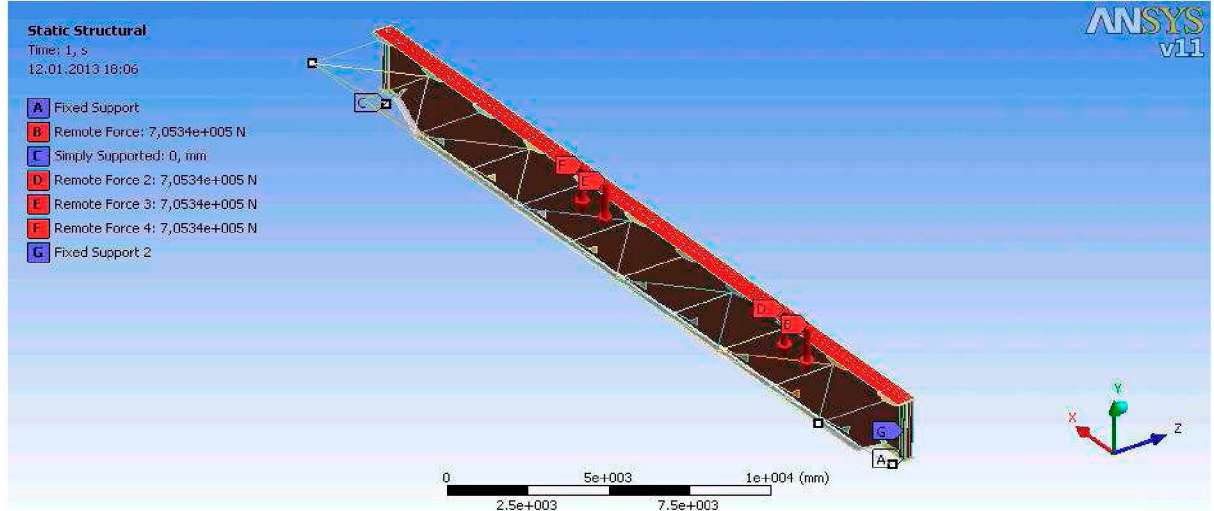
Thermal Add/Remove Properties		
☐ Thermal Conductivity	6,05e-002 W/mm·°C	
☐ Specific Heat	434, J/kg·°C	

Electromagnetics Add/Remove Properties		
☐ Relative Permeability	10000	
☐ Resistivity	1,7e-004 Ohm·mm	

Şekil 3.6 Malzeme özellikleri.

Eleman tipi olarak yüzey elemanları için; Shell 181, çubuk elemanlar için; Beam 188 elemanları Ansys tarafından otomatik olarak atanmıştır. Shell 181 eleman tipi ince ve orta derece kalın malzemeler için uygundur. Bu eleman dört düğüm noktasına sahiptir ve her bir düğüm noktası için x, y, z eksenlerinde ötelenme ve dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Beam 188 eleman türü narin ve orta derecede kalın elemanlar için

kullanılabilir. Bu eleman kesme deformasyon etkilerini dikkate alan Timoshenko kiriş teorisi baz alınarak oluşturulmuştur. Beam 188 elemanı 2 düğüm noktasına, her düğüm noktasında ise x, y, z eksenlerinde ötelenme ve dönme olmak üzere 6 adet serbestlik derecesine ve opsiyonel olarak ilave 1 adet çarpılma serbestlik derecesi olmak üzere toplam 7 serbestlik derecesine sahiptir. Bu eleman liner, büyük deformasyona sahip ve liner olmayan gerinim problemler için uygundur (Ansys Workbench V.12 2009).



Şekil 3.7 Analiz yükleme ve mesnet durumları.

Analizler güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada statik analiz, termal analiz ve yorulma analizi, ikinci aşamada ise güçlendirilmiş kirişin statik, termal ve yorulma analizleri yapılmıştır.

3.3.1 Analiz Yorulma Modülünün Bileşenleri

Ansys yorulma modülü ile analiz yapılırken elde edilecek sonuçlar genel olarak 5 kriter tarafından şekillendirilir. Bunlar;

- Yorulma analiz tipi (Gerilme-Ömür veya Şekil Değiştirme-Ömür analiz tipi seçimi)
- Yükleme tipi (Değişken, Sabit, Orantılı ve Orantısız)
- Ortalama gerilme etkisi (Goodman, Soderberg, Gerber)
- Çok eksenli gerilme düzeltmesi
- Yorulma modifikasyon faktörü

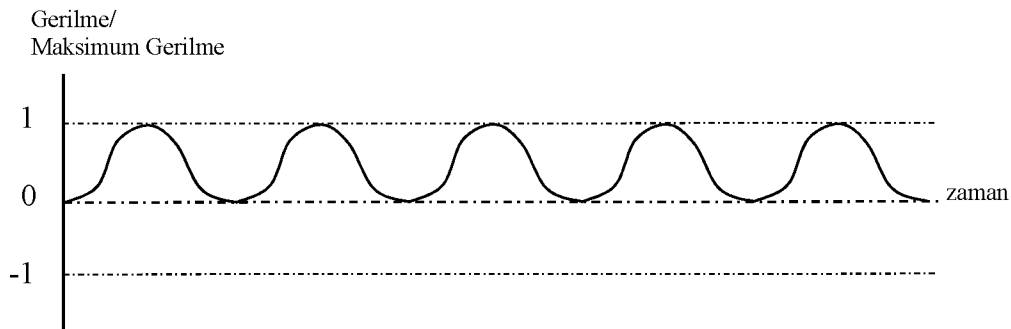
3.3.1.1 Yorulma Analiz Tipi

Bir çok analiz türünü yapmaya imkan sunan Ansys programı içerisinde, analizi yapılan elemanı yorulma yönünden değerlendirmeye imkan sunan yorulma modülü de yer almaktadır. Yorulma analiz modülü, yorulmayı 2 farklı kategoride ele alır. Bunlardan birincisi Gerilme-Ömür(Strees-Life) yaklaşımı şeklinde adlandırılan ve yüksek çevrim sayılı yorulma türleri için geçerli olan yaklaşımdır. Bu yaklaşım çevrim sayısı 10^4 ile 10^9 mertebesindeki yüklemeleri içine alır ve bu yaklaşımın tercih edildiği analizlerde gerilme değerleri malzemenin sınır mukavemetine oranla düşüktür. Bu çalışmada Gerilme-Ömür yaklaşımı tercih edilmiştir. İkinci kategori ise göreceli olarak daha düşük çevrim sayılarının mevcut olduğu durumlar için geçerli olan düşük çevrim sayılı yorulmadır. Düşük çevrim sayılı yorulma durumunda Ansys yorulma modülünün Şekil değiştirme-Ömür (Strain-Life) yaklaşımı tercih edilir.

3.3.1.2 Yükleme Tipi

Tekrarlı yükler sabit genlikli olabildiği gibi değişken genliklere de sahip olabilirler. Ansys ile sabit genlikli orantılı yükleme, sabit genlikli orantısız yükleme, değişken genlikli orantılı yükleme, değişken genlikli orantısız yükleme tiplerinde veya bir yükleme veri dosyası üzerinden yükleme yapmak mümkündür.

Bu tez çalışmasında modele, krenin kren kirişi üzerinde gezinmesi esnasında kiriş tam yüklü durumda olduğundan ve kren farklı bir kiriş üzerinde hareketini devam ettirdiği esnada söz konusu kirişte yükleme durumu sıfır olacağından sabit genlikli taban genlik değeri sıfır olan yükleme uygulanmaktadır (Şekil 3.8).

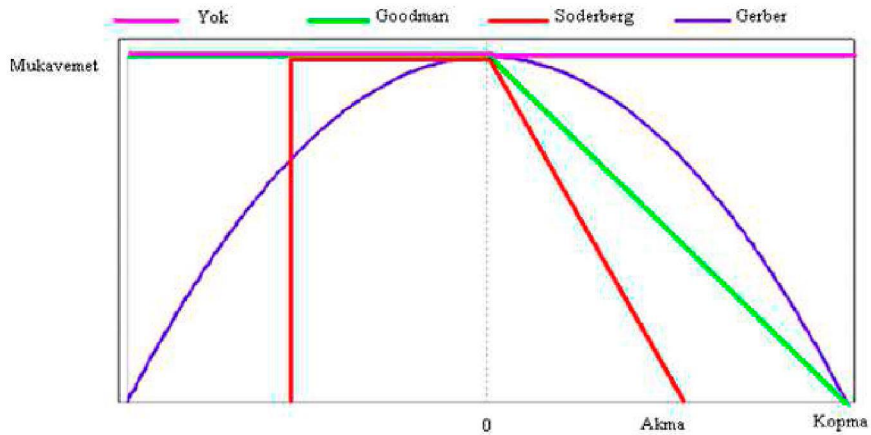


Şekil 3.8 Sabit genlikli taban genliği sıfır olan yükleme durumu.

3.3.1.3 Ortalama Gerilme Etkisi

Yorulma deneyleri genellikle ortalama gerilmenin $\sigma_0=0$ olduğu durumlar için geçerlidir. Oysaki ortalama gerilmenin değiştiği durumlarda genlik gerilmesini dolayısı ile genlik gerilmesine denk gelen çevrim sayısının değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle Ansys farklı ortalama gerilme değerleri için farklı S-N diyagramları tanımlanmasına imkân sağlayarak daha doğru sonuçların ortaya çıkmasına olanak verir.

Ortalama gerilmeleri hesaplamak için Soderberg, Goodman veya Gerber gibi teoriler kullanılır Goodman düşük süneklığe sahip malzemeler için uygundur. Soderberg, Goodman teorisinden daha muhafazakar sonuçlar vermekle beraber bazen gevrek malzemeler için de tercih edilebilir. Gerber ise sünek malzemeler için seçilebilir (Chaush 2008). Bu nedenle analizde Gerber ortalama gerilme teorisi kullanıldı. Gerber ortalama gerilme teorisine ait diyagram ve eşitlik Şekil 3.9’da ve eşitlik (3.2)’de verilmektedir.



Şekil 3.9 Goodman, Gerber, Soderberg ortalama gerilme diyagramı.

$$\frac{\sigma_{\text{genlik}}}{\sigma_{\text{dayanım limiti}}} + \left(\frac{\sigma_{\text{ortalama gerilme}}}{\sigma_{\text{akma gerilme}}} \right)^2 = 1 \quad (3.2)$$

3.3.1.4 Çok Eksenli Gerilme Düzeltme Faktörü

Deneysel veriler genellikle tek eksenli gerilme sonuçlarından ibarettir. Oysa yorulma analizi sonuçları genellikle çok eksenli gerilmelerden oluşmaktadır. Bazı noktalarda gerilmelerin çok

eksenli durumdan tek eksenli duruma dönüştürülmesi gerekir. Von-Mises gerilmesi, maksimum kayma veya farklı gerilme bileşenleri tek eksenli deneysel verilerle karşılaştırılması için kullanılabilir (Chaush 2008).

3.3.1.5 Yük Faktörü

Eğer istenirse girilen bir yükleme ölçek faktör değeri için hem gerilme genlikleri hem de ortalama gerilmeleri ölçüp bu değere göre dengelenebilir. Bu değer statik bir modelin üzerinde değişen ortalama ve gerilme genliklerin şiddetlerini görmek için her defasında çözüm bulmaktan kaçınmak için kullanışlıdır.

3.3.2 Ansys Yorulma Analiz Çıktı Özellikleri

Ansys yorulma modülü analiz edilen parçanın her bölgesinin ayrı ayrı yorulma ömrünü, hasar miktarını ve güvenilirlik durumu hakkında bilgi verebilmektedir. Ayrıca bir yükleme verisi üzerinden analiz yapılması halinde veriler üzerinde yağmur-akış yöntemi ile yükleme matrisi oluşturulabilmektedir.

3.3.2.1 Yorulma Ömrü

Analiz yapıldıktan sonra, analizi yapılan parçanın değişik bölgeleri için muhtemel ömrünü görmek mümkündür. Renklendirilmiş yorulma skalası üzerinde, yorulmadan dolayı parçanın kopacağı ana kadarki çevrim sayılarını gözükmetedir.

3.3.2.2 Yorulma Hasarı

Yorulma hasarı, verilen ömür için yorulma hasarını gösterir. Yorulma hasarı için birden büyük değerler ömür tamamlanıncaya kadar olan hasarları gösterir.

3.3.2.3 Yorulma Güvenlik Faktörü

Yorulma güvenlik faktörü, verilen ömürde parçanın güvenilirliği hakkında bize bilgi verir. Maksimum güvenlik faktörü 15 değeridir ve 1'den küçük olan değerler ömür tamamlanmadan önceki güvensiz bölgeleri temsil eder.

3.3.2.4 İki Eksenlilik Gösterimi

Yorulma ile ilgili malzeme özellikleri tek eksenli gerilmeler altında belirlenir. Bu sonuç kullanıcıya bütün model üzerindeki gerilme durumları ve bunların yorumlanması hakkında bilgi verir. Tek eksenli gerilmeler 0, kayma gerilmeleri -1 ve çift eksenli gerilmeler 1 ile temsil edilir.

