İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT KÖPRÜ KİRİŞLERİNDE YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Vefa OKUMUŞ

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Yapı Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT KÖPRÜ KİRİŞLERİNDE YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Vefa OKUMUŞ
(501091151)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ (İTÜ)
Eş Danışman : Prof. Dr. Alper İLKİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zekai CELEP (İTÜ)
Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Kutay ORAKÇAL (BÜ)

HAZİRAN 2011

Anne ve babamın anısına,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca çok değerli bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Abdullah GEDİKLİ ve Sayın Prof. Dr. Alper İLKİ'ye minnet ve şükranlarımı sunarım.

Destek ve yardımlarından dolayı Çağla Mühendislik ve Mimarlık A.Ş.'ye, BetonSA Hazır Beton'a, BMS Hazır Demir A.Ş.'ye ve İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı personeline teşekkürü bir borç bilirim.

Gerek tez gerekse mühendislik çalışmalarımda maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, bana mesleğimi bir kez daha sevdiren İnş. Yük. Müh. Barış GÜNEŞ'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili ablam Hicran OKUMUŞ'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Haziran 2011

Vefa OKUMUŞ

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **23**
1.1 Köprülerin Önemi 23
1.2 Çelik-Betonarme Kompozit Köprüler 24
1.3 Tezin Amacı 25
2. ÇELİK KÖPRÜLERDE YORULMA **27**
2.1 Metal Malzemelerin Yorulması 27
2.1.1 Çatlak oluşma aşaması 29
2.1.2 Çatlak büyüme aşaması 29
2.2 Çelik Köprülerde Yorulma 30
2.2.1 Çelik köprülerde yorulma çatlaklarının sebepleri 32
2.2.2 Gerilme Esaslı Yorulma Analizi 34
2.2.3 Konuyla ilgili yapılmış önemli çalışmalar 38
2.2.3.1 Albrecht ve Wright (2000) 38
2.2.3.2 Richard ve diğ. (1997) 46
3. AASHTO LRFD 2007'YE GÖRE KOMPOZİT KİRİŞ TASARIMI **51**
3.1.1 Yükler ve yük kombinasyonları 52
3.1.1.1 Araç yükleri (LL) 54
3.1.2 Dayanım faktörleri 57
3.1.3 Kesit özelliklerinin hesaplanması 58
3.1.3.1 Kesit özelliklerinin belirlenmesi 58
3.1.3.2 Kesit özellikleri kontrolleri 59
3.1.3.3 Akma momentinin hesaplanması 59
3.1.3.4 Plastik moment kapasitesinin hesaplanması 60
3.1.4 Dayanım limit durumu 61
3.1.4.1 Eğilme momenti etkisinde dayanım limit durumu tasarımı 61
3.1.5 Yorulma limit durumu 63
4. MALZEME VE YÖNTEM **67**
4.1 Deney Numunelerinin Özellikleri 67
4.1.1 Numunelerin malzeme özellikleri 69
4.1.1.1 Yapı çeliği 69
4.1.1.2 Beton 71
4.2 Deney Numunelerinin İmalatı 71

4.2.1 Çelik kirişlerin imalatı 72
4.2.2 Kesme saplamalarının kaynaklanması 72
4.2.3 Betonarme tabliyenin imalatı 73
4.3 Deney düzeneği 74
4.3.1 Veri toplama sistemi ve ekipmanları 75
4.3.1.1 Veri toplayıcı 76
4.3.1.2 Yükölçer 77
4.3.1.3 Yerdeğiştirmeölçer 77
4.3.1.4 Şekildeğiştirmeölçer (Şerit Tipi) 77
4.3.1.5 Şekildeğiştirmeölçerler (PI Tipi) 78
4.4 Deney Programı 78
5. BULGULAR 81
5.1 Teorik Hesap Sonuçları 81
5.1.1 Statik analiz 81
5.1.2 Kesit özelliklerinin hesabı 81
5.1.2.1 Kesit özellikleri kontrolleri 81
5.1.2.2 Akma momentinin hesaplanması 82
5.1.2.3 Plastik momentin hesaplanması 83
5.1.3 Dayanım limit durumu kontrolleri 83
5.1.3.1 Eğilme momenti etkisindeki kontroller 83
5.1.4 Yorulma limit durumu kontrolleri 84
5.2 Deneysel Çalışma Sonuçları 85
5.2.1 Monotonik yükleme deneyi sonuçları (Mon numunesi) 85
5.2.2 Yorulma deneyi sonuçları (Fat-01, Fat-02, Fat-03, Fat-04) 89
5.2.2.1 Fat-01 deney sonucu 90
5.2.2.2 Fat-02 deney sonucu 93
5.2.2.3 Fat-03 deney sonucu 95
5.2.2.4 Fat-04 deney sonucu 99
5.2.3 Deney sonuçlarının karşılaştırılması 102
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 107
KAYNAKLAR 109
ÖZGEÇMİŞ 113

KISALTMALAR

AASHTO	**:** The American Association of State Highway and Transportation Officials
ASCE	**:** American Society of Civil Engineers
ASTM	**:** American Society for Testing and Materials
CFRP	**:** Carbon fiber reinforced polymer
GOKT	**:** Günlük ortalama kamyon trafiği
HPS	**:** High Performance Steel
Hz	**:** Hertz
KGM	**:** Karayolları Genel Müdürlüğü
kN	**:** Kilonewton
LEFM	**:** Linear Elastic Fracture Mechanics
LRFD	**:** Load and Resistance Factor Design
m	**:** Metre
mm	**:** Milimetre
MPa	**:** Megapascal
NBI	**:** National Bridge Inventory
NDL	**:** Number of Design Lanes
NCHRP	**:** National Cooperative Highway Research Program
PTE	**:** Plastik tarafsız eksen
RMC	**:** Root Mean Cube
RMS	**:** Root Mean Square

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Önemli yorulma dayanımı çalışmalarının özeti.....46
Çizelge 2.2 : Richard ve diğ., (1997) kiriş statik kapasite sonuçları.....47
Çizelge 3.1 : AASHTO LRFD 2007 yük kombinasyonları.....55
Çizelge 3.2 : AASHTO LRFD 2007 Çoklu bulunma faktörleri 57
Çizelge 3.3 : Betonarme elemanların AASHTO LRFD 2007'ye göre dayanım faktörleri 57
Çizelge 3.4 : Çelik elemanların AASHTO LRFD 2007'ye Göre Dayanım Faktörleri 57
Çizelge 3.5 : Pozitif kesitler için $\bar{Y}$ ve Mp değerlerinin hesabı 61
Çizelge 3.6 : Yorulma kategorisi sabiti ve sabit genlikli yorulma eşiği değerleri 65
Çizelge 3.7 : Her bir kamyon geçişinde meydana gelen gerilme aralığı tekrarı, n....65
Çizelge 3.8 : Kamyon trafiği tek şerit faktörü 65
Çizelge 4.1 : Numunelerde kullanılan beton karışımı.....71
Çizelge 5.1 : Tekrarlı yüklemeye tabi tutulan numunelere ait deney parametreleri ..90
Çizelge 5.2 : AASHTO LRFD ve deneyden elde edilen yük tekrarı sayıları karşılaştırılması 105

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tipik çelik-betonarme kompozit köprü üst yapısı (Chen ve Duan, 2000) 24
Şekil 2.1 : Sabit genlikli yüklemeye ait bileşenler 28
Şekil 2.2 : Çatlak büyümesinin şematik gösterimi 30
Şekil 2.3 : Distorsiyon ve ikincil gerilme kaynaklı yorulma hasarları (Albrecht ve Wright, 2000). 33
Şekil 2.4 : AASHTO detay kategorilerinin yükleme sayısı – gerilme aralığı eğrileri. 37
Şekil 2.5 : Sonlu ve sonsuz yorulma ömrü bölgeleri.....37
Şekil 2.6 : Berkitme levhalı çekme numunesi (Albrecht and Friedland, 1979) (Ölçüler: mm) 39
Şekil 2.7 : Albrecht ve Friedland'ın (1979) çalışmalarında kullandıkları spektrum 39
Şekil 2.8 : Otomatik kaynaklı birinci seri numuneler için S-N diyagramı (Albrecht ve Friedland, 1979).....40
Şekil 2.9 : Otomatik kaynaklı ikinci seri numuneler için S-N diyagramı (Albrecht ve Friedland, 1979) 40
Şekil 2.10 : Manuel kaynaklı numuneler için S-N diyagramı (Albrecht ve Friedland, 1979) 40
Şekil 2.11 : Enine berkitmeli çekme numunesi (Klippstein ve Schilling, 1989) (Ölçüler: mm) 41
Şekil 2.12 : Enine berkitmeli çekme numunesine ait S-N diyagramı (Klippstein ve Schilling, 1989) 41
Şekil 2.13 : Fisher'ın (1993) kullandığı numune (Ölçüler: mm) 41
Şekil 2.14 : Fisher'ın (1993) kullandığı yük spektrumu.....42
Şekil 2.15 : Guse levhalı detaya ait S-N diyagramı (Fisher ve diğ., 1993) 42
Şekil 2.16 : Ek levhalı detaya ait S-N diyagramı (Fisher ve diğ., 1993).....42
Şekil 2.17 : Dikey berkitmelere ait S-N eğrisi (Fisher ve diğ., 1993).....43
Şekil 2.18 : A588 manuel kaynaklı boyuna berkitmeli numune (Albrecht ve diğ., 1994) (Ölçüler: mm) 43
Şekil 2.19 : Albrecht ve diğerlerinin (1994) çalışmalarında kullandıkları yük spektrumu 43
Şekil 2.20 : A572 çekme numunesine ait S-N diyagramı (Albrecht ve diğ., 1994)...44
Şekil 2.21 : A588 berkitmeli çekme numunesine ait S-N diyagramı (Albrecht ve diğ., 1994) 44
Şekil 2.22 : Enine berkitmeli kiriş (Wright, 1993) (Ölçüler: mm).....45
Şekil 2.23 : Dikey berkitmeli kiriş için S-N sonuçları (Wright, 1993) 45
Şekil 2.24 : Statik yükleme deneyinden sonra numunede göçme hasarı (Richard ve diğ., 1997) 47
Şekil 2.25 : Seyrek donatılı tam kompozit numunenin açıklık yerdeğiştirmeleri (Richard ve diğ., 1997) 48

Şekil 2.26 : Kalıcı yük taşıma kapasitesi, P_r (Richard ve Diğ., 1997)..... 49
Şekil 2.27 : Kalıcı rijitlik, EI_i (Richard ve Diğ., 1997)..... 49
Şekil 3.1 : HL-93 Tasarım kamyon yükü..... 56
Şekil 3.2 : AASHTO LRFD 2007 treyler hareketli yükü..... 56
Şekil 3.3 : Pozitif eğilme etkisinde kompozit kesit parametreleri..... 58
Şekil 4.1 : Numune boy görünüşü (Ölçüler: mm)..... 67
Şekil 4.2 : Numune en kesiti (Ölçüler: mm)..... 68
Şekil 4.3 : Numune donatı planı (Ölçüler: mm)..... 68
Şekil 4.4 : Numunelerde kullanılan kayma bağlantısı..... 68
Şekil 4.5 : Numune saplama yerleşimi (Ölçüler: mm)..... 69
Şekil 4.6 : Grup kupon numuneleri ve çekme deneyi düzeneği..... 69
Şekil 4.7 : Çelik çekme testi gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi (Şerit tipi şekildeğiştirmeölçer)..... 70
Şekil 4.8 : Çelik çekme testi gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi (PI tipi şekildeğiştirmeölçer)..... 70
Şekil 4.9 : Beton basınç deneyi..... 71
Şekil 4.10 : Beton basınç deneyi gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi..... 72
Şekil 4.11 : Saplama kaynak makinesi ve tabancası..... 73
Şekil 4.12 : Saplamaların tabancaya yerleşimi ve kaynaklama işlemi..... 73
Şekil 4.13 : Betonarme tabliye imalatından görüntüler..... 74
Şekil 4.14 : Kutu mesnet..... 75
Şekil 4.15 : Deney düzeneği..... 75
Şekil 4.16 : MTS yük ünitesi ve hidrolik veren..... 76
Şekil 4.17 : Dinamik veri toplayıcı..... 76
Şekil 4.18 : Dinamik yükleme verisi örneği..... 77
Şekil 4.19 : Çelik ve betonda şekildeğiştirmeölçerlerin yerleşimi..... 78
Şekil 4.20 : Şekildeğiştirmeölçerlerin yerleşimi..... 78
Şekil 4.21 : PI tipi şekil değiştirme ölçerlerin yerleşimi..... 79
Şekil 4.22 : Deney veri toplama sistemi şeması..... 79
Şekil 5.1 : Sisteme yükleme durumu (Ölçüler: mm)..... 81
Şekil 5.2 : Mon numunesi..... 85
Şekil 5.3 : Mon numunesi ölçüm noktaları..... 86
Şekil 5.4 : Monotonik deney sonrasında Mon numunesi..... 86
Şekil 5.5 : Mon numunesinde betonda oluşan deformasyonlar..... 86
Şekil 5.6 : Mon numunesinde yük - yerdeğiştirme ilişkisi..... 87
Şekil 5.7 : Mon numunesinde çelik alt başlıkta yük - şekildeğiştirme ilişkisi..... 87
Şekil 5.8 : Mon numunesinde açıklık boyunca yük - şekildeğiştirme ilişkisi..... 88
Şekil 5.9 : Mon numunesinde kesit yüksekliği boyunca yük - şekildeğiştirme ilişkisi..... 88
Şekil 5.10 : Mon numunesinde orta kesitte yük - şekildeğiştirme ilişkisi..... 89
Şekil 5.11 : Mon numunesinde PS-02 ve SS-06 şekildeğiştirmeölçerlerinde yük - şekildeğiştirme ilişkisi..... 89
Şekil 5.12 : Fat-01 numunesi ölçüm noktaları..... 90
Şekil 5.13 : Fat-01 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği..... 91
Şekil 5.14 : Fat-01 numunesi yorulma göçmesi..... 91
Şekil 5.15 : Fat-01 numunesi yorulma çatlağı ve ilerlemesi..... 92
Şekil 5.16 : Fat-01 numunesi betonda oluşan deformasyonlar..... 92
Şekil 5.17 : Fat-01 numunesi tekrar sayısı - yerdeğiştirme grafiği..... 93
Şekil 5.18 : Fat-01 numunesi tekrar sayısı - rijitlik grafiği..... 93
Şekil 5.19 : Fat-02 numunesi ölçüm noktaları..... 93

Şekil 5.20 : Fat-02 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.....94
Şekil 5.21 : Fat-02 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.....94
Şekil 5.22 : Fat-02 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği 95
Şekil 5.23 : Fat-02 numunesi statik yükleme altında yük - yerdeğiştirme ilişkisi 95
Şekil 5.24 : Fat-03 numunesi ölçüm noktaları 96
Şekil 5.25 : Fat-03 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.....96
Şekil 5.26 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.....97
Şekil 5.27 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği 97
Şekil 5.28 : Fat-03 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.....98
Şekil 5.29 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.....98
Şekil 5.30 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği 98
Şekil 5.31 : Fat-03 numunesi yük - yerdeğiştirme grafiği 99
Şekil 5.32 : Fat-04 numunesi ölçüm noktaları 99
Şekil 5.33 : Fat-04 numunesi yükleme sayısı - şekildeğiştirme grafiği 100
Şekil 5.34 : Fat-04 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.....100
Şekil 5.35 : Fat-04 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği 101
Şekil 5.36 : Yorulma göçmesi esnasında Fat-04 numunesi.....101
Şekil 5.37 : Fat-04 numunesi yorulma göçmesi hasarı.....102
Şekil 5.38 : Mon numunesi yük - yer değiştirme eğrisi 102
Şekil 5.39 : Mon ve Fat-02 numunelerinin yük - yer değiştirme ilişkileri karşılaştırması.....103
Şekil 5.40 : Mon, Fat-02 ve Fat-03 numunelerinin yük - yer değiştirme ilişkileri karşılaştırması.....104
Şekil 5.41 : Numunelerin deney süreleri boyunca rijitlik değişimleri 104
Şekil 5.42 : Deney sonuçları ile AASHTO LRFD 2007 değerlerinin karşılaştırılması 105
Şekil 5.43 : Deney sonuçları ile Albrecht ve Friedland'ın çalışmalarından (1979) elde edilen değerlerinin karşılaştırılması. 106
Şekil 5.44 : Deney sonuçları ile Albrecht ve diğerlerinin çalışmaları (1979) ile karşılaştırılması. 106

SEMBOL LİSTESİ

a : Çatlak uzunluğu
a_f : Göçme anındaki çatlak uzunluğu
b_{eff} : Efektif tabliye genişiği
b_f : Başlık genişliği
d_c : Basınç başlığı geometrik merkezinin tarafsız eksene uzaklığı
d_s : Tabliye geometrik merkezinin tarafsız eksene uzaklığı
d_t : Çekme başlığı geometrik merkezinin tarafsız eksene uzaklığı
d_w : Gövde geometrik merkezinin tarafsız eksene uzaklığı
f_{bu} : Yanal eğilme hesaba katılmadan hesaplanan başlık gerilmesi
m : Basquin kuralında malzeme katsayısı
n : Modüler oran
p : Kamyon trafiği tek şerit faktörü
q_{DC} : Numune zati yükü
t_f : Başlık kalınlığı
t_{fc} : Basınç başlığı kalınlığı
t_{ft} : Çekme başlığı kalınlığı
t_s : Tabliye genişliği
t_w : Gövde genişliği
t_s : Tabliye genişliği
A : Yorulma kategorisi sabiti
$ADTT_{SL}$: Tek bir şeritten bir günde geçen kamyon sayısı
C_{ct} : Tarafsız eksenin tabliye üstüne uzaklığı
C_{sb} : Tarafsız eksenin çelik kiriş altına uzaklığı
C_{st} : Tarafsız eksenin çelik kiriş üstüne uzaklığı
D : Gövde yüksekliği
D_p : Plastik moment altında tabliye üstünün tarafsız eksene mesafesi
D_t : Toplam kompozit kiriş yüksekliği
D_{cp} : Plastik moment altında gövde basınç derinliği
E : Elastisite modülü
EI_i : Başlangıç rijitliği
EI_r : Kalan rijitlik
F_{nc} : Basınç başlığı nominal eğilme dayanımı
F_{nt} : Çekme başlığı nominal eğilme dayanımı
F_{yc} : Basınç başlığı akma gerilmesi
F_{yt} : Çekme başlığı akma gerilmesi
F_{yf} : Başlık akma gerilmesi
GKA : Gros kamyon ağırlığı
GKA_{max} : En büyük gros kamyon ağırlığı
I_{yc} : Basınç başlığı dikey eksene göre atalet momenti
I_{yt} : Çekme başlığı dikey eksene göre atalet momenti
M_{D1} : Kompozit olmayan yüklerden meydana gelen faktörlü moment
M_{D2} : Uzun süreli kompozit yüklerden meydana gelen faktörlü moment

M_{AD} : Hareketli yükten kaynaklanan faktörlü moment
M_n : Nominal eğilme dayanımı
M_p : Plastik moment kapasitesi
M_u : Faktörlü yüklerden kaynaklanan en büyük eğilme momenti
M_y : Kesit akma momenti
N : Yük tekrarı adedi
N_f : Göçme anındaki yük tekrarı adedi
N_{tr} : Geçiş ömrü
P_{amp} : Değişken yük
P_C : Basınç başlığı akma kuvveti
P_{cr} : Numuneye uygulanan hareketli yük
P_{DC2} : Dağıtma kirişinden kaynaklanan sabit yük
P_{mean} : Sabit yük
P_y : Kiriş alt başlığında akma oluşturan yük
P_r : Kalan yük taşıma kapasitesi
P_S : Beton basınç kuvveti
P_T : Çekme başlığı akma kuvveti
P_W : Gövde akma kuvveti
P_u : Kirişi nihai dayanımına ulaştıran yük
Q_i : Nominal yük etkisi
R_h : Hibritlik katsayısı
R_n : Nominal dayanım
S_{LT} : Uzun süreli kompozit durumda mukavemet momenti
S_{NC} : Kompozit olmayan durumda mukavemet momenti
S_{ST} : Kısa süreli kompozit durumda mukavemet momenti
S, S_r : Gerilme aralığı büyüklüğü
Δf : Yorulma yükünden dolayı oluşan gerilme aralığı
ΔF_n : Nominal tasarım yorulma dayanımı
ΔF_{TH} : Sabit genlikli yorulma eşiği
σ_a : Değişken gerilme
σ_m : Sabit gerilme
σ_{max} : En büyük gerilme
σ_{min} : En küçük gerilme
η : Yük modifikasyon faktörü
η_D : Süneklik faktörü
η_R : Yapısal sistem faktörü
η_I : Yapı önem faktörü
Φ : Dayanım faktörü
γ : Yük faktörü
$\bar{Y}$: Plastik tarafsız eksenin bulunduğu elemanın üst noktasından uzaklığı

ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT KÖPRÜ KİRİŞLERİNDE YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde kullanımda olan birçok otoyol ve demiryolu köprüsü hizmet ömrünün yarısını veya daha fazlasını tamamlamış durumdadır. Bu köprülerin önemli bir kısmı yorulma etkilerinin tasarımda göz önüne alınmadığı dönemlerde yapılmış olup, yorulma hasarına karşı hassas tasarımsal ve yapısal öğeler barındırmaktadırlar. Bunun yanında, günümüz tasarım yönetmeliklerinde kullanılan yorulma tasarımı kriterlerinin çoğu 1970'li yıllarda sadece çelik kirişler ve numunelerle yapılan deneylere dayanmakta olup çelik-betonarme kompozit köprü kirişlerinin yorulma davranışı hakkında literatürde doyurucu bilgi bulunmamaktadır. Tüm bunlara ek olarak çevresel etkiler, artan taşıt yükleri ve artan trafik hacmi dikkate alındığında kompozit kirişlerde yorulma etkilerinin, üzerinde önemle durulması gereken bir konu olduğu görülmektedir.

Bu çalışma Sayın Barış Güneş'in "Karbon Lifli Polimerler (CFRP) ile Güçlendirilmiş Çelik-Betonarme Kompozit Kirişlerin Yorulma Davranışı" isimli doktora tezi çalışması kapsamında yapılmış bir çalışmadır. Tez kapsamında önce metal malzemelerin yorulmasına dair kırılma mekaniği bilgileri, sonrasında ise çelik ve çelik-betonarme kompozit köprü kirişleri hakkında günümüze kadar yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Bir sonraki aşamada beş adet küçük ölçekli çelik-betonarme kompozit kiriş üzerinde yapılan deneysel çalışma özetlenmiştir. Bu kirişlerden biri monotonik olarak yüklenerek kiriş kapasitesi bulunmuş, diğer dört numune ise farklı yük seviyelerinde sabit genlikli yorulma testine tabi tutularak numunelerin yorulma davranışı incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen bilgiler teorik bilgilerle karşılaştırılmış, sonuçlar grafikler ve tablolar yardımıyla verilmiştir. Buna göre; statik yükleme deney sonuçlarının teorik sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür. Yorulma deneyleri sonuçlarında ise kompozit kirişin alt başlığının akma limitinin %40'ı kadar gerilme oluşturan hareketli yük altında herhangi bir yorulma hasarı belirtisi görülmemiş ve numunenin sonsuz yorulma ömrüne sahip olduğu kabul edilerek statik yükleme altında kırılmıştır. Kiriş alt başlığında akma limitinin %60 ve %70'i düzeyinde çekme gerilmesi oluşturan yük seviyelerinde numune yorulma göçmesine uğramıştır. Bu yük seviyeleri için elde edilen sonuçların AASHTO LRFD 2007 yönetmeliğinde verilen kriterlerle uyumlu olduğu fakat gerçekte kirişin yorulma ömrünün beklendiği gibi daha yüksek olduğu görülmüştür.

FATIGUE BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BRIDGE BEAMS

SUMMARY

Significant number of highway and railway bridges in use today have nearly completed their design life or in the midst of it. Most of them were designed and built when bridge design codes did not have proper fatigue design provisions; therefore, they include several structural and conceptual susceptibilities to fatigue damage. Besides, fatigue design provisions in use today are based on the fatigue tests of steel beams and specimens which were tested in the 1970's and studies in the literature, which have been done on the fatigue behavior of steel-reinforced concrete composite beams, are far from being sufficient. Moreover, by taking into consideration of environmental factors, increasing vehicle loads and traffic density; the fatigue behavior of steel-reinforced concrete composite beams gains importance as a research topic.

In this study, a literature review about the fracture mechanics of metal material fatigue has been done and up-to-date studies about the steel-reinforced concrete composite beams are abridged. Afterwards, an experimental study on five small scale steel-reinforced concrete composite beams is summarized. One of these small scale composite beams has been tested under monotonic load and its beam capacity has been found. The other four have been tested under constant amplitude fatigue tests in order to examine the fatigue behavior.

Experimental data are compared with the theoretical calculations and comparison results have been given via tables and data plots. After all, it is observed that experimental results of static load tests are considerably close to theoretical expectations. In fatigue tests, under live load which produces stress values of 40% and 45% of the yielding limit of the bottom flange of composite beams, no fatigue damage has been observed and it is assumed that beams have infinite fatigue life, and then it is statistically loaded until failure occurs. However, for the stress values of 60% and 70% of the yielding limit of the bottom flange of composite beams, fatigue failure has been observed on samples. Results for these load levels are reasonable related to the AASHTO LRFD 2007 regulations, yet it is observed that in reality, fatigue life of the beam is higher as expected.

1. GİRİŞ

1.1 Köprülerin Önemi

Ulaşım ilk çağlardan beri insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından biri olarak ortaya çıkmıştır. Geçen zaman içinde çok çeşitli ulaşım hatları inşa edilmiş olup günümüzde de artan nüfusa paralel olarak artan ihtiyaçlar nedeniyle bu inşa süreci hızlanarak devam etmektedir. Her türlü kara ulaşımında, doğal ve yapay engellerin aşılması maksadıyla köprüler kullanılmaktadır. Bu bakımdan köprüler, bir kara ulaşım hattının vazgeçilmez unsurlarından biridir. Bunun yanında;

- Ulaşım sisteminin kapasitesinin belirlenmesinde kilit eleman olması
- Sistemde birim uzunluk başına en pahalı yapısal eleman olması
- Köprünün herhangi bir nedenden aksaması durumunda tüm sistemin aksaması

sebeplerinden dolayı, köprüler aynı zamanda sistemin en hassas ve önemli elemanlarından biridir.

Eğer bir köprü, trafik yoğunluğunu taşıyabilecek kadar şeride sahip değilse, söz konusu köprü trafik akışını engelleyecektir. Eğer köprü ağır kamyonları veya yük trenlerini taşıyacak şekilde tasarlanmamış veya hasarlı ise, ağır araçların trafik akışı başka bir güzergâha kaydırılacaktır. Bu açıdan bakıldığında köprüler, hem trafik hacmini hem de sistem tarafından taşınabilecek yük miktarını belirleyen en önemli etmendir.

Bir ulaşım sistemindeki köprü servisten kaldırılır ise ulaşım sistemi işlevini kısmen veya tamamen yitirir. Genelde sistemin işlevini sürdürmesi için, trafik başka güzergâhlara aktarılır. Genelde bu güzergâhlar, sistemin hacmini taşıyamayacak güzergâhlardır ve sistemi kullanan insanlara zaman ve para kaybına neden olurlar. Sistemden çıkarılan köprü tekrar hizmete sokulmadıkça, sistem normale dönmez.

Bu bilgiler göz önüne alındığında, köprülerin doğru tasarlanmasının ve hizmetlerinin aksatılmamasının, sistemin sağladığı ulaşım hizmetinin aksamamasında önemli rol oynadığını anlaşılmaktadır.

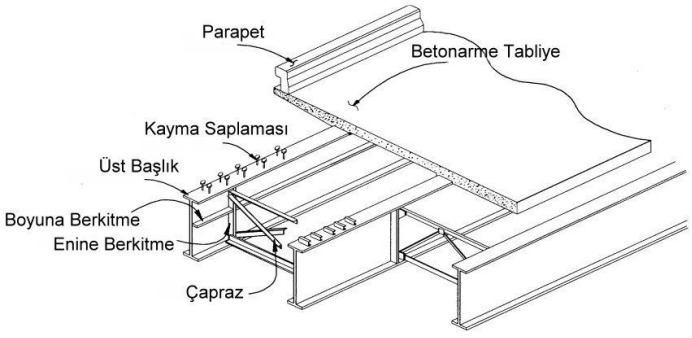
1.2 Çelik-Betonarme Kompozit Köprüler

Köprüler ana taşıyıcı sistemine göre genel olarak; betonarme plak, dolu gövde kirişli, kutu kesitli, askılı, asma, kemerli ve kafes sistem olarak sınıflandırılır.

Bir köprü yapısı, iki ana kısımdan oluşur. Bunlar üst yapı ve alt yapıdır. Üst yapı, köprünün orta ayak ve kenar ayak gibi destek yapılarının üzerindeki kısmının tamamını temsil eder. Üst yapı genellikle kaplama, tabliye, birincil taşıyıcı elemanlar (kesme kuvveti ve eğilme momenti taşıyan elemanlar), ikincil taşıyıcı elemanlardan (stabilite elemanları) oluşur. Alt yapı ise üst yapıyı destekleyen elemanları içerir ve kenar ayaklar, orta ayaklar, mesnetler, istinat duvarlarından meydana gelir.

Günümüzde otoyol köprüsü üst yapılarında, ana taşıyıcı malzeme olarak çelik ve betonarme tercih edilmektedir. Üst yapı ana taşıyıcı sistemi çelik olarak tasarlanmış köprüler uygulamada "çelik köprü" olarak tabir edilmektedir. Ana taşıyıcı kirişleri çelik-betonarme kompozit olan köprüler uygulamada "kompozit köprü" olarak tabir edilmektedirler.

Kompozit köprülerde taşıyıcı çelik kirişler ile köprü tabliyesini meydana getiren betonarme döşeme birbirine bağlanarak bu iki elemanın beraber çalışması sağlanır. Böylece hem dayanım arttırılırken deformasyonların da azaltılması amaçlanır. Betonarme tabliye ile çelik arasındaki bağlantı kayma saplaması adı verilen elemanlar yardımıyla yapılır. Tipik bir kompozit köprü üst yapısı Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 : Tipik çelik-betonarme kompozit köprü üst yapısı (Chen ve Duan, 2000).

Ekonomik olması, kolay ve hızlı inşa edilebilmesi özellikleri nedeniyle çelik-betonarme kompozit köprüler uygulamada en sık kullanılan köprü üst yapısı tiplerinden biridir.

