

# ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ MEKANİK ANABİLİM DALI

# KAFES TİPİ KÖPRÜ YAPILARDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ DİNAMİK YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Akhaan MIZAMKHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ MEKANİK BİLİM DALI

BURSA-2018

### T. C. ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

# KAFES TİPİ KÖPRÜ YAPILARDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ DİNAMİK YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Akhaan MIZAMKHAN

Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ (Danışman)

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ MEKANİK BİLİM DALI

BURSA 2018

### **TEZ ONAYI**

Akhaan MIZAMKHAN tarafından hazırlanan "Kafes Tipi Köprü Yapılardaki Bağlantı Elemanlarının Dinamik Yük Etkisi Altındaki Davranışı" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman	: Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ
----------	----------------------------

Başkan :	Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Doç.Dr. Mustafa Özgür YAYLI Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Doç.Dr. Şeref Doğuşcan AKBAŞ Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali BAYRAM Enstitü Müdürü 05/01/2018

# U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,

- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,

- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,

- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

# beyan ederim.

### 05/01/2018 Akhaan MIZAMKHAN

# ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

# KAFES TİPİ KÖPRÜ YAPILARDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ DİNAMİK YÜK ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

### Akhaan MIZAMKHAN

Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

### Danışman: Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

Kafes köprüler ekonomik ve nispeten uygun fiyatlı tasarım inşaat nedeniyle ulaşım ağlarında kullanılmaktadır. Birleşim plakalardan oluşan bu köprüler genellikle tekrarlanan ve dinamik yükler etkisi altında yük taşıma kapasitesi ve rijitliklerini kaybederler. Bu birleşim plakaların varlığı köprü üyelerinin sertliği üzerinde kayda değer bir etkisi vardır.

Bu çalışma ile, bu özel bağlantı elemanının sismik yükler altında, hareketini karakterize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu da kafes çelik köprünün bağlantı levhası davranışını tahmin etmek için hesaplama sonlu eleman modelini kurarak elde edilir. Malzemenin kurucu davranışı doğrusal olmayan çifte-elastoplastik hasar malzeme modeli ile karakterize edilir. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri sismik yükleme koşullarına maruz birleşim plakaların stres, elastik olmayan gerilme ve hasar durumlarını hesaplamak için yapılır. Analizlerin sonucu şunları önerir; i) makas elemanlarından ötürü bağlantı levhası üzerinde sıkıştırma/basınç ve gerilme arasındaki etkileşim birleşim plakalarda hasar oluşmasında önemli rol oynar ii) çatlak, perçinli bağlantı etrafında başladığı tahmin edilmektedir ve çatlak bölgesel plastic gerilme bölgede ilerleyip birleşim plakaların ciddi yetersizliğine yol açar iii) Burkulan bağlantıt plakalar etkili genişlikten çıkmış oluyor dolaysıyla onların tasarım kontrolü için kullanılan etkin genişlik konsepti burada tutarlı olmadığı görülüyor.

Anahtar Kelimeler: Kafes köprüler; Bağlantı levhası; Köprülerin statik, dinamik ve sismik analizi;

### ABSTRACT

#### MSc Thesis

THE MODELING THE BEHAVIOR GUSSET PLATES OF THE TRUSS BASED BRIDGES UNDER DYNAMIC LOADING

### Akhaan MIZAMKHAN

### Uludağ University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering

### Supervisor: Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

The truss based steel bridges have been used in transportation networks due to their economical design and relatively affordable construction. These bridges usually consist of gusset plates which lose their load carrying capacity and rigidity under the effects of repeated and dynamics loads. The resence of these gusset plates has an appreciable effect on the stiffness of the members of the bridge.

This study is aimed to characterize the behavior of this particular connection member under the seismic loading. This is achieved by establishing a computational finite element model to predict the behavior of gusset plates in a truss based steel bridge. The constitutive behavior of material is characterized by a nonlinear coupled elastoplastic damage material model. The nonlinear finite element analyses are performed to calculate the stress, inelastic strain and damage states of the gusset plates subjected to seismic loading conditions. The analyses results suggest the followings; i) the interaction between compression and tension on the gusset plate due to the truss members plays an important role on the failure of the gusset plates ii) the initiation of crack due to the damage on gusset plate is predicted around riveted connections and it is found that the crack propagates over the localized plastic strain region, resulting in a catastrophic failure of the gusset plate iii) the gusset plate is buckled out of the plane, therefore the effective width concept used in the design check of the gusset plates is found to be unconservative.

*Key words*: Gusset plate; steel truss bridge; computational model; fracture; static, dynamic and seismic loading

# TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bilgi, deneyim ve yakın ilgilerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca bilgisayar programı kullanımı aşamasında yaptığı katkılardan dolayı İsmail Cem TÜRTÜK 'e teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

### Akhaan MIZAMKHAN

ÖZET	i
ABSTRACT	i
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MALZEME VE YÖNTEM	7
3.1. Doğrusal Olmayan Elatoplastik Malzeme Modeli	7
3.2. Malzeme Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi	10
4. BULGULAR	12
4.1. Kafes Köprünün Statik Ve Dinamik Analizi	12
4.1.1. Köprü Tasarımın Detayları (Kaynaklı Birleşimli)	12
4.1.2. Sonlu Eleman Modeli	15
4.1.3. Analizler ve tartışmalar	16
4.2. Köprü Tasarımın Detayları	23
4.2.1. Köprü Tasarımın Detayları (Civata Birleşimli)	23
4.2.2. Sonlu Eleman Modeli	26
4.3. Deprem Yükleri Altında Yapının Dinamik Tepkisi	29
4.3.1. Analiz ve Tartışma	31
5. SONUÇ	36
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	39

# İÇİNDEKİLER

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
σ	Cauchy Gerilme Tansörü
8	Gerilme Tansörü
$\overline{\overline{E}}$	Hasarsız malzemin dördüncü dereceden elastik malzeme
	modülütensörüdür
α	Alfa Taneciği
β	Beta Taneciği
γ	Gama Taneciği
X	X Işını Simgesi
σ	Cauchy Gerilme Tansörü
κ	Çift oluşumu soğurma katsayısını
τ	Fotoelektrik Etki Kısmi Zayıflatma Katsayısı
μ	Lineer Azalım Katsayısı
$\mu_{\rm m}$	Kütle Azalım Katsayısı
I <sub>0</sub>	Zayıflatılmamış Radyasyon Şiddeti
Ι	Zayıflatılmış Radyasyon Şiddeti
ρ	Yoğunluk
Ť	Tufal Agregası Kullanılarak Üretilmiş Ağır Beton
D	Demir Cevheri Agregası Kullanılarak Üretilmiş Ağır Beton
B1	Barit1 Agregası Kullanılarak Üretilmiş Ağır Beton
B2	Barit2 Agregası Kullanılarak Üretilmiş Ağır Beton
G	Çelikhane Cürufu, Demir Cevheri ve Taştozu Agregaları Kullanılarak
	Üretilmiş Ağır Beton
V	Hacim
$m_1$	Kalıp Ağırlığı
$m_2$	Beton ile Dolu Olan Kalıp Ağırlığı
kN	Kilo Newton
$\mathbf{f}_{ct}$	Yarmada Çekme Dayanımı
F	Kırılma Yükü
L	Numunenin Yükleme Parçasına Temas Çizgisi Uzunluğunu
d	Numunenin En Kesit Boyutunu
$\mathbf{W}_0$	Yük-Sehim Eğrisi Altında Kalan Alan (N/m)
$ m G_{f}$	Kırılma enerjisi (Joule/m <sup>2</sup> )
m	Kirişin Mesnetleri Arasında Kalan Kısmın Ağırlığı (kg)
g	Yer Çekim Ivmesi
δ	Kirişin Göçme Sırasındaki Deformasyonu
A <sub>lig</sub>	Çentik Açıldıktan Sonraki Etkin Alan
Х	Soğurucunun Kalınlığını
Р	Yük
L	Mesnetler Arası Açıklık
В	Kiriș Enine Uzunluğu
Н	Kiriş Yüksekliği
a	Çentik Yüksekliği
Fnet	Eğilme Dayanımı

# Kısaltmalar Açıklamalar

LRFD	Load and Resistance Factor Design
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AISC	American Institute of Steel Construction

# ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Hasarlı Malzeme
Şekil 3.2. Akma gerilme diyagrami Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 3.3. Hasarlı malzemenin gerilmesi11
Şekil 4.1. Kafes Köprü13
Şekil 4.2. Bağlantı levhaların geometrik detayları (F,L, G-K and B-D in Şekil 4.1.) 13
Şekil 4.3. Kafes Köprü Abaqus Sonlu Elemanlar Modeli16
Şekil 4.4. Kafes Köprü Birleşim Yeri Abaqus Sonlu Elemanlar Modeli16
Şekil 4.5. SAP2000 Modeldeki, Statik Yükler Altındaki Yerdeğiştirme17
Şekil 4.6. Abaqus Modeldeki, Statik Yükler Altındaki Yerdeğiştirme17
Şekil 4.7. Lineer Statik Analizi Elde Edilen Birleşim Levhasının Maksimum Von Mises
Dağılımı17
Şekil 4.8. Modal Dinamik Analizinden Elde Kafes Sisteminin Zaman-Kuvvet Eğrilerisi
Şekil 4.9. Modal Dinamik Analizinden Elde Kafes Sisteminin Zaman-Yerdeğiştirme
Eğrilerisi
Şekil 4.10. Modal Dinamik Analizinden Elde Edilen Birleşim Plaka Uzerinde Von Mises
Gerilme Dağılımı
Şekil 4.11. Modal Dinamik Analizinden Elde Edilen Birleşim Plaka Uzerinde Von Mises
Gerilme Dağılımı
Şekil 4.12. Elasto-plastik hasar analizlerden elde edilen bağlantı levhası von Mises
gerilme dağılımı
Şekil 4.13. Elasto-plastik hasar analizlerden elde edilen bağlantı levhası von Mises
gerilme dağılımı
Şekil 4.14. Von Mises gerelmesine göre C noktasındaki birleşim plakasının, elasto-plastik
hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını
Şekil 4.15. Von Mises gerelmesine göre C noktasındaki birleşim plakasının, elasto-plastik
hasar modeli eşdeger plastik gerinme ve hasar başlatma dagitim sonuçlarını
Şekil 4.16. V on Mises gerelmesine gore C noktasındaki birleşim plakasının, elasto-plastik
nasar modeli eşdeger plastik gerinme ve hasar başlatma dagitim sonuçlarını
Şekil 4.17. Von Mises gereimesine gore H noktasındaki birleşim plakasının, elasto-
plastik nasar modeli eşdeger plastik gerinme ve nasar başlatma dağıtım sonuçlarını22
Şekil 4.18. Von Mises gereimesine gore H noktasındaki birleşim plakasının, elasto-
plastik nasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve nasar başlatma dağlum sonuçlarını 22 Saltil 4.10. Van Miaza ganılmaşina görə U nalttaşındalti hirləşim nlakaşının alaşta
sekii 4.19. Von Mises gerennesine gore fi noktasindaki birleşim piakasının, elasto-
plastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinine ve hasar başlatına dağıtını sonuçlarını22 Solvil 4.20. Eklemlerde kullenden iki tin beğlenti leyholerinin geometrik evruntıleri (Solvil
J 1'do E L CK vo DD)
4.1 de, F, L OK ve DD)
Sekil 4.22. Columna dikov vo votov kosmo vo hosmoto kösebent plakalarin dirongini
Sekir 4.22. Çekirle, dikey ve yatay kesirle ve basiriçia koşebent piakararın direncini besenlamak için kullanınlan nlakanın detayı
Sekil 4.23 Kafes Könrüsü Modeli join Küresel 3D Kahuk Modeli 27
Sekil 4.24 Kafes Könrüsü Modeli join Küresel 3D Kabuk Modeli 27
Sekil 4.25 Bağlantı levhasının Verel 3D katı model
Sekil 4.26 Bağlantı levhasının Verel 3D katı model
Sekil 4.27 Hesanlama modelinin sıralı adımları
Sekil 4.28, 1999 Kocaeli Deprem Kavdı
çenir 1.20. 1777 i tobuon Depieni ituyur

Şekil 4.29. 1999 Kocaeli Deprem Kaydının Yatay Zemin hareketi ivmeleri
Şekil 4.30. Küresel modelinden submodel üyelerine transfer edilen dynamic kuvvetler
kuvvet-zaman
Şekil 4.31. Küresel modelinden submodel üyelerine transfer edilen dynamic kuvvetler
moment-zaman
Şekil 4.32. Sonlu eleman modelinin enerji tepkisi
Şekil 4.33. Birleşim levhalarında Von Mises gerilme dağılımı
Şekil 4.34. Birleşim levhalarında Von Mises gerilme dağılımı (Şekil 4.1'de G)33
Şekil 4.35. Birleşim levhalarında Von Mises gerilme dağılımı (Şekil 4.1'de K.)33
Şekil 4.36. Birleşim levhalarında eşdeğer plastik gerinme dağılımı
Şekil 4.37. Birleşim levhalarında eşdeğer plastik gerinme dağılımı (Şekil 4.1'de G)34
Şekil 4.38. Birleşim levhalarında eşdeğer plastik gerinme dağılımı (Şekil 4.1'de K)34
Şekil 4.39. Perçin öngerilim altında 3D yerel katı modelin bağlantı levhası Von Mises
gerilme dağılımı
Şekil 4.40. Perçin öngerilim altında 3D yerel katı modelin Perçinlerin Von Mises gerilme
dağılımı

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge 3. 1. A36 Celik Malzeme Modeli Sabitleri	12
Çizelge 4. 1. Hematit Genel Özelikleri	15
Çizelge 4. 2. Birleşim plakaların tasarım direnci özeti	25
Çizelge 4. 3. Kesmeye maruz kalan bağlantı levhasının direnç özeti	26

### 1. GİRİŞ

Kafes yapı sistemleri nispeten ekonomik, insaatı kolay ve eşsiz geometrik şekiller alabildiği için ulaşım ağlarında, uzun açıklıklı ve orta açıklıklı karayolu köprüleri veya demiryolu köprüleri, enerji nakil yapılarında, endüstriyel fabrikalarda, spor merkezleri ve havalanaları çatı yapı sistmelerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Yamamoto et al, 1988). Örneğin çelik kafes köprü yapıları altyapı ve ulaşım ağlarının yapımı için kullanılan hafif ve düşük maliyetli yapılardır. Bu yapıların en önemli özelliği yüklerin temellere daha uygun bir şekilde aktarılmasıdır. (Rantucci, 1994; Sohn, 2003). Altyapı ve ulaşım ağlarının önemli bir parçası olan köprü yapılarının her zaman güvenli işlevsel olaması istenir. Ancak, birçok kafes tabanlı köprü yapıları seneler önce inşaa edildiğiden zamanla yapılan bakım, onarım ve iyeşletirme çaşımalarını neticesinde yeni yük koşullarına maruz kalıyorlar. Örneğin bazı köprüler ilk tasarım esnasında, değişen ulaşım veya trafik ihtiyaçlarından ötürü farklı yük koşullarına maruz kalma ihtimalleri düşünülerek revize edilmiştir. Kullanımda olan eski kafes köprü yapılarının perfomans analizleri ve tasarımlarınının tekrardan gözden geçirlemesi bu yapıların taşıyıcı elemanlarında oluşubabileck hasarların belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Çünkü kötü performanstan ötürü herhangi bir köprünün çökmesi, ulaşım sistemini sekteye uğratır ve doğrudan can ve mal kaybına neden olabilir. (Wang ve Chan, 2009).

Çelik kafes yapılarının taşıyıcı elemanlarının en önemli bileşenlerinden biriside elemanlarının birleşim noktalarında kullanılan birleştirme levhalarıdır. Birleşim levhaları genellikle maruz kaldıkları tekrarlı dinamik yüklerin etkisi altında yük taşıma kapasitelerini ve rijitliklerini kaybederler. Bağlantı levhalarında oluşan bu durumun kafes yapının taşıyıcı elemanlarının davranışı üzerinde önemli bir etki vardır. Örneğin, köprü sisteminin titreşim karakteristikleri ve göçme mekanizmalarını önemli ölçüde değişebilir. Özellikle, bu bağlantı yerin esnekliği köprünün titreşim karakteristiklerini değişmesine de neden olabilir. Ancak, bu levhalar tekrarlanan ve dinamik yüklerin etkisi altında yük taşıma kapasitesi ve rijitliğini kaybedebilir. Açıkçası, bu yapıların tasarım ömrünün sonuna yaklaşıldığı için birleşim levhalarının incelenemesi daha da kritik hale gelmiştir. Bu gereksinimin acı bir örneği olarak 2007 yılında Minneapolis Mississippi Nehri üzerinde Interstate Highway I-35W taşıyan köprünün trajik bir şekilde yıkılması sonucu 13 kişinin ölümü ve birçok kişinin çok ciddi yaralanmaları verilebilir.

Çalışmaların çoğunda genellikle birleşim plakaların statik ve dinamik yükler altında davranışını araştırmaya odaklanıldığı görülmektedir. Ancak, birleşim levhalarının sismik olayların altında permformansını belirleyen sınırlı ölçüde deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar bulunmklatadır. Bu konudaki en önemli kapsamlı çalışmalar Astaneh-Asl (1998) sismik olaylara maruz kalan çelik çerçeveli birleşim levhalarının analitik yöntmelere bağlı standart tasarım aşamlarını içeren çalışmalardır. Dolayısıyla birleşim levhalarının doğrusal elastik davranışı ve basit yükleme koşulları dikkate alınmıştır.

Kafes tipi köprülerin geniş alanda kullanımları göz önüne alındığında bu köprülerdeki birleşim levhalarının davranışının yapının performansı üzderindeki etkilerini daha iyi anaşılması için detaylı bir şekilde modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolaysıyla, bu tez çalışmasının temel amacı birleşim levhalarının doğrusal olmayan malzeme modellemesini dikkate alan sonlu elemanlar çatısı altında bir hesaplama modeli geliştirmektir. Geliştirilen hesaplama modeli, malzemenin hasar ve plastikleşme deformasyonlarını karakterize eden doğrusal olmayan malzeme modeli yanı sıra birleşim nokatasında oluşabilecek çekme, başınç ve kesme gibi farklı yük etkileşimlerinide dikkate almaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar beş bölüm altında toplandı. Özetle Bölüm 2'de çalışma konusunun önemi, çalışmanın motivasyonu, konu ile ilgi yapılan çalışmların değerlendirmesi ve ihtiyaç duyulan eksiklerin ve problemlerin tanımlanması özetlenmişitr. Bölüm 3'de kullanılan materyel yöntem ile ilgili teorik alt yapı, kullanılan formüller ve veriler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bölümde 4'de hesaplam modelinin oluşturlmasının yanı sıra yapılan analizlerin sonuçları ve bunların değerlendirmeleri kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır Bölüm 5'de ise analizl sonuçlarının değerlendirlmesinden çıkarılan sonuçlar sıralanmış ve geleceğe yönelik yapılması gerekenler belirtilmiştir.

### 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Birleşim plakalar üzerinde yapılan ilk çalışmalar esas olarak çekme ve basınç davranışını dikkate alınarak tasarlanan bağlantı levhaları için yapıldı. Yapılan bu çalışmalarda genel olarak birleşim plakaları üzerindeki gerilme büyüklüğünün ve yerinin bulunmasına odaklanılmıştır. Bu elemanların tasarımı için en basit şekilde maksimum gerilme değerinin bulunması hedeflenmiştir. Wyss tarafından 1923'te gerçekleştirilen deneysel çalışmalar da Warren tipi kafes yapının birleşim levhaları üzerindeki gerilme dağılımları belirlenmişi üzerinedir. Bu deneysel çalışmaların bir sonucu olarak Wyss, maksimum normal gerilmelerin genellikle bağlantı elemanın sonunda meydana geldiğini ve gerilmelerin elemanlar üzerinde 30°'lik açı yaparak bir hat boyunca yayılmış olduğunu göstermiştir.