3.3.2.5 Yorulma Hassasiyeti

Yorulma hassasiyeti, ömür, hasar ve güvenlik faktörünün yüklemenin bir fonksiyonu olarak kritik bölgelerde nasıl değiştiğini gösterir. Yük değişim limitleri girdi olarak atanabilir.

3.3.2.6 Yağmur-Akış Matrisi

Düzensiz bir yükleme durumu için özel bir işleme ihtiyaç vardır. Düzensiz bir yükleme biçimi için çevrim sayısının saymak yağmur-akış çevrim sayaç metodu ile gerçekleştirilmektedir. Yağmur-akış çevrim sayaç metodu düzensiz bir gerilme verisini yorulma hesaplarında kullanmak için çevrime dönüştürmek için geliştirilen bir tekniktir. Farklı ortalama gerilmelerin ve gerilme genliklerin çevrimlerini sayar daha sonra bu çevrimler kullanılarak yorulma hesabı yapılır.

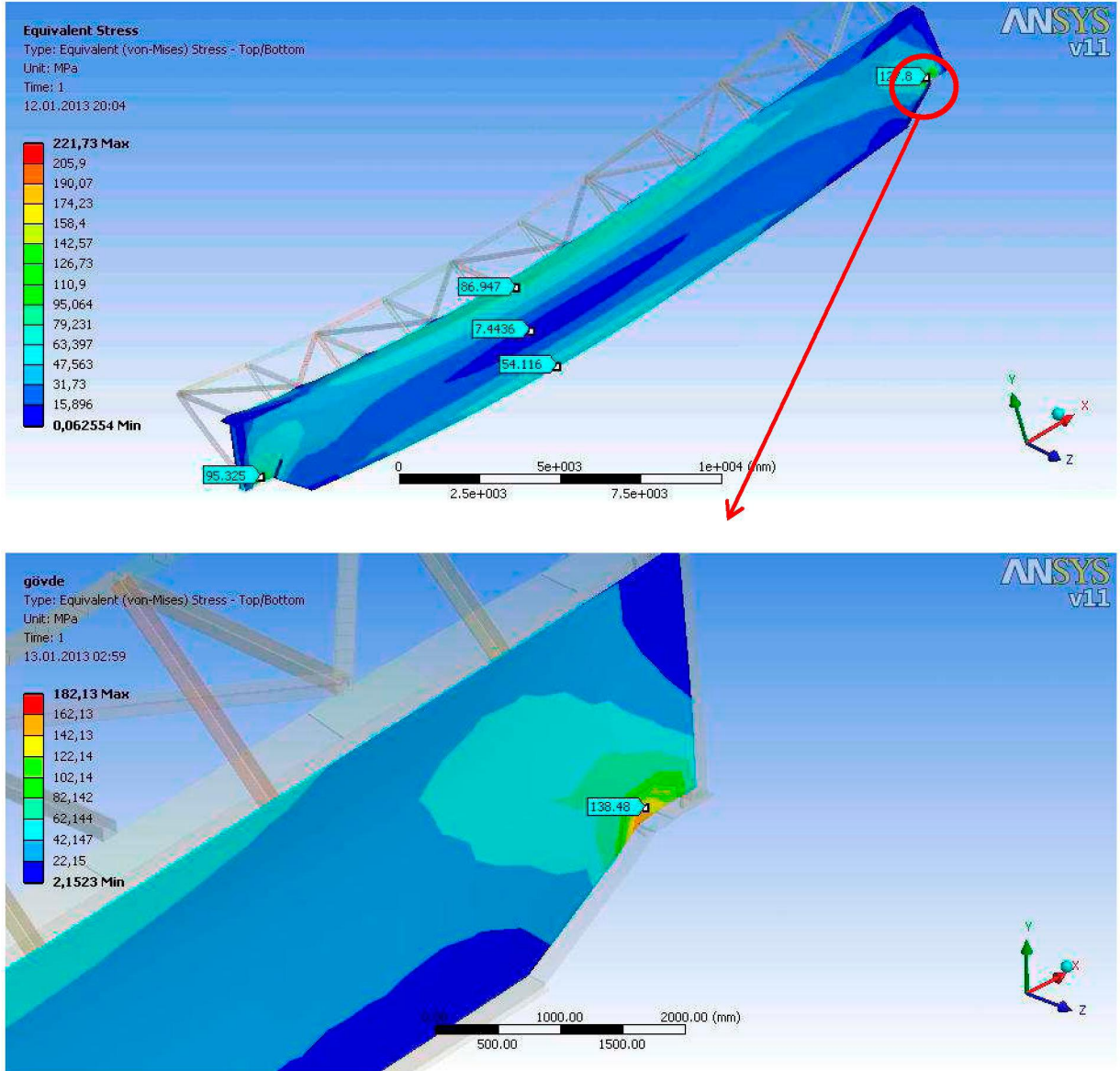
3.4 ANSYS ANALİZ SONUÇLARI

Ansys ile analiz güçlendirme öncesi ve sonrası olmak üzere 2 ayrı kısımda ele alınmıştır. Her bir kısım için statik yapısal analiz, termal analiz, termal etkiye bağlı statik analiz ve hem teker yüklerini hem de termal yükleri içine alan statik analiz yapılmıştır. Kirişin tamamı ve bazı parçalar için eş değer (Von-Mises) gerilmeleri, yorulma ömürleri ve deformasyon sonuçları bulunmuştur.

3.4.1 Güçlendirme Öncesi Ansys Statik Analiz Sonuçları

Güçlendirme öncesi statik yükleme altında kiriş gövdesinde ve kritik bölgelerinde oluşan eş değer gerilme değerleri Şekil 3.10'da görülmektedir. Gövdedeki maksimum gerilme değeri mesnet bölgelerinde oluşmaktadır. Gövdenin bir ucundaki değere 100 MPa iken diğer ucunda 135 MPa'ı bulmaktadır. Gövde ortasındaki gerilmeler mesnetlerde oluşan gerilmelere kıyasla

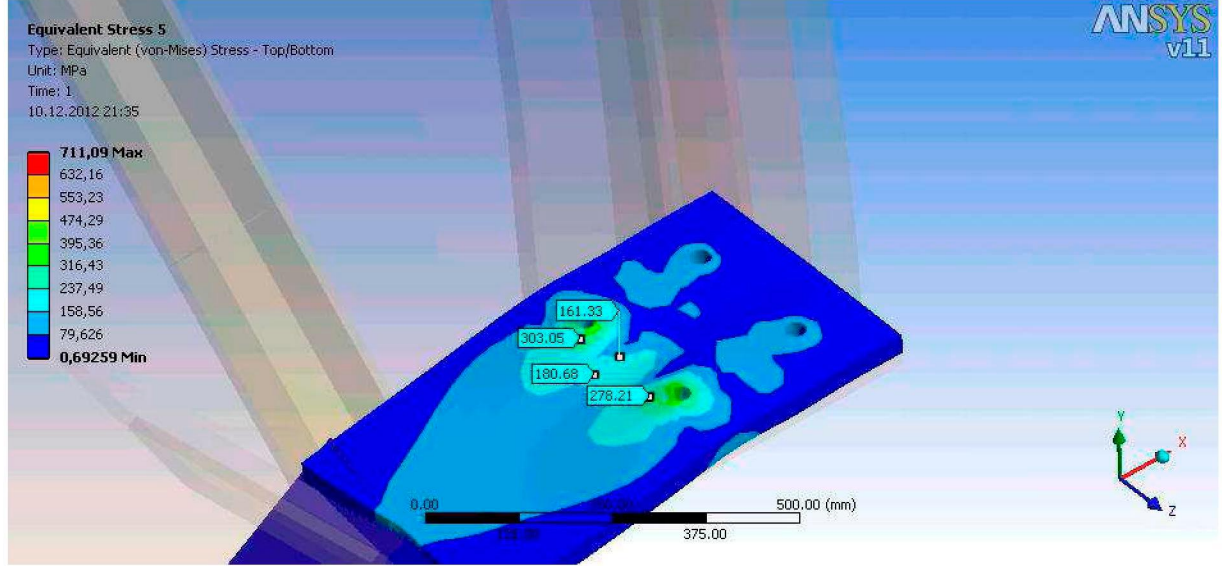
daha küçük değerlerdedir. Ancak gövde ortasında gövdenin başlıklara bağlandığı bölgelerde gerilme değeri bir miktar yüksektir. Gövdenin üst başlığa bağlandığı yerde 72 MPa, alt başlığa bağlandığı bölgede ise 52 MPa'dır. Üst başlıkta maksimum gerilme değerleri ortaya yakın bölgelerdedir ve 86 MPa mertebelerindedir. Kiriş genelinde gerilme değerlerinin güvenli sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.10 Güçlendirme öncesi eş değer gerilmeler.

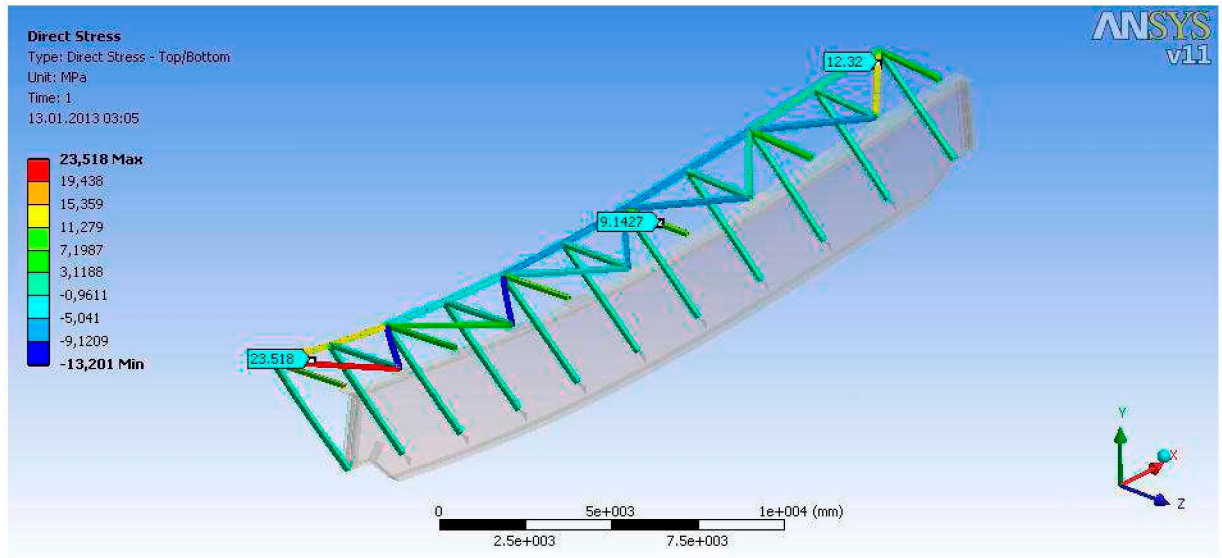
Kirişin kolona mesnetlendiği cıvata delikleri etrafında oluşan gerilmeler Şekil 3.11'de görülmektedir. Bu bölgeler kirişin mesnetlendiği bölgeler olduğundan ve geometri olarak gerilme yoğunluklarının oluşmasına müsait olduğu için yüksek eş değer gerilmeler oluşmaktadır. Gerilme değerlerinin 300 MPa mertebelerine vardığı dolayısıyla bu bölgelerin

kritik bölgeler olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Dolayısıyla gerilme değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisine çekebilmek için ilave önlemler almakta fayda vardır.



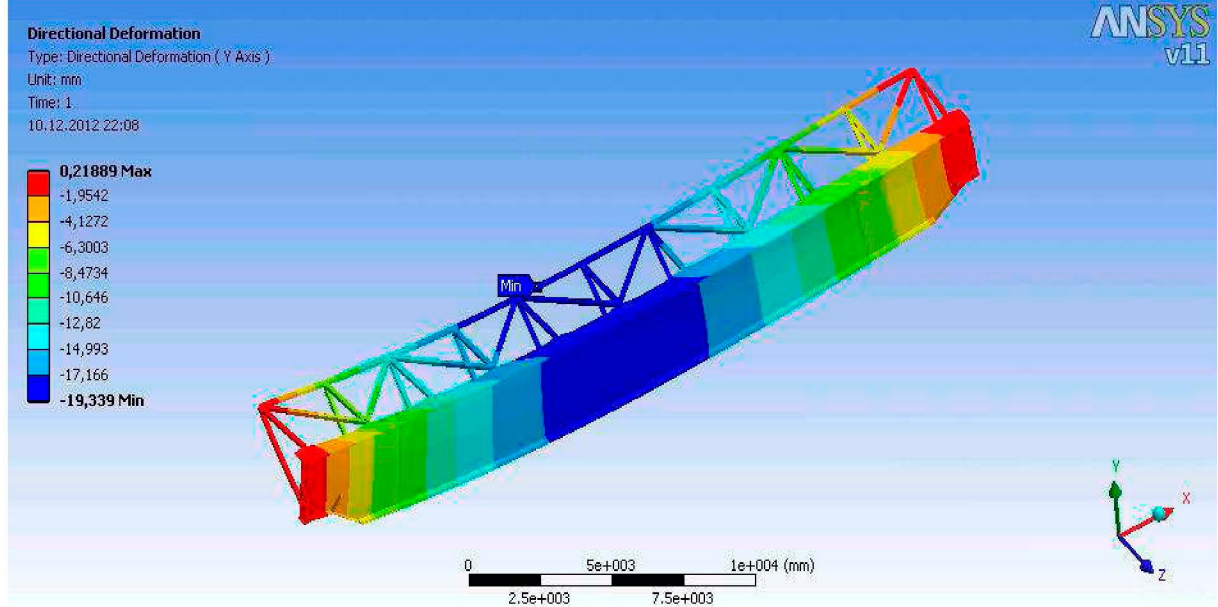
Şekil 3.11 Güçlendirme öncesi mesnet plakalarında oluşan gerilmeler.

