



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAYIFLATILMIŞ VE GÜÇLENDİRİLMİŞ TİPTEKİ ÇELİK KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Elif Tuba HATİPOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalını

Ocak-2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ZAYIFLATILMIŞ VE GÜÇLENDİRİLMİŞ TİPTEKİ ÇELİK KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Elif Tuba HATİPOĞLU

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali KÖKEN

2011, 139 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Fatih ALTUN
Yrd. Doç. Dr. Günnur YAVUZ
Yrd. Doç. Dr. Ali KÖKEN

Bu çalışmada tipik kolon-kiriş birleşiminde, kolon-kiriş birleşim bölgesinde karşılaşılan olumsuzlukların önüne geçmek için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yük altında test edilmiştir. Deney numunelerinin ilki güçlendirilmiş kiriş kesiti şeklinde, ikinci ve üçüncü numuneler ise sıra ile %40 ve %45 oranında zayıflatma yapılmış numunelerdir. Ayrıca sonuçların karşılaştırılması için 1 adet referans numunesi üretilmiştir. Üretilen toplam dört adet deney numunesi S.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Laboratuarında rijit yükleme duvarı kullanılarak, deprem yükünü benzeştiren düşey tersinir-tekrarlanır yük altında test edilmiştir. Deneyler deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiş ve deney sırasında yük ve deplasman ölçümü için yük hücresi ve LVDT 'ler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda, deney numunelerinin davranış özellikleri elde edilmiş ve deney numuneleri için yük geçmişi, yük-deplasman ilişkisi, moment-toplam dönme ilişkisi, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve enerji tüketme kapasitesi ilişkileri elde edilmiştir. Ayrıca deney numunelerinin akma ve göçme durumları için analitik hesaplamalar yapılarak bunlara ait sonuçlar verilmiştir. Son olarak elde edilen deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırması yapılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik çerçeve, çelik kolon-kiriş birleşimi, kolon-kiriş birleşimlerinin deprem davranışı, zayıflatılmış kiriş enkesiti.

ABSTRACT

MS THESIS

WEAKENED AND STRENGTHENED TYPE STEEL COLUMN-BEAM JUNCTİONS TO İNVESTİGATE THE BEHAVİOR UNDER EARTHQUAKE LOADİNG

Elif Tuba HATİPOĞLU

SELCUK UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLİED SCİENCES DEPARTMENT OF CİVİL ENGİNEERİNG

Advisor: Asist. Prof. Dr. Ali KÖKEN

2011, 139 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Fatih ALTUN
Asist. Prof. Dr. Günnur YAVUZ
Asist. Prof. Dr. Ali KÖKEN

In this study, 4 steel beam to column connection specimens were produced to eliminate the problems of typical beam to column connections and cyclic loading were applied to the specimens. The first specimen was a reinforced beam section and the second and the third ones were reduced beam sections which were reduced %40 and %45 respectively. Furthermore, one typical beam to column connection was produced and tested to compare the results. The specimens were tested on the rigid wall in S.Ü. Civil Engineering Department Earthquake laboratory. Columns were supported with pin connection and the beams were loaded cyclically at the end of them. Displacement controlled loading were applied and the load cell and LVDT were used to measure the applied load and the displacement. At the end of the experimental study, Load-Displacement relationship, Moment-Rotation relationship, the strength, rigidity, energy consumption capacities were obtained. Besides, analytical study on the yielding and tensile points of the specimens was calculated. Finally, the results of experimental and analytical solutions were obtained and the results were compared.

Key Words: Steel frame, the combination of steel column-beam, seismic behavior of column-beam combinations, reduced beam section.

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerinden her zaman faydalandığım danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali KÖKEN ‘e teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Ayrıca çalışma boyunca benden her türlü desteğini esirgemeyen Sayın Hocam Arş. Gör. M. Alparslan KÖROĞLU ‘na teşekkürlerimi sunarım. Deneylerin yapıldığı Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem Laboratuarı teknisyeni Yüksel Çiftçi ‘ye teşekkür ederim. Bu çalışmayı destekleyen S.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kurumuna teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca her konuda bana sürekli yardımcı olan Konya İl Özel İdaresi, Su ve Kanal Hizmetleri Müdürü Sayın Seyfullah UĞUZ ‘a teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince daima yanımda olan ve benden her türlü desteğini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime ayrıca teşekkür ederim.

Elif Tuba HATİPOĞLU
KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **ix**

ABSTRACT ..... **x**

ÖNSÖZ ..... **xi**

İÇİNDEKİLER ..... **xii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xiv**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**

3. MATERYAL VE METOT **9**

3.1. Yapı Çeliğinin Mekanik Özellikleri 10
3.2. Plastik Mafsal Kavramı 11
3.3. Süneklik (Düktilite) ve Enerji Yutma Özelliği 14
3.4. 1994 Northridge Depremi 16
3.4.1. Northridge depremi öncesi birleşimler 17
3.4.2. Northridge depremi sonrası yapılanlar 18
3.5. Birleşim Tipleri 21
3.5.1. Kaynaklı birleşim detayı 21
3.5.2. Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim detayı 22
3.5.3. Alın levhalı bulonlu birleşim detayı 23
3.5.4. Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim detayı 24
3.5.5. Alın levhasız bulonlu birleşim detayı 25
3.5.6. Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim detayı 26

4. DENEY NUMUNELERİ, DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM TEKNİĞİ **32**

4.1.Giriş 32
4.2. Deney Numunelerinin Yapımında Kullanılan Çelik Profillerin Geometrik ve Mekanik Özellikleri 32
4.3. Deney Numunelerinin Özellikleri 34
4.4. Deney Düzeneği 34
4.5. Ölçme Tekniği 38
4.5.1. Yük ölçümleri 38
4.5.2. Deneylerde kullanılan ölçüm düzeneği 40
4.6. Çerçeve Deneylerinde Uygulanan Yükleme Programı 41
4.7. Ölçmelerin Değerlendirilmesi 43
4.7.1. Yük geçmişi grafiklerinin çizdirilmesi 42
4.7.2. Yük-deplasman ve moment-toplam dönme grafiklerinin çizdirilmesi 42
4.7.3. Dayanım zarfı grafiklerinin çizdirilmesi 44
4.7.4. Rijitlik azalımı grafiklerinin çizdirilmesi 45
4.7.5. Tüketilen enerji grafiklerinin çizdirilmesi 46

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 48

5.1. Deney Programı 48
__5.1.1. Deney 1 (N1) 48
__5.1.2. Deney 2 (N2) 63
__5.1.3. Deney 3 (N3) 78
__5.1.4. Deney 4 (N4) 97

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 122

7. ANALİTİK ÇALIŞMALAR 127

7.1. Giriş 127
7.2. Deney Numunelerinin Analizi 127
__7.2.1. Akma durumu için analitik hesaplamalar 129
__7.2.2. Plastik durum için analitik hesaplamalar 130

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLME 132

8.1. Giriş 132
8.2. Deneysel ve Analitik Sonuçların Değerlendirilmesi 132
8.3. Sonuç ve Değerlendirmeler 134

KAYNAKLAR 137

ÖZGEÇMİŞ 139

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ_p : Orantılılık sınır gerilmesi
σ_E : Elastiklik sınır gerilmesi
σ_F, σ_Y : Akma gerilmesi
σc , σu : Kopma gerilmesi
εe : Elastik şekil değiştirme
ε_{pl} : Plastik (kalıcı) şekil değiştirme
M_p : Plastik moment
S_X : Kesitin yarısının (x-x) asal eksenine göre statik momenti
μ : Süneklik
E_H : Histerik enerji
E_D : Deprem enerjisi
E_e : Elastik deformasyon enerjisi
E_K : Harcanan plastik enerji
a : Kolon yüzünden zayıflatma yapılan yere olan mesafe
b : Kiriş başlığında yapılan zayıflatma miktarı
c : Kesim derinliği
r : Kesim yarıçapı
b_{bf} : Kiriş başlık genişliği
d_b : Kiriş yüksekliği
b : Başlık genişliği
h : Profil yüksekliği
t : Başlık kalınlığı
s : Gövde kalınlığı
F : Enkesit alanı
G : Ağırlık
I_x : x-x için atalet momenti
I_y : y-y için atalet momenti
Wx : x-x için mukavemet momenti
W_p : Plastik moment
W_y : y-y için mukavemet momenti
i_x : x-x için atalet yarıçapı
i_y : y-y için atalet yarıçapı
ε_y : Akma birim uzaması
ε_u : Kopma birim uzaması
E : Elastisite modülü
n_j : Periyot tekrarı
Φ : Toplam dönme

Kısaltmalar

DBYBHY-2007	: Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik 2007
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
EC 8	: Eurocode 8
ISO	: International Organization for Standardization

1. GİRİŞ

Sistemden yük etkisi kaldırıldığında dayanımda kayda değer bir azalma olmadan elastik ötesi deformasyon yapabilme yeteneğine süneklik denilmektedir. Yapının deprem kuvvetine karşı istenilen dayanımı göstermesi, yapı ve yapıyı oluşturan elemanların sünek ve dayanımının yüksek olması ile sağlanabilmektedir. Bilindiği gibi çelik, çekme kuvveti altında sünek basınç kuvveti altında burkulan bir malzemedir. Çeliğin en önemli iki özelliği, sünekliği ve tekrarlı inelastik yükleme altında enerji yutma kapasitesidir. Birçok yapısal taşıyıcı sistem arasında çelik çerçevenin en fazla süneklik gösterdiği, akademisyenler ve yapı mühendisleri tarafından kabul edilmektedir. Ayrıca sünek bir yapının maruz kalacağı yatay yükün şiddeti, süneklik düzeyi düşük olan bir yapıya göre daha azdır. Çelik malzeme deprem esnasında oluşan elastik olmayan deformasyonların yapıdan kolaylıkla geçmesine yardımcı olmakta ve deprem enerjisinin önemli bir miktarının yapı içerisinde sönümlenmesini sağlamaktadır.

Malzeme olarak çeliğin sünek olması, çelik yapıların da sünek olacağı anlamına gelmemektedir. Bunun yanı sıra, tersinir tekrarlı yükler altında çelik yapıların özellikle birleşim bölgelerinde elastik olmayan deformasyonların oluşmasına engel olmayacak şekilde detaylandırılması ve yapıyı oluşturan elemanların plastikleşmeyi sağlayacak dayanıma sahip olması gereklidir. Böylelikle yapıya gelen deprem enerjisi kolon-kiriş birleşimlerinin panel bölgesinde, kiriş ve kolonlarda plastik dönme kapasitesi kullanılarak yapı içerisinde sönümlenmektedir.

1994 Northridge ve 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) depremlerinden sonra kolon-kiriş birleşim noktalarında beklenmedik kırılmalar meydana gelmiştir (Tezer, 2002). Kiriş başlıklarına uygulanan kaynaklarda veya bunların yakınında meydana gelen gevrek kırılmalar sonucu yük taşıma kapasitesinde önemli kayıplar olmuştur. Böylelikle kolon-kiriş tasarım yöntemleri üzerine geniş çaplı çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Kırılmaya birçok faktörün olumsuz yönde katkıda bulunduğu, yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Bu faktörlerden ikisi (Tezer, 2002);

- Birleşimlerin büyük miktarda süneklik talep etmesi,
- Kaynaklı başlıklarda yüksek gerilim yoğunlaşmasıdır.

Kaynaklı bölgelerde süneklik talebinin azaltılması ve gerilme yoğunlaşma seviyesinin düşürülmesi, sorunu çözmeye yardımcı olacaktır.

Bu önemli iki depremin ardından, çelik çerçevelerin yapımı ve güçlendirilmesi için birçok çözüm önerisi ortaya atılmıştır. Bunlardan biri Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (RBS) biçimidir. Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti, kolon-kiriş birleşimine yakın bölgede plastik mafsal oluşumu için kiriş başlığının bir kısmının kesilmesi ile elde edilmektedir. Kolon-kiriş ara yüzünde kaynak kullanılması sonucu elde edilen süneklik, Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti 'nde elde edilen süneklikten daha azdır. Zayıflatılmış Kiriş Enkesitli kolon-kiriş birleşimlerinin süneklik kapasitesinde belirgin bir düzelme olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür.

Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti 'nde kiriş başlığında yapılan küçük azaltmalar kolon yüzündeki gerilmeyi azaltmaktadır. Fakat kiriş başlığında aşırı azaltma yapılması, bağlantının yanal burkulması ile sonuçlanabilir. Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (RBS) başlık azaltma yeri verimliliği etkilemektedir (Shen ve ark. 2000). FEMA-267 'de Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti 'nin yeri, azaltma oranı gibi tasarım parametreleri verilmektedir.

Konstrüksiyon çerçeveyi güçlendirmek için kirişi zayıflatma fikrinin anlamsız olduğu düşünülebilir. Fakat konuyla ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonuçları bu tip kolon-kiriş birleşimlerinde performansın en üst düzeyde olduğu sonucunu göstermektedir. Çerçeve en iyi yerel performansını kirişin zayıflatılan kısmında göstermektedir. Kiriş başlıklarından kaynaklı ve gövdeden bulonlu numunelerle, tamamen kaynaklı numuneler çok yetersiz bir davranış göstermiştir. Ani gevrek kırılmalar meydana gelmektedir. Başlık levhaları ile takviye edilmiş kolon-kiriş birleşimlerinin çoğu çok iyi inelastik performans göstermiştir. Zayıflatılmış Kiriş Enkesit (RBS) birleşimi çoğu testlerde yeterli sünekliği sergilemiş ve kısa sürede geniş kitlelerce kabul edilmiştir.

Bu çalışmada alın levhalı tipik kolon-kiriş birleşiminde, kolon-kiriş birleşim bölgesinde karşılaşılan olumsuzlukların önüne geçmek için 3 adet deney numunesi üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yük altında test edilmiştir. Deney numunelerinin ilki güçlendirilmiş kiriş kesiti şeklinde, ikinci ve üçüncü numunelere ise sıra ile %40 ve %45 oranında zayıflatma yapılmıştır. Ayrıca sonuçların karşılaştırılması için 1 adet te referans numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen değerler yorumlanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bayülke (1996) 'ye göre, betonarmeye göre daha sünek ve yüksek dayanıma sahip olan çelik yapıların, daha güvenilir yapılar olduğu konusundaki genel düşünce 1994 Northridge depremine kadar sürmüştür. 1994 Northridge depreminden sonra çoğu çelik yapıların kolon-kiriş birleşim yerlerinde kaynak çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, kullanılan birleşim teşkil özellikleri, görülen hasarlar ve çözüm yolları üzerinde durulmaktadır.

Kolon-kiriş birleşim yerleri kiriş başlığının kaynaklı, kiriş gövdesinin de bulonlu ya da perçinli olarak kolon başlığına ya da gövdesine bağlanması biçiminde yapılan birleşim tipi en yaygın olarak kullanılanıdır. Bu tip birleşimde üst taraftaki kolon-kiriş arasındaki kaynak yuvası tam olarak doldurulabilirken, alt taraftaki kolon-kiriş arasındaki kaynak yuvası tam olarak doldurulamamaktadır. Bu da kolon, kiriş ve kaynakta çatlamalara neden olmaktadır. Ayrıca çelik içerisindeki kükürt oranının az olması çeliğin tabakalı yırtılmasını azaltmaktadır. Çeliğin saflığını bozan karbon gibi elementlerin oluşumu, malzeme yüzeyinin pürüzlü olmasına neden olmaktadır. Bu da kristal katmanlar arası kaymanın oluşumunu engellemekte ve dayanımın artmasına, sünekliğin azalmasına neden olmaktadır.

Shen ve ark. (2000), çalışmada zayıflatılmış kiriş enkesitli (RBS) çelik çerçevelerinin tasarım ilkeleri ve deprem performansları incelemiştir. Sekiz adet çerçevenin (3 ve 10 katlı çelik çerçevelere %40 ve %60 oranında zayıflatma yapılan) lineer olmayan statik analizleri yapılmıştır. Çerçevelerin genel ve yerel performansları, plastik deformasyonları, elastik olmayan kayma oranları incelenmiştir.

Kiriş başlığında yapılan bu zayıflatma kolon yüzündeki gerilmeyi azaltmaktadır. Ancak kiriş başlığında aşırı azaltma yapılması bağlantının yanal burkulmasına neden olmaktadır. Başlık azaltma oranı ve yeri elemanın davranışını etkilemektedir. 3 ve 10 katlı çerçeve sisteminde başlıkta %60 oranında yapılan zayıflatma, dayanımın %20 civarında azalmasına neden olmaktadır. Zayıflatılmış kiriş enkesit birleşimli elemanların süneklik kapasitelerinde belirgin bir düzelme olmuştur. Zayıflatılmış kirişin sonlu eleman analizi sonucu ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirmesi, deneylere göre çok küçüktür. Deney sonuçlarına göre başlıkta %40-60 oranı arasında zayıflatma yapılması tavsiye edilmektedir.

Bayülke (2003), çalışmada 1994 Northridge depreminden sonra Moment Taşıyan Çelik Çerçeveli (MTÇÇ) yapılarının, kolon-kiriş birleşim yerleri üzerinde yaptığı etkiyi incelemiştir. 1994 Northridge depremi öncesinde çelik yapılarda kullanılan birleşim yönteminin eksikliklerine ve tekrar hasar oluşmaması için alınması gereken önlemlere değinilmektedir.

Çelik yapıların depreme karşı dayanıklı olabilmesi için özellikle birleşim yerlerinin tasarımı ve yapımına itina gösterilmesi gerekmektedir. Birleşim yerlerinde özellikte kaynakta oluşan hasarı önleyebilmek için yüksek sertlikte kaynak elektrotları kullanılması, kaynak malzemesinin daha yüksek dayanımda olması ve kaynak işçiliği konusunda daha titiz davranılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca kiriş üst başlığında kullanılan bayrak levhasının sökülmeden önce altlarına kaynak yapılması önerilmektedir. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde kirişte oluşan etkinin kaynak ile kolon başlığına, kolon panel bölgesine ve kolon berkitme levhalarına aktarılması ve bunun hesaplanması gerekmektedir.

Tezer (2005), 1994 yılında Kaliforniya eyaletinin Northridge yöresinde meydana gelen ve aletsel büyüklüğü 6.7 olan deprem sonucunda, tipik olarak kullanılan kolon-kiriş birleşimli yapıların özellikle kiriş başlığını kolon başlığına bağlayan kaynak dikişlerinde çatlaklar olduğu gözlenmiştir. Bu hasarları gidermek amacıyla yoğun ve detaylı çalışmalar yapılmış ve bu çalışmada zayıflatılmış kolon-kiriş birleşimleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmada dört farklı oranda dairesel kesim yapılan, 6 ve 10 m açıklıklı kiriş elemanlarının çeşitli parametreleri incelenmiştir. Ayrıca çalışmada sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak numunelerin rijitlik özellikleri incelenmiştir.

Sonuçlar irdelendiğinde, kirişte yapılan bu zayıflatmanın eksenel rijitliğe etkisinin olmadığı, açıklık arttıkça eğilme rijitliğinin %10 ’dan %5 ’lere kadar düştüğü görülmüştür. Ayrıca açıklık arttıkça rijitlik kaybı azalmaktadır. Hasar gören çerçevenin iyileştirilmesi için herhangi bir ek eleman kullanılmadığı için maliyet azalmaktadır. Kirişte yapılan bu zayıflatma oranı %50 ’yi geçmemelidir. Uygulamada bu oran %40 civarındadır. Kiriş başlığında yapılan bu zayıflatma tekniği depreme dayanıklı yapı tasarımında yenilikçi çözümler sağlamaktadır.

Jin ve El-Tawil (2005), bu çalışmada zayıflatılmış kiriş enkesitli çelik çerçevelerin deprem performansını araştırmaktadır. 1994 Northridge depreminden sonra zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşimler ekonomik ve pratiklik yönünden geliştirilmişlerdir. Kapsamlı deneysel çalışmalar ve sayısal benzetimler bu tip birleşimlerin davranışına ışık tutmasına rağmen RBS birleşimli çelik çerçevelerin sistem düzeyinde çalışmaları oldukça sınırlıdır. FEMA-350 'de son olarak yayımlanan tasarım özelliklerini eleştirmek ve RBS çerçeve davranışlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla 4, 8 ve 16 katlı çerçevelerin doğrusal olmayan itme analizleri yapılmıştır. Analizlerde dayanım miktarının düşük çıkmasına rağmen RBS birleşimleri deprem riski yüksek olan bölgelerde iyi performans sergilediği sonucun varılmıştır. Ayrıca tasarıma etkisi olan diğer yapısal davranış sorunları da tartışılmıştır.

Lee ve Kim (2007), çalışmada kiriş derinliği boyunca bulonlu birleşimlerin deneysel ve analitik sonuçlarını incelemektedir. Zayıflatılmış kiriş enkesit birleşimlerin, kiriş başlığının kaynak giriş deliğinde ani gevrek kırılma meydana gelmekte ve elemanın yetersiz performans göstermesine neden olmaktadır. Birleşim bulonla yapıldığında kaynağın birleştiği yerde kırılganlık azalmaktadır. Bulonlu birleşimlerde, kırılmanın tamamı kiriş başlık genişliği boyunca gelişmektedir. Bulonla birleştirilmiş numuneler kaynakla birleştirilmiş numunelere göre daha fazla gerilme değerine sahiptirler. Kaynak ve bulonlu birleşimler çok daha iyi performans sergilemektedirler. Bulonlu Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (RBS) birleşimlerinin depreme karşı performansı daha iyidir. Kırılma olmaksızın numunelerin birleşim yerlerinde dönme oranı %5 'den daha fazladır. Deneysel ve analitik sonuçlara göre Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (RBS) birleşimleri sistem üzerindeki yük geçişini normal kiriş birleşimlerine göre daha iyi yapmaktadırlar.

Lee ve Chung (2007), dairesel kesimli zayıflatılmış kiriş enkesitli (RBS) çelik çerçeve birleşimlerinin elastik kat sapmaları analitik olarak bu çalışmada incelenmiştir. Dairesel kesimli zayıflatılmış kiriş enkesitli (RBS) birleşimler, kiriş kat sapmasına katkıda bulunmakta ve bu yöntemde matematiksel olarak eşlenik metodunu hesaplamak zorlaşmaktadır. Zayıflatılmış kiriş enkesitinde (RBS) karşılaşılan bu problem kiriş genişliği değiştirilerek önlenmektedir. İkisi arasında olan denklik RBS bölgelerinde eşit başlık uzama kriterleri tarafından gerçekleşmektedir. Bu yaklaşım sonlu eleman analizlerinde gereklidir. Kat sapmalarına katkıda bulunan kiriş, panel bölgesi ve kolon elemanları, tipik kolon-kiriş montajında formüle edilmişlerdir. RBS çerçevelerinin kat sapmalarının büyüklüğünü ve rijitlik farkının etkilerini tahmin etmede elde edilen sonuçlar tasarımcılar tarafından kullanılabilmektedir.

Kim ve ark. (2008), çalışma CFT 'li birleşimlerde rijitleştirmenin etkisini incelemektedir. Bu araştırma lineer olmayan sonlu eleman analizini ve rijitleştirici T birleşimlerinin tasarımında gerekli temel verileri kullanarak, rijitleştirici T kolon-kiriş birleşiminde gerilme yayılım mekanizmasını araştırmaktır. Önceki çalışmalarda karşılaşılan sorunları tanımlamak için numuneler sonlu eleman analizi kullanılarak tasarlanmıştır. Farklı rijitleştirici T birleşimleri; analiz modellemesi ile oluşturulan rijitleştirici T birleşimi (TS serisi), 'dogbone' rijitleştirici T birleşimi (TSD serisi), zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşim (RBS kesimi) ve yatay elemanında delik açılmış rijitleştirici T birleşimi (TSH serisi) olarak gruplandırılmıştır. Lineer olmayan sonlu eleman analizleri elde edilen deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. İkinci olarak çalışmada birleşim bölgesinde oluşan gerilme yığılmasını azaltacak çözümler araştırılmıştır.

Çalışmada ana parametreler; delik boyutu, RBS kesim yapısı, yatay ve düşey elemanın dayanım oranı ve yatay elemanın türüdür. Rijitleştirilmiş T birleşimi, gerilme ve şekil değiştirme gibi çeşitli parametreleri daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Bu tasarım fikri birleşimler arasında olan ilişkiyi detaylandırmada tavsiye edilmektedir.

Prinz ve Richards (2009), yapılan çalışma zayıflatılmış gövde bölümleri ile eksen dışı takviyeli çerçeve birleşimleri ile ilgilidir. Kolon bağlantılı eksen dışı takviyeli çerçeve (EBFs) birleşimleri kesme kuvveti ve momentleri iletmek zorundadır. Deneyler kaynaklı kolon-kiriş birleşimlerinde olan başlık bağlantılarının kırılma eğilimde olduklarını göstermiştir. Amerikan Çelik Birleşim Enstitüsü (AISC), deprem etkisi altında kolon-kiriş birleşimlerinde yapılan tasarım problemlerini belirlemiş ve yapılan araştırmaları açıklamıştır. EBFs bağlantısında başlık birleşimlerinde dönme kapasitesini sınırlamak amacıyla yapılan gövdenin bir kısmının çıkarılması kapsamında araştırılan bu pilot çalışmaya AISC destek olmaktadır. Sonlu eleman modelleri ile 19 bağlantı tekrarlı yükleme altında incelenmiştir. Tekrarlı yükleme altında analiz edilen bağlantılar, modelleme tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Birleşimlerde başlıklara delik açılması ile gerilme ve şekil değiştirme değerleri azalmış fakat deliklerin kenarlarında üç eksenli gerilme ve plastik şekil değiştirme değerleri artmıştır. Gövdede zayıflatılmış bölümlerin dönme kapasiteleri ya beklenen şekilde ya da daha az miktarda çıkmıştır. Bu çalışma ile gövdede yapılan zayıflatma çözümü gelecek vadeden bir yöntem olmadığı kanaatine varılmıştır.

Ashrafi ve ark. (2009), zayıflatılmış kiriş enkesitli çelik çerçevelerin tekrarlı yükleme altında performansları bu çalışmada araştırılmıştır. 1994 Northridge depreminin ardından çelik çerçevelerin kolon-kiriş birleşimleri için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan zayıflatılmış kiriş enkesiti (RBS) birleşiminin, kazanılan enerjinin yok edilmesinde etkili ve ekonomik bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapısal sistemlerin davranışında sayısal hesapların ve deneysel sonuçların benzerlik gösterdiği mevcut literatürde görülmektedir. Bu çalışmada normal olarak zayıflatılmış başlıkların aksine RBS birleşimlerinin yeni bir tipi kullanılmaktadır. Bu tip birleşimin özellikle güçlendirme projelerinde yararlı olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma tek bir elemandan daha çok yapısal sistem bakımından önemlidir. 4, 8 ve 16 katlı çelik çerçevenin lineer olmayan analizlerinde, RBS birleşimlerinin optimum enerji yaydıkları, ekonomik ve yapılabilir oldukları sonucuna varılmıştır. Ayrıca RBS birleşimlerinin alt katlarda üst katlardan daha büyük etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Ohsaki ve ark. (2009), tekrarlı yüklemeler altında zayıflatılmış kiriş enkesitinde yapılan şekil iyileştirmesi ile ilgili bir çalışmadır. Çevrimsel deplasman kuvvetine bağlı olan H kirişi, zayıflatılmış kiriş enkesiti için en uygun şekil olduğu sonucuna varılmıştır. Bu kiriş elasto-plastik analizler kullanılarak ABAQUS diye isimlendirilen ticari bir yazılım paketi ile çözülmektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Maksimize edilen fonksiyon, yük geçmişi boyunca harcanan enerji olarak tanımlanmaktadır. Kaynaklı birleşimlerde maksimum eşdeğer plastik şekil değiştirmeler kısıtlanmaktadır. En iyi çözümlere sezgisel bir yaklaşım olan ABAQUS ile ulaşılmaktadır. Başlık şekilleri en uygun hale getirildiğinde, enerji sönümleme kapasitesinin önemli ölçüde iyileştiği gözlenmiştir.

Pachoumis ve ark. (2010), zayıflatılmış kiriş enkesitli (RBS) çelik çerçeve birleşimlerin tekrarlı yüklemeler altında, yüksek süneklik ve performans gösterebilmeleri için bu çalışma geliştirilmiştir. EC 8, Bölüm 3 ’te zayıflatılmış kiriş enkesitli (RBS) birleşimlerinin tasarım parametreleri verilmektedir. Avrupa’da profiller için mevcut olan öneriler sınırlı olduğundan sonuçları şüphe uyandırmaktadır. Deneysel programda zayıflatılmış kiriş enkesiti (RBS) birleşimlerinde önerilen değerler ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Farklı ölçülere sahip iki grup çevrimsel yük altında test edilmiş, elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde zayıflatılmış kiriş enkesitinde (RBS) kullanılan profillerin Avrupa’da uygulanabilmesi için elemanların geometrik özelliklerinin tekrar ayarlanmasına ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

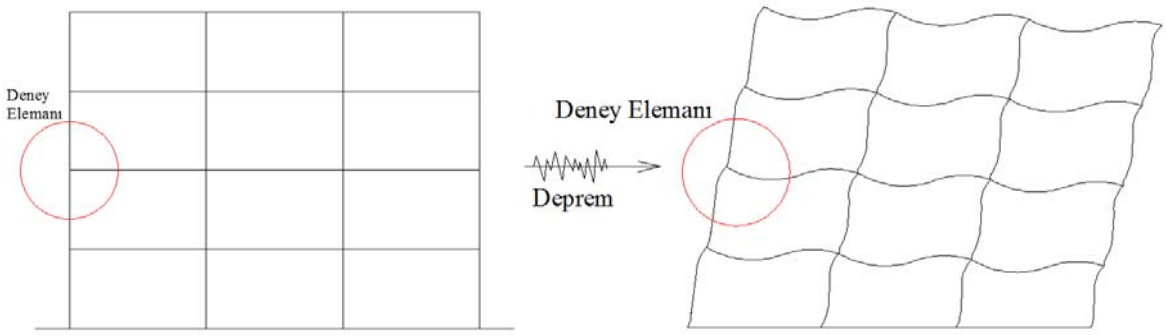
Gross, çalışmada depremsel değişikliklerde kaynaklı çelik çerçeve yapılarının tasarım kuralları üzerinde durulmaktadır. 1994 Northridge depreminde çelik yapıların kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kaynakta hasar olduğu gözlenmiştir. Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST) tarafından kaynaklı çelik çerçeve birleşimlerinde yapılan değişimlerin deprem performansını iyileştirdiği saptanmıştır. Mevcut WSMF binalarının güçlendirilmesi ile ilgili problemler tartışılmış ve çalışma için seçilen alternatif stratejiler açıklanmıştır. Döşemede hafif beton levhasının iki yönlü birleşimlerinin 18 adet tam ölçekli test sonuçları sunulmaktadır. Deneysel sonuçları temel alan tasarım kuralları, Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü (AISC) işbirliği ile yazılmış ve açıklanmıştır.

Okahashi ve ark., çalışmada süreklilik levhaları olmadan zayıflatılmış kiriş enkesiti araştırılmıştır. 1994 Northridge depreminden sonra depreme dayanıklı çerçeve için geliştirilen yeni birleşimlerden biri "dogbone" olarakta bilinen zayıflatılmış kiriş enkesiti (RBS) 'dir. Laboratuar testlerinde iyi performans gösteren RBS birleşimleri bina yapımında kullanılmaktadır.

Resmi Yapı Yönetmeliği (UBC 1994), çelik birleşimlerde süreklilik plakalarının gereksinimi konusunda kuralları kapsamaktadır. 1999 yılında Utah Üniversitesi RBS bağlantılarının etkisini göstermek için süreklilik plakaları kullanmadan, yarı statik çevrimsel testler yapmışlardır. Bu testlerde kirişler W30×132 A572 kalite 50 çelik, güçlü kolon-zayıf kirişlerden ilkinin kolonu W14×280 A572 kalite 50 çelik diğeri W18×132 A572 kalite 50 çelik olarak imal edilmiştir. Kirişler kolona A WS tam penatrasyonlu kaynak ile birleştirilmiştir. Yukarıdaki koşullar altında UBC 'nin gerekli gördüğü süreklilik levhalarına ihtiyaç olmadığı gözlenmiştir. Ek olarak, Amerikan Çelik İmalat Enstitüsü (AISC) bu tür birleşim hesaplarında süreklilik levhalarına gerek duymamaktadır fakat deprem riski yüksek olan bölgelerde süreklilik levhalarının kullanılmasını istemektedir. RBS birleşimleri için yapılan testler, süreklilik levhalarına ihtiyaç olmadığını göstermiştir.

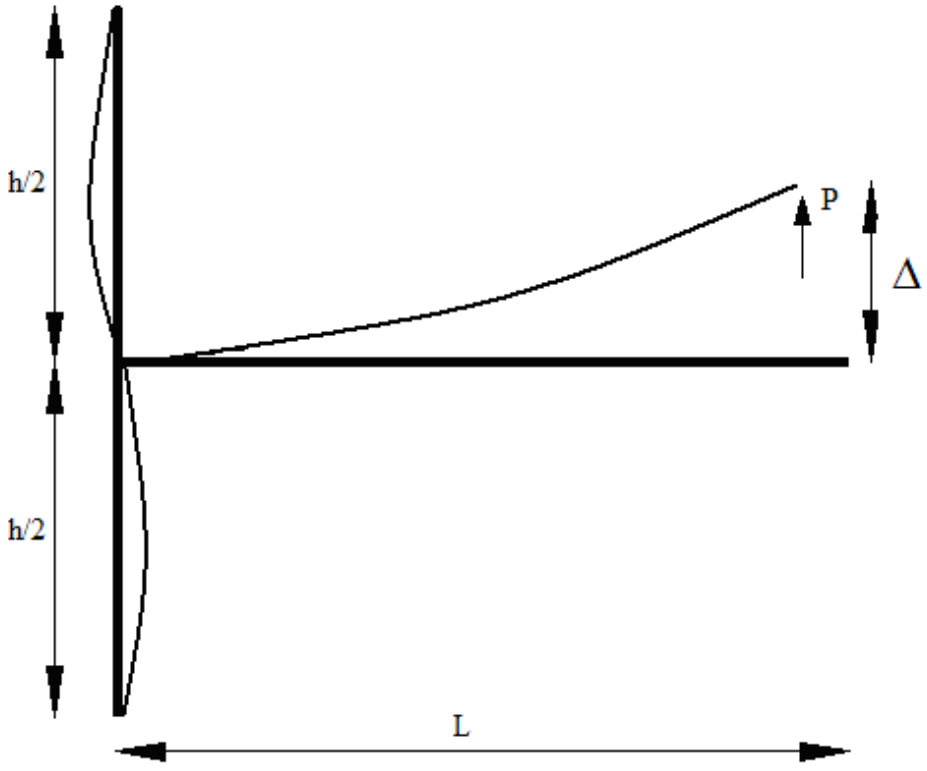
3. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu çalışmada farklı birleşim özelliğinde, 4 adet kolon-kiriş düğüm noktası üretilmiştir. Deney numuneleri yüksek katlı bir çelik yapının kenar düğüm noktasını temsil etmek üzere kat yüksekliği ve kiriş açıklığının orta noktasından izole edilmiş şekilde üretilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Deney numunelerinin tasarım felsefesi

Üretilen kolon-kiriş birleşimleri kolon uçlarından mafsallı olarak mesnetlendikten sonra kiriş ucunda tersinir-tekrarlanır yük tatbik edilmiştir (Şekil 3.2).

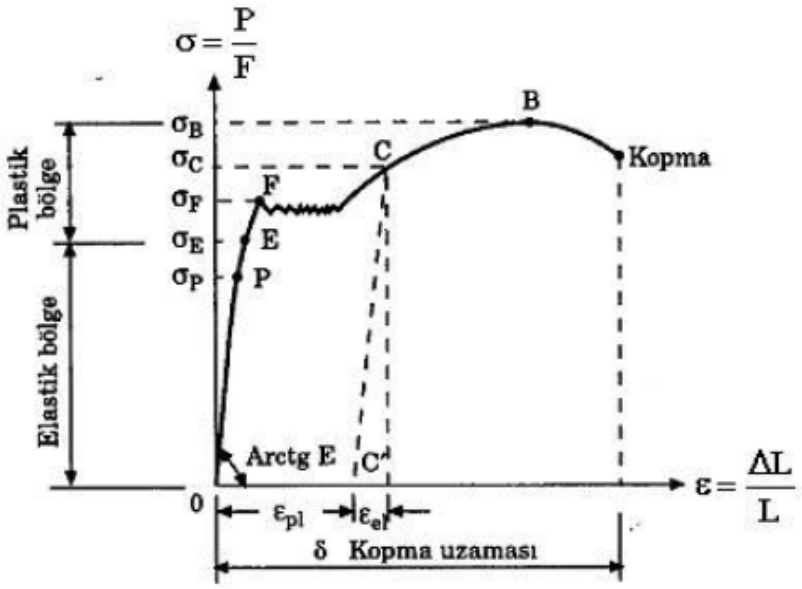


Şekil 3.2. Deney numunelerinin ölçü, mesnet ve yükleme durumu

Çelik sistemde meydana gelen yer değiştirmeler OPKON marka Potansiyometrik Cetveller (LVDT) yardımıyla bulunmuştur. Gerçekleştirilen ölçümler vasıtasıyla deney numunelerinin davranışı, taşıma güçleri, enerji tüketme kapasiteleri vb. sonuçlar elde edilmiştir. Sonrasında elde edilen bu sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Yapı Çeliğinin Mekanik Özellikleri

Çelik, kristal bir bünyeye sahip olan homojen ve izotrop bir malzemedir. Yani fiziksel ve mekanik özellikleri her yer ve doğrultuda aynıdır. Bu özelliği ile mukavemet hesaplarında esas alınan ideal malzeme kabulüne en iyi uyan malzemedir. Çeliğin mekanik özellikleri denince deformasyon ve gerilme ilişkileri aklımıza gelmektedir. Bunun için yapı çeliğini çekme deneyine tabi tutup, her çekme kuvvetine karşılık gelen uzama miktarlarını ölçtüğümüzde Şekil 3.3 'de görülen gerilme-şekil değiştirme eğrisi karşımıza çıkacaktır.



Şekil 3.3. Çekme deneyinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Deren, 2008)

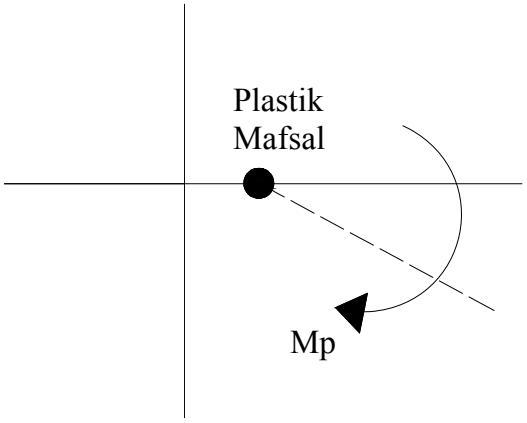
Şekil 3.3 incelenecek olursa, eğrinin başlangıçta belli bir bölgede doğru olarak devam ettiği görülmektedir. Yani deformasyonlarla gerilmeler doğru orantılı olup sabit bir orana eşittir. Hooke Kanunu geçerli olduğu bu bölgeye "orantılılık bölgesi", sınır gerilme değerine de orantılık sınır gerilmesi (σ_p) denir. Orantılılık sınırı içinde gerilmenin herhangi bir değerinde boşalma yapılırsa meydana gelen bütün deformasyonların kaybolduğu görülmektedir. Yükün kalkmasıyla kaybolan deformasyona "elastik deformasyon" denir.

Gerilme değeri orantılılık sınırını (σ_p) aştıktan sonra (σ_E) elastik sınır gerilmesine varıncaya kadar malzeme elastik kalmaktadır fakat Hooke Kanunu geçerli değildir. Orantılık sınırından büyük fakat yakın gerilme değerleri için deformasyonlar elastiktir. Örnek verilecek olursa, daha büyük gerilme değeri (σ_C) 'de boşaltma yapılacak olursa deformasyonların tamamen kaybolmadığı bir kısmının kaldığı görülmektedir. Buna "kalıcı yani plastik deformasyon" denilmektedir.

Elastik bölgede yükleme boşaltmadan sonra deformasyonlar tamamen ortadan kalkmaktadır. Bu bölgedeki gerilmeye "elastik sınır gerilmesi" denilir. Elastik sınır gerilmesinden sonra yük daha da artmaya devam ederse gerilmede bir artış olmadığı halde deformasyonların önemli miktarda arttığı görülmektedir. Bu olaya "akma" denilmekte ve akmanın başladığı gerilme değerine "akma sınır gerilmesi", yükün artış göstermediği bu bölgeye "akma bölgesi" denilmektedir. Akmadan sonra malzeme yeni bir iç denge oluşturur yani pekleşir. Yük artışına devam edildiğinde, gerilme değeri de artmaya devam etmektedir. Maksimum gerilme değerine ulaşıldığında, çekme gerilmesi maksimum değerine ulaşmakta, kopma gerilmesi çekme gerilmesinden küçük olmakta ve daha sonra kopma meydana gelmektedir.

3.2. Plastik Mafsal Kavramı

Deprem enerjisinin yapı bünyesinde yok edilebilmesi için yapının önceden belirlenmiş bazı bölgelerinde hasar oluşması istenir. Kolon-kiriş düğüm noktalarına yakın bu bölgelerde, dış yük etkisiyle oluşan moment, kesme kuvveti, normal kuvvet vb. etkiler sabit kalmakta ya da çok az miktarda artmaktadır. Bu bölgelere plastik mafsal denilmektedir. Şekil 3.4 'de görüldüğü gibi plastik mafsal sabit moment altında dönebilir (M=Mp).



Şekil 3.4. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde plastik mafsal

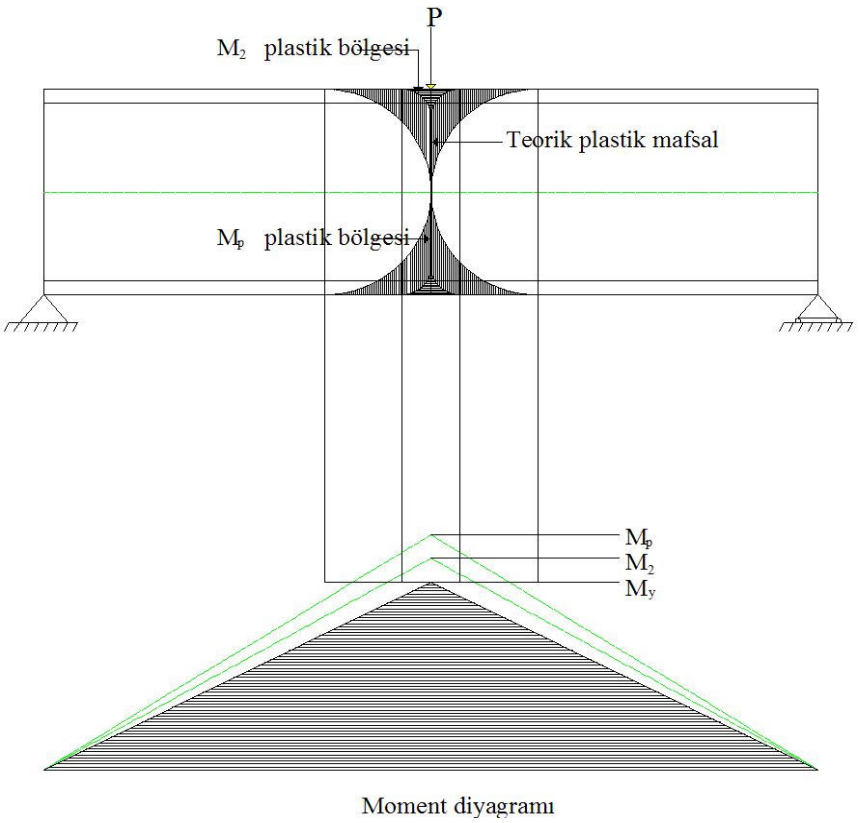
Plastik mafsal olan kesitte büyük deformasyon kapasitesinin olması gerekir. Ortaya çıkan enerjinin çoğu plastik mafsallarda tüketildiği için deprem davranışında plastik mafsal çok önemlidir.

Tüm yapılarda plastik mafsalın öncelikle kirişlerde oluşması istenir. Kiriş uçlarının mafsallaşması ile oluşan yıkılma mekanizması ile kolon uçlarının mafsallaşması ile oluşan yıkılma mekanizması birbirinden çok farklıdır. Kirişlerde mafsallaşma ile yapının labil konuma gelmesi için bütün kiriş uçlarının ve daha sonra zemin kat kolonlarının tabandan mafsallaşması gereklidir. Kirişlerin mafsallaşması ile büyük miktarda deprem enerjisi tüketilmesinin nedeni, bütün kat kirişleri mafsallaşmadan depremin bitme olasılığının daha yüksek olması ve yapının yıkılmamasıdır. Çerçeveli ve boşluklu perde duvarlı yapılarda, kolonların moment taşıma gücü kirişlerden daha büyük olduğundan mafsallaşma kirişlerde olmaktadır.

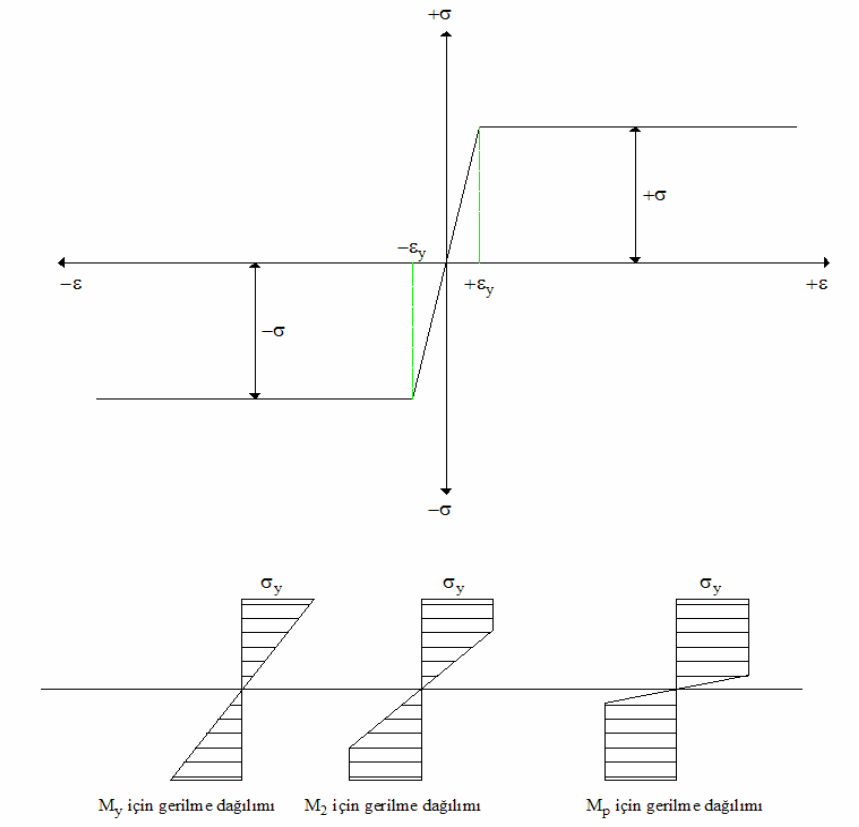
Tüm yapılarda plastik mafsalın en son kolonlarda oluşması istenir. Kolon ve perdelerdeki sınırlı enerji tüketiminin nedeni bu elemanların eksenel yük taşımalarıdır. Eksenel yükü hemen hiç olmayan kirişte yüksek enerji tüketimi elde edilirken, eksenel yükü olan diğer elemanlarda sünek ve enerji tüketen davranış kısıtlıdır. Kolonlarda mafsallaşma ile yapının labil duruma gelmesi için, yalnızca zemin kat kolonlarının alt ve üst uçlarının mafsallaşması yeterlidir. Kolonların kirişlerden daha güçsüz olması deprem bitmeden yapıyı yıkıma götürmekte ve daha az enerji tüketilmesine neden olmaktadır.

Kısaca kolon mafsallaşması yapıyı hemen yıkıma götürmektedir. Perdeli bir sistemde ise önce perdeleri bağlayan bağ kirişlerinin uçlarında sonra perdenin zemin kat alt ucunda mafsallaşma gereklidir.

Çelik yapılarda plastik mafsal kavramını daha iyi anlayabilmek için Şekil 3.5 ’de görülen basit kirişi açıklık ortasından P tekil yükü ile yükleyelim. Ayrıca Şekil 3.6 ’da görülen gerilme-deformasyon ilişkisi olarak elastik ve plastik tasarımda kullanılan idealleştirilmiş gerilme-deformasyon ilişkisi göz önüne alınmalıdır.



Şekil 3.5. Plastik mafsal oluşumu (Deren, 2008)



Şekil 3.6. Gerilme-deformasyon ilişkisi (Deren, 2008)

P yükünün belirli bir değerinde, kirişin en dış liflerinin akma sınır gerilmesine (σ_y) ulaştığını düşünelim. P 'nin değeri daha da artırılırsa, bu sefer kesitin en dış liflerine ek olarak tarafsız eksene doğru daha başka lifleri de (σ_y) akma sınır gerilmesine ulaşır. σ_y akma gerilmesi sınırına ulaşan liflerin göz önüne alınan gerilme-deformasyon ilişkisi uyarınca, yükün artırılmasıyla gerilme σ_y 'nin üstüne çıkamaz. Buna karşılık deformasyonlar çok büyük değerlere ulaşabilir. Kirişte oluşan gerilme dağılımı adım adım grafikte gösterilmiştir. M_2 ve Mp momenti gerçekte kiriş üzerinde yayılı durumdadır. Mp momentine gelen plastikleşmenin, bu noktada yer alan kiriş kesitinde meydana geldiği kabul edilir. Maksimum momentin oluştuğu noktada bütün kesitin plastikleştiği hale karşı gelen Mp momentini oluşturan P yükü değeri tekrar arttırılmaya çalışılırsa, Mp momentinin oluştuğu nokta, bu yük artırımı için gerçek bir plastik mafsal davranışı gösterir. P noktasında oluşan plastikleşme aşağıdaki gibi bulunur.

$$M_p = W_{px} \, x \, \sigma_y \tag{3.1}$$

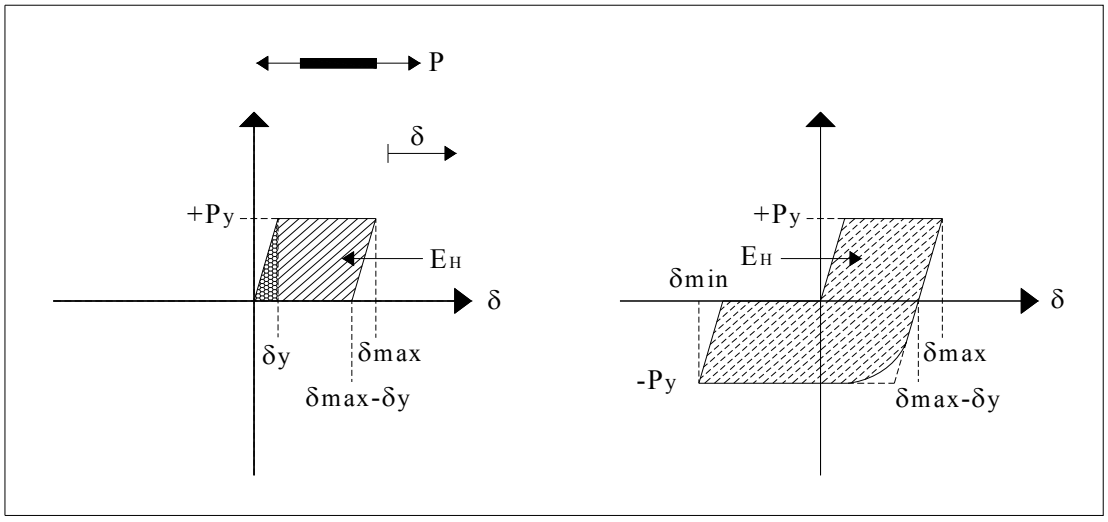
$$W_{px} = 2 \, x \, S_x \tag{3.2}$$

3.3. Süneklik (Düktilite) ve Enerji Yutma Özelliği

Dayanımda kayda değer bir azalma olmadan elastik ötesi şekil değiştirmeler yapabilme yeteneğine süneklik denilmektedir. Yüksek şiddetli deprem altında dayanım, önceden belirlenen noktalarda aşılabilir ve bunun sonucu olarak önceden belirlenen bu bölgelerde plastik mafsallar oluşabilir. Bu plastik mafsallar içinde yoğun, elastik ötesi şekil değiştirmeler oluşmaktadır. Bu davranışın sonucunda rijitlik azalır, periyot büyür, sismik kuvvetler azalır ve deprem enerjisi tüketilir. Depremin yapıya yüklediği enerji yapı içerisinde sönümlenmelidir. Bu enerji tüketimi yapının belirli bölgelerinde sünek davranış gösteren hasara izin verilerek sağlanır. Ayrıca süneklik, büyük şekil değiştirmeler olmasına rağmen yapının yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde kaybolmaması olup, enerji tüketme kapasitesinin bir ölçüsüdür.

