



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK YAPISAL ELEMANLARDA BLOK
KIRILMA SINIR DURUMUNUN SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

Hilmi ARISOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hilmi ARISOY tarafından hazırlanan “Çelik Yapısal Elemanlarda Blok Kırılma Sınır Durumunun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” adlı tez çalışması 29/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK

.....

Danışman

Doç. Dr. Günnur YAVUZ

.....

Üye

Prof. Dr. Ali KÖKEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 211004054 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hilmi ARISOY

Tarih: 29/06/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK YAPISAL ELEMANLARDA BLOK KIRILMA SINIR DURUMUNUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Hilmi ARISOY

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Günnur YAVUZ

2022, 82 Sayfa

**Jüri
Doç. Dr. Günnur YAVUZ
Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK
Prof. Dr. Ali KÖKEN**

Çelik yapılarda, çelik çaprazlı perdelerin çapraz elemanları, kafes kirişlerdeki çekme çubukları ve çatı makaslarının gergi elemanları eksenel çekme kuvveti etkisindeki çekme çubuklarına örnek olarak verilebilir. Çekme çubuklarının tasarımında akma, kırılma ve blok kırılma (kayma) sınır durumları dikkate alınarak hesaplama yapılmaktadır. Bu sınır durumlar hem kaynaklı hem de bulonlu uç birleşimleri bulunan çekme çubukları için geçerlidir. Blok kırılma, çekme elemanlarının birleşimlerinin yanısıra, eğilme elemanlarının moment aktaran bağlantıya sahip uçlarında çekme kuvvetinin olduğu bölümlerde ve kesme kuvvetinin aktarıldığı birleşimlerde hem elemanın hem de kullanılan bağ levhalarının üzerinde oluşabilen ve tasarımın dayanımını belirleyen bir göçme modudur. Yönetmelikler blok kırılma dayanımını tahmin etmek için denklemler önermektedir. Ancak bu denklemler kullanılarak her zaman yüksek doğrulukta tahminler yapılamayabilmektedir. Blok kırılma sınır durumu, çelik yapılarda çekme gerilmelerinin olduğu bölgelerde kontrol edilmesi gereken önemli bir göçme modudur. Blok kırılma kuvvete dik eksendeki alanların çekme kapasitesine, kuvvete paralel eksendeki alanların ise kesme kapasitesine ulaştığı bir sınır durumudur. Blok kırılmanın şeklini bağlantının geometrisi belirlemektedir. Yönetmeliklerde verilen analitik modeller ile blok kırılma sınır durumu kapasitesini belirlemek için olası bütün blok kırılma şekilleri için hesaplama yapmak ve kritik olanı belirlemek gerekmektedir. Farklı blok kırılma şekilleri için bulunan dayanımlardan en küçüğü blok kırılma dayanımını vermektedir. Bu işlem tasarım süresini oldukça uzatmaktadır. Ayrıca tasarımcının bazı kırılma şekillerini gözden kaçırma ihtimali de mevcuttur.

Bu tez çalışmasında, çelik yapılarda kullanılan bulonlu uç bağlantılarda meydana gelen blok kırılma sınır durumu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar yönteminin doğruluğunu teyit etmek için S235 kalitesinde 4 mm kalınlığında levhalara blok kırılma hasarı oluşacak şekilde bulonlu uç bağlantısı oluşturulmuş ve levhalarda eksenel çekme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut yönetmeliklerin kullandığı kapasite denklemleri ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapısal çelik, blok kırılma, bulonlu birleşim, sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

MS THESIS

ANALYSIS OF THE BLOCK SHEAR FAILURE OF STRUCTURAL STEEL MEMBERS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Hilmi ARISOY

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Günnur YAVUZ

2022, 82 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Günnur YAVUZ
Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK
Prof. Dr. Ali KÖKEN**

Bracing elements, tension elements in lattice girders and roof trusses can be given as examples of elements under the influence of axial tensile force in steel structures. In the design of tension elements, calculation is made by taking into account the limit states of tensile yielding, tensile rupture and block shear rupture. These limit states apply to tension elements with both welded and bolted end connections. Block shear is a failure mode that determines the design strength of the connection. Block shear can occur on both the tension element and the plates used in the sections where the tensile force is formed at the ends of the bending elements with a moment connection, as well as in the connections where the shear force is transferred. The regulations recommend equations for estimating block shear strength. However, these equations may not always be able to predict with high accuracy. Limit state of block shear rupture is an important failure mode that must be controlled in areas where tensile force occurs in steel structures. Block shear is a limit state in which areas on the axis perpendicular to the force reach the tensile capacity, and areas on the axis parallel to the force reach the shear capacity. The geometry of the connection determines the shape of the block shear. In order to determine the block shear limit state capacity with the analytical models given in the regulations, it is necessary to perform calculations for all possible block shear paths and determine which is critical. The smallest of the strengths found for different paths of block shear gives block shear strength. This process greatly extends the design time. In addition, there is a possibility that the designer will miss some paths of block shear.

In this thesis study, block shear failure occurring in bolted end connections used in steel structures was examined by finite element method. In addition, in order to verify the accuracy of the finite element method, bolted end connections are formed on S235 quality 4 mm thick plates and axial tensile test was performed on the plates. The obtained results were compared with the capacity equations used by the current regulations and experimental results.

Keywords: Structural steel, block shear failure, bolted connection, finite element method

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın belirlenmesi, hazırlanması ve yazımı esnasında bana yol gösteren, her türlü desteği sağlayan, değerli fikirlerinden ve yönlendirmelerinden yararlandığım akademik danışmanım Sayın Doç. Dr. Günnur YAVUZ'a ve her daim yanımda olan aileme tüm içtenliğimle teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hilmi ARISOY
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. BLOK KIRILMA SINIR DURUMU	3
2.1. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTHYE-2018).....	5
2.2. Eurocode 3 (EN 2005) Yönetmeliği	7
2.3. CSA S16-14 Yönetmeliği	7
2.4. IS: 800 (2007) Yönetmeliği	8
2.5. AIJ (1990) Yönetmeliği	9
2.6. SBC (2007) Yönetmeliği	9
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
4.1. Deney Elemanları	17
4.2. Deney Elemanlarının Malzeme Özellikleri	20
4.3. Deney Düzenegi ve Ölçme Tekniği.....	23
5. DENEY SONUÇLARI	25
5.1. S1A Deney Numunesi	25
5.2. S1B Deney Numunesi.....	26
5.3. S1C Deney Numunesi.....	28
5.4. S2A Deney Numunesi	29
5.5. S2B Deney Numunesi.....	31
5.6. S2C Deney Numunesi.....	32
5.7. T1A Deney Numunesi	34
5.8. T1B Deney Numunesi	36
5.9. T1C Deney Numunesi	38
5.10. T2A Deney Numunesi	40
5.11. T2B Deney Numunesi	42
5.12. T2C Deney Numunesi	44
5.13. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	46
6. ANALİTİK ÇALIŞMA VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	52

6.1. Giriş	52
6.2. Malzeme Özellikleri	52
6.3. Sonlu Eleman Modelleri ve Sonuçların Deneysel Çalışma ile Karşılaştırılması. 56	
6.4. Sonlu Eleman Metodolojisinin Literatürdeki Bir Deneysel Çalışma Üzerinde Uygulanması	74
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{gt}	: Çekme gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı [mm^2]
A_{gv}	: Kayma gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı [mm^2]
A_{nt}	: Çekme gerilmesi etkisindeki net alan (Net çekme alanı) [mm^2]
A_{nv}	: Kayma gerilmesi etkisindeki net alan (Net kayma alanı) [mm^2]
Cl	: Birleşimin uzunluğu [mm]
F_u	: Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı [MPa]
F_y	: Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi [MPa]
l	: Şekil değiştirmiş boy [mm]
l_0	: İlk boy [mm]
P_u	: Karakteristik dayanım [N]
R_n	: Karakteristik dayanım [N]
R_t	: Birleşik denklem için eşdeğer gerilme katsayısı [-]
R_v	: Birleşik denklem için eşdeğer gerilme katsayısı [-]
U_{bs}	: Çekme gerilmeleri yayılımını dikkate alan bir katsayı [-]
U_t	: Birleşimin tipine bağlı olarak değişen etkinlik katsayısı [-]
γ_{M0} ve γ_{M2}	: Malzeme dayanım katsayıları [-]
γ_{M0} ve γ_{M1}	: Farklı sınır durumlar için güvenlik katsayıları [-]
ϵ_{gr}	: Gerçek birim şekil değiştirme [-]
$\epsilon_{müh}$	: Mühendislik birim şekil değiştirmesi [-]
σ_{gr}	: Gerçek gerilme [MPa]
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik gerilmesi [MPa]
σ_u	: Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]
σ_y	: Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

Kısaltmalar

AIJ	: Architectural Institute of Japan
AISC	: American Institute of Steel Construction
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CSA	: Canadian Standards Association
ÇYTHYE	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
IS	: Indian Standard
SBC	: Saudi Building Code

1. GİRİŞ

Çelik yapılarda, çelik çaprazlı perdelerin çapraz elemanları, kafes kirişlerdeki çekme çubukları ve çatı makaslarının gergi elemanları eksenel çekme kuvveti etkisindeki çekme çubuklarına örnek olarak verilebilir. Çekme çubuklarının tasarımında akma, kırılma ve blok kırılma (kayma) sınır durumları dikkate alınarak hesaplama yapılmaktadır. Bu sınır durumlar hem kaynaklı hem de bulonlu uç birleşimleri bulunan çekme çubukları için geçerlidir.

Bulonlu uç birleşimine sahip çekme elemanları çelik yapılarda kullanılan ana yapısal taşıyıcı elemanlardır. Bu elemanlar yapıya gelen yükler altında toplam enkesit alanında akmanın gerçekleşmesi, en küçük net enkesit alanında çekme kırılması oluşması ve blok kırılma sınır durumları göz önüne alınarak tasarlanmaktadır.

Blok kırılma, çekme elemanlarının birleşimlerinin yanısıra, eğilme elemanlarının moment aktaran bağlantıya sahip uçlarında çekme kuvvetinin olduğu bölümlerde ve kesme kuvvetinin aktarıldığı birleşimlerde hem elemanın hem de kullanılan bağ levhalarının üzerinde oluşabilen tasarımın dayanımını belirleyen bir göçme modudur. Blok kırılma kuvvete dik eksendeki alanların çekme kapasitesine, kuvvete paralel eksendeki alanların ise kesme kapasitesine ulaşması ile meydana gelen bir sınır durumdur.

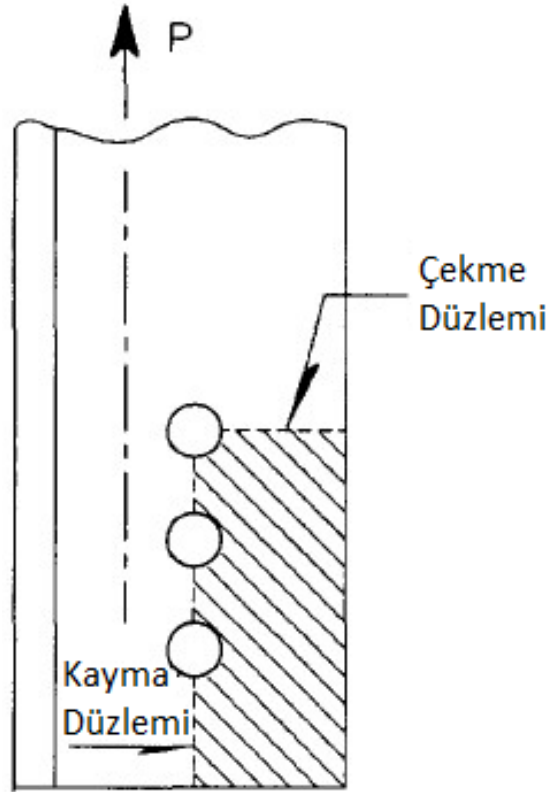
Blok kırılma sınır durumu, çelik yapı elemanlarının tasarımda göz önüne alınması gereken ana kriterlerden biridir. Blok kırılma oluşumunda birçok parametrenin etkili olmasına karşın, tasarımda en sık tercih edilen yöntem yönetmeliklerde belirtilen analitik modellerin kullanılmasıdır. Yönetmelikte verilen denklemler uygulama kolaylığı açısından büyük avantaj sağlasa da farklı kırılma şekillerini kullanıcının tahmin etmesi gerektiği için işlem yükünü artırmaktadır. Yönetmeliklerde verilen analitik modeller ile blok kırılma sınır durumu kapasitesini belirlemek için olası bütün blok kırılma şekilleri için hesaplama yapmak ve kritik olanı belirlemek gerekmektedir. Farklı blok kırılma şekilleri için bulunan dayanımlardan en küçüğü blok kırılma dayanımını vermektedir. Bu işlem tasarım süresini oldukça uzatmaktadır. Ayrıca tasarımcının bazı kırılma şekillerini gözden kaçırma ihtimali mevcuttur.

Çelik çekme elemanları yapılarda hem yatay hem de düşey yüklerin karşılanmasında kullanılmaktadır. Çatı ve cephelerde kullanılan çapraz elemanlarının deprem ve rüzgâr gibi yatay yükler altında öngörülmeleyen bir şekilde yük taşıma kapasitesine ulaşması durumunda yapı sisteminin bir bölümü labil hale gelebilecektir.

Bu tez çalışmasında, bulonlu birleşimlerde blok kırılma sınır durumu taşıma kapasitesinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak daha düşük hata oranları ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonlu eleman modelinin güvenilirliğini test etmek için kontrol deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği ÇYTHYE (2018), 'nin önerdiği ve AIJ (1990), CSA S16-14, Eurocode 3 (EN 2005), IS: 800 (2007), SBC (2007) yönetmeliklerindeki denklemlerden bulunan dayanım değerleri ve sonlu eleman modelinden elde edilen dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2. BLOK KIRILMA SINIR DURUMU

Blok kırılma, birleşimi oluşturan elemanların bir bölümünün blok şeklinde kırılarak esas elemandan ayrılması durumu olarak tanımlanmaktadır. Bu sınır durum çekme elemanı veya birleşim levhası üzerinde gerçekleşebilmektedir. Blok kırılma sınır durumu hem bulonlu hem de kaynaklı birleşimlerde gözönüne alınması gereken bir göçme modudur. Bulonlu bağlantıya sahip korniyer enkesitli bir çekme elemanı için blok kırılma göçme mekanizması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



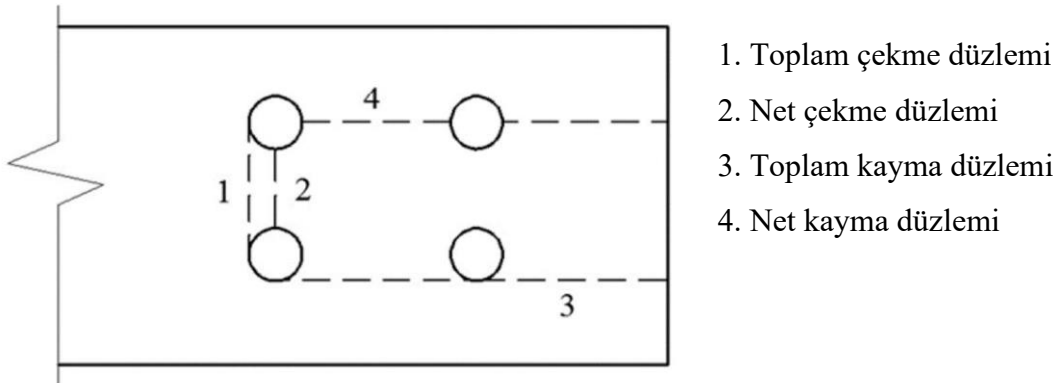
Şekil 2.1. Tipik blok kırılma mekanizması (Cunningham ve ark., 1995)

Çekme çubuklarının uç birleşimlerinde, bulon ya da kaynak kullanılması durumunda bu bağlantı elemanlarının kontrolü yapılmaktadır. Ayrıca bu birleşimlerin blok kırılma açısından da kontrol edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.2’de blok kırılma sınır durumu için bulonlu bir çekme çubuğu uç birleşiminde düğüm levhası üzerinde oluşan kırılma mekanizması görülmektedir.