Kiriş çaprazlarında maksimum gerilme miktarı 23 MPa olup, kiriş güvenliği yönünden herhangi bir risk teşkil etmemektedir (Şekil 3.12).



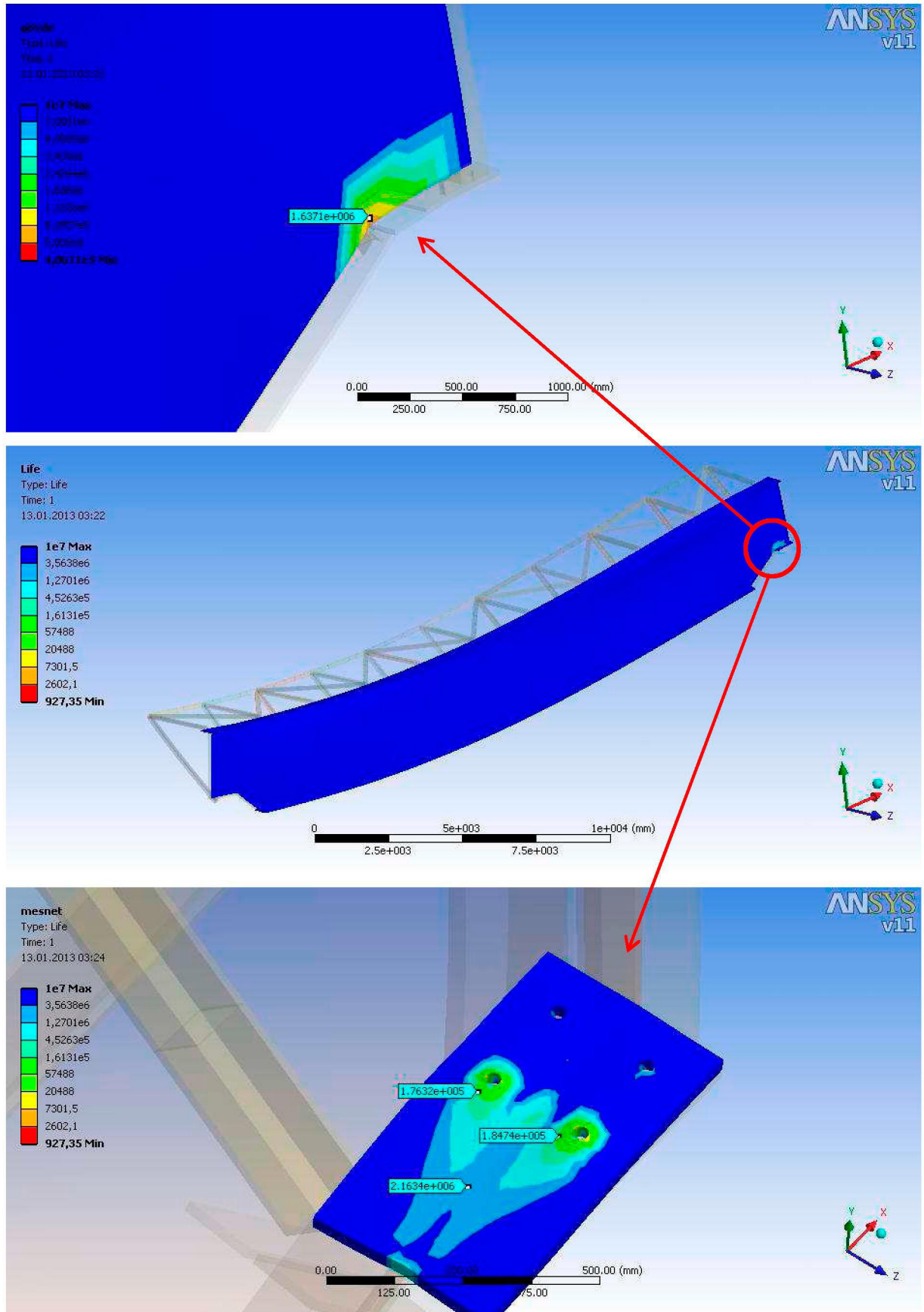
Şekil 3.12 Güçlendirme öncesi kiriş çaprazlarında oluşan gerilmeler.

Kren kirişinin güçlendirme öncesi maksimum düşey deformasyonu 19.34 mm'dir (Şekil 3.13). Bu değer kabul edilebilir sehim sınırı olan “ $L/800$ ” değerinin altındadır. Dolayısıyla kiriş sehim yönünden emniyetlidir denilebilmektedir.



Şekil 3.13 Güçlendirme öncesi deformasyon.

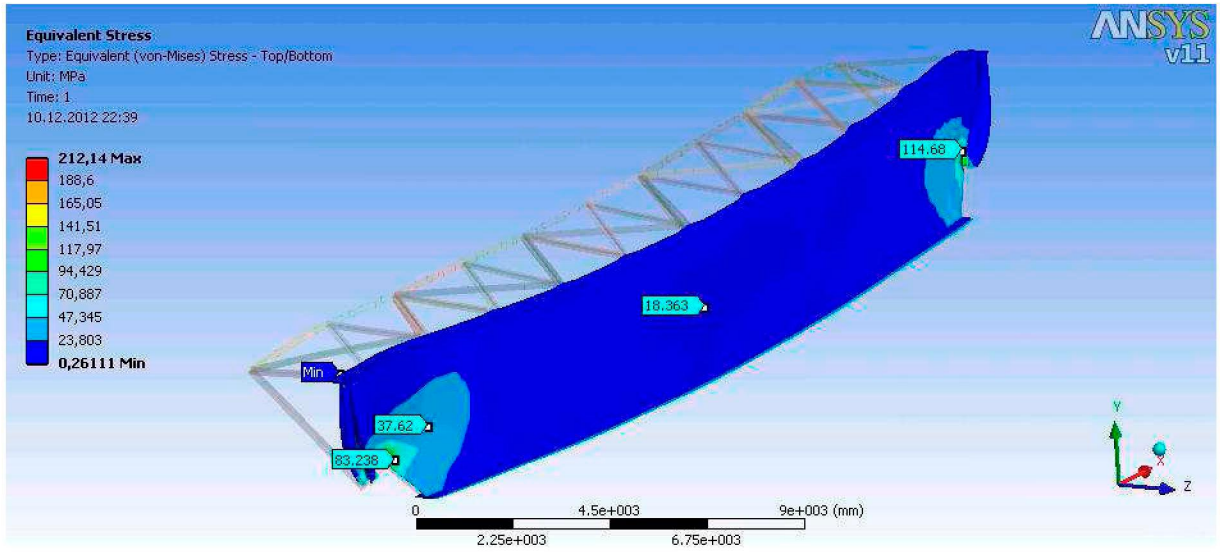
Kiriş kritik yorulma bölgeleri Şekil 3.14’de verilmektedir. Görüldüğü üzere kiriş genelini yorulma yönünden çok fazla kritik bölgeye sahip olmamasına karşın, gerilme yoğunluklarının yüksek olduğu mesnet bölgesinde ve cıvata delikleri çevresinde yorulma ömrü de düşüktür. Kirişin çok büyük bir kısmı 10 milyon çevriminin üzerinde yorulma ömrüne sahiptir. Bununla birlikte gövde uçlarında yorulma ömrü 1.6 milyon mertebelerinde iken, delik çevresinde yorulma ömrü 170000 çevrim sayısına kadar düşmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki; kirişin en kritik bölgesi mesnet bölgeleridir ve gerilme yoğunluklarının düşürülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.14 Güçlendirme öncesi yorulma.

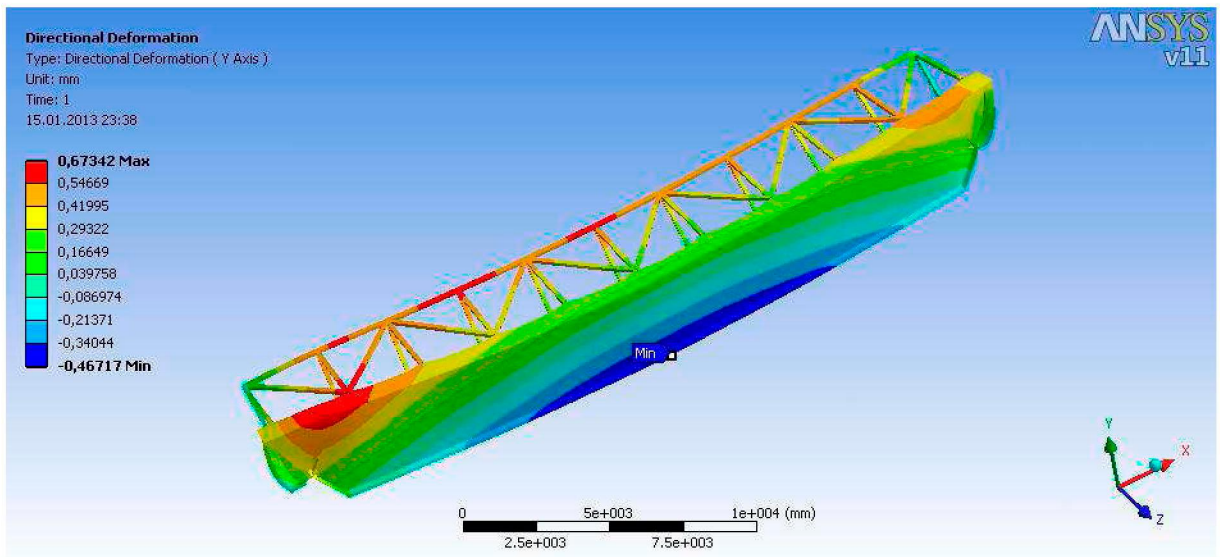
3.4.2 Güçlendirme Öncesi Termal Analiz Sonuçları

Kiriş alt plakasına uygulanan 40°C ısı etkisi sonucunda kiriş gövdesinde dikkate alınması gereken gerilmelerin olduğu görülmektedir (Şekil 3.15). Oluşan gerilmeler teker yükü yüklemesine benzer şekilde mesnetlere yakın bölgelerde yüksek değerdedir. Ancak bu değerler teker yüklemesindeki değerler kadar yüksek olmayıp bir uçta 80 MPa diğer uçta 110 MPa mertebesindedir.



Şekil 3.15 Güçlendirme öncesi termal etki için eş değer gerilmeler.