Depreme dayanıklı ve depreme karşı güvenli bir yapı sünek olmalıdır. Ancak sünek bir yapı, yapıyı oluşturan malzemelerin sünek olmasıyla sağlanır. Beton gevrek bir malzemedir. Donatı çeliği çekme kuvveti altında sünek, basınç kuvveti altında burkulan bir malzemedir. Betonu oluşturan bu malzemelerin sünek olması için belirli kurallar kapsamında imal edilmeleri gereklidir. Yani beton ve donatı çeliğinden oluşan malzeme sünek olmalıdır. Çeliğin en önemli iki özelliği, sünekliği ve tekrarlı yükleme altında enerji yutma kapasitesidir. Çeliğin deprem enerjisinin büyük miktarını elastik olmayan davranışla sönümlemesi çok önemli bir özelliğidir.

Elastik olmayan bölgede kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alan plastik deformasyon için gerekli olan enerjiyi hesaplamamızı sağlamaktadır. Bir çelik elemanın plastik uzaması veya kısalması için ihtiyaç duyulan enerji, plastik kuvvet ile plastik deformasyonun çarpımı olarak hesaplanır ve histerik enerji olarak adlandırılır. Kinetik ve elastik deformasyon enerjisinin tersine, histerik enerji geriye dönüşü olmayan, sarf edilmiş enerjidir.



Şekil 3.7. Yük-deformasyon eğrisi (Deren, 2008)

Şekil 3.7 'den anlaşılacağı gibi çelik eleman periyodik olarak yüklenmekte ve yük etkisi ortadan kaldırılmaktadır. Bu artan ve daha sonra boşalan yüklemede, E_H olarak gösterilen histerik enerji;

$$E_H=P_y \times(\delta_{max}-\delta_y) \quad (3.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Süneklik oranı ise;

$$\mu = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır.

Taşıyıcı sisteme etkiyen deprem yükü, sisteme bir dış enerji uygulamaktadır. Bu deprem enerjisi sistemde harcanan plastik enerji, depolanan deformasyon ve kinetik enerjinin toplamı ile bulunmaktadır.

$$E_D=E_H+E_e+E_K \quad (3.5)$$

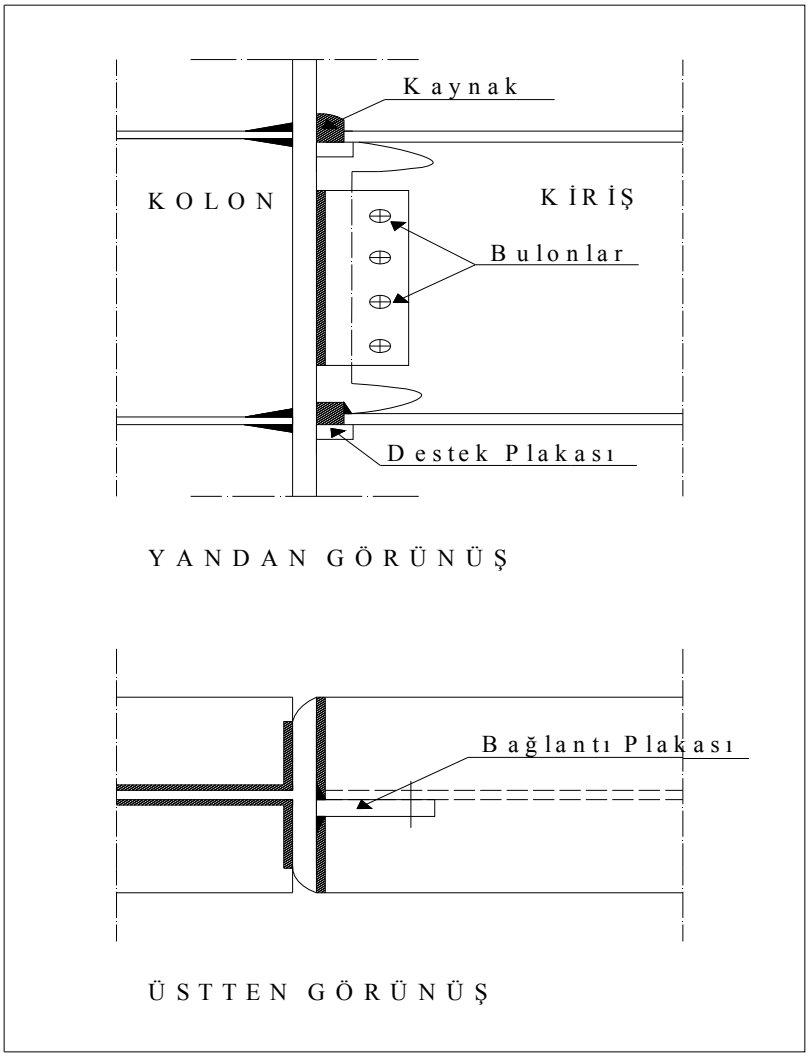
Yüksek enerji yutma kapasitesi sayesinde çelik; deprem anında çelik yapıların kinetik ve elastik enerji birikimini azaltmakta ve bu şekilde yapının deprem anında dinamik etkiler karşısındaki kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir. Yani yapıların dayanıklılığı artmaktadır. Davranışın bu türünü güvence altına almak için dikkatli detaylandırma yapmak gereklidir.

3.4. 1994 Northridge Depremi

1994 yılının Ocak ayında, Güney Kaliforniya eyaletinin Northridge yöresinde sabah 4.30 'da aletsel büyüklüğü 6.7 olan büyük bir deprem meydana geldi. Depremde 57 kişi hayatını kaybetmiş, 9000 'den fazla insan yaralanmış ve 20000 kişi evsiz kalmıştır. Orta büyüklükte bir deprem olması ve sabahın erken saatlerinde olmasından dolayı can kaybının çok olmaması büyük bir şanstır. Depremin ilk 10-20 sn arasında binalar göçmüş, otobanlar, yollar, köprüler yıkılmış ve gaz hatları parçalanmıştır.

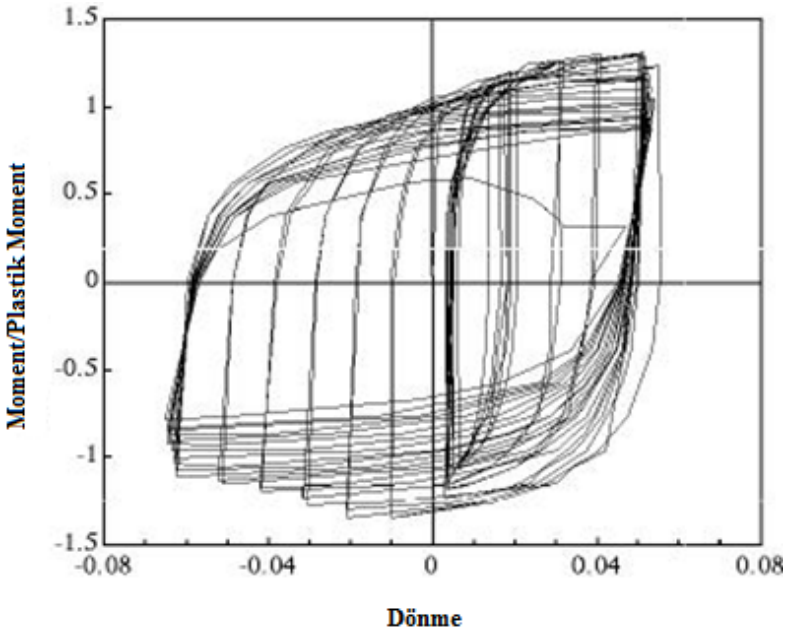
3.4.1. Northridge depremi öncesi birleşimler

Northridge depremine kadar çelik yapıların betonarmeye göre şiddetli depremlerde fazla zorlanmayacağı kabul edilmekteydi. Bu düşünce deprem sonrasında sorgulanmaya başlanmıştır. Northridge depreminden önce Şekil 3.8 'de görüldüğü gibi kolon-kiriş birleşim yeri kiriş başlığının kaynaklı, kiriş gövdesinin de kolonun gövdesine ya da başlığına tam nüfuziyetli kaynakla bağlanmış bir levhaya bulonlu olarak bağlanması biçiminde yapılmaktadır. Bu tip birleşim detayı ABD 'de deprem öncesinde çok yaygın olarak kullanılmıştır. Ayrıca kirişin alt ve üst başlığına destek vermesi amacıyla destek (bayrak) levhaları konulmaktadır.



Şekil 3.8. 1994 Northridge depremi öncesi kolon-kiriş birleşim detayı (Tezer, 2005)

Northridge depremine kadar bu birleşim tipi depreme karşı oldukça dayanıklı olduğu birleşimin Şekil 3.9 'da görülen moment-dönme histeresis eğrisinden anlaşılmaktadır.



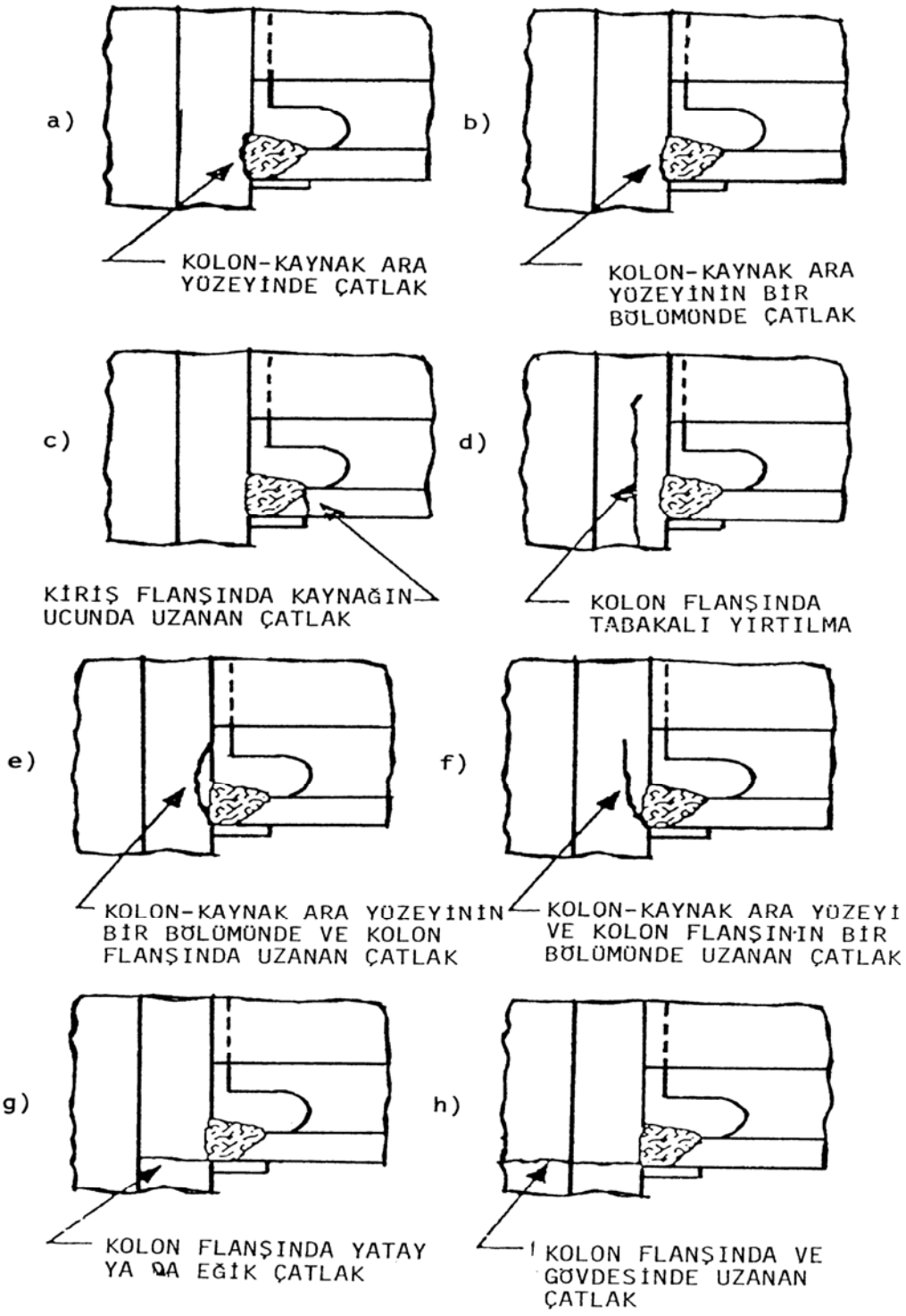
Şekil 3.9. Tipik kolon-kiriş birleşim detayının moment-dönme davranış eğrisi (Tezer, 2002)

Deprem sonrasında yapılan çalışmalarda anlaşılmıştır ki, çelik taşıyıcı elemanların yangından koruyucu yalıtım malzemeleri ile örtülü olması, daha önceki depremlerde yapıda hasar meydana gelmişse bile gözlenememesine neden olmuştur. Bu malzeme şekil değiştirmelerin dışarıdan fark edilmemesine neden olmaktadır. Yapıları inceleyen mühendisler yalıtım malzemesinde meydana gelen deformasyondan kuşkulanarak, kolon-kiriş birleşim noktasında kaynakta meydana gelen çatlakla karşılaşmışlardır. İncelemelerine devam eden mühendisler aynı yapı üzerindeki tüm kolon-kiriş birleşim yerlerinde çatlaklarla karşılaşmışlardır. 120 'den fazla çelik yapıda aynı sorunun belirlenmesi üzerine sorunun çok ciddi boyutta olduğu anlaşılmıştır. ABD hasarın nedenini araştırmak ve önlemek için yoğun çalışmalar yapmıştır.

3.4.2. Northridge depremi sonrası yapılanlar

Çalışmalar sonucunda çelik yapılarda meydana gelen hasarın betonarme yapılara göre farklılık gösterdiği ortaya çıkmıştır. Betonarme yapılarda deprem etkisiyle meydana gelen hasar öncelikle taşıyıcı olmayan dolgu duvar ve sıvada gözlenirken, çelik yapılarda taşıyıcı olan elemanlarda gözlenmiştir. Yani çelik yapılarda taşıyıcı olmayan elemanlarda hasar olmamaktadır.

Bu davranış taşıyıcı olmayan elemanların daha esnek olduğunu ya da çelik taşıyıcı sistemin ötelenmesi ile daha uyumlu olduğu ile açıklanabilir. Yapılan deneyler sonucunda kırılma kiriş alt başlığı ile kaynak arasında meydana geldiği Şekil 3.10 'da görülmektedir.



Şekil 3.10. 1994 Northridge depremi sonrası kolon-kiriş birleşim yerlerinde gözlenmiş hasarlar (Bayülke, 1996)

Çatlamanın kiriş alt başlığında meydana gelmesinin nedeni olarak, üst başlıktaki kaynak yuvası tam olarak doldurulabilirken, destek plakaları alt başlıktaki kaynak yuvasının tam olarak doldurulmasına engel olmaktadır. Deprem sonrası alt başlıktaki destek plakaları söküldükten sonra oluşan hasarlar tespit edilmiştir. Meydana gelen hasar, Şekil (3.10 a ve b) ‘de kaynağın tam ya da kısmen kolon veya kirişten ayrılması şeklinde, Şekil (3.10 c, d, e ve f) ‘de kolon başlığında çeliğin tabakalı olarak çatlaması şeklinde, Şekil (3.10 g ve h) ’da ise kolon başlık veya gövdesinde çatlama meydana gelmesi şeklindedir.

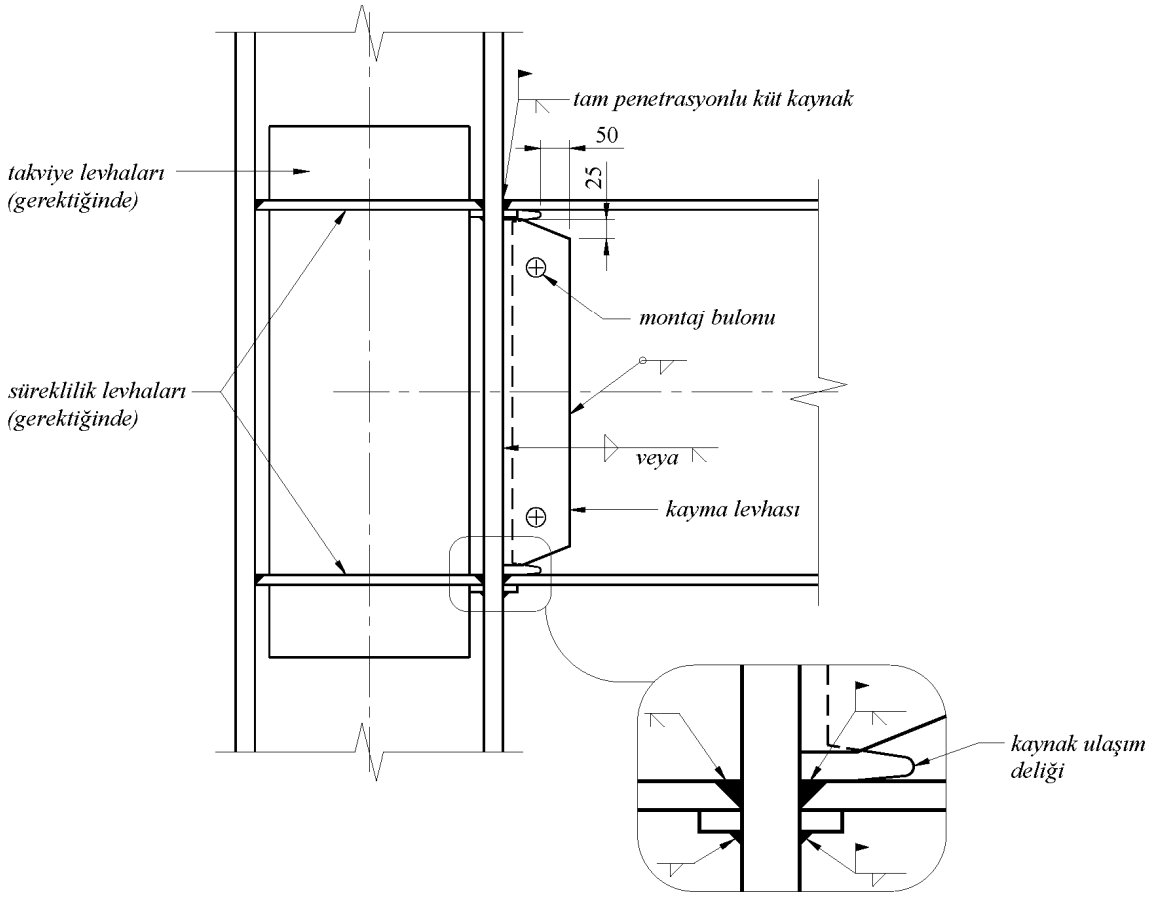
Northridge depreminde yerinde yapılan inceleme sonucu, kolon-kiriş ek yerlerinde plastik dönmenin %2-3 düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Fakat yapılan deneyler kiriş dönmesinin maksimum %0,9 olabileceğini göstermiş, bu da bize kolon-kiriş birleşim noktalarında yeni çözümlere gidilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

3.5. Birleşim Tipleri

Northridge depremi sonrasında yapılan çalışmalar sonucunda, çelik yapıların daha güvenilir olması için birçok çözüm önerisi sunulmuştur. Bu bölümde süneklik düzeyi yüksek çerçeve sistemlerinin birleşim yöntemleri için ortaya atılmış kaynaklı ve bulonlu birleşimlere kısaca değinilecektir.

3.5.1. Kaynaklı birleşim detayı

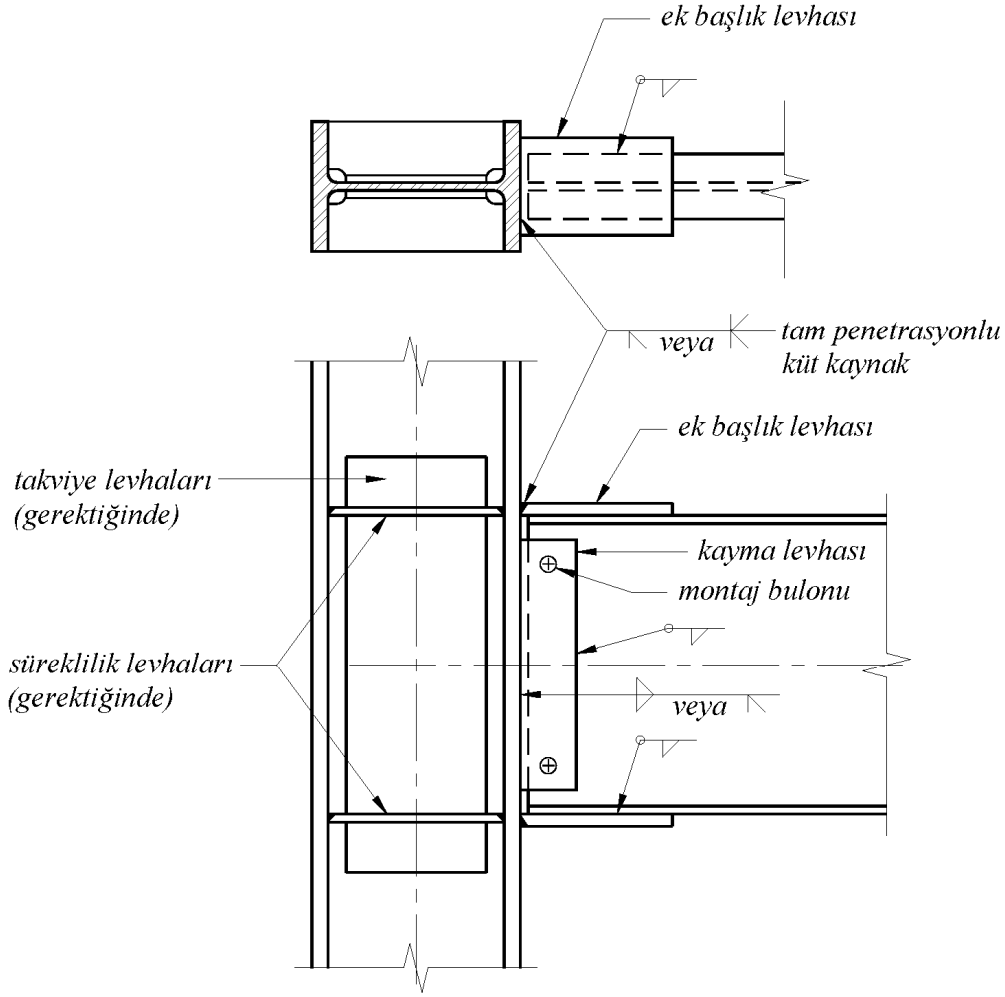
Kaynaklı birleşim detayı Şekil 3.11 'de verilmiştir. Detayda, kiriş başlık levhalarının kolona birleşimi tam penatrasyonlu küt kaynak ile sağlanmaktadır. Kiriş gövde levhası ise, kayma levhası kullanılarak, küt kaynak veya köşe kaynağı ile kolona bağlanmaktadır. Detayda gösterildiği gibi, kiriş başlıklarındaki küt kaynaklar için kaynak ulaşım deliklerine gerek olmaktadır (DBYBHY-2007).



Şekil 3.11. Kaynaklı birleşim detayı (DBYBHY-2007)

3.5.2. Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim detayı

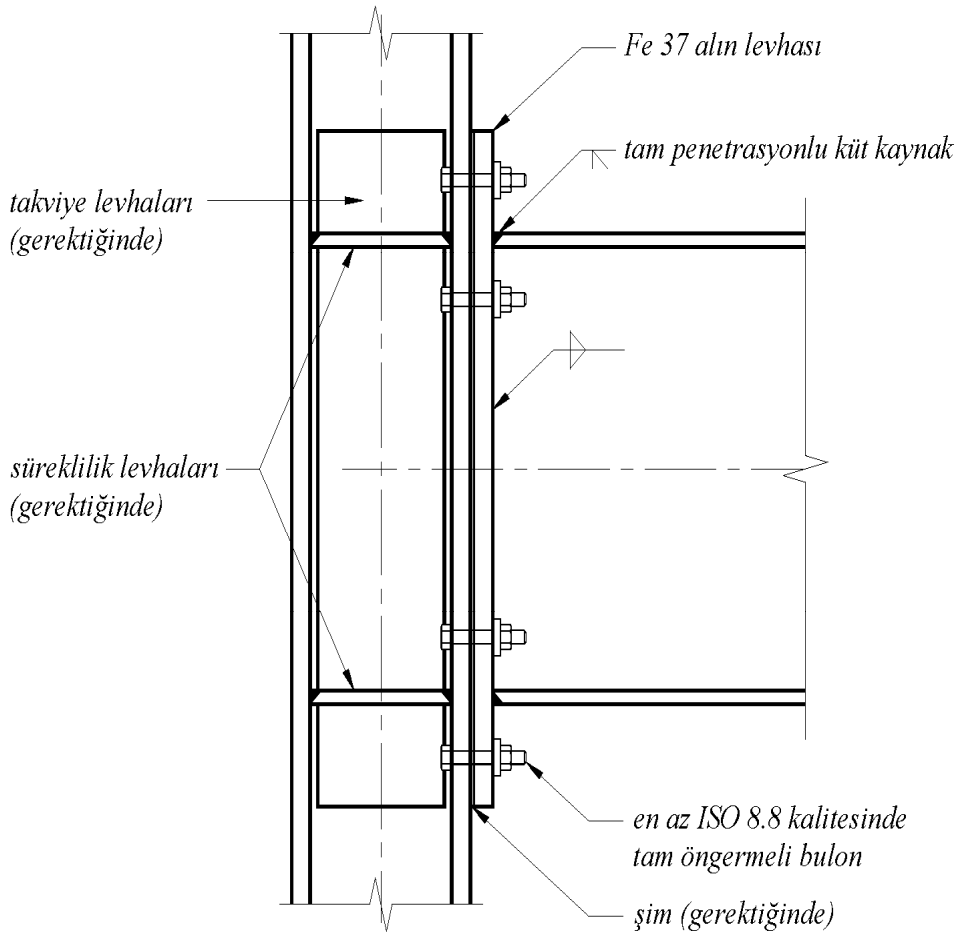
Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim detayı Şekil 3.12 ’de verilmiştir. Detayda, ek başlık levhasının kolona birleşimi tam penetrasyonlu küt kaynak ile kiriş başlığına birleşimi çevresel köşe kaynağı ile sağlanmaktadır. Ek başlık levhasının hadde doğrultusu, kiriş boyuna ekseninin doğrultusunda olacaktır. Kiriş gövde levhası ise, kayma levhası kullanarak, küt kaynak veya köşe kaynağı ile kolona bağlanmaktadır. Bu detayda kaynak ulaşım deliğine gerek olmamaktadır (DBYBHY-2007).



Şekil 3.12. Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim detayı (DBYBHY-2007)

3.5.3. Alın levhalı bulonlu birleşim detayı

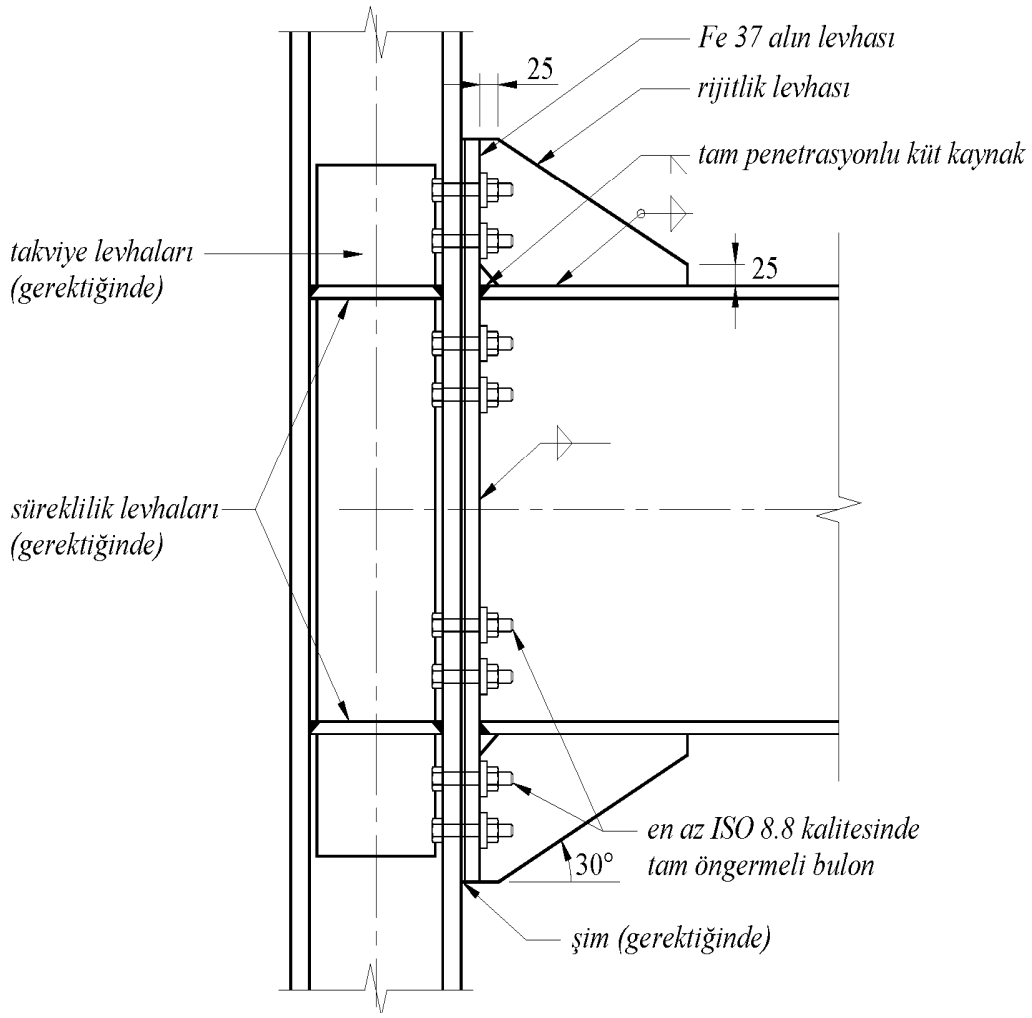
Alın levhalı, bulonlu kiriş-kolon birleşim detayı Şekil 3.13 ’de verilmiştir. Detayda, Fe 37 çeliğinden yapılan alın levhası kirişin başlık levhalarına tam penetrasyonlu küt kaynak ile gövde levhasına ise çift taraflı köşe kaynağı ile birleştirilmektedir. Alın levhasının kolona bağlantısı için, en az ISO 8.8 kalitesinde tam öngermeli bulonlar kullanılacaktır (DBYBHY-2007).



Şekil 3.13. Alın levhalı bulonlu birleşim detayı (DBYBHY-2007)

3.5.4. Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim detayı

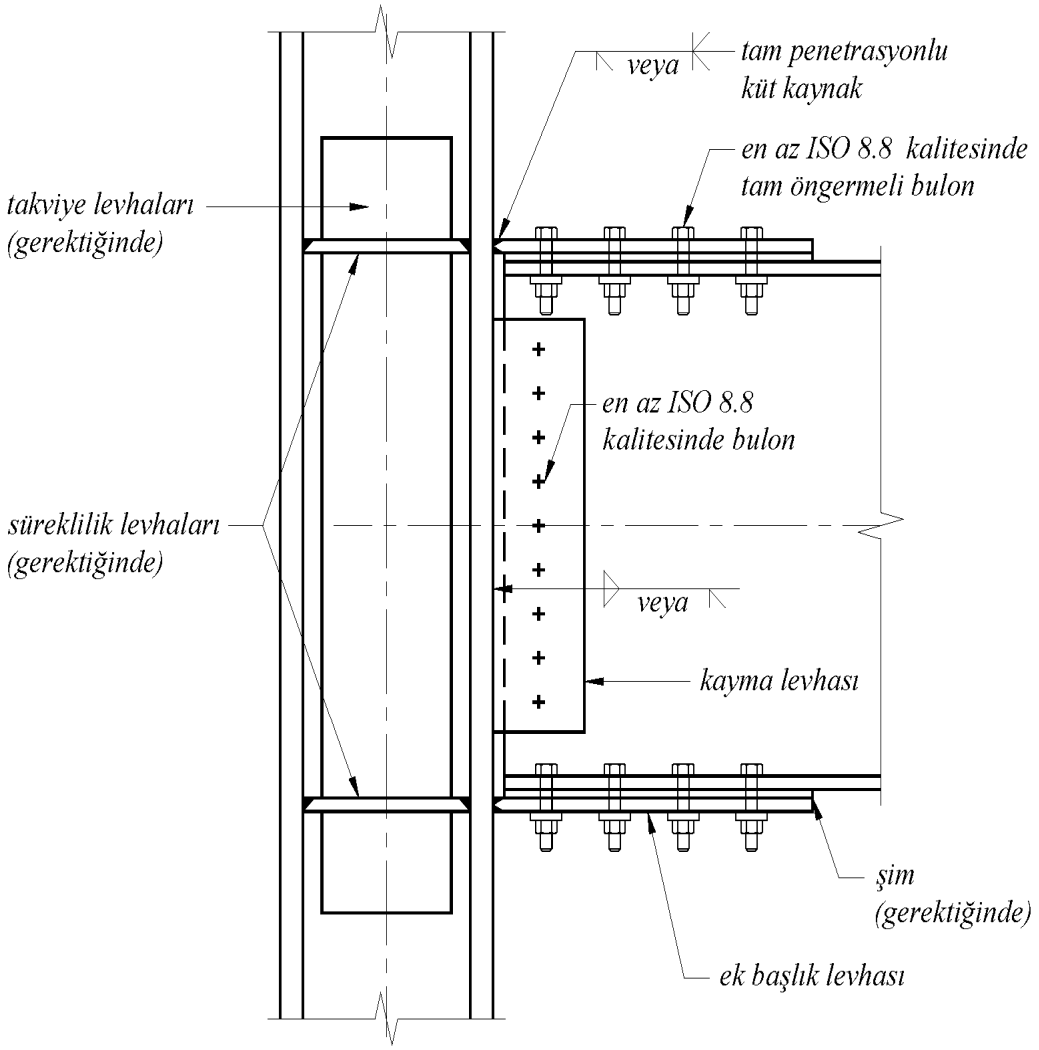
Rijitlik levhaları ile takviye edilmiş alın levhalı, bulonlu kiriş-kolon birleşim detayı Şekil 3.14 ’de verilmiştir. Detayda, Fe 37 çeliğinden yapılan alın levhası kirişin başlık levhalarına küt kaynak ile gövde levhasına ve rijitlik levhalarına ise çift taraflı köşe kaynağı ile birleştirilmektedir. Alın levhasının kolona bağlantısı için, en az ISO 8.8 kalitesinde tam öngermeli bulonlar kullanılacaktır (DBYBHY-2007).



Şekil 3.14. Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim detayı (DBYBHY-2007)

3.5.5. Alın levhasız bulonlu birleşim detayı

Alın levhasız, bulonlu kiriş-kolon birleşim detayı Şekil 3.15 ’de verilmiştir. Detayda, kirişin kolona bağlantısı ek başlık levhaları ve gövdedeki kayma levhası ile sağlanmaktadır. Ek başlık levhaları kolona tam penetrasyonlu küt kaynak ile kayma levhası ise küt kaynak veya köşe kaynağı ile birleştirilmiştir. Kiriş başlık ve gövde levhalarının ek başlık levhasına ve kayma levhasına bağlantısı için en az ISO 8.8 kalitesinde bulonlar kullanılacaktır. Ek başlık levhasının hadde doğrultusu, kiriş boyuna ekseninin doğrultusunda olacaktır (DBYBHY-2007).



Şekil 3.15. Alın levhasız bulonlu birleşim detayı (DBYBHY-2007)

3.5.6. Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim detayı

Mühendisliğin başlıca sorumlulukları arasında yapıların performanslarını sürekli denetlemek ve uygun tasarım metotları bulunmaktadır. Yapı dinamiği ve malzeme davranışlarının iyi anlaşılması için yapıda oluşabilecek hasarların istenilen şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Northridge depremine kadar kullanılan tipik birleşim detayının (Şekil 3.8) güvenilirliği depremden sonra oluşan hasarlardan dolayı sorgulanmaya başlanmış, bu birleşim tipinin yeterince güvenilir olmadığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. Tipik birleşimde hasarların oluşumuna katkıda bulunan birçok unsurun olduğu yapılan araştırmalarda ortaya çıkmıştır. Kısaca bunlara değinecek olursak;

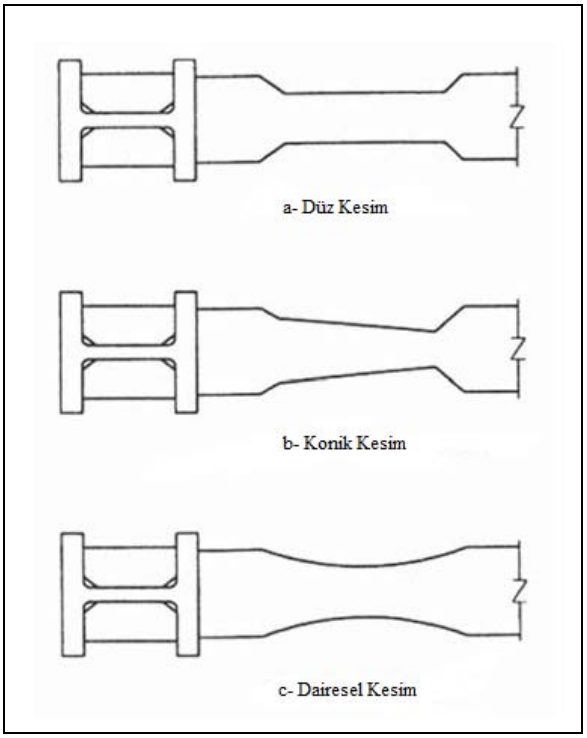
- Kaynak birikintilerinin dayanımı miktarını düşürdüğü,
- Geometrik birleşimlerin üç eksenli gerilmelere neden olduğu,
- Geometrik devamsızlıkların gerilme değerlerini yükselttiği,
- Haddeleme yönünün dikey olmasından dolayı çelik özelliklerinin güvenilir olmaması,
- Tasarım pratikliği özelliğinden dolayı moment dayanımı az olan çerçevenin kullanılması,
- Büyük enkesitlerin test edilmeden önce kullanılması,
- Birleşim bölgelerinde oluşan hasarın kontrolündeki zorluklar,
- Kolonların aşırı zayıf ve esnek panel bölgeleri,
- Kolon ve kirişlerin önceden tahmin edilemeyen değişken özellikleri,
- Kirişlerin özellikle dayanım miktarları.

Araştırmalar sonucunda elde edilen bu veriler ışığında kolon-kiriş birleşim bölgelerini geliştirmek amacıyla birçok çözüm önerisi ortaya konmuştur.

Deprem kuvveti sonucu ortaya çıkan elastik olmayan şekil değiştirmelerin kolon-kiriş birleşiminde belirli bir bölgeye toplanarak yok edilmesine "kapasite tasarımı" denilmektedir. Bu yaklaşım doğrultusunda "Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti (RBS)" kavramı ortaya çıkmıştır.

Bu birleşim tipin de, kolon yüzünden belli bir uzaklıkta, kirişin hem alt hem de üst başlığında yapılacak azaltmalar yardımıyla yapıya bir anlamda yapısal sigorta yerleştirerek, elastik olmayan şekil değiştirmeler zayıflatılmış bölgeye yönlendirilerek kontrol altına alınabilmektedir (Tezer, 2005).

Kiriş başlığında yapılan azaltma fikrinin olumsuz sonuçlar doğuracağı düşünülse de, yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar bunun tam aksini göstermektedir. Kirişte yapılan bu azaltma ile moment kapasitesinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Momentin önceden tasarlanmış değerinden küçük olması, kaynak üzerindeki gerilmeyi azaltmakta ve 'güçlü kolon-zayıf kiriş' ilkesini sağlamaktadır. Zayıflatılmış kiriş enkesiti tipleri Şekil 3.16 'da görüldüğü gibi düz kesim, konik kesim ve dairesel kesimdir. Bu kesim tipleri haricinde farklı şekil ve geometrik özelliklere sahip kesimler de denenmiştir.

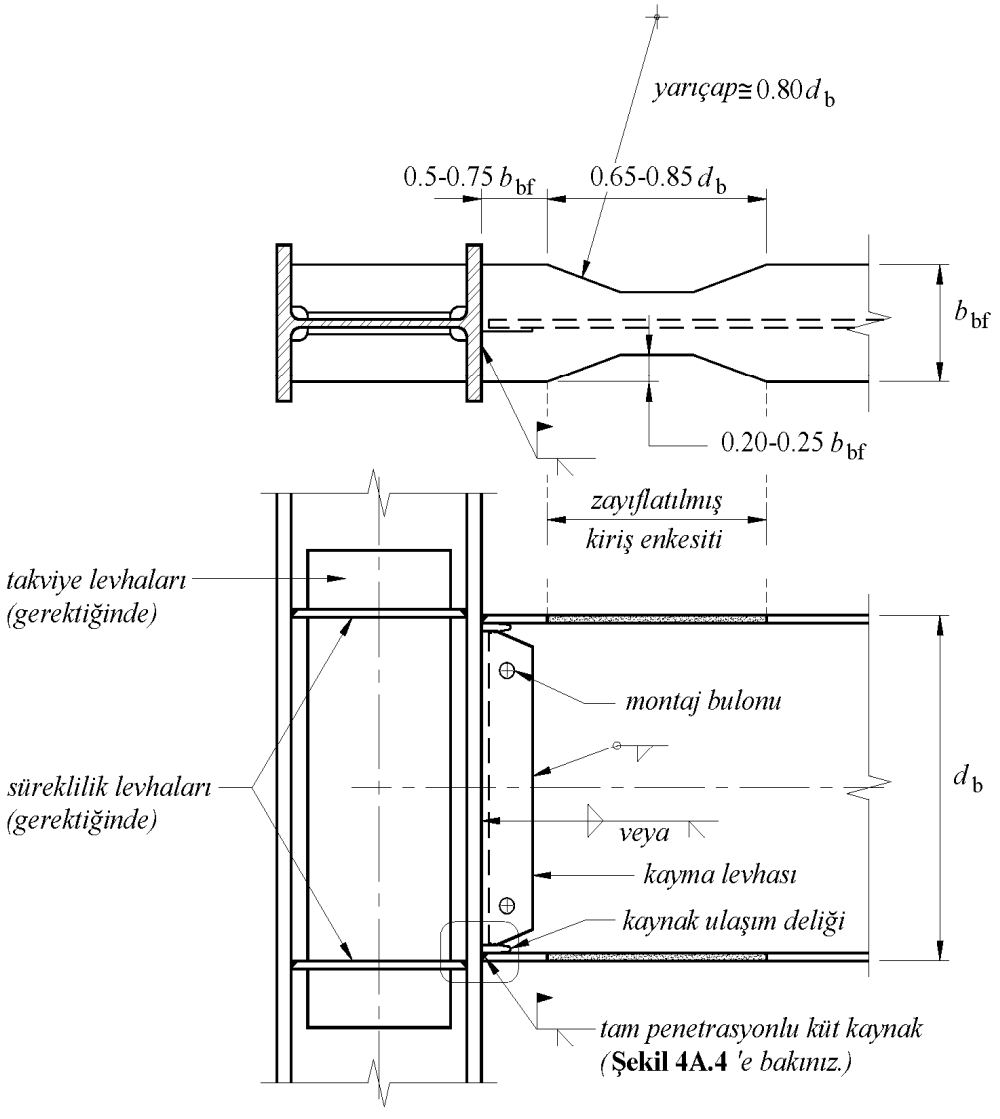


Şekil 3.16. Zayıflatılmış kiriş enkesiti tipleri (Tezer, 2005)

Düşünce olarak ilk ortaya atılan düz kesim sonucu elde edilen veriler, konik kesimin yapılmasına yol açmıştır. Kolon yüzeyine yaklaştıkça artan momenti karşılayacak biçimde kesit artırılması konik kesimde görülmektedir.

Düz ve konik kesim için yapılan deneylerin sonuçları olumludur. Fakat bu iki kesimdeki ortak kusur, kiriş başlığında yapılan kesimlerde oluşan ani kesit değişimleri sonucu gözle görülmeyen ufak çentiklerin gerilme yığılmaları sonucu çatlaklara dönüşmesidir (Tezer, 2005).

Dairesel kesimde ani kesit değişimleri olmadığından bu tür bir probleme rastlanmamıştır. Zayıflatılmış kiriş enkesiti tipleri arasında yönetmeliklerce kullanılması önerilen ve en çok kullanılanı dairesel kesimdir. Dairesel kesimde gerilme yoğunluğu minimum düzeyde olmakta ve değişik çatlama olayları azalmaktadır. Yönetmeliklerde zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim detayı Şekil 3.17 'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim detayı (DBYBHY-2007)

Ayrıca FEMA 350/351, DBYBHY-2007 ve EC 8 yönetmeliklerinin zayıflatılmış kiriş enkesiti için öngörülen geometrik boyutlar Çizelge 3.1 'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Zayıflatılmış kiriş enkesiti birleşimlerin geometrik özellikleri

FEMA 350/351 ve DBYBHY-2007	EC 8 Part 3
$a = 0,5–0,75 \times b_{bf}$	$a = 0,60 \times b_{bf}$
$b = 0,65–0,85 \times d_b$	$b = 0,75 \times d_b$
$c = 0,20–0,25 \times b_{bf}$	$c = 0,20–0,25 \times b_{bf}$
$r = (4c^2+b^2) / 8c$ veya $r = 0,80 \times d_b$	$r = (4g^2+b^2) / 8g$ veya $r = 0,80 \times d_b$

Çizelge 3.1 ’de verilen parametreleri açıklayacak olursak;

$a = 0,5–0,75 \times b_{bf}$
$b = 0,65–0,85 \times d_b$
$c = 0,20–0,25 \times b_{bf}$
$r = (4c^2+b^2) / 8c$ veya $r = 0,80 \times d_b$

Burada ‘a’ ile gösterdiğimiz değer kolon yüzünden başlayıp, kirişte zayıflatma yapılacak yere kadar olan mesafedir. Bu mesafeyi ‘b_{bf}’ kiriş başlık genişliğinin 0,5-0,75 katı arasında bir değer alarak bulmaktadır. ‘b’ değeri kiriş başlığında zayıflatma yapılan mesafedir. Bu değeri kiriş yüksekliğinin ‘d_b’ 0,65-0,85 katı arasında bir değer alarak alınmaktadır. ‘c’ değeri ise elemanın performansını etkileyen en önemli parametre olup, kesim derinliğini vermektedir. Bu değer, kiriş başlık genişliğinin 0,20-0,25 katı arasında bir değer alarak bulmaktadır.

Toplam kesim derinliği ‘2c’ için mevcut standartlarda en fazla $0,50 \times b_{bf}$ değeri verilmekte ancak uygulamada $0,40 \times b_{bf}$ değerinin üzerine çıkılmamaktadır (Tezer, 2005).

‘r’ değeri ise kesim yarıçapı olup, kaynaklarda $r = (4c^2+b^2) / 8c$ veya $r = 0,80 \times d_b$ olarak verilmektedir. Yapılan hesaplamalarda değerler birbirine çok yakın çıkmaktadır.

DBYBHY-2007 ’de zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı kolon-kiriş birleşim detayının uygulama sınırları verilmiştir. Bu detayın süneklik düzeyi yüksek çerçevelere uygulanabilmesi için, birleşim detayı parametrelerinin Çizelge 3.2 ’de verilen uygulama sınırlarını sağlaması gerekmektedir (DBYBHY-2007). Deneylerde kullanılan IPE 400 ve IPE 270 profillerinin verilen sınırlara uygun olup/olmadığının kontrolü Çizelge 3.3 ’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı kolon-kiriş birleşim detayının uygulama sınırları

Birleşim Detayı Parametreleri	**Uygulama Sınırları**
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 1000 mm
Kiriş birim boy ağırlığı	≤ 450 kg/m
Kiriş açıklığı/enkesit yüksekliği oranı	≥ 7
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 45 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Kaynak ulaşım deliği	Gerekli
Ek başlık levhası kalınlığı	Tam penetrasyonlu küt kaynak

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan profillerin uygulama sınırlarının kontrolü

Birleşim Detayı Parametreleri	**Uygulama Sınırları**	
Kiriş enkesit yüksekliği	270 mm ≤ 1000 mm	√
Kiriş birim boy ağırlığı	36,1 kg/m ≤ 450 kg/m	√
Kiriş açıklığı/enkesit yüksekliği oranı	Kiriş açıklığı / 270 ≥ 7→	
	Kiriş açıklığı ≥ 1890 mm ≥ 2000 mm	√
Kiriş başlık kalınlığı	10,2 mm ≤ 45 mm	√
Kolon enkesit yüksekliği	400 mm ≤ 600 mm	√
Kaynak ulaşım deliği	Gerekli	√
Ek başlık levhası kalınlığı	Tam penetrasyonlu küt kaynak	√

Zayıflatılmış kiriş enkesitinde yönetmeliklerde verildiği üzere kolon ve kirişin alt ve üst başlığına bayrak levhası dediğimiz parçalar konulmaktadır. Bu ilave parçaların kolon ve kirişe sızdırmayan dolgu kaynak ile monte edilmesi gerekmektedir.

Northridge sonrasında ortaya atılan güçlendirilmiş kolon-kiriş birleşim tiplerinin aksine, zayıflatılmış kiriş enkesiti birleşim herhangi bir takviye levhası ve bu levhaları kirişe bağlayacak karmaşık ve uygulaması zor kaynak dikişleri gerektirmemekte, bu sayede malzeme ve işçilik açısından ekonomik bir birleşim olma özelliği kazanmaktadır. Deneylerde gösterdiği olumlu performans ve bahsedilen ekonomik olma özelliği nedeniyle, depreme dayanıklı çelik yapı tasarımıyla ilgilenenlerden yoğun ilgi görmektedir (Tezer, 2005).