1.3 Tezin Amacı

Mevcut köprü yönetmeliklerindeki yorulma ile ilgili kriterlerin 70'li yıllardan sonra olgunlaşmaya başladığı düşünüldüğünde binlerce çelik köprünün yorulmaya karşı hassas detaylar içerdiği, yani yorulma etkilerine karşı yeterli tasarlanmadığı düşünülmektedir. National Bridge Inventory'nin, 2009 yılına ait köprülerin malzeme bakımından sınıflandırılması raporunda (NBI, 2009a) ABD'deki otoyol köprüleri üst yapı malzemelerine göre sınıflandırılmış ve yapısal olarak yetersiz olanların adetleri belirtilmiştir. Sayıma dahil edilmiş 603307 adet otoyol köprüsünden 250717 adedinin (%41) betonarme, 186274 adedinin (%31) çelik, 137298 adedinin (%23) öngermeli betonarme, geri kalan 28959 adet (%5) köprünün ise ahşap, taş, demir, alüminyum köprü sınıfına girdiği görülmektedir. Bu köprülerden betonarme olanların 18209 adedinin (%7), çelik olanların 36836 adedinin (%20), öngermeli betonarme olanların 5414 adedinin (%4) yapısal olarak yetersiz olduğu belirtilmiştir. Piyasadaki kullanım sıklığı göz önünde bulundurulduğunda çelik tabir edilen köprülerin çok büyük çoğunluğunun dolu gövde kirişli kompozit köprüler olduğu tahmin edilmektedir. Aynı kurumun 2009 yılına ait köprülerin yapım yılına göre sınıflandırılması raporu (NBI, 2009b) incelendiğinde de, ülke genelindeki köprülerin inşasında İkinci Dünya Savaşı sonundan 2000'li yılların başına kadar bir patlama yaşandığı görülmektedir.

Ayrıca ASCE (1982) tarafından çelik köprülerdeki göçmelerin %80'inden fazlasının yorulma ve kırılmaya bağlı olarak gerçekleştiği belirtilmiştir.

Ülkemizde ise Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2010 yılı "Karayolları Bakımı Altındaki Devlet ve İl Yolları Üzerinde Bulunan Köprülerin Yıllara Göre Toplam Sayı ve Uzunlukları" raporu (KGM, 2010) incelendiğinde 5815 adet betonarme, 287 adet çelik, 56 adet taş köprü olmak üzere toplam 6158 köprünün hizmette olduğu görülmektedir. Ülkemizdeki köprülerin performans durumu hakkındaki genel bir çalışma ne yazık ki henüz yapılmamıştır. Fakat oransal olarak, ülkemizdeki kusurlu çelik köprü sayısının da Amerika Birleşik Devletleri'ndekine yakın olduğu tahmin edilmektedir.

Yorulma etkileri zamanla yapısal elemanlarda çatlaklara neden olabilmekte ve köprünün hizmet ömrünü azaltabilmektedir. Tüm bu bilgilerin ışığında; köprülerin yüksek yeniden yapım, tamir ve güçlendirme maliyetleri dikkate alındığında, mevcut köprülerin yorulma davranışının incelenmesi ve yapılacak olan köprülerde yorulma kriterlerinin daha iyi belirlenmesi bir gereklilik halini almaktadır. Bu tez çalışmasında; uygulamada sık kullanılan fakat konu üzerinde çok az çalışma bulunan betonarme-çelik kompozit köprü kirişlerinde yorulma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular mevcut tasarım yönetmelik kuralları ışığında değerlendirilmiştir.

Bu çalışma Sayın Barış Güneş'in "Karbon Lifli Polimerler (CFRP) ile Güçlendirilmiş Çelik-Betonarme Kompozit Kirişlerin Yorulma Davranışı" isimli doktora tezi çalışması kapsamında yapılmış bir çalışmadır.

2. ÇELİK KÖPRÜLERDE YORULMA

2.1 Metal Malzemelerin Yorulması

Metal malzemelerin yorulması, mühendisliğin birçok alanında karşılaşılan ve hakkında birçok çalışma yapılmış bir konudur. Malzemelerin yorulması hakkındaki ilk ciddi çalışmalar 19. yüzyılda yorulma etkisinin mühendislik araç ve yapılarında görülmesiyle başlamıştır. "Yorulma" kelimesi ilk olarak 1840'lı yıllarda kullanılmaya başlanmış ve konu hakkındaki ilk sistematik çalışmalar Alman mühendis August Wöhler (1819-1914) tarafından 1850'li ve 1860'lı yıllarda yapılmıştır. Wöhler, gerilme – yükleme sayısı diyagramları konseptini oluşturmuş ve yorulma davranışının en yüksek gerilmeden ziyade bu çalışmada daha sonra anlatılacak olan gerilme aralığına bağlı olduğunu göstermiştir. (Stephens ve diğ., 2001) Mühendislik araç ve yapılarının tarihinde birçok yorulma hasarı olayına rastlanır ki, bunların bazıları patlamalar veya bir köprünün tamamen yıkılması gibi ölümlü felaketlere yol açmıştır. Bu nedenle yorulma, üzerinde hassasiyetle durulması gereken önemli bir meseledir.

Metallerin yorulması sabit genlikli yorulma ve değişken genlikli yorulma olarak iki ana başlıkta incelenmektedir. Bu çalışmanın konusu sadece sabit genlikli yorulmayı kapsadığından sadece bu konunun üzerinde detaylı olarak durulacaktır.

Sabit genlikli yorulma, bütün yükleme adımlarının biçim ve büyüklük olarak birbirinin aynısı olduğu yorulma türüdür. Yükleme adımı, bir yüklemenin temel elemanıdır. Yükleme genellikle sinüzoidal şekilde uygulanır. Bir yükleme adımı sabit gerilme ve değişken gerilme oluşturan iki yük bileşeninden oluşur (Şekil 2.1). Sabit gerilme, yüklemenin sabit değerli bölümüdür ve σ_m simgesiyle gösterilir. Değişken gerilme ise yüklemenin değişken değerli bölümüdür ve σ_a ile gösterilir. Buna göre maksimum (σ_{max}) ve minimum (σ_{min}) gerilmeler:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \qquad \textbf{(2.1)}$$

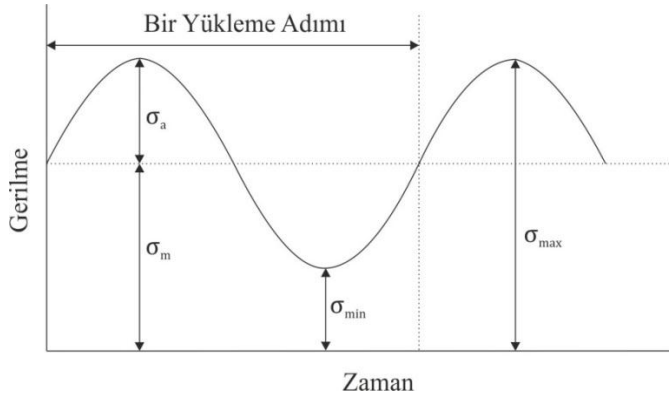
$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a \quad \textbf{(2.2)}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Aynı zamanda;

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \textbf{(2.3)}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \textbf{(2.4)}$$

olmaktadır.



Şekil 2.1 : Sabit genlikli yüklemeye ait bileşenler.

Yorulmanın mekanizması 20. yy'da mikroskobik inceleme alanında vuku bulan ilerlemeler ışığında açıklanabilmiştir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, tekrarlı yükler halindeki bir malzemede yorulma mekanizması oluşmakta, bu mekanizma gözle görülemeyecek kadar küçük çatlaklara (mikro çatlaklar) sebep olmakta, zamanla bu çatlaklar büyümekte ve nihayetinde elemanın tamamen göçmesine neden olmaktadır.

Yorulma mekanizmasının başlangıcından yapının göçmesine kadar olan sürece yapının yorulma ömrü denir. Bu süreç çatlak oluşma aşaması ve çatlak büyüme aşaması olmak üzere iki ana kısımda incelenmektedir. Bu kısımlar birbirinden ayrılırken, çatlak oluşma aşamasında çatlakların büyümediği akla gelmemelidir. Mikro çatlaklar yorulma ömrünün çok erken safhasında oluşmaya başlayıp süreç boyunca büyümeye devam etmekte fakat çatlak büyüme aşamasına kadar bu büyümeler gözle görülebilecek seviyede olmamaktadır.

2.1.1 Çatlak oluşma aşaması

Metallerde çatlak oluşması boyutları 10^{-3} mm mertebesinde olan taneciklerin plastik şekil değiştirmesine bağlı olarak gerçekleşir. Yüzey tanecikleri, dış ortama açık olduklarından, iç taneciklere göre daha az mesnetlidirler. Bu durum çok küçük gerilmelerde bile plastik şekil değiştirme yapabilmelerine neden olur ve bu durumun sonucunda tanecikler arasında kaymalar meydana gelir. Böylece mikro çatlaklar oluşmuş olur. Kaymalar bir kesme deformasyonudur ve metallerin kristal yapılarına bağlı olarak gelişirler. Dislokasyonların kristal düzlemler üzerindeki hareketleriyle meydana gelirler (Cottrell, 1964).

Monotonik yüklemede, metal düzleminde birbirine paralel kayma düzlemleri oluşur ve bu düzlemler yüzeyde çıkıntıya neden olur. Yön değiştiren yüklemelerde ise yük kaldırıldığında veya tersinir yük uygulandığında benzer kayma düzlemleri bu sefer girintiler meydana getirir. Bunun sonucunda yüzey çatlakları meydana gelir (Forsyth, 1969).

2.1.2 Çatlak büyüme aşaması

Metallerde çatlak büyüme aşaması, iki farklı seviyede meydana gelmektedir. Birinci aşama, çatlak oluşma aşamasında meydana gelen mikro çatlağın yönünü değiştirmeden büyümesini içerir. Bu çatlak kritik uzunluğa ulaştığında yönünü değiştirir. Kritik uzunluk, malzemenin mikro yapısına ve gerilme durumlarına büyük ölçüde bağlı olmakla beraber genelde 0.02 mm civarındadır. Bu geçişten sonra çatlak ikinci aşamaya ulaşır ve kesit boyunca yayılır. Sonrasında ise çatlak göçme aşamasına ulaşır (Forsyth 1969).

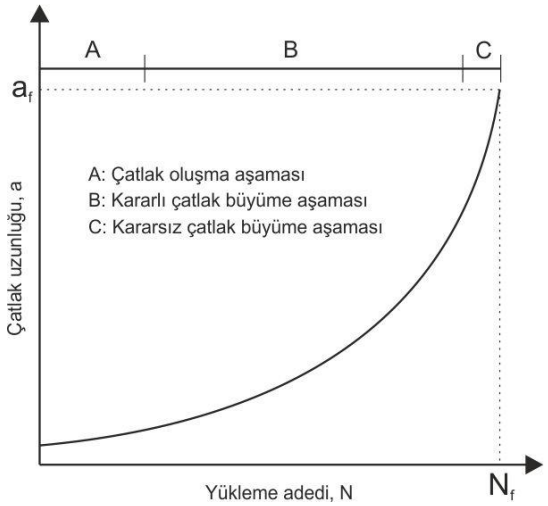
Josi (2010), yapısal elemanlarda, tekrarlı yükler altındaki yorulma ömrünü;

A. Çatlak oluşma aşaması
B. Kararlı çatlak büyüme aşaması
C. Kararsız çatlak büyüme aşaması

basamaklarında incelemiştir. Bu sınıflandırmanın grafiksel ifadesi Şekil 2.2'de verilmiştir.

2.2 Çelik Köprülerde Yorulma

Yorulma, çelik köprülerin yapısal yeterliliğini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Elemanlarda yerel olarak meydana gelen yorulma çatlakları, önlem alınmaması halinde büyüyebilir ve gevrek kırılmalara neden olarak elemanın veya köprünün tamamının göçmesine neden olabilir (Zhao, 2003).



Şekil 2.2 : Çatlak büyümesinin şematik gösterimi.

1950'li yıllardan başlayarak, otoyol ve demiryolu ağlarının gelişmesiyle beraber birçok çelik köprü inşa edilmiştir. Günümüzde bu köprülerin birçoğu yarı ömrünü veya ömrünü tamamlamaya yaklaşmıştır. Artan taşıt yükleri ve çevresel etkiler, çelik köprüleri yorulmaya karşı daha hassas bir hale getirmektedir. Bu nedenle yorulma, üzerinde dikkatle durulması ve ekonomik çözümler üretilmesi gereken bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çelik köprü üst yapıları, elemanların perçin, bulon veya kaynak gibi birleşim yöntemleriyle bir araya getirilmesinden oluşmuştur. Bu ana elemanlar ve birleşim elemanları tekrarlı yüklemeye maruz kaldığından yorulma meydana gelir. Yapısal eleman ve detaylarda yorulma ömrünü etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Josi, 2010):

- Yük yoğunluğu ve köprünün yaşı
- Detayların geometri ve imalat özellikleri
- Malzeme özellikleri

Yük Yoğunluğu ve Köprünün Yaşı: Yük yoğunluğu ve köprünün yaşı, köprünün maruz kaldığı toplam yük döngüsünü ve uygulanan yükün büyüklüğünü temsil etmektedir (Ressler, 1991). Köprülerde yük yoğunluğu Günlük Ortalama Kamyon Trafiği (GOKT) ile temsil edilmektedir. Günümüzde birçok otoyolda GOKT sürekli artış eğilimindedir (Moses, 1976).

Detayların geometri ve imalat özellikleri: Gerilme yığılmalarının, dış merkezliğin ve kalıcı çekme gerilmelerinin yüksek olduğu birleşim ve detaylar yorulma çatlaklarına karşı hassas elemanlardır (Josi, 2010). Özellikle kaynaklı birleşimler, yorulma etkilerine karşı hassas birleşim türlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Kaynaklı birleşimlerde yorulma çatlakları kaynaktaki veya kaynaklanan metal elemandaki süreksizlikler nedeniyle ortaya çıkar. Aynı zamanda kaynak geometrisi de yerel gerilme yığılmalarını etkileyen önemli bir faktördür. Örneğin köşe kaynak olarak tabir edilen kaynak türü yorulmaya karşı en hassas kaynak türlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Bu çalışmada da köşe kaynağa sahip detay tipi kullanılmıştır). Bu kaynak tipinde çatlak genellikle kaynağın uç noktasında başlar ve komşu metale doğru yayılır. Bunların yanında, kalıcı gerilmeler, distorsiyon, ısıl işlem gibi etmenler de kaynaklı birleşimlerin yorulma performansını etkileyebilmektedir (Barsom ve Rolfe, 1999).

Malzeme Özellikleri: Yapısal alanda sıklıkla kullanılan düşük alaşımlı çeliklerin yorulma performansını etkilemediği kabul edilmiştir (Fisher ve diğ., 1997). Fakat Alberta Üniversitesi tarafından yapılan araştırmalar (Chen ve diğ., 2005) yüksek mukavemetli çeliklerin (HPS), normal köprü çeliklerine (Grade 350WT) oranla daha uzun yorulma ömrüne sahip olduğunu göstermiştir. Buna paralel olarak Garbatov ve Guedes Soares (2004) malzemenin çekme dayanımı arttıkça yorulma ömrünün de arttığını göstermiştir.

Yorulmaya karşı oldukça hassas olan kaynaklı çelik köprüler 1950'li yıllardan itibaren sıklıkla inşa edilmiştir (Fisher, 1984). 1960'lı yıllardan itibaren yorulma çatlakları ilk olarak ek levhalarının uç kaynaklarında görülmeye başlandı. Guse ve berkitme levhaları gibi diğer kaynaklı birleşimlerde de yorulma çatlaklarının görülmesinden itibaren karşılaşılan çatlak sayısı ve tipinde 1970 ve 1980'li yıllarda önemli artış görüldü. Bundan itibaren diğer kaynaklı eleman detaylarında da 1970 ve 1980'li yıllarda sıklıkla çatlak oluşumlarıyla karşılaşıldı. Aynı zamanda 1970'li

yıllarda bir diğer önemli durum olan düzlem dışı davranış sebebiyle oluşan yorulma çatlaklarının farkına varıldı. Fisher (1997) tarafından verilen istatistiklere göre, ABD'de 123,000 otoyol ve demiryolu köprüsünün kaynaklı birleşime sahip olduğu, 50,000 tanesinin 1955 ile 1975 yılları arasında inşa edildiği, yaklaşık yüzde 10'unun ise yorulmaya karşı hassas detaylandırmaya sahip olduğu belirtilmiştir (Zhao, 2003).

2.2.1 Çelik köprülerde yorulma çatlaklarının sebepleri

Çelik köprülerde yorulma çatlaklarının oluşma nedenleri genel olarak aşağıdaki sebeplere bağlanmıştır:

- Distorsiyon kaynaklı yorulma
- İkincil gerilmeler
- Kaynak uygulamasına bağlı sorunlar

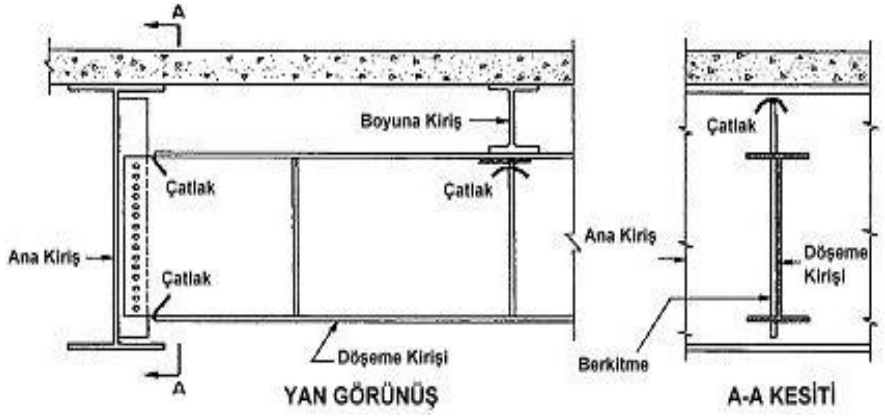
olarak sıralanabilir (Albrecht ve Wright, 2000).

Distorsiyon kaynaklı çatlaklar genellikle ana kirişlere bağlanan ve çoğunlukla diyafram, çapraz ve döşeme enine kirişlerinin bağlantısı için kullanılan dikey berkitme levhalarında meydana gelmektedir (Albrecht ve Wright, 2000). 1980'lerin başına kadar yapılan uygulamalarda, genellikle birleşim levhaları ana kirişin çekme başlığına kaynaklanmıyordu. Bazı uygulamalarda basınç başlığına da kaynaklanmadığı oluyordu. Bu nedenden dolayı gövdede küçük bir kısım boş kalıyor ve yük altında bu boşluğun olduğu kısımda oluşan dönme istemleri nedeniyle oldukça gerilmeler meydana gelerek yorulma çatlaklarına neden oluyordu (Şekil 2.3) (Zhao, 2003).

Sürekli kirişe sahip köprülerde açıklıklarda pozitif moment bölgeleri, orta ayak gibi desteklerin olduğu kısımlarda da negatif moment bölgeleri bulunur. Pozitif moment bölgeleri mesnetlerden uzak olduğu için yer değiştirme istemleri daha büyüktür. Yapılan saha incelemelerinde düzlem dışı davranışa bağlı yorulma çatlaklarının genellikle kiriş orta açıklığındaki pozitif moment bölgelerinde, büyük yer değiştirmeler nedeniyle meydana geldiği görülmüştür. Negatif moment bölgelerinde, yer değiştirmelerin daha az olması nedeniyle nispeten daha az yorulma çatlağı gözlenmiştir. Bunun yanında çatlakların kiriş üst başlığında daha çok meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebi ise üst başlığın betonarme tabliyeye rijit olarak bağlanmasından ve bundan dolayı yukarda bahsi geçen, gövdedeki desteksiz kalan

kısım ile birlikte hareket edememesidir. Kiriş alt başlıkları ise daha serbest hareket edebilmelerinden dolayı, düzlem dışı davranış kaynaklı yorulmaya karşı daha dayanıklıdırlar (Zhao, 2003).

Distorsiyon kaynaklı yorulma çatlakları aynı zamanda yatay çaprazlar için bağlantı elemanı olarak kullanılan yatay guse levhalarında da görülmektedir (Albrecht ve Wright, 2000).



Şekil 2.3 : Distorsiyon ve ikincil gerilme kaynaklı yorulma hasarları (Albrecht ve Wright, 2000).

Yorulma çatlakları tasarım aşamasında genellikle hesaba katılmayan ikincil gerilmeler nedeniyle de oluşabilmektedir. Örneğin gövde berkitme levhalarına bulonlanan enine kirişler genelde yarı-rijit olarak tasarlanır ve servis durumunda kesme kuvvetlerine ek olarak eğilme momenti etkisinde de kalırlar. Şekil 2.3'de bu duruma bir örnek verilmiştir. Ana kirişe bağlanan enine döşeme kirişinin bağlantı levhasına bağlanabilmesi için alt ve üst başlığının bir kısmı kesilmiştir. Yükleme esnasında oluşan ikincil gerilmeler nedeniyle her iki kesimin de köşelerinde yorulma çatlakları meydana gelmiştir.

Kaynak bölgeleri gerilme yığılmalarının yüksek olduğu bölgeler olduğundan dolayı bu kısımlarda yorulma çatlakları sıklıkla görülmektedir. İşçiliği düzgün yapılmamış yük taşıyan kaynaklarda ve yük taşımayacağı düşünülerek tasarlanan elemanların birleşim kaynaklarında (örneğin basınç bölgesinde gövdenin burkulmasını engellemek amacıyla kullanılan yatay berkitme levhasının estetik olarak bütünlemek amacıyla kirişin çekme bölgesine kaynaklanan levhalarda) yorulma çatlakları görülebilmektedir (Albrecht ve Wright, 2000).

2.2.2 Gerilme Esaslı Yorulma Analizi

Günümüzde sıklıkla kullanılan üç farklı yorulma analizi yöntemi vardır. Bunlar gerilme esaslı yaklaşım, şekil değiştirme esaslı yaklaşım ve lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) yaklaşımlarıdır. AASHTO gibi sık kullanılan yönetmelikler gerilme esaslı yaklaşımı baz alırlar. Bu çalışmada da gerilme esaslı tasarım baz alındığından sadece gerilme esaslı yaklaşıma değinilecektir.

Gerilme esaslı tasarım (bir diğer adıyla S-N eğrisi yaklaşımı) döngü sayısı yüksek yorulma problemlerinde uygulanabilen, gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde olduğu ve başlangıçta çatlaksız olan elemanlar için kullanılabilen bir tasarım yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın temelinde, laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin yardımı ile gerilme aralığı büyüklüğü S_R ve göçmenin meydana geldiği yükleme adedi N_f arasında Denklem 2.5'de verildiği gibi bir bağıntı kurma esası bulunmaktadır. A ve m elemana ve malzemeye bağlı katsayılar olmak üzere Basquin Kuralı;

$$N_f = A x S_R^{-m} \qquad \textbf{(2.5)}$$

olarak ifade edilmektedir. 2.7 İfadesi aynı zamanda $\log S_R$ ile $\log N_f$ arasındaki bir lineer bağıntının ifadesi olmaktadır. Analiz yönteminin deneysel temelli olmasından dolayı bu yöntemle sadece üzerinde test yapılmış detay türleri analiz edilmekte, bu detay tiplerinin dışında kalan detaylar için yöntem geçersiz olmaktadır.

Kaynaklı birleşimlerin yorulma dayanımı bulonlu birleşimlere göre genellikle daha düşüktür (Picard ve diğ., 1991). Kaynaklı birleşimlerde meydana gelen kalıcı gerilmeler, geometrik süreksizlikler ve kaynak yüzeyindeki kusurlar bu tür birleşimlerin yorulmaya karşı daha hassas olmasına neden olur. Ayrıca, yapılar tasarlanırken, birleşim hesaplarında yığılmış gerilmeler dikkate alınmaz ve birleşimler standart analiz yöntemleriyle elde edilen nominal gerilmelere göre hesaplanır. Tüm bu nedenlerden dolayı kaynaklı birleşimler üzerinde hassasiyetle durulması gereken birleşim türleridir.

AASHTO standartlarında yer alan yorulma tasarımı kriterleri, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) tarafından 1967'de başlatılan kaynaklı köprü detaylarının yorulma dayanımı çalışmalarını temel almaktadır. Bu çalışmalarda gerçek boyutlu numuneler kullanılarak gerilme geçmişinin, detay geometrisinin,

imalat kalitesinin ve çelik malzeme türünün yorulma davranışına etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları 102, 147, 188, 206, 227, 267, 286 numaralı NCHRP raporlarında verilmiştir. 102 numaralı raporda (Fisher ve diğ., 1970) 374 adet 3 m. uzunluğundaki kirişler iki noktalı yükleme altında sabit genlikli ve 83-110 MPa arasında değişen gerilme aralıklarında test edilmiştir. Bu kirişlerin 204 tanesi ek levhalı, 84 tanesi başlık ekli ve 86 tanesi ise düz hadde profillerden oluşmaktaydı. 147 Numaralı raporda ise (Fisher ve diğ., 1974), 157 adet 3 ila 6 m. arası çelik kirişler iki noktalı, sabit genlikli yükleme altında test edilmiştir. Bu numunelerin ise 29'u düz hadde profil, 69 tanesi tek taraftan enine berkitmeli, 59 tanesi ise başlık ekleri ile imal edilmiştir.

Bu çalışmalar, yapısal detayların yorulmaya karşı tasarımında en önemli faktörün gerilme aralığı olduğunu göstermiştir (Clarke, 1997). Çalışmalarda kullanılan detay tipleri A sınıfı birleşimler en yüksek yorulma dayanımına sahipken E sınıfı birleşimler en düşük yorulma dayanımına sahip olacak şekilde A'dan E'ye kadar sınıflandırılmıştır. Her kategoride 100,000 tekrar, 500,000 tekrar, 2,000,000 tekrar ve 2,000,000'dan daha fazla tekrar durumları için bir müsaade edilen yorulma gerilme aralığı, F_{sr} önerilmiştir. Sonrasında ise 206 numaralı rapor (Fisher ve diğ., 1979) hazırlandı. Bu çalışmada ek levhalı hadde profiller 28 ile 58 MPa arasında değişen gerilme aralıkları altında sabit genlikli yorulma testine tabi tutulmuştur. Bu rapor sonucunda E' olarak adlandırılan yeni bir kategori mevcut sınıflandırmaya eklendi. 227 numaralı raporun temel aldığı çalışmada da 18 adet gövde ve başlıkları yanal plakalarla güçlendirilmiş numuneler gerilme aralığı 41-103 MPa arasında değişen sabit genlikli yorulma testine tabi tutulmuştur.

188 numaralı raporda (Schilling ve diğ., 1978) ve 267 numaralı raporda (Fisher ve diğ., 1983) kaynaklı birleşime sahip elemanların değişken genlikli yorulma testleri baz alınmıştır. Bu iki rapordan iki önemli sonuç elde edilmiştir. Bu sonuçlardan birincisi sabit genlikli yükleme ile değişken genlikli yükleme arasındaki bağıntının hem Miner Kuralı hem de RMS (Root Mean Square) yöntemi ile kurulabileceğidir. Bu iki terim arasındaki bağıntı; eşit sayıda yükleme tekrarı için, efektif sabit genlikli gerilme aralığının değişken genlikli gerilme aralığıyla aynı yorulma hasarını yaptığı yüklemeyi ifade eder. Bu sonuçların ikincisi ise tek bir yükleme adımının sabit genlikli yükleme eşiğini geçmesi durumunda bütün yükleme adımlarının yorulma hasarına katkıda bulunacağıdır.

286 numaralı raporda ise (Keating ve diğ., 1986) AASHTO yorulma tasarımı eğrilerinin yapılan diğer yorulma çalışmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılmasını baz alır. Bu çalışma sonucunda AASHTO yorulma eğrilerinin -3.0 sabit eğimle oluşturulmasına karar verilmiştir. Nitekim gerçek boyutlu elemanların test sonuçlarına ait eğrilerin eğimi genellikle 2.9 ve 3.1 arasında kalmaktaydı (Fisher ve diğ., 1993). Aynı zamanda B' olarak adlandırılan ve boylamasına yarı penetrasyonlu yiv kaynaklı birleşimleri baz alan bir kategori daha eklenmiştir.

Öte yandan Fisher ve diğ (1970, 1974, 1993) sabit genlikli yükleme deneylerinde, gerçek boyutlu numunelerde sabit gerilmenin yorulma ömrü üzerinde kayda değer etkisinin olmadığını, en büyük etkinin gerilme aralığına bağlı olarak gerçekleştiğini belirtmiştir. Aynı çalışmalarda, çelik mukavemetinin ve tipinin bir birleşimden beklenen yorulma performansı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar sonucunda gerilme aralığının numunelerin yorulma ömrü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Birleşim detayı geometrisi ve yükleme frekansının yorulma çatlağı oluşumuna neden ikincil faktörler olduğu vurgulanmıştır. (Fisher, 1997).

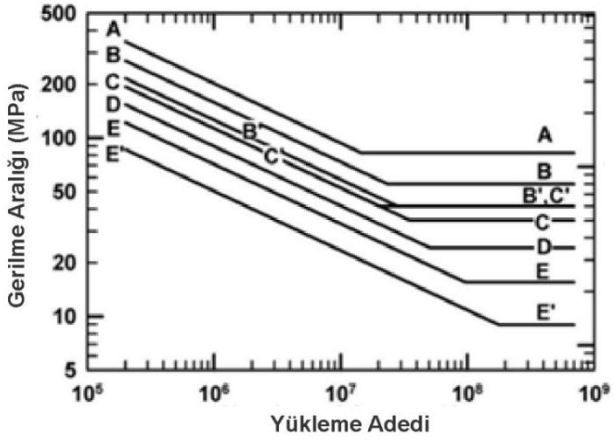
Stephens ve diğ (2001), küçük boyutlu numunelerde yorulma ömrünün büyük boyutlu numunelere göre daha fazla olabileceği belirtilmiştir. Schijve (2001); bu durumu malzeme yüzeyi arttıkça yorulma çatlağının oluşması olasılığının da artmasına bağlamıştır.

Stephens ve diğ (2001), genel olarak 200 Hz'e kadar olan frekanslarda frekansın yorulma ömrü üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmiştir.

Güncel 2007 AASHTO LRFD Standardında da köprü eleman ve birleşimlerinin yorulma dayanımını sınıflandırmak amacıyla 8 farklı kategori belirlenmiştir. Genel olarak A kategorisi düz elemanları, B kategorisi destek çubuğu bulundurmayan ek levhasız yapma kirişlerdeki kaynaklı birleşimleri (genellikle gerilme eksenine paralel kaynak bulunduran detayları), B´ kategorisi destek çubuğu bulunduran ek levhasız yapma kirişlerdeki kaynaklı birleşimleri, C kategorisi 50 mm'den kısa alın veya köşe kaynaklı ek levhaları, C' kategorisi başlık ve/veya gövdeye gerilme eksenine dik köşe kaynağı kaynaklanan enine berkitmeleri, D kategorisi 50-100 mm uzunluğundaki kaynaklı ek levhaları, E ve E´ kategorisi ise ek levhası bitişinin

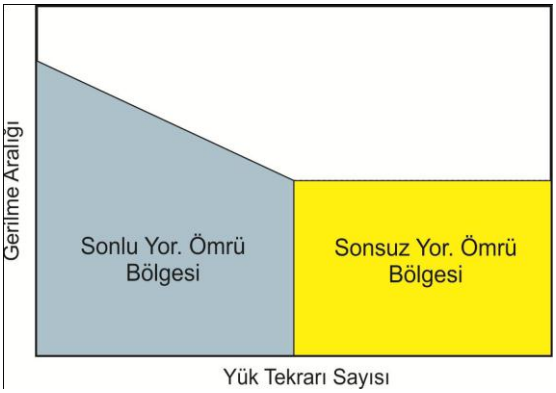
kaynaklı olduğu birleşimleri içermektedir. (Bu kategorilerin detaylı açıklaması ve temsili şekilleri için ilgili standartta Tablo 6.6.1.2.3-1'e başvurulabilir). Bu kategorilerin her birinin yorulma davranışı Şekil 2.4'de verilen S-N eğrileri grafiği ile gösterilmiştir.