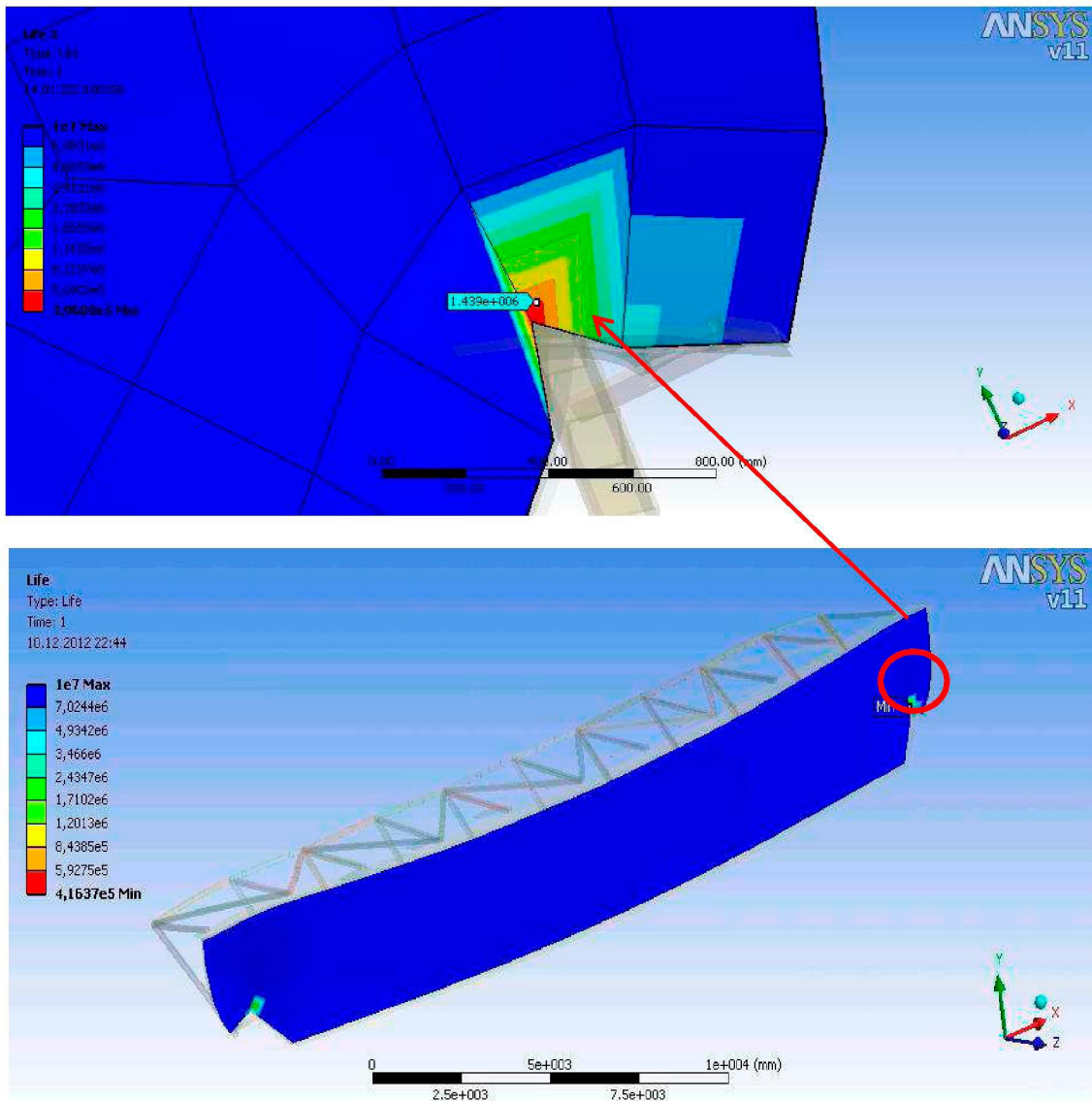
Isı nedeni ile oluşan toplam deformasyon değeri maksimum 0.46 mm'dir (Şekil 3.16).



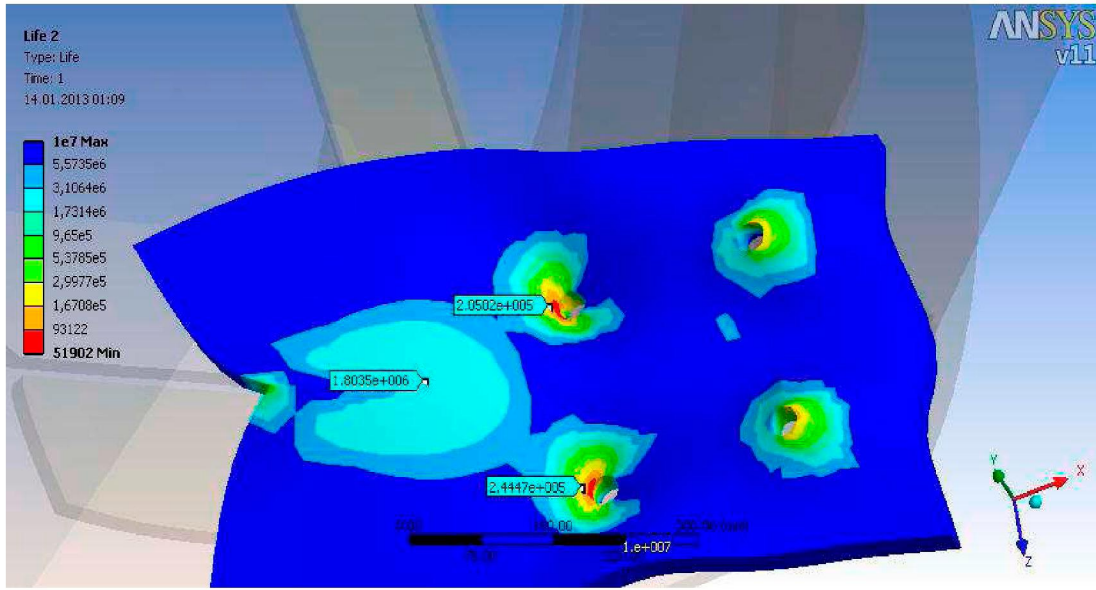
Şekil 3.16 Güçlendirme öncesi termal etki için deformasyon.

Bu sehim miktarı teker yükü yüklemesinde oluşan deformasyona oranla oldukça düşük olup ihmal edilebilir bir değer olarak nitelendirilebilir.

Kiriş alt başlık plakasına uygulanan ve 20°C ile 40°C alçalıp yükselerek değişen termal etki sürekli değişen gerilmeler oluşturarak kirişin yorularak hasarlanmasına neden olabilmektedir. Kiriş gövdesindeki kritik yorulma bölgeleri Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de görülmektedir. Şekil 3.17 ve 3.18’den anlaşılacağı gibi, kiriş gövdesinin uç kısımları ve cıvata delikleri etrafı yorulma yönünden kritiktir. Yorulma ömrü gövde uçlarında 1.5 milyon iken delik çevresinde 200000 çevrime kadar düşmektedir.



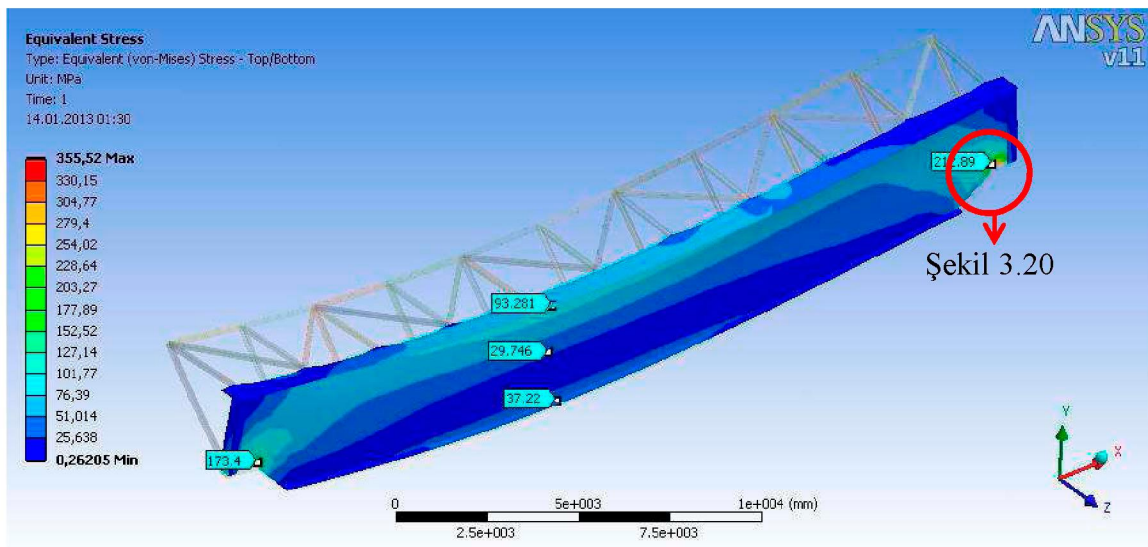
Şekil 3.17 Güçlendirme öncesi termal etki için yorulma.



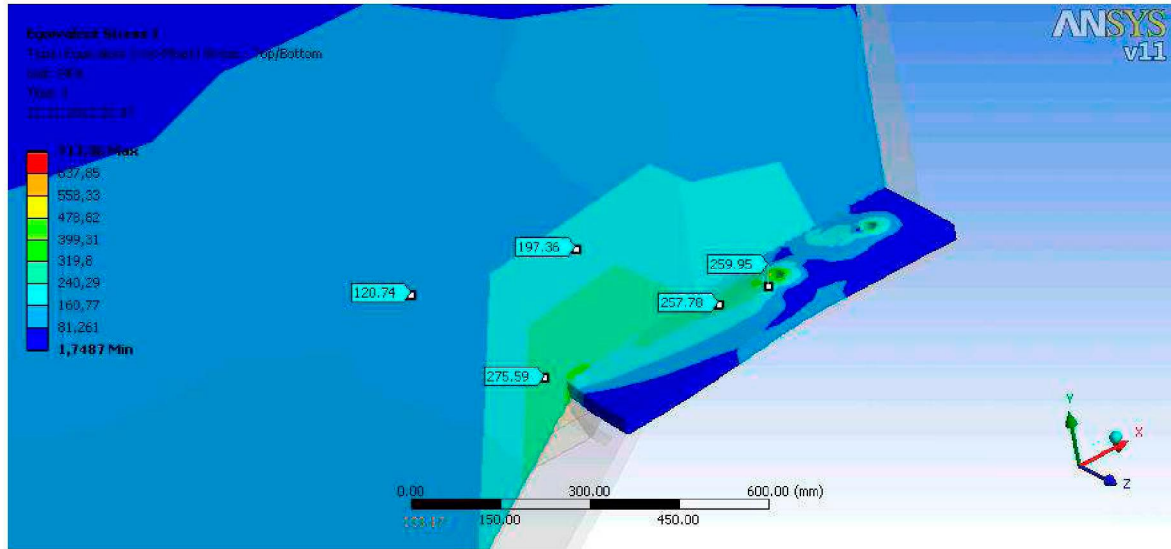
Şekil 3.18 Güçlendirme öncesi termal etki için cıvata delik çevresi yorulma.

3.4.3 Güçlendirme Öncesi Kiriş Analiz Sonuçları

Kren teker yükleri ile termal etkiler aynı statik analiz içerisine dâhil edilerek analiz sonuçları değerlendirildiğine kiriş genelinde gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Eş değer gerilme değerleri kiriş uçlarında 200 MPa değerinin üzerine çıkmaktadır. Kiriş açıklığında ise gerilme değerleri 93 MPa kadar çıkmaktadır. Ancak kiriş alt tarafındaki gerilme değerlerinde bir azalma söz konusudur. Şekil 3.19 ve 3.20’de kirişe ait eş değer gerilme değerleri görülmektedir.

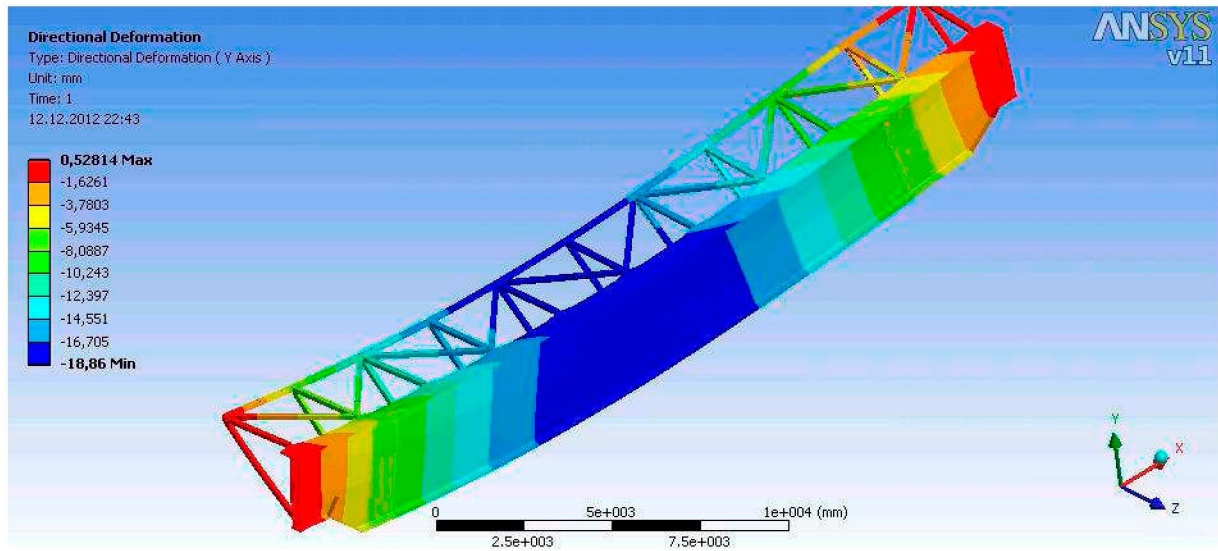


Şekil 3.19 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için eşdeğer gerilmeler.



Şekil 3.20 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için eşdeğer gerilmeler.