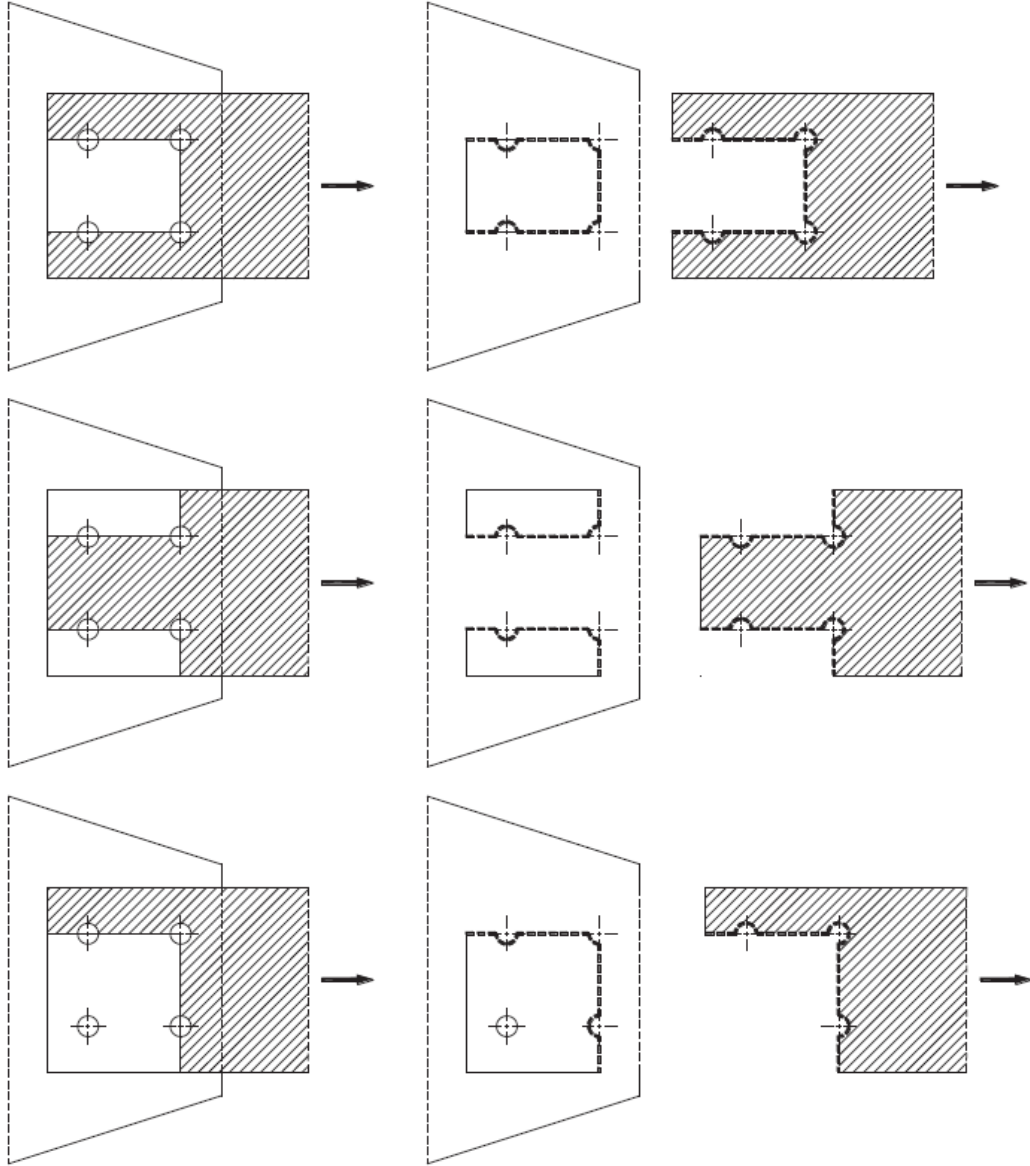
Şekil 2.2. Blok kırılma (Güçlü, 2019)

Karakteristik blok kırılma dayanımı R_n , kesme kuvveti nedeni ile toplam kesme alanında oluşan akma ya da net kesme alanında oluşan kırılma sınır durumları ile çekme kuvveti nedeni ile net çekme alanında oluşan kırılma sınır durumları esas alınarak hesaplanmaktadır (ÇYTHYE, 2018). Burada bahsedilen alanlar Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Çekme ve kayma düzlemleri (Teh ve Clements, 2012)

Blok kırılma farklı kırılma çizgilerini takip ederek oluşabilmektedir. Bu nedenle oluşabilecek tüm kırılma çizgisi kombinasyonları incelenmeli ve en küçük dayanımı veren kırılma şekli bulunmalıdır. Şekil 2.4'te, 4 bulonlu bir birleşimde ortaya çıkabilecek farklı blok kırılma sınır durumları gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Birleşimde oluşabilecek farklı blok kırılma durumları (Güçlü, 2019)

2.1. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği (ÇYTHYE-2018)

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (2018)'de blok kırılma sınır durumunda karakteristik dayanımın belirlenmesi için Denklem 2.1'deki bağıntı önerilmektedir. ÇYTHYE (2018) yönetmeliğindeki bu denklemde net çekme alanında kırılma ile birlikte net kayma alanında kırılma ya da toplam kayma alanında akma gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Bu varsayıma göre blok kırılma sınır durumu karakteristik dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$R_n = 0.60F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0.60F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (2.1)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

R_n = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı [MPa]

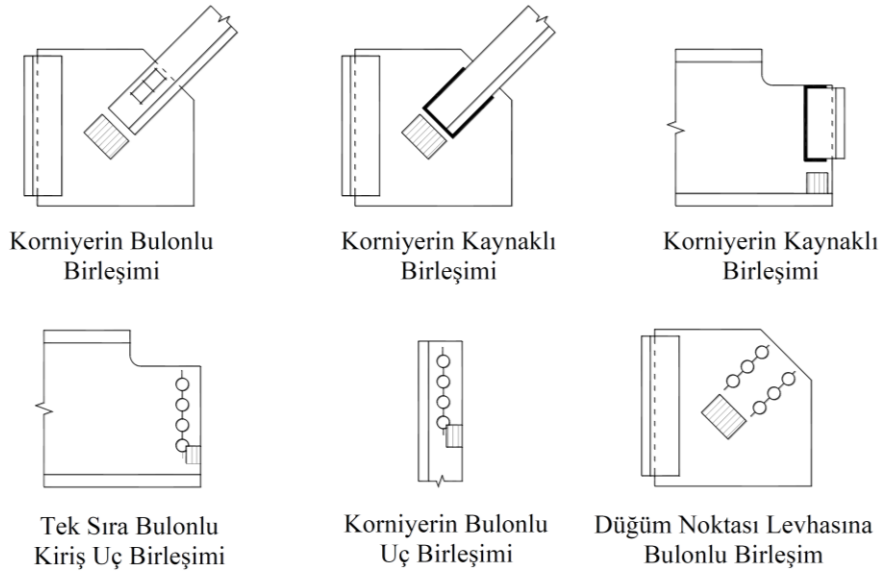
A_{nt} = Çekme gerilmesi etkisindeki net alan (Net çekme alanı) [mm²]

A_{gv} = Kayma gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı [mm²]

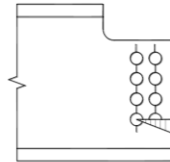
A_{nv} = Kayma gerilmesi etkisindeki net alan (Net kayma alanı) [mm²]

U_{bs} = Çekme gerilmeleri yayılışını dikkate alan bir katsayı [-]

Çekme gerilmeleri yayılışının üniform olduğu yüzeylerde $U_{bs} = 1.0$, üniform olmadığı yüzeylerde ise $U_{bs} = 0.5$ olarak alınacaktır (Şekil 2.5).



a) $U_{bs} = 1.0$ olan birleşim tipleri



Çok Sıra Bulonlu Kiriş Uç Birleşimi

b) $U_{bs} = 0.5$ olan birleşim tipi

Şekil 2.5. Blok kırılma sınır durumunda çekme gerilmelerinin yayılışı (ÇYTHYE, 2018)

2.2. Eurocode 3 (EN 2005) Yönetmeliği

Eurocode 3 (EN 2005) “Eurocode 3: Design of Steel Structures-part 1–8: Design of Joints” Yönetmeliği’nde blok kırılma sınır durumu için net çekme alanında kırılma ve net kayma alanında akmanın gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Eksantrisitenin olduğu durumlarda gerilme dağılımının homojen olmaması nedeniyle çekme alanında 0.50 katsayısı gözönüne alınmaktadır. Buna bağlı olarak blok kırılma dayanımı için Denklem 2.2 ve Denklem 2.3’teki formüller önerilmektedir.

$$\text{Merkezi yükleme için: } P_u = \frac{F_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{F_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.2)$$

$$\text{Eksantrik yükleme için: } P_u = \frac{0.50 F_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{F_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.3)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

P_u = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{nv} = Net kayma alanı [mm²]

γ_{M0} ve γ_{M2} = Malzeme dayanım katsayıları [–]

2.3. CSA S16-14 Yönetmeliği

CSA S16-14, “Canadian Standards Association-Design of Steel Structures” Kanada Çelik Yapılar Yönetmeliği’nde blok kırılma kapasitesini elde etmek için net çekme alanında kırılma gerilmesi, toplam kayma alanında ise kırılma ile akma gerilmelerinin ortalaması bir gerilme oluşacağı varsayılmaktadır. Buna göre blok kırılma karakteristik dayanımı Denklem 2.4’teki şekilde hesaplanmaktadır.

$$P_u = U_t F_u A_{nt} + 0.60 A_{gv} \frac{(F_y + F_u)}{2} \quad (2.4)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

P_u = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{gv} = Toplam kayma alanı [mm²]

U_t = Birleşimin tipine bağlı olarak değişen etkinlik katsayısı [simetrik veya merkezi yüklem için $U_t = 1$, tek kolundan bağlanan korniyerler için $U_t = 0.6$, kesme kuvveti aktarılan kiriş gövdelerinde tek sıra bulon için $U_t = 0.9$, çift sıra bulon için $U_t = 0.3$ alınacaktır.]

2.4. IS: 800 (2007) Yönetmeliği

IS: 800 (2007), “General Construction in Steel-Code of Practice” Hindistan Yönetmeliği’nde blok kırılma sınır durumunun brüt kayma alanında akma ile net çekme alanında kırılma ya da net kayma alanında kırılma ile brüt çekme alanında akmanın olmasıyla gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Buna bağlı olarak blok kırılma dayanımı, Denklem 2.5 ve Denklem 2.6’dan elde edilen dayanım değerlerinden küçük olanı olarak tanımlanmaktadır.

$$P_u = \frac{0.90F_u A_{nt}}{\gamma_{M1}} + \frac{F_y A_{gv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.5)$$

$$P_u = \frac{F_y A_{gt}}{\gamma_{M0}} + \frac{0.90F_u A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} \quad (2.6)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

P_u = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{gt} = Brüt çekme alanı [mm²]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{gv} = Brüt kayma alanı [mm²]

A_{nv} = Net kayma alanı [mm²]

γ_{M0} ve γ_{M1} = Farklı sınır durumlar için güvenlik katsayıları [–]

2.5. AIJ (1990) Yönetmeliği

AIJ (1990), “Architectural Institute of Japan - Standard for Limit State Design of Steel Structures” Japonya Yönetmeliği’nde blok kırılma dayanımını elde etmek için iki denklem önerilmiştir. Her iki denklemde de hem çekme hem de kayma alanı için net alanlar kullanılmıştır. Denklem 2.7 ve Denklem 2.8’den elde edilen dayanım değerlerinden küçük olanı karakteristik blok kırılma dayanımını belirlemek için kullanılmaktadır.

$$P_u = F_u A_{nt} + \frac{F_y A_{nv}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

$$P_u = F_y A_{nt} + \frac{F_u A_{nv}}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

P_u = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{nv} = Net kayma alanı [mm²]

2.6. SBC (2007) Yönetmeliği

SBC (2007), “Saudi Building Code-SBC 306” Suudi Arabistan Yönetmeliği’nde blok kırılma, kırılma çizgisi üzerindeki kayma dayanımlarının ve çekme dayanımlarının toplamı olan bir sınır durum olarak tanımlanmaktadır. SBC (2007) bir düzlemde net alanda kırılma olurken, buna dik diğer düzlemde brüt alanda akma gerçekleşeceğini varsaymaktadır. Buna bağlı olarak blok kırılma dayanımı Denklem 2.9 ve Denklem 2.10’dan elde edilen dayanım değerlerinden küçük olanı ile belirlenmektedir.

$$F_u A_{nt} \geq 0.60 F_u A_{nv} \text{ ise}$$

$$R_n = F_u A_{nt} + 0.60 F_y A_{gv} \leq F_u A_{nt} + 0.60 F_y A_{nv} \quad (2.9)$$

$$F_u A_{nt} < 0.60 F_u A_{nv} \text{ ise}$$

$$R_n = F_y A_{gt} + 0.60 F_u A_{nv} \leq F_u A_{nt} + 0.60 F_y A_{nv} \quad (2.10)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

R_n = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{gt} = Brüt çekme alanı [mm²]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{gv} = Brüt kayma alanı [mm²]

A_{nv} = Net kayma alanı [mm²]

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kulak ve Grondin (2001) blok kırılma sınır durumu için Avrupa, Amerika, Kanada, Avustralya ve Japonya yönetmeliklerindeki analitik modelleri ve deney sonucu elde ettikleri verileri karşılaştırmıştır. Ayrıca, sonuçları birleşim tipi ve kullanılan çekme elemanı türüne göre sınıflandırıp, analitik model sonuçlarını test sonuçlarına oranlayarak güvenlik katsayılarını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak aşağıdaki analitik modelleri önermişlerdir.

$$\text{Düğüm levhası ve korniyer için } P_u = \sigma_u A_{nt} + 0.60 \sigma_y A_{gv} \quad (3.1)$$

$$\text{Başlığı kesilmiş kiriş gövdelerinde } P_u = 0.50 \sigma_u A_{nt} + 0.60 \sigma_y A_{gv} \quad (3.2)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

P_u = Blok kırılma sınır durumu karakteristik dayanımı [N]

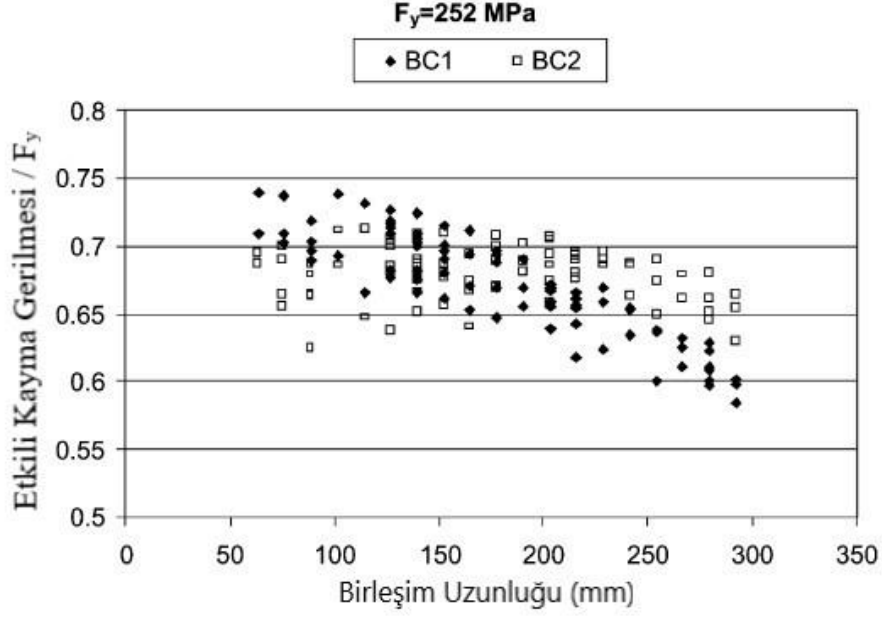
σ_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

σ_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{gv} = Toplam kayma alanı [mm²]

Topkaya (2004) daha önce yapılan deneysel çalışma sonuçları ile parametrik bir sonlu eleman modeli çalışması gerçekleştirmiştir. Bu modellerin analizi sonucunda, kesme düzleminde oluşan gerilmenin çeliğin akma gerilmesinden düşük ancak kesme gerilmesinden ($0.60F_y$) yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun sonucunda birleşim uzunluğu arttıkça efektif kayma gerilmesi değerinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Birleşim uzunluğunun etkili kayma gerilmesi üzerindeki etkisi (Topkaya, 2004)