Whitmore, 1952 de birleşim plakaların gerilme dağılımının belirlenmesi için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneylerini, 39ksi'lik akma mukavemetine, 10,000ksi'lik elastisite modülüne ve 1/8inch'lik kalınlığa sahip olan alüminyum bağlantı levhaları üzerinde yapmıştır. Whitmore, maksimum kayma gerilmelerinin birleşim elemanların orta bölgelerinde ve kenar bölgelerinde daha az gerilmeler oluşurken basınç ve çekme gerilmelerini diyagonal elemanlarının uçları etrafında oluştuğunu belirtmiştir. Bununla birlikte Dietrich, 1999 yılında A36 çelik birleşim elemanlar üzerinde tekrarlı yükler altından yaptığı deneyler dayanarak bu plakalarda oluşan göçmenin Whitmore'un etkili genişliği boyunca oluşan çatlaklar nedeniyle olduğunu belirtmiştir.

Mevcut uygulamalarda, birleşim levhalarının tasarımı, Whitmore bölgesindeki gerilmeleri dikkate alarak basit kiriş denklemlerine dayalı olarak yapılıyor. Ancak, denge ve elastisite denklemlerine dayalı basit tasarım yöntemleri tasarım için yeterli olmasına rağmen bağlantı elemanlardaki gerçek gerilme dağılımını elastik bölgede bile doğru olarak belirlenmediği görülmektedir. Bu nedenle, son yıllarda birleşim levhalarının yerel gerilme dağılımları, burkulmaları, kararsızlıkları ya da sismik davranışları daha iyi anlaşılması için daha kapsamlı incelemeler sonlu elemanlar çatısı altında yapılmkatadır.

Yamamot ve akadaşları. (1985), Warren ve Pratt tipi kafeslerde bir dizi deneysel ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışma kapsamında bağlantı elemanlarda oluşan plastikleşme, yerel burkulma ve göçmeler gibi deformasyon mekanizmalar üzerinde durulmuştur. Bu çalışma sonuncunda yüklemenin başlangıç aşamalarında akma başlangıcın plakanın iç kısımlarında oluşurken yük arttıkça plastikleşmenin plakanın dış bölgelerine doğru kaydığı gösterilmiştir.

Huns ve akadaşları (2006) birleşim plakalarındaki çekme ve kesme blok göçmelerini tahmin etmek için sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda güncel tasarım denklemleri değerlendirmek için mevcut deney sonuçlarının güvenilirlik analizlerini yapmışlardır. Yapılan bu analizlerin sonucuna göre çekme kırıkları her zaman kesme kopmalarından önce oluşmakta ve kopmalar oluşmadan önce birleşim levhalarının tam kapasiteye ulaştıkları gösterilmiştir. Hardash ve Bjorhovde (1984), yaptıkları analizlerinin sonuca bakarak, birleşim levhalarının test sonuçlarını tasarım standartlarında kullanılan denklemlerden daha iyi tahmin eden Driver ve diğerleri (2004) tarafından geliştirilen denklemlerin kullanılmasını önermişlerdir. Çünkü tasarım standartlarının daha konservatif ve bazı durumlarda göçme türlerini doğru tahmin etmediğini öne sürmüşlerdir. Hardash ve Bjorhovde (1985) , çekme yüküne maruz birleşim levha serisi üzerinde yaptıkları testleri içeren deneysel çalışmalarından elde ettikleri bulgularını

- birleşim lehvaları numunelerinin en son satırdaki cıvatalar boyunca oluşan çekme çatlaklarından dolayı kırıldığı
- ii) cıvatalar doğrultusundaki kayma akmalarından dolayı oluşan yırtılmaların çekme küvetlerine ile paralell olduğu,
- iii) kayma akmasından kaynaklı göçme türü blok kayma olarak görüldüğü,
- iv) burkulmanın birleşim levhalarının basınç dayanımını önemli ölçüde etkilediği

şeklinde sıralamışlardır.

Özellikle, 2007 yılında Minneapolis Mississippi Nehri üzerinde Interstate Highway I-35W taşıyan köprünün trajik bir şekilde yıkılmasından sonra köprünün çöküşünü tetikleyen etkenleri araştırması üzere enkaz üzerinde yapılan inceleme ve araştırma raporlarınında köprünün çöküşünü tetikleyen yapısal istikrarsızlığın köprünün birleşim yerlerinde bulunan levhalarından kaynaklandığı ifade edilmiştir. (Liao, 2009, Liao, 2011 Ganz, 2012).

Bulgular sonuncunda birleşim levha kalınlıklarının çekme/basınç ve kesme etkileşimi etkisi altında yetersiz kaldığı kanaatine varılmıştır. Ulusal Ulaşım Güvenliği Kurulu

raporunda (NTSB, 2003) ve Federal Karayolları İdaresi(2010 FHWA, 2009)'nin birleşim levhalarının ve taşıyıcı elemanların kapasitesini kontrol gerektiren teknik tasarım raporlarında eski tasarımlarının değişen koşullar altında yetersizliliği ifade edilmiştir. Bu nedenle, birçok çalışmalar da farklı yükleme koşullarına altında bu özel bağlantı elemanının performansını ve davranışlarını üzerine odaklanılmıştır. (Nakamura ve SIMULIA Corp, 2008).

Liao ve akadaşları (2007), geniş açıklı köprülerin dinamik tepkilerini ve oluşan hasarlarını çok ölçekli sayısal sayısal analiz yöntem ile incelenmesi esas alarak bağlantı levhaların davranışı üzerinde bir araştırma yapmıştır. Çalışma örneği olarak Çin'de bir asma köprü kullanılmıştır. Bu çalışma ile sonucu, çok uzun açıklıklı köprülerin değerlendirilmesi ve hasar etkilerinin belirlenmesinde için çok ölçekli modellemenin gerekli olduğu sonucuna varmışlardır.

Myers 2009, Liao ve ark. (2009, 2011) yaptıkları çalışmalar ile, köprünün göçmesine neden olan ana faktorün, bayrak levhalarının yetersiz dayanımlarından kaynaklı bu levhaların önemli bir bölümünde oluşan akma ve kırılmalar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmalardan çıkartılan diğer bir sonuç ise basınç ve kayma etkileşiminin bayrak levhasının göçmesinde önemli bir rol oynadığı dolayısıyla bayrak levhalarının tasarımında bu etkileşimin dikkate alınması gerektiğidir. Liao ve ark. (2009) I-35W köprüsünün göçmesini incelenmesi üzerine kapsamlı hesaplamalar yapmışlardır. Raporlarında, bayrak levhalarında oluşan gerilme ve birim şekil değiştirmeleri hesaplayan doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu elemanlar modelini detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. I-35W Köprüsünün yıkılma felaketine yol açan olası büyük nedenleri olarak

- i) birleşim plakalarının, önemli kısımları çöküşü sırasından önce taşıma kapasite sınırını çoktan geçmiş olması
- ii) birleşim levhalarının taşıma kapasitenin altında olmalarının yanı sıra, yol üsty yapısının bakım ve onarımdan kaynaklı ağırlığın artması
- iii) Birleşim levhalarında oluşan basınç ve kesme etkileşiminin oluşması

şeklinde sıralamışlardır.

Myers (2011) hareketli yükleme çeşitlerine göre birleşim levhalarında oluşan gerilmelerin incelenmesi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Daha iyi analiz etme özelliklere ihtiyaç olup olmadığını belirlemek için çalışma sonuçları FHWA tarafından önerilen kesit alma yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar yönteminin sonuçları ile ve kesit alma yönteminin sonuçları benzer olsa da, yazarlar Yöntemi Bölüm yaklaşımı değeri yük veri girişi doğruluğuna kuvvetle bağlı olduğu sonucuna varıldı.

Ganz (2012) tek açıklıklı Warren Kafes köprüleri üzerinde sonlu eleman analizinikullanarak, karbon fiberden yapılmış birleşim levhaları ile çelikten yapılmış birleşim levhalarının köprünün yapısal performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmak üzere analizler yapmıştır. Her iki malzemenin performansı köprünün göçme marjini ve sehimine dayanarak değerlendirdiğin de Granz, karbon fiber levhalarınçelik levhalara kıyasla daha üstün bir performans sunmadığı sonucuna varmıştır

Crosti ve Duthinh (2014) doğrusal olmayan bağlantı davranışını tanımlamak için yeni bir model önermişlerdir. Bu önerilen modelde, birleşimlevhaların serbest ucuna uygulanan kuvvet ve momentlerden elde edildilen altıya altı tam rijitlik matrisine sahip kullanıcı tanımlı yarı rijit yaylar şeklinde modellenmiştir. ku, Ancak, bu yöntem yapının bazı özel bağlantı noktalarını dikkate aldığı için yapının bütünün performansını doğru bir şekilde yansıtmamaktadır. Berman ve ark. (2012) servis yükleri altında akma ihtimali olan birleşimlevhalarınınndavranışı hızlı ve daha tutucu tarafta belirleyen üç aşamalıdeğerlendirme prosedürü önermişlerdir. Bu değelendirme aşamaları ileyeterli kapasiteye sahip birleşim levhaları için daha iler düzey analizlere ihtiyaç duyulmayacağını belirtmişlerdir. Bu amaçları doğrultusunda Washington State köprüsünün birleşim levhasının sonlu eleman modelini oluşturmuşlar ve belirledikleri kritik birleşim noktlarını kullanarak önerdikleri değerlendirme aşamlarını geliştirmiş ve önerilerini irdelemişlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda Whitmore kesitinde elde edilen tek eksenli gerilmeler ile kıyaslandığında birleşim levhasındaki akmanın tutucu tarafada tahmin edildiğini ve akmanın birleşim levhasının burkulmasından önce ğerçekliştiği ifade edeilmişitir.

### **3. MALZEME VE YÖNTEM**

Birleşim levhalarında farklı yükleme koşullarından dolayı oluşabilecek plastik deformasyon ve kırılma gibi deformasyonları hesaba katmak için levhanın mekanik malzeme davranışı elastoplastik ve sünek hasar modeli ile karakterize edildi.