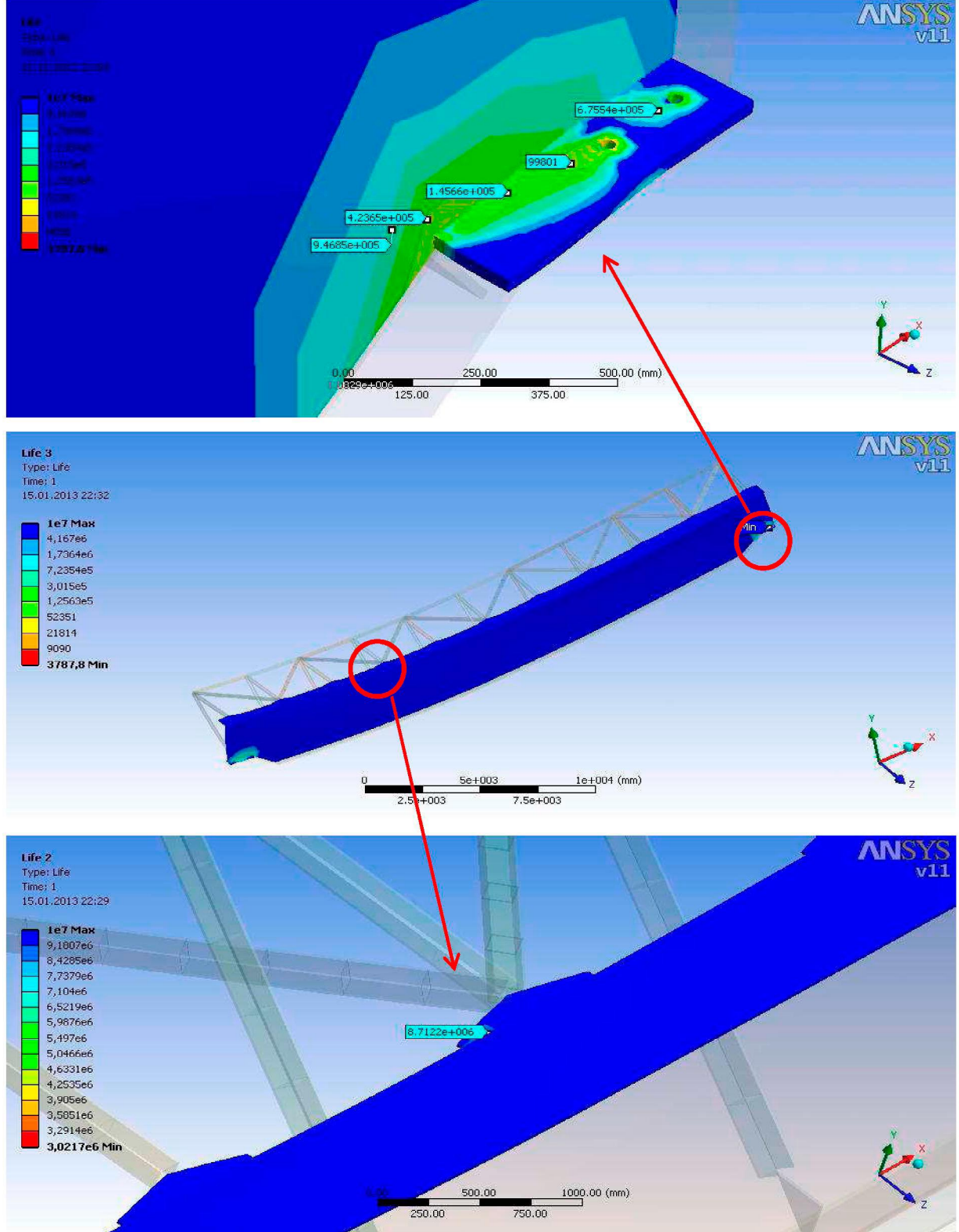
Güçlendirme öncesinde teker yükleri ve termal ekiler aynı anda analize dâhil edildiğinde elde edilen deformasyon değeri maksimum 18,86 mm'dir (Şekil 3.21). Bu değer yalnız teker yükleri dahil edildiğinde ortaya çıkan deformasyondan çok farklı değildir. Termal etkinin deformasyon miktarını çok etkilemediği görülmektedir.



Şekil 3.21 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için deformasyon.

Güçlendirme öncesinde teker yükleri ve termal ekiler aynı anda analize dâhil edildiğinde, kiriş uçlarında yorulma ömrü 400000 çevrim sayısına kadar düşmektedir. Mesnet civata delikleri çevresinde ise yorulma ömrünün 100000 çevrim sayısına kadar düştüğü gözlenmektedir. Teker yükleri ve termal etki aynı anda dâhil edildiğinde mesnet bölgelerindeki kritik yorulma

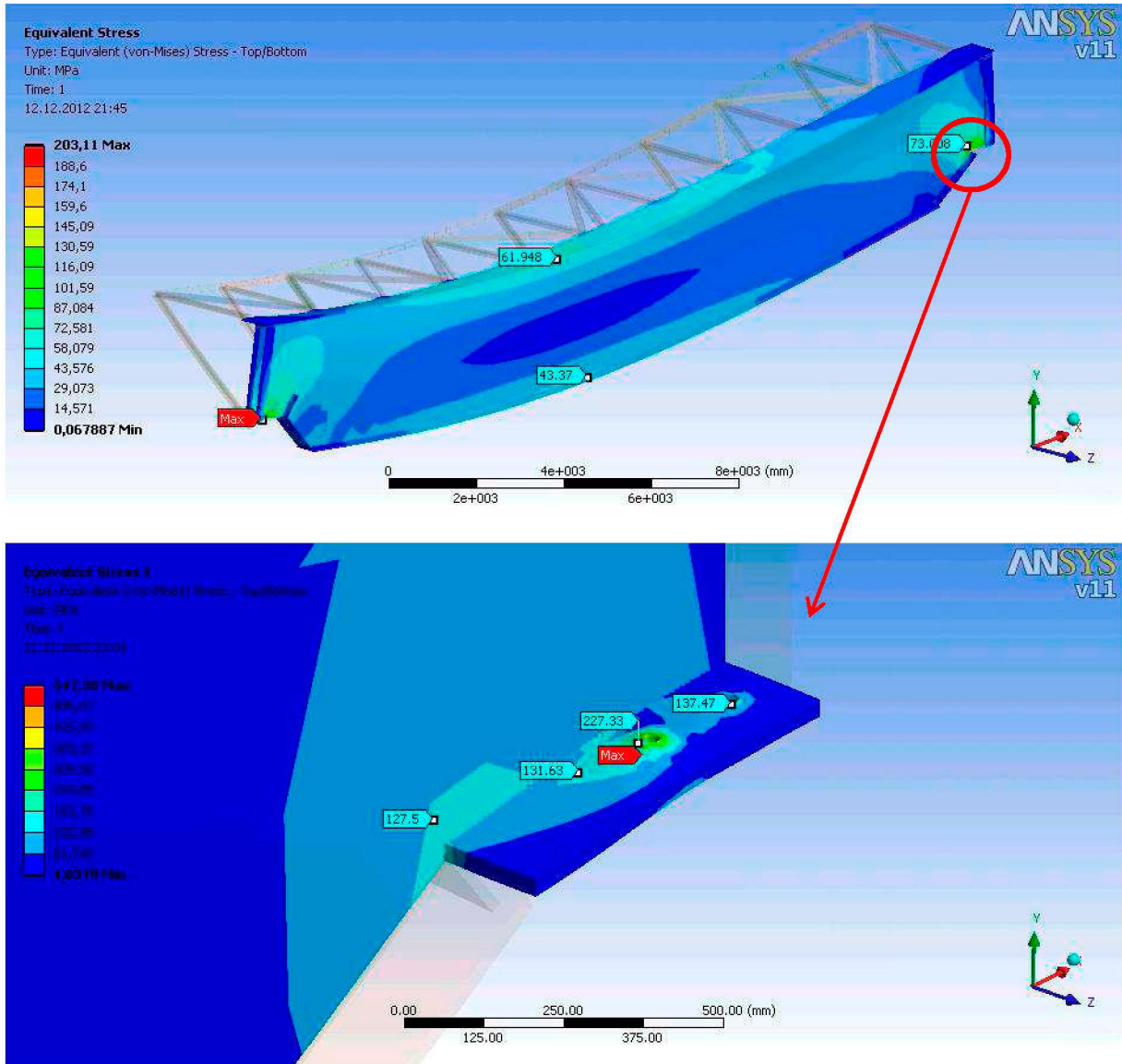
bölgelerine ilave olarak kiriş çaprazlarının üst gövdeye bağlandığı plakalarda da yorulma yönünden kritik bölgelerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.22). Bu bölgede yorulma 8.7 milyon çevrimdir.



Şekil 3.22 Güçlendirme öncesi teker yükleri ve termal etki için yorulma.

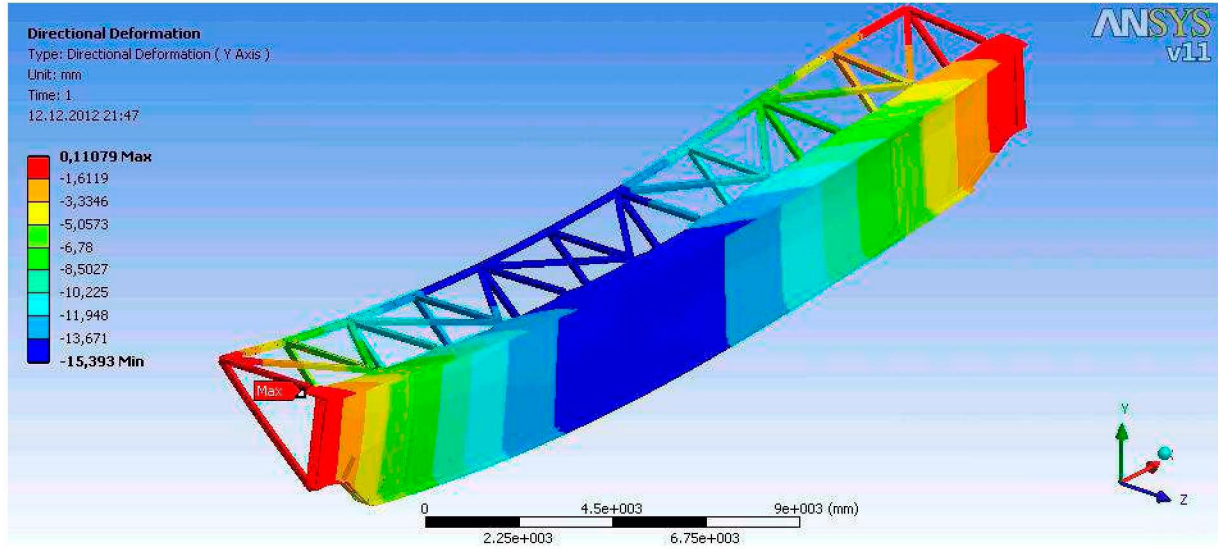
3.4.4 Güçlendirme Sonrası Ansys Statik Analiz Sonuçları

Güçlendirme sonrasında kiriş genelinde eşdeğer gerilme değerlerinde düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni yapılan ilave güçlendirmeler nedeni ile kiriş kesitindeki artıştır. Kiriş gövde uçlarında gerilme değeri 73 MPa, cıvata delikleri etrafında ise 220 MPa bulunmaktadır. Kiriş genelindeki gerilme dağılımı ve mesnet bölgesinde gerilme değerleri Şekil 3.23'de görülmektedir.



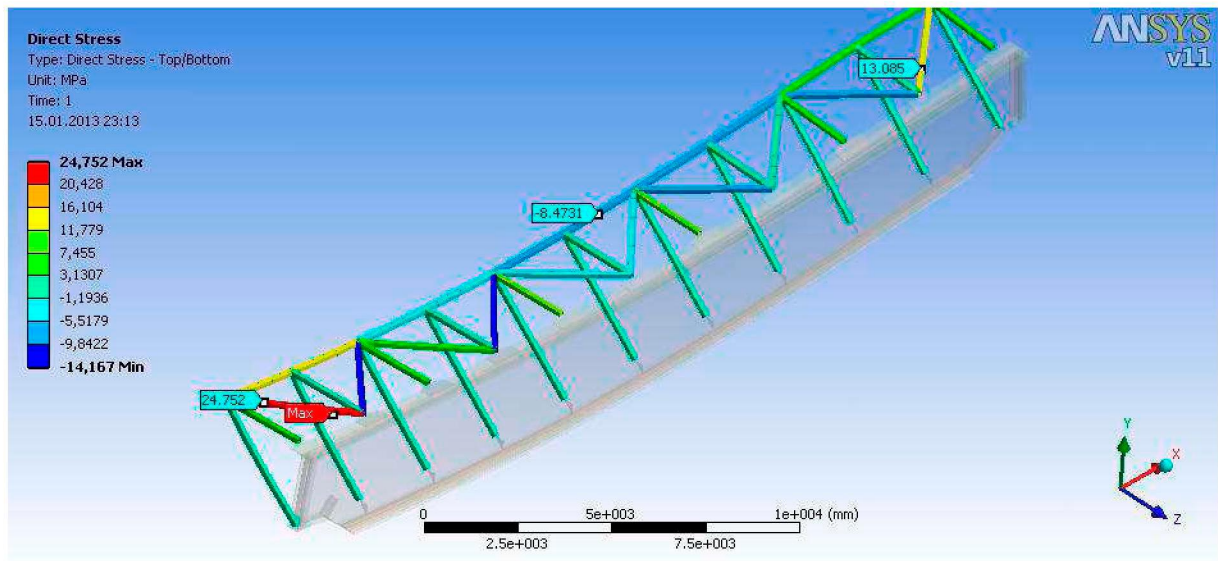
Şekil 3.23 Güçlendirme sonrası eş değer gerilmeler.

