

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPALI KESİT PASLANMAZ ÇELİK ÇEKME
ELEMANLARI KAYNAKLI UÇ BİRLEŞİMLERİNİN
DAVRANIŞ VE TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Edip SEÇKİN

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI

ARALIK 2012

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAPALI KESİT PASLANMAZ ÇELİK ÇEKME
ELEMANLARI KAYNAKLI UÇ BİRLEŞİMLERİNİN
DAVRANIŞ VE TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Edip SEÇKİN

(0709122045)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Aralık 2012

Tezin Savunulduğu Tarih: 06 Şubat 2013

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güven KIYMAZ
Tez İzleme Jürisi: Prof.Dr. Yusuf Hatay ÖNEN
Prof.Dr. Faruk YÜKSELER**

ARALIK 2012

ÖNSÖZ

Bu doktora tezinin hazırlanması sırasında, her zaman; desteğini, sabrını ve anlayışını eksik etmeyen aileme, sıkıntılarımı paylaşarak azaltan, sevinçlerimi paylaşarak çoğaltan, sevgili eşim Asuman'a, biricik çocuklarım Batuhan ve Sena'ya sonsuz teşekkür ederim.

Tüm akademik çalışmalarında ve tez çalışması boyunca yardım ve desteğini hiç esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren tez danışmanım, Sayın Doç.Dr. Güven KIYMAZ'a, tez izleme kurulunda yer alan, yapıcı eleştirileri ve çalışmaya katkılarında dolayı Sayın Prof.Dr. Faruk YÜKSELER ve Doç.Dr. S.Ümit DİKMEN'e, tezin bitirilmesinde manevi desteğini ve katkılarını esirgemeyen Sayın Prof.Dr. Yusuf Hatay ÖNEN'e, deneysel çalışmalar boyunca yardımını esirgemeyen Sayın İnş.Yük.Müh. Korhan Deniz DALGIÇ'a ve deneysel çalışmalar için gerekli desteği sağlayan TC İstanbul Kültür Üniversitesi Rektörlüğü'ne sonsuz teşekkürler ederim.

Tez çalışmam boyunca katkı ve desteği bulunan, isimlerini saymadığım tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Çalışmanın bilim dünyasına faydalı olması dileğiyle.

Edip SEÇKİN
İSTANBUL, 2012

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
SİMGE LİSTESİ	xiv
ÖZET.....	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Konusu, Amacı ve Kapsamı.....	2
1.2 Paslanmaz Çelik Hakkında Genel Bilgi	5
1.2.1 Mekanik Özellikler	10
1.2.2 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi İçin Analitik İfadeler	12
1.2.3 Paslanmaz Çeliğin Yapısal Uygulama Alanları	16
1.2.3.1 Paslanmaz Çelik Kullanılan Yapı Örnekleri, Japonya	18
1.2.3.2 “Villa Inox” Tuusula, Finlandiya	19
1.2.3.3 Vauxhall Cross Otobüs Terminali Londra, İngiltere.....	20
1.2.3.4 “La Grande Arche” Panoramik Asansör Yapısı Paris, Fransa.....	21
1.2.3.5 Siena Yaya Köprüsü, Ruffolo, İtalya.....	22
2 LİTERATÜR TARAMASI.....	24
2.1 Giriş	24
2.2 Daha Önceki Çalışmalar.....	24
3 KAPALI KESİT ÇELİK ELEMAN BİRLEŞİMLERİ DAVRANIŞ VE	
TASARIMI	32
3.1 Giriş	32
3.2 Kapalı Kesit Çelik Elemanlar.....	32
3.3 Kapalı Kesit Çelik Eleman Birleşimleri.....	34
3.4 Kapalı Kesit Çelik Elemanlarının Kaynaklı Uç Birleşimleri	35
3.5 Kayma Aksaması ve Çevresel Yırılma.....	38

3.6 Blok Kesme Göçmesi	46
3.7 Tasarım Yaklaşımları	48
3.8 Yapısal Paslanmaz Çelik Tasarım Standartları	55
4 DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMALARI	56
4.1 Giriş	56
4.2 Malzeme Deneyleri.....	56
4.2.1 Kupon Çekme Deneyi.....	57
4.2.2 Kupon Deney Numunesi.....	59
4.2.3 Kupon Çekme Testi Sonuçları	61
4.3 KÇKB Numunelerinin Hazırlanması.....	65
4.4 Test Düzenegi ve Yükleme Sistemi.....	71
4.5 Deneysel Gözlemler.....	73
4.5.1 Boru Profil Numuneleriyle İlgili Deneysel Gözlemler (C-Lxx-NW,RW)74	
4.5.1.1 C-L30-NW Numunesi Deney Gözlemi	74
4.5.1.2 C-L30-RW Numunesi.....	77
4.5.2 Kutu Profil Numuneleriyle İlgili Deneysel Gözlemler (S-Lxx-NW,RW)79	
4.5.2.1 S-L30-NW Numunesi Deney Gözlemi.....	79
4.5.2.2 S-L30-RW Numunesi Deney Gözlemi.....	82
4.5.3 Genel Deneysel Gözlem Sonuçları.....	85
4.6 Yük-Yer Değiştirme Eğrilerinin Değerlendirilmesi	95
4.7 Sayısal Analiz Çalışmaları.....	97
4.7.1 ABAQUS® Sonlu Elemanlar Programı Hakkında Genel Bilgi.....	98
4.7.2 Kullanılan Modelleme Elemanları ve Teknikleri.....	99
4.7.2.1 Malzeme Özellikleri	99
4.7.2.2 Başlangıç Koşulları	102
4.7.2.3 Parçaların Birleştirilmesi	103
4.7.2.4 Mesnet Koşulları Tanımı ve Yük Uygulanması.....	104
4.7.2.5 Sonlu Eleman Çözüm Ağı Düzenlemesi	106
4.7.3 Sayısal Analiz Sonuçları	107
4.8 Yaklaşık Kapasite Eğrisi ile Birleşim Akma Yükünün Belirlenmesi.....	116
4.9 Kesit Çarpılmasına Bağlı Maksimum Yükün Bulunması	122
5 DENEYSEL, SAYISAL ANALİZ VE ANALİTİK ÇALIŞMA	
SONUÇLARININ TASARIMA YÖNELİK DEĞERLENDİRİLMESİ	128

5.1 Giriş	128
5.2 Analitik ve Deneysel Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	128
5.3 Tasarıma Yönelik Net Enkesit Azaltma İfadesinin Belirlenmesi.....	136
6 GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	147
6.1 Giriş	147
6.2 Çalışma Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçları	147
6.3 Tez Kapsamında Yapılan Sayısal Analiz Çalışmalarının Sonuçları.....	151
6.4 Çalışmanın Tasarıma Yönelik Genel Değerlendirmesi	152
6.5 Gelecekte Yapılması Önerilen Çalışmalar	154
KAYNAKÇA.....	155
EK.A Test Sonuçları	160
EK.B Sayısal Analiz Sonuçları	174
EK.C Test ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	179
ÖZGEÇMİŞ	184

KISALTMALAR

AIJ	: Architectural Institute of Japan.
AISC	: American Institute of Steel Construction.
AISI	: American Iron and Steel Institute.
ASCE	: American Society of Civil Engineers.
ASTM	: American Society for Testing and Materials.
AS/NZS	: Australian / New Zealand Standard.
CF	: Circumferences Failure (Çevresel Göçme)
CSA	: Canadian Standards Association.
EC	: EuroCode
EN	: EuroNorm
GY	: Gross section Yield (Brüt kesitte akma)
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
JSSA	: Japan Stainless Steel Association.
LCC	: Life Cycle Cost (Ömür Boyu Dönüşüm Maliyeti)
NW	: No Return Weld (Kaynak uç dönüşsüz)
RW	: Return Weld (Kaynak uç dönüşlü)
SABS	: South African Bureau of Standards.
SANS	: South African National Standard.
SCI	: Steel Construction Institute (İngiltere)
SL	: Shear Lag (Kayma Aksamı / Düzensizliği)
TO	: Tear-Out (Blok kesme yırtılması)
YCP	: Yield Capacity Point (Akma kapasitesi noktası, ilk akma yükü)

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Paslanmaz çelik kullanım alanları (URL 2).	8
Tablo 1.2 Paslanmaz çelik ve karbon çeliğin tipik mekanik özellikleri.	10
Tablo 3.1 Profillerin kaynaklı uç birleşimleri için göçme modları (Zhao ve diğ. 2005).	45
Tablo 3.2 Kapalı kesitli, guse plakasına kaynaklı uç birleşimleri için kayma aksaması etkisine bağlı tasarım koşulları.	52
Tablo 3.3 Boru kesitli, guse plakasına kaynaklı uç birleşimleri için blok kesme etkisine bağlı tasarım koşulları.	52
Tablo 3.4 Çekme elemanlarının birleşimleri için kayma aksaması faktörleri tablosu (AISC 2005).	54
Tablo 4.1 Test kuponlarının geometrik ölçüleri.	60
Tablo 4.2 Düz bölgeden alınmış örneklerin çekme testi sonuçları.	61
Tablo 4.3 Köşe bölgeden alınmış örneklerin çekme testi sonuçları.	61
Tablo 4.4 Boru üzerinden alınmış örneklerin çekme testi sonuçları.	62
Tablo 4.5 Kuponların çekme testi genel sonuçları.	62
Tablo 4.6 Deney numuneleri geometrik özellikleri.	69
Tablo 4.7 Boru deney numunelerinin kaynak uzunluğu kontrolleri.	70
Tablo 4.8 Kutu deney numunelerinin kaynak uzunluğu kontrolleri.	70
Tablo 4.9 Boru profil numuneleri test sonuçları.	90
Tablo 4.10 Kutu profil numuneleri test sonuçları.	90
Tablo 4.11 Boru profil (NW) numuneleri göçme resimleri.	91
Tablo 4.12 Boru profil (RW) numuneleri göçme resimleri.	92
Tablo 4.13 Kutu profil (NW) numuneleri göçme resimleri.	93
Tablo 4.14 Kutu profil (RW) numuneleri göçme resimleri.	94
Tablo 4.15 Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri.	99
Tablo 4.16 Sonlu eleman modellerinde kullanılan kaynak malzemesi özellikleri. ...	102
Tablo 4.17 Boru numunelerin sayısal analiz, yük-yer değiştirme sonuçları.	108
Tablo 4.18 Kutu numunelerin sayısal analiz, yük-yer değiştirme sonuçları.	109
Tablo 4.19 Boru profil (NW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının	

karşılaştırması.....	111
Tablo 4.20 Boru profil (RW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.....	111
Tablo 4.21 Kutu profil (NW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.....	113
Tablo 4.22 Kutu profil (RW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.....	113
Tablo 4.23 Boru profil numuneleri için birleşim akma yükü tablosu.....	119
Tablo 4.24 Kutu profil numuneleri için birleşim akma yükü tablosu.....	120
Tablo 4.25 Numunelerde %3D,H kesit çarpılması limitindeki yük ve yer değiştirme.	124
Tablo 4.26 Birleşim akma yüklerine karşılık gelen Δ ve $\%(X)D$ kesit çarpılma limitleri.....	126
Tablo 5.1 Boru numunelerin nominal dayanımlarının belirlenmesi için gerekli parametreler.....	128
Tablo 5.2 Kutu numunelerin nominal dayanımlarının belirlenmesi için gerekli parametreler.....	129
Tablo 5.3 Boru numuneleri için etkili net enkesit (A_e) alanları.....	130
Tablo 5.4 Kutu numuneleri için etkili net enkesit (A_e) alanları.....	130
Tablo 5.5 Boru profil C-NW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.....	131
Tablo 5.6 Boru profil C-RW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.....	132
Tablo 5.7 Kutu profil S-NW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.....	132
Tablo 5.8 Kutu profil S-RW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.....	133
Tablo 5.9 Boru profil (NW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.....	134
Tablo 5.10 Boru profil (RW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.....	135
Tablo 5.11 Kutu profil (NW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.....	135
Tablo 5.12 Kutu profil (RW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.....	136
Tablo 5.13 Boru profil numunelerin net enkesit azaltma (U) ifadeleri.....	145
Tablo 5.14 Kutu profil numunelerin net enkesit azaltma (U) ifadeleri.....	145

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Pasif tabaka oluşumu (URL 3).....	5
Şekil 1.2 Paslanmaz çelik ürün çeşitleri (URL 8).....	6
Şekil 1.3 Paslanmaz çelik ağacı (URL 4).....	9
Şekil 1.4 Tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği (URL 5).....	11
Şekil 1.5 Ramberg-Osgood tahminiyle tipik paslanmaz çelik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Rasmussen Kim J.R., 2001).	13
Şekil 1.6 Örnek (UNS30403 paslanmaz çelik kullanılan 9 nolu test) gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Rasmussen Kim J.R., 2001).	15
Şekil 1.7 Örnek (UNS31803 paslanmaz çelik kullanılan 15 nolu test) gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Rasmussen Kim J.R., 2001).	16
Şekil 1.8 Ofis binasının görünüşleri.	18
Şekil 1.9 Otobüs terminali görünüşleri.	19
Şekil 1.10 Kapalı yüzme havuzu ve hareketli döşeme yapısı.	19
Şekil 1.11 Villa Inox paslanmaz çelik kullanımı.....	20
Şekil 1.12 “La Grande Arche” ve paslanmaz çelik asansör yapısı. (URL 9 ve URL 10).....	21
Şekil 1.13 Siena yaya köprüsü.....	22
Şekil 2.1 Tipik plakalı kaynaklı uç birleşim.....	24
Şekil 3.1 Kapalı kesit genel profil tipleri.	33
Şekil 3.2 Tipik birleşimler.....	35
Şekil 3.3 Uygulama örnekleri.....	36
Şekil 3.4 Bağlantı plakalı uç birleşim tipleri a) Plakada açılan yarıkla birleşim b) Boruda açılan yarıkla kaynak dönüşsüz birleşim c) Kaynak dönüşlü birleşim (Willibald S. ve diğ. 2006).	37
Şekil 3.5 Von-Mises gerilme dağılımları.	38
Şekil 3.6 Plakalı uç birleşiminde kayma aksaması (Design Guide 3, 2009).....	39
Şekil 3.7 Plakalı uç birleşiminde kayma aksaması (Martinez-Saucedo, 2006).....	40
Şekil 3.8 Çevresel yırtılma dayanım parametreleri.	41
Şekil 3.9 RW ve NW durumunda yerel gerilme yığılımlarının dağılımı.	42

Şekil 3.10 Boru plakalı uç birleşiminde çevresel şekil değiştirme dağılımı. (S.Willibald ve diğ. 2004).....	43
Şekil 3.11 Tipik göçme modları.....	44
Şekil 3.12 Blok kesme göçmesi.....	46
Şekil 3.13 Blok kesme dayanım parametreleri.....	47
Şekil 3.14 Boru (a) ve kutu (b) profillerin plakalı uç birleşimleri için genel ölçülendirmeler.....	50
Şekil 4.1 Gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları.....	58
Şekil 4.2 Test kuponlarının numune üzerinden çıkarıldığı kısımlar.....	59
Şekil 4.3 Tipik test kuponu ölçüleri.....	59
Şekil 4.4 Profillerden alınan test kuponları.....	60
Şekil 4.5 Çekme testi sonrası kopmuş kupon görünüşleri.....	60
Şekil 4.6 PL Kuponları test grafikleri.....	63
Şekil 4.7 S Kuponları test grafikleri.....	63
Şekil 4.8 C Kuponları test grafikleri.....	63
Şekil 4.9 Kuponların grup test grafikleri.....	64
Şekil 4.10 Boru ve kutu profilli numuneler.....	65
Şekil 4.11 (a) RW ve (b) NW uç kaynak bitişleri.....	65
Şekil 4.12 Profilde yarık ölçüleri.....	66
Şekil 4.13 Numunelerin hazırlanma süreci.....	66
Şekil 4.14 Kullanılan kaynak özellikleri.....	67
Şekil 4.15 (a) kutu ve (b) boru kesitli numuneler için şematik gösterim.....	68
Şekil 4.16 Numune isimlendirmesi.....	68
Şekil 4.17 Kaynak uzunluklarının birleşimdeki yerleri.....	70
Şekil 4.18 a) Yer değiştirme ölçerlerin yerleşimi b) Yük ölçüm düzeneği.....	71
Şekil 4.19 Üniversal hidrolik test makinası ve düzeneğin kurulması.....	72
Şekil 4.20 Test düzeneğinin bileşenleri.....	73
Şekil 4.21 C-L30-NW, deney numunesi.....	74
Şekil 4.22 C-L30-NW numunesi yarık dibi genişlemesi.....	75
Şekil 4.23 C-L30-NW numunesi profil ağzı eğikliği ve kesitte çarpılma.....	75
Şekil 4.24 C-L30-NW deney sonrası üst kısım hasar durumu.....	76
Şekil 4.25 C-L30-NW, deney numunesi ve yük-yer değiştirme grafiği.....	76
Şekil 4.26 C-L30-RW, deney numunesi.....	77
Şekil 4.27 C-L30-RW deney sonrası üst kısım hasar durumu.....	78

Şekil 4.28 C-L30-RW, deney numunesi ve yük-yer değiştirme grafiği.	78
Şekil 4.29 S-L30-NW, deney numunesi.	79
Şekil 4.30 S-L30-NW numunesi yarık dibi genişlemesi.....	80
Şekil 4.31 S-L30-NW numunesi profil ağız eğikliği ve kesitte çarpılma.....	81
Şekil 4.32 S-L30-NW deney sonrası alt kısım hasar durumu.....	82
Şekil 4.33 S-L30-NW, deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği.	82
Şekil 4.34 S-L30-RW, deney numunesi.....	83
Şekil 4.35 S-L30-RW numunesi kesitte çarpılma.	84
Şekil 4.36 S-L30-RW deney sonrası üst kısım hasar durumu.....	84
Şekil 4.37 S-L30-RW, deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği.	85
Şekil 4.38 NW numunelerinde yarık dibi tipik hasar gelişimleri.	87
Şekil 4.39 RW numunelerinde uç dönüş kaynağı tipik hasar gelişimi.	87
Şekil 4.40 Kutu profil numunelerinde tipik ileri hasarlar.	88
Şekil 4.41 Boyuna kaynak dikişi açılması.	88
Şekil 4.42 Boru profil (RW) numuneleri.	96
Şekil 4.43 Boru profil (NW) numuneleri.	96
Şekil 4.44 Kutu profil (RW) numuneleri.	97
Şekil 4.45 Kutu profil (NW) numuneleri.	97
Şekil 4.46 Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzemeler için gerilme / şekil- değiştirme grafikleri.....	100
Şekil 4.47 Parçaların sonlu eleman modelleri.	101
Şekil 4.48 Kullanılan kaynak elektrodu malzeme bilgisi.	102
Şekil 4.49 RW ve NW Numunelerinin temas bölgeleri.....	103
Şekil 4.50 Kutu profil numunenin birleştirilmiş sonlu eleman modeli.	103
Şekil 4.51 Boru profil numunenin birleştirilmiş sonlu eleman modeli.	104
Şekil 4.52 Numunelerin mesnet koşulları.	105
Şekil 4.53 Yük uygulanması.	106
Şekil 4.54 Sonlu eleman çözüm ağı düzenlenmiş modeller.....	107
Şekil 4.55 Boru profillerin (RW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.	108
Şekil 4.56 Boru profillerin (NW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.	109
Şekil 4.57 Kutu profillerin (RW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.	110
Şekil 4.58 Kutu profillerin (NW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.....	110
Şekil 4.59 C-L30-RW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.	112

Şekil 4.60 C-L60-RW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.	112
Şekil 4.61 S-L70-NW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.	114
Şekil 4.62 S-L60-RW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.	114
Şekil 4.63 C-L76 numunelerinin RW ve NW tiplerinin deney ve sonlu eleman analiz sonucu yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.	115
Şekil 4.64 S-L70 numunelerinin RW ve NW tiplerinin deney ve sonlu eleman analiz sonucu yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.	115
Şekil 4.65 Kesitte aşırı çarpılma ve yüksek şekil değiştirme.	117
Şekil 4.66 Yük-yer değiştirme kapasitesinin yaklaşık bilineer modelle gösterilmesi.	117
Şekil 4.67 Boru test numunelerinin birleşim akma yükü ve test yükü grafiği.	121
Şekil 4.68 Boru ve kutu numunelerinin birleşim akma yükü ve test yükü grafiği. ...	122
Şekil 4.69 Kesit çarpılması sınır durumları.	123
Şekil 4.70 Boru numunelerde elde edilen yük seviyeleri.	125
Şekil 4.71 Kutu numunelerde elde edilen yük seviyeleri.	125
Şekil 5.1 Tüm numuneler için Q_y yükleri ve öneri U katsayısı.	138
Şekil 5.2 Boru profil birleşimlerin dayanım ve öneri ifadelerinin karşılaştırılması.	139
Şekil 5.3 Kutu profil birleşimlerin dayanım ve öneri ifadelerinin karşılaştırılması.	139
Şekil 5.4 Boru profilli (RW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması.	141
Şekil 5.5 Boru profilli (NW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması. ...	142
Şekil 5.6 Kutu profilli (RW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması.	143
Şekil 5.7 Kutu profilli (NW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması. ...	144

SİMGE LİSTESİ

A	: Kesit alanı (mm ²)
A_e	: Etkili net kesit alanı (mm ²)
A_g	: Brüt kesit alanı (mm ²)
A_{gv}	: Kayma blok göçmesi için brüt kesit alanı (mm ²)
A_{gt}	: Çekme blok göçmesi için brüt kesit alanı (mm ²)
A_n	: Net kesit alanı (mm ²)
A_{nt}	: Çekme blok göçmesi için net kesit alanı (mm ²)
a	: Köşe kaynak kalınlığı (mm)
B	: Kutu profil yüksekliği (mm)
D	: Boru dış çapı (mm)
E	: Elastisite Modülü (N/mm ²)
F_m	: Maksimum yük (kN)
f_u	: Çekme dayanımı (N/mm ²)
f_y	: Çekme akma dayanımı (N/mm ²)
H	: Kutu profil eni (mm)
L_w	: Kaynak uzunluğu (mm)
N	: Uygulanan yük (kN)
N_{FE}	: Maksimum sayısal analiz yükü (kN)
N_{Test}	: Maksimum test yükü (kN)
P	: Uygulanan yük (kN)
Q_y	: Birleşim akma yükü (kN)
Q_u	: Maksimum birleşim çekme yükü (kN)
R_m	: Çekme dayanımı (N/mm ²)
R_p	: Çekme yükü altında akma dayanımı (N/mm ²)
t	: Profil sac kalınlığı (mm)
t_p	: Guse plakası kalınlığı (mm)
t_{sl}	: Profilde yarık genişliği (mm)
T_r	: Çekme bölgesi dayanımı (kN)
V_r	: Kayma bölgesi dayanımı (kN)
U	: Net kesit azaltma çarpanı
U_{bs}	: Blok kayması için azaltma katsayısı (AISC)
U_{FE}	: Sayısal analiz yükü için net kesit azaltma çarpanı
U_{Test}	: Test yükü için net kesit azaltma çarpanı
u	: Yer değiştirme (mm)
u_y	: Akma yükü yer değiştirmesi (mm)
u_u	: Çekme yükü yer değiştirmesi (mm)
w	: Kaynaklar arası çevresel mesafe (mm) $w = \frac{\pi D - 2 t_p}{2}$
x	: Kesit ağırlık merkezinin plakaya mesafesi (mm)

\bar{x} : Ağırlık merkezi kaçıklığı: Borular için, $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$ Kutular için, $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$

\bar{x}' : Azaltılmış ağırlık merkezi kaçıklığı ($\bar{x}' = \bar{x} - t_p / 2$)

Z : Kesit daralması

γ_{M0} : Azaltma Katsıyısı = 1 (EC3)

γ_{M2} : Azaltma Katsıyısı = 1.25 (EC3)

δ_{Test} : Maksimum test yükü karşılığı yer değıştirmesi (mm)

δ_{FE} : Maksimum sayısal analiz yükü karşılığı yer değıştirmesi (mm)

ϵ : Birim şekil değıştirme

ϵ_u : Maksimum şekil değıştirme

$\epsilon_{0.02}$: Akma gerilmesi karşılığı şekil değıştirme

σ : Gerilme (N/mm²)

σ_y : Akma gerilmesi (N/mm²)

$\sigma_{0.02}$: Kaydırılmış (%0.2) akma gerilmesi (N/mm²)

σ_u : Çekme gerilmesi (N/mm²)

\emptyset : Çap (mm)

ÖZET

Üniversite	:	İstanbul Kültür Üniversitesi
Enstitüsü	:	Fen Bilimleri Enstitüsü
Dalı	:	İnşaat Mühendisliği
Programı	:	Yapı
Tez Danışmanı	:	Doç.Dr. Güven KIYMAZ
Tez Türü ve Tarihi	:	Doktora – Aralık 2012

KAPALI KESİT PASLANMAZ ÇELİK ÇEKME ELEMANLARI KAYNAKLI UÇ BİRLEŞİMLERİNİN DAVRANIŞ VE TASARIMI

Edip SEÇKİN

Kapalı kesit (boru ve kutu) çelik profillerin, yarıklı ve guse plakasına kaynaklı uç bağlantıları eleman uç birleşimleri arasında en sık tercih edilen alternatiflerden birisidir. Bu tür uç birleşimi, esasen profilde uzunlamasına açılmış iki adet yarığın içine yerleştirilen guse plakasının boyuna köşe kaynakla birleştirilmesiyle yapılan bir uç bağlantı şeklidir. Bu tez çalışmasında, paslanmaz çelik boru ve kutu profillerin kaynaklı uç birleşimlerinin statik çekme yükü altındaki davranışları üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sunulmuştur.

Paslanmaz çelik başlangıç maliyetinin, karbon çeliğe göre nispeten yüksek olmasından dolayı yapısal olarak kullanımda bir yük getirmektedir. Güvenli ve ekonomik bir tasarım için yapısal eleman ve birleşim davranışlarının araştırılması gerekmektedir. Böylece verimli bir tasarımın yolu açılmış olur. Bu nedenle, seçilen birleşim tipi için tez çalışmasının sonuçları gözönüne alınmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel programda, 24 adet paslanmaz çelik boru ve kutu kesitli profil birleşimleri çeşitli kaynak uzunlukları ile tasarlanıp statik eksenel çekme kuvveti uygulanarak test edilmiştir. Eksenel çekme yükü altında kaynak uzunluğuna ve uç dönüş kaynağına bağlı dayanımlar ile genel şekil değiştirme davranışları incelenerek yük-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiş, dayanım ve süneklik karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmanın ardından sonlu elemanlar programı ABAQUS® kullanılarak bir sayısal model oluşturulmuştur. Programın doğrusal olmayan modelleme özellikleri kullanılarak test davranışı benzetilmiştir. Çalışma kapsamındaki numunelerin temsil ettiği geometrik aralık için elde edilen dayanım sonuçları incelenerek profillerin yarıklı, guse plakasına kaynaklı uç birleşimleri için mevcut tasarım kılavuzları ile karşılaştırılmıştır. Bu tip yapısal paslanmaz çelik birleşimlerin tasarımları için uluslararası hiç bir standart mevcut değildir. Bu nedenle bu çalışmanın sonuçları karbon çelik eleman ve birleşimleri için var olan mevcut

tasarım kuralları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım amaçlarında, en yüksek test dayanım değerinden daha düşük olan, aşırı kesit bozulmaları ile ilgili kullanılabilirlik limitlerinin de dikkate alındığı dayanım değerinin kullanılması önerilmiştir. Bu amaçla, birleşimin tasarım dayanım seviyesinin hesaplanması için ilk akma yükü yaklaşımı benimsenmiştir. Tüm test numuneleri için yük- yer değiştirme grafikleri üzerinden akma yükü kapasite noktası (YCP) belirlenmiştir. YCP değerleri özellikle, kayma aksaması azaltma faktörünün hesaplanması için tasarım denkleminin önerilmesi için kullanılmıştır. Bu katsayı aksel çekme yükü altında birleşimdeki kayma aksaması nedeniyle oluşan verim kaybını dikkate almaktadır.

Test programında incelenen geometrik aralık için önerilen denklem, paslanmaz çelik (304 kalite) kapalı kesit profillerin yarıklı, kaynaklı uç birleşimlerinin tasarımı için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz çelik, boru profil, kutu profil, kaynaklı birleşim, kutu ve boru profil birleşimleri, kayma aksaması.

ABSTRACT

University : İstanbul Kültür University
Institute : Institute of Science
Department : Civil Engineering
Literature Programme : Structure
Supervisor : Assoc.Prof.Dr. Güven KIYMAZ
Degree Awarded and Date : Ph.D – December 2012

BEHAVIOUR AND DESIGN OF GUSSET PLATE WELDED SLOTTED STAINLESS STEEL TUBULAR MEMBERS UNDER AXIAL TENSION

Edip SEÇKİN

Among the various alternatives to make a steel tubular member connection, making a slotted and gusset plate welded connection is one of the most frequently preferred alternatives. This type of connection is essentially an end connection that is made by slotting the tube longitudinally, inserting the gusset plate and then placing longitudinal fillet welds at the tube-to-plate interface. In this thesis an experimental and numerical study on the behaviour of such connections in stainless steel is presented.

Relatively high initial cost of stainless steel is one burden for its structural use. To achieve a safe and economic design; it is necessary to investigate the mechanical response of structural components, connections and the overall system, thus leading to efficient design. Therefore, the results of this thesis study are considered to serve this purpose for the chosen connection type.

24 specimens have been tested under concentrically applied axial static tensile forces for varying tube-to-gusset plate weld lengths. Both circular and box section members were considered in the test program. Load-deformation curves were obtained and comparisons were made in terms of strength and ductility. General deformation behavior under axial tensile loading and variation of strength with weld length were also examined. Following the experimental study, a numerical model was developed that could simulate the test behavior by using the ABAQUS[®] finite element software. Nonlinear modeling features of the software were used to simulate as closely as possible the full nonlinear behavior of the connections.

Experimental as well as the numerical ultimate strength values achieved for the range of geometries considered in the test program were then critically examined and

compared with currently available design guidance for slotted gusset plate welded tubular end connections. It was noted that no specific rules exist in international specifications on structural stainless steel which cover the design of such connections. Therefore, the results of this study were compared with the existing design rules for carbon steel. For design purposes which would take into account of serviceability limitations regarding the excessive distortions of the connections a lower test strength value than the peak test strength value was suggested to be applied. For this purpose a first yield approach is adopted to calculate the design strength levels. For all the specimen tests, a yield capacity point (YCP) was identified on the test load-displacement plots. In particular, the YCP values were used to propose a design equation for the calculation of the shear-lag reduction factor. This factor takes into account the loss of efficiency of the connection due to shear lag under axial tensile loading. For the dimensional range studied in the test program, the proposed equation can be used for the design of slotted and gusset plate welded connections in stainless steel in Grade 304.

The conclusions and original contributions are summarized and recommendations for design are also provided.

Keywords: Stainless steel tubular members, tubes connections, slotted and gusset welded connections, shear lag.

1 GİRİŞ

Doğal kaynakların hızlı bir biçimde tükenmeye başladığı ve çevre kirliliğinin dünya genelinde toplum sağlığını tehdit ettiği günümüzde sürdürülebilirlik kavramı daha da önem kazanmıştır. Bilindiği gibi, inşaat sektörü gerçekleştirdiği üretim ile kaynakların tüketilmesi ve çevre kirliliği konularında tek başına en büyük katkıyı yapan sektörlerden birisidir. Bu kapsamda, inşaat sektöründe sürdürülebilirlik adına yapılacak küçük katkılar bile sektörün büyüklüğü düşünüldüğünde çok önem arz etmektedir. Örneğin, yapı taşıyıcı sistemlerinde malzeme olarak çelik seçilmesi en sürdürülebilir seçeneklerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yapısal uygulamalarda; çeliğin, yapım hızı, yüksek dayanımı, güvenilirliği, bakım-onarım maliyetlerinin düşük oluşu, geri dönüşüm özelliği ve iş sonunda en az malzeme atığı üretilmesi gibi üstün özellikleri vardır. Dünyada ekonomik olarak geri kazanımı en yüksek malzeme, %99 oranla çeliktir. Toplumsal sürdürülebilirlik açısından çelik; daha az atık, daha az gürültü, yüksek güvenlik ve üstün konfor özellikleriyle öne çıkmaktadır.

Çelik malzeme tipleri arasında paslanmaz çelik ise yukarıda sayılan tüm özelliklere ilave olarak yüksek korozyon ve yangın dayanımı ile ömür boyu düşük bakım maliyeti açısından en sürdürülebilir malzeme tipi olarak öne çıkmaktadır. Servis ömrü boyunca performans ve bakım maliyeti arasındaki faydalı denge, inşaat mühendisliğinin yapısal uygulamalarında da kullanım olanağı sağlamaktadır. Paslanmaz çelik, günümüz sürdürülebilir yapı sistemlerinin kullanılmasına ve gelişimine yönelik yeni fırsatlar yaratan bir malzeme olmuştur. Bir çok endüstride oldukça yaygın kullanım alanı olan paslanmaz çelik, inşaat sektöründe de farklı uygulama alanlarında kendine özgü özellikleri ve avantajlarıyla son 60 yılın vazgeçilmez malzemeleri arasına girmiştir (B.A. Burgan ve diğ. 2000).

Paslanmaz çelik, inşaat sektöründe daha çok bağlantı elemanları, kaplama malzemesi ve estetiğin arandığı uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak bu uygulama alanlarının ötesinde paslanmaz çeliğin, yapıların ana taşıyıcı elemanlarında da kullanılır hale gelmesi yukarıda bahsedilen üstünlükler gözönüne alındığında inşaat sektörünün sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlayabilecektir.

Aslında, yapısal uygulamalardaki malzeme seçiminde, üstün özellikleriyle paslanmaz çelik tercih edilir hale gelmektedir. Avrupa ve Amerika’da, yapısal paslanmaz çeliğin kullanıldığı örnek yapılar görmek mümkündür. Ancak bilindiği gibi paslanmaz çeliğin yüksek ilk maliyeti yapısal olarak kullanımda önemli bir çekince oluşturmaktadır. Bu nedenle paslanmaz çeliğin yapısal kullanıma yönelik daha hassas, karbon çeliğinden farklı malzeme özelliklerinin göze alındığı, daha ekonomik tasarım kurallarının geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Di Sarno ve diğ. 2003). Literatürde de yapısal paslanmaz çelik ile ilgili araştırmalar (Aoki H., 2000, Burgan ve diğ., 2000, Johansson ve diğ., 2000, Khoki ve diğ., 2000) sözkonusu ihtiyacın karşılanmasına katkıda bulunan çalışmalardır. Mevcut tez çalışmasının da motivasyonu budur.

Tez konusu olarak, paslanmaz çelikten imal edilmiş kapalı kesitli elemanların kaynaklı birleşimlerinin davranış ve tasarımı seçilmiştir. Sözkonusu birleşimler ile ilgili mevcut uluslararası “Yapısal Paslanmaz Çelik” standartlarında herhangi bir tasarım kuralına rastlanmamıştır. Çalışmanın bir önemli hedefi de bu kapsamda ilgili birleşimler için tasarım önerilerinde bulunmaktır.

1.1 Çalışmanın Konusu, Amacı ve Kapsamı

Bu tez kapsamında, kapalı kesitli paslanmaz çelik (boru ve kutu) profillerin plakalı kaynaklı uç birleşimlerinin davranış ve tasarımı çalışılmıştır. Mevcut uluslararası standartlarda (AISC 360(2005), CAN/CSA-S16 (2001), EN1993-1-8 (2005)) bu tip birleşimler için sadece karbon çeliğine uygun tasarım kriterleri bulunmakta, paslanmaz çelikten imal edilmiş birleşimler için herhangi bir kural ve düzenleme yer almamaktadır.

Çalışmanın üç ana amacı aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Kapalı kesit paslanmaz çelik çekme elemanların kaynaklı uç birleşimlerinin deneysel olarak incelenmesi ve irdelenmesi.
2. Deneysel, analitik ve sayısal çalışmalarla birleşimin statik çekme yükü altındaki davranışının araştırılması.
3. Kapalı kesit paslanmaz çelik çekme elemanların kaynaklı uç birleşimlerinin tasarımı için önerilerde bulunulması.

Çalışma; analitik, deneysel ve sayısal olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın analitik bölümünde, karbon çeliğinden yapılmış çekme elemanları birleşimleri için varolan standartların kurallarına göre dayanımlar hesaplanarak ilgili yönetmelikler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, karbon çeliği için hesaplanan dayanımlar paslanmaz çelik için yapılan deneysel ve sayısal analiz dayanım sonuçları ile karşılaştırılarak mevcut hesap ifadeleri malzemenin paslanmaz çelik olması durumu için değerlendirilmiştir.

Çalışmanın deneysel kısmında, analitik çalışmayla dayanım hesaplamaları yapılmış olan paslanmaz çelik numuneler, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Malzeme Laboratuvarında test edilmiştir. Test numunelerinden alınan kuponlar üzerinde, kupon çekme testleri yapılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında; 24 adet boru ve kutu kesitli paslanmaz çelik profil, uç birleşimlerinin aksenal statik çekme yükü altında testleri yapılmıştır. Test programında ele alınan geometrik büyüklükler (kesit ve kaynak uzunluğu) pratikte kullanılan büyüklüklere karşılık gelmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda test edilen numunelerin çekme kuvvetleri etkisindeki yük-yer değiştirme ilişkileri, elemanda ve kaynaklı uç birleşiminde davranış ve hasar oluşumları incelenmiştir.

Sayısal analiz çalışmasında; sonlu elemanlar yöntemi tabanlı ABAQUS® programı kullanılarak test numuneleri modellenmiş, deneysel davranış ve sonuçlar doğrulanmıştır.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde; çalışma konusu, amacı ve kapsamı hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, paslanmaz çelik malzemesi ve yapısal olarak uygulama alanları hakkında da genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde; çalışma konusuyla ilgili literatür araştırmasına yer verilmiş, kapalı kesit çelik elemanların kaynaklı uç birleşimleriyle ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan konuya uygun olanları seçilmiş ve özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde; kapalı kesit çelik çekme eleman birleşimlerinin davranış ve tasarımı konusu üzerine durulmuş ve birleşim tiplerine özel, kayma aksaması ve blok kesme göçmesi gibi davranışlar ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Ayrıca çalışma konusu uç birleşimlerinin tasarımıyla ilgili standart ve yönetmeliklerde yer alan tasarım kuralları bu bölümde incelenmiştir.

Dördüncü bölümde; İTÜ Malzeme Laboratuvarında, araştırmacı tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile ilgili düzenek ve yöntem, numune testleri ve malzeme deneyleri tarif edilmiş ve deney sonuçları verilmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca ABAQUS®, programı kullanılarak sonlu eleman yöntemi tabanlı çalışmalarla numune modelleri oluşturulmuş ve deney sonuçları için doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları üzerinden birleşimlere ait yaklaşık kapasite eğrileri ile birleşim akma yükleri belirlenmiş ve literatürde yer alan kesit çarpılmaları limitlerine de bağlı olarak çekme dayanımları araştırılmıştır.

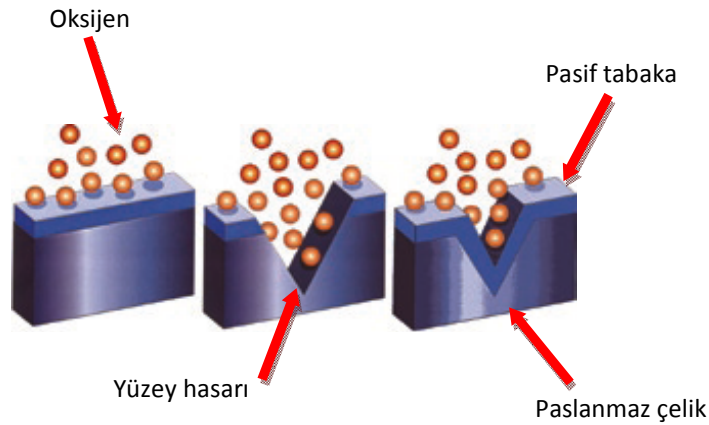
Beşinci bölümde; deneysel, sayısal ve analitik çalışmaların sonuçları grafik ve tablo yöntemleri ile karşılaştırılarak tartışılmış ve tasarıma yönelik öneri ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Son olarak altıncı bölümde; yapılan tüm çalışmalar özetlenerek, elde edilen sonuçlar tartışılmış, tasarım önerilerinde bulunulmuş ve çalışma konusu ile ilgili gelecekte yapılması önerilen çalışma başlıkları verilmiştir.

1.2 Paslanmaz Çelik Hakkında Genel Bilgi

Teze konu olan profil eleman ve kaynaklı uç birleşimi, paslanmaz çelik malzemeden imal edildiği için, aşağıda bu çelik sınıfının üretimi, özellikleri ve uygulama alanları ile ilgili kısa bilgiler verilmiştir.

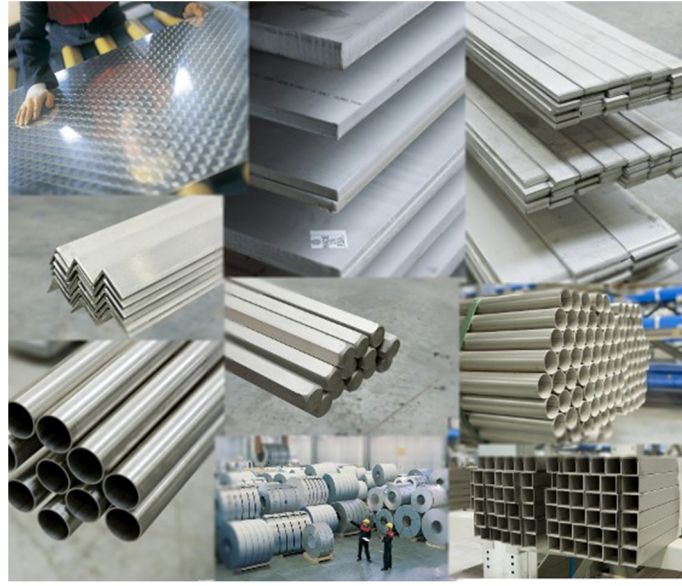
Paslanmaz çelik, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi herhangi bir hasar (çizik, çarpma, delme, kesme vs) durumunda yüzeyinde kendiliğinden yapılan ve korozyon direnci sağlayan bir yüzey tabakası (pasif tabaka-passive layer) oluşumunu temin etmek üzere gereken miktarda krom ($\geq\%10.5$) ve karbon ($\leq\%1.2$) içeren demir alaşımıdır (URL 2).



Şekil 1.1 Pasif tabaka oluşumu (URL 3).

Paslanmaz çelik, 20. yüzyıl başlarında, kimya endüstrisindeki uygulamalarda ihtiyaç duyulan yüksek korozyon direnci gereği üzerine geliştirilmiş bir çelik türüdür. Paslanmaz çelik kullanımından önce, çelikteki paslanmayı geciktirmek ve önlemek için malzeme boyanıyor veya galvanizle kaplanarak kullanılıyordu. Bu tip çözümler özellikle sağlık ve gıda sektöründe daha başka sorunlar yaratıyordu. İlk paslanmaz çelik 1912 yılında, Harry Brearley tarafından tesadüfen keşfedilmiştir. Tüfek namluları için çeşitli metalleri birleştirerek yapılan deneyler sonucunda bazılarının paslanmaya karşı dirençli oldukları görülmüş ve çalışmalar bu yönde ilerlemiştir. Her büyük buluşta olduğu gibi, bu buluşun sanayicilere kabul ettirilmesi için uzun uğraşlar verildi.

Günümüzde ise, çok değişik kullanım alanlarında ve farklı şartlara cevap verebilen paslanmaz çelik için gittikçe daha fazla çeşidin elde edilebilmesi söz konusudur. Artık paslanmaz çelik, gıda endüstrisinde olduğu kadar, tıbbi uygulamalar, inşaat ürünleri ve otomotiv parçaları için de standart bir tercih olmaya başlamıştır (Şekil 1.2). Bugün önemli bir yaşam kültürü durumuna gelen paslanmaz çeliğin gittikçe artan kullanımı, kalite ve ekonomik değerlerin göstergesi olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 1.2 Paslanmaz çelik ürün çeşitleri (URL 8).

Paslanmaz çelik ile demir arasında çok az bir fark vardır. Saf demir bir bakır kadar yumuşaktır ancak içine % 2'ye kadar karbon katılması ile mukavemeti, sertliği ve diğer önemli mekanik özellikleri iyileşir ve adı çelik olur. Demirin dünya üzerinde fazlaca bulunması, kolay ve ucuz elde edilmesi sebebiyle, elde edilen çeliğin de kullanımı oldukça yaygındır. Ancak demirde olan zayıf nokta “paslanma” ya da “oksidasyon” çelikte de bulunmaktadır.

Günlük hayatımızda kullanılan her türlü demir içerikli eşyanın ve konumuzla ilgili olan yapı sistemlerinin paslanması sonucu her yıl dünyada milyonlarca lira boşa gitmektedir. Paslanma, kısaca demir atomlarının havadaki oksijen ile birleşmesi olarak tanımlanan elektro-kimyasal bir reaksiyondur. Paslanma sadece demir ve çelikte değil alüminyum, pirinç, bronz gibi diğer metallerde de görülmektedir. Ancak

bu metallerde malzemeyle oksijenin birleşmesinden meydana gelen çok ince bir tabaka, daha oluşur oluşmaz metalin hava ile temasını keserek koruyucu bir rol oynar ve paslanmanın gelişimini önler. Tabaka çok ince olduğundan, malzemenin rengi pek değişmez. Demirdeki paslanmanın özelliği ise demir ve oksijen atomlarının boyutlarındaki büyük farktan dolayı yüzeyde sağlam bir birleşme olamamasıdır. Paslanmanın malzemenin içine işlenmesiyle hem görüntü hemde mukavemeti değişmektedir. Paslanmanın oluşumu, ilerlemesi ve renginde, havadaki nemin, su miktarının ve tuzun büyük etkileri bulunmakta ve bu elektro-kimyasal reaksiyonun hızını arttırmaktadırlar. Krom'un atom boyutlarının oksijen atomlarıyla yakın büyüklüklerde olmasından dolayı oksijenle çok kolay ve süratli birleşirler. Kalınlığı birkaç atom olacak şekilde ince ama sağlam bir tabaka oluştururlar. Bu tabaka zarar görse de tekrar meydana gelir. Krom belli bir nispette çeliğe katılırsa, benzer oluşumlar yeni metalde de meydana gelir ve çelik artık paslanmaz olur. Paslanmaz çelikte %10-30 civarında krom vardır. Krom ve yeni eklenecek diğer katkılara (ör; titanyum, nikel, alüminyum, sülfür, fosfor, bakır vs.) bağlı olarak kullanım yeri değişir (URL 2). 1912 yılında V2A (bugünkü Cr18Ni8) ve V4A (bugünkü Cr20Ni10Mo2) olarak iki kalite şeklinde patent altına alınması ile başlayan serüven, bugün 120'den fazla kalite çeşidi ile çok geniş bir kullanım alanına erişmiştir. Başlıca genel özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Korozyon direnci,
- Estetik,
- Isıl direnç,
- Düşük toplam ömür maliyeti (Life Cycle Cost / LCC),
- Tamamen geri dönüşümlü,
- Biyolojik olarak nötr,
- Ağırlık / dayanıklılık oranı

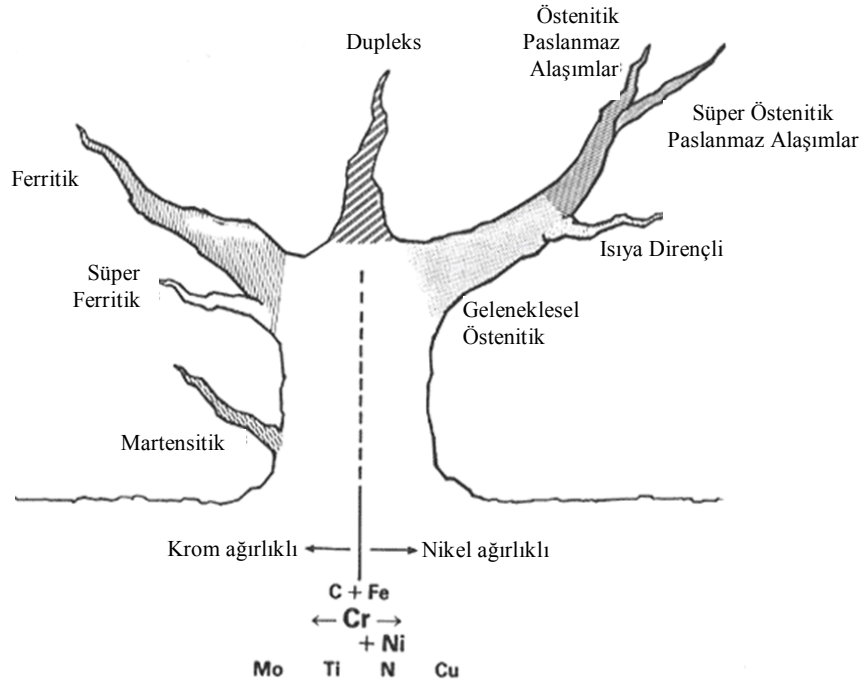
Paslanmaz çelik genel olarak ferritik, östenitik, martensitik ve dupleks olarak gruplandırılmaktadır. Her gruptaki çelik malzemelerinin kaliteleri ve iç yapı özellikleri farklı olup, dayanıklılık özelliklerine göre ayrı kullanım alanları bulunmaktadır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1 Paslanmaz çelik kullanım alanları (URL 2).

ASTM KOD	ÖZELLİKLER	KULLANIM ALANI
304	Paslanmaz çeliğin temel çeşididir. 400 °C' ye kadar yüksek oksidasyon sağlar. Mekanik direnç ve sürtünme mukavemeti çok iyidir.	Mutfak eşyaları, evyeler, endüstriyel mutfaklar, kimya ve petro kimya sektörü, gıda sektörü, yapısal uygulamalar, otomotiv sanayi, eşanjör ve boyler üretimi.
304 L	304 Kalite paslanmaz çeliğin düşük karbonlu versiyonudur.	Kağıt sanayi, süthane ekipmanları, sabun sanayi, deri sanayi, kimya endüstrisi, petrol endüstrisi, kazan yapımı ısı değiştiriciler.
321	Bünyesindeki Titan ilavesi ile korozyona karşı mukavemeti arttırılmıştır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır.	Rezistanslar, egzost boruları, havacılık endüstrisi, bira fabrikaları, kimya endüstrisi.
316	600 °C' ye kadar sıcaklıklara dayanıklıdır. Mekaniksel kopma ve büzülme mukavemeti oldukça iyidir. Bünyesindeki molibdenden dolayı oksidasyon ve asitlere dayanıklıdır.	Kimya, petro kimya endüstrisi, buhar kazanları, ısıya dayanıklı eşanjörler, çeşitli kazan uygulamaları, yapısal uygulamalar.
316 L	316 Kalite paslanmaz çeliğin düşük karbonlu versiyonudur. 400 °C' ye kadar sıcaklıklara dayanıklıdır.	Kimya, petro kimya endüstrisi, kağıt endüstrisi, nükleer mühendislik, süthane ekipmanları.
316 Ti	316 Kalite paslanmaz çeliğin Titanyumlu versiyonudur. Yüksek sıcaklık ve oksidasyon mukavemetine sahiptir.	Kimya, petro kimya endüstrisi, pompa ve kompresör parçaları, kazanlar ve ısı değiştiriciler.
309 S	1050 °C' ye kadar sıcaklıklarda oksidasyon mukavemeti yüksektir.	Yüksek sıcaklığa dayanıklı ekipmanların ve parçaların üretiminde.
310	1100 °C' ye kadar sıcaklıklarda oksidasyon mukavemeti yüksektir.	Fırın parçaları ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ekipmanlar, kimya, petro kimya endüstrisi.
310 S	1100 °C' ye kadar sıcaklıklarda oksidasyon mukavemeti yüksektir.	Fırın parçaları ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ekipmanlar, kimya, petro kimya endüstrisi.
430	İyi yüzey görünümü sağlar. Nikel içermediğinden manyetiktir.	Dekoratif amaçlı kullanımlar, parlak yüzey uygulamaları.

Başlıca paslanmaz çelik grupları (Şekil 1.3);

- **Östenitik** : Demir-krom-nikel, karbon $< \%0.1$ (çoğunlukla krom/nikel oranı 18/8; 18/10 olarak anılan 1.4301/304 kalite) manyetik olmayan ve dünya paslanmaz çelik kullanımındaki payı $> \%65$ 'tir.
- **Ferritik**: Düşük krom alaşımlar, ciddi olmayan ortamlar ve görünümün öncelik taşımadığı yerler için seçilebilir. En popüler kalite EN 1.4016 (AISI430) dır. Krom ve molibden korozyon direncini artırır. Titanyum ve niyobyum kaynaklanabilirliği geliştirir. Karbon oranı düşük $< \%0.1$, ve manyetiktir.
- **Martensitik**: Demir-krom karışımıyla, karbon $> \%0.1$, manyetik ve sertleştirilebilir özelliği vardır.
- **Dupleks**: Dupleks paslanmaz çelikler tipik olarak, en yaygın ferritik ve östenitik kalitelere kıyasla daha yüksek mekanik özellikler ve korozyon direnci gösterirler. Manyetiktir.



Şekil 1.3 Paslanmaz çelik ağacı (URL 4).

1.2.1 Mekanik Özellikler

Paslanmaz çelik malzemesinin karakteristik gerilme-şekil değiştirme davranışının nonlineer olmasının yanında malzeme çekme ve basınç etkilerinde de simetrik olmayan davranış göstermektedir (Design Manual for Structural Stainless Steel, 2006 SCI). Özellikle çekme testlerindeki davranışın basınç testlerindeki davranıştan daha nonlineer olduğu bilinmektedir. Bir çok paslanmaz çelik tipi olmasına rağmen yapısal olarak kullanılacak ve kaynaklanabilecek çelikler az sayıdadır. Östenitik ve dupleks paslanmaz çelikler yapısal uygulamalar için önerilmekte ve tercih edilmektedir. Östenitik paslanmaz çelik korozyon direnci ve form verilebilme özelliklerine sahip bir çelik tipidir. Standartlarda tanımlanmış minimum akma dayanımları $210-240 \text{ N/mm}^2$ olsa da, genel yapısal karbon çeliklerin akma değerinin altında kalmasına rağmen süneklikleri iki kat fazladır (Gardner L. ve diğ 2006). Dupleks paslanmaz çelik ise yüksek dayanım ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Ancak sünekliği östenitik paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Ayrıca genel olarak paslanmaz çelikler, iyi bir düşük sıcaklık tokluğuna sahip bir malzemedir.

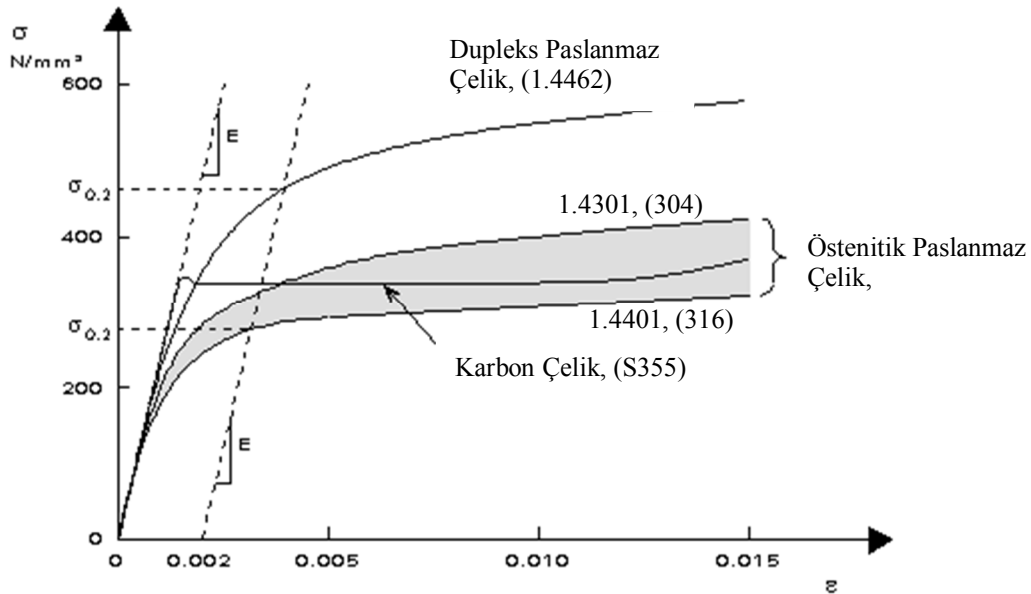
Tablo 1.2 Paslanmaz çelik ve karbon çeliğin tipik mekanik özellikleri.

Çelik Kalitesi		Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Elastisite Modülü
EN	AISI /ASTM	F_y MPa	F_u MPa	%	E MPa
1.4301 Östenitik Pas.Ç	304	210*	540 - 750	45	200000
1.4401 Östenitik Pas.Ç	316	220*	530 - 680	40	200000
1.4435 Östenitik Pas.Ç	316 L	220*	550 - 680	40	200000
1.4462 Dupleks Pas.Ç	S32205	460*	700 - 950	25	200000
1.4362 Dupleks Pas.Ç	S32304	400*	650 - 850	20	200000
S235 Karbon Çelik	A283	235	360	22	210000
S275 Karbon Çelik	A570	275	430	22	210000
S355 Karbon Çelik	A572	355	490	22	210000

* Min. %0,2 Akma Dayanımı

Tipik östenitik ve dupleks paslanmaz çelik mekanik özellikleri Tablo 1.2’de verilmiştir. Paslanmaz çelik için östenitik çelik kaliteleri dupleks kalitelerinden daha az dayanıma sahiptirler. Bu değerler paslanmaz çelik tavllanmış profiller için EN10088 Bölüm 2 ve 3’den, yapısal karbon çelikleri için EN 10027-1’den alınmıştır. Çelik kaliteleri arasında genel bir bilgi vermesi açısından yapısal karbon çelik değerleri de tabloya eklenmiştir.

İki çelik kalitesinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarına bakıldığında (Şekil 1.4) paslanmaz çeliğin, karbon çeliğinde gözlendiği gibi belirgin bir akma gerilmesi noktasına sahip olmadığı görülmektedir. Bu sebeple paslanmaz çelik akma gerilmesinin belirlenmesi için %0.2 paralel kaydırılmış gerilme değeri kullanılmaktadır.



Şekil 1.4 Tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği (URL 5).

Aşağıda sayılan bir kaç faktör, paslanmaz çelik kalitesinin gerilme-şekil değiştirme davranışını değiştirebilmektedir. Bunlar;

- Soğukta şekil verme,
- Kaynaklama,
- Tavlama,

Tasarım aşamasında kullanılacak mekanik özellikler için yukarıda sayılan etkilerin varlığı araştırılmalıdır. Dolayısıyla genel gerilme-şekil değiştirme davranış formu üzerinden tasarım yapılmamalıdır (Euroinox, 2006).

1.2.2 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi İçin Analitik İfadeler

1941 yılında Ramberg ve Osgood'un ilk kez alüminyum alaşımı için gerilme ve şekil değiştirme davranışını tanımladıkları çalışmaları daha sonrasında paslanmaz çelik için devam etmiştir. Soğukta şekil verilmiş paslanmaz çelikler için nonlineer gerilme ve şekil-değiştirme davranışı Ramberg-Osgood ifadeleriyle Amerikan (ASCE,1991), Avustralya (AS/NZS 4673, 2001) ve Güney Afrika (SABS,1997) standartlarında yer almıştır.

Paslanmaz çelik, düşük orantılılık sınırlarına ve uzun pekleşme kapasitesine sahiptir. Karbon çeliği için akma gerilmesi kolay tespit edilebilirken, paslanmaz çelik için yapısal tasarımda kullanılacak akma gerilmesi ($\sigma_{0.02}$), elastisite modülü eğimine paralel kaydırılmış çizgi üzerindeki değer olarak alınmaktadır. Paslanmaz çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Ramberg-Osgood ifadeleri ile aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1.1)$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0.2} / \sigma_{0.01})} \quad (1.2)$$

Bu ifadelerde;

σ : Gerilme değeri

ε : Şekil değiştirme

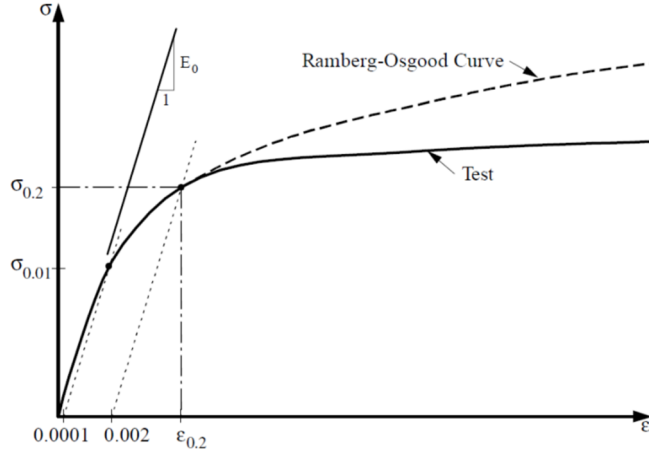
E_0 : Başlangıç elastisite modülü

$\sigma_{0.01}$: %0.01 kaydırılmış deneme gerilme değeri

$\sigma_{0.2}$: %0.2 kaydırılmış deneme gerilme değeri

n : Eğri büküm keskinliği

Ancak Ramberg-Osgood (1.1 ve 1.2) ifadeleri ile tanımlanan paslanmaz çelik gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, şekil değiştirme değerleri %0.02'yi geçmeye başladığında gerçekçi olmayan yüksek gerilme değerleri elde edilmektedir (Rasmussen Kim J.R., 2001) (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Ramberg-Osgood tahminiyle tipik paslanmaz çelik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Rasmussen Kim J.R., 2001).

Ramberg-Osgood'un çalışmaları temel teşkil etmek üzere, Hancock (1993), Rasmussen ve Rondal (1997), Rodes ve diğerleri (2000) ve MacDonald ve diğerleri (2000) tarafından kullanılarak paslanmaz çeliğin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini temsil eden yeni ifadeler geliştirmişlerdir.

Rasmussen, paslanmaz çeliklerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için eğrinin ilk kısmının ($\sigma \leq \sigma_{0.2}$) Ramberg-Osgood yaklaşımıyla, ikinci kısmının ($\sigma > \sigma_{0.2}$) ise aşağıda verilen ifadelerle temsil edilebileceğini önermiştir.