Bu davranışta sonlu yorulma ömrü ve sonsuz yorulma ömrü olarak adlandırılan iki ayrı davranış söz konusudur. Grafikteki eğimli çizgiler sonlu yorulma ömrünü temsil ederken düz çizgiler ise aynı zamanda üst sınırı sabit genlikli yorulma eşiği (ΔF_{TH}) değeri olan sonsuz yorulma ömrünü temsil eder (Şekil 2.5).



Şekil 2.4 : AASHTO detay kategorilerinin yükleme sayısı – gerilme aralığı eğrileri.

Sonlu yorulma ömrü bölgesindeki bir elemanda her gerilme aralığının belli bir maksimum yük tekrarı sayısı vardır. Sonsuz yorulma ömrü bölgesindeki elemanın ise teorik olarak sonsuz yorulma ömrü olduğu yani bu elemanın tekrarlı yükler altında göçmeyeceği kabul edilir.



Şekil 2.5 : Sonlu ve sonsuz yorulma ömrü bölgeleri.

Yukarda bahsi geçen deneysel çalışmalar (ΔF_{TH}) değerinin altındaki sabit genlikli gerilme aralıklarında elemanda kayda değer çatlakların oluşmayacağı ve elemanın sonsuz yorulma ömrüne sahip olacağına dikkat çekilmiştir. Fakat üzerindeki trafik yükünün biçimi ve büyüklüğünün değişken olmasından dolayı gerçekte köprüler değişken genlikli yüklemeye maruzdur. Gerçek boyutlu numunelerde, değişken genlikli yükleme testlerine dayanılarak, NCHRP 354 no'lu raporda (Fisher, 1993) uygulanan gerilme adımlarının % 0.01'inin bile (ΔF_{TH}) değerini geçmesi halinde yorulma çatlaklarının oluşabileceği belirtilmiştir.

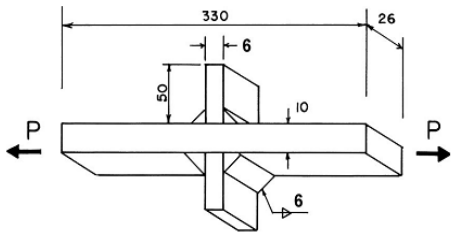
2.2.3 Konuyla ilgili yapılmış önemli çalışmalar

2.2.3.1 Albrecht ve Wright (2000)

Albrecht ve Wright (2000) çalışmalarında değişken ve sabit genlikli yükleme deneylerinden oluşan birçok çalışmayı özetlemişlerdir. Bu çalışmade özetlenen çalışmalar aşağıda verilmiştir:

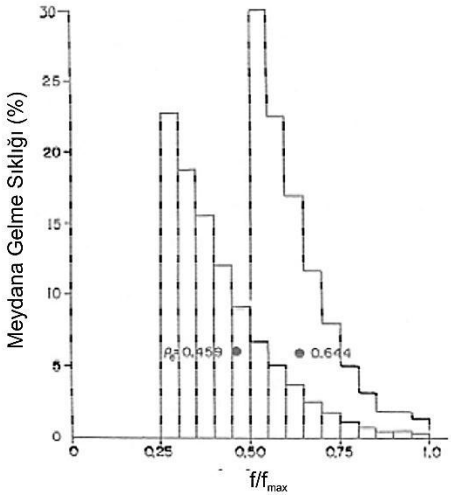
Bugüne kadar yapılmış çalışmalar incelenirken numunenin hangi yorulma bölgesinde göçtüğünü anlamak sonuçların değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu değerlendirmenin daha rahat yapılabilmesi için Albrecht ve Wright (2000) yaptıkları incelemelerde bazı parametreler belirlemişlerdir. Bu parametrelerden biri geçiş ömrü olarak tabir edilen N_{tr} değeridir. Geçiş ömrü, sonlu ve sonsuz yorulma bölgelerini ayıran yük tekrarı sayısıdır. Çalışmada sabit genlikli yorulma dayanımı ile değişken genlikli dayanım arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için numunenin en az $5N_{tr}$ yük tekrarı ile test edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Her birleşim tipinin geçiş ömrü farklı olduğundan, numunenin test edildiği sürenin daha net fikir vermesi amacıyla uzun ömür faktörü olarak adlandırılan ve test edilen yük sayısının geçiş ömrüne oranı olarak ifade edilen N/N_{tr} katsayısı tanımlanmıştır. Takip eden S-N diyagramlarında bir çizgi yardımıyla numaralandırılan değerler o yükleme aralığında birbirinin aynısı kaç numune test edildiğini göstermektedir.

Albrecht ve Friedland (1979): Bu çalışmada enine berkitme levhalı seksen üç çekme numunesi (Şekil 2.6)



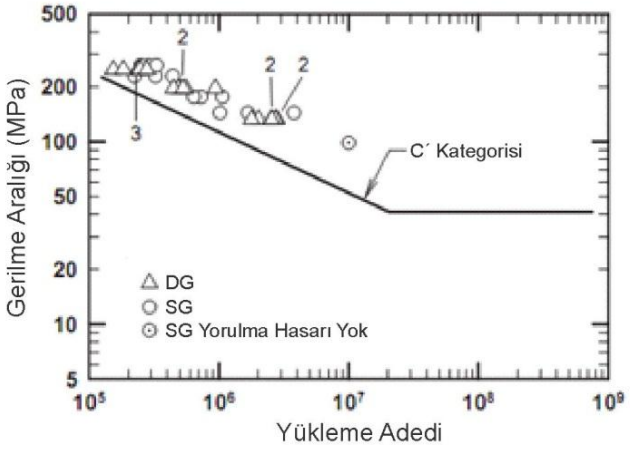
Şekil 2.6 : Berkitme levhalı çekme numunesi (Albrecht and Friedland, 1979) (Ölçüler: mm).

Numuneler 29 farklı köprüden toplanan verilerle oluşturulmuş gerilme histogramı altında değişken genlikli yüklemeye tabi tutulmuştur. Yük histogramı Şekil 2.7'de verilmiştir.

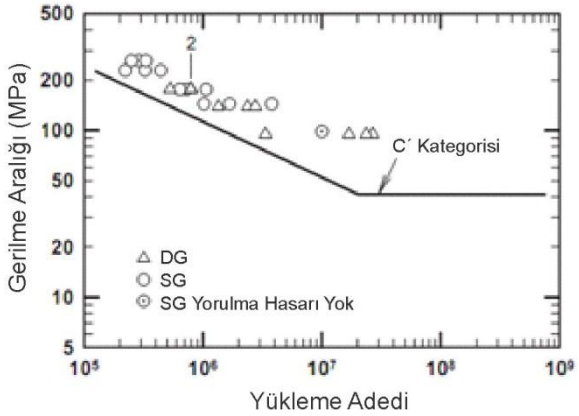


Şekil 2.7 : Albrecht ve Friedland'ın (1979) çalışmalarında kullandıkları spectrum.

Bu çalışmanın sonucunda değişken genlikli yorulma dayanımının bir katsayıya bağlı olarak sabit genlikli yorulma dayanımı değerinin altında kaldığı vurgulanmıştır. Bahsi geçen katsayı eşdeğer gerilme aralığının değişken genlikli yükleme spektrumundaki en büyük değere bölümüyle elde edilmektedir. Diğer bir deyişle, en büyük gerilme aralığı değeri sabit genlikli yorulma limitine eşit olduğunda değişken genlikli yorulma limitine ulaşılmış olmaktadır. Şekil 2.8-2.10 sırasıyla; otomatik kaynaklı birinci seri numunelerine, otomatik kaynaklı ikinci seri numunelerine ve manuel kaynaklı numunelere ait S-N grafikleri görülmektedir:

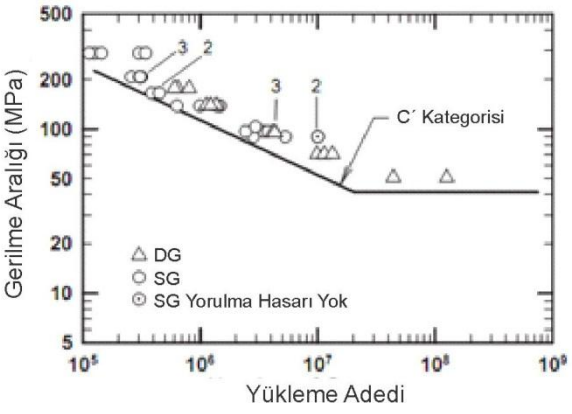


Şekil 2.8 : Otomatik kaynaklı birinci seri numuneler için S-N diyagramı (Albrecht ve Friedland, 1979).

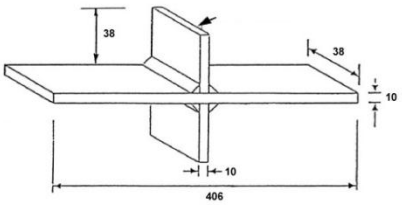


Şekil 2.9 : Otomatik kaynaklı ikinci seri numuneler için S-N diyagramı (Albrecht ve Friedland, 1979).

Klippstein ve Schilling (1989): Bu çalışmada enine berkitmeli çekme numuneleri kullanılmıştır (Şekil 2.11).

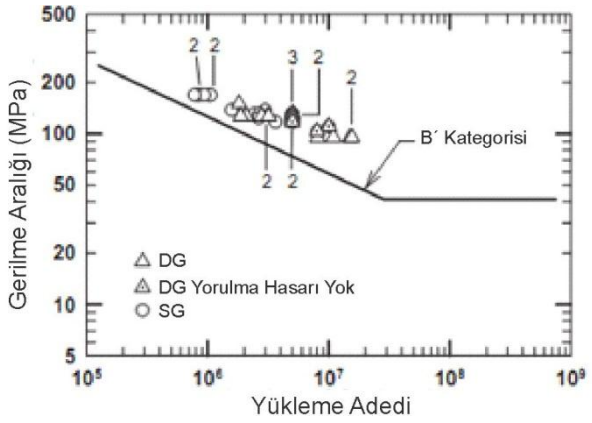


Şekil 2.10 : Manuel kaynaklı numuneler için S-N diyagramı (Albrecht ve Friedland, 1979).



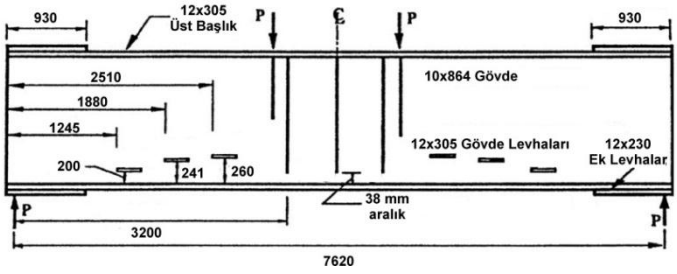
Şekil 2.11 : Enine berkitmeli çekme numunesi (Klippstein ve Schilling, 1989) (Ölçüler: mm).

Sabit genlik altında yirmi yedi numune, değişken genlik altında da on numune test edilmiştir. Levha malzemesi olarak ASTM A572 kullanılmıştır. Detaylar kategori B' yorulma dayanımına göre değerlendirilmiştir. Tüm numuneler sonlu yorulma ömrü bölgesinde test edilmiştir. Sabit ve değişken genlikli yüklemeye ait deneylerin sonuçları birbiriyle uyumludur (Şekil 2.12).

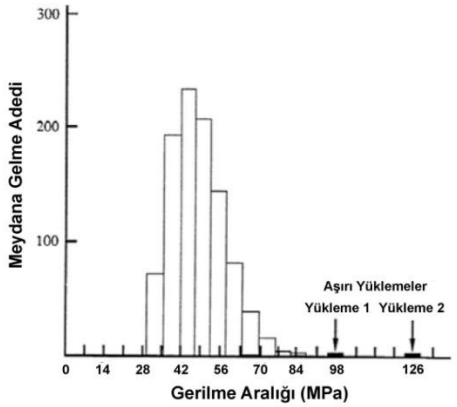


Şekil 2.12 : Enine berkitmeli çekme numunesine ait S-N diyagramı (Klippstein ve Schilling, 1989).

Fisher ve diğ. (1993): Bu çalışmada her biri üç farklı detaya sahip olan üç farklı kiriş test edilmiştir. Söz konusu detaylar İki E' kategorisi ek levhalı, altı E' kategorisi yatay guse levhası ve üç C' kategorisi dikey berkitme levhasıydı (Şekil 2.13). Tüm levhalar ASTM A36 çeliğinden imal edilmiştir. Numuneler Şekil 2.14'de verilen ve aşırı yüklemeler de bulunduran spektrum kullanılarak test edilmiştir.

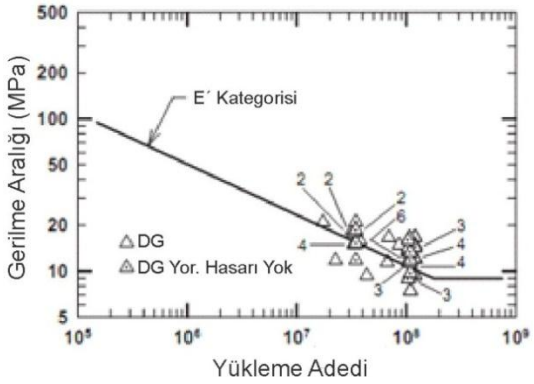


Şekil 2.13 : Fisher'ın (1993) kullandığı numune (Ölçüler: mm).

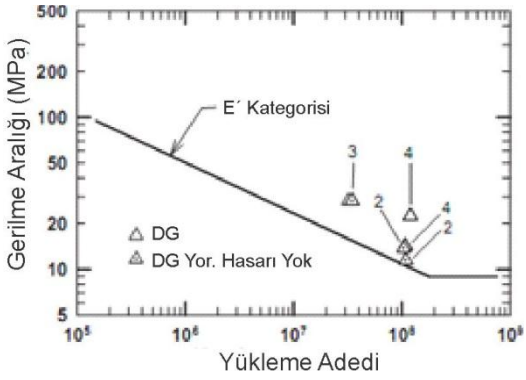


Şekil 2.14 : Fisher'ın (1993) kullandığı yük spektrumu.

Kirişler 120 milyon kez yüklenmiştir. 16 ek levhanın 1 tanesinde, 96 gövde ek levhasının 20 tanesinde ve 24 dikey berkitmenin 2 tanesinde çatlakların kesit kalınlığı boyunca büyüdüğü görülmüştür. Kalan numunelerin 86'sında uzun yükleme boyunca hasar oluşmamış, 23 numunede ise gerek deney esnasında gerekse deney sonunda eleman boyunca çatlaklar görülmüştür. Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da guse levhasına ve ek levhaya ait S-N sonuçları verilmiştir.

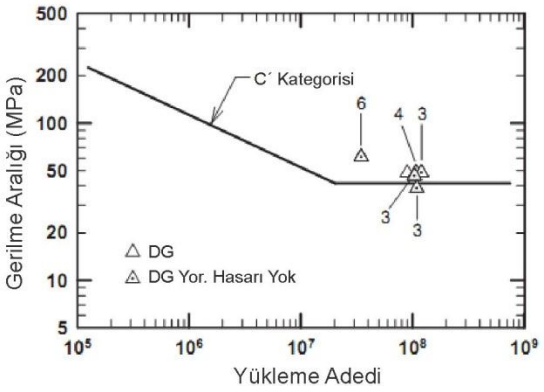


Şekil 2.15 : Guse levhalı detaya ait S-N diyagramı (Fisher ve diğ., 1993).



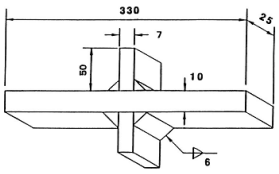
Şekil 2.16 : Ek levhalı detaya ait S-N diyagramı (Fisher ve diğ., 1993).

Dikey berkitmeler ise sonsuz ömür bölgesinde kalmıştır. Bu detaya ait S-N sonuçları da Şekil 2.17'de verilmiştir.



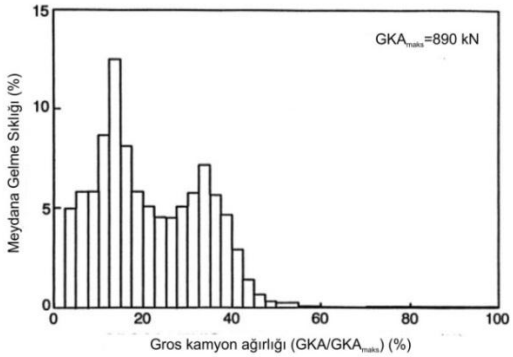
Şekil 2.17 : Dikey berkitmelere ait S-N eğrisi (Fisher ve diğ., 1993).

Albrecht ve diğ. (1994): Bu çalışmada A572 çeliği ile üretilmiş Klippstein ve Schilling'in (1989) kullandığıyla aynı olan (Şekil 2.11) enine berkitmeli numuneler ile Şekil 2.18'de görülen A588 çeliğinden üretilmiş manuel kaynaklı enine berkitmeli numuneler kullanılmıştır.



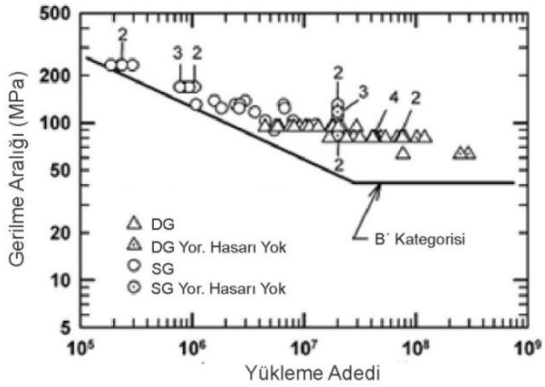
Şekil 2.18 : A588 manuel kaynaklı boyuna berkitmeli numune (Albrecht ve diğ., 1994) (Ölçüler: mm).

Çalışmada kullanılan spektrum Şekil 2.19'da verilmiştir. Bu spektrum gerçek köprülerdeki incelemeler vasıtasıyla ölçülen kamyon yüklerinin (GKA) ölçülen en büyük kamyon ağırlığına (GKA_{maks}) oranlanmasıyla elde edilmiştir.

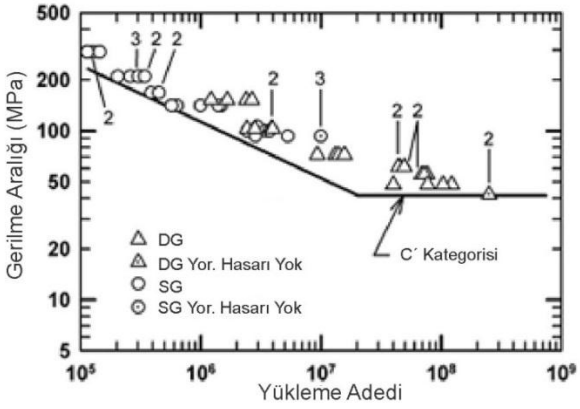


Şekil 2.19 : Albrecht ve diğerlerinin (1994) çalışmalarında kullandıkları yük spektrumu.

Şekil 2.20 ve Şekil 2.21 sırasıyla her bir numune tipi için S-N grafiklerini göstermektedir.



Şekil 2.20 : A572 çekme numunesine ait S-N diyagramı (Albrecht ve diğ., 1994).



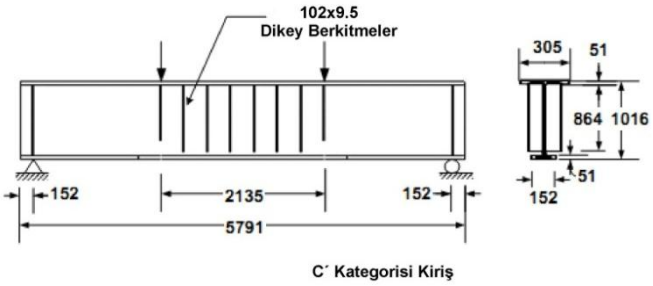
Şekil 2.21 : A588 berkitmeli çekme numunesine ait S-N diyagramı (Albrecht ve diğ., 1994).

Sonuçlar daha öncesinde Albrecht ve Friedland (1979) tarafından bulunmuş sonuçları desteklemektedir:

- Değişken genlikli teste ait veriler RMC metoduyla eşdeğer gerilme aralığına çevrildiğinde sabit genlikli test sonuçlarıyla birbirine yakın çıkmaktadır. (RMC metodu bir serisinin istatistiki ölçümünü sağlayan bir hesap yöntemidir.)
- Spektrumdaki en büyük gerilme aralığı sabit genlikli yorulma dayanımına eriştiğinde, spektrumun eşdeğer gerilme aralığı değişken genlikli yorulma dayanımına eşit olmaktadır.

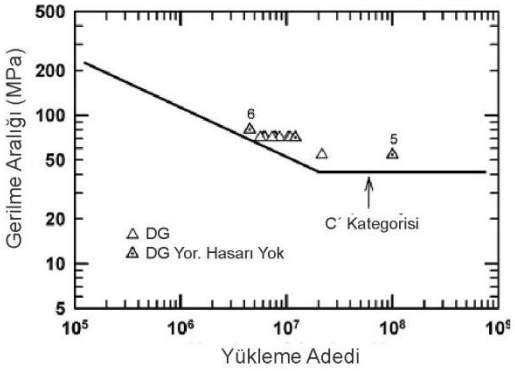
- Sabit genlikli yorulma dayanımının altında kalan değişken genlikli yükleme aralığı adedi arttıkça başlangıçta düz olan S-N çizgisi gittikçe eğri halini alarak değişken genlikli yorulma dayanımına yakınsamaktadır.
- Bir detay için sabit genlikli yorulma dayanımı tek olmakla beraber, değişken genlikli yorulma dayanımı yükleme spektrumuna göre değişebilmektedir.

Wright (1993): Bu çalışmada C' sınıfı enine berkitmeli, gerçek boyutlu numuneler test edilmiştir (Şekil 2.22). Yük spektrumu olarak Albrecht ve diğerlerinin (1994) çalışmasında kullanılan yük spektrumu seçilmiştir (Şekil 2.19). Kirişler 1,016 mm derinliğindeydiler ve orta kısmında 2,135 mm'lik bir sabit moment bölgesi ihtiva ediyorlardı. Yükler iki adet 980 kN kapasiteli MTS sistemiyle uygulanmıştır.



Şekil 2.22 : Enine berkitmeli kiriş (Wright, 1993) (Ölçüler: mm).

Numunelerdeki detaylarda minimum gerilme 6.9 MPa, olarak belirlenmiştir. Şekil 2.23'de çalışmaya ait S-N verileri gösterilmiştir. C' sınıfı verilerinde 54 MPa gerilme aralığında 100 milyon yüklemelik hasarsız testler görülmektedir. Bu veriler aynı spektrumu kullanılan fakat küçük ölçekli numunelerle çalışılan Albrecht ve diğ. (1994) çalışmasına ait verilerle uyuşmaktadır.



Şekil 2.23 : Dikey berkitmeli kiriş için S-N sonuçları (Wright, 1993).

Buraya kadar anlatılan çalışmalar Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

2.2.3.2 Richard ve diğ. (1997)

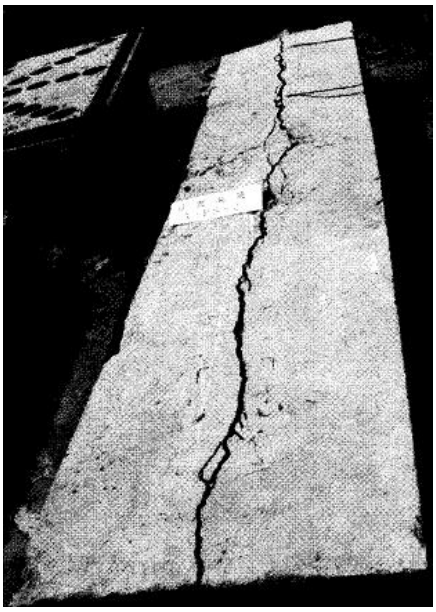
Bu çalışmada 70 mm kalınlıkta betonarme döşemeye sahip, 100 x 100 mm geniş başlıklı kirişlerden oluşan yarı ölçekli kompozit numunelerin yorulma davranışı incelenmiştir. Donatı dağılımının yorulma kapasitesine etkisinin incelenmesi amacıyla, çalışmada iki tip döşeme donatısı kullanılmıştır. Bunlardan birincisi standart donatılardan oluşan döşeme (A grubu), diğeri ise çelik hasırın donatı olarak kullanıldığı döşemedir (B grubu). Her iki döşemede de aynı donatı oranına sahip olup, ikinci döşemede donatı yerleşimi daha sıktır. Aynı zamanda tam kompozit ve kısmi kompozit olmak üzere saplama adetleri farklı iki farklı kompozit kiriş kullanılmıştır.

Çizelge 2.1 : Önemli yorulma dayanımı çalışmalarının özeti.

Çalışma	Detay Tipi	AASHTO Detay Kategorisi	En Uzun Test Ömrü N ($x10^6$)	Geçiş Ömrü N ($x10^6$)	Uzun Ömür Faktörü N/N_{tr}
Albrecht ve Friedland (1979)	Otomatik kaynaklı iki çift enine berkitme levhalı çekme numunesi	C'	26.7	20.4	1.31
	Manuel kaynaklı iki çift enine berkitme levhalı çekme numunesi	C'	125.0	20.4	6.13
Klippstein ve Schilling (1989)	2 Enine berkitme levhalı çekme numunesi	B	15.5	23.6	0.66
Fisher ve diğ. (1993)	3 Enine berkitme levhalı yapma kiriş	C'	120.0	26.7	4.50
	6 Gövde guse levhalı yapma kiriş	E'	120.0	178.5	0.62
	İki 25x230x1100 mm ek levhalı yapma kiriş	E'	120.0	178.5	0.62
Albrecht ve diğ. (1994)	2 Enine berkitme levhalı çekme numunesi	B	294.0	23.6	12.50
	Manuel kaynaklı 2 enine berkitme levhalı çekme numunesi	C'	250.0	20.4	12.30
	7x45x100 mm plaka kaynaklı çekme numunesi	C'	252.0	20.4	12.40
Wright (1993)	6 Dikey berkitmeli yapma kiriş	C'	100.0	20.4	4.90
	6 Guse levhalı yapma kiriş	D	89.7	51.2	1.75

Çalışmada öncelikle kirişler statik olarak yüklenerek kapasiteleri belirlenmiştir. Çizelge 2.2'de görüldüğü üzere sık donatı dağılımlı kirişlerde yaklaşık % 8 daha fazla kapasite elde edilmiştir. Tüm numuneler kirişte betonun kiriş boyuna doğrultusunda çatlamasıyla göçmüştür (Şekil 2.24).

Kirişlerin akma yükü P_y = 78.4 kN olarak belirlenmiştir. Deneylerde $0.20P_y$ değişken yük (P_{amp}) $0.40P_y$, $0.50P_y$ ve $0.60P_y$ de sabit yük (P_{mean}) olmak üzere en fazla $0.80P_y$ ($0.60P_y$ + $0.20P_y$) yorulma yükü 10 Hz frekans ile uygulanmış ve numuneler 2,000,000 adet yüklemeye kadar test edilmiştir.

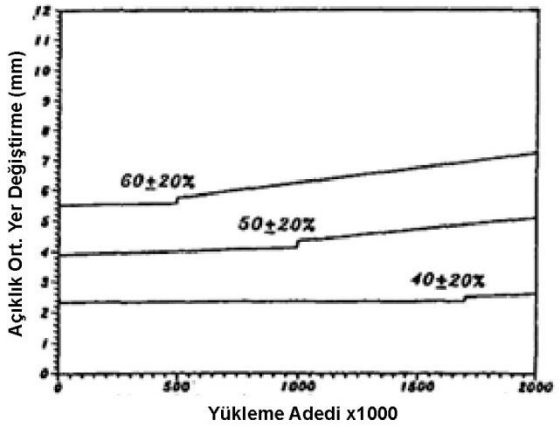


Şekil 2.24 : Statik yükleme deneyinden sonra numunede göçme hasarı (Richard ve diğ., 1997).

Çizelge 2.2 : Richard ve diğ., (1997) kiriş statik kapasite sonuçları.

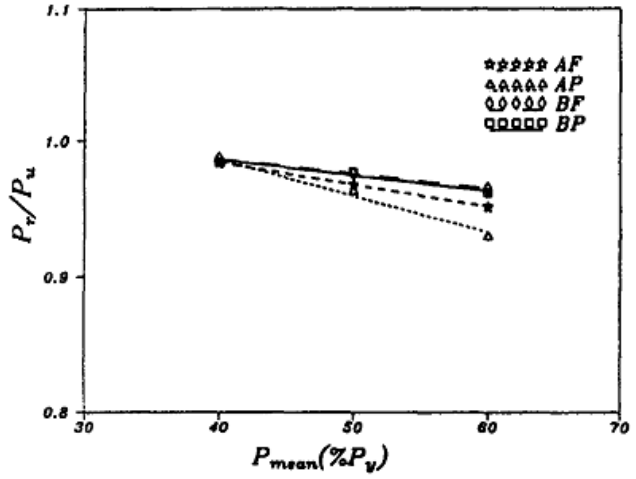
Numune	Kapasite (kN)	Moment Kapasitesi (kNxmm)	Beton Dayanımı (MPa)
Seyrek Donatı, Tam Kompozit (AF)	123	4.93×10^4	20.87
Seyrek Donatı, Kısmi Kompozit (AP)	120	4.81×10^4	20.38
Sık Donatı, Tam Kompozit (BF)	130	5.21×10^4	20.58
Sık Donatı, Kısmi Kompozit (BP)	128	5.13×10^4	20.58

Numunelerin hiçbirinde yorulma kaynaklı göçme oluşmamıştır. Şekil 2.25'de seyrek donatılı kiriş, tam kompozit kiriş için açıklıktaki yer değiştirme grafiği verilmiştir. Diğer numuneler için de söz konusu grafik benzerdir. Söz konusu şekilde görüldüğü gibi, yerdeğiştirmeler yükleme sayısını bağlı olarak önce artmış, betondaki çatlaklar hesaplanan tarafsız ekseni geçtiğinde ise deplasmanlarda bir zıplama gözlenmiştir. Bu zıplamalardan sonra ise açıklık yerdeğiştirmelerin daha hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Bunun yanında seyrek donatılı tam kompozit kirişlerin, kısmi kompozit kirişlere göre, yerdeğiştirmelerdeki zıplamadan önce % 30 daha fazla yük tekrarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Sık donatılı kirişlerde ise bu oran % 5'lerde kalmıştır.



Şekil 2.25 : Seyrek donatılı tam kompozit numunenin açıklık yerdeğiştirmeleri (Richard ve diğ., 1997).

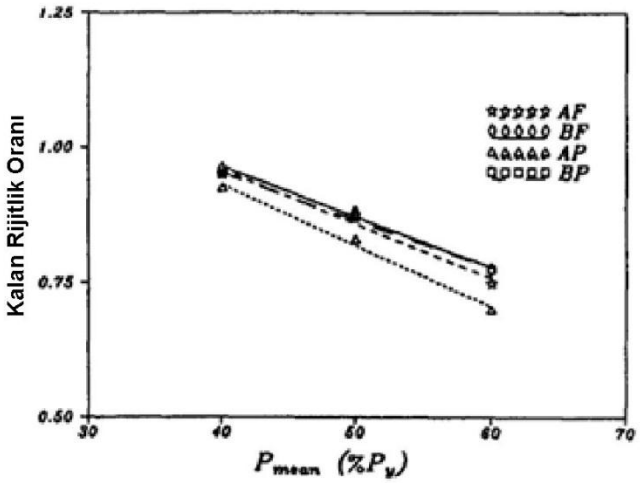
Yorulma testi sonrasında numuneler göçene kadar yüklenerek kalan yük kapasitesi P_r ve kalan eğilme rijitliği EI_r bulunmuştur. Şekil 2.26 ve Şekil 2.27 P_r / P_u ve EI_r / EI_i oranlarını göstermektedir. Burada P_u nihai kapasite, EI_i ise hasarsız numune rijitliğidir.