Güçlendirme sonrasında kirişin deformasyon miktarını yaklaşık 3 mm kadar azalma meydana gelmektedir ve 15.39mm olarak gerçekleşmektedir (Şekil 3.24). Dolayısıyla kiriş güçlendirme sonrası da sehim kriteri olan “L/800” değerinden küçük olma koşulunu sağlamaktadır.



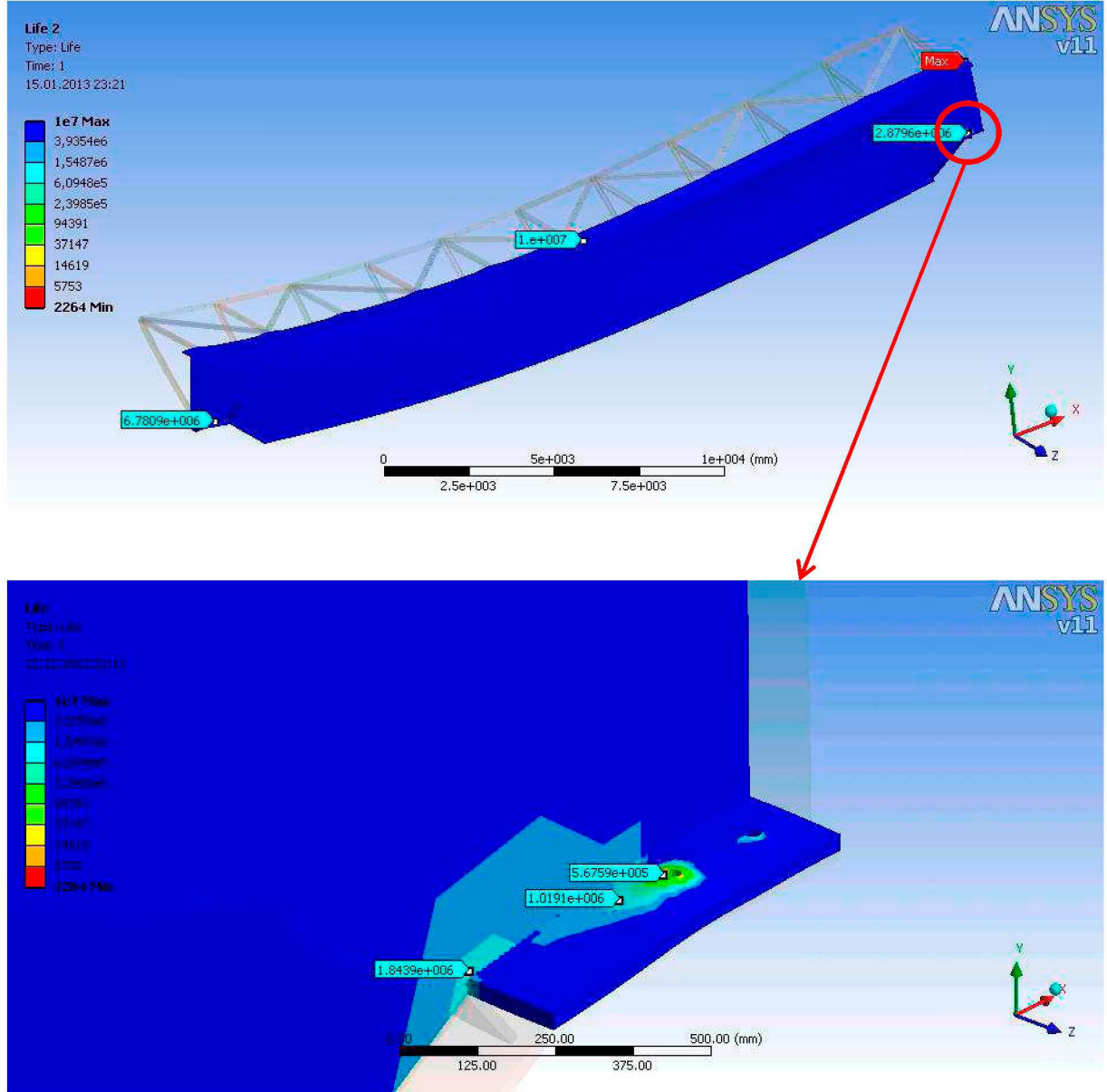
Şekil 3.24 Güçlendirme sonrası deformasyon.

Kiriş yatay rijitliğini artıran çaprazlarda meydana gelen gerilmeler Şekil 3.25’de görülmektedir. Bu gerilmeler kritik değerlerin çok altında olup yorulma yönünden de güvenlidir denilebilmektedir.



Şekil 3.25 Güçlendirme sonrası kiriş çaprazlarında oluşan gerilme.

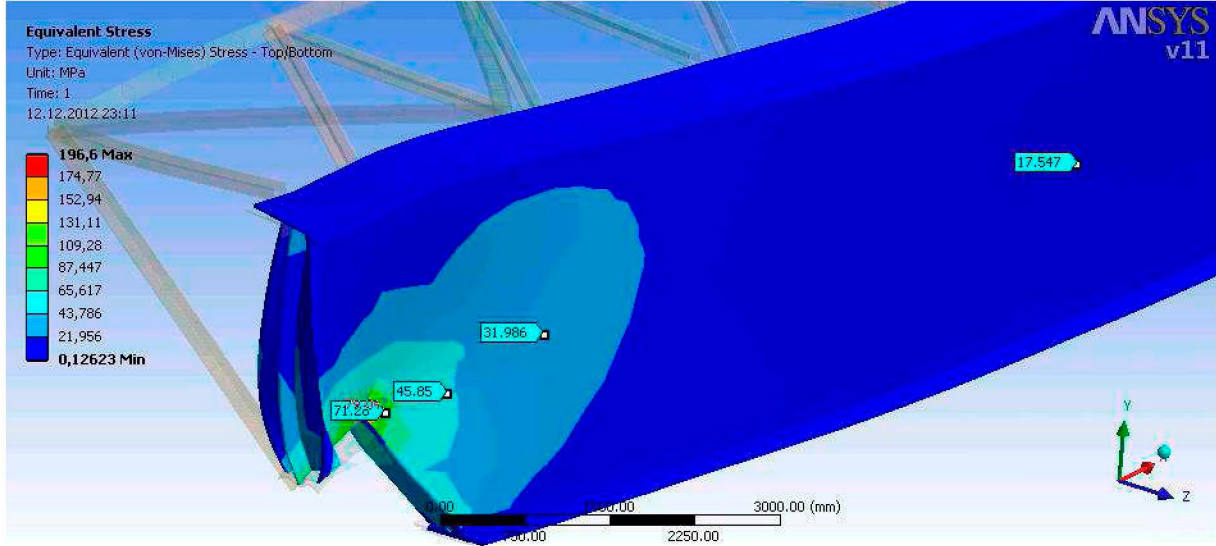
Güçlendirme sonrası yalnız teker yükleri etkisi altında kiriş üzerindeki kritik yorulma bölgeleri Şekil 3.26’da görülmektedir. Yorulma ömründe güçlendirme öncesi duruma göre artış görülmektedir. Kiriş gövdesinin mesnetlere yakın uçlarında yorulma ömrü 1.8 milyon iken delik çevresinde 600000 çevrime kadar düşmektedir.



Şekil 3.26 Güçlendirme sonrası yorulma.

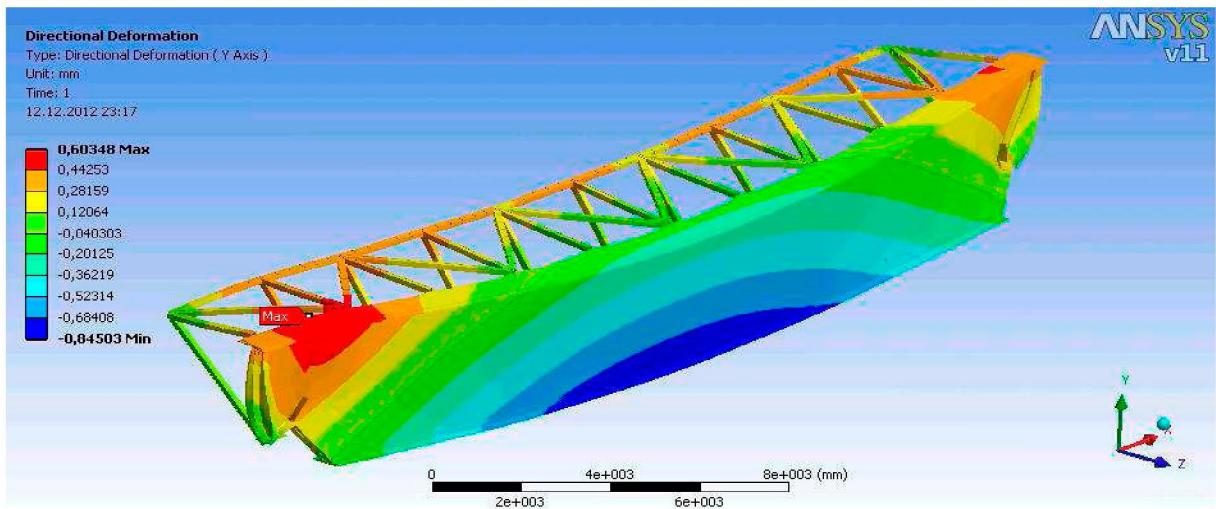
3.4.5 Güçlendirme Sonrası Termal Analiz Sonuçları

Güçlendirme sonrasında 40°C ısı etkisine bağlı kiriş genelinde oluşan eş değer gerilmeler Şekil 3.27’de görülmektedir. Güçlendirme öncesine oranla gerilme değerlerinde önemli düşüş gözlenmektedir. Gerilme değerleri kiriş gövde uçlarında 70 MPa mertebelerindedir.



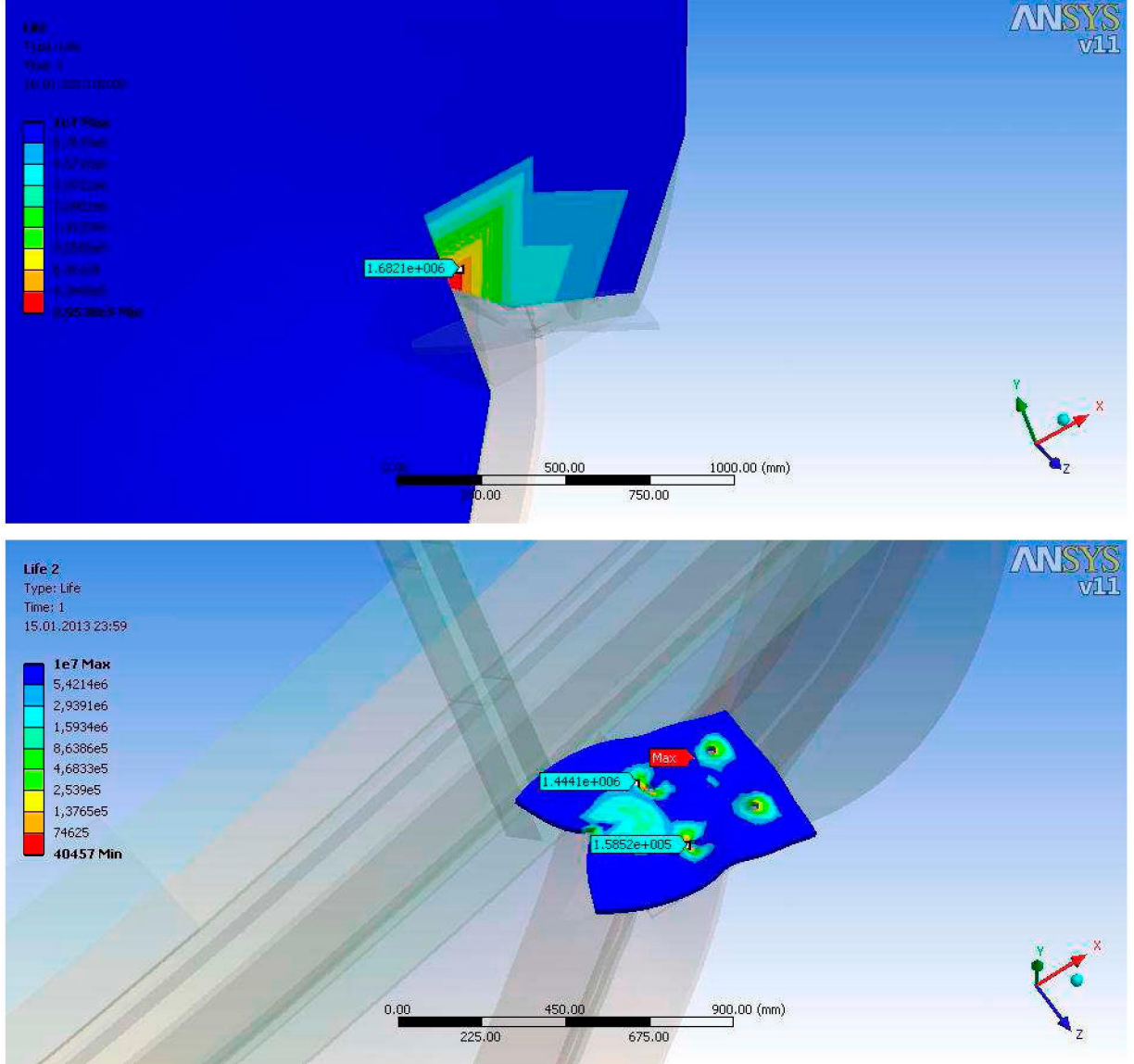
Şekil 3.27 Güçlendirme sonrası termal etki için değer gerilme.