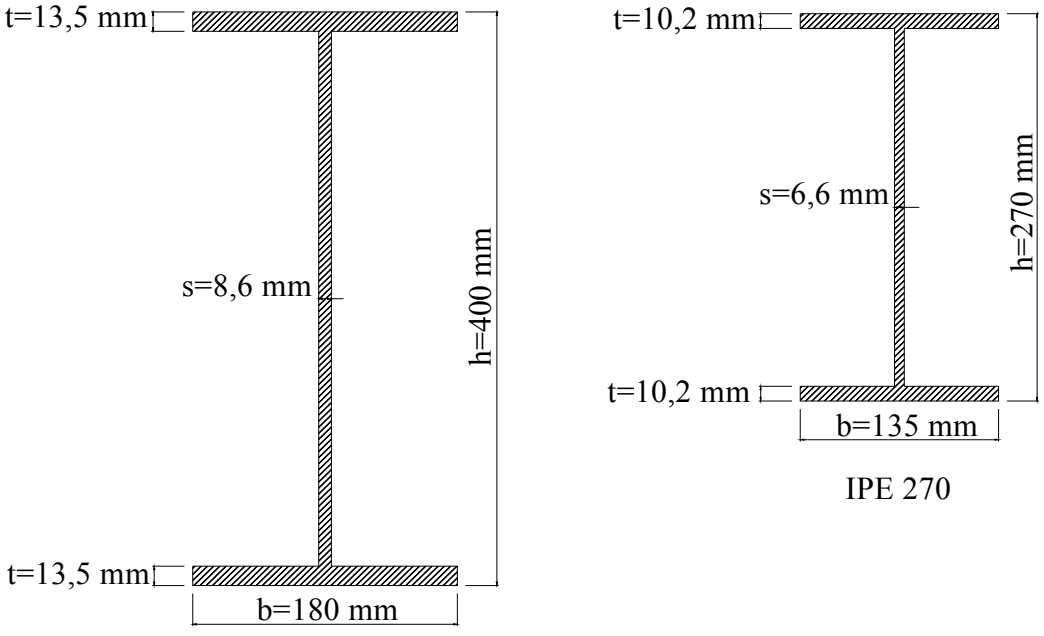
4. DENEY NUMUNELERİ, DENEY DÜZENEĞİ VE ÖLÇÜM TEKNİĞİ

4.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneyler Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deprem Araştırma Laboratuarı 'nda gerçekleştirilmiştir. Bu yüksek lisans tez çalışmasında farklı birleşim özelliklerine sahip 4 adet kolon-kiriş düğüm noktası üretilmiş ve birleşimler kiriş ucundan tatbik edilen tersinir-tekrarlanır düşey yük etkisi altında denenmiştir. Deney sırasında bilgisayar destekli veri okuma sistemi kullanılarak, gerekli yük ve yer değiştirme okumaları yapılmış ve kayıt altına alınmıştır.

4.2. Deney Numunelerinin Yapımında Kullanılan Çelik Profillerin Geometrik ve Mekanik Özellikleri

Yapılan bu çalışmada, üretilen 4 adet deney numunesinde aynı kolon ve kiriş kesiti kullanılmıştır. Deneylerde kolonlar için IPE 400, kirişler için IPE 270 profilleri kullanılmıştır. Kullanılan profillerin geometrik ve fiziksel özellikleri Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1 'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan IPE profillerinin geometrik özellikleri

Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan IPE profillerinin geometrik ve fiziksel özellikleri

Parametreler / Profiller		**IPE 400**	**IPE 270**
b	(mm)	180	135
h	(mm)	400	270
t	(mm)	13,5	10,2
s	(mm)	8,6	6,6
F	(cm^2)	84,50	45,9
G	(kg/m)	66,3	36,1
I_x	(cm^4)	23130	5790
I_y	(cm^4)	1320	420
W_x	(cm^3)	1160	429
W_p	(cm^3)	1470	484
W_y	(cm^3)	146	62,2
i_x	(cm)	16,5	11,2
i_y	(cm)	3,95	3,02

Deney numunelerinin üretiminde kullanılan profillerin mekanik özelliklerini belirlemek üzere kolon ve kiriş elemanlarının gövde ve başlık kısımlarından yeterli sayıda kupon kesilmiştir. Kesilen bu kuponlar Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuarında çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda çelik profillerin mekanik özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen profillere ait mekanik özellikler Çizelge 4.2 'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneylerde kullanılan IPE profillerinin mekanik özellikleri

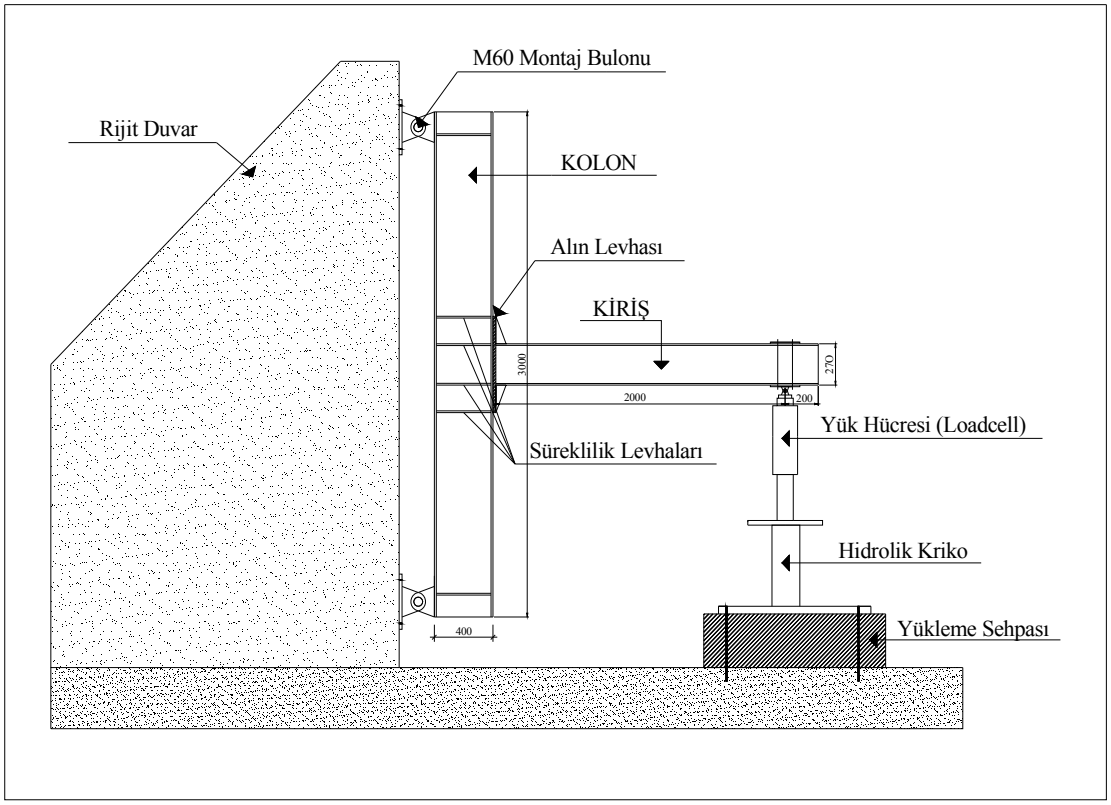
Mekanik Özellikler		**Numune**
Akma Gerilmesi (σy)	(N/mm^2)	302
Kopma Gerilmesi (σu)	(N/mm^2)	448
Akma Birim Uzaması (εy) (%)		24
Kopma Birim Uzaması (εu) (%)		34
Elastisite Modülü (E)	(N/mm^2)	203000

4.3. Deney Numunelerinin Özellikleri

Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında, üretilen 4 adet deney numunesinde aynı kolon ve kiriş kesiti kullanılmıştır. Deneylerde kolonlar için IPE 400, kirişler için IPE 270 profilleri kullanılmıştır. Farklı birleşim ve kesit özelliklerine sahip 4 adet kolon-kiriş birleşimi kiriş ucundan tersinir-tekrarlanır düşey yük etkisi altında denenmiştir. Test edilen 4 adet deney numunesinden ilki referans numunesidir. Bu numunenin kiriş kesitinde her hangi bir zayıflatılma ve güçlendirme yapılmamıştır. İkinci ve üçüncü numuneler kiriş kesiti zayıflatılmış kesitler olup, ikinci numunede kiriş alt ve üst başlığında %40, üçüncü numunede ise %45 azaltma yapılmıştır. Dördüncü numunede ise kiriş ucunda rijitlik levhası kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Test edilen deney numunelerinin ayrıntılı şekilleri deneylerin anlatıldığı 5. bölümde detaylı olarak verilmiştir.

4.4. Deney Düzeneği

Yapılan bu çalışmada üretilen 4 adet kolon-kiriş birleşiminde aynı tip çelik profiller kullanılmıştır. Deneylerde kolonlar IPE 400, kirişler IPE 270 çelik profillerden imal edilmiş ve kiriş ucundan düşey yük uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kolon uzunluğu 3 m olup, rijit yükleme duvarına tam öngermeli, M60 montaj bulonları vasıtasıyla mesnetlenmiştir. Böylelikle sistemin herhangi bir dönme ve ötelenme yapması engellenmiş olacaktır. 2 m uzunluğundaki kiriş, kolon açıklık ortasından 63×20×3cm alın levhası kullanılarak, köşe kaynak ve M18 bulonlar vasıtasıyla kolona birleştirilmiştir. Birleşim oluşturulurken kaynakta göçme olmaması yani göçmenin kirişte olması için maksimum kaynak kalınlığı kullanılmıştır. Kirişin kolona saplandığı bölgede, kolon panel bölgesini korumak amacıyla, süreklilik levhaları ile güçlendirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.2 ’de görülmektedir. Kiriş ucundan tersinir-tekrarlı yük verilmesi amacıyla oluşturulan yükleme düzeneğinin (Şekil 4.3) yatayda ve düşeyde hareketinin engellenmesi için yükleme sehpası bulonlar ile zemine sabitlenmiştir. Yükleme sehpası (Şekil 4.4) üzerine sabitlenmiş olan hidrolik kriko (Şekil 4.5), sisteme hem çekme hem de basınç kuvveti uygulamamıza imkan sağlamaktadır. Hidrolik kriko üzerine yük okumalarını yapabilmek için yük hücresi (Şekil 4.6) yerleştirilmiştir. Sistemde hidrolik kriko ve yük hücresi birbiriyle temas halinde olup, hidrolik kriko iki yönlü yük uygulamakta yük hücresi de numuneye uygulanan yükü okuyabilmektedir.



a- Deney düzeneği detayı



Şekil 4.2.b. Deney düzeneği şekli



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan yükleme düzeneği



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan yükleme sehpası



Şekil 4.5. Deneylerde kullanılan hidrolik kriko



Şekil 4.6. Deneylerde kullanılan yük hücresi

4.5. Ölçme Tekniği

Sistemde meydana gelen yer değiştirmeler OPKON marka Potansiyometrik Cetveller (LVDT) yardımıyla (Şekil 4.7) bulunmuştur. Bu aletler yardımıyla alınan değerler Teknik Destek Grubu isimli veri toplama (data-logger) sistemi ile bilgisayar ortamına aktarılıp kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.8).

4.5.1. Yük ölçümleri

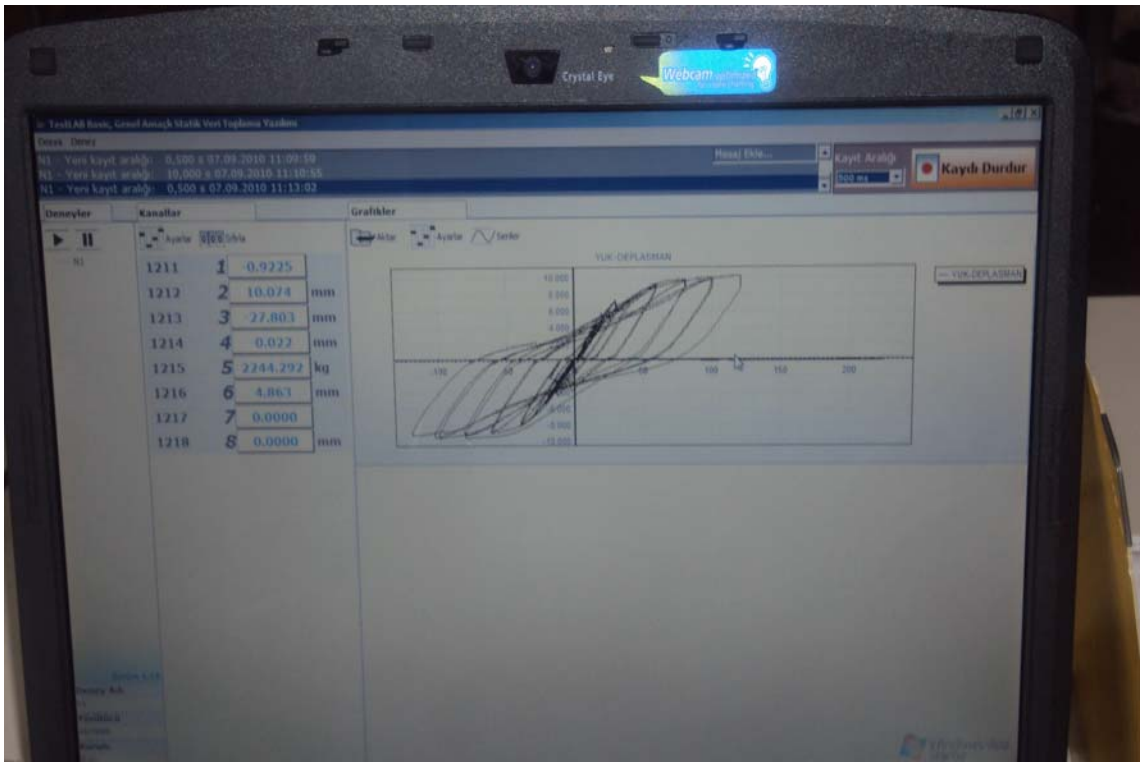
Hidrolik kriko sistemi, numunelere basınç ve çekme yönünde yük uygulamaktadır. Basınç durumunda hidrolik kriko sistemi itmekte iken, çekme durumunda sistemi çekmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan hidrolik kriko ve Potansiyometrik Cetveller kalibre edilmiş, kullanılacak olan programa tanıtılmıştır. Yük hücresinin çıkış ucu veri toplama kutusuna bağlı olup, alınan gerilme değerleri veri toplama kutusuna oradan da bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Alınan değerler TDG CODA Veri Toplama Yazılım Paketi vasıtasıyla bilgisayar ortamında takip edilmektedir (Şekil 4.9). Gerçekleştirilen ölçümler sayesinde deney numunelerinin davranışı, taşıma güçleri, enerji tüketme kapasiteleri vb. sonuçlar elde edilmiştir. Sonrasında elde edilen bu sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7. Deneylerde kullanılan yer değiştirme ölçüm sistemi (LVDT)



Şekil 4.8. Yük ve yer değiştirme okumalarını değerlendiren data-logger sistemi

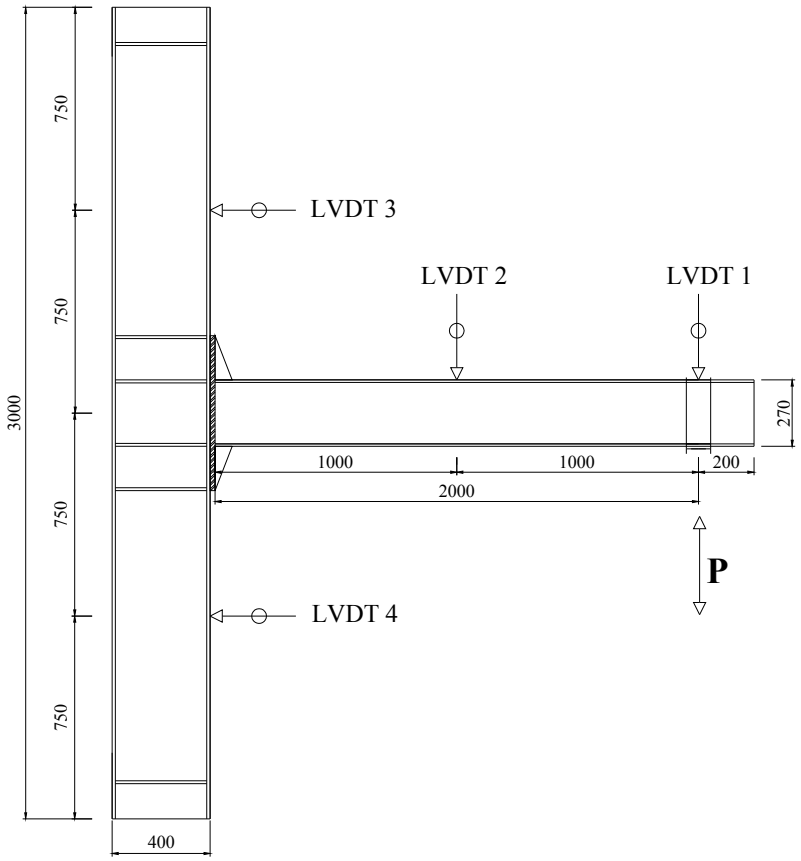


Şekil 4.9. Deneylerde kullanılan veri toplama yazılım program

4.5.2. Deneylerde kullanılan ölçüm düzeneği

Deneylerde test edilen her bir çerçeve sistemi için, mümkün olduğunca aynı yerlerden olacak şekilde ölçüm sistemi kullanılmıştır. Yer değiştirme ölçümleri, çelik çerçeve sisteminin alt ve üst uçlarının yatay yer değiştirmelerinin, tabanda ve üst başlıktaki dönmelerin tespiti amacıyla gerekli yerlerde ve gerekli sayıda LVDT kullanılarak yapılmıştır. Yük ölçümleri ise, hidrolik kriko ile bağlantılı olarak çalışan yük hücresi kullanılarak yapılmıştır.

Test edilen çelik çerçeve sistemlerinde kullanılan ölçüm düzeneği Şekil 4.10 'da verilmiştir. Kiriş ucunda meydana gelen düşey yer değiştirmeler LVDT 1, kiriş ortasında meydana gelen düşey yer değiştirmeler LVDT 2 ile ölçülmüştür. Kolon alt ve üst ucu sabit olması nedeniyle kolon uçları hareket etmemektedir. Kolon ile kiriş ortasındaki yer değiştirmeleri ölçmek üzere de LVDT 3 ve LVDT 4 kullanılmıştır. Ayrıca kiriş ucunda yer alan yük hücresi vasıtasıyla da kirişe tatbik edilen yük değeri de okunmuştur.



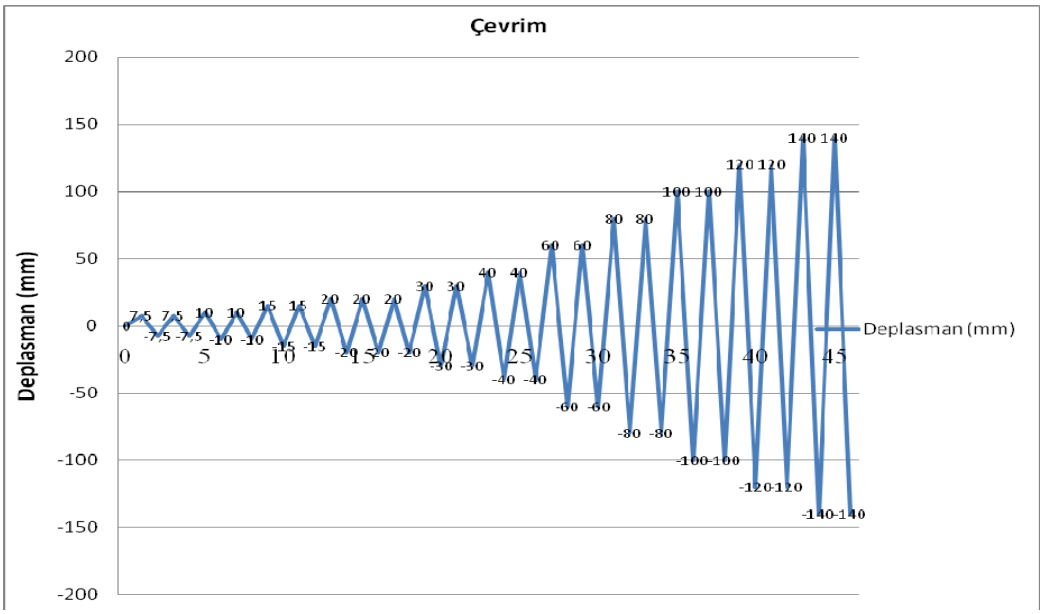
Şekil 4.10. Deney düzeneğinde kullanılan LVDT ve yük ölçüm yerleri

4.6. Çerçeve Deneylerinde Uygulanan Yükleme Programı

Yapılan deneylerin tamamında deplasmanlar kontrol edilmiştir. Yükleme kontrolü FEMA-351 'e uygun olan ve Pachoumis ve ark. (2010) çalışmalarındaki çevrimler esas alınarak yapılmış ve buna ait değerler Çizelge 4.3 'de verilmiştir. Çizelge göz önüne alınarak yapılan çevrim-deplasman grafiği Şekil 4.11 'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Deneylerde uygulanan çevrim değerleri

Yükleme Adımı	**Toplam Dönme Φ (Radyan)**	**Periyot Tekrarı, n_j**	**Deformasyon Miktarı (mm)**
1	0,00375	2	7,5
2	0,005	2	10
3	0,0075	2	15
4	0,01	4	20
5	0,015	2	30
6	0,02	2	40
7	0,03	2	60
8	0,04	2	80
9	0,05	2	100
10	0,06	2	120



Şekil 4.11. Deneylerde uygulanan yükleme programı

Ayrıca DBYBHY-2007 'de göreli kat ötelenme sınır durumları aşağıda Çizelge 4.4 ile verilmiştir.

Çizelge 4.4. Göreli kat ötelenmesi sınırları

Göreli Kat Ötelenmesi Oranı	**Hasar Sınırı**		
δji/hji	**MN**	**GV**	**GÇ**
	0,01	0,02	0,03

Çizelgedeki;

MN: Minimum hasar sınırı

GV: Güvenlik sınırı

GÇ: Göçme sınırını ifade etmektedir.

4.7. Ölçmelerin Değerlendirilmesi

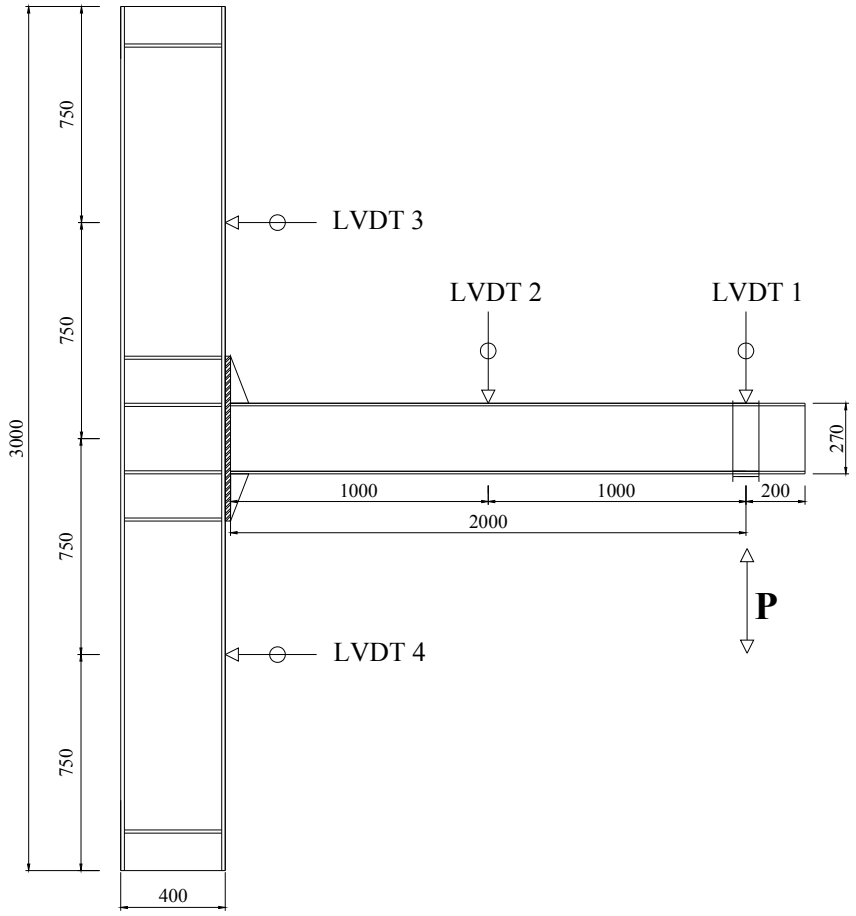
Deney sırasında sistemde meydana gelen yer değiştirmeleri ölçmek için potansiyometrik cetveller (LVDT) ve yük hücresinden alınan okuma değerlerinden faydalanarak deney numunelerinin davranış özellikleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, her bir deney için yük geçmişi, yük-deplasman ve moment-toplam dönme ilişkisi, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve tüketilen enerji grafikleri çizdirilmiştir.

4.7.1. Yük geçmişi grafiklerinin çizdirilmesi

Yük geçmişi grafiklerinin çizdirilmesi amacıyla, önce deney sırasında her çevrim için ileri ve geri yüklemelerde elde edilmiş olan yatay yük değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, çevrim ve yatay yük ilişkisi grafiksel olarak değerlendirilerek her bir numune için yük geçmişi grafiği çizdirilmiştir.

4.7.2. Yük-deplasman ve moment-toplam dönme grafiklerinin çizdirilmesi

Yük-Deplasman ve Moment-Toplam Dönme grafiklerinin çizdirilmesi amacıyla, deney sırasında yük hücresinden okunan yük değerleri ile kiriş ucundaki LVDT 1 ölçümlerinden faydalanılmıştır. (Şekil 4.12). Grafiklerin çizdirilmesinde aynı deplasman değeri için gerçekleştirilen her çevrim için elde edilen yük değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır.



Şekil 4.12. Deneylerde kullanılan ölçüm düzeneği

Şekil 4.12 ’den görüleceği gibi Yük-Deplasman grafiği çizdirilirken yük değeri yük hücresinden okunan yük ölçümü (P), deplasman değeri ise LVDT 1 ’den okunan yer değiştirme değeri (Δ) esas alınmıştır. Ayrıca Moment-Toplam Dönme grafiği çizdirilirken ise Moment (M=P×L) ve Toplam Dönme (Φ=Δ/L) şeklinde hesaplanarak çizdirilmiştir.

4.7.3. Dayanım zarfı grafiklerinin çizdirilmesi

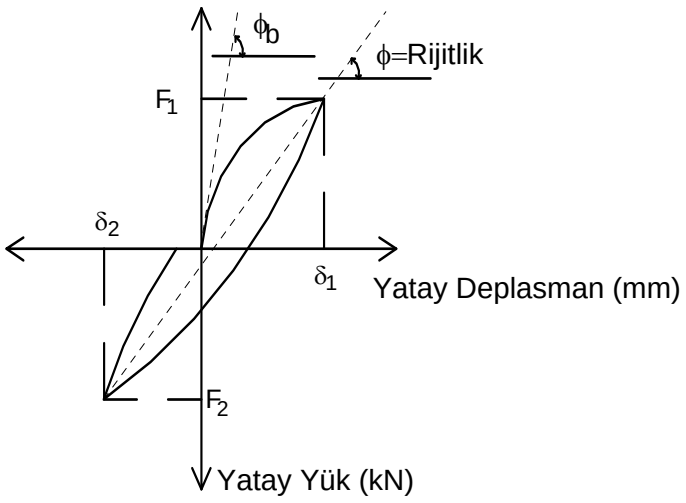
Dayanım zarfı grafiklerinin çizdirilmesi amacıyla, her çevrimde okunan en büyük yatay deplasman değerleri ve buna karşı gelen en büyük yatay yük değerleri elde edilmiştir. İleri ve geri okumalardan elde edilen yatay deplasmanlar ile yatay yük değerleri grafiksel olarak çizdirilmiştir (Şekil 4.14).

4.7.4. Rijitlik azalımı grafiklerinin çizdirilmesi

Tersinir-tekrarlanır yatay yükleme altında, deney numunelerinin rijitliklerinde ilerleyen her çevrimde bir azalma olmaktadır. Çelik çerçeve numunelerinin rijitlik değerleri, her bir çevrim için Yük-Deplasman grafiğinin eğimi bulunarak elde edilmiştir. Her çevrimde, Yük-Deplasman eğrisinde okunan yatay yük değerleri F_1 ve F_2 ve yatay deplasman değerleri Δ_1 ve Δ_2 olarak belirlenirse, o çevrim için rijitlik değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\text{Rijitlik } (\phi)=(|F_1|+|F_2|)/(|\Delta_1|+|\Delta_2|) \tag{4.5}$$

İleri ve geri çevrimleri tamamlanamayan durumlarda ise, yukarıdaki hesaplamalar sadece ileri çevrim için yapılmıştır. Ayrıca analitik çözümlerle karşılaştırma yapabilmek için, 1-1 çevrimi Yük-Deplasman eğrisinin başlangıç teğet eğimi hesaplanarak başlangıç rijitliği (ϕ_b) de hesaplanmıştır.



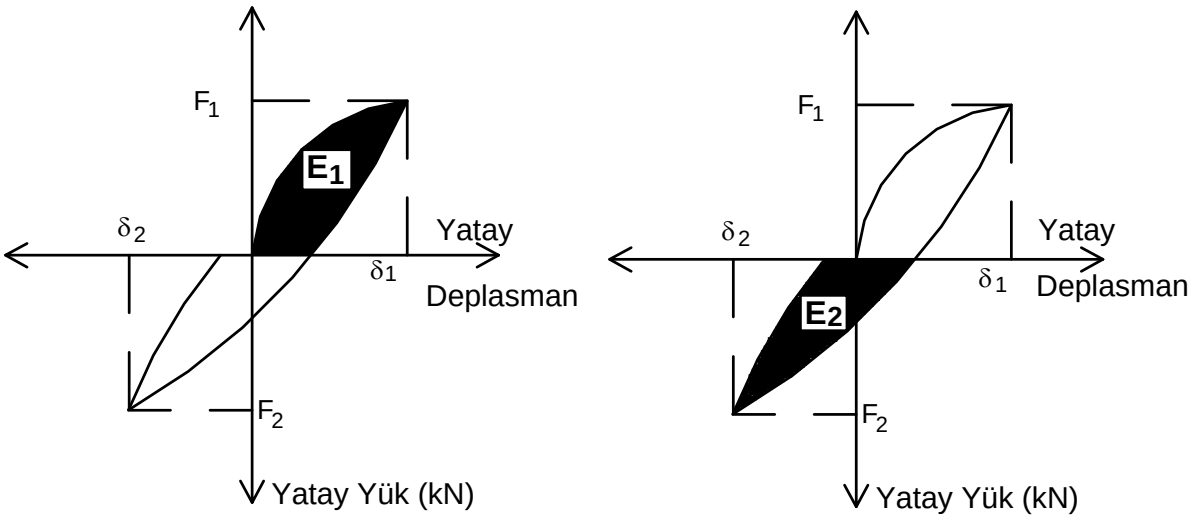
Şekil 4.13. Çelik çerçeve numunelerin rijitlik değerlerinin belirlenmesi

Deney numuneleri için elde edilen rijitlik azalımı grafiklerinin birbirleri ile kıyaslanabilmesi için, bulunan rijitlik değerlerinin, Deplasman/Açıklık (Δ/L) oranı ile değişiminin grafiksel olarak çizdirilmesi ile rijitlik azalımı grafikleri elde edilmiştir. Rijitlik azalımı grafikleri, deney sonuçları arasında daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla; çevrim sayısına bağlı olarak değil, (Δ/L) oranına bağlı olarak çizilmiştir.

4.7.5. Tüketilen enerji grafiklerinin çizdirilmesi

Tersinir-tekrarlanır yatay yüke maruz çerçeve sistemleri, üzerine gelen enerjinin bir kısmını deformasyona uğrayarak tüketmektedir. Tüketilen bu enerji, özellikle deprem gibi dinamik yükleme durumu için oldukça önemlidir. Bu çalışmada da deney numunelerinin tüketmiş oldukları enerji değerleri elde edilmiştir. Fizik kurallarından da bilindiği gibi enerji yapılan işe, iş ise kuvvet ile kat edilen yolun çarpımına eşittir. Bu nedenle deney numunelerinin tüketmiş olduğu enerji, her çevrimde Yük-Deplasman eğrisinin kapsamış olduğu alana eşittir. Ancak her çevrimde elde edilen tüketilen enerji değerleri toplanarak toplam tüketilen enerji grafiğinin çizdirilmesi daha gerçekçi olacağı düşünüldüğünden, her bir numune için buna göre toplam tüketilen enerji grafiği çizdirilmiştir (Şekil 4.14). Bu amaçla ilk olarak, ileri yüklemede Yük-Deplasman eğrisinin altında kalan alan E_1 hesaplanmıştır.

Daha sonra geri yüklemede Yük-Deplasman eğrisinin altında kalan alan E_2 hesaplanmış ve bu çevrim için toplam tüketilen enerji E1 ve E_2 değerlerinin toplanması suretiyle hesaplanmıştır. Bundan sonra her çevrim için elde edilen tüketilen enerji değerleri toplanarak toplam tüketilen enerji değerleri hesaplanmıştır. Deney numuneleri için elde edilen enerji tüketme grafiklerinin birbirleri ile kıyaslanabilmesi için kümülatif toplam tüketilen enerji değerinin ardışık olarak toplanan kümülatif toplam deplasman/açıklık $\Sigma(\Delta/L)$ oranı ile değişiminin grafiksel olarak çizdirilmesi ile tüketilen enerji grafikleri elde edilmiştir. Tüketilen enerji grafikleri, deney sonuçları arasında daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla; çevrim sayısına bağlı olarak değil, kümülatif toplam $\Sigma(\Delta/L)$ oranına bağlı olarak çizilmiştir.



Şekil 4.14. Toplam tüketilen enerji değerlerinin hesaplanması

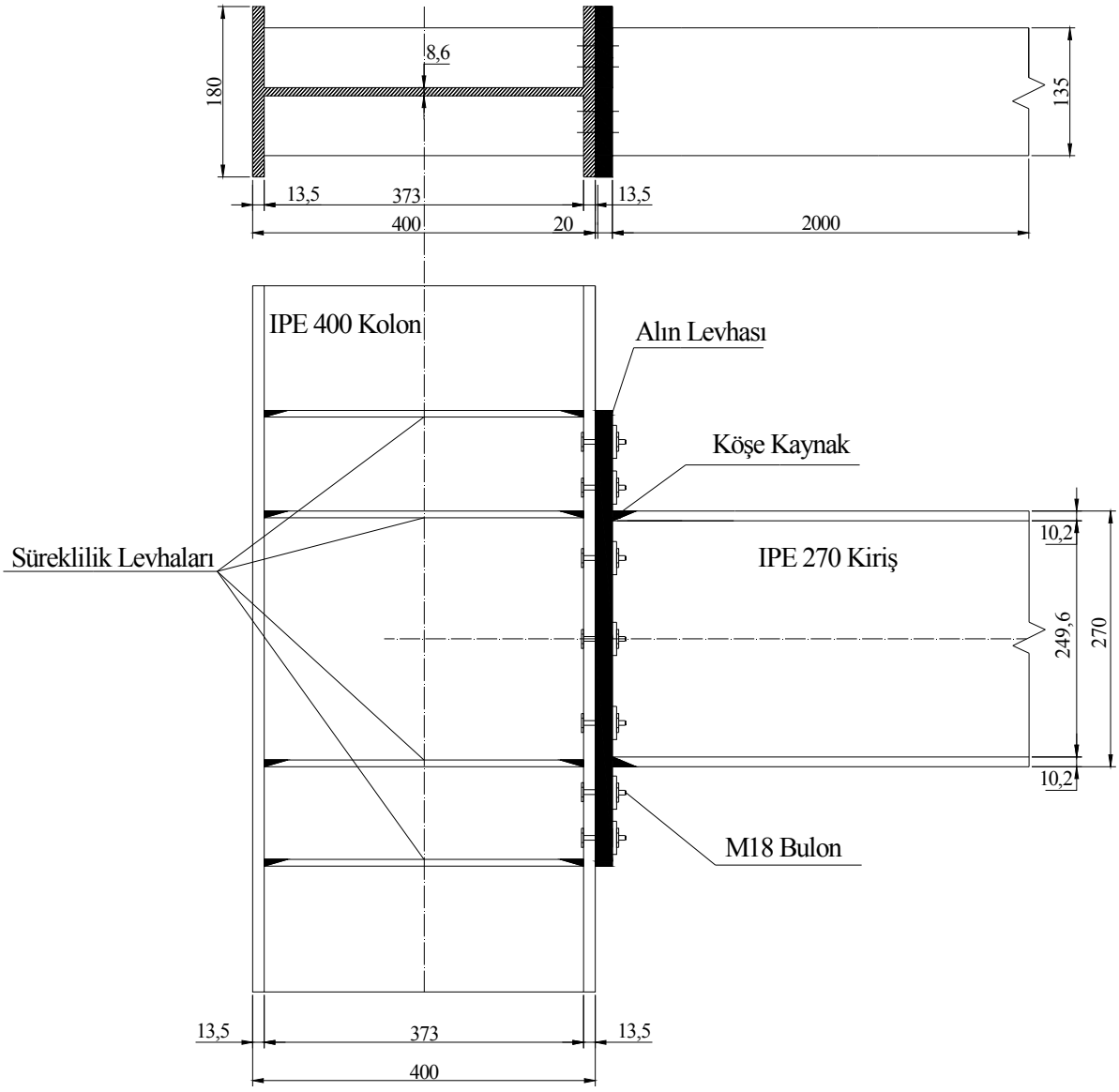
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Deney Programı

Deney programında 4 adet numune test edilmiştir. 1. numune referans numunesi olup, arada alın levhası kullanılarak kiriş kolon yüzüne mesnetlenmiştir. 2. numunede kiriş başlığında %40 oranında zayıflatma yapılmıştır. 3.numunede kiriş başlığında %45 oranında zayıflatma yapılmıştır. 4. numune ise kiriş kolona rijitlik levhası kullanılarak, güçlendirilmiş biçimde imal edilmiştir. Deneyler sırasında sistemde meydana gelen yer değiştirmeleri ölçmek için potansiyometrik cetveller (LVDT), kolon ve kirişin belirli bölgelerine yerleştirilmiş ve data-logger yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.

5.1.1. Deney 1 (N1)

Deney 1 (N1) numunesi referans numune olup, buna ait ölçüler Şekil 5.1 ’de verilmiştir. 3 metre uzunluğundaki kolon rijit yükleme duvarına, M60 bulonlar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Burada yapılan işlemin amacı, sistemin herhangi bir dönme ve ötelenme yapmasını önlemektir. Kiriş 2 metre uzunluğunda olup, geometrik özellikleri değiştirilmemiştir. Kiriş ucuna alın levhası kaynatılmış ve alın levhası kolon ortasından 8.8 kalitesinde M18 bulonlar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Sisteme kiriş uç noktasından FEMA-351 ’de verilen yükleme programı baz alınarak işlem yapılmıştır. Sisteme ilk olarak 1-1 çevriminde ileri yükleme ile basınç yönünde 7,5 mm ’lik deplasman uygulanmıştır, sistemdeki yük boşaltılmış ve daha sonra –(1-1) çevriminde geri yükleme ile çekme yönünde 7,5 mm ’lik deplasman uygulanmıştır. Daha sonra ikinci çevrimde sisteme ileri yükleme ile basınç yönünde ve geri yükleme ile çekme yönünde 10 mm ’lik deplasman uygulanmıştır. Bu işlemler yükleme programı ve sistemin imkan verdiği sürece devam etmiştir. Uygulamada referans numune sistemi Şekil 5.2 ’de görülmektedir.



Şekil 5.1. Deney 1 (N1) referans numune detayı



Şekil 5.2. Deney 1 (N1) referans numuneye ait deney öncesi resim

Deneye başlandığında 1-1 çevrimi gereğince sisteme basınç doğrultusunda 7,07 mm ’lik deplasman uygulanmış ve bu deplasman değerine karşılık 13,48 kN yük elde edilmiştir. Daha sonra sistemdeki yük boşaltılmış ve 2,31 mm ’lik kalıcı deplasman değeri ölçülmüştür. -(1-1) çevriminde sisteme çekme yönünde 7,06 mm deplasman uygulanmış ve 22,23 kN yük elde edilmiştir. Sistemdeki yük boşaltılmış ve kalıcı deplasman değeri 1,49 mm olarak bulunmuştur. İşlem tüm yükleme programınca bu şekilde devam etmiştir.

7-1 çevrimine kadar sistemde herhangi bir yapısal bozukluk görülmemiştir. 7-1 çevriminde sisteme basınç doğrultusunda uygulanan 60,04 mm deplasman değerine karşılık 87,34 kN yük değeri ölçülmüştür. Sistemdeki yük boşaltıldığında 24,72 mm ’lik kalıcı deplasman ölçülmüştür. 7-1 çevriminde kiriş alt başlığında akma meydana gelmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. 7-1 çevriminde kiriş alt başlığında meydana gelen akma olayı

-(7-1) çevrimine başlanılmış, 61,37 mm deplasmana ulaşıldığında 90,05 kN değerinde yük okunmuştur. Yük boşaltıldığında ise 17,55 mm kalıcı deplasman gözlenmiştir.

8-1 çevriminde 80,25 mm deplasman değerine karşılık, 91,85 kN yük elde edilmiş ve 47.98 mm kalıcı deplasman gözlenmiştir. Bu çevrim sonucunda kiriş alt başlığında kaynakta ayrılma başlamıştır (Şekil 5.4).



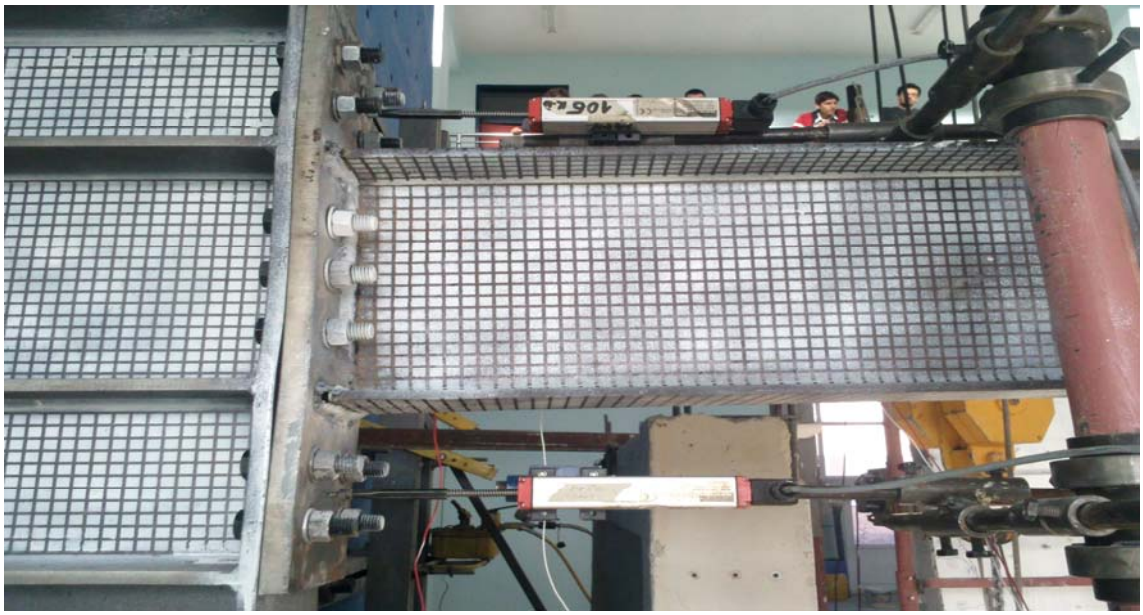
Şekil 5.4. 8-1 çevriminde kiriş alt başlığında kaynakta ayrılma başlangıcı

-(8-1) çevriminde 81,61 mm deplasman değerine karşılık, 99,40 kN yük ölçülmüş ve 35,72 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür (Şekil 5.5). –(8-1) çevriminde bu deney için en büyük yatay yük değeri olan 99,40 kN değerine ulaşılmıştır.



Şekil 5.5. Çevrim –(8-1) ‘de oluşan kalıcı deformasyon

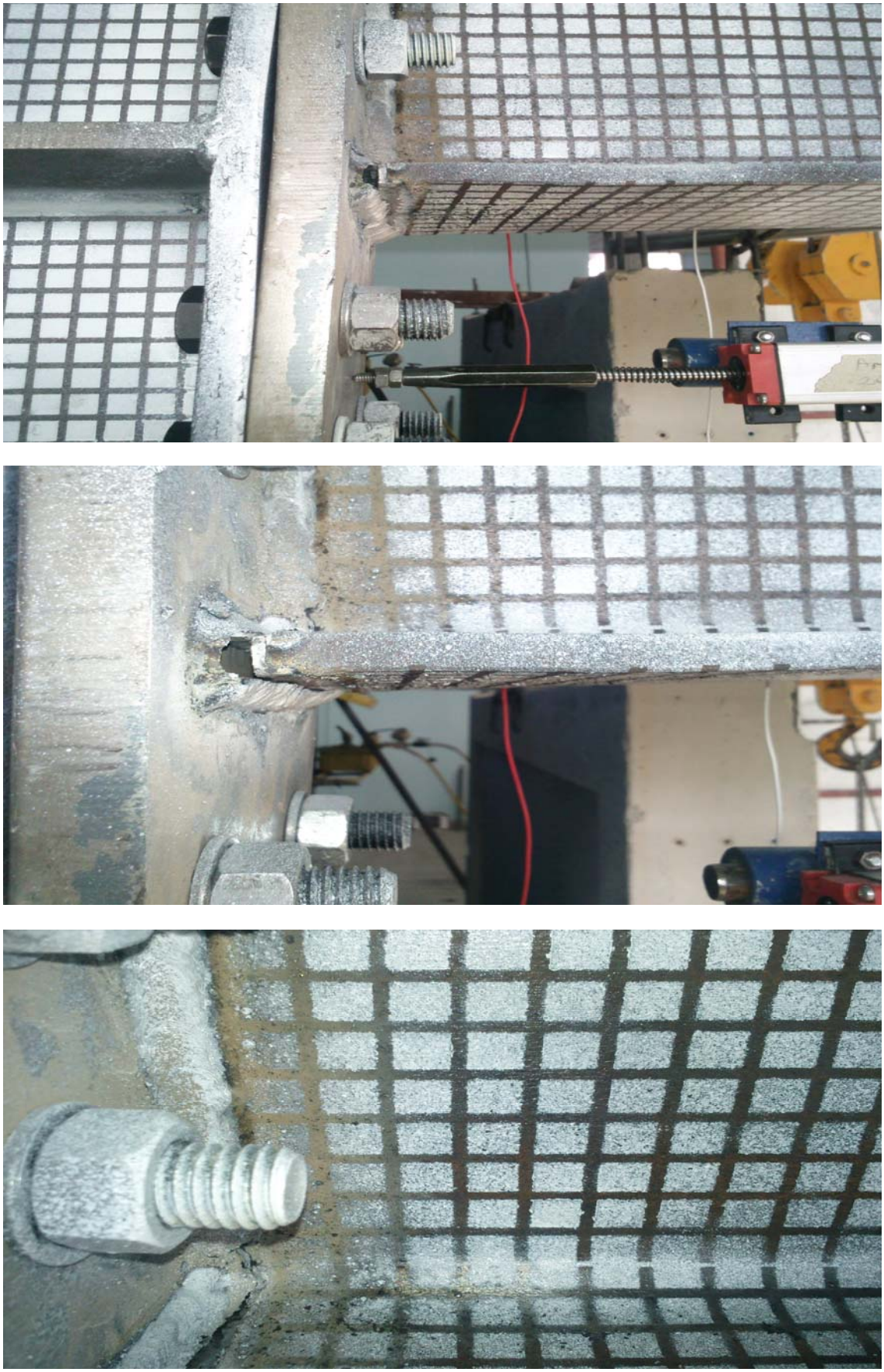
8-2 çevriminde ise sisteme 81,71 mm deplasman uygulanmış ve 88,55 kN yük elde edilmiştir. Yük kaldırıldığında 44,67 mm kalıcı deplasman değeri ölçülmüştür. Ayrıca kiriş baş tarafında yanal burkulma ve gövdede düğüm noktasına yakın bir yerde buruşma başlamıştır (Şekil 5.6). Kiriş alt başlığında 7-1 çevrimde meydana gelen akma ilerlemiştir (Şekil 5.7). Ayrıca kiriş alt başlığındaki kaynak kopmuştur (Şekil 5.8).



Şekil 5.6. 8-2 çevriminde meydana gelen gövdede buruşma

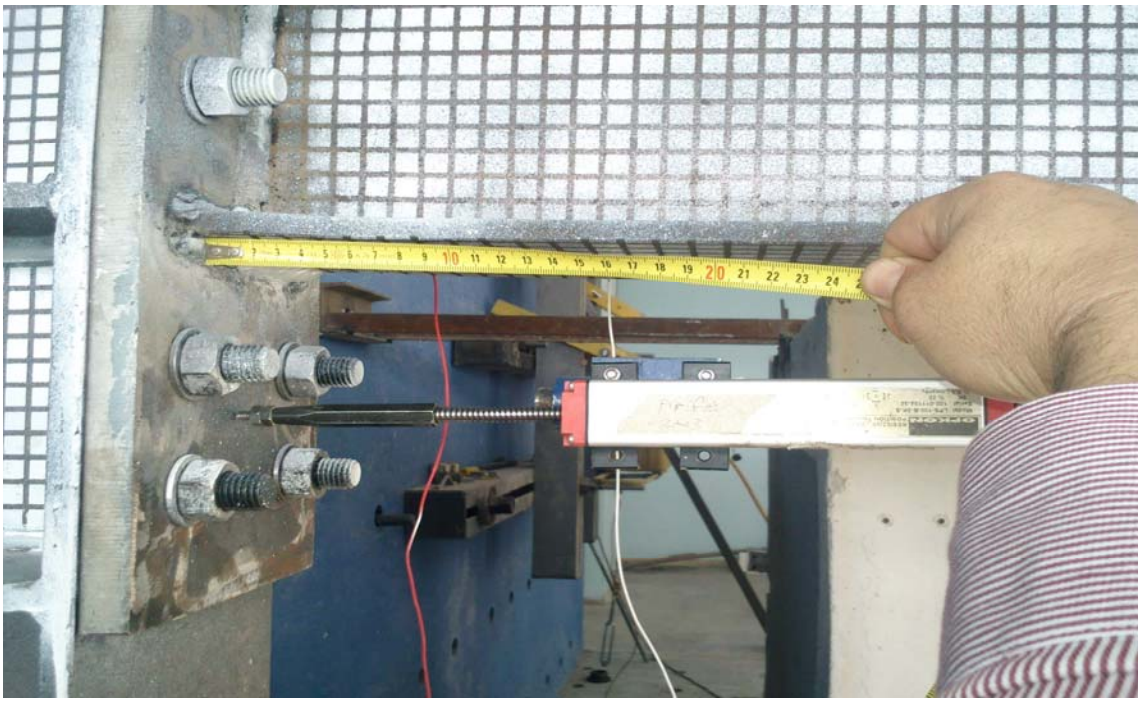


Şekil 5.7. 8-2 çevriminde kiriş alt başlığında ilerleyen akma



Şekil 5.8. 8-2 çevriminde kiriş alt başlığında kaynakta ayrılma

-(8-2) çevriminde sisteme 81,12 mm deplasman uygulanmış ve 94,49 kN yük elde edilmiştir. Sistemden yük kaldırıldığında 36,90 mm kalıcı deplasman değeri ölçülmüştür. Kiriş alt başlıkta mesnet yüzünden 8 cm uzakta burkulma oluştuğu Şekil 5.9 'da görülmektedir.



Şekil 5.9-a. 8 cm uzakta meydana gelen burkulma

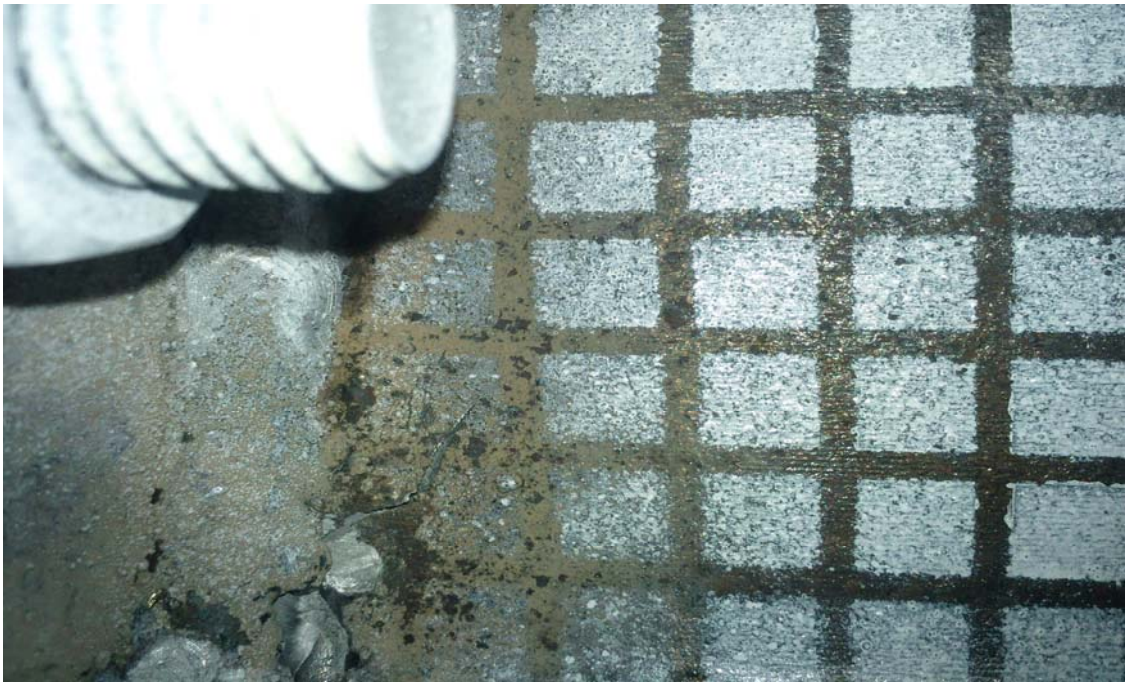


Şekil 5.9-b. –(8-2) çevriminde gövdede meydana gelen burkulma

Sistemde 9-1 çevriminde 101,2 mm ’lik deplasman değerine karşılık, 92,57 kN yük değeri ve 55 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür. Kolon kiriş birleşim noktasında, kiriş alt başlığında bulunan kaynağın tamamıyla koptuğu Şekil 5.10 ’da ve ayrıca kiriş alt başlık gövde tabanından 3 cm yanlara doğru yırtıldığı Şekil 5.11 ’de görülmektedir.