### 3.1. Doğrusal Olmayan Birleşik Elatoplastik Hasar Malzeme Modeli

Teorik formülasyon, toplam birim şekil değiştirmenin zamana bağlı değişimi elastik ve plastik şekil değiştirmelerin zamana bağımlı değişimlerine ayrıştıralabilme esansına göre yapıldı.

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \dot{\bar{\varepsilon}}^e + \dot{\bar{\varepsilon}}^p \tag{1}$$

Denk (1) deki semboller üzerindeki üst çizgi birim şekil değiştirmenin hıza bağımlı değişiminin, efektif ortamda olduğunu göstermek için kullanıldı. Eşdeğer birim şekil değiştirme prensibi (Lamaitre, 1996), hasarlı malzemenin bünye denklemleri, hasarsız malzeme için elde edilen bünye denklemleri gibi, hasarın farazi kaldırılarak elde edilen efektif ortamda her iki ortamın birim şekil değiştirmenin hıza bağımlı değişimlerinin eşdeğer kabul edilerek ve efektif gerilme tanımı kullanılark elde edildiğini ifade eder.. Bu presnsibe göre eşdeğer birim şekil değiştirmenin hıza bağımlı değişimleri

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^e = \dot{\varepsilon}^e \tag{2}$$

ve efektif gerilme

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \tag{3}$$

Denklemler (1) ve (2) deki gibi ifade edilir. Denk (2) deki D değişkeni malzemedek mikro çatlakların ve mikro-gözeneklerin yüzey yoğunluğunu temsil eden bir skaler hasar değişkendir. Gerilme tensörünün zamana bağlı değişimi hasar değişkeni cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{\overline{\sigma}} = \overline{E} : \dot{\varepsilon}^e \text{ veya } \dot{\sigma} = (1 - D)\overline{E} : \dot{\varepsilon}^e - \frac{\dot{D}\sigma}{(1 - D)}$$
 (4)

burada  $\overline{E}$  hasarsız malzemin dördüncü dereceden elastik malzeme modülütensörüdür. Bu malzemenin plastik deformasyonu efektif ortamda von Mises akma kriteri bünyesinde izotropik plastik pekleşme içeren Johson-Cook akma modeli (Johnson ve Cook, 1985) kullanılarfak karakterize edildi. von Mises akma kriteri  $f = \bar{\sigma}_{eq} - \bar{\sigma}_{flow} \leq 0$  olması durumunda malzenin elastik deformasyon gösterdiği aksi durumlarda plastik deformasyon oluşmakatadır. Burada efektif ortamdaki eşdeğer von Mises gerilmesi,  $\bar{\sigma}_{eq} = \left(\frac{3}{2}\bar{\tau}_{ij}\bar{\tau}_{ij}\right)^{1/2}$ Cauchy gerilme tensörün deviatorik bileşenleri,  $\bar{\tau}_{ij}$  cinsinden ifade edildi. Johson-Cook akma modeli ile tanımlan,  $\bar{\sigma}_{flow}$  aşağıdaki denklemde verildi.

$$\bar{\sigma}_{flow} = [1 - D] \left[ A + B\bar{\varepsilon}_p^{\ n} \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_o} \right] \left[ 1 - \frac{T - T_o}{T_m - T_o} \right]^m \tag{5}$$

Burada  $\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{2/3\bar{\varepsilon}_{ij}^p\bar{\varepsilon}_{ij}^p}$  biriken plastik birim şekil değiştirme ;  $\dot{\bar{\varepsilon}}_p$  ve  $\dot{\bar{\varepsilon}}_o$  mevcut ve referans biriken plastik birim şekil değiştrimelerin zamana bağlı değişimleridir.  $T_m$  ve  $T_o$  sırasıyla erime ve oda sıcaklıklarıdır; A, B, C,n ve m, deneylerden elde edililecek olan malzeme sabitleridir. Denk (5) verilen Johson Cook akma modelin kullanılması ile izotropik plaastik pekleşme, yükleme hızına bağlılık , sıcaklık ve hasar etkileri dikkate alındı.. Yüksek veya ani yüklemeler sonucu lokalize bölgede plastikleşmeden kaynaklı oluşan ısı malzemeyi terk etmek için yeteri kadar zaman bulmadığından malzemede sıcaklık artışına sebeb olur Bu nedenle, sismik etkiler nedeni ile oluşan dinamik kuvvetlerin bir sonucu bağlantı levhasının plastikleşme den kaynaklı adiyabatik ısının malzemede oluşturuduğu sıcaklık artışı  $\Delta T$  aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\Delta \mathbf{T} = \int \frac{\chi}{\rho c_v} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{d\varepsilon}^p \tag{6}$$

Burada  $\rho$ , yoğunluğu,  $c_v$  özel 1sıyı ve  $\chi$  plastik enerjinin 1sıya dönüştürülme oranını gösteriri. Plastik akma ve iç değişkenlerin gelişim denklemleri termodinamik çatısı altında geri dönüştürülmez malzemenin açığı çıkan enerjisi maksimize edilerek edilir. Buna göre plastik deformasyanın gelişimi aşağıdaki denklemde ifade edilir.

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^{p} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \bar{\tau}_{ij}} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\lambda}}{(1-D)} \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\left(\bar{\tau}_{ij}\right)_{eq}}$$
(7)

Burada  $\dot{\lambda}$ ,Lagrange çarpanı, uyumluluk şartı,  $\dot{f} = 0$ ' dan elde edilir.Literatürde sünek kırılmayı modellemek için bir çok model önerilmiştir. Ancak bu modellerin sadece

birkaçı alanın uzmanları tarafından kabul görmüş ve sonlu eleman kodları bünyesindeyer almıştır. En yaygın olarak kullanılan sünek kırılma modllerinden biri olan

Johnson-Cook kırılama kriteri (Johnson ve Cook, 1985) birleşim levhasındaki kırılma hasarlarını tahmin etmek için kullanıldı. Johnson-Cook hasar değişkeninin gelişim denklemi aşağıdaki gibidir..

$$\dot{D} \approx \frac{\dot{p}}{p_f}$$
 (8)

Hasarsız malzeme için, D sıfıra eşit olurkeb tam hasarlı malzeme için, D bir olur. Ancak, atomic çözülmenin yarattığı erken kopma/kırılmadan dolayı hasar değişkeni D asla 1'e eşit olamaz. Bu nedenle, sürekli ortamlar hasar mekaniğinde, liner kırlma mekaniğinde olduğu gibi, malzemenin herhangi bir yerinde belli ölçülerde bir çatlak veya kusurun önceden tanımlanmasına gerek yoktur. Denk (8) verilen hasar değişkeninin gelişimi biriken plastik şekil değiştirmenin zamana bağlı değişimi cinsinden aşağıdaki gibi ifade edildi.

$$\dot{D} = \begin{cases} 0 & \text{for } p \le p_d \\ D_C \frac{\dot{p}}{p_f - p_d} & \text{for } p > p_d \end{cases}$$
(9)

Burada  $p_d$  hasar eşiğini.  $D_C$  ise kiritik hasarı belirten malzeme sabitleridir. Malzemede çatlakların yada hasarın, hasar değişkeni D'nin  $D_C \leq 1$  ulaştığında oluştuğu kabul edilir. Denk (9) görülen  $p_f$ , malzemenin sünek hasarını temsil eden değişken ise Johnson ve Cook (1985) tarafından önerilen ve  $\frac{\sigma_h}{\overline{\sigma}}$  olarak tanımlanan gerilme üçeksenliliği cinsinden üstel fonksiyonu ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$p_f = D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}}\right) \tag{10}$$

Burada  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  malzeme sabitidir. Yukarıdaki denklemin bir eksik yönü olarak kırılma/kopma değişkeni  $p_f$ nin  $D_2 = 0$  olamsı durumunda sabite bir değere dönüşmesi gösterilebilir.

### 3.2. Malzeme Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi

Oluşturulan hesaplama modelinde, birleşim levhaları ve kafes yapının taşıyıcı elemanlarının ASTM A36 düşük karbonlu çeliğinden yapıldığı kabul edili. Bağlantı levhalarının birleşik elastik-plastik ve hasar davranışı ABAQUS bünyesinde bulunan Johnson-Cook plastisite modeli ile tanımladı. Bu modelin malzeme parametreleri, literatürden elde edilen deneysel eğrilere (Borvik ve ark, 2001, Teng ve Wierzbicki 2006, Jutras 2008) linear olmaya eğri uğdurma yöntemi kullanılarak model denklemlerine uydurulması ile elde edileniştir. Örneğin, elastoplastik malzeme modelin parametreleri, Şekil (3.1) gösterilen Abaqus bünyesinde oluşturulan tek eksenli çekme deneyi simülasyonundan elde edilen eğrilerinin literatürdeki mevcut çekme deneyinden elde edilen eğrilere en yakın sonuç verecek şekilde belirlendi (Şekil 3.2). Benzer şekilde Johnson Cook sünek hasar modelinin parametreleri, doğrusal olmayan en küçük kareler algoritmasını kullanılarak Denk (10) daki fonksiyonun mevcut deney verilelerinden elde edilen eğrilerendi (Şekil 3.3).



Şekil 3.1. Tek ekseneli çekme deneyinin Abaqus modeli



Şekil 3.2. Gerilme-plastik birim şekil değiştirme eğrileri



Şekil 3.3. Üç eksenlii gerilme değişkeni kırılma birim şekil değiştitme eğrileri.

Çizelge 3.1 de yukarıda belirtilen eğri uydurma yöntemleri kullanılarak belirlen plastik ve hasar model parametrelerinin değerleri verildi.