Buna göre, daha gerçekçi tahminlere ihtiyaç duyulan durumlarda tek bir değer olan 0,6'nın kullanılmayacağı belirtilmiştir. Topkaya (2004) çalışmasında düzlem içi ve düzlem dışı eksantrisitenin etkisini de incelemiş ve düzlem içi eksantrisitenin dayanımı %15'e kadar düşürdüğünü belirlemiştir. Ayrıca 150 mm'ye kadar olan birleşimler için kapasite azaltımı gerekmediğini belirtmektedir. Düzlem dışı eksantrite durumunda, eksantrik olmayan bağlantılar arasındaki fark en fazla %5 olarak bulunmuştur. Bu bulgular nedeniyle, blok kırılma kapasitesinin düzlem dışı eksantrisiteden etkilenmediği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak blok kırılma kapasitesini belirlemek için aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$R_n = \left(0.25 + 0.35 \frac{F_u}{F_y} - \frac{Cl}{2800} \right) F_y A_{gv} + F_u A_{nt} \quad (3.3)$$

R_n = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

A_{gv} = Toplam kayma alanı [mm²]

Cl = Birleşimin uzunluğu [mm]

Driver ve ark. (2006) yaptıkları çalışma için levha, korniyer, T enkesit, başlığı kesilmiş I profil içeren blok kırılma deneylerinin bir veri tabanını oluşturmuştur. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te çalışmada kullanılan bazı deney elemanlarının fotoğrafları görülmektedir. Sonuç olarak bağlantı türüne göre farklı katsayıları olan Denklem 3.4'teki formülü önermişlerdir.

$$P_u = R_t A_{nt} F_u + R_v A_{gv} \left(\frac{F_y + F_u}{2\sqrt{3}} \right) \quad (3.4)$$

P_u = Karakteristik dayanım [N]

F_y = Yapısal çelik akma gerilmesi [MPa]

F_u = Yapısal çelik çekme gerilmesi [MPa]

A_{nt} = Net çekme alanı [mm²]

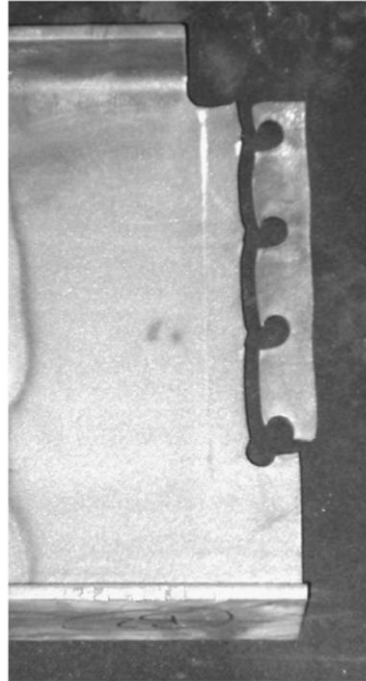
A_{gv} = Toplam kayma alanı [mm²]

R_t, R_v = Birleşik denklem için eşdeğer gerilme katsayıları [–]

Eşdeğer gerilme katsayısı birleşim tipine bağlı olarak 0.3-1 arasında değişmektedir. Driver ve ark. (2006)'na göre bu formülün avantajı, yönetmeliklerden daha gerçekçi sonuçlar vermesi ve hem eksantrik hem de merkezi yükleme durumları için kullanılabilmesidir.



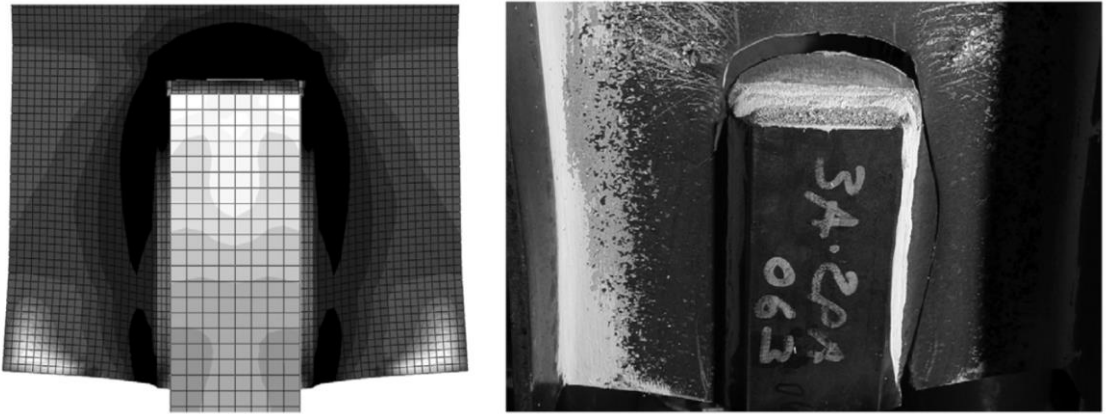
Şekil 3.2. Bulonlu bağlantı için levhada gerçekleşen blok kırılma (Huns ve ark.,2002)



Şekil 3.3. Kesme kuvveti aktaran bulonlu birleşimde gerçekleşen blok kırılma (Franchuk ve ark.,2003)

Kulak ve Wu (1997), tek ve çift korniyerlerde çekme etkisinde kırılma sınır durumu için gerilme düzensizliğini incelemişlerdir. Uygulamada karşılaşılan zorluklar nedeniyle korniyerlerin her iki kolundan birleşim yapılması tercih edilmemektedir. Tek kolundan bağlanan korniyerlerde ise bağlantı bölgesinde gerilme dağılımı homojen olmamaktadır. Bu durumu incelemek için ANSYS sonlu eleman yazılımı ile malzeme ve geometri açısından doğrusal olmama durumları gözönüne alınarak analizler yapılmıştır. Birleşimlerin kırılma yükü yakınsama yapan son analiz adımındaki yük olarak gözönüne alınmış ve bire bir ölçekte yapılan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

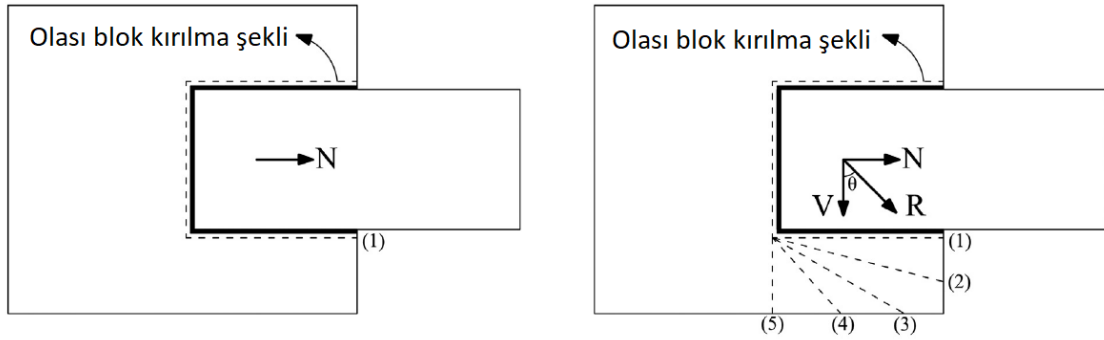
Oosterhof ve Driver (2011), kaynaklı düğüm levhası bağlantılarında bağlantı geometrisinin blok kırılma sınır durumu dayanımına etkisini incelemişlerdir. Bu etkiyi gözlemlemek adına iki farklı tipte kaynaklı düğüm levhası birleşimi için doğrusal olmayan sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.4'te W3 numunesi için oluşturulan sonlu eleman modeli ile deney sonucunda oluşan kırılma şekli görülmektedir. İlk olarak sonlu eleman modeli yazarların daha önce yaptığı deneysel çalışma Oosterhof ve Driver (2008) ve Topkaya (2007)'deki deneysel çalışmanın sonuçları ile test edilmiştir. Daha sonra 30 farklı ölçüde kaynaklı düğüm levhası için sonlu eleman modelinden elde edilen dayanım AISC-2005 (American Institute of Steel Construction) yönetmeliğinde önerilen blok kırılma dayanımı ve Kulak ve Grondin (2001)'in önerdiği birleşik blok kırılma dayanımı denklemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.4. W3 numunesi için Von-misses gerilmeleri ve blok kırılma şekli (Oosterhof ve Driver, 2011)

Maleki ve Ghaderi-Garekani (2020) yaptıkları çalışmada düğüm levhalarına kaynaklı bağlantı yapılan birleşimlerde çekme ve kesme kuvvetinin birlikte etkimesi

halinde blok kırılma sınır durumunu incelemiştir. Şekil 3.5'te çalışmada incelenen düğüm levhası için olası blok kırılma şekilleri verilmektedir. Bu araştırmada, birleşik yükleme altında bağlantı geometrisi ve kaynak grubu konfigürasyonunun kaynaklı bağlantıların blok kırılma dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, birleşik yükleme için eğik göçme düzlemlerinin mümkün olduğunu ve bu tür düzlemlerdeki gerilmenin, yükleme açısıyla orantılı olarak çekme ve kesme gerilmelerinin bir kombinasyonu olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak birleşik yüklemeye maruz kalan kaynaklı bağlantılarda blok kırılma dayanımını daha doğru tahmin eden, yer değiştirmiş bloğun gerçek şeklini dikkate alan yeni bir denklem önerilmiştir.



Şekil 3.5. Eksenel yükleme ve birleşik yükleme durumları için blok kırılma çizgileri
(Maleki ve Ghaderi-Garekani, 2020)

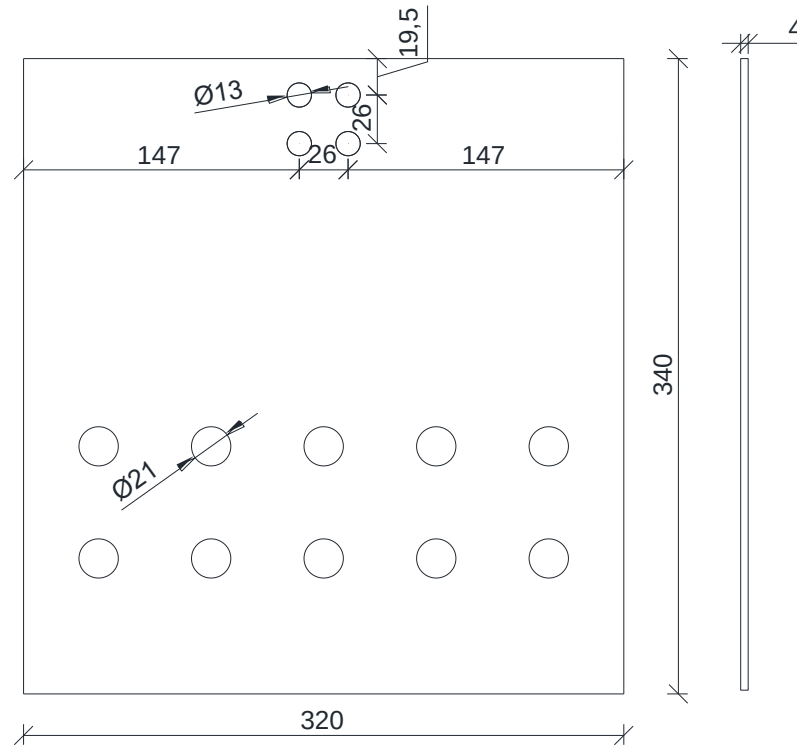
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, blok kırılma sınır durumunun incelenmesi için oluşturulan sonlu eleman modelinin analizinin doğruluğunu test etmek amacıyla yapılan deneysel çalışma ile ilgili detaylar sunulmaktadır. Bu çalışmada bulonlu çelik birleşimlerde blok kırılma sınır durumu dayanımını belirlemek için eksenel çekme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler oluşturulan sonlu eleman metodolojisini kontrol etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarındaki malzemeden kaynaklı standart sapmayı azaltmak için deney numunelerinden 3'er adet üretilmiştir. Ayrıca çelik malzemenin özelliklerini belirlemek için çekme ve kayma deneyleri yapılmıştır. Yönetmeliklerde bulonların ara ve kenar mesafeleri için minimum ve maksimum sınır değerler verilmektedir. Ancak minimum değerden daha küçük bulon aralıklarının, uygulanabilirliği gösterildiği takdirde kullanılabileceği belirtilmektedir (ÇYTHYE, 2018). Bu çalışmada bulonların ara ve kenar mesafeleri minimum değerlerden daha küçük uygulanabilir değerlerde seçilmiştir. Ayrıca deney numunelerinde bulon ara mesafeleri çekme alanının kayma alanına oranı farklı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu seçim ile çekme ve kayma alanlarının taşıdığı yüklerin ayrı ayrı tespit edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarında bulunan çelik çekme deney aletinin kapasitesi deney numunelerinin tasarımında gözönüne alınmıştır.

4.1. Deney Elemanları

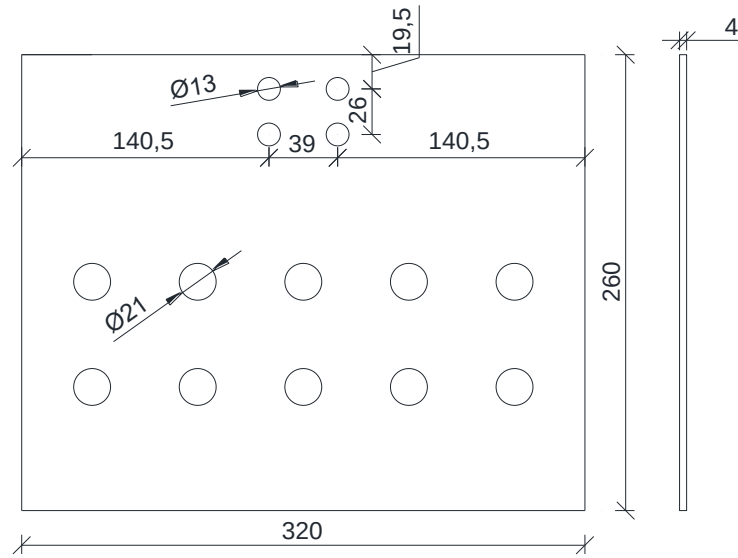
Bu tez çalışmasında, deney numunelerinde S235 kalitesinde 4 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılmıştır. Çelik levha üzerinde oluşturulan bulonlu bağlantıda bulon yerleşimi değiştirilerek 2 farklı tipte deney elemanı oluşturulmuştur. İki tip numunenin herbirinden 3'er adet olmak üzere toplam 6 adet çekme deneyi yapılmıştır. Çelik levhalar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilen ölçülerde lazer kesim ve sütunlu matkap tezgâhı yardımı ile hazırlanmıştır. Blok kırılmanın incelendiği bağlantıda M12 – 8.8 kalitesinde 4 adet bulon kullanılmıştır. Bu bulonlar için 13 mm çapında standart dairesel delik açılmıştır. M12 bulonların dış açılmış gövde bölümü kayma düzlemi dışındadır. Birinci tip numunelerde (T1A, T1B ve T1C) kuvvet doğrultusunda bulon ara mesafesi 26 mm, bulon kenar mesafesi 19.5 mm ve kuvvete dik doğrultuda bulon ara mesafesi 26 mm, bulon kenar mesafesi 147 mm seçilmiştir. İkinci tip numunelerde (T2A, T2B ve

T2C) kuvvet doğrultusunda bulon ara mesafesi 26 mm, bulon kenar mesafesi 19.5 mm ve kuvvete dik doğrultuda bulon ara mesafesi 39 mm, bulon kenar mesafesi 140.5 mm seçilmiştir. Levhaların çekme deney aletine bağlantısı için 10 adet M20 – 8.8 kalitesinde bulon kullanılmıştır. Bu bulonlar için 21 mm çapında standart dairesel delik hazırlanmıştır. ÇYTHYE-2018’de bulon deliği merkezleri ara mesafesinin en küçük değeri bulon çapının 3 katı olarak belirtilmiştir. Ancak, ara mesafe değerinin birleşimin uygulanabilirliği gösterildiği takdirde daha küçük seçilebileceği ifade edilmektedir (ÇYTHYE-2018). Benzer şekilde AISC360-16 yönetmeliğinde de uygulanabilirliğinin gösterilmesi durumunda bulon delikleri arasındaki net mesafenin minimum değeri bulon çapı olarak verilmiştir. Bu sınır değerler gözönüne alınarak bulon ara ve kenar mesafeleri belirlenmiştir. Deneysel aşamada kullanılan çelik levha deney numuneleri Şekil 4.3’te gösterilmektedir.