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & \sigma \leq \sigma_{0.2} \text{ için} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} & \sigma > \sigma_{0.2} \text{ için} \end{cases} \quad (1.3)$$

Östenitik ve dupleks alaşımlar için,

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = 0.2 + 185e \quad (1.4)$$

$$e = \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} \quad (1.5)$$

$$m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad (1.6)$$

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n/e} \quad (1.7)$$

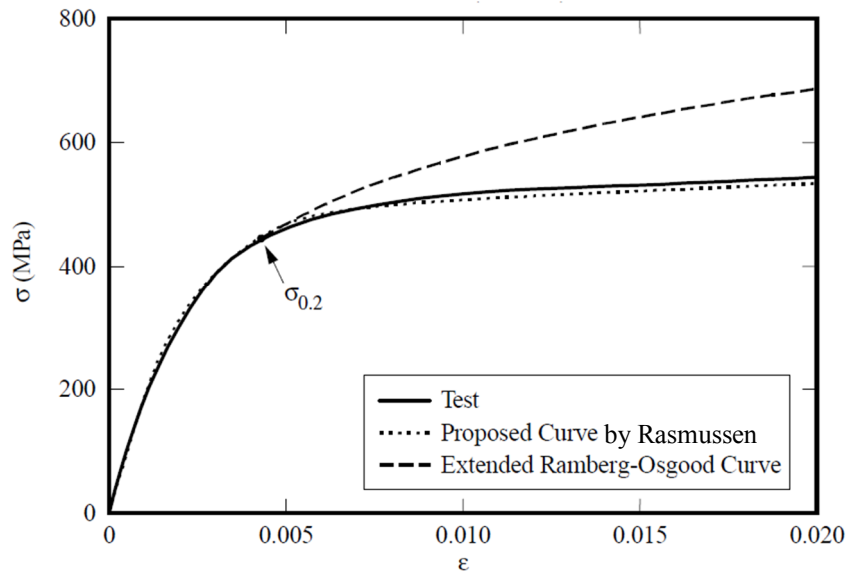
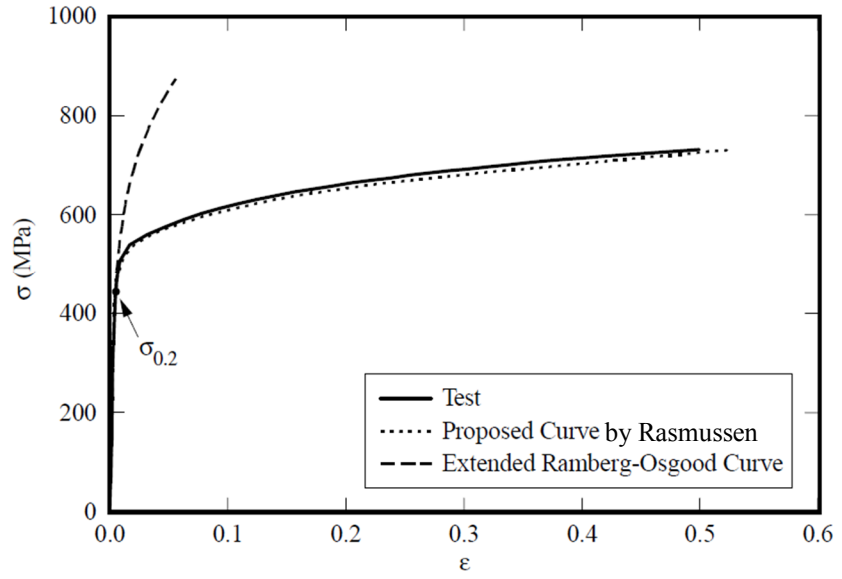
$$\varepsilon_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} + 0.002 \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad (1.9)$$

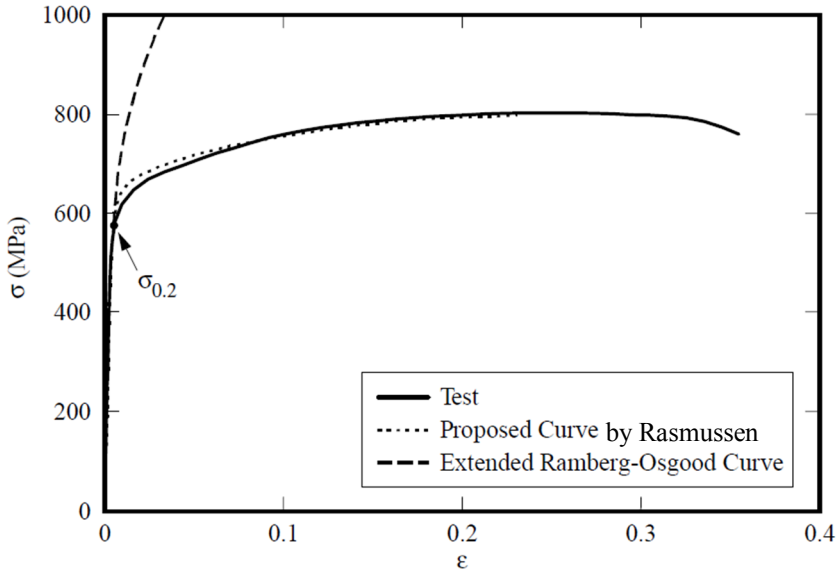
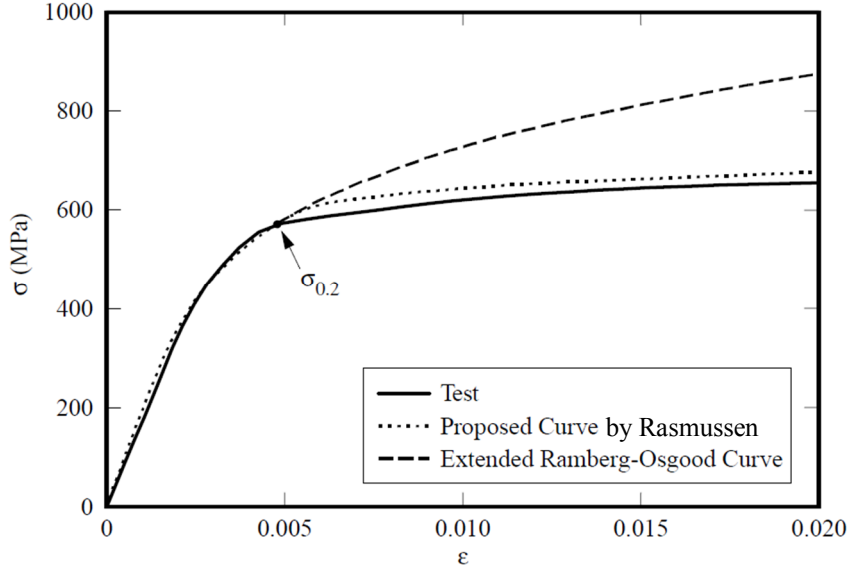
şeklinde verilmektedir.

Ramberg-Osgood ifadelerinin ve önerilen diğer denklemlerin kullanımıyla gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin tüm eğrisi, Amerikan, Avustralya ve Güney Afrika paslanmaz çelik standartlarında da yer alan şekliyle paslanmaz çelik elemanların, tasarım ve sayısal modellemeleri için güvenilir ve kullanışlı sonuçlar vermektedir. Örnek malzeme grafikleri ve Rasmussen'in önerdiği eğri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 1.6, 1.7).

Görüldüğü gibi farklı paslanmaz çelik kaliteleri için test ile elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, Rasmussen tarafından önerilen denklemler (Denklem 1.3) ile çok başarılı bir biçimde temsil edilebilmektedir. Ramberg-Osgood ifadeleri ise daha önce de bahsedildiği gibi ($\sigma \leq \sigma_{0.2}$) koşulunu sağlayan gerilmeler için test sonuçları ile uyum göstermektedir.



Şekil 1.6 Örnek (UNS30403 paslanmaz çelik kullanılan 9 nolu test) gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Rasmussen Kim J.R., 2001).



Şekil 1.7 Örnek (UNS31803 paslanmaz çelik kullanılan 15 nolu test) gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Rasmussen Kim J.R., 2001).

1.2.3 Paslanmaz Çeliğin Yapısal Uygulama Alanları

Paslanmaz çelik, geleneksel yapı uygulamalarında 1920’li yıllardan beri daha çok cephe, çatı ve iç dekorasyon sistemlerinde kullanılmaktaydı. Yapısal olarak erken kullanım örnekleri olsa da; örneğin, 1925 yılında, Londra’daki St.Paul Katedrali’nin kubbesinde kullanılan ankrajlı zincirler gibi, yaygın yapısal kullanımları olamamıştır (Baddoo, 2008). Ancak 2000 yılından bu yana yapısal ve mimari alanlardaki

kullanımları dikkat çekmektedir. Estetik, korozyon direnci, uzun ömürlü dayanımı ya da bu faktörlerin bir kombinasyonu olan gerekçelerle yapılarda kullanılırlar. Yapılardaki kullanımında aşağıdaki gibi sıralanabilecek çeşitli ürün tipleri bulunmaktadır:

- Kalınlığı 8-80 mm arasında değişen sıcak haddeli plakalar,
- Geniş çaplı düz veya şekillendirilmiş tüpler,
- Çapı ya da genişliği 75 mm den büyük dairesel, kare veya dikdörtgen kesitli kapalı profiller.
- Plakadan imal edilmiş düz ya da değişken kutu kesitli elemanlardır.

Yapısal uygulamaların tasarımında ve şantiyedeki kullanımında esas önemli olan şey, paslanmaz çeliğin farklı kesit ve şekillerinin bulunabilirliğinden çok elemanların nasıl ve hangi yöntem ve teknolojilerle birleştirileceği önemlidir. Paslanmaz çelik elemanların, benzer kesit ve özelliklere sahip karbon çelik elemanlarla bağlanmalarında daha çok bulonlu birleşimler kullanılmaktadır. Ancak paslanmaz çelik bulon kullanılarak sürtünme ile yük aktaran birleşimlerde kritik kayma sorunları olabilmektedir. İlave önlemler alınarak bu sorunlar çözümlenebilir. Bunun haricinde, çelik sınıflarına ve uygun kaynaklama prosedürlerine uyularak kaynaklı birleşimlerde çok yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

Paslanmaz çelik malzemesinde bir çok çeşit olmakla beraber, yapısal mühendislik uygulamalarında, daha çok östenitik ve dupleks paslanmaz çelik alaşımları kullanılmaktadır. Son yıllarda gittikçe gelişen alaşım teknolojilerinin araştırmalarında yapısal uygulamalarda kullanılacak yeni tip paslanmaz çelik sınıfını olan “lean duplex” ortaya çıkmıştır. Bu ürünün dupleks sınıflarına göre dayanımının yüksek, ancak korozyon direnci açısından östenitik paslanmaz çeliklere göre daha düşük olduğu belirtilmiştir (Gedge, 2008). Paslanmaz çeliğin kullanımında; üreticilerin, tasarımcıların ve bu ürünü kullanan tüm uygulamacıların malzemenin özellikleri ve kullanımlarıyla ilgili açıklayıcı kullanım kılavuzlarına ihtiyaçları vardır.

Paslanmaz çelik, Japonya’da, “*Stainless Steel for Building Structures*” isimli JSSA, SAS601-1989 standardıyla yapısal eleman olarak tarif edilmekte ve bu tür çeliğin kullanımıyla maksimum 3 katlı, 15m yüksekliğinde, 20m açıklığında ve 3000m² alana sahip yapı yapılabilir (Aoki H., 2000).

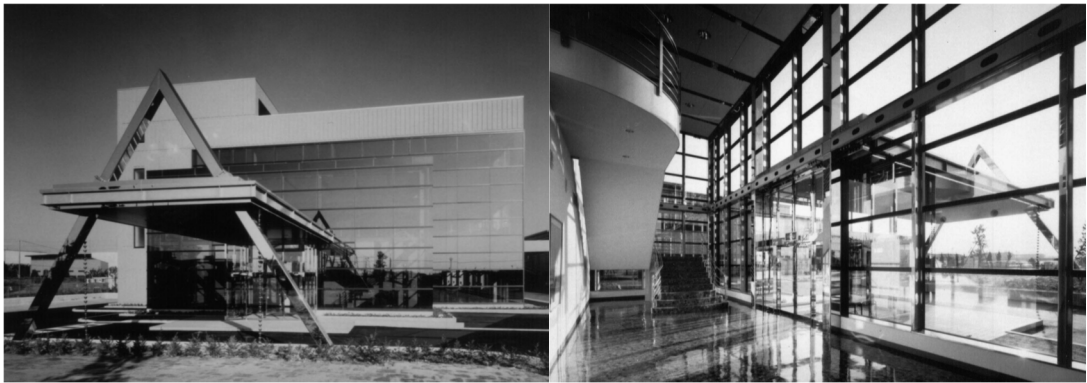
Paslanmaz çelik diğer karbon çeliklerine kıyasla yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahiptir. Yapısal eleman olarak kullanılmaları durumunda plastik şekil değiştirme kapasitesinin yüksek olması sebebiyle mükemmel enerji sönümleyebildikleri için özellikle deprem bölgelerinde önemli bir avantaj sağlamaktadırlar.

Aşağıda, özellikle taşıyıcı sistemlerinde paslanmaz çelik kullanılan yapı örneklerinin bir kaçı verilmiştir.

1.2.3.1 Paslanmaz Çelik Kullanılan Yapı Örnekleri, Japonya

Son yıllarda Japonya’da yapısal elemanlarında paslanmaz çelik kullanılan bazı yapılar aşağıda verilmiştir (Aoki H., 2000).

Aichi Steel Works Ltd. şirketinin 1996 yılında yaptığı ofis binasıdır. Binada kolonlar için 298x296x11mm boyutlarında kutu profiller ve kirişler için 300x300x10x16 mm boyutlarında geniş başlıklı pofiller kullanılmıştır. Cam cephe giydirmeleri kullanılarak taşıyıcı sistemin görünmesi sağlanmıştır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Ofis binasının görünüşleri.

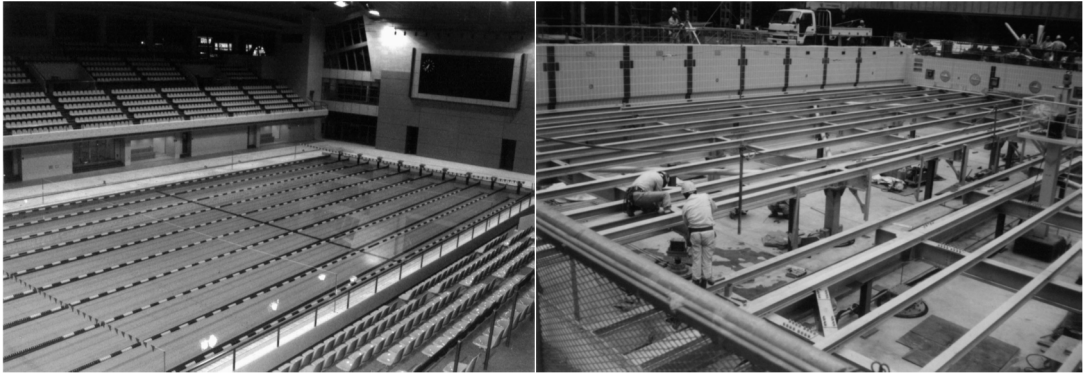
Otobüs terminali olarak kullanılan bir başka yapıda ise taşıyıcı sistemin parçaları olan paslanmaz çelik elemanlar ayrıca yüzeyleri dekoratif olarak işlenerek görünüm

açısından zenginleştirilmiştir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9 Otobüs terminali görünüşleri.

Kapalı yüzme salonunda havuz üstünde kullanılabilen hareketli döşeme yapısı. Bu döşeme yukarı aşağı hareket edebilen ve jimnastik sporlarında kullanılan bir yapıdır. Havuz üstünde yüksek nem sebebiyle döşemenin tüm yapısal aksamı yüksek korozyona dayanıklı paslanmaz çelik olarak tasarlanmıştır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Kapalı yüzme havuzu ve hareketli döşeme yapısı.

1.2.3.2 “Villa Inox” Tuusula, Finlandiya

Bu yapı Finlandiya’da dışı geleneksel Finlandiya mimarisini esas alan ahşapla kaplanmış ancak iç yapısı daha yaratıcı bir düzene sahip olan yaklaşık 180 m² lik iki katlı bir konuttur. Bina, modern yapım tekniklerini ve malzemelerini barındıran bir tasarıma sahiptir (Şekil 1.11). Paslanmaz çelikte bunlardan biridir. Hatta eve ismini bile vermiştir “Villa Inox”. Ev paslanmaz çelik kullanılan taşıyıcı bir sisteme sahiptir.



Şekil 1.11 Villa Inox paslanmaz çelik kullanımı.

Tüm taşıyıcı çerçeve elemanları fabrika koşullarında imal edilmiş ve sahaya taşınmıştır. Yapısal çerçeveler, paslanmaz çelikten imal edilmiş 150x150x3mm kare kesitli kutu profillerden oluşturulmuştur. Çatı kaplamalarının bitişlerinde, cephe kenarlarında, balkonlarda, ana giriş yapısında, iç merdiven aksamında paslanmaz çelik tercih edilmiştir. Balkonlar ana taşıyıcı sisteme çekme çubukları ile asılarak taşınmıştır.

Yapı uzun ömürlü, az ve kolay bakım gerektiren bir yaklaşımla tasarlanmıştır. Tüm binada kullanılan çelikler geri dönüştürülebilir kalitededir (Miettinen, 2002).

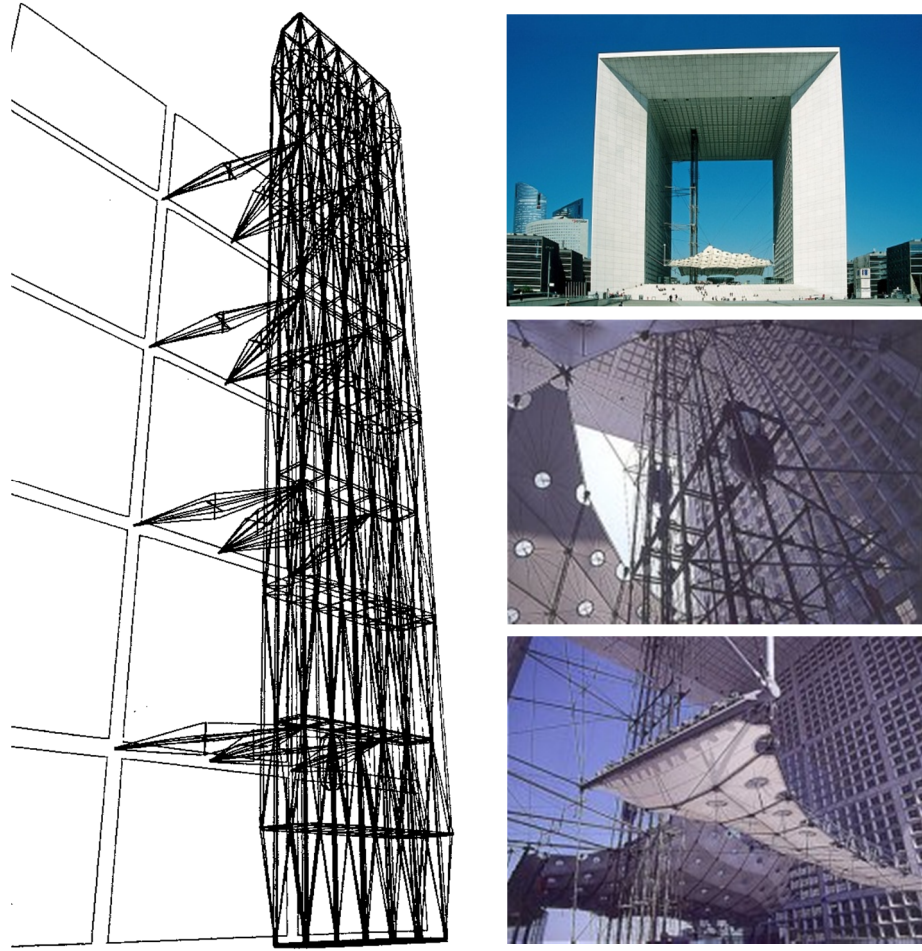
1.2.3.3 Vauxhall Cross Otobüs Terminali Londra, İngiltere

Gece üstüne vuran ışıklandırmaların yansımından dolayı yol gösterici bir deniz feneri gibi görünen otobüs durağının göze çarpan heykel formu, kolaylıkla fark edilebilen kentsel nirengi noktası konumundadır. Kullanım ömrü, bakım giderleri ve çevrecilik açısından tüm yüzey kaplaması paslanmaz çelik kullanılmış olan istasyon yapısının boyu 120m. olup uç kısmında 12m.'lik çarpıcı ve dikkat çekici bir konsolu bulunmaktadır. Çelik konstrüksiyonu, kutu kesitli ve I kesitli profiller ile oluşturulan taşıyıcı sistem 1,6mm ve 2mm kalınlığındaki EN 1.4401 kalitesindeki paslanmaz çelik levhalarla kaplanmıştır.Yapı ile ilgili diğer bir önemli özellikte konsolları

üstündeki yüzeye 168 adet fotovoltaik güneş enerjisi modülü yerleştirilerek 23.000 kWh yıllık elektrik enerjisi üretebilmekte ve bu enerji, istasyonun yıllık elektrik ihtiyacının %30'unu karşılamaktadır (URL 3).

1.2.3.4 “La Grande Arche” Panoramik Asansör Yapısı Paris, Fransa

Ulusal mimari proje yarışmasında birinci seçilen ve 1989 yılında tamamlanan yapı, iş merkezi, müze ve restoran gibi çeşitli imkanları sunan bir tasarıma sahiptir. Binanın eni, boyu ve yüksekliği 110m olup, ana taşıyıcı sisteminde yüksek dayanımlı beton ve ard-germe teknikleri kullanılmıştır.



Şekil 1.12 “La Grande Arche” ve paslanmaz çelik asansör yapısı.
(URL 9 ve URL 10)

Yapının halka açık kısmında sonradan inşaa edilen panoramik asansör, oldukça kompleks ve ayrıntılı bir paslanmaz çelik konstrüksiyona sahiptir (Şekil 1.12).

Asansör şaft sistemine bir çeşit yelken direği gibi görünen taşıyıcı sistem eklenmiştir. 90m yüksekliğinde olan asansör kulesinin taşıyıcısı 5 adet kapalı kesit profilden imal edilmiş her biri 21m boyundaki paslanmaz çelik elemanlarla oluşturulmuştur. Yapısal stabilite mümkün olan en narin elemanlarla sağlanmıştır. Burkulma problemlerinin oluşmaması için ana taşıyıcılar arasında paslanmaz çelik rodlarla ardgermeli çekme elemanları eklenmiştir. Basınca çalışan elemanlar için daire kesitli profiller kullanılmıştır. Tüm yapıda, bakım masraflarının azaltılması, uzun ömürlü olması ve yapısal kalitenin en üst düzeyde sağlanması için paslanmaz çelik elemanlar seçilmiştir. Kullanılan paslanmaz çelik kalitesi yeni tip östeno-ferritik olan ve içinde %22 krom, %6.3 nikel, %3 molibden ve %1.5 bakır barındırmaktadır. Çekme dayanımı yaklaşık 500 MPa olup yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Buna bağlı olarak düşük ısı iletkenliğinin olması yangın direncinide arttırmaktadır (URL 3).

1.2.3.5 Siena Yaya Köprüsü, Ruffolo, İtalya

2006 yılında bitirilen köprüde paslanmaz çelik kablo ve ana kirişleri kullanılarak oldukça yoğun bir otoyol üzerinden 60m'lik bir açıklık geçilmiştir. Eni 2m'lik kompozit döşeme sistemi olan köprünün kirişleri ($h=500\text{mm}$) ve pylonları ($h=12\text{m}$) 1.4162 (S32101) duplex kalitesindeki paslanmaz çelik kullanılarak imal edilmiştir. Pylonlar 400x600mm kutu kesitli elemanlardır. 60mm ve 70mm çaplarında ve 1.4462 (S32205) kalitesindeki askı kablolarının bir ucu kaynaklı ankraj yapılmış ve diğer ucu ise pilonlara birleştirilmiştir (Şekil 1.13).



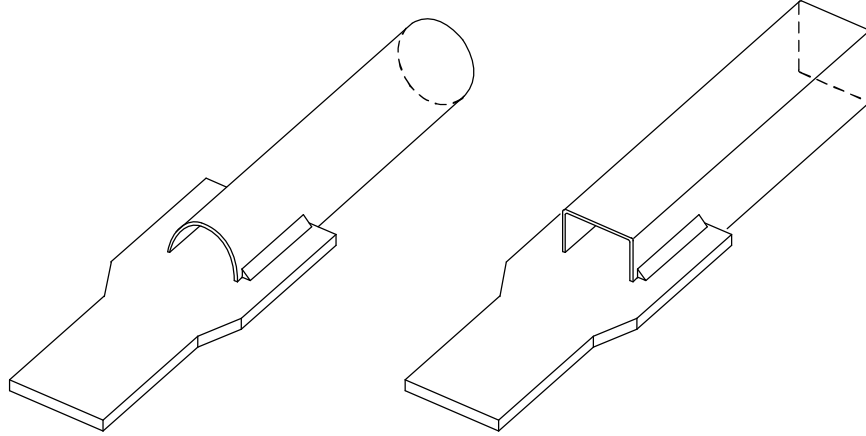
Şekil 1.13 Siena yaya köprüsü.

Korkuluklarında da paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. 1.4162 (S32101) Duplex malzemenin içeriğinde düşük nikel oranı olup çekme dayanımı 450 MPa civarındadır. Sünekliği yüksek, iyi form alabilen ve kaynaklanabilirliği yüksek bir çeliktir. Siena yaya köprüsü, bu kalitedeki paslanmaz çelik türünün kullanıldığı ilk yapıdır. Dikkat çekici bir görünüşü olan köprünün, işlevsel faydası yüksek ve ömrü boyunca düşük maliyete sahip tasarımı vardır. Tasarımda köprünün ömrü 120 yıl olarak kabul edilmiş ve dolayısıyla daha düşük maliyetli bakıma sahip olması dikkate alınmıştır (URL 2).

2 LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Giriş

Kapalı kesit profillerin yarık kaynaklı uç birleşimleri en çok kullanılan birleşim tiplerinden biridir (Şekil 2.1). Bu tip birleşimlerin tasarımı ve davranışı ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı, uluslararası çelik standartlarının konuyla ilgili tasarım kurallarıyla karşılaştırılırken bir kısımda tasarıma yönelik yeni önerilerde bulunmaktadır. Literatürde, paslanmaz çelik ile imal edilmiş kaynaklı uç birleşimlerle ilgili herhangi bir araştırmaya rastlanılmamıştır.



Şekil 2.1 Tipik plakalı kaynaklı uç birleşim.

2.2 Daha Önceki Çalışmalar

Konuyla ilgili yapılan, seçilmiş çalışmalardan bir kısmı aşağıda verilmiştir. Araştırmaların hemen hemen tümünde benzer deneysel çalışmalar yapıp farklı eleman kesit ve birleşimleri için davranış özellikleri belirlenmiş ve teorik, sayısal yaklaşımlarla desteklenen çalışma sonuçları kullanılarak tasarım önerilerinde bulunulmuştur. Yapılan çalışmaların tümünde malzeme olarak karbon çeliği esas alınmıştır.

W.S. Easterling ve L.G. Giroux (1993): Çalışmada, üç tip çelik eleman çeşidi (düz plaka, köşebent ve U profil) ve üç tip kaynak konfigürasyonu kullanılarak, çekme yükü altındaki eleman ve birleşimde kayma aksamasının etkileri araştırılmıştır. Mevcut AISC standardının çelik çekme elemanlarının tasarım koşulları gözden geçirilmiştir. Kaynaklı birleşimle üretilmiş 27 adet numune göçme durumlarına kadar yüklenmiş ve test edilmiştir. Testlerin hepsinde eleman en kesitlerinde akmaya ulaşıldıktan sonra tam kopma göçmeleri oluşmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan ANSYS programıyla test sonuçlarının kıyaslaması yapılmıştır. Üçüncü kısımda ise, ilk iki bölümde incelenen ve deneyi yapılan çalışmalar irdelenmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Yapılan çalışmada, standartta enine ve boyuna kaynakların birarada kullanıldığı durumlar için kayma aksaması hakkında herhangi bir açıklama olmadığı bildirilmiştir. Boyuna gerilmelerin sonlu elemanlarla da doğrulandığı gösterilmiştir. Şekil değiştirmeler ise deney numuneleri üzerinden alınmıştır. Test ve analitik çalışmaların elastik bölgeleri birbirleriyle karşılaştırılmış ve uygunluğu kontrol edilmiştir. Köşebent ve düz plakalarda kayma aksaması görülmüştür. Köşebente ilave edilen enine kaynak, kayma aksaması oluşumunu değiştirmemiştir. Kayma aksaması katsayısının en yüksek 0,90 olması önerilmiştir.

R.M. Korol (1996): Çalışmada, kapalı kesit elemanların yaygın kullanımındaki kaynaklı, yarıklı birleşimlerinin çekme yükleri altında kayma aksaması etkileri araştırılmıştır. Kaynak uzunluğu, kaynak mesafesi ve diğer parametrelerin birleşimin dayanımına ve davranışına etkileri irdelenmiştir. Hazırlanan deneysel programda 18 adet numune test edilmiştir. Numunelerin 11 tanesi blok yırtılma kopmasından, 7 tanesi de kayma aksaması sebebiyle göçmüştür. Test sonuçları, Kanada Standardında belirtilen dayanımlarla karşılaştırılmıştır. Kutu kesitlerin b/d oranlarının, kayma aksaması azaltma katsayısına etkisinin oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen çekme dayanımlarının, geçerli Kanada Standardının önerdiği dayanım değerlerini aştığı belirtilmiştir. Buna bağlı olarak kapalı kesit elemanların çekme yükü altındaki birleşimleri için yeni kayma aksaması azaltma katsayısı önerilmiştir.

J.J. Roger Cheng, G.L. Kulak, Heng-Aik Khoo (1998): 3 farklı tüp çeşidi ve 4 farklı kaynak tipi ile toplam 9 test yapılarak dayanımları üzerine çalışılmıştır. Numunelerin 7 tanesinde orta bölgeden düktil göçme yaşanmış, 2 tanesinde de

kaynak başlangıcından başlayan hasarla sonlanmıştır. Elde edilen dayanımların AISC'nin iyi tahmin ettiği belirtilmiştir. Numerik analizlerde eşdeğer kritik şekildeğiştirme limiti kullanılarak kırılmanın yeri ve dayanımı tahmin edilebileceği görülmüştür. Kayma aksaması etkisinin gözardı edilmemesi tavsiyesi verilmiştir.

X.L. Zhao, R. Al-Mahaidi, K.P. Kiew (1999): Çalışmada, yüksek dayanımlı çelikten ($f_y=450$ MPa) imal edilmiş, et kalınlığı 3 mm'den az olan, soğukta şekillendirilmiş dikdörtgen kesitli kutu profillerin çeşitli plaka oryantasyonu ve birleşim tipine göre boyuna kaynaklarının davranışı araştırılmıştır. Yapılan çalışmada yükleme tiplerinin, dönüş kaynaklarının, kaynak dayanımının ve kutu profil-plaka yerleşiminin etkileri araştırılmıştır. Deneysel kaynak dayanımı, Avustralya, Amerikan, Avrupa ve Kanada Standartları kullanılarak belirlenen kaynak dayanımı tahminleriyle ve daha önce yapılan araştırma projesi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Testler sonunda elde edilen yük taşıma kapasiteleri ve göçme modları nonlinear sonlu elemanlar yöntemi analizleriyle karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçları, yük- yer değiştirme grafikleri, gerilme değerleri, göçme modu ve yerel şekil değiştirme şekilleri için uygun tahminler vermiştir. Soğukta şekil verilmiş kutu profil elemanlarının boyuna kaynaklı plakalı birleşimleri ve dayanımları için tasarım kuralları önerilmiştir. Dayanımda etkili olan dönüş kaynaklı ve dönüş kaynaklı durumlar için katsayı önerileri yapılmıştır.

J.J. Roger Cheng, G.L. Kulak (2000): Deneysel çalışmada guse plakasına kaynakla birleştirilmiş kapalı kesitli çekme elemanlarının uç bölgelerinde oluşan kayma aksaması etkileri araştırılmıştır. 9 farklı test numunesi, 3 farklı kesit ile, farklı boylardaki kaynak uzunluklarıyla hazırlanmıştır. Birleşimlerin sayısal analizleri ölçülen malzeme özellikleriyle elasto-plastik model kurularak yapılmıştır. Uç dönüş kaynağı yapılırsa düktilitenin düşebileceği söylenmiştir. Test sonuçları Amerikan Çelik Enstitüsü'nün (AISC) "*Kapalı Kesitli Çelik Elemanların Tasarım Şartnamesi*" ışığında değerlendirilmiştir. Elde edilen test ve analiz sonuçlarına göre, kayma aksaması etkisinin ($L_w > 1.3D$) durumunda, herhangi bir azaltma kullanılmayacağı ve dayanımı önemli bir şekilde etkilemediği görülmüştür.

S. Willibald, J.A. Packer, G. Martinez Saucedo, R.S. Puthli (2004): Çalışmada, yazarların daha önce yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalar derlenip bu sefer boru profillerin kaynaklı, yarıklı birleşimleri için geliştirilen birleşim ayrıntıları ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan altı adet numunenin, dört tanesi kayma aksaması sebebiyle göçmüş, bir tanesinde blok kopma, diğerinde de hem kayma aksaması hemde blok kopma sebebiyle göçme meydana gelmiştir. Tüm numunelerin kesitleri göçme öncesinde ovalleştikleri gözlenmiştir. Birleşimde kaynak başlangıcına yakın yerdeki ilk rozet okumasında en yüksek gerilme değerlerinin elde edildiği belirtilmiştir. ANSYS programıyla, sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Kayma aksaması etkilerinin, kaynaklı birleşimi kritik hale getirdiği belirlenmiştir. Bazı test numunelerinde, göçmeden önce büyük yer değiştirmeler meydana gelmiş olduğu, varsa şekil değiştirme limitleri sözkonusu olduğunda bu durum kritik bir hal alabileceği bildirilmiştir. Sonraki çalışmada parametrik çalışmaların yapılacağı ve kayma aksaması etkisinin sebebiyle oluşan göçmeler için daha uygun tasarım önerilerinin verileceği bildirilmiştir. Bu tip birleşimler için ayrıca tekrarlı yükler altında da araştırmaların devam edeceği bildirilmiştir.

Humphries Matthew J.R., Birkemoe Peter C. (2004): Deneysel çalışmanın yapıldığı araştırmada, çeşitli kesitlerin kaynak uzunluğu, eleman uzunluğu ve kaynak simetriğinin dikkate alındığı, çekme yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Numuneler CAN/CSA S.16-01 standardına göre tasarlanmıştır. Birleşimlerde tek plakaya kaynaklı, kapalı kesitlerin çeşitli kombinasyonları kullanılmıştır. Çalışmada, kopma davranışının analitik olarak daha iyi modellenmesi için yüksek şekil değiştirmelerin olduğu bölgelerdeki yırtık oluşumları fotometrik tekniklerin kullanımıyla incelenmiştir. Araştırma sonunda standartlardaki tasarım hükümlerinin bir kaç durum dışında çok emniyetli olduğu belirtilmiştir.

T.W. Ling, X.L. Zhao, R. Al-Mahaidi, J.A. Packer (2006): Çalışma, VHS (Very High Strength) çok yüksek mukavemetli çelik tüplerin plakalı kaynaklı birleşimlerindeki kayma aksaması hasarlarını araştırmak için yapılmıştır. Testi yapılan 16 numunenin hepsi kayma aksamısından dolayı ilk hasarlarını almış ve son dayanımları belirlenmiştir. Test numunelerinin dayanımları AISC ve CSA

standartlarına göre tahmin edilmiş ancak yapılan testlerde bu tahminlerin yeteri kadar gerçek dayanıma yaklaşmadığı görülmüştür. 5 adet modifikasyon önerilmiş ve tasarım için bir formül tavsiye edilmiştir.

S. Willibald, J.A. Packer, G. Martinez-Saucedo (2006): 13 adet guse plakalı eliptik kesitli elemanların basınç ve çekme kuvvetleri altındaki testleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, geçerli tasarım prosedürleri ve diğer çalışmaların önerileri ile karşılaştırılmıştır. Test numunelerinde birleşim uzunluğunun etkisi, profil kesitinin plaka üstündeki yerleşimi ve kaynakların arasındaki mesafeler dikkate alınmıştır. Çekme kuvveti altındaki numuneler, elemanda çevresel kopma ya da kaynak uzunluğu boyunca boru malzemesinin yırtılmasıyla hasarlar oluşmuştur. Basınç altındaki numunelerde ise burkulma ile sonuçlanmıştır. Deneysel çalışmalar, kayma aksaması etkisinin bu tip birleşimlerde kritik sonuçlar çıkaracağını göstermiştir.

G. Abi-Saad, D. Bauer (2006): Çalışmanın amacı; çelik çekme elemanlarının dayanımlarının azalmasına sebep olan kayma aksaması etkisinin araştırılarak dayanım azaltması hesaplarının analitik bir yaklaşımla değerlendirilmesidir. Yaklaşım, eleman uçlarındaki kuvvet akış çizgilerinin Whitmore konsepti kullanılarak birleşim plakalarında kullanılabileceği üzerine dayandırılmıştır. Metod basit bir kaynak üstünde elastik, plastik ve son gerilme durumları için örneklerle gösterilmiştir. Ayrıca çalışma, Kanada Standardı'ndaki (CAN/CSA-S16-01) tek veya çift boyuna paralel kaynaklı birleşim şekilleri için verilen tavsiyelerle karşılaştırılmıştır. Bu yöntemle tahmin edilen dayanımlar, daha önce yapılan laboratuvar testlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen metod, farklı kesitlere sahip ve kayma aksaması etkisindeki çekme elemanların dayanımlarının belirlenmesinde kullanılabilir.

G. Martinez-Saucedo, J.A. Packer, S. Willibald (2006): 8 adet numune pratikte sıkça kullanılan 3 farklı birleşim tipi ile eksenel çekme ve basınç yükleri altında test edilerek sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programı kullanılarak parametrik analizleri yapılmıştır. Kullanılan parametreler ise, kaynak uzunluğu (L_w), boru çapı ve et kalınlığının oranı (D/t) ve yarım kesitin ekzantrik merkezinin plaka üstüne olan

mesafesi (\bar{x}') dir. Yarıklı plakalı birleşimlerde kayma aksamaları etkilerinin kritik olduğu görülmüştür. Genel olarak birleşimin kapasitesine en geniş etkiyi yapan parametrenin kaynak uzunluğu olduğu belirtilmiştir. Göçme modları arasındaki geçiş noktası birleşimin tipine, kaynak uzunluğuna (L_w), çap-et kalınlığı (D/t) oranına ve birleşimin eksantrisitesine bağlı olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda en yakın dayanım tahmininin AISC Standardına ait olduğu belirtilmiş olup, tüm testler de göstermiştir ki, birleşimin dayanımı, uygulanabilirliği ve kaynak uzunluğu ile tüp geometrileri hakkında gerekli açıklamaların olduğu ayrıntılı tasarım metodunun hazırlanması gerektiği belirtilmektedir.

G. Martinez-Saucedo, J.A. Packer, C. Christopoulos (2008): Elastik olmayan çevrimsel yükler altında test edilen kapalı kesitli elemanların plakalı uç birleşimlerinin davranışları incelenmiştir. Çalışmada geleneksel yarıklı, plakalı birleşim ve ani kırılma göçmelerinin önüne geçecek değiştirilmiş yeni iki tip yarıklı plakalı birleşim olmak üzere, üç tip birleşim üzerinde testler yapılmıştır. Yeni tip birleşimde, inelastik çevrimsel yüklerin sebep olduğu gerilme yığılmalarının daha geniş bölgelere dağıtıldığı, birleşimin etkinliğini arttırdığı gözlenmiş ve tüp elemanların ortasından kopana kadar enerji sönmlemeye devam ettiği anlaşılmıştır. Bu tip yenilikçi birleşimlerin deprem bölgelerindeki yapı sistemlerinde kullanılabileceği sonucu çıkarılmıştır.

R.G. Zhao, R.F. Huang, H.A. Khoo, J.J.R. Cheng (2008): Kare ve dikdörtgen kesitli profillerin, kaynaklı yarıklı plakalı birleşimlerinde kaynak uzunlukları ve uç kaynak dikişlerinin tipleriyle ilgili deneysel bir çalışmadır. Toplam 30 adet kare ve dikdörtgen numune 16 ayrı birleşim konfigürasyonu ile test edilmiştir. Çalışmada kaynak yerleşimi, kaynak uzunluğu/kesit oranları ve guse plakası kalınlıklarıyla birleşime etkileri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçların, kayma aksamaları etkilerinin de bulunduğu birleşim dayanımlarının, Kanada ve Amerikan Standartlarının önerdiği dayanımlardan daha yüksek sonuçlar verdiği ve Standartların oldukça emniyetli olduğunu desteklediği belirtilmiştir. Çalışma sonunda, Kanada Standardı için bu tip birleşimlerde kayma aksamaları etkilerinin dikkate alınmasıyla ilgili öneri geliştirilmiştir.

R. Zhao, R. Huang, H.A. Khoo, J.J.R. Cheng (2009): Kare ve dikdörtgen kesitli profillerin, kaynaklı yarıklı plakalı birleşimlerinde kaynak uzunlukları, profil-plaka oryantasyonu ve kaynak kalınlıkları değişkenleriyle numuneler test edilmiş, profillerin köşe dayanımlarını dikkate alan, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modeller parametrik çalışmalar yapıp test sonuçlarıyla ve standartlardaki dayanım tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Numunelerde kaynak ucu dönüşü yapılmamıştır. Kapalı kesit elemanların kaynaklı, yarıklı birleşimleri için sonlu elemanlar yöntemi için model geliştirilerek test ve hesaplanan dayanımlar daha uygun bir şekilde karşılaştırılmıştır. Küçük kaynak uzunluğu oranlarında, kutu kesitlerin köşe kısımlarının hesaba katılmasıyla, eleman ve birleşimin çekme dayanımı kapasitesini pek etkilemediği tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucunda, yeni kaynak uzunluğu oranı bulunmuştur. Bu parametrenin, Amerikan ve Kanada Standartlarında yer alan kapalı kesit elemanların kaynaklı, yarıklı birleşim dayanımının hesaplanmasında kullanılan kayma aksaması (U) katsayısını etkilediği ve daha iyi dayanım tahmin edilmesine olanak sağladığı belirtilmiştir.

G. Martinez-Saucedo, J.A. Packer (2009): Çalışmada, Amerikan, Kanada ve Avrupa Standartlarına göre kapalı kesit yapısal çelik elemanların çekme yükleri altındaki kaynaklı, yarıklı, plakalı birleşim kapasiteleri gerekli limit durum kontrolleri yapılarak irdelenmiştir. Yazarların ve diğer araştırmacıların konuyla ilgili daha önce yapılmış tüm çalışmaları özetlenmiş ve çekme yükü altındaki elips, kutu, dikdörtgen kesitli tüm profiller için uygulanabilecek bu tip birleşimlerin kapasiteleri ile ilgili yeni bir prosedür önerilmiştir. Kapalı kesit elemanları kaynaklı uç birleşimlerinin gerçek davranışlarının birden fazla limit durum kontrollerinin yapılması gerektiği önerilmiştir. Çeşitli göçme mekanizmalarının (kayma aksaması ve blok yırtılma) etkilerinin dikkate alınması gerektiği ve önerilen yeni eksantrisite-kaynak uzunluğu oranının bu davranışı daha iyi tanımladığı belirtilmiştir. Kayma aksaması için tavsiye edilen bu yeni modelle, yazarların ve diğer araştırmacıların daha önce yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmalarla da iyi bir korelasyon kurulduğu belirtilmektedir.

Salih E.L. Gardner L. ve Nethercot D.A. (2010): Çalışmanın konusu bulonlu birleşime sahip paslanmaz çelik plakalarda net kesit davranışının incelenmesidir.

Daha önce yapılan test çalışmaları sonlu elemanlarla doğrulanmıştır. Bulonlu birleşimlerde net kesitteki kopmaya etkisi olan temel parametrelerin araştırılması sözkonusudur. Kırılma öncesi geniş gerilme dağılımlarının yeterli seviyede sağlanabilmesi için paslanmaz çeliğin duktilitesinin yeterli olduğu belirlenmiştir. Paslanmaz çelik standardındaki (Eurocode 1993-1-3) net kesitli birleşimleri için tasarım formülü önerilmiştir.

L.C. Schmidt, P.R. Morgan (2011): Çalışmada çelik tüp elemanları ve onların birleşimlerinin davranışı araştırılmıştır. Birleşimler pratikte kullanılan 3 farklı birleşim olup, elemanlarda ise 2 farklı çelik kalitesi; geleneksel yapısal çelik kalitesi ve soğuk şekillendirmeye uygun çelik kalitesi kullanılmıştır. Birleşimlerden bir tanesinde kasıtlı olarak kaynak fabrikasyonunda kusur bırakılmıştır. Kullanılan iki çelik kalitesinin en belirgin özelliği pekleşme oranlarının (strain hardening ratio) farklı olmasıdır. Çalışmada eleman ve birleşimlerinin son yük taşıma kapasitelerindeki azalmaya dikkat çekilmiştir. Ayrıca düşük pekleşme oranı olan çelikle imal edilmiş kusurlu birleşimin sünekliğinin ciddi şekilde düştüğü belirlenmiştir.

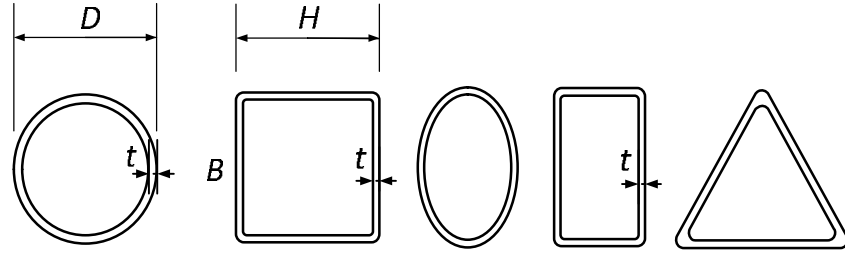
3 KAPALI KESİT ÇELİK ELEMAN BİRLEŞİMLERİ DAVRANIŞ VE TASARIMI

3.1 Giriş

Çekme elemanları doğrudan çekme yüklerine maruz, boyca uzamaya eğilimli ve iki ucu basit mesnetli moment aktarmayan elemanlardır (Zhao ve diğ. 2005). Çeşitli kesit tipleri kullanılabilen bu tip elemanlarda yapısal sistemin gereği ve ihtiyacı olan özelliklerde profiller kullanılmaktadır. Açık kesitli (U, H, L şeklindeki) profillerin kullanımının yanında daha ekonomik, estetik açıdan tercih sebebi olan, imalatı ve birleşim detaylandırması daha pratik olan kapalı kesit profillerde kullanılmaktadır. Kapalı kesit profiller, eğilme, burulma, basınç ve çekme elemanı olarak yapıların çeşitli bölgelerinde kullanılmaktadır (Cheng ve diğ. 1998). Ancak kapalı kesit profiller daha sıklıkla çekme ve basınç elemanı olarak tercih edilmektedir. Bu bölümde kapalı kesit çelik çekme elemanlarına genel olarak değinildikten sonra profillerin kaynaklı uç birleşimlerinin davranışı ve tasarım yaklaşımları üzerine durulmuştur.

3.2 Kapalı Kesit Çelik Elemanlar

Kapalı kesit (boru, kutu profil, vs.) çelik çekme elemanlar endüstriyel üretim tesislerinde çeşitli yöntemlerle (dikişli veya sıcak hadde) üretilen, boyut ve et kalınlığı toleransları oldukça hassas olan (~0.1mm) ve çok çeşitli çelik malzemesi kullanılarak imal edilebilen elemanlardır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kapalı kesit genel profil tipleri.

En yaygın kullanılan kesit çeşidi daire ve dikdörtgendir. Bunun yanında elips, üçgen ve çeşitli farklı formlarda üretilen kapalı kesit çelik elemanlar da mevcuttur. Yapısal olarak kullanılan profiller yapısal olmayanlara göre daha büyük çaplı, köşe dönüşleri daha geniş ve et kalınlıkları daha fazladır. Yapısal olmayan kapalı kesit profillerin (gaz, su boruları, vs.) boyut ölçüleri daha hassastır ve özel sınıflandırma kategorileri vardır.

Dikdörtgen ve dairesel kesitlere sahip profiller düzgün geometrik yapıları ve dayanım özellikleri açısından çelik yapı sistemlerinde oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Yapısal tasarımlarda bu elemanlar genellikle basınç, çekme, burulma kuvvetlerinin tek başına veya birleşik etkileri altında kullanılırken gereği halinde eğilme elemanı olarak da değerlendirilebilmektedir. Yapısal anlamda dikdörtgen kesitli elemanların kullanım, işleme ve birleştirmeleri daha elverişli olmakla beraber estetiklik göz önüne alındığında dairesel ve elips kesitli elemanlar da tercih edilmektedir.

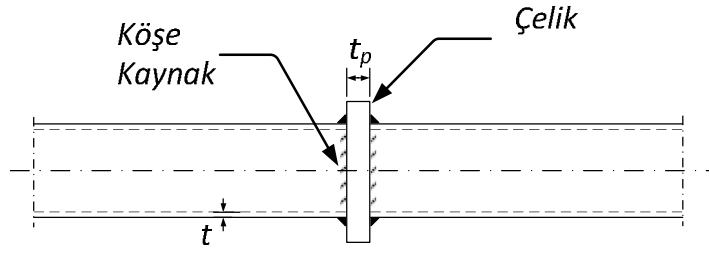
Profillerin şekilsel üretiminde iki yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemler, sıcak hadde ya da dikişli profil olarak adlandırılır ve kısaca şöyle tanımlanabilir. Sıcak hadde profil üretiminde, sıcak üretim safhasında bulunan şekil verilebilme özelliğini yitirmemiş çelik maddesi profil en kesitini oluşturacak bir dizi şekil haddelerinden geçerek boru haline gelir ve boyut kontrolü yapılarak üretim tamamlanır. Bu tip üretim hem dairesel hemde dikdörtgen kesitli profiller için kullanılmaktadır. Dikişli profil üretiminde ise çelik sac levhaları uygun ebatlarda kesilerek şeritler haline getirilir ve soğuk bükme yöntemleri kullanılarak iki kenar yanyana getirilir. Profil bükülmüş ancak kaynaklanmamış kapalı kesit durumundadır. Sürekli kaynak tekniği ile kenarlar kaynakla birleştirilir. Çap, et kalınlığı ve boy kontrolleri yapıldıktan

sonra depolanır. Yukarıda kısaca açıklanan tüm üretim tekniklerinin ülkelere göre belli standartları olup (ASTM A500, CSA G40.21, EN 10210 gibi) çeşitli boy ve ebatlarda üretim yapılabilmektedir.

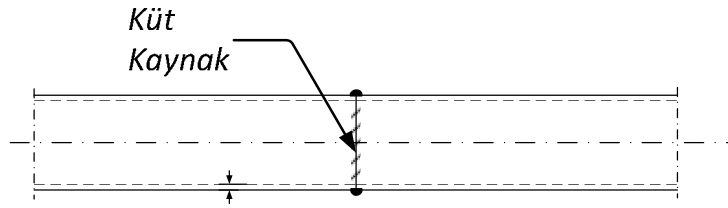
3.3 Kapalı Kesit Çelik Eleman Birleşimleri

Kapalı kesit çelik elemanların mevcut boy ve kullanım durumlarına göre diğer eleman ve yapı sistemleri içinde kullanılabilmesi için birleşimlerinin imalat ve uygulama tekniklerine uygun tasarlanması önemlidir. Kapalı kesit elemanlar aktardıkları yük tiplerine göre farklı şekil ve tiplerde birbirleriyle birleştirilmektedirler. Teze de konu olan çekme elemanlarının kaynaklı uç birleşimleri kapsamında Şekil 3.2 de gösterilen birleşim tipleri en sık kullanılan, üretimi ve detaylandırması en kolay olan bağlantı çeşitleridir.

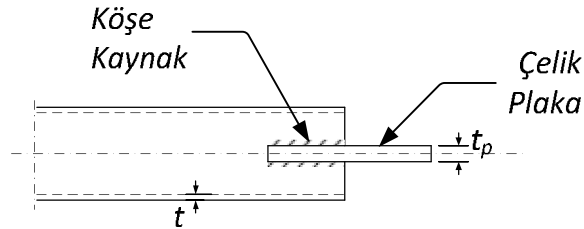
Enine plakalı birleşimler aksenal basınç/çekme, kesme ve moment etkilerinin taşınabileceği birleşimlerdir (Şekil 3.2.a.). Birleşim; profillerin, eksenleri boyunca mimari ve estetik görünümünü etkileyen ve detay problemleri oluşturan bir özelliğe sahiptir. Bu birleşim tipi, uygulanan kuvvetin (özellikle basınç ve çekme kuvvetleri) tüm kesite düzgün olarak yayılmasını sağlayan, yapısal olarak tasarımı, üretimi ve uygulanması kolay bir tekniktir. Profilin çekme kapasitesinde kayıp olmadan faydalı kullanım sağlar. Ancak profil içi kullanım imkanı (kablolama, sıvı-gaz iletimi, vs.) kısıtlıdır. Birleşimde tek taraflı kaynak kullanılabileceği gibi çift plakalı bulonlu birleşim kullanılarak eleman uç birleşimi olarak tertiplenebilir.



a) Enine plakalı birleşim



b) Küt kaynaklı birleşim



c) Plakalı kaynaklı birleşim

Şekil 3.2 Tipik birleşimler.

Şekil 3.2.b’de gösterilen küt kaynaklı birleşimler, estetik görünümünün önemli olduğu, daha çok yapısal olmayan elemanlarda sıkça kullanılan bir birleşim tekniğidir. Özellikle eleman boyunun uzatılmasında kullanılır. Profil içi kullanıma uygundur. Profil kenarlarına kaynak ağızı açılarak gerekli birleşim kaynakla sağlanır. Uygulanan kuvvet profilin tüm kesitine düzgün yayılabilmekte ve eleman çekme kapasitesinin tümüyle faydalı kullanım sağlanabilmektedir. Şekil 3.2.c’de gösterilen birleşim tipi ise aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.4 Kapalı Kesit Çelik Elamanlarının Kaynaklı Uç Birleşimleri

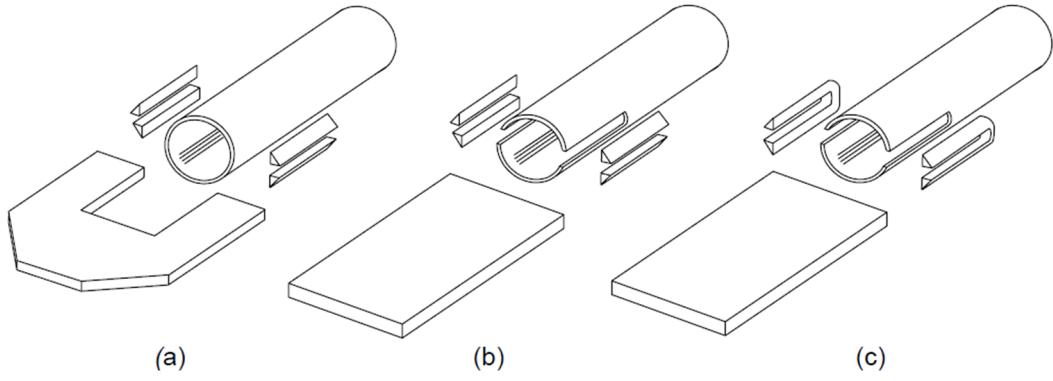
Mevcut araştırma çalışmasına konu olan profili yarıklı, guse levhasına kaynaklı (Şekil 3.2.c) birleşimler, tasarımı, imalatı ve uygulaması diğerlerine göre daha zor olan uç birleşim tipleridir. Ancak kullanımlarında, diğer taşıyıcı sistem elemanlarıyla

(kolon, kiriş) birleşim sağlanması kolay ve pratik olan bir birleşimdir. Uygun kalınlıktaki plakalar, profil boyunca açılmış yarıklarına yerleştirilip kaynaklanır. Kaynak boyu yarıkların uzunluğuna kadar alınmaktadır. Plakanın açıkta kalan kısmi kaynaklı veya bulonlu birleşime uygun olarak tasarlanabilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Uygulama örnekleri.

İnce cidarlı, kapalı kesit çelik çekme elemanların uç birleşimlerinin oluşturulmasında en çok kullanılan ve daha önce değinildiği gibi diğer elemanlara birleştirilmesi en pratik olan birleşimler plakalı yarıklı birleşimlerdir. Bu birleşimler daha önce de bahsedildiği gibi, profil boyuna doğrultusunda açılan birden fazla paralel yarıklara gerekli kalınlıktaki guse plakası yerleştirilip yarıkların kenarlarından kaynaklanması ile elde edilmektedir. Bu tip birleşimler üç şekilde yapılabilmektedir (Şekil 3.4). Bunlar, Şekil 3.4.a'da gösterildiği gibi plakada açılan yarıklarla, kaynak dönüşsüz birleşim, Şekil 3.4.b'de gösterildiği gibi boruda açılan yarıklarla, kaynak dönüşsüz birleşim ve Şekil 3.4.c'de gösterildiği gibi boruda açılan yarıklarla, kaynak dönüşlü birleşim sağlanan birleşimlerdir.



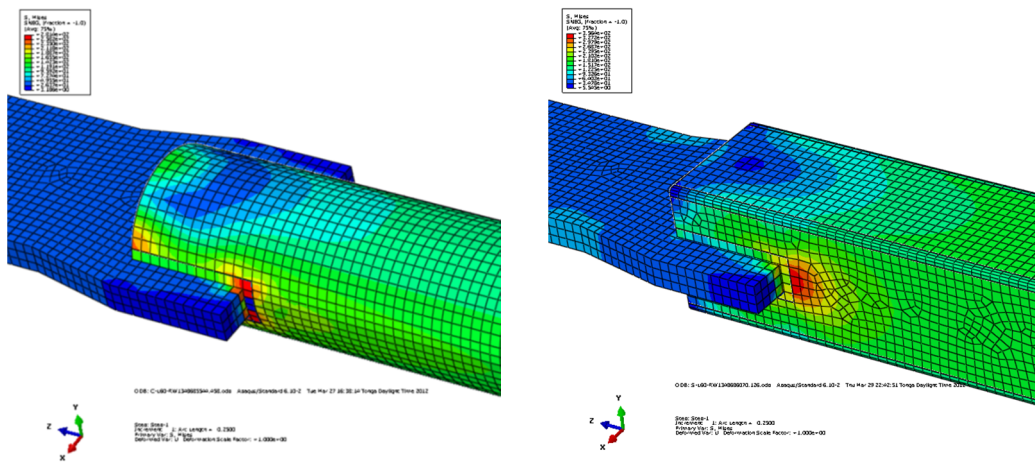
Şekil 3.4 Bağlantı plakalı uç birleşim tipleri **a)** Plakada açılan yarıklı birleşim **b)** Boruda açılan yarıklı kaynak dönüşsüz birleşim **c)** Kaynak dönüşlü birleşim (Willibald S. ve diğ. 2006).

Uygulamada en sık kullanılan tip, Şekil 3.4.b ve c’de gösterilen, profilde açılan yarıklı oluşturulan birleşimdir. Bu tip bağlantılardaki tüm kesme, delme ve kaynaklama işinin atölye veya şantiyede yapılabilmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Plakalı birleşim tekniği basit olmasına rağmen çekme yükü altındaki davranışlarının yeteri kadar ele alınmaması sebebiyle güvenli detaylar tasarlanamamaktadır. Bu tip birleşimde profil kesitinin bir kısmının bağlanmış olmasıyla etkileyen kuvvetlerin özellikle basınç ve çekme etkileri altındayken birleşim bölgesindeki gerilme dağılımlarının profil en kesitine düzgün yayılamamasından dolayı yük aktarımında olumsuzluklar yaşanmaktadır. Dolayısıyla kaynaklanan bölgelerde gerilme artışları limit değerlerini bulurken kesitin çevresi üzerinde (altta ve üstte) daha düşük gerilmeler olmakta ve kayma aksamaları (*shear lag*) meydana gelmektedir (Şekil 3.4). Bu durum profil enkesitinin faydalı kullanımını etkilemekte ve birleşim iki adet hasar sonucu ile göçmeye gitmektedir. Hasarlardan biri çevresel göçme (**CF**) durumunu diğeri kaynak dikişi etrafında blok kesme (**TO**) yetmezliğidir (Design Guide 3, 2009). Hasarların tipini belirleyen en önemli etken, birleşimdeki kaynak uzunluğu (L_w) veya kaynak uzunluğu/çevresel (L_w/w) mesafe oranıdır.

3.5 Kayma Aksaması ve Çevresel Yırtılma

Kayma aksaması (*shear lag*), profillerin uç birleşimlerinde, çevresel kesitin tümünün tutulmaması durumunda ortaya çıkar. Bu durum ayrıca çekme yükü uygulanan elemanın kesit değişiminin olduğu bölgelerde ve üniform olmayan birleşim bölgelerindeki yük transferleri sırasında da ortaya çıkmaktadır. Aşağıdaki şekilde de görüleceği üzere çekme yükünün etkisi ile uç kaynak bölgelerindeki gerilme değerleri maksimum olurken profil üst kısımlarına doğru ilerledikçe gerilmeler düşmektedir (Şekil 3.5).

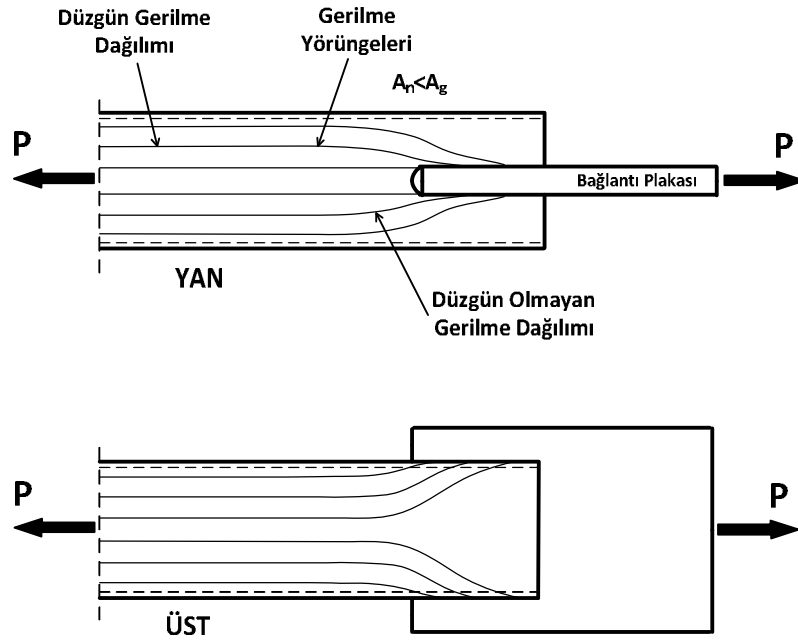


Şekil 3.5 Von-Mises gerilme dağılımları.

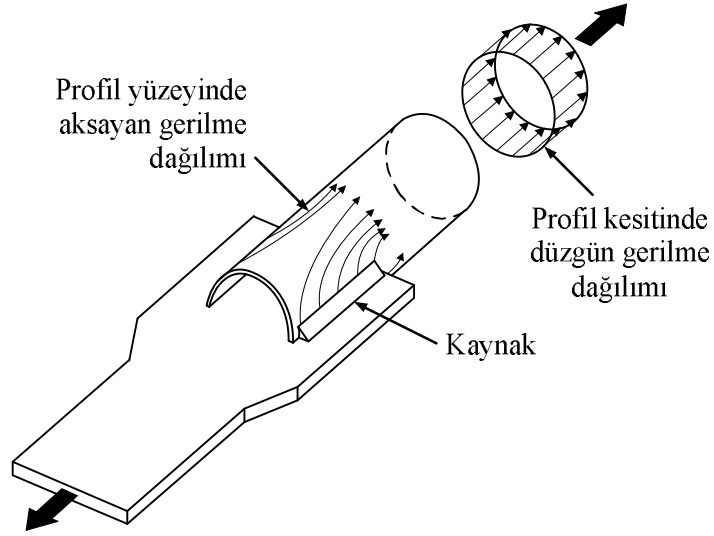
Kayma aksaması etkisininin hesaba katıldığı ilk öneri, Chesson ve Munse'nin 1963'te yaptıkları çalışmada yer almaktadır. Başlangıçta perçinli ve bulonlu birleşimler için oluşturulan öneri, sonrasında kaynaklı birleşimlere de uygulanmıştır. Easterling ve Giroux 1993 ve Kirkham ve Miller 2000 yılında yaptıkları açık kesitli yapısal elemanların çekme dayanımı çalışmalarında da kayma aksamasını dikkate almışlardır. Bu model, kapalı kesitli elemanların birleşimleri için de uygulanmaktadır. Ancak bu bağlantı türleri için araştırmalar nispeten yeni ve kapsamı sınırlıdır.

Kapalı kesitli elemanların yarıklı, plakalı birleşimlerinde, göçme durumlarının oluşmasına sebep olan en temel davranış, elemanın çevresel kesiti üzerinde düzgün gerilme dağılımının olmamasıdır. Kayma aksamasının etkisiyle, hesaplanan net kesit alanına göre daha az çekme dayanımı elde edilebilir. Ayrıca kayma aksaması etkisi,

özellikle kaynaklı birleşimin olduğu durumlarda kaynak uzunluğu ile bağlantılı düşünülmelidir (Cheng Roger J.J. ve Kulak, G.L. 2000). Kayma aksamasının oluşmasında bir çok parametrenin etkili olduğu bilinmektedir. Bunlar; kesitin tipi ve büyüklüğü, birleşimin tipi, kaynak uzunluğu, eleman uzunluğu ve düğüm noktasının kaçıklığı gibi sayılabilir. Ancak en etkili parametrenin, kaynak uzunluğunun (L_w) eleman kesit genişliğine (H veya D) oranı (L_w/H , L_w/D) olduğu belirtilmiştir (G. Abi-Saad ve diğ. 2005). Birleşimdeki yük transferi esnasında kutu profil çevresi boyunca eşit olmayan gerilme dağılımları oluşmaktadır (Şekil 3.6). Kaynak uzunluğu tarafından yönetilen hasar oluşumları blok kesme ve çevresel yırtılma olarak ortaya çıkmaktadır (Design Guide 3 2009). Ayrıca boru profiller için de Şekil 3.7’de görüleceği gibi birleşimde profil kesitinin uç bölgesi plakalı birleşim tipinden dolayı çevresel olarak üniform şekilde tutulmadığı için çekme kuvvetinin etkisi profilin tüm yüzüne düzgün dağılamamaktadır (Martinez-Saucedo, 2008).



Şekil 3.6 Plakalı uç birleşiminde kayma aksaması (Design Guide 3, 2009).



Şekil 3.7 Plakalı uç birleşiminde kayma aksaması (Martinez-Saucedo, 2006).

Yükün artmasıyla yarık çevresindeki bölgelerde akma gerilmeleri ve sonrasında kopma gerilmelerine ulaşılması elemanın ve birleşimin dayanımını düşürmektedir.

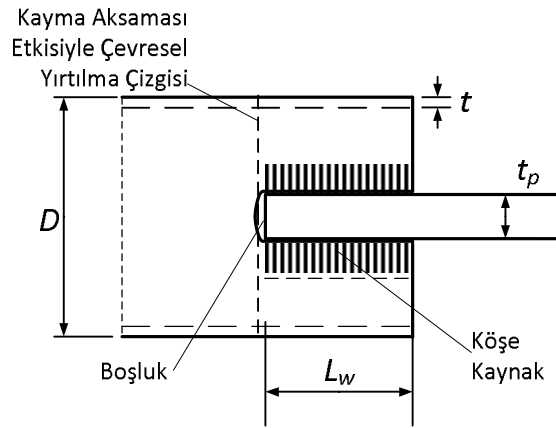
Birleşimdeki kaynak boyu, plaka kalınlığı, profil çap ve et kalınlığı dayanımı ve davranış tiplerinin oluşumunu ve birleşimin dayanımını etkileyen parametrelerdir. Aşağıda ayrıntılı olarak anlatılacak kayma aksamasının etkisi, standartlarda verilen bir (U) azaltma katsayısı ile dikkate alınmakta ve birleşim dayanımı hesaplanmaktadır.