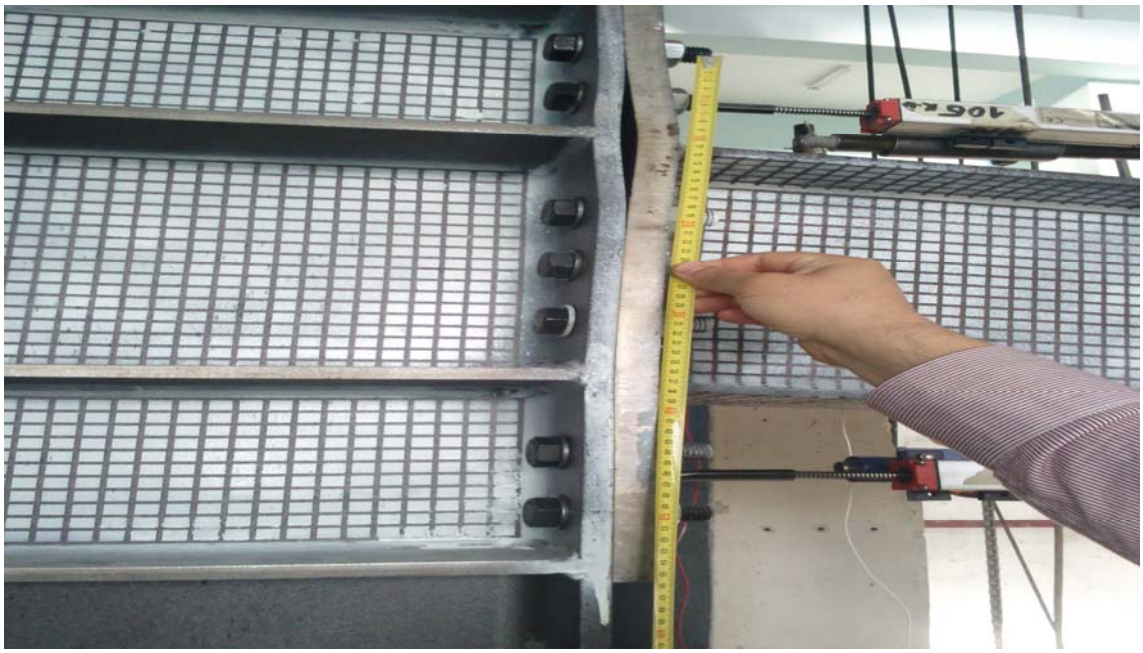


Şekil 5.10. 9-1 çevrimi sonucu ilerleyen kaynak ayrılması



Şekil 5.11. 9-1 çevriminde kiriş gövdesinde meydana gelen yırtılma

-(9-1) çevrimine başlanmış, sisteme çekme doğrultusunda 101,63 mm 'lik deplasman uygulanmış ve 98,19 kN maksimum yük değeri ölçülmüştür. Sistemden yük boşaltıldığında 49,66 mm kalıcı deplasman elde edilmiştir (Şekil 5.12). Çekme doğrultusunda verilen yük neticesinde kiriş üst başlığında akma olayı artmıştır (Şekil 5.13).



Şekil 5.12. –(9-1) çevriminde kolon-kiriş birleşim noktasında meydana gelen kalıcı deformasyon



Şekil 5.13. –(9-1) çevrimi sonucu kiriş üst başlığında artan akma olayı

Deneyde elde edilen maksimum yüke rağmen deneye devam edilmiş ve sistemin nasıl bir davranış gösterdiğine bakılmıştır. 9-2 çevriminde sisteme 99,77 mm deplasman uygulanmış ve 88 kN yük elde edilmiştir. Sistemdeki yük boşaltıldığında 59,09 mm kalıcı deformasyon elde edilmiştir. 9-1 çevriminde meydana gelen kiriş alt başlık gövdesindeki yırtılma tabandan 8 cm kadar yukarıya kadar açılmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14-a. Kiriş gövdesinde meydana gelen yırtılma



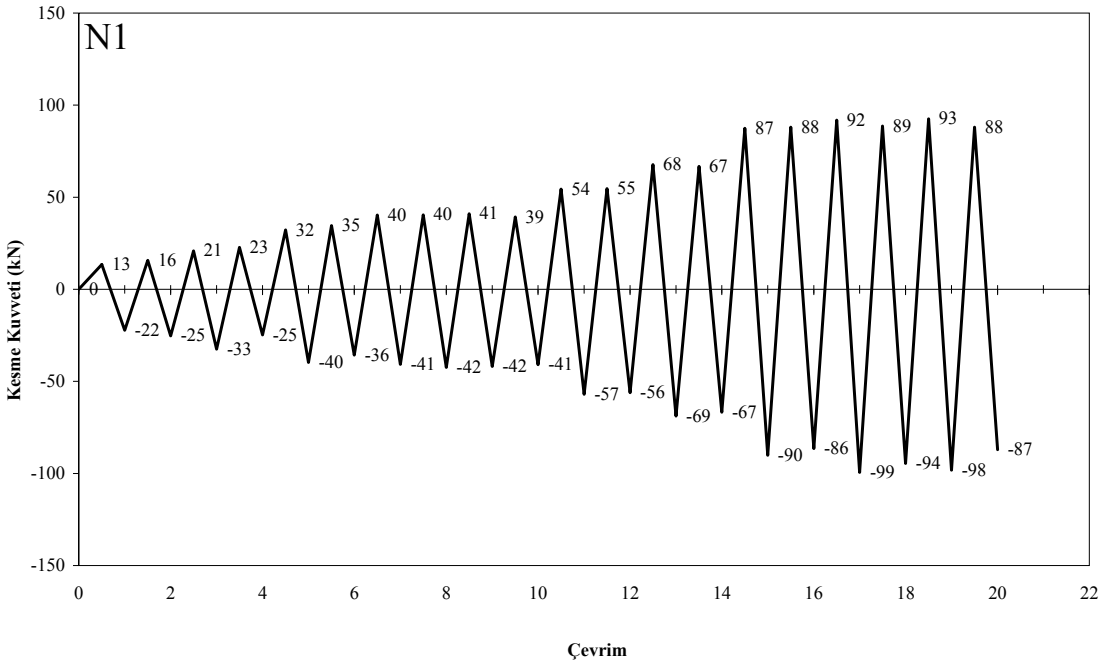
Şekil 5.14-b. 9-2 çevrimi sonrası kiriş gövdesinde meydana gelen yırtılma

-(9-2) yapılan çevrimde sisteme 109,71 mm ’lik deplasman uygulanmış, 87,06 kN yük elde edilmiştir. Yük boşaltıldığında ise 123,5 mm deplasman elde edilmiştir. Son olarak sisteme çekme doğrultusunda 120 mm ’lik deplasman uygulanmış deney sırasında Şekil 5.15 ’de görülen kiriş üst başlıktaki kaynak ayrılmış ve deneye son verilmiştir.

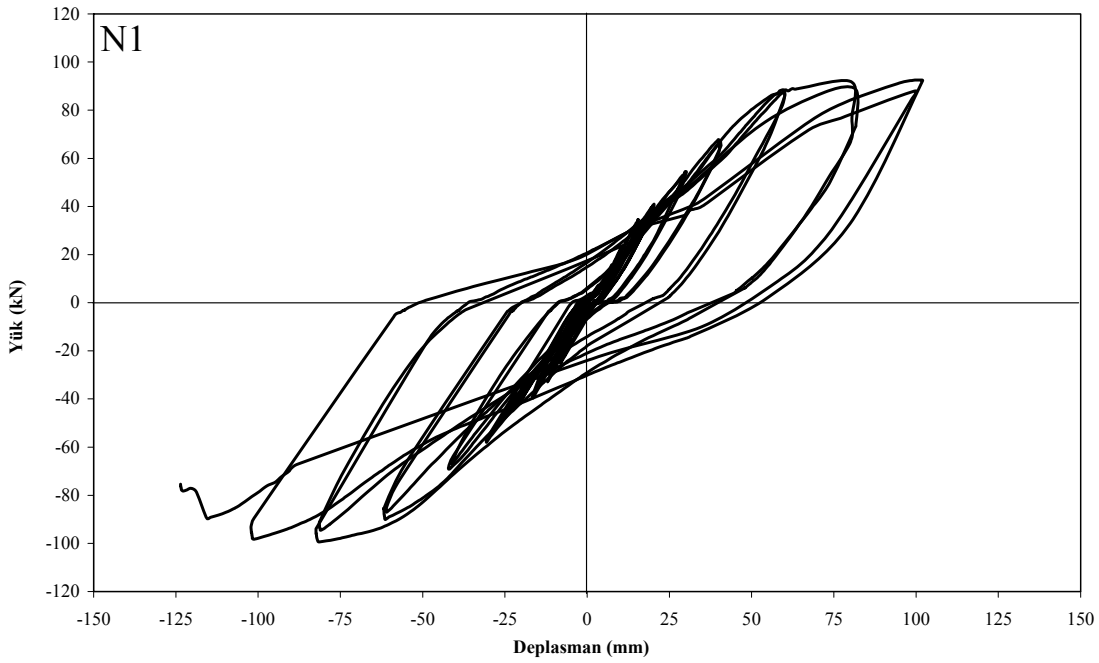


Şekil 5.15. 9-2 çevriminde kiriş üst başlığında ilerleyen kaynak ayrılması

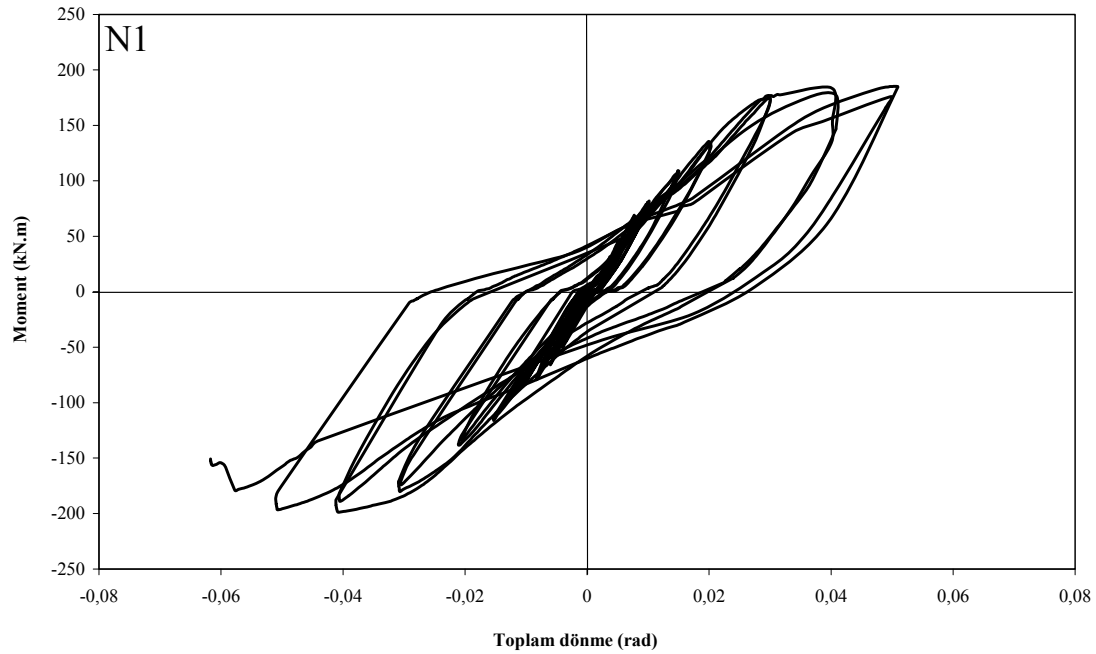
Çelik çerçeve sistemine ait yük geçmişi Şekil 5.16, yük-deplasman ilişki Şekil 5.17, moment-toplam dönme ilişkisi Şekil 5.18, dayanım zarfı Şekil 5.19, rijitlik azalımı grafiği Şekil 5.20 ve enerji tüketme kapasitesi grafiği de Şekil 5.21 ’de verilmiştir.



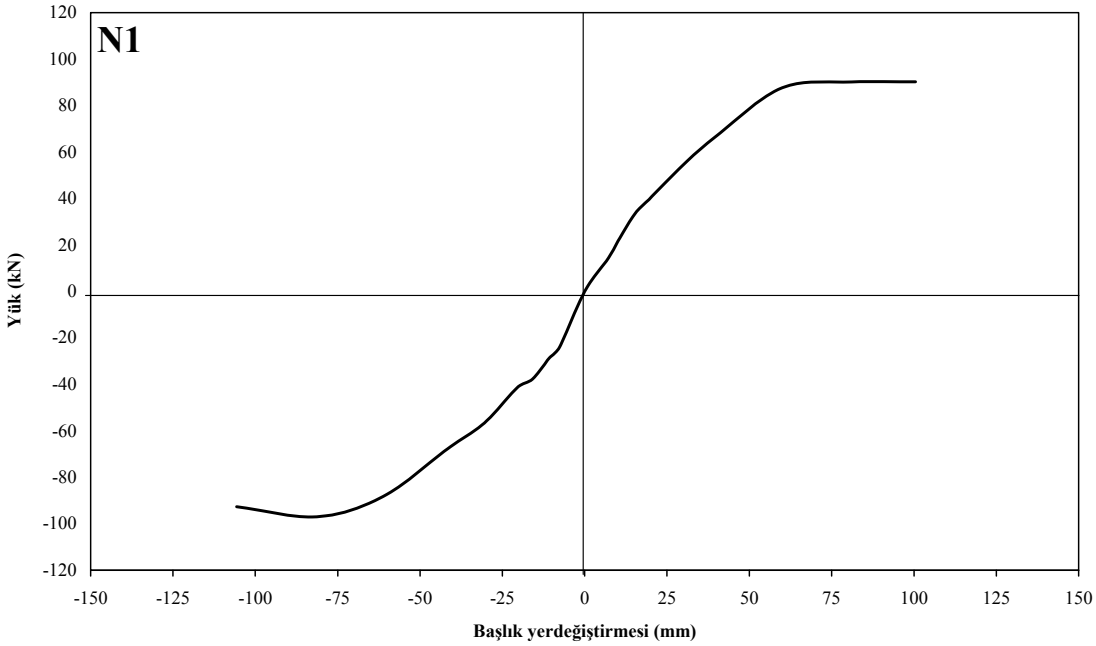
Şekil 5.16. Deney 1 (N1) için yük geçmişi



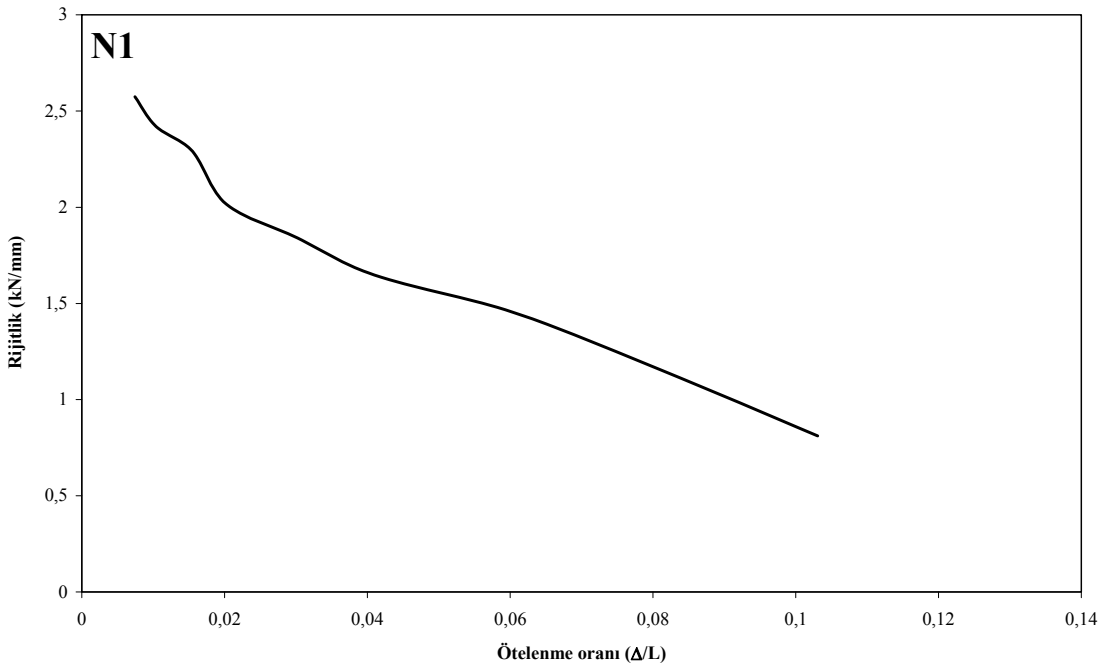
Şekil 5.17. Deney 1 (N1) için yük-deplasman ilişkisi



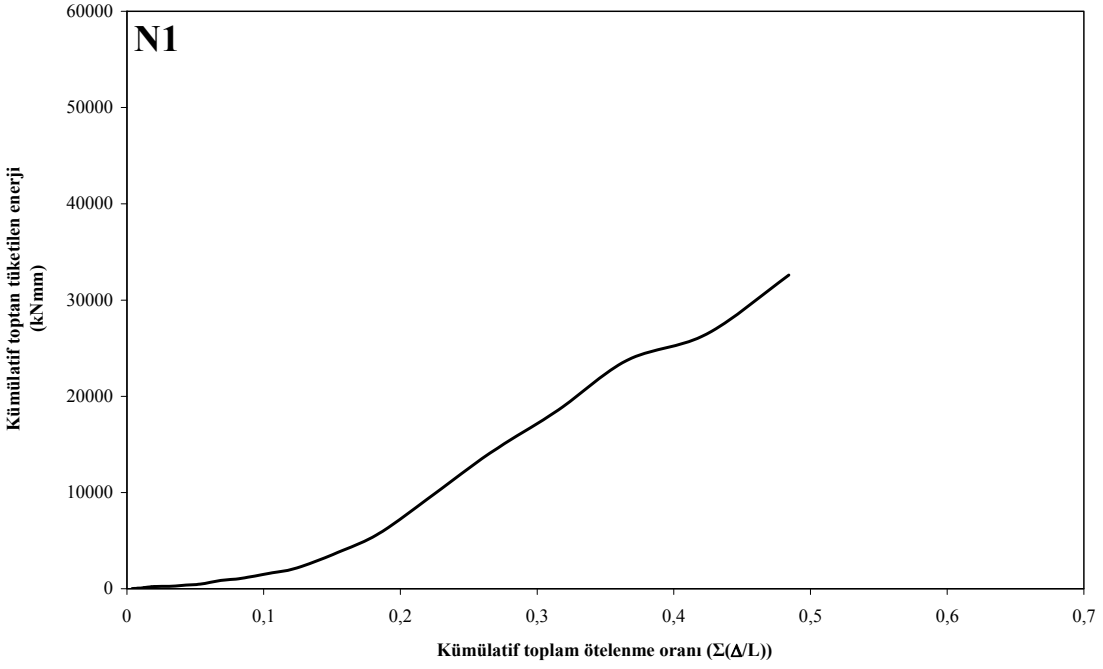
Şekil 5.18. Deney 1 (N1) için moment-toplam dönme ilişkisi



Şekil 5.19. Deney 1 (N1) için dayanım zarfı



Şekil 5.20. Deney 1 (N1) için rijitlik azalımı grafiği



Şekil 5.21. Deney 1 (N1) için enerji tüketme kapasitesi grafiği

5.1.2. Deney 2 (N2)

Deney 2 (N2) numunesindeki kirişin alt ve üst başlığında %40 oranında dairesel zayıflatma yapılması şeklinde numune üretilmiştir. DBYBHY-2007 'den alınan parametreler doğrultusunda Çizelge 5.1 'de verilen değerler elde edilmiştir. Bu parametrelerden;

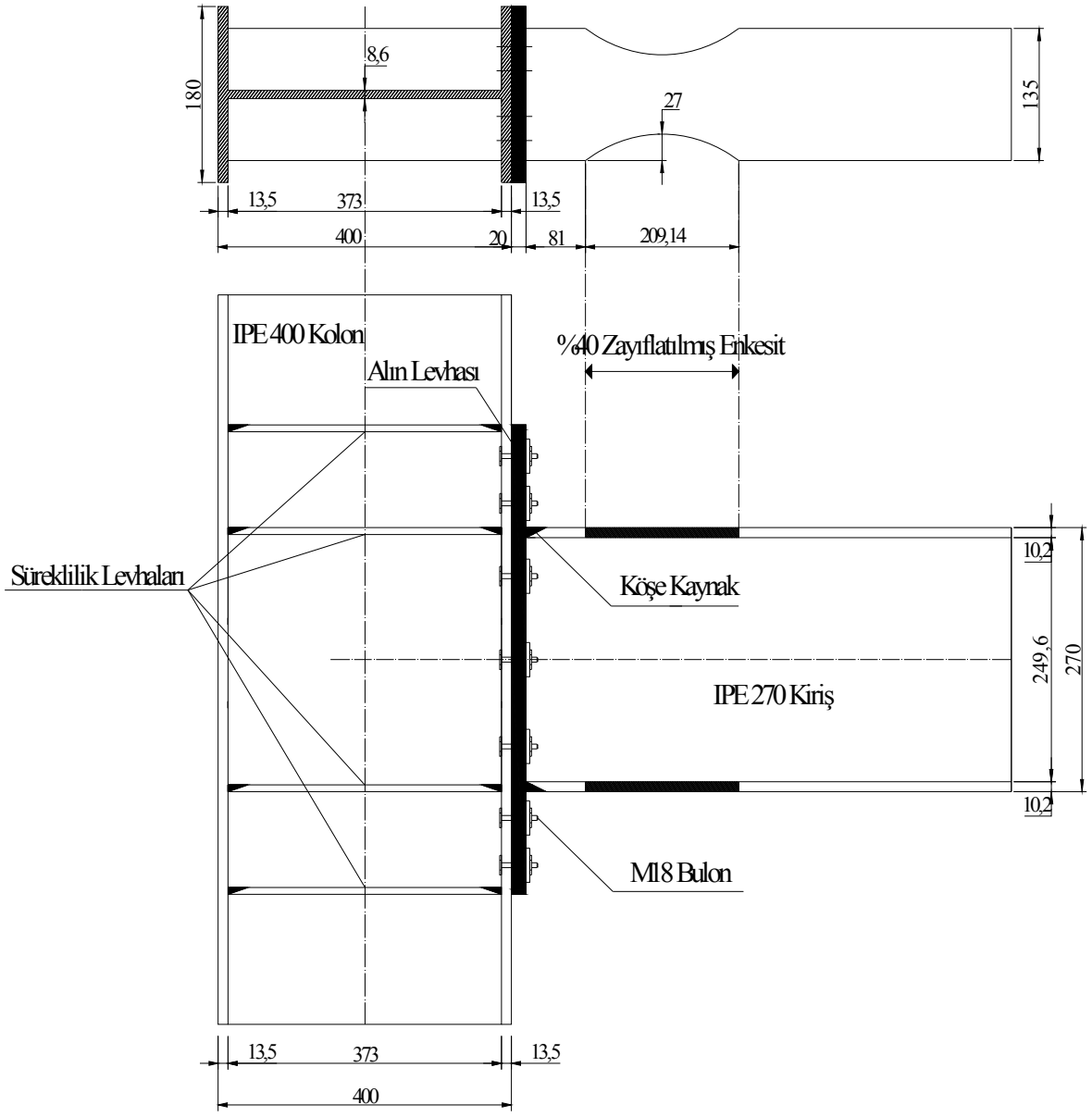
'a' değeri (0,5-0,75)×b_{bf} arasında olup, kolon yüzünden başlayıp zayıflatma yapılacak yere kadar olan mesafedir. 'a' nın minimum değeri a=0,5×135=67,5 mm, 'a' nın maksimum değeri a=0,75×135=101,25 mm 'dir. Deneylerde 'a' uzunluğu 0,6×b_{bf}=0,6×135=81 mm olarak kullanılmıştır.

'b' değeri kiriş başlığında yapılan zayıflatma mesafesidir. (0,65-0,85)×d_b arasında bir değerdir. Minimum 'b' değeri 0,65×270=175,5 mm ve maksimum 'b' değeri 0,85×270=229,5 mm 'dir. Deneylerde 'b' değeri başlıklarda yapılan kesim derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu deneyde 'c' yani kesim derinliği 0,20×b_{bf} =0,20×135=27 mm minimum değer kullanılmıştır. Autocad programı yardımıyla 'c' değerinin karşılığı olarak 'b' değeri 209,14 mm çıkmaktadır. 'r' ise kesim yarıçapı olup, r=0,80×d_b=0,80×270=216 mm kullanılmıştır. Bahsi geçen bu değerlerin tamamı özet halinde Çizelge 5.1 'de verilmektedir.

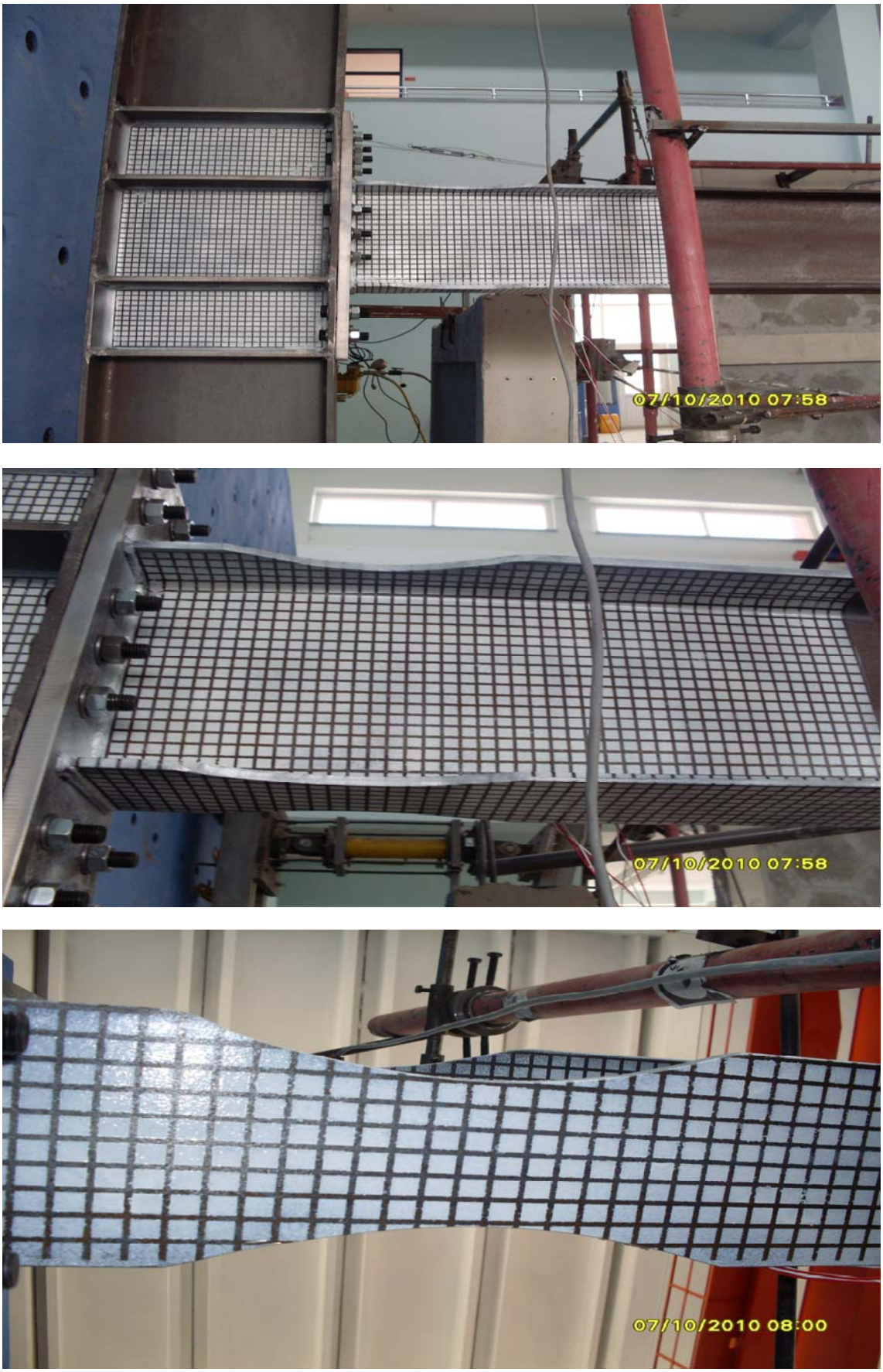
Çizelge 5.1. %40 oranında zayıflatılmış kiriş enkesiti profillerine uygulanan sayısal değerler

Geometrik Özellikler	**a = 0,5–0,75×b_{bf}**	**b = 0,65–0,85×d_b**	**c = 0,20–0,25×b_{bf}**	**r = 0,80×d_b**
Minimum Değerler (mm)	a=0,5×135=67,5	b=0,65×270=175,5	c=0,20×135=27	r=0,80×270=216
Maksimum Değerler (mm)	a=0,75×135=101,25	b=0,85×270 =229,5	c=0,25 × 135=33,75	r=0,80×270=216
Kullanılan Değerler (mm)	a=0,60×135=81	b=209,14 (c=27 mm)	c=0,20×135 =27	r=0,80×270=216

Kiriş alt ve üst başlığından %40 oranında zayıflatılmış, kolon-kiriş birleşiminde uygulanan mesafeler ve oranlar Şekil 5.22 üzerinde görülmektedir. Ayrıca deney düzeneği ve kirişte yapılan zayıflatma Şekil 5.23 'de görülmektedir.



Şekil 5.22. Deney 2 (N2) numunesi kiriş alt ve üst başlığında %40 oranında zayıflatılmış enkesit



Şekil 5.23. Deney 2 (N2) numunesi kiriş başlığında %40 oranında yapılan zayıflatma şekli

Bir önceki deney düzeneği bu deney için de kullanılacaktır. Sistemde kullanılan kolon bundan önceki deneyde herhangi bir hasara uğramadığı için aynı şekilde kalmakta, sadece kiriş kesitinde değişim yapılmıştır.

Deneye başlandığında 1-1 çevrimi gereğince sisteme ileri yükleme ile basınç doğrultusunda 7,13 mm 'lik deplasman uygulanmış ve bu deplasman değerine karşılık 14,08 kN yük elde edilmiştir. Daha sonraki aşamada sistemden yük boşaltılmış ve herhangi bir kalıcı deplasmana rastlanmamıştır. –(1-1) çevriminde ise sisteme geri yükleme ile çekme doğrultusunda 7,12 mm deplasman uygulanmış ve 10,18 kN yük elde edilmiştir. Yük boşaltıldığında 3,69 mm 'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir. İşlem tüm yükleme programınca devam etmiş ve 7-1 çevrimine kadar sistemde herhangi bir yapısal bozukluk görülmemiştir. 7-1 çevriminde Şekil 5.24 'de görüldüğü gibi sisteme basınç yönünde 59 mm değerinde deplasman uygulanmış ve 78,38 kN yük elde edilmiştir. Yük kaldırıldığında ise 18,21 mm kalıcı deplasman gözlenmiştir. Çevrim sonrasında kiriş alt başlığında deformasyon ve akma oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 5.24. 7-1 çevrimi

Devamında -(7-1) çevriminde (Şekil 5.25) sisteme çekme doğrultusunda 60,24 mm ’lik deformasyon uygulanmış, bu değere karşılık 80,22 kN yük okunmuştur. Yük boşaltıldığında sistemde 18,5 mm kalıcı deplasman oluşmuştur.

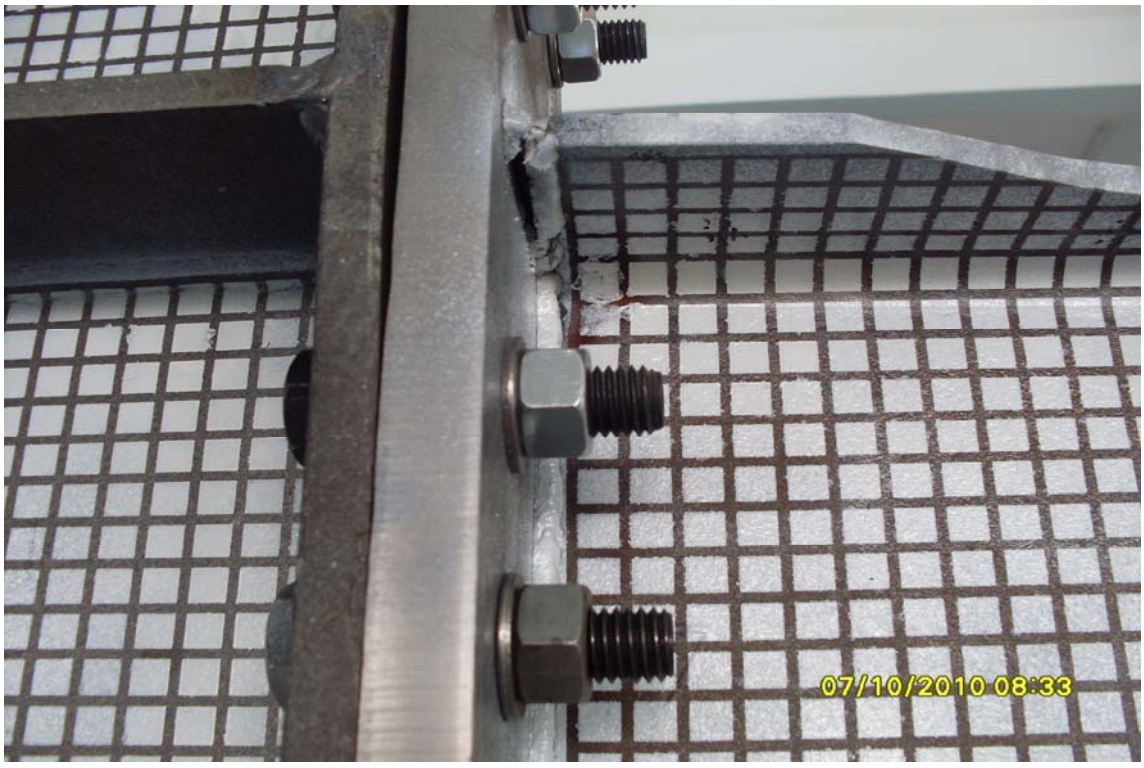
Bu çevrimin sonucunda kiriş üst başlığında Şekil 5.26 ’da görülen deformasyon oluşmuş ve başlıkta akma meydana gelmiştir. Şekil 5.27 ’de görüldüğü gibi kiriş üst başlık kaynağında da ayrılma başlamıştır.



Şekil 5.25. –(7-1) çevrimi

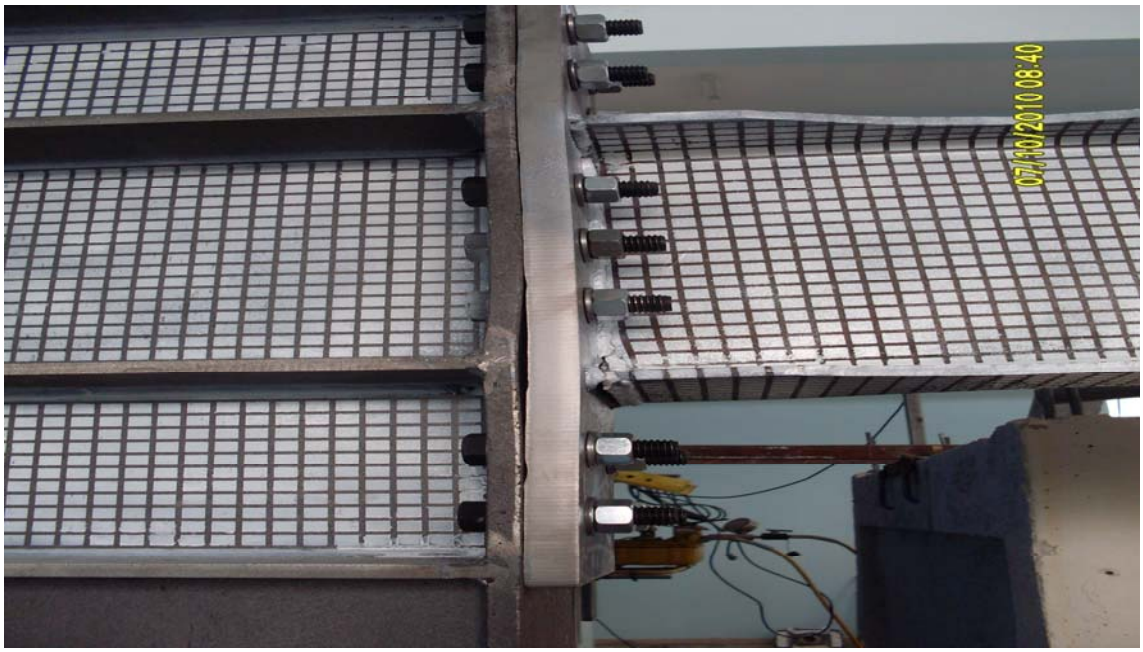


Şekil 5.26. –(7-1) çevriminde kiriş üst başlığında meydana gelen akma

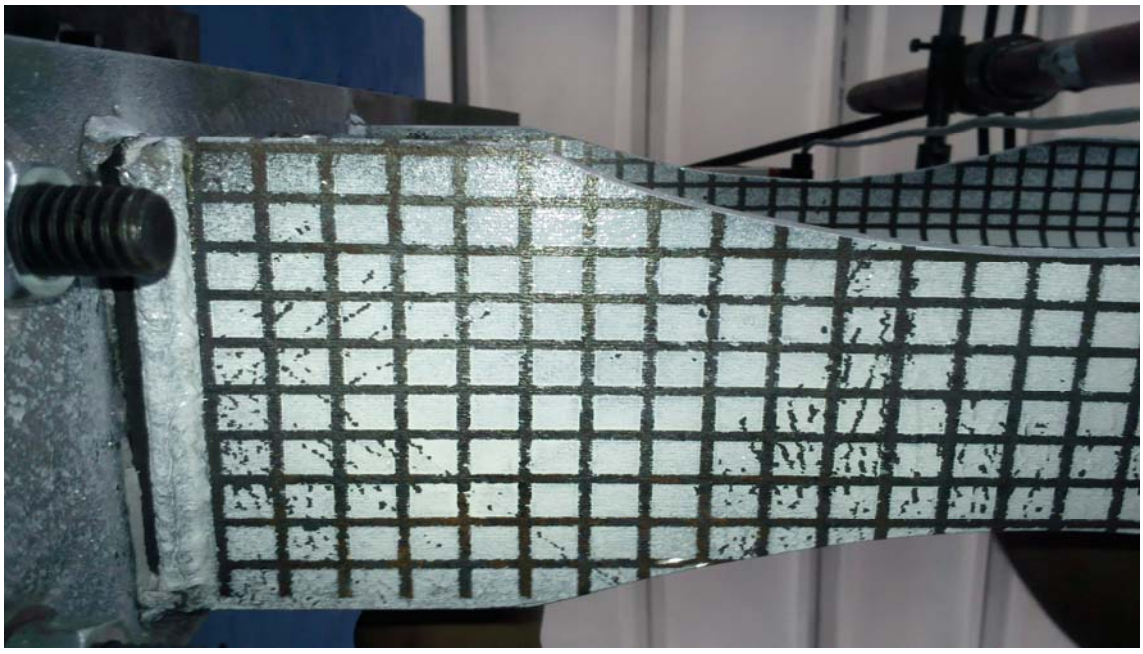


Şekil 5.27. –(7-1) çevriminde kiriş üst başlık kaynağında meydana gelen ayrılma

8-1 çevriminde sisteme basınç doğrultusunda 82,72 mm deplasman uygulanmış ve 87,25 kN yük elde edilmiştir. Sonrasında sistemde 45,25 mm kalıcı deplasmana rastlanmıştır (Şekil 5.28). Kiriş alt başlığında 7-1 çevriminde meydana gelen akma olayının Şekil 5.29 'da arttığı görülmektedir. Bu yükleme sonucu kiriş alt başlık kaynağında ayrılma meydana gelmiştir (Şekil 5.30).



Şekil 5.28. 8-1 çevriminde kiriş alt başlığında meydana gelen kalıcı deformasyon



Şekil 5.29. 8-1 çevriminde kiriş alt başlığında artan akma olayı

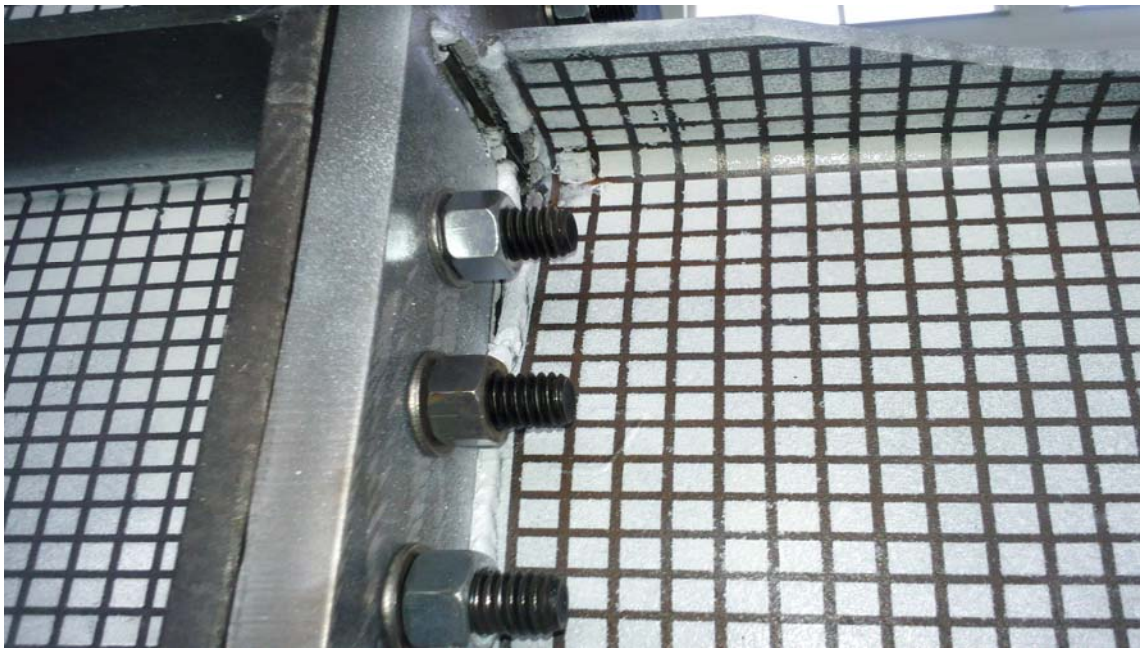


Şekil 5.30-a. Kiriş alt başlığında kaynakta ayrılma

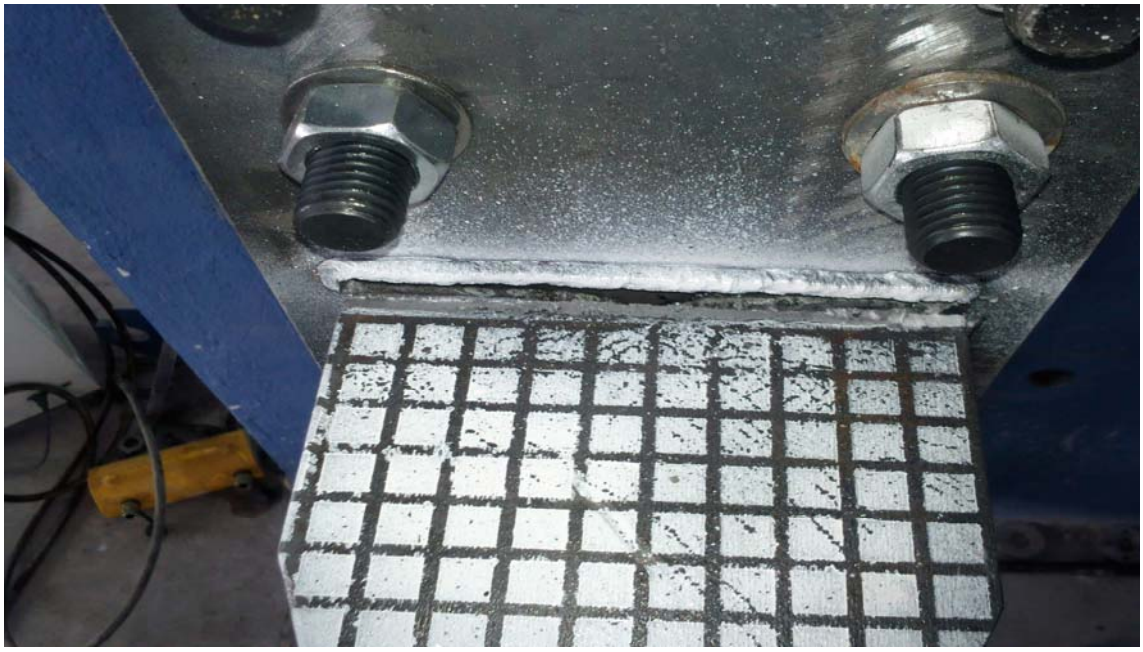


Şekil 5.30-b. 8-1 çevrimi sonunda ilerleyen kiriş alt başlık kaynağında ayrılma

-(8-1) çevriminde sisteme çekme yönünde 80,57 mm deplasman uygulanmış ve deneyde en büyük yüke ulaşılmıştır. Bu değer 91,17 kN 'dur. Sistemden boşaltılan yükün sonucunda 29,94 mm 'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir. Kiriş üst başlığında –(7-1) çevriminde meydana gelen kaynak çatlağı büyümüştür (Şekil 5.31).



Şekil 5.31-a. Kiriş üst başlığında kaynak ayrılması

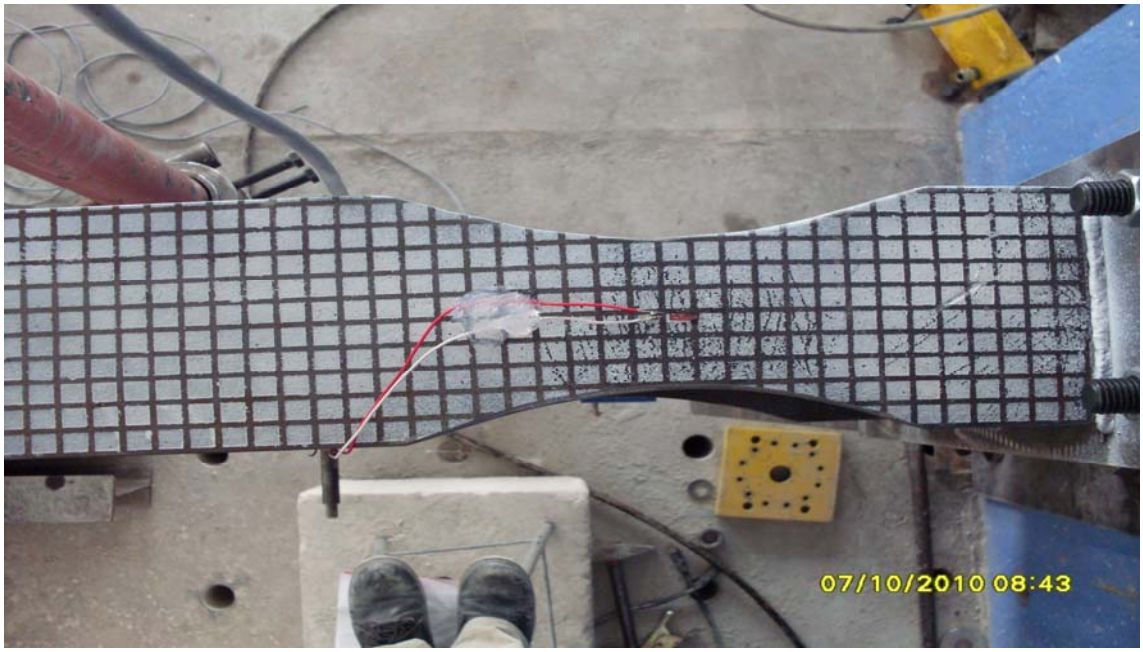


Şekil 5.31-b. –(8-1) çevriminde kiriş üst başlığında büyüyen kaynak ayrılması

Daha sonra 8-2 çevrimine başlanılmış, sisteme basınç yönünde uygulanan 82 mm deplasman değerine karşılık 83,71 kN yük elde edilmiştir. Sistemden kaldırılan yükün sonrasında 45,02 mm 'lik kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Gövdenin üst başlığı tarafına doğru hafif burkulma olmuştur (Şekil 5.32).

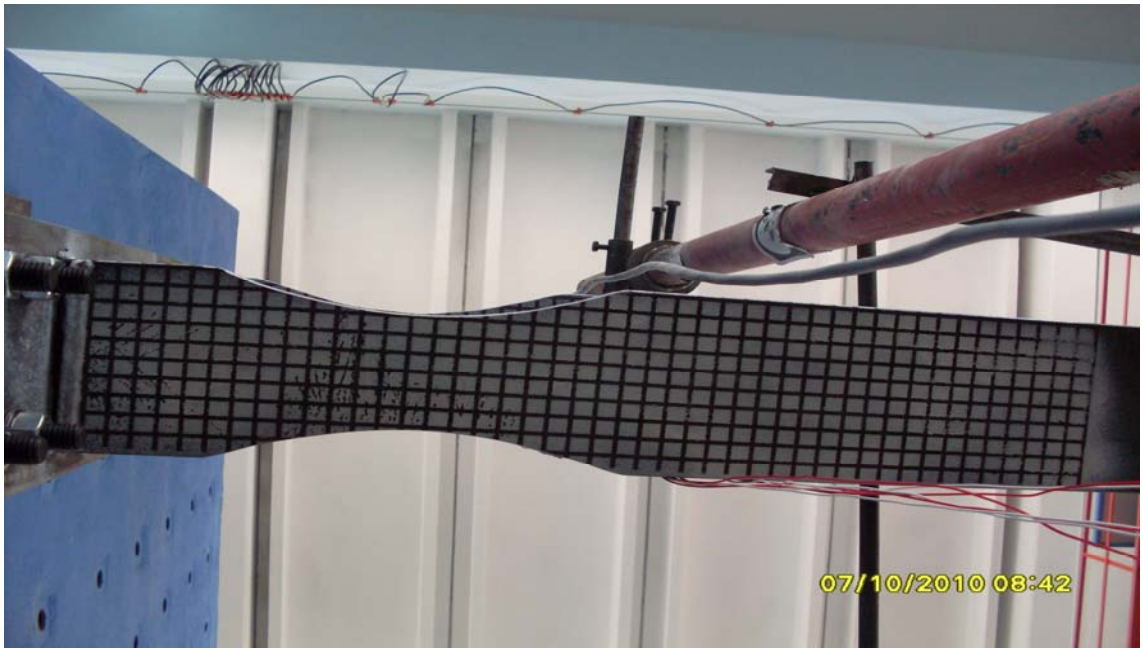


Şekil 5.32-a. Kiriş üst başlık burkulması



Şekil 5.32-b. 8-2 çevrimi sonucu meydana gelen üst başlık burkulması

-(8-2) çevriminde sisteme çekme doğrultusunda 80,15 mm değerinde deplasman uygulanmış ve 78,17 kN yük elde edilmiştir. Daha sonra sistemden yük kaldırılmış ve sonrasında 27,2 mm 'lik kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Bu kez kiriş gövdesinin alt başlığı tarafına doğru hafif burkulma olmuştur (Şekil 5.33).