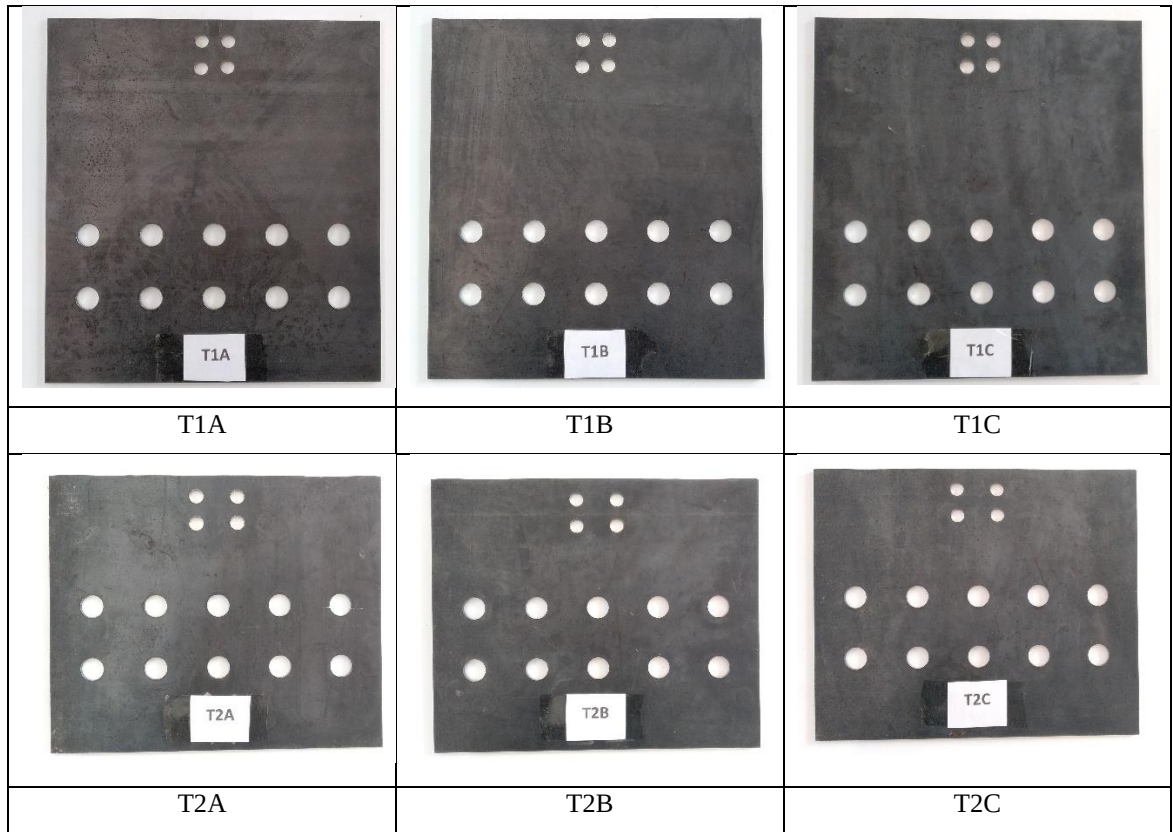
Tüm ölçüler mm’dir

Şekil 4.1. T1A, T1B ve T1C numunelerinin boyutları, bulon delik çapları ve bulon mesafeleri



Tüm ölçüler mm'dir

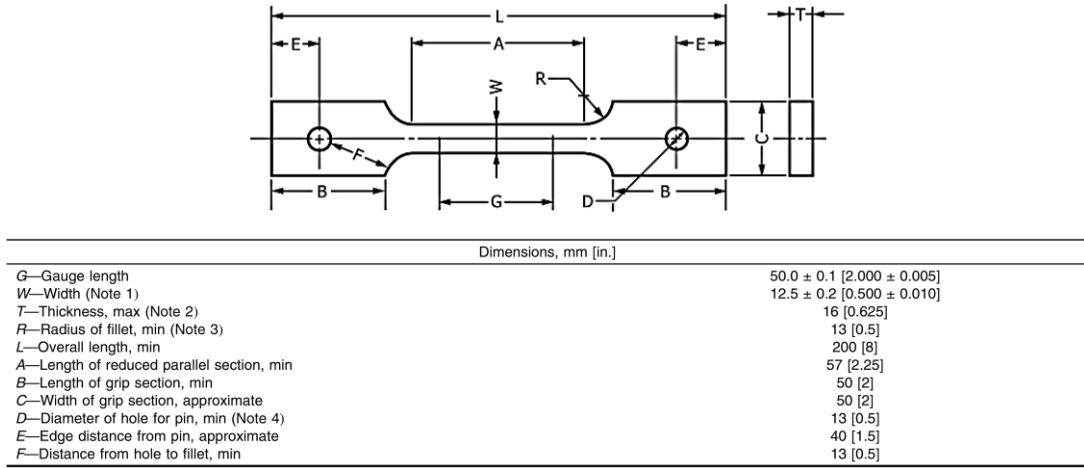
Şekil 4.2. T2A, T2B ve T2C numunelerinin boyutları, bulon delik çapları ve bulon mesafeleri



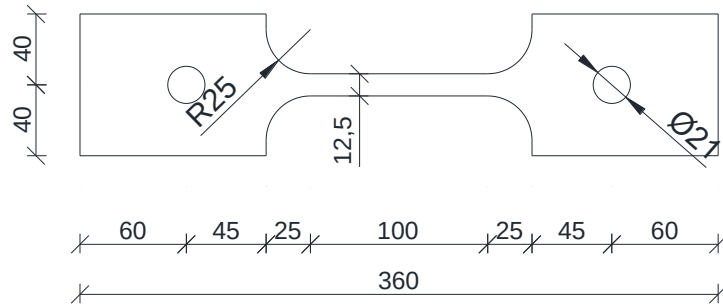
Şekil 4.3. T1A, T1B, T1C, T2A, T2B ve T2C deney numuneleri

4.2. Deney Elemanlarının Malzeme Özellikleri

Deneylerde kullanılan S235 kalitesinde 4 mm kalınlığındaki çelik levhaların malzeme özelliklerini belirlemek için çekme ve kayma deneyleri yapılmıştır. Çekme deneylerinde ASTM-E8-2016 (American Society for Testing and Materials) yönetmeliği esas alınmıştır (Şekil 4.5). Şekil 4.6’da verilen ölçülerde 3 adet numune hazırlanmış ve çekme deneyi yapılmıştır.

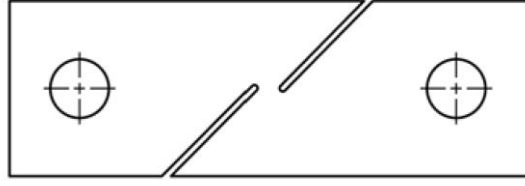


Şekil 4.5. ASTM-E8-2016 standardına göre çekme deney numunesi ölçüleri (ASTM-E8, 2016)

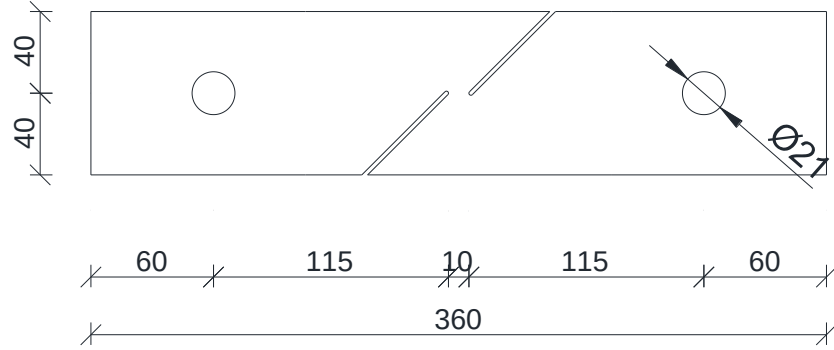


Şekil 4.6. Malzeme özelliklerini belirlemek için hazırlanan çekme deneyi numunesinin boyutları

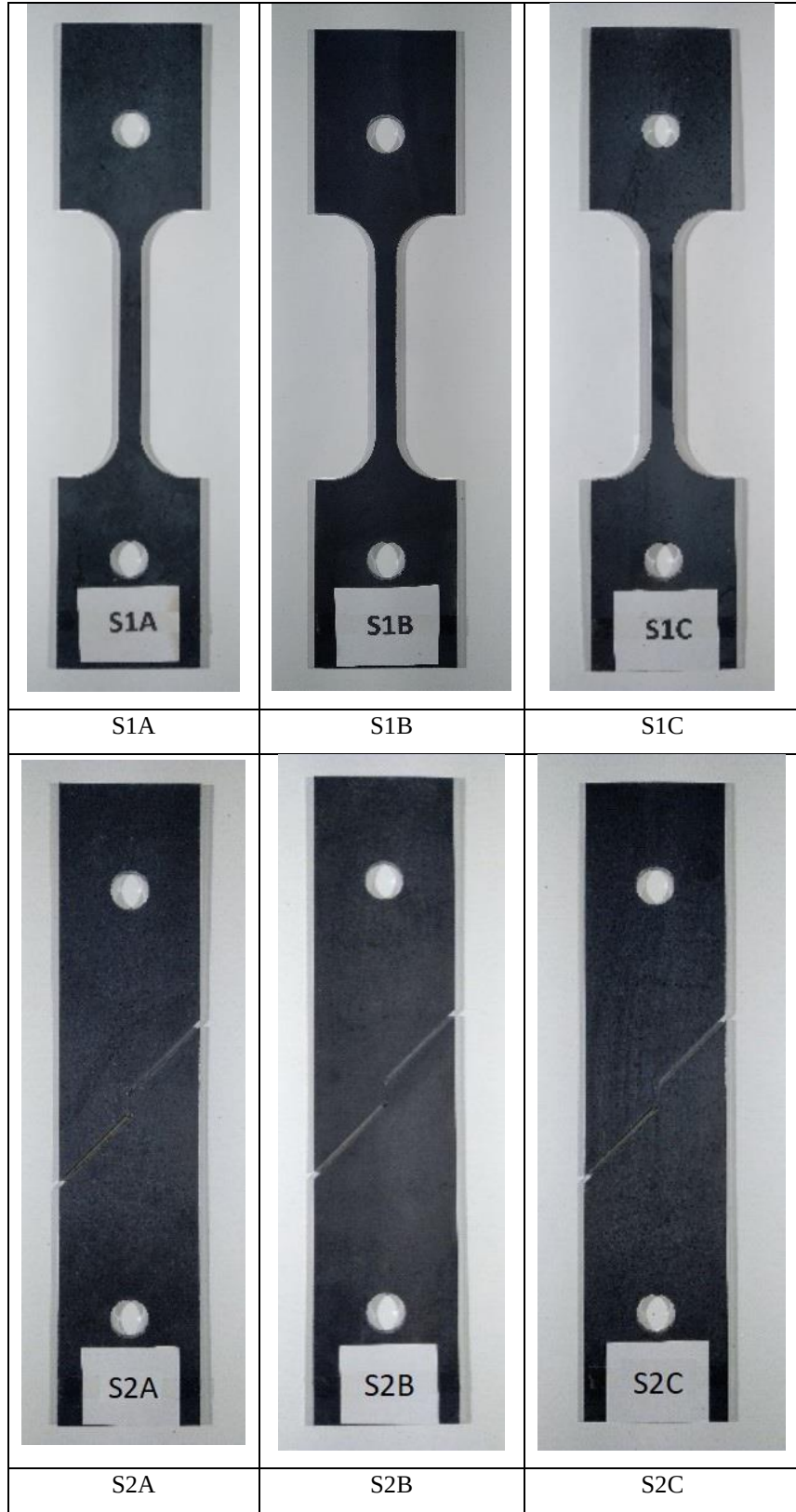
Kayma deneyi numunelerinin tasarımında ise ince alüminyum alaşımlarının kayma deneyi standardı olan ASTM-B831-14’ten yararlanılmıştır (Şekil 4.7). Şekil 4.8’de verilen ölçülerde 3 adet numune hazırlanmış ve kayma deneyi yapılmıştır. Hazırlanan S1A, S1B, S1C, S2A, S2B ve S2C deney numuneleri Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.7. ASTM-B831-2014 standardına göre kayma deneyi numunesi (ASTM-B831, 2014)



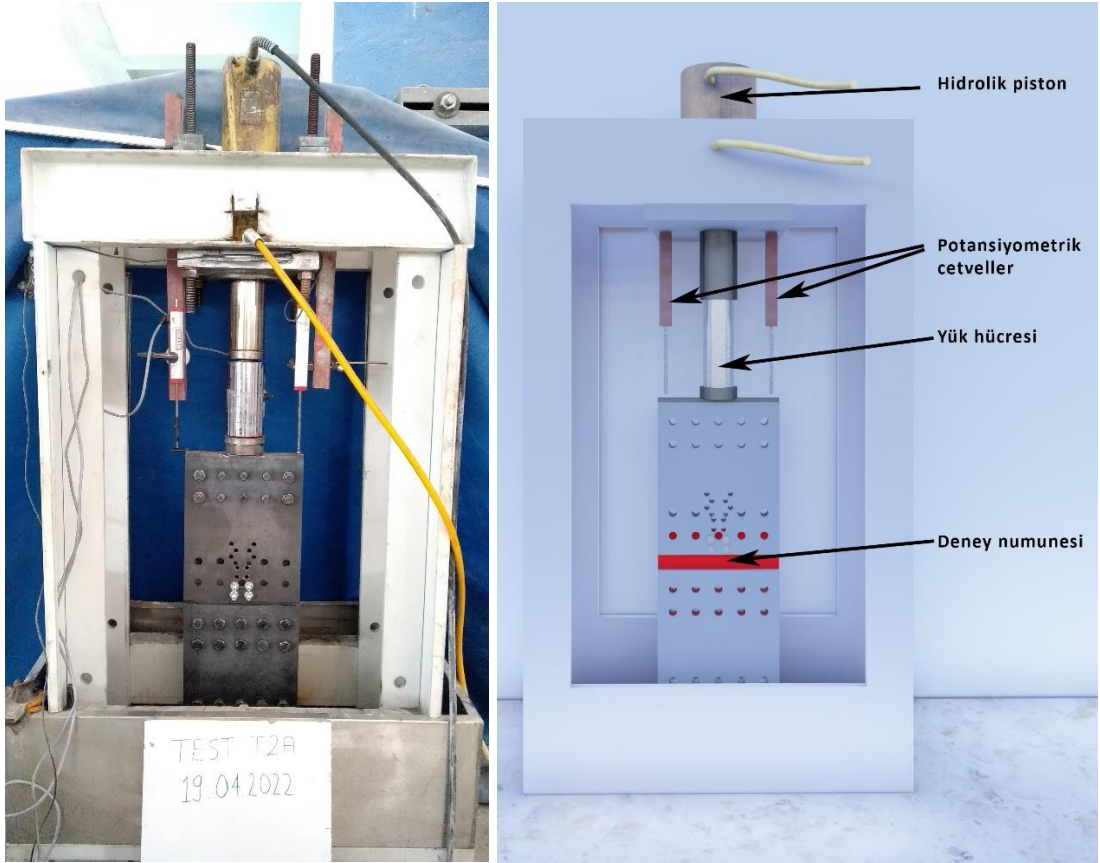
Şekil 4.8. Malzeme özelliklerini belirlemek için hazırlanan kayma deneyi numunesinin boyutları



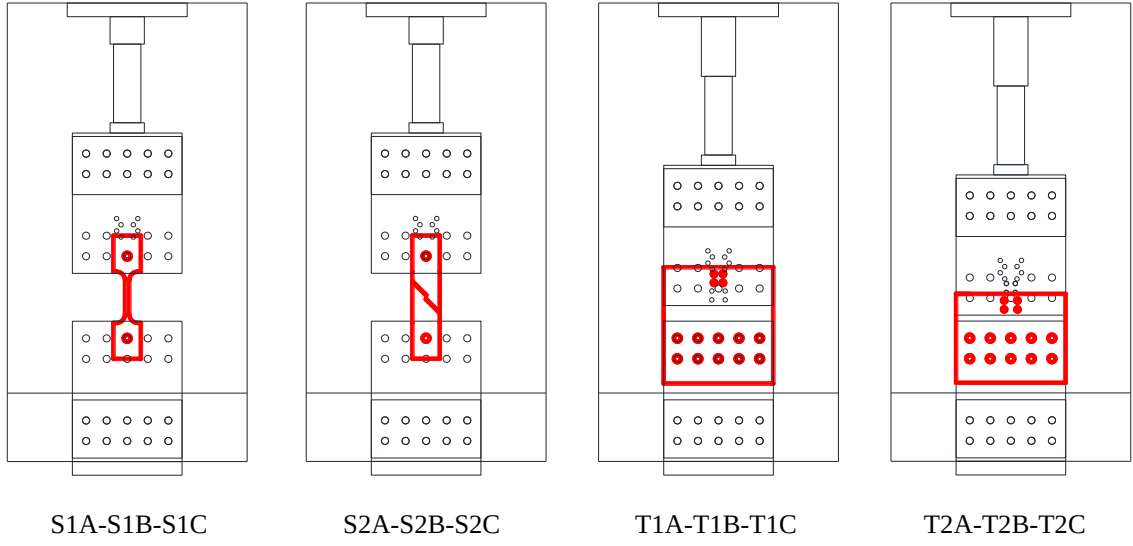
Şekil 4.9. S1A, S1B, S1C, S2A, S2B ve S2C deney numuneleri

4.3. Deney Düzeneđi ve Ölçme Tekniği

Deneylerde Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan 200 kN kapasiteli çelik çekme deney aleti kullanılmıştır (Şekil 4.10). Deney numunelerinin test cihazına bağlantısı Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Sistem üzerine yerleştirilmiş olan yük hücresi ve 2 adet doğrusal potansiyometrik cetvel yardımıyla çekme deneylerinde yük ve yer değıştirme verileri elde edilmiştir. Yük hücresinden ve doğrusal potansiyometrik cetvellerden gelen sinyaller Testbox-1001 8 kanallı statik veri toplama sistemi yardımı ile 0.125 saniye aralıklarla okunmuştur. Deneylerde blok kırılma hasarı beklenen numunelerin çekme bölgesinde ve kayma bölgesinde kırılma meydana geldiği anda numune üzerindeki yük boşaltılmış ve bağlantı levhaları sökölerek oluşan hasarlar incelenmiştir.