Şekil 2.26 : Kalıcı yük taşıma kapasitesi, P_r (Richard ve Diğ., 1997).

Şekil 2.27'ye göre, kalan rijitlik kaybının seyrek donatılı numunelerde daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir.

Çalışma sonucunda donatı dağılımının monotonik yükleme altındaki kirişin eğilme kapasitesi üzerinde ciddi etkisinin olduğu görülmüştür. Sık donatı yerleşimine sahip kirişlerin daha büyük eğilme rijitliği ve kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 2.27 : Kalıcı rijitlik, EI_i (Richard ve Diğ., 1997).

2,000,000 Tekrar sonrasında, numunelerde herhangi bir yorulma hasarı görülmemiş, yorulma yüklemelerinden sonra yapılan monotonik yüklemeler sonucunda yük taşıma kapasitesinin ortalama %3 gibi bir oranda azaldığı görülmüştür.

3. AASHTO LRFD 2007'YE GÖRE KOMPOZİT KİRİŞ TASARIMI

Bu çalışmada deneye tabi tutulan kirişlerin teorik kapasitesinin belirlenmesi AASHTO LRFD 2007 yönetmeliğine göre yapılacaktır. AASHTO LRFD 2007 Standardı ile ilgili herhangi bir tablo, denklem, şekil gibi öğelere referans verilmesi durumunda ilgili öğenin standarttaki başlığının başına "S" eki getirilecektir. Örneğin S1.3.2.1 gösterimi standardın 1.3.2.1 maddesine, STablo 6.9.5.1-1 ise standardın 6.9.5.1-1 tablosuna referans vermektedir. Burada anlatılan tasarım yöntemi sadece kompozit, yatayda ve dikeyde düz, sürekli kirişli köprüler için geçerlidir.

AASHTO LRFD 2007 standardında yük ve dayanım faktörü ilkesine göre tasarım baz alınmaktadır. Buna göre bir elemanın tasarım yeterliliği;

$$\sum \eta\gamma_i \, Q_i \;\leq\; \phi R_n \qquad \textbf{(3.1)}$$

ifadesiyle belirlenir. Burada;

η : Yük modifikasyon faktörü

γ_i : Yük faktörü

Q_i : Nominal yük etkisi

ϕ : Dayanım faktörü

R_n : Nominal dayanım

değerlerini göstermektedir.

Yük modifikasyon faktörü olarak tabir edilen η değeri en büyük γ_i değeri için;

$$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I \leq 0.95 \qquad \textbf{(3.2)}$$

En küçük γ_i için ise;

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_D \eta_R \eta_I} \leq 1.0 \qquad \textbf{(3.3)}$$

olarak alınır. Burada;

η_D : Süneklikle ilgili faktör

η_R : Yapısal sistemle ilgili bir faktör

η_I : Yapı önem faktörü

olmaktadır.

Burada bahsedilen yük ve dayanım faktörleri farklı durumlarda farklı değerler alarak elemanın inceleme yapılan limit durumdaki yeterliliğinin belirlenmesi sağlanır. Bu limit durumlar yapının farklı yük etkileri altındaki durumunu ifade eder ve toplamda dört adettirler. Bunlar yapının dayanım ve stabilitesinin baz alındığı dayanım limit durumu, kullanım özelliklerinin baz alındığı ve gerilme, deformasyon ve çatlak genişliklerinin incelendiği servis limit durumu, deprem ve sel gibi doğal afetlerin etkilerinin baz alındığı aşırı durum limit durumu ve son olarak yorulma etkilerinin baz alındığı yorulma limit durumudur. S1.3.2.1 maddesine göre bu limit durumların hepsi aynı derecede öneme sahiptir.

3.1.1 Yükler ve yük kombinasyonları

Yapıya etkiyen yükler genel olarak iki başlıkta incelenmektedir. Bunlardan ilki kalıcı yükler olup, aşağıdaki gibidir:

DC : Taşıyıcı elemanların ve taşıyıcı olmayan yapısal elemanların zati yükü

DW : Kaplamaya ait zati yük

EL : Ardgermeden kaynaklanan yük etkileri

ES : Sürşarj yükü

EV : Toprak dolgu zati yükünden kaynaklanan düşey basınç

EH : Yatay toprak basıncı

Bir diğer yük grubu da değişken yüklerdir:

LL : Araç yükü

PL : Yaya yükü

BR : Araç fren kuvveti

CT : Araç çarpışma kuvveti

EQ : Deprem kuvveti

SH : Büzülme

IM : Araç darbe etkisi

LS : Hareketli yük sürşarj etkisi

CE : Araç merkezkaç kuvveti
CV : Gemi çarpma kuvveti
CR : Sünme
FR : Sürtünme
TU : Düzgün yayılı sıcaklık etkileri nedeniyle oluşan kuvvetler
TG : Sıcaklık gradyanı
SE : Oturmadan kaynaklı etkiler
IC : Buz yükü
WA : Su yükü ve akıntı basıncı
WL : Hareketli yüke etkiyen rüzgardan kaynaklanan kuvvetler
WS : Yapıya etkiyen rüzgardan kaynaklanan kuvvetler

Farklı limit durumlar için yük kombinasyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Burada değişken olarak verilen γ değerleri S3.4.1'den alınır. Bu faktörlerin değişken olarak verilmesinin nedeni kullanıldığı yük kombinasyonunda en gayrı müsait durumu yaratmak için kombinasyonun toplam değerine olumsuz (yani yükü arttıran) etki eden kuvvetleri büyütmek, olumlu (yani toplam yükü azaltan) etki eden yükleri ise azaltmaktır.

Standarda göre kompozit kirişlerin hesabı yapılırken kesite ait geometrik özelliklerin bulunmasında dönüştürülmüş kesit özellikleri kullanılır ve dönüştürülmüş kesit uzun süreli ve kısa süreli kompozit olmak üzere ikiye ayrılır. Dönüştürülmüş kesit özelliklerinde kullanılan n modüler oranı, çelik elastisite modülünün beton elastisite modülüne oranı olarak ifade edilir. Bu oran kısa sureli kompozit kesitte n, uzun sureli kompozit kesitte büzülme etkilerinden kaynaklanan dayanım azalmalarını yansıtmak amacıyla 3n olarak alınır.

Çelik kiriş, betonarme tabliye ve çaprazlar gibi yardımcı elemanların zati yüklerinin kompozit olmayan kesite, parapet ve kaplama gibi sonradan eklenen yüklerin uzun süreli kompozit kesite, araç yüklerinin ise kısa süreli kompozit kesite etkidiği göz önünde bulundurulur.

Dayanım I yük kombinasyonu köprünün normal kullanım altındaki durumunu ifade eder. Dayanım II yük kombinasyonu işveren tarafından özel olarak belirtilmiş araçların yük etkilerinin bulunması için kullanılır. Dayanım III kombinasyonu 90 km/s'den büyük rüzgârların etkisi altında bulunan ve üstünde o an trafik yükü

bulunmayan durumları değerlendirmek için kullanılır. Dayanım IV yük kombinasyonu açıklığı 67 metreden büyük açıklığa sahip, zati yük/hareketli yük oranı büyük köprüler için kullanılır. Dayanım V yük kombinasyonu ise trafiğe açık durumda ve 90 km/s rüzgâr hızına maruz köprülerin durumunu değerlendirmek için kullanılır.

Servis I limit durumu köprünün günlük kullanımdaki durumunu ve öngermeli betonarme elemanlarda basınç etkisinin incelenmesi için kullanılır. Servis II limit durumu çelik köprülerde akma oluşmasını engellemek için kullanılır. Servis III limit durumu ise öngermeli betonarme elemanlarda çekme etkisinin incelenmesi için kullanılır.

Aşırı Durum I limit durumu yapının şiddetli depremler altındaki durumunu, Aşırı Durum II limit durumu ise sel ve gemi çarpması gibi etkiler altında köprünün durumunu değerlendirmek için kullanılır.

Yorulma limit durumu araç yükü (LL) ve araç darbe etkisi (IM) etkisi altındaki durumda yorulma ve kırılma özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılır.

3.1.1.1 Araç yükleri (LL)

Araç yüklerinin etki edeceği tasarım şeridi sayısı yönetmelik S3.6.1.1.1'e göre belirlenir. Buna göre temiz yol genişliği tasarım şerit genişliği olarak kabul edilen 3600 mm'ye bölünür ve bulunan değerin tam sayı kısmı alınarak tasarım şeridi sayısı olarak kabul edilir. Yorulma limit durumunda şerit sayısı tektir.

En büyük hareketli yük etkileri bulunurken kullanılacak olan araç yükleri S3.6.1.2'de açıklanmıştır. Buna göre yüklemeler, tasarım kamyonu veya treylerinin şerit yüküyle kombinasyonundan meydana gelmektedir.

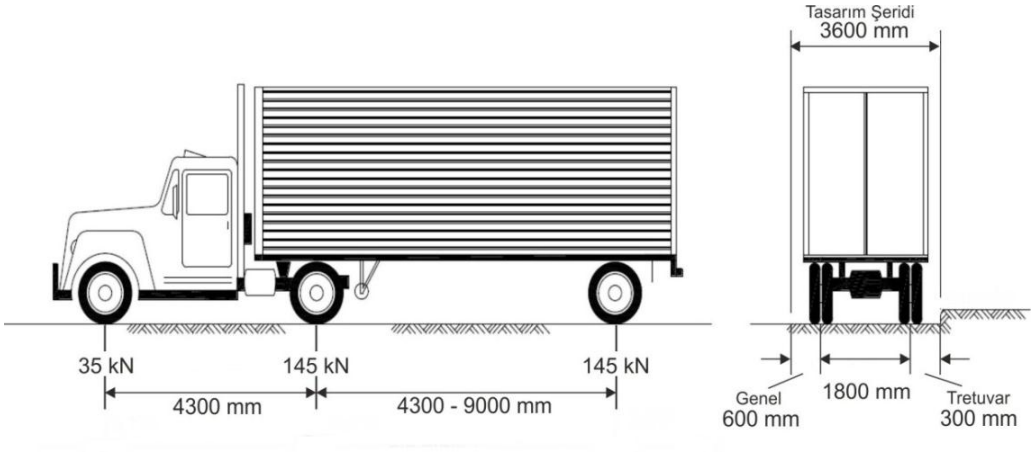
Tasarım kamyonu Şekil 3.1'de verilen ve HL-93 olarak adlandırılan kamyondur. Yorulma limit durumunda arka aks boyuna mesafesi sabit 9000 mm alınır.

Treyler yükü ise Şekil 3.2'de verilen 1200 mm arayla ayrılmış her biri 110 kN yüke sahip iki akstan oluşan treylerdir. İki tekerleğin enine mesafesi 1800 mm'dir.

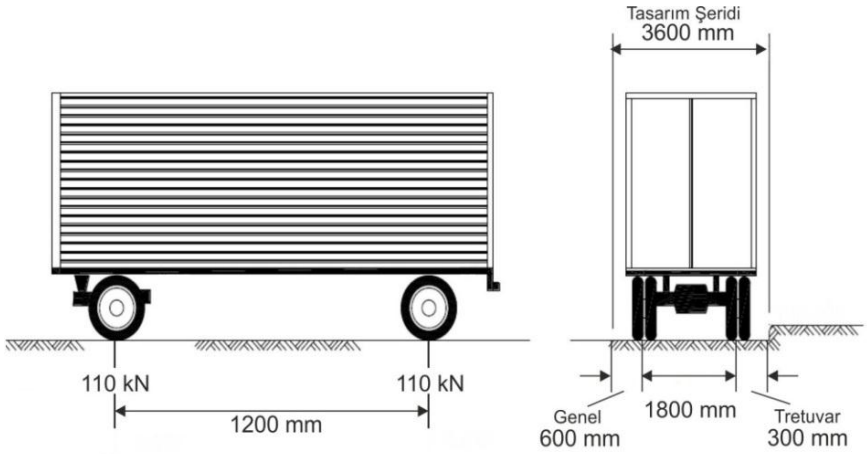
Yönetmelik Madde 3.6.2.1'e göre, tasarım kamyonu ve treyler yüküne uygulanan yükün %33'ü kadar araç darbe yükü eklenir. Yorulma limit durumunda bu değer %15'dir.

Çizelge 3.1 : AASHTO LRFD 2007 yük kombinasyonları.

Yük Kombinasyonu Limit Durumu	DC DW EH EV ES EL	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	EQ	IC	CT	CV
Dayanım I	γ_p	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Dayanım II	γ_p	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Dayanım III	γ_p	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Dayanım IV	γ_p	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
Dayanım V	γ_p	1.35	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Aşırı Durum I	γ_p	γ_{EQ}	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-
Aşırı Durum II	γ_p	0.50	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00
Servis I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Servis II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	1.00/1.21	-	-	-	-	-	-
Servis III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	1.00/1.22	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Servis IV	1.00	-	1.00	0.70	-	1.00	1.00/1.23	-	1.00	-	-	-	-
Yorulma	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Şekil 3.1 : HL-93 Tasarım kamyon yükü.



Şekil 3.2 : AASHTO LRFD 2007 treyler hareketli yükü.

HL93 tasarım kamyonu ve treyler yüküne ek olarak tasarım şerit yükü uygulanır. Tasarım şerit yükü 3000 mm enine genişliğe sahip 9.3 N/mm yayılı yükten ibarettir. Şerit boyunca düzgün yayılı olarak uygulanır. Yorulma limit durumunda şerit yükü uygulanmaz.

S3.6.2.1'e göre, tasarım kamyonu ve treyler yüküne uygulanan yükün %33'ü kadar araç darbe yükü eklenir. Yorulma limit durumunda bu değer %15'dir.

S3.6.1.1.2'ye göre araç yükleri uygulanırken dikkate alınması gereken bir başka husus çoklu bulunma faktörüdür. Kamyon ve şerit yükleri, tüm şeritlerin aynı anda dolu olma olasılığının düşük olmasından dolayı şerit sayısına bağlı olarak azaltılır. Buna göre, çoklu bulunma faktörleri Çizelge 3.2'de verilmiştir:

Çizelge 3.2 : AASHTO LRFD 2007 Çoklu bulunma faktörleri.

Tasarım Şerit Sayısı (NDL)	Çoklu Bulunma Faktörü, m
1	1.20
2	1.00
3	0.85
>3	0.65

3.1.2 Dayanım faktörleri

Yapısal elemanlardaki malzeme ve imalat gibi özelliklerden ve yapısal tasarımda öngörülen yaklaşımlardan kaynaklanan belirsizliklerin yansıtılması amacıyla eleman kapasiteleri mukavemet faktörleri ile azaltılır. Bu faktörler betonarme elemanlar için, geleneksel inşaat şartlarında dayanım limit durumuna göre Çizelge 3.3'de verilmiştir:

Çizelge 3.3 : Betonarme elemanların AASHTO LRFD 2007'ye göre dayanım faktörleri.

Eğilme ve Çekme	
Betonarme	0.90
Öngermeli betonarme	1.00
Normal Ağırlıktaki Betonda Kayma	0.90
Eksenel Basınç	0.75
Beton Üstünde Mesnet	0.70

Dayanım faktörleri çelik elemanlar için dayanım limit durumuna göre Çizelge 3.4'de verilmiştir:

Çizelge 3.4 : Çelik elemanların AASHTO LRFD 2007'ye Göre Dayanım Faktörleri.

Eğilme	ϕ_f	1.00
Kesme	ϕ_v	1.00
Eksenel Basınç (Çelik veya Kompozit)	ϕ_c	0.90
Çekme		
Akma limit durumu	ϕ_y	0.95
Kırılma limit durumu	ϕ_u	0.80
Bulonlar		
Çekme	ϕ_t	0.80
Kesme	ϕ_s	0.80
Ezilme	ϕ_{bb}	0.80
Kaynak		
Tam penetrasyonlu kaynak kesme	ϕ_{e1}	0.85
Kısmi penetrasyonlu kaynak kesme	ϕ_{e2}	0.80

3.1.3 Kesit özelliklerinin hesaplanması

Bu bölümde kesit kapasitesinin hesaplanması için gerekli kesit özelliklerinin hesaplanması anlatılacaktır.

3.1.3.1 Kesit özelliklerinin belirlenmesi

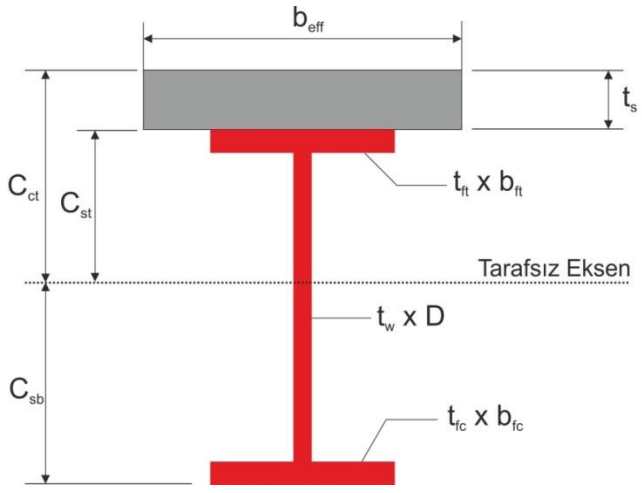
Pozitif eğilme etkisindeki (örneğin açıklık ortasındaki) kesitler uygulamada genel olarak pozitif kesit olarak adlandırılırlar. Pozitif kesit özellikleri belirlenirken önce efektif başlık genişliği belirlenir. Efektif başlık genişiği iç kirişlerde;

- Efektif açıklığın 1/4'ü
- Ortalama döşeme kalınlığının 12 katı + gövde kalınlığı veya üst başlık genişliğinin yarısı değerlerinden büyük olanı
- Komşu kirişler arası ortalama mesafe

Değerlerinden küçük olanı ve dış kirişlerde ise komşu iç kiriş efektif genişliğinin yarısına;

- Efektif açıklığın 1/8'i
- Ortalama döşeme kalınlığının 6 katı + gövde kalınlığının yarısı veya üst başlık genişliğinin 1/4'ü değerlerinden büyük olanı
- Tretuvar genişliği

değerlerinden küçük olanının eklenmesiyle bulunur. Efektif açıklık basit kirişlerde mesnetten mesnete mesafe olarak alınabilir. Efektif başlık genişliği belirlendikten sonra kompozit kesit ortaya çıkmış olur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Pozitif eğilme etkisinde kompozit kesit parametreleri.

3.1.3.2 Kesit özellikleri kontrolleri

Çelik I kesitlerin S6.10.2'de belirtilen kesit sınırlamalarını sağlaması gerekmektedir. Buna göre kiriş gövdesinde boyuna berkitme bulundurmayan kesitler;

$$\frac{D}{t_w} \leq 150 \quad \textbf{(3.4)}$$

Boyuna berkitme bulunduran kesitler ise;

$$\frac{D}{t_w} \leq 300 \quad \textbf{(3.5)}$$

koşullarını sağlamalıdır. Burada;

D : Gövde derinliği

t_w : Gövde kalınlığı

olmaktadır. Çekme ve basınç başlıkları ise;

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 12.0 \quad \textbf{(3.6)}$$

$$b_f \geq D/6 \quad \textbf{(3.7)}$$

$$t_f \geq 1.1t_w \quad \textbf{(3.8)}$$

$$0.1 \leq \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 10 \quad \textbf{(3.9)}$$

koşullarını sağlamalıdır. Burada;

b_f : Başlık genişliği

t_f : Başlık kalınlığı

I_{yc} : Basınç başlığı gövde ortasından geçen dikey eksene göre atalet momenti

I_{yt} : Çekme başlığı gövde ortasından geçen dikey eksene göre atalet momenti

3.1.3.3 Akma momentinin hesaplanması

Pozitif kompozit kesitlerin akma momenti değerinin hesabı SD6.2.2'ye göre yapılır. Buna göre Denklem 3.10'dan

$$F_{yf} = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{AD}}{S_{ST}} \quad \textbf{(3.10)}$$

M_{AD} değeri çözülür ve

$$M_y = M_{D1} + M_{D2} + M_{AD} \quad \textbf{(3.11)}$$

denkleminde yerine konarak M_y değeri bulunur. Burada;

S_{NC} : Kompozit olmayan durumdaki mukavemet momenti
S_{LT} : Uzun süreli kompozit durumda mukavemet momenti
S_{ST} : Kısa süreli kompozit durumda mukavemet momenti
M_{D1} : Kompozit olmayan yüklerden meydana gelen faktörlü moment
M_{D2} : Uzun süreli kompozit yüklerden meydana gelen faktörlü moment
M_{AD} : Akma meydana gelmesi için gerekli ek moment
M_y : Kesit akma momenti

olmaktadır. M_y hem çekme hem de basınç başlığı için hesaplanıp, küçük olan değer alınmalıdır.

3.1.3.4 Plastik moment kapasitesinin hesaplanması

AASHTO LRFD'ye göre kesitlerin plastik moment kapasitesi SD6.1 kısmına göre belirlenir. Plastik moment kapasitesinin hesabı için öncelikle;

P_T : Çekme başlığı akma kuvveti
P_W : Gövde akma kuvveti
P_C : Basınç başlığı akma kuıvveti
P_S : Döşeme basınç kuvveti

değerleri hesaplanır.

Sonrasında ise pozitif kesitler için Çizelge 3.5'de verilen farklı durumlar değerlendirilerek M_p plastik moment kapasitesi belirlenir. $\bar{Y}$ değeri plastik tarafsız eksenin bulunduğu elemanın üst noktasından plastik tarafsız eksene olan mesafedir.

Çizelge 3.5 : Pozitif kesitler için $\bar{Y}$ ve M_p değerlerinin hesabı

Durum	$\bar{Y}$ ve M_p	PTE Yeri
$P_t + P_w \geq P_c + P_s$	$\bar{Y} = \frac{D}{2}\left[\frac{P_t - P_c - P_s}{P_w} + 1\right]$ $M_p = \frac{P_w}{2D}[\bar{Y}^2 + (D - \bar{Y})^2] + [P_s d_s + P_c d_c + P_t d_t]$	Gövde
$P_t + P_w + P_c \geq P_s$	$\bar{Y} = \frac{t_c}{2}\left[\frac{P_w + P_t - P_s}{P_c} + 1\right]$ $M_p = \frac{P_c}{2t_c}[\bar{Y}^2 + (t_c - \bar{Y})^2] + [P_s d_s + P_w d_w + P_t d_t]$	Üst Başlık
$P_t + P_w + P_c \geq P_s$	$\bar{Y} = t_s\left[\frac{P_c + P_w + P_t}{P_s} + 1\right]$ $M_p = \frac{\bar{Y}^2 P_s}{2t_s} + [P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$	Tabliye

3.1.4 Dayanım limit durumu

3.1.4.1 Eğilme momenti etkisinde dayanım limit durumu tasarımı

Pozitif moment etkisindeki kompozit kirişlerde dayanım limit durumu incelenirken öncelikle kesitin kompakt olup olmadığı değerlendirilir. Kompakt kesitlerin tam plastik moment kapasitesine erişebildiği varsayılır. Kompakt olmayan kesitlerde ise elastik sınırlar geçerlidir. Buna göre bir kesitin kompakt olarak değerlendirilebilmesi için S6.10.6.2.2'ye göre;

$$F_{yf} \leq 485\ MPa \qquad \textbf{(3.12)}$$

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76\sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \qquad \textbf{(3.13)}$$

koşullarının sağlanması gerekmektedir. Burada;

F_{yf} : Başlık akma gerilmesi

D_{cp} : Plastik moment altında gövde basınç derinliği

E : Eleman elastisite modülü

F_{yc} : Basınç başlığı akma gerilmesi

olmaktadır. Ayrıca D gövde derinliği ve t_w gövde kalınlığı olmak üzere S6.10.2.1.1'de verilen;

$$\frac{D}{t_w} \leq 150 \quad \textbf{(3.14)}$$

koşullarının sağlanması gerekmektedir. Eğer kesit kompakt olarak değerlendirilebiliyorsa S6.10.7.1'e göre;

$$M_u + \frac{1}{3} f_l S_{xt} \leq \phi_f M_n \quad \textbf{(3.15)}$$

Koşulunun sağlanması gerekmektedir. Burada;

M_u : Faktörlü yüklerden kaynaklanan en büyük eğilme momenti
f_l : Yanal eğilmeden kaynaklanan gerilme
S_{xt} : Çekme başlığının güçlü yöndeki mukavemet momenti
ϕ_f : Eğilme için dayanım azaltma katsayısı
M_n : Nominal eğilme dayanımı

olmaktadır. M_n nominal eğilme dayanımı hesaplanırken D_p plastik moment altında tabliye üstünden tarafsız eksene ölçülen mesafe ve D_t kompozit kesit toplam yüksekliği olmak üzere;

$$D_p \leq 0.1 D_t \quad \textbf{(3.16)}$$

koşulunun sağlanması halinde;

$$M_n = M_p \quad \textbf{(3.17)}$$

olmaktadır. Eğer Denklem 3.16 koşulu sağlanmıyorsa nominal eğilme dayanımı;

$$M_n = M_p \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t}\right) \quad \textbf{(3.18)}$$

değerini almaktadır. Ayrıca sürekli kirişlerde;

$$M_n = 1.3 R_h M_y \quad \textbf{(3.19)}$$

değerinin aşılmaması gereklidir. Burada R_h hibritlik katsayısıdır. Bu katsayı malzeme açısından homojen kesitlerde 1.0 alınmalıdır. Aksi halde S6.10.1.10.1'e göre belirlenir.

Kompakt olmayan kesitlerin hesabı ise S6.10.7.2'ye göre yapılır. Basınç başlığında f_{bu}, yanal eğilme hesaba katılmadan hesaplanan başlık gerilmesi olmak üzere;

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc} \quad \textbf{(3.20)}$$

koşulu sağlanmalıdır. Burada F_{nc} basınç başlığının nominal eğilme dayanımı olup;

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad \textbf{(3.21)}$$

olarak ifade edilir. Burada R_b S6.10.1.10.2'ye göre hesaplanan bir katsayıdır. Kompakt olmayan kesitlerde çekme başlığı ise;

$$f_{bu} + \frac{1}{3} f_l \leq \phi_f F_{nt} \quad \textbf{(3.22)}$$

koşulu sağlanmalıdır. Burada F_{nt} çekme başlığında nominal eğilme dayanımı olup

$$F_{nt} = R_h F_{yt} \quad \textbf{(3.23)}$$

olarak ifade edilir. F_{yt}, çekme başlığı akma gerilmesidir.

Hem kompakt hem de kompakt olmayan kesitler S6.10.7.3-1'de belirtilen;

$$D_p \leq 0.42\, D_t \quad \textbf{(3.24)}$$

süneklik koşulunu sağlamalıdır.

3.1.5 Yorulma limit durumu

Daha önce de belirtildiği gibi, yorulma limit durumunda kullanılacak yük etkileri hesaplanırken tek bir tasarım şeridi ve arka aks aralığı sabit 9000 mm olan tek tasarım kamyonu kullanılır. Bu sebeple, çoklu bulunma faktörü 1.00 olarak alınır. Araç darbe etkisi bulunurken de araç yükünden kaynaklanan etkiler %15 arttırılır. Yorulma analizi sadece yorulma limit durumu yük kombinasyonu için yapılır.

Yorulma limit durumunun sağlanması için gerekli kontroller S6.6.1'de açıklanmıştır. Buna göre inceleme yapılan detay;

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n \quad \textbf{(3.25)}$$

koşulunu sağlamalıdır. Burada;

γ : Yorulma yük kombinasyonu faktörü (STablo 3.4.1-1)

(Δf) : Yorulma yükünden dolayı oluşan gerilme aralığı

$(\Delta F)_n$: Nominal tasarım yorulma dayanımı

olmaktadır. Nominal yorulma dayanımı ise;

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{1/3} \geq 0.5(\Delta F)_{TH} \quad \textbf{(3.26)}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;

A : Kategori sabiti (Çizelge 3.6)

N : 365x75xnx$ADTT_{SL}$, 75 Yıllık ömür için gerekli gerilme aralığı tekrarı

n : Her bir kamyon geçişinde meydana gelen gerilme aralığı tekrarı (Çizelge 3.7)

$ADTT_{SL}$: Tek bir şeritten bir gün içinde geçen kamyon sayısı

$(\Delta F)_{\mathrm{TH}}$: Nominal sabit genlikli yorulma eşiği (Çizelge 3.6)

$0.5(\Delta F)_{\mathrm{TH}}$: Nominal değişken genlikli yorulma eşiği

olmaktadır.

Bunun yanında ADTT bir günlük ortalama kamyon trafiği sayısı, *p*, kamyon trafiği tek şerit faktörü (Çizelge 3.8) olmak üzere olmak üzere;

$$ADTT_{SL} = ADTT\ x\ p \quad \textbf{(3.27)}$$

olmaktadır.

Denklem 3.27'de kullanılan $0.5(\Delta F)_{TH}$ değeri sonsuz yorulma ömrüne karşılık gelir. AASHTO LRFD 2007 standardı, 0.5 çarpanını en büyük gerilme aralığı sabit genlikli yorulma eşiğinden düşük olması gereken yüksek trafik hacimli köprülerin hesaba katılması için koyulduğunu belirtmiştir. Burada maksimum gerilme aralığının, standart yorulma tasarım kamyonun neden olduğu gerilme aralığının iki katı olduğu

düşünülmüştür. Denklemde yükün iki katının alınmasındansa kapasite tarafının yarısı alınmıştır.

Çizelge 3.6 : Yorulma kategorisi sabiti ve sabit genlikli yorulma eşiği değerleri.

Detay Kategorisi	Kategori Sabiti, A* (MPa^3) x 10^{11}	Yorulma Eşiği, $(\Delta F)_{TH}$** (MPa)
A	82.0	165.0
B	39.3	110.0
B´	20.0	82.7
C	14.4	69.0
C´	14.4	82.7
D	7.21	48.3
E	3.61	31.0
E’	1.28	17.9

Çizelge 3.7 : Her bir kamyon geçişinde meydana gelen gerilme aralığı tekrarı, *n.*

Boyuna Elemanlar	Açıklık Mesafesi	
	> 12000 mm	≤ 12000 mm
Basit Kiriş	1.0	2.0
Sürekli Kiriş		
İç mesnet civarı	1.5	2.0
Diğer kısımlarda	1.0	2.0
Konsol Kiriş	5.0	
Kafesler	1.0	
Enine Elemanlar	**Aralık Mesafesi**	
	> 6000 mm	**≤ 6000 mm**
Tümü	1.0	2.0

Çizelge 3.8 : Kamyon trafiği tek şerit faktörü.