Çalışmanın konusu olan bu tip birleşimlerin çekme kuvvetleri altındaki davranışları incelendiğinde kaynaklı bölgenin başlangıcından, profil ortasına doğru yayılan gerilme ve şekil değiştirmeler profil enkesiti üstünde üniform olamazlar. Bağlantının yapıldığı kaynaklı birleşimde plaka ve özellikle profilin kaynaklı bölgeleri üzerinde gerilme yığılmaları oluşur, kısa süre sonra ulaşılan kopma gerilmesi değerlerinden sonra kaynak uçlarında ve yarık bitişlerinde çatlakla başlayan ve yırtılmayla devam eden hasarlar meydana gelmektedir. Böyle bir durumda elemanın ve birleşimin çekme dayanımı kapasitelerine ulaşmadan sistem göçme durumuna geçmektedir. Dolayısıyla uygulamada beklenmeyen ve istenmeyen bir sonla karşılaşılması için birleşimin çekme dayanımında, kayma aksaması etkisinin dikkate alınması gerekmektedir (Martinez-Saucedo, 2008). Gerekli dayanım aşağıdaki ifadelerle belirlenir.

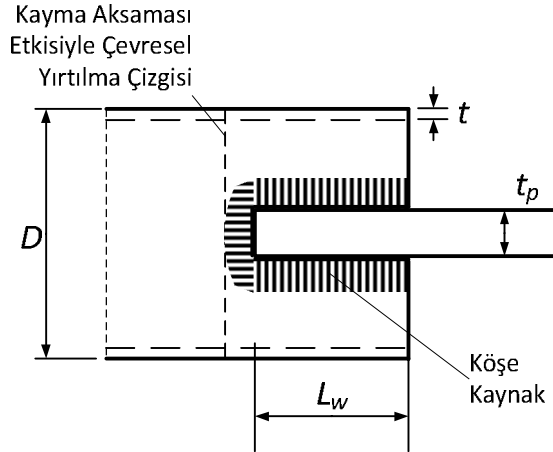
$$P_n = f_u A_e \quad (3.1)$$

$$A_e = U A_g \quad (3.2)$$

Kayma aksamasının etkisi, profilin net kesit alanının (A_n) bir azaltma katsayısı ($U \leq 1$) ile azaltılması ile gözönüne alınır. Bu şekilde elde edilen etkili alan (A_e) ve çelik maksimum çekme dayanımı (f_u) ile çarpılarak birleşimin çekme dayanımı belirlenir (Şekil 3.8).



a) Uç dönüş kaynağı yok (NW).



b) Uç dönüş kaynağı var (RW).

Şekil 3.8 Çevresel yırtılma dayanım parametreleri.

Kayma aksamasının bir miktar iyileştirilmesi için çalışılan örneklerde olduğu gibi bağlantı plakasını profille birleştiren kaynağın uç kısmında dönüş kaynağı ilave

edilebilir. Bu durumda kesit üzerindeki gerilme dağılımında kopukluk olmaz ve olası erken yırtılma hasarı geciktirilmiş olur. Uç dönüş kaynağının yapılması durumunda net kesit alanı, ($A_n=A_g$) brüt alana eşit alınarak dayanım hesapları yapılır. Buna göre

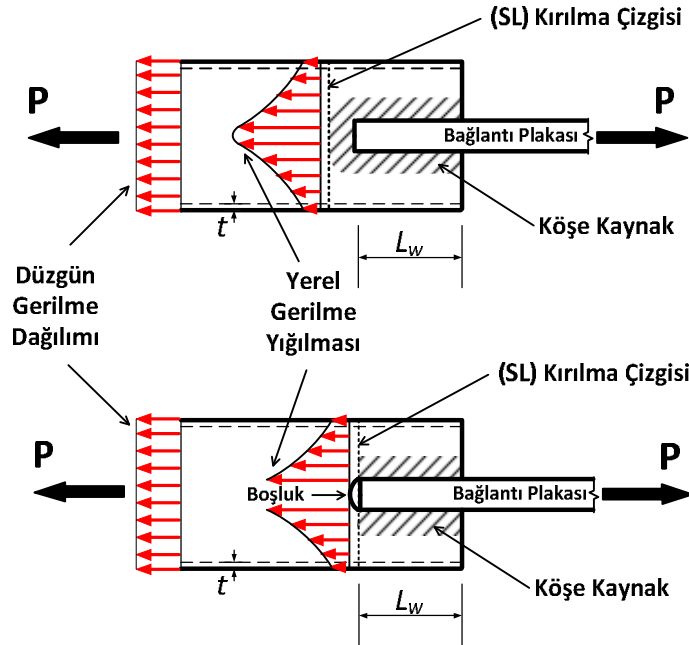
Kaynak uç dönüşlü (RW) birleşimlerde etkili net kesit alanı :

$$A_e = U A_g \quad (3.3)$$

Kaynak uç dönüşü olmayan (NW) birleşimlerde etkili net kesit alanı :

$$A_e = U A_n \quad (3.2)$$

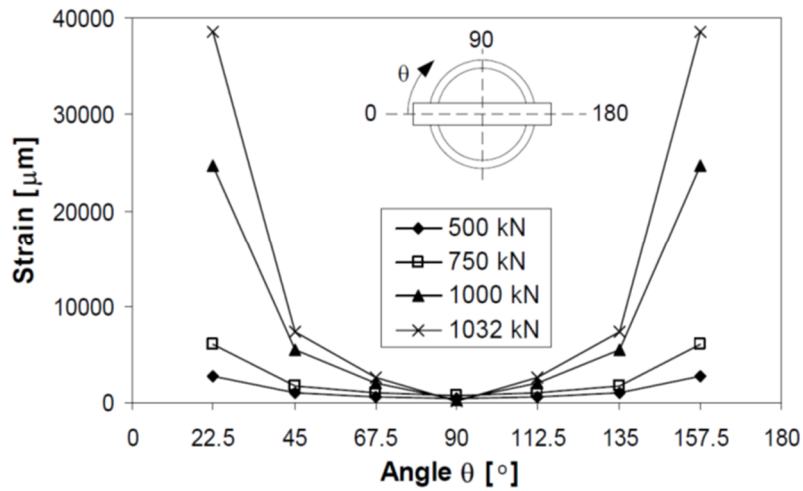
Aşağıdaki şekilde görüleceği gibi kaynak uç dönüşü olduğunda (bundan sonra RW şeklinde anılacaktır) çevresel yırtılmanın oluşacağı kırılma çizgisi dönüş kaynağının önünde oluşmaktadır. Kaynaksız durumda (bundan sonra NW şeklinde anılacaktır) ise kırılma çizgisinin net kesitten geçtiği görülmektedir. Ayrıca çekme yükünün uygulanmasıyla yerel gerilme yığılmalarının dağılımı da şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 RW ve NW durumunda yerel gerilme yığılmalarının dağılımı.

Packer ve Henderson 1992 yılında yaptıkları çalışmada, kayma aksamasının dikkate alınmasında kaynaklar arası çevresel mesafenin (w) etkili olduğunu belirtmiş ve kaynak uzunluğunun (L_w) bu mesafeyle ilişkisine (L_w/w) bağlı bir net kesit azaltma faktörü (U) önermişlerdir.

Willibald ve diğerlerinin 2004 yılında yaptıkları çalışmada (Şekil 3.10) boru profilin plakayla kaynaklandığı bölgelerde yük arttıkça gerilme ve şekil değiştirmeler en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir. Kayma aksamasının etkisi, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi uygulanan yükün şiddeti arttıkça profil üzerindeki şekil değişimi dağılımının farklılıkları açık bir şekilde görülmektedir. Bu durumda kesitin bağlanmamış kesiti, gerilme dağılımına katkı sağlayamadığı için eleman kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.10 Boru plakalı uç birleşiminde çevresel şekil değiştirme dağılımı.
(S. Willibald ve diğ. 2004)

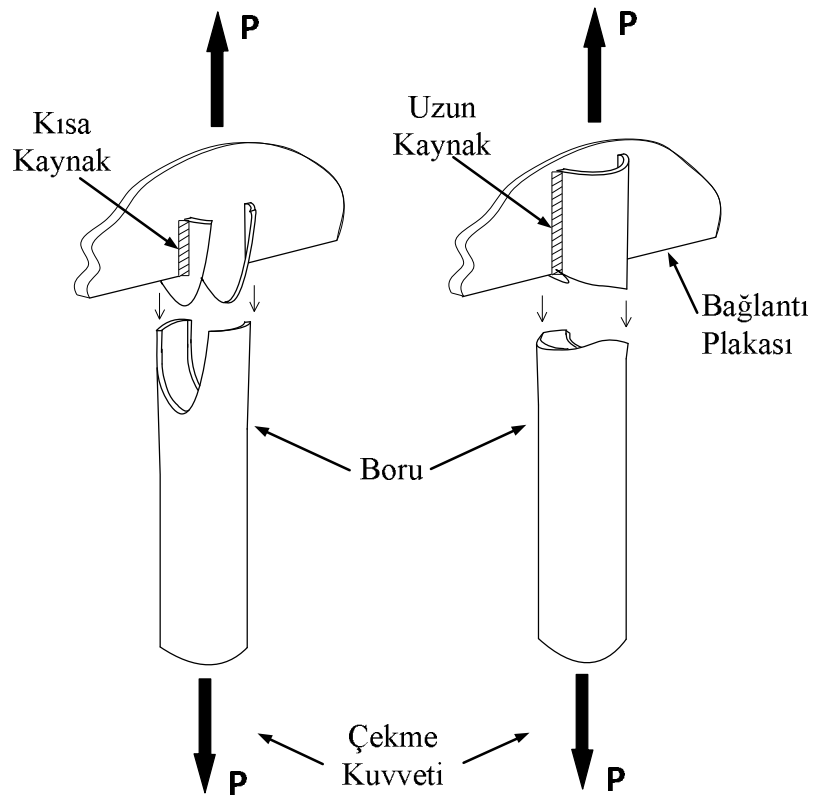
Yükün daha da artırılması durumunda yerel gerilme ve şekil değiştirmelerin sınır değerlerine ulaştığı yarıç diplerinde başlangıç çatlakları oluşur. Eğer yeterli kaynak uzunluğu mevcutsa hasar profil en kesitine paralel gelişerek çevresel yırtılma ile son bulur. Bu tip göçme moduna çevresel göçme (*Circumferential Failure, CF*) denir.

Birleşimin dayanımını ilk bakışta tahmin etmek kolay gibi görünsede kayma aksamasının sebep olduğu en sık karşılaşılan göçme halleri aşağıda verilmiştir.

- Çevresel çekme kopması (*CF - Circumferential tension rupture*)
- Kaynak etrafından blok yırtılma (*TO - Block shear tear-out*)

Yukarıda bahsedilen göçme durumları, çalışılan birleşimin çekme dayanımı için kontrol edilmesi gerekli davranışlardır.

Kayma aksaması, profil kaynaklı uç birleşimindeki geometrik parametrelere bağlı olarak çevresel çekme kopması veya blok yırtılma şeklinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.11).



a) "Blok yırtılma" (TO) b) "Çevresel yırtılma" (CF)

Şekil 3.11 Tipik göçme modları.

Willibald ve diğerlerinin (2006) yapmış olduğu çalışmalarda, kayma aksamasının, kaynağın başladığı uç kısımda ya da diğer bir anlatımla yarık dibinde gerilme ve şekil değiştirmelerin artmasıyla çevresel çekme kopması (*CF - Circumferential tension rupture*) ve kaynak etrafından blok yırtılma (*TO - Tear out block shear*) hasarlarına sebep olduğu belirtilmiştir.

Tezin konusu olan bu tip birleşimler için yapılan ilk çalışmalarda, kutu profiller için kaynak uzunluğunun ($L_w > 1.2w$) olması durumunda kayma aksamasının etkili olmadığı ve azaltma katsayısının (U) gerekmediği belirtilmiştir (Korol, 1996). Ayrıca aynı çalışmada blok yırtılma (TO) göçme tipinin, kaynak uzunluğunun ($L_w < 0.6w$) olması durumunda olduğu ifade edilmiştir.

Cheng ve Kulak (2000), Willibald ve diğerleri (2004) boru profiller için yaptıkları çalışmalarda kaynak uzunluğunun ($L_w > 1.2D$) olması durumunda kayma etkisi azaltma katsayısının (U) gerekmediği bildirilmiştir. Daha düşük kaynak uzunluklarında blok yırtılma (TO) göçme tipinin olduğu belirtilmiştir.

Boru profiller için sınırlı sayıda yapılmış olan test sonuçlarına göre kaynak uzunluğunun ($L_w > 0.7w$, Willibald ve diğ. 2004) ve ($L_w > 0.6w$, Ling ve diğ. 2004) olması durumunda da blok yırtılma (TO) göçme tipi görüldüğü belirtilmiştir (Zhao ve diğ. 2005).

Yapılan farklı çalışmalardaki sonuçlara göre, profil uç birleşimleri için göçme modları Tablo 3.1'deki gibi özetlenebilir.

Tablo 3.1 Profillerin kaynaklı uç birleşimleri için göçme modları (Zhao ve diğ. 2005).

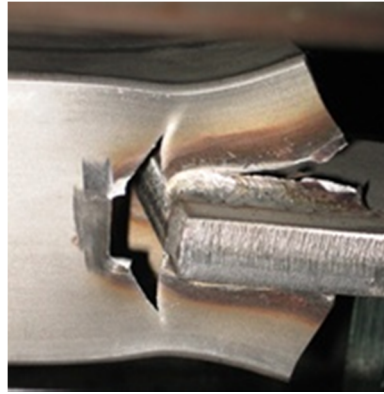
Göçme Modu	Koşul
Kaynak çevresinde göçme, blok yırtılma (TO)	$0.6 w > L_w$ (boru ve kutu profiller için)
Kayma aksaması etkisiyle çevresel göçme (SL \rightarrow CF)	$1.2 w \geq L_w \geq 0.6 w$ (kutu profiller için) $1.3 D \geq L_w \geq 0.6 w$ (boru profiller için)
Kayma aksamasının etkili olmadığı göçme (kutu profiller için)	$L_w > 1.2 w$ (kutu profiller için) $L_w > 1.3 D$ (boru profiller için)

Kural olarak TO ve CF mekanizmaları ortak bir orjine sahiptir. Her iki durumdada göçme mekanizması maksimum gerilmelerin olduğu noktadaki başlangıç çatlak ile gelişir. Bu çatlak, kaynak dibinden boru ucuna doğru ilerler ya da profil çevresi

etrafında uzanarak net kesit göçmesini oluşturur. Birleşim boyunca gerilmelerin seviyeleri ve dağılımı L_w/w oranına bağlı olmaktadır. Sonuç olarak göçme mekanizmaları iyi tanımlanmış L_w/w seviyeleri ile belirlenmeli ve geliştirilmekte olan paslanmaz çelik standartlarında bu durumların sınır koşulları belirtilmelidir.

3.6 Blok Kesme Göçmesi

Çekme etkisi altındaki kapalı kesit elemanların kaynaklı plakalı uç birleşimlerinde oluşan kayma aksaması etkilerinin sebep olduğu göçme hasarlarından biridir. Blok kesme göçmesi (*Tear-Out Failure, TO*) genellikle kısa kaynak uzunluklarında ($L_w < D$) ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.12).



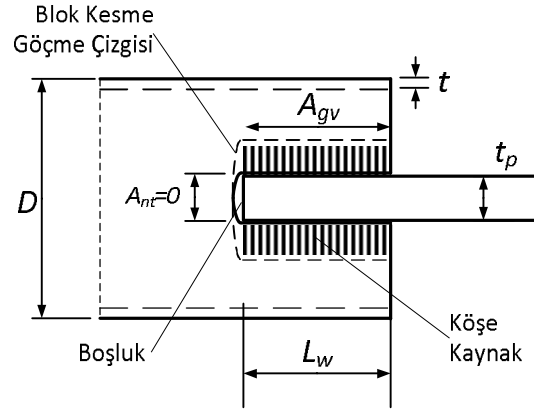
Şekil 3.12 Blok kesme göçmesi.

Dayanım iki farklı bölgenin (çekme ve kayma) katkılarıyla hesaplanmaktadır. Bunlardan ilki çekme bölgesinin katkısı (T_r),

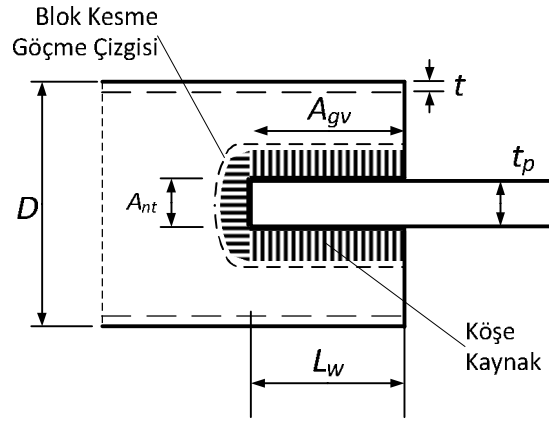
$$T_r = A_{nt} f_u \quad (3.4)$$

$$A_{nt} = 2(t_p t) \quad (3.5)$$

Yukarıdaki ifadelerde blok kesme göçmesinde çalışan çekme net alan (A_{nt}) profil cidar kalınlığı (t) ile yarı genişliğinin (t_p) (ya da plaka kalınlığı) fonksiyonudur (Şekil 3.13.a). Her iki profil kenarında da kaynaklı bölge olduğu için 2 ile çarpılmaktadır. f_u , çelik malzemesinin maksimum çekme gerilmesidir.



a) Uç dönüş kaynağı yok (NW).



b) Uç dönüş kaynağı var (RW).

Şekil 3.13 Blok kesme dayanım parametreleri.

Diğer bölge ise kesme dayanımı bölgesidir. Bu bölgede zorlanan alanın dayanım (V_r) hesabında malzeme kalitesi (f_y) ile kaynak uzunluğu (L_w) ve profil cidar kalınlığı (t) etkilidir (Şekil 3.13.b).

$$V_r = 0.6 A_{gv} f_y \quad (3.6)$$

$$A_{gv} = 4(L_w t) \quad (3.7)$$

Yukarıdaki ifadelerde blok kesme geçmesinde çalışan kayma alanı (A_{gv}) profil cidar kalınlığı ile kaynak uzunluğunun çarpımıdır. Her iki profil kenarında kaynaklı bölge olduğu ve alt üst kaynaklar bulunduğu için 4 ile çarpılmaktadır. f_y , çelik

malzemesinin çekme akma gerilmesidir.

Plakalı birleşimin blok kesme dayanımı yukarıda ifade edilen dayanımların toplamıyla bulunmaktadır.

$$T_r + V_r = A_{nt} f_u + 0.6 A_{gv} f_y \quad (3.8)$$

Birleşimdeki yarık dibinde bulunan uç bölgede kaynakla dönüş yapılmazsa (NW durumu) yukarıda ifade edilen çekme bölgesinin blok kesme dayanımına katkısı olmaz ve 0 alınır. Bu durumda blok kesme dayanımı sadece kesmeye çalışan kayma alanlarıyla (V_r) hesap edilir. Özetle;

RW durumu için blok kesme dayanımı :

$$T_r + V_r = A_{nt} f_u + 0.6 A_{gv} f_y \quad (3.8)$$

NW durumu için blok kesme dayanımı :

$$V_r = 0.6 A_{gv} f_y \quad (3.6)$$

3.7 Tasarım Yaklaşımları

Kapalı kesit profillerin kaynaklı uç birleşimleri çekme dayanımlarının belirlenebilmesi bir önceki konuda anlatıldığı gibi, birleşim bölgesindeki farklı enkesit alanlarının çelik çekme dayanımları ile çarpılmasıyla hesaplanabilmektedir. Bu tip birleşimler için kayma aksamasının, dayanımı değiştiren etkilerinin dikkate alınabilmesi için net enkesit alanı iki uluslararası standart tarafından aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Net enkesit alanı (A_n) bir azaltma katsayısı ($U \leq 1$) ile azaltılarak “*etkili net enkesit alanı*” (A_e) bulunur.

$$A_e = A_n U \quad (\text{AISC2005}) \quad (3.2)$$

$$A'_{ne} = A_n U \quad (\text{CSA2001}) \quad (3.9)$$

Azaltma katsayısı her iki standartta iki ayrı yöntemle belirlenmektedir. Bunlardan

ilki, Chesson ve Munse'nin 1963'te perçin ve bulonlu birleşimler için önerdiği kayma aksaması fenomenini dikkate alan ve Amerikan Standardı'nda (AISC 2005) yer alan, birleşimin eksantrikliği (\bar{x}) ile kaynak uzunluğunun (L_w) karşılaştırılmasıdır.

$$U = 1 - \left(\frac{\bar{x}}{L_w} \right) \quad (3.10)$$

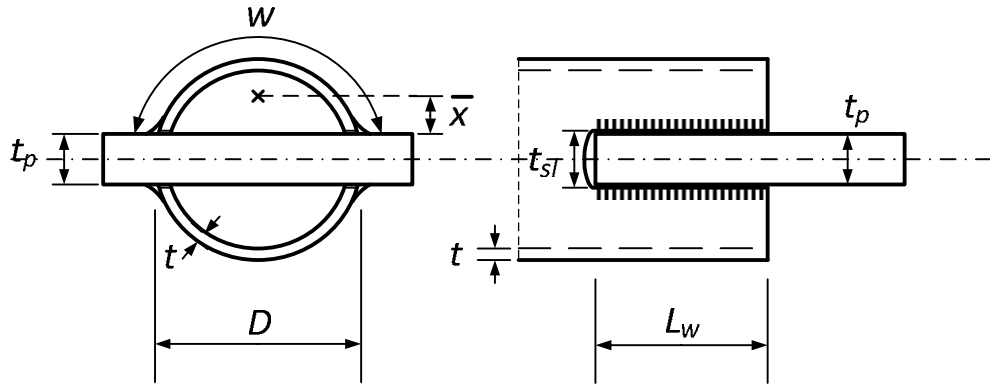
Boru profiller için,

$$\bar{x} = \frac{D}{\pi} \quad (3.11)$$

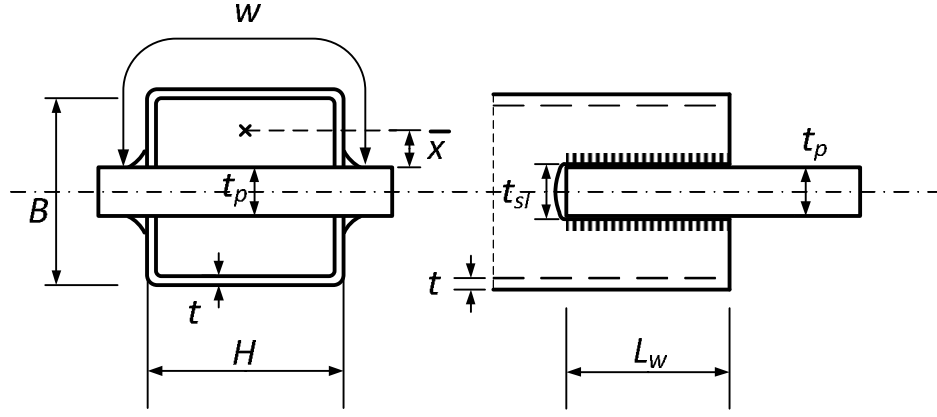
Kutu profiller için,

$$\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)} \quad (3.12)$$

Boru ve kutu profillerin dayanımlarını hesaplayabilmek için gerekli parametreler aşağıdaki şekillerde ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 3.14).



a) boru profiller,



b) kutu profiller,

Şekil 3.14 Boru (a) ve kutu (b) profillerin plakalı uç birleşimleri için genel ölçülendirmeler.

İkinci yöntem ise, kaynaklar arası çevresel mesafeye (w) kaynak uzunluğunu (L_w) karşılaştırır. Bu yöntem, Packer ve Henderson'un 1997'de hazırladığı “*Yapısal Profiller için Tasarım*” kılavuzunda ve Kanada Standardında (CSA 2001) yer almaktadır.

$$w = \frac{\pi D - 2t_p}{2} \quad (3.13)$$

Sadece çekme yüküne maruz çelik eleman birleşimlerinde, kayma aksaması etkilerinin dikkate alındığı ve birleşim tasarım kurallarının olduğu az sayıda uluslararası çelik yapı standardı bulunmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere bu standartlar ve ilgili kurallar yapısal karbon çeliği ile üretilmiş birleşimler için sözkonusudur. Bunlar;

1. Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü'nün Standardı AISC 360 (2005),
2. Kanada Çelik Yapı Standardı CAN/CSA-S16 (2001),
3. Japon Mimarlık Enstitüsü'nün Standardı AIJ (2002),
4. Avrupa Çelik Yapı Standardı EN1993-1-8 (2005).

Japon Standardı AIJ 2002, birleşimde minimum kaynak uzunluğunun ($L_w > 1.2D$) sağlanması halinde kayma aksaması durumunu dikkate almamakta, sadece brüt kesit

alanının (A_g) üretimdeki belirsizliklerden dolayı ($U=0.9$) ile çarpılarak azaltılmasını önermektedir (S.Willibald ve diğ. 2004).

Avrupa çelik standardı EC3 Bölüm 1.8'de tüp elemanların bu tip birleşimlerindeki kayma aksaması etkileri için herhangi bir düzenleme bulunmamakta, sadece bir kolundan bulonlu birleşimi olan çekme etkisindeki köşebent profillerin kayma aksaması etkileri için tasarım koşulları bulunmaktadır.

Amerikan ve Kanadastandartlarında, çekme yükü altındaki kapalı kesitli eleman ve birleşimleri için kayma aksaması ve blok kesme kırılmaları ile ilgili hesap formülleri Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Standartların bir kısmında, blok kesme dayanımları için öngördükleri yaklaşımlar karşılaştırıldığında denklemlerin benzer olduğu görülmektedir (küçük bir farklılık olarak EC3'ün kayma akma katsayısı $1/\sqrt{3}$ alınmaktadır). Fakat standartlardaki farklı dayanım katsayılarından dolayı tasarım dayanım değerleri farklı bulunmaktadır. Kanada Standardı (CSA 2001)'de **0.765**, Amerikan Standardı (AISC 2005)'te **0.75**, Avrupa Standardında (EN1993-1-8 2005)'te **0.80** (1/1.25)'dir.

Tablo 3.2 Kapalı kesitli, guse plakasına kaynaklı uç birleşimleri için kayma aksamaması etkisine bağlı tasarım koşulları.

Standart	Etkili Net Alan, A_e	Kayma Aksamaması Katsayısı, U	Geçerlilik Sınırı
AISC (2005)	$A_e = A_n \cdot U$	Borular için $L_w \geq 1.3D$ için, $U = 1$ $1.3D > L_w \geq D$ için, $U = 1 - \frac{\bar{x}}{L_w}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	$L_w > D$
		Kutular için $L_w \geq H$ için, $U = 1 - \frac{\bar{x}}{L_w}$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B+H)}$	
CSA (2001)	$A_e = A_n \cdot U$	$\frac{L_w}{w} \geq 2$ için, $U = 1$ $2 > \frac{L_w}{w} \geq 1$ için, $U = 0.5 + 0.25 \frac{L_w}{w}$ $1 > \frac{L_w}{w}$ için, $U = 0.75 \frac{L_w}{w}$	Kısıtlama Yok
AIJ (2002)	$A_e = A_g \cdot U$	$U = 0.9$ (borular için üretimdeki belirsizlik)	$L_w \geq 1.2D$

Tablo 3.3 Boru kesitli, guse plakasına kaynaklı uç birleşimleri için blok kesme etkisine bağlı tasarım koşulları.

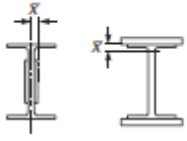


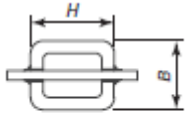
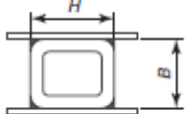
Standart	Blok Kesme (TO) Dayanımı
AISC (2005)	$T_r + V_r = \phi U_{bs} A_{nt} F_u + 0.6 \phi A_{gv} F_y \leq \phi U_{bs} A_{nt} F_u + 0.6 \phi A_{nv} F_u$ $\phi = 0.75$ ve $U_{bs} = 1.0$
CSA (2001)	$T_r + V_r = \phi A_{nt} F_u + 0.6 \phi A_{gv} F_y \leq \phi A_{nt} F_u + 0.6 \phi A_{nv} F_u$ $\phi = 0.90$
EC3 (2005)	$T_r + V_r = \frac{1}{\gamma_{M2}} A_{nt} F_u + \frac{1}{\gamma_{M0}} \frac{1}{\sqrt{3}} A_{nv} F_y$ $\gamma_{M0} = 1.0, \gamma_{M2} = 1.25$

Kayma aksamasının etkisi olarak iki genel yaklaşım kabul edilmiştir. Tablo 3.2’de gösterilen kayma aksaması etkisi için kullanılan U katsayısı, AISC (2005)’de kaynak uzunluğunun (L_w), birleşimin kaçıklığına (\bar{x}) olan oranının fonksiyonu ile hesaplanır. CSA (2001)’daki U katsayısı, kaynak uzunluğunun (L_w) kaynaklar arası çevresel mesafeyle (w) olan oranının bir fonksiyonudur. Her iki yönetmelikte de kaynak uzunluğu arttıkça kayma aksamasının etkileri azalmaktadır.

Amerikan Standardı AISC (2005)’de boru elemanlar için kayma aksaması katsayısı U için, kaynak uzunluğunun eleman çapının 1.3 katından büyük olması istenmekte ($L_w > 1.3D$), Kanada Standardı CSA (2001)’da geçerlilik limiti ise kaynak uzunluğunun kaynaklar arası çevresel mesafenin 2 katından büyük olması ($L_w \geq 2w$) istenmektedir. Bu nedenle Kanada Standardındaki limit daha güvenli kısımda kalmaktadır.

Kaynak uzunluklarının yönetmeliklerde belirtilen limitlerden küçük olması durumunda örneğin; Amerikan Standardı AISC (2005)’ye göre ($L_w < 1.0D$) olması ve Kanada Standardı CSA (2001)’ya göre ($L_w < 1.0w$) olması gibi birleşimin göçme davranışının blok kesmesi (TO) ile yönlendirilerek oluşacağını işaret eder. Alt ve üst limitler için kayma aksaması katsayısı U için tasarım formülleri Amerikan Standardında Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4 Çekme elemanlarının birleşimleri için kayma aksaması faktörleri tablosu (AISC 2005).

TABLE D3.1				
Shear Lag Factors for Connections to Tension Members				
Case	Description of Element		Shear Lag Factor, U	Example
1	All tension members where the tension load is transmitted directly to each of cross-sectional elements by fasteners or welds. (except as in Cases 3, 4, 5 and 6)		$U = 1.0$	---
2	All tension members, except plates and HSS, where the tension load is transmitted to some but not all of the cross-sectional elements by fasteners or longitudinal welds (Alternatively, for W, M, S and HP, Case 7 may be used.)		$U = 1 - \bar{x}/l$	
3	All tension members where the tension load is transmitted by transverse welds to some but not all of the cross-sectional elements.		$U = 1.0$ and $A_n =$ area of the directly connected elements	---
4	Plates where the tension load is transmitted by longitudinal welds only.		$l \geq 2w \dots U = 1.0$ $2w > l \geq 1.5w \dots U = 0.87$ $1.5w > l \geq w \dots U = 0.75$	
5	Round HSS with a single concentric gusset plate		$l \geq 1.3D \dots U = 1.0$ $D \leq l < 1.3D \dots U = 1 - \bar{x}/l$ $\bar{x} = D/\pi$	
6	Rectangular HSS	with a single concentric gusset plate	$l \geq H \dots U = 1 - \bar{x}/l$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$	
		with two side gusset plates	$l \geq H \dots U = 1 - \bar{x}/l$ $\bar{x} = \frac{B^2}{4(B + H)}$	
7	W, M, S or HP Shapes or Tees cut from these shapes. (If U is calculated per Case 2, the larger value is permitted to be used)	with flange connected with 3 or more fasteners per line in direction of loading	$b_f \geq 2/3d \dots U = 0.90$ $b_f < 2/3d \dots U = 0.85$	---
		with web connected with 4 or more fasteners in the direction of loading	$U = 0.70$	---
8	Single angles (If U is calculated per Case 2, the larger value is permitted to be used)	with 4 or more fasteners per line in direction of loading	$U = 0.80$	---
		with 2 or 3 fasteners per line in the direction of loading	$U = 0.60$	---

l = length of connection, in. (mm); w = plate width, in. (mm); \bar{x} = connection eccentricity, in. (mm); B = overall width of rectangular HSS member, measured 90 degrees to the plane of the connection, in. (mm); H = overall height of rectangular HSS member, measured in the plane of the connection, in. (mm)

3.8 Yapısal Paslanmaz Çelik Tasarım Standartları

Uluslararası yapısal paslanmaz çelik standartlarının ilki 1968 yılında Amerika, ardından 1994 Avrupa Standardı, 1995 Japonya, 1997 Güney Afrika ve 2001 yılında Avustralya ve Yeni Zelanda Standardı olarak çıkarılmıştır. Amerikan ve Avrupa standartları gelişen yeni tasarım kurallarıyla revize edilerek sırasıyla 2002 ve 2006 yıllarında güncellenmiştir (Gardner L. 2005).

Yapısal tasarımda karbon çeliği için kullanılan standartların ve tasarım kurallarının farklı özelliklere sahip olan paslanmaz çelik için kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir (Baddoo, N.R. 2003). Çünkü paslanmaz çelik, karbon çeliğine göre farklı bir gerilme-şekil değiştirme davranışına sahiptir. İki çelik tipinin mekanik özellikleri arasındaki en önemli fark gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin paslanmaz çelikte devamlı fakat lineer olmayan, karbon çeliğinde ise açıkça belli olan bir akma noktasının olmasıdır.

Yapısal paslanmaz çelik eleman ve birleşimlerinin hesap ve tasarımı ile ilgili uluslararası standartlar aşağıda verilmiştir.

- 1- Avrupa Paslanmaz Çelik Standardı (*EC3 Design of Steel Structures – Part 1-4: General Rules – Supplementary Rules for Stainless Steels EN 1993-1-4: 2006*)
- 2- Amerikan Paslanmaz Çelik Standardı (*ASCE Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, SEI / ASCE 8-02*)
- 3- Avustralya ve Yeni Zelanda Paslanmaz Çelik Standardı (*AS/NZS 4673-2001*)
- 4- Güney Afrika Paslanmaz Çelik Standardı (*SANS 10162-4 / SABS 0162-4, 1997*)
- 5- Japonya Paslanmaz Çelik Yapı Birliğinin Standardı (Japonca), (*Design and Construction Specifications for Stainless Steel Structures-1995*)

Yukarıda yer alan standartların hiçbirinde, çalışma konusunu teşkil eden, paslanmaz çelik kapalı kesit elemanların, guse plakasına kaynaklı, yarıklı, uç birleşimlerinin tasarımına dair herhangi bir kural bulunmamaktadır.

4 DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMALARI

4.1 Giriş

Tezin önemli bir bölümünü oluşturan deneysel çalışmada, daha önce bahsedildiği gibi tam ölçekli paslanmaz çelik kapalı kesitli bir çekme elemanında plakalı uç birleşiminin statik çekme yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Test kapsamında, iki tip birleşim detayı ile, 6 farklı uzunlukta ($L_w=30, 45, 60, 70 (76), 90$ ve 105mm) kaynak boyu ve iki çeşit (kutu ve boru) kapalı kesit profil kullanılarak 24 adet paslanmaz çelik, KÇKB (*Kapalı Kesit Çelik Çekme Elemanının Kaynaklı Uç Birleşimi*) numunesi İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Malzeme Laboratuvarında, itme ve çekme yükü verebilen 50 ton kapasiteli hidrolik universal test makinası ile statik çekme yükü etkilerek testler yapılmıştır. Numuneler, günümüzde geçerli olan Amerikan (AISC) ve Kanada (CAN/CSA) standartlarının her ikisini birden bu tip birleşimler için öngördüğü limitleri (Tablo 3.2) barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca numunelerin çelik kalitelerinin ve karakteristik malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için malzeme testleri yapılmıştır. Test programında iki değişken dikkate alınmıştır. Bunlar, birleşimin kaynak uzunluğu (L_w) ve kaynak uç dönüşünün olup olmaması durumudur. Kaynak uç dönüşü, yarıklı kısımdaki bağlantı plakası kalınlığına eş uzunlukta kaynağın yapılmasıdır. Numunelerde bu bölgede dönüş kaynağı varsa, RW (*Return Weld*), dönüş kaynağı yoksa NW (*No return Weld*) şeklinde adlandırılmıştır. Bölümün sonunda testlerden elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca bu bölüm kapsamında sonlu elemanlar tabanlı ABAQUS® programı kullanılarak testleri gerçekleştirilen numuneler modellenmiş ve testler simüle edilmiştir.

4.2 Malzeme Deneyleri

Bu çalışma kapsamında deneysel çalışmada kullanılacak numunelerden kesilerek alınan malzeme test kuponları ile çelik malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tüm kuponlar profillerin boyuna doğrultusundan ve

plakaların haddelene yönünden alınmıştır. Ayrıca kutu kesitlerde soğuk şekillendirme sırasında köşe bölgelerinde bulunan çelik malzemenin özellikleri değiştiğinden, köşelerden alınan malzeme örnekleri de ayrıca test edilerek sonuçlar tablo ve grafik yöntemlerle özetlenmiştir.

4.2.1 Kupon Çekme Deneyi

Kupon çekme deneyi, malzemelerin statik çekme yükü altındaki başlıca mekanik özelliklerini belirlemek için uygulanan, standartlaştırılmış basit bir testtir. Deney, mekanik özellikleri belirlemek amacıyla standartlara (TS EN ISO 6892-1) göre hazırlanmış bir deney numunesinin, tek ekseninde, belirli bir yükleme hızında ve sabit ortam sıcaklığında genellikle kopuncaya kadar çekilmesiyle son bulan bir çalışmadır.

Belirlenebilen genel mekanik özellikler:

- a) Elastisite katsayısı (E)
- b) Elastiklik sınırı
- c) Akma gerilmesi (R_p)
- d) Çekme gerilmesi (Maksimum gerilme, R_m)
- e) Uzama (% , A)
- f) Kesit daralması (% , Z)

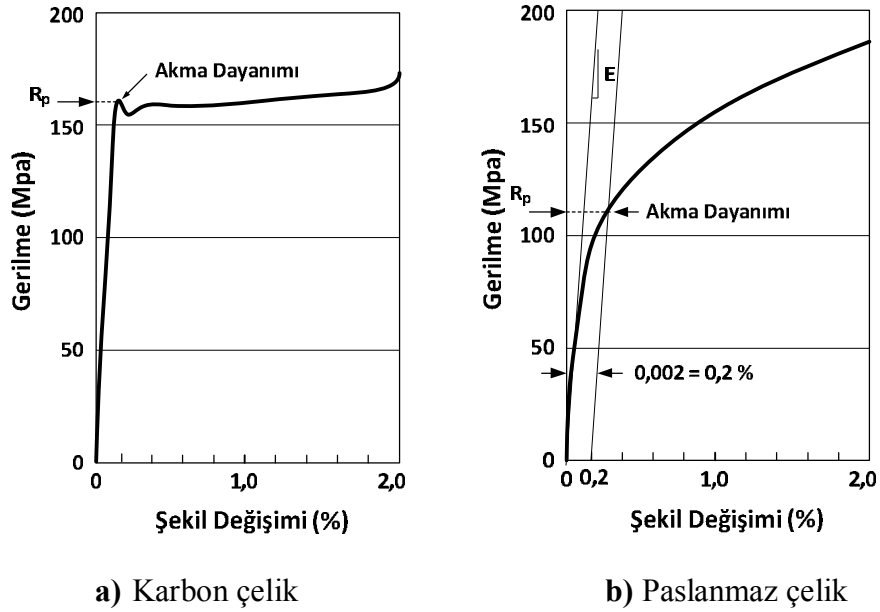
Elastisite katsayısı (E) : Gerilme (σ) ile birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişkiyi belirleyen ve malzemenin temel özelliği olan bir sabittir.

$$E = \sigma \epsilon \quad (4.1)$$

Elastiklik sınırı : Elastik şekil değişiminin görüldüğü en yüksek gerilme değerine denir.

Akma Gerilmesi (R_p) : Uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına rağmen plastik şekil değişiminin önemli ölçüde arttığı ve grafik eğrisinin yön değişimi gösterdiği andaki gerilme değeridir. Karbon çelik malzemesindeki gerilme-şekil değiştirme grafiğinde bu bölge açık bir şekilde belli olurken (Şekil 4.1.a), paslanmaz çelikte bu kadar anlaşılır değildir (Şekil 4.1.b). Dolayısıyla

paslanmaz çeliğin akma gerilmesi, grafik üzerinde, Şekil 4.1.b.'deki yöntem uygulanarak bulunur. Bu yöntemle göre, elastik bölgede belirlenen, bir ucu 0 da olan, E eğimindeki doğru parçası şekil değiştirme ekseninde sağa doğru %0.2 birim kaydırılarak doğrunun test eğrisini kestiği nokta akma gerilmesi değeri olarak kabul edilir.



Şekil 4.1 Gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları.

Çekme Gerilmesi (R_m) : Numunenin kopmadan dayanabileceği ve diyagramdaki en yüksek gerilme değeridir.

Uzama (%) : Son ölçü uzunluğu ile ilk ölçü uzunluğunun farkının ilk ölçü uzunluğuna oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$A(\%) = \frac{L_u - L_o}{L_o} 100 \quad (4.2)$$

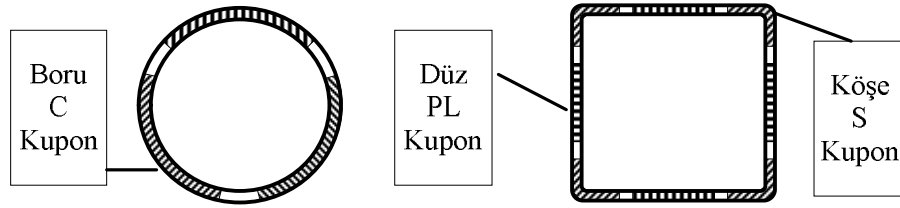
Kesit daralması (%) : İlk kesit alanı ile son kesit alanı farkının ilk kesit alanına oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$Z(\%) = \frac{S_o - S_u}{S_o} 100 \quad (4.3)$$

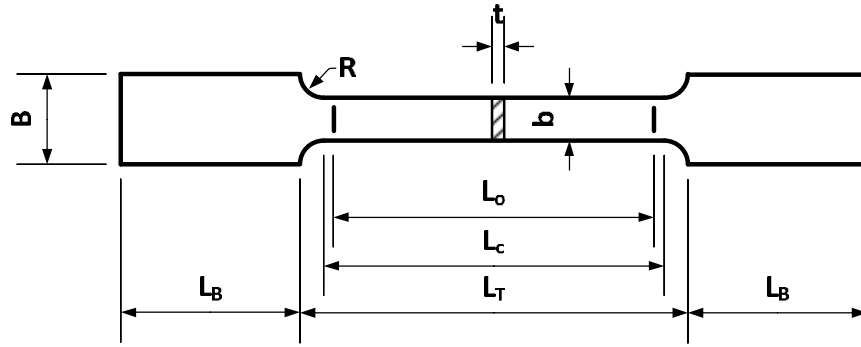
4.2.2 Kupon Deney Numunesi

TS EN ISO 6892-1 standardına göre kupon numuneleri, EN10088 (X5CrNi18-10) paslanmaz çelik profiller üzerinden profil ve haddeleme doğrultusuna paralel kesilerek alınmış ve hazırlanmıştır. Deney, İTÜ, Malzeme Laboratuvarında ve sıcaklığın 20-23 °C arasında olduğu şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Numunelerden alınan test kuponu örneklerinin çıkarıldığı bölgeler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Çekme numunelerinin ölçüleri Şekil 4.3’te ve Tablo 4.1’te verilmiştir. Ayrıca test kuponlarının görünüşleri de Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.2 Test kuponlarının numune üzerinden çıkarıldığı kısımlar.

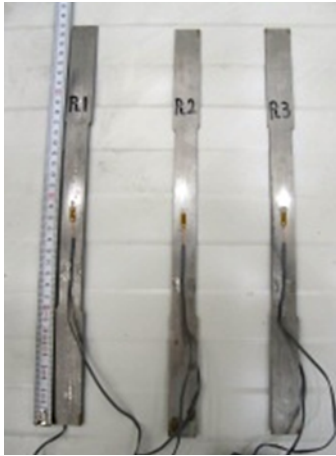


Şekil 4.3 Tipik test kuponu ölçüleri.

Kupon testleri boyunca tüm okumalar uygun ve elverişli aralıklarla alınmıştır. Bu okumalarda akma dayanımı, kopma dayanımı ve uzama miktarları elde edilmiştir. Son boy uzaması kopma yaşandıktan sonra ölçülerek bulunmuştur.

Tablo 4.1 Test kuponlarının geometrik ölçüleri.

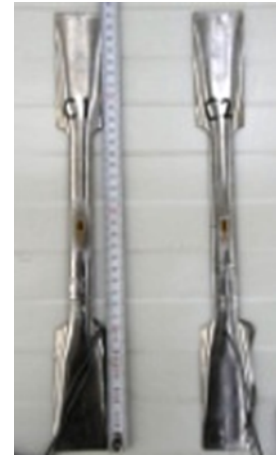
Kupon Örneğinin Alındığı Bölge	Et Kalınlığı t (mm)	Boyun Kısımının Genişliği b (mm)	Baş Kısımının Genişliği B (mm)	Baş Kısımının Uzunluğu L_B (mm)	Geçiş Yarıçapı R (mm)	İlk Ölçü Uzunluğu L_o (mm)	Boyun Kısımının Uzunluğu L_c (mm)	Toplam Uzunluk L_T (mm)
Düz Bölge Kuponu PL	2	20	30	100	5	150	160	170
Köşe Kuponu S	2	10+10	20+20	100	10	140	150	170
Boru Kuponu C	2	20	40	100	10	140	150	170



a) Düz bölge kuponu



b) Köşe bölge kuponu



c) Boru kuponu

Şekil 4.4 Profillerden alınan test kuponları.

Çekme testi yapıldıktan sonra numunelerin kopmuş halleri Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5 Çekme testi sonrası kopmuş kupon görüntüleri.

4.2.3 Kupon Çekme Testi Sonuçları

Numelerden alınmış kupon örneklerinin çekme testi sonuçları Tablo 4.2, 4.3, 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Düz bölgeden alınmış örneklerin çekme testi sonuçları.

Ölçüm Sonuçları	P.Ç. Kutu Profil		
	PL1	PL2	PL3
Et Kalınlığı (mm)	2	2	2
Genişlik (mm)	19	19	20
Kesit Alanı (mm ²)	38	38	40
Paralel Boy (mm)	160	160	160
İlk Ölçüm Boyu (mm)	150	150	150
Son Ölçüm Boyu (mm)	202	196	203
Uzama Oranı %	34.6	31.0	35.0
Elastisite Modülü, E (kN/mm ²)	205	197	200
Maksimum Yük, F_m (kN)	28.9	25.0	28.2
Akma Dayanımı, R_p (N/mm ²)	430	420	440
Çekme Dayanımı, R_m (N/mm ²)	681	657	706

Tablo 4.3 Köşe bölgeden alınmış örneklerin çekme testi sonuçları.

Ölçüm Sonuçları	P.Ç. Kutu Profil		
	S1	S2	S3
Et Kalınlığı (mm)	2	2	2
Genişlik (mm)	17	18	17
Kesit Alanı (mm ²)	34	36	34
Paralel Boy (mm)	150	150	150
İlk Ölçüm Boyu (mm)	140	140	140
Son Ölçüm Boyu (mm)	172	181	182
Uzama Oranı %	23.3	29.1	30.0
Elastisite Modülü, E (kN/mm ²)	203	198	197
Maksimum Yük, F_m (kN)	24.3	27.5	25.7
Akma Dayanımı, R_p (N/mm ²)	400	410	400
Çekme Dayanımı, R_m (N/mm ²)	716	764	755

Tablo 4.4 Boru üzerinden alınmış örneklerin çekme testi sonuçları.

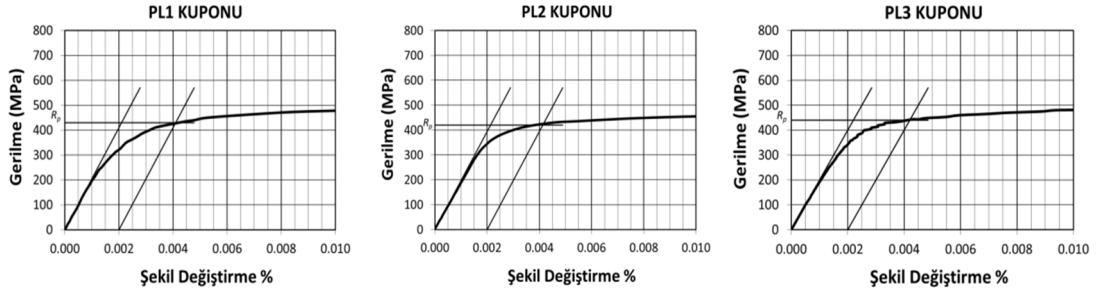
Ölçüm Sonuçları	P.Ç. Boru Profil		
	C1	C2	C3
Et Kalınlığı (mm)	2	2	2
Genişlik (mm)	19	20	20
Kesit Alanı (mm ²)	38	40	40
Paralel Boy (mm)	150	150	150
İlk Ölçüm Boyu (mm)	140	140	140
Son Ölçüm Boyu (mm)	201	207	206
Uzama Oranı %	43.8	48.1	47.3
Elastisite Modülü, E (kN/mm ²)	195	190	196
Maksimum Yük, F _m (kN)	25.5	26.0	25.2
Akma Dayanımı, R _p (N/mm ²)	315	295	275
Çekme Dayanımı, R _m (N/mm ²)	670	650	630

Kutu profillerin köşelerinden alınmış kupon örneklerinin (S kuponları) test sonuçlarına bakıldığında (Tablo 4.3) soğuk şekillendirme işleminin malzemenin karakteristik özelliklerini değiştirdiği gözlenmiştir. Ortalama sonuçlara göre akma dayanımında %5-10 oranında azalma, çekme dayanımında da %2-16 arası artış olduğu görülmektedir.

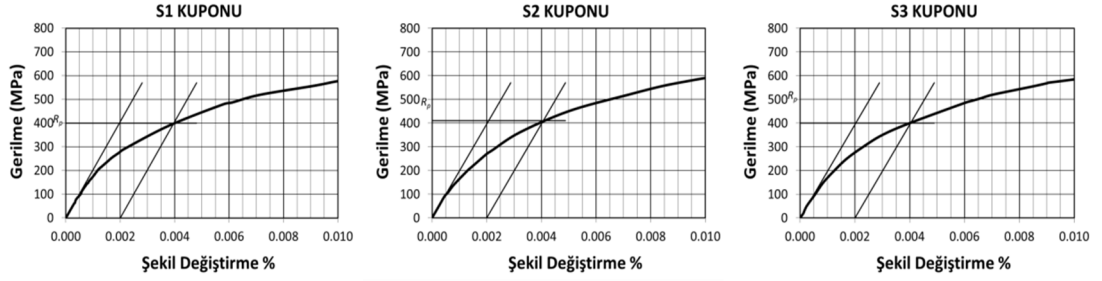
Kupon deneyleri ile ilgili sonuç grafikleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir (Tablo 4.5 ve Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9).

Tablo 4.5 Kuponların çekme testi genel sonuçları.

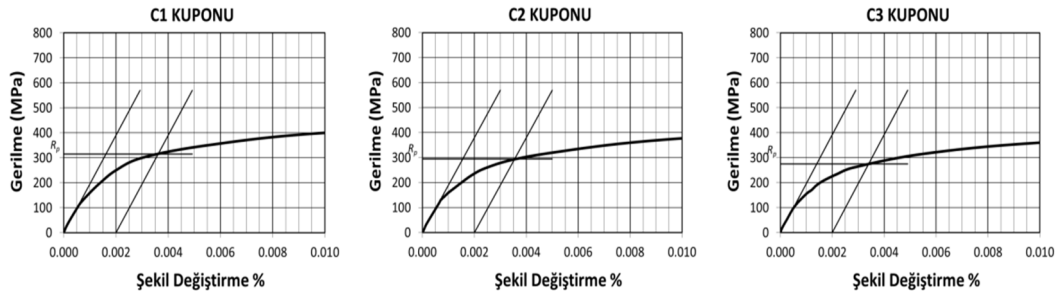
Çelik Tipi	Kupon Tipi	Akma Dayanımı R _p (N/mm ²)	Kopma Dayanımı R _m (N/mm ²)	Uzama %	Elastisite Modülü E (kN/mm ²)
Paslanmaz Çelik EN10088 (X5CrNi18-10) AISI (304)	PL1	430	681	34.6	205
	PL2	420	657	31.0	197
	PL3	440	706	35.0	200
	S1	400	716	23.3	203
	S2	410	764	29.1	198
	S3	400	755	30.0	197
	C1	315	670	43.8	195
	C2	295	650	48.1	190
	C3	275	630	47.3	196



Şekil 4.6 PL Kuponları test grafikleri.



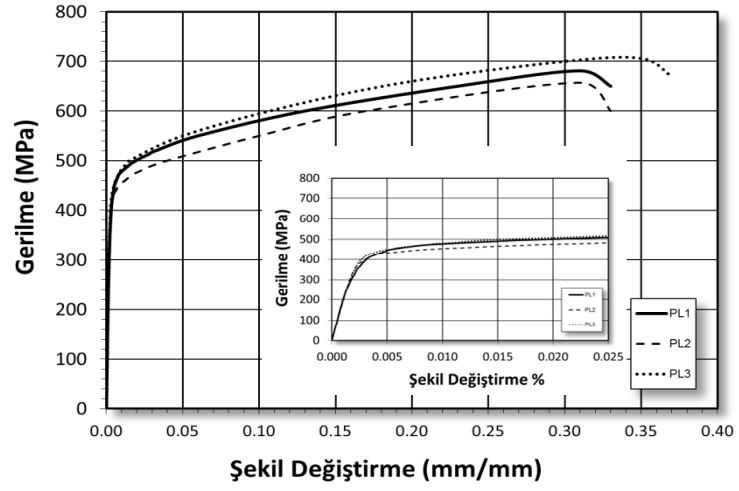
Şekil 4.7 S Kuponları test grafikleri.



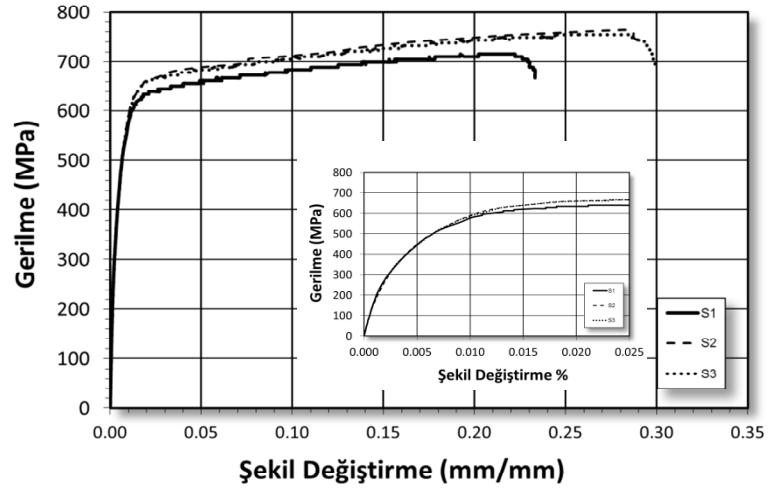
Şekil 4.8 C Kuponları test grafikleri.

Kupon testlerinin sonuçları, kendi aralarındaki ilişkilerin daha iyi görülmesi için ortak grafikler üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.9).

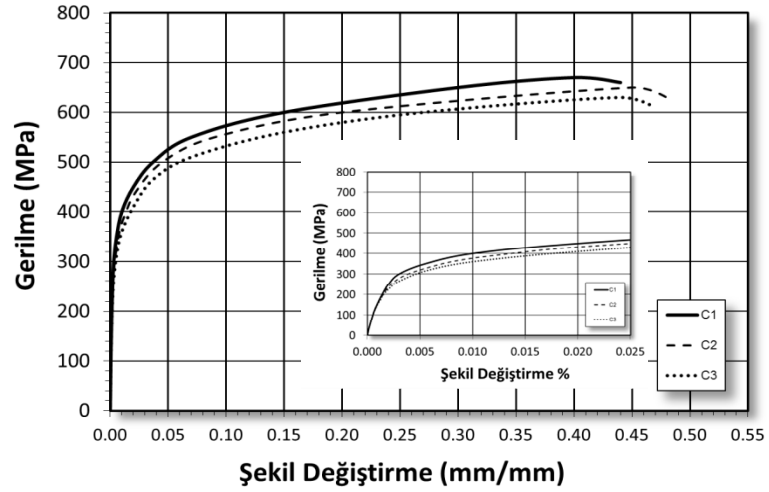
PL KUPONLARI



S KUPONLARI



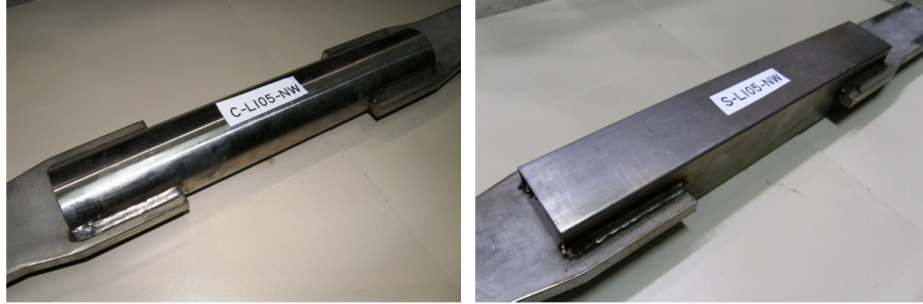
C KUPONLARI



Şekil 4.9 Kuponların grup test grafikleri.

4.3 KÇKB Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışma için toplam 24 adet test numunesi; EN10088(X5CrNi18-10), AISI(304), kalitesinde östenitik paslanmaz çelikten imal edilmiş, yarıklı, birleşim plakasına kaynaklı kutu profil ve boru elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 4.10).

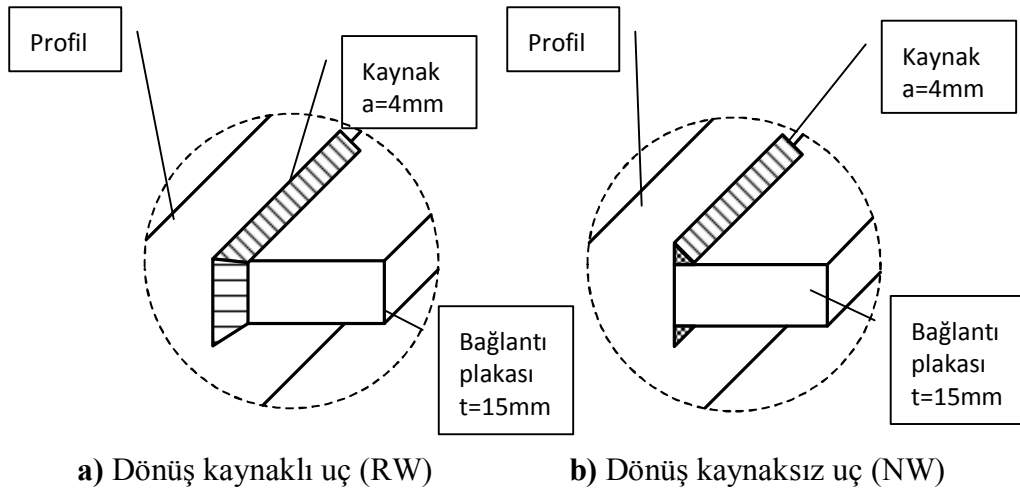


Boru profil

Kutu profil

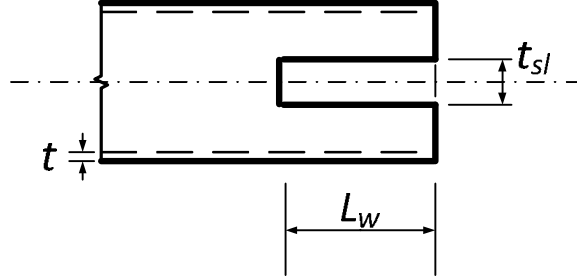
Şekil 4.10 Boru ve kutu profil numuneler.

Test numuneleri, paslanmaz çelik konstrüksiyon işleri ile ilgili özel imalat yapan bir atölye tarafından üretilmiştir. Hazırlanan 24 adet numunenin 12 tanesi boru (çap=76.1mm, t=2mm), diğer 12 tanesi 70.70.2mm ebatlarında kare kesitli kutu profildir. Her iki gruptaki numunelerde iki ayrı kaynak ucu bitişi uygulanmıştır. Bunlardan bir tanesi dönüş kaynaklı NW (No Return Weld), diğeri ise dönüş kaynaklı RW (Return Weld) olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.11).



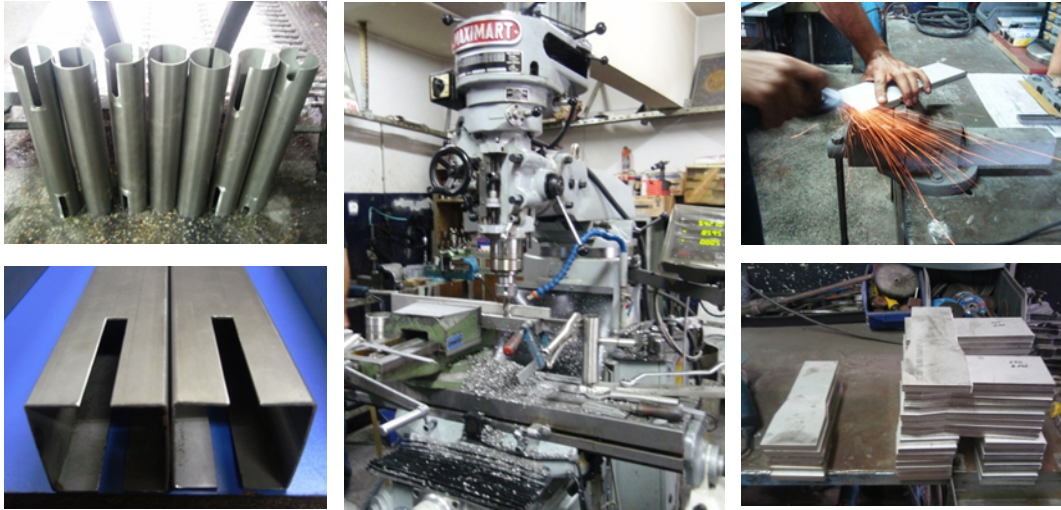
Şekil 4.11 (a) RW ve (b) NW uç kaynak bitişleri.

Tüm boru ve kutu profiller, 450mm.'lik eşit boylarda kesilmiştir. Profillerin her iki ucunda 15mm'lik plaka kalınlığının yerleşebilmesi için ($t_{sl}=16\text{mm}$) kadar bir genişlikte ve çeşitli kaynak uzunluklarına göre ($L_w=30, 45, 60, 70, (76), 90$ ve 105mm) yarık (slot) açılmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Profilde yarık ölçüleri.

Numunelerin uçlarında açılan yarıklarda, gerekli düzeltme ve temizlik işlemleri yapılmıştır. Birleşim plakaları, 15mm kalınlığındaki paslanmaz çelik plakalardan lazer kesim tekniği ile hassas şekilde ölçüsüne uygun olarak kesilip çıkarılmıştır. Plakalar, $a=4\text{mm}$ 'lik kaynak kullanılarak profillerle birleştirilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Numunelerin hazırlanma süreci.