Elastic constants and density			Johson Cook Plasticity				Johson Cook Fracture strain					
E(ksi)	ν	$\rho(\text{lb/in}^3)$	A (ksi)	B(ksi)	n	m	С	$\dot{\varepsilon}$ (s <sup>1</sup> )	<i>D</i> <sub>1</sub>	<i>D</i> <sub>2</sub>	<i>D</i> <sub>3</sub>	D <sub>c</sub>
29,000	0.26	0.282	41.40	72.54	0.228	0.92	0.017	1.0	0.834	2.15	2.95	0.3

Çizelge 3. 1. A36 Çelik Malzeme Palstik ve Hasar Modelinin Sabitleri

### 4. KAFES KOPRÜNÜN MODELLENMESİ ve ANALİZLERİ

### 4.1. Köprünün Statik ve Dinamik Yükler Altında Analizleri

Bu çalışma kapasamında birleşim levhalarının statik ve dinamik yükler etkisi altında yapısal davranış analiz etmek üzere Warren Kafes Köprüsü tipi şeçilmiş bu köprünün tasarım detayları ve sonlu elemanalar modeli bir sonroki bölümlerde detaylı olark verildi.

### 4.1.1 Köprü Tasarımın Detayları (Kaynaklı Birleşimli)

Birleşim levhaları ve kafes taşıyıcı elemanlarından oluşan bir kafes köprüsünün tasarım için Najjar et al. (21010) ve Ganz (2012)'nin çalışmasında verilen veriler kullanıldı. Bu tür bir köprü modelinin seçilmesi gerçek demiryolu köprüsüne oldukça yakın bir model olmasından dolayıdır. Köprünün geometrik bilgileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi köprünün uzunluğu 120 ft ve yüksekliği 20 ft olarak tanımlanmışır. Çapraz kafes taşıyıcı elamanları ise sırasıyla 45 ve 135 dercelik açılarla yerleştirilmişitir. Yatay, dikey ve diyagonal elemanların uzunluklarıda sırasıyla. 15.83ft, 16.67 ft ve 24.62 ft olarak tanımıştır. Kafes yapının tüm taşıyıcı elemanlarının enkesit alanları 80 in<sup>2</sup> 'lik olarak tasarlanmıştır. Köprü yapısının genel deformasyon ve sehim karketersitiğini birleşim levhalarında oluşan deformayonların kumalatif toplamının bir sonucu olabilmesi ve elemanların burkulma, eğilme veya aşırı sehimlerinden kaynaklı deformas etkilerini minimize etmek için taşıyıcı elemanların kalınlıkları 12 inch olarak alınmıştır.

Şekil 4.1de de görüleceği gibi kafes yapının diğüm noktalarında üç farklı tip bağlantı levhası kullanılmıştır. Bunlar alt uçlarda F ve L düğüm noktalarında kullanılan tipler, A ve B düğüm noktalarında kullanılan tipler ve orta açıklıklardaki düğüm noktalarında kullanılan tiplerdir.



Şekil 4.1. Kafes Köprü



Şekil 4.2. Bağlantı levhaların geometrik detayları (F,L, G-K and B-D )

Bu köprünün ve birleşim levhaların tasarımı Yapısal Çelik Binalar (AISC 2005) ve Federal Karayolları İdaresi Köprüsü Tasarım Rehberi için tanımlanan AISC Şartnamesinde belirtilen kod ve kurallara göre yapıldı.. Özellikle, birleşim levhalarının tasarımı içinYük ve Direnç Faktörü Tasarımı Yöntemi (LRFD) uyarınca AASHTO da belirtilen koşullara göre yapılmıştır (Astaneh ark. 1989, Astaneh Asl 1992, 1998, İbrahim 2008).

Mevcut uygulamalarda bağlantı levhaları genellikle levhanın herhangi bir bölgesinde gerilmelerin kod ve kılavuzlarda belirtilen kapasite sınırlarını aşmayacak şekilde tasarlanır. Dolayısıyla bu levhalardaen çok gerilmeye maruz kalan bölgenin belirlenmesi son derece önemlidir. Bu kritik bölümün belirlenmesi çoğunlukla tahmin ve tecrübeye dayanmaktadır. Bu nedenle, güvenilir sonlu eleman analizleri bağlantı levhasları üzerinde gerilme dağılımlarını detaylı olarak verdiklerinden tasarımcıları levha üzerindeki kritik bölümü belirlenmelri kolaylaşmaktadır.

Köprünün yükleme koşulları AISC (2005) uyarınca ölü yük, rüzgâr ve hareketli yük (taşıtlar ve kar) gibi dinamik yükler olarak belirlendi. Bu yüklerin hesaplanan değerleri

şöyle verilmiştir: Köprü bölümleri, kaldırımlar, asfalt ve karayolundaki ölü yük için 351.146 lbs, geçen araç ve kar ağırlığı hareketli yükler olarak 279.436 lbs dikkate alındı. Bu köprü üzerinde etkili toplam yük (W) değeri, ölü yük ve hareketli yüklerin kombinasyonu olarak 630.581 lbs olarak hesaplandı. Bu toplam yük daha sonra eşit bir şekilde kafes yapının birleşim noktalarına tekil kuvvet olarak uygulanarak yapılan yapısal analiz sonucu kafes yapının taşıyıcı elemanlarına etki eden kuvvetler hesaplandı. Bu kuvvetlerin etkisi altında serbes cisim diyagramı oluşturulan birleşim levhasının yük taşıma kapasite tasarım, Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı Yöntemi (LRFD) ' de belirtilen esaslar dikkate alınrak yapıldı. Bu birleşim levhaları kontrülü,  $L_wx$  t enkesit alanlarına etki eden eksenel kuvvetler altında yapıldı. Burada  $L_w$ , etkin genişlik ve t ise levha kalınlığıdır. Hesaplanan  $L_w$  etkin genişlik, maksimum gerilme iz düşümlerinin levhaya bağlanan elemanların eksenleri ile 30 derece açı yapacak şekilde oluşturulan Whitmore bölgesi analizine dayanmaktadır.

LRFD'ye uygun olarak AASHTO yönergelerince yapılan tasarım kontrülü hesaplamalarının sonuncunda bağlantı levhaları için kritik bölge kafes yapının I ve B düğüm noktalarını olarak belirlendi. Bu hesplama sonuçları Çizelge 4.1. içinde özetlendi.

Location	Áxial R	Resistance of	Controlling	Inventory			
Location		(Kips	Axial	Rating			
At the	Gross	Net	Blo	ck		Resistance	Factor
and of	Section	Section	She	or	Comp.		
mombor	Yielding	Fraction in	Dont	ai	Buckling	$C = 0.9 \mathrm{x} \emptyset R_n$	C - 0.74 DL
member	in Tension	Tension	Kapture			(Kips)	1.24 <i>LL</i>
Ι	1003.89	1362.08	860.72		-	774.648	1.73
В	-	-	-		910.711	819.64	2.21
Location		Shear Rest	istance	e of t	the Gusset	Controlling	Inventory
Location	Orientation		Pla	te		Shear	Rating
At the	of the	Gross Sec	tion	Ne	et Section	Resistance	Factor
end of	section	Yielding	in	Fı	raction in	C = 0.9  MR n	<i>C</i> – 0.65 <i>DL</i>
member		Shear			Shear		1.24 <i>LL</i>
н	Vertical	642.19	)		1177.4	577.9	3.46
11	Horizontal	1155.94	5.943		2119.32	1040.35	6.1

Çizelge 4. 1. Birleşim levhaları kapasite kontrol hesapları

Bu tasarım kontrolüne göre I düğüm noktasındaki birleşim levhaları için bulunan kritik bölgede, blok kesme kırılma invantory derecelendirme faktörü levha 1.73 olarak hesaplandı

### 4.1.2. Sonlu Eleman Modeli

Bir önceki bölümde tasarımı yapılan Warren Tipi Kafes Köprüsünün sonlu eleman modeli, Abaqus 6.9 (2009) bünyesinde elemen kütüphanesinde bulun S4R tipi 19193 kabuk dörtgen elemanlar ve 22329 düğüm noktası kullanılarak oluşturuldu (Şekil 4.3). Sonlu eleman modelinde bağlantı levhaları ile taşıyıcı elemanların arasında kaynak tipi bağlantı olduğu düşünülerek bu elemanların yüzeyleri arasındaki temas tie constraints özelliği kullanılarak modellendi(Şekil 4.4). Kafesy yapı basit mesnetli kiriş gibi düşünülerek sağ alt köşesine basit mesnet ve sol alt köşesinede haraketli mesnet konulmuştur.



Şekil 4.3. Kafes Köprü Abaqus Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 4.4. Birleşim levhası sonlu elemanlar modeli detayı

### 4.1.3. Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli kullanılarak, statik, modal dinamik ve linear olmayan dinamik analizler yapılarak birleşim levhaları üzerindeki gerilme ve birim şekil değiştireme dağılımlarının yanı sıra plastikleşme ve hasar bölgeleri belirlendi. Sonuçlar Von Mises gerilmeleri, plastik şekil değiştirme ve hasar deformasyonlarını gösteren dağılımlar ve yabancı saha cinsinden gösterildi. Oluşturulan sonlu eleman modelinin doğruluğunu ve güvenilirliğini belirlemek, ilk önce ağ boyutuna bağlı sonuçlar elde etmemek içinstatik yükleme koşulları altın ağ hassasiyeti çalışması yapılarak en karaklı ağ boyutu belirlendi. Daha sonra Abaqus modelininden elde edilen maksimum sehim SAP2000'den oluşturaln basit yapısal modelden elde edilen maksimum sehim sonucu ile karşılaştıldı (Şekil 4.5-4.6)

Şekil 4.5'te görldüğü gibi gibi SAP2000 analizinden elde edilen maksimum sehim değeri 0,5817 inch olarak bulunurken şekil 4.6'da Abaqus modelinin analizinden elde edilen maksimum sehim değeri 0,54inch olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi her iki analizden elede edilen sonuçları birbire oldukça yakındır. Abaqus modelinin güvenilirliği daha fazla test etmek için, statik analiz sonucu bağlantı levhaları üzerinde von Mises gerilme dağılımları belirlendi. Şekil 4.7'de göreleceği gibi 26.368 psi 'lik maksium von Mises gerilme değeri malzenin akma ve çekme mukavemetinden daha düşükolarak I düğüm noktasındaki bağlama levhasında elde edildi. Burada elde edilen sonucun Bölüm 4.1.1 de analitk yöntmle elde edilen sonuçla uyum içiresinde olduğu görülmektedir..