Güçlendirme sonrasında da termal etki altında kiriş deformasyon miktarını teker yüklerinin oluşturduğu deormasyona oranla oldukça küçüktür. Şekil 3.28’de kiriş genelinin deformasyon görülmektedir.



Şekil 3.28 Güçlendirme sonrası termal etki için deformasyon.

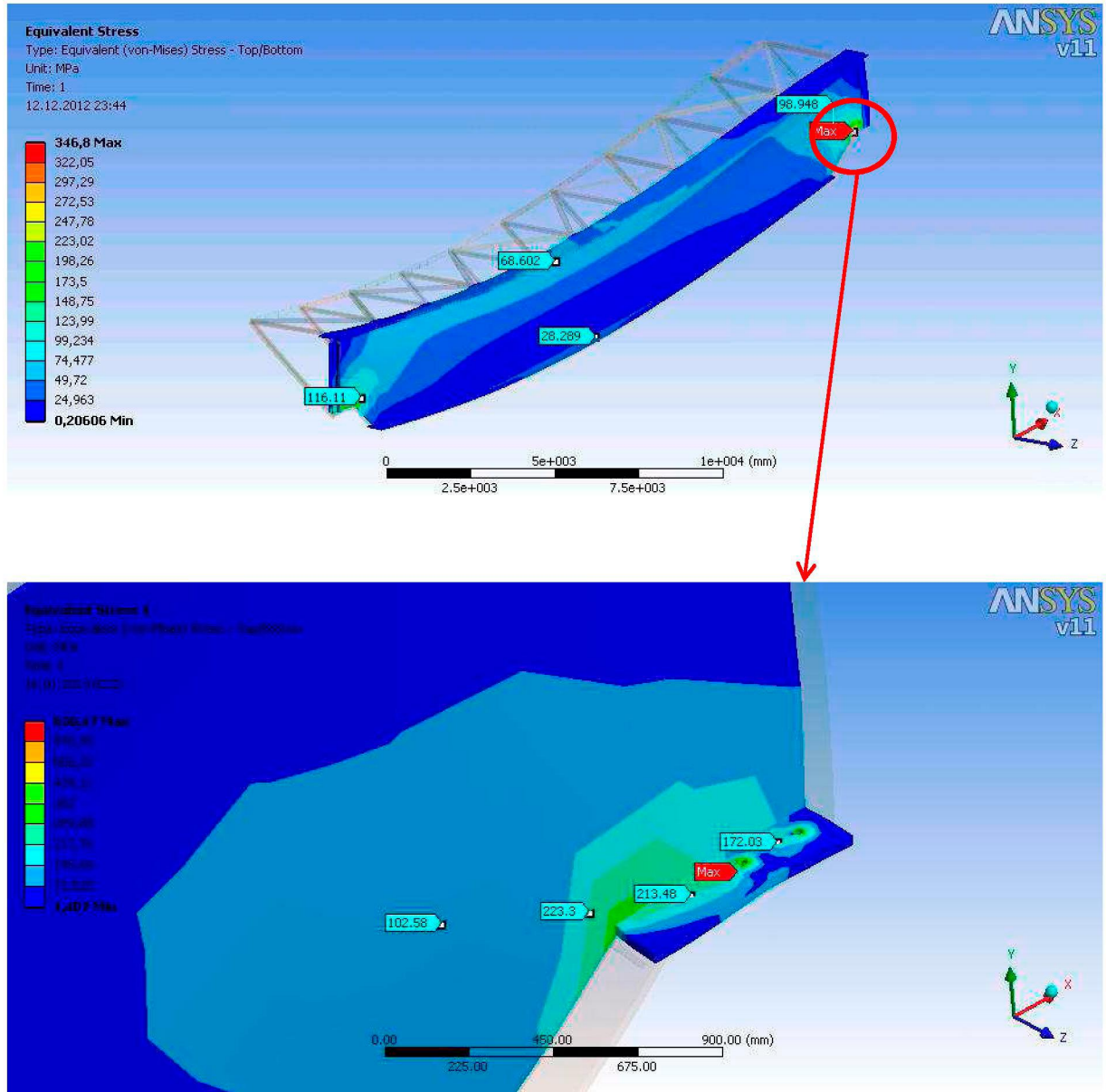
Güçlendirme sonrasında 40°C ısı etkisine bağlı kiriş mesnet bölgesindeki yorulma miktarı şekil 3.29’da görülmektedir. Mesnet bölgelerindeki yorulma ömrü 1.6 milyon çevrime kadar düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 3.29 Güçlendirme sonrası termal etki için yorulma.

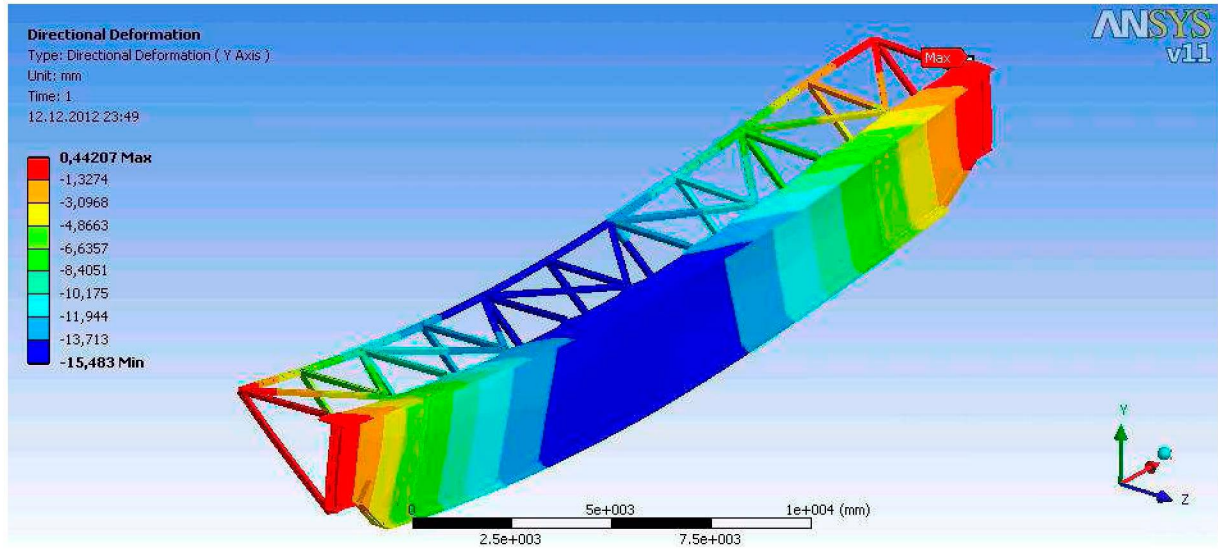
3.4.6 Güçlendirme Sonrası Kirişin Genel Analiz Sonuçları

Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etkiler beraber tesir ettiğinde kiriş genelinde oluşan gerilme değerleri Şekil 3.30 görülmektedir. Gerilme değerlerinde güçlendirme öncesine oranla azalma göze çarpmaktadır. Kiriş gövde uçlarında gerilme değerleri 100 ve 110 MPa mertebelerinde iken açıklıkta maksimum 70 MPa kadardır.



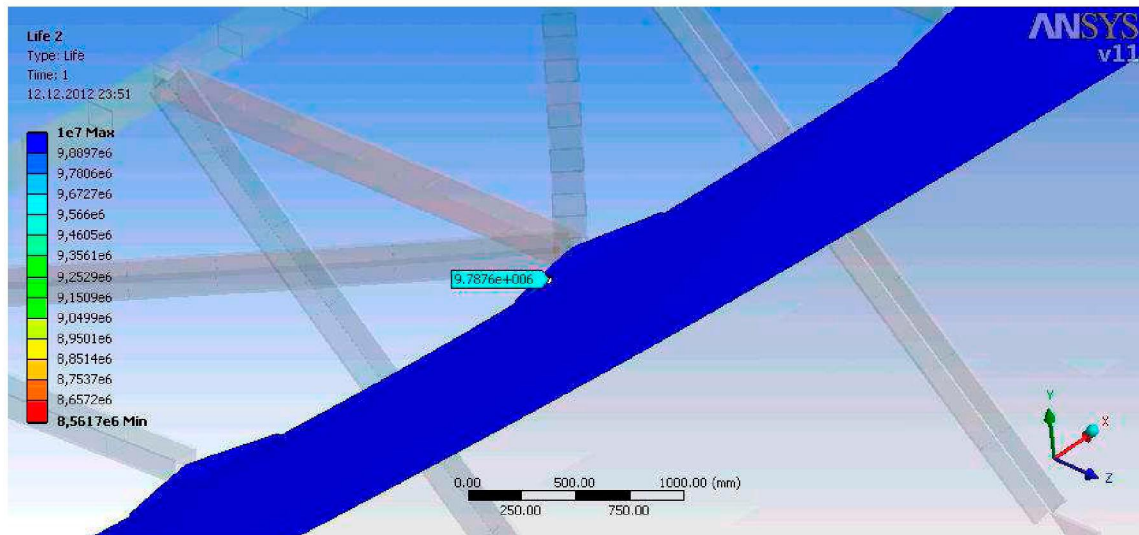
Şekil 3.30 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için eş değer gerilmeler.

Güçlendirme sonrasında teker yükleri ve termal ekiler aynı anda analize dahil edildiğinde elde edilen deformasyon değeri maksimum 15.43 mm'dir (Şekil 3.31). Bu değer yalnız teker yükleri dahil edildiğinde ortaya çıkan deformasyon çok farklı değildir. Termal etkinin toplam deformasyon miktarını çok etkilemediği görülmektedir. Kiriş maksimum deformasyon miktarı kabul edilebilir sınırlar içerisinde.

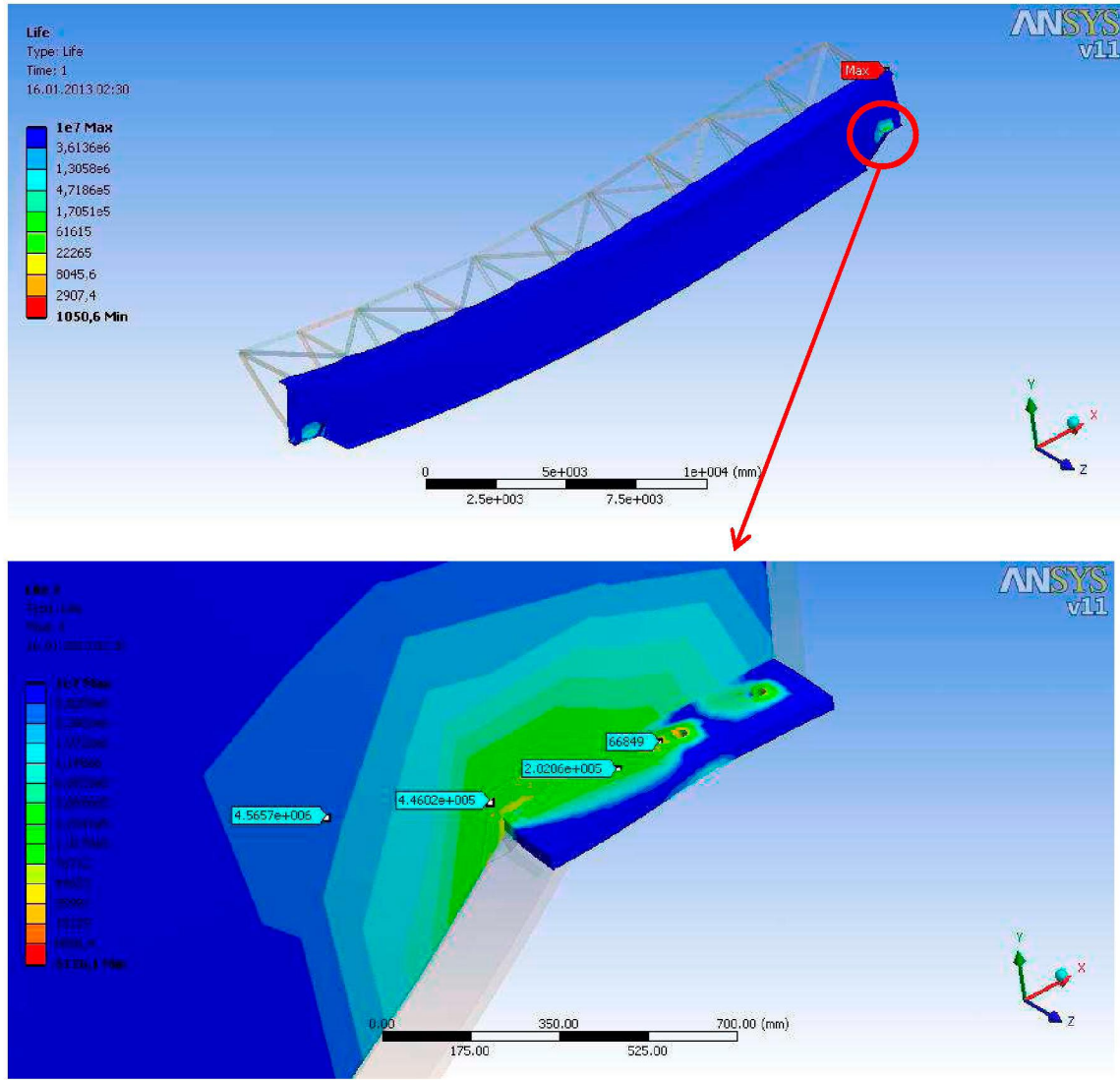


Şekil 3.31 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için deformasyon.