Kamyon Trafiğine Açık Şerit Sayısı	*p*
1	1.00
2	0.85
3 ve daha fazla	0.80

S3.6.1.4.3a’da, S4.6.3’de belirtilen analiz yöntemlerinden birinin kullanılması halinde, yorulma analizinin yapıldığı detayda en büyük gerilme aralığını elde edecek şekilde tasarım ve trafik şeridinden bağımsız olarak, köprü boyuna ve enine doğrultusunda yerleştirilmesini öngörmüştür. S4.6.2’de belirtilen yaklaşık analiz yöntemlerinden birinin kullanılması halinde ise tek şerit için bulunan dağıtma faktörünün kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

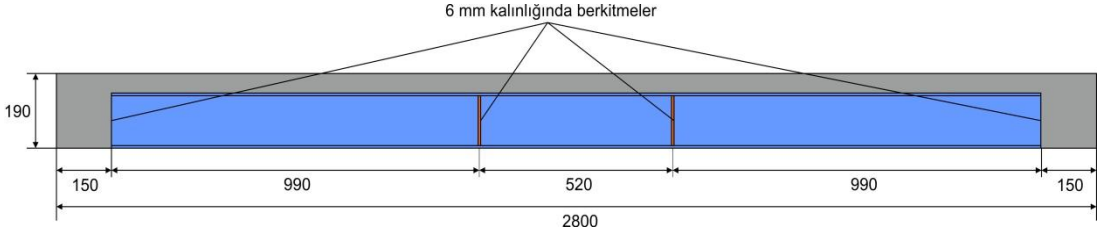
Deneysel çalışmada test edilmek üzere toplam 5 adet çelik-betonarme kompozit kiriş imal edilmiştir.

Deneysel çalışma iki aşamalıdır. Birinci aşamada referans numune monotonik yükleme altında test edilerek statik yükler altındaki kapasitesi belirlenmiş ve yönetmeliğin öngördüğü kriterler kullanılarak elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada diğer numuneler üzerinde farklı yük seviyelerinde tekrarlı yükler altında yorulma deneyleri yapılarak kirişlerin yorulma davranışları belirlenmiştir.

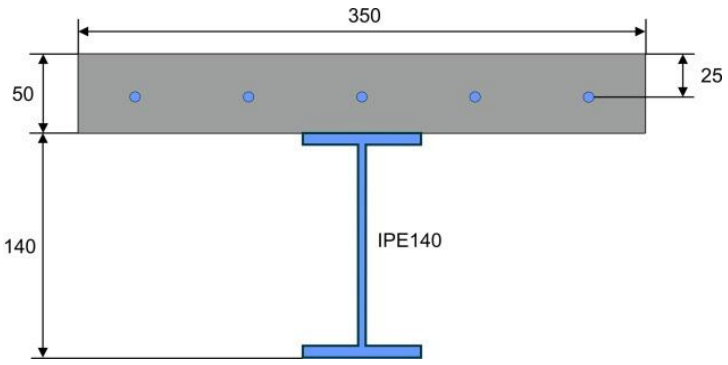
Bu bölümde deney numunelerinin özellikleri, malzeme özellikleri, imalatları, deney düzeneği ve deney programı ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

4.1 Deney Numunelerinin Özellikleri

Kullanılan numuneler küçük ölçekli numunelerdir ve tipik bir çelik otoyol köprüsünün yaklaşık 1/6 ölçeğinde imal edilmiştir. Ekonomik imkanlar, laboratuvar şartları gibi nedenlerden dolayı küçük ölçekli numuneler bu tür çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Örneğin Albrecht ve diğ. (1994), Richard ve diğ (1997) çalışmalarında küçük ölçekli numuneler kullanmışlardır. Çelik-betonarme kompozit kirişlerin çelik kısmı IPE140 kirişten betonarme kısmı ise onun üzerindeki 350 mm genişliğinde 50 mm kalınlığında yerinde dökme betonarme tabliyeden oluşmaktadır. Kirişlerin her birinin toplam uzunluğu 2800 mm'dir. (Şekil 4.1). Yüksekliği tabliye dahil 190 mm, genişliği ise 350 mm'dir (Şekil 4.2).

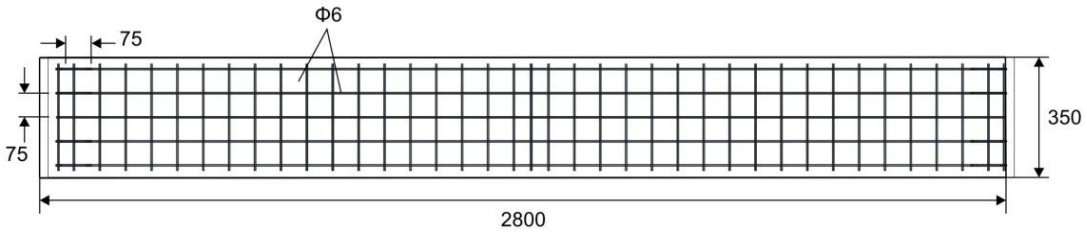


Şekil 4.1 : Numune boy görünüşü (Ölçüler: mm).

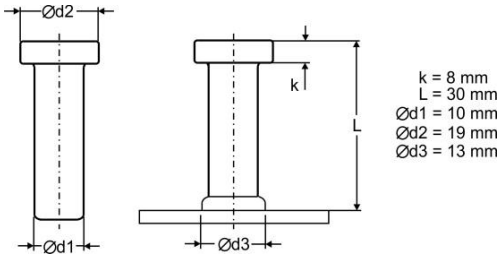


Şekil 4.2 : Numune en kesiti (Ölçüler: mm).

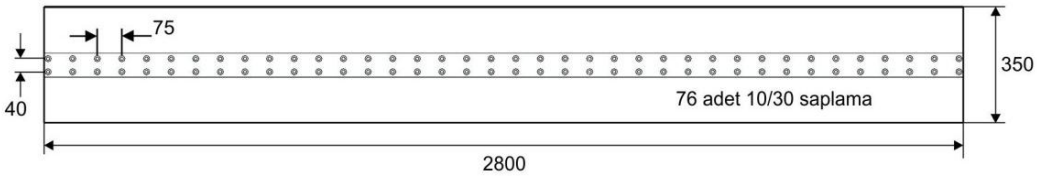
Betonarme tabliye donatısı olarak 6 mm çapında S500 sınıfında donatılar kullanılmıştır. Bu donatılar kiriş boyuna ve enine doğrultusunda 75 mm aralıklı olarak, tabliyenin düşeyde ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Çelik ve betonarme arasında kayma bağlantısı olarak Şekil 4.4'de geometrik özellikleri verilen KÖCO marka kafalı saplama tipi kayma bağlantı elemanları 75 mm aralıklı olarak kullanılmıştır. Bu saplamalar aralarında 40 mm aralığa sahip iki sıra halinde kullanılmıştır (Şekil 4.5). Kirişlerin her iki ucunda mesnet bölgelerinde 150 mm uzunluğunda betonarme bloklar mevcuttur. Bu betonarme bloklarda yine 6 mm çapında S500 kalitesinde donatılar kullanılarak imal edilen etriyeler mevcuttur.



Şekil 4.3 : Numune donatı planı (Ölçüler: mm).



Şekil 4.4 : Numunelerde kullanılan kayma bağlantısı.



Şekil 4.5 : Numune saplama yerleşimi (Ölçüler: mm).

Kiriş mesnetlerindeki betonarme bloklarda ve tekil yüklerin uygulandığı noktalarda her iki tarafta 6 mm kalınlığında berkitmeler kullanılmıştır. Bu berkitmeler çelik kirişin alt, üst başlığına ve gövdesine kaynatılmıştır. Bu detay tipik olarak birçok otoyol köprüsünde uygulanmakta olup köprünün yorulma tasarım kategorisini belirlemektedir. Bu detay tipi AASHTO LRFD 2007 yorulma kriterlerine göre C´ kategorisine denk gelmektedir.

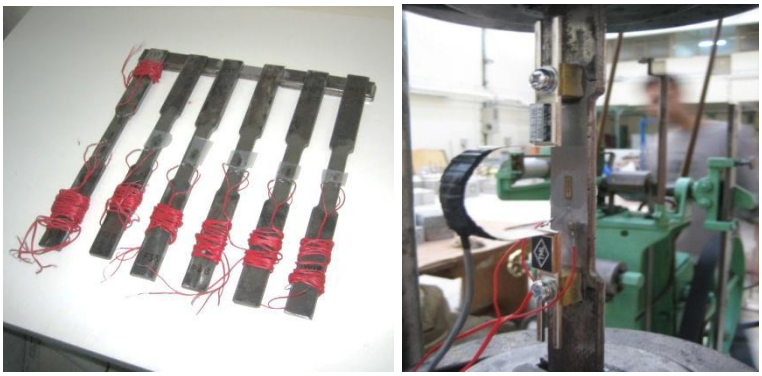
Çelik kirişler aynı üreticiden sağlandığı halde geometrik özelliklerinde EN 10002 2001 standardında belirtilen toleranslar dahilindeki farklılıklar mevcuttur.

4.1.1 Numunelerin malzeme özellikleri

Bu bölümde çelik-betonarme kompozit kirişte kullanılan yapı malzemelerinin özellikleri anlatılmıştır. Yapı çeliği ve betonun dayanım özellikleri İstanbul Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir.

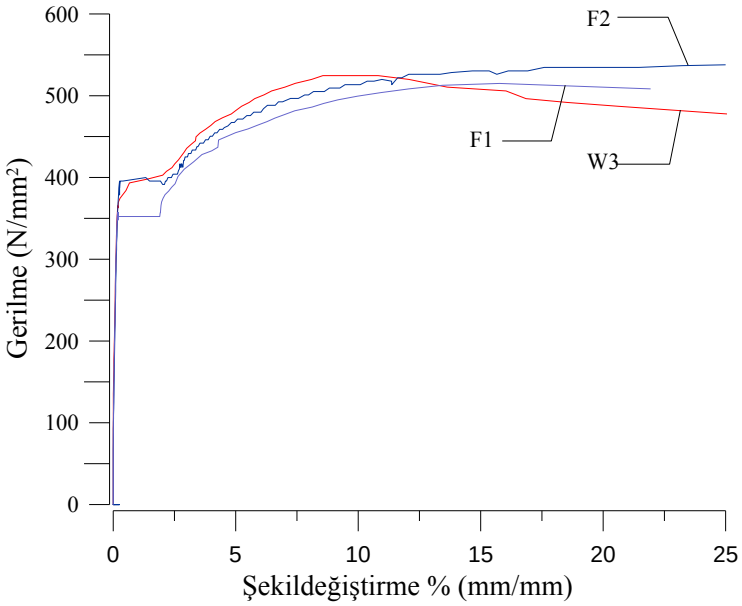
4.1.1.1 Yapı çeliği

Çelik kirişler S275JR sınıfında yapı çeliğinden üretilmiş profillerin başlığından dört adet ve gövdelerinden ise 2 adet olmak üzere EN 10002 2001 şartnamesinde belirtilen boyutlara göre kupon numuneler kesilmiş ve çelik çekme testi ile malzeme özellikleri belirlenmiştir. Şekil 4.6'da kupon numuneleri ve çelik çekme deneyi düzeneği gösterilmiştir.

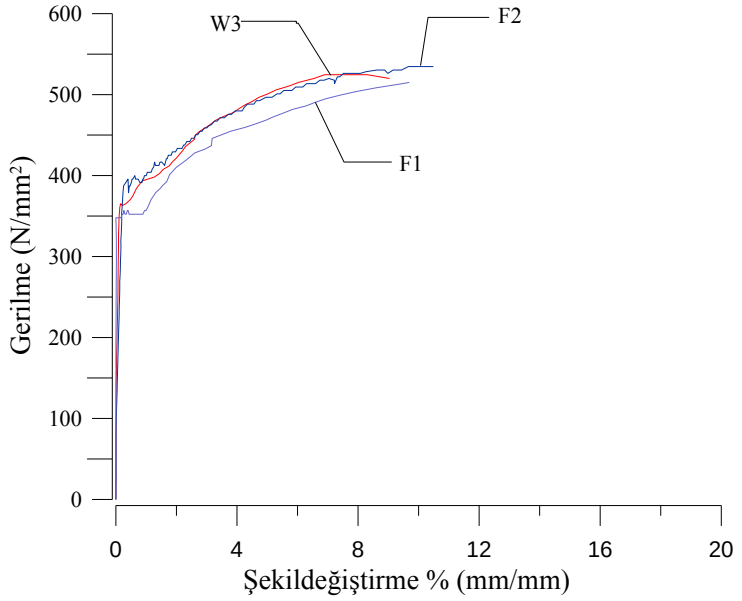


Şekil 4.6 : Grup kupon numuneleri ve çekme deneyi düzeneği.

Kupon numunelerinin ortasına her iki tarafa 5 mm ölçüm boyuna sahip YFLA-5 serisi şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Ayrıca her numuneye 100 mm ölçüm boyuna 5 mm ölçüm kapasitesine sahip PI tipi şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Deneyde şekildeğiştirmeölçerden elde edilen veriler Şekil 4.6'da, PI tipi şekildeğiştirmeölçerden elde edilen veriler de Şekil 4.7'de verilmiştir. F ön eki kupon numunenin başlıktan, W ön eki ise kupon numunenin gövdeden alıntığını belirtmektedir.



Şekil 4.7 : Çelik çekme testi gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi (Şerit tipi şekildeğiştirmeölçer).



Şekil 4.8 : Çelik çekme testi gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi (PI tipi şekildeğiştirmeölçer).

Deneyler sonucunda çelik kirişin ortalama akma dayanımı 365 N/mm^2 olarak belirlenmiştir.

4.1.1.2 Beton

Betonarme tabliyelerde kullanılan beton Betonsa Beton Sanayi A.Ş. tesislerinde hazırlanmıştır. Beton karışımı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Numunelerde kullanılan beton karışımı.

Çimento:	:	375 kg/m^3
Kum:	:	490 kg/m^3
Taş tozu	:	355 kg/m^3
1 No mıcır	:	1025 kg/m^3
Su	:	140 kg/m^3
Katkı maddesi	:	5.78 kg/m^3

Dökülen betonun slump deneyi sonucu ortalama 22 cm olarak bulunmuştur. Dört adet silindir numune testi yapılmıştır (Şekil 4.9). Testte 150 mm boyunda ve 5 mm ölçüm kapasitesine sahip yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Test sonucunda 28 günlük ortalama standart silindir (150 mm x 300 mm) beton basınç dayanımı 24 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.10'da gerilme - şekil değiştirme ilişkisi gösterilmiştir.

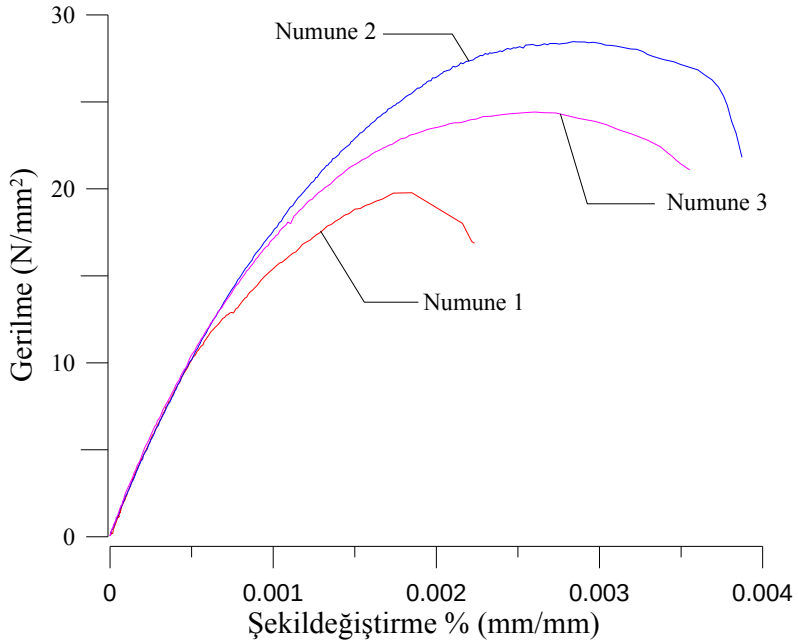


Şekil 4.9 : Beton basınç deneyi.

4.2 Deney Numunelerinin İmalatı

Çelik-betonarme kompozit kiriş numuneler imal edilirken ilk önce çelik profil kesimi ve berkitmelerin kaynaklanması işlemi yapılmıştır. Daha sonra saplamalar çelik

profil üst başlığına ve mesnet blokları bölgesine çakılmıştır. Son olarak da betonarme tabliye imalatı yapılmıştır.



Şekil 4.10 : Beton basınç deneyi gerilme - şekildeğiştirme ilişkisi.

4.2.1 Çelik kirişlerin imalatı

IPE140 çelik profil 12 m boyunda atölyeye getirilmiştir. Bu çelik profiller ilk önce kumlama işlemine maruz bırakılmıştır. 12 m uzunluğundaki kirişler 2.8 m olacak şekilde kesilmiştir. Şekil 4.1'de görülen 6 mm kalınlığındaki berkitme levhaları, profilin açıklık ve mesnet bölgelerine iki taraflı olacak şekilde 3 mm çapındaki kaynakla kaynaklanmıştır. Tüm bu işlemler Çağla Mühendislik atölyelerinde yapılmıştır.

4.2.2 Kesme saplamalarının kaynaklanması

Çelik kiriş üst başlığına 10 mm çapında 30 mm yüksekliğinde kesme saplamaları kaynatılmıştır. Kaynaklama işleminde KÖCO Eletop 3002 model kaynak makinesi ve tabancası kullanılmıştır (Şekil 4.11). Kaynaklama işlemi sırasında ilk önce saplamalarının başı kaynak tabancasının ucuna takılmaktadır, daha sonra saplamanın uç kısmına seramik halka takılarak çelik kirişte daha önce belirlenmiş olan noktalara kaynatılmaktadır. Şekil 4.12'de saplamaların tabancaya yerleşimi ve kaynaklanması işlemi görülmektedir.



Şekil 4.11 : Saplama kaynak makinesi ve tabancası.



Şekil 4.12 : Saplamaların tabancaya yerleşimi ve kaynaklama işlemi.

4.2.3 Betonarme tabliyenin imalatı

Betonarme tabliyenin imalatı İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Çelik kirişler atölyedeki imalatlarının ardından kaynatılmış halde laboratuvara getirilmiştir. Betonarme tabliye imalatı için ilk olarak kirişin kalıbı hazırlanmıştır. Kalıp için 18 mm kalınlığında plywood elemanlar lazerde istenilen ölçülerde kesilmiş ve kiriş geometrisine uygun olarak birleştirilmiştir. Çelik kirişler hazırlanan bu ahşap kalıpların içine yerleştirilmiştir. Betonarme tabliyede kullanılan donatılar BMS Hazır Demir A.Ş. atölyesinde istenilen ölçülerde kesilmiş ve bükülmüştür. Kesilmiş ve bükülmüş halde laboratuvara getirilen bu donatılar Şekil 4.13'de görülen şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıp ve donatı arasındaki mesafeyi sağlamak için plastik pas payı elemanlar kullanılmıştır. Bütün kalıplar düzgün bir geometri elde edebilmek için teraziye alınmıştır. Böylece kiriş beton dökümü için hazır hale gelmiş

ve beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Tabliyede kullanılan beton, Betonsa Beton Sanayi A.Ş. tesislerinde hazırlanmıştır. Beton döküm işlemi sırasında, betonda herhangi bir boşluk olmaması için demir çubuklarla şişleme işlemi gerçekleştirilmiş. Düzgün bir yüzey elde edebilmek için tabliyenin üst yüzü düzeltilmiştir. Beton dökümünden sonra numunelere kimyasal kür işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.13 : Betonarme tabliye imalatından görüntüler.

4.3 Deney düzeneği

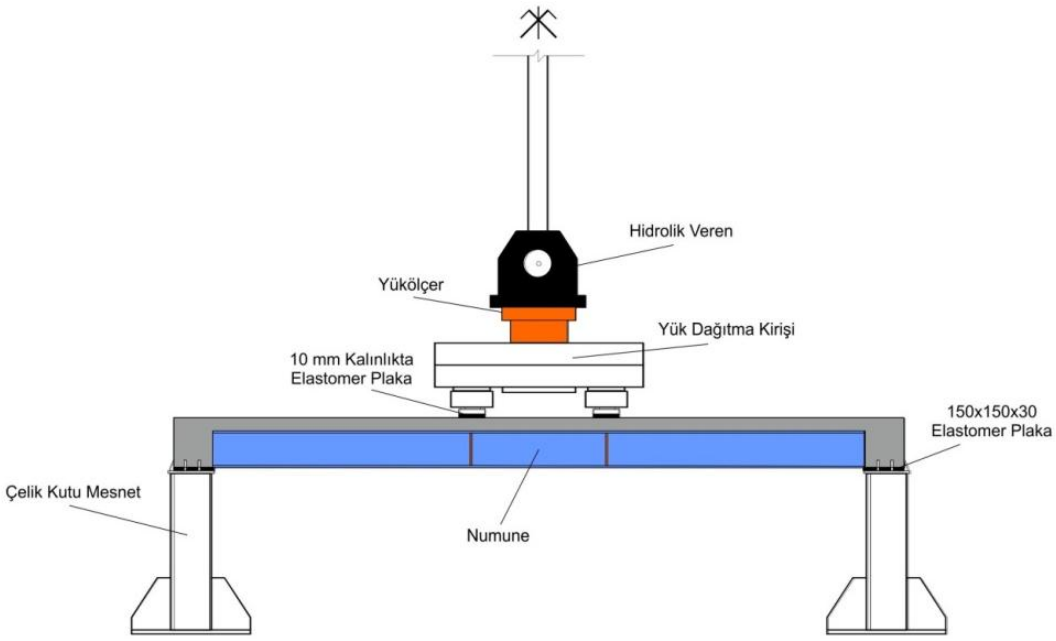
Deney düzeneği genel olarak numune, iki adet kutu kesitli çelik mesnet, yük uygulama sistemi ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır.

Kutu mesnetlere kirişlerin oturacağı bölgeye kirişlerin sabit kalması için çelik plakalar kaynatılmıştır (Şekil 4.14). Çelik kutu mesnetler deney çerçevesine kaynatılarak sabitlenmiştir. Bu mesnetlerin üzerinde 150*150*30 mm ebatlarında iki adet elastomer mesnet mevcuttur. Kirişler bu elastomer mesnetler üzerine oturmaktadır.

Deneylerde ikisi mesnet ikisi kuvvet uygulama noktası olmak üzere dört noktalı yükleme uygulanmıştır. Hidrolik verenin içindeki yükölçere ilave olarak numune hidrolik veren arasına harici bir yükölçer daha konulmuştur. Yükölçerin altında yükü iki noktaya dağıtan çelik kutu profillerden yapılan dağıtma kirişi vardır. Yükün uygulandığı noktada, betonarme tabliye ile çelik profil arasında betonun ezilmesini engellemek amacıyla 10 mm kalınlığında elastomer plaka bulunmaktadır (Şekil 4.15).



Şekil 4.14 : Kutu mesnet.



Şekil 4.15 : Deney düzeneği.

Yük ünitesi olarak Şekil 4.16'de görülen 250 kN kapasiteli statik ve dinamik yükleme yapabilen MTS 810 yük ünitesi kullanılmıştır. Yükleme sistemi Test-Star, Function Generator ve Test-Ware programları aracılığı ile kontrol edilmiştir. Bu programlarla yük ve yerdeğiştirme kontrolü ile yükleme yapılabilmektedir.

4.3.1 Veri toplama sistemi ve ekipmanları

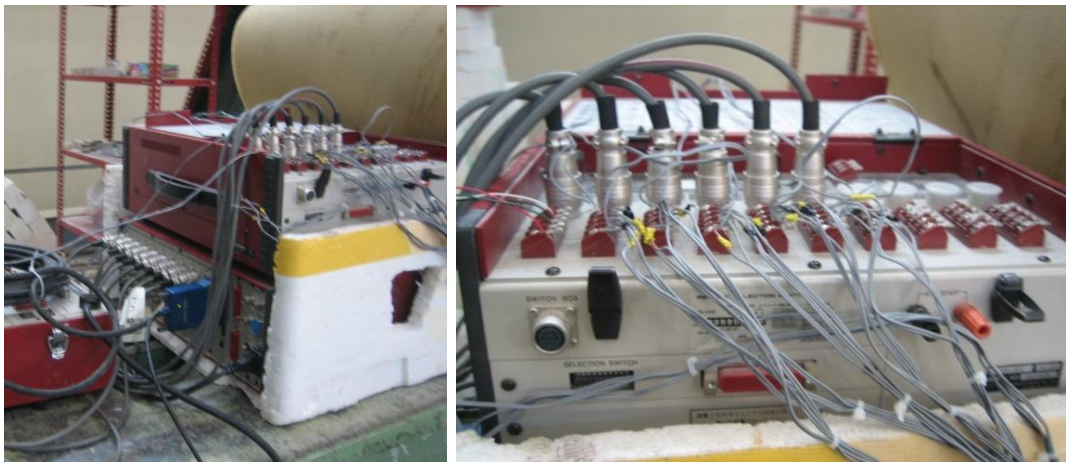
Çalışma kapsamında yapılan deneylerde veri toplayıcı, yükölçerler, yerdeğiştirmeölçerler, şekildeğiştirmeölçerler gibi ölçüm ve veri toplama cihazları kullanılmıştır. Bu bölümde bu alet ve cihazlar hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.



Şekil 4.16 : MTS yük ünitesi ve hidrolik veren.

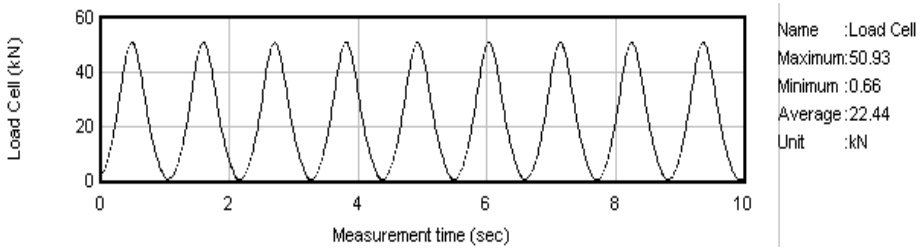
4.3.1.1 Veri toplayıcı

Çalışma kapsamında hem statik hem de dinamik deneyler yapılmıştır. Her iki deney tipinde farklı veri toplayıcı kullanılmıştır. Statik deneylerde TML marka TDS 302 ve 303 model, dinamik deneylerde ise TML marka DRA 101-C model dinamik veri toplayıcı kullanılmıştır (Şekil 4.17). Dinamik veri toplayıcı ile 10 kanaldan ölçüm alınabilmektedir fakat bir kanal sürekli değiştirilerek çoklu ölçüm alınabilmiştir.



Şekil 4.17 : Dinamik veri toplayıcı.

Her iki deney tipinde de toplanan verileri bilgisayara aktarmak üzere Visual Log programı farklı versiyonları ile kullanılmıştır. Örnek bir tekrarlı yükleme verisi grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18 : Dinamik yükleme verisi örneği.

4.3.1.2 Yükölçer

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi hidrolik veren ile yük dağıtma kirişi arasında tipi CLL-1MNA tipi olan 1000 kN kapasiteli yükölçer kullanılmıştır. Bu yükölçerden dinamik veri alınabilmektedir.

4.3.1.3 Yerdeğiştirmeölçer

Şekil 4.20'de görüldüğü gibi kirişin farklı noktalarında yer değiştirme değerini ölçmek için Tokyo Sokki Kenkyujo markalı CDP-25, CDP-50, CDP-100 modellerinde yerdeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Bazı deneylerde açıklık ortası ve mesnetler olmak üzere üç adet, bazı deneylerde ise bunlara ilave olarak açıklığın 1/4 noktalarında ve kiriş yan yüzünde olmak üzere altı adet yerdeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Bu yerdeğiştirmeölçerlerden eş zamanlı dinamik veri alınabilmektedir.

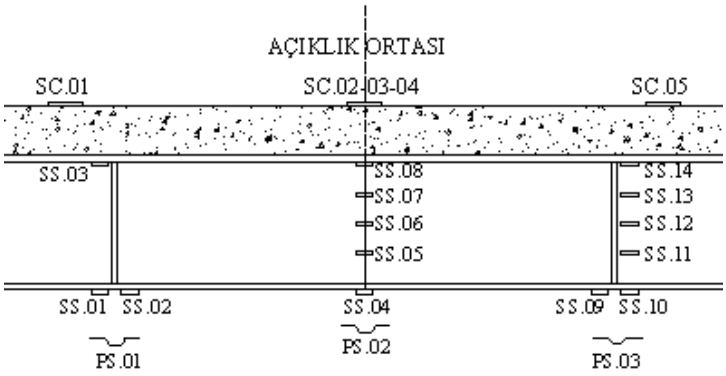
Açıklık ortasında net düşey yerdeğiştirmenin bulunabilmesi için alt başlıkta, mesnetlerden yaklaşık 1 cm uzaklıkta ve açıklık ortasında yerdeğiştirmeler ölçülmüştür. Daha sonra açıklık ortasında elde edilen yerdeğiştirmeden kenarlardaki yerdeğiştirmenin ortalaması çıkarılarak net yerdeğiştirme bulunmuştur.

4.3.1.4 Şekildeğiştirmeölçer (Şerit Tipi)

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de görüldüğü gibi kirişin açıklığı ve yüksekliği boyunca farklı noktalarda şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Çelik profil ve betonarme tabliyeden şekil değiştirme ölçümleri alınmıştır. Çelik için SS, betonarme tabliye için SC, kısaltması kullanılmıştır. Çelik için 6 mm ölçüm boyuna sahip Tokyo Sokki Kenkyujo marka FLA-6-11-5L 120 ohm şekildeğiştirmeölçer, betonarme için ise 60 mm ölçüm boyuna sahip Tokyo Sokki Kenkyujo marka PL-60-11-5L 120 ohm şekildeğiştirmeölçer kullanılmıştır.



Şekil 4.19 : Çelik ve betonda şekildeğiştirmeölçerlerin yerleşimi.



Şekil 4.20 : Şekildeğiştirmeölçerlerin yerleşimi.

4.3.1.5 Şekildeğiştirmeölçerler (PI Tipi)

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi kirişin açıklığı boyunca farklı noktalarda ortalama şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Çelik profil ve betonarme tabliye üzerinde şekil değiştirme ölçümleri alınmıştır. Çelik için PS, betonarme tabliye için PC kısaltmaları kullanılmıştır. Deneylerde Tokyo Sokki Kenkyujo marka PI-2-50 ve PI-5-100 şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır.