Şekil 4.10. Çelik çekme deney aleti ve deney numunelerinin yerleşimi



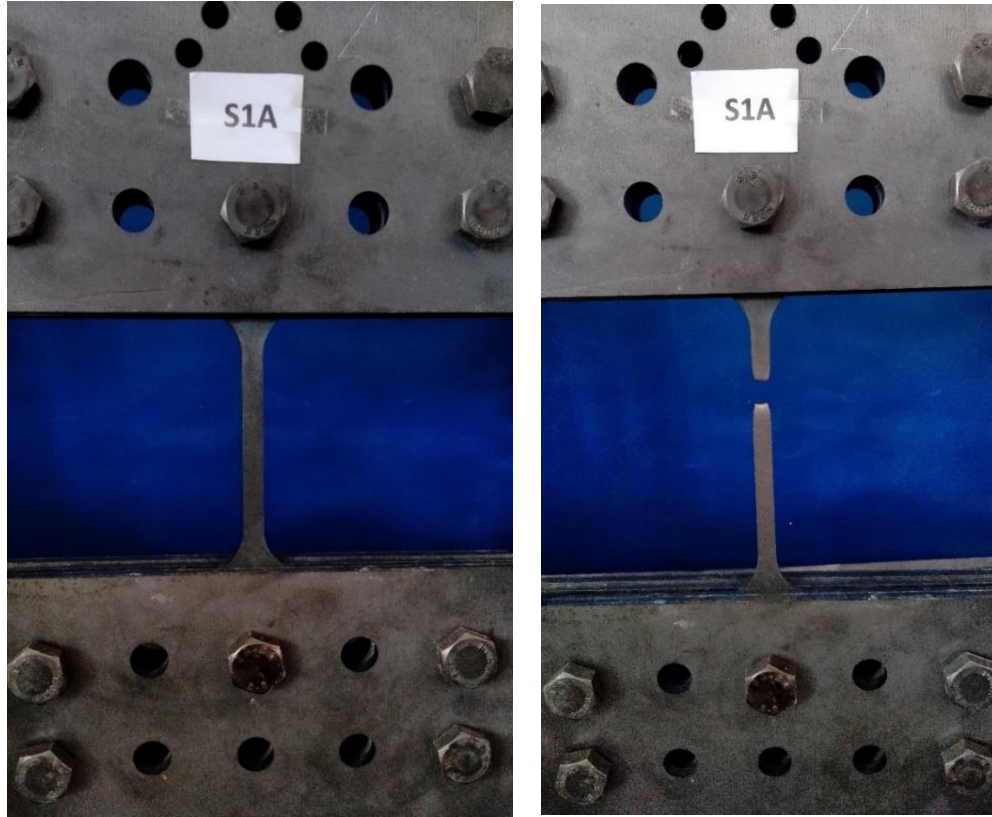
Şekil 4.11. Deney numunelerinin test cihazına bağlantısı

5. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde çelik levhaların malzeme özelliklerini belirlemek için yapılan çekme ve kayma deneyleri ile blok kırılma hasarı oluşması öngörülen bulonlu çelik uç birleşimi deney numunelerinin çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

5.1. S1A Deney Numunesi

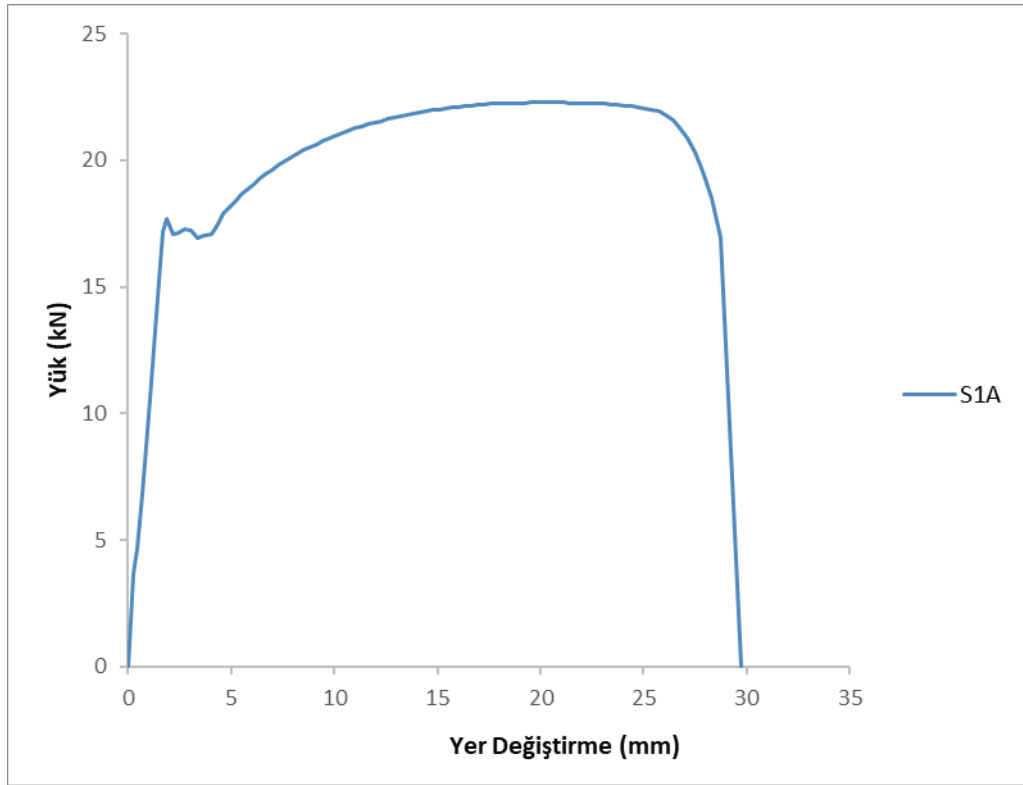
Şekil 5.1’de deney numunelerinin çelik malzemesine ait karakteristik değerlerini belirlemek için hazırlanan S1A deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda üst akma noktası 17.66 kN, alt akma noktası 16.94 kN, maksimum çekme kuvveti 22.28 kN olarak belirlenmiştir. Numunenin 4.0 mm yer değiştirmede peklemeye başladığı ve 20.5 mm yer değiştirmede boyun vererek 28.7 mm’de koptuğu tespit edilmiştir. S1A numunesi için yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Deney öncesi

Deney sonrası

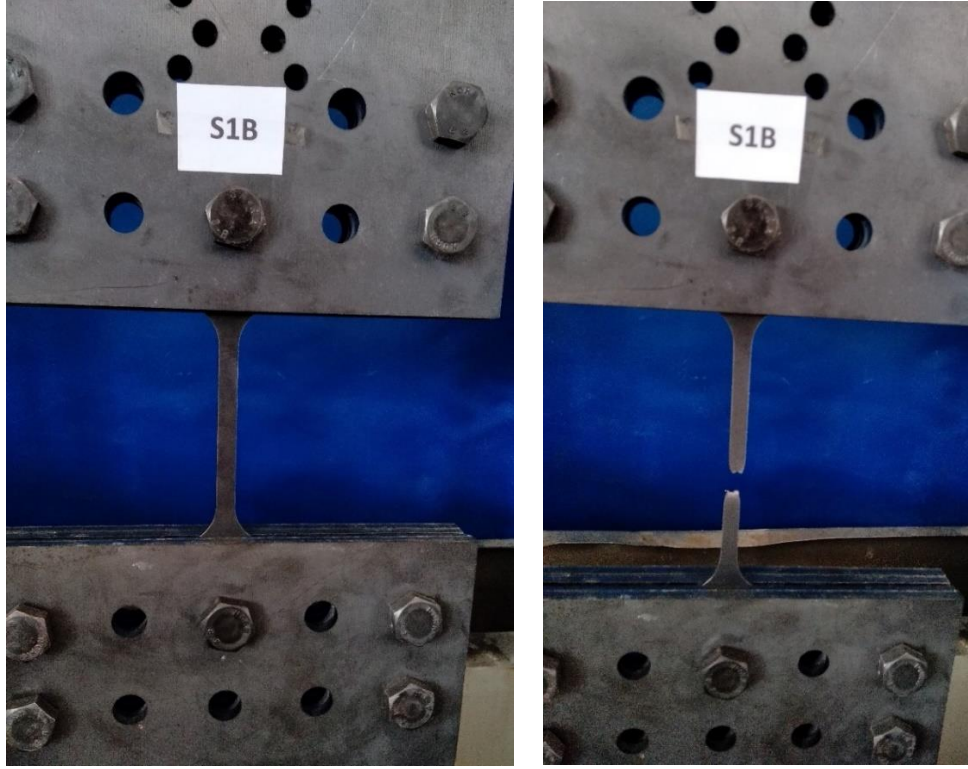
Şekil 5.1. S1A deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü



Şekil 5.2. S1A deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği.

5.2. S1B Deney Numunesi

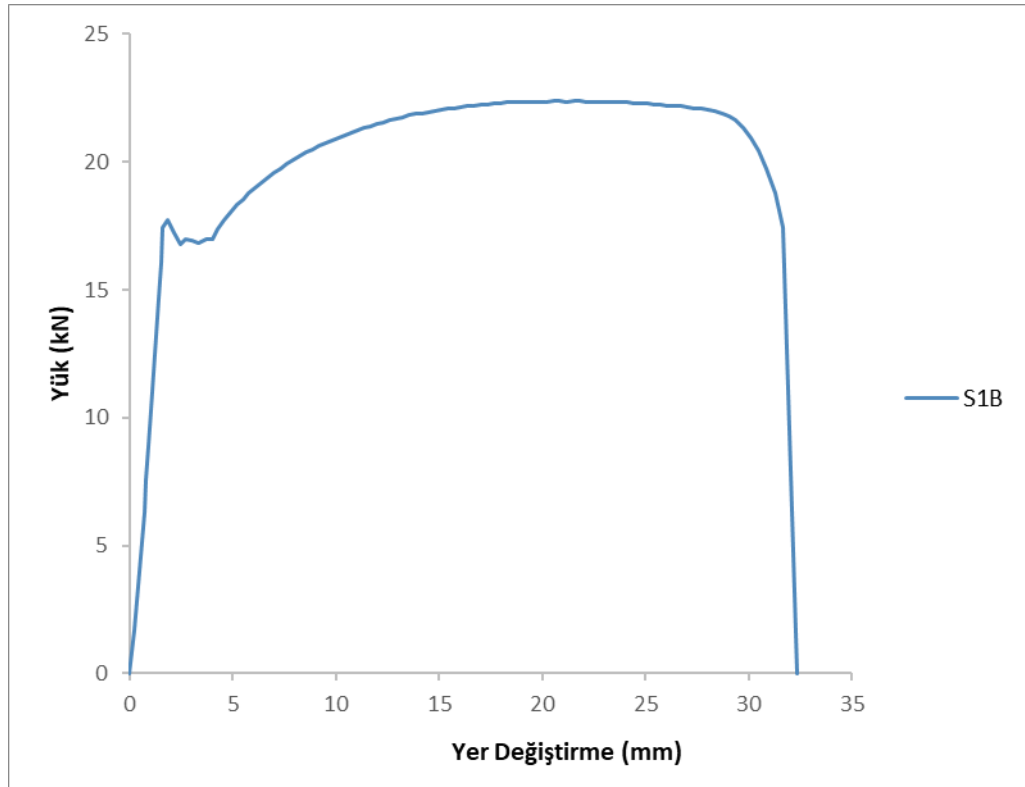
Şekil 5.3'te S1B deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda üst akma noktası 17.71 kN, alt akma noktası 16.83 kN, maksimum çekme kuvveti 22.36 kN olarak belirlenmiştir. Numunenin 4.0 mm yer değiştirmede pekleşmeye başladığı ve 20.5 mm yer değiştirmede boyun vererek 31.7 mm'de koptuğu tespit edilmiştir. S1B numunesi için yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



Deney öncesi

Deney sonrası

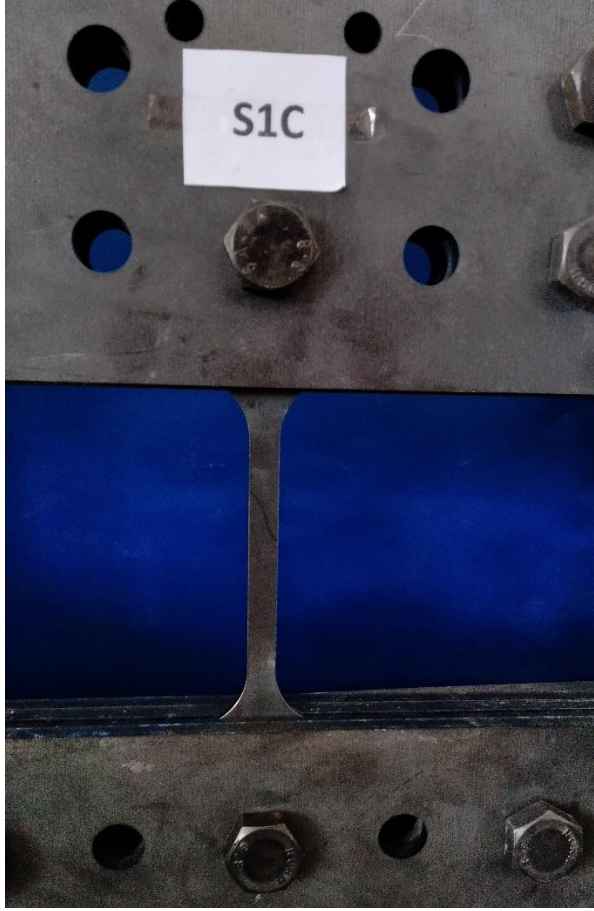
Şekil 5.3. S1B deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü



Şekil 5.4. S1B deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği

5.3. S1C Deney Numunesi

Şekil 5.5'te S1C deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda üst akma noktası 18.28 kN, alt akma noktası 17.28 kN, maksimum çekme kuvveti 22.29 kN olarak belirlenmiştir. Numunenin 3.8 mm yer değiştirmede peklemeye başladığı ve 19.4 mm yer değiştirmede boyun vererek 28.6 mm'de koptuğu tespit edilmiştir. S1C numunesi için yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