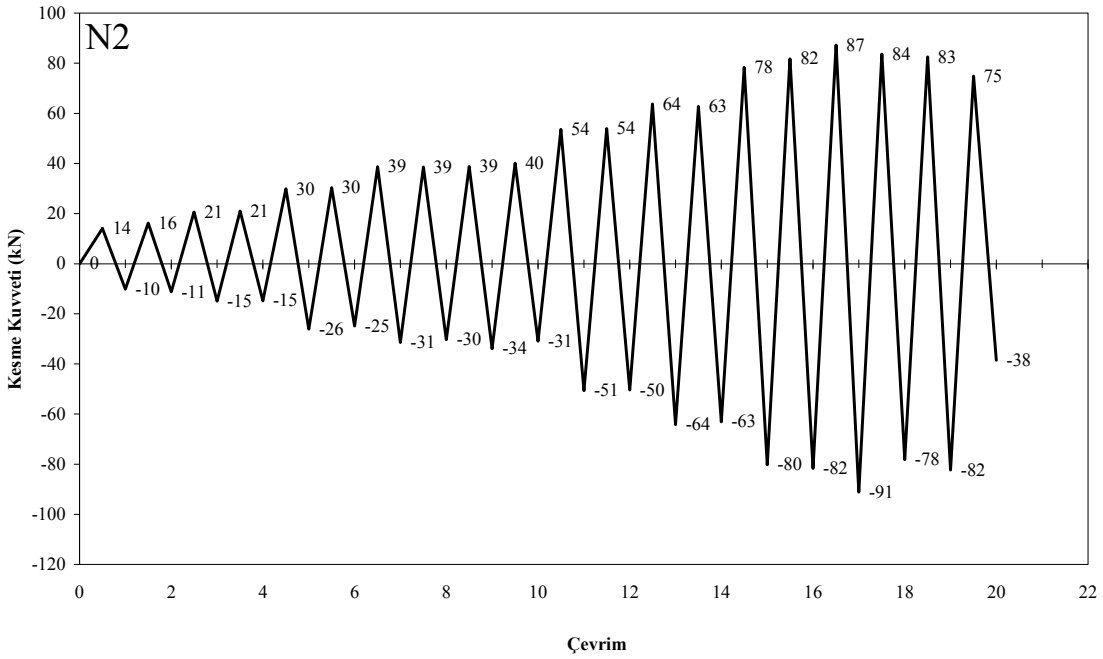
Şekil 5.33-a. Kiriş alt başlık burkulması



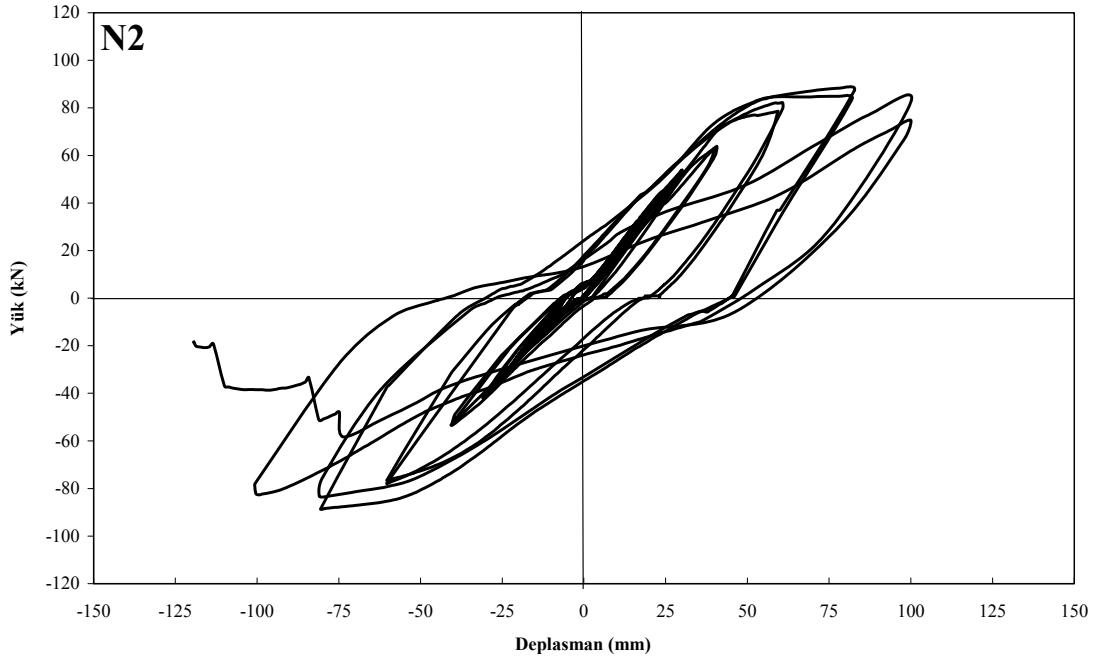
Şekil 5.33-b. -(8-2) çevrimi sonucu meydana gelen kiriş alt başlık burkulması

Sonrasında yükleme programına uygun olarak deneye devam edilmiştir. Sisteme 9-1 ve –(9-1) çevrimlerinde sırası ile 100 mm ve 100,35 mm ’lik deplasman uygulanmış ve 82,5 ve 82,25 kN yük, 63,02 ve 42,56 mm ’lik kalıcı deplasman değerleri elde edilmiştir. Devamında 9-2 çevriminde sisteme 100 mm değerinde deplasman uygulanmış ve 74,80 kN yük değerine ulaşılmıştır. Sistemden boşaltılan yükün sonrasında 79,27 mm kalıcı deplasman değeri ölçülmüştür. Son çevrim olan –(9-2) ’de görülen, sistemin artık yük almamaya başladığı ve kalıcı deplasman değerinin büyüdüğüdür. –(9-2) ’de ise 100,58 mm ’lik deplasman değerine karşılık sistemden 38,48 kN yük ve 119,36 mm kalıcı deplasman değerine okunmuştur. Artık sistem yük almamaya ve kalıcı deformasyon değerleri büyümeye başladığından deneye son verilmiştir.

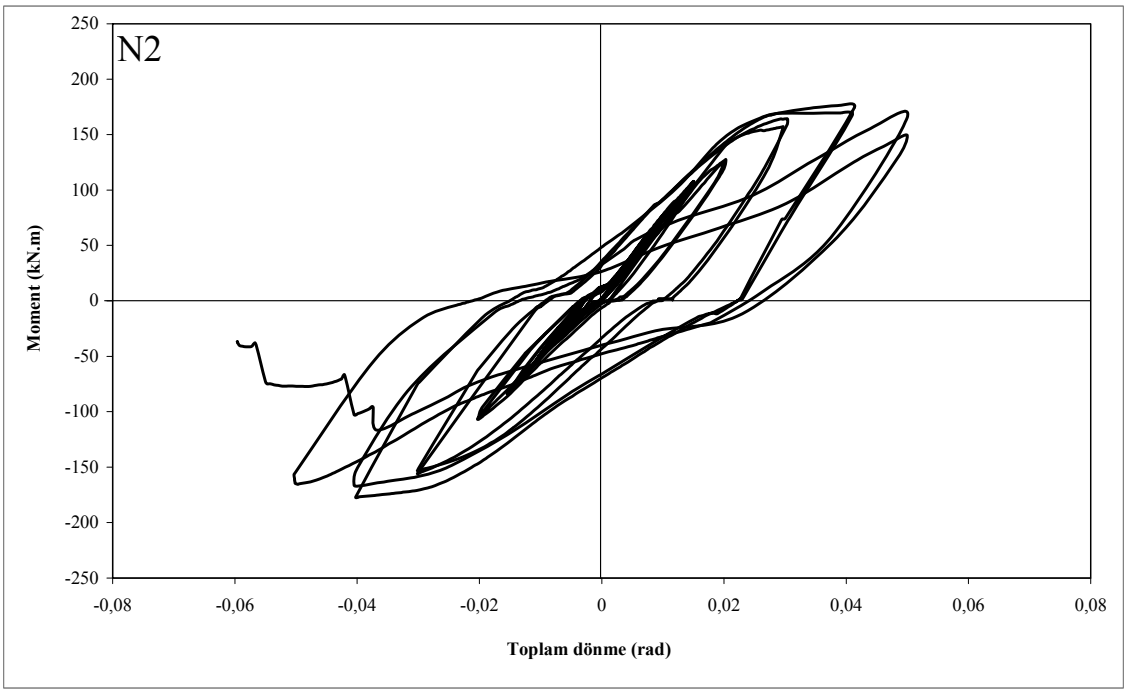
Çelik çerçeve sistemine ait yük geçmişi Şekil 5.34, yük-deplasman ilişki Şekil 5.35, moment-toplam dönme ilişkisi Şekil 5.36, dayanım zarfı Şekil 5.37, rijitlik azalımı grafiği Şekil 5.38 ve enerji tüketme kapasitesi grafiği de Şekil 5.39 ’da verilmiştir.



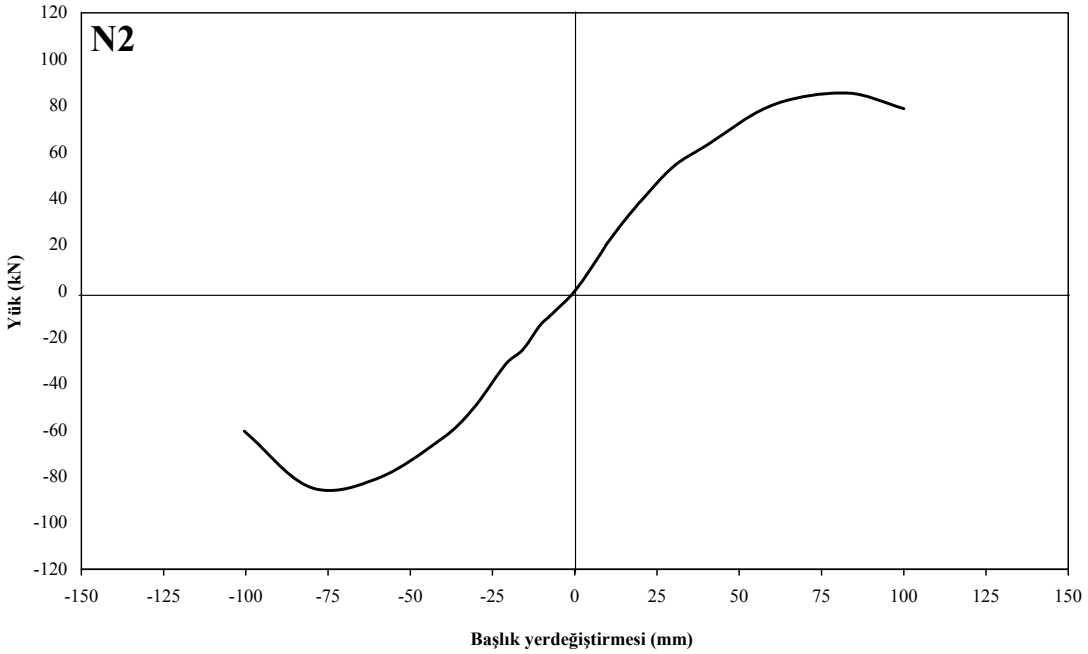
Şekil 5.34. Deney 2 (N2) için yük geçmişi



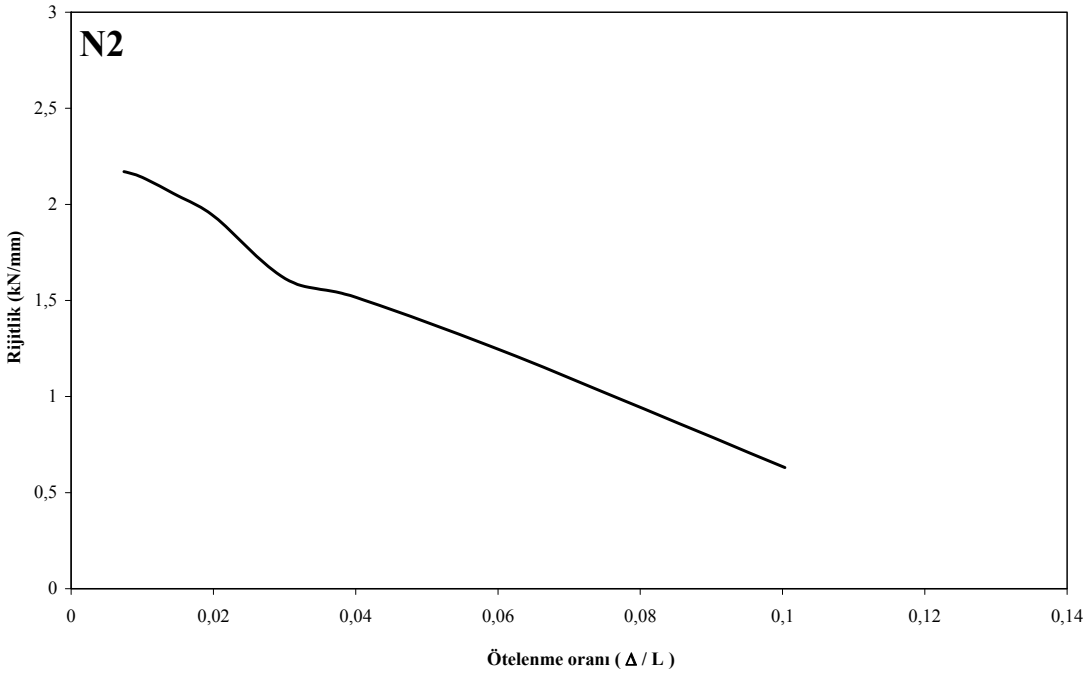
Şekil 5.35. Deney 2 (N2) yük-deplasman ilişkisi



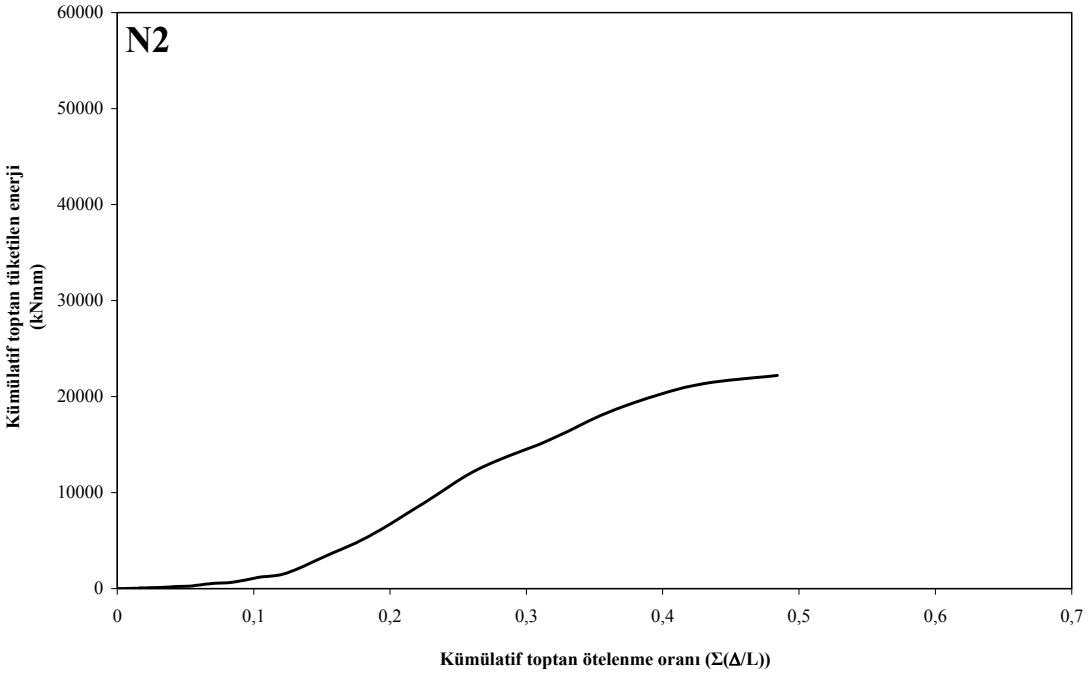
Şekil 5.36. Deney 2 (N2) için moment-toplam dönme ilişkisi



Şekil 5.37. Deney 2 (N2) için dayanım zarfı



Şekil 5.38. Deney 2 (N2) için rijitlik azalımı grafiği



Şekil 5.39. Deney 2 (N2) için enerji tüketme kapasitesi grafiği

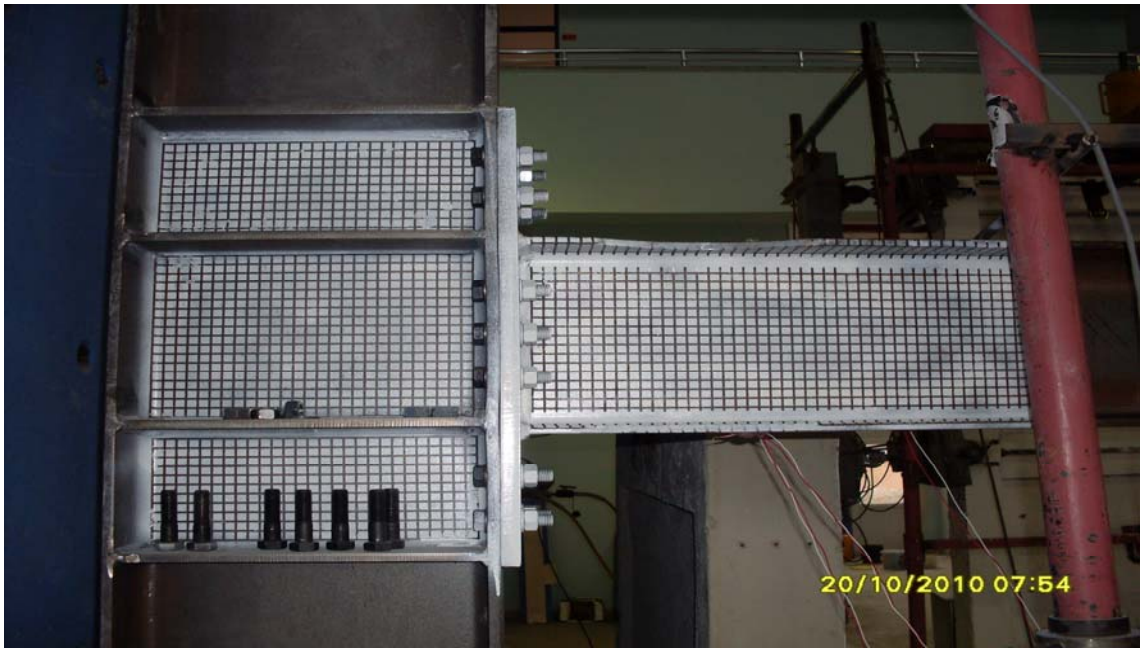
5.1.3. Deney 3 (N3)

Deney 3 (N3) numunesindeki kirişin alt ve üst başlığında %45 oranında dairesel zayıflatma yapılması şeklinde numune üretilmiştir. Kiriş alt ve üst başlığında dairesel olarak yapılan zayıflatmanın değerleri Çizelge 5.2 ’de verilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.40 ’da görülmektedir.

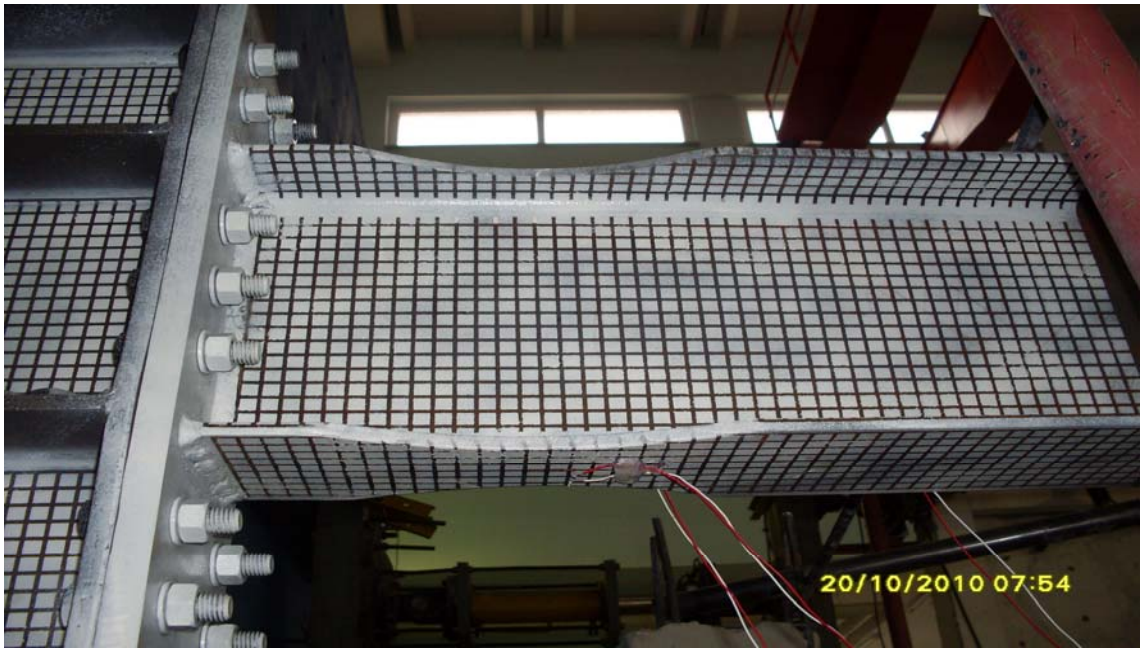
Çizelge 5.2. % 45 oranında zayıflatılmış kiriş enkesiti profillerine uygulanan sayısal değerler

Geometrik Özellikler	**a = 0,5–0,75×b_{bf}**	**b = 0,65–0,85×d_b**	**c = 0,20–0,25× b_{bf}**	**r = 0,80× d_b**
Minimum Değerler (mm)	a=0,5×135=67,5	b=0,65×270=175,5	c=0,20×135=27	r=0,80×270=216
Maksimum Değerler (mm)	a=0,75×135=101,25	b=0,85×270=229,5	c=0,25×135=33,75	r=0,80×270=216
Kullanılan Değerler (mm)	a=0,60×135=81	b=220,9(c=30,375 mm)	c=0,225×135=30,375	r=0,80×270=216

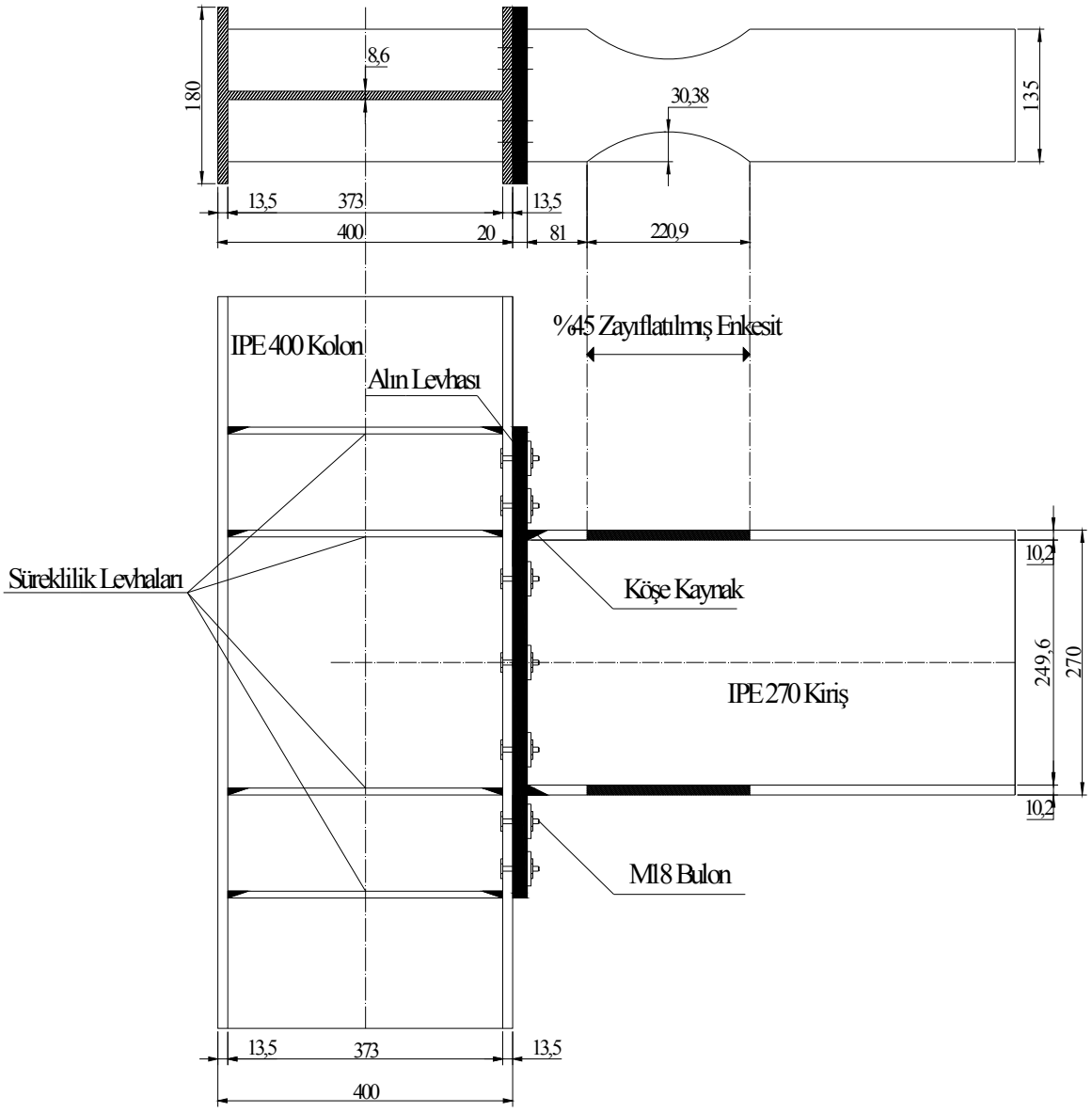
Deneyde kullanılan kesit detayları Şekil 5.41 ’de görülmektedir. %40 oranında yapılan zayıflatma deneyinde kullanılan ‘a’ ve ‘r’ değerleri bu deney içinde aynıdır. Değişken olan kesim derinliği ‘c’ ve kiriş başlığında yapılan zayıflatma miktarı ‘b’ değeridir.



Şekil 5.40-a. Deney düzeneği

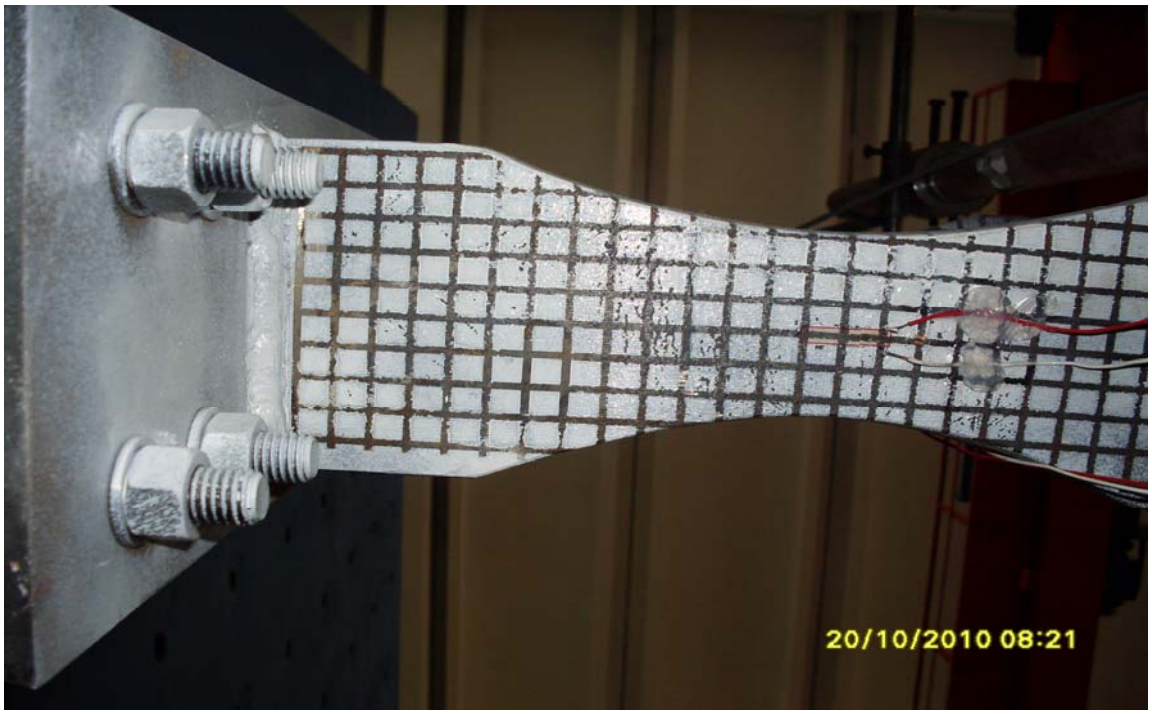


Şekil 5.40-b. Kirişte %45 oranında dairesel kesim ile zayıflatma yapılan deney düzeneği



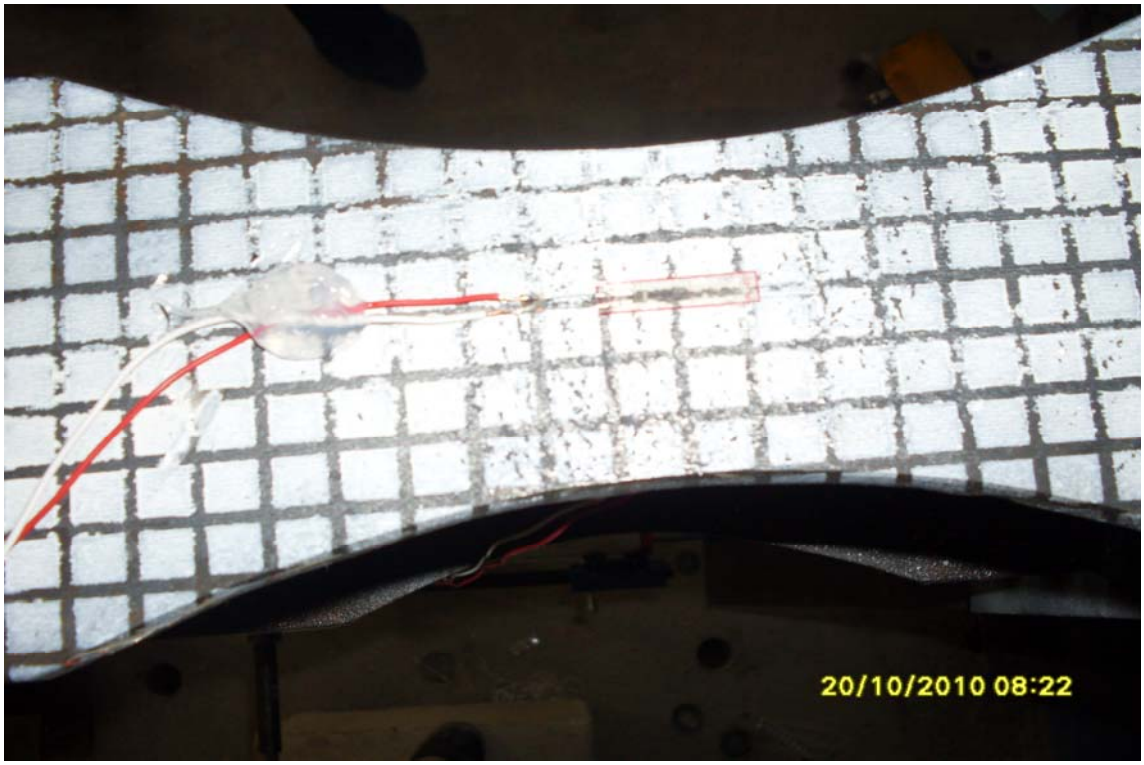
Şekil 5.41. Deney 3 (N3) kiriş alt ve üst başlığında %45 oranında zayıflatılmış enkesit detayı

Deney yükleme programına uygun olarak yapılmaya başlanmıştır. İlk olarak 1-1 çevrimi için sisteme ileri yükleme ile basınç doğrultusunda 7,5 mm deplasman uygulanmış ve 6,5 kN yük değerine ulaşılmıştır. Yük kaldırıldığında herhangi bir kalıcı deplasman değerine rastlanmamıştır. –(1-1) çevriminde sisteme geri yükleme ile çekme doğrultusunda 7,5 mm 'lik deplasman uygulanmış ve 10 kN yük elde edilmiştir. Yük etkisi ortadan kaldırıldığında sistemde kalıcı deplasman oluşmamıştır. Tüm yükleme programı boyunca bu işlem devam etmiş, 6-2 çevrimine kadar sistemde yapısal bir bozukluk oluşmamıştır. 6-2 çevriminde basınç doğrultusunda 40,48 mm 'lik deplasman değerine karşılık sistemde 63,12 kN yük elde edilmiştir. Sistemden kaldırılan yük neticesinde 7,01 mm 'lik kalıcı deplasman değeri elde edilmiştir. –(6-2) çevriminde sisteme çekme doğrultusunda 40,90 mm deplasman uygulanmış, buna karşılık 58,87 kN yük ölçülmüştür. Sistemdeki yük boşaltılmış ve 16,78 mm 'lik kalıcı deplasman oluşmuştur. 7-1 çevriminde ise, 60,36 mm 'lik yatay deplasmana karşılık 73,81 kN değerinde yük değerine ulaşılmış, yük boşaltıldığında 20,65 mm kalıcı deplasman gözlenmiştir (Şekil 5.42). Ayrıca bu çevriminde kiriş alt bölgesinde burkulmanın başladığı gözlenmiştir. –(7-1) çevriminde sisteme çekme doğrultusunda 60,87 mm deplasman uygulanmış ve bu değere karşılık 69,07 kN yük elde edilmiştir. Sistemden kaldırılan yükün ardından 13,14 mm kalıcı deplasmana rastlanmıştır.



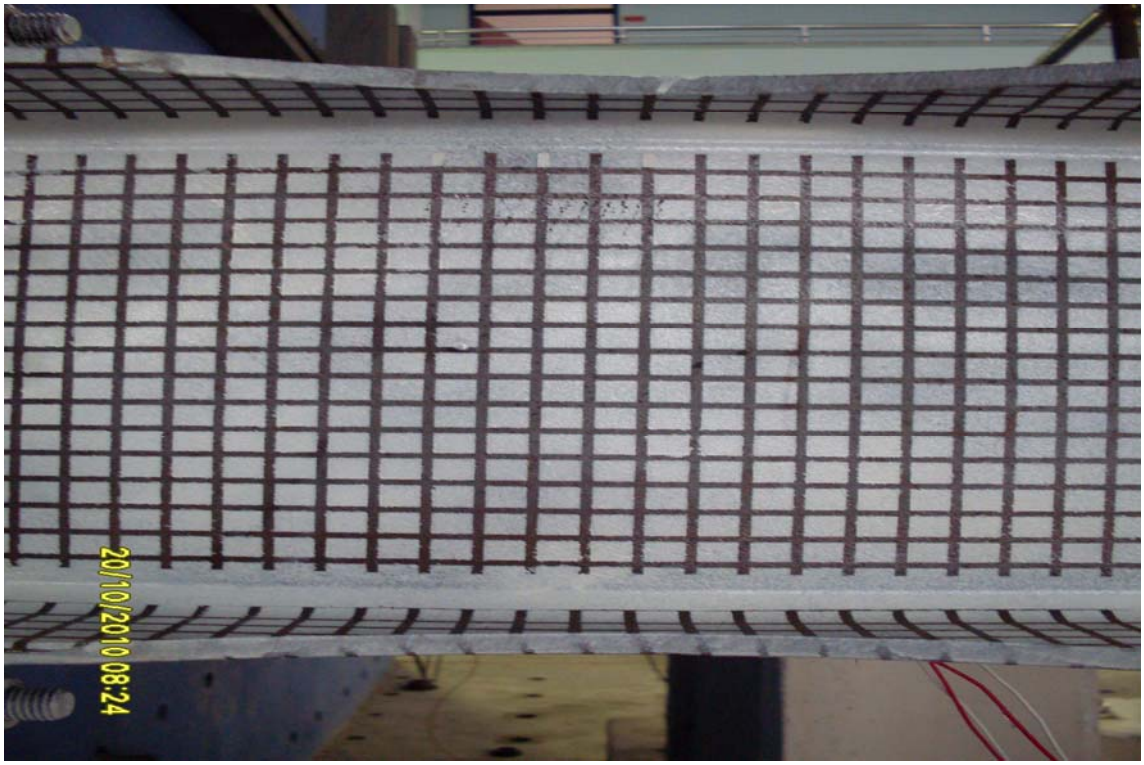
Şekil 5.42. 7-1 çevriminde kiriş alt başlığında meydana gelen deformasyon

7-2 çevrimine başlandığında sisteme basınç doğrultusunda 59,36 mm 'lik deplasman uygulanmış ve 77,31 kN yük elde edilmiştir. Sistemden yük kaldırıldığında 19,26 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür. –(7-2) çevriminde sisteme 60,67 mm deplasman uygulanmış, 70,19 kN yük elde edilmiş ve kalıcı deplasman miktarı 32,97 mm 'dir (Şekil 5.43).

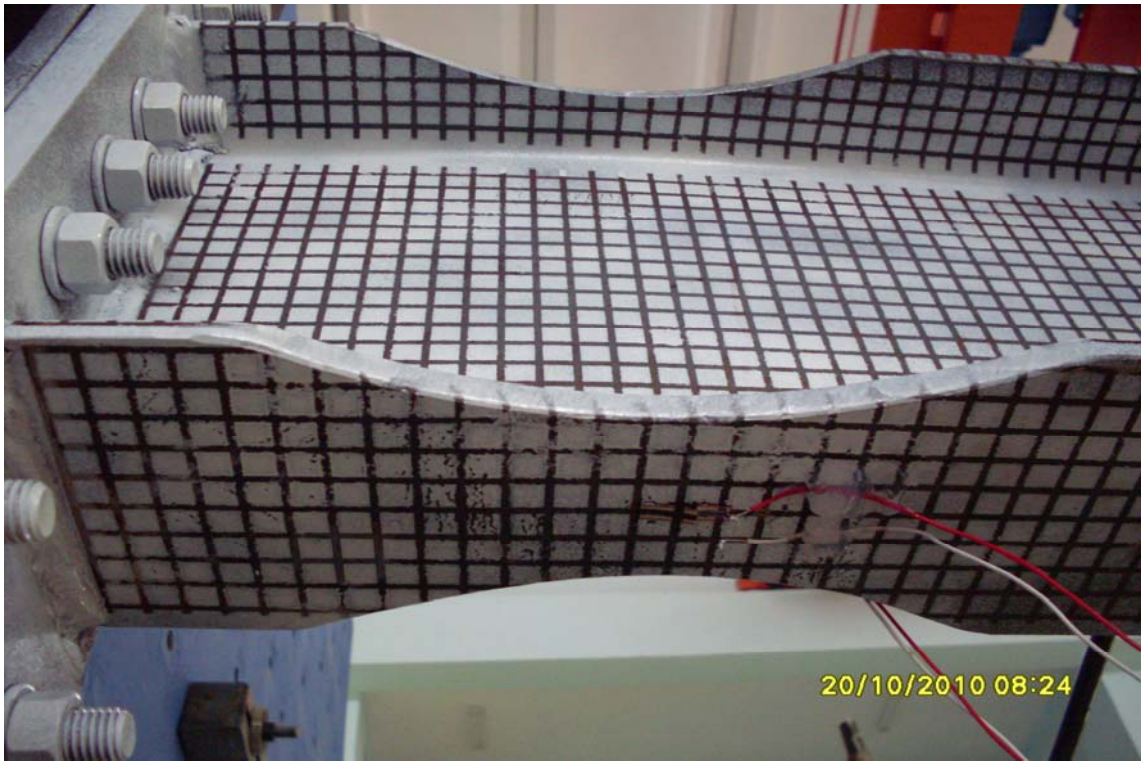


Şekil 5.43. –(7-2) çevriminde kiriş alt başlığında meydana gelen deformasyon

-(7-2) çevriminde kiriş gövdesi basınç bölgesinde deformasyonun başladığı Şekil 5.44 'da görülmektedir. 7-1 çevrimi sonucu kiriş alt başlığında meydana gelen burkulma daha ileri boyuta geçmiştir (Şekil 5.45).



Şekil 5.44. –(7-2) çevriminde kiriş gövdesinde oluşan deformasyon

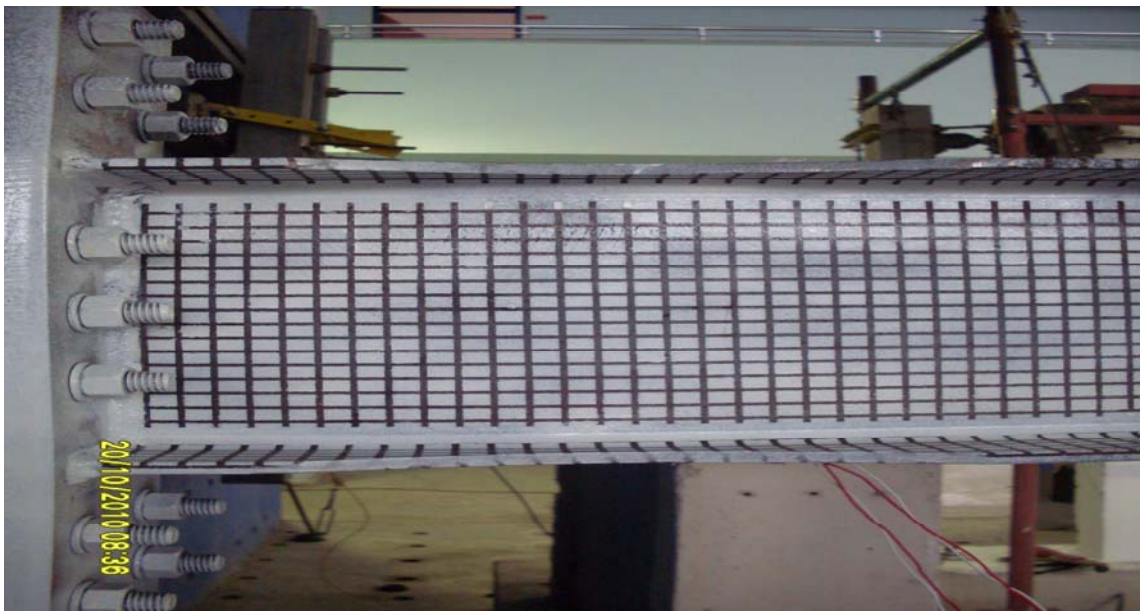


Şekil 5.45. –(7-2) çevrimi sonucu kiriş alt başlığında oluşan burkulma

Yükleme programına uygun olarak yapılan işlemde, sıra 8-1 çevrimindedir. Sisteme basınç doğrultusunda verilen 80,24 mm 'lik deplasman değerine karşılık, 81,75 kN yük elde edilmiştir. Sistemde ki yük boşaltıldığında 37,22 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. 8-1 çevriminde kiriş alt başlığında (Şekil 5.46) ve daha önceki çevrimlerde kiriş basınç bölgesinde (Şekil 5.47) oluşan deformasyon miktarı artmıştır.



Şekil 5.46. 8-1 çevrimi sonucu kiriş alt başlığında artan deformasyon



Şekil 5.47. 8-1 çevrimi sonucu kiriş gövdesinde artan deformasyon

-(8-1) çevriminde sisteme 81,25 mm deplasman uygulanmış ve 76,22 kN yük elde edilmiştir. Sistemdeki yük boşaltıldığında 30,63 mm kalıcı deplasman değeri elde edilmiştir. Bu yüklemede kiriş üst başlık bölgesinde kaynakta çatlama meydana gelmiştir (Şekil 5.48).



Şekil 5.48. –(8-1) çevrimi sonucu kiriş üst başlığında oluşan kaynak çatlağı

8-2 çevrimini gereğince sisteme basınç doğrultusunda 80,22 mm 'lik deplasman uygulanmış ve bu deplasman değerine karşılık 83,47 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu deney için en büyük yük değeri olan 83,47 kN bu çevrimde elde edilmiştir. Sistemdeki yük boşaltıldığında 36,32 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür. Bu yükleme seviyesinden sonra sistemin yük almamaya başlaması gerekmektedir. Fakat 10-1 çevrimine kadar sistemdeki yük miktarında fazla bir düşüş olmamıştır.

Daha sonra –(8-2) çevriminde sisteme çekme doğrultusunda 81,60 mm 'lik deplasman uygulanmış ve 76,47 kN yük elde edilmiştir. Sistemdeki yükün boşaltılmasından sonra 49,05 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür. Bu çevrim sonucunda Şekil 5.49 'da görüldüğü gibi kesit gövdesinin en zayıf olduğu noktada bombeleşme meydana gelmiştir. Ayrıca kiriş gövdesi basınç bölgesinde lokal burkulma başlamıştır (Şekil 5.50). Basınç bölgesinde çekmede akma, basınçta burkulma meydana gelmiştir (Şekil 5.51).



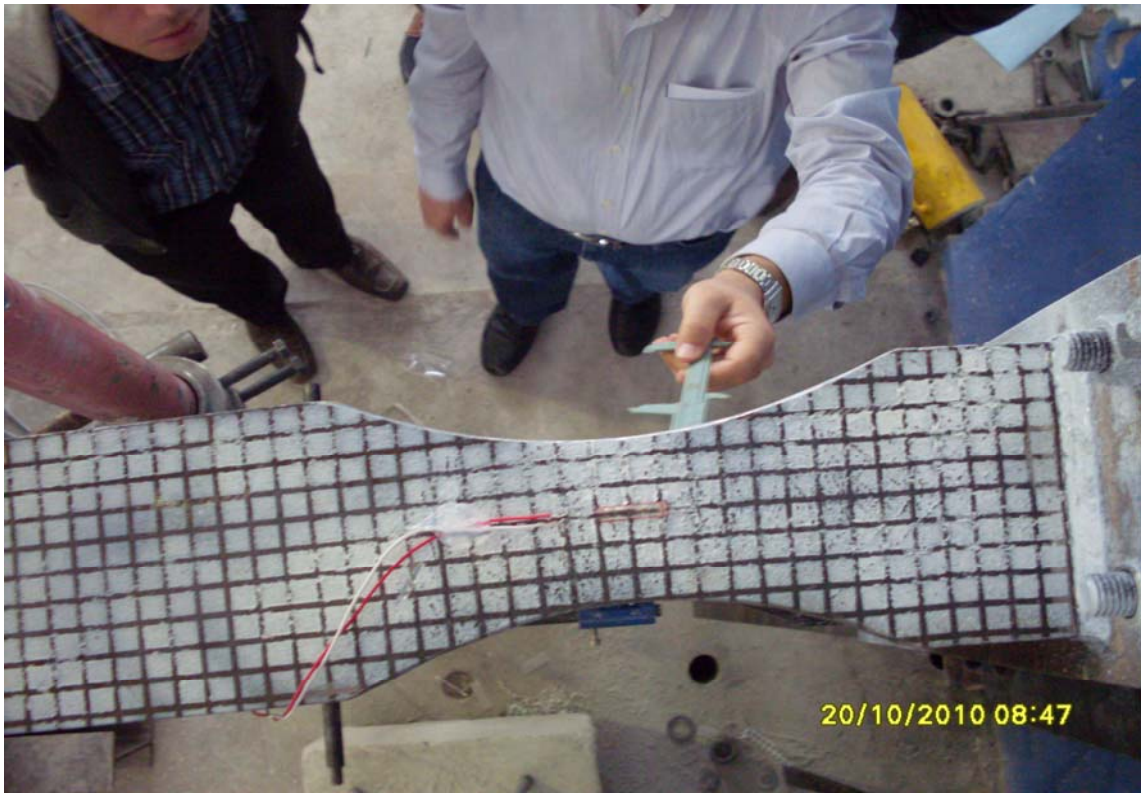
Şekil 5.49-a. Kiriş gövdesinde bombeleşme



Şekil 5.49-b. –(8-2) çevrimi sonucu kiriş gövdesinde meydana gelen bombeleşme



Şekil 5.50. –(8-2) çevriminde kiriş gövdesinde meydana gelen lokal burkulma



Şekil 5.51. –(8-2) çevriminde kiriş üst başlığında artan akma

Sistem hala yük almaya devam etmekte olduğundan 9-1 çevriminde sisteme 100,09 mm deplasman uygulanmış ve 83,18 kN yük değerine ulaşılmıştır. Sistemdeki yük boşaltıldığında 51,11 mm 'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir. Bu çevrimde –(8-2) çevriminde kiriş gövdesinde oluşan bombeleşmenin tarafsız eksenin üst tarafında olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.52).



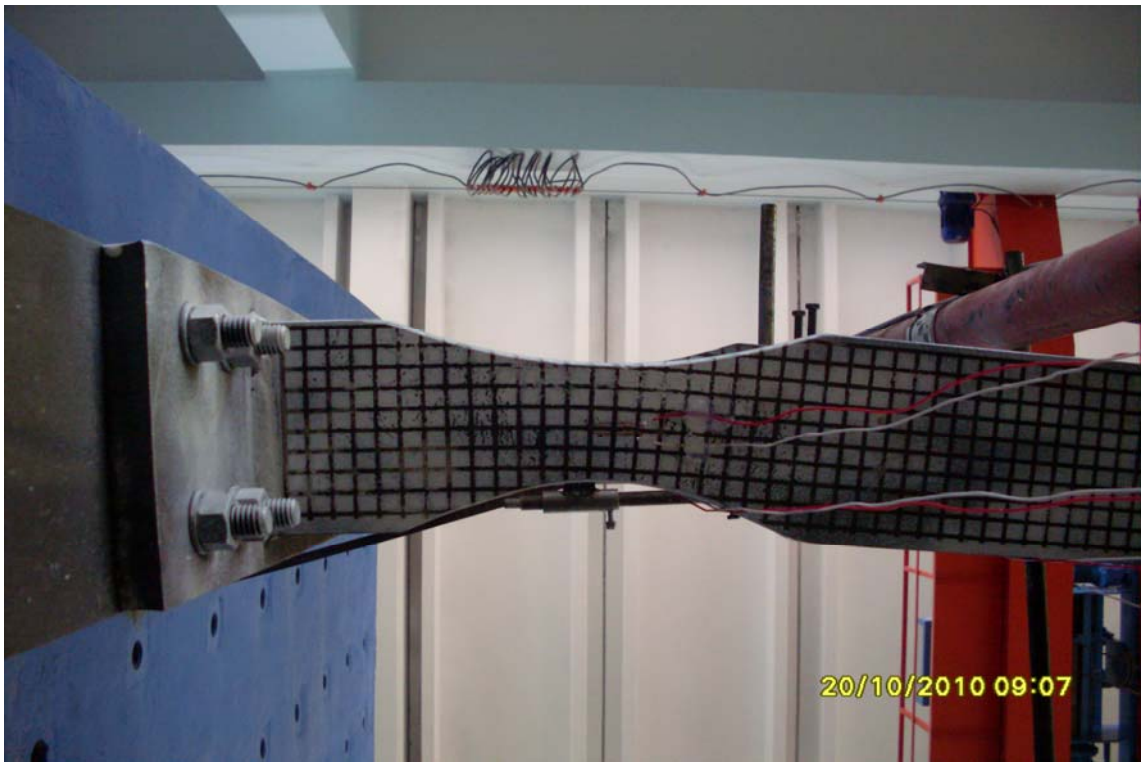
Şekil 5.52. 9-1 çevriminde kiriş gövdesinde artan bombeleşme

-(9-1) çevrimine başlanmış ve sisteme çekme doğrultusunda 100,55 mm deplasman verilmiş, bu değere karşılık 72,73 kN yük elde edilmiştir. Yük etkisi ortadan kaldırıldığında kalıcı deplasman miktarı 47,89 mm 'dir. Şekil 5.53 'den kiriş gövdesinde oluşan bombeleşme daha net görülebilmektedir. Ayrıca kiriş üst başlık kaynağında açılma gözlenmiştir.