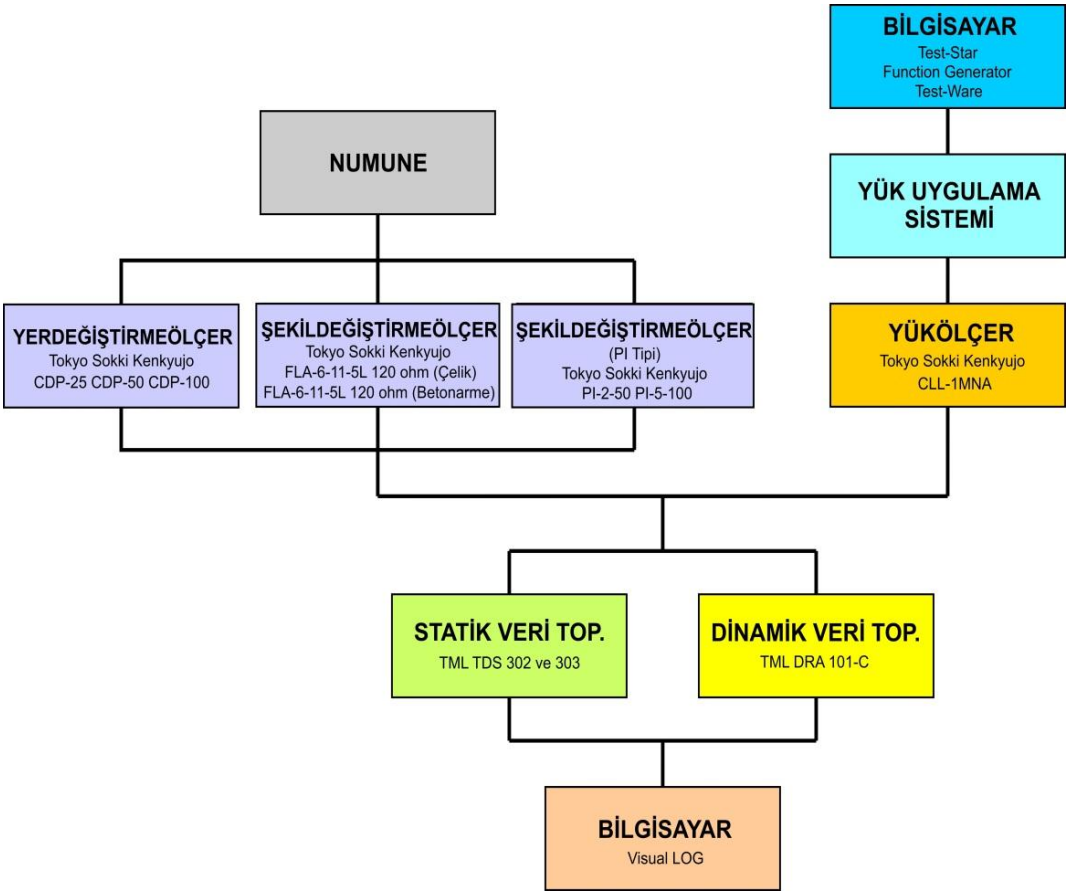
Veri toplama sisteminin özet şeması Şekil 4.22'de verilmiştir.

4.4 Deney Programı

Çalışma kapsamında 5 adet deney yapılmıştır. İlk olarak çelik-betonarme kompozit kirişin taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla bir adet monotonik (Mon) deney yapılmıştır. Sonrasında ise Fat-01, Fat-02, Fat-03, Fat-04 numuneleri farklı yük seviyelerinde tekrarlı yüklemelere maruz bırakılarak yorulma davranışı incelenmiştir.



Şekil 4.21 : PI tipi şekil değiştirme ölçerlerin yerleşimi.



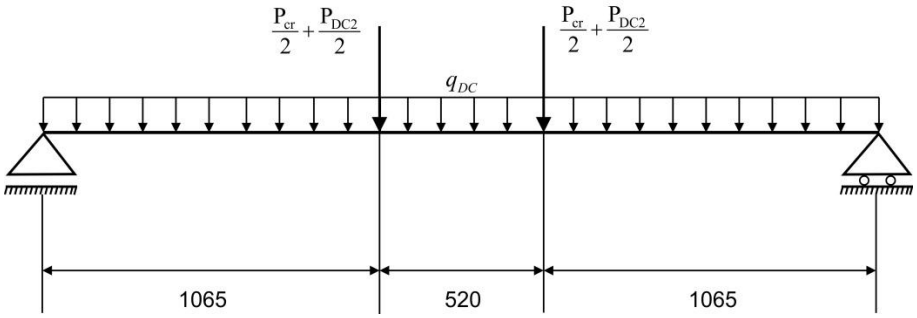
Şekil 4.22 : Deney veri toplama sistemi şeması.

5. BULGULAR

5.1 Teorik Hesap Sonuçları

5.1.1 Statik analiz

Sistem yüklemesi **Şekil 5.1**'de verildiği gibidir:



Şekil 5.1 : Sisteme yükleme durumu (Ölçüler: mm).

Burada q_{DC} çelik ve betonarme elemanların zati yükünü, P_{cr} sisteme uygulanan hareketli yükü, P_{DC2} dağıtma kirişinden kaynaklanan sabit yükü temsil etmektedir.

5.1.2 Kesit özelliklerinin hesabı

5.1.2.1 Kesit özellikleri kontrolleri

Boyuna berkitme bulunmayan kiriş gövdelerinde Denklem 3.4'den;

$$\frac{125.50}{5.50} = 22.82 \leq 150 \quad \textbf{(5.1)}$$

koşulu sağlanır. Çekme başlığında sırasıyla Denklem 3.6, 3.7 ve 3.8'den;

$$\frac{73.00}{2\ x\ 6.00} = 6.08 \leq 12 \quad \textbf{(5.2)}$$

$$73.00 \geq \frac{125.50}{6} = 20.92 \quad \textbf{(5.3)}$$

$$6.00 \leq 1.1\ x\ 5.50 = 6.05 \quad \textbf{(5.4)}$$

koşulları sağlanır. Basınç başlığında ise sırasıyla Denklem 3.6, 3.7 ve 3.8'den;

$$\frac{73.00}{2x6.00} = 6.08 \leq 12.0 \quad \textbf{(5.5)}$$

$$73.00 \geq \frac{125.50}{6} = 20.92 \quad \textbf{(5.6)}$$

$$6.00 \geq 1.1\ x\ 5.50 = 6.05 \quad \textbf{(5.7)}$$

koşulları da sağlanır. Ve son olarak Denklem 3.9'dan;

$$0.1 \leq \frac{(6{,}00\ x\ 73.00^3)/12}{(6{,}00\ x\ 73.00^3)/\ 12} = 1.00 \leq 10 \quad \textbf{(5.8)}$$

koşulu da sağlanmış olur.

5.1.2.2 Akma momentinin hesaplanması

Statik analizden;

M_{D1}= 1.25 x 0.492 = 0.615 kNm **(5.9)**

M_{D2}= 1.25 x 2.024 = 2.529 kNm **(5.10)**

Değerler Denklem 3.10'da üst başlık için yerine konursa:

$$365 = \frac{0.615}{68300\text{x}10^{-6}} + \frac{2.529}{720479\text{x}10^{-6}} + \frac{M_{AD}}{720479\text{x}10^{-6}} \quad \textbf{(5.11)}$$

eşitliği elde edilir (Uzun süreli kompozit kesit modüler oranı n alınmıştır). Buradan;

M_{AD}= 253.958 kNm **(5.12)**

bulunur. Değerler Denklem 3.11'de yerine konursa;

$M_{yc} =$ 257.103 kNm **(5.13)**

bulunur. Aynı işlemler alt başlık için de yapılırsa;

$M_{yt} =$ 38.04 kNm **(5.14)**

bulunur. Buna göre;

$M_y = 38.04$ kNm **(5.15)**

olarak alınır.

5.1.2.3 Plastik momentin hesaplanması

Öncelikle eleman akma kuvvetleri hesaplanır:

P_T = 73.00 x 6.00 x 365/1000 = 160 kN **(5.16)**

P_C = 73.00 x 6.00 x 365/1000 = 160 kN **(5.17)**

P_W = 125.50 x 5.50 x 365/1000 = 252 kN **(5.18)**

P_S = 0.85 x 24 x 50 x 350/1000 = 357 kN **(5.19)**

Daha sonra Çizelge 3.5'den $\bar{Y}$ ve M_p değerleri hesaplanır. Buna göre, plastik tarafsız eksen üst başlıkta olup;

$\bar{Y}$ = 4.03 mm **(5.20)**

M_p = 47.80 kNm **(5.21)**

bulunmuştur.

5.1.3 Dayanım limit durumu kontrolleri

5.1.3.1 Eğilme momenti etkisindeki kontroller

Pozitif kesitte dayanım limit durumu kontrolleri yapılırken öncelikle kesitin kompaktlığına bakılır. Buna göre sırasıyla Denklem 3.12, 3.13 ve 3.14 denklemleri sağlanmalıdır:

$365 \leq 485$ MPa **(5.22)**

SD6.3.2'ye göre PTE alt veya üst başlıkta bulunduğu durumlarda D_{cp} = 0'dır. Buna göre Denklem 3.13 ve 3.14'den;

$$\frac{2\ x\ 0}{5.50} = 0 \leq 3.76\sqrt{\frac{190000}{365}} \quad \textbf{(5.23)}$$

$$\frac{125.50}{5.50} = 22.82 \leq 150 \quad \textbf{(5.24)}$$

Kompaktlık koşulları sağlandığından kesit kompakt olarak hesaplanabilir. Denklem 3.16 koşulu sağlanmadığından Denklem 3.18 geçerli olmaktadır. Buna göre nominal dayanım momenti:

$$M_n = 47.80\left(1.07 - 0.7\frac{54.03}{187.50}\right) \quad \textbf{(5.25)}$$

M_n = 41.50 kNm **(5.26)**

bulunur. Faktörlü dayanım momenti ise;

$\phi_f M_n$ = 1.0 x 41.50 = 41.50 kNm **(5.27)**

bulunur. Buna göre kesiti plastik kapasitesine ulaştıran P_{cr} değeri yük ve mukavemet faktörleri uygulandığında 42 kN yük ve mukavemet faktörleri kullanılmadan hesap yapıldığında ise 74 kN olarak bulunmuştur.

Kesit kompakt olarak kabul edilmeyip elastik hesap yapılsaydı, alt başlık için Denklem 3.23'den;

$F_{nt} = 1.0 \text{ x } 365 = 365$ kN **(5.28)**

bulunur. Faktörlü dayanım:

$\phi_f F_{nt} = 1.0 \text{ x } 365 = 365$ kN **(5.29)**

Buna göre alt başlıkta 365 Mpa gerilme oluşturan P_{cr} değeri yük ve mukavemet faktörleri uygulandığında 37 kN, yük ve mukavemet faktörleri kullanılmadan hesap yapıldığında ise 66 kN olarak bulunmuştur.

5.1.4 Yorulma limit durumu kontrolleri

Kiriş AASHTO LRFD 2007 yönetmeliğinde C′ detayının geçiş ömrü olan 2,545,000 adet yüklemeye dayanacak şekilde tasarlanacaktır. Buna göre;

N = 2,545,000 **(5.30)**

$A = 14.4 \times 10^{11}$ MPa^3 **(5.31)**

$(\Delta F)_{TH}$ = 82.70 MPa **(5.32)**

olmak üzere 3.27'den nominal yorulma limit durumu dayanımı;

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{14.4x10^{11}}{2545000}\right)^{1/3} \geq 0.5 \times 82.70 \quad \textbf{(5.33)}$$

$(\Delta F)_n$ = 82.71 MPa **(5.34)**

bulunur. Statik analizden kiriş alt başlığında bu gerilmeyi oluşturan faktörlü hareketli yük yaklaşık olarak 22 kN bulunmuştur. Yük ve dayanım faktörlerinin kullanılmadığı durumda ise bu değer yaklaşık 16 kN bulunmuştur. Faktörsüz durumda bulunan değerin faktörlü durumda bulunan değerden küçük olmasının sebebi AASHTO LRFD 2007 yönetmeliğinde yorulma limit durumu hareketli yük faktörünün 0.75 olmasıdır.

5.2 Deneysel Çalışma Sonuçları

5.2.1 Monotonik yükleme deneyi sonuçları (Mon numunesi)

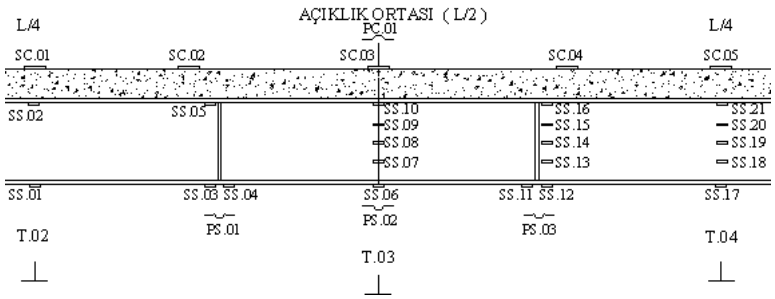
Bu bölümde Mon numunesi için yapılan monotonik yükleme deney sonuçları özetlenmiştir. Deney başlangıcında numunenin durumu Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Mon numunesi.

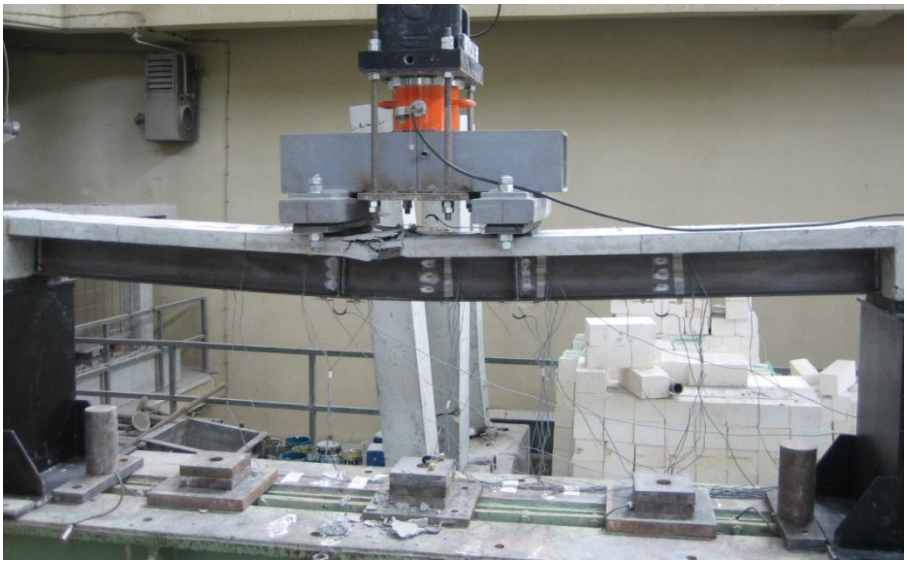
Mon numunesinin, mesnet noktaları, açıklık ortası ve açıklığın 1/4'ü kadar mesafede yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Açıklık ortasında, berkitmenin olduğu kesitte ve

mesnetlerden açıklığın 1/4'ü kadar uzaklıktaki yerlerde şekildeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Şekil ve yerdeğiştirme ölçümlerinin yapıldığı yerler Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3 : Mon numunesi ölçüm noktaları.

Şekil 5.4'de kirişin göçme mekanizması görülmektedir. Çelik-betonarme kompozit kirişte yapılan statik yüklemede betondaki basınç ezilmesi neticesinde kiriş göçme durumuna ulaşmıştır. Şekil 5.5'de betonda oluşan deformasyonlar görülmektedir.



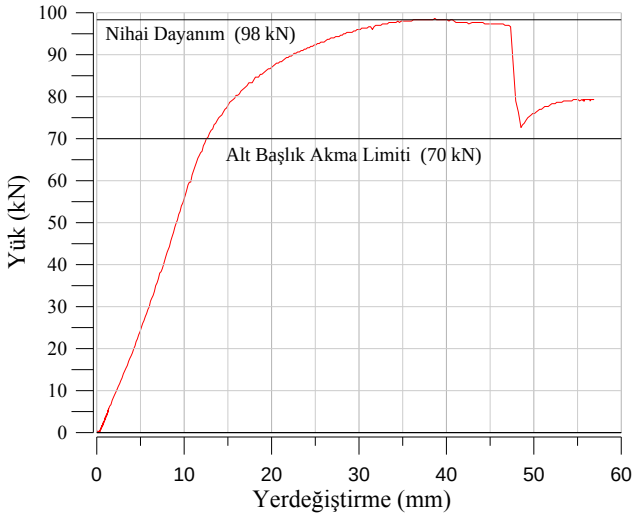
Şekil 5.4 : Monotonik deney sonrasında Mon numunesi.



Şekil 5.5 : Mon numunesinde betonda oluşan deformasyonlar.

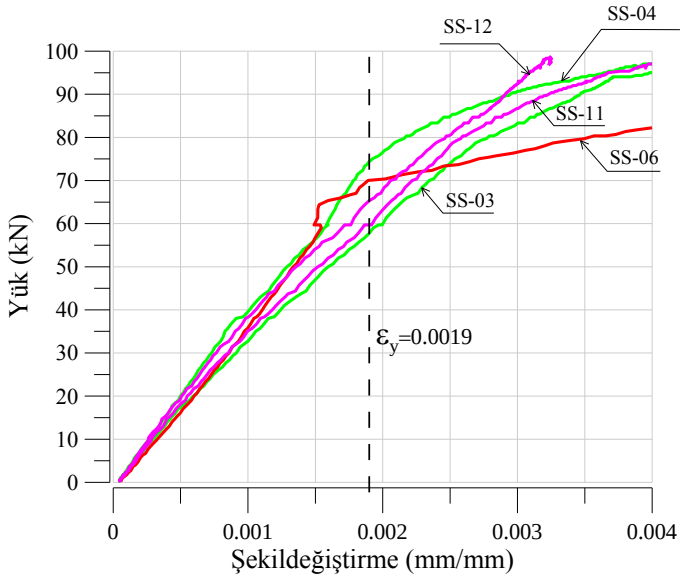
Yapılan deneyler ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme ve yük-yer değiştirme eğrileri aşağıda verilmiştir.

Şekil 5.6'da Mon numunesine ait yükleme - yerdeğiştirme ilişkisi verilmiştir. Deney sonucunda kirişin nihai taşıma kapasitesi 98 kN olarak bulunmuştur. Deneyde kiriş alt başlığında akma gerilmesi 70 kN olarak bulunmuştur.



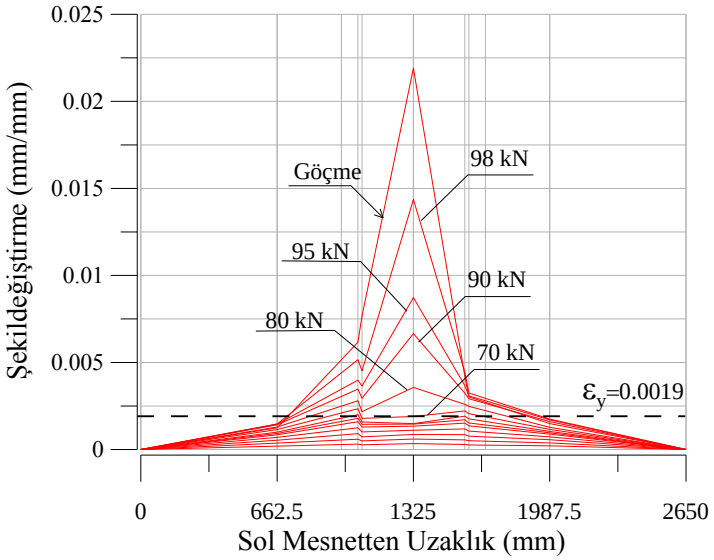
Şekil 5.6 : Mon numunesinde yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

Şekil 5.7'de Mon numunesine ait çelik alt başlığı, yük – şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir. Grafikte elastik limite kadar şekil değiştirmelerin birbirleriyle uyumlu olarak arttığı fakat elastik limitten sonra orta kesitin diğer kesitlere göre daha farklı davrandığı ve yük taşıma kapasitesinin hızla azalarak şekil değiştirmelerin arttığı görülmektedir.

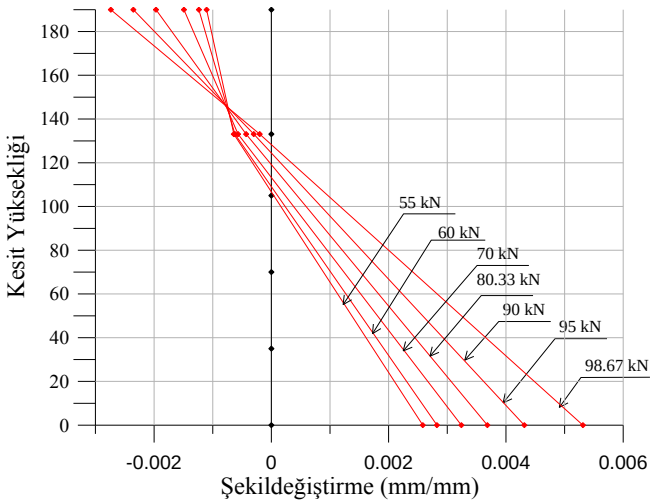


Şekil 5.7 : Mon numunesinde çelik alt başlıkta yük - şekildeğiştirme ilişkisi.

Kiriş hesap açıklığı 2650 mm dir. Kiriş açıklığının 1/4'ü kadar mesafelerde noktalarında çelik profil alt başlığında şekil değiştirme okumaları yapılmıştır. Bu değerler sonucu faklı yük seviyelerinde açıklık boyunca şekil değiştirme değerlerinin değişimi Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.9'da ise çeşitli yük seviyeleri için Mon numunesinde kesit yüksekliği boyunca yük - şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



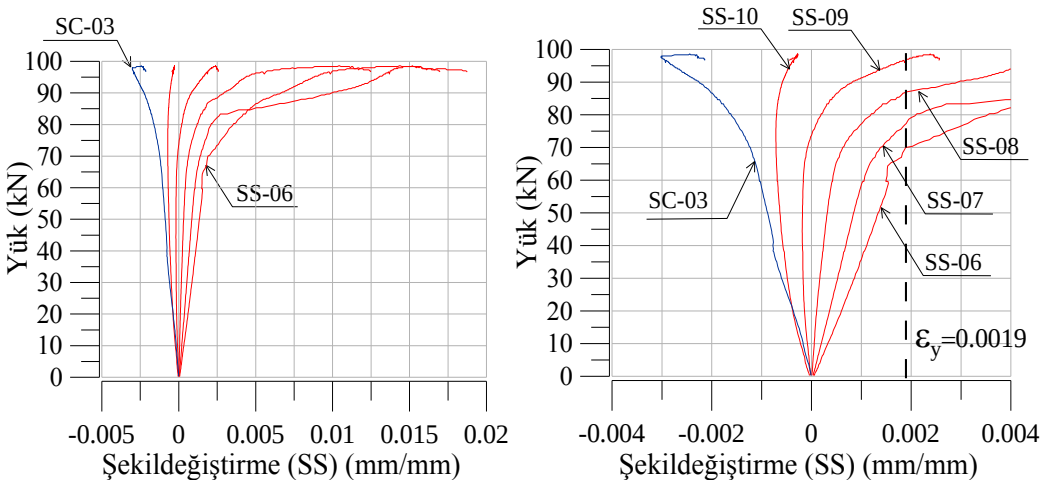
Şekil 5.8 : Mon numunesinde açıklık boyunca yük - şekildeğiştirme ilişkisi.



Şekil 5.9 : Mon numunesinde kesit yüksekliği boyunca yük - şekildeğiştirme ilişkisi.

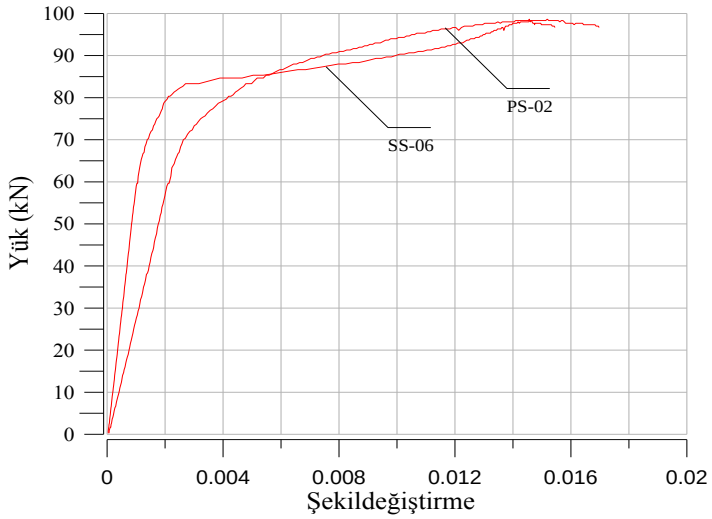
Şekil 5.10'da açıklık ortasında kesit yüksekliği boyunca ölçülen şekil değiştirme oranları iki farklı ölçekte gösterilmiştir. Grafikte en sağdaki eğri kesit alt noktasını, en soldaki eğri ise kesit üst noktasını göstermektedir. Buna göre tabliye üzerindeki şekildeğiştirmeölçerden alınan veriye göre bu bölgede kısalma meydana gelmektedir.

Üst başlığa yakın yerleştirilen SS-10 şekildeğiştirmeölçerinden okunan veride ise bu bölgede uzamanın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.10 : Mon numunesinde orta kesitte yük - şekildeğiştirme ilişkisi.

Şekil 5.11'de açıklık ortasındaki PI tipi şekildeğiştirmeölçerden okunan numunenin yük – şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.11 : Mon numunesinde PS-02 ve SS-06 şekildeğiştirmeölçerlerinde yük - şekildeğiştirme ilişkisi.

5.2.2 Yorulma deneyi sonuçları (Fat-01, Fat-02, Fat-03, Fat-04)

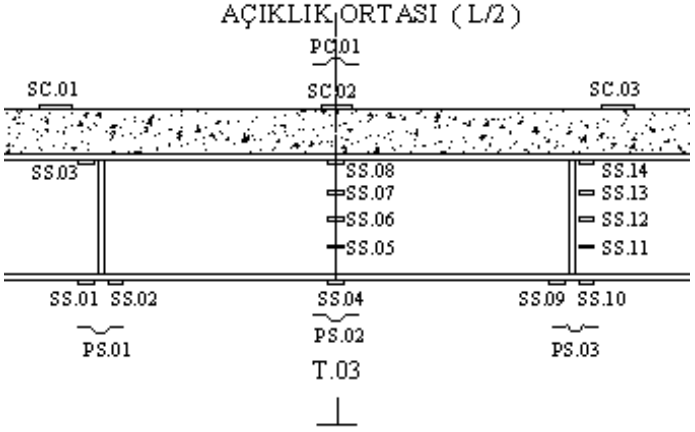
Bu bölümde Fat-01, Fat-02, Fat-03, Fat-04 numuneleri için yapılan tekrarlı yükleme deney sonuçları özetlenmiştir. Yapılan deneyler ile elde edilen tekrar sayısı - şekildeğiştirme, tekrar sayısı - yerdeğiştirme, tekrar sayısı - rijitlik gibi ilişkiler sunulmuştur. Yorulma deneylerine ait parametreler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Tekrarlı yüklemeye tabi tutulan numunelere ait deney parametreleri.

Numune Adı	Sabit Yük P_{mean} (kN)	Değişken Yük P_{amp} (kN)	Uygulanan En Büyük Yük $P_{mean} + P_{amp}$ (kN)	Yükleme Frekansı (Hz)
Fat-01	0.53	49.87	50.40	0.9
Fat-02	0.95	25.74	26.69	2.5
Fat-03	0.90	34.27	35.17	1.8
Fat-04	0.85	41.02	41.87	1.2

5.2.2.1 Fat-01 deney sonucu

Fat-01 numunesinde mesnet noktaları ve açıklık ortasında yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Açıklık ortasında ve berkitmelerin olduğu kesitte, kiriş alt başlığında ve gövdede yükseklik boyunca şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Şekil ve yerdeğiştirme ölçümlerinin yapıldığı yerler Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

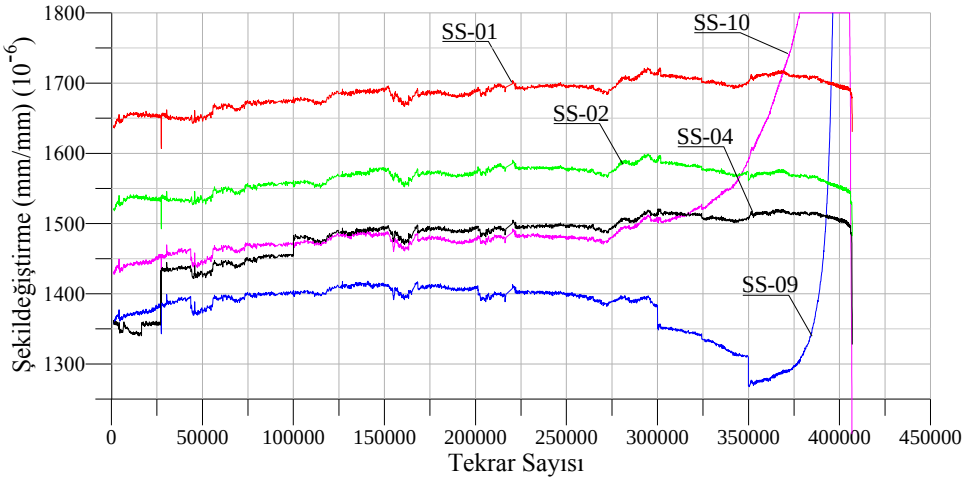


Şekil 5.12 : Fat-01 numunesi ölçüm noktaları.

Fat-01 numunesine yaklaşık 50 kN seviyesinde, 0.9 Hz frekans değerinde dinamik yükleme uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeler alt başlıkta akma gerilmesinin yaklaşık yüzde 70'i seviyesinde yapılmıştır. Açıklık ortasında ve berkitmelerin olduğu yerlerde profil alt başlığında ve gövdesi boyunca, açıklık ortasında tabliyenin ise üstünden ortalama her 200 yüklemede bir 10 saniyelik ölçümler alınmıştır.

Şekil 5.13'de Fat-01 numunesinde kiriş alt başlığına ait şekildeğiştirme değerleri verilmiştir. Ölçüm yapılan tüm noktalarda şekildeğiştirmelerin yük tekrarı adediyle beraber arttığı görülmektedir. Fat-01 numunesinde deney başladıktan dört gün sonra yaklaşık 300,000 yükleme sayısına ulaşıldığında sağ taraftaki ikinci berkitmenin altında SS-10 şekildeğiştirmeölçerinde okunan veriye göre diğer noktalardaki

davranışlardan farklı bir davranış meydana gelmeye başladığı görülmüştür. Aynı yük seviyesinde şekildeğiştirmeler diğer dört noktadan daha fazla artmaya başlamıştır.



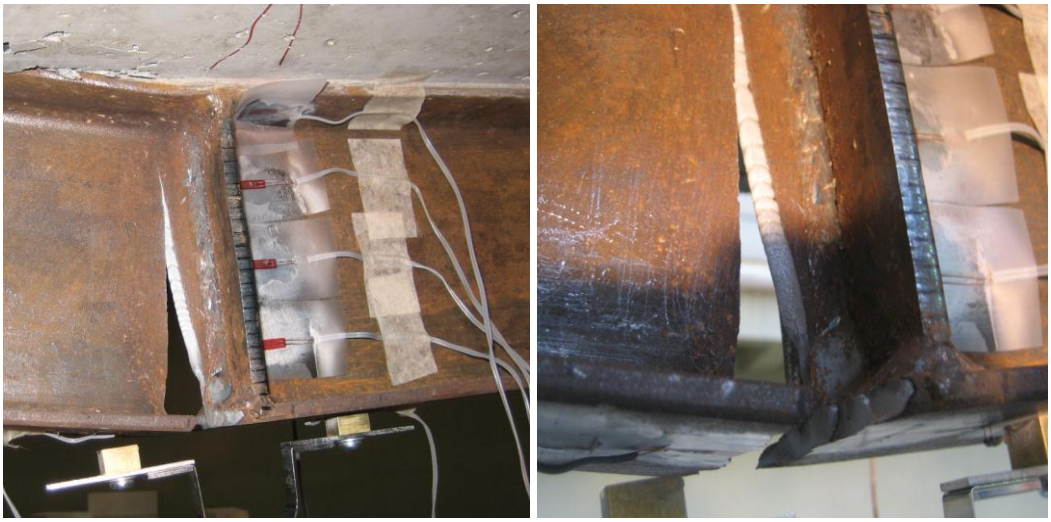
Şekil 5.13 : Fat-01 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.