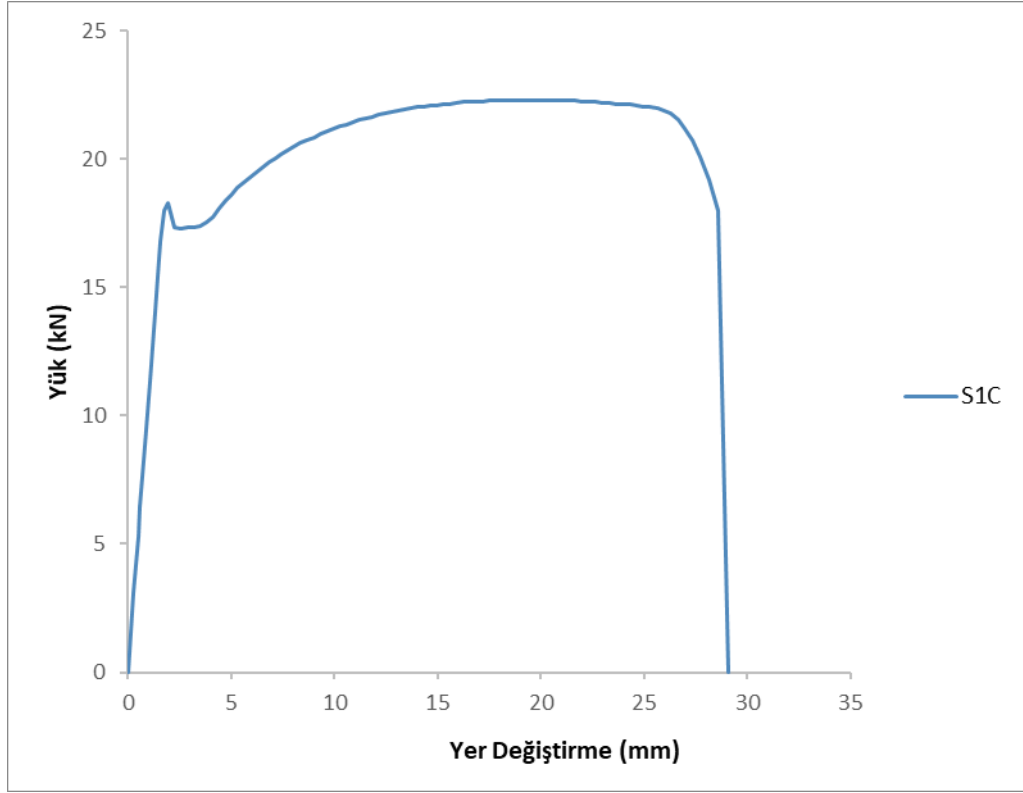


Deney öncesi



Deney sonrası

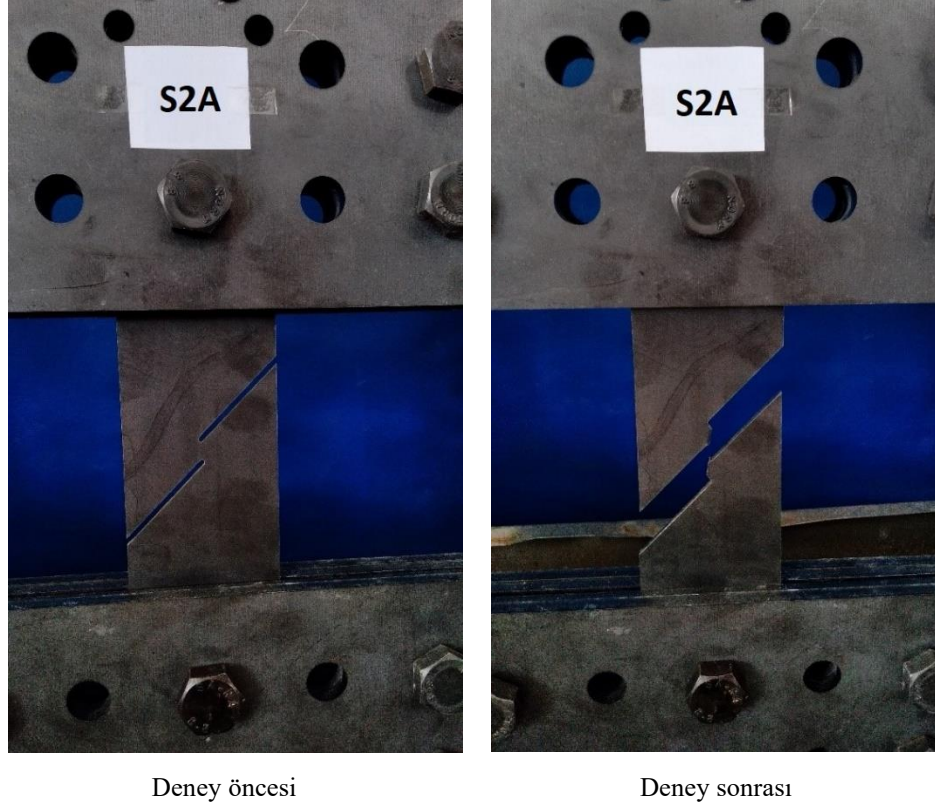
Şekil 5.5. S1C deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü



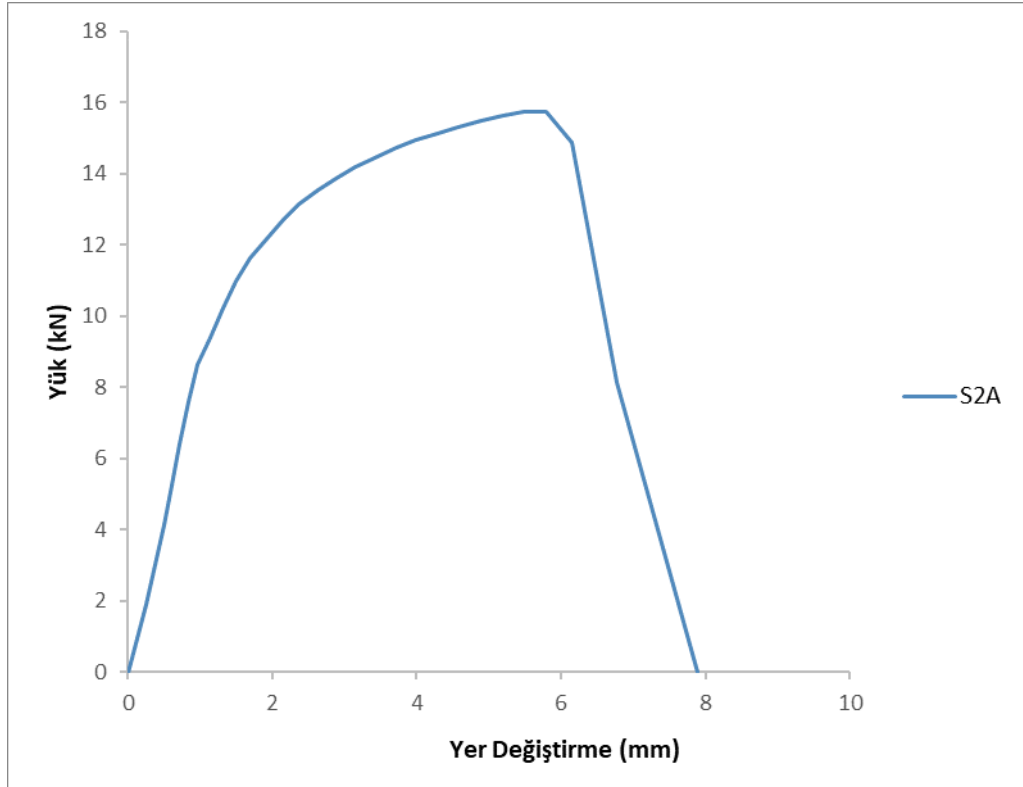
Şekil 5.6. S1C deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği

5.4. S2A Deney Numunesi

Şekil 5.7’de S2A deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda maksimum çekme kuvveti 5.8 mm yer değiştirmede 15.76 kN olarak belirlenmiştir. S2A numunesi için yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.8’de gösterilmektedir.



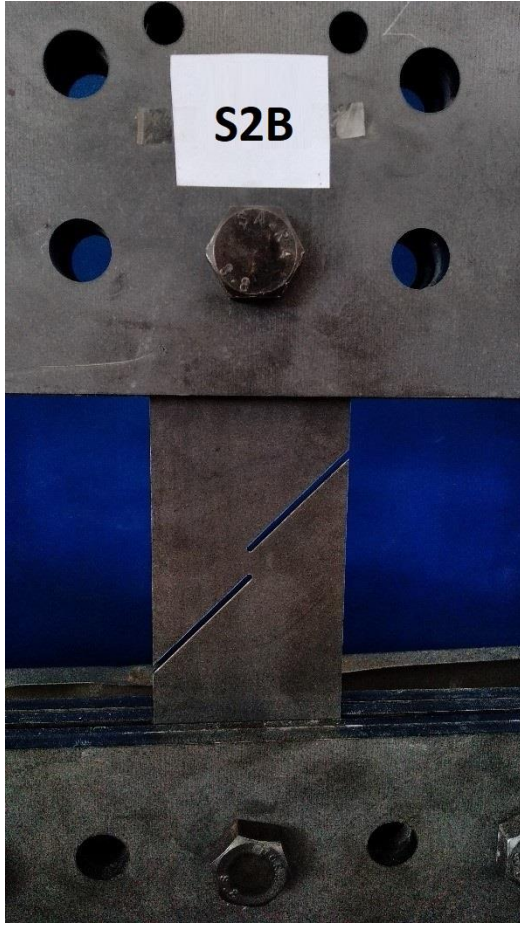
Şekil 5.7. S2A deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü



Şekil 5.8. S2A deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği

5.5. S2B Deney Numunesi

Şekil 5.9’da S2B deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda maksimum çekme kuvveti 5.1 mm yer değiştirmede 15.52 kN olarak belirlenmiştir. S2B numunesi için yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.10’da gösterilmektedir.

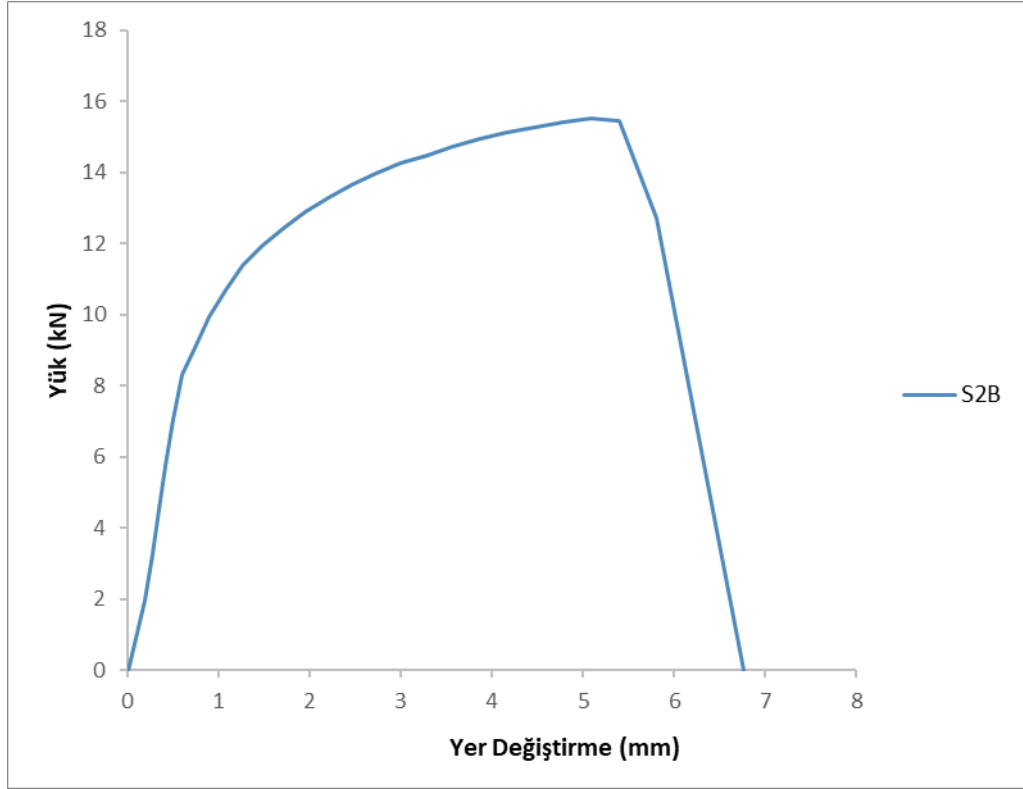


Deney öncesi



Deney sonrası

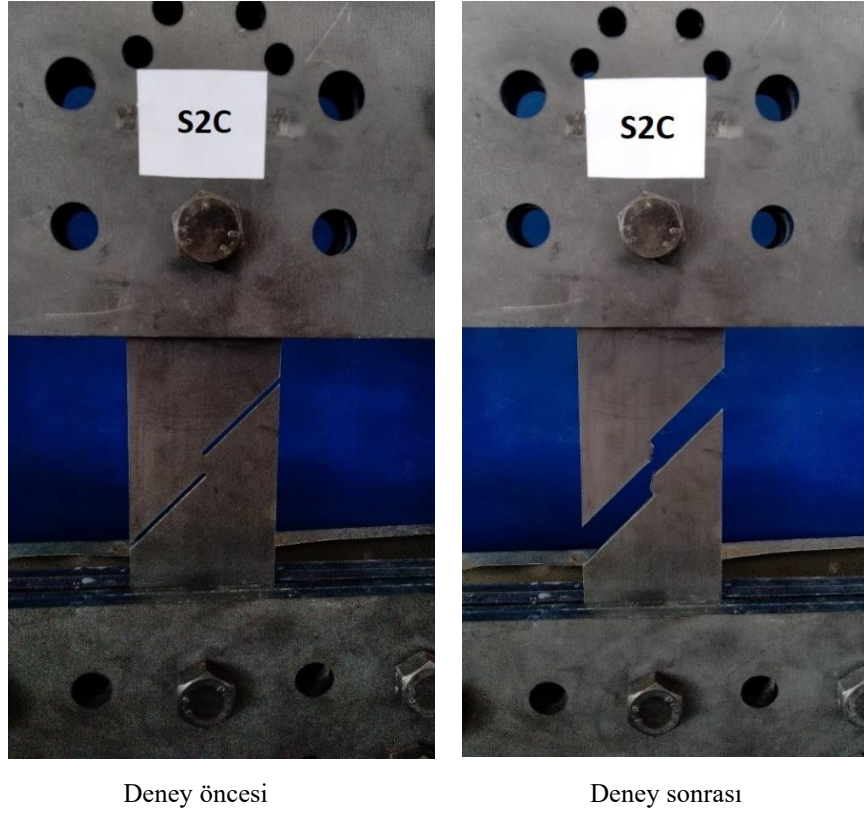
Şekil 5.9. S2B deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü



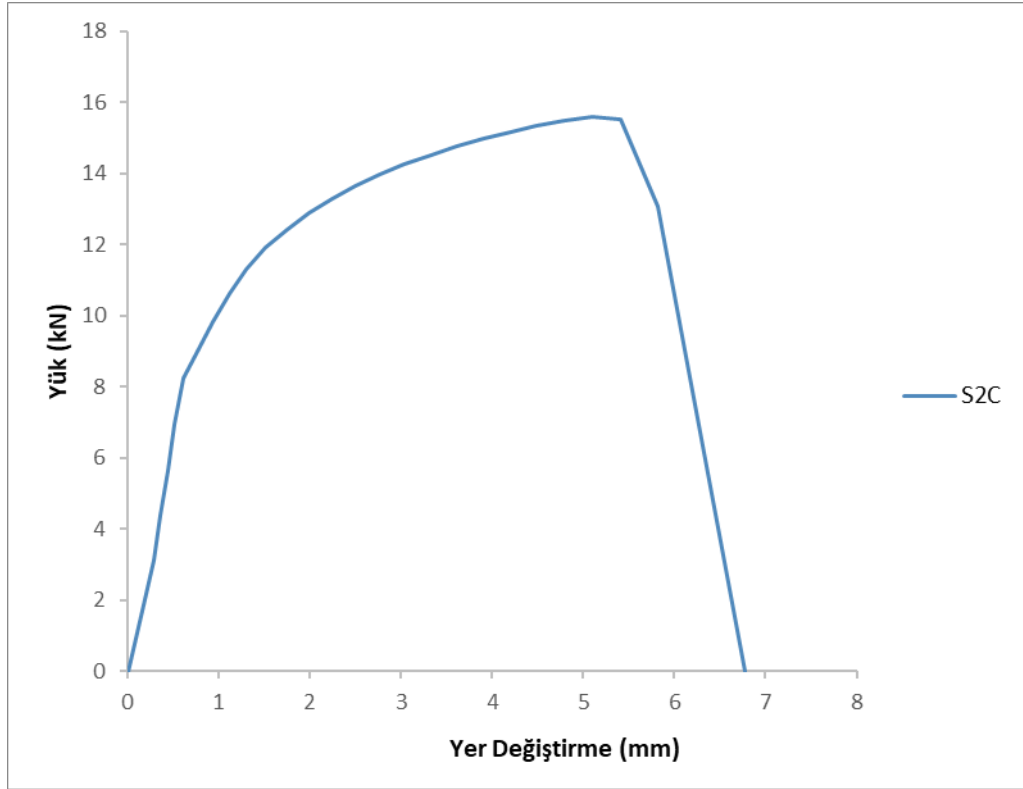
Şekil 5.10. S2B deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği

5.6. S2C Deney Numunesi

Şekil 5.11’de S2C deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda maksimum çekme kuvveti 5.1 mm yer değiştirmede 15.60 kN olarak belirlenmiştir. S2C numunesi için yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. S2C deney numunesinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü



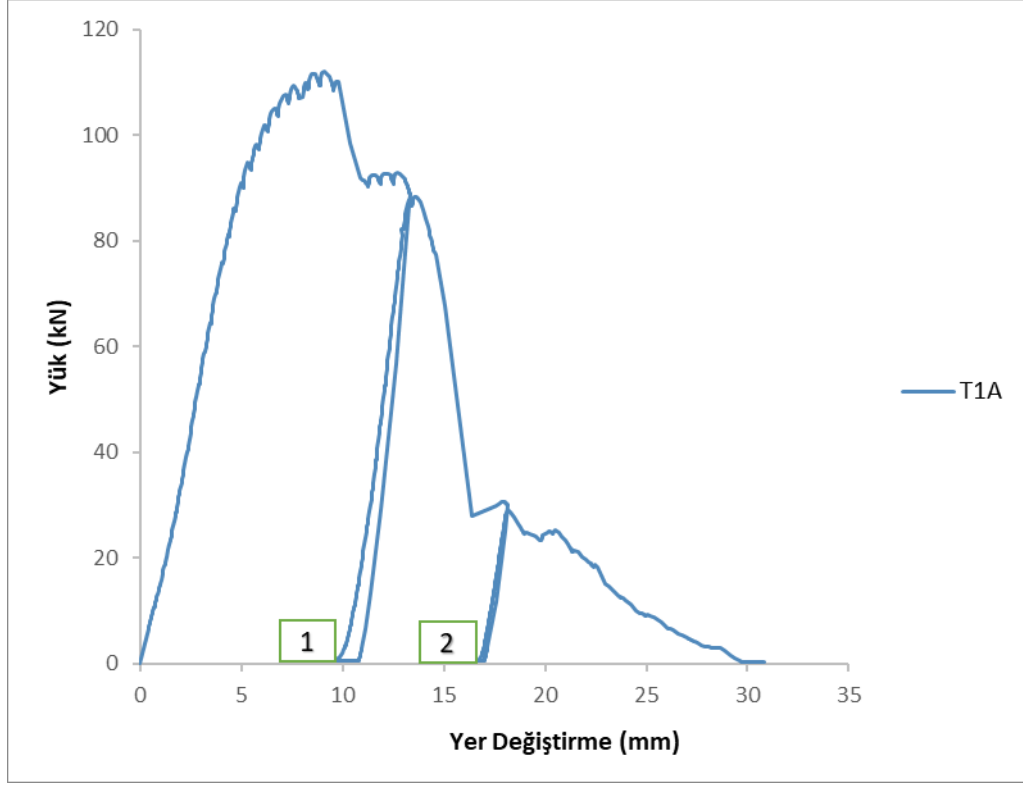
Şekil 5.12. S2C deney numunesi yük-yer değiştirme grafiği

5.7. T1A Deney Numunesi

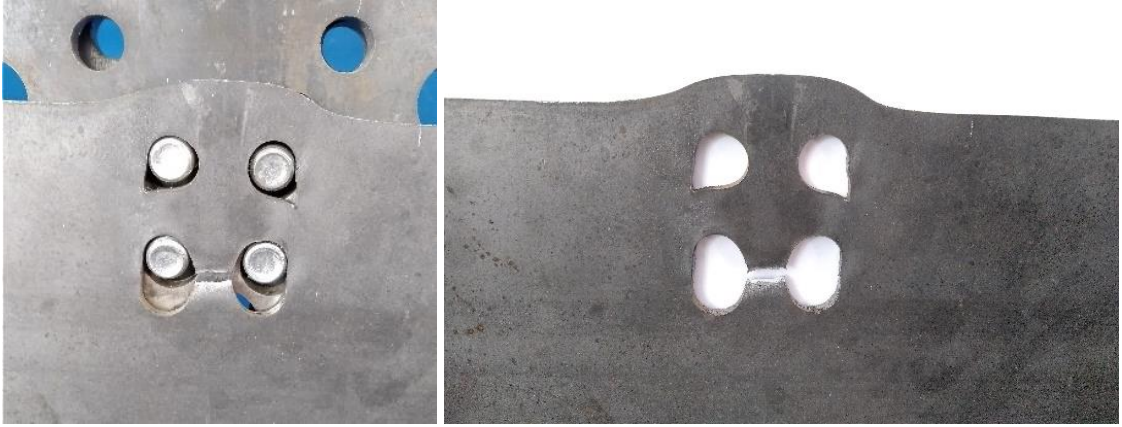
Şekil 5.13'te T1A deney numunesinin çekme deney aleti üzerinde bağlantıları yapılmış durumu görülmektedir. Deney sonucunda birleşimin taşıdığı maksimum yük değeri 9.1 mm yer değiştirmede 111.97 kN olarak tespit edilmiştir. T1A numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.14'te gösterilmektedir. 9.7 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında çekme bölgesinde kırılma gerçekleşmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan en büyük yük 12.7 mm yer değiştirmede 92.99 kN'dur. 13.8 mm'de kayma bölgesinde kırılma gerçekleşmiş ve 16.4 mm yer değiştirmede taşınan yük 27.96 kN seviyesine kadar düşmüştür. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra numune üzerindeki yük kaldırılmış ve numune incelenmiştir. İnceleme yapılan noktalar Şekil 5.14'ün üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sırasıyla 1 ve 2 nolu noktalar için T1A deney numunesinin fotoğrafları gösterilmektedir.



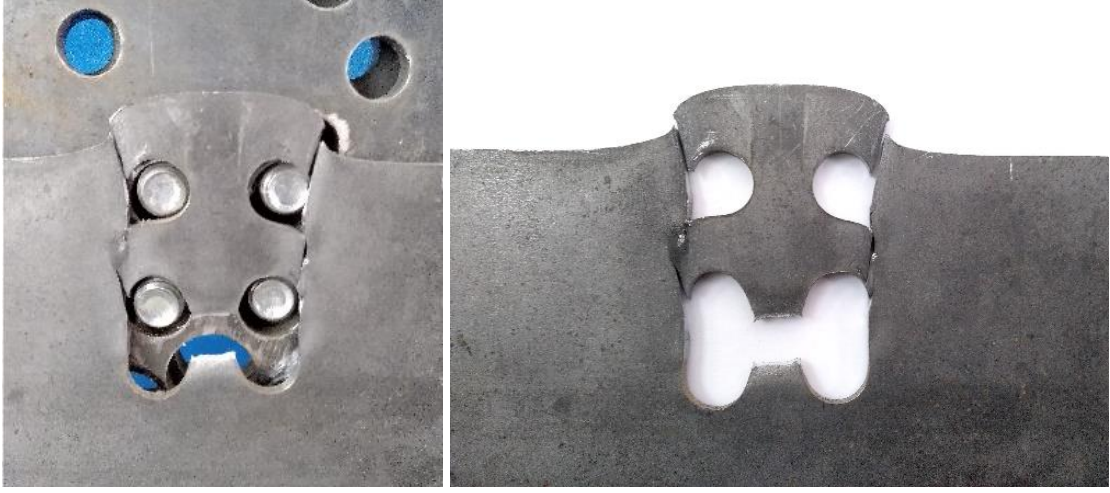
Şekil 5.13. T1A deney numunesi



Şekil 5.14. T1A deney numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 5.15. 1 nolu noktada T1A deney numunesindeki hasar durumu



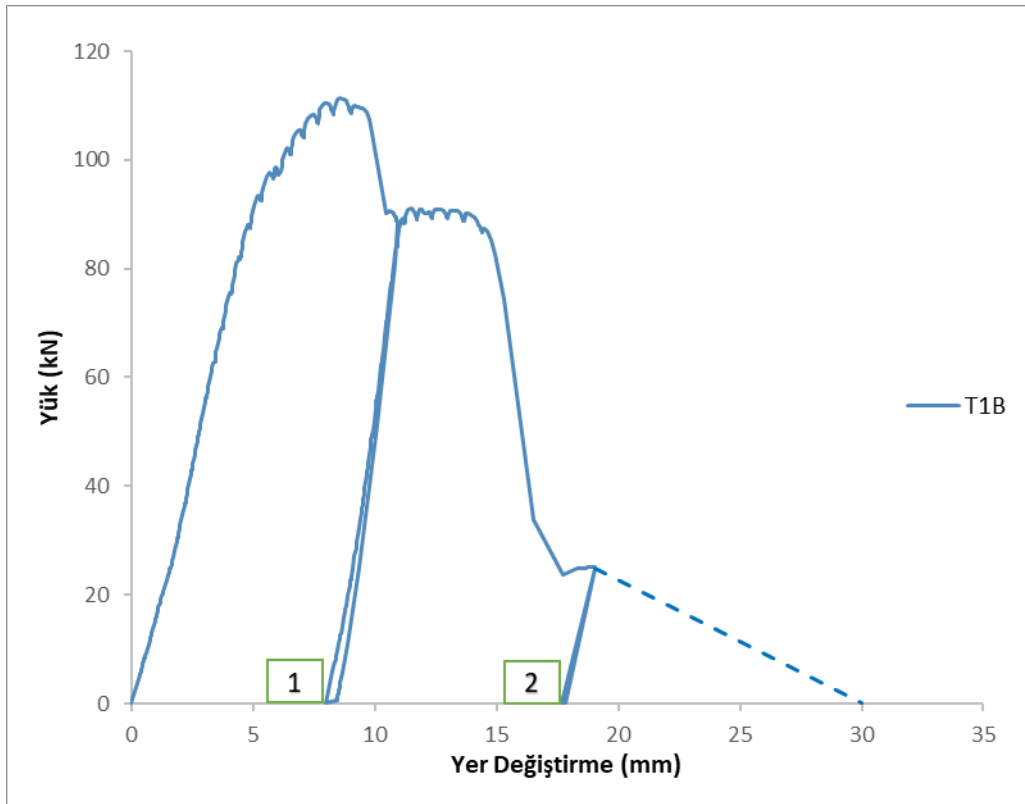
Şekil 5.16. 2 nolu noktada T1A deney numunesindeki hasar durumu

5.8. T1B Deney Numunesi

Şekil 5.17’de T1B deney numunesinin çekme deney aleti üzerinde bağlantıları yapılmış durumu görülmektedir. Deney sonucunda birleşimin taşıdığı maksimum yük değeri 8.6 mm yer değiştirmede 111.29 kN olarak tespit edilmiştir. T1B numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.18’de gösterilmektedir. 9.8 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında çekme bölgesinde kırılma gerçekleşmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan en büyük yük 11.5 mm yer değiştirmede 91.01 kN’dur. 14.9 mm’de kayma bölgesinde kırılma gerçekleşmiş ve 17.7 mm yer değiştirmede taşınan yük 23.67 kN seviyesine kadar düşmüştür. 19.1 mm’den sonra veri toplama kutusunda yaşanan bir arıza sebebiyle bu bölgenin ilerisindeki veriler kaydedilememiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra numune üzerindeki yük kaldırılmış ve numune incelenmiştir. İnceleme yapılan noktalar Şekil 5.18’in üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de sırasıyla 1 ve 2 nolu noktalar için T1B deney numunesinin fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 5.17. T1B deney numunesi



Şekil 5.18. T1B deney numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 5.19. 1 nolu noktada T1B deney numunesindeki hasar durumu



Şekil 5.20. 2 nolu noktada T1B deney numunesindeki hasar durumu

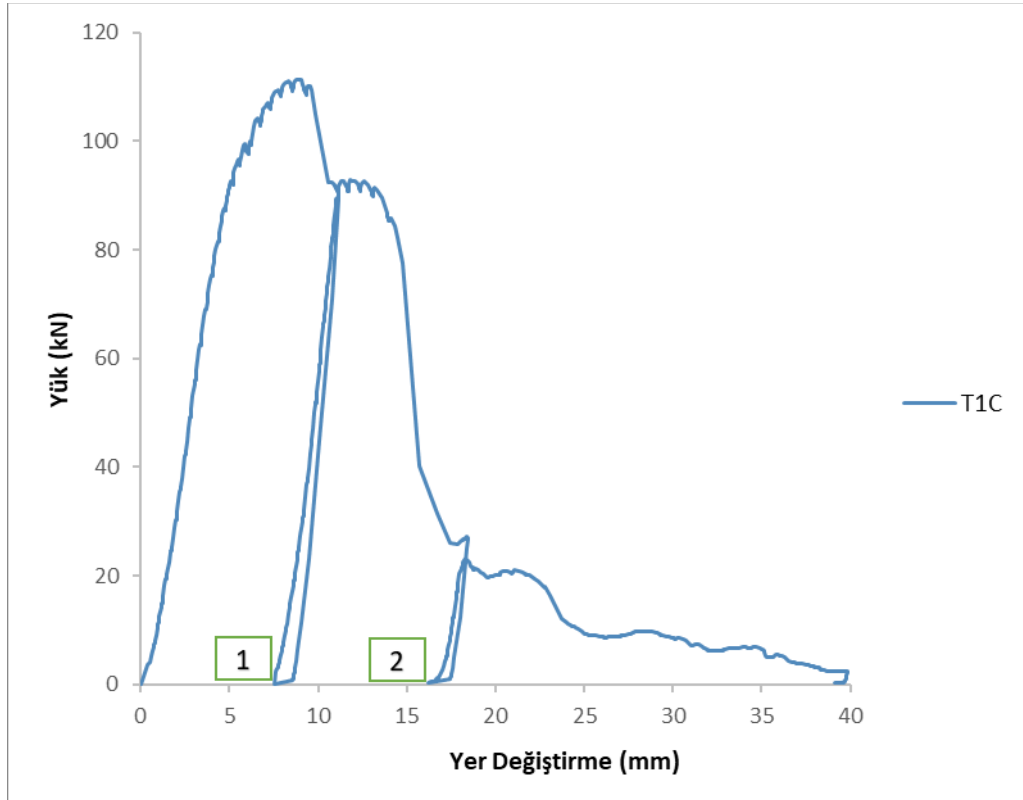
5.9. T1C Deney Numunesi

Şekil 5.21’de T1C deney numunesinin çekme deney aleti üzerinde bağlantıları yapılmış durumu görülmektedir. Deney sonucunda birleşimin taşıdığı maksimum yük değeri 8.9 mm yer değiştirmede 111.40 kN olarak tespit edilmiştir. T1C numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.22’te gösterilmektedir. 9.9 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında çekme bölgesinde kırılma gerçekleşmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan en büyük yük 11.8 mm yer değiştirmede 92.78 kN’dur. 14.5 mm’de kayma bölgesinde kırılma gerçekleşmiş ve 17.5 mm yer değiştirmede taşınan yük 26.02 kN seviyesine kadar düşmüştür. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra numune üzerindeki yük kaldırılmış ve numune incelenmiştir. İnceleme yapılan noktalar Şekil 5.22’nin üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.23 ve Şekil

5.24'te sırasıyla 1 ve 2 nolu noktalar için T1C deney numunesinin fotoğrafları gösterilmektedir.