Şekil 4.5. SAP2000 Modeldeki, Statik Yükler Altındaki Yerdeğiştirme



Şekil 4.6. Abaqus Modeldeki, Statik Yükler Altındaki Yerdeğiştirme



Şekil 4.7. Lineer Statik Analizi Elde Edilen Birleşim Levhasının Maksimum Von Mises Dağılımı

Bağlantı noktalarındaki sürtünme etkisini görmek için kafes yapı sisteminin modal dinamik analizi, malzeme ve geometrik nonlineerite dikkate alınmadan, yapıldı. Düğüm noklatalrında ki bu sürtünme etkiler enerjinin açığa çıkmasını sebeb olmaktadır. Dolayısıyla yapının enerji sönümleme kapasitesinin -hesaplanması gerekmektedir. Bunu hespalmak içindeçok fazla deteya girmeden, modelde kritk sönümleme yüzdelerinin kullanılması uygun görüldü. Analizlerde %1, %2 ve % 3 kritik sönüm yüzdeleri kullanılarak basit mesnette elde edilen kuvvet tepkisi ile orta açıklıkta elde edilen sehimler, sırası ile Şeki 4.8 ve 4.9 da gösterildi.



Şekil 4.8. Modal Dinamik Analizinden Elde Kafes Sisteminin Zaman-Kuvvet Eğrilerisi



Şekil 4.9. Modal Dinamik Analizinden Elde Kafes Sisteminin Zaman-Yerdeğiştirme Eğrilerisi

Beklendiği gibi, düşük yüzdeli kritik sönümlemerde oluşuna dalgalanmalar yüksek sönümlemelerinkine göre zamala daha hızlı azalmamamktadır. Dolayısıyla küçük yüzdeli kritik sönümleme kaysayayılarında sistemin enerji sönümleme kapasati beklendiği gibi daha az olmaktadır.

Modal dinamik analizlerinde, statik analizinden farklı olarak maksimum Won Mises gerilimesi I birleşim levhası yerine J birleşim levhasında 11.573 psi değerle hesaplanmıştır (Şekil 4.10-4.11).



Şekil 4.10. Modal Dinamik Analizinden Elde Edilen Birleşim Plaka Üzerinde Von Mises Gerilme Dağılımı



**Şekil 4.11.** Modal Dinamik Analizinden Elde Edilen Birleşim Plaka Üzerinde Von Mises Gerilme Dağılımı

Ayrıca, I bağlantı levhasının modal dinamik analizinin von Mises gerilmeleri, statik analizindekinden neredeyse% 50 daha az olduğu görülebilir. Bu sonuç, uygulanan dinamik yükün frekansı, minimum doğal frekansı 2.76 rad / sn olan yapısal sistemlerin

doğal frekansına göre oldukça yüksek olmasıdan kaynaklandığından beklenen bir sonuçtur.

Açık dinamik analizler doğrusal olmayan hasar birleşik elasto-plastik malzeme modeli ile yapıldı. Hasar birleşik elasto-plastik analizinden C düğümündeki bağlantı levhası için elde edilen maksimum von Mises gerilmesi statik analizin sonuçlarına karşılaştırıldı(Şekil 4.12-4.13).



Şekil 4.12. Elasto-plastik hasar analizlerden elde edilen bağlantı levhası von Mises gerilme dağılımı



Şekil 4.13. Elasto-plastik hasar analizlerden elde edilen bağlantı levhası von Mises gerilme dağılımı

Görüldüğü gibi, elastik olmayan analizden elde edilen gerilme dağılımı statik analizden elde edilen gerilme dağılımına göre oldukça farklıdır. Maksimum von Mises gerilmesi, statik analizinden elde edilenden üç kat büyük, yaklaşık olarak 62.254 psi değerinde hesaplanmıştır.. Bu gerilme değeri, A36 çelik'in akma mukavemeti ve kopma mukavemetinden yüksek olmasından dolayı malzemede plastik deformasyon ve çatlama hasarlarının oluşması açıktır. C ve H düğüm noktalarındaki birleşim levhaları için Şekil

4.14-4.19, sırasıyla, Von Mises gerilme dağılımı, eşdeğer plastik birim şekil değiştirme dağılımınıve hasar başlangıcını gösterildi.



**Şekil 4.14.** Von Mises gerelmesine göre C noktasındaki birleşim plakasının, elastoplastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını.



**Şekil 4.15.** Von Mises gerelmesine göre C noktasındaki birleşim plakasının, elastoplastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını.



**Şekil 4.16.** Von Mises gerelmesine göre C noktasındaki birleşim plakasının, elastoplastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını.



**Şekil 4.17.** Von Mises gerelmesine göre H noktasındaki birleşim plakasının, elastoplastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını.



**Şekil 4.18.** Von Mises gerelmesine göre H noktasındaki birleşim plakasının, elastoplastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını



Şekil 4.19. Von Mises gerelmesine göre H noktasındaki birleşim plakasının, elastoplastik hasar modeli eşdeğer plastik gerinme ve hasar başlatma dağıtım sonuçlarını.

Bu grafiklerde, açık doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları, deneysel ve analitik çalışmalarda belirtildiği gibi, maksimum gerilme dağılımının basınç ve çekme etkilerinin oluşabileceği köşegen taşyıcvı elemanların birleşti bölgelerde olduğunu göstermektedir.

Bu analizlerden elde edilen diğer bir sonuç ise plastikleşmenin, yüklemenin başlangıcında bağlantı levhalarının iç kısmında başlyarak yük artışı ile plastik bağlantı levhasının dış kısmına doğru ilerlemesidir. (Şekil 4.14-4.19). Hasarın maksimum von Mises gerilmelerinin ve plastik birim şekil değiştirmelerin lokalize olduğu bölğede oluştuğu görülmektedir. Buradan çıkarılan en en önemli sonuç bu bölgede, çekme ve basınç etkileşimi nedeniyle kesme kuvvetlerininden dolayı oluşacak kayma gerilmelerinin malzemenin kayma direncinin üzerinde oluşabileceği dolayısıyla kesmedenkaynaklı hasarların ve göçmelerin oluşabileceği yönündedir.

### 4.2. Köprünün Deprem Yükler Altında Analizleri

Bu bölümde deprem yük koşulları altında bağlantı levhasının davranışını belirlemek için analizler yapıldı. Bağlantı levhlarına gelen taşıyıcı kafes elemanlar, kaynak tipi bağlantı yerine gerçeğe daha uygun olarak cıvata bağlantı şekli kullanılark birleştirildi. Köprünün sonlu elemanlar modeli ise üç boyutlu olarak kabuk ve katı elemanlar kullanılarka yapıldı.

.Köprü tasarımı ve sonlu elemanlar modellemesi ile ilgili detaylar ileryen bölümlerde kapsamlı bir şekilde verildi.

### 4.2.1. Köprü Tasarımın Detayları (Civata Birleşimli)

Köprü tasarımında, AISC Yapısal Çelik Binalar (AISC 2005) ve Federal Karayolları İdaresi Köprüsü Tasarım Rehberlik Şartnamesinde belirtilen kod ve kurallar izlendi. Özellikle bağlantı levhaların tasarımı için Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı Yöntemi (LRFD) uyarınca AASHTO (2007) belirtilen esaslar kullanıldı(Astaneh ve diğerleri, 1989; Astaneh Asl, 1992 ve 1998; İbrahim 2008). Bu köprünün birleşim noktlarında kullanılan üç farkli tip bağlantı levhalarının geometrik deyatyları Şekil 4.20 verildi.



**Şekil 4.20.** Eklemlerde kullanılan iki tip bağlantı levhalarının geometrik ayrıntıları.(Şekil 4.1'de,F,L GK ve BD)

Köprü yapısna etki eden yük koşulları ve yüklme şekli Bölüm 4.1.1 belirtilmiştir. Bu yükleme koşulları altında bağlantı levhalarına taşıyıcı elemanlardan etki eden kuvvetler belirlendikten sonra civatalı bağlantı levhaların tasarım kontrölü, Yük ve Direnç Faktörü Değerlendirmesi Yöntemi (LRFD)'de belirtilen esaslar üzerinden yapıldı.

Bağlantı levhalarının tasarım kontrolü bu levhalara bağlanan taşıyıcı elamanların eksenlerinden yaklaşık 30° hatları yapan Whitmore etkin genişliği kullanılarak hesaplandı. (Şekil 4.21)



Şekil 4.21. Birleşim levhaların etkin genişliği

Bağlantı levhasında sırası ise perçin kesme direnci, taşıma direnci, brüt bölüm verimlilik direnci, net kesit kırılma direnci ve blok direncini kontrolleri yapıldı (Şekil 4.22).



**Şekil 4.22.** Çekme, dikey ve yatay kesme ve basınçta köşebent plakaların direncini hesaplamak için kullanınlan plakanın detayı

Şekil 4.1'de gösterilen F, G ve H düğüm noktalarında düşey ve yatay kesme, çekme ve baınç kuvvetlerine maruz kalmalrından dolayı kritik olan bağlantı levhalarının tasarım

kontrolü, Yük ve Direnç Faktörü Değerlendirmesi Yöntemi (LRFD)'de belirtilen esaslar dikkate alınarak yapıldı ve bu bulgular Çizelge 4.2 ve 4.3 'de özetlendi.