350,000 yükleme sayısından sonra ise SS-09 şekildeğiştirmeölçerinde okunan veriye göre şekildeğiştirme değerleri hızla artarak SS-10 noktasını geçmiş ve sistem bu noktada çelik profil alt başlık ve gövdesinde oluşan ani çatlak sonucu göçmüştür. Yorulma çatlakları SS-09 noktasında oluşmuş ve hızla ilerlemiştir. Alt başlıkta oluşan çatlak profil gövdesi boyunca hızla ilerlemiş ve kiriş taşıma kapasitesini yitirmiştir. Nihai yükleme adımı sayısı 407,000'dir. Şekil 5.14'de yorulma göçmesinde kirişin gelen görünümü, Şekil 5.15'de ise yorulma çatlağının görüntüleri görülmektedir.

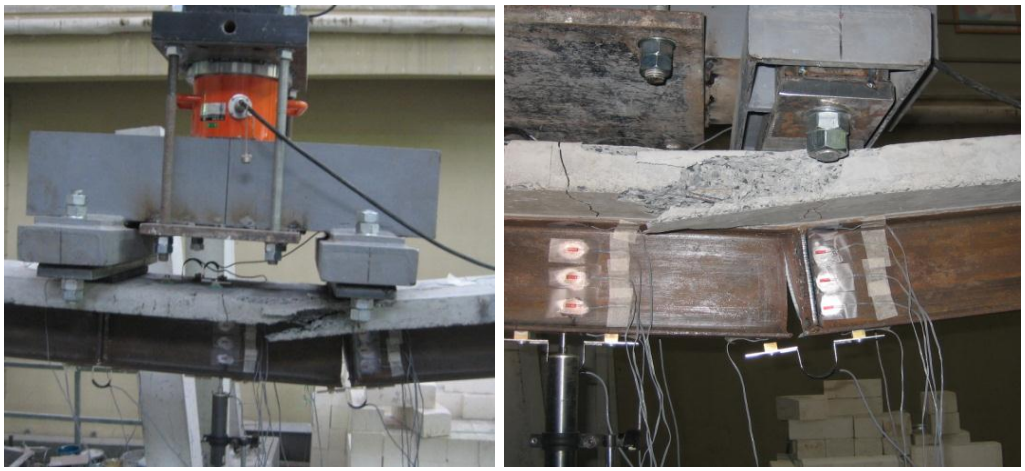


Şekil 5.14 : Fat-01 numunesi yorulma göçmesi.

Şekil 5.16'da betondaki kesme deformasyonları görülmektedir. Çelik kiriş taşıma kapasitesinin yitirdikten sonra tabliyede yatayla yaklaşık 30 derece açıya sahip kesme çatlaklarıyla kesme hasarı oluşmuştur.

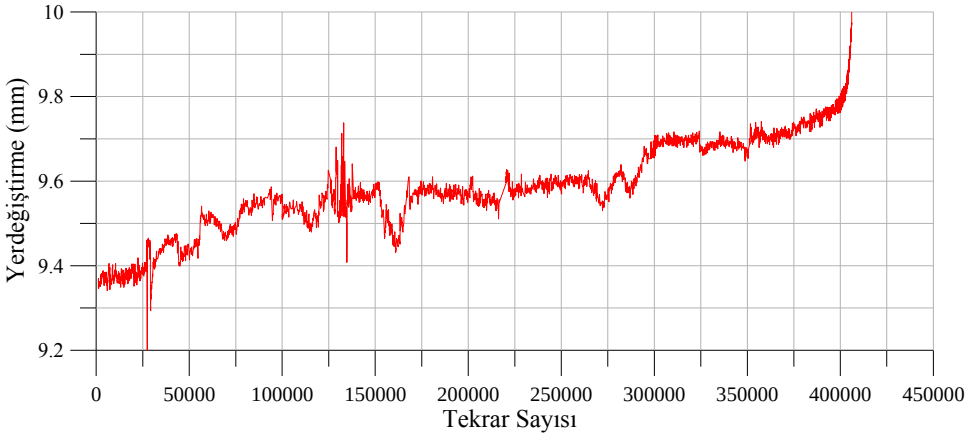


Şekil 5.15 : Fat-01 numunesi yorulma çatlağı ve ilerlemesi.

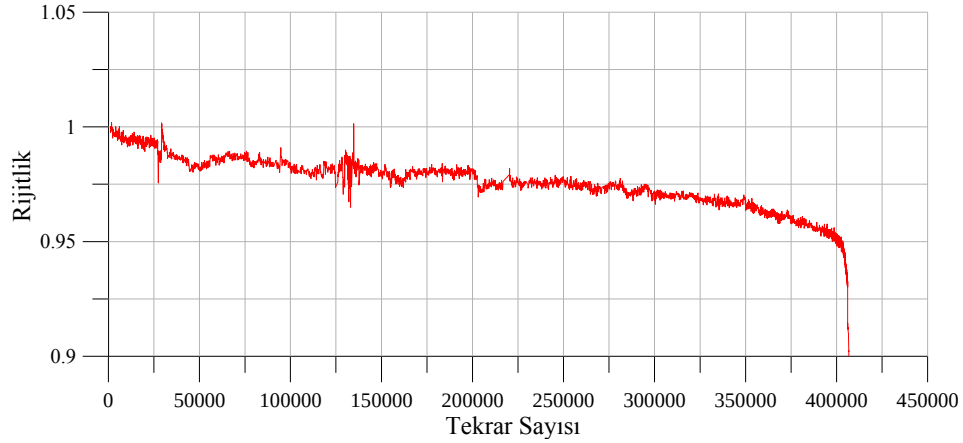


Şekil 5.16 : Fat-01 numunesi betonda oluşan deformasyonlar.

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de numuneye ait tekrar sayısı - yerdeğiştirme ve tekrar sayısı rijitlik değişimi ilişkileri verilmiştir. Buna göre deney başlangıcından itibaren yerdeğiştirmede belirgin bir artış olurken rijitlikte de belirgin bir şekilde azalma meydana gelmiştir. Şekil 5.18'de verilen rijitlik değeri, yükleme adımının deney başlangıcındaki rijitlik değerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş rijitliktir.



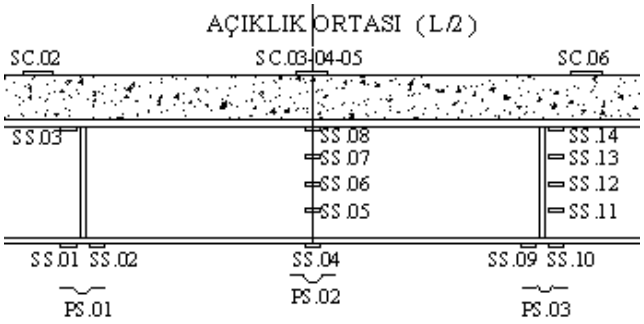
Şekil 5.17 : Fat-01 numunesi tekrar sayısı - yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.18 : Fat-01 numunesi tekrar sayısı - rijitlik grafiği.

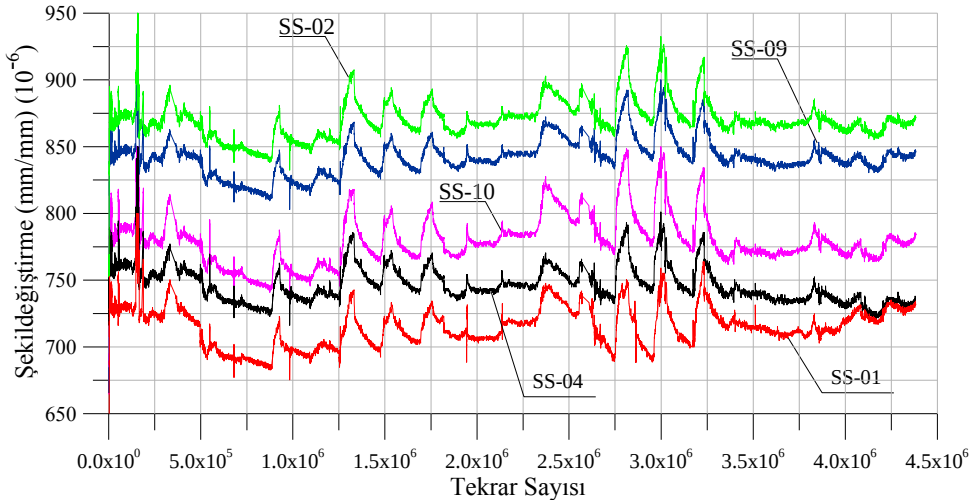
5.2.2.2 Fat-02 deney sonucu

Fat-02 numunesinde mesnet noktaları, açıklık ortasında yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Açıklık ortasında ve berkitmelerin olduğu yerlerde, kiriş alt başlığında ve gövdede yükseklik boyunca şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Şekil ve yerdeğiştirme ölçümlerinin yapıldığı yerler Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



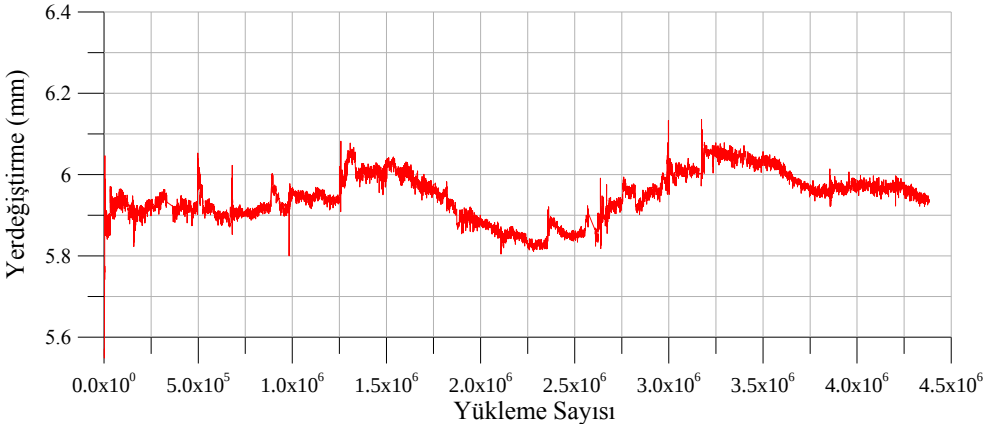
Şekil 5.19 : Fat-02 numunesi ölçüm noktaları.

Fat-02 numunesine yaklaşık 27 kN seviyesinde, 2.5 Hz frekans değerinde dinamik yükleme uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeler çelik alt başlık akma gerilmesinin yaklaşık yüzde 40'ı seviyesinde yapılmıştır. Fat-02 numunesi yaklaşık 4,400,000 yükleme sayısına maruz bırakılmıştır. Bu deney yaklaşık 23 gün sürmüştür. Bu süre sonunda şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme değerlerinde bir artış görülmemiştir. Şekil 5.20'de çelik alt başlığındaki şekildeğiştirmeölçerlerden alınan veriler görülmektedir.



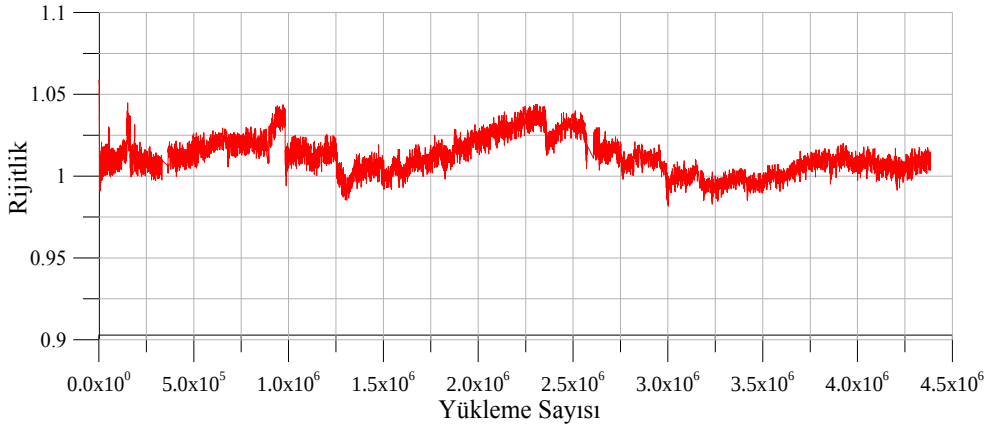
Şekil 5.20 : Fat-02 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.

Şekil 5.21'de Fat-02 numunesine ait yük - yerdeğiştirme ilişkisi verilmiştir. Grafikteki dalgalanmalar laboratuvar şartlarındaki sıcaklık değişimlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.21 : Fat-02 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.

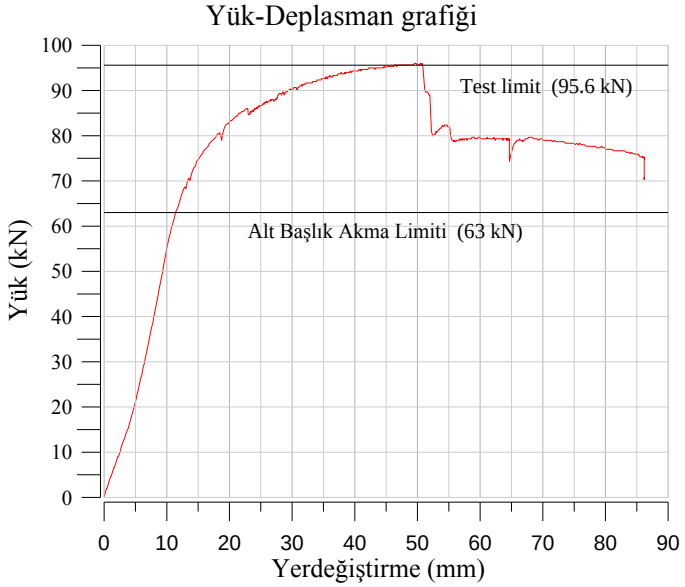
Şekil 5.22'de Fat-02 numunesine ait yük - rijitlik ilişkisi verilmiştir. Grafikteki dalgalanmalar laboratuvar şartlarındaki sıcaklık değişimlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.22 : Fat-02 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği.

Fat-02 numunesinde dinamik yükler altında yorulma göçmesi olmayacağı kabul edilerek numune monotonik teste tabii tutularak 4,400,000 yükleme sayısı sonunda taşıma kapasitesi belirlenmiştir.

Fat-02 numunesine ait statik yükleme deneyinin yük - yerdeğiştirme sonuçları Şekil 5.23'de verilmiştir. Buna göre alt başlıkta akma oluşturan yük değeri 63 kN, kirişin nihai dayanımı ise 95.6 kN bulunmuştur.



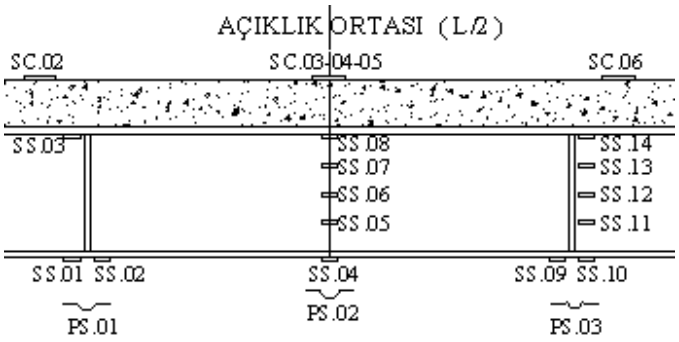
Şekil 5.23 : Fat-02 numunesi statik yükleme altında yük - yerdeğiştirme ilişkisi.

5.2.2.3 Fat-03 deney sonucu

Fat-03 numunesinde mesnet noktalarında, açıklık ortasında ve mesnetlerden açıklığın 1/4'ü kadar mesafede bulunan yerlerde yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Açıklık ortasında ve berkitmelerin olduğu yerlerde, kiriş alt başlığında ve gövdede yükseklik

boyunca şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Şekil ve yerdeğiştirme ölçümlerinin yapıldığı yerler Şekil 5.24'de gösterilmiştir.

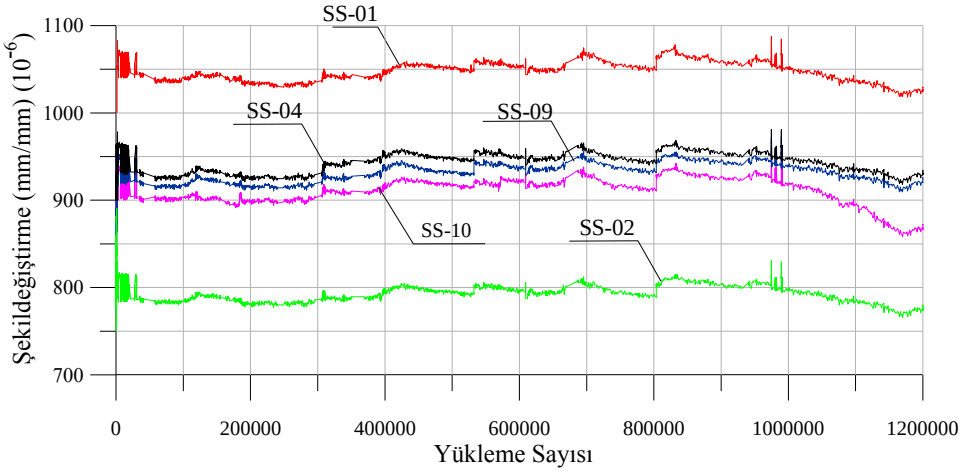
Fat-03 numunesine yaklaşık 35 kN seviyesinde, 1.8 Hz frekans değerinde dinamik yükleme uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeler çelik alt başlık akma gerilmesinin yaklaşık yüzde 50'si seviyesinde yapılmıştır.



Şekil 5.24 : Fat-03 numunesi ölçüm noktaları.

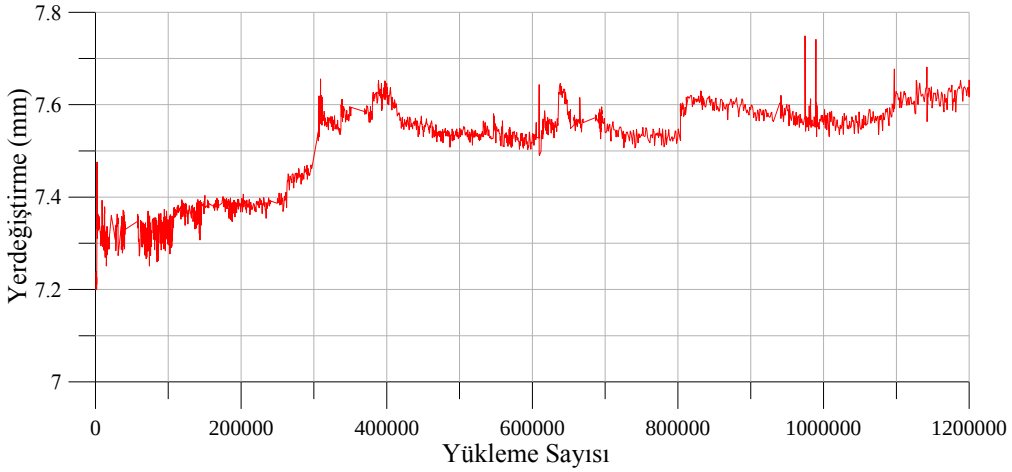
Bu deneyde kirişe dinamik yükleme uygulanmıştır. Yaklaşık 1,200,000 seviyesinde sistemde kullanıcıdan kaynaklanan aşırı yükleme durumu meydana gelmiş ve çelik akma gerilmesi seviyesini aşmıştır. Bu noktadan sonra aynı yük seviyesinde yine dinamik yükleme yapılmıştır ve kirişe 4,200,000 yükleme daha yapılmıştır. Kirişte yorulma göçmesi meydana gelmediği için kiriş monotonik yüklenerek kırılmıştır.

Kiriş alt başlığı için, aşırı yüklemeye kadar olan tekrar sayısı - şekildeğiştirme değerleri Şekil 5.25'de gösterilmiştir. Yükleme boyunca şekildeğiştirmelerde belirgin bir değişim olmamıştır.

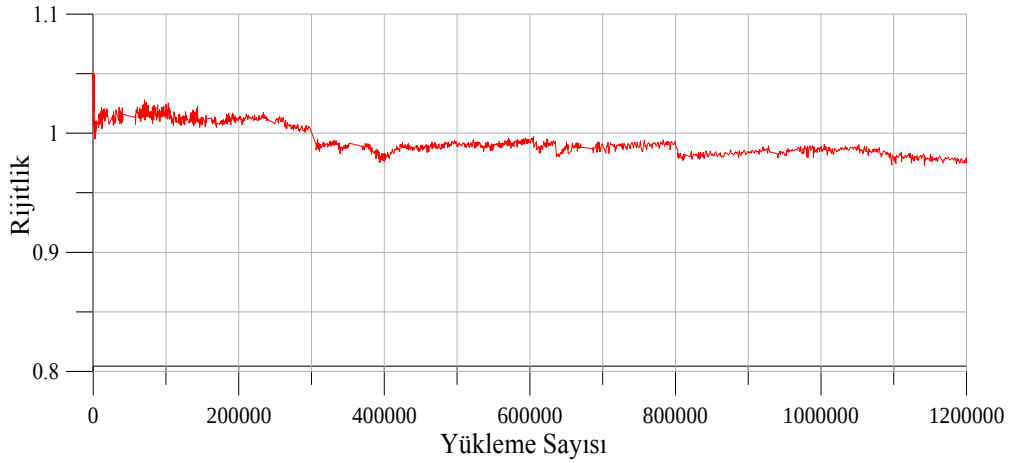


Şekil 5.25 : Fat-03 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.

Şekil 5.26'da Fat-03 numunesine ait yükleme sayısı - yerdeğiştirme ilişkisi verilmiştir. Şekil 5.27'de ise Fat-03 numunesine ait yükleme sayısı - rijitlik ilişkisi verilmiştir.

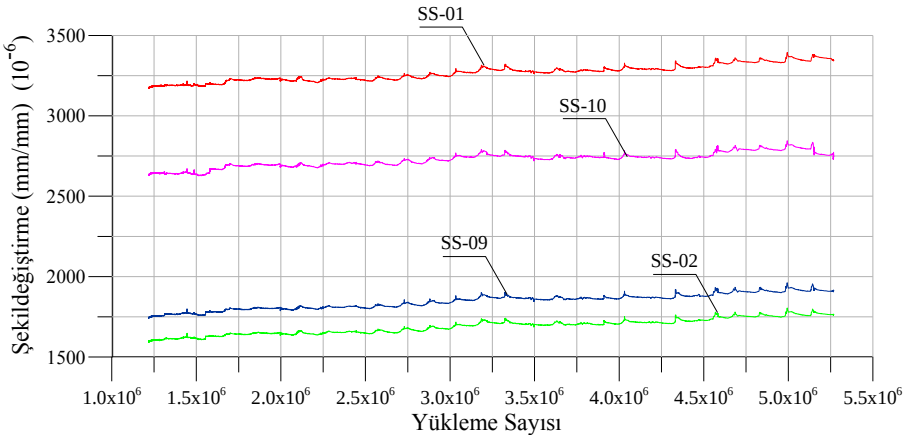


Şekil 5.26 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.



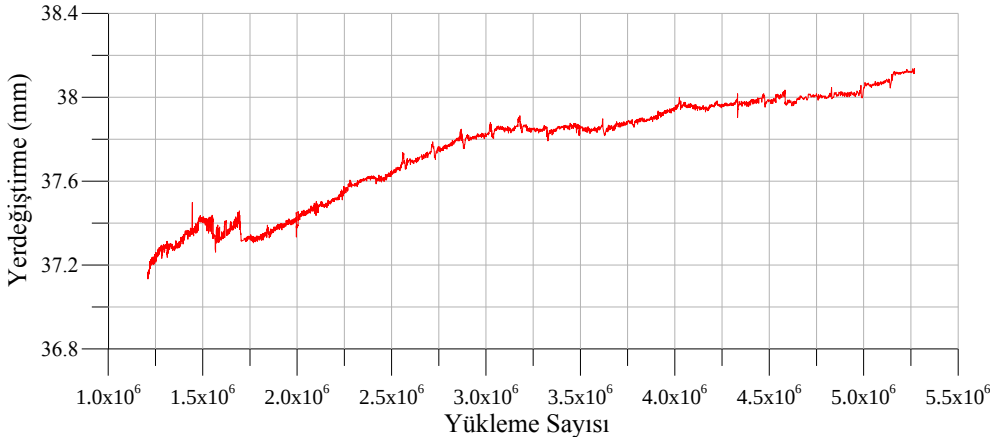
Şekil 5.27 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği.

1,200,000 tekrar sayısından sonra sisteme kaza ile aşırı yüklenmiş ve hasarlı bir kiriş olarak kabul edilerek ilk durumdaki tekrarlı yük altında dinamik yüklemeye devam edilmiştir. Şekil 5.28'de Fat-03 numunesi için ait aşırı yükleme sonrası alt başlık için yükleme sayısı - şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



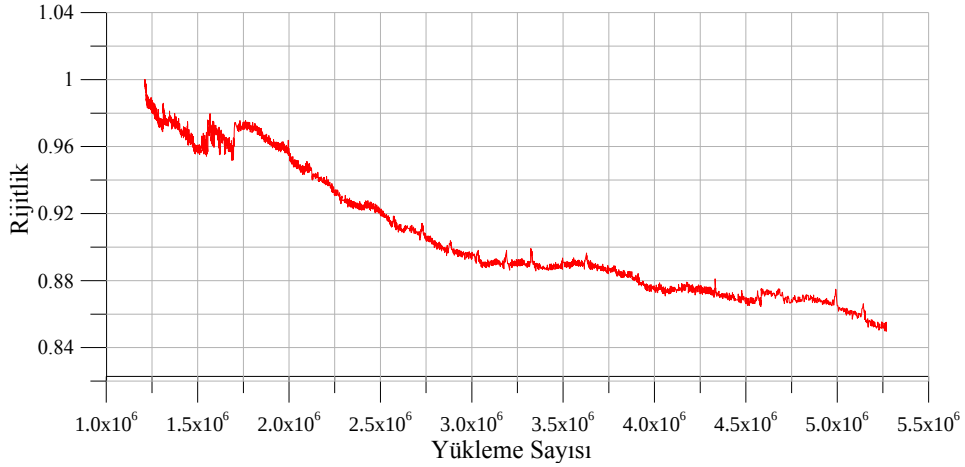
Şekil 5.28 : Fat-03 numunesi tekrar sayısı - şekildeğiştirme grafiği.

Şekil 5.29'da Fat-03 numunesine ait aşırı yükleme sonrası yükleme sayısı - yerdeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



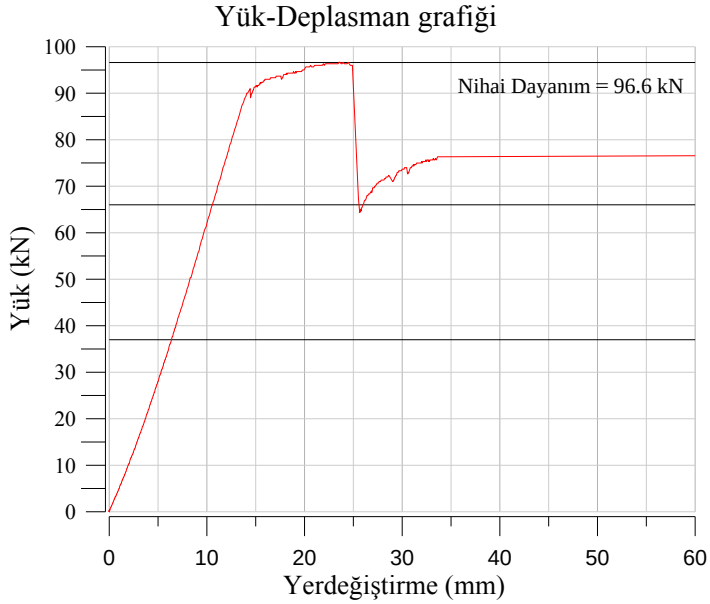
Şekil 5.29 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.

Şekil 5.30'da Fat-03 numunesine ait aşırı yükleme sonrası yükleme sayısı - rijitlik ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.30 : Fat-03 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği.

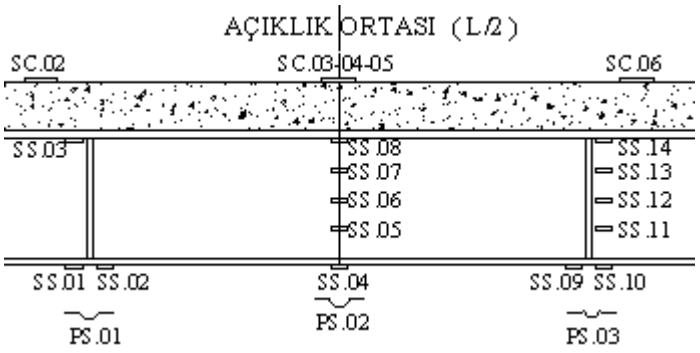
5,400,000 yükleme sayısı sonunda kirişte herhangi bir yorulma göçmesi belirtisi görülmemiştir. Kiriş statik yükleme altında kırılmıştır. Statik yüklemeye ait yük - yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 5.31'de verilmiştir.



Şekil 5.31 : Fat-03 numunesi yük - yerdeğiştirme grafiği.

5.2.2.4 Fat-04 deney sonucu

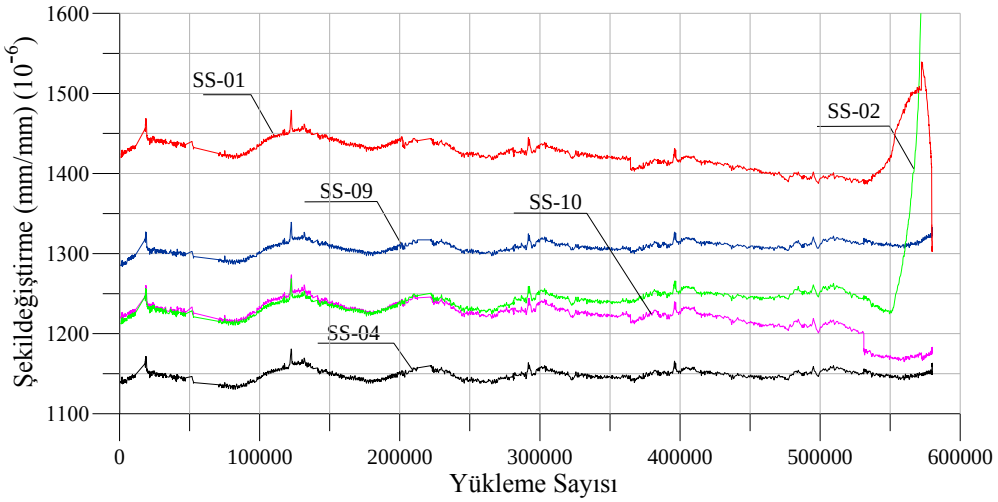
Fat-04 numunesinde mesnet noktaları, açıklık ortasında yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Açıklık ortasında ve berkitmelerin olduğu kesitte kiriş alt başlığında ve gövdede yükseklik boyunca şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Şekil ve yerdeğiştirme ölçümlerinin yapıldığı yerler Şekil 5.32'de gösterilmiştir.



Şekil 5.32 : Fat-04 numunesi ölçüm noktaları.