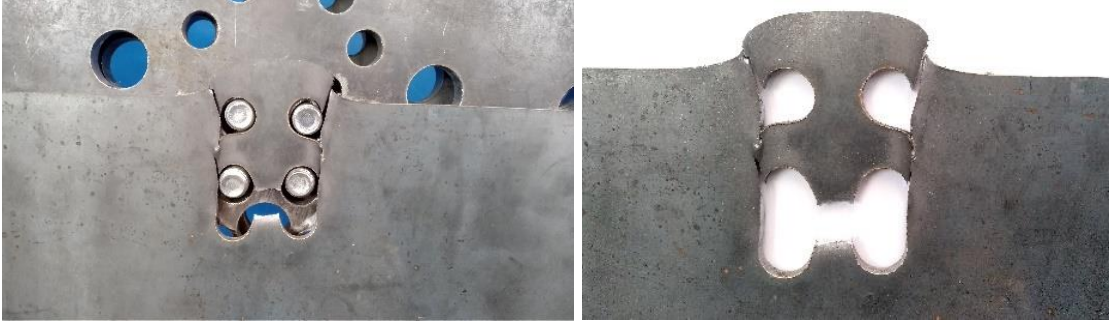
Şekil 5.21. T1C deney numunesi



Şekil 5.22. T1C deney numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 5.23. 1 nolu noktada T1C deney numunesindeki hasar durumu



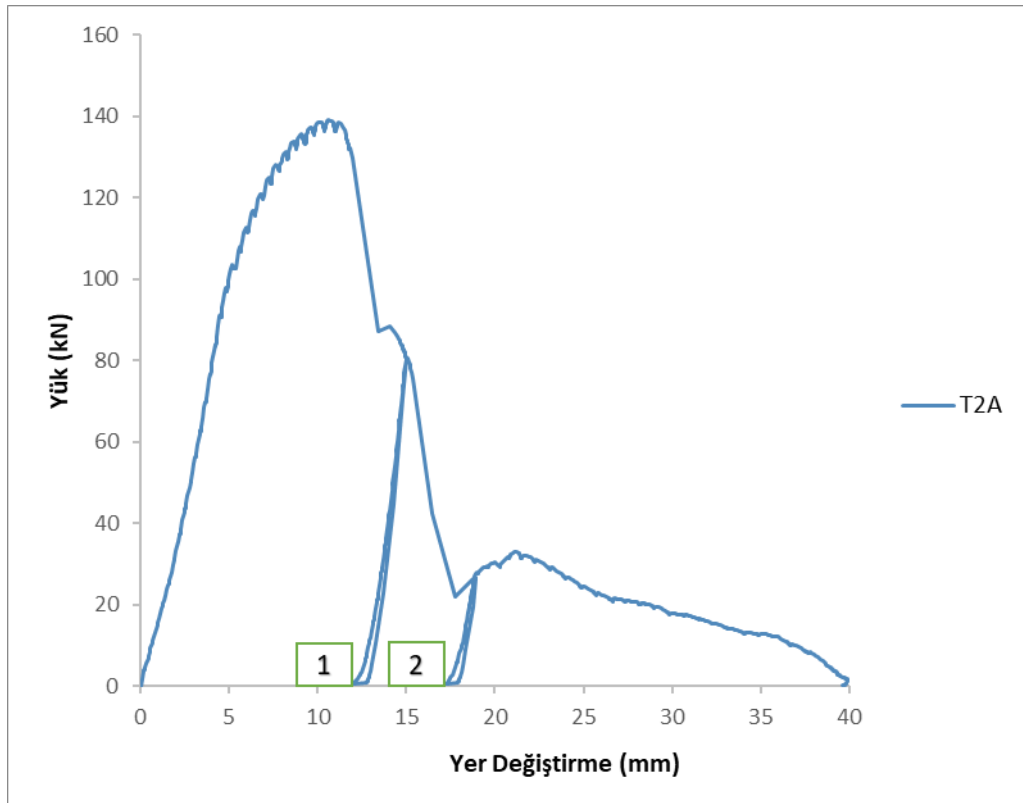
Şekil 5.24. 2 nolu noktada T1C deney numunesindeki hasar durumu

5.10. T2A Deney Numunesi

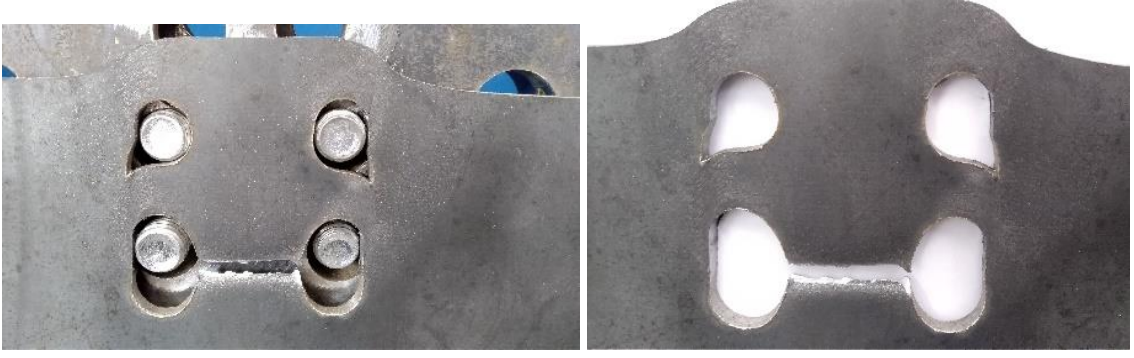
Şekil 5.25'te T2A deney numunesinin çekme deney aleti üzerinde bağlantıları yapılmış durumu görülmektedir. Deney sonucunda birleşimin taşıdığı maksimum yük değeri 10.6 mm yer değiştirmede 138.97 kN olarak tespit edilmiştir. T2A numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.26'da gösterilmektedir. 12.0 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında çekme bölgesinde kırılma gerçekleşmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan en büyük yük 14.0 mm yer değiştirmede 88.38 kN'dur. 15.1 mm'de kayma bölgesinde kırılma gerçekleşmiş ve 17.8 mm yer değiştirmede taşınan yük 22.08 kN seviyesine kadar düşmüştür. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra numune üzerindeki yük kaldırılmış ve numune incelenmiştir. İnceleme yapılan noktalar Şekil 5.26'nın üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de sırasıyla 1 ve 2 nolu noktalar için T2A deney numunesinin fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 5.25. T2A deney numunesi



Şekil 5.26. T2A deney numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 5.27. 1 nolu noktada T2A deney numunesindeki hasar durumu



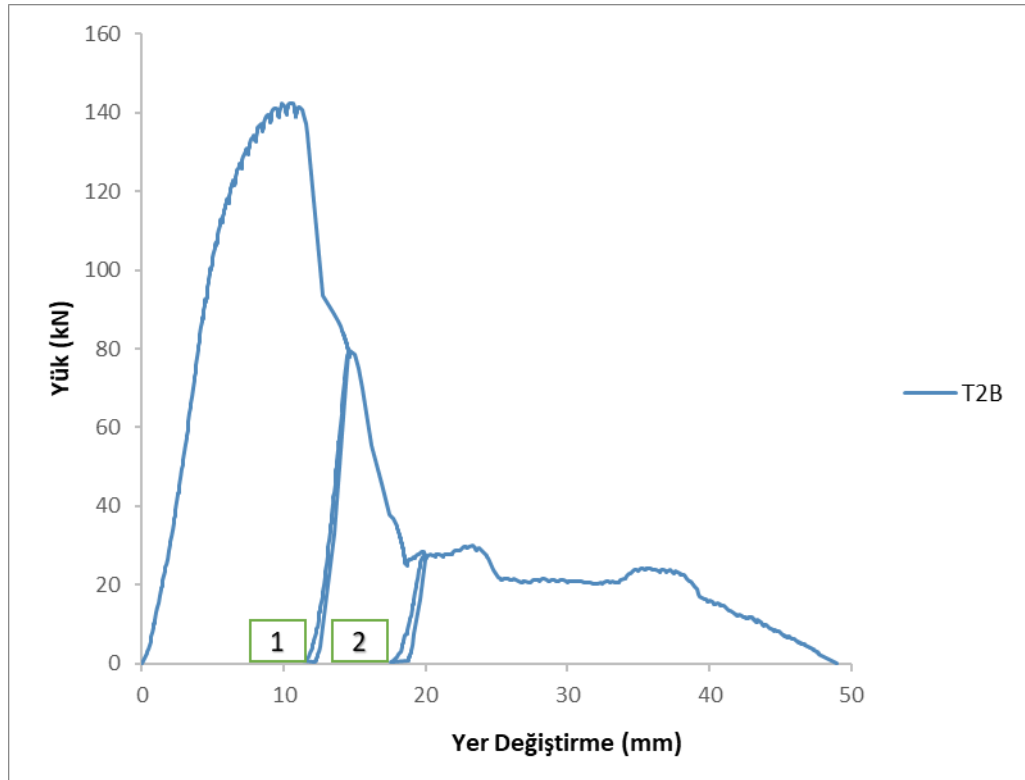
Şekil 5.28. 2 nolu noktada T2A deney numunesindeki hasar durumu

5.11. T2B Deney Numunesi

Şekil 5.29’da T2B deney numunesinin çekme deney aleti üzerinde bağlantıları yapılmış durumu görülmektedir. Deney sonucunda birleşimin taşıdığı maksimum yük değeri 10.5 mm yer değiştirmede 142.53 kN olarak tespit edilmiştir. T2B numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.30’da gösterilmektedir. 11.6 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında çekme bölgesinde kırılma gerçekleşmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan en büyük yük 12.7 mm yer değiştirmede 93.42 kN’dur. 15.0 mm’de kayma bölgesinde kırılma gerçekleşmiş ve 18.7 mm yer değiştirmede taşınan yük 24.94 kN seviyesine kadar düşmüştür. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra numune üzerindeki yük kaldırılmış ve numune incelenmiştir. İnceleme yapılan noktalar Şekil 5.30’un üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de sırasıyla 1 ve 2 nolu noktalar için T2B deney numunesinin fotoğrafları gösterilmektedir.



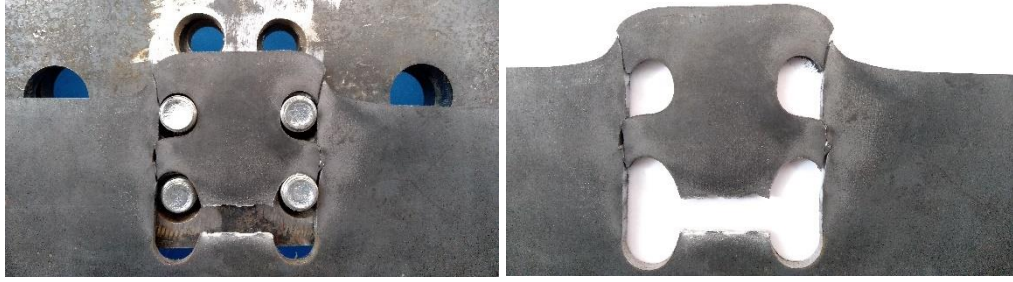
Şekil 5.29. T2B deney numunesi



Şekil 5.30. T2B deney numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 5.31. 1 nolu noktada T2B deney numunesindeki hasar durumu



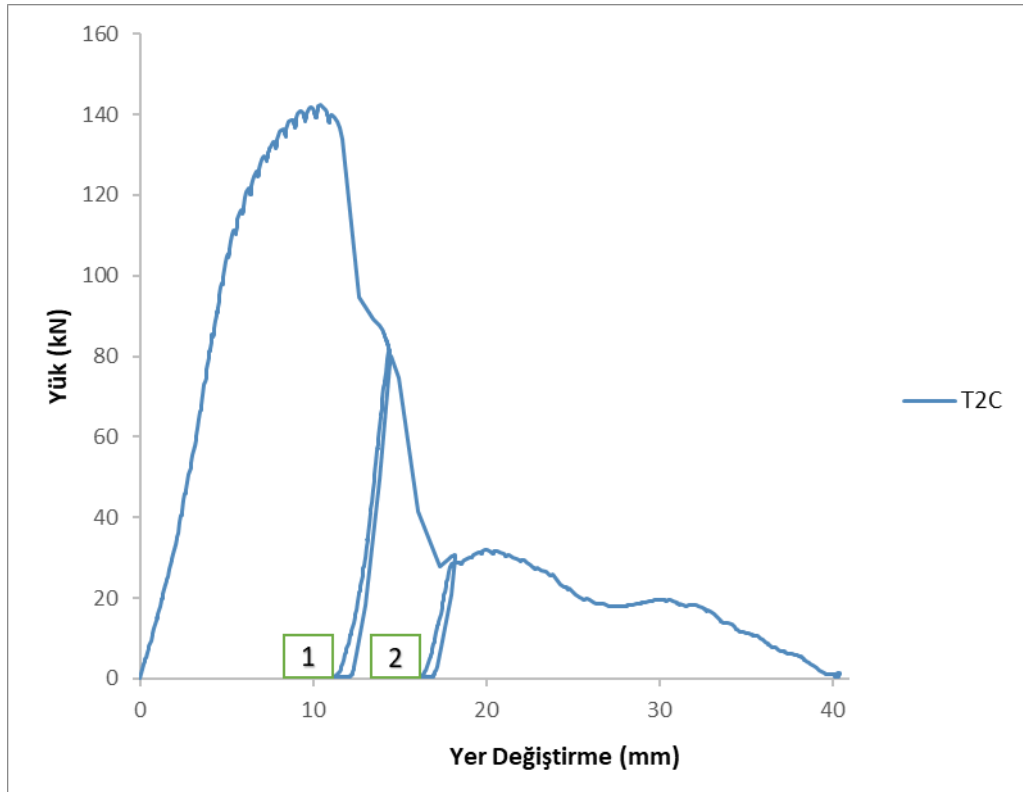
Şekil 5.32. 2 nolu noktada T2B deney numunesindeki hasar durumu

5.12. T2C Deney Numunesi

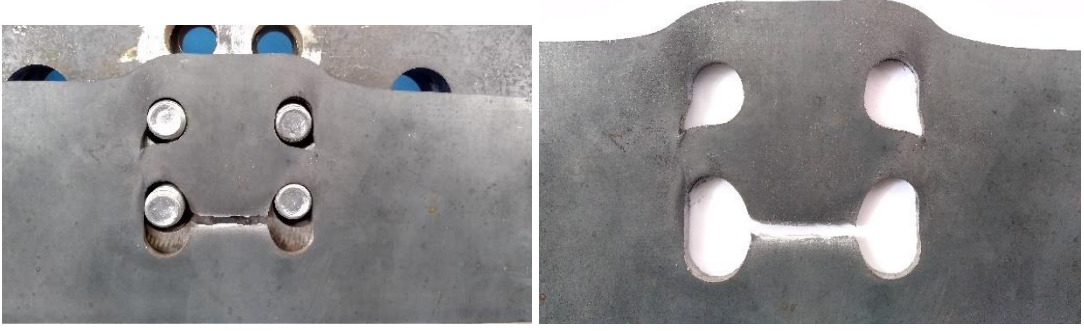
Şekil 5.33'te T2C deney numunesinin çekme deney aleti üzerinde bağlantıları yapılmış durumu görülmektedir. Deney sonucunda birleşimin taşıdığı maksimum yük değeri 10.4 mm yer değiştirmede 142.29 kN olarak tespit edilmiştir. T2C numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 5.34'te gösterilmektedir. 11.7 mm yer değiştirmeye ulaşıldığında çekme bölgesinde kırılma gerçekleşmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan en büyük yük 12.7 mm yer değiştirmede 94.71 kN'dur. 14.9 mm'de kayma bölgesinde kırılma gerçekleşmiş ve 17.3 mm yer değiştirmede taşınan yük 27.83 kN seviyesine kadar düşmüştür. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra numune üzerindeki yük kaldırılmış ve numune incelenmiştir. İnceleme yapılan noktalar Şekil 5.34'ün üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da sırasıyla 1 ve 2 nolu noktalar için T2C deney numunesinin fotoğrafları gösterilmektedir.



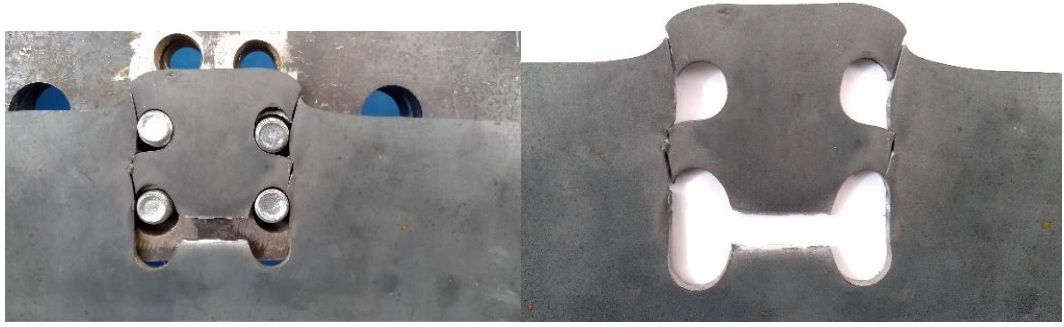
Şekil 5.33. T2C deney numunesi



Şekil 5.34. T2C deney numunesine ait yük-yer değiştirme grafiği