Joints	Loc	Resistance of Fastener (Kips)	Axial Resi (Kips)	stance of th	Controlling Axial Resistance	Inventory Rating		
	At the end of mem.	Fastener Shear	Gross Section Yielding in Tension	Net Section Fraction in Tension	Block Shear Rapture	Comp. Buckling	C=0.9xØRn (Kips)	Factor $\frac{C - 0.74 DL}{1.24 LL}$
F	1	452.34	960.7	1166.4	1064.5	-	407.11	1.6
	2	376.95	-	-	-	950.4	339.255	0.64
G	1/2	980.07	1384.031	1832.1	1455.51	-	882.1	4.34
	3	376.95	902.71	1041.8	908.9	-	339.255	4.14
	1	980.07	1384.031	1832.1	1455.51	-	882.1	4.34
Н	2	980.07	1384.031	1832.1	1455.51	_	882.1	2.1
	4	376.95	902.71	1041.8	908.9	_	339.255	1.6

Çizelge 4. 2. Birleşim plakaların tasarım direnci özeti

	3	2		Controlling			
Joints	Orientatio	Shear Resistance	Resistance	Rating			
	n of the section			C=0.9xØRn	Factor		
		Gross Section	Net Section Fraction		$\frac{C - 0.65 DL}{1.24 LL}$		
		Yielding in Shear	in Shear		1.24 <i>LL</i>		
F	Vertical	642.19	1097.92	577.9	3.83		
•	Horizontal	577.97	741.76	520.1	2.34		
G	Vertical	642.19	1097.92	577.9	2.67		
	Horizontal	1150.94	1430.54	1035.85	14.28		

Çizelge 4. 3. Kesmeye maruz kalan bağlantı levhasının direnç özeti

Kritk düğüm noktalarındaki bağlantı levhaları üzerine yapılan bu tasarım köntrölleri sonucu en düşük inventroy konntrol faktörü 0.65 olarak F düğüm noktasındaki bağlantı levhasının basın burkulması durumunda hesaplandı. Dolayısıyla bu tasrım kontrollerinden çıkan sonuç bağlantı levhasında tasarımı kontrol eden en krtik direnç faktörünün basınç burkulması olduğudur.

### 4.2.2. Sonlu Eleman Modeli

Kafes köprü yapının sayısal modeli ABAQUS sonlu elemanlar programı içinde yapıldı. Modelleme bir birini sıralı takip eden iki hesaplama adımları ve modeleri şeklinde yapıldı. Başlangıç sonlu eleman modeli kafes yapının üç boyutlu gloabal tepkisini ve kuvvet ve momentlerin maksimum olduğu kritk düğüm noklatlarını belirleyebilmek için oluşturldu. Birleşim levhaları ve kafes taşıyıcı elemanları bir bütün halinde olacak şekilde 3D kabuk elemanlar kullanılarak modellendi (Şekil 4.23-24).



Şekil 4.23. Kafes Köprüsü Modeli için Küresel 3D Kabuk Modeli



Şekil 4.24. Kafes Köprüsü Modeli için Küresel 3D Kabuk Modeli

Civatalar üç boyutlu kirş elaman olarak modellenirken civata bağlantı levhası birleşim için ise Abaqus'un kiriş tipi birçok noktadan kısıtlma (Multi Point Contraint-MPC) özelliği kullanıldı. MPC 'nin etkileşim bölgesi, civatalar ile bağlantı levhası arasındaki etkin temas yüzeyleri tanımlanarak yapıldı. Civata bağlantılarında izlenen bu tür bir idalleştirme, gerek civata yüklerinin doğru aktarılması gerek hesaplama zamanlarının azaltılması açısından tam boyutlu sonlu eleman modellemelerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

En kritik düğüm noktaları belirlendikten sonra bu noktalardaki bağlantı levhaların plastikleşme ve çatlak hasar davranaışlarını daha iyi belirleyebilmek için kabuk'tan kabuğa submodeling tekniği kullanıldı (Şekil 4.25-4.26).



Şekil 4.25. Bağlantı levhasının 3D kabuk kabuk submodeli



Şekil 4.26. Bağlantı levhasının 3D katı-katı Submodeli

Bağlantı levhası için hasar birleşik elasto-plastisite doğrusal olmayan malzeme modeli kullanılırken cıvata ve taşıyı elemanlar plastik malzeme davranışı ile modellendi. Submodelleme tekniği ile oluşturulan yapuıda daha küçük boyutlu ağ yapıları kullanılabildiğinden levhalar üzerinde doğru ve güvenilir gerilme ve deformasyon dağılımlarını elde etmek mümkün oldu.

Cıvattalarının sıkıştırlamsından dolayı oluşacak öngerilme kuvvetlerini hesaba katmak için katı-katı submodelli (Şekil 4.26) statik analizleri ABAQUS/Standard çözücüde gerçekleştirilerek civata da oluşacak öngerilme kuvvetleri hesaplandı. Bu kuvvetler ABAQUS/Expilict çözücü ile dinamik analizleri yapılan kabuk-kabuk submodellinde kullanıldı. Bu bir birini takip eden küreselden yerele sıralı modelleme yönteminin akış diayagramı Şekil 4.27 gösterildi.



Şekil 4.27. Hesaplama modelinin sıralı adımları

Bu tip sıralı küresel - yerel modelleme yönteminin, Deliktaş ve Mizamkhan (2014) tarafından, kafes taşıyıcı elemanları ile birleşim levhalarının biribirine ayrışmaz bağlantı tipi kullanalırak sadece kabuk elemalardan oluşturulan sonlu elamanlar modeline göre önemli avantajları vardır. Bu çalışmada sıralı küresel - yerel modelleme yöntemini ile oluşturulan modellenen civata bağlantılı sonlu elemanlar modeli ile daha gerçekçi bir kafes yapı sitemi oluşturularak bağlı levhalarının plastikleşme ve çatlak hasarı deformasyonları daha detaylı ve doğru bir şekilde belirlenebildi.

### 4.2.3. Deprem Yükleri Altında Yapının Dinamik Tepkisi

Sismik yükleme koşulları için 1999 Kocaeli, Türkiye, depremin tepkileri dikkate alındı. Zemin hareketin hız-zaman geçmişi burada kafes köprünün mesnetlerinde bir doğrultuda uygulandı. Burada kullanılan sismik yükleme koşulu 0.41 g'lik yatay zemin hareketi ivmeleri ile (PGAs) kayıt edilen 1999 Kocaeli Depremin sismik dalga verisidir. Depremin etkin olduğu süre yaklaşık olarak 7 saniye kabul edilirken zemin hareketin toplam süresi 10 saniye ve sonlu elemanlar analiz süresi 0,0001 saniye bir artım adım adımları ile 12 saniye olarak alındı. (Şekil 4.28-4.29)



Şekil 4.28. 1999 Kocaeli Deprem Kaydı



Şekil 4.29. 1999 Kocaeli Deprem Kaydının Yatay Zemin hareketi ivmeleri

Global modelin sesmik analizinde kritik düğüm noktalarındaki taşıyıcı elemanaların enkesitleri için elde edilen eksenel kuvvet ve moment değerleri(Şekil 4.30-31) yerel modelin yükleme koşulları olarak taşıyıcı elemanların kesitlerene uygulandı.



Şekil 4.30. Küresel modelinden submodel üyelerine transfer edilen dynamic kuvvetler kuvvet-zaman



Şekil 4.31. Küresel modelinden submodel üyelerine transfer edilen dynamic kuvvetler moment-zaman

### 4.2.4. Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Oluşturulan sonlu eleman modelinin doğrulunu belirleyebilmek için kafes yapının iç ve dış enerji tepkilerinin yanı sıra yapay birim şekil değiştirme enerjisi (ALLAE)' de hesaplandı(Şekil 4.32).



Şekil 4.32. Sonlu eleman modelinin enerji tepkisi

Şekil 4.32'de görüldüğü gibi, kinetik enerji (ALLKE)'nim toplam iç enerjiye (ALLIE) oranı yükün başlangıç aşamalarında yüksek olmasına rağmen ilerleye yükün ilerleyen aşamalarında bu ran gittikçe azalmaktadır. Yapay birim enerjininde yükleme süreci karlı bir şekilde düşük kalması oşturulan dinamik modelin doğru olduğunu göstermektedir.

Sisimik analizler ile en kritk bağlantı levhasında oluşan von Mises gerilemenin, eş değer plastik birim şekil değiştirmelerin ve çatlak hasarlarının dağılımları elde edilirken özellikle burkulma şeklinde oluşan aşırı deformasyonlarda gösterildi. Şekil 4.34-4.35, maksimum von Mises gerilme dağılımlarının genellikle taşıyıcı elemanların bağlantı levhalarına birleştiği yerlerin sonlarında, deneysel ve Bölüm 4.21. de belirtilen analitik hesaplamalarda tanımlanan gerilme doğrultularında oluştuğu görülmektedir. Bunu yanısıra analzilerde görülen önemli bir deformasyon ise bağlantı levhalarının düzlem dışı aşırı burkulma davranışı göstermesidir. Bu burkulma bölgesi ve doğrulutsunun, yıkılan köprülerdeki bağlantı levhalarında görülen çatlak ve kırılmlarla benzer bölgelere ve doğrultularda olması yapılan analizlerin doğruluğu ve gerekliği açısınadan son derece önemlidir.



Şekil 4.33. Birleşim levhalarında Von Mises gerilme dağılımı



Şekil 4.34. Birleşim levhalarında Von Mises gerilme dağılımı (Şekil 4.1'de G)



Şekil 4.35. Birleşim levhalarında Von Mises gerilme dağılımı (Şekil 4.1'de K.)

Mühendislik tasarımı açısından bu analizlerden çıkarılacak sonuç ise etkin genişlik esasına göre yapılacak tasarımlar çok sınırlayıcı olup burkulma benzeri aşırı deformasyonları belirlemede yetersiz kalmaktadır.

Sonlu elemanların diğere öenmli bir avantajıda bağlantı levhalarında oluşan plastikleşme ve çatlak hasar dağılımlarının detaylıve doğru bir şekilde belirlenebilmesidir. Şekiller 4.36-38 de sunulan eşdeğer birim plastik şekil değiştirme (PEEQ) dağılımından da görüldüğü gibi plastikleşmenin çivatalar etrafında lokalize olduğu bunda cıvatalrdaki öngerilmelerin ve gerilme yığılmalarının önemli rol oynadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.36. Birleşim levhalarında eşdeğer plastik gerinme dağılımı



Şekil 4.37. Birleşim levhalarında eşdeğer plastik gerinme dağılımı (Şekil 4.1'de G)



Şekil 4.38. Birleşim levhalarında eşdeğer plastik gerinme dağılımı (Şekil 4.1'de K)

Plastikleşmeye sebep olan diğer bir unsurda, Deliktaş ve Mizamkhan (2014) çalışmasında öngörüldüğü gibi, bağlantı levhasının düzlem dışı burkulmasıdır. Bu plastikleşme bölgeleri malzemde sünek hasarı ve dolasıyla çatlak oluşumlarını ve gelişimlerini tetikleyen bölgelerdir.