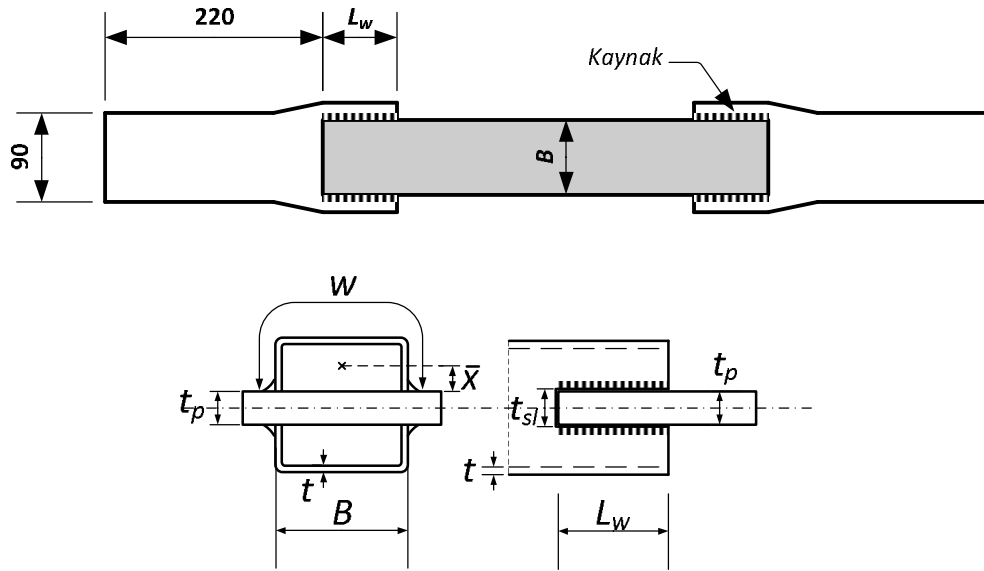
Test kapsamındaki östenitik paslanmaz çelik numuneler, rutil tipli elektrod kullanılarak kaynakla birleştirilmiştir. Kaynak kalitesi ile ilgili etiket bilgisi Şekil 4.14'te verilmiştir.

FOX SAS 2 - A		Korozyona Dayanıklı Paslanmaz Elektrod	
TS 2716 EN 1600 : E 19 9 Nb R 32	Mekanik Özellikleri:	Re : min 390 N/mm ²	
DIN 8556 : E 19 9 Nb R 23		Rm : 570-740 N/mm ²	
AWS A 5.4 : E 347-16		As : min %30	
		Av : min 47 J	
Dikişin Analizi% :			
C : 0.03	Mo : 19.5	Ø mm	Amper
Si : 0.8	Ni : 10	2.00	40-60
Mn : 0.8	+ Nb	2.50	50-90
		3.20	80-120
		4.00	110-160
Doğru akım pozitif (+) kutupta veya dalgalı akımda kullanılır.			

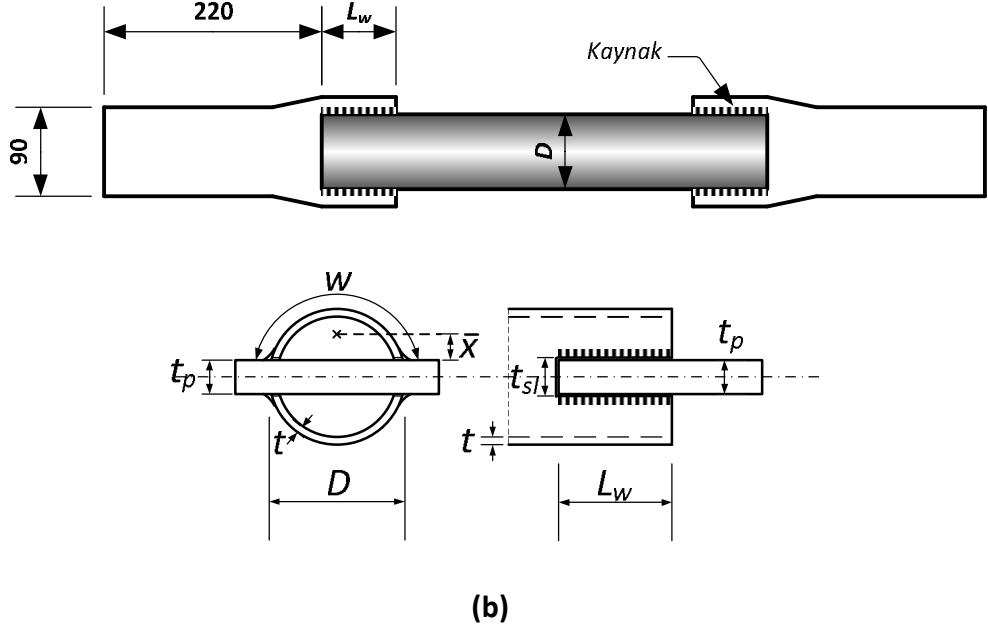
FOX SAS 2 - A		Korozyona Dayanıklı Paslanmaz Elektrod	
Krom - Nikelli çeliklerin ve çelik dökümlerin kaynağında kimyasal zorlama gören asit, buhar, gaz ve su armatürlerinin kaynağında, kaplamalı sacların kaplama taraflarının kaynağında kullanılır.			
Rutil tipli, Niobiyum ile stabilize edilmiş bir elektroddur. + 400°C'a kadar işletme sıcaklıklarına dayanıklıdır.			
Elektrodlar 300°C'de 2 saat kurutulduktan sonra kullanılmalıdır.			
Türk Malı			

Şekil 4.14 Kullanılan kaynak özellikleri.

Boru profiller sıcak haddeleme esnasında çekme yöntemiyle üretilmiş olduğundan profil üzerinde herhangi bir kaynak dikişi bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu durum, birleşim plakaları yarıklarının açılmasında ve kaynaklanmasında sorun olmamıştır. Ancak kutu profillerin üretimi, soğukta şekil verilmiş ve ucuca getirilmiş çelik levha ağızlarının kaynaklanmasıyla oluşturulmuştur. Bu tip tüpler dikişli profil diye anılmaktadır. Kutu profil yarıklarının açılmasında kaynak dikişinin olduğu yüzlerden kaçınılarak temiz kenarlar kullanılmıştır. Dolayısıyla test boyunca karşılaşılabilecek olası bir başka hasar ve davranışın önüne geçilmiştir. Numunelerin üretim ve geometrik detaylarının gösterimi Şekil 4.15'te verilmiştir.

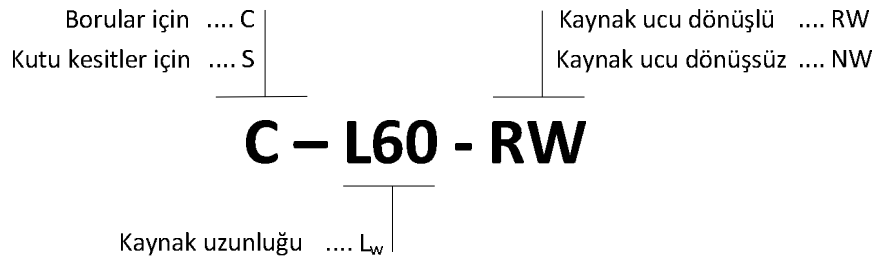


(a)



Şekil 4.15 (a) kutu ve (b) boru kesitli numuneler için şematik gösterim.

Numunelerin isimlendirmesi için belirlenen etiket şablonu Şekil 4.16'da verilmiş olup ilgili geometrik özellikler Tablo 4.8'de özetlenmiştir.



Şekil 4.16 Numune isimlendirmesi.

Hazırlanan numunelerin boyut kontrolleri yapılmış, toleransların kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüş ve analitik hesaplamalarda teorik ölçüler kullanılmıştır. Örneğin C-L30 numuneleri için kaynak uzunluğu 30mm alınmıştır.

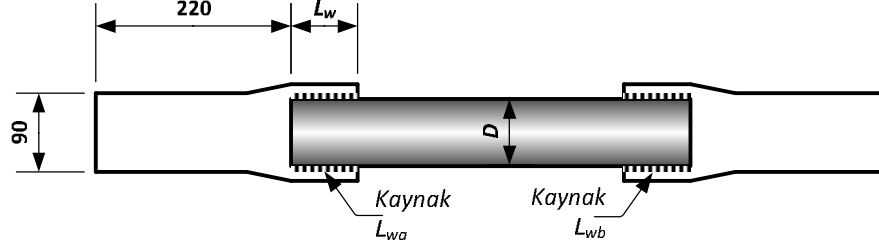
Tablo 4.6 Deney numuneleri geometrik özellikleri.

Numune	L (mm)	D veya H (mm)	L _w (mm)	t (mm)	w (mm)	L _w /w
C-L30	450	76.1	30	2	104.54	0.287
C-L45			45			0.430
C-L60			60			0.574
C-L76			76			0.727
C-L90			90			0.861
C-L105			105			1.004
S-L30	450	70	30	2	122.42	0.245
S-L45			45			0.368
S-L60			60			0.490
S-L70			70			0.572
S-L90			90			0.735
S-L105			105			0.858

Numune profilleri için yapılan ölçüm kontrollerinde, borularda dış çap $D=76.1$ mm ve et kalınlığı $t=2$ mm, kutu profillerde dış ebatların 70×70 mm ve et kalınlığının $t=2$ mm oldukları belirlenmiş kayda değer ölçü farklılığı olmadığı için hesaplarda ve tasarımda anılan değerler kullanılmıştır. Tablo 4.7 ve 4.8’de, profil boyu L , uçlardaki kaynak boyları L_w olarak belirtilmiştir. Numunenin uçları a ve b şeklinde isimlendirilmiştir (Şekil 4.17). A ve b bölgesindeki dörder adet toplam sekiz kaynağın, plaka kenarı referans alınarak sadece uzun doğrultudaki boyları (L_w) ölçülmüştür. Kaynak uzunluklarının ortalamaları alınarak, her iki uç için L_{wa} ve L_{wb} olarak Tablo 4.7 ve 4.8’de belirtilmiştir. Uç kaynağı olan (RW) numunelerinde kaynak uzunluklarına dönüş kaynağının boyu ilave edilmemiştir. Deneysel çalışmada sadece kaynak uzunluğunun birleşimin dayanımı ve davranışına olan etkisi incelendiğinden, kaynak uzunluğu hariç kaynak tipi, kalınlığı, profil tipi ve ölçüleri, guse plakaları kalınlığı ve tipi ve birleşim simetrisi değiştirilmemiştir.

$$L_{wa} = \frac{L_{wa1} + L_{wa2} + L_{wa3} + L_{wa4}}{4} \quad (4.4)$$

$$L_{wb} = \frac{L_{wb1} + L_{wb2} + L_{wb3} + L_{wb4}}{4} \quad (4.5)$$



Şekil 4.17 Kaynak uzunluklarının birleşimdeki yerleri.

Tablo 4.7 Boru deney numunelerinin kaynak uzunluğu kontrolleri.

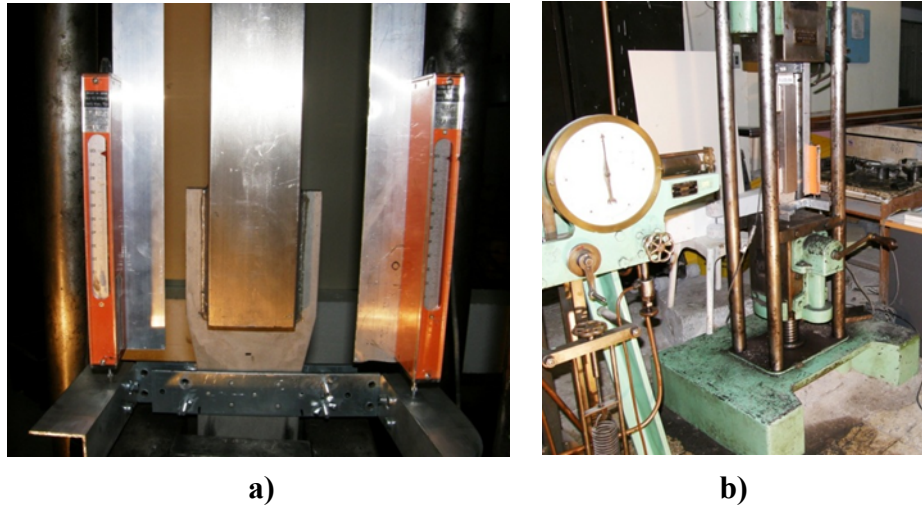
Numune	L (mm)	L_{wa} (mm)	L_{wb} (mm)
C-L30-RW	451	31	30
C-L45-RW	450	45	46
C-L60-RW	450	61	60
C-L76-RW	451	74	75
C-L90-RW	452	91	90
C-L105-RW	450	105	104
C-L30-NW	448	30	30
C-L45-NW	450	46	44
C-L60-NW	449	59	60
C-L76-NW	450	76	77
C-L90-NW	451	92	91
C-L105-NW	451	105	106

Tablo 4.8 Kutu deney numunelerinin kaynak uzunluğu kontrolleri.

Numune	L (mm)	L_{wa} (mm)	L_{wb} (mm)
S-L30-RW	450	30	31
S-L45-RW	449	46	46
S-L60-RW	449	61	59
S-L70-RW	451	72	71
S-L90-RW	450	92	89
S-L105-RW	451	105	105
S-L30-NW	449	31	30
S-L45-NW	450	46	45
S-L60-NW	449	61	61
S-L70-NW	450	71	69
S-L90-NW	450	91	89
S-L105-NW	451	106	107

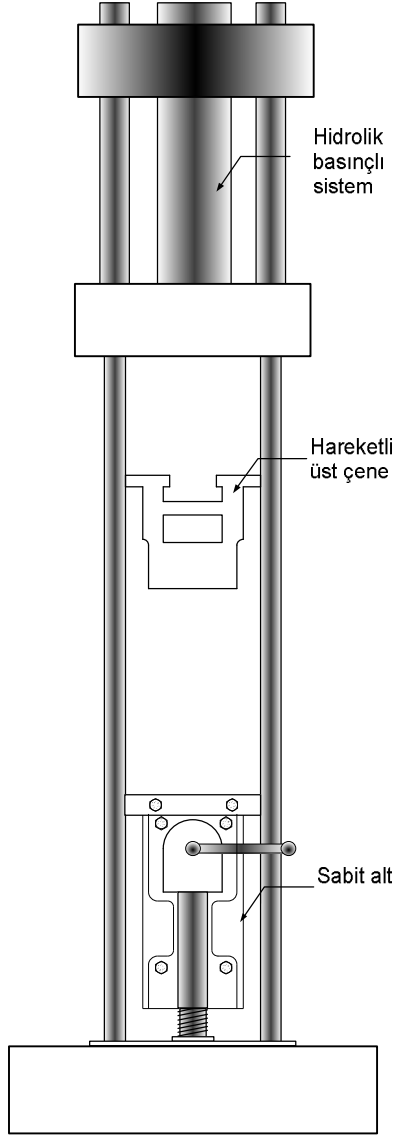
4.4 Test Düzeneği ve Yükleme Sistemi

Deneysel çalışma kapsamında, EN10088(X5CrNi18-10), AISI(304) kalitelerindeki paslanmaz çeliktenimal edilmiş, yarıklı, guse plakasına kaynaklı kutu profil ve boru elemanlardan oluşan toplam 24 adet numune, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Malzeme Laboratuvarında, 50 ton kapasiteli (*Alfred J.AMSLER-Laffon&Sohn No:106 - İsveç*) itme ve çekme özelliklerine sahip, manuel kontrollü, hidrolik üniversal test makinası ile statik çekme yükü etkitilerek deney yapılmıştır. Yer değiştirme kontrolü ve ölçümünde, numunenin alt ve üst ucunda bulunan birleşim plakalarına montajlanmış özel aparata bağlı sağda ve solda olmak üzere iki adet (*SDP-100C, 50x10⁻⁶/mm, Tokyo Sokki Kenkyujo Co.Ltd.*) 1/20000 hassasiyetinde ölçüm yapabilen lineer değişkenli yer değiştirme ölçüm (*LVDT-Linear Variable Differential Transformer*) cihazı kullanılarak yer değiştirmeler okunmuştur. Yük kontrolü ve ölçümü ise test makinesine yük aktaran hidrolik sistem üzerindeki yükleme göstergesinden takip edilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 a) Yer değiştirme ölçerlerin yerleşimi **b)** Yük ölçüm düzeneği.

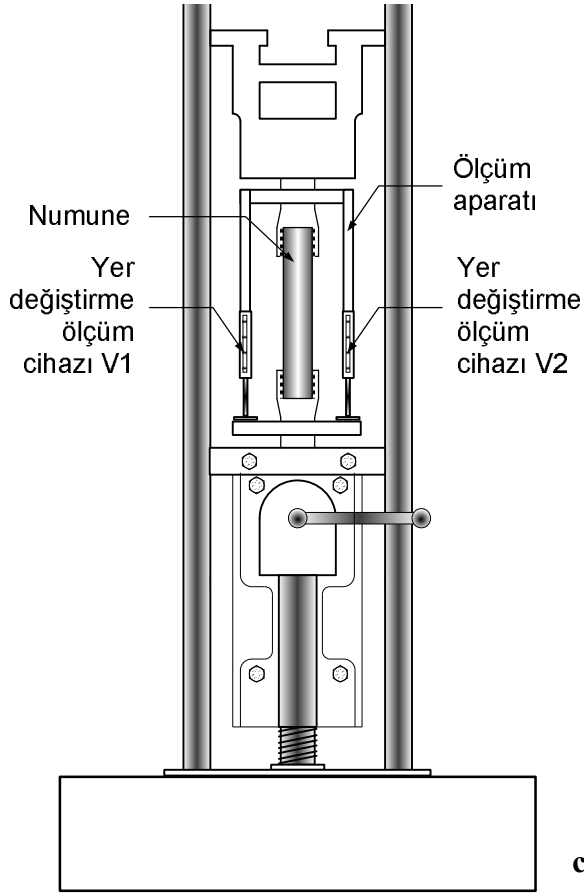
Testler Şekil 4.19'da gösterilen test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Yükleme, test numunesinin eksenine boyunca, hızı 0.2mm/sn yer değiştirme yapacak şekilde statik olarak uygulanmıştır. Test sırasında numunelerde ulaşılan maksimum çekme yükünden sonra da yüklemeye devam edilmiş olup oluşan hasarların gelişimi takip edilmiştir.



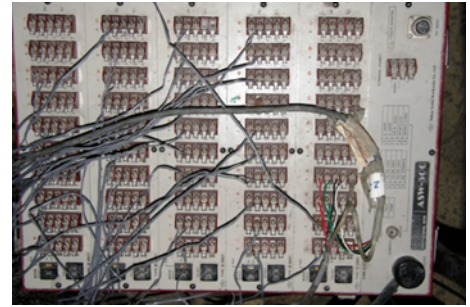
Şekil 4.19 Üniversal hidrolik test makinası ve düzeneğin kurulması.

Yükleme, eleman eksenini boyu doğrultusunda düşey olarak ve numune enkesitinde çekme etkisi oluşturacak şekilde uygulanmıştır. Test esnasında numunelerde oluşabilecek simetrik olmayan; yüklenme, şekil değiştirme ve yer değiştirmelerin önüne geçmek için üzerindeki birleşim plakaları test cihazının alt ve üst kavrama çenelerinin ortasına gelecek şekilde hassas biçimde yerleştirilmiş ve yüklemenin numune ekseninde toplanması sağlanmıştır.

Numunenin test makinasına yerleşimi ve diğer cihazların görünüşleri Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



a) TDS-302 (Data Logger)



b) ASW-50C (Switch Box)

c) Test düzeneğinin şematik şekli

şekil 4.20 Test düzeneğinin bileşenleri.

4.5 Deneysel Gözlemler

Deneysel alışma kapsamındaki numuneler, hazırlanan düzeneğe yerleştirilip, gerekli ölçü ve yerleşim kontrolleri yapıldıktan sonra deneylere başlanmıştır. Tüm deneyler başlangıçtan sona kadar kamera ve fotoğraflarla kayıt altına alınmıştır. Deneyler boyunca herhangi bir aksaklık ve sorun yaşanmamıştır. Deneylerin tümünde sonuca ulaşılmış ve başarıyla bitirilmiştir. Deneysel davranış ile ilgili gözlemler boru ve kutu numunelerden seçilen dört numune için ayrıntılı bir tarifile aşağıda açıklanmıştır. Tüm numunelerin deneysel davranışı ile ilgili genel tespitler ile ortaya çıkan yük- yer değiştirme eğrileri arasındaki karşılaştırmalara ilerleyen sayfalarda yer verilmiştir.

4.5.1 Boru Profil Numuneleriyle İlgili Deneysel Gözlemler (C-Lxx-NW,RW)

Paslanmaz çelik boru deneylerinde, sırasıyla kaynak uzunluğu 30mm'den 105mm'ye kadar olan numunelerin deneyleri yapılmıştır. Aşağıda en kısa kaynak boyuna sahip boru profil birleşimler ile ilgili deneysel gözlemler verilmiştir.

4.5.1.1 C-L30-NW Numunesi Deney Gözlemi

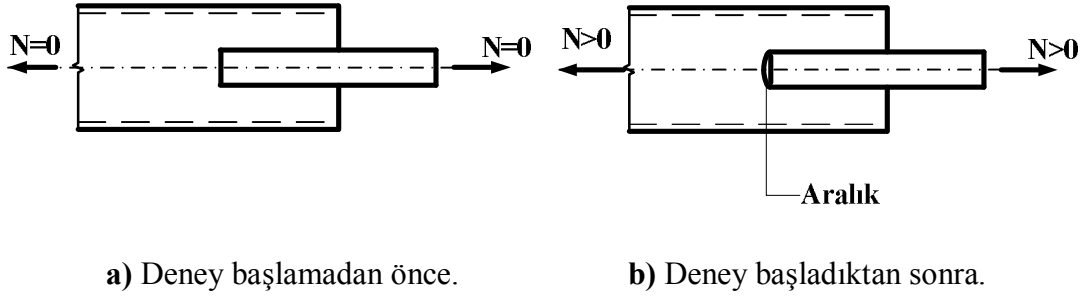
C-L30-NW numunesi, birleşim dayanımı en düşük ($N_{Analitik}=42.5$ kN) olarak hesaplanmış elemandır (Şekil 4.21). Birleşimde kaynak uç dönüşü bulunmamaktadır (NW). Deney için gerekli düzenlemeler yapıldıktan ve ölçüm cihazları bağlandıktan sonra yükleme başlatılmış, yük-yer değiştirme parametreleri ve hasar takibi gözlemleriyle deney sonlandırılmıştır.



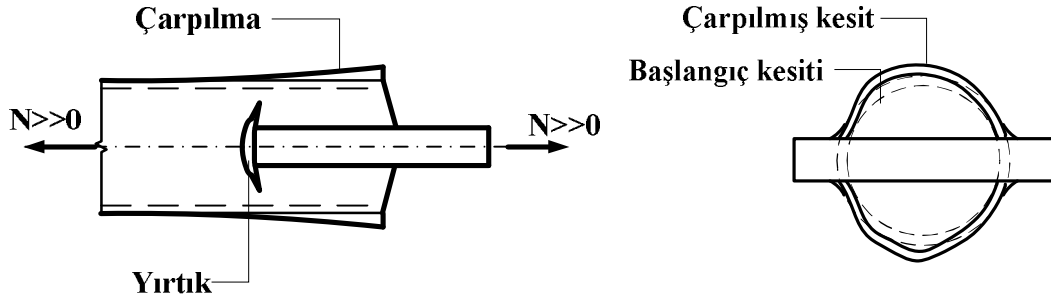
Şekil 4.21 C-L30-NW, deney numunesi.

Yükleme başladıktan sonra numuneye etkitilen yükün ve aksenal uzamaların sayısal değerleri, kaynak dikişleri, yarık dibi ve numune davranışı takip edilmiştir. Kaynaklanmamış yarık diplerinde başlangıçta plakaya bitişik olup herhangi bir aralık görünmezken (Şekil 4.22.a), yüklemenin $N=60$ kN ve $\delta=1.0$ mm olduğu seviyelerde alt ve üstteki tüm yarık diplerindeki aralıklar gözle görülür şekilde açılmaya başlamıştır (Şekil 4.22.b). Yüklemenin 90 kN, seviyesine kadar alt ve üst bölgelerdeki ortalama aralık boşluğu 2mm civarında olduğu gözlenmiştir. Bu seviyedeki toplam yer değiştirme $\delta=3.2$ mm'dir. 90kN'dan sonra üstteki aralıklar,

alttaki aralıklara göre belirgin bir şekilde genişleyerek ilk yırtılma hasarının burada olacağı belirtilerini vermiştir. Yüklemenin bu seviyesinden itibaren profil ağız kesitlerinde gözle görülür eğilme ve çarpılmalar ve kesit düzleminde ovalizasyonlar meydana gelmeye başlamış ve bu durum test sonuçlanıncaya kadar artarak devam etmiştir. Bu hasarlar test sonunda da kalıcı bir duruma gelmiştir (Şekil 4.23).



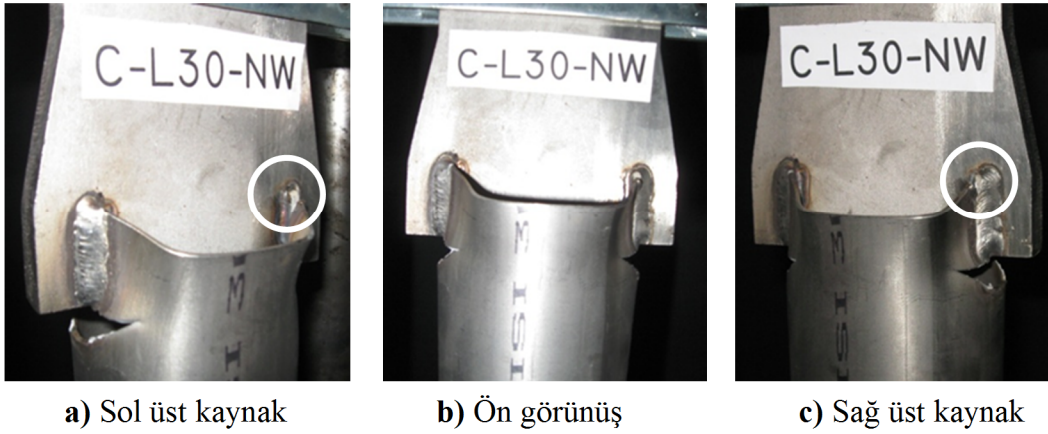
Şekil 4.22 C-L30-NW numunesi yarı dibi genişlemesi.



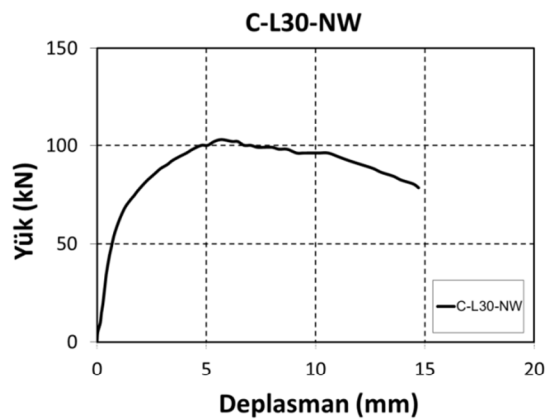
Şekil 4.23 C-L30-NW numunesi profil ağız eğikliği ve kesitte çarpılma.

Yükün artmasıyla, gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarının en üst düzeye çıktığı $N_{Test}=103\text{kN}$ 'da üst solda ilk yırtık oluşmuştur. Yüklemeye devam edildiğinde numunedeki dayanım, 103kN 'dan düşmeye başlamış ve 96kN seviyelerinde üst sağda ikinci yırtılma başlamıştır. Maksimum yük değerinden sonra numune uzun bir süre yırtıkların gelişimine paralel 103kN ve 5.70mm yer değiştirmeden, 78.5kN , 14.7mm 'lik yer değiştirmesine kadar gittikçe azalan aksenal çekme yükünü taşımıştır. Bu süre içinde yırtılmaların gelişimi birbirlerine denk görünüş ve davranışta deney sonuna kadar devam etmiştir (Şekil 4.24). Dönüş kaynağının olmadığı yerde çatlakla başlayan ve yırtılmayla devam eden tüm hasarlar profil ağızına doğru ilerlemiştir. Yüklemede, en büyük çekme dayanımı, $N_{Test}=103\text{kN}$ 'a

erişilmiş ve bu yük karşılığında $\delta_{Nest}=5.7\text{mm}$ yer değiştirme elde edilmiştir. Deneysel sonuna doğru sağ üst profil ucunda ayrışma başlangıcı gözlenmiştir (Şekil 4.24a ve c). Üst bölgede oluşan yırtılma hasarı gelişerek test sonuna gelinmiştir. Hasar tipi blok kesme yırtılmasıdır (*Tear-out Failure, TO*). Bu durumdan dolayı alttaki birleşimde herhangi bir hasar gelişimi tespit edilmemiştir. Çekme dayanımı 103 kN'dan düşerek $N=78.5\text{ kN}$ 'a gerilemiş ve toplam yer değiştirme $\delta_{max}=14.7\text{mm}$ seviyesindeyken deney sonlandırılmıştır. Yük-yer değiştirme grafiklerinin hazırlanmasında iki adet yer değiştirme ölçüm cihazından elde edilen uzamaların ortalamaları dikkate alınmıştır. Test boyunca elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.24 C-L30-NW deney sonrası üst kısım hasar durumu.



Şekil 4.25 C-L30-NW, deney numunesi ve yük-yer değiştirme grafiği.

4.5.1.2 C-L30-RW Numunesi

C-L30-RW numunesinin minimum birleşim dayanımı ($N_{Analitik}=65.1$ kN) olarak hesaplanmıştır. Kaynak uç dönüşü (RW) bulunmaktadır (Şekil 4.26). Deney için gerekli düzenlemeler yapıldıktan ve ölçüm cihazları bağlandıktan sonra yükleme başlatılmış, yük-yer değiştirme parametreleri ve hasar takibi gözlemleriyle deney sonlandırılmıştır.

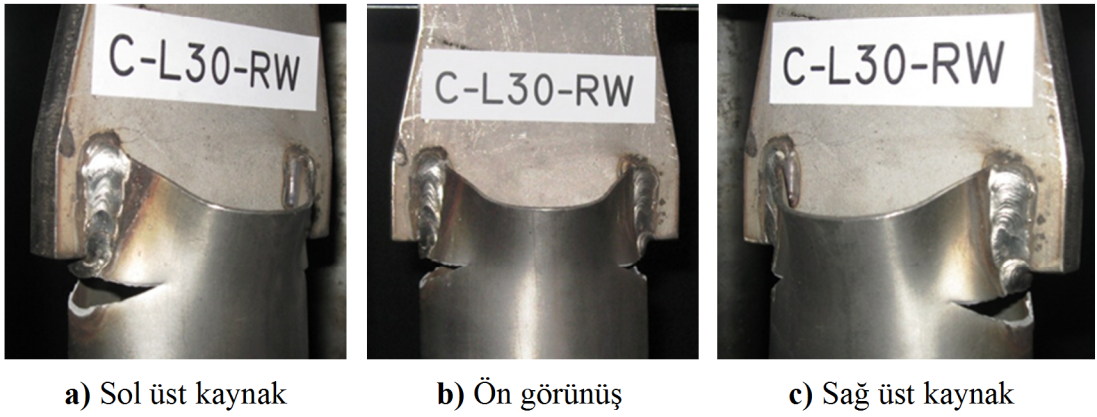


Şekil 4.26 C-L30-RW, deney numunesi.

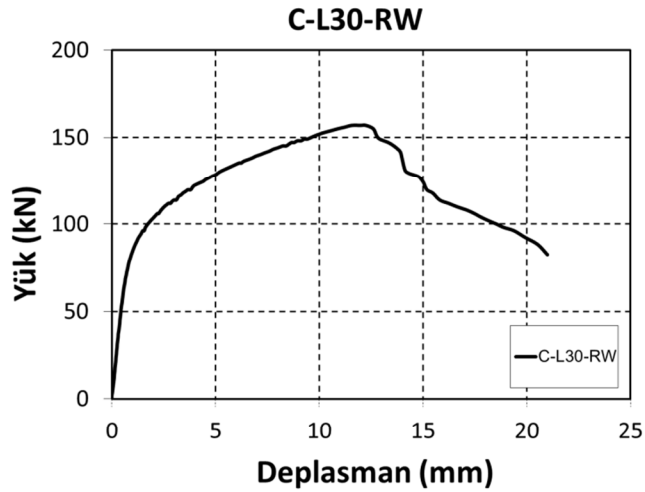
Yükleme başladıktan sonra numuneye etkiyen yükün ve aksenal uzamaların sayısal değerleri, kaynak dikişleri, yarık dibi ve numune davranışı takip edilmiştir. Kaynak uç dönüşleri kapalı olduğu için 100 kN'luk yük durumuna kadar numune üzerinde herhangi bir gözle görülür aralanma ve boşluk genişlemesi görülmemiştir. Testin 150kN yük seviyesi sırasında numunenin üst uç dönüş kaynakları bölgesinde çatlak oluşmuş ve her iki yanda birbirine benzer şekilde gelişmeye başlamıştır. Yük 157 kN'a geldiğinde çatlakların genişliği artmış ve dayanım düşmeye başlamıştır. Üst birleşimde oluşan hasardan dolayı alt uçta sadece gözle görülür bir uzamanın olduğu görülmüş ve herhangi bir çatlak tespit edilmemiştir. Çatlakla başlayan ve yırtılmayla devam eden tüm hasarlar profil ağzına doğru ilerlemiştir (Şekil 4.27). Numunenin kesitindeki ovalleşmelerin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Yüklemeye, en büyük çekme dayanımı, $N_{Test}=157$ kN'a erişilmiş ve bu yük karşılığında $\delta_{N_{Test}}=12.2$ mm yer değiştirme elde edilmiştir. Yüklemeye devam

edildikçe çatlak genişlikleri ve uzunlukları artmıştır. Dayanımdaki ani düşüşler gelişen çatlaklarla daha belirgin hale gelmiştir. Yük $N=84$ kN ve toplam yer değiştirme $\delta_{max}=21$ mm seviyesindeyken test sonlandırılmıştır. Hasar tipi blok kesme yırtılmasıdır (*Tear-out Failure, TO*). Yük-yer değiştirme grafiklerinin hazırlanmasında iki adet yer değiştirme ölçüm cihazından elde edilen uzamaların ortalamaları dikkate alınmıştır. Test boyunca elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu numunenin dayanımında, uç kaynağı olmayan diğer numuneye (C-L30-NW) göre yaklaşık %52’lik, uzama yer değiştirme oranında ise %215’lik bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.27 C-L30-RW deney sonrası üst kısım hasar durumu.



Şekil 4.28 C-L30-RW, deney numunesi ve yük-yer değiştirme grafiği.

4.5.2 Kutu Profil Numuneleriyle İlgili Deneysel Gözlemler (S-Lxx-NW,RW)

Paslanmaz çelik kutu profil deneylerinde, sırasıyla kaynak uzunluğu 30 mm'den 105 mm'ye kadar olan numunelerin deneyleri yapılmıştır. Aşağıda en kısa kaynak boyuna sahip kutu profil birleşimler ilgili deneysel gözlemler sunulmuştur.

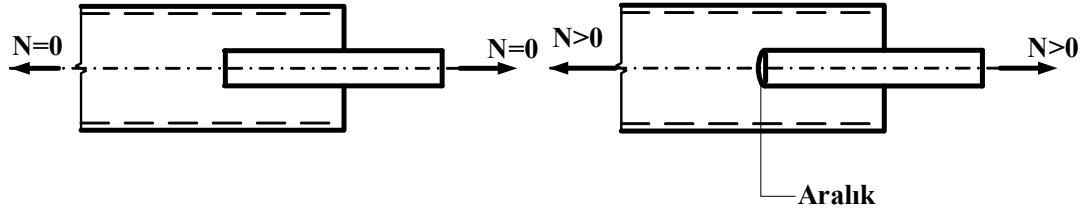
4.5.2.1 S-L30-NW Numunesi Deney Gözlemi

S-L30-NW numunesinin minimum dayanımı ($N_{Analitik}=59.7$ kN) olarak hesaplanmıştır. Kaynak uç dönüşü (NW) bulunmamaktadır (Şekil 4.29). Deney için gerekli düzenlemeler ve ölçüm cihazları bağlandıktan sonra yükleme başlatılmış, yük-yer değiştirme parametreleri ve hasar takibi gözlemleriyle deney sonlandırılmıştır.



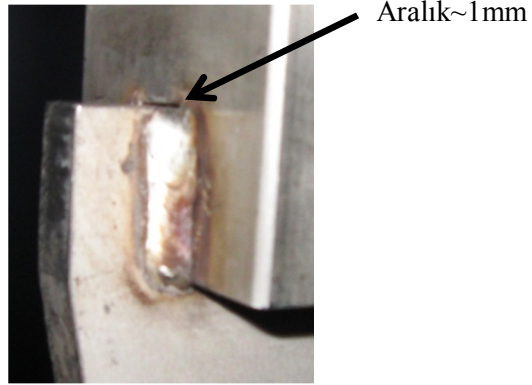
Şekil 4.29 S-L30-NW, deney numunesi.

Yükleme başladıktan sonra numuneye etkiyen yükün ve eksenel uzamaların sayısal değerleri, kaynak dikişleri, yarık dibi ve numune davranışı takip edilmiştir. Kaynaklanmamış yarık dipleri başlangıçta plakaya bitişik olup herhangi bir aralık görünmezken (Şekil 4.30 a), yüklemenin $N=90$ kN ve $\delta=0.85$ mm olduğu seviyelerde alt ve üstteki tüm yarık diplerindeki aralıklar gözle görülür şekilde açılmaya başlamıştır (Şekil 4.30 b ve 4.30 c).



a) Deney başlamadan önce.

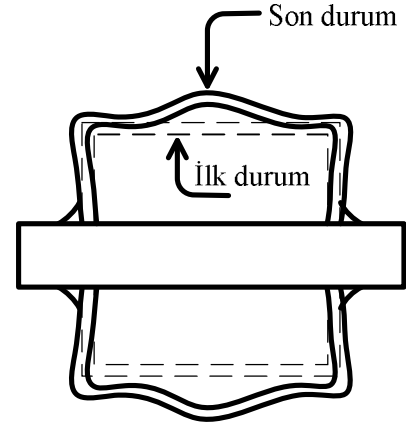
b) Deney başladıktan sonra.



c) Alt plakada aralanma.

Şekil 4.30 S-L30-NW numunesi yarık dibi genişlemesi.

Yüklemenin 100 kN seviyesine kadar alt ve üst bölgelerdeki ortalama aralık boşluğu 2mm civarında olduğu gözlenmiştir. Bu seviyedeki toplam yer değiştirme $\delta=1.60$ mm'dir. 110 kN'dan sonra alttaki aralıklar, üstteki aralıklara göre belirgin bir şekilde genişleyerek ilk yırtılma hasarının burada olacağı belirtilerini vermiştir. Yüklemenin bu anından itibaren profil ağız kesitlerinde gözle görülür eğilmeler meydana gelmeye başlamış ve bu durum test sonuçlanıncaya kadar artarak devam etmiş ve test sonundada kalıcı bir duruma gelmiştir (Şekil 4.31).

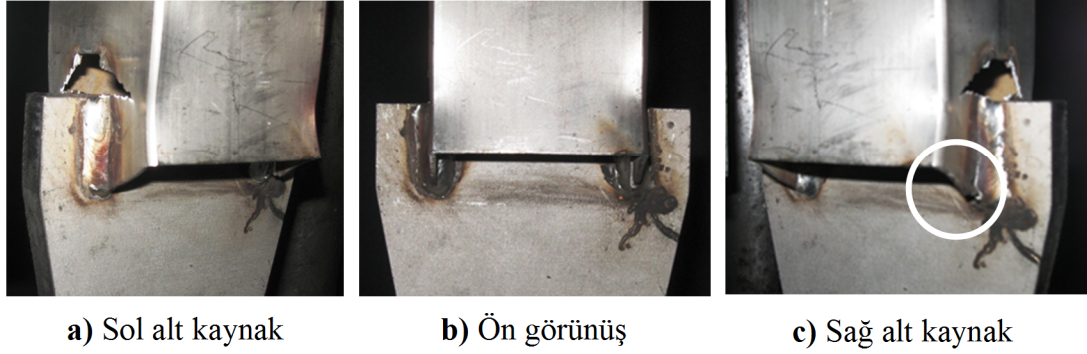


Şekil 4.31 S-L30-NW numunesi profil ağzı eğikliği ve kesitte çarpılma.

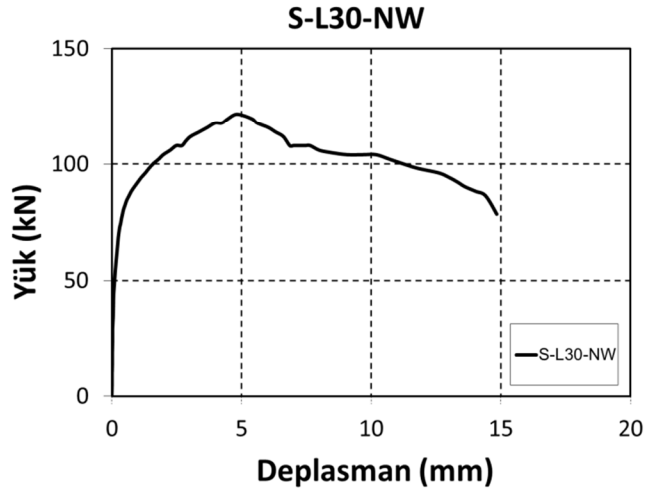
Yükün artmasıyla, gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarının en üst düzeye çıktığı 115 kN’da sol altta ilk yırtık oluşmuştur. Yükleme devam edildiğinde numunedeki dayanım, $N_{Test}=121.6$ kN’a kadar yükselmiş ve sonrasında düşmeye başlamıştır. Yük düşüşünün 115 kN seviyelerinde ilk yırtığın simetriğindeki yerde bulunan ikinci yırtık gelişerek birbirlerine paralel şekilde kutu profilin kesit köşelerine kadar ilerlemişlerdir. Maksimum yük değerinden sonra numunede hızlı bir dayanım azalması gözlenmiştir. Maksimum çekme yükü sırasında sağ alt kaynak dikişinin üst kısmı, ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) blok kesme hasarı başlangıcı oluşmuş ve yırtılma gelişerek kaynak boyunun 1/3’ü kadar ilerlemiştir (Şekil 4.32.c). Numune, 121 kN ve 4.8 mm yer değiştirmeden, 78.5 kN, 14.8 mm’lik yer değiştirmesine kadar ani dayanım düşüşleriyle, aksenal çekme yükünü taşımıştır. Bu süre içinde mevcut hasar ve yırtılmalar dahada gelişerek deney sonuna kadar devam etmiştir. Maksimum çekme yükü sırasında sağ alt kaynak dikişinin üzerinden yırtılma başlamış ve kaynak boyunun 1/3’ü kadar ilerlemiştir (Şekil 4.32.c). Çatlakla başlayan ve yırtılmayla devam eden tüm hasarlar, kutu profil kesitinin büküm köşelerine kadar ilerlemiş ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.32).

Yüklemede, en büyük çekme dayanımı, $N_{Test}=121.6$ kN’a erişilmiş ve bu yük karşılığında $\delta_{N_{Test}}=4.8$ mm yer değiştirme elde edilmiştir. Deney sonuna doğru sağ alt profil ucunda ayrışma başlangıcı gözlenmiştir (Şekil 4.32c). Alt bölgede oluşan yırtılma hasarı gelişerek test sonuna gelmiştir. Bu durumdan dolayı üstteki birleşimde aralıkların genişlemesinden başka herhangi bir hasar gelişimi tespit

edilmemiştir. Çekme dayanımı $N=78.5$ kN ve toplam yer değiştirme $\delta_{max}=14.8$ mm seviyesindeyken deney sonlandırılmıştır. Hasar tipi genel olarak blok kesme yırtılmasıdır (*Tear-out Failure, TO*). Yük-yer değiştirme grafiklerinin hazırlanmasında iki adet yer değiştirme ölçüm cihazından elde edilen uzamaların ortalamaları dikkate alınmıştır. Test boyunca elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.32 S-L30-NW deney sonrası alt kısım hasar durumu.



Şekil 4.33 S-L30-NW, deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği.

4.5.2.2 S-L30-RW Numunesi Deney Gözlemi

S-L30-RW numunesinin minimum dayanımı ($N_{Analitik}=67.2$ kN) olarak hesaplanmıştır. Kaynak uç dönüşü (RW) bulunmaktadır (Şekil 4.34). Deney için gerekli düzenlemeler ve ölçüm cihazları bağlandıktan sonra yükleme başlatılmış,

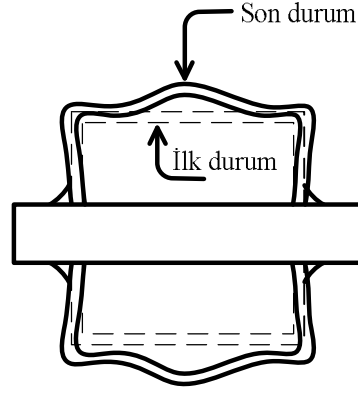
yük-yer değiştirme parametreleri ve hasar takibi gözlemleriyle deney sonuna sonlandırılmıştır.



şekil 4.34 S-L30-RW, deney numunesi.

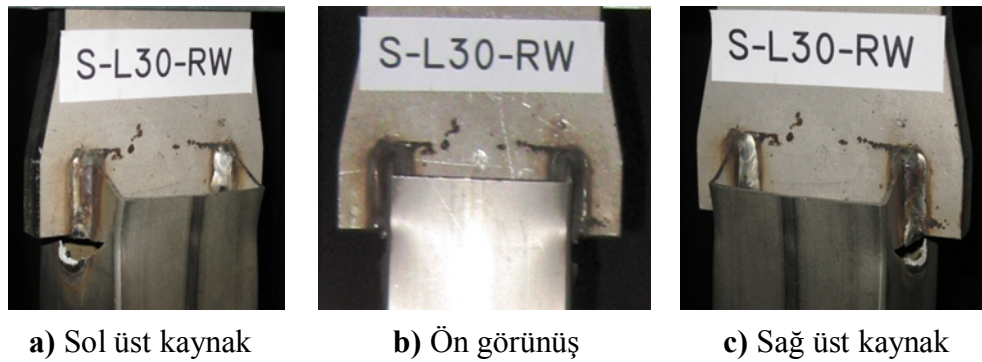
Yükleme başladıktan sonra numuneye etkiyen yükün ve eksenel uzamaların sayısal değerleri, kaynak dikişleri, yarık dibi ve numune davranışı takip edilmiştir. Test başlangıcından, 125 kN ve $\delta=2.3$ mm yük seviyesine kadar numune üzerinde ve kaynaklarda herhangi bir hasar görülmemiştir. Bu yük seviyesinde üst sol uç dönüş kaynağında küçük boyutlu çatlak oluşmuş ve ardından sağ taraftaki simetrik yerde de benzer çatlak belirmiştir. İlk hasar üst bölgede yer alınca tüm enerji bu yırtıkların çevresinde harcanmış ve yükün artmasıyla çatlak boyları ve genişlikleri dahada gelişmiştir.

Yük 147 kN'a geldiğinde çatlakların genişliği artmış ve dayanım düşmeye başlamıştır. Üst birleşimde oluşan hasardan dolayı alt uçta gözle görölür herhangi bir çatlak tespit edilmemiştir. Numunenin kesitinde çarpılmalar gözlenmiştir (şekil 4.35). Çatlakla başlayan ve yırtılmayla devam eden tüm hasarlar profil ağızına doğru ilerlemiştir (şekil 4.36).

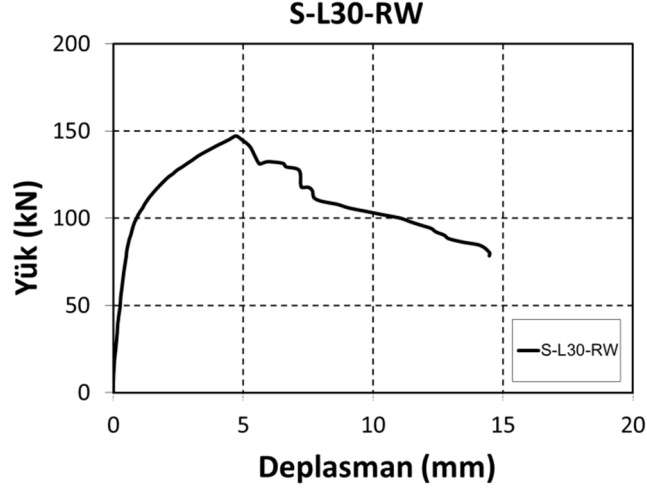


Şekil 4.35 S-L30-RW numunesi kesitte çarpılma.

Yüklemede, en büyük çekme dayanımı, $N_{Test}=147.2\text{kN}$ 'a erişilmiş ve bu yük karşılığında $\delta_{N_{test}}=4.7\text{mm}$ yer değiştirme elde edilmiştir. Yük arttırıldıkça numunede çatlak genişlikleri ve uzunlukları gelişerek ani dayanım düşmesi olmuştur. 140 kN ve 120 kN seviyelerinde iki ani düşüş gerçekleşince, $N=80.4\text{ kN}$ ve toplam yer değiştirme $\delta_{max}=14.5\text{mm}$ seviyesindeyken test sonlandırılmıştır. Çatlakla başlayan ve yırtılmayla devam eden tüm hasarlar, kutu profil kesitinin büküm köşelerine kadar ilerlemiş ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.36). Hasar tipi blok kesme yırtılması (*Tear-Out Failure, TO*) olarak tanımlanabilir. Yük-yer değiştirme grafiklerinin hazırlanmasında iki adet yer değiştirme ölçüm cihazından elde edilen uzamaların ortalamaları dikkate alınmış ve elde edilen grafik Şekil 4.37'de verilmiştir. Bu numunenin testinde, uç kaynağı olmayan diğer numuneye (S-L30-NW) göre yaklaşık %21'lik artış, uzama yer değiştirmeleri oranında ise %2'lik bir azalma görülmüştür.



Şekil 4.36 S-L30-RW deney sonrası üst kısım hasar durumu.



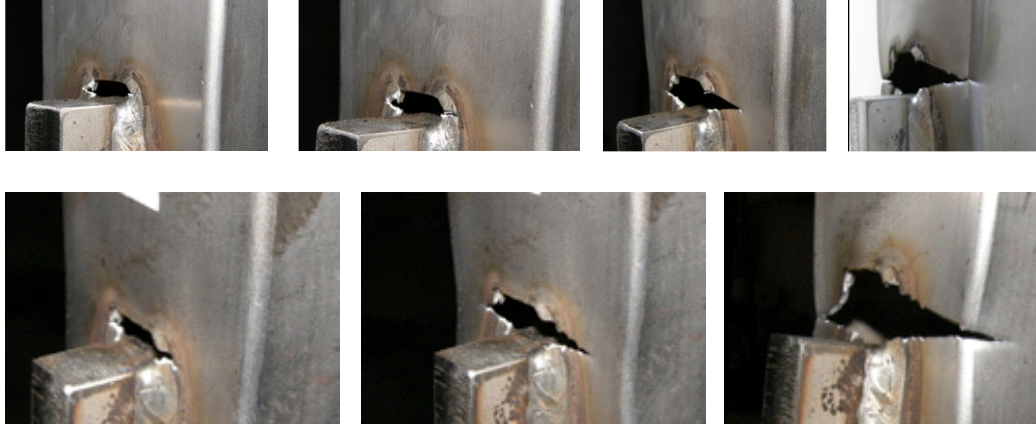
Şekil 4.37 S-L30-RW, deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği.

4.5.3 Genel Deneysel Gözlem Sonuçları

Çalışma kapsamında ele alınan 24 adet paslanmaz çelik numunesi sadece çekme yükü etkisinde incelenmiştir. Deney programında, birleşimin davranışını etkileyen, hasar tipini belirleyen ve göçmeye götüren bir çok faktörün olduğu belirlenmiştir. Aşağıda deneyler boyunca gözlenen davranışlar ve numune tiplerine bağlı olan farklılıklardan bahsedilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde standartların tasarım kurallarıyla karşılaştırılmıştır.

- Paslanmaz çelikten imal edilmiş, 2 farklı kesit (boru ve kutu), 2 farklı dönüş uç kaynağı (RW ve NW) ve 6 farklı kaynak uzunluğu (30mm...105mm) ile toplam 24 adet deney numunesi statik çekme yükü uygulanarak test edilmiştir.
- 3 farklı göçme tipi olan brüt kesitte akma (*Gross Yield, GY*), kaynak çevresinde ve kaynak dikişine paralel yırtılma (*Block Tear-out, TO*) ve kayma aksamasının (*Shear Lag*) sebep olduğu net kesitteki çevresel yırtılma (*Circumferential Failure, CF*) hasarlarının gözlenmesi beklenmiştir.
- Uç dönüş kaynağı olmayan (NW) numunelerde uç kaynak bölgesinde çatlak başlangıcı daha kolay ve gözle görülür bir şekilde gerçekleşirken, kaynak dönüşü olan (RW) numunelerde bu durum kolay izlenememiştir.

- RW numunelerinde genel olarak, uç dönüş kaynaklarında, kaynak enkesiti içinde yaklaşık 45° lik bir açıyla kayma düzlemi oluşmuştur. Kaynak malzemesi içinde ve kaynak dikişine paralel oluşan çatlak gelişerek profil gövdesine ulaşmıştır.
- Tüm numunelerin ilk üç kaynak boyuna sahip ($L_w=30, 45, 60\text{mm}$) olanlarında birleşimin dip kısmından başlayan çatlaklar gelişerek profilin serbest ucuna doğru ilerleme eğilimi göstermişlerdir. Bu durum TO göçme tipine işaret etmektedir. Diğer numunelerde ise ($L_w=70-76, 90, 105\text{mm}$) kayma aksamasının (SL) sebep olduğu ve birleşimin dip kısmında yer alan net kesitin bulunduğu bölgeden başlayan çatlak ile çevresel yırtılma hasarı (CF) meydana gelmiştir. Bu tip yırtılma numune resimlerinden de görüleceği üzere kesit düzlemine paralel gelişmiş ve sonraki yük seviyelerinde net kesit çizgisinde birleşerek tam ayrışmanın olduğu görülmüştür.
- Profillerin bağlantı plakalarıyla olan birleşimlerinde, uç dönüş kaynağı olmayan numunelerin (NW), kaynaklı numunelere (RW) göre genel olarak maksimum dayanımlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, NW numunelerinin daha düşük net enkesite sahip olmalarıdır. Dolayısıyla daha düşük maksimum çekme dayanımının elde edilmesi beklenen bir durumdur. Dönüş uç kaynağı olmayan bu tip numunelerde deney esnasında çekme yükü arttıkça yarık diplerinde bulunan boşlukların gittikçe aralandığı gözlenmiştir. Deneyin maksimum yük seviyesinde, birleşimin en zayıf kesiti olan net en kesit (A_n) bölgesinde, artan gerilme yığılmaları etkilerine bağlı olarak yarık dibi köşelerinde çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 4.38). Yüklemeye devam edildikçe yırtıkların gelişimi her iki yanda birbirlerine benzer şekilde ilerlerken aksel uzama hızla büyümüştür.



Şekil 4.38 NW numunelerinde yarık dibi tipik hasar gelişimleri.

- Dönüş kaynağı olan (RW) numunelerinde yarık geometrisi diğer numunelerle (NW) aynıdır. Profil ve bağlantı plakasının her iki yüzünde de yapılan kaynak dikişleri, plaka kalınlığının (t_p) bulunduğu uç dönüş kısmında birleşir ve net en kesitin bulunduğu bölüm kapatılmış olur. Bu tip RW numunelerin deneylerinde ilk çatlak hasarının oluşumu dönüş uç kaynağının bulunduğu yerde ve maksimum yük anında ortaya çıktığı gözlenmiştir. Tüm RW numunelerinde hasar, uç dönüş kaynağının çatlamasıyla başlamıştır. Çatlağın ilerleyerek yırtık haline gelmesi sonucu, dayanımda ilk ani düşme oluşmakta ve ilerleyen durumlarda göçmeyle sonuçlanmaktadır (Şekil 4.39). Uç dönüş kaynağı (RW) olan numunelerde, maksimum yüke ulaşıldıktan kısa bir süre sonra dayanımlarının ani olarak düştüğü gözlenmiştir.



Şekil 4.39 RW numunelerinde uç dönüş kaynağı tipik hasar gelişimi.

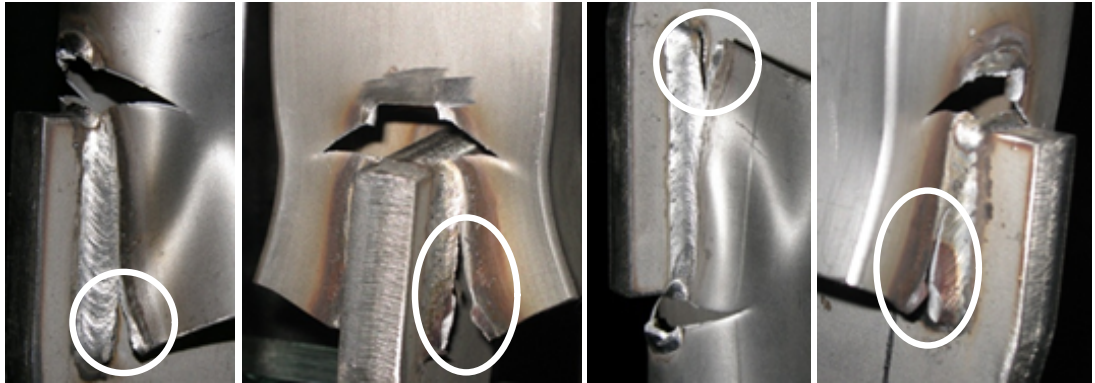
- Deney programı boyunca, kutu profil numunelerde gelişen davranış hasarları boru numunelere göre farklılık göstermişlerdir. Bu değişikliğin temel sebebi kesit tipinden dolayı olduğu sonucuna varılmıştır. Deney sırasında uç kaynak bölgesinden başlayan çatlak, 90° kıvrımlı köşe ve buna bağlı olarak nispeten daha sert malzemeden dolayı kıvrım bölgesinde bir

miktar yönünü değiştirip profil ucuna doğru ilerlemektedir. Bununla birlikte birleşim bölgesinde oluşan kayma düzensizliğinin etkileriyle kesitte çarpılmalar ve şekil bozuklukları oluşmakta, bu durum bükülmüş köşe kısımlarını ayrıca etkileyip hasarın gelişimini başka bir yöne kaydırmaktadır (Şekil 4.40).



Şekil 4.40 Kutu profil numunelerinde tipik ileri hasarlar.

- Boru ve kutu profilli numunelerin ilk üç kısa kaynaklı birleşimlerinde ($L_w=30, 45, 60\text{mm}$), boyuna kaynak dikişlerinde yırtılma hasarı gözlenmiştir (Şekil 4.41). Yırtılmaların hepsinin ortak yanı Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)'de kalmasıdır.



Şekil 4.41 Boyuna kaynak dikişi açılması.

- Boru profil numunelerinin kaynak uzunluğu, $L_w=45, 60$ ve 76mm olan bazı elemanlarındaki hasarlar incelendiğinde, yarık dibinden başlayan çatlakla beraber, profil ucu kaynak dikişinde açılmaların olduğu görülmüştür.

Deneyde maksimum yüke ulaşılan kadar kaynak uzunluğu bölgesinde bulunan kesitte aşırı çarpılmalar meydana gelmiştir. Şekil bozukluğunun etkisi ile uç kısımlarda aşırı gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin oluşmasından dolayı kaynak dikiş başlangıcındaki açılmanın meydana geldiği söylenebilir. Açılan kaynak dikiş yakından incelendiğinde kaynak malzemesinde herhangi bir çatlak olmadığı, yırtığın kaynak ile profil cidarının arakesitinde meydana geldiği görülmektedir. Yırtılmanın olduğu kısım ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) de bulunmaktadır. Yüklemenin devam edilmesiyle yarıklı ucunda başlayan çatlak ve gelişen yırtık kaynak başlangıcındaki açılmayla birleşip tipik TO göçme durumu gözlenecektir. Test düzeneğinin ve deney izleme sistemlerinin herhangi bir kazaya maruz kalmamaları için yükleme, deney numunesi tam ayrışmadan durdurulmuştur.

- Kutu profil numunelerinin kaynak uzunluğu, $L_w=45, 60$ ve 70 mm olan bazı elemanlarındaki hasarlar incelendiğinde, yarıklı dibinden başlayan çatlakla beraber, profil ucu köşelerinde ve profil eksenine paralel açılmalar meydana gelmiştir. Bahsedilen hasar, boru profilli numunelerin kaynak uzunluğu, $L_w=45, 60$ ve 76 mm olan bazı elemanlarındaki hasarlara benzemektedir. Yükleme etkisiyle gittikçe bozulan enkesit şekli, profil ve kaynak dikişini zorlamaktadır. Bu durumda kaynak dikişinde beklenen açılma, kutu profilin enkesit tipinden dolayı kesitin büküm köşesinde ortaya çıkmaktadır. Test düzeneği ve ekipmanının olası bir ani göçme sebebiyle zarar görmemesi için yüklemeye devam edilmemiş ve deney numunesi tam koparılmamıştır.

Tüm profillerin testlerde ulaşılan maksimum çekme yükleri ve karşılığındaki uzama yer değiştirmeleri ile göçme tipleri aşağıdaki tablolarda ayrı ayrı belirtilmiştir (Tablo 4.9 ve 4.10).

Deneysel çalışma kapsamında, aksenal çekme yükü uygulanmış toplam 24 adet numunenin birleşimlerindeki hasarlar ayrıntılı olarak aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Tüm hasarlar, elemanların kaynaklı birleşim bölgeleri ve net kesitlerinde meydana gelmiş olup bağlantı plakalarında ve eleman brüt kesitlerinde herhangi bir hasar gözlenmemiştir (Tablo 4.11, 12, 13, 14).

Tablo 4.9 Boru profil numuneleri test sonuçları.

Numune	Kaynak Boyu L_w (mm)	Test Yüğü N_{test} (kN)	Yer Değiş. $\delta_{N_{test}}$ (mm)	Test Göçme Modu*
C-L30-NW	30	103.0	5.70	TO
C-L45-NW	45	135.4	7.24	TO
C-L60-NW	60	161.9	10.64	TO
C-L76-NW	76	192.3	10.65	CF
C-L90-NW	90	190.3	10.26	CF
C-L105-NW	105	187.4	24.50	CF
C-L30-RW	30	157.0	12.24	TO
C-L45-RW	45	184.4	10.22	TO
C-L60-RW	60	215.8	11.84	TO-CF
C-L76-RW	76	241.3	25.53	CF
C-L90-RW	90	247.2	46.25	CF-GY
C-L105-RW	105	251.1	13.60	CF-GY

* TO: Tear-Out (Blok Kesme Yırtılması)

* CF : Circumferential Failure (Çevresel Göçme)

* GY: Gross Yield (Brüt Kesitte Akma)

Tablo 4.10 Kutu profil numuneleri test sonuçları.

Numune	Kaynak Boyu L_w (mm)	Test Yüğü N_{test} (kN)	Yer Değiş. $\delta_{N_{test}}$ (mm)	Test Göçme Modu*
S-L30-NW	30	121.6	4.83	TO
S-L45-NW	45	149.1	9.08	TO
S-L60-NW	60	192.3	14.38	TO
S-L70-NW	70	251.1	11.72	CF
S-L90-NW	90	251.1	9.10	CF
S-L105-NW	105	288.4	24.34	CF
S-L30-RW	30	147.2	4.72	TO
S-L45-RW	45	188.4	6.09	TO
S-L60-RW	60	225.6	6.36	TO
S-L70-RW	70	274.7	9.79	CF
S-L90-RW	90	314.9	29.53	CF
S-L105-RW	105	321.8	20.71	CF-GY

* TO: Tear-Out (Blok Kesme Yırtılması)

* CF: Circumferential Failure (Çevresel Göçme)

* GY: Gross Yield (Brüt Kesitte Akma)


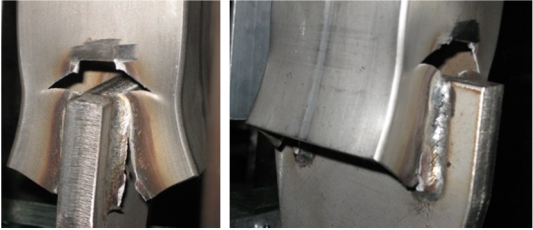
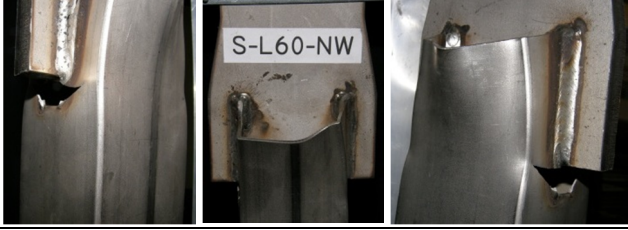

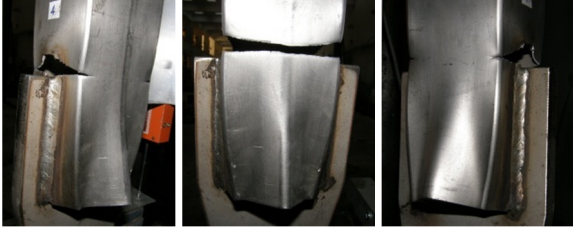
Tablo 4.11 Boru profil (NW) numuneleri göçme resimleri.

Numune	Göçme Tipi	Göçme Resimleri
C-L30-NW	TO	
C-L45-NW	TO	
C-L60-NW	TO	
C-L76-NW	CF	
C-L90-NW	CF	
C-L105-NW	CF	



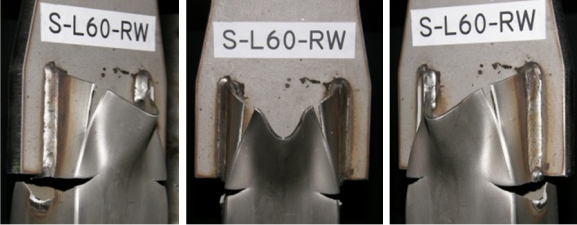



Tablo 4.12 Boru profil (RW) numuneleri göçme resimleri.