Şekil 5.53. –(9-1) çevrimi sonunda kiriş gövdesinde artan bombeleşme

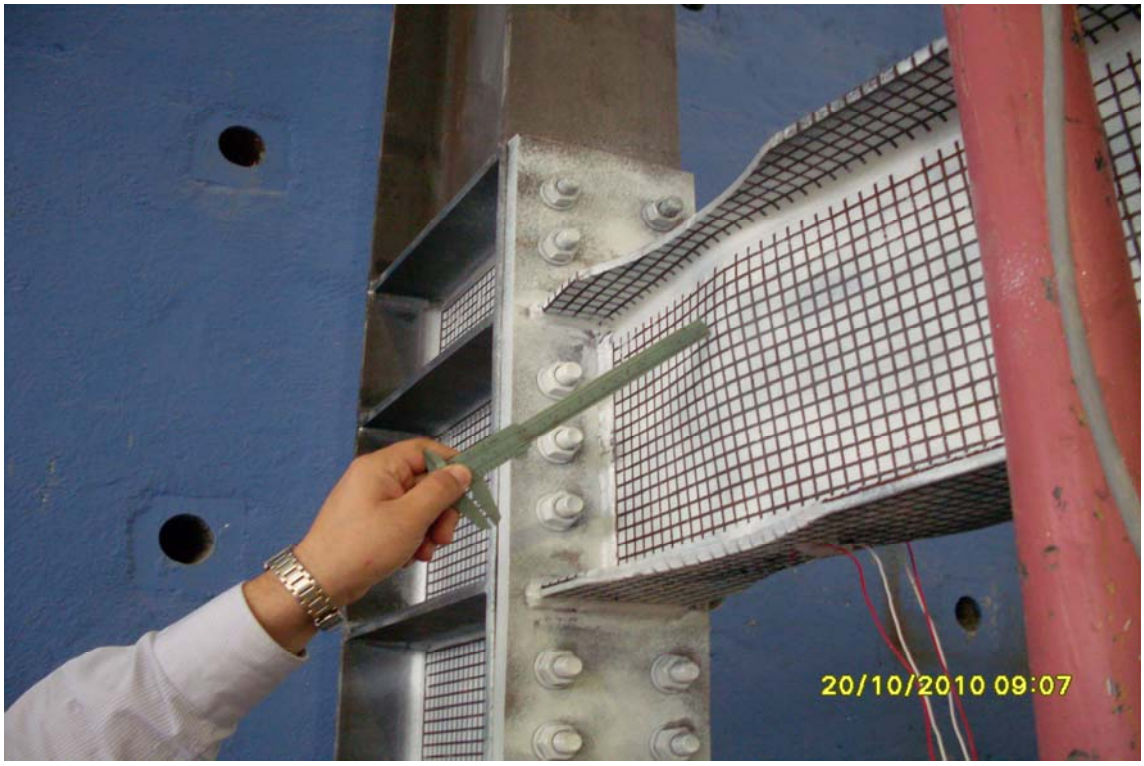
9-2 çevrimi gereğince sisteme basınç doğrultusunda 100,09 mm deplasman uygulanmış ve 82,37 kN yük elde edilmiştir. Yük kaldırıldığında 49,82 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Aynı şekilde sisteme çekme doğrultusunda uygulanan –(9-2) çevriminde, 100,89 mm deplasman değerine karşılık 72,86 kN yük ve 66,82 mm kalıcı deplasman değeri elde edilmiştir. 10-1 çevriminde sisteme 119,32 mm değerinde deplasman uygulanmış ve 82,83 kN yük elde edilmiştir. Sistemden boşaltılan yükün sonrasında 122,46 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür. Çevrim sonucunda kiriş alt başlığında deformasyon miktarı artmıştır (Şekil 5.54). Şekil 5.55 ’de görüldüğü gibi kiriş gövdesinde oluşan bombeleşme daha belirgin hale gelmiştir.



Şekil 5.54. –(9-2) çevrimi sonunda kiriş alt başlığında artan deformasyon



Şekil 5.55-a. Kirişte bombeleşme



Şekil 5.55-b. Kirişte bombeleşme

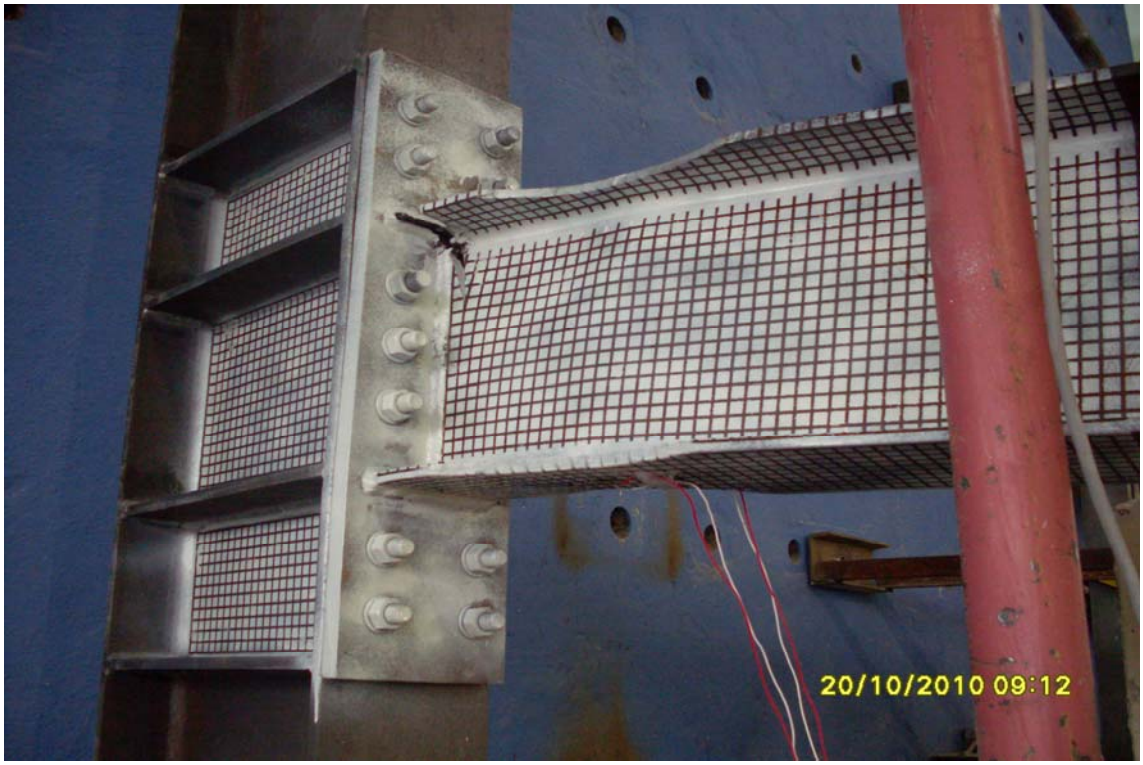


Şekil 5.55-c. –(9-2) çevriminde kiriş gövdesinde belirginleşen bombeleşme

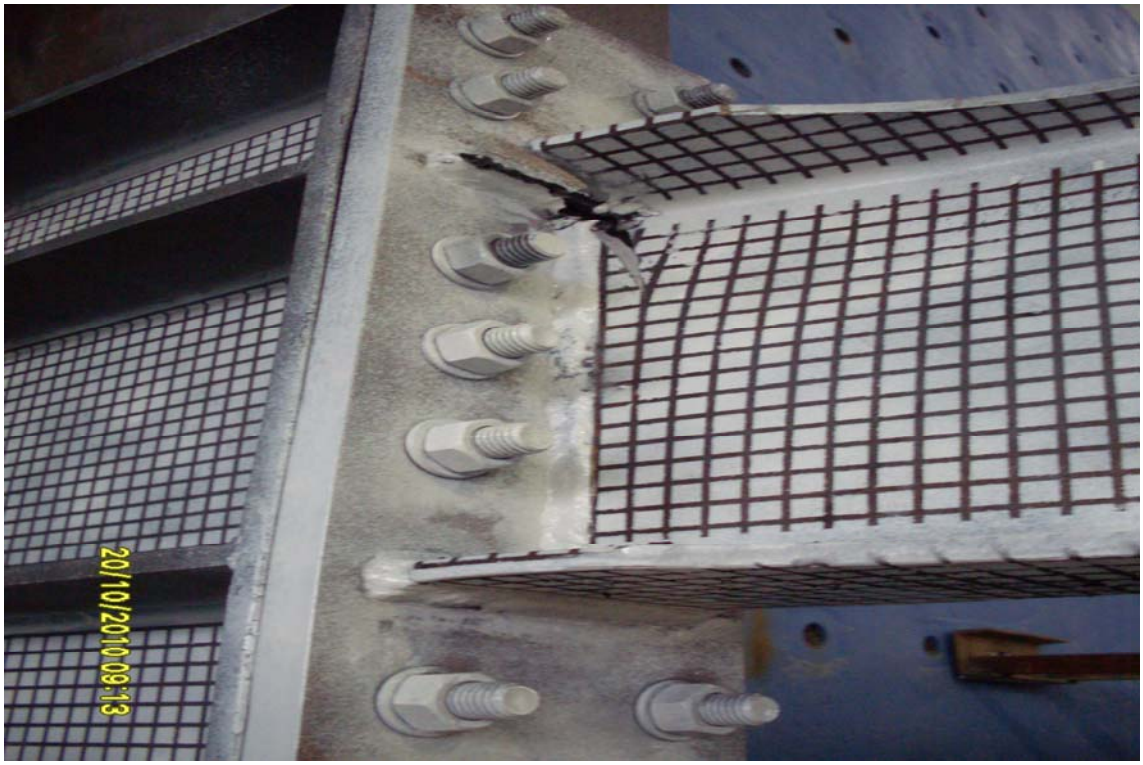
Sistemin nasıl bir davranış sergileyeceğini görmek amacıyla deneye devam edilmiştir. Son olarak 10-1 çevrimi ile sisteme çekme doğrultusunda 122,15 mm 'lik deplasman uygulanmış ve 23,96 kN yük elde edilmiştir. Şekil 5.56 'dan açıkça görüldüğü gibi kiriş üst başlığında deformasyon miktarı artmıştır. Bu yüklemenin sonucunda üst başlık kaynağı tamamıyla koptuğu Şekil 5.57 'den görülmektedir. Kiriş gövdesinde 8 cm yakın yırtılma meydana gelmiştir (Şekil 5.58). Son yapılan bu yükleme ile deneye son verilmiştir.



Şekil 5.56. 10-1 çevriminde kiriş üst başlığında artan deformasyon

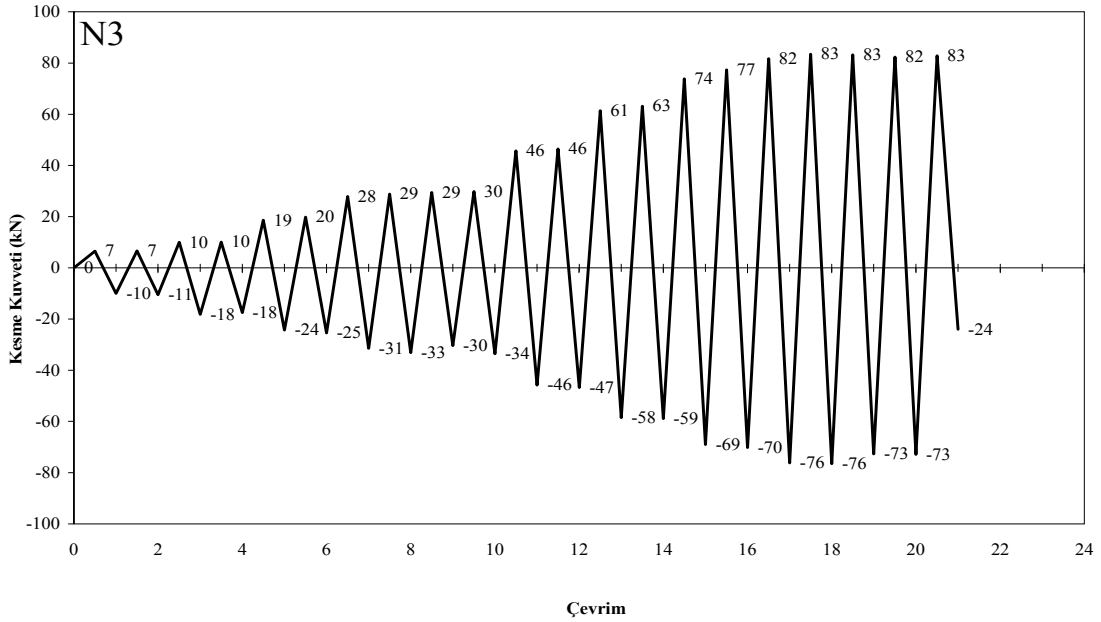


Şekil 5.57. 10-1 çevriminde kiriş üst başlığında kaynakta ayrılma

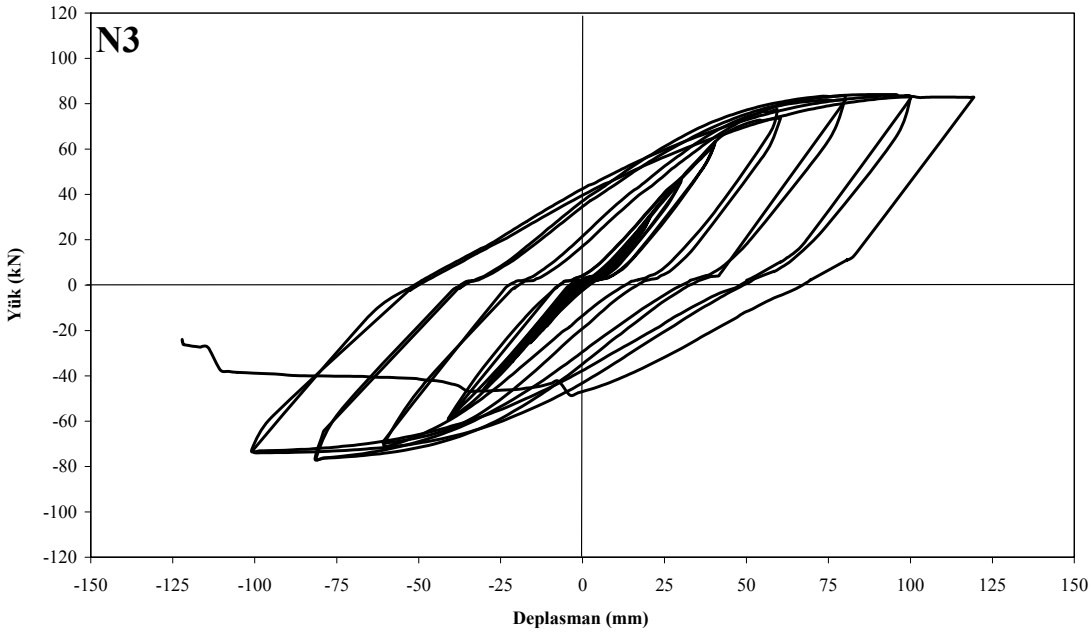


Şekil 5.58. 10-1 çevrimi sonucu kiriş gövdesinde oluşan yırtılma

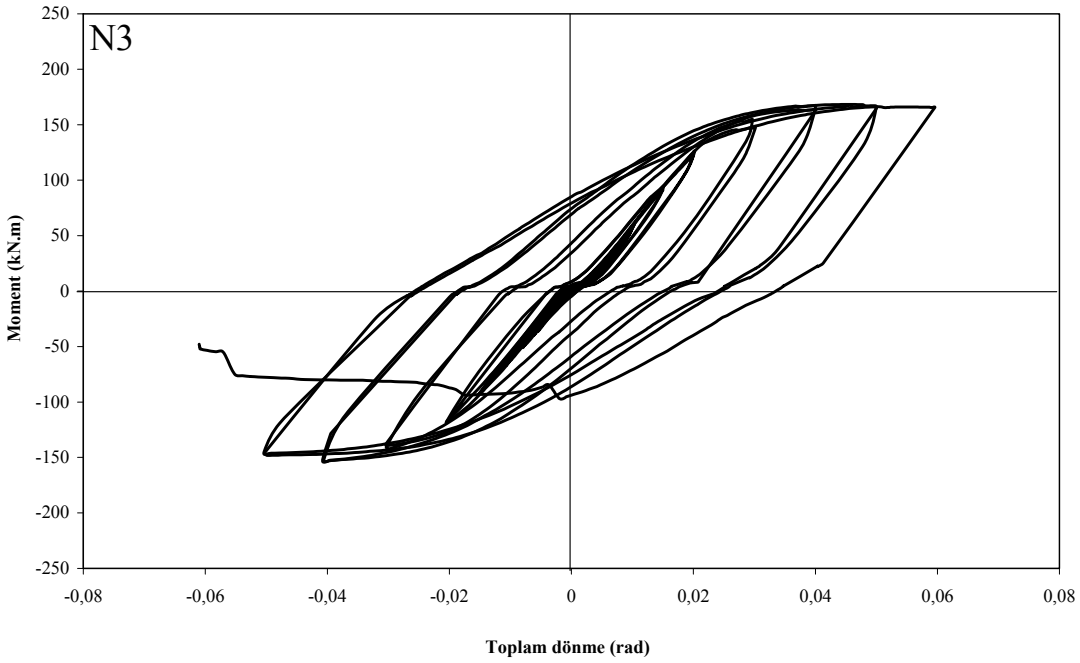
Çelik çerçeve sistemine ait yük geçmişi Şekil 5.59, yük-deplasman ilişki Şekil 5.60, moment-toplam dönme ilişkisi Şekil 5.61, dayanım zarfı Şekil 5.62, rijitlik azalımı grafiği Şekil 5.63 ve enerji tüketme kapasitesi grafiği de Şekil 5.64 ’de verilmiştir.



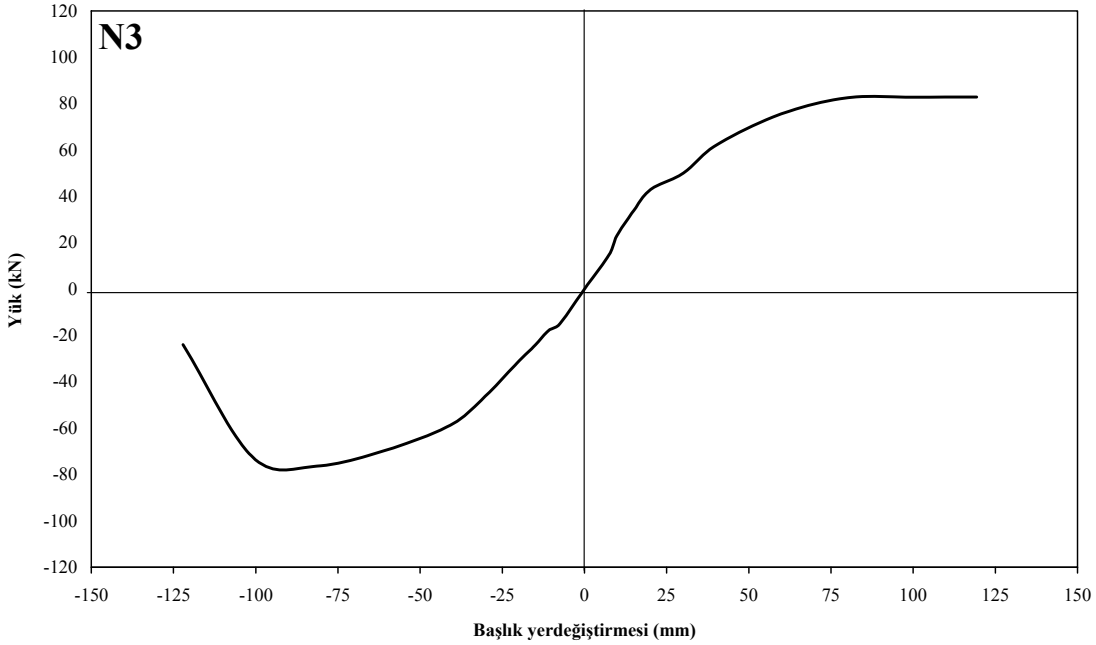
Şekil 5.59. Deney 3 (N3) için yük geçmişi



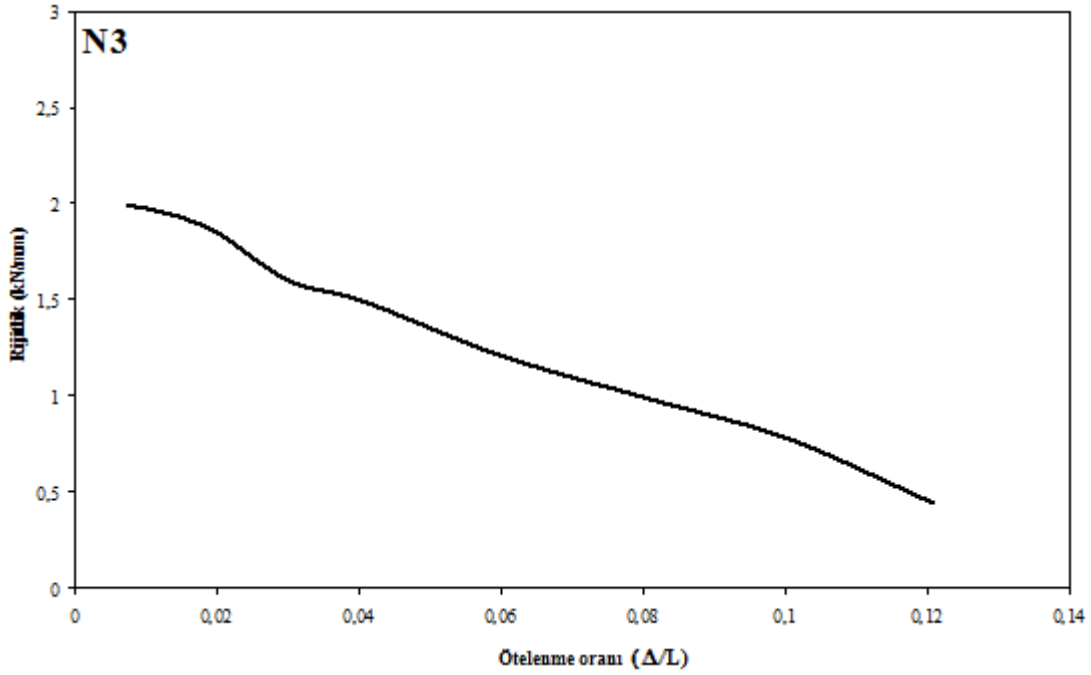
Şekil 5.60. Deney 3 (N3) için yük-deplasman ilişkisi



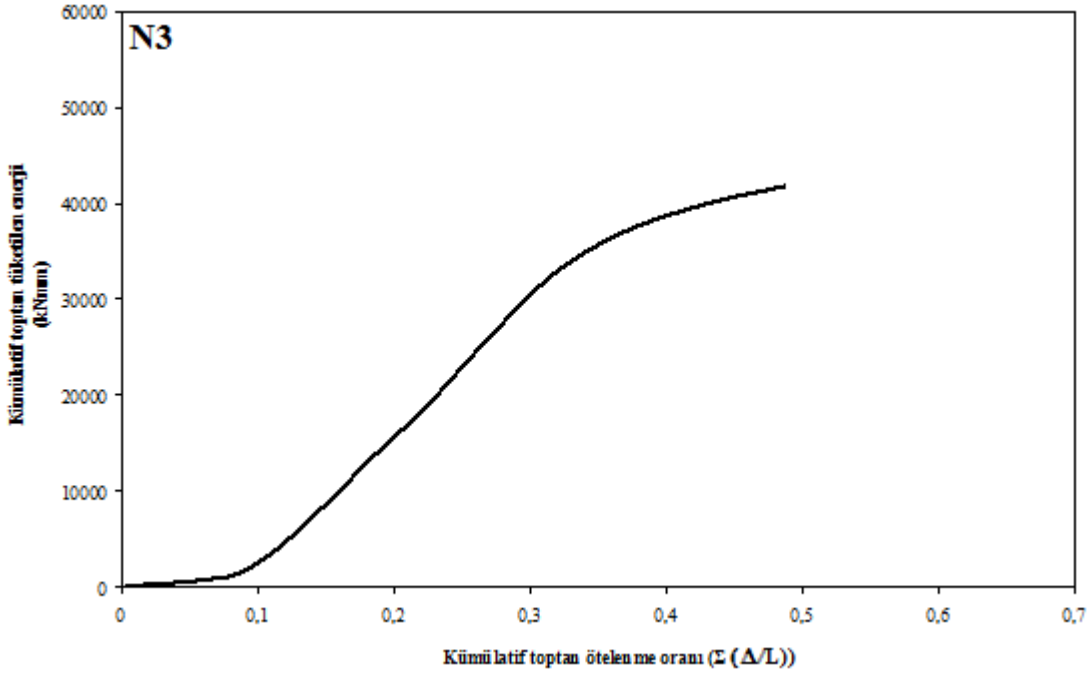
Şekil 5.61. Deney 3 (N3) için moment-toplam dönme ilişkisi



Şekil 5.62. Deney 3 (N3) için dayanım zarfı



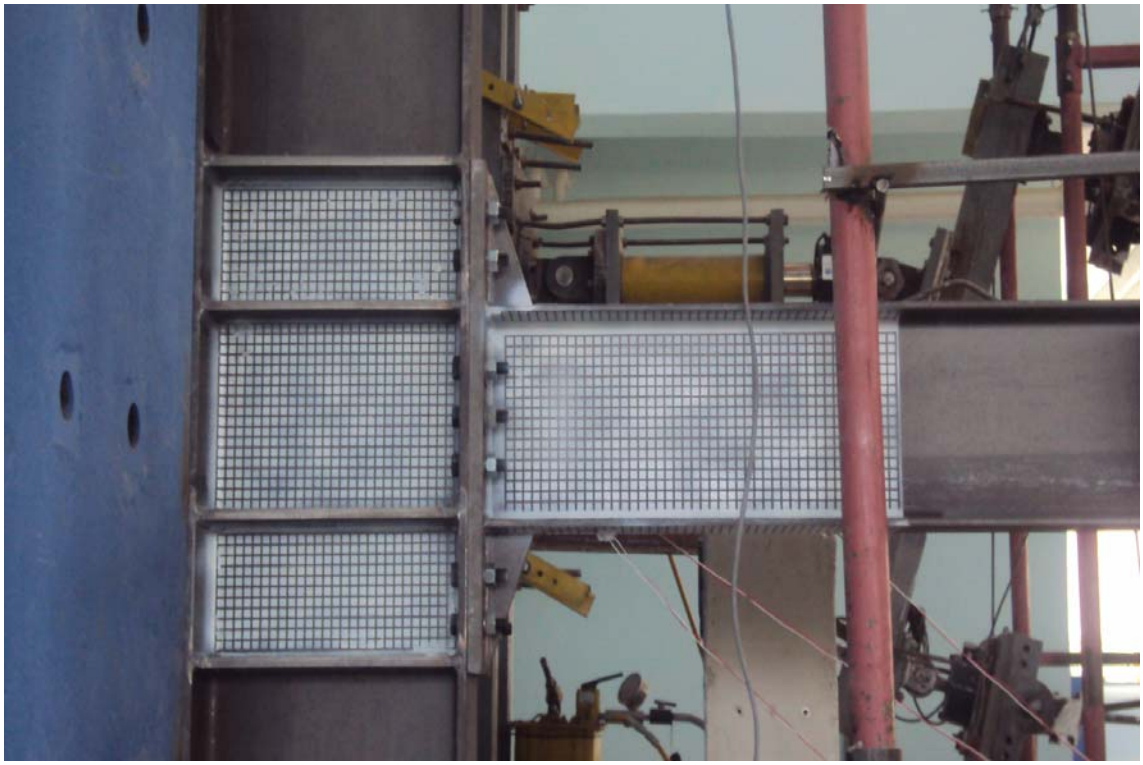
Şekil 5.63. Deney 3 (N3) için rijitlik azalımı grafiği



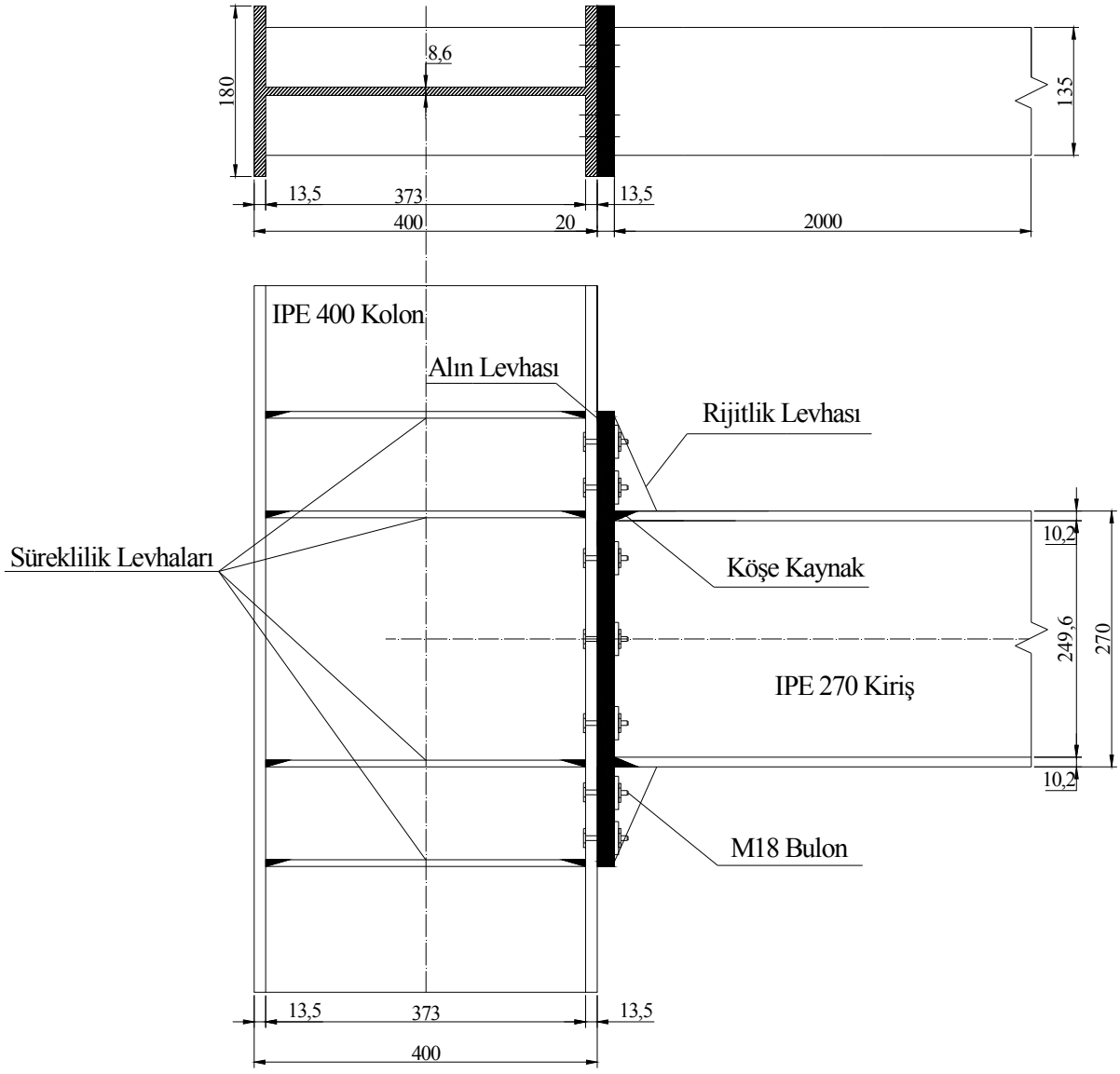
Şekil 5.64. Deney 3 (N3) için enerji tüketme kapasitesi grafiği

5.1.4. Deney 4 (N4)

Deney 4 (N4) numunesi kolon-kiriş birleşim noktasında güçlendirme yapılarak hazırlanmıştır. Şekil 5.66 'da görülen sistem rijitlik ve alın levhası, bulonlu kolon-kiriş birleşim detayı olarak düzenlenmiştir. Burada alın levhalı kirişin başlık levhalarına küt kaynak ile gövde levhasına ve rijitlik levhalarına ise çift taraflı köşe kaynağı kullanılarak birleştirilmektedir. Alın levhasını kolona birleştirmek için M18 bulonlar kullanılmıştır. Uygulamada güçlendirilmiş kolon-kiriş birleşimi Şekil 5.65 'de verilmektedir.

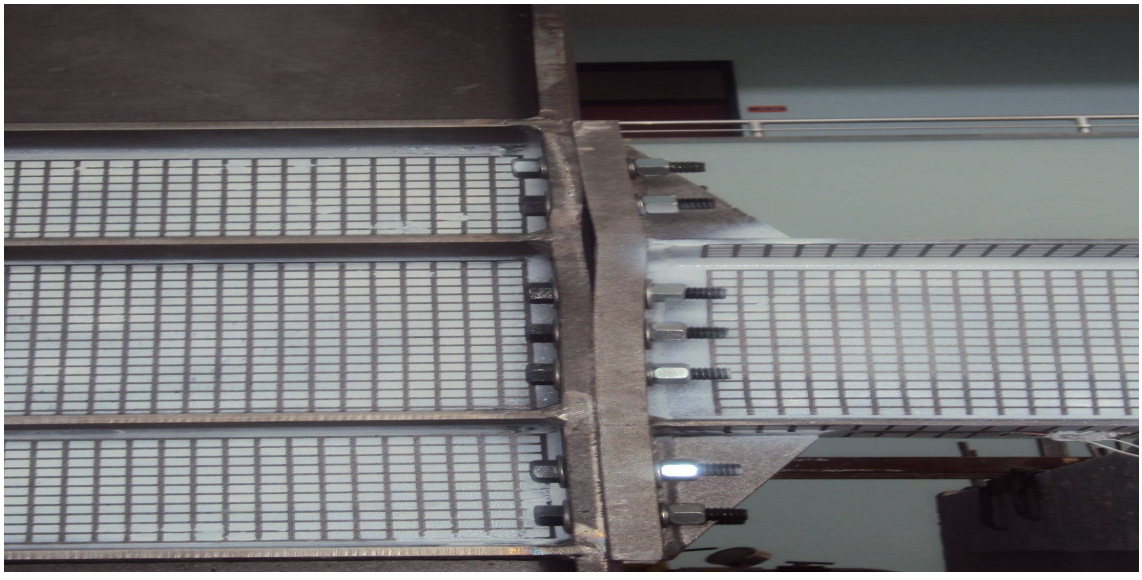


Şekil 5.65. Deney 4 (N4) için kolon-kiriş birleşim bölgesi güçlendirilmiş sistem



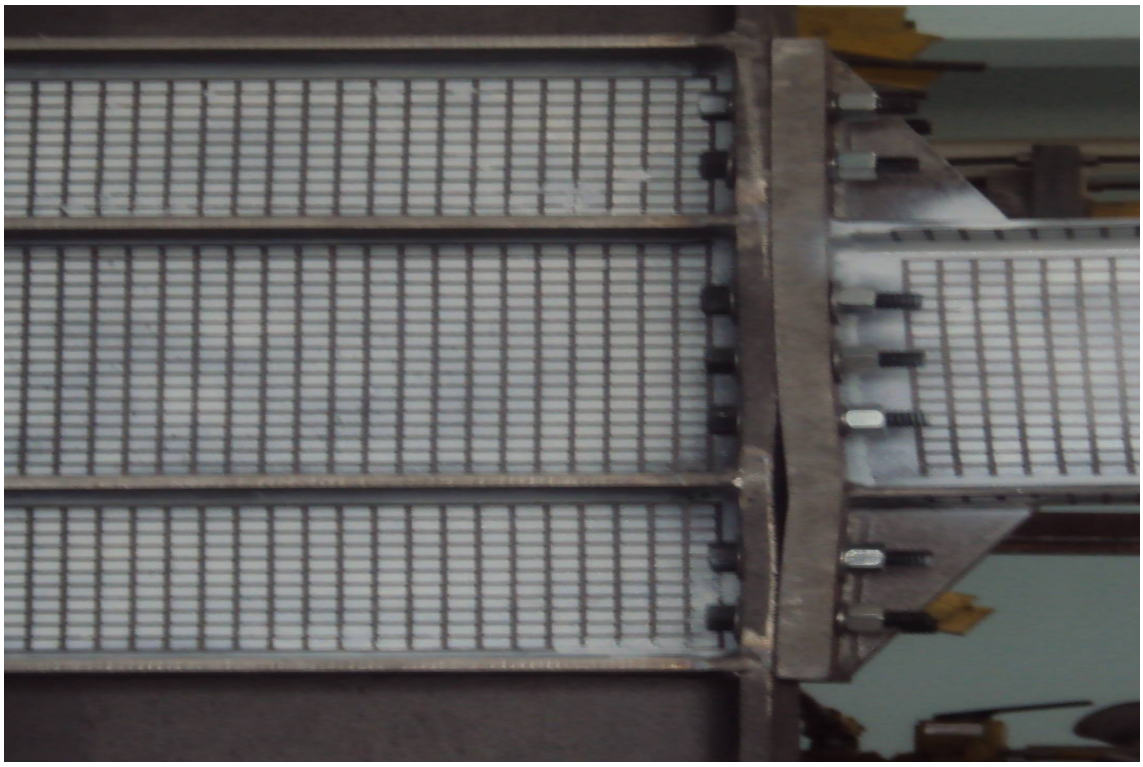
Şekil 5.66. Deney 4 (N4) için kolon-kiriş birleşim bölgesi güçlendirilmiş sistem detayı

Deney bundan önce yapılan deneylerde kullanılan yük programına uygun olarak yapılmıştır. Deneye başlandığında sisteme ileri yükleme ile basınç doğrultusunda 7,5 mm ’lik deplasman uygulanmış ve 21,82 kN yük değerine ulaşılmıştır. Sistemdeki yük kaldırıldığında herhangi bir kalıcı deplasman değerine rastlanmamıştır. Sonrasında sisteme geri yükleme ile çekme doğrultusunda 7,5 mm deplasman verilmiş ve 20,14 kN yük değerine ulaşılmıştır. Sistemden yük etkisi kaldırıldığında kalıcı deplasman oluşmamıştır. 6-1 çevriminde kadar sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir. 6-1 çevriminde sisteme basınç doğrultusunda 40,02 mm deplasman uygulanmış ve 73,12 kN yük değeri elde edilmiştir. Yük etkisi kaldırıldığında sistemde 8,96 mm kalıcı deplasman değeri elde edilmiştir. 6-1 çevriminden sonra sistemde kalıcı deplasman değeri artış göstermiştir. 7-1 çevriminde sisteme basınç yönünde 59,61 mm deplasman uygulanmış ve sistemde 74,57 kN yük ve 22,84 mm kalıcı deplasman değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş alt başlığı akmıştır. Sisteme 8-1 çevriminde 80,36 mm’ lik deplasman uygulanmıştır. Yüklemenin ardından 92,02 kN yük değeri elde edilmiş olup, yük etkisi kaldırıldığında 42,05 mm değerinde kalıcı deplasman elde edilmiştir. Bu çevrimde kiriş alt başlık kaynağının koptuğu gözlenmiştir. –(8-1) çevriminde sistemde oluşan kalıcı deformasyon gözle görülebilir hale gelmiştir. Çekme doğrultusunda sisteme 80,62 mm deplasman uygulanmış ve 87,61 kN yük elde edilmiştir. Sistemden kaldırılan yükün sonrasında 45,57 mm ’lik kalıcı deplasman elde edilmiştir. Kolon kiriş birleşim noktasında meydana gelen bu deformasyon Şekil 5.67 ’de görülmektedir.



Şekil 5.67. –(8-1) çevriminde meydana gelen kalıcı deformasyon

8-2 çevriminde sisteme basınç doğrultusunda verilen 80,40 mm ’lik deplasman değerine karşılık 98,38 kN yük elde edilmiş ve 35,77 mm kalıcı deplasman elde edilmiştir. Bu çevrim sonunda kiriş baş tarafında burulma ve gövdede düğüm noktasına yakın bir bölgede buruşma oluştuğu gözlenmiştir. –(8-2) çevriminde ise sisteme çekme yönünde 80,84 mm ’lik deplasman uygulanmış ve sistemden 95,95 kN yük değeri elde edilmiştir. Sistemden kaldırılan yükün sonrasında 39,50 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Bu çevrim sonucunda sistemde meydana gelen deformasyon Şekil 5.68 ’de görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.69 ’da görüldüğü gibi kiriş alt başlığında mesnet yüzünden 8 cm kadar uzakta burkulma olayı gerçekleşmiştir.

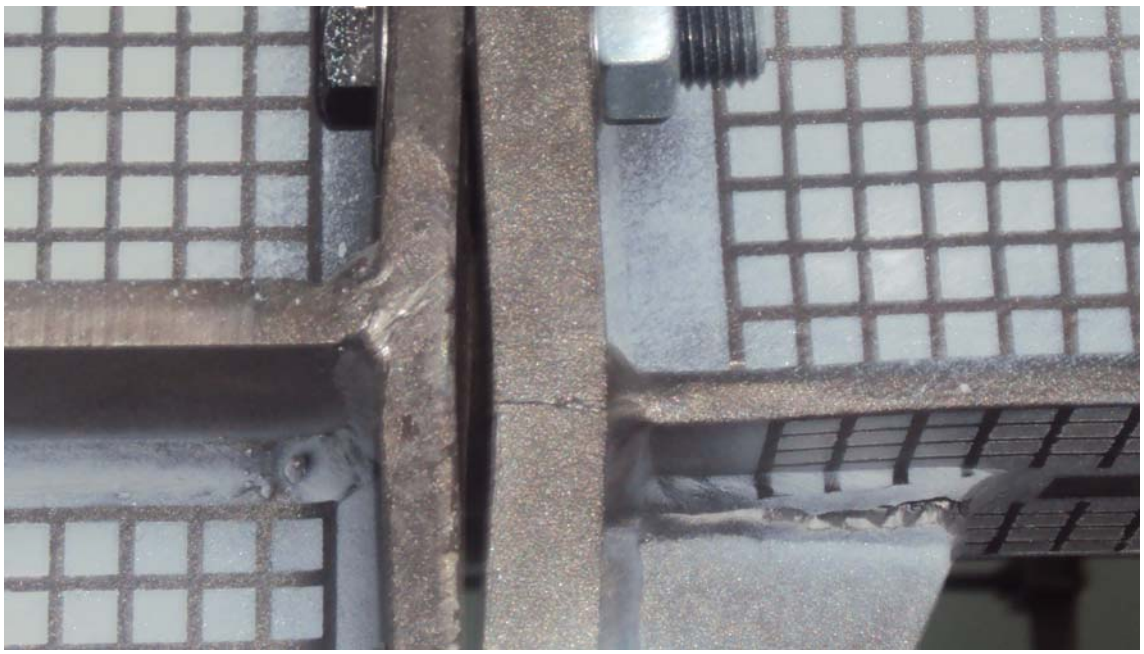


Şekil 5.68. –(8-2) çevrimi sonucu sistemde meydana gelen deformasyon

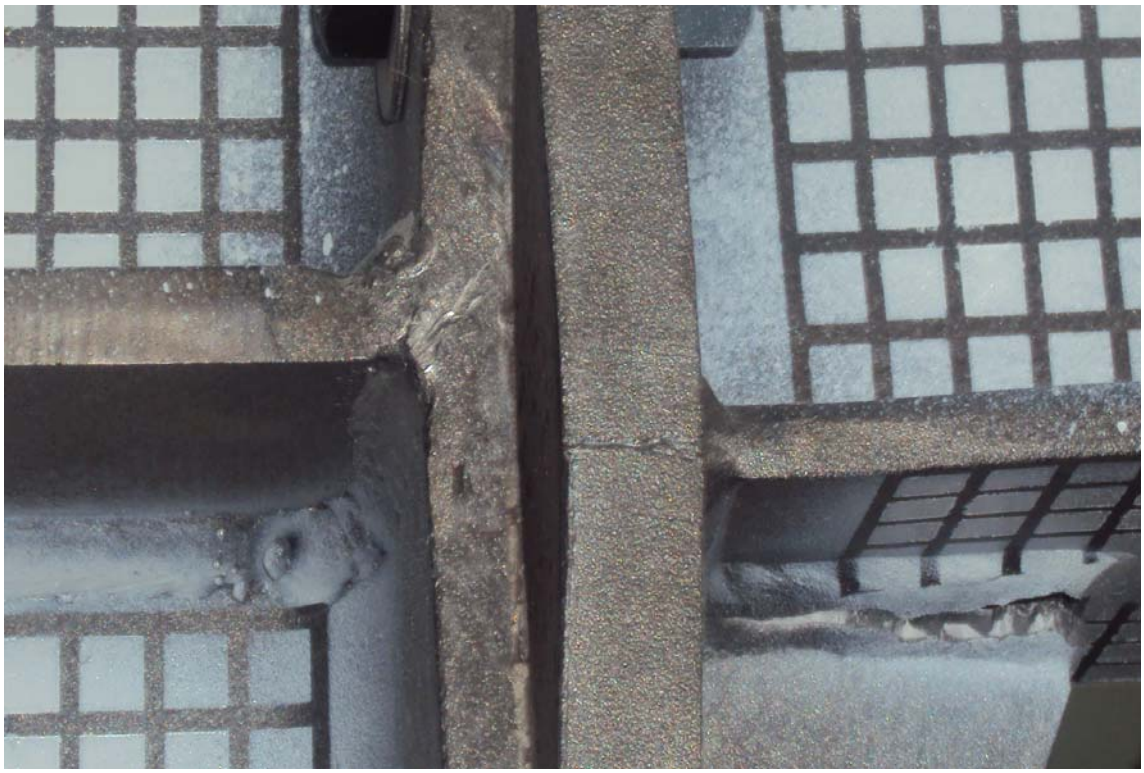


Şekil 5.69. -(8-2) çevriminde kiriş alt başlığında meydana gelen burkulma

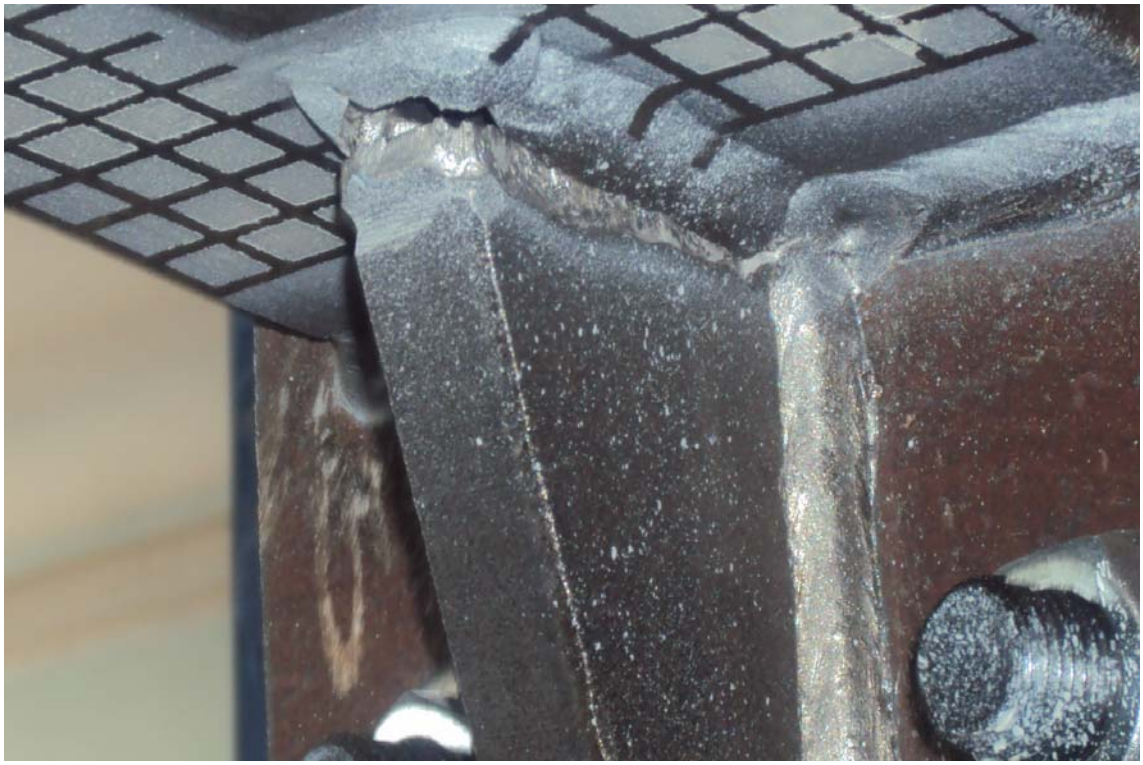
Çevrim 9-1 ’de ise sisteme basınç doğrultusunda 100,10 mm değerinde deplasman uygulanmıştır. Bu deplasman değerine karşılık sistemden 96,79 kN yük elde edilmiştir. Yük etkisi kaldırıldığında kalıcı deplasman değeri 54,91 mm ’dir. Bu çevrim sonucu kolon-kiriş arasında bulunan alın levhasında, kiriş alt başlık seviyesinden yanal çatlama meydana geldiği Şekil 5.70 ’den görülmektedir. Ayrıca kiriş alt başlığında bulunan rijitlik levhası kaynaktan ayrılmıştır (Şekil 5.71).