Bağlantı levhalarında oluşacak hasarı tetikleyen diğer bir nedende öngerilmeli cıvatalarda oluşan gerilmeler ve plastik deformasyonlardır (Şekil 4.39-4.40)



Şekil 4.39. Perçin öngerilim altında 3D yerel katı modelin bağlantı levhası Von Mises gerilme dağılımı



**Şekil 4.40.** Perçin öngerilim altında 3D yerel katı modelin Perçinlerin Von Mises gerilme dağılımı

Bu anliz sonucu cıvata bağlantıları için çıkarılan sonuç eğer cıvata bağlantılarını kayması kontrol edilirse yapını sünek davranışı ve enerji sönümle kapasitesinin artacağı şeklindedir.

### 5. SONUÇ

Kafes yapılardaki bağlanı levhlarının statik, dinamik ve sismik yükleme koşulları altında yapısal analizleri ABAQUS'un sonlu elemanlar bünyesinde Johnson-Cook yükleme hızına bağlı plastisite ve hasar modelş kullanılarak yapıldı. Yapılan analizler sonucu dinamik ve deprem yükleri altında özellikle, yatay, düşey ve çapraz taşıyıcı elemanların bağlandığı düğüm noktalarındaki bağlantı levhalarının plastikleşme, hasar ve düzlem dışı burkulma gibi aşırı deformayon maruz kaldığı görüldü. Bu nedenle, çekme ve basınç etkileşimlerinden dolayı birleşim levhalarında oluşan çatlama/kırılmalarda kesme kuvvetininden kaynaklı kayma gerilmelerinin önemli bir rol oynadığı sonucuna varıldı.

Bu çalışmanın diğer önemli bir sopnucu ise bağlantı levhaların üzerinde hasar nedeniyle oluşan çatlağın civata bağlanıtı bölgelerinde başlamsı ve zamanla plastikleimenin ve düzlem dışı burkulmaların lokalize olduğu doğrultuda yayıldığının belirlenmesidir. Dolayısıyla sonlu elamlar yönteminin, analitik yöntemlere göre bağlantı levhalar üzerindeki gerilme, deformasyon ve hasar dağılımlarını daha kapsamlı ve detaylı olarak sağlıdığı görülmektedir. Yapılan bu tez çalışması ile kafes taşıyıcı elemanları ve kafes yapının tamamındaki etkileşimleride dikkate alçak şekilde genişiletilerek yapısal performansın belirlenmesine imkan sağlayack bir alt yapı oluşturmuştur.

### KAYNAKLAR

**Anonim, 2012.** Tufal Raporu. Marzinc Marmara Geri Kazanım San. ve Tic. A.Ş, İstanbul Türkiye.

Abaqus 6.9,2009. Abaqus User Manual. Dassault Systèmes, Providence, RI.

AASHTO, LRFD, 2008. Interim Revisions.

AISC,2005. Chicago, IL.

**Astaneh, A., 1992.** Cyclic Behavior of gusset plate connections in V-braced steel frames, Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading, Fukomoto, Y. and Lee, G. C., eds., CRC Press, Ann Arbor, pp. 63-84.

Astaneh-Asl A., 1998. Seismic Behavior and Design of Gusset Plates, SSEC Steel Tips, Technical Information & Product Service.

Astaneh-Asl, A., Call, S. M., and McMullin, K. M, 1989. Design of single plate shear connections, *Engineering Journal, AISC, First Quarter, pp.21-3* 

**Borvik, T., Hoperstad, O.S., Berstad, T. and Langseth, M., 2001.** A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration, *Eur J Mech, 20, pp. 685–712.* 

**Deliktas, B. Mizamkhan A.,2013.** Computational Modeling the Behavior of the Gusset Plates in Truss Based Bridges under Dynamics Loads, International Conference on Earthquake Engineering, Macedonia.

**Federal Highway Administration (FHWA), 2010.** Guidelines for the Load and Resistance Factor Design and Rating of Riveted and Riveted Gusset-Plate Connections for Steel Bridges, Project No. 12–84, Second Interim Report, FHWA, Washington, DC.

**Federal Highway Administration (FHWA), 2009.** Load Rating Guidance and Examples for Riveted and Riveted Gusset Plates in Truss Bridges", FHWA-IF-09-014, FHWA, Washington, DC.

Ganz, S. Structural analysis of bridge gusset plates: steel vs. composite, M.S: Thesis,

Hardash, S.G. and Bjorhovde, R.. Gusset plate design utilizing block-shear concepts. Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, 1984. The University

of Arizona, Tucson, AZ,.

Huns, B.B.S., Grondin, G.Y. and Driver, R.G., 2006. Tension and shear block failure of riveted gusset plates, Canadian Journal of Civil Engineering, 33(4), pp. 395-408.

Ibrahim, F.I.S., 2008. Bridge Design Guidance No:1, AASHTO LFFR & LRFD.

Jeffrey W. Berman, 2012. Rapid Assessment of Gusset Plate Safety in Steel Truss Bridges, Journal of Bridge Engineering.

**Johnson, G.R. and Cook, W.H., 1985.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, 21(1), pp.31-48.

**Hu, J. W., 2013.** Design and Strength Evaluation of Critical Gusset Plates in the Steel Bridge Using New Load and Resistance Factor Design Methods and Advanced FE Analyses, ISIJ International, 53(8), pp. 1443–1452.

Jutras, M.,2008. Improvement of the characterization method of the Johnson-Cook Model, *M.S. Thesis*, Faculty of Sciences and Engineering, Laval University, Quebec, Canada.

Lehman, D., Roeder, C., Herman, D., Johnson, S. and Kotulka, B., 2008. Improved Seismic Performance of Gusset Plate Connections. J. Struct. Eng.. 134(6), pp. 890–901. Lemaitre J., 1996. A Course on Damage Mechanics, Springer, Berlin, Heidelberg New York. Li, Z.X., Zhou, T.Q., Chan, T.H.T. and Yu, Y., 2007. Multi-scale numerical analysis on dynamic response and local damage in long-span bridges, Engineering Structures, 29, pp. 1507–1524.

Liao, M., Okazaki, T., Ballarini, R., Schultz, A.E. and Galambos, T.V., 2009. Analysis of critical gusset plates in the collapsed I-35W bridge, Proceedings of the Structures Congress

Don't Mess with Structural Engineers, 2009. Expanding Our Role, pp. 2159-2168.

Liao, M., Okazaki, T., Ballarini, R., Schultz, A.E. and Galambos, T.V., 2011. Nonlinear finite element analysis of critical gusset plates in the I-35W bridge in Minnesota, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp. 59-69.

Myers, M.M., Screening and analysis for the gusset plates of the Hawk Falls Bridge,

**Pennsylvania, 2009.** USA Safety and Reliability of Bridge Structures, ed. K.M. Mahmoud, CRC Press, Balkema, Leiden, The Netherlands.

**Najjar, Walid S., DeOrtentiis, Frank, 2010.** Gusset Plates in Railroad Truss Bridges Finite Element Analysis and Comparison with Whitmore Testing. Briarcliff Manor, New York.

**Nakamura, T. and Simulia Corp., 2008**. Structural and local failure study of gusset plate in Minneapolis Birdge Collapse, National Transportation Safety Board, Washington D.C. 20594, pp.1-271.

National Transportation Safety Board (NTSB), 2008. Collapse of I-35W Highway Bridge, Minneapolis, Minnesota, August 1, 2007, Highway Accident Report NTSB/HAR-08/03, NTSB, Washington, DC.

**Rantucci, G., 1994.** Geological disasters in the Philippines : the July 1990 earthquake and the June 1991 eruption of Mount Pinatubo : description, effects and lessons learned, Roma: Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento per l'informazione e l'editoria. **Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, Connecticut, (2012).** pp. 1-87.

Sohn, H., Farrar, C., Hunter, N. and Worden, K., 2003. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.

**Teng, X., Wierzbicki, T.**.Evaluation of six fracture models in high velocity perforation. **Engineering Fracture Mechanics, (2006).** pp:1653–78.

Wang, L. and Chan, T.H.T.,2009. Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring, In The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development: Planning, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure, 26 March 2009, Queensland University of Technology, Brisbane.

Whitmore, R.E., 1952. Experimental investigation of stresses in gusset plates. Bulletin, University of Tennessee, Knoxville, Engineering Experiment Station.

Yamamoto, K., Akiyama N. and Okumura, T., 1988. Buckling strength of gusseted truss joints, J. Struct. Eng., ASCE, pp. 575-590.

Yamamoto, K., Akiyama, N. and Okumura, T., 1985. Elastic analysis of gusseted truss joints, *Journal of Structural Engineering*, pp. 2545-2564.

Yamamoto, K., Akiyama, N. and Okumura, T.,1988. Buckling Strengths of Gusseted Truss Joints, J. Struct. Eng. ASCE, 114(3), pp. 575-590.

# ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Akhaan MIZAMKHAN Doğum Yeri ve Tarihi : Moğolıstan, 1984

Eğitim Durumu: Lise : Moğolıstan Lisesi Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

Zeki Ün Mühendislik (Bursa) Modül F Mimarlık Ve Mühendislik (Bursa) Hidayet Sac Profil Ins. Mak. San. Ve Tıc. (Kayseri)

İletişim (e-posta): <u>m.akhaan@hidayetcelik.com.tr</u>

Yayın:

**Deliktas, B. and Mızamkhan, A., 2014.** Modeling Nonlineer Behavior of Gusset Plates in the Truss Based Steel Bridges, *Structural Engneering and Mechanics. 51, No. 5 pp 809-821*