Numune	Göçme Tipi	Göçme Resimleri
C-L30-RW	TO	
C-L45-RW	TO	
C-L60-RW	TO	
C-L76-RW	TO-CF	
C-L90-RW	CF-GY	
C-L105-RW	CF-GY	

Tablo 4.13 Kutu profil (NW) numuneleri göçme resimleri.

Numune	Göçme Tipi	Göçme Resimleri
S-L30-NW	TO	
S-L45-NW	TO	
S-L60-NW	TO	
S-L70-NW	CF	
S-L90-NW	CF	
S-L105-NW	CF	

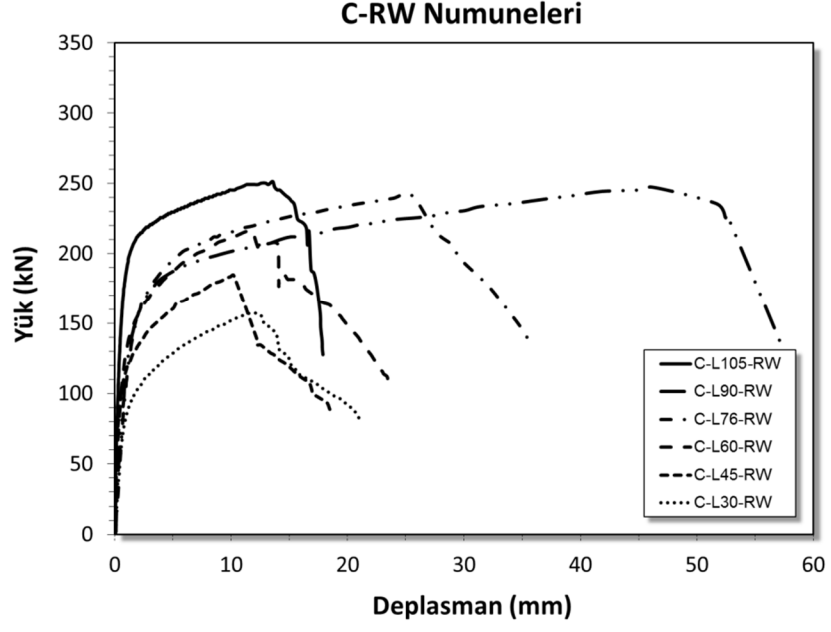
Tablo 4.14 Kutu profil (RW) numuneleri göçme resimleri.

Numune	Göçme Tipi	Göçme Resimleri
S-L30-RW	TO	
S-L45-RW	TO	
S-L60-RW	TO	
S-L70-RW	CF	
S-L90-RW	CF	
S-L105-RW	CF-GY	

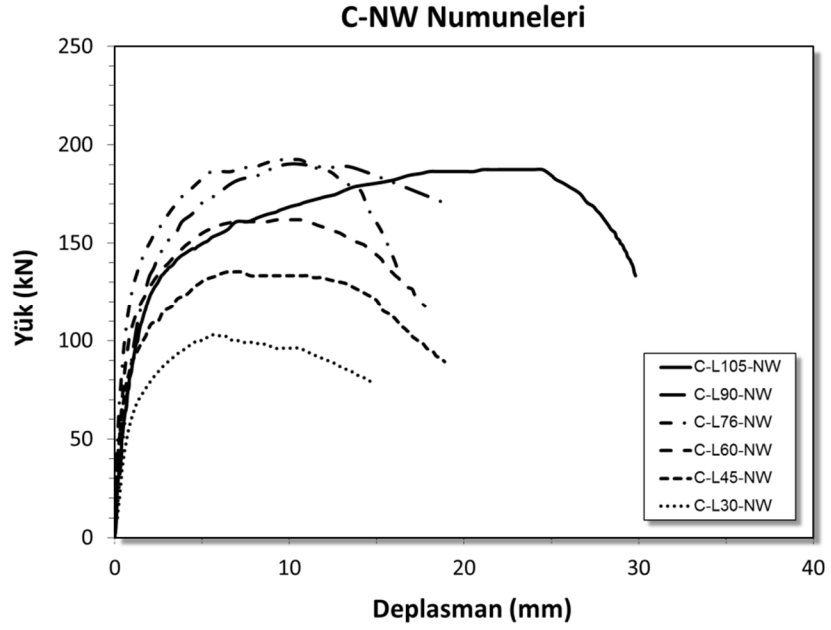
4.6 Yük-Yer Değiştirme Eğrilerinin Değerlendirilmesi

Deneysel alışma kapsamındaki numunelerin yük-yer değiştirme eğrileri, aşağıda verilen gözlem sonuçları düşünülerek değerlendirilmiştir.

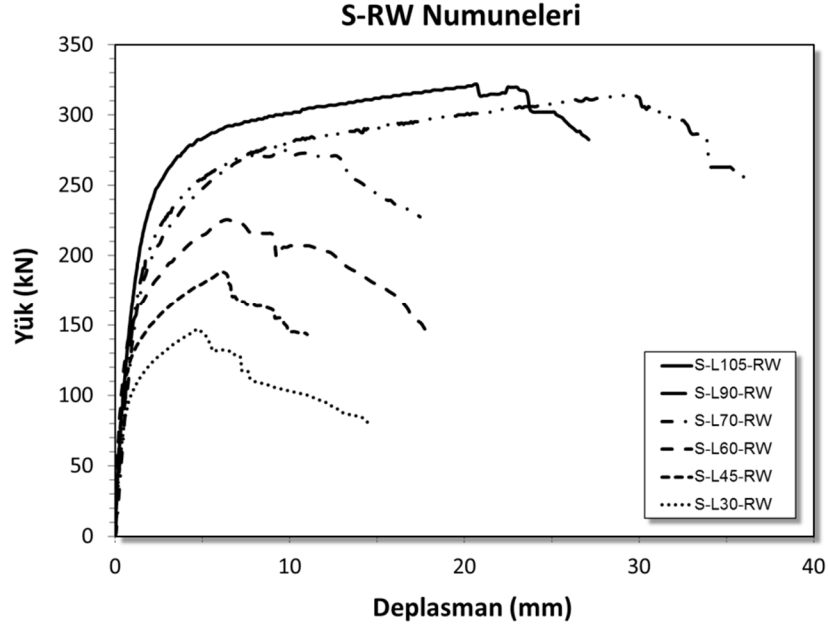
- Genel olarak RW ve NW numunelerinin yük-yer değiştirme grafiklerine bakıldığında ilk başlangıç rijitliklerinin birbirlerine yakın davranış gösterdikleri görülmüştür.
- Tüm numunelerde göçme olmadan önce kesitlerinde ovalizasyon oluştuğu görülmüştür.
- RW numunelerinin yük-yer değiştirme grafiklerinde, maksimum yük oluştuktan kısa bir süre sonra ani dayanım düşüşleri görülmüştür (şekil 4.42 ve 4.44). Diğer taraftan NW numunelerinde maksimum yüke eriştikten sonra yumuşak geçişli dayanım azalması elde edilmiştir (şekil 4.43 ve 4.45). Bu durum her iki profil kesitinin yer aldığı boru ve kutu numunelerinin tamamında görülmüştür.
- Numunelerin yük-yer değiştirme grafikleri arasında karşılaştırma yapıldığında NW numunelerindeki davranışın daha sünek olduğu gözlenmiştir. RW numuneleri daha yüksek yük seviyelerine çıkarken maksimum yük sonrasında ani düşüşlerle dayanımlarını kaybetmekte ve diğer taraftan NW numuneleri daha düşük maksimum yük seviyelerinde iken dayanımlarını bir miktar daha ileri yer değiştirmelere kadar sürdürüp sonrasında yumuşak bir azalma davranışı gösterdikleri gözlenmiştir.
- Numunelerin (S-L105-NW ve C-L105-NW) olanlarında maksimum yük seviyeleri ve yer değiştirmeleri elde edilmiştir (şekil 4.43 ve 4.45).
- C-L105-RW numunesi için elde edilen yük-yer değiştirme grafiği, olması gereken yer değiştirmelerin çok altında sonuçlar vermiştir. Bu durumun deney esnasındaki bir aksaklıktan kaynaklandığı düşünölmektedir.



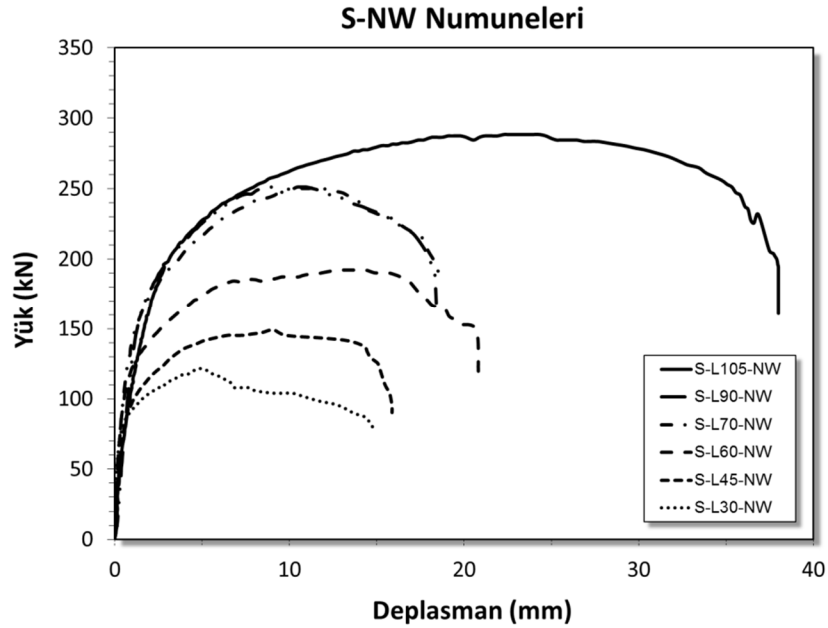
Şekil 4.42 Boru profil (RW) numuneleri.



Şekil 4.43 Boru profil (NW) numuneleri.



Şekil 4.44 Kutu profil (RW) numuneleri.



Şekil 4.45 Kutu profil (NW) numuneleri.

4.7 Sayısal Analiz Çalışmaları

Teze konu olan paslanmaz çelik kapalı kesitlerin kaynaklı, plakalı uç birleşimlerinin deneysel çalışması kapsamında gerçekleştirilen testlerin tamamı ayrıntılı bir sayısal analiz çalışması ile simüle edilmiştir. Çalışma kapsamında bulunan toplam 24 adet test numunesi için, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak nonlineer analiz yapabilen

ve genel amaçlı kullanılan ABAQUS® 6.10 mühendislik paket programı ile sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır.

Modellerde malzeme ve enkesit bilgileri tanımlanmıştır. Gerekli noktalarda uygun sınır koşulları ve kısıtlamalar belirtilmiştir. Elemanlar birbirleriyle temas özellikleri kullanılarak birleştirilmiştir. Oluşturulan modelde her iki bağlantı plakasına aksenal çekme yükü uygulanmıştır. Numunenin davranışı, uygulanan sınır koşulları ve malzeme bilgilerine göre simüle edilmiştir.

Modelleme ayrıntıları, kullanılan elemanlar ve analizler ile elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

4.7.1 ABAQUS® Sonlu Elemanlar Programı Hakkında Genel Bilgi

ABAQUS®, katıların, kabukların, çubukların ve daha bir çok elemanın dışarıdan uygulanan yükler altındaki davranışlarını modellemek için tasarlanmış, son derece gelişmiş genel amaçlı bir sonlu eleman programıdır. Program özellikle, uçak ve otomobil endüstrisinde, petrol sanayinde, mikroelektronik sanayinde, üniversitelerde ve araştırma laboratuvarlarında olmak üzere dünya üzerindeki bir çok endüstride çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Program, Brown'nun katıların mekaniği üzerine yapmış olduğu doktora çalışması üzerinden, Hibbitt, Karlsson ve Sorensen (HKS) tarafından yazılmaya başlamış ve 1978'de kurulan, şu an yüzlerce çalışanı olan şirket tarafından geliştirilmektedir.

Programın başlıca özellikleri:

- Statik ve dinamik problemleri çözebilme özelliği,
- Katıların büyük şekil değişikliklerini 2 ve 3 boyutlu çözebilme özelliği,
- Sürekli elemanların, kabukların, kiriş elemanların, plakaların ve daha bir çok çeşit elemanın bulunduğu eleman kütüphanesi,
- Katılar arası farklı temas modelleme algoritmalarının bulunması,
- Genel kullanımda olan, elastik ve elastoplastik özelliklere sahip malzemeler için gelişmiş bir malzeme kütüphanesi,

- Modelleme için bir çok çözüm yöntemini, (sıvı/yapı etkileşimi, akustik, burkulma problemleri, vs) barındırmaktadır.

Programın genel çalışma düzenindeki ilk adım giriş dosyasının oluşturulmasıdır. Bunlar; malzeme bilgilerinin belirtilmesi, parçaların modellenmesi, sınır şartlarının belirtilmesi, çözüm ağının oluşturulması ve çözüm yönteminin seçilmesidir. İkinci adımda, programın analiz kısmı çalıştırılır. Üçüncü adımda ise modelin simülasyon sonuçları yazı, tablo, grafik veya çeşitli animasyon çıktılarıyla görülebilmektedir.

4.7.2 Kullanılan Modelleme Elemanları ve Teknikleri

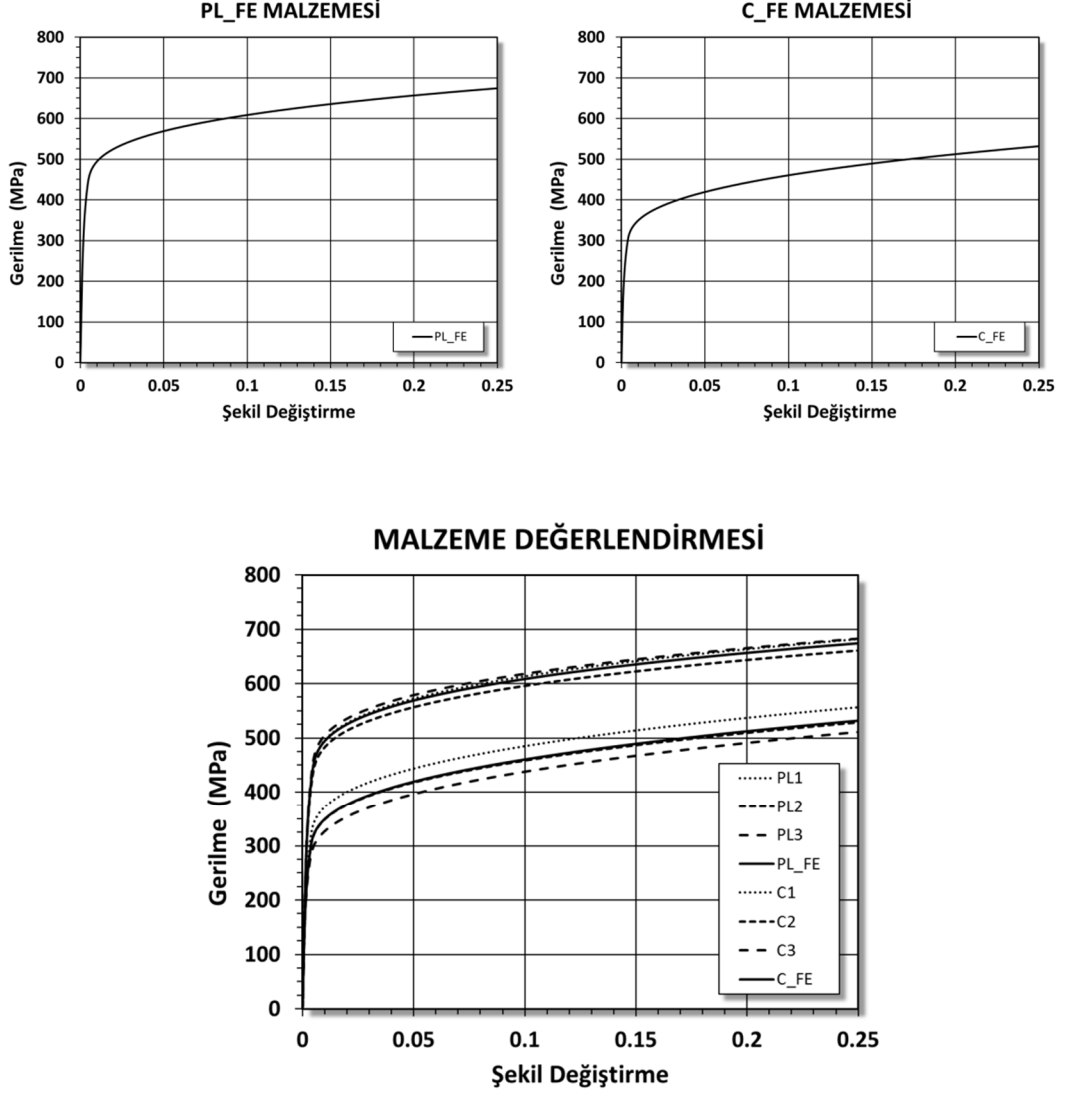
Sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında aşağıda belirtilen modelleme adımları ve teknikler kullanılmıştır.

4.7.2.1 Malzeme Özellikleri

Modellemede, Martinez ve diğerlerinin 2006'da yapmış oldukları çalışmadaki gibi ortalama değerlere sahip malzemeler kullanılmıştır. Ortalama malzeme değerleri PL ve C kuponları için ayrı ayrı dikkate alınarak belirlenmiştir. Her iki malzeme ilgili oldukları test kuponlarının ortalamaları olarak ele alınmıştır. S kuponları soğuk işlem görmüş çelik malzeme olduğu için değerlendirmeye katılmamıştır. Yukarıda anlatılan paslanmaz çelik malzeme özelliklerine göre modellemede, kupon testlerinden elde edilen gerilme/şekil-değiştirme ilişkileri değerlendirilerek boru numuneleri için (C_FE), kutu numuneleri için (PL_FE) ortalama değerlere sahip malzeme özellikleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir (Tablo 4.15 ve Şekil 4.46).

Tablo 4.15 Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri.

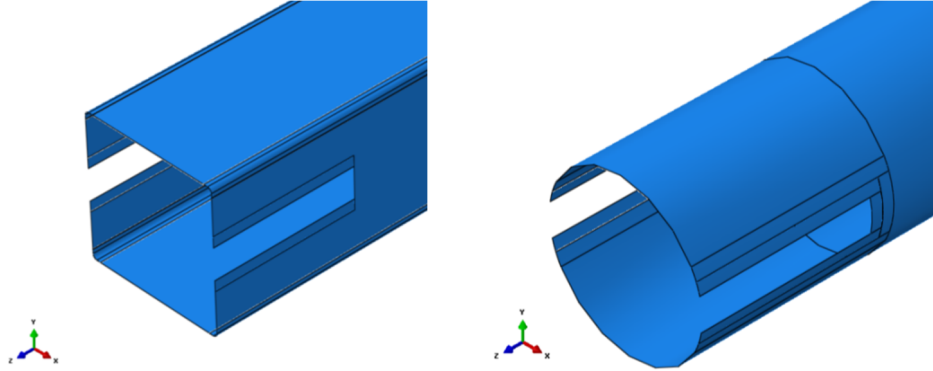
Malzeme	Akma Dayanımı R_p (N/mm ²)	Kopma Dayanımı R_m (N/mm ²)	Elastisite Modülü E (kN/mm ²)
PL_FE	430	681	200
C_FE	295	650	193



Şekil 4.46 Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzemeler için gerilme / şekil-değişirme grafikleri.

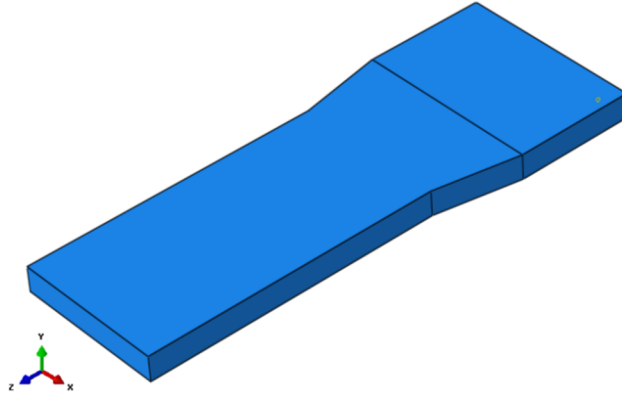
70x70x2mm kutu profil modellemesinde, düz ve köşe parçalar ayrı ayrı oluşturulmuş ve 2 mm'lik shell eleman kalınlığı tanımlanarak parçalar birleştirilmiştir. 76.1x2mm boru profil modellemesi için, planda çizilmiş çemberin 3.boyuta 450mm uzatılmasıyla ve 2mm'lik kabuk (shell) eleman kalınlığı tanımlanarak parça modelleri oluşturulmuştur. Bağlantı plakasının modellemesinde 3 boyutlu şekil değiştirebilen katı eleman seçilmiş ve 2 boyutlu düzlemde çizilen poligon 3.boyuta 15mm uzatılarak parça tamamlanmıştır (Şekil 4.47).

Numunelerin modellenmesinde geometrik şekillerde mm, yük ve gerilme ifadelerinde N ve N/mm² birimleri kullanılmıştır.



Kutu profil modeli
70 x 70 x 2mm

Boru profil modeli
ø76,1 x 2mm



Bağlantı plakası modeli
t=15mm

Şekil 4.47 Parçaların sonlu eleman modelleri.

Profil elemanlarında lineer kuadritik (S4R) 4-nodlu eleman tipi ve bağlantı plakasının modellenmesinde ise lineer hegzagonal (C3D8R) 8-nodlu eleman tipi kullanılmıştır. S4R elemanı, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modellemelerde, genel amaçlı uygulamalarda en sık kullanılan, lineer ara değerlerle büyük/küçük şekil-değiştirmelerin bulunmasını sağlayan bir eleman tipidir. C3D8R elemanı 3 boyutlu, 8 nodlu her nodunda 3 öteleme serbestliği olan bir elemandır. Bu eleman temas problemlerinde, plastisitenin ve geniş şekil değiştirmelerin olduğu karışık nonlineer analizlerde kullanılması önerilmektedir (Salih ve diğ. 2010).

Numunelerin kaynaklı kısımlarında, kaynak kalınlığının $a=4\text{mm}$ civarında olduğu tespit edilmiş (kaynak kesit alanı yaklaşık 16mm^2) ve sonlu elemanlar modellerinde gerekli kalınlık (3mm) ve yükseklik (5.3mm) ile idealize edilmiştir. Kaynaklı kısmın malzeme bilgisi aşağıda verilmiştir (Tablo 4.16 ve Şekil 4.48).

Tablo 4.16 Sonlu eleman modellerinde kullanılan kaynak malzemesi özellikleri.

Malzeme	Akma Dayanımı σ_y (N/mm ²)	Kopma Dayanımı σ_u (N/mm ²)	Elastisite Modülü E (kN/mm ²)
WELD	380	600	200



Şekil 4.48 Kullanılan kaynak elektrodu malzeme bilgisi.

4.7.2.2 Başlangıç Koşulları

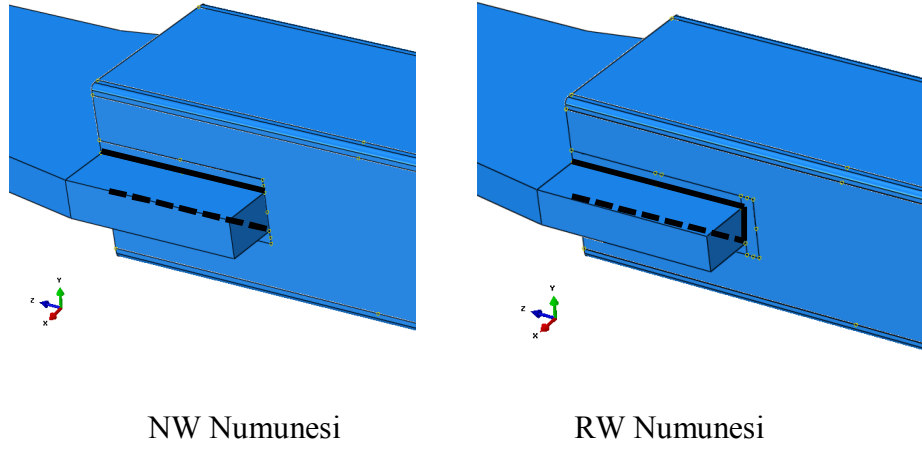
Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin test koşullarındaki başlangıç şartlarına sahip olması için bağlantı plakalarının mesnetleri ve hareket serbestlikleri tanımlanmıştır. Yapılan testlerde numunelere aksenal çekme yükü uygulandığı için elemanlarda burkulma probleminin olmayacağı gözetilerek modellemeye herhangi bir geometrik ön kusur tanımlanmamıştır.

Doğrusal olmayan durum için sadece malzeme nonlineeritesi kullanılmıştır. Birleşim ve sürtünme etkisi bulunmadığından sınır nonlineeritesi etkileri dikkate alınmamıştır. Kaynak işleminde ortaya çıkan yüksek ısınmış bölgeler dikkate alınmamıştır.

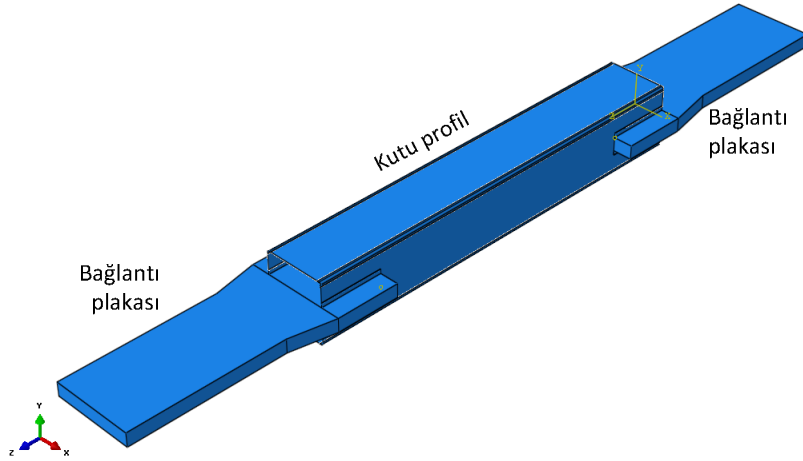
ABAQUS[®], genellikle nonlineer problemler için çözüm stratejisi olarak yük kontrollü Newton-Raphson metodunu kullanılmaktadır.

4.7.2.3 Parçaların Birleştirilmesi

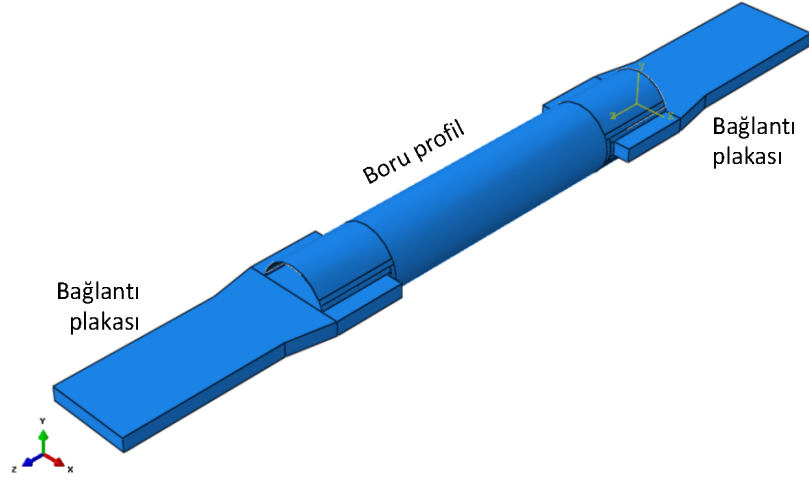
Modellenen parçalar, programın temas özellikleri kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirmede *tie* tipi temas tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte yük akışına uygun sıralamayla birincil (*master*) ve ikincil (*slave*) birleşim yüzeyleri/kenarları seçilerek gerekli etkileşimler sağlanmıştır (Şekil 4.49). Parçaların birleştirilmesi tamamlandıktan sonra ortaya çıkan tipik sonlu eleman modelleri Şekil 4.50 ve 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.49 RW ve NW Numunelerinin temas bölgeleri.



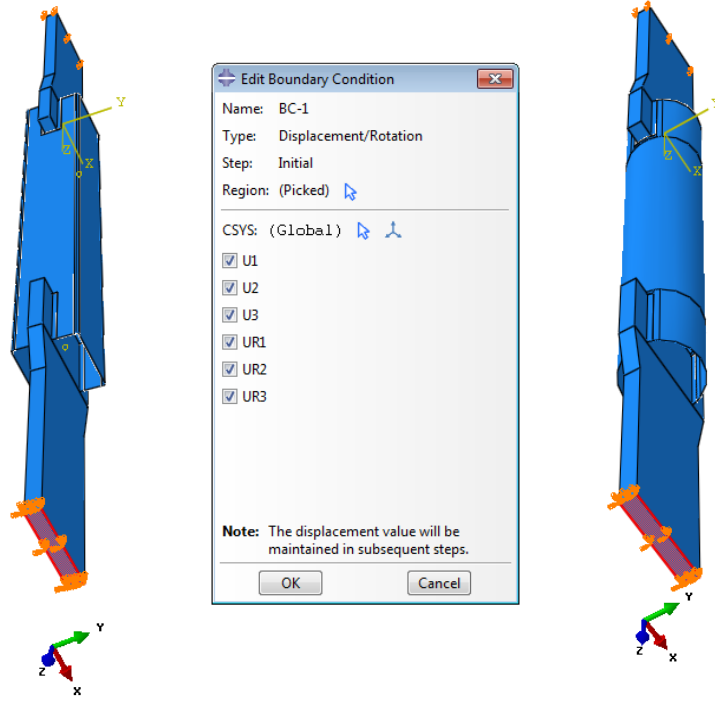
Şekil 4.50 Kutu profilli numunenin birleştirilmiş sonlu eleman modeli.



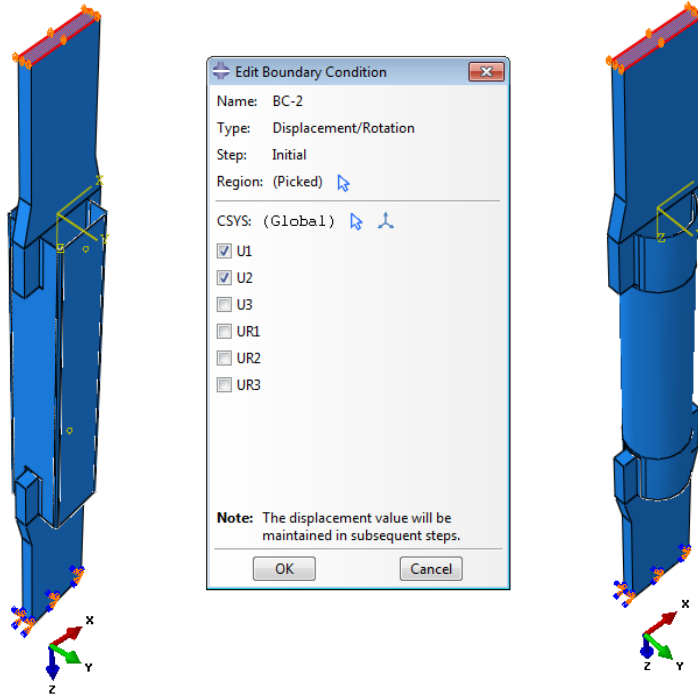
Şekil 4.51 Boru profilli numunenin birleştirilmiş sonlu eleman modeli.

4.7.2.4 Mesnet Koşulları Tanımı ve Yük Uygulanması

Sonlu eleman modelinin her iki bağlantı plakasına, deneysel çalışmadaki mesnet şartlarına uygun olacak şekilde mesnet koşulları uygulanmıştır. Numunenin alt kısmındaki plakanın alt yüzeyinin her yöndeki (x,y,z) öteleme ve dönme serbestlikleri (U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3) engellenmiştir (Şekil 4.52.a). Üst plakanın üst yüzeyi ise sadece iki yöndeki (x, y) öteleme serbestliği (U1, U2) engellenmiştir (Şekil 4.52.b). Profil boyunca ve aynı zamanda eksenel yükün uygulandığı doğrultuda üst plakanın üst yüzündeki öteleme (z yönünde) (U3) serbest bırakılmıştır.



a) Alt plaka ucu (x,y,z)



b) Üst plaka ucu (x, y)

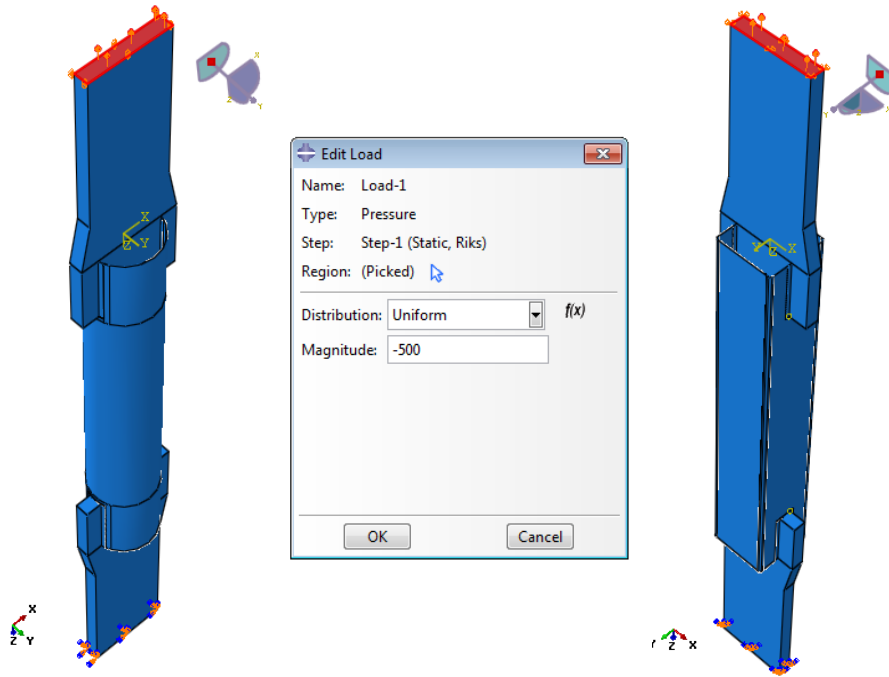
Şekil 4.52 Numunelerin mesnet koşulları.

Eksenel çekme yükü, numunede herhangi bir dış merkezlik ve ilave etkiler oluşturmayacak şekilde numune eksenine paralel şekilde uygulanmıştır. Kupon testleri yapılan paslanmaz çelik malzemenin elde edilen en yüksek kopma dayanımı $R_m=764\text{MPa}$ olduğu düşünülürse sonlu elemanlar analizinde uygulanacak çekme yükü için yaklaşık 600 kN civarında bir yükün yeterli olacağı düşünülmüştür. Çekme yükü numunenin bağlantı plakasının, alanı 1350mm^2 olan üst yüzeyine üniform olarak 500N/mm^2 büyüklüğündeve düşey (-z) yönünde uygulanmıştır (Şekil 4.53).

Uygulanan toplam yük;

Yüzey alanı : $A=15\text{mm}\times 90\text{mm}=1350\text{mm}^2$

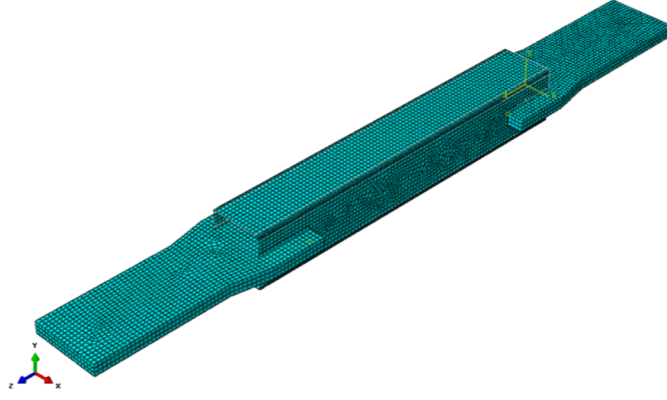
Toplam yük : $P=1350\text{mm}^2\times 500\text{N/mm}^2=675\text{kN}$ 'dur.



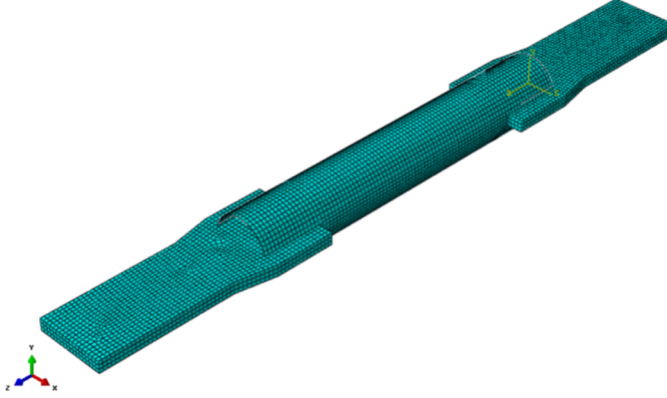
Şekil 4.53 Yük uygulanması.

4.7.2.5 Sonlu Eleman Çözüm Ağı Düzenlemesi

Birleşimleri bitirilmiş modelin tümü, parça büyüklüklerine göre çözüm ağına ayrıştırılmıştır. Birim büyüklüğü 5 birim olacak şekilde genel ayrıştırma (*global seed*) işlemi yapılmıştır. Uygun ağ aralıkları sağlandıktan sonra, kabuk elemanlara *kuadritik*, solid olan elemanlara *hex* ağ eleman tipleri atanmıştır (Şekil 4.54).



Kutu profil numunesi



Boru profil numunesi

Şekil 4.54 Sonlu eleman çözüm ağı düzenlenmiş modeller.

4.7.3 Sayısal Analiz Sonuçları

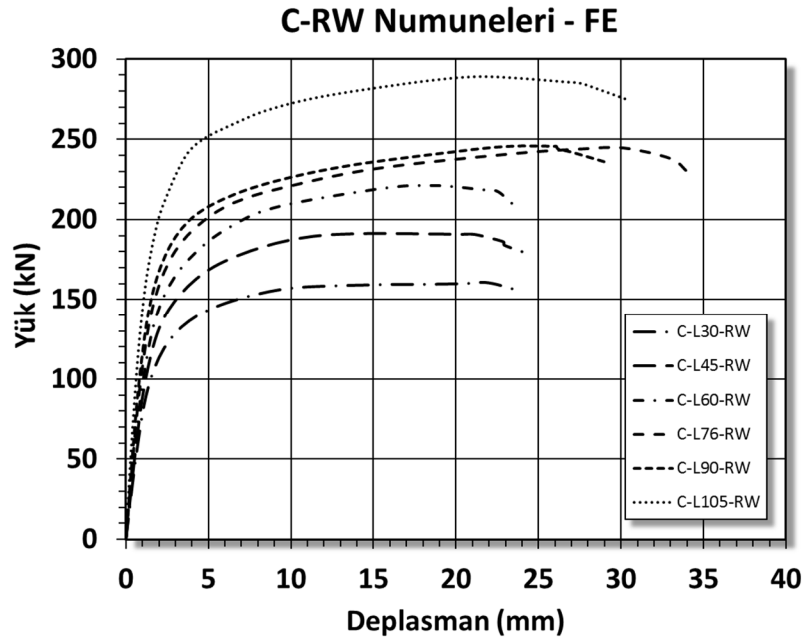
Tüm numunelerin sonlu eleman modelleri yukarıda anlatılan adımlar uygulanarak oluşturulmuş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Boru numuneler için elde edilen sonuçlar derlenerek grafik ve tablolar yardımı ile aşağıda belirtilmiştir (Tablo 4.17, Şekil 4.55 ve 4.56). Grafiklerde sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri, tablolarda ise tüm numuneler için maksimum yük ve yer değiştirmeler verilmiştir.

Tablo 4.17 Boru numunelerin sayısal analiz, yük-yer değiştirme sonuçları.

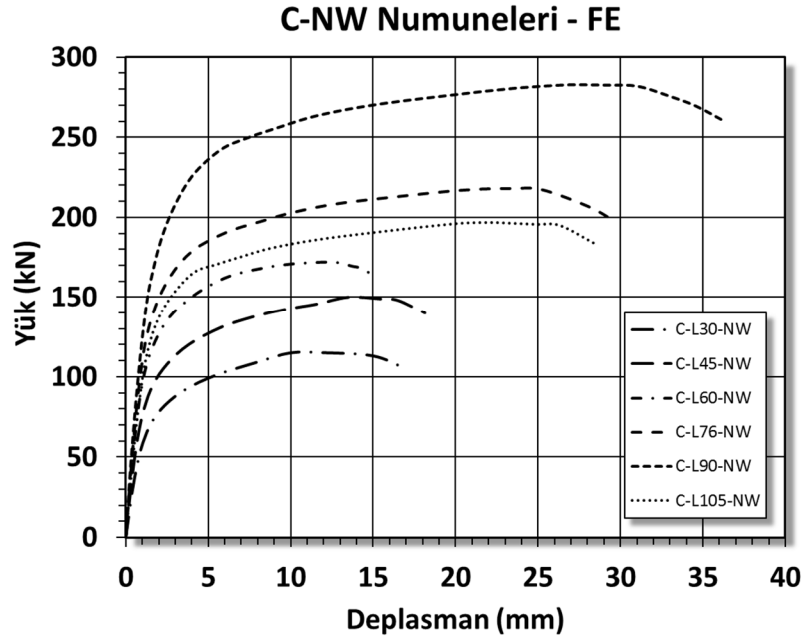
Numune	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değiştirme δ_{FE}^{**} (mm)	Numune	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değiştirme δ_{FE}^{**} (mm)
C-L30-NW	115.1	12.0	C-L30-RW	160.6	21.9
C-L45-NW	150.2	13.5	C-L45-RW	191.2	14.4
C-L60-NW	172.0	12.4	C-L60-RW	221.2	18.8
C-L76-NW	218.3	23.5	C-L76-RW	244.6	30.2
C-L90-NW	211.4	25.3	C-L90-RW	245.9	23.9
C-L105-NW	196.8	22.3	C-L105-RW	246.1	20.6

* Ulaşılan maksimum yük değeri.

** Maksimum yük değerindeki yer değiştirme



Şekil 4.55 Boru profillerin (RW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.



Şekil 4.56 Boru profillerin (NW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.

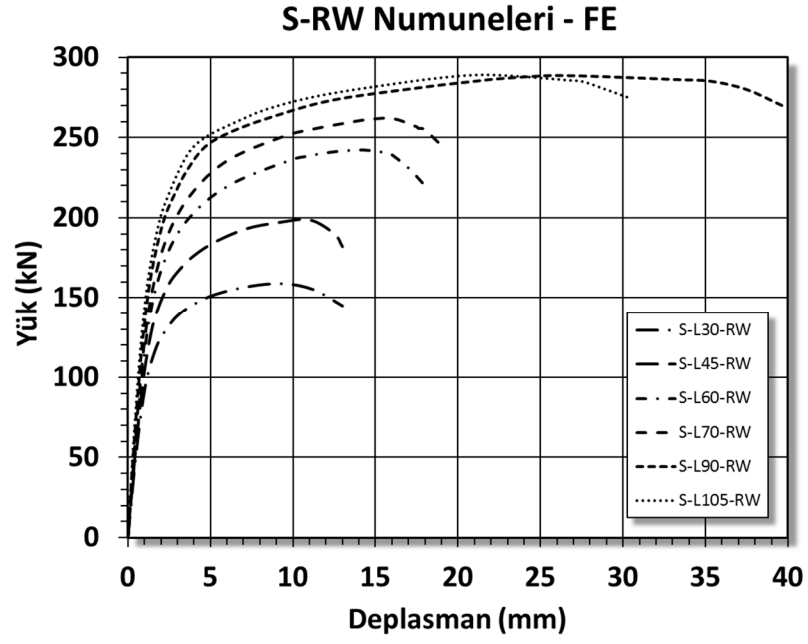
Kutu numuneler için elde edilen sonuçlar derlenerek grafik ve tablolar yardımı ile aşağıda belirtilmiştir (Tablo 4.18, Şekil 4.57 ve 4.58).

Tablo 4.18 Kutu numunelerin sayısal analiz, yük-yer değiştirme sonuçları.

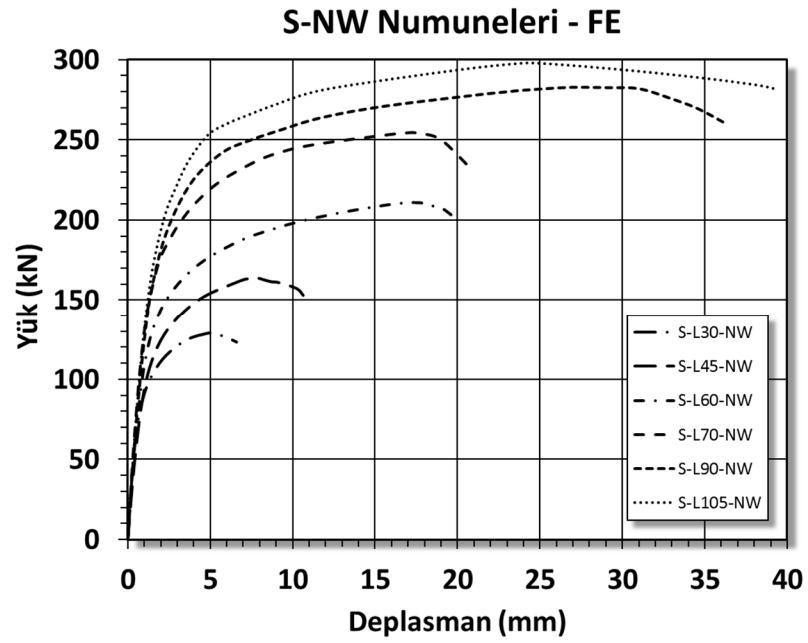
Numune	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değiştirme δ_{FE}^{**} (mm)	Numune	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değiştirme δ_{FE}^{**} (mm)
S-L30-NW	129.0	5.0	S-L30-RW	158.9	9.5
S-L45-NW	163.9	7.8	S-L45-RW	198.7	11.0
S-L60-NW	211.0	17.1	S-L60-RW	242.2	14.0
S-L70-NW	254.5	17.2	S-L70-RW	262.1	15.6
S-L90-NW	282.8	27.4	S-L90-RW	288.6	26.7
S-L105-NW	297.9	24.6	S-L105-RW	289.1	21.9

* Ulaşılan maksimum yük değeri.

** Maksimum yük değerindeki yer değiştirme



Şekil 4.57 Kutu profillerin (RW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.



Şekil 4.58 Kutu profillerin (NW) sayısal analiz yük-yer değiştirme eğrileri.

Boru numuneler için test ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar derlenip grafik ve tablolar yardımı ile karşılaştırılarak aşağıda belirtilmiştir (Tablo 4.19 ve Tablo 4.20).

Tablo 4.19 Boru profil (NW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.

Numune	Test Yüğü N_{Test}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{Test}^{**} (mm)	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{FE}^{**} (mm)	N_{FE} / N_{Test}
C-L30-NW	103.0	5.7	115.1	12.0	1.12
C-L45-NW	135.4	7.2	150.2	13.5	1.11
C-L60-NW	161.9	10.6	172.0	12.4	1.06
C-L76-NW	192.3	10.7	218.3	23.5	1.14
C-L90-NW	190.3	10.3	211.4	25.3	1.11
C-L105-NW	187.4	24.5	196.8	22.3	1.05
Ortalama :					1.10
Standart Sapma (%) :					3.4

* Ulaşılan maksimum yük değeri.

** Maksimum yük değerindeki yer değışirme

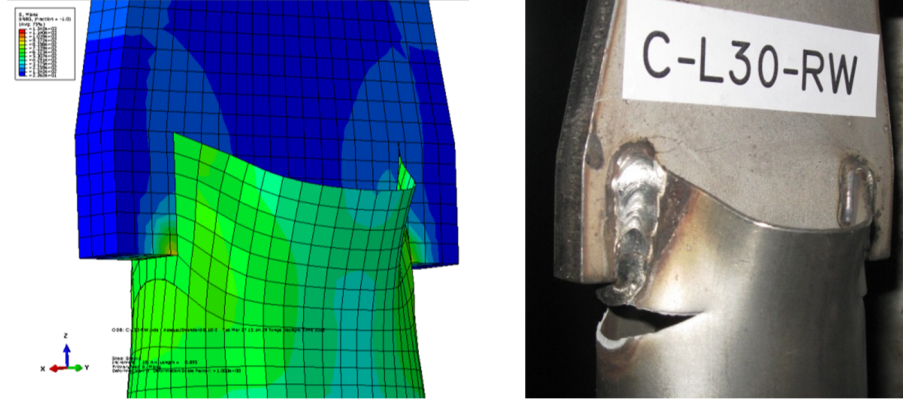
Tablo 4.20 Boru profil (RW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.

Numune	Test Yüğü N_{Test}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{Test}^{**} (mm)	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{FE}^{**} (mm)	N_{FE} / N_{Test}
C-L30-RW	157.0	12.2	160.6	21.9	1.02
C-L45-RW	184.4	10.2	191.2	14.4	1.04
C-L60-RW	215.8	11.8	221.2	18.8	1.03
C-L76-RW	241.3	25.5	244.6	30.2	1.01
C-L90-RW	247.2	46.3	245.9	23.9	0.99
C-L105-RW	251.1	13.6	246.1	20.6	0.98
Ortalama :					1.01
Standart Sapma (%) :					2.1

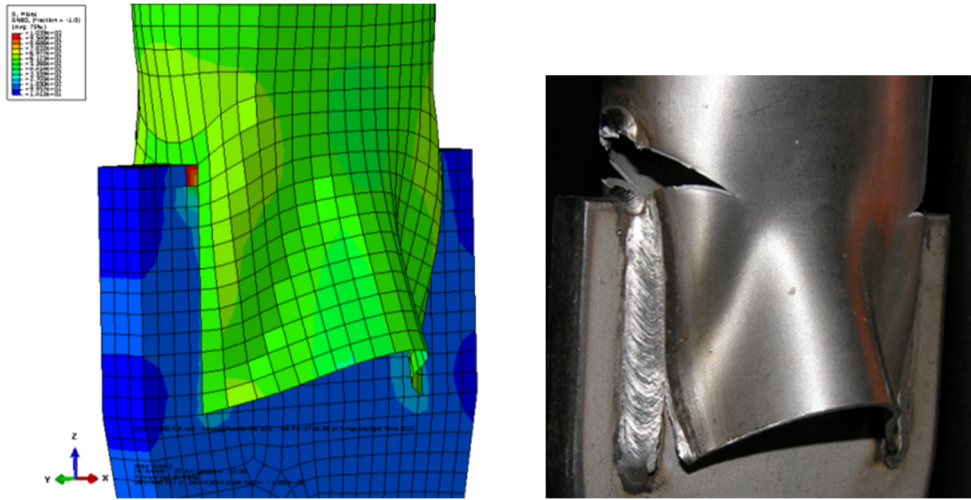
* Ulaşılan maksimum yük değeri.

** Maksimum yük değerindeki yer değışirme

Testlerde gözlemlenen birleşim şekil değiştirme biçimleri sonlu elemanlar yöntemiyle başarılı bir şekilde benzetilmiş ve boru numuneler için tipik örnekler aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.59 ve 4.60).



Şekil 4.59 C-L30-RW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.



Şekil 4.60 C-L60-RW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.

Kutu numuneler için test ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar derlenerek grafik ve tablolar yardımı ile karşılaştırılarak aşağıda belirtilmiştir (Tablo 4.21 ve Tablo 4.22).

Tablo 4.21 Kutu profil (NW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.

Numune	Test Yüğü N_{Test}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{Test}^{**} (mm)	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{FE}^{**} (mm)	N_{FE} / N_{Test}
S-L30-NW	121.6	4.8	129.0	5.0	1.06
S-L45-NW	149.1	9.1	163.9	7.8	1.10
S-L60-NW	192.3	14.4	211.0	17.1	1.10
S-L70-NW	251.1	11.7	254.5	17.2	1.01
S-L90-NW	251.1	9.1	282.8	27.4	1.13
S-L105-NW	288.4	24.3	297.9	24.6	1.03
Ortalama :					1.07
Standart Sapma (%) :					4.3

* Ulaşılan maksimum yük değeri.

** Maksimum yük değeriindeki yer değışirme

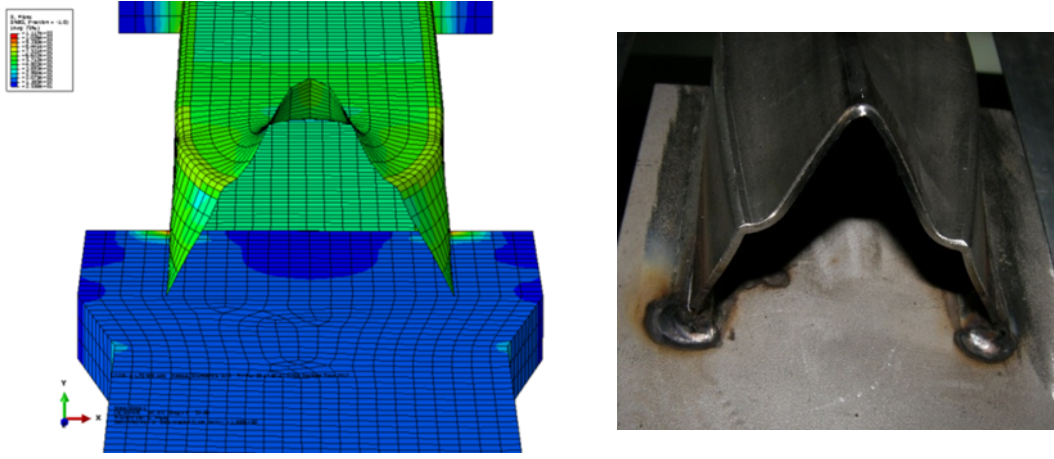
Tablo 4.22 Kutu profil (RW) numuneleri test ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırması.

Numune	Test Yüğü N_{Test}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{Test}^{**} (mm)	FE Yüğü N_{FE}^* (kN)	Yer Değişirme δ_{FE}^{**} (mm)	N_{FE} / N_{Test}
S-L30-RW	147.2	4.7	158.9	9.45	1.08
S-L45-RW	188.4	6.1	198.7	11.00	1.05
S-L60-RW	225.6	6.4	242.2	14.04	1.07
S-L70-RW	274.7	9.8	262.1	15.58	0.95
S-L90-RW	314.9	29.5	288.6	26.67	0.92
S-L105-RW	321.8	20.7	289.1	21.88	0.90
Ortalama :					1.00
Standart Sapma (%) :					8.3

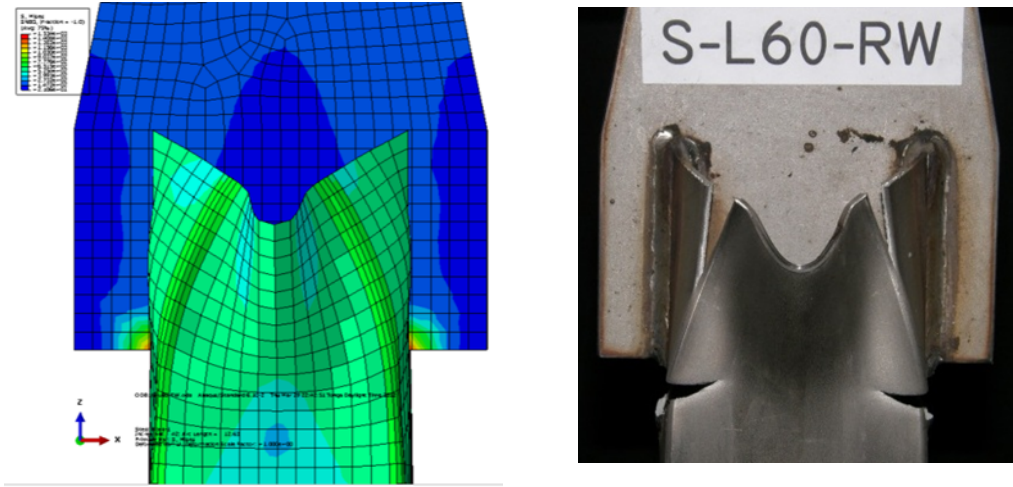
* Ulaşılan maksimum yük değeri.

** Maksimum yük değeriindeki yer değışirme

Testlerde gözlemlenen birleşim şekil değiştirme biçimleri sonlu elemanlar yöntemiyle başarılı bir şekilde benzetilmiş ve kutu numuneler için tipik örnekler aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.61 ve 4.62).

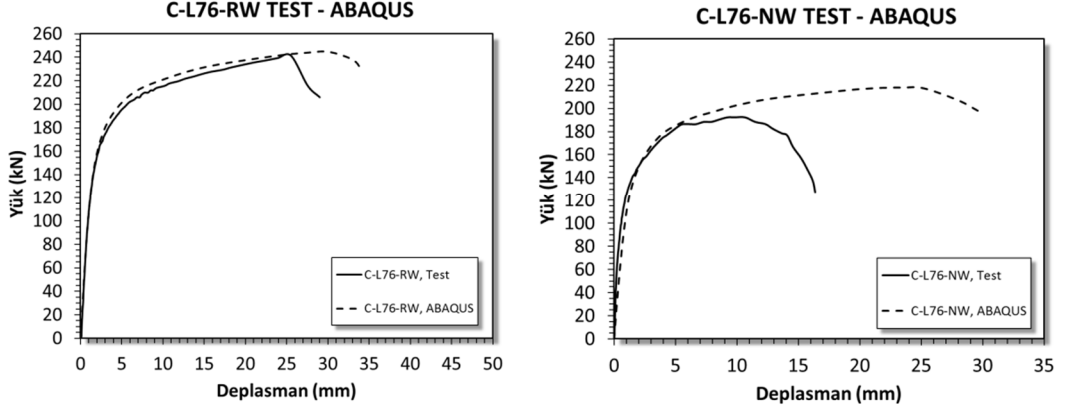


Şekil 4.61 S-L70-NW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.

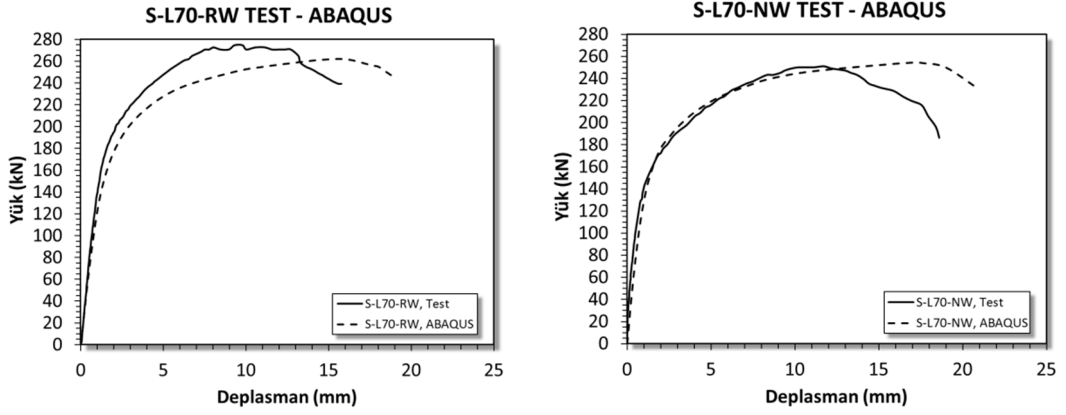


Şekil 4.62 S-L60-RW numunesi, test ve sonlu eleman analizi sonuçlarına göre göçme modları.

Sayısal analiz çalışmaları yapılan paslanmaz çelik kapalı kesitlerin plakalı birleşimleri için elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir. Örnek olarak, C-L76 ve S-L70 numunelerinin deney ve sonlu eleman analiz sonucu yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 4.63 ve 4.64). Ayrıntılı sonlu eleman analiz sonuçları ve karşılaştırmaları Ek B’de sunulmuştur.



Şekil 4.63 C-L76 numunelerinin RW ve NW tiplerinin deney ve sonlu eleman analiz sonucu yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.



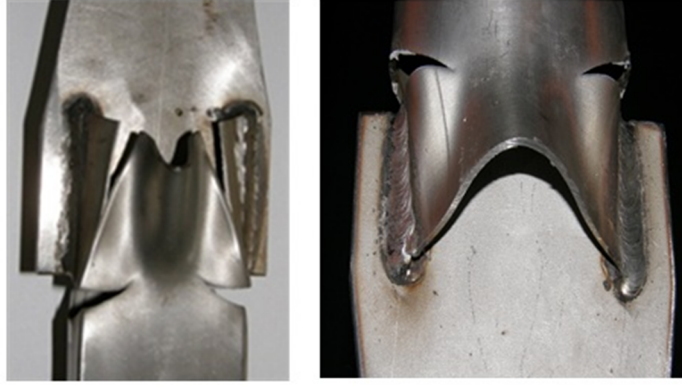
Şekil 4.64 S-L70 numunelerinin RW ve NW tiplerinin deney ve sonlu eleman analiz sonucu yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.

- Deneysel çalışmalardan elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ile sayısal analiz sonuçlarının kısmen uyduğu tespit edilmiştir. Özellikle kalıcı plastik şekil değiştirmelerin minimum olduğu ilk bölgelerde büyük oranda yakınsama elde edilmiştir.
- Boru profil NW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.10, standart sapma değeri %3.4 olmuştur.
- Boru profil RW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.01, standart sapma değeri %2.1 olmuştur.

- Kutu profilli NW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.07, standart sapma değeri %4.3 olmuştur.
- Kutu profilli RW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.0, standart sapma değeri %8.3 olmuştur.
- Test çalışmalarının sonuçlarında görüleceği gibi kaynak uç dönüşü olmayan (NW) numunelerin, kaynak uç dönüşü olan (RW) numunelerine göre sonlu eleman çözümlerinde de daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.
- RW numunelerinde bulunan uç dönüş kaynağı, uygulanan yükün kesit üzerine daha etkili yayılmasını sağlamış ve dayanımı artırıcı bir etken olmuştur.
- RW numunelerinde aksel yük doğrultusunda izlenen yer değiştirmeler kaynaklı olan aynı tip numunelere göre daha düşük uzama ve daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.
- RW numunelerinin analizleri sırasında uç dönüş kaynağının olduğu bölgelerde daha erken akma gerilmelerine ulaşıldığı gözlenmiştir.
- Boru kesitli numunelerin sonlu elemanlar analizlerinde daha erken yük seviyelerinde kesit çarpılmalarının olduğu, kutu profilli numunelerde ise maksimum yük seviyelerine yakın durumlarda aşırı şekil değiştirmelerin olduğu gözlenmiştir.

4.8 Yaklaşık Kapasite Eğrisi ile Birleşim Akma Yükünün Belirlenmesi

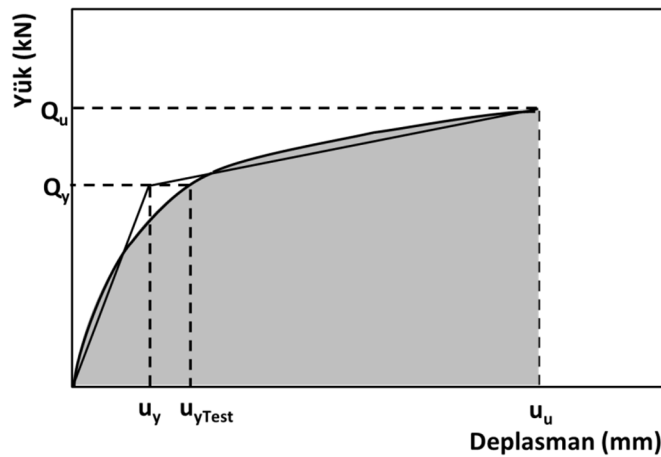
Deneysel çalışmalarda elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinden, görsel gözlemlerden ve sayısal analiz sonuçlarından da görüleceği üzere test numunelerinin birleşim geometrilerindeki aşırı çarpılmalar ve yüksek şekil değiştirmelerle maksimum çekme (N_{Test}) yüklerine ulaşılmıştır (Şekil 4.65). Bu pratik olmayan davranışın önlenmesi için tasarımda kullanılabilir bir limitin uygulanması gerekmektedir. Daha az şekil değiştirme seviyesindeki yükün esas alınması daha makul olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.65 Kesitte aşırı çarpılma ve yüksek şekil değiştirme.

Bu nedenle maksimum çekme yükünden daha düşük değerlerde bir dayanımın dikkate alınmasıyla kullanılabilir sınırlarda bir birleşim dayanımı önerilmektedir. Deney numunelerinin eğrileri üzerinden birleşim için “ilk akma yük seviyesi” nin bu kapsamda esas alınabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla birleşimin ilk akma yükü (Q_y) değerinin hesaplanması için, uygulanan yöntem aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Birleşimin çekme yükü altında sergilemiş olduğu davranışla sarfedilen enerji, yük-yer değiştirme grafiğindeki eğrinin altında kalan alanla ifade edilir. Bu alan sünekliği belirtmekte ve eleman için yerel süneklik alanının tespiti için kullanılmaktadır. Yerel süneklik alanına eş değer ve ortalama bilineer şekilde temsil edilen yeni eğri, yaklaşık kapasite diyagramı olarak tanımlanır (Reinhorn A.M. 1997) (Şekil 4.66).