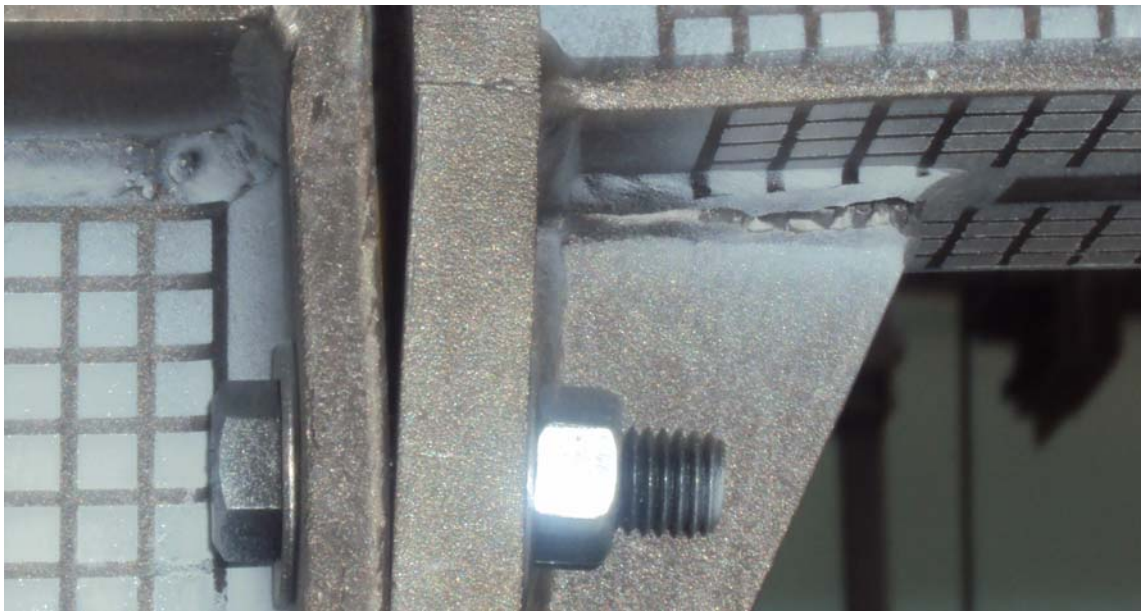
Şekil 5.70-a. Alın levhasında yanal çatlama



Şekil 5.70-b. 9-1 çevriminde alın levhasında meydana gelen yanal çatlama

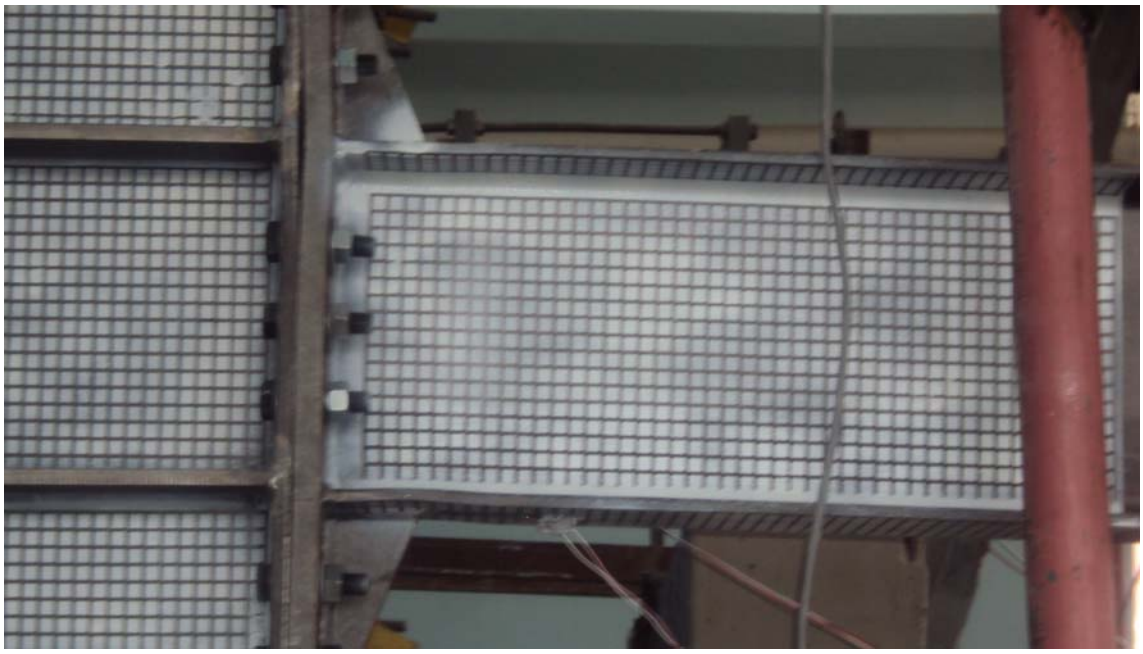


Şekil 5.71-a. Rijitlik levhası kaynağında ayrılma



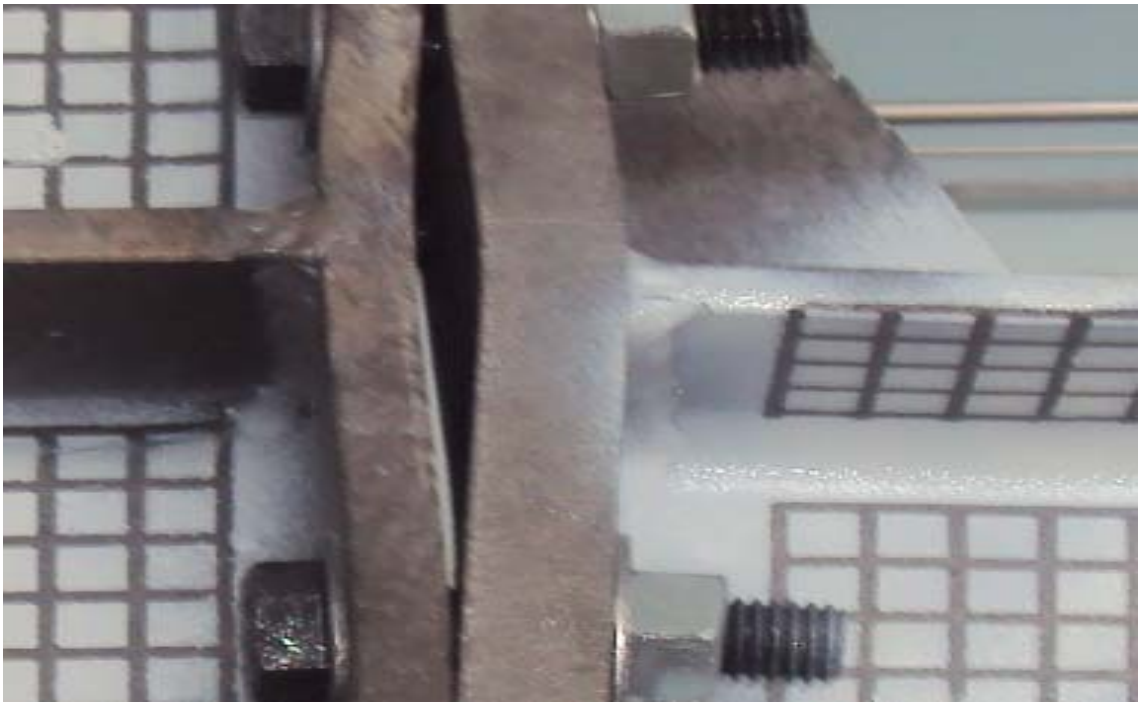
Şekil 5.71-b. 9-1 çevriminde rijitlik levhasının kaynaktan ayrılması

Bu çevrimden sonra sıra –(9-1) çevrimine gelmiştir. –(9-1) çevriminde sisteme çekme yönünde verilen 100,84 mm 'lik deplasman değerine karşılık, 92,60 kN yük elde edilmiştir. Sistemden yük etkisi kaldırıldığında ise 56,88 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Bu çevrim sonucunda sistemde kiriş alt başlığı burkulmaya başlamıştır (Şekil 5.72).



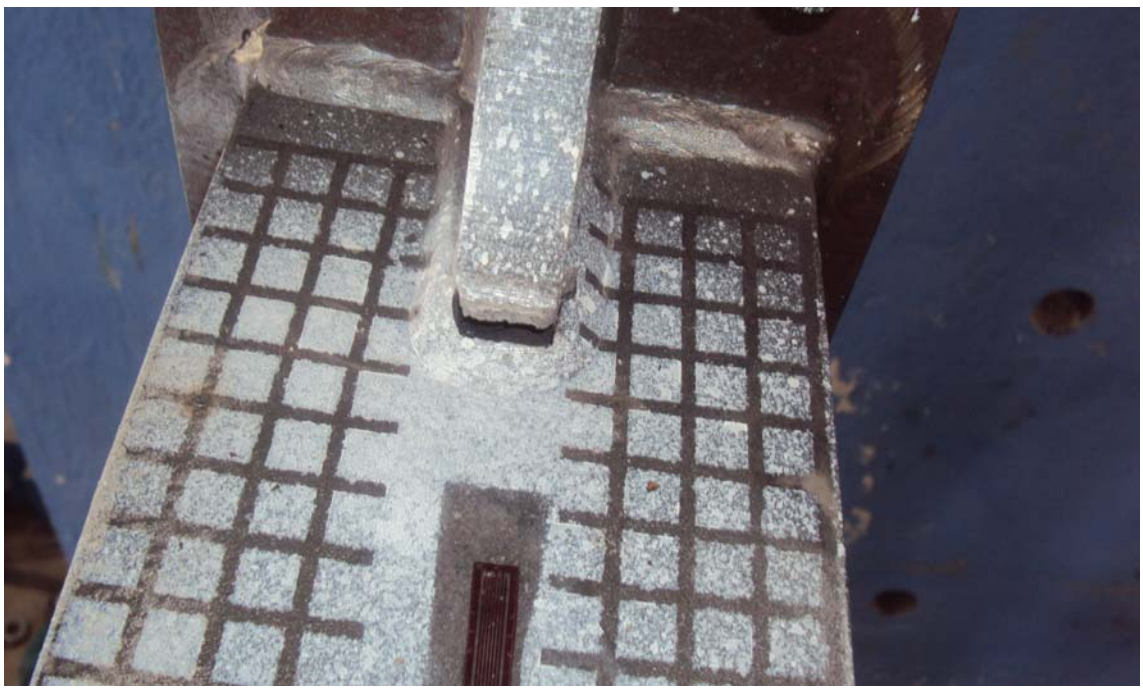
Şekil 5.72. –(9-1) çevriminde kiriş alt başlığında meydana gelen burkulma

Kolon kiriş birleşim noktasında olan alın levhası kiriş üst başlık seviyesinden çatlamıştır (Şekil 5.73).



Şekil 5.73. –(9-1) çevriminde alın levhasında meydana gelen çatlama

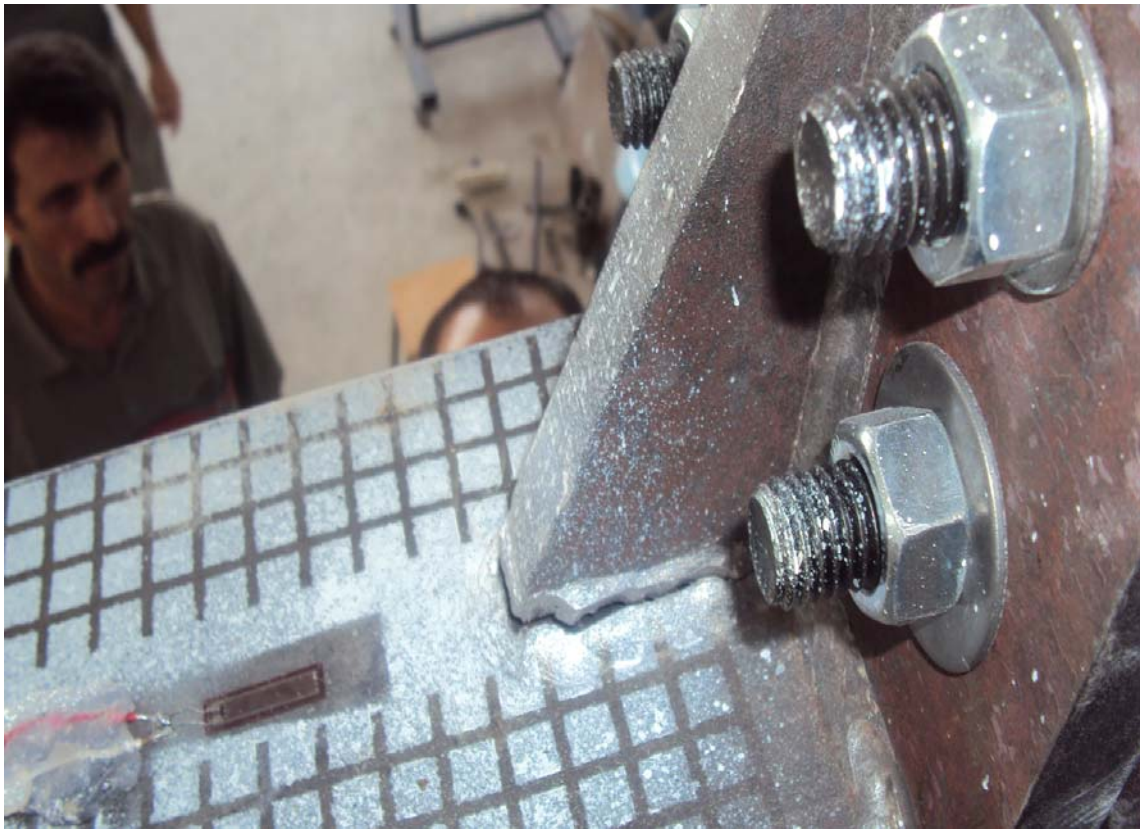
Kiriş üst başlığına yerleştirilen rijitlik levhası kaynaktan ayrılmıştır (Şekil 5.74).



Şekil 5.74-a. Kiriş üst başlıkta rijitlik levhasının kaynaktan ayrılması

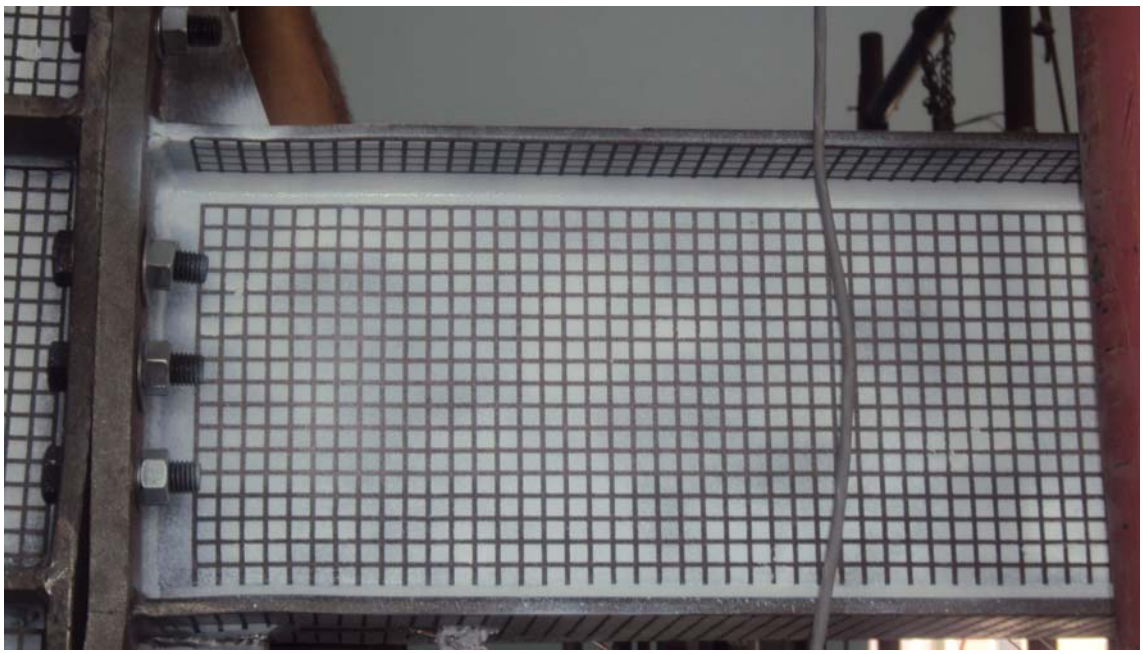


Şekil 5.74-b. Kiriş üst başlıkta rijitlik levhasının kaynaktan ayrılması

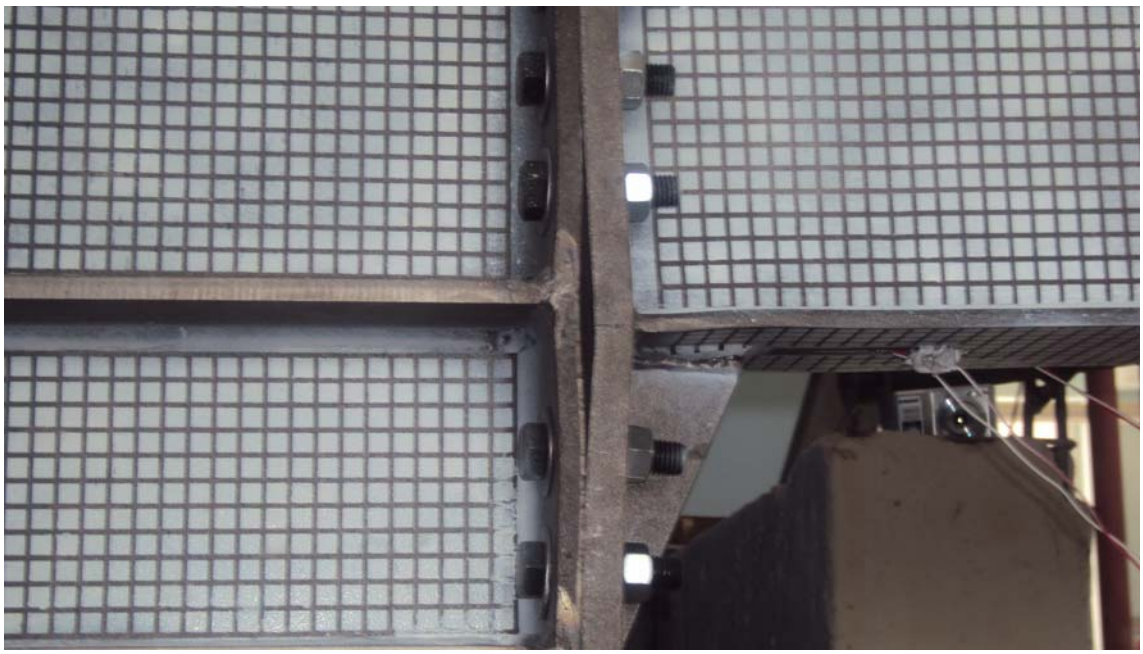


Şekil 5.74-c. –(9-1) çevriminde üst başlıkta bulunan rijitlik levhasının kaynaktan ayrılması

9-2 çevriminde sisteme basınç yönünde 99,31 mm 'lik deplasman uygulanmış olup, bu deplasman değerine karşılık 101 kN yük elde edilmiştir. Sistem üzerindeki yük etkisi kaldırıldığında 51,98 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Şekil 5.75 'den kolon kiriş birleşim noktası arasında olan, alın levhasında daha önceden oluşmuş deformasyon miktarının arttığı sonucuna varılmıştır.

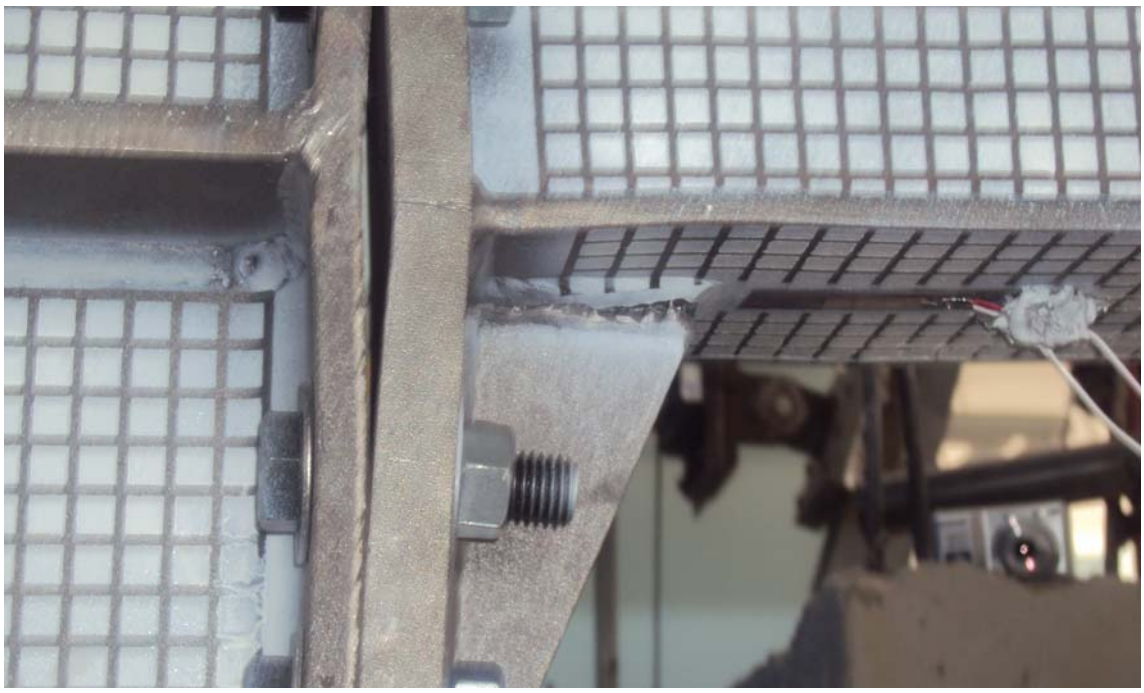


Şekil 5.75-a. Kalıcı deformasyon



Şekil 5.75-b. 9-2 çevriminde sistemden boşaltılan yük sonrasında artan kalıcı deformasyon

9-1 çevriminde meydana gelen alt başlık rijitlik levhasının kaynak yırtılması, 9-2 çevriminde daha büyüdüğü Şekil 5.76 ’dan gözlenmektedir.



Şekil 5.76-a. Rijitlik levhası kaynak yırtılması

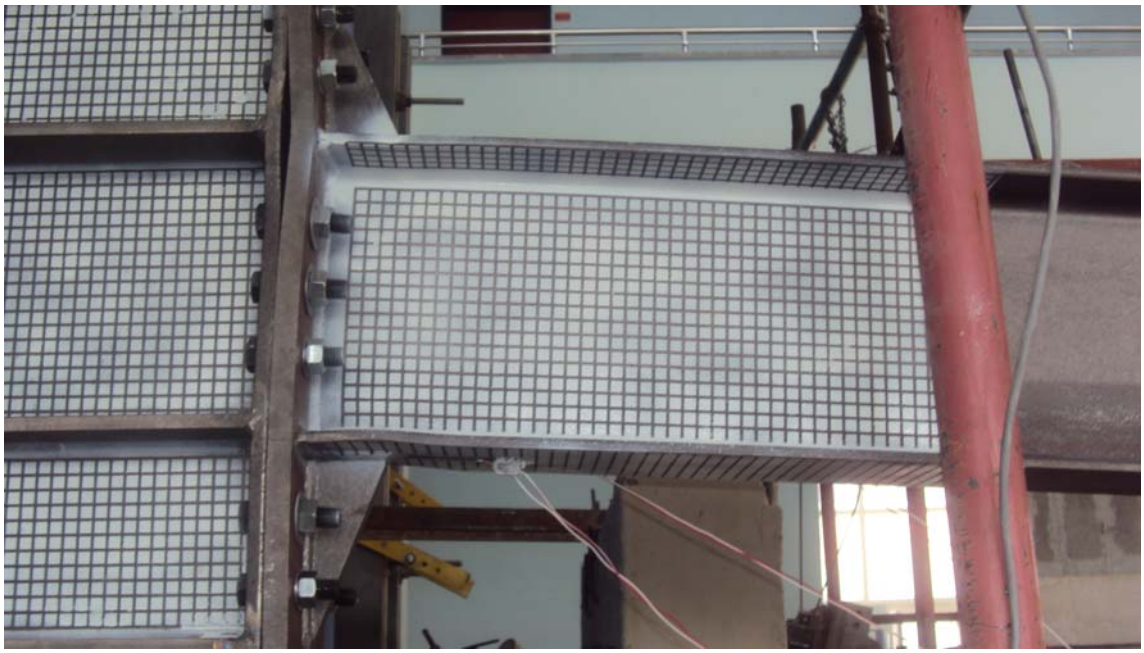


Şekil 5.76-b. 9-2 çevriminde kiriş alt başlık rijitlik levhasında büyüyen kaynak yırtılması

-(9-2) çevriminde sisteme çekme yönünde 100,4 mm deplasman uygulanmış ve sistemde 95,70 kN yük değerine ulaşılmıştır. Sistemden yük etkisi boşaltıldığında kalıcı deplasman değeri 58,50 mm olarak bulunmuştur. Çevrim sonucunda sistemde meydana gelen değişim Şekil 5.77 ’den görülmektedir.

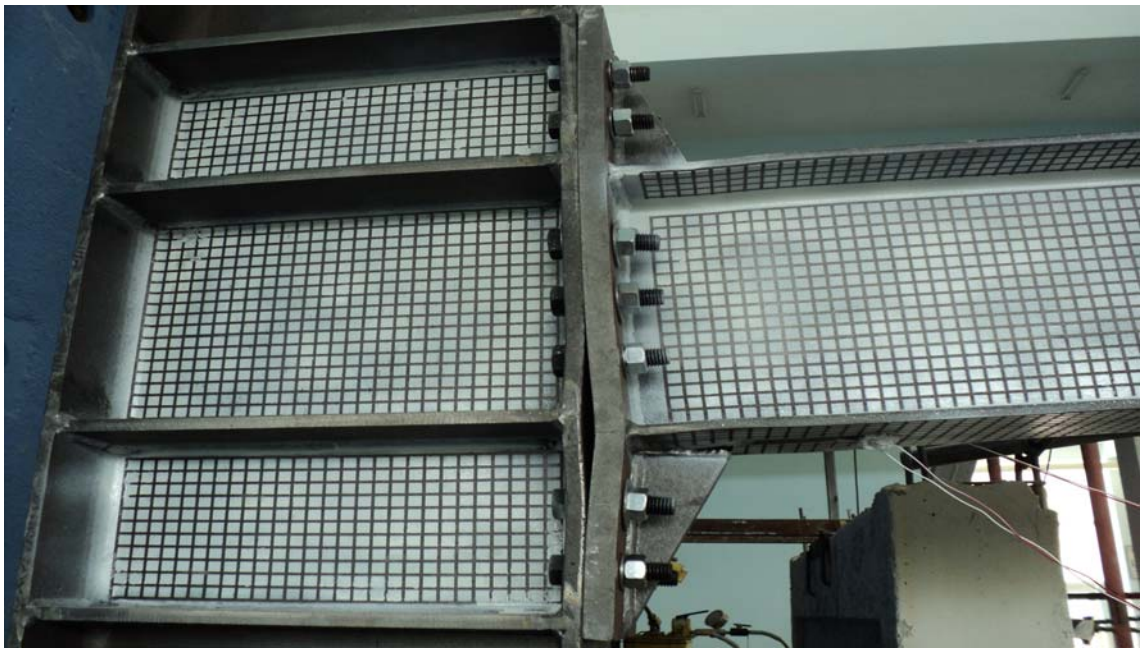


Şekil 5.77-a. Kalıcı deformasyon

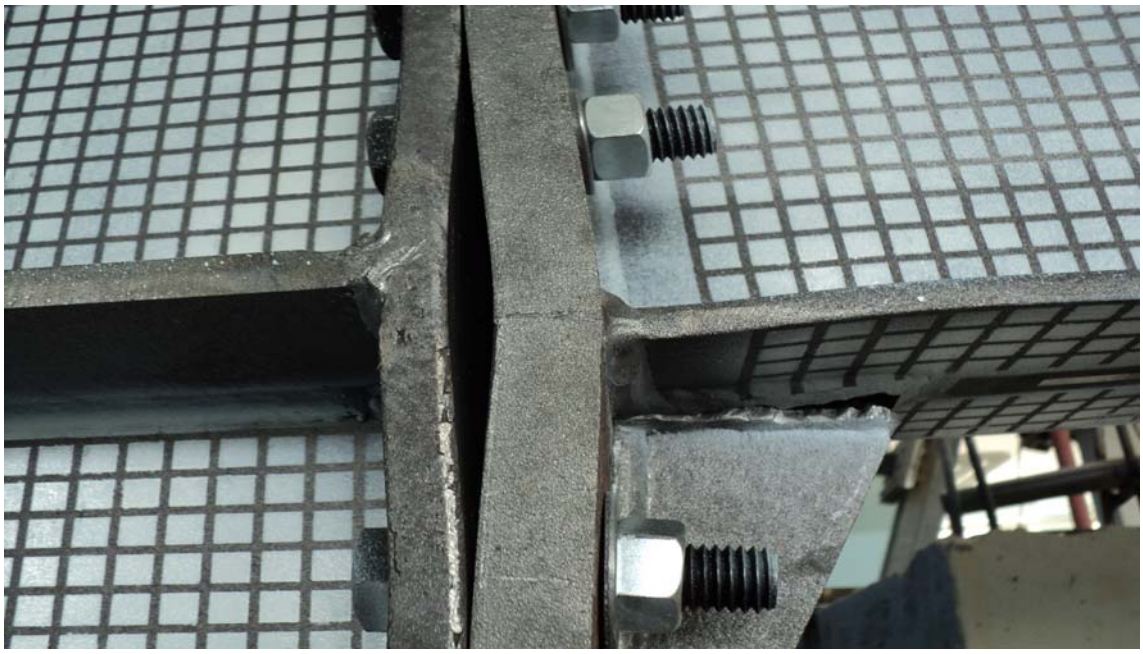


Şekil 5.77-b. –(9-2) çevrimi sonucu artan deformasyon

Çevrim 10-1 ’de sisteme basınç doğrultusunda 120,24 mm değerinde deplasman uygulanmış ve güçlendirilmiş sistemde 99 kN yük değerine ulaşılmıştır. Sistemden boşaltılan yükün sonrasında kalıcı deplasman değeri 72,93 mm olarak ölçülmüştür. Bu çevrimde sistemde oluşan durum Şekil 5.78 ’de gösterilmektedir.



Şekil 5.78-a. 10-1 çevrimi sonucu sistem



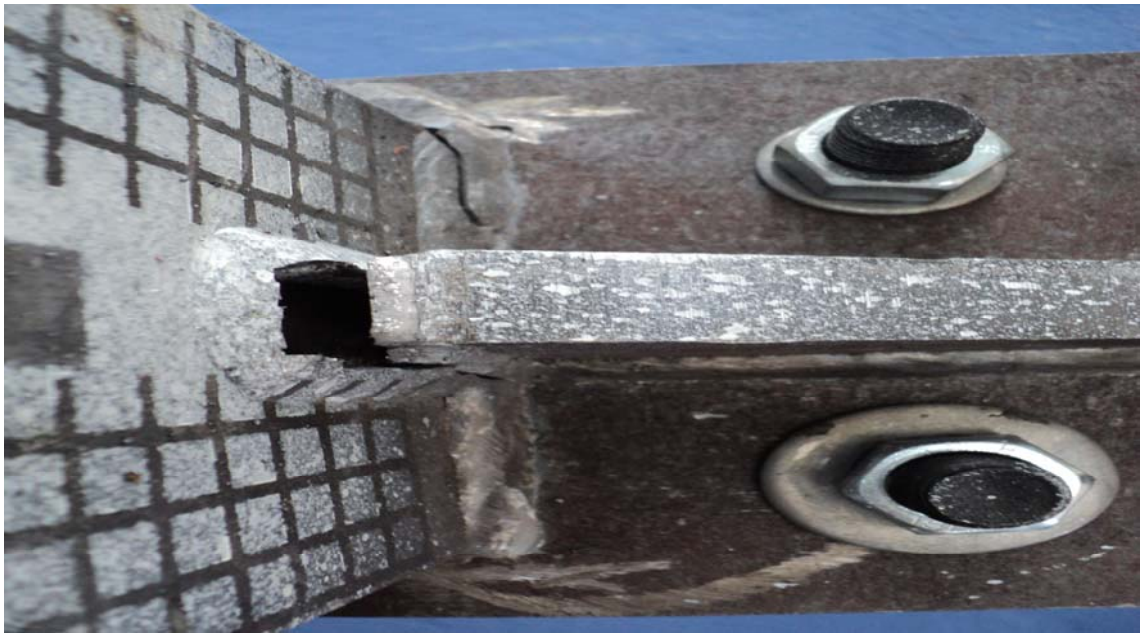
Şekil 5.78-b. 10-1 çevrimi sonucu sistemin durumu

-(10-1) çevriminde ise sisteme çekme doğrultusunda 120,26 mm değerinde deplasman uygulanmıştır. Bu deplasman değerine karşılık sistemde 93,95 kN yük elde edilmiştir. Sistemdeki yük etkisi ortadan kaldırıldığında kalıcı deplasman değeri 75,04 mm 'dir (Şekil 5.79).



Şekil 5.79. –(10-1) çevriminde sistemde oluşan kalıcı deformasyon

Bu çevrimde kiriş üst başlık ile alın levhası arasındaki kaynak çatlamıştır (Şekil 5.80).



Şekil 5.80-a. Kaynak ayrılması



Şekil 5.80-b. –(10-1) çevriminde rijitlik levhasının kaynaktan ayrılması

Ayrıca Şekil 5.81 ’den görüldüğü gibi çevrimde kiriş üst başlıkta bulunan rijitlik levhası alın levhasına sabitlenmiş kaynağından ayrılmıştır.

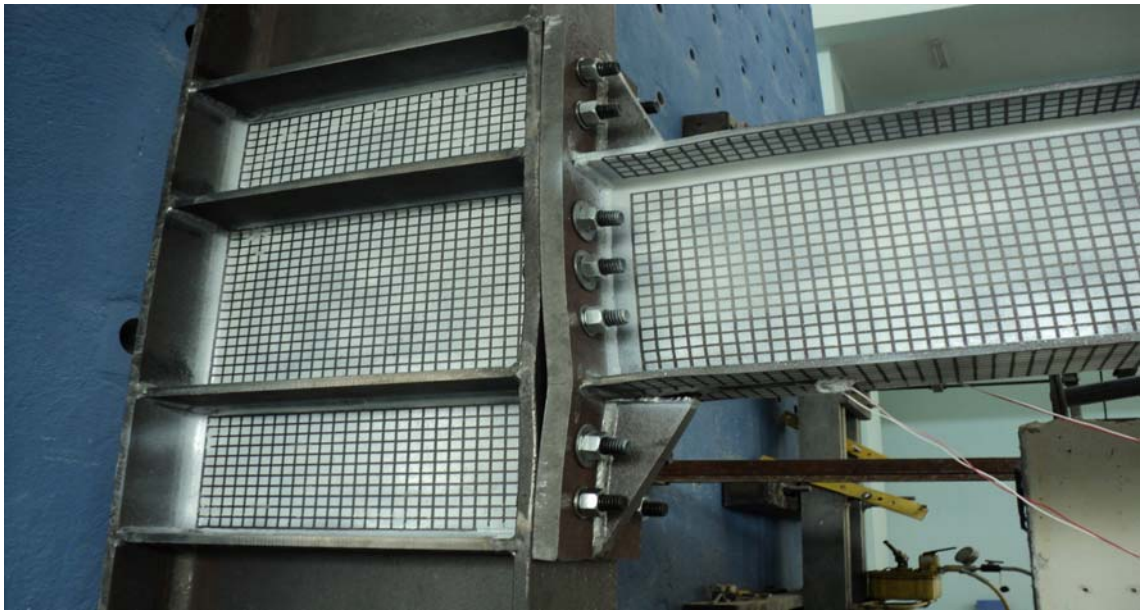


Şekil 5.81-a. Kaynak ayrılması

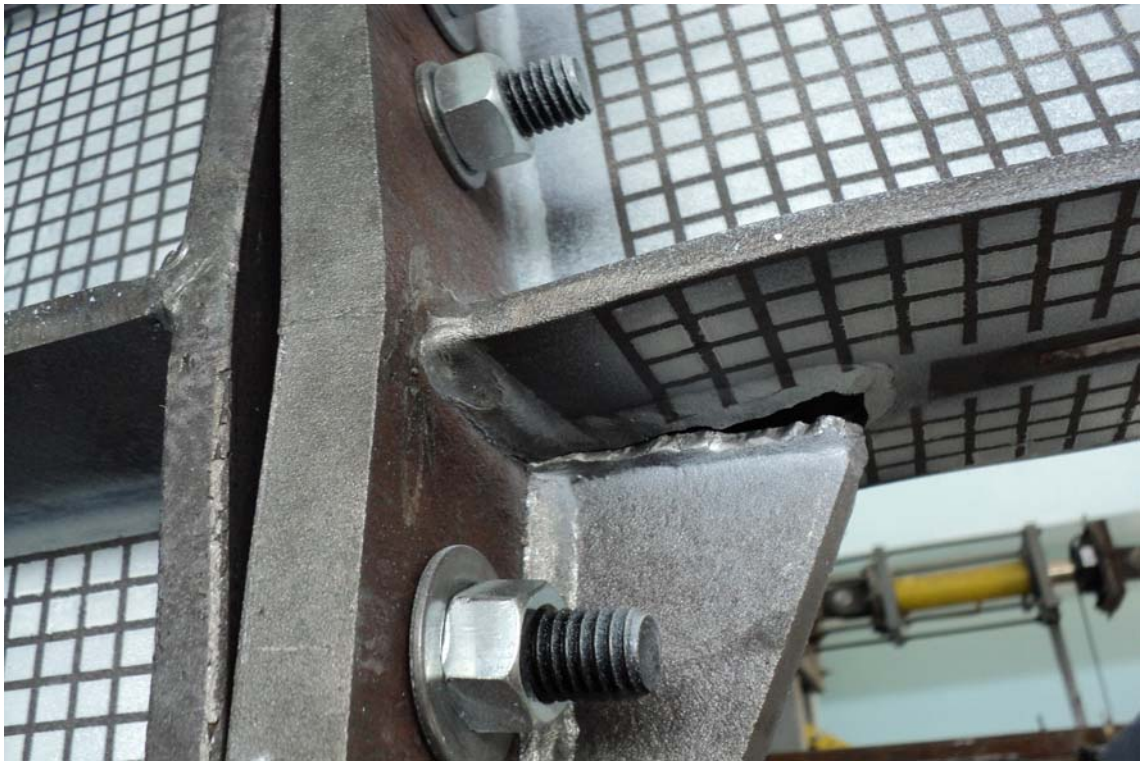


Şekil 5.81-b. –(10-1) çevriminde kiriş üst başlık ile alın levhası arasındaki kaynağın çatlaması

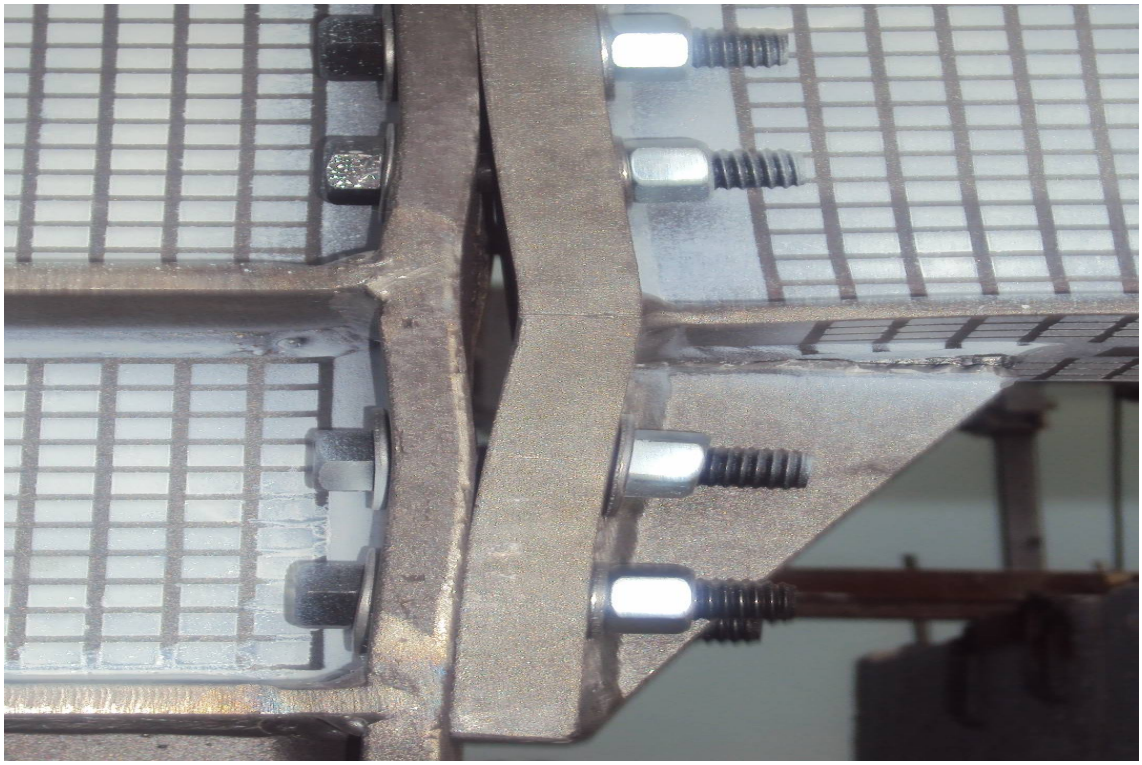
10-2 çevriminde sisteme basınç yönünde verilen 119,99 mm 'lik deplasman değerine karşılık sistemden 102,55 kN maksimum yük elde edilmiştir. Bu yük değerinden sonra sistemin aldığı yük değeri düşmeye başlamıştır. Sistemden etkisi kalkan yükün sonrasında 71,6 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Bu çevrim sonucunda sistemde meydana gelen değişim Şekil 5.82 'de görülmektedir.



Şekil 5.82-a. 10-2 çevrimi

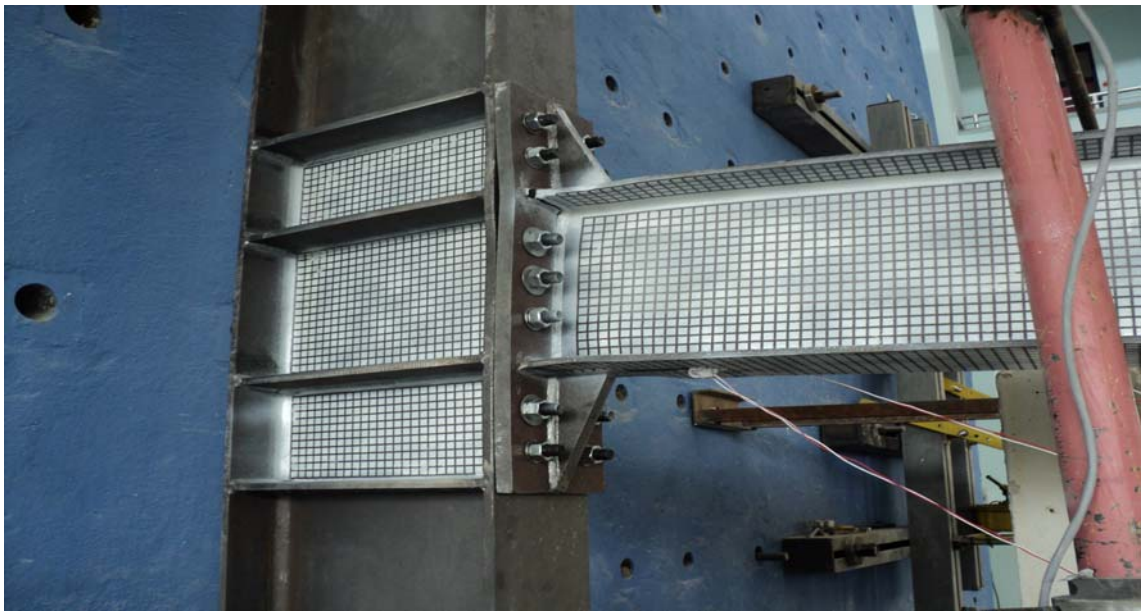


Şekil 5.82-b. 10-2 çevrimi



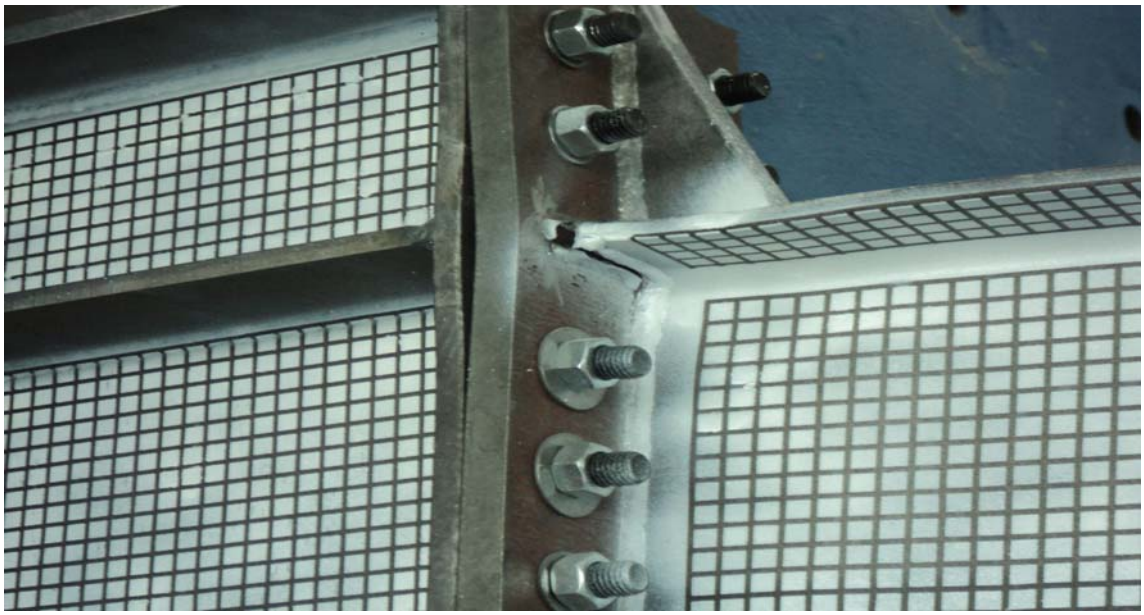
Şekil 5.82-c. 10-2 çevrimi sonucu sistemin durumu

Çevrim –(10-2) ’de ise sisteme 120,81 mm değerinde deplasman uygulanmıştır. Bu deplasman değerine karşılık sistemden 92,19 kN yük elde edilmiştir. Yük etkisi kaldırılan sistemde 78,07 mm kalıcı deplasman elde edilmiştir (Şekil 5.83).



Şekil 5.83. -(10-2) çevrimi sonucu artan deformasyon

Şekil 5.84 ’de görüldüğü üzere çevrimde kiriş üst başlığı kaynaktan tamamıyla ayrılmıştır.



Şekil 5.84. –(10-2) çevriminde meydana gelen kiriş üst başlığının kaynaktan tamamıyla ayrılması

-(10-2) çevriminde kiriş üst başlığında kaynağın bütünüyle ayrılmasının haricinde, gövde kaynağı da kiriş gövdesine doğru 2-3 cm kadar ayrılmıştır (Şekil 5.85).

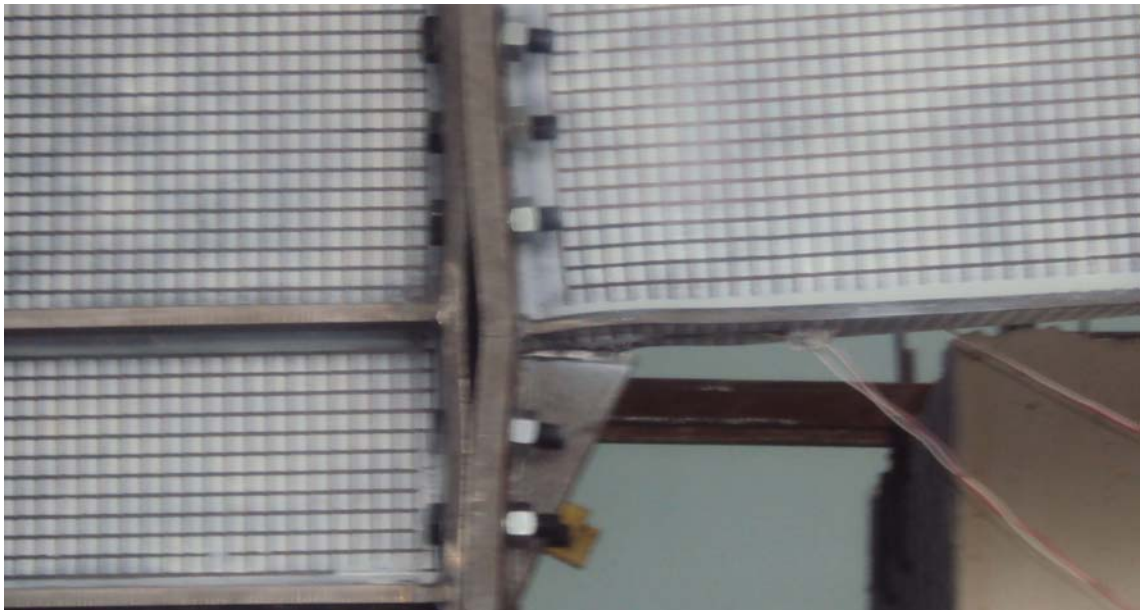


Şekil 5.85-a. Kaynak ayrılması



Şekil 5.85-b. –(10-2) çevriminde kiriş üst başlık ile alın levhası arasında büyüyen kaynak ayrılması

11-1 çevriminde sisteme basınç yönünde 134,16 mm değerinde deplasman uygulanmış olup, bu deplasman değerine karşılık sistemde 100,65 kN yük elde edilmiştir. Yük etkisi kaldırılan sistemde 105,92 mm 'lik kalıcı deplasman değeri ölçülmüştür. Çevrimde Şekil 5.86 'da görüldüğü gibi kiriş alt başlığı kaynaktan tamamıyla ayrılmıştır.

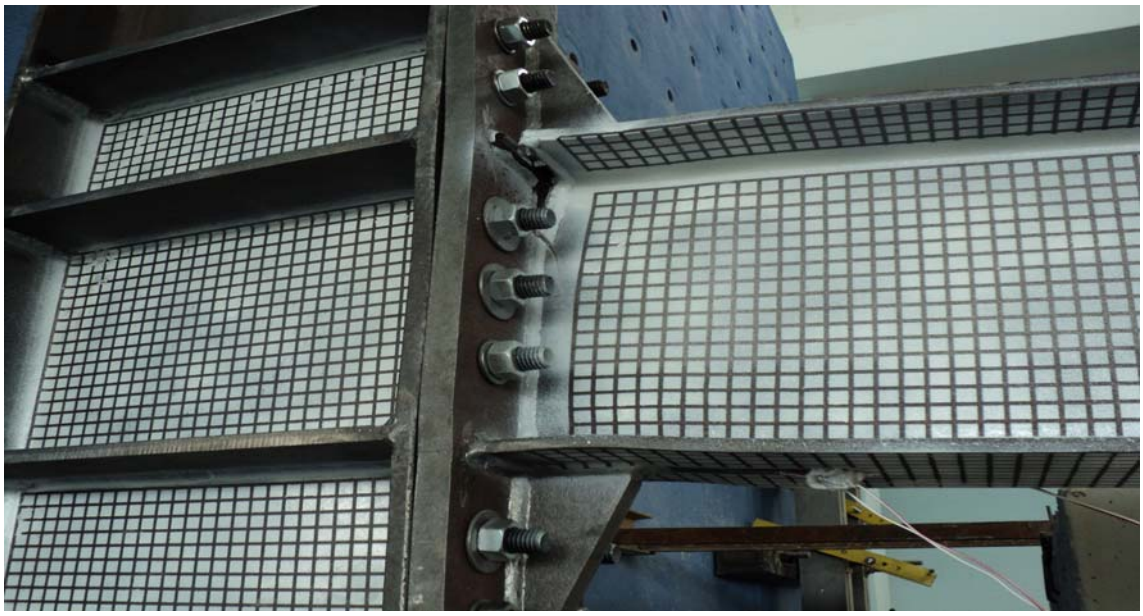


Şekil 5.86-a. Kaynak ayrılması



Şekil 5.86-b. 11-1 çevriminde kiriş alt başlığının kaynaktan ayrılması

Deney için yapılan son çevrim olan –(11-1) ’de sisteme çekme doğrultusunda 140,29 mm deplasman uygulanmıştır. Bu deplasman değerine karşılık sistemde 68,90 kN yük elde edilmiştir. Artık sistem yük almamaya başlamıştır. Sistemdeki yük boşaltıldığında 146,3 mm kalıcı deplasman değerine ulaşılmıştır. Bu aşamadan sonra sistem yük almadığından deneye son verilmiştir. Yapılan bu çevrimde kiriş üst başlığında kaynak bütünüyle ayrıldı (Şekil 5.87).

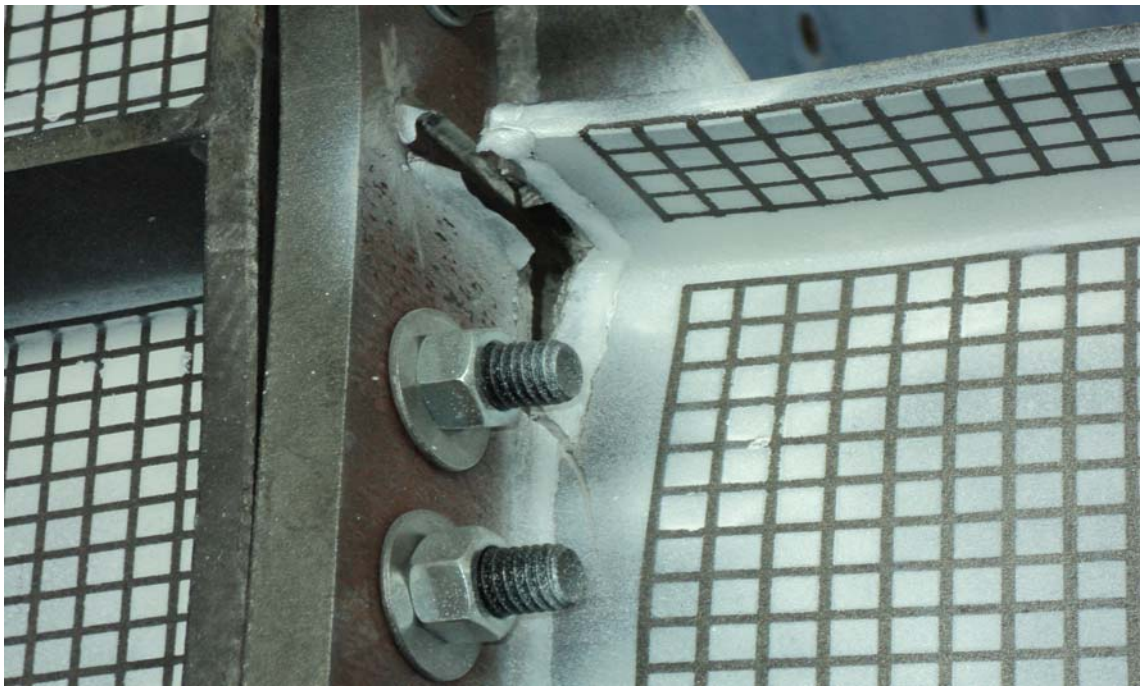


Şekil 5.87-a. Kaynak ayrılması



Şekil 5.87-b. –(11-1) çevriminde kiriş üst başlığın kaynaktan bütünüyle ayrılması

Ayrıca Şekil 5.88 ’de görüldüğü gibi kiriş üst başlık gövdesinde 6-7 cm yakın aşağı doğru yırtılma meydana gelmiştir.