Güçlendirme sonrasında teker yükleri ve termal etkiler aynı anda analize dahil edildiğinde, kiriş uçlarında yorulma ömrü 400000 çevrim sayısına kadar düşmektedir. Mesnet civata delikleri çevresinde ise yorulma ömrünün 200000 çevrim sayısına kadar düştüğü gözlenmektedir. Teker yükleri ve termal etki aynı anda dahil edildiğinde mesnet bölgelerindeki kritik yorulma bölgelerine ilave olarak kiriş çaprazlarının üst gövdeye bağlandığı plakalarda da yorulma yönünden kritik bölgelerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.32 ve 3.33). Bu bölgede yorulma 9.7 milyon çevrimdir.



Şekil 3.32 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için yorulma



Şekil 3.33 Güçlendirme sonrası teker yükleri ve termal etki için yorulma.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

Bu çalışmada örnek bir çelik kren kirişinin detaylı yorulma analizi yapılmıştır. Bu amaçla yorulma faktörünün kren kirişlerinde oluşturduğu hasar irdelenmiştir. Örnek kiriş hem klasik yöntemlerle basit kiriş kabul edilerek sayısal olarak çözülmüş, hem de bir sonlu elemanlar yazılımı olan Ansys Workbench ile çözülmüştür. Bu iki çözümden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

Kren kirişi ilk olarak basit kiriş kabulü ile çubuk eleman olarak çözülmüş, maksimum moment ve mesnet reaksiyonlarına göre kesit analizi yapılmıştır. Kesit üzerinde belirlenen beş farklı bölgenin gerilme detayları, AISC ve Eurocode'da belirtilen yorulma detay kategorilerine denk gelen kategori ile eşleştirilmiştir. Kren kirişinin güçlendirme öncesi maruz kaldığı yükleme çevrim sayısı, detayların yorulma ömürlerini tamamlayacağı çevrim sayısına oranlanarak yüzde hasar hesaplanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; özellikle kaynak bölgelerinde güçlendirme öncesinde %30, güçlendirme sonrasında ise %39 olmak üzere birikimli olarak toplamda %69 oranında hasar oluşmaktadır. İlave plakalar ile yapılan güçlendirmeler gerilme bölgelerindeki gerilme değerlerini düşürmesine ve gerekli tahkikleri sağlamış olmasına rağmen, kaynaklarda bir iyileştirme sağlamadığından güçlendirmenin yorulma hasarına azaltıcı yönde bir etki sağlamadığı anlaşılmaktadır.

AISC ve Eurocode'a göre yapılan yorulma hesapları birbiri ile kıyaslandığında, maksimum hasarın gerçekleştiği noktada, AISC'ye göre %63, Eurocode'a göre %69 hasar olduğu görülmektedir. Bu değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu ve AISC'ye göre yapılan yorulma analizinde elde edilen sonuçların daha muhafazakar olduğu söylenebilmektedir.

Kren kirişi analizi esnasında teker yükünün maksimum moment oluşturduğu bölge tespit edilmiş, 27.3 m uzunluğundaki kirişin mesnetten 11.265 m. uzakta maksim momentin olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuç hareketli yük katarlarının tesiri altındaki kirişlerde

maksimum gerilmelerin açıklığın tam ortasında olmadığını göstermektedir. Yük katarları etkisindeki kirişlerde maksimum moment tekil yüklerden birinin altında meydana gelmektedir.

Ansys ile yapılan analiz sonuçlarında, maksimum açıklık momentinin olduğu bölgede gerilme değerlerinin basit mesnet kabulü ile yapılan hesaplama sonuçlarına oranla daha düşük, mesnete yakın bölgelerde ise daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni Ansys ile yapılan analizde modelin basit kirişten daha ziyade ankastreye yakın ya da belli bir oranda ankastre mesnetlenmiş olmasıdır. Kren kirişinin mesnetlere oturduğu bölgelerde gövde derinliğinin değişmesi ve geometri düzeninin bozulması nedeni ile yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Mesnetlere yakın bölgelerde geometrinin değişim göstermesi ve oluşan gerilme konsantrasyonların nedeni ile yorulma ömrü, açıklık bölgelerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Kren kirişinin kolonlara mesnetlendiği cıvata delikleri çevresinde gerilme değerlerinin oldukça yüksek olduğu dolayısıyla bu bölgelerde yorulma ömrünün düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca kren kirişine yatayda rijitlik sağlayan çaprazların kren üst başlığına bağlandığı bölgelerde de gerilme değerlerinde yükseklik ve yorulma ömründe azalma dikkat çekmektedir.

Isı etkisinin kren üzerindeki etkisini görmek amacı ile kiriş alt plağına 40°C ısı uygulanmış mesnet bölgelerinde önemli gerilmeler oluşturduğu, yorulma hasarına teker tesirlerine oranla mesnet bölgelerinde daha fazla, açıklık bölgelerde daha az katkı sağladığı görülmüştür. Bu derece düşük termal etki altında dahi ciddi gerilmelerin oluşması termal etkilere karşı izolasyon vb. önlemlerin alınmasının ne derece önemli olduğu göstermektedir. Özellikle demir çelik sektöründe kullanılan vinçler erimiş madenin yaydığı ısıya maruz kalabildiklerinden dolayı termal etkiler için ekstra tedbirlerin alınması gerekmektedir.

Yapılan iki hesaplamanın sonucunda, Ansys ile yapılan çözümlemenin klasik yöntemle oranla, kiriş açıklığında daha emniyetli mesnetlerde ise daha kritik sonuçlar verdiği gözükmemektedir. Ansys ile yapılan çözümlemede yorulma ömrünün mesnetlerdeki delikler çevresinde ve gövde plakasının uç kısımlarında oldukça düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Gövde plağının uç kısmındaki darlaşma nedeni ile oluşan geometri düzensizliğini, yuvarlatılmış geçişler yaparak iyileştirmek bu bölgelerdeki gerilme yoğunlaşmalarının önüne geçecektir. Mesnet uçlarındaki gerilme yoğunlaşmalarını önlemek amacı ile diğer bir yöntem mesnet ucundaki eğimi düşürmektir. Ayrıca mesnet bölgelerindeki cıvata delikleri için gerilme

yoğunlaşmalarını önleyici tedbirler almak gerekmektedir. Bu amaçla gerilme dağılımının homojen olmasını sağlayacak detaylar tasarlanmalıdır.

Sonuç olarak yorulmaya bağlı hasar miktarının en az indirilmesi amacı ile gerilme yoğunlukları oluşturabilecek geometrileri ve mesnet yöntemlerini kullanmaktan vazgeçmek, kaynak kusurlarının en aza indirilmesi amacı ile testler yapmak yorulma hasarına bağlı göçmeleri önleyecektir. Güçlendirme yapılırken kaynak miktarını en aza indirecek kesit detayları tasarlamak kaynak kusurlarından doğabilecek hasarların oluşma olasılığını düşürecektir. Ayrıca kren kirişlerinde yatay çaprazlar kullanmak kesitin zayıf ekseninde daha güçlü olmasını sağlayarak oluşabilecek yüksek gerilme değerlerinin oluşmasına izin vermeyecektir.

KAYNAKLAR

- URL-1** (2012) [http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(material\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material)), Wikipedia, 01.05.2012.
- Agerskov H** (2000) Fatigue in steel structures under random loading, *J Constr Steel Res*, 5: 283–305.
- Fisher J M, Van de Pas J** (2003) New fatigue provisions for the design of Crane runway girders, <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/acero>.
- Hou C Y** (2003) Three-dimensional finite element analysis of fatigue crack closure behavior in surface flaws, *Int J Fatigue*, 26: 1225–1239.
- Seçer M** (2007) Kaynaklı yapılarda yorulma davranışının Eurocode -3 ile incelenmesi, 2. *Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu*, İzmir, s. 163-173.
- Çağlayan Ö, Özakgöl K, Tezer Ö, Uzgider U** (2010) Fatigue life prediction of existing crane runway girders, *J Constr Steel Res*, 66:1164-1173.
- McDonald B, Ross B, Carnahan R. A** (2011) The Bellevue crane disaster, *Eng Fail Anal*, Article in Press.
- Tong X, Christopher Y. T, Yang J, Zhang J, Yue Q** (2007) Fatigue Strength of End-Coped Crane Runway Girders, *J Struct Eng -ASCE*, 133: 1791-1801.
- Kopnov V.A** (1999) Fatigue life prediction of the metalwork of a travelling gantry Crane, *Eng Fail Anal*, 6: 131-141.
- Tsouvalis N. G, Mirisiotis L. S, Dimou D. N** (2009) Experimental and numerical study of the fatigue behaviour of composite patch reinforced cracked steel plates, *Int J Fatigue*, 31: 1613–1627.
- Keyder E** (1990) *Dolu Gövdeli Çelik Kirişler*, Çelik Bağlan Yayıncılık, Ankara, 115 s.
- Maccrimmon R A** (2005) *Crane Supporting Structures*, First Edition, Canadian Institute of Steel Construction, Quadratone Graphics Limited, Toronto Ontario, 129 pp.
- Eurocode 1 Part 3** (2002) *Actions induced by cranes and machinery*, 2. Draft, TSE, Ankara, 42 s.
- Eurocode 3:** (2007) *Çelik yapıların tasarımı - Bölüm 6: Krane mesnet yapıları*, TSE, Ankara, 37 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kaplan H** (2004) *Çelik yapılar ders notları*, PAÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı, DENİZLİ, 176 s.
- Schijve J** (2004) *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwe Academic Publishers, Delft, The Netherlands, 512 pp.
- Ün H** (2007) Malzeme Ders Notları, *Yorulma*, Pamukkale Üniversitesi, hun.pau.edu.tr/ders_notlari/.../Malzeme_ders_7_Yorulma.pdf.
- Ma J, Zhang B, Xu D, Han E, Ke W**, (2010), Effects of inclusion and loading direction on the fatigue behavior of hot rolled low carbon steel, *Int J Fatigue*, 32: 1116–1125.
- AISC LRFD** (1999) Specification For Structural Steel Buildings, AISC, USA, 327 pp.
- Eurocode 3** (2005) Çelik Yapıların Tasarımı, *Bölüm 1- Genel Kurallar: Yorulma*, TSE, Ankara, 34 s.
- Ansys Workbench (V. 12.0)** (2009) Ansys Element Reference, Release 12.0, 1690 pp.
- Chaush Y** (2008) Ansys Workbench ile Yorulma Analizi, Bitirme Ödevi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, www.ansysbilgihavuzu.com, 71 s.
- TS 648** (1980) Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, 1. Basım, TSE, Ankara, 43 s.
- Schtuz W** (1996) History of Fatigue, *Eng Fract Mech*, 2: 263-300.

ÖZGEÇMİŞ

Dursun GÜL 1979 yılında Samsun’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Trabzon Yomra Fen Lisesinden mezun olduktan sonra 1996 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliğine bölümüne girdi. 2001 yılında üniversiteden mezun olduktan sonra çeşitli taahhüt firmalarında saha mühendisliği, şantiye şefliği ve teknik ofis mühendisliği görevleri yaptı. 2004 yılında Ereğli Demir Çelik T.A.Ş. Yapım Montaj Müdürlüğünde Mühendis olarak göreve başladı ve halen aynı firma bünyesinde çalışmaktadır. 2009 yılında başladığı Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği yapı anabilim dalında yüksek lisans programına devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Bağlık Mah. 88 Evler
No:13/3 Kdz. Ereğli/ZONGULDAK

Tel : (0372) 329 61 91
Cep : (0505) 617 76 19
E-posta : dursun.gul@erdemir.com.tr