Şekil 4.66 Yük-yer değiştirme kapasitesinin yaklaşık bilineer modelle gösterilmesi.

Basitleştirilmiş ifadeyle,

$$Q_{(u)} = Q_y \left\{ \frac{u}{u_y} - (1-\alpha) \left(\frac{u}{u_y} - 1 \right) U \left[\frac{u}{u_y} - 1 \right] \right\} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte Q_y ve u_y birleşimin akma dayanımı ve yer değiştirmesine, Q_u ve u_u birleşimin maksimum dayanım ve yer değiştirmesine karşılık gelmektedir. Akma sonrası pekleşme rijitliği oranı $\alpha=K_y/K_o$ olarak ifade edilir. Süneklik oranları arasında da aynı ilişki kurulabilir.

$$Q_{(\mu)} = Q_y \left\{ \mu - (1-\alpha)(\mu-1) U[\mu-1] \right\} \quad (4.7)$$

Bilineer kapasite grafiğinde ilk doğru parçası, başlangıç rijitliği eğiminden küçük olan ve (K_o) eğimindeki doğrudur. İkinci doğru parçası ise maksimum yük (Q_u) değerinden geçen ve ilk grafikte kesişen doğrudur. Gerçekte kopma yükü olarak ifade edilen Q_u , bu örnekte testlerde elde edilmiş maksimum yüke (N_{Test}) karşılık gelmektedir. Grafikte maksimum yük sonrası enerji yutma kabiliyeti zayıfladığından ileriki yük-yer değiştirme değerleri dikkate alınmamıştır.

$$A = \frac{1}{2} Q_y u_y + \frac{1}{2} (Q_u + Q_y)(u_u - u_y) \quad (4.8)$$

Yukarıdaki denklemde A alanı, göçme öncesi ulaşılan maksimum yüke kadar yapılan işi ifade etmektedir. Eşdeğer bilinear kapasite grafiğinde, Q_y ve u_y birleşimin akma kuvveti ve akma yer değiştirmesini, Q_u ve u_u birleşimin maksimum dayanım ve buna karşılık gelen yer değiştirmesini göstermektedir (Şekil 4.66). Akma yükü akma yer değiştirmesinden ve akma sonrası rijitliğinden bulunabilir ($K_y=\alpha.K_o$).

$$u_y = \frac{2 Q_u u_u - K_y u_u^2 - 2 A}{Q_u - K_y u_u} \quad (4.9)$$

Bilineerleştirme yapıldıktan sonra akma ifadesinin olduğu değere kadar olan üçgenin alanı (B) elastik bölgeyi ifade eder.

$$B = \frac{1}{2} Q_y u_y \quad (4.10)$$

Yukarıdaki ifadelerle göre aşağıdaki tablolar hazırlanmıştır (Tablo 4.23 ve 4.24). Test numuneleri için birleşimin akma yükü (Q_y), bilineerleştirme yapılarak elde edilen iki lineer ifadenin kesiştiği yük seviyesi olarak alınmıştır. Akma yüküne karşılık gelen yer değiştirme (u_y) ise birleşimin akma yer değiştirmesidir. Ancak birleşimin deney yük-yer değiştirme eğrisi üzerindeki akma yüküne karşılık gelen yer değiştirme değeri (u_{yTest}) olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 4.23 Boru profil numuneleri için birleşim akma yükü tablosu.

Numune	Birleşim Akma Yükü Q_y (kN)	Birleşim Akma Yer Değ. u_y (mm)	Birl. Akma Yer Değ. u_{yTest} (mm)	Maks. Yük* Q_u (kN)	Maks Yer Değ. u_u (mm)	Q_y / Q_u	u_y / u_u
C-L30-NW	77	1.15	1.90	103.0	5.70	0.75	0.20
C-L45-NW	101	0.50	1.69	135.4	7.24	0.75	0.07
C-L60-NW	138	0.92	2.78	161.9	10.64	0.85	0.09
C-L76-NW	157	0.63	2.45	192.3	10.65	0.82	0.06
C-L90-NW	142	1.42	2.44	190.3	10.26	0.75	0.14
C-L105-NW	150	1.20	5.08	187.4	24.50	0.80	0.05
C-L30-RW	117	1.17	3.39	157.0	12.24	0.75	0.10
C-L45-RW	132	0.53	1.88	184.4	10.22	0.72	0.05
C-L60-RW	163	0.75	2.48	215.8	11.84	0.76	0.06
C-L76-RW	195	1.95	4.85	241.3	25.53	0.81	0.08
C-L90-RW	191	1.43	5.95	247.2	46.25	0.77	0.03
C-L105-RW	215	0.72	2.35	251.1	13.60	0.86	0.05
Ortalama :						0.78	0.08
Standart Sapma (%) :						4.5	4.7

* Testte elde edilmiş maksimum yük (N_{Test}).

Tablo 4.24 Kutu profil numuneleri için birleşim akma yükü tablosu.

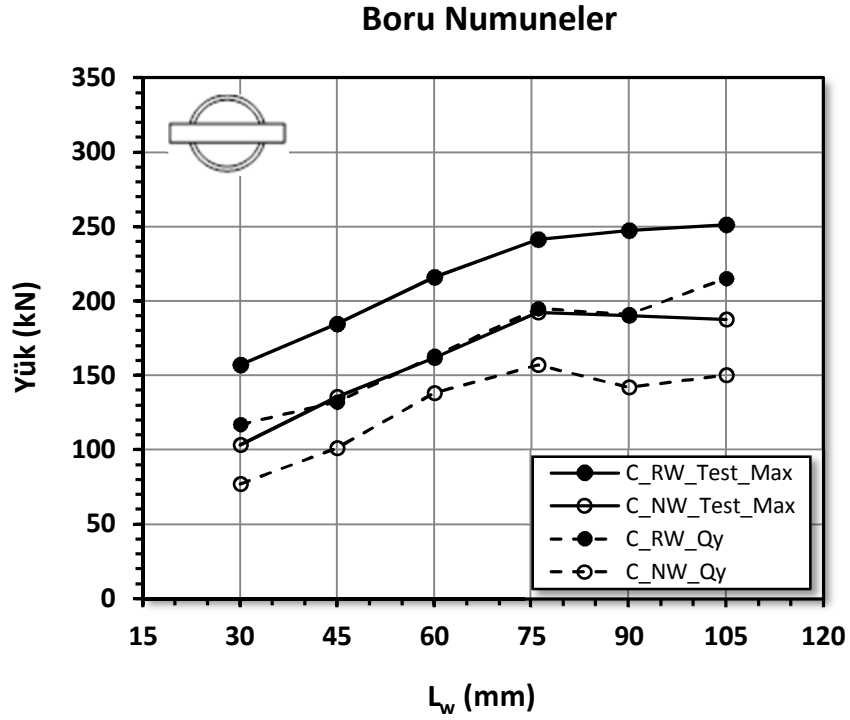
Numune	Birleşim Akma Yüğü Q_y (kN)	Birleşim Akma Yer Değ. u_y (mm)	Birl. Akma Yer Değ. u_{yTest} (mm)	Maks. Yüğü* Q_u (kN)	Maks Yer Değ. u_u (mm)	Q_y / Q_u	u_y / u_u
S-L30-NW	91	0.30	0.93	121.6	4.83	0.75	0.06
S-L45-NW	115	0.58	1.99	149.1	9.08	0.77	0.06
S-L60-NW	157	0.63	3.22	192.3	14.38	0.82	0.04
S-L70-NW	184	0.74	2.50	251.1	11.72	0.73	0.06
S-L90-NW	193	1.54	2.70	251.1	9.10	0.77	0.17
S-L105-NW	229	1.53	5.20	288.4	24.34	0.80	0.06
S-L30-RW	103	0.52	1.00	147.2	4.72	0.70	0.11
S-L45-RW	135	0.54	1.21	188.4	6.09	0.72	0.09
S-L60-RW	161	0.64	1.30	225.6	6.36	0.71	0.10
S-L70-RW	214	1.46	2.73	274.7	9.79	0.78	0.15
S-L90-RW	256	1.71	5.15	314.9	29.53	0.81	0.06
S-L105-RW	272	1.60	3.75	321.8	20.71	0.84	0.08
Ortalama :						0.77	0.09
Standart Sapma (%) :						4.6	3.8

* Testte elde edilmiş maksimum yük (N_{Test}).

Tablo 4.23 ve 4.24'teki taralı bölgelerdeki değerlere dikkat edilecek olursa birleşim akma yükleri Q_y 'ye karşılık gelen deney eğrisi üzerindeki yer değiştirmeler, maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirmelerle karşılaştırıldığında oldukça makul seviyede düşük yer değiştirmeler oldukları görülmektedir. Bu bakımdan tasarıma yönelik "birleşim akma yükleri"nin kullanılması daha doğru olacaktır.

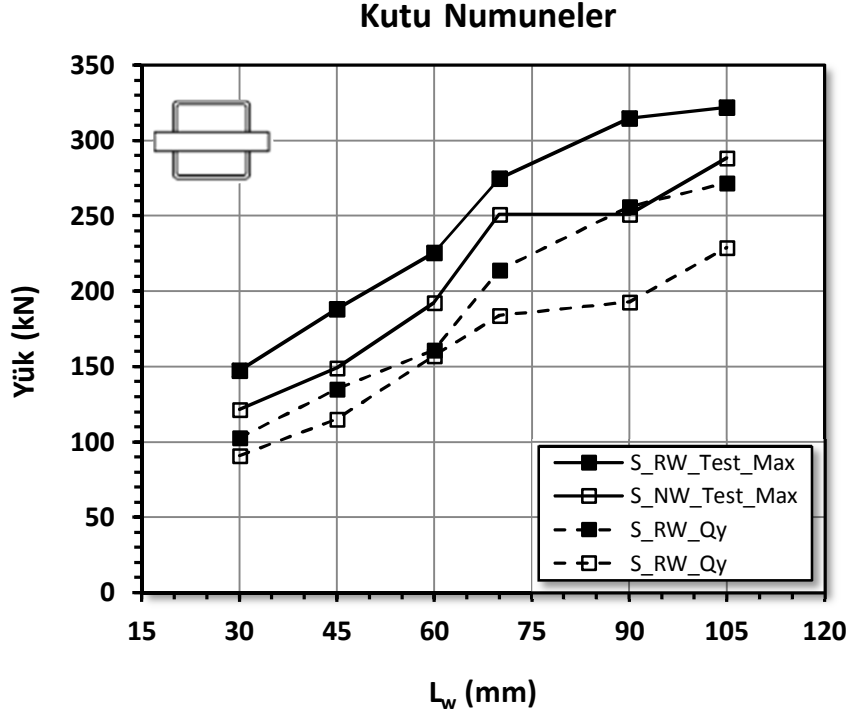
Yukarıdaki tablo sonuçlarına göre aşağıda birleşim akma yükü (Q_y) grafikleri hazırlanmıştır (Şekil 4.67 ve 4.68). Grafiklerden de anlaşılacağı üzere akma yükü değerleri genel itibariyle kaynak uzunluğuna bağlı olarak belirgin bir şekilde artış göstermektedir. Q_y , boru profil numunelerde $L_w=D=76$ mm kaynak uzunluğu değerinden sonra fazla artış göstermemiştir (Şekil 4.67). Uç dönüş kaynağı olan ve olmayan (C-RW ve C-NW) numunelerin birleşim akma yükü değerleri birbirine

paralel olup beklenen davranışı gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.67 Boru test numunelerinin birleşim akma yükü ve test yükü grafiği.

Kutu profilli numunelerde kaynak uzunluğu arttıkça birleşim akma yüküde gittikçe artmıştır. Kaynak uzunluğu $L_w=30, 45$ ve 60 mm olan numuneler için birleşim akma yükleri birbirlerine yakın değerler alırken, $L_w=70, 90$ ve 105 mm'lik kaynak uzunluklarına sahip numunelerin yük değerleri arasındaki fark artış göstermektedir (Şekil 4.68).



Şekil 4.68 Boru ve kutu numunelerinin birleşim akma yükü ve test yükü grafiği.

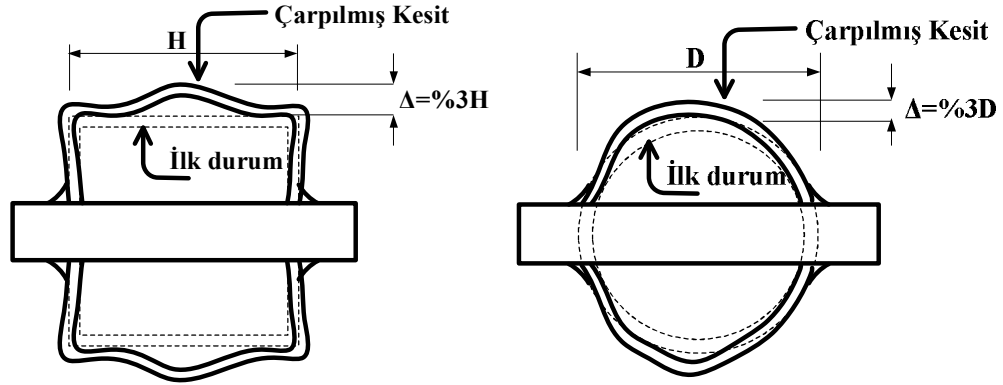
Kutu profilli numunelerin, Şekil 4.68'deki grafik incelendiğinde birleşim akma yükleri ve test yüklerinin kaynak uzunluğuna bağlı olarak dayanım artışlarının daha belirgin olduğu görülmektedir.

Her iki grafikte de değerlerin ortalama eğimleri dikkate alındığında (boru numuneler $m=100\text{kN}/85\text{mm}=1.17$ ve kutu numuneler $m=166\text{kN}/85\text{mm}=1.95$ ($1.95/1.17$)-1= %66) kutu profilli numunelerin dayanım artışlarının yaklaşık 1,66 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak kutu profil numunelerinin enkesit alanının ($A=537.1\text{mm}^2$) boru numunelerinin enkesit alanından ($A=465.6\text{mm}^2$) %15 fazla olması ve kutu profillerde köşe kıvrımlarının etkisinin kesite yayılan yükün artışına paralel olarak dayanıma katkı sağlamasıdır.

4.9 Kesit Çarpılmasına Bağlı Maksimum Yükün Bulunması

Bir önceki başlıkta belirtildiği gibi maksimum aksenal çekme yükü, numunelerde aşırı kesit çarpılması ve yüksek şekil değiştirme seviyelerine ulaşıldıktan sonra elde edilmiştir. Bu durum birleşimin pratikte kullanılabilir olmasının mümkün olmadığı bir duruma karşılık gelmektedir. Çekme yükü etkisiyle birleşimdeki elemanın

enkesitinde ovalizasyon meydana gelmekte ve buna bağlı olarak kesit çarpılmaları oluşmaktadır (Şekil 4.69). Bu bölümde 4.8’de bahsedilen birleşim akma yüküne göre yapılan değerlendirmeye alternatif olarak kesit çarpılması limitine göre değerlendirme açıklanmaktadır.



Şekil 4.69 Kesit çarpılması sınır durumları.

Literatürde kapalı kesitli profillerin bu tip kullanımlarının faydalı olabilmesi için ulaşılabilecek en büyük çekme yükünün, kesit çarpılma sınırının veya distorsiyon limitinin (Δ) eleman çapının en fazla %3’ündeki yük seviyesi kadar olabileceği önerilmiştir (Martinez ve Packer, 2006). Buna göre mevcut araştırma kapsamında sözkonusu limitler aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır;

$$\text{boru profiller için } (D=\text{Ø}76.1\text{mm}) : \quad \Delta = \%3D = 2.28\text{mm} \quad (4.11)$$

$$\text{kutu profiller için } 70.70.2 \text{ (H=70mm)} : \quad \Delta = \%3H = 2.10\text{mm} \quad (4.12)$$

Yukarıda belirtilen kesit çarpılması limitlerine göre numunelerin sayısal analiz sonuçlarından elde edilen %3 kesit çarpılmalarına denk gelen çekme yükleri ve boyca uzama değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 4.25).

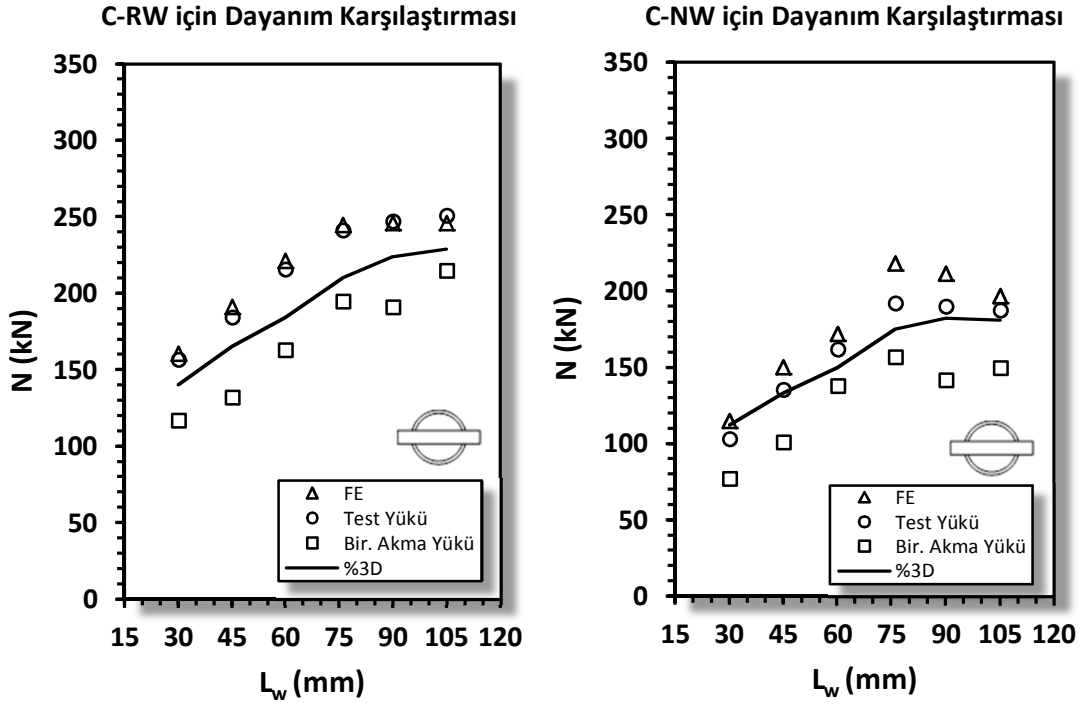
Tablo 4.25 Numunelerde %3D,H kesit çarpılması limitindeki yük ve yer değiştirme.

Numune	Yük N _{%3D} (kN)	Yer Değ. u _{%3D} (mm)
C-L30-NW	112*	9.0
C-L45-NW	133	6.4
C-L60-NW	150	2.7
C-L76-NW	175	4.0
C-L90-NW	182	6.1
C-L105-NW	181	8.9
C-L30-RW	140	6.1
C-L45-RW	165	5.3
C-L60-RW	184	4.8
C-L76-RW	210	6.5
C-L90-RW	224	9.1
C-L105-RW	229	9.1

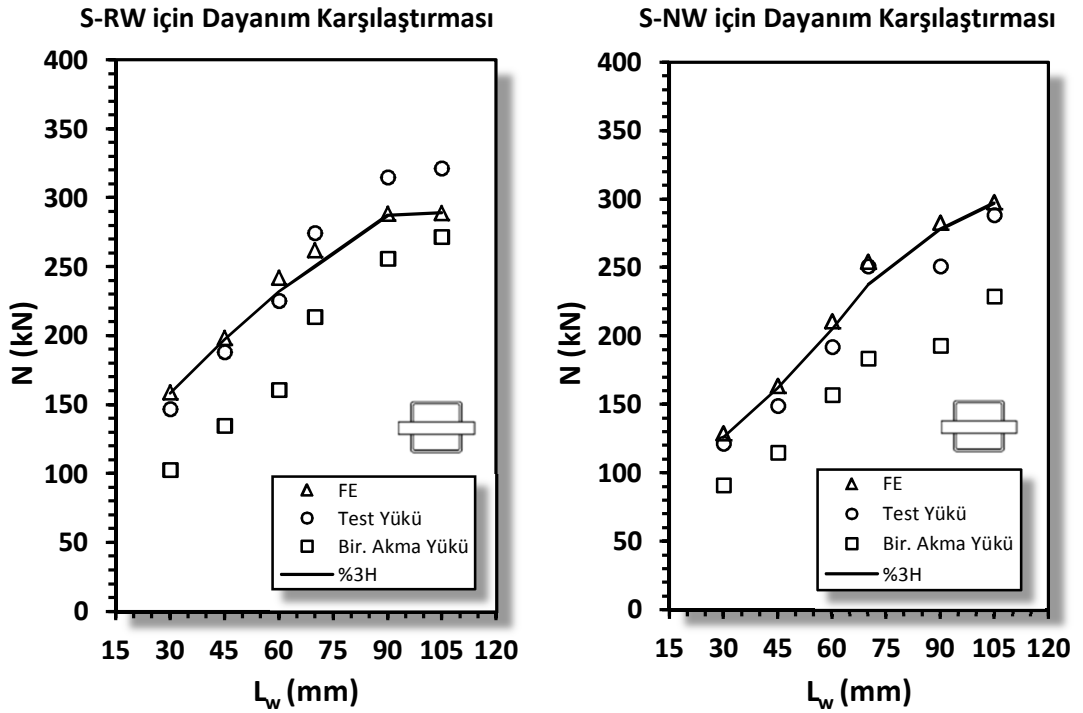
Numune	Yük N _{%3D} (kN)	Yer Değ. u _{%3D} (mm)
S-L30-NW	126*	6.1
S-L45-NW	162*	6.8
S-L60-NW	205*	7.0
S-L70-NW	237	7.8
S-L90-NW	278*	21.2
S-L105-NW	297*	26.1
S-L30-RW	158*	9.4
S-L45-RW	197*	9.1
S-L60-RW	232*	9.9
S-L70-RW	250	9.3
S-L90-RW	287	22.6
S-L105-RW	289	21.8

* Maksimum test yükü sonrası erişilen kesit çarpılması yükü.

Numuneler için yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarla elde edilen maksimum yük seviyeleri ile yaklaşık birleşim akma yükü ve maksimum kesit çarpılma limiti seviyesindeki yükler dikkate alınarak boru ve kutu numuneler için aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur (Şekil 4.70 ve 4.71).



Şekil 4.70 Boru numunelerde elde edilen yük seviyeleri.



Şekil 4.71 Kutu numunelerde elde edilen yük seviyeleri.

Numunelerin, yük-yer değiştirme grafikleri üzerinden belirlenen yaklaşık birleşim akma yükleri (Q_y), yukarıdaki grafiklerden de anlaşılacağı üzere çekme yükü altındaki elemanlar için maksimum kullanılabilirlik sınırı olan ($\Delta = \%3D$, H) kesit çarpılma ifadesinin belirlediği limit yüklerin altında kalmaktadır. Bu durumda birleşim akma yüklerine karşılık gelen kesit çarpılma değerleri (X), 0.03'ten daha küçük olacaktır. Bu değerler aşağıdaki ifadeden elde edilerek Tablo 4.26'da verilmiştir.

$$\Delta_{Q_y} = \% (X) D \text{ veya } H \quad (4.13)$$

$$X = 100 \Delta_{Q_y} / D \text{ veya } H \quad (4.14)$$

Tablo 4.26 Birleşim akma yüklerine karşılık gelen Δ ve $\% (X) D$ kesit çarpılma limitleri.

Numune	Yük Q_y (kN)	Kesit Çarp. Δ_{Q_y} (mm)	$\% (X) D$ X	Numune	Yük Q_y (kN)	Kesit Çarp. Δ_{Q_y} (mm)	$\% (X) D$ X
C-L30-NW	77	1.50	1.97	S-L30-NW	91	0.56	0.80
C-L45-NW	101	1.70	2.23	S-L45-NW	115	0.28	0.40
C-L60-NW	138	2.09	2.74	S-L60-NW	157	0.56	0.80
C-L76-NW	157	2.03	2.67	S-L70-NW	184	0.49	0.70
C-L90-NW	142	1.72	2.26	S-L90-NW	193	0.21	0.30
C-L105-NW	150	1.73	2.27	S-L105-NW	229	0.21	0.30
C-L30-RW	117	1.58	2.08	S-L30-RW	103	0.07	0.10
C-L45-RW	132	1.54	2.03	S-L45-RW	135	0.04	0.05
C-L60-RW	163	1.91	2.51	S-L60-RW	161	0.01	0.02
C-L76-RW	195	2.08	2.73	S-L70-RW	214	0.14	0.20
C-L90-RW	191	1.88	2.47	S-L90-RW	256	0.70	1.00
C-L105-RW	215	2.10	2.76	S-L105-RW	272	0.70	1.00
Ortalama :			2.40	Ortalama :			0.47

Yukarıdaki tablodan da görüleceği üzere boru numuneler için birleşim akma (Q_y)

yüklerine karşı gelen kesit çarpımları (Δ_{Qy}) için katsayı (**X**) değerlerinin ortalaması **2.40**, kutu numuneler için ise **0.47** civarında olmaktadır. Kutu numunelerinin ortalama değerinin küçük çıkmasının sebebi, köşe kıvrımlarının etkisiyle kesitteki çarpımlar maksimum yüke yakın seviyelere kadar küçük değerlerde iken maksimum yüke ulaşıldığı anlarda hasar ve gerilme dağılımlarının ileri seviyelere gelmesiyle kesit çarpımları %3H seviyesine erişmekte ve sonrasında çok hızlı deforme olmaktadır. Bu durumda kutu profilli numunelerde birleşim akma yüküne karşılık gelen kesit çarpımları değerleri oldukça küçük çıkmaktadır.

5 DENEYSEL, SAYISAL ANALİZ VE ANALİTİK ÇALIŞMA SONUÇLARININ TASARIMA YÖNELİK DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Giriş

Bu bölümde, paslanmaz çelik profil kaynaklı uç birleşim numuneleri için yapılan deneysel ve sonlu elemanlarla modelleme çalışmalarının sonuçları, yaklaşık birleşim akma yükleri ve kesit çarpılması limit durumu dikkate alınarak tasarıma yönelik değerlendirilmeler yapılmıştır. Elde edilen bulgular kullanılarak karbon çeliği için mevcut olan yönetmelik kurallarının, paslanmaz çelik profillerin kaynaklı uç birleşimleri için uygunluğu tartışılmış ve tasarım önerilerinde bulunulmuştur.

5.2 Analitik ve Deneysel Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında testleri yapılan 24 adet paslanmaz çelik numunenin, karbon çeliği için önerilen standartlardaki ilgili tasarım kuralları kullanılarak çekme yükü nominal dayanımlarının belirlenebilmesi için gerekli geometrik parametreler ve enkesit azaltma katsayıları hem boru ve hemde kutu profiller için aşağıdaki tablolarda ayrı ayrı verilmiştir (Tablo 5.1 ve 5.2).

Tablo 5.1 Boru numunelerin nominal dayanımlarının belirlenmesi için gerekli parametreler.

Numune (D=76,1mm)	L_w (mm)	L_w/D	CSA			AISC		
			w (mm)	L_w/w	U	\bar{x} (mm)	\bar{x}/L_w	U
C-L30-RW	30	0.39	104.54	0.29	0.215	24.22	0.81	0
C-L45-RW	45	0.59	104.54	0.43	0.323	24.22	0.54	0
C-L60-RW	60	0.79	104.54	0.57	0.430	24.22	0.40	0
C-L76-RW	76	1.00	104.54	0.73	0.546	24.22	0.32	0.682
C-L90-RW	90	1.18	104.54	0.86	0.646	24.22	0.27	0.731
C-L105-RW	105	1.38	104.54	1.00	0.751	24.22	0.23	1.0
C-L30-NW	30	0.39	104.54	0.29	0.215	24.22	0.81	0
C-L45-NW	45	0.59	104.54	0.43	0.323	24.22	0.54	0

C-L60-NW	60	0.79	104.54	0.57	0.430	24.22	0.40	0
C-L76-NW	76	1.00	104.54	0.73	0.546	24.22	0.32	0.682
C-L90-NW	90	1.18	104.54	0.86	0.646	24.22	0.27	0.731
C-L105-NW	105	1.38	104.54	1.00	0.751	24.22	0.23	1.0

Tablo 5.2 Kutu numunelerin nominal dayanımlarının belirlenmesi için gerekli parametreler.

Numune (B=H=70mm)	L_w (mm)	L_w/H	CSA			AISC		
			w (mm)	L_w/w	U	\bar{x} (mm)	\bar{x}/L_w	U
S-L30-RW	30	0.43	122.42	0.25	0.184	26.25	0.88	0
S-L45-RW	45	0.64	122.42	0.37	0.276	26.25	0.58	0
S-L60-RW	60	0.86	122.42	0.49	0.368	26.25	0.44	0
S-L70-RW	70	1.00	122.42	0.57	0.429	26.25	0.38	0.625
S-L90-RW	90	1.29	122.42	0.74	0.551	26.25	0.29	0.708
S-L105-RW	105	1.50	122.42	0.86	0.643	26.25	0.25	0.750
S-L30-NW	30	0.43	122.42	0.25	0.184	26.25	0.88	0
S-L45-NW	45	0.64	122.42	0.37	0.276	26.25	0.58	0
S-L60-NW	60	0.86	122.42	0.49	0.368	26.25	0.44	0
S-L70-NW	70	1.00	122.42	0.57	0.429	26.25	0.38	0.625
S-L90-NW	90	1.29	122.42	0.74	0.551	26.25	0.29	0.708
S-L105-NW	105	1.50	122.42	0.86	0.643	26.25	0.25	0.750

Çalışma kapsamında ele alınan numuneler için Amerikan (AISC) ve Kanada (CSA) standartlarına göre etkili net kesitler (A_e) belirlenmiş ve aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 5.3 ve Tablo 5.4). Birleşimde dönüş uç kaynağının (RW) bulunması durumunda yarık dibindeki boşluğa denk gelen ($A_{nt}=2 t t_p$) alan kaynakla tutulduğu için “0” kabul edilir ve $A_n=A_g$ olarak etkili net enkesit alanı hesaplanır. Amerikan Standardı AISC (2005)’ye göre kayma aksamasının sebep olacağı çevresel yırtılma hasar dayanımının belirlenebilmesi için limit durum ($L_w>1.0D$) dir. Numune çapı olan $D=76.1\text{mm}$ ve kutu profil kesit genişliği $H=70\text{mm}$ ’den daha küçük olan kaynak boyları için kayma aksaması azaltma faktörü hesaplanmamaktadır. Buna bağlı olarak, her iki kesit tipindeki ilk üç numune (C-L30, 45, 60 ve S-L30, 45, 60) için etkili net enkesit alanları “0” olduğundan CF dayanımı hesaplanmamıştır. Standartlara göre hesaplanan dayanım değerleri herhangi bir kısmi güvenlik katsayısı ile çarpılmamış olup nominal dayanım değerleridir.

Tablo 5.3 Boru numuneleri için etkili net enkesit (A_e) alanları.

Numune (D=76,1mm)	L_w (mm)	CSA			AISC		
		A_n (mm ²)	U	A_e (mm ²)	A_n (mm ²)	U	A_e (mm ²)
C-L30-RW	30	465.6	0.215	100.2	465.6	0	0
C-L45-RW	45	465.6	0.323	150.3	465.6	0	0
C-L60-RW	60	465.6	0.430	200.4	465.6	0	0
C-L76-RW	76	465.6	0.546	254.2	465.6	0.682	317.4
C-L90-RW	90	465.6	0.646	300.6	465.6	0.731	340.3
C-L105-RW	105	465.6	0.751	349.7	465.6	1.00	465.6
C-L30-NW	30	405.6	0.215	87.3	405.6	0	0
C-L45-NW	45	405.6	0.323	130.9	405.6	0	0
C-L60-NW	60	405.6	0.430	174.6	405.6	0	0
C-L76-NW	76	405.6	0.546	221.4	405.6	0.682	276.5
C-L90-NW	90	405.6	0.646	261.9	405.6	0.731	296.4
C-L105-NW	105	405.6	0.751	304.6	405.6	1.00	405.6
<i>Dönüş uç kaynağı (RW) olan numunelerde, $A_n=A_g$ alınır.</i>							

Tablo 5.4 Kutu numuneleri için etkili net enkesit (A_e) alanları.

Numune (B=H=70mm)	L_w (mm)	CSA			AISC		
		A_n (mm ²)	U	A_e (mm ²)	A_n (mm ²)	U	A_e (mm ²)
S-L30-RW	30	537.1	0.184	98.7	537.1	0	0
S-L45-RW	45	537.1	0.276	148.1	537.1	0	0
S-L60-RW	60	537.1	0.368	197.4	537.1	0	0
S-L70-RW	70	537.1	0.429	230.3	537.1	0.625	335.7
S-L90-RW	90	537.1	0.551	296.2	537.1	0.708	380.5
S-L105-RW	105	537.1	0.643	345.5	537.1	0.750	402.8
S-L30-NW	30	477.1	0.184	87.7	477.1	0	0
S-L45-NW	45	477.1	0.276	131.5	477.1	0	0
S-L60-NW	60	477.1	0.368	175.4	477.1	0	0
S-L70-NW	70	477.1	0.429	204.6	477.1	0.625	298.2
S-L90-NW	90	477.1	0.551	263.1	477.1	0.708	338.0
S-L105-NW	105	477.1	0.643	306.9	477.1	0.750	357.8
<i>Dönüş uç kaynağı (RW) olan numunelerde, $A_n=A_g$ alınır.</i>							

Deneyi yapılan 24 adet paslanmaz çelik numunenin test göçme modları ile standartların tahmin ettiği göçme modları (CF, TO, ve GY) ile karşılaştırılmış ve 15 numunenin göçme tiplerinin, tahmin edilenlerden farklı olduğu görülmüştür. 12 numunenin göçme modları belirgin şekilde farklı olduğu, diğer 3 numunenin ise iki göçme modu (CF-GY) arasında kalan bir hasarla göçtüğü görülmüştür. Aşağıdaki tablolarda içi taralı test göçme modları bu kapsamda uyumsuz olan numuneleri göstermektedir (Tablo 5.5, 5.6, 5.7, 5.8). Uyumsuzluk her iki numune tipinde de görülmektedir. Bazı numunelerde yırtık hasarının gelişimi, TO ve CF tipi göçme modları arasında kalmış olduğundan yakın olan duruma göre sonuç belirlenmiştir. Bu durum tartışılması gereken bir bulgu olarak karşımıza çıkmış ve standartların KARBON çeliği için tahmin ettiği göçme modlarının PASLANMAZ çelik durumunda geçerli olamayacağı sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.5 Boru profil C-NW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.

Numune	Test Yüğü N_{test} (kN)	GY	CF		TO	Beklenen Göçme Modu	Test Göçme Modu
		$A_g F_y$ (kN)	$A_e F_u$ (kN)		AISC, CSA, EC3 V_r (kN)		
			AISC	CSA			
C-L30-NW	103.0	137.4	-	56.7	42.5	TO	TO
C-L45-NW	135.4	137.4	-	85.1	63.7	TO	TO
C-L60-NW	161.9	137.4	-	113.5	85.0	TO	TO
C-L76-NW	192.3	137.4	179.7	143.9	107.8	TO	CF
C-L90-NW	190.3	137.4	192.7	170.2	127.4	TO	CF
C-L105-NW	187.4	137.4	263.6	198.0	148.7	GY	CF

$F_y = 295 \text{ MPa}$, $F_u = 650 \text{ MPa}$, $A_g = 465.58 \text{ mm}^2$, $A_n = 405.58 \text{ mm}^2$,
 $A_e = U A_n$, $A_{gv} = 4 t L_w$, $V_r = 0.6 A_{gv} F_y$

*TO : Tear-Out (Blok Yırtılma), CF: Circumferential Failure (Çevresel Göçme),
GY: Gross Yield (Brüt Kesitte Akma)*

Tablo 5.6 Boru profil C-RW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.

Numune	Test Yüğü N_{test} (kN)	GY	CF		TO	Beklenen Göçme Modu	Test Göçme Modu
		$A_g F_y$ (kN)	$A_e F_u$ (kN)		AISC, CSA, EC3		
			AISC	CSA	T_r+V_r (kN)		
C-L30-RW	157.0	137.4	-	65.1	81.5	CF	TO
C-L45-RW	184.4	137.4	-	97.7	102.7	CF	TO
C-L60-RW	215.8	137.4	-	130.3	124.0	TO	TO-CF
C-L76-RW	241.3	137.4	206.3	165.2	146.8	GY	CF
C-L90-RW	247.2	137.4	221.2	195.4	166.4	GY	CF-GY
C-L105-RW	251.1	137.4	302.6	227.3	187.7	GY	CF-GY

$F_y = 295 \text{ MPa}$, $F_u = 650 \text{ MPa}$, $A_g = 465.58 \text{ mm}^2$,
 $A_e = U A_g$, $A_{gv} = 4 t L_w$, $T_r + V_r = A_n F_u + 0.6 A_{gv} F_y$

*TO : Tear-Out (Blok Yırılma), CF: Circumferential Failure (Çevresel Göçme),
GY: Gross Yield (Brüt Kesitte Akma)*

Tablo 5.7 Kutu profil S-NW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.

Numune	Test Yüğü N_{test} (kN)	GY	CF		TO	Beklenen Göçme Modu	Test Göçme Modu
		$A_g F_y$ (kN)	$A_e F_u$ (kN)		AISC, CSA, EC3		
			AISC	CSA	V_r (kN)		
S-L30-NW	121.6	231	-	59.7	61.9	CF	TO
S-L45-NW	149.1	231	-	89.6	92.9	CF	TO
S-L60-NW	192.3	231	-	119.4	123.8	CF	TO
S-L70-NW	251.1	231	203.1	139.3	144.5	CF(CSA)	CF
S-L90-NW	251.1	231	230.2	179.2	185.8	CF(CSA)	CF
S-L105-NW	288.4	231	243.7	209.0	216.7	CF(CSA)	CF

$F_y = 430 \text{ MPa}$, $F_u = 681 \text{ MPa}$, $A_g = 537.13 \text{ mm}^2$, $A_n = 477.13 \text{ mm}^2$,
 $A_e = U A_n$, $A_{gv} = 4 t L_w$, $V_r = 0.6 A_{gv} F_y$

*TO : Tear-Out (Blok Yırılma), CF: Circumferential Failure (Çevresel Göçme),
GY: Gross Yield (Brüt Kesitte Akma)*

Tablo 5.8 Kutu profil S-RW numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları ve göçme modları.

Numune	Test Yüğü N_{test} (kN)	GY	CF		TO	Beklenen Göçme Modu	Test Göçme Modu
		$A_g F_y$ (kN)	$A_e F_u$ (kN)		AISC, CSA, EC3		
			AISC	CSA	T_r+V_r (kN)		
S-L30-RW	147.2	231	-	67.2	102,8	CF	TO
S-L45-RW	188.4	231	-	100.8	133,7	CF	TO
S-L60-RW	225.6	231	-	134.5	164,7	CF	TO
S-L70-RW	274.7	231	228.6	156.9	185,4	CF (CSA)	CF
S-L90-RW	314.9	231	259.1	201.7	226,6	CF (CSA)	CF
S-L105-RW	321.8	231	274.3	235.3	257,6	GY	CF-GY

$F_y = 430 \text{ MPa}, F_u = 681 \text{ MPa}, A_g = 537.13 \text{ mm}^2,$
 $A_e = U A_g, A_{gv} = 4 t L_w, A_{nt} = 2 t t_p, T_r + V_r = A_{nt} F_u + 0.6 A_{gv} F_y$

TO : Tear-Out (Blok Yırılma), CF: Circumferential Failure (Çevresel Göçme),
GY: Gross Yield (Brüt Kesitte Akma)

Standartlara göre yapılan dayanım hesap sonuçları, numunelerin test yükleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5.5, 5.6, 5.7, 5.8). Çalışma kapsamında testleri yapılan tüm numunelerin TO dayanımı için Amerikan ve Kanada Standartları aynı hesap sonucunu vermekle beraber özellikle kayma aksamasının etkin olduğu CF tipi göçme modu için Kanada Standardının (CSA) daha emniyetli dayanım hesap sonucu verdiği görülmektedir. Amerikan (AISC) Standardının, kapalı kesitli guse plakasına kaynaklı uç birleşimleri için kayma aksaması etkisine bağlı olarak önerdiği hesap formüllerinin geçerlilik sınırı (borular için, $L_w > D$ ve kutular için, $L_w > H$) olduğundan daha küçük kaynak uzunluğu olan birleşimler için AISC ile dayanım hesabı yapılmamaktadır. Bununla birlikte Amerikan (AISC) Standardının (CF) göçme yükü hesap sonuçları oldukça yüksek değerler aldığından ileriki dayanım hesaplarında emniyetli kısımda kalmak için değerlendirme dışı bırakılacak ve çalışma kapsamındaki tüm numuneler için dayanım hesabı yapılabilen Kanada Standardı rehber alınacaktır.

Aşağıdaki tablolarda standartların hesap dayanımları ve deneylerde elde edilen dayanımlar karşılaştırılmıştır. Boru numunelerin kaynak uç dönüşü olmayan (NW) tipleri incelendiğinde standartlara göre birleşimi kontrol eden en küçük dayanımın ilk beş numune için blok kesme (V_r) dayanımı, son numune için brüt kesitte akma dayanımı olduğu görülmektedir (Tablo 5.9). Test sonuçları ise bu değerlerden oldukça yüksek çıkmıştır. Ancak kaynak uzunlukları arttıkça hesap dayanımları test sonuçlarına yaklaşmaktadır. $L_w=90$ mm kaynak uzunluğu olan numunede (CF_{AISC}) dayanım değeri test değeriyle örtüşmekte ancak, (CF_{CSA}) değeriyle %11 lik fark oluşturmaktadır. $L_w=105$ mm'lik kaynak uzunluğu olan numunede ise tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. (CF_{AISC}) dayanım değeri ile test değeri arasında %41 fark oluşurken, (CF_{CSA}) değeriyle %5'lik fark oluşmaktadır.

Tablo 5.9 Boru profil (NW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.

Numune	N_{Test}^* (kN)	GY	CF		TO	$\frac{AISC}{N_{Test}}$	$\frac{CSA}{N_{Test}}$	$\frac{V_r}{N_{Test}}$
		$A_g F_y$ (kN)	AISC	CSA	V_r			
C-L30-NW	103.0	137.4	-	56.7	42.5	-	0.55	0.41
C-L45-NW	135.4	137.4	-	85.1	63.7	-	0.63	0.47
C-L60-NW	161.9	137.4	-	113.5	85.0	-	0.70	0.53
C-L76-NW	192.3	137.4	179.7	143.9	107.8	0.93	0.75	0.56
C-L90-NW	190.3	137.4	192.7	170.2	127.4	1.01	0.89	0.67
C-L105-NW	187.4	137.4	263.6	198.0	148.7	1.41	1.05	0.79

* N_{Test} : Maksimum test dayanımı.

Boru profillerin kaynak uç dönüşü olan (RW) numunelerinde ise birleşimi kontrol eden dayanımın ilk iki tipinde ($L_w=30$ ve 45 mm) çevresel göçme dayanımı olduğu görülmektedir (Tablo 5.10). $L_w=60$ mm olan numunde blok kesme dayanımı ve diğer son üç numunede ise brüt kesitte akma dayanımının yetersiz olduğu görülmektedir. Blok kesme dayanımları, numunelerdeki uç dönüş kaynağıyla çekme bölgesinde ilave dayanım (T_r) elde edildiğinden bir miktar artış göstermiştir. Benzer artışlar çevresel göçme dayanımı (CF) değerlerinde de görülmektedir. Kaynak uzunlukları arttıkça önerilen dayanımlar test yüklerine yaklaşmaktadır.

Tablo 5.10 Boru profil (RW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.

Numune	N_{Test}^* (kN)	GY	CF		TO	AISC	CSA	$\frac{T_r + V_r}{N_{Test}}$
		$A_g F_y$ (kN)	AISC	CSA	$T_r + V_r$	$\frac{AISC}{N_{Test}}$	$\frac{CSA}{N_{Test}}$	$\frac{T_r + V_r}{N_{Test}}$
C-L30-RW	157.0	137.4	-	65.1	81.5	-	0.41	0.52
C-L45-RW	184.4	137.4	-	97.7	102.7	-	0.53	0.56
C-L60-RW	215.8	137.4	-	130.3	124.0	-	0.60	0.57
C-L76-RW	241.3	137.4	206.3	165.2	146.8	0.85	0.68	0.61
C-L90-RW	247.2	137.4	221.2	195.4	166.4	0.89	0.79	0.67
C-L105-RW	251.1	137.4	302.6	227.3	187.7	1.21	0.91	0.75

* N_{Test} : Maksimum test dayanımı.

Kutu numunelerinin (NW) tipleri karşılaştırıldığında kaynak uzunluğu arttıkça önerilen dayanım değerleri ile test değerleri birbirlerine yakınlaşmakta ancak bu yaklaşma hiç bir dayanım durumu için % 8'in altına inmemektedir (Tablo 5.11). Tüm kutu profil (NW) numuneleri için önerilen (CF_{CSA}) dayanımları birleşimi kontrol eden minimum dayanım olarak karşımıza çıkmaktadır. Blok kesme dayanımı için kaynak uzunluğu arttıkça standartlarda önerilen dayanımların test sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. Elde edilen yüksek test değerlerinin oluşmasında kutu kesitli profillerde köşe kıvrım bölgelerinin etkili ve dayanımı arttırıcı faktörü olduğu düşünülmektedir.

Tablo 5.11 Kutu profil (NW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.

Numune	N_{Test}^* (kN)	GY	CF		TO	AISC	CSA	$\frac{V_r}{N_{Test}}$
		$A_g F_y$ (kN)	AISC	CSA	V_r	$\frac{AISC}{N_{Test}}$	$\frac{CSA}{N_{Test}}$	$\frac{V_r}{N_{Test}}$
S-L30-NW	121.6	231	-	59.7	61.9	-	0.49	0.51
S-L45-NW	149.1	231	-	89.6	92.9	-	0.60	0.62
S-L60-NW	192.3	231	-	119.4	123.8	-	0.62	0.64
S-L70-NW	251.1	231	203.1	139.3	144.5	0.81	0.55	0.58
S-L90-NW	251.1	231	230.2	179.2	185.8	0.92	0.71	0.74
S-L105-NW	288.4	231	243.7	209.0	216.7	0.85	0.72	0.75

* N_{Test} : Maksimum test dayanımı.

Kutu numunelerinin (RW) tipleri karşılaştırıldığında ilk beş tip kaynak uzunluğu olan elemanlarda önerilen minimum dayanımın (CF_{CSA}), son numunede ise brüt kesitte akma dayanımının olduğu görülmektedir (Tablo 5.12). Kaynak uzunluğu arttıkça hesaplanan dayanım değerleri ile test değerleri birbirlerine yakınlaşmakta ancak bu yakınlaşma da hiç bir dayanım durumu için % 15'in altına inmemektedir (Tablo 5.12). Blok kesme dayanımı için kaynak uzunluğu arttıkça standartlarda önerilen dayanımların test sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. Bu numunelerde uç dönüş kayanağının olması sebebiyle blok kesme (T_r+V_r) ve çevresel göçme (CF) dayanımlarında daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Tablo 5.12 Kutu profil (RW) numuneleri nominal hesap dayanım sonuçları.

Numune	N_{Test}^* (kN)	GY	CF		TO	AISC	CSA	$\frac{T_r + V_r}{N_{Test}}$
		$A_g F_y$ (kN)	AISC	CSA	T_r+V_r	$\frac{AISC}{N_{Test}}$	$\frac{CSA}{N_{Test}}$	
S-L30-RW	147.2	231	-	67.2	102.8	-	0.46	0.70
S-L45-RW	188.4	231	-	100.8	133.7	-	0.54	0.71
S-L60-RW	225.6	231	-	134.5	164.7	-	0.60	0.73
S-L70-RW	274.7	231	228.6	156.9	185.4	0.83	0.57	0.67
S-L90-RW	314.9	231	259.1	201.7	226.6	0.82	0.64	0.72
S-L105-RW	321.8	231	274.3	235.3	257.6	0.85	0.73	0.80

* N_{Test} : Maksimum test dayanımı.

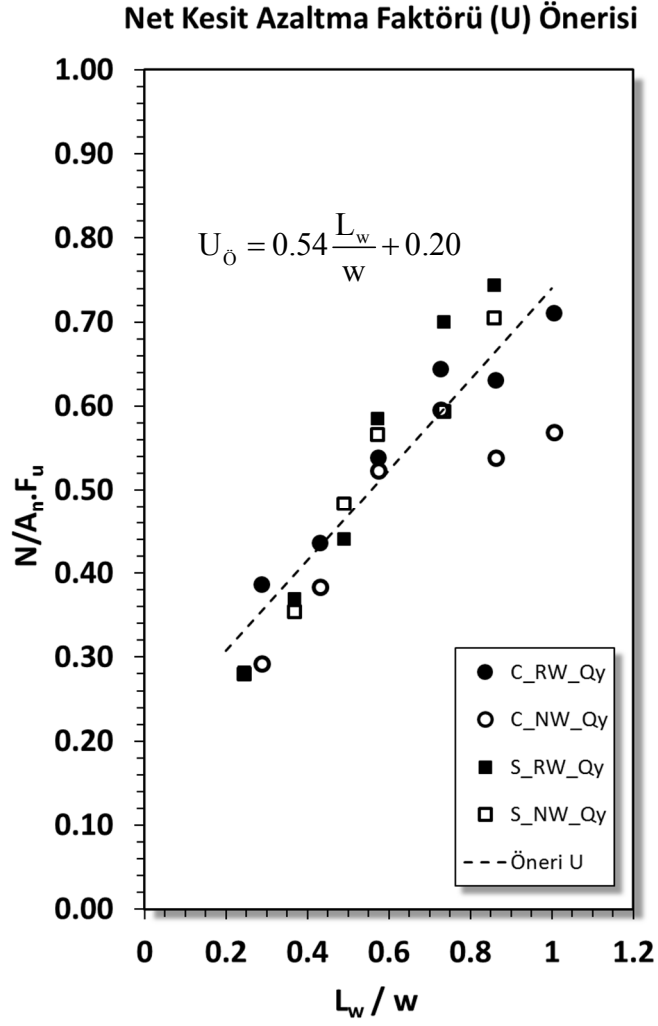
5.3 Tasarıma Yönelik Net Enkesit Azaltma İfadesinin Belirlenmesi

Profillerin bağlantı plakalı ve uç kaynaklı birleşimlerinin, kaynak uzunluğuna bağlı olarak iki tip göçme moduyla dayanımlarını kaybettiği önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Blok kesme dayanımı için kaynak uzunluğu ve profil et kalınlığının etkili olduğu, çevresel yırtılma hasarının oluşumunda da kaynak uzunluğuna bağlı olarak kayma aksamasının etkili olduğu bilinmektedir. Bu tip birleşimler için çekme dayanımının belirlenmesinde önemli rol oynayan kayma aksaması etkisinin dikkate alınması gerekmektedir. “3.7 Tasarım Yaklaşımları” başlığı altındada ayrıntılı bir biçimde açıklandığı gibi kayma aksaması etkisi bir azaltma katsayısı U , ile ele alınmaktadır. Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar kullanılarak paslanmaz çelik kapalı kesit plakalı ve kaynaklı uç birleşimlerinin tasarımına yönelik

azaltma katsayısı önerilmektedir. Çalışmalar sonucunda numuneler için üç adet gösterge dayanım seviyesi (N_{Test} , $N_{%3D,H}$ ve Q_y) elde edilmiştir. Bunlardan ilki olan N_{Test} dayanımı her numune için deney sonunda ulaşılan en büyük çekme yüküdür. Test sırasında elemanların bir çoğunda maksimum yük seviyesinde çok yüksek şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Ulaşılan maksimum çekme yükleri; eleman eksenli boyunca oluşan yer değiştirmeler ve kesit düzlemindeki aşırı çarpılmalar nedeniyle kullanılabilir olamayacağı için tasarım açısından dayanım yükü olarak önerilmemiştir. İkinci dayanım değeri, literatürde önerilen ve çekme elemanı olarak kullanılacak kapalı kesitli profil elemanlarda maksimum kullanılabilirlik sınırı olarak ifade edilen $%3D,H$ kesit çarpılma limiti seviyesindeki yük değeridir. Yapılan çalışmalarda her numune için kesit düzleminde oluşan çarpılmaların sözkonusu limit değer seviyesindeki yükler araştırılmıştır. Boru numuneler için maksimum test yükünün altında kalan bu yükler, kutu numunelerde maksimum test yükü seviyelerinde ve yükün düşüşe geçtiği ileri hasar seviyelerinde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla her iki profil tipi için ortak bir tasarım dayanım yükü olarak önerilmemiştir. Çalışmalar sonunda elde edilen üçüncü dayanım değeri, deneysel yük- şekil değiştirme eğrileri üzerinden çıkarılan, yaklaşık birleşim akma yükü şeklinde tanımlanabilecek olan Q_y yüküdür. Çalışılan bu yük seviyesi, tüm numunelerde maksimum test yükünün ve önerilen distorsiyon limiti seviyesindeki yükün altında elde edilmiştir. Ayrıca Q_y yükü, elemanda boyca uzama değerlerinin makul seviyelerde kaldığı ve bu seviyedeki kesit çarpılmalarının en fazla $%2.4$ ($<%3.0$) olduğu dayanım değeri olduğundan $N_{%3D,H}$ yüküne göre kullanılabilirlik açısından daha uygun olduğuna karar verilmiştir.

Çalışma kapsamındaki numunelerin tasarım çekme yükü dayanımlarının belirlenebilmesi için Q_y yükleri değerlendirilerek gerekli olan net enkesit alanı azaltma katsayısı (U) için öneride bulunulmuştur (Şekil 5.1). U ifadesi, yükün net enkesit alanı ve çelik çekme dayanımına bölümüyle elde edilen, 1'e eşit ve küçük boyutsuz bir büyüklüktür.

$$U = \frac{N}{A_n F_u} \quad (5.1)$$



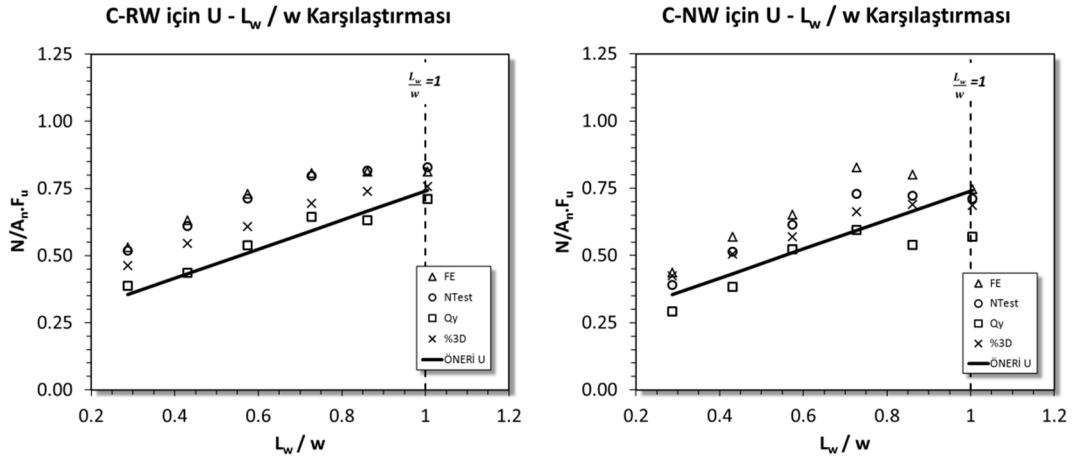
Şekil 5.1 Tüm numuneler için Q_y yükleri ve öneri U katsayısı.

Şekil 5.1’de yatay eksen kaynak uzunluğunun çevresel mesafeye oranı şeklinde isimlendirilebilecek L_w/w , dikey eksen de denklem 5.1’de verilen dayanım oranı ($N/A_n F_u$) dur. $N/A_n F_u$ oranının hesabında N için test birleşim akma yükü Q_y , kullanılmıştır. Ortaya çıkan ilişki çalışma kapsamındaki tüm numuneler için uygulama sınırı ($1 > L_w/w$) olan birleşimlerde lineer bir biçimde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

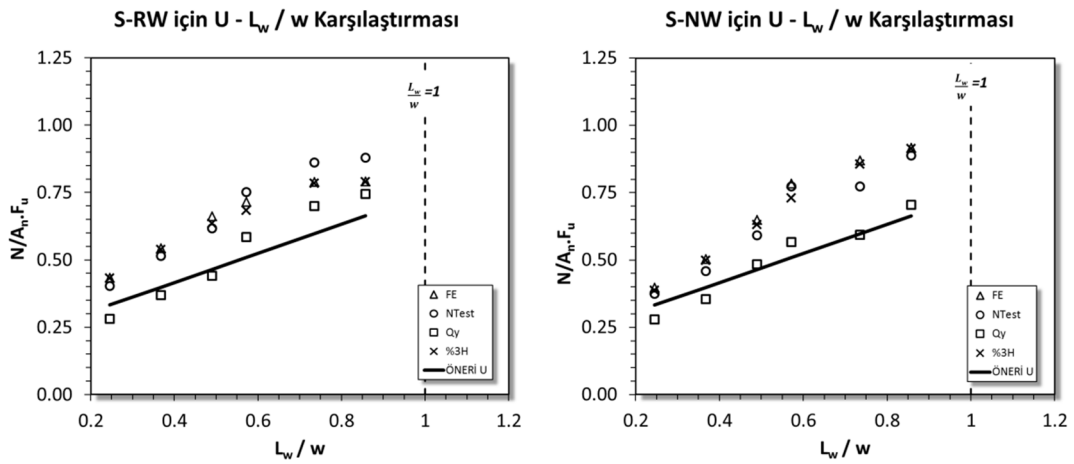
$$1 > \frac{L_w}{w} \text{ için } \rightarrow U_{\bar{0}} = 0.54 \frac{L_w}{w} + 0.20 \quad (5.2)$$

Tez kapsamında yapılan çalışmalarla elde edilen sonuçların ve önerilen kesit azaltma

ifadesinin değerleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 5.2 ve 5.3).



Şekil 5.2 Boru profil birleşimlerin dayanım ve öneri ifadelerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.3 Kutu profil birleşimlerin dayanım ve öneri ifadelerinin karşılaştırılması.

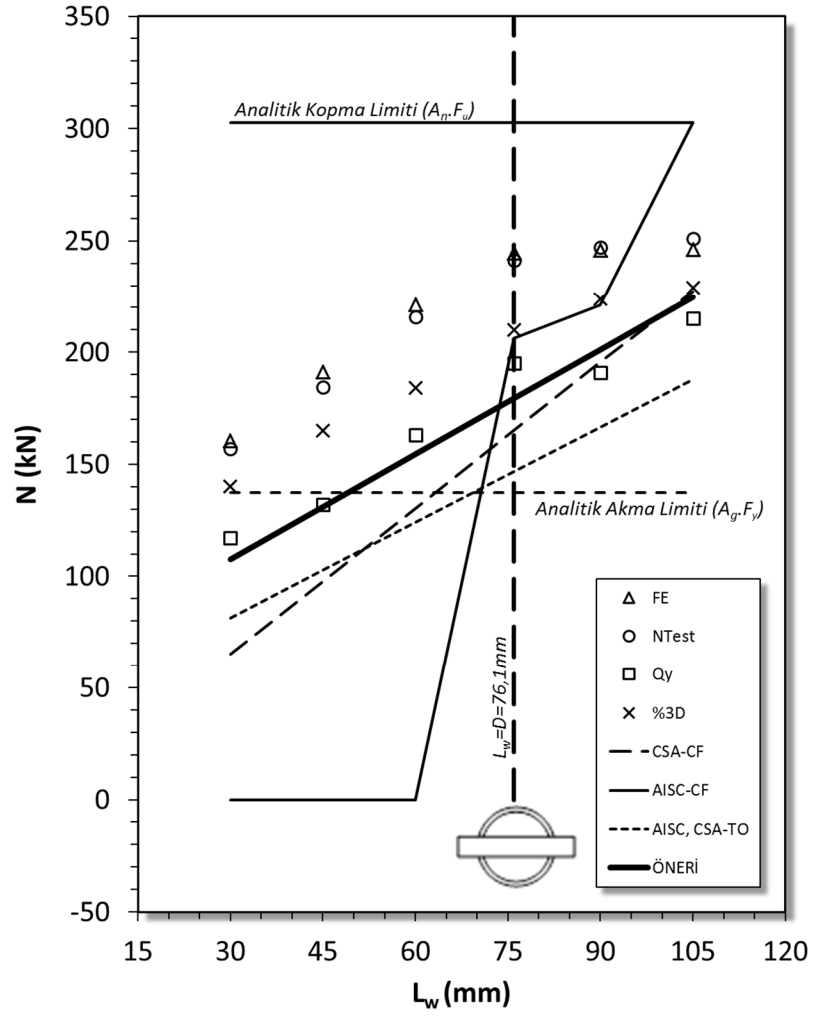
Daha önce Bölüm 3'te anlatıldığı gibi Packer ve Henderson 1992 yılında yaptıkları çalışmaya göre, kayma aksamasının dikkate alınmasında kaynaklar arası çevresel mesafenin (w) etkili olduğu ve (L_w/w) kaynak uzunluğu oranına bağlı bir net kesit azaltma ifadesi önerdikleri, ayrıca Korol'un ve Zhao ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmalarda da blok yırtılma (TO) göçme tipinin, kaynak uzunluğunun ($L_w < 0.6w$) olması durumunda olduğu ifade edilmiştir. Çalışma kapsamındaki numunelerde kaynak uzunluğu ($L_w = 30, 45, 60mm$) olan numunelerde yukarıda açıklanan limitler ile uyumlu göçme hasarlarının olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgilerin ışığında

paslanmaz çelik boru profilli numunelerin uç kaynaklı birleşimleri için yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirildiğinde benzer limitin grafiklerden ($L_w < 0.7w$) kullanılabilir olduğu görülmüştür. Bu sınırın çalışma kapsamındaki boru numuneler için ($0.7w=73\text{mm}$) ve kutu numuneler için ($0.7w=85\text{mm}$) olduğu görülmektedir. Numunelerde kaynak uzunluğu yukarıda belirlenen (73mm ve 85mm) değerlere kadar TO hasarlarının görüldüğü bu değerlerden sonra ise göçme modunun CF hasar tipine geçtiği görülmüştür.

Çalışma kapsamındaki numunelerin dayanımları karşılaştırıldığında özellikle ($L_w=D$) durumuna kadar kaynak uzunluğunun artmasıyla dayanımın da arttığı görülmüştür. Bununla birlikte ($L_w>D$) durumunda olan numunelerin dayanımlarında belirgin bir artışın olmadığı görülmüştür. Amerikan (AISC-2005) ve Kanada (CSA-2001) Standartlarında karbon çeliği için verilen dayanım formüllerinin paslanmaz çelik test numuneleri için kullanılmasıyla hesaplanan dayanımları, test dayanımları ile karşılaştırıldığında kaynak uzunluklarının ($L_w=D$) olduğu bölgeye kadar emniyetli olduğu görülmüştür. Buna karşılık, ayırım bölgesi olarak kullanılabilen ($L_w=D$) durumu sonrasında deneysel ve sayısal analiz sonuçları ile standartların dayanım değerleri birbirlerine yaklaşmakta ve özellikle boru numunelerde emniyetsiz sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 5.4 ve 5.5).

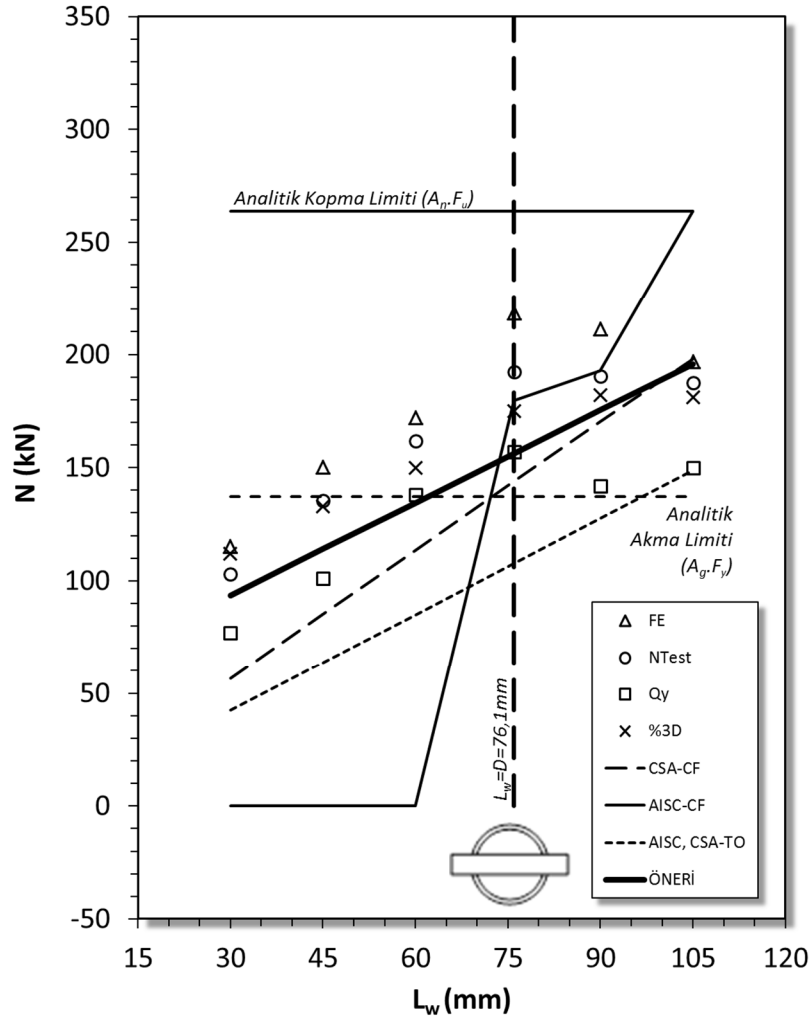
Önceki konuda bahsedilen ve numunelerin yük-yer değiştirme ilişkileri dikkate alınarak yaklaşık kapasite eğrisi çalışmasından elde edilen birleşim akma yükü değerleri (Q_y), deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen ve karbon çeliği standartlarının önerdiği dayanımlarla karşılaştırılmak üzere aşağıdaki aynı grafiklerde ifade edilmiştir (Şekil 5.4, 5.5, 5.6, 5.7). Birleşim akma yükü ile tanımlanan dayanımlar, ($L_w=D$) durumuna kadar boru profilli numuneler için standartların tahmin ettiği dayanımların biraz üstünde kalmakla beraber yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 5.4 ve 5.5).

C-RW için Dayanım Karşılaştırması



Şekil 5.4 Boru profilli (RW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması.

C-NW için Dayanım Karşılaştırması

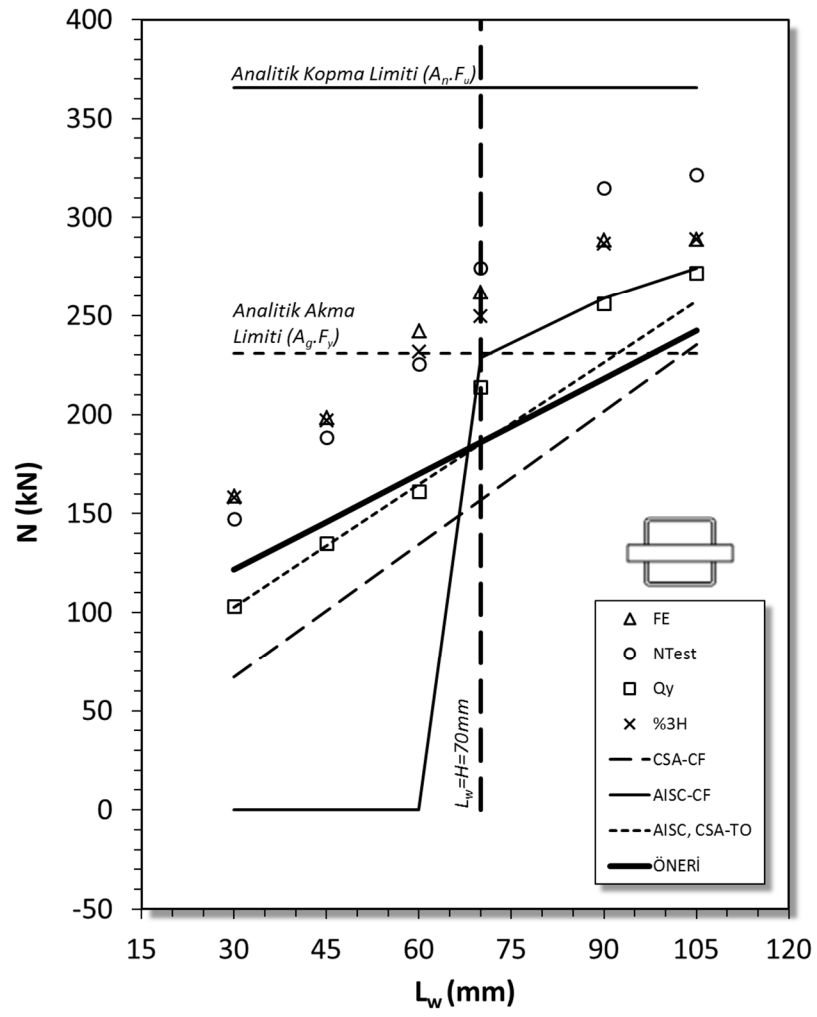


Şekil 5.5 Boru profilli (NW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması.

Kutu profilli numunelerin dayanımları karşılaştırıldığında, son numuneye kadar kaynak uzunluğunun artmasıyla dayanımında artış gösterdiği ancak göçme modu şeklinin değiştiği gözlenmiştir. Test ve sayısal analiz çalışmalarında elde edilen dayanımların, Kanada Standardının (CSA-2001) ve Amerikan Standardının (AISC-2005) önerdiği nominal dayanımların üzerinde olduğu görülmüştür (Şekil 5.6 ve 5.7).

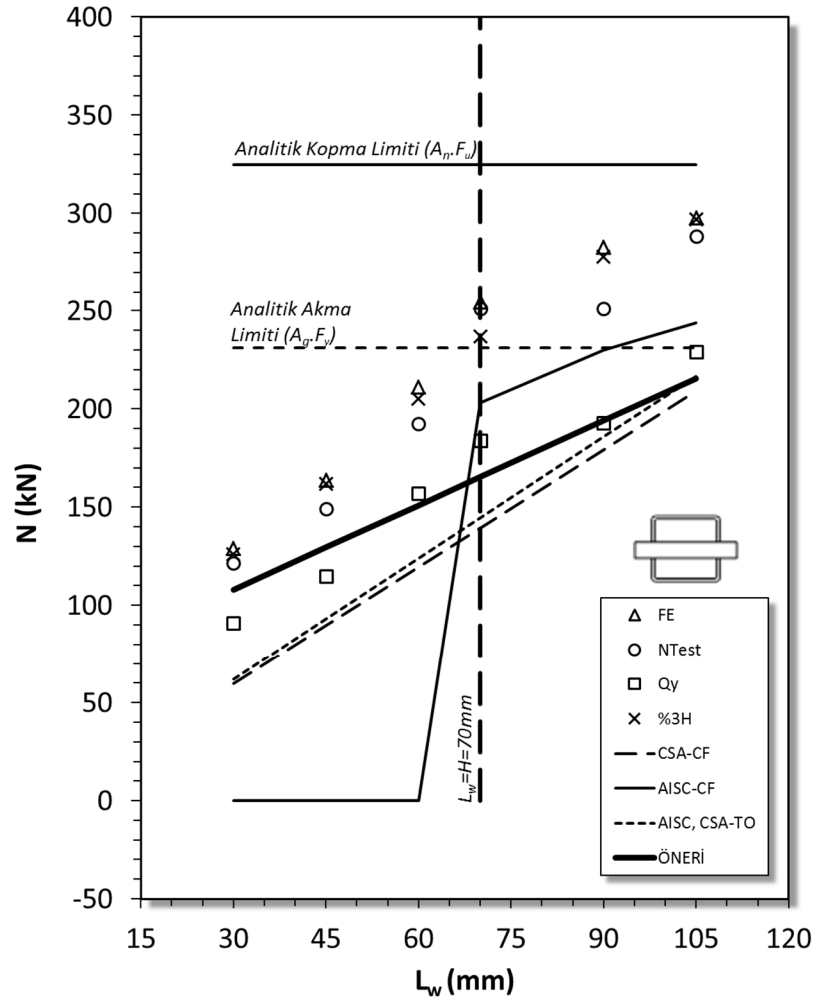
Birleşim akma yükü değerleri incelendiğinde standartların kutu profilli numuneler için önerdiği dayanımlara oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 5.6 ve 5.7). Her iki profil tipi için elde edilen birleşim akma yükleri en emniyetli nominal dayanım değerleri vermektedir.

S-RW için Dayanım Karşılaştırması



Şekil 5.6 Kutu profilli (RW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması.

S-NW için Dayanım Karşılaştırması



Şekil 5.7 Kutu profilli (NW) birleşimlerin dayanım yüklerinin karşılaştırılması.

Teze konu olan paslanmaz çelik boru ve kutu profillerin kaynaklı uç birleşimleri için yapılan dayanım belirleme çalışmalarında 24 numune için farklı yöntemlerle elde edilen net enkesit azaltma katsayıları aşağıdaki tablolarda özetlenmiştir (Tablo 5.13 ve 5.14).

Önerilen azaltma ifadesi; küçük kaynak uzunluğuna sahip boru ve kutu profil numuneleri için rehber olarak kullanılan Kanada (CSA) Standardından daha yüksek dayanım değerleri vermektedir. Ancak, kaynak uzunluğu arttıkça standardın tahminine yaklaşılmaktadır.

Tablo 5.13 Boru profil numunelerin net enkesit azaltma (U) ifadeleri.

Numune	L_w (mm)	L_w/w	U_{AISC}	U_{CSA}	U_{Test}	U_{FE}	U_{Qy}	$U_{\%3D}$	U_{δ}
C-L30-NW	30	0.29	-	0.22	0.39	0.44	0.29	0.42	0.35
C-L45-NW	45	0.43	-	0.32	0.51	0.57	0.38	0.50	0.43
C-L60-NW	60	0.57	-	0.43	0.61	0.65	0.52	0.57	0.51
C-L76-NW	76	0.73	0.68	0.55	0.73	0.83	0.60	0.66	0.59
C-L90-NW	90	0.86	0.73	0.65	0.72	0.80	0.54	0.69	0.66
C-L105-NW	105	1.00	1.00	0.75	0.71	0.75	0.57	0.69	0.74
C-L30-RW	30	0.29	-	0.22	0.52	0.53	0.39	0.46	0.35
C-L45-RW	45	0.43	-	0.32	0.61	0.63	0.44	0.55	0.43
C-L60-RW	60	0.57	-	0.43	0.71	0.73	0.54	0.61	0.51
C-L76-RW	76	0.73	0.68	0.55	0.80	0.81	0.64	0.69	0.59
C-L90-RW	90	0.86	0.73	0.65	0.82	0.81	0.63	0.74	0.66
C-L105-RW	105	1.00	1.00	0.75	0.83	0.81	0.71	0.76	0.74

Tablo 5.14 Kutu profil numunelerin net enkesit azaltma (U) ifadeleri.

Numune	L_w (mm)	L_w/w	U_{AISC}	U_{CSA}	U_{Test}	U_{FE}	U_{Qy}	$U_{\%3H}$	U_{δ}
S-L30-NW	30	0.25	-	0.18	0.37	0.40	0.28	0.39	0.33
S-L45-NW	45	0.37	-	0.28	0.46	0.50	0.35	0.50	0.40
S-L60-NW	60	0.49	-	0.37	0.59	0.65	0.48	0.63	0.46
S-L70-NW	70	0.57	0.63	0.43	0.77	0.78	0.57	0.73	0.51
S-L90-NW	90	0.74	0.71	0.55	0.77	0.87	0.59	0.86	0.60
S-L105-NW	105	0.86	0.75	0.64	0.89	0.92	0.70	0.91	0.66
S-L30-RW	30	0.25	-	0.18	0.40	0.43	0.28	0.43	0.33
S-L45-RW	45	0.37	-	0.28	0.52	0.54	0.37	0.54	0.40
S-L60-RW	60	0.49	-	0.37	0.62	0.66	0.44	0.63	0.46
S-L70-RW	70	0.57	0.63	0.43	0.75	0.72	0.59	0.68	0.51
S-L90-RW	90	0.74	0.71	0.55	0.86	0.79	0.70	0.78	0.60
S-L105-RW	105	0.86	0.75	0.64	0.88	0.79	0.74	0.79	0.66

Bu çalışma göstermiştir ki paslanmaz çelik profillerin kısa kaynak dikişli birleşimleri için kaynak bölgesi civarına iyi yayılan gerilme dağılımlarıyla CF oluşumu engellenmekte olduğu görülmüş ve buna dayanarak şu tespit yapılmıştır. L_w/w arttıkça gerilme dağılımları daha çok net kesitin olduğu çizgi üzerinde yığıldığından başlangıç çatlakları gelişerek hasarı CF'ye doğru götürmektedir. Sadece C-RW numunelerindeki son iki numune (C-L90-RW ve C-L105-RW) CF hasarı ve brüt kesitte akma (necking) arasında kalmıştır.

Çalışmaların sonuçlarına göre olası tasarım önerisi şu şekilde verilmiştir. CF dayanımını belirleyen (U_0) azaltma katsayısı, kısa kaynak boylarında CF dayanımını arttırıcı, uzun kaynak boylarında da CF dayanımının artış eğimini azaltıcı etkisi olan bir öneridir. Çalışma kapsamında tüm numunelerin dayanımlarının hesaplanmasında kullanılabilir olduğu için Kanada Standardının dayanım kuralları rehber alınmıştır. Bu yüzden birleşimlerin dayanım tahmininde, net enkesit alanını azaltan ifade için kullanım parametresi olarak L_w/w ilişkisi dikkate alınmıştır.

6 GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

6.1 Giriş

Mevcut tez kapsamında kapalı kesit paslanmaz çelik (boru ve kutu) profillerin plakalı ve kaynaklı uç birleşimlerinin yapısal davranışı ve tasarımı araştırılmıştır. Konuyla ilgili literatür araştırmaları gözden geçirildiğinde herhangi bir benzer çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bölümde çalışmada ulaşılan genel sonuçlar özetlenmiş ve değerlendirmeler yapılarak tasarım önerileri verilmiştir. Ayrıca konuyla ilgili olarak ileride yapılması önerilen çalışmalar belirtilmiştir.

6.2 Çalışma Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmaların Sonuçları

- Paslanmaz çelikten imal edilmiş, 2 farklı kesit (boru ve kutu), 2 farklı dönüş uç kaynağı (RW ve NW) ve 6 farklı kaynak uzunluğu (30mm...105mm) ile toplam 24 adet deney numunesi statik çekme yükü uygulanarak test edilmiştir.
- Karbon çeliği için hazırlanmış uluslararası standartların dayanım önerileri ile paslanmaz çelik deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamındaki tüm numuneler için dayanım hesabı yapılabildiğinden ve uygulanabilirlik açısından Kanada Standardı rehber alınmıştır. Standardın dayanım hesapları deney dayanımlarına göre emniyetli bulunmuştur.
- 3 farklı göçme tipi olan brüt kesitte akma (*Gross Yield, GY*), kaynak çevresinde ve kaynak dikişine paralel yırtılma (*Block Tear-out, TO*) ve kayma aksamasının (*Shear Lag*) sebep olduğu net kesitteki çevresel yırtılma (*Circumferential Failure, CF*) hasarları gözlenmiştir.

- Deneyi yapılan 24 adet paslanmaz çelik numunenin test göçme modları ile standartların tahmin ettiği göçme modları (CF, TO, ve GY) ile karşılaştırılmış ve 15 numunenin göçme tiplerinin, tahmin edilenlerden farklı olduğu görülmüştür. 12 numunenin göçme modları belirgin şekilde farklı olduğu, diğer 3 numunenin ise iki göçme modu (CF-GY) arasında kalan bir hasarla göçtüğü görülmüştür.
- Genel olarak RW ve NW numunelerinin yük-yer değiştirme grafiklerine bakıldığında ilk başlangıç rijitliklerinin birbirlerine yakın davranış gösterdikleri ve genel olarak tüm numunelerin göçme olmadan önce kesitlerinde distorsiyon oluştuğu görülmüştür.
- Birleşimlerde kaynak ucu dönüşlerinin olması durumunda (RW) sünek olmayan ancak nispeten yüksek çekme dayanımına sahip bir davranış gösterdiği, kaynak uç dönüşünün olmadığı (NW) durumda ise sünekliğin yüksek ancak çekme dayanımının RW'ye göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum Cheng ve Kulak'ın 2000'de yaptıkları çalışmayla da benzerlik göstermektedir.
- Uç dönüş kaynağı olmayan (NW) numunelerde uç kaynak bölgesinde çatlak başlangıcı daha kolay ve gözle görülür bir şekilde gerçekleşirken, kaynak dönüşü olan (RW) numunelerde bu durum kolay izlenememiştir.
- RW numunelerinde genel olarak, uç dönüş kaynaklarında, kaynak enkesiti içinde kayma düzlemi oluşmuş ve ilk çatlak meydana gelmiştir. Daha sonra gelişerek hasar tipi L_w/w oranına göre belirginleşmiştir.
- Tüm numunelerin ilk üç kaynak boyuna sahip ($L_w=30, 45, 60\text{mm}$) olanlarında birleşimin dip kısmından başlayan çatlaklar gelişerek profilin serbest ucuna doğru ilerleme eğilimi göstermişlerdir. Bu durum TO göçme tipine işaret etmektedir. Diğer numunelerde ise ($L_w=70-76, 90, 105\text{mm}$) kayma aksamasının (SL) sebep olduğu ve birleşimin dip kısmında yer alan net kesitin bulunduğu bölgeden başlayan çatlak ile çevresel yırtılma hasarı

(CF) meydana gelmiştir. Bu tip yırtılma numune resimlerindedeki görüleceği üzere kesit düzlemine paralel gelişmiş ve sonraki yük seviyelerinde net kesit çizgisinde birleşerek tam ayrışmanın olduğu görülmüştür.

- RW numunelerinin yük-yer değiştirme grafiklerinde, maksimum yük oluştuktan kısa bir süre sonra ani dayanım düşüşleri görülmüştür. Diğer taraftan NW numunelerinde maksimum yüke eriştikten sonra yumuşak geçişli dayanım azalması elde edilmiştir. Bu durum her iki profil kesitinin yer aldığı boru ve kutu numunelerinin tamamında görülmüştür.
- Numunelerin yük-yer değiştirme grafikleri arasında karşılaştırma yapıldığında NW numunelerindeki davranışın daha sünek olduğu gözlenmiştir. RW numuneleri daha yüksek yük seviyelerine çıkarken maksimum yük sonrasında dayanımlarında ani düşüşler olmaktadır. Ancak NW numuneleri daha düşük maksimum yük seviyelerinde iken dayanımlarını bir miktar daha ileri yer değiştirmelere kadar sürdürüp sonrasında yumuşak bir azalma davranışı gözlenmiştir.
- Profillerin bağlantı plakalarıyla olan birleşimlerinde, uç dönüş kaynağı olmayan numunelerin (NW), kaynaklı numunelere (RW) göre genel olarak hem sistem akma hemde çekme dayanımlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dönüş uç kaynağı olmayan numunelerde deney esnasında çekme yükü arttıkça yarık diplerinde bulunan boşlukların gittikçe aralandığı gözlenmiştir. Deneyin maksimum yük seviyesinde, birleşimin en zayıf kesiti olan net en kesit (A_n) bölgesinde, artan gerilme yığılmaları etkilerine bağlı olarak yarık dibi köşelerinde çatlaklar oluşmuştur. Yükleme devam edildikçe yırtıkların gelişimi her iki yanda birbirlerine benzer şekilde ilerlerken aksel uzama yer değiştirmesi hızla büyümüştür.
- RW numunelerin deneylerinde ilk çatlak hasarının oluşumu dönüş uç kaynağının bulunduğu yerde ve maksimum yük anında ortaya çıktığı gözlenmiştir. Tüm RW numunelerinde hasar, uç dönüş kaynağının çatlamasıyla başlamıştır. Çatlağın ilerleyerek yırtık haline gelmesi sonucu,

dayanımda ilk ani düşme oluşmakta ve ilerleyen durumlarda göçmeyle sonuçlanmaktadır. Uç dönüş kaynağı (RW) olan numunelerde, maksimum yüke ulaşıldıktan kısa bir süre sonra dayanımlarının ani olarak düştüğü gözlenmiştir.

- Deneysel programı boyunca, kutu profil numunelerde gelişen davranış hasarları boru numunelere göre farklılık göstermişlerdir. Bu değişikliğin temel sebebi kesit tipinden dolayı olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel sırasında uç kaynak bölgesinden başlayan çatlak, 90° kıvrımlı köşe ve buna bağlı olarak nispeten daha sert malzemedeki kıvrım bölgesinde bir miktar yönünü değiştirip profil ucuna doğru ilerlemektedir. Bununla birlikte birleşim bölgesinde oluşan kayma düzensizliğinin etkileriyle kesitte çarpılmalar ve şekil bozuklukları oluşmakta, bu durum bükülmüş köşe kısımlarını ayrıca etkileyip hasarın gelişimini başka bir yöne kaydırmaktadır.
- Boru ve kutu profil numunelerin ilk üç tipinde, boyuna kaynak dikişlerinde yırtılma hasarı gözlenmiştir. Yırtılmaların hepsinin ortak yanı Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)'de kalmasıdır.
- Boru profil numunelerinin kaynak uzunluğu, $L_w=45, 60$ ve 76 mm olan bazı elemanlarındaki hasarlar, yarık dibinden başlayan çatlakla beraber, profil ucu kaynak dikişinde açılmaların olduğu görülmüştür. Deneysel maksimum yüke ulaşılan kadar kaynak uzunluğu bölgesinde bulunan kesitte aşırı çarpılmalar meydana gelmiştir. Şekil bozukluğunun etkisi ile uç kısımlarda aşırı gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin oluşmasından dolayı kaynak dikiş başlangıcındaki açılmanın meydana geldiği söylenebilir. Açılan kaynak dikişi yakından incelendiğinde kaynak malzemesinde herhangi bir çatlak olmadığı, yırtığın kaynak ile profil cidarının arakesitinde meydana geldiği görülmektedir. Yırtılmanın olduğu kısım ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) de bulunmaktadır.
- Kutu profil numunelerinin kaynak uzunluğu, $L_w=45, 60$ ve 70 mm olan bazı elemanlarındaki hasarlar incelendiğinde, yarık dibinden başlayan çatlakla

beraber, profil ucu köşelerinde ve profil eksenine paralel açılmalar meydana gelmiştir. Bahsedilen hasar, boru profilli numunelerin kaynak uzunluğu, $L_w=45, 60$ ve 76mm olan bazı elemanlarındaki hasarlara benzemektedir.

- Numunelerin hasarları incelendiğinde $L_w=D$ sınırından sonraki çoğu numunelerde başlangıçta CF ile TO göçme modları birlikte görülmekte daha sonra CF hasarına doğru gelişmektedir.

6.3 Tez Kapsamında Yapılan Sayısal Analiz Çalışmalarının Sonuçları

- Deneysel çalışmalardan elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ile sayısal analiz sonuçlarının uyduğu tespit edilmiştir. Özellikle kalıcı plastik şekil değiştirmelerin minimum olduğu ilk bölgelerde büyük oranda yakınsama elde edilmiştir.
- Boru profilli NW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.1, standart sapma değeri %3.4 olmuştur.
- Boru profilli RW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.01, standart sapma değeri %2.1 olmuştur.
- Kutu profilli NW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.07, standart sapma değeri %4.3 olmuştur.
- Kutu profilli RW numuneleri için deneysel ve sayısal analizlerde elde edilen maksimum yük oranlarının ortalaması 1.0, standart sapma değeri %8.3 olmuştur.
- Test çalışmalarının sonuçlarında görüleceği gibi kaynak uç dönüşü olmayan (NW) numunelerin, kaynak uç dönüşü olan (RW) numunelerine göre sonlu

eleman çözümlerinde de daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.

- RW numunelerinde bulunan uç dönüş kaynağı, uygulanan yükün kesit üzerine daha etkili yayılmasını sağlamış ve dayanımı arttırıcı bir etken olmuştur.
- RW numunelerinde aksel yük doğrultusunda izlenen yer değiştirmeler kaynaklı olan aynı tip numunelere göre daha düşük uzama ve daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.
- RW numunelerinin analizleri sırasında uç dönüş kaynağının olduğu bölgelerde daha erken akma gerilmelerine ulaşıldığı gözlenmiştir.
- Boru kesitli numunelerin sonlu elemanlar analizlerinde daha erken yük seviyelerinde kesit çarpılmalarının olduğu, kutu profilli numunelerde ise maksimum yük seviyelerine yakın durumlarda aşırı distorsiyonların oluştuğu gözlenmiştir.

6.4 Çalışmanın Tasarıma Yönelik Genel Değerlendirmesi

Tez çalışması kapsamında ele alınan 24 adet paslanmaz çelik boru ve kutu profil kaynaklı uç birleşim numuneleri için yapılan deneysel ve sonlu elemanlarla modelleme çalışmalarının sonuçları, yaklaşık birleşim akma yükleri ve kesit çarpılması limit durumu dikkate alınarak tasarıma yönelik değerlendirilmelerle elde edilen bulgular kullanılmış ve karbon çeliği için mevcut olan yönetmelik kurallarının, paslanmaz çelik profillerin kaynaklı uç birleşimleri için uygunluğu tartışılmış, tasarım önerilerinde bulunulmuştur.

Deneysel ve sayısal analiz çalışmaları değerlendirildiğinde numunelerin test davranışları ve yük-yer değiştirme eğrilerinin sonlu eleman analizleri ile uygun bir şekilde benzetilmiştir.

Kapasite eğrisi kullanılarak bilineerleştirme yapılmış ve yaklaşık birleşim akma yükleri elde edilmiştir. Kesit çarpılma limit değerleri hesaplanarak numunelerin

sonlu elemanlar analizlerinden her yük seviyesi için kesit çarpılma değerleri ve yer değiştirmeleri okunmuştur. Sayısal analiz sonuçları tasarıma yönelik ifadelerin oluşturulmasına oldukça büyük katkı sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlara göre kayma aksamalarının olumsuz etkilerini dikkate alan, kesit çarpılmalarının %3'ü geçmediği, kabul edilebilir şekil değiştirmelerin olduğu, yüksek plastik şekil değiştirmelerin olmadığı, pratik kullanılabilirliği olan ve çalışma kapsamındaki tüm numuneler dikkate alınarak uygulama sınırı ($I > L_w/w$) olan birleşimler için aşağıdaki gibi lineer bir net enkesit azaltma ifadesi (U_{δ}) belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar Kanada Standardının dayanım hesaplarının düşük kaynak uzunluklarında daha emniyetli olduğunu göstermiştir. Uygulama sınırı olarak, benzer araştırmalarda sıkça kullanılan kaynak uzunluğunun kaynaklar arası çevresel mesafeye oranı dikkate alınmıştır.

$$U_{\delta} = 0.54 \frac{L_w}{w} + 0.20 \quad (5.2)$$

Tasarım açısından şu hususların dikkate alınması önerilmektedir.

- Birleşimin kayma aksaması etkisine bağlı dayanım hesabında herhangi bir uygulama geçerlilik sınırı bulunmamaktadır.
- Uç dönüş kaynağının yapılması birleşime dayanım kazandırmaktadır.
- Köşe kıvrımlı profillerin uzun kaynaklı birleşimlerinde ($L_w > 0.7w$) yüksek dayanım elde edilmekte ancak ani göçme yaşanmaktadır.
- Çalışma kapsamındaki birleşimler için profil kesit ağızlarına guse plakasına dik plaka kaynaklanmasıyla ilk kesit çarpılmaları önlenir.
- Profilde açılan yarıklı diplerinin oval olması gerilme yığılımlarının konsantrasyonunu azaltacaktır.

6.5 Gelecekte Yapılması Önerilen Çalışmalar

Paslanmaz çelik malzemesinin kullanımının artması ve hemen hemen her endüstride hızla yaygınlaşması çevremizdeki gelişmelerden de rahatça anlaşılmaktadır. İnşaat sektöründe ise daha çok görsel çekiciliğin ön planda olduğu ve korozyon etkilerine maruz kalınabilecek sistemlerde kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliğin yapılarda taşıyıcı eleman ve birleşimlerinde etkili ve verimli kullanımına yönelik önemli araştırmalar halen devam etmektedir. Mevcut tez çalışmasında sonuçları bakımından tasarıma yönelik öneriler içerdiğinden devam eden araştırmalar ile katkı bakımından paralellik arz etmektedir. Ancak çalışma konusu ile ilgili yapılması önerilen ilave konu başlıkları da bulunmaktadır. En ilgili dört konu başlığı aşağıda verilmiştir.

- Çeşitli profil çapları veya boyutları (D veya H) ve kalınlıkları (t) ile değişken kaynak uzunluğu (L_w) değerlerine sahip birleşimler için çalışmaların yapılmasına gerek duyulmaktadır.
- Birleşim için plaka-profil yerleşim oryantasyonlarının alternatifleri denenmelidir.
- Paslanmaz çeliğin yüksek süneklik özelliğinin katkısıyla, basınç ve tekrarlı yükler altında birleşimlerin araştırılması yapılmalıdır.
- Çalışmalarda diğer paslanmaz çelik kalitelerinin de ayrıca dikkate alınması önemli bir katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Abi-Saad G., Bauer D. (2006). Analytical approach for shear lag in welded tension members, Canadian Journal of Civil Engineering 33:384-394
- Abi-Saad G., Benaddi A., Bauer D. (2005). Shear lag in tension member welded connections, 33. Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, GC246-1, Toronto, Kanada
- Aoki H. (2000). Establishment of design standards and current practice for stainless steel structural design in Japan. Journal of Constructional Steel Research 54(1):191–210.
- Baddoo N.R. (2008). Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. Journal of Constructional Steel Research, 64 (11), 1199-1206.
- Baddoo N.R. (2003). A comparison of structural stainless steel design standards. The Steel Construction Institute, 131-150.
- Burgan BA, Baddoo NR, Gilsenan KA. (2000). Structural design of stainless steel members: comparison between Eurocode 3, Part 1.4 and tests results. Journal of Constructional Steel Research 54(1):51–73.
- Cheng Roger, J.J., Kulak, G.L and Khoo, H.A. (1998). Strength of slotted tubular tension members. Canadian Journal of Civil Engineering 25:982-991
- Cheng Roger, J.J., Kulak, G.L. (2000). Gusset plate connection to round HSS tension members. Engineering Journal / Fourth Quarter 133-139
- Chryssanthopoulos M.K., Kıymaz G. (1998) Bending Tests of Structural Stainless Steel Circular Hollow Sections. CESLIC Report OR 12, Imperial College, Londra.

- Design Guide 3 (2009) Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading, CIDECT, LSS Verlag,
- Di Sarno L., Elnashai A.S. and Nethercot D.A. (2003). Seismic performance assessment of stainless steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 1289–1319
- Easterling W.S. ve Gonzalez G. (1993). Shear lag effects in steel tension members. *Engineering Journal AISC*, 77-89
- Gardner L. Talja A., Baddoo N.R. (2006) Structural design of high-strength austenitic stainless steel. *Thin-Walled Structures* 44, 517-528.
- Gardner L. (2005) The use of stainless steel in structures. *Prog. Structural Engineering Material*, 7:45-55, Wiley InterScience, DOI: 10.1002/pse.190
- Gedge G., (2008). Structural uses of stainless steel – buildings and civil engineering. *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (11), 1194-1198
- Johansson B, Olsson A. (2000). Current design practice and research on stainless steel structures in Sweden. *Journal of Constructional Steel Research* 54(1):3–29.
- Humphries Matthew J.R., Birkemoe Peter C. (2004). Shear lag effects in fillet-welded tension connections of channels and similar shapes. 5. Connection in *Steel Structures Conferences*, Amsterdam, 381-391
- Korol R.M. (1996). Shear lag in slotted HSS tension members. *Canadian Journal of Civil Engineering* 23:1350-1354
- Ling, T.W., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. ve Packer, J.A. (2007). Investigation of shear lag failure in gusset plate welded structural steel hollow section connections. *Journal of Constructional Steel Research* 63, 293–304
- Ling, T.W., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. ve Packer, J.A. (2007). Investigation of block tear-out failure in gusset-plate welded connections in structural steel

hollow sections and very high strength tubes. *Engineering Structures*, 29, Pages 469-482

Martinez-Saucedo G., Packer J.A., Willibald S. (2006). Parametric finite element study of slotted end connections to circular hollow sections. *Engineering Structures*, 28, Pages 1956-1971

Martinez-Saucedo G., Packer J.A. ve Christopoulos, C. (2008). Gusset plate connections to circular hollow section braces under inelastic cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 134:7, 1252-1258.

Martinez-Saucedo G. ve Packer J.A. (2009). Static design recommendations for slotted end HSS connections in tension. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 135:7, 797-805.

Martinez-Saucedo G. and Packer J.A. (2006). Slotted end connections to hollow sections. CIDECT Report 8G-10/06. University of Toronto, Kanada.

Ran F., Ben Y. (2012). Design of cold-formed stainless steel tubular joints at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 35 188-202.

Rasmussen Kim J.R. (2000). Recent research on stainless steel tubular structures. *Journal of Constructional Steel Research* 54, 75–88

Reinhorn A.M. (1997). Inelastic Analysis Technics in Seismic Evaluations. *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Code Workshop*, 277-287, Slovenya.

Rasmussen Kim J.R. (2001). Full-range Stress-strain Curves for Stainless Steel Alloys. Research Report No:R811. The University of Sydney, Avustralya

Salih E.L. Gardner L., Nethercot D.A. (2010). Numerical investigation of net section failure in stainless steel bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research* 66, 1455–1466

Nascimbene R., Rassati G.A., Wijesundara K.K. (2012). Numerical simulation of gusset plate connections with rectangular hollow section shape brace under

- quasi-static cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research* 70, 177–189
- Schmidt L.C. and Morgan P.R. (2011). Member ductility and design detail of some welded joints. *International Journal of Space Structures*, 26 (3), 155-161
- Willibald S., Packer J.A. and Martinez-Saucedo G. (2006). Behaviour of gusset plate connections to ends of round and elliptical hollow structural section members. *Canadian Journal of Civil Engineering* 33 (4), 373-383
- Willibald S., Packer J.A., Martinez-Saucedo G., Puthli R.S., (2004). Shear lag slotted gusset plate connections to tubes. 5. Connection in Steel Structures Conferences, Amsterdam, 445-455
- Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. and Kiew K.P., (1999). Longitudinal fillet welds in thin-walled C450 RHS members. *Journal of Structural Engineering*, August, ASCE, 821-828
- Zhao, R., Huang, R., Khoo, H.A., Cheng J.J.R. (2009). Parametric finite element study on slotted rectangular and square HSS tension connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 611-621
- Zhao, R.G., Huang, R.F., Khoo, H.A., Cheng J.J.R. (2008). Experimental study on slotted rectangular and square hollow structural section (HSS) tension connections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35, 1318-1330
- ANSI/AISC 360-05 (2005). Specification for structural steel buildings, Chicago: American Institute of Steel Construction (AISC).
- CAN/CSA-S16 (2001). Limit states design of steel structures, Toronto Canadian Standards Association (CSA).
- EN1993-1-8 (2005). Eurocode 3 Design of steel structures- general rules—part 1–8: Design of Joints, Brussels: European Committee for Standardisation.

EN1993-1-4 (2006). Eurocode 3 Design of steel structures - Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels, Brussels: European Committee for Standardisation.

Miettinen E. (2002). Sustainable Architecture with Stainless Steel. “Creative Architecture with Stainless Steel” Konferansı, Euro Inox, İspanya

SEI / ASCE (2002). 8-02. Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members. American Society of Civil Engineers

Special BSSA Report (2004). Stainless Steel and Sustainable Construction.

Euroinox (2006). Design Manual For Structural Stainless Steel, 3.Baskı, Euro Inox and The Steel Construction Institute.

Zhao X.L., Wilkinson T., Hancock G. (2005). Cold-Formed Tubular Members and Connections -Structural Behaviour and Design. Published by Elsevier

URL 1 <http://www.tucsa.org/>

URL 2 <http://www.pas-der.com>

URL 3 <http://www.euro-inox.org>

URL 4 <http://www.ssina.com>

URL 5 <http://www.bssa.org.uk>

URL 6 <http://www.bombayharbor.com>

URL 7 <http://2.imimg.com>

URL 8 <http://www.ozbaypaslanmaz.com>

URL 9 http://www.coyne-et-bellier.fr/en/dun/gsp/fiche_grandarche.html

URL 10 <http://www.eri.dk/ukelevator.htm>

EKLER

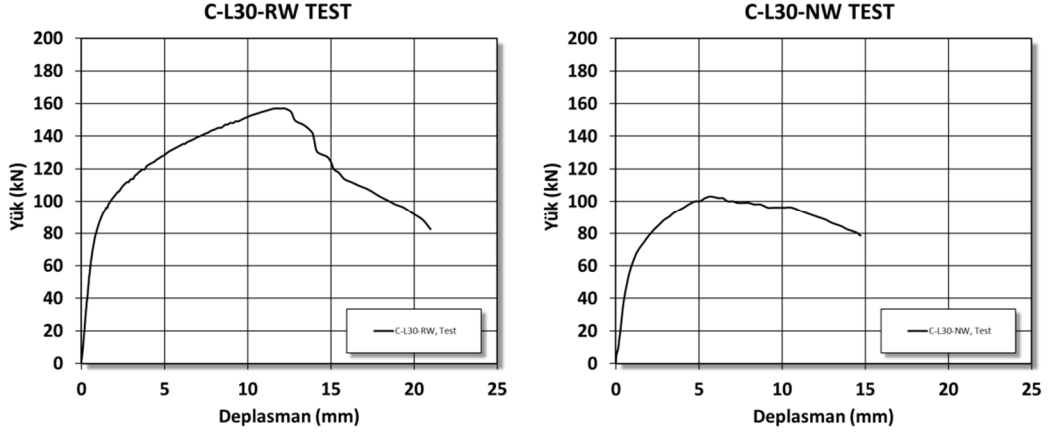
EK.A Test Sonuçları.

EK.B Sayısal Analiz Sonuçları

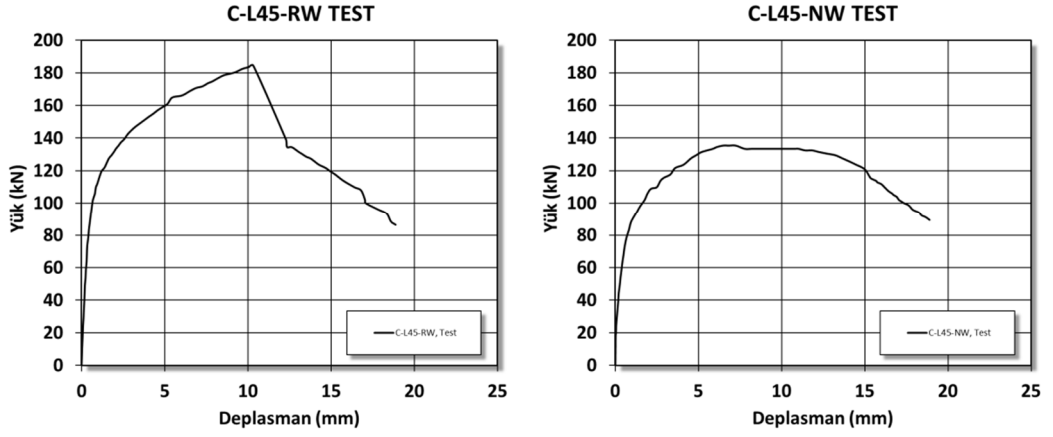
EK.C Test ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

EK.A Test Sonuçları

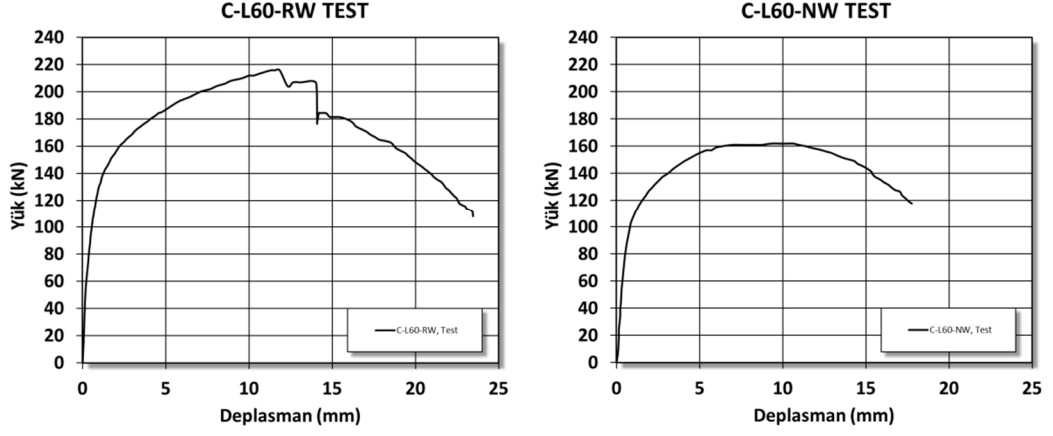
Test numunelerinden elde edilen yük-yer değiştirme, yük-zaman ve yer değiştirme-zaman ilişkileri aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



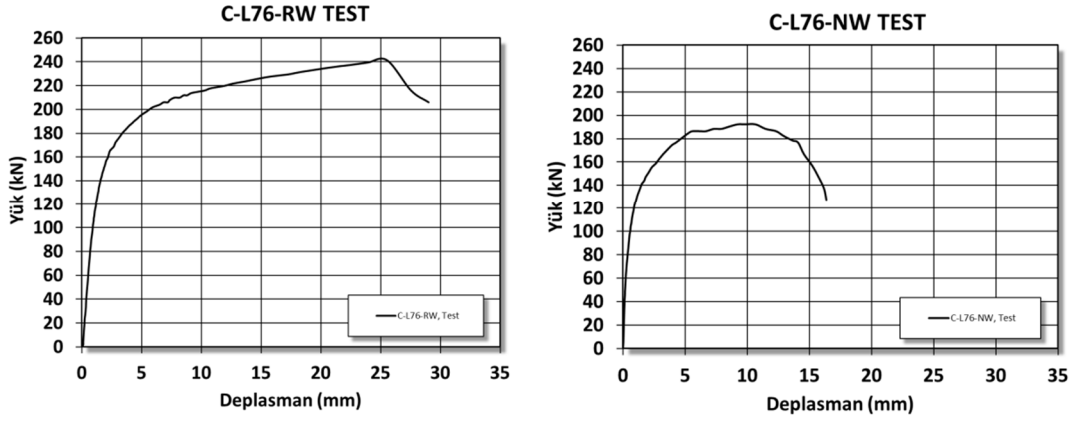
şekil A. 1 C-L30 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



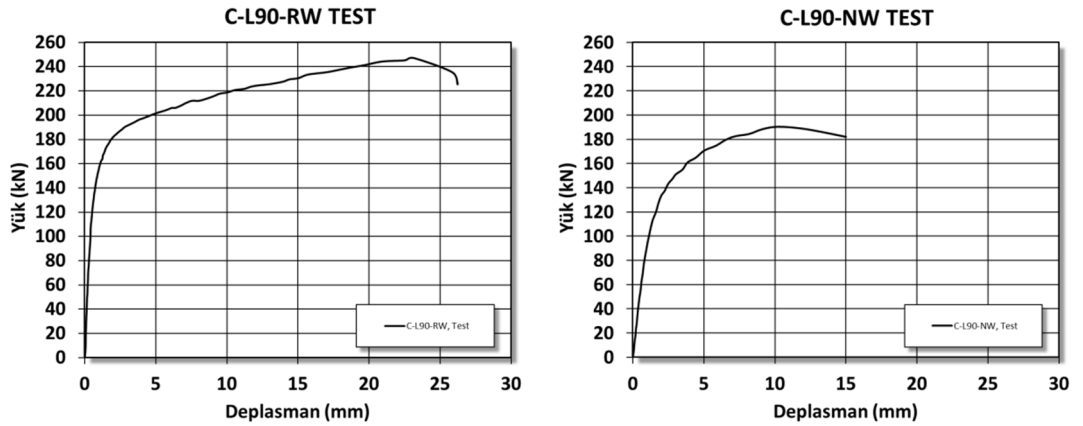
şekil A. 2 C-L45 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



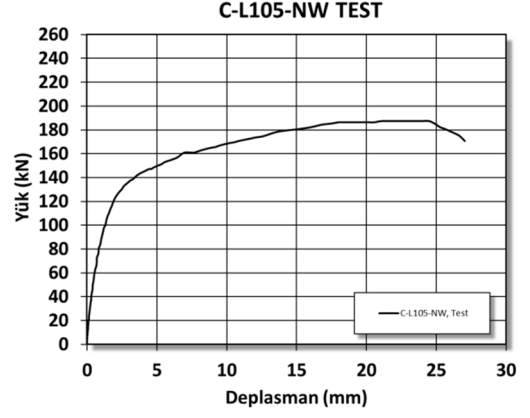
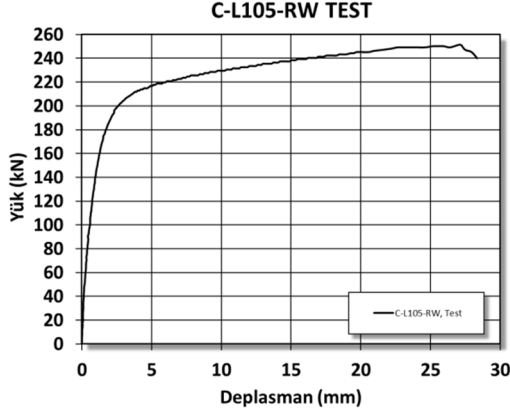
Şekil A. 3 C-L60 Numunelerinin yük-yer değıştirme test grafikleri.



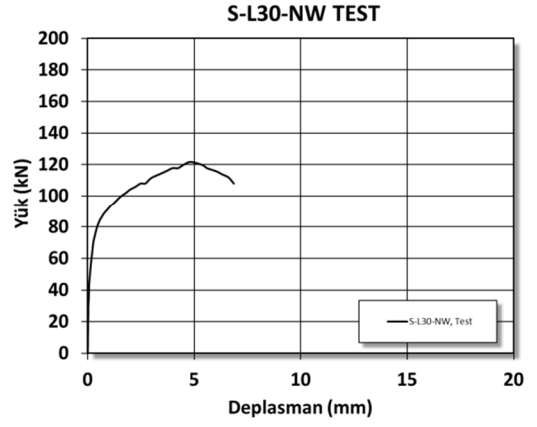
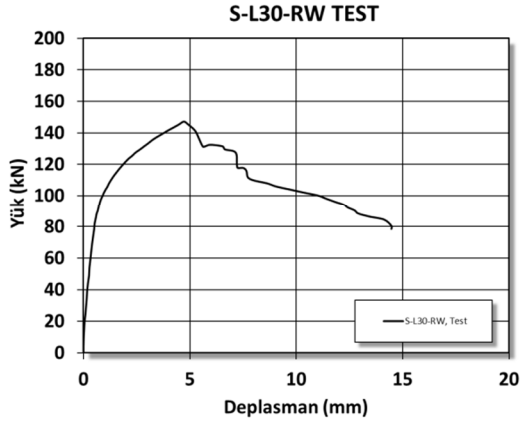
Şekil A. 4 C-L76 Numunelerinin yük-yer değıştirme test grafikleri.



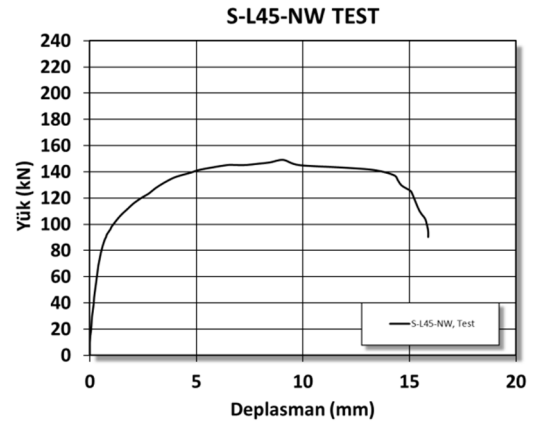
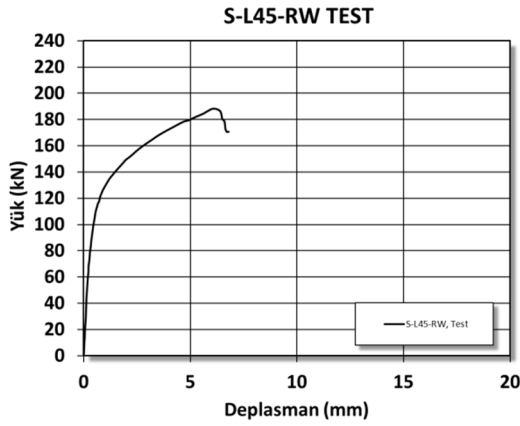
Şekil A. 5 C-L90 Numunelerinin yük-yer değıştirme test grafikleri



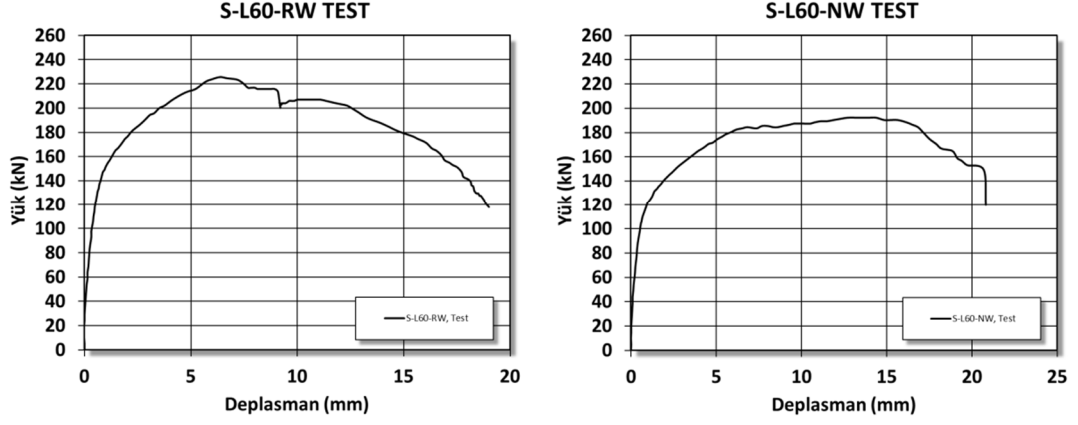
Şekil A. 6 C-L105 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



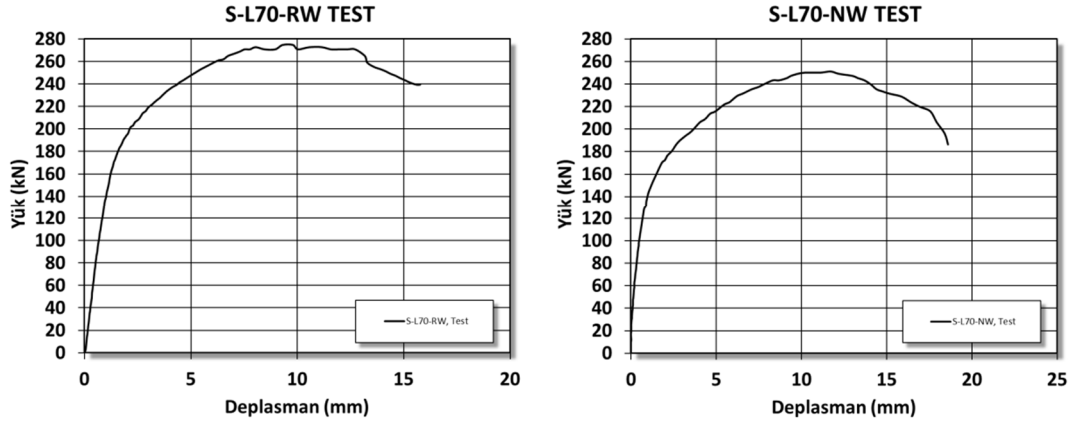
Şekil A. 7 S-L30 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



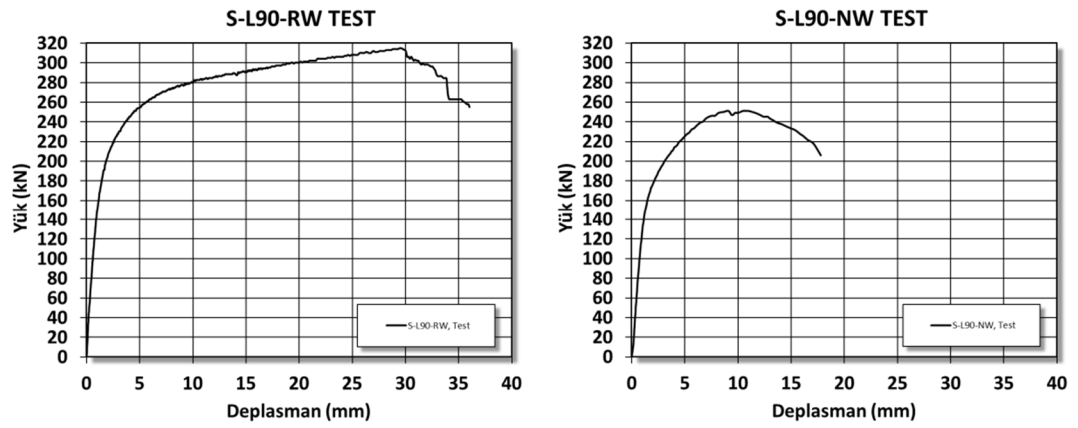
Şekil A. 8 S-L45 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



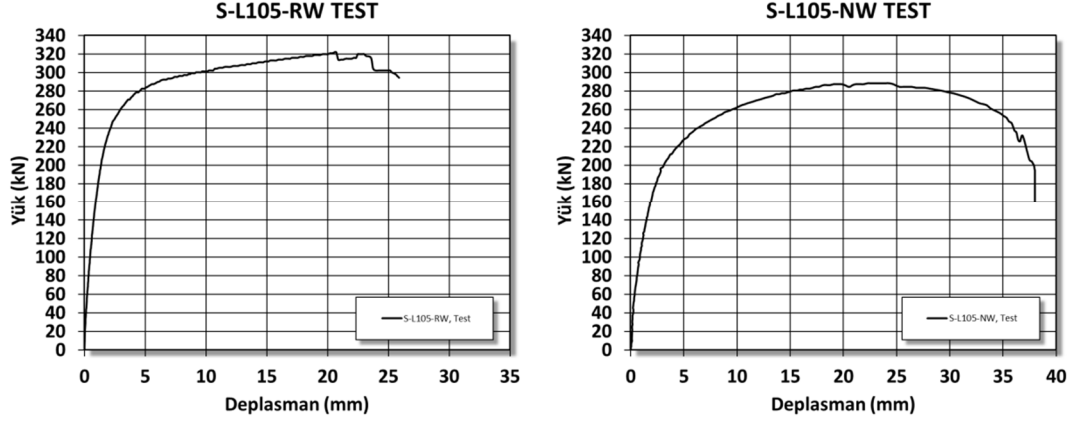
Şekil A. 9 S-L60 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



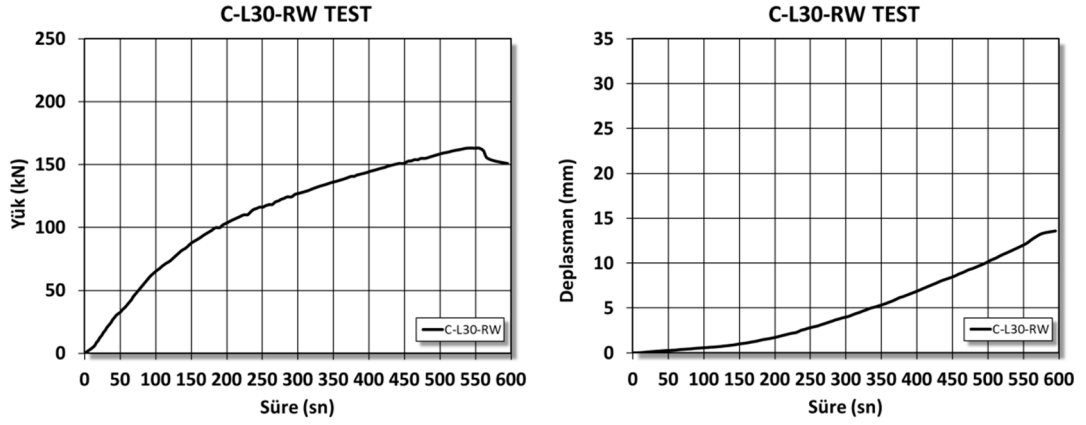
Şekil A. 10 S-L70 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



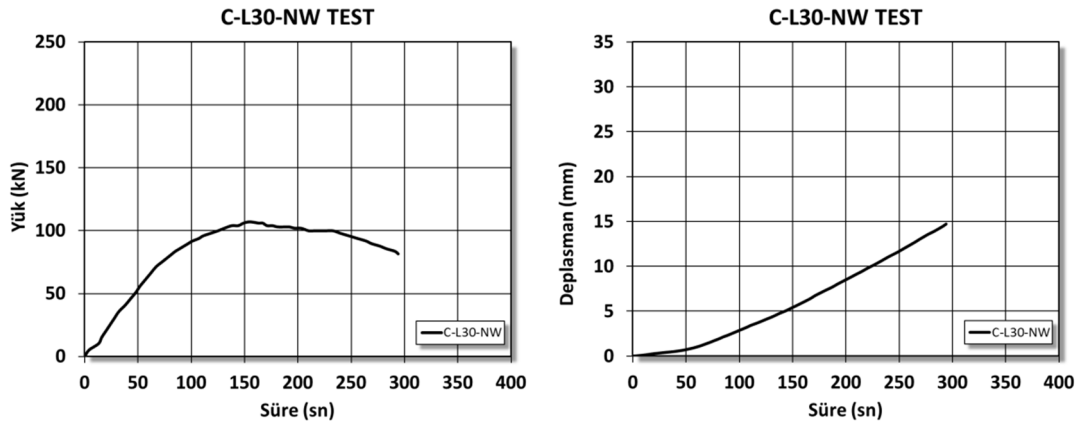
Şekil A. 11 S-L90 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



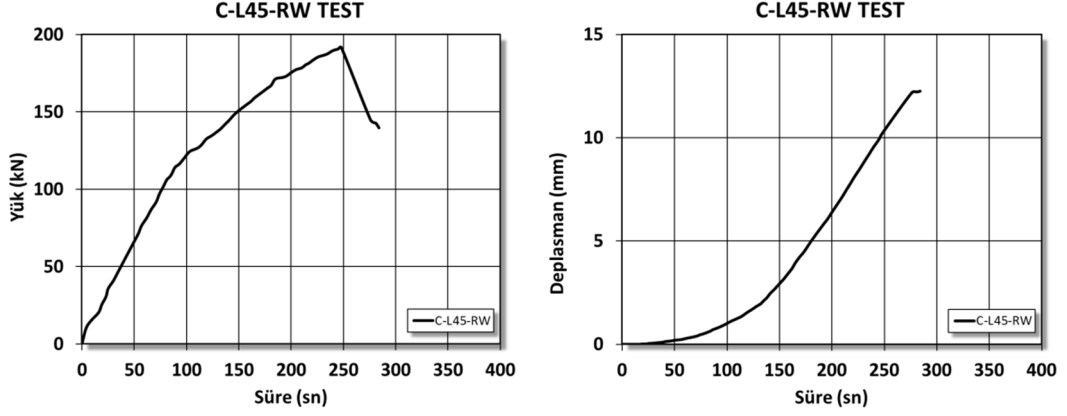
Şekil A. 12 S-L105 Numunelerinin yük-yer değiştirme test grafikleri.



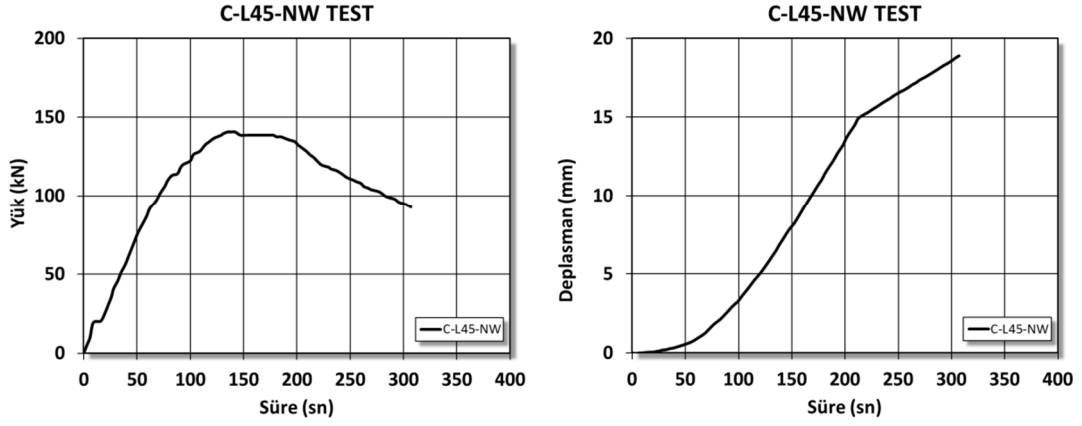
Şekil A. 13 C-L30-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



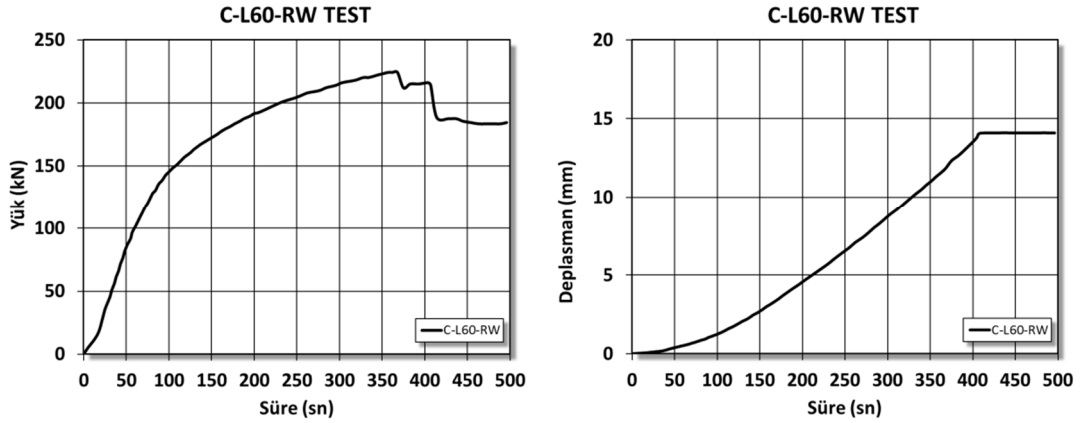
Şekil A. 14 C-L30-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



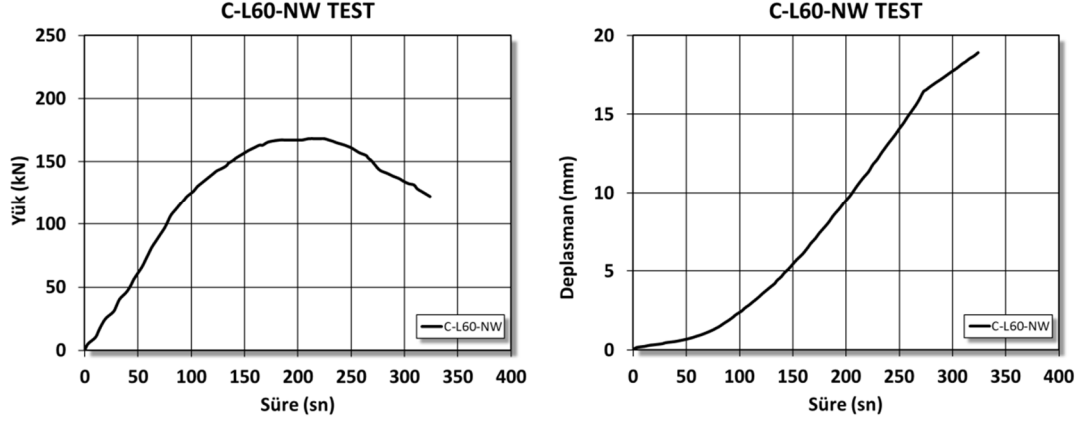
Şekil A. 15 C-L45-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



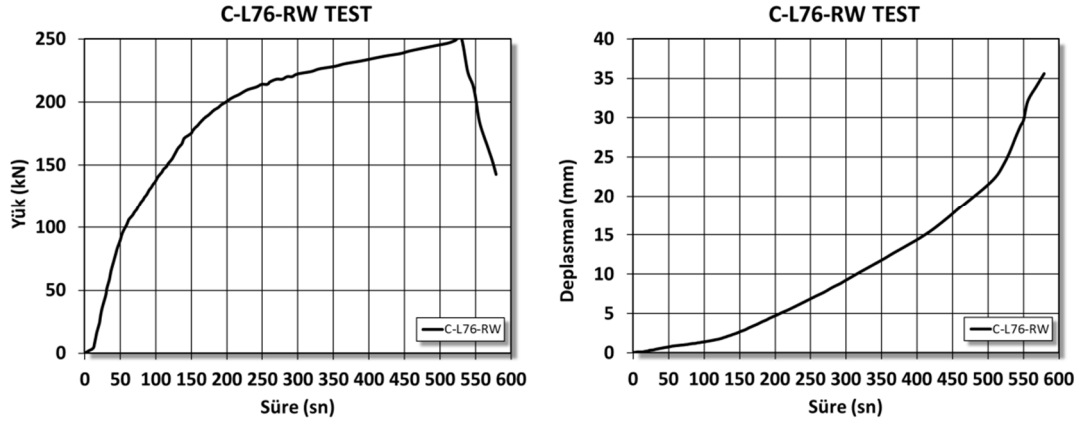
Şekil A. 16 C-L45-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



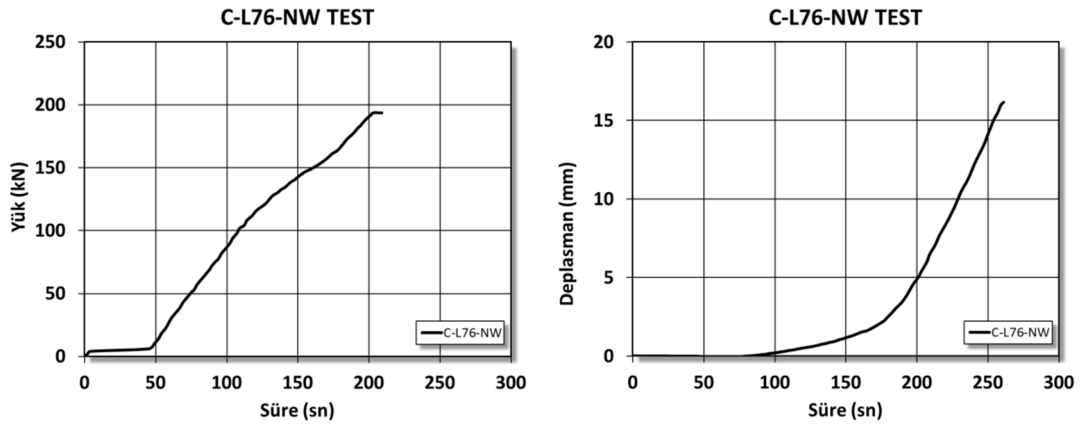
Şekil A. 17 C-L60-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



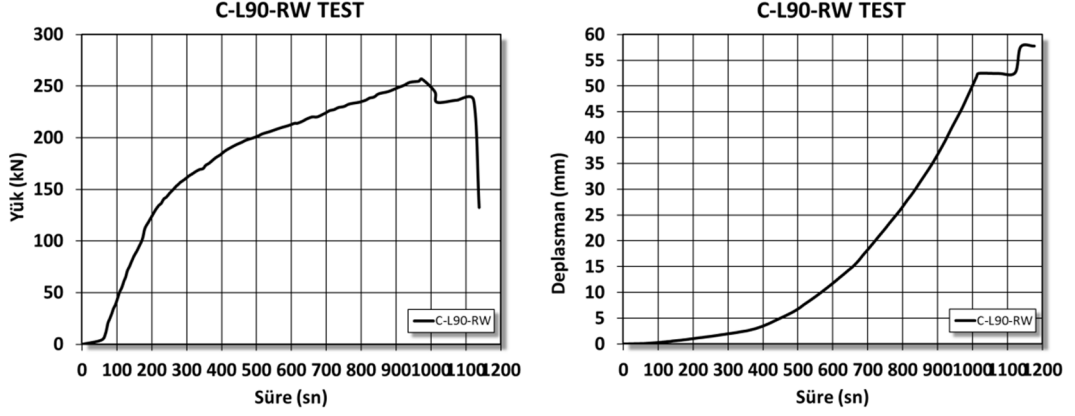
Şekil A. 18 C-L60-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



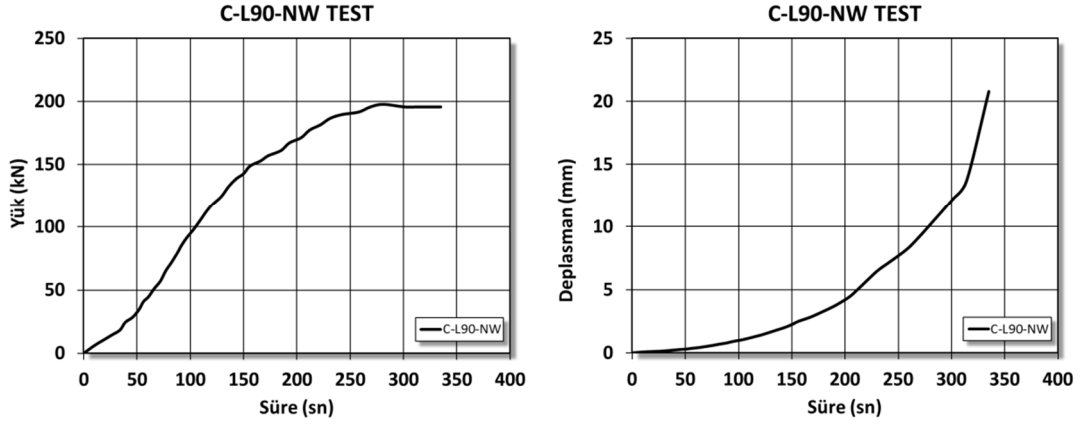
Şekil A. 19 C-L76-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



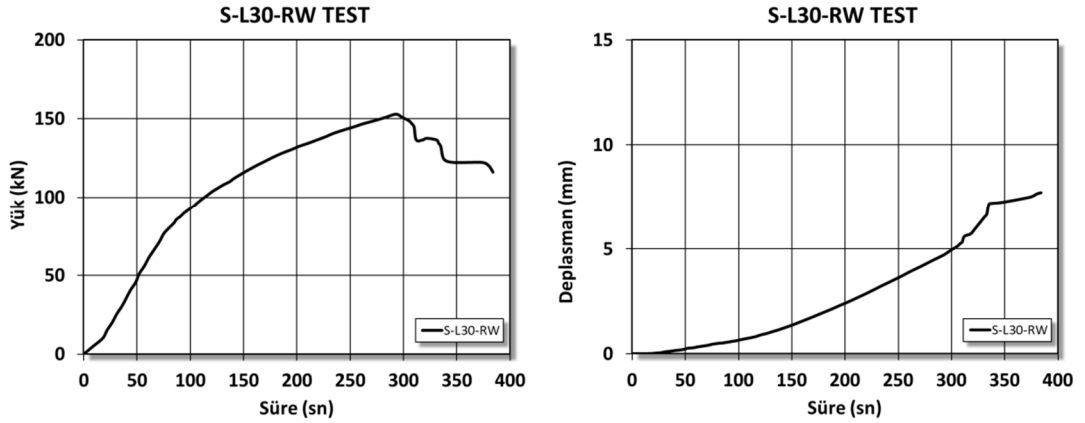
Şekil A. 20 C-L76-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



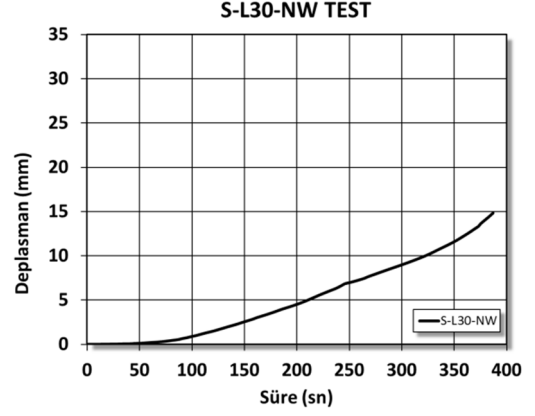
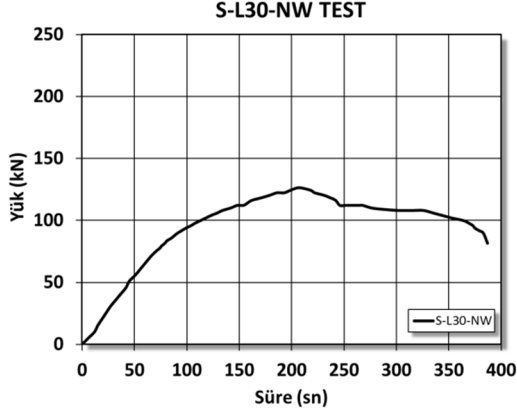
Şekil A. 21 C-L90-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



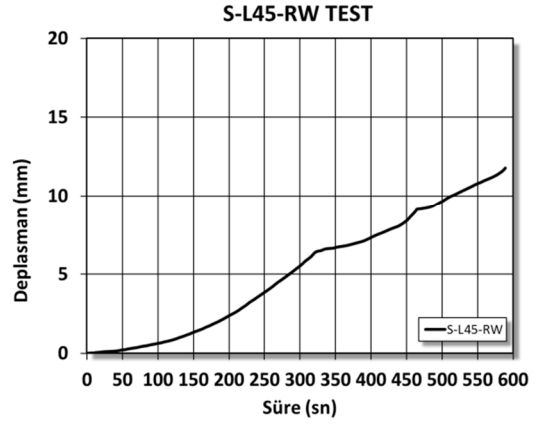
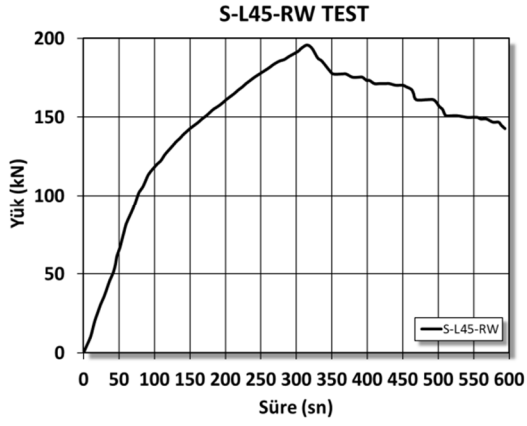
Şekil A. 22 C-L90-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



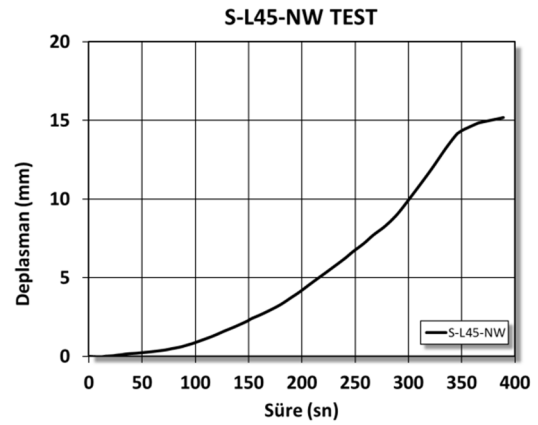
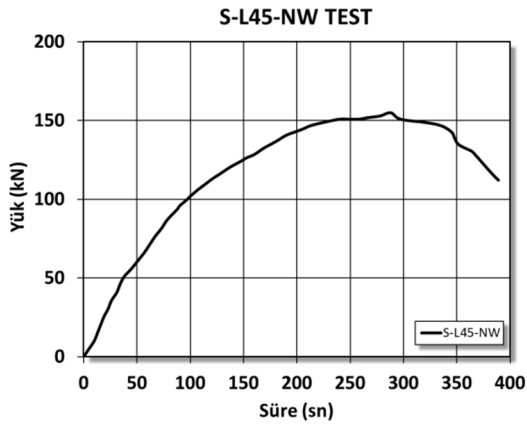
Şekil A. 23 S-L30-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



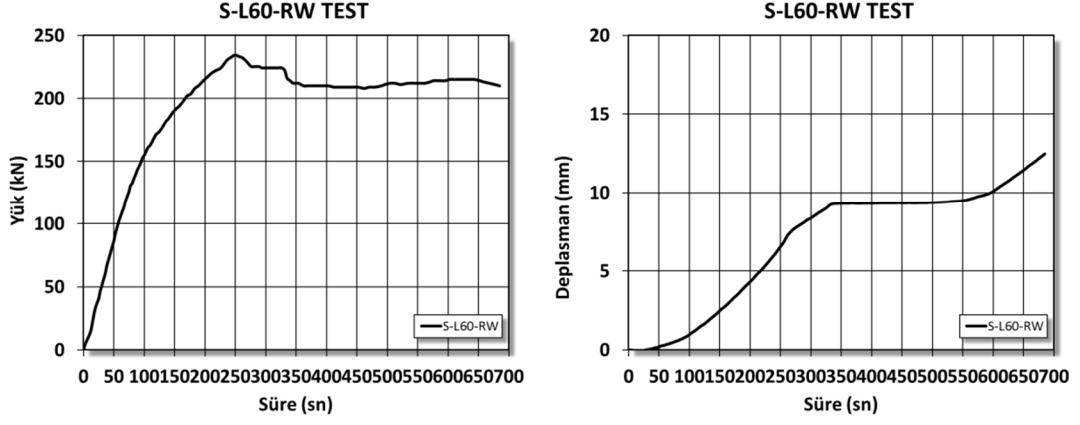
Şekil A. 24 S-L30-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



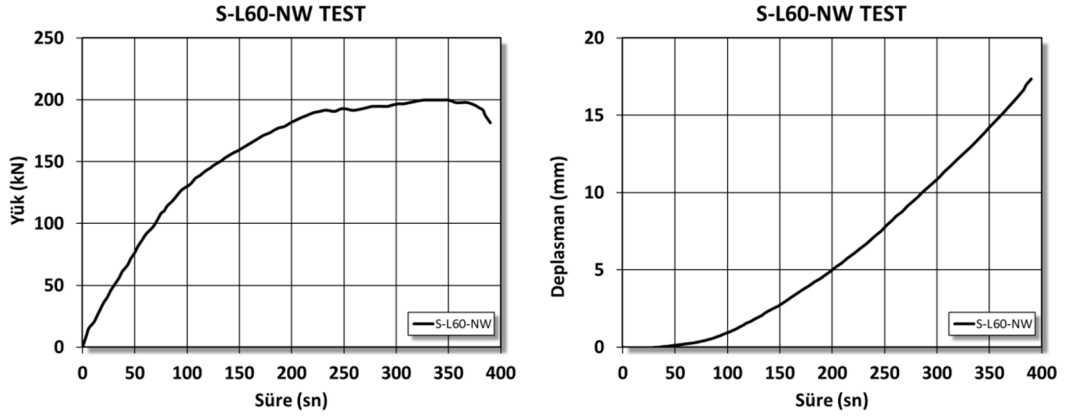
Şekil A. 25 S-L45-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



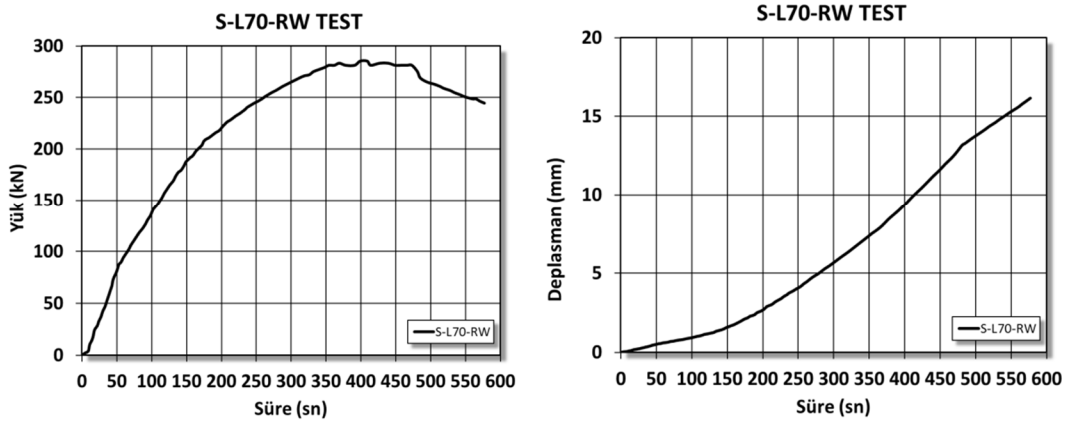
Şekil A. 26 S-L45-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



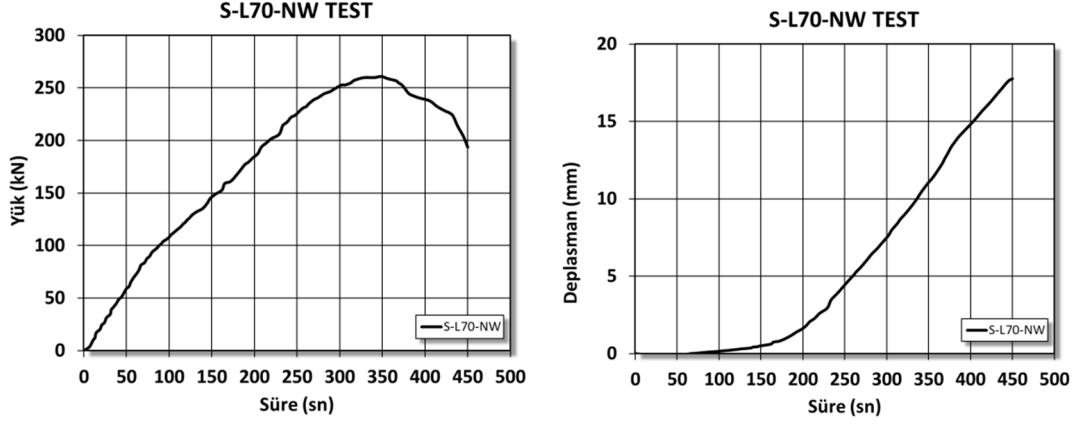
Şekil A. 27 S-L60-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



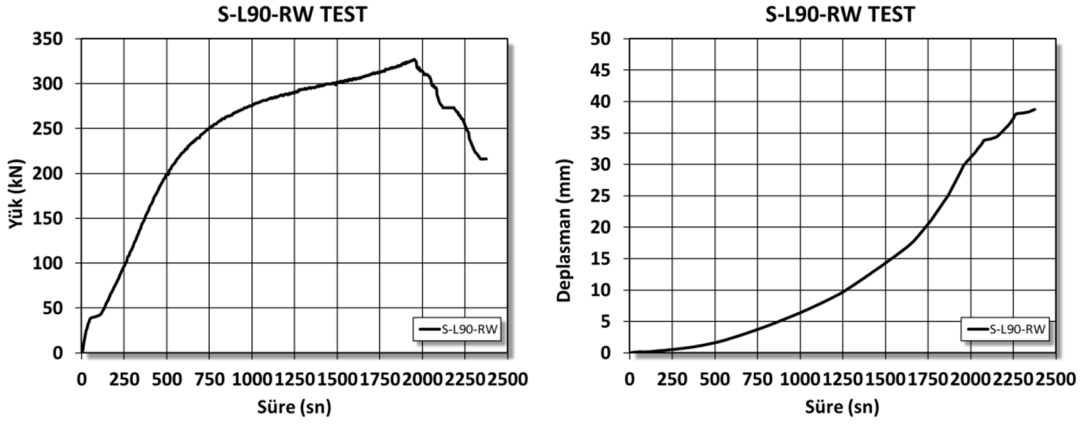
Şekil A. 28 S-L60-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



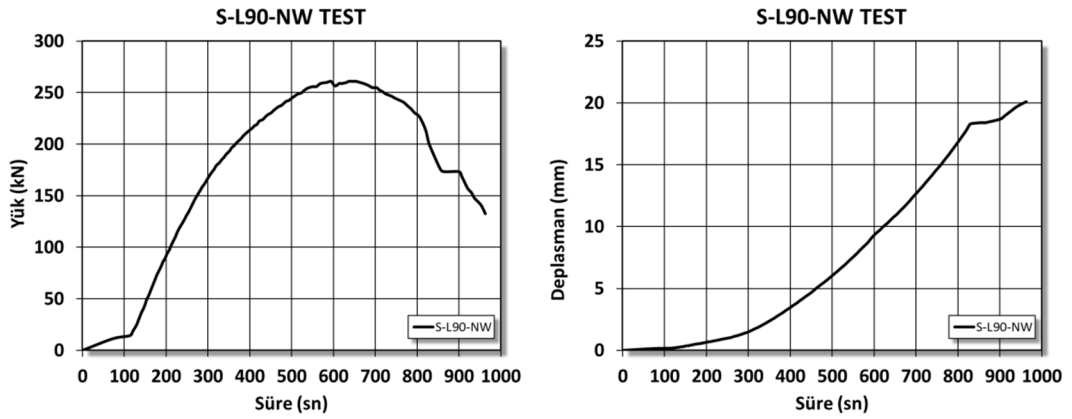
Şekil A. 29 S-L70-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



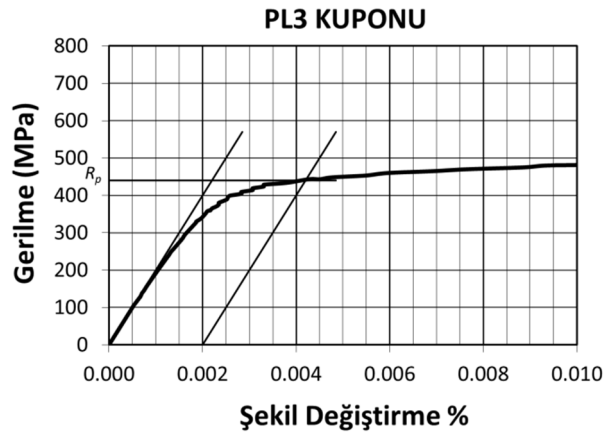
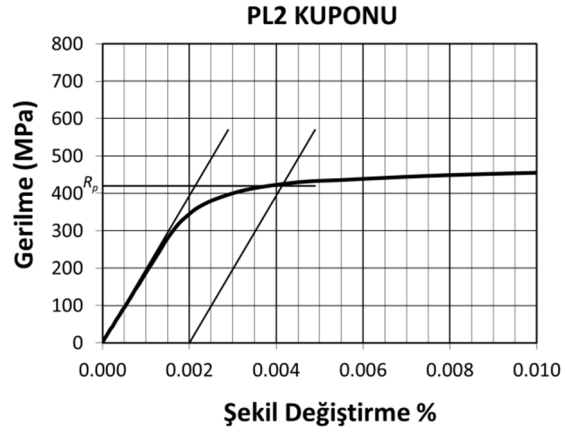
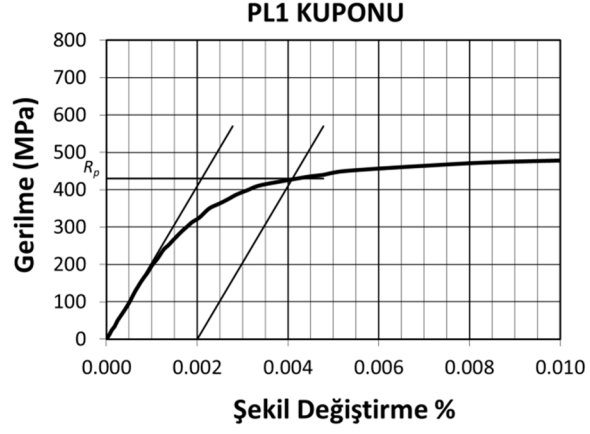
Şekil A. 30 S-L70-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



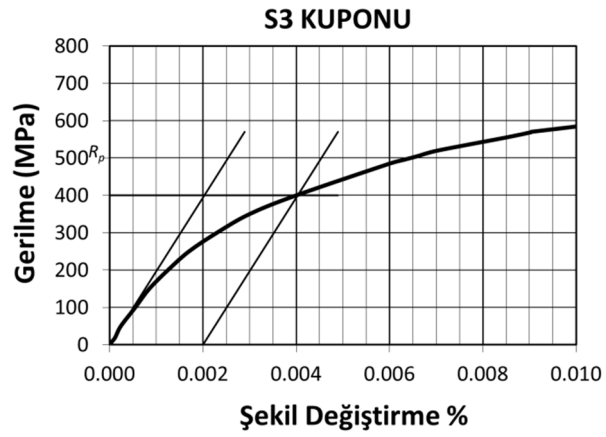
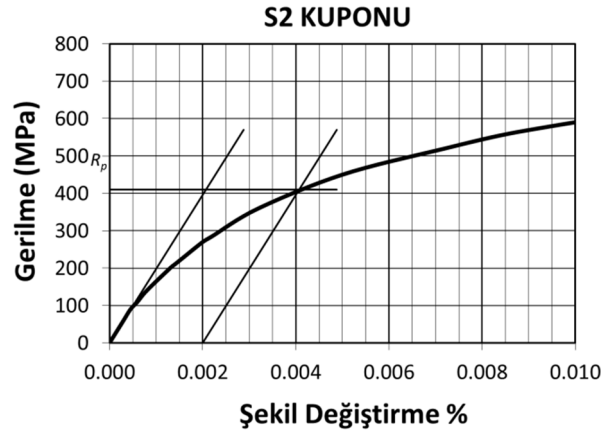
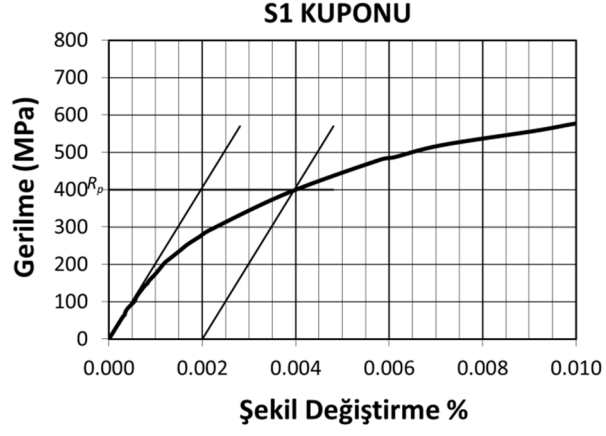
Şekil A. 31 S-L90-RW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



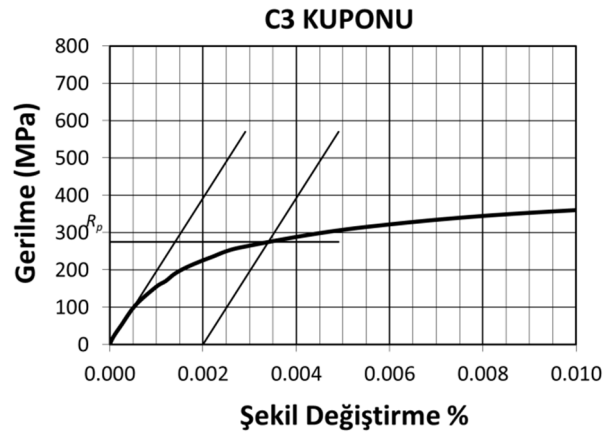
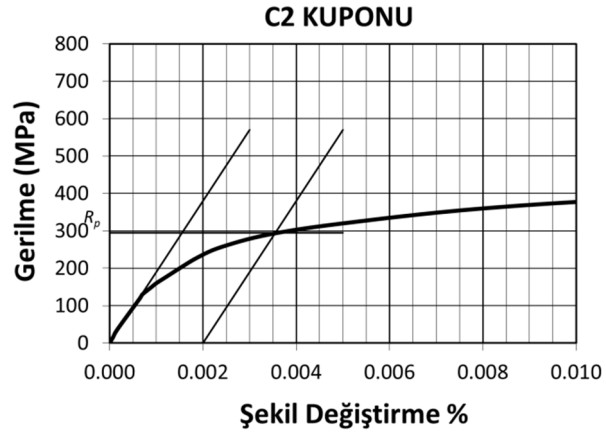
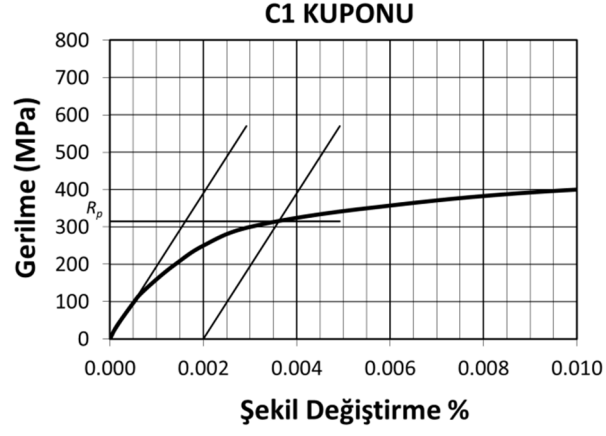
Şekil A. 32 S-L90-NW Numunesinin yük-zaman ve yer değiştirme -zaman test grafikleri.



Şekil A. 33 PL Kuponları test grafikleri.



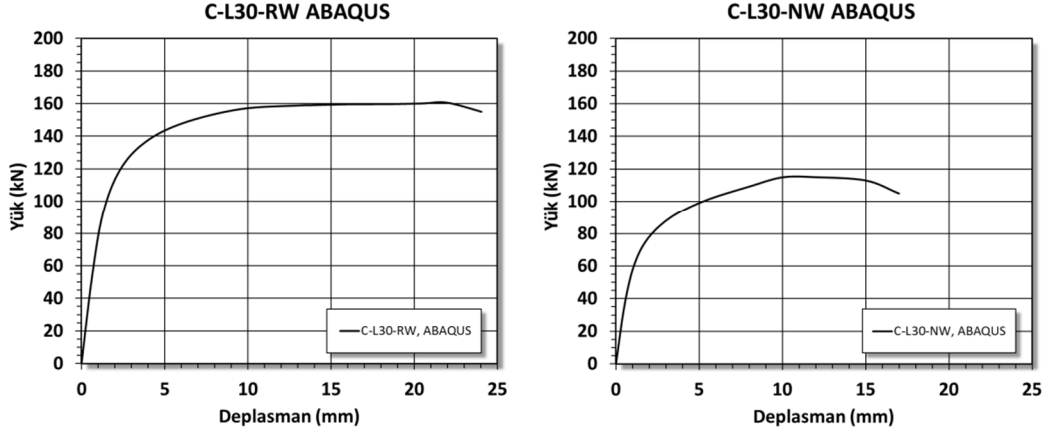
Şekil A. 34 S Kuponları test grafikleri.



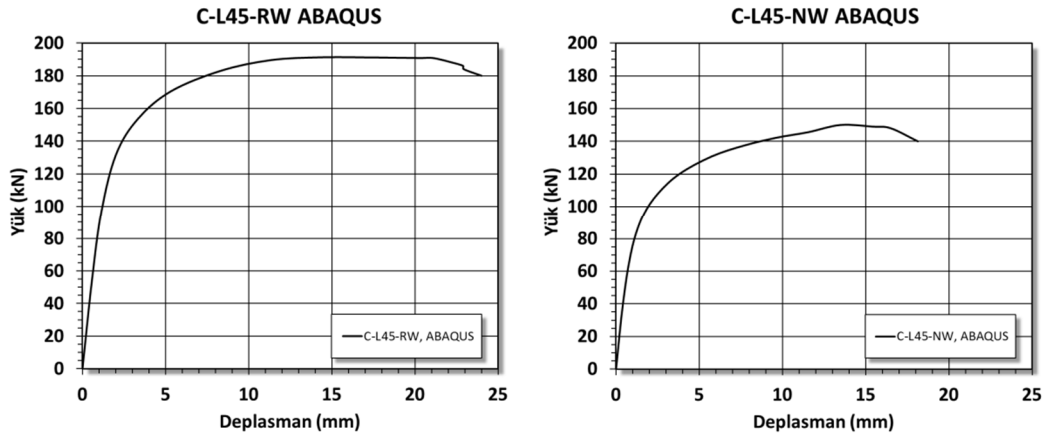
Şekil A. 35 C Kuponları test grafikleri.

EK.B Sayısal Analiz Sonuçları

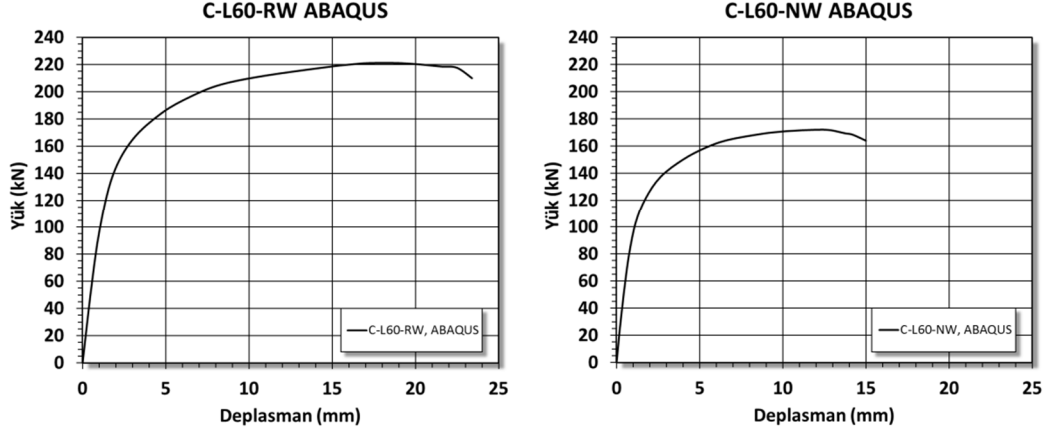
ABAQUS® Sonlu Elemanlar programı ile yapılan analizlerin sonuçlarına göre modellerin yük-yer değiştirme ilişkileri aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



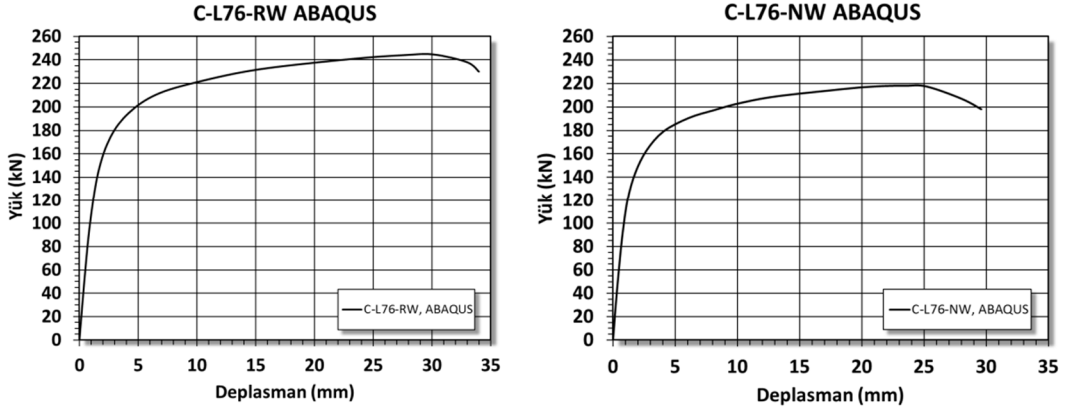
Şekil B. 1 C-L30 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



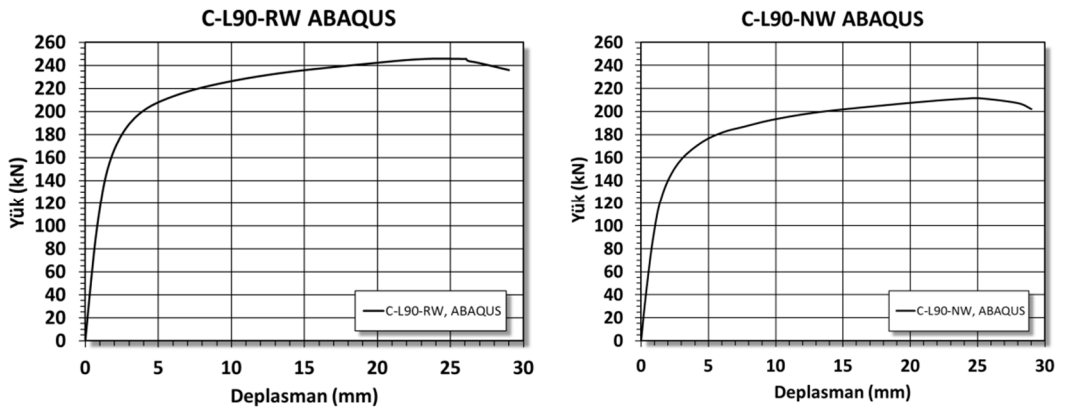
Şekil B. 2 C-L45 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



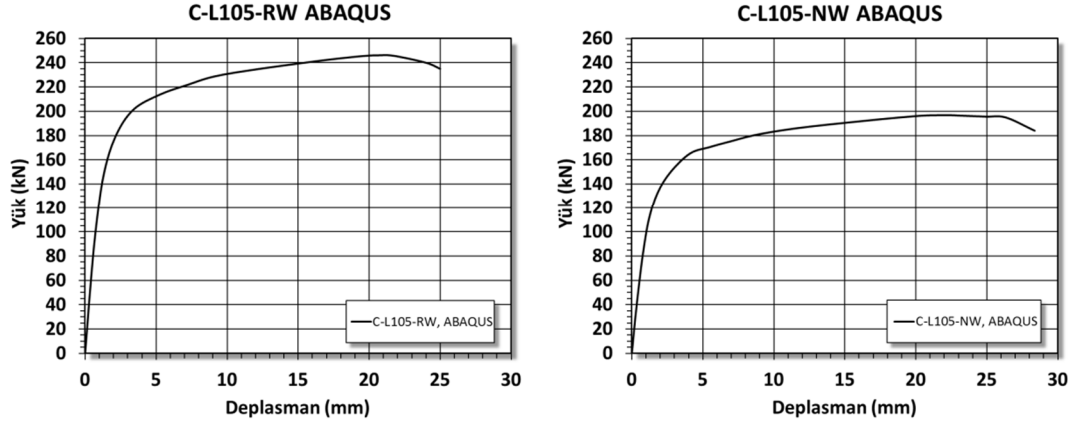
Şekil B. 3 C-L60 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



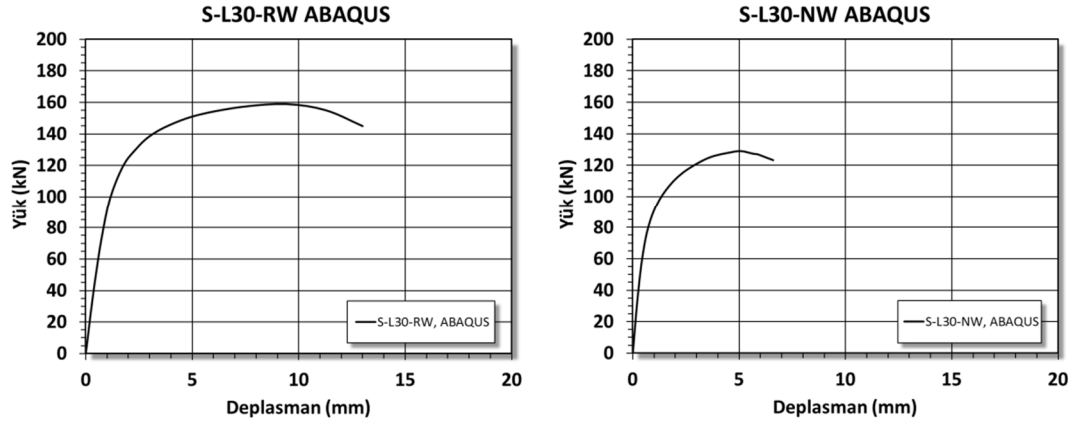
Şekil B. 4 C-L76 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



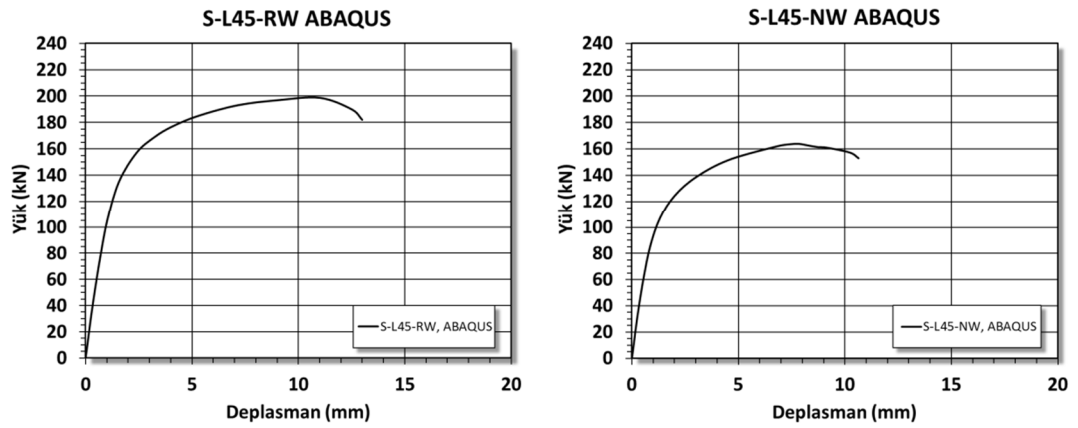
Şekil B. 5 C-L90 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



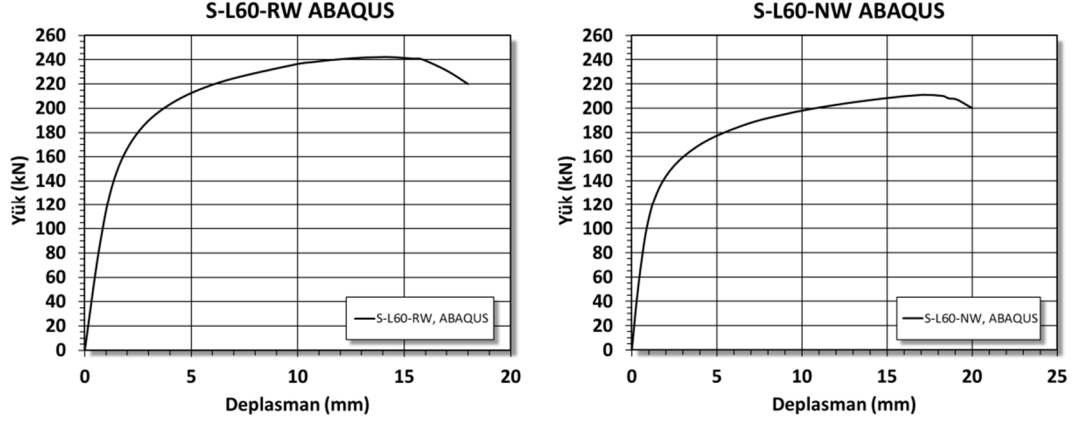
Şekil B. 6 C-L105 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



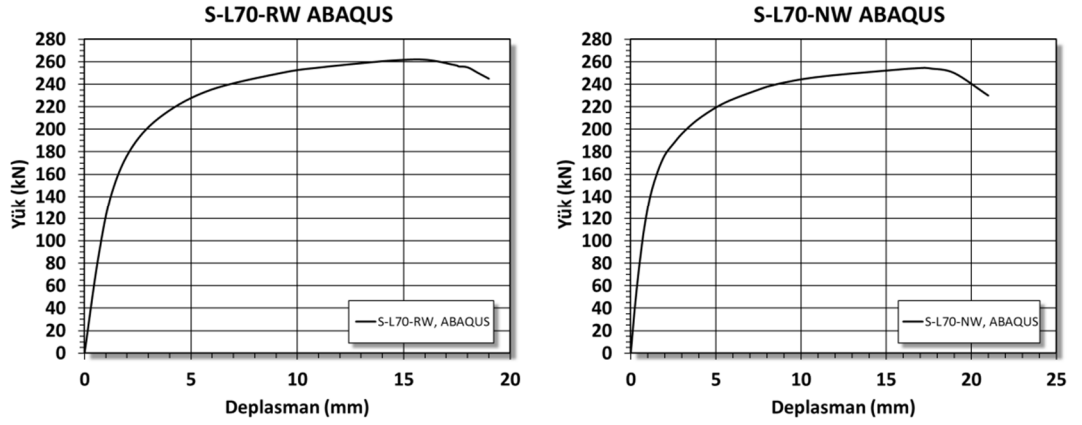
Şekil B. 7 S-L30 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



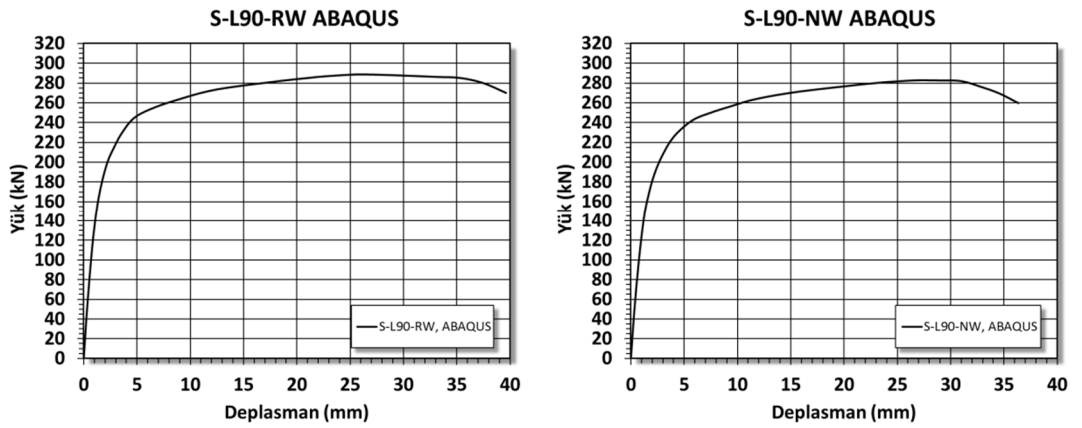
Şekil B. 8 S-L45 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



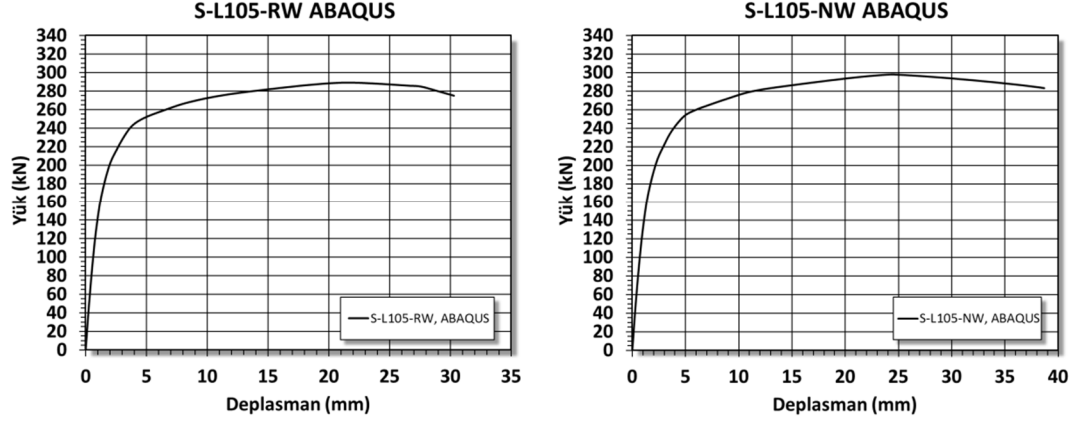
Şekil B. 9 S-L60 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



Şekil B. 10 S-L70 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



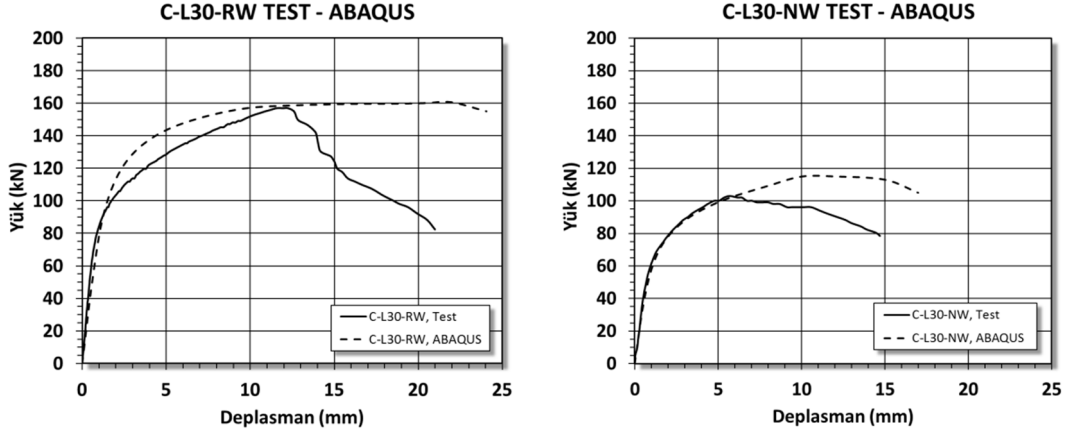
Şekil B. 11 S-L90 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.



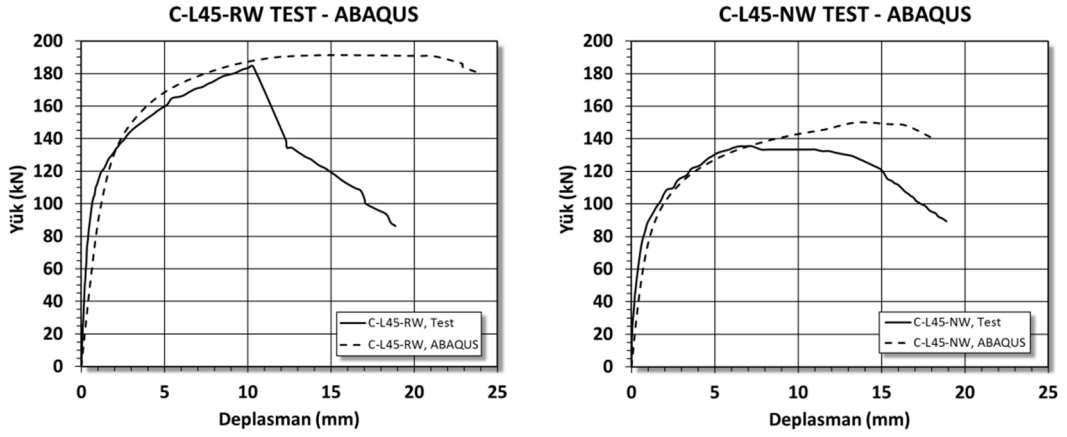
Şekil B. 12 S-L105 Numuneleri sonlu eleman analiz sonuçları yük-yer değiştirme grafiği.

EK.C Test ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

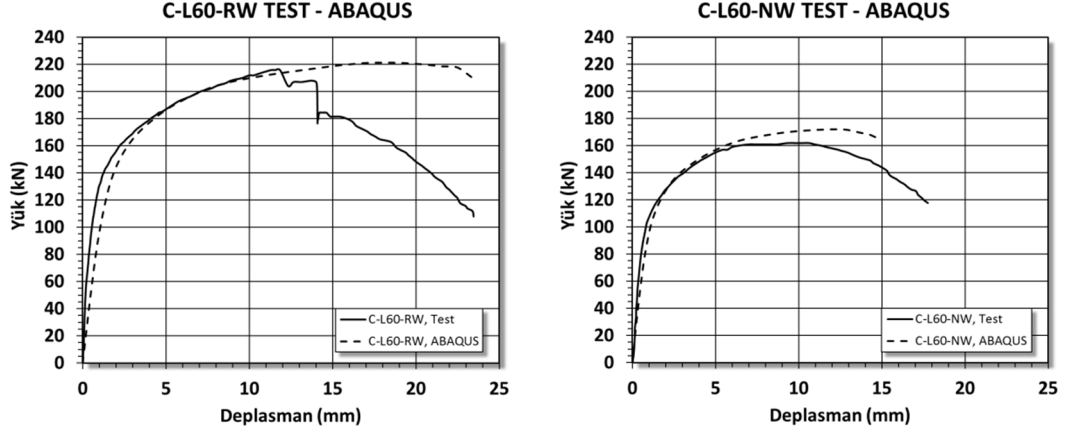
ABAQUS® Sonlu Elemanlar programı ile yapılan analizlerin sonuçları numune test verileri ile karşılaştırılmış olarak aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.



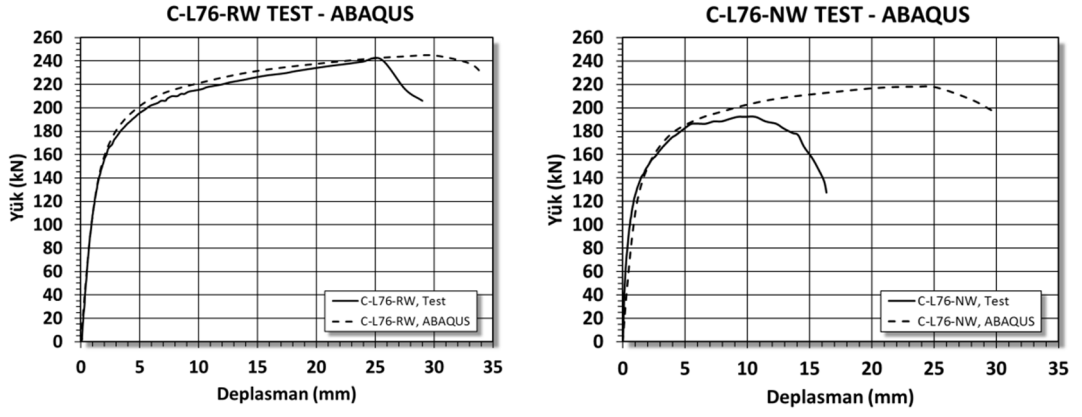
Şekil C. 1 C-L30 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



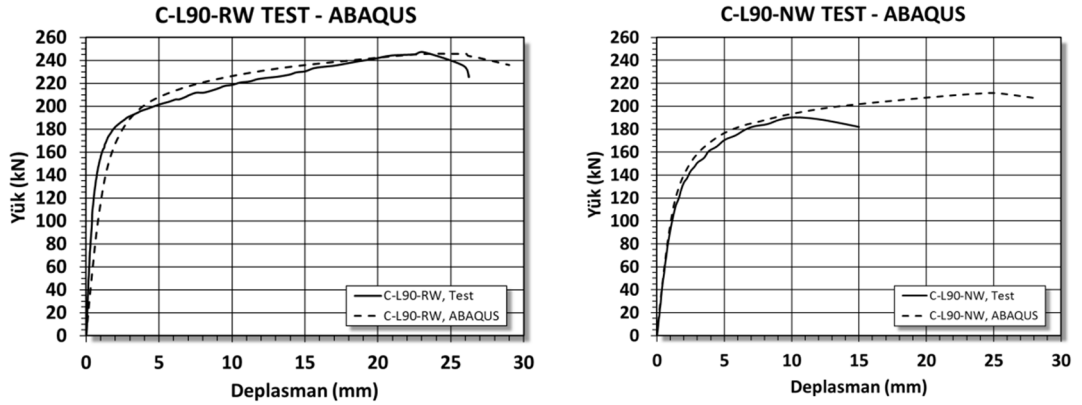
Şekil C. 2 C-L45 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



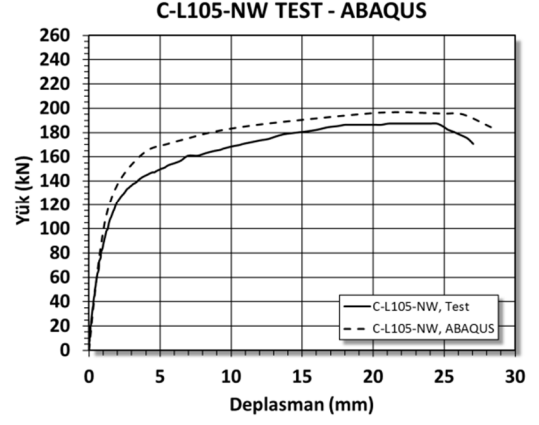
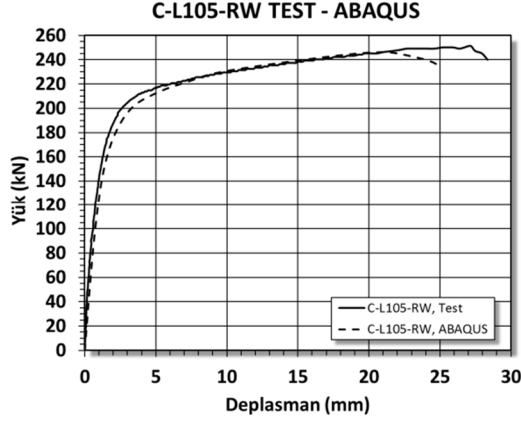
Şekil C. 3 C-L60 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



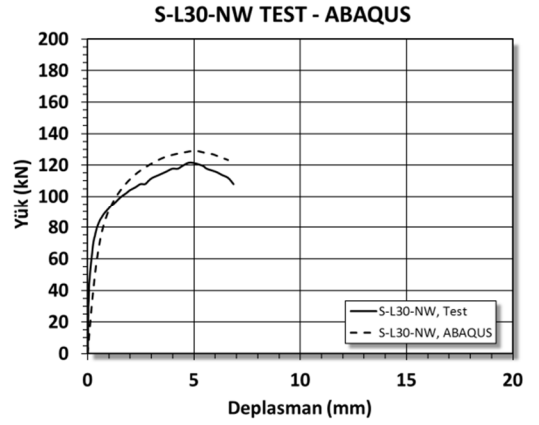
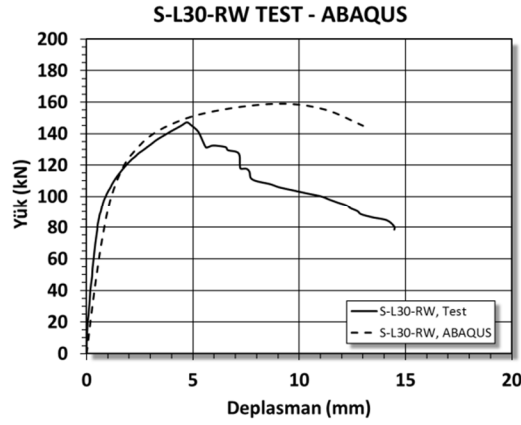
Şekil C. 4 C-L76 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



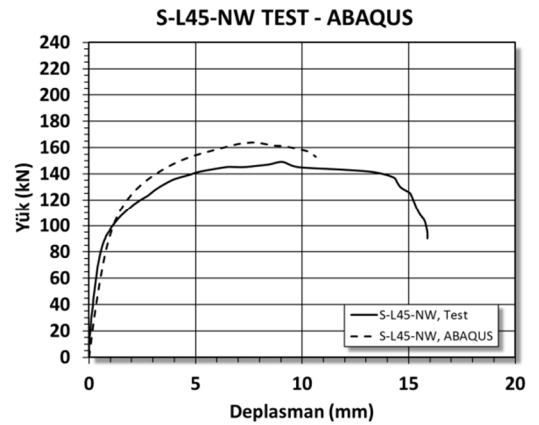
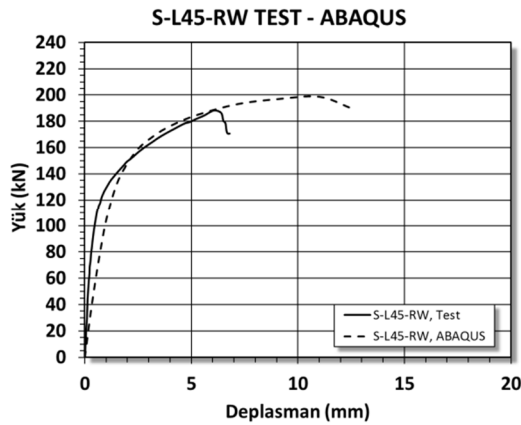
Şekil C. 5 C-L90 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



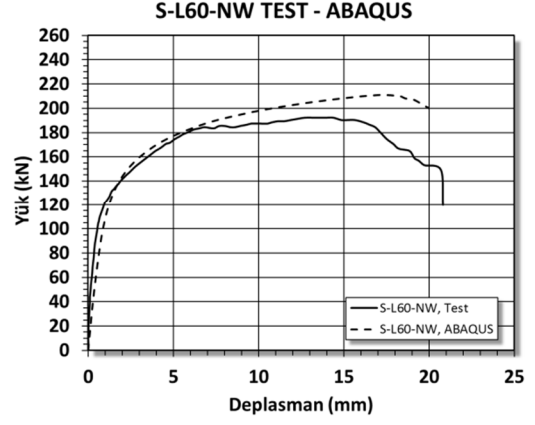
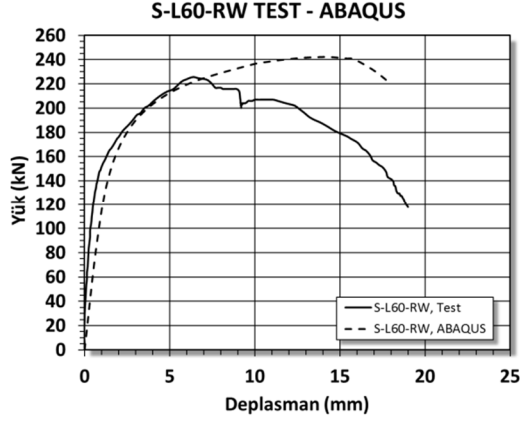
Şekil C. 6 C-L105 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



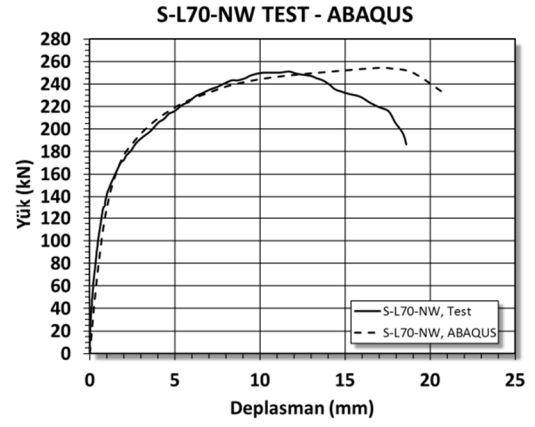
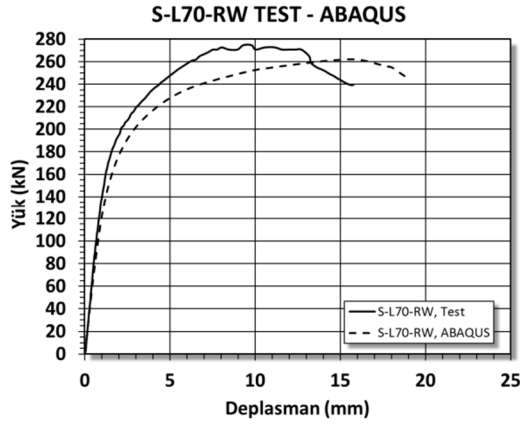
Şekil C. 7 S-L30 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



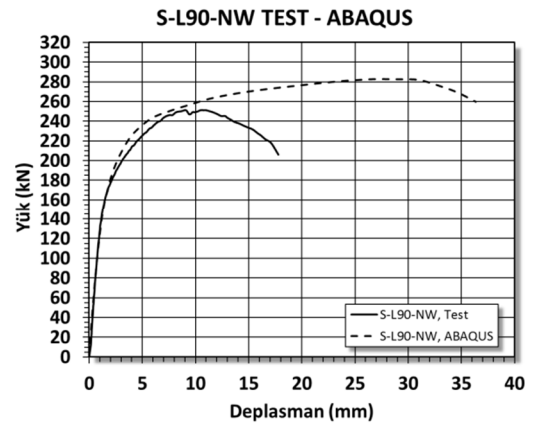
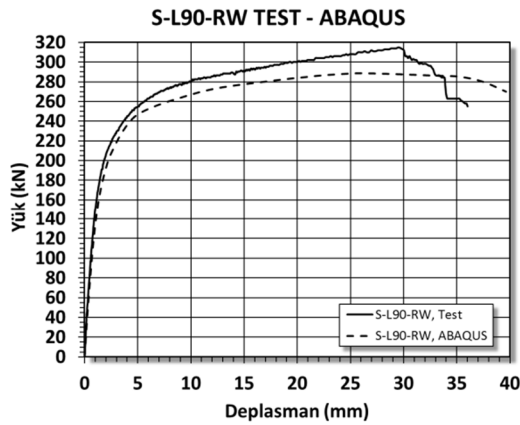
Şekil C. 8 S-L45 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



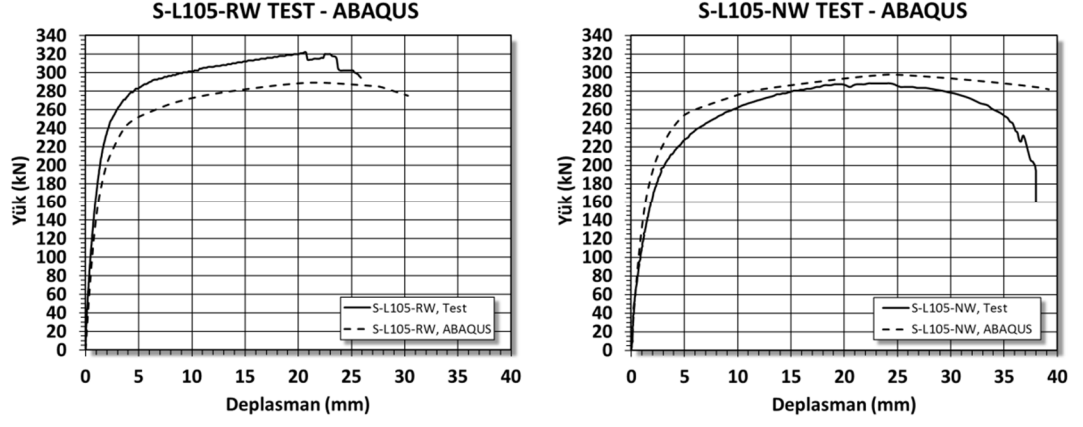
Şekil C. 9 S-L60 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



Şekil C. 10 S-L70 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



Şekil C. 11 S-L90 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.



Şekil C. 12 S-L105 numunelerinin karşılaştırmalı test ve sayısal analiz grafiği.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 08.03.1971

Doğum yeri Eskişehir

Lise 1985-1988 Plevne Lisesi, İstanbul.

Ön Lisans 1989-1991 Trakya Üniversitesi, İnşaat MYO., Edirne

Lisans 1998-2002 İstanbul Kültür Üniversitesi,
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Yüksek Lisans 2002-2004 İstanbul Kültür Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı.

Doktora 2004-2012 İstanbul Kültür Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Yapı Programı.

Çalıştığı kurumlar:

1988-1998 Seçkin Yapı Tic. Ltd.Şti., İstanbul

2002-Devam ediyor İstanbul Kültür Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, Araştırma Görevlisi.