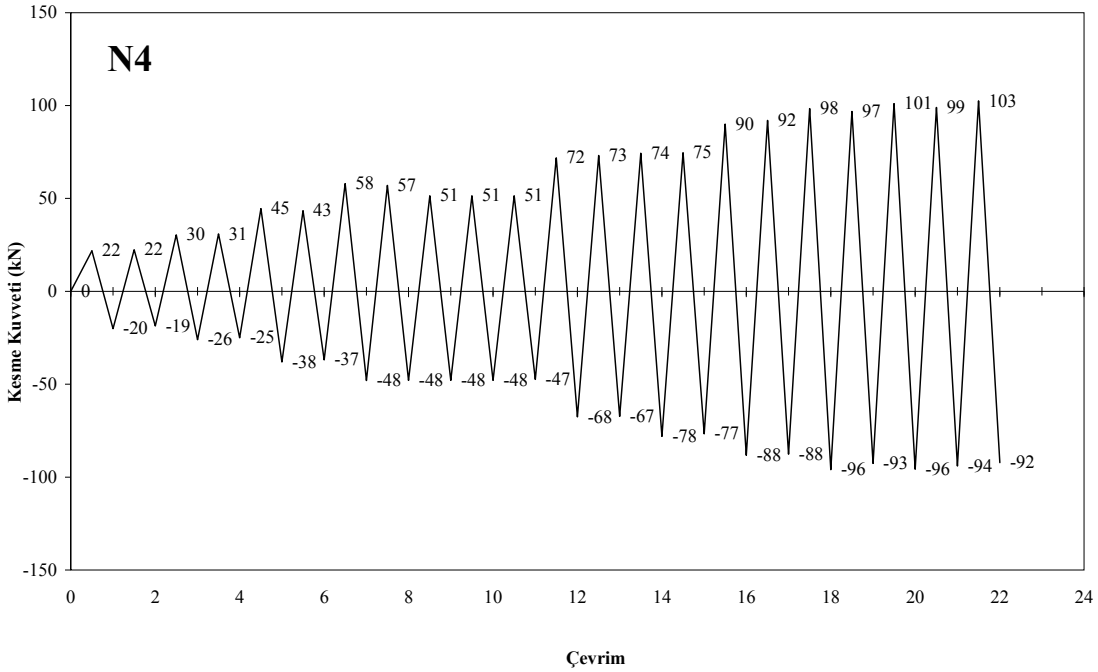


Şekil 5.88-a. Kiriş gövdesinde oluşan yırtılma

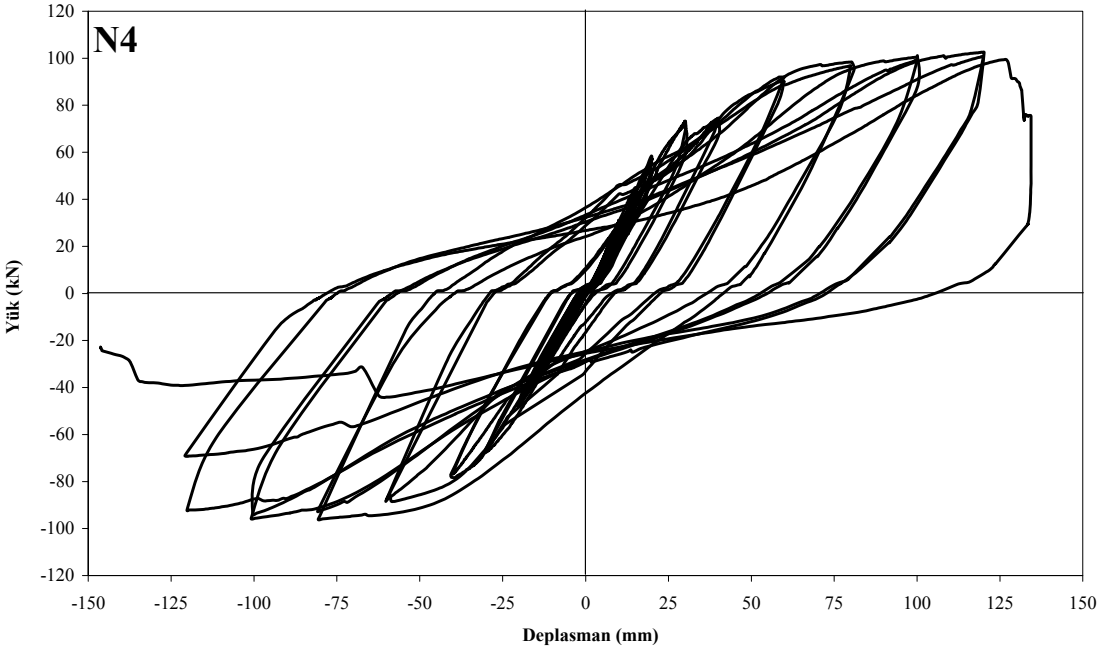


Şekil 5.88-b. –(11-1) çevrimi sonucu kiriş gövdesinde meydana gelen yırtılma

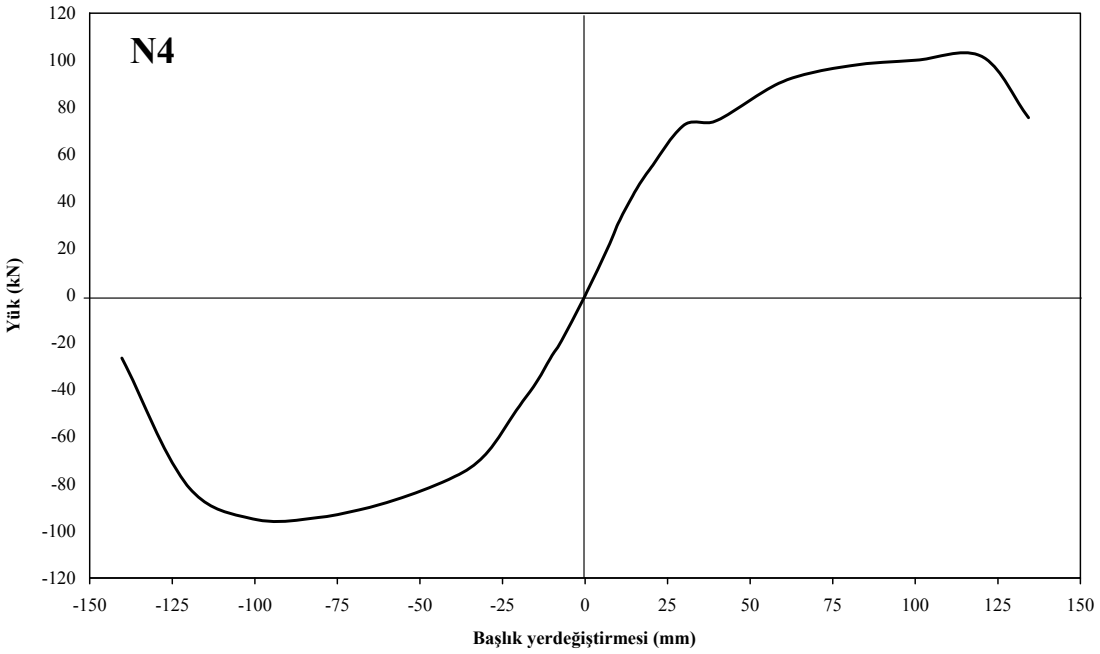
Çelik çerçeve sistemine ait yük geçmişi Şekil 5.89, yük-deplasman ilişki Şekil 5.90, moment-toplam dönme ilişkisi Şekil 5.91, dayanım zarfı Şekil 5.92, rijitlik azalımı grafiği Şekil 5.93 ve enerji tüketme kapasitesi grafiği de Şekil 5.94 'de verilmiştir.



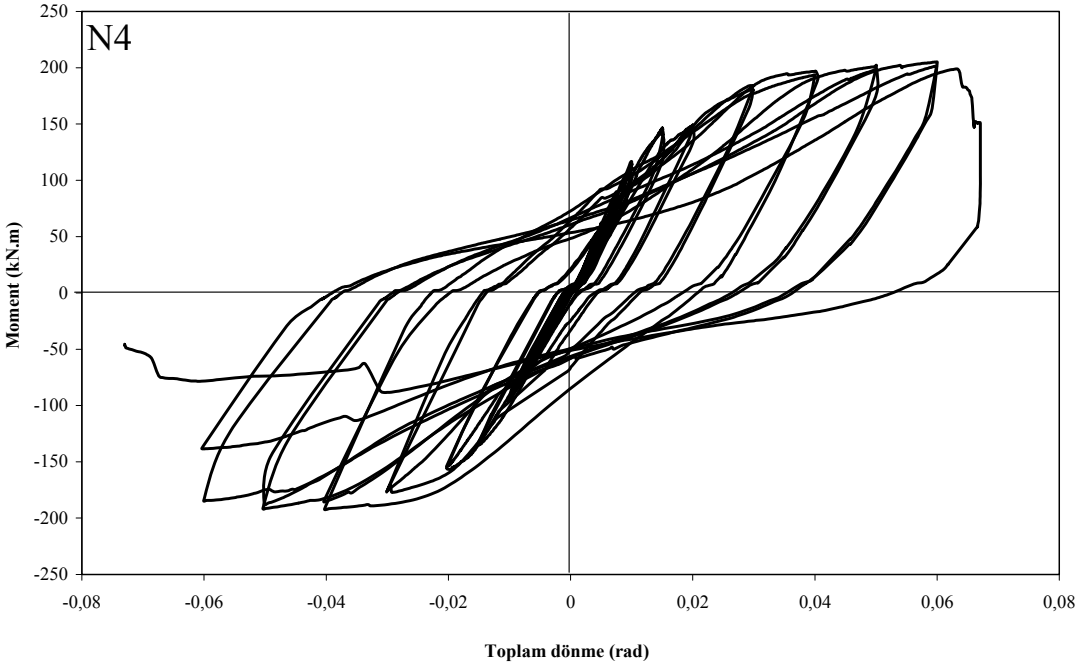
Şekil 5.89. Deney 4 (N4) için yük geçmişi



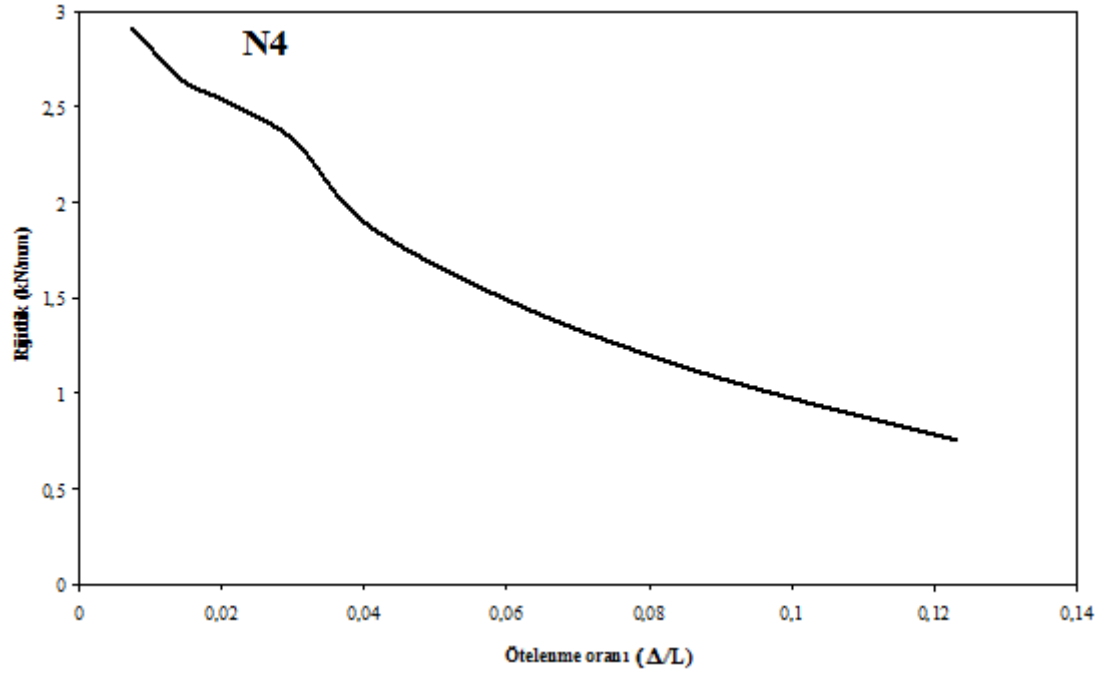
Şekil 5.90. Deney 4 (N4) için yük-deplasman ilişkisi



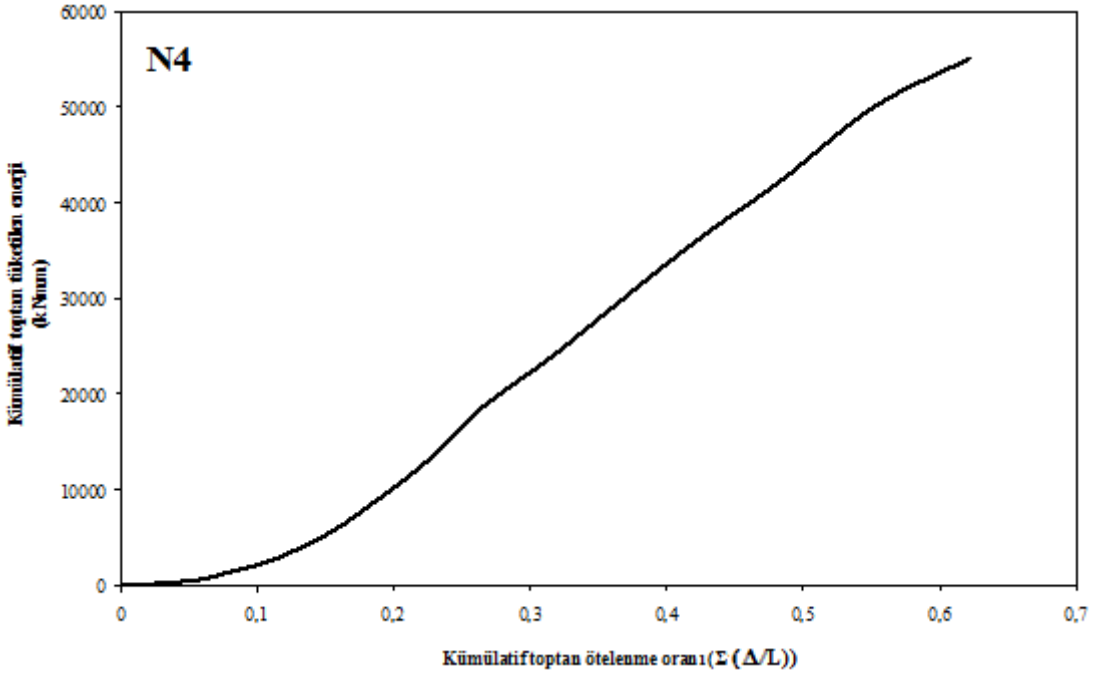
Şekil 5.91. Deney 4 (N4) için moment-toplam dönme ilişkisi



Şekil 5.92. Deney 4 (N4) için dayanım zarfı



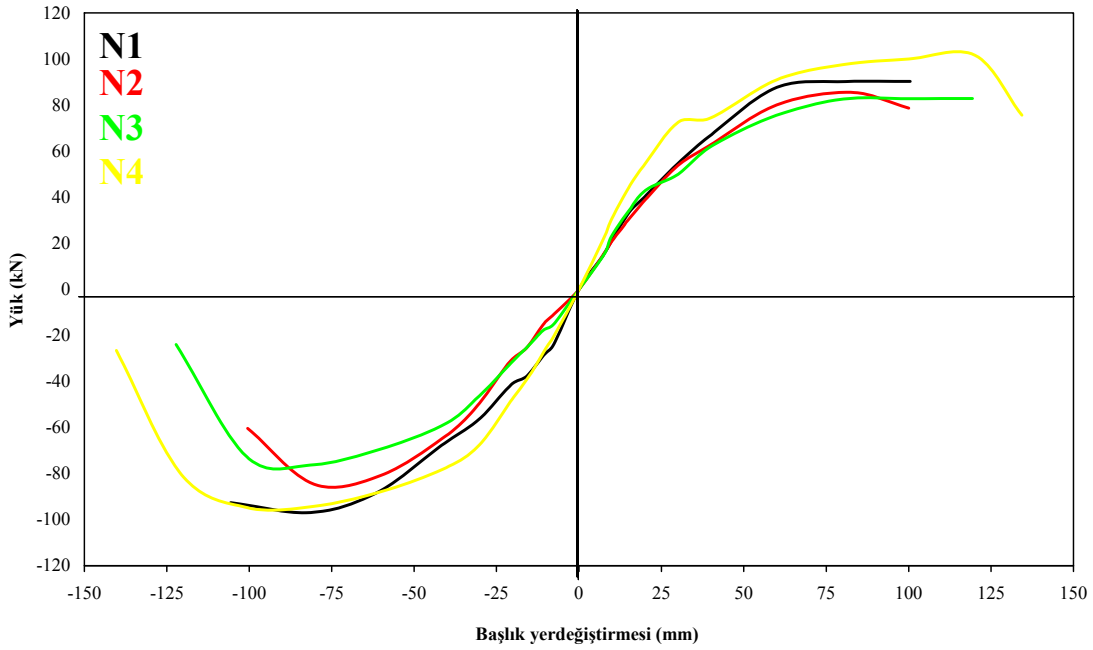
Şekil 5.93. Deney 4 (N4) için rijitlik azalımı grafiği



Şekil 5.94. Deney 4 (N4) için enerji tüketme kapasitesi grafiği

6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

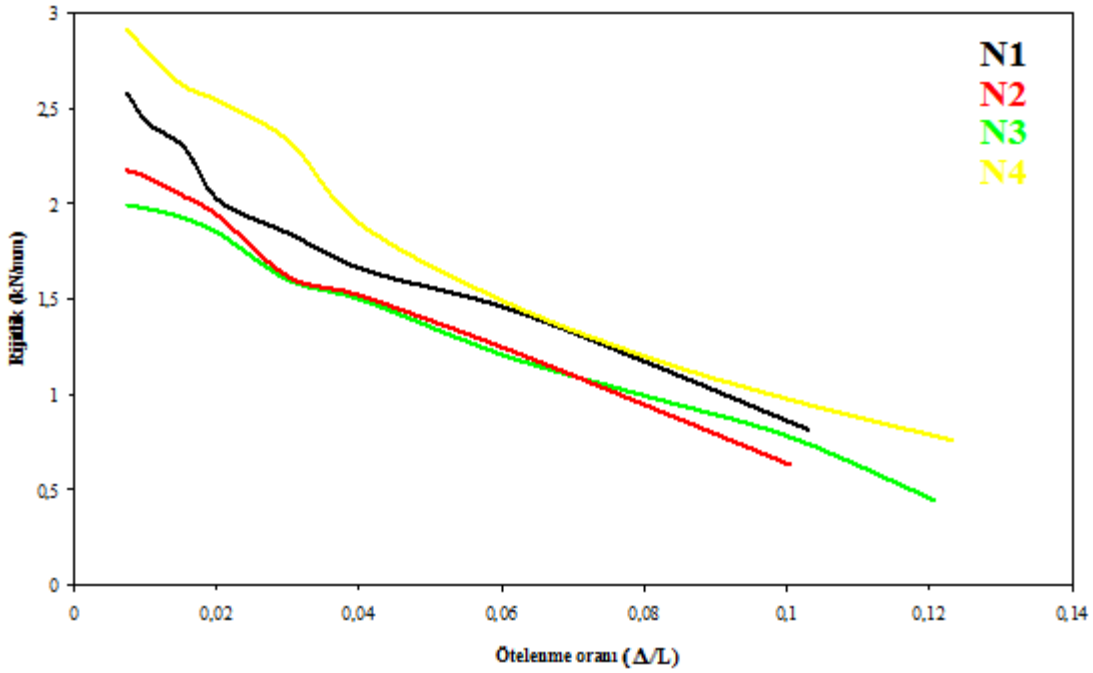
Deney sonuçları; bu çalışmanın amacına uygun olarak, deney numunelerinin özellikleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, test edilen deney numuneleri dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve enerji tüketme kapasitesi bakımından karşılaştırılmıştır. Grafiklerin çizdirilmesinde aynı deplasman değeri için gerçekleştirilen her çevrim için elde edilen yük değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır. Söz konusu numunelerin dayanım zarfları Şekil 6.1 'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deney numunelerine ait dayanım zarfları

Şekil 6.1 'den görüleceği üzere taşınan en büyük ortalama yatay yük değerleri sırasıyla 96,95 kN (N1), 85,48 kN (N2), 82,83 kN (N3) ve 101,60 kN (N4) olarak bulunmuştur. Referans olarak azaltılma ve güçlendirme yapılmayan (N1) numunesi baz alındığında; %40 azaltılma yapılan (N2) numunesi %12 daha az, %45 azaltılma yapılan (N3) numunesi %15 daha az, güçlendirme yapılan (N4) numunesi ise %5 daha fazla yük taşımıştır. Deney numunelerinin en büyük yük değerine ulaştığı deplasman değeri 80-120 mm ve (Δ/L) oranı ise 0,04-0,06 arasındadır.

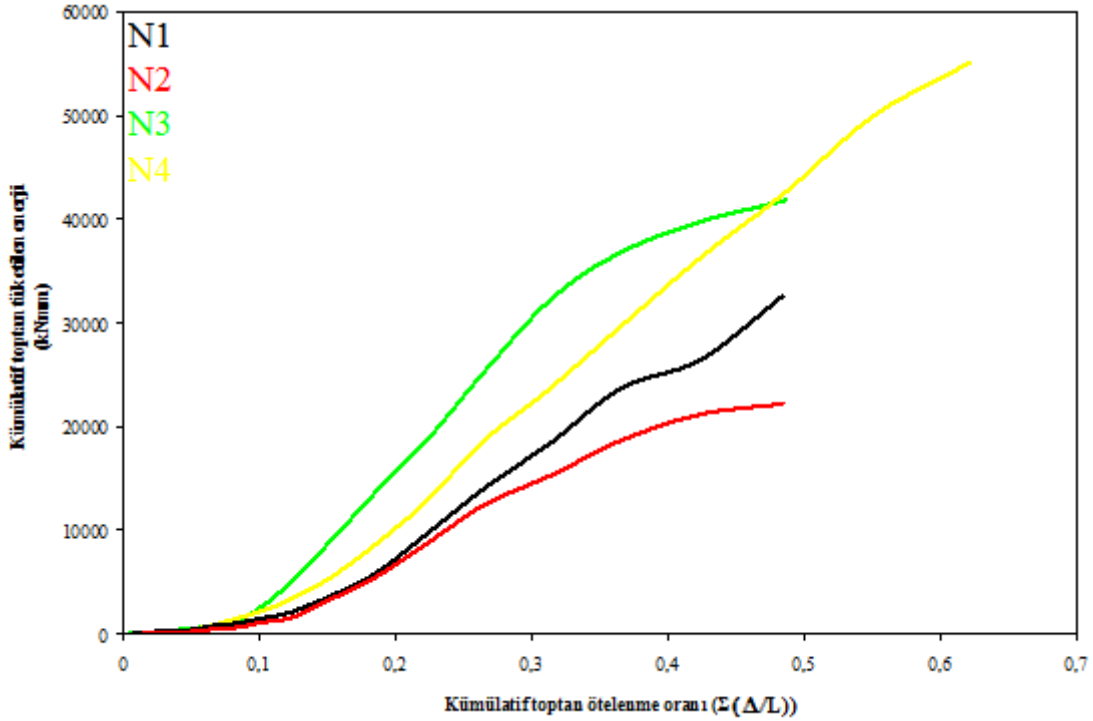
Bu seviyelere kadar kiriş kesitinde akma ve burkulma sınır durumları geçildikten sonra düğüm noktasında kaynaklarda kopma meydana gelmesi ile numuneler göçme sınır durumuna ulaşmışlardır. Söz konusu numunelerin deneylerinden elde edilen rijitlik azalımı grafikleri de Şekil 6.2 'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Deney numunelerine ait rijitlik azalım grafikleri

Şekil 6.2 'nin incelenmesinden görüleceği üzere 1. çevrim rijitlikleri sırasıyla 2,57 kN/mm (N1), 2,17 kN/mm (N2), 1,99 kN/mm (N3) ve 2,91 kN/mm (N4) değerlerinde iken ilerleyen çevrimlerde rijitlikler düşmektedir. Azaltılmış kesitli N2 ve N3 numunelerindeki rijitlik azalımı diğer numuneler göre biraz daha hızlı gerçekleşmiştir. Başlangıç rijitlik değerleri göre N1 numunesi referans olarak alınırsa N2 numunesi %16 daha az, N3 numunesi %23 daha az ve N4 numunesi ise %13 daha fazla başlangıç rijitliğine sahiptir. Deney sonunda ($\Delta/L=0,100$) esnasında numunelerin rijitlik değerleri 1 kN/mm değerinin altına düşmektedir. Bu seviyedeki son rijitlik değerleri numuneler için sırayla (0,811), (0,630), (0,775) ve (0,971) kN/mm 'dir.

Söz konusu numunelerin deneylerinden elde edilen toplam tüketilen enerji grafikleri de Şekil 6.3 ’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Deney numunelerine ait enerji tüketme kapasite grafikleri

Şekil 6.3 ’den görüleceği üzere deney numunelerinin toplam tüketilen enerji değerleri, kümülatif toplam ötelenme oranı (Σ(Δ/L)) 0,484 değerinde iken sırasıyla 32590 kNmm, 22194 kNmm, 41817 kNmm, 42374 kNmm olarak elde edilmiştir. Referans N1 numunesi baz alındığında N2 numunesi %32 daha az, N3 numunesi %28 daha fazla ve N4 numunesi %30 daha fazla enerji tüketmiştir. Bu sonuçlardan N2 numunesinde daha az enerji tüketilmesinin nedeni bu numunenin diğer numunelere göre daha erken kaynak problemine girmesi, kaynakların kopmasıdır.

Deney numunelerine ait deneysel sonuçları, Çizelge 6.1, göreli kat ötelenme sınır durumları için elde edilen deneysel sonuçlar ise Çizelge 6.2 ’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney numunelerine ait deneysel sonuçlar

Numune	En Büyük Kesme Kuvveti/Moment				En Büyük Kesme Kuvveti/ Moment Oranı	1. Çevrim Rijitliği	Son Rijitlik		1. Çevrim Rijitlik Oranı	Tüketilen Enerji		Tüketilen Enerji Oranı
	Yük (kN)	Moment (kNm)	Deplasman (Δ) (mm)	(Δ /L)	*(2)/N1*	(kN/mm)	Rijitlik (kN/mm)	(Δ/L)	*(7)/N1*	Toplam Tüketilen Enerji (kNmm)	Toplam (Δ/L)	*(11)/N1*
(1)	*(2)*	*(3)*	*(4)*	*(5)*	*(6)*	*(7)*	*(8)*	*(9)*	*(10)*	*(11)*	*(12)*	*(13)*
N1	96,95	193,90	81,36	0,0407	1,00	2,57	0,811	0,103	1,00	32590	0,484	1,00
N2	85,48	170,96	82,36	0,0412	0,88	2,17	0,630	0,100	0,84	22194	0,484	0,68
N3	82,83	165,66	119,32	0,0597	0,85	1,99	0,775	0,100	0,77	41817	0,487	1,28
N4	101,60	203,20	120,12	0,0601	1,05	2,91	0,971	0,100	1,13	42374 55081	0,484 0,621	1,30 --

Çizelge 6.2. Deney numunelerine ait göreli kat ötelenme sınır durumları için elde edilen deneysel sonuçlar

NUMUNE	δji/hji=0,01		δji/hji=0,02		δji/hji=0,03		δji/hji=0,04	
	KESME KUVVETİ (kN)	GÖZLENEN DAVRANIŞ	KESME KUVVETİ (kN)	GÖZLENEN DAVRANIŞ	KESME KUVVETİ (kN)	GÖZLENEN DAVRANIŞ	KESME KUVVETİ (kN)	GÖZLENEN DAVRANIŞ
N1	40,24	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	67,75	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	87,34	Kiriş alt başlığında akma meydana gelmiştir.	91,85	Kiriş alt başlığında kaynakta ayrılma başlamıştır.
	40,76		68,82		90,05	17,55 mm'lik kalıcı deplasman gözlenmiştir.	99,40	En büyük yatay yük değeri ölçülmüştür.
	40,39		66,73		88,03	-	88,55	Kiriş baş tarafında yanal burkulma ve gövdede düğüm noktasına yakın bir yerde buruşma başlamıştır. Kiriş alt başlığında akma olayı ilerlemiştir. Kiriş alt başlığındaki kaynak kopmuştur.
	42,38		66,72		86,49	-	94,49	Kiriş alt başlıkta mesnet yüzünden 8 cm uzakta burkulma oluşmuştur.
N2	38,69	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	63,78	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	78,38	Kiriş alt başlığında deformasyon ve akma olayı meydana gelmiştir.	87,25	Kiriş alt başlığında oluşan akma olayı ilerlemiştir. Kiriş alt başlık kaynağında ayrılma meydana gelmiştir.
	31,43		64,19		80,22	Kiriş üst başlığında deformasyon ve akma meydana gelmiştir. Kiriş üst başlık kaynağında ayrılma başlamıştır.	91,17	En büyük yatay yük değeri ölçülmüştür. Daha önce meydana gelen kiriş üst başlığındaki kaynak çatlağı büyümüştür.
	38,55		62,78		81,77	-	83,71	Gövdenin üst başlığı tarafına doğru hafif burkulma olmuştur.
	30,33		63,12		81,68	-	78,17	Kiriş gövdesinin alt başlığı tarafına doğru hafif burkulma olmuştur.
N3	27,84	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	61,40	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	73,81	Kiriş alt bölgesinde burkulma başlamıştır.	81,75	Kiriş alt başlığında ve kiriş basınç bölgesinde oluşan deformasyon miktarı artmıştır.
	31,41		58,49		69,07	13,14 mm'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir.	76,22	Kiriş üst başlık bölgesinde kaynakta çatlama meydana gelmiştir.
	28,81		63,12	7,01 mm'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir.	77,31	32,97 mm'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir.	83,47	En büyük yatay yük değeri ölçülmüştür.
	33,11		58,87	16,78 mm'lik kalıcı deplasman elde edilmiştir.	70,19	Kiriş gövdesi basınç bölgesinde deformasyon başlamıştır. Kiriş alt başlığında daha önce meydana gelen burkulma ileri boyuta geçmiştir.	76,47	Kiriş kesit gövdesinin en zayıf olduğu noktada bombeleşme meydana gelmiştir. Kiriş gövdesi basınç bölgesinde lokal burkulma başlamıştır. Basınç bölgesinde çekmede akma, basınçta burkulma meydana gelmiştir.
N4	58	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	73,12	Sistemde yapısal bir bozukluk görülmemiştir.	74,57	Kiriş alt başlığı akmıştır.	92,02,	Kiriş alt başlık kaynağı kopmuştur.
	48		67,32		76,72	-	87,61	Kolon kiriş birleşim noktasında gözle görülür deformasyon meydana gelmiştir.
	57		74,33		89,97	-	98,38	Kiriş baş tarafında burulma ve gövdede düğüm noktasına yakın bir bölgede buruşma olmuştur.
	48		78,11		88,22	-	95,95	Kiriş alt başlığında mesnet yüzünden 8cm kadar uzakta burkulma meydana gelmiştir.

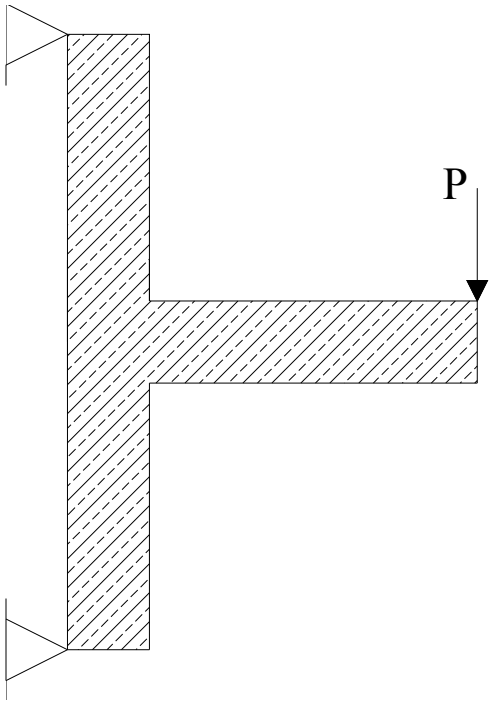
7. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

7.1. Giriş

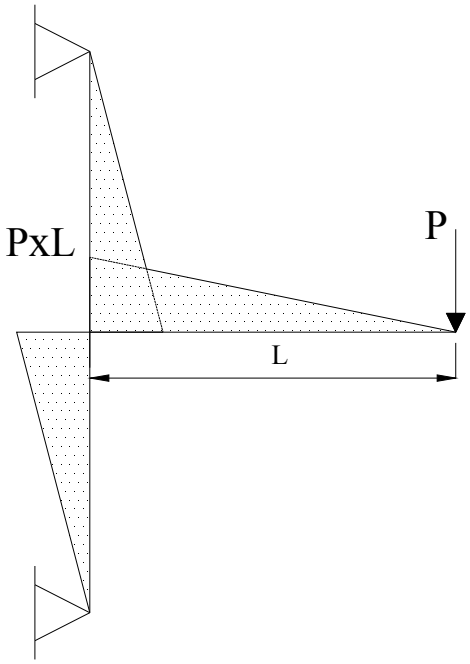
Bu tez kapsamında analitik çalışma olarak deney numunelerinin teorik olarak akma yükü ile plastik durum için taşınan yükleri ve bu yük durumlarına karşı gelen moment değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla deney numuneleri gerçek boyutlarında ve tespit edilen malzeme özelliklerinde SAP2000 programı kullanılarak modellenmiş ve deney düzeneğine uygun olarak kiriş ucundan P kuvveti tatbik edilmiştir. Deney numunesinde oluşan kesit tesirleri belirlenmiştir. Deney numunelerinin oluşan bu kesit tesirleri altında akma ve plastik durumları için sınır durum yükleri ve buna karşılık gelen momentleri hesaplanmıştır.

7.2. Deney Numunelerinin Analizi

Deneylerde kullanılan numuneler gerçek boyut ve malzeme özellikleri kullanılarak SAP2000 programı kullanılarak modellenmiştir. Yine deney düzeneğine uygun olarak kolonların mesnetlenmesi ve kiriş ucuna P yükü tatbiki yapıldıktan sonra sistemin statik analizi gerçekleştirilerek oluşan kesit tesirleri elde edilmiştir (Şekil 7.1-7.2). Deney numunelerinin kesit özellikleri, malzeme özellikleri ve statik analizden elde edilen kesit tesirlerinden faydalanarak akma ve plastik sınır durumları için yük ve moment taşıma güçleri elde edilmiştir



Şekil 7.1. Deney numunesinin modellenmesi



Şekil 7.2. Deney numunesine uygulanan P yükü altında oluşan moment diyagramı

Statik analiz sonucu kirişin yük-moment ilişkisi denklem (7.1) 'deki gibi ifade edilebilir.

$$M=P \times L \tag{7.1}$$

Kiriş enkesitinin sahip olduğu geometrik ve mukavemet özelliklerine bağlı olarak da moment taşıma kapasitesi denklem (7.2) 'deki gibi hesaplanabilir.

$$Mr=\sigma_y \times W \tag{7.2}$$

(7.1) ve (7.2) ifadelerinden sınır durumlar için P yük değeri (7.3) ifadesinden hesaplanabilir.

$$P=\frac{\sigma_y \times W}{L} \tag{7.3}$$

Bu ifadelerde;

σ_y*: Deney* numunelerinin üretildiği malzemenin akma gerilmesi olup 302 N/mm^2 'dir.

W: Kesitin x-x ekseninde sahip olduğu mukavemet momenti olup, hesaplamalarda akma sınır durumu için W_e, plastik sınır durum için ise W_p değeri dikkate alınmıştır. Ayrıca azalma miktarları mukavemet momentlerinin belirlenmesinde dikkate alınmıştır.

7.2.1 Akma durumu için analitik hesaplamalar

Akma durumu için akma kuvveti P_y ve akma moment M_y hesaplanırken yukarıda ele alındığı şekilde akma gerilmesi ve kesitin elastik mukavemet momenti kullanılmıştır.

7.2.2 Plastik durum için analitik hesaplamalar

Plastik durum için akma kuvveti P_p ve akma moment Mp hesaplanırken yukarıda ele alındığı şekilde akma gerilmesi ve kesitin plastik mukavemet momenti kullanılmıştır. Plastik moment hesabı yapılırken (7.4) ifadesi esas alınmıştır.

$$Mp=1,1\times D_a\times W_p\times \sigma_y \tag{7.4}$$

Bu ifadede yer alan D_a artırma katsayısı malzeme sınıfına ve eleman türüne bağlı olarak 1,2-1,1 arasında değişmektedir.

Yukarıda anlatılan esaslar göre her bir deney numunesi için hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar Çizelge 7.1 ’de sunulmuştur. Ayrıca bu çizelgede deneysel sonuçlarda verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deney numunelerinin analitik ve deneysel taşıma güçleri

NUMUME	**Wx** (cm^3)	**Wp** (cm^3)	**l'** (mm)	**Analitik Hesaplamalar**				**Pp/Py** *(8)/(6)*	**Deneysel** P_{max}	**Deneysel** P_{max}/ **Analitik Pmax** *(10)/(8)*
				My (kNm)	**Py** (kN)	**Mp** (kNm)	**Pp** (kN)			
(1)	*(2)*	*(3)*	*(4)*	*(5)*	*(6)*	*(7)*	*(8)*	*(9)*	*(10)*	*(11)*
N1	429	484	2000	130	64,78	193	96,47	1,49	96,95	1,00
N2	282	330	1810	85	46,94	132	72,59	1,55	85,48	1,18
N3	264	311	1810	80	44,00	124	68,59	1,56	82,83	1,21
N4	429	484	1920	130	67,51	193	100,54	1,49	101,60	1,01

8. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

8.1. Giriş

Bu çalışmada tipik kolon-kiriş birleşiminde, kolon-kiriş birleşim bölgesinde karşılaşılan olumsuzlukların önüne geçmek için toplam 4 adet deney numunesi üretilmiş ve tersinir tekrarlanır yük altında test edilmiştir. Deney numunelerinin ilki güçlendirilmiş kiriş kesiti şeklinde, ikinci ve üçüncü numuneler ise sıra ile %40 ve %45 oranında zayıflatma yapılmış numunelerdir. Ayrıca sonuçların karşılaştırılması için 1 adet te referans numunesi üretilmiş ve test edilmiştir.

Deneysel çalışmalardan elde edilmiş olan yük geçmişi, yük-deplasman ilişkisi, dayanım zarfı özellikleri, çerçeve sisteminde meydana gelen rijitlik azalımı ve enerji tüketme kapasitesine ait grafikler 5. Bölümde verilmiştir. 6. Bölümde ise, deney sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi sunulmuştur.

7. Bölümde gerçekleştirilen analitik çalışmalarda ise, çelik kolon-kiriş sistemin akma ve göçme (plastik durum) durumları için taşıma güçleri hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

8.2. Deneysel ve Analitik Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 8.1 ve 8.2 ’de sunulmuştur. Söz konusu bu çizelgede, deneysel çalışmada elde edilen göçme yükleri ve göçme anındaki yatay kat ötelenme oranı (Δ/L), başlangıç rijitlik değerleri ve toplam tüketilen enerji değerleri verilmiştir. Ayrıca, analitik çalışmalardan elde edilen akma ve göçme yükleri de bu çizelgede sunulmuştur. Deneysel ve analitik sonuçların bir karşılaştırması da yine bu çizelgede yapılmıştır.

Çizelge 8.1. Deney numunelerinin deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Numune	En Büyük Kesme Kuvveti/Moment				Max. Kesme Kuvveti/Moment Oranı ***(2)/N1***	1. Çevrim Rijitliği (kN/mm)	Son Rijitlik		1. Çevrim Rijitlik Oranı ***(7)/N1***	Tüketilen Enerji		Tüketilen Enerji Oranı ***(11)/N1***
	Yük (kN)	Moment (kNm)	Deplasman (Δ) (mm)	(Δ/L)			Rijitlik (kN/mm)	(Δ/L)		Top. Tüketilen Enerji (kNmm)	Toplam (Δ/L)	
(1)	*(2)*	*(3)*	*(4)*	*(5)*	*(6)*	*(7)*	*(8)*	*(9)*	*(10)*	*(11)*	*(12)*	*(13)*
N1	96,95	193,90	81,36	0,0407	1,00	2,57	0,811	0,103	1,00	32590	0,484	1,00
N2	85,48	170,96	82,36	0,0412	0,88	2,17	0,630	0,100	0,84	22194	0,484	0,68
N3	82,83	165,66	119,32	0,0597	0,85	1,99	0,775	0,100	0,77	41817	0,487	1,28
N4	101,60	203,20	120,12	0,0601	1,05	2,91	0,971	0,100	1,13	42374 55081	0,484 0,621	1,30 --

Çizelge 8.2. Deney numunelerinin analitik ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

NUMUME	**Analitik Hesaplamalar**				**Pp/Py** *(8)/(6)*	**Deneysel P_{max}**	**Deneysel P_{max}/ Analitik Pmax** *(7)/(5)*
	My (kNm)	**Py** (kN)	**Mp** (kNm)	**Pp** (kN)			
(1)	*(2)*	*(3)*	*(4)*	*(5)*	*(6)*	*(7)*	*(8)*
N1	130	64,78	193	96,47	1,49	96,95	1,00
N2	85	46,94	132	72,59	1,55	85,48	1,18
N3	80	44,00	124	68,59	1,56	82,83	1,21
N4	130	67,51	193	100,54	1,49	101,60	1,01

8.3. Sonuç ve Değerlendirmeler

Bu çalışmada dört değişik kesit özelliğine sahip kiriş-kolon birleşimli çelik sistem deprem yükünü benzeştiren yatay tersinir-tekrarlanır yükleme altında test edilmiştir. Deney numunelerinin tasarımında ve sayısının belirlenmesinde bu çalışmanın gerçekleştirildiği S.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün imkanları önemli rol oynamıştır. Mevcut olan imkanların el verdiğince tezin amacına ulaşmak için fazla sayıda deney numunesi hazırlanmasına çalışılmıştır. Bu nedenle, kısıtlı sayıda gerçekleştirilen deneyler ile bu konuda kesin bir yargıya varmanın mümkün olmadığı da bir gerçektir. Ayrıca deney numunelerinin davranış özellikleri ile gerçek yapının davranış özellikleri birbirinden farklılık gösterebilmektedir. Deney numunelerinin davranışının tam olarak ortaya çıkarılabilmesi için birçok değişken mevcuttur. Bu değişkenlerin tamamını deney numunelerinin hazırlanması ve test edilmesinde göz önünde bulundurmak da oldukça güçtür. Bu nedenle, elde edilen sonuçların bu çalışmada ele alınan değişkenler için geçerli olabileceği de unutulmamalıdır. Tüm bu değerlendirmeler göz önünde bulundurularak, bu tez kapsamında yapılan deneysel ve analitik çalışmaların ışığı altında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Gerçekleştirilen deneyler sonunda kiriş tarafından taşınan en büyük ortalama kesme kuvveti 101,60 kN ile N4 numunesine aittir. Referans N1 numunesine göre N4 numunesi %5 daha fazla kesme kuvveti, dolayısıyla moment taşımaktadır. N2 ve N3 numuneleri ise referans N1 numunesinden sırasıyla %12 ve %15 daha az kesme kuvveti taşımıştır. Bu nedenle kolon-kiriş birleşim noktasında kiriş kesitinin rijitlik (guse) levhası kullanarak güçlendirilmesi kiriş kesme kuvveti ve dolayısıyla moment kapasitesini artırmaktadır.

2. Başlangıç rijitlik değerleri esas alındığında en büyük rijitlik değeri 2,57 kN/mm değer ile N4 numunesine aittir. Referans N1 numunesine göre N4 numunesi %13 daha büyük, N2 ve N3 numuneleri ise sırasıyla %16 ve %23 daha az başlangıç rijitlik değerine sahiptirler. Kolon-kiriş birleşim noktasında rijitlik (guse) levhası kullanımı başlangıç rijitliğini artırırken, kiriş kesitinde yapılan kesit azaltması başlangıç rijitliğini yaklaşık %20 oranında azaltmaktadır.

3. Tüketilen enerji değerleri esas alındığında yine en büyük tüketilen enerji 42374 kNmm ile N4 numunesine aittir. Referans N1numunesine göre N4 numunesi %30, N3 numunesi %28 daha fazla enerji tüketirken, N2 numunesi ise %32 daha az enerji tüketmiştir. N2 numunesinin tüketmiş olduğu enerji miktarının az olması bu numunenin diğer numunelere göre daha erken kaynak problemine girmesidir. Ana genel ifade ile hem rijitlik (guse) levhası kullanarak kesiti güçlendirilme, hem de kiriş kesitinde azaltma yapılması tüketilen enerji miktarını %30 oranında artırmaktadır. Bu artış bu tür sistemlerin deprem altındaki performansını olumlu yönde etkilemektedir.

4. Analitik çözümde elde edilen sonuçlara göre deney numunelerinin göçme sınır durum (plastik durum) için taşıdıkları kesme kuvveti değerleri, akma sınır durumuna göre tüm numuneler için yaklaşık %49-55 arasında daha büyüktür.

5. Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılmasında; N1 ve N4 numuneleri için elde edilen ve hesaplanan en büyük kesme kuvveti değerleri hemen hemen aynı çıkmaktadır. Azaltılmış kesitli N2 ve N3 numuneleri için elde edilen deneysel kesme kuvveti değerleri, analitik çözümden elde edilen değerlerden yaklaşık %20 daha fazladır. Analitik hesaplamalar yapılırken Da artırma katsayısı 1,2 olarak alınmıştır. Ayrıca azaltılmış kesitler için gerçek kesit özellikleri kullanılmıştır. Plastik hesaplamalar için önerilen formül diğer numuneler için oldukça gerçeğe yakın sonuçlar verirken, azaltılmış kesitler için bir miktar sapma göstermektedir. Bu nedenle azaltılmış kesitler için analitik hesaplamalarda kullanılan bu formülün yeniden değerlendirilmesi göz önünde bulundurulabilir.

6. Deney numunelerinin göçme şekilleri göz önünde bulundurulduğunda ileri çevrim safhalarında çelik kirişte ilk olarak en büyük gerilme seviyesinde kesitte akma olayı gerçekleşmektedir. Daha sonra başlıklarda burkulma başlamaktadır. Burkulma ileri safhalarda kiriş gövdesine doğru inmiştir. Bu sırada kaynaklarda hasar oluşumu başlamıştır. Özellikle N2 numunesinin deneyinde başlık kaynaklarında kopma beklenenden daha erken gerçekleşmiştir. Bu durum taşınan maksimum kesme kuvveti ve moment değerlerinde çok fazla etkili olmasa da özellikle son rijitlik ve tüketilen enerji değerlerinin beklenenden daha az olmasına neden olmuştur.

7. Gerçekleştirilen deney sonucunda çelik elemanların imalatında kullanılan kaynak birleşiminin teşkilinde büyük özen gösterilmesi ve yapılan imalatın kontrolünün yapılmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Ashrafi, Yousef., Rafezy, Behzad., Howson, W.Paul., 2009, Evaluation of the performance of reduced beam section (RBS) connections in steel moment frames subjected to cyclic loading, *Proceedings of the World Congrees on Engineering 2009 Vol II WCE 2009,* July 1-3, 2009, London, U.K.

Bayülke, N., 1996, Moment taşıyan çelik kolon-kiriş birleşim yerlerinin 1994 Northridge Kaliforniya depremindeki davranışı, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 382

Bayülke, N., 2003, 1994 Northridge Kaliforniya depremi sonrasında moment taşıyan çelik kolon-kiriş birleşim yerleri üzerinde yapılan deneyler, araştırma ve geliştirmeleri, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 425/3

Deren, H., 2008, Uzgider, E., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö., 2008, *Çelik Yapılar, Çağlayan Basımevi*, No;26/3-4, İstanbul

FEMA-267., 2000, Federal Emergency Management Agency

FEMA 350., 2000, Federal Emergency Management Agency

FEMA 351., 2000, Federal Emergency Management Agency

Jin, Jun., El-Tawil, Sherif., 2005, Seismic performance of steel frames with reduced beam section connections, *Journal of Constructional Steel Research,* 61 (2005) 453-471

John L. Gross, Ph.D., P.E., Design guidelines for the seismic modification of welded steel moment frame buildings, *Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg*, Maryland 20899 USA

Karaduman, M., 2002, *Çelik Yapılar, Atlas Yayın Dağıtım*, No;38, İstanbul

Kim, Young-Ju., Shin, Kyung-Jae., Kim, Wha-Jung., 2008, Effect of stiffener details on behavior of CFT column-to-beam connections, *Steel Structures* 8 (2008) 119-133

Lee, Cheol-Ho., Kim, Jae-Hoon., 2007., Seismic design of reduced beam section steel moment connections with bolted web attachment, *Journal of Constructional Steel Research,* 63 (2007) 522-531

Lee, Cheol-Ho., Chung, Samuel W., 2007, A simplified analytical story drift evaluation of steel moment frames with radius-cut reduced beam section, *Journal of Constructional Steel Research,* 63 (2007) 564-570

Ohsaki, M., Tagawa, H., Pan, P., 2009, Shape optimization of reduced beam section under cyclic loads, *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 1511-1519

Okahashi, Y., Pantelides, C.P., Reaveley, L.D., Reduced beam section moment connections without continuity plates.

Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfos, C.N., Efthimiou, I.Z., 2010, Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections-experimental analysis and finite element model simulation, *Engineering Structures*, 32 (2010) 2683-2692

Prinz, G.S., Richards, P.W., 2009, Eccentrically braced frame links with reduced web sections, *Journal of Constructional Steel Research,* 2009

Shen, J., Kitijasateanphun, T., Srivanich, W., 2000., Seicmic performance of steel moment frames with reduced beam sections, *Engineering Structures*, 22 (2000) 968-983

Tezer, Ö., 2002, Zayıflatılmış kiriş enkesitinin moment aktaran çelik çerçevelerin elastik ve elastik olmayan davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* İstanbul, 1-46

Tezer, Ö., 2005, Zayıflatılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimleri, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 435/1

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : E. Tuba HATİPOĞLU
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya 16.07.1981
Telefon : -
Faks : -
e-mail : tugba_hatipoglu@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite :	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2007
Yüksek Lisans :	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2011
Doktora :	-	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2007-2008	Kadınhanı Faik İçil MYO	Ücretli Öğretim Görevlisi
2009-…	Konya İl Özel İdaresi	İnşaat Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Yapı Bilgisi-Çelik Yapılar
İçmesuyu Temini-Su Deposu İnşaatı
Karayolları-Asfalt ve Parke

YABANCI DİLLER

İngilizce