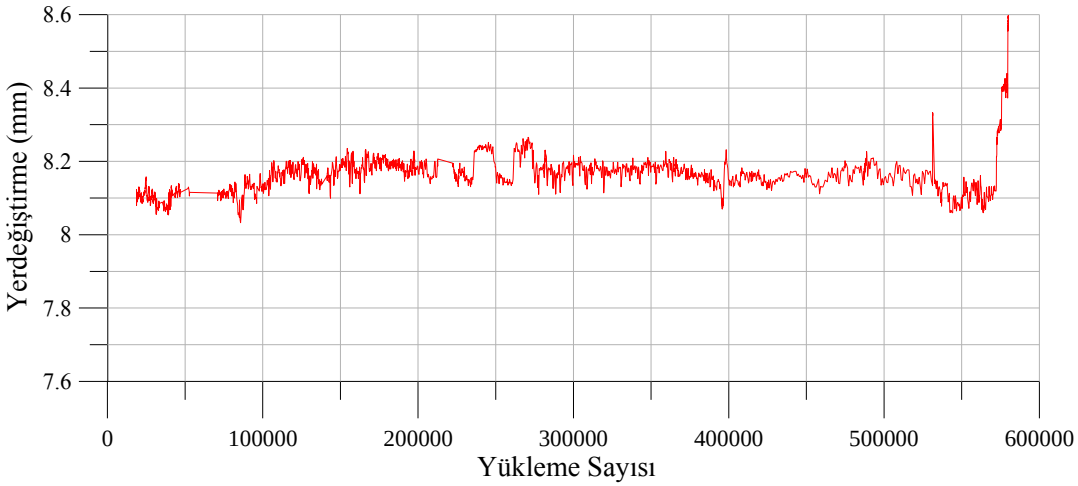
Fat-04 numunesine yaklaşık 41 kN seviyesinde, 1.2 Hz frekans değerinde dinamik yükleme uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeler çelik alt başlık akma gerilmesinin yaklaşık yüzde 60'ı seviyesinde yapılmıştır.

Şekil 5.33'de Fat-04 numunesine ait alt başlıktaki şekildeğiştirme ölçerden elde edilen veriler gösterilmiştir. Fat-04 numunesinde yaklaşık 530,000 yükleme sayısına ulaşıldığında sol taraftaki berkitmenin altında (SS-02), diğer noktalardaki davranışlardan farklı bir davranış meydana gelmeye başlamıştır. Aynı yük seviyesinde şekildeğiştirmedeki artışlar diğer dört noktadan daha fazla artmaya başlamıştır. 550,000 yükleme sayısından sonra ise SS-01 noktasında şekildeğiştirme değerleri hızla artarak SS-02 noktasını geçmiş ve sistem bu noktadan göçmüştür. Yorulma çatlakları SS-01 noktasında oluşmuş ve hızla ilerlemiştir.



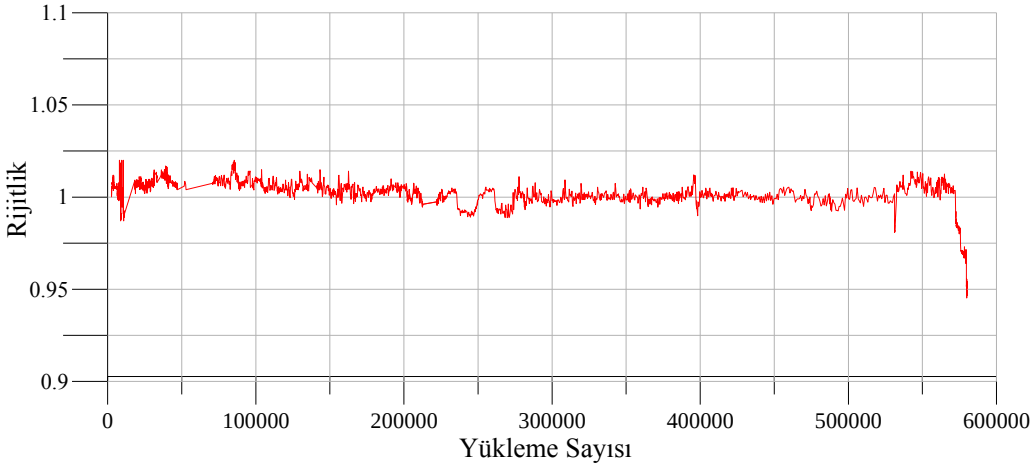
Şekil 5.33 : Fat-04 numunesi yükleme sayısı - şekildeğiştirme grafiği.

Şekil 5.34'de Fat-04 numunesine yükleme sayısı - yerdeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 5.34 : Fat-04 numunesi yükleme sayısı - yerdeğiştirme grafiği.

Şekil 5.35'de Fat-04 numunesine yükleme sayısı - rijitlik ilişkisi verilmiştir. Fat-04 numunesinde yorulma hasarı oluşmasına rağmen, Fat-01 numunesinin tersine rijitlikte belirgin bir değişme görülmemiştir.



Şekil 5.35 : Fat-04 numunesi yükleme sayısı - rijitlik grafiği.

Şekil 5.36'da Fat-04 numunesinde yorulma göçmesi mekanizması görülmektedir.

Kiriş yaklaşık 580,000 yükleme sayısında taşıma kapasitesini yitirmiştir. Alt başlıkta oluşan çatlak profil gövdesi boyunca hızla ilerlemiştir (Şekil 5.37). Yukarıdaki yükleme sayısı-rijitlik grafiğinde görüldüğü gibi, kiriş başlangıç rijitliğinin yaklaşık 0.95 ine ulaştığında kapasitesini yitirmekte ve hızla göçmektedir.



Şekil 5.36 : Yorulma göçmesi esnasında Fat-04 numunesi.

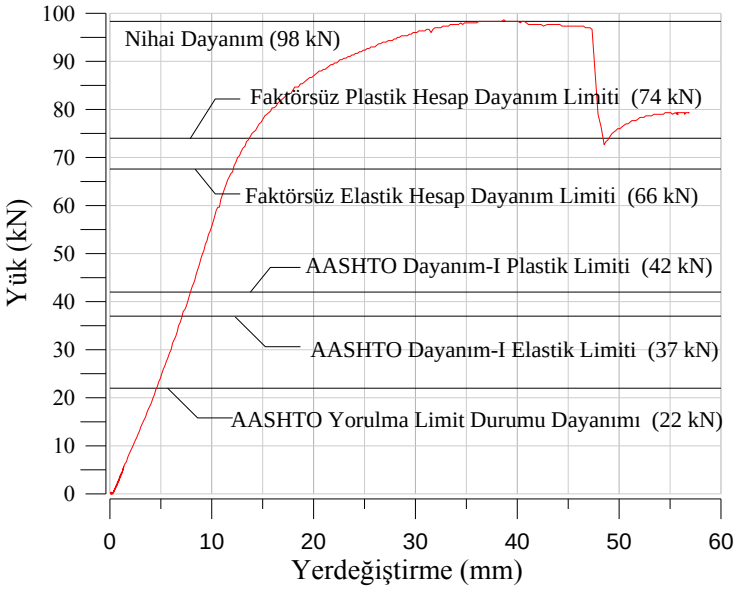


Şekil 5.37 : Fat-04 numunesi yorulma göçmesi hasarı.

5.2.3 Deney sonuçlarının karşılaştırılması

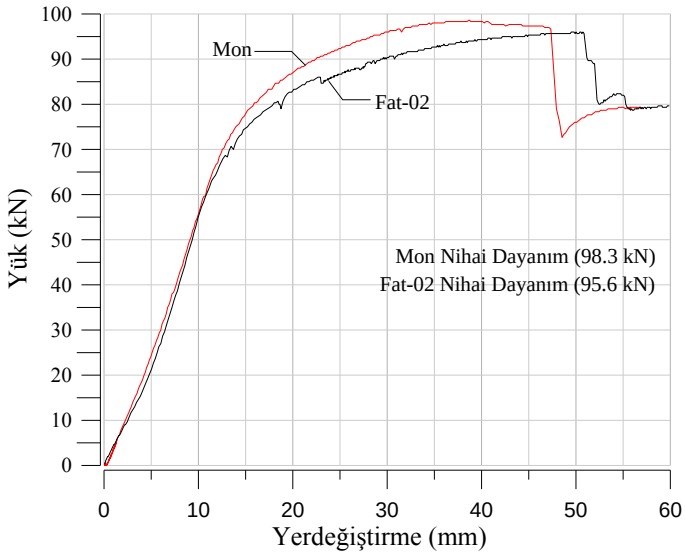
Bu bölümde numunelere ait çeşitli veriler karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Şekil 5.38'de Mon numunesine ait yük-deplasman eğrisi verilerek deneyde bulunan değerler teorik hesap sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Burada faktörsüz elastik hesap limiti, AASHTO LRFD 2007 standardına göre, yük ve dayanım faktörleri kullanılmadan bulunan elastik hesap limit dayanımı; faktörsüz plastik hesap limiti ise aynı standarda göre yine yük ve mukavemet faktörleri kullanılmadan hesaplanan plastik hesap limit dayanımıdır. AASHTO Dayanım-I limitleri ise yük ve mukavemet faktörleri kullanılarak AASHTO LRFD 2007 standardına göre elde edilen limit dayanım değerleridir.



Şekil 5.38 : Mon numunesi yük - yer değiştirme eğrisi.

Şekil 5.39'da Fat-02 numunesinin statik yüklenmesine ait yük - yerdeğiştirme ilişkisi Mon numunesinin statik yüklenmesiyle elde edilen yük - yerdeğiştirme ilişkisiyle karşılaştırılmıştır. Deneyler sonrasında 4,400,000 yüklemenin ardından numunenin nihai dayanımında yaklaşık %3'lük bir azalma olmuştur. Bu sonuç Richard ve diğerlerinin çalışmalarında (1997) 2,000,000 yükleme için elde ettikleri değerle aynıdır.

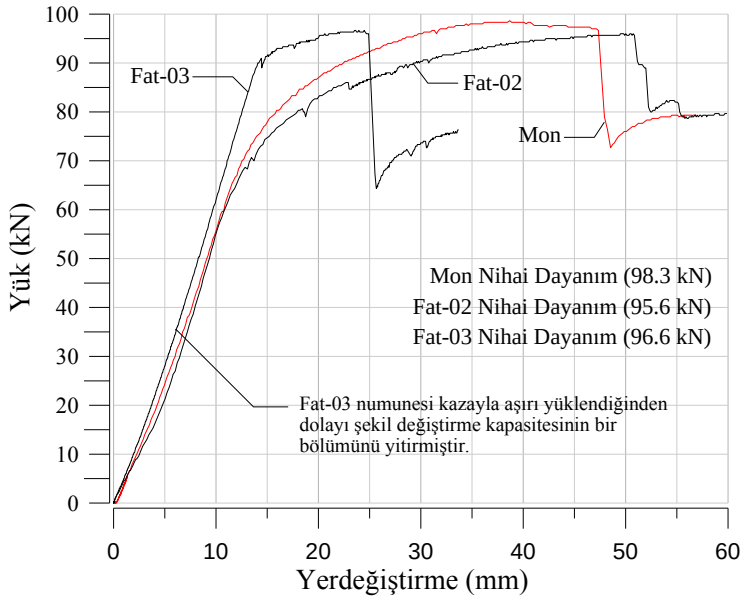


Şekil 5.39 : Mon ve Fat-02 numunelerinin yük - yer değiştirme ilişkileri karşılaştırması.

Şekil 5.40'da aşırı yükleme sonucu alt başlığında akma oluşan Fat-03 numunesinin statik yüklenmesine ait yük - yerdeğiştirme ilişkisi Mon numunesi ve Fat-02 numunesine ait yük - yerdeğiştirme ilişkileriyle karşılaştırılmıştır. Alt başlığında akma oluştuğu ve akmanın ardından 4,200,000 kez daha tekrarlı yüke tabi tutulduğu halde Fat-03 numunesinin nihai dayanımı referans Mon numunesine göre % 2'den daha az değişmiştir. Bu değer Fat-02 numunesine göre ise yaklaşık % 1 olmuştur. Elde edilen bu bilgiler ışığında, yük tekrarı sayısının alt başlığında akma oluşmuş kirişlerin nihai taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemediği söylenebilir. Fakat kesin bir yargıya varabilmek için farklı yük seviyelerinde daha fazla deney verisine ihtiyaç vardır.

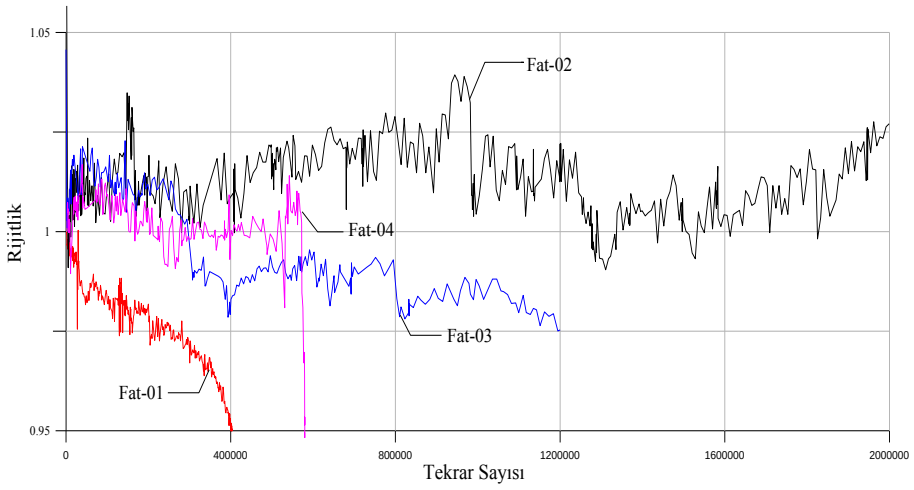
Şekil 5.41'de numunelerin 2,000,000 yük tekrarına kadar olan rijitlik değerleri verilmiştir. Fat-03 numunesine ait veri aşırı yüklemeye kadar olan, hasarsız kirişe ait veridir. Elde edilen bilgilere göre; artan tekrar sayısıyla beraber Fat-01 ve Fat-03 kirişlerinde belirgin bir rijitlik kaybı görülürken, Fat-02 ve Fat-04 numunelerinde rijitlikte ciddi bir değişim meydana gelmemiştir. Fat-01 ve Fat-04 numunelerinin

yorulma göçmesine uğramış olması, rijitlik değişimi eğiliminin yorulma göçmesini önceden haber vermeyeceğini düşündürtmektedir.



Şekil 5.40 : Mon, Fat-02 ve Fat-03 numunelerinin yük - yer değiştirme ilişkileri karşılaştırması.

Yorulma göçmesine uğrayan her iki numunede de (Fat-01 ve Fat-04), ani bir rijitlik kaybıyla beraber yorulma hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 5.41 : Numunelerin deney süreleri boyunca rijitlik değişimleri.

Çizelge 5.2'de deney numunelerine alt başlıkta oluşan gerilme değerine AASHTO LRFD 2007'de karşılık gelen yorulma ömrü ve deneyde bulunan yük tekrarı sayıları verilmiştir. Burada P_y kiriş alt başlığında akma gerilmesi oluşturan yüktür.

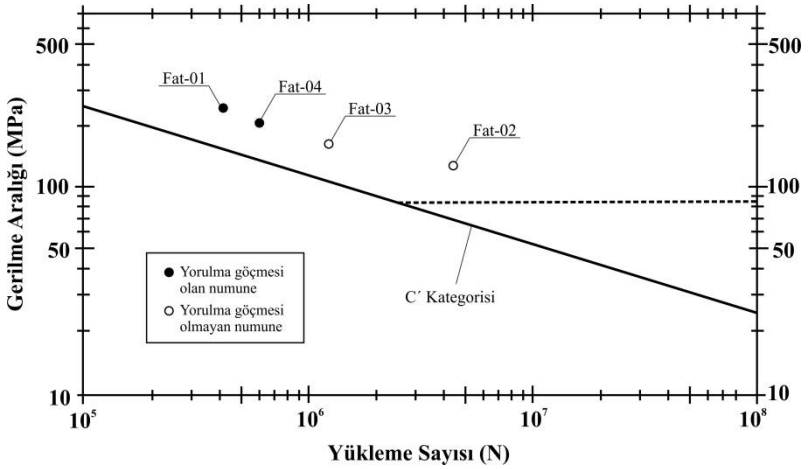
Çizelge 5.2 : AASHTO LRFD ve deneyden elde edilen yük tekrarı sayıları karşılaştırılması.

Uygulanan Maks. Yük, P (kN)	P/P_y	Numune	Δf (MPa)	N_{AASHTO}	N_{deney}	Yorulma Göçmesi
27	0.40	Fat-02	137	562,723	4,400,000	Yok
35	0.50	Fat-03	177	258,366	1,200,000	Yok*
42	0.60	Fat-04	208	160,714	580,000	Var
50	0.70	Fat-01	253	88,615	407,000	Var

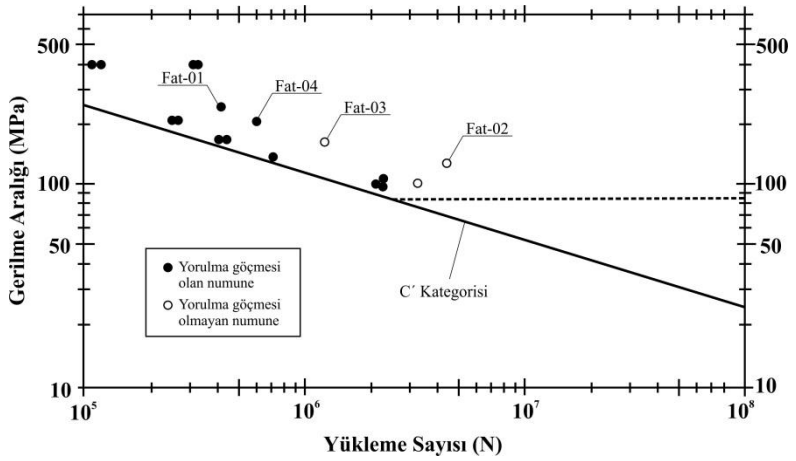
*1,200,000 tekrar sayısında numune yanlışlıkla aşırı yüklenmiştir.

Şekil 5.42'de deney sonuçlarının AASHTO LRFD 2007 S-N eğrisindeki karşılıkları verilmiştir. AASHTO S-N eğrisinin %5 güvenlikle çizildiği de düşünülürse sonuçların AASHTO LRFD 2007 ile uyum sağladığı söylenebilir.

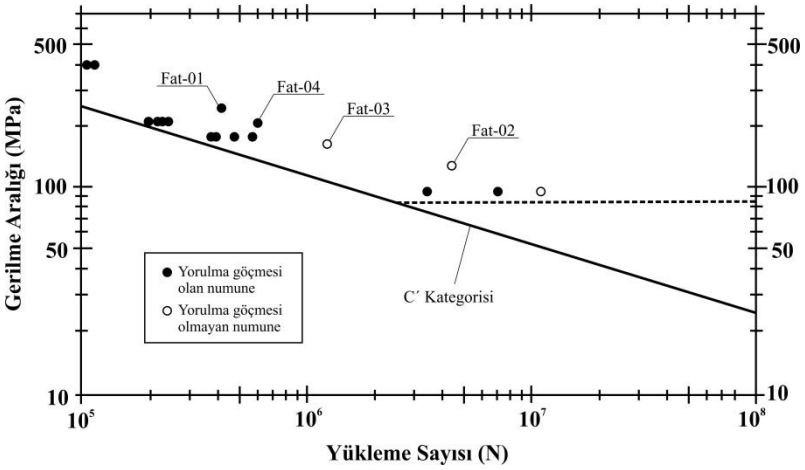
Şekil 5.43'de, deneyden elde edilen verilerin Albrecht ve Friedland'ın çalışmalarında (1979) sabit genlikli yorulma deneylerinden elde ettikleri verilerin bazılarıyla karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 5.44'de ise deneyden elde edilen verilerin Albrecht ve diğerlerinin çalışmalarında (1994) sabit genlikli yorulma deneylerinden elde ettikleri verilerin bazılarıyla karşılaştırılması verilmiştir:



Şekil 5.42 : Deney sonuçları ile AASHTO LRFD 2007 değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.43 : Deney sonuçları ile Albrecht ve Friedland'ın çalışmalarından (1979) elde edilen değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.44 : Deney sonuçları ile Albrecht ve diğerlerinin çalışmaları (1979) ile karşılaştırılması.

Deneylerden elde edilen verilerin AASHTO LRFD 2007 değerleri ve geçişte yapılmış çalışmalarla davranış olarak uyumlu olduğu fakat bu çalışmada elde edilen değerlerin daha olumlu olduğu yani aynı yük tekrarında daha yüksek gerilmelere müsaade edilebildiği görülmüştür. Sonuçlar arasındaki farklılıklara numune boyutlarındaki farklılıkların ve kaynak kalitesinin neden olduğu düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında konuyla ilgili literatür bilgileri ve çalışmaları sunulmuştur. Sonrasında ise çelik-betonarme kompozit kiriş numunesinin AASHTO LRFD 2007 standardına göre tasarımı yapılmış ve numunelerin yorulma davranışı yapılan deneysel çalışma yardımıyla incelenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında bir tanesi monotonik, dört tanesi tekrarlı yükleme olmak üzere toplam beş adet deney yapılmıştır. İlk olarak kirişin statik yükler altında kapasitesi belirlenerek yönetmelik değerleriyle karşılaştırılmış, sonrasında ise diğer numuneler sabit genlikli yükleme altında farklı yük seviyelerinde yorulma testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar görseller, tablolar ve grafikler yardımıyla verilmiştir.

Elastik hesaba göre kirişin yük ve mukavemet faktörleri kullanıldığı durumdaki dayanımı 37 kN, yük ve mukavemet faktörleri kullanılmayan durumda ise 66 kN bulunmuştur. Plastik hesaba göre ise kirişin kapasitesi yük ve mukavemet faktörleri kullanılan ve kullanılmayan durumlar için sırasıyla 42 kN ve 74 kN bulunmuştur. Yorulma limit durumunda ise kirişin 2,545,000 tekrarlık yorulma ömründe limit dayanım için gerekli hareketli yük 22 kN olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde bu değere en yakın yük seviyesi 27 kN'dur. Bu yük seviyesinde 4,400,000 yükleme yapılmış ve kirişte yorulma hasarı görülmemiştir. Statik deney sonucunda kiriş alt başlığının akma limitine ulaşması için gerekli yük seviyesi 70 kN olarak bulunmuştur. Değerler teorik hesapların deneysel hesaplara yakın olduğunu ve yönetmeliğin yük ve mukavemet faktörleri kullanılmadığı halde dahi yaklaşık alt başlıkta akma oluşturan limit yük için %6 güvenlikli değer sağladığını göstermektedir.

Deneylerde maksimum yük değeri alt başlıkta akma oluşturan hareketli yük değerinin yaklaşık %40, %50, %60 ve %70'i oranlarında gerçekleştirilmiştir. Bu değerler kiriş alt başlığında sırasıyla 137 MPa, 208 MPa ve 253 MPa gerilme aralığı oluşturan değerlerdir. Buna göre akma limitinin %40 ve %50'si oranlarındaki yüklemelerde kirişte herhangi bir yorulma hasarı gözlenmemiş ve kirişin sonsuz

yorulma ömrüne sahip olduğu kabul edilmiştir. %60 ve %70 oranlarında ise numune sonlu yorulma bölgesinde kalarak yorulma göçmesine ulaşmıştır. %60 Yük seviyesinde elde edilen yorulma ömrü %70 yük seviyesinde elde edilen yorulma ömründen yaklaşık olarak %42 oranında daha fazladır.

Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri enine berkitmelerde kullanılan köşe kaynaklarının yorulmaya karşı çok hassas olduğunun görülmesidir. Nitekim tüm yorulma göçmeleri bu kısımda meydana gelen çatlakların büyümesiyle vuku bulmuştur.

Numunelerin rijitlik değişiminin, yorulma hasarını haber vermediği, çalışmada elde edilen bir başka sonuçtur. Fakat daha kesin bilgi için daha fazla deney yapılmalıdır.

Yorulma ömürlerine dair deneylerde elde edilen sonuçlar ile önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıkların numune boyut farkına ve kaynak kalitesindeki farklılıklara bağlı olduğu düşünülmektedir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak, araştırma ve uygulama önerileri aşağıda sıralanmıştır:

- Daha yüksek tekrar sayılarında ve farklı yük seviyeleri için yorulma deneyleri yapılmaldır.
- Değişken genlik altında yorulma deneyleri yapılmalıdır.
- Gerçek boyutlara daha yakın boyuttaki ve farklı birleşim detayları bulunduran numuneler ile yorulma deneyleri yapılmalıdır.
- Rijitlik değişiminin yorulma hasarını haber verip vermediği konusunda daha kesin bilgiler elde edebilmek için farklı yük seviyelerinde daha fazla deney yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

AASHTO LRFD, 2007: LRFD Bridge Design Specifications, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington DC.

Albrecht, P. and Friedland, I. M., 1979: Fatigue-Limit Effect On Variable Amplitude Fatigue Of Stiffeners, *Journal of Structural Division*, Vol. **105**, no. 12, pp. 2657–2675.

Albrecht, P. and Rubeiz, C., 1990: Variable-Amplitude Load Fatigue, Task A: Literature Review, Volume III: Variable-Amplitude Fatigue Behavior, *Rep. No. FHwA-RD-87-061*, Federal Highway Administration, McLean, Va.

Albrecht, P. and Wright, W., 2000: Fatigue And Fracture Of Steel Bridges, *European Structural Integrity Society*, Vol. **26**, pp. 211-234.

Albrecht P., Lu, H.Y., Jung, K.S., Lıu, H.J., Cheng, J.G., 1994: Long-Life Variable Amplitude Fatigue Strength Of Welded Steel Bridge Details, *Rep. No. Fhwa-RD-94-108*, Federal Highway Administration, McLean, Va.

ASCE, 1982: Fatigue Reliability: Variable Amplitude Loading. *Journal of the Structural Division.* Vol. **108**, no. ST1, pp. 47-69.

Barsom, J. M. and Rolfe, S. T., 1999: *Fracture and Fatigue Control in Structures:Applications of Fracture Mechanics*, ASTM, Philadelphia, 0-8031-2082-6.

Chen, H., Grondin, G. Y., Driver, R. G., 2005: Fatigue Resistance of High Performance Steel, *Structural Engineering Report No. 258*, University of Alberta.

Chen, W. F. and Duan, L., 2000: *Bridge Engineering Handbook*, CRC Press, Florida, 0-8493-7434-0.

Clarke, S. N., 1997: *Analysis of Fatigue Prone Details on a Continuous Steel Girder Bridge*, Thesis (PhD), The University of Tennessee.

Cottrell, A. H., 1964**:** *Theory of Crystal Dislocations*, Blackie and Son, London, 978-0677001753.

En 10002 3, 2001: Metallic Materials - Tensile Testing, *European Committee for Standardisation*, Brussels.

Fisher, J. W., 1984, Evolution of Fatigue Resistant Steel Bridges, *Transportation Research Record 1594*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Fisher, J. W., 1997, *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*, Wiley Interscience, London, 978-0471804697.

Fisher, J. W., Albrecht P. A., Yen, B. T., Klingerman, D. J., McNamee, B. M., 1974: Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, *NCHRP Report 147*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Fisher, J. W., Frank, K. H., Hirt, M. A., McNamee, B. M., 1970: Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams, *NCHRP Report 102*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Fisher, J. W., Hausammann, H., Sullıvan, M. D., Pense, A. W., 1979: Detection and Repair of Fatigue Damage in Welded Highway Bridges, *NCHRP Report 206*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Fisher, J. W., Kulak, G. L., Smith, I. F. C., 1997: A Fatigue Primer for Structural Engineers, *ATLSS Report No. 97-11*, National Steel Bridge Alliance, AISC.

Fisher, J. W., Mertz, D. R., Zhong, A., 1983, Steel Bridge Members Under Variable Amplitude Long Life Fatigue Loading, *NCHRP Report 267*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Fisher, J. W., Nussbaumer, A., Keating, P. B., Yen, B. T., 1993, Resistance of Welded Details Under Variable Amplitude Long-Life Fatigue Loading, *NCHRP Report 354*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Forsyth, P. J. E., 1969: *The Physical Basis of Metal Fatigue*, Blackie and Son, London, 978-0216890329.

Garbatov, Y., Guedes Soares, C., 2004: Influence of Steel Grade on the Fatigue Reliability of Welded Structural Components, *International Journal of Fatigue*, Vol. **26**, no. 7, pp. 753-762.

Josi, G., 2010: *Reliability-Based Management Of Fatigue Failures*, Thesis (PhD), University of Alberta.

Keating, P. B. and Fisher, J. W., 1986: Evaluation of Fatigue Tests and Design Criteria on Welded Details, *NCHRP Report 286*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

KGM, 2010: Karayolları Bakımı Altındaki Devlet ve İl Yolları Üzerinde Bulunan Köprülerin Yıllara Göre Toplam Sayı ve Uzunlukları. Ziyaret Tarihi: 1 Şubat 2011, Adres: http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/KopruSayiUzunlugu.pdf

Klippstein, K. H. and Schilling,C. G., 1989: Pilot Study on the Constant and Variable Amplitude Behavior of Transverse Stiffener Welds,*Special Issue on Fatigue and Fracture, Journal of ConstructionalSteel Research*, Vol. **12**, no. 3 and 4, pp. 229-252.

Moses, F.and Pavia, A., 1976: Probability Theory for Bridge Fatigue Stresses – Phase II,*Report OHIO-DOT-02-76*, Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University.

NBI, 2009a, Material Type of Structure by State as of 12/2010, U.S. Departmantent of Transportation – Federal Highway Administration.Ziyaret Tarihi: 7 Ocak 2011 Adres: http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi/mat10.cfm

NBI, 2009b, Material Type of Structure by Year Built, U.S. Departmantent of Transportation – Federal Highway Administration. Ziyaret Tarihi: 7 Ocak 2011 Adres: http://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi/yrblt10.cfm

Picard, A. and Beaulieu, D., 1991: Calcul Des Charpentes D'acier. Willowdale Ont. *Institut Canadien de la Construction en acier*. xvi, 862.

Ressler, S. J., 1991: *Fatigue Reliability And Redundancy In Two-Girder Steel Highway Bridges*, Thesis (PhD), Lehigh University.

Richard Yen, J. Y., Lin, Y., Lai, M. T., 1997: Composite Beams Subjected to Static and Fatigue Loads, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, no. 6, pp. 765-771.

Schilling, C. G., Klippstein, K. H., Barsom, J. M., Blake, G. T., 1978: Fatigue of Welded Steel Bridge Members Under Variable Amplitude Loadings, *NCHRP Report 188*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC.

Schijve, J., 2001: *Fatigue of Structures and Materials*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 0-306-48396-3.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O., 2001: *Metal Fatigue in Engineering. Second Edition*. John Wiley & Sons, New York, 978-0471510598.

Wright, W. J., 1993: Long-Life Fatigue Behavior Of Welded Steel-Bridge Girder Details, *Proceedings of ASCE Structures Congress*, California, 19-21 April 1993, 945–950.

Zhao, Y., 2003, *Fatigue Prone Steel Bridge Details: Investigation and Recommended Repairs*, Thesis (PhD), University of Kansas.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Vefa OKUMUŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: Bitlis / 19.02.1985

Lisans Üniversite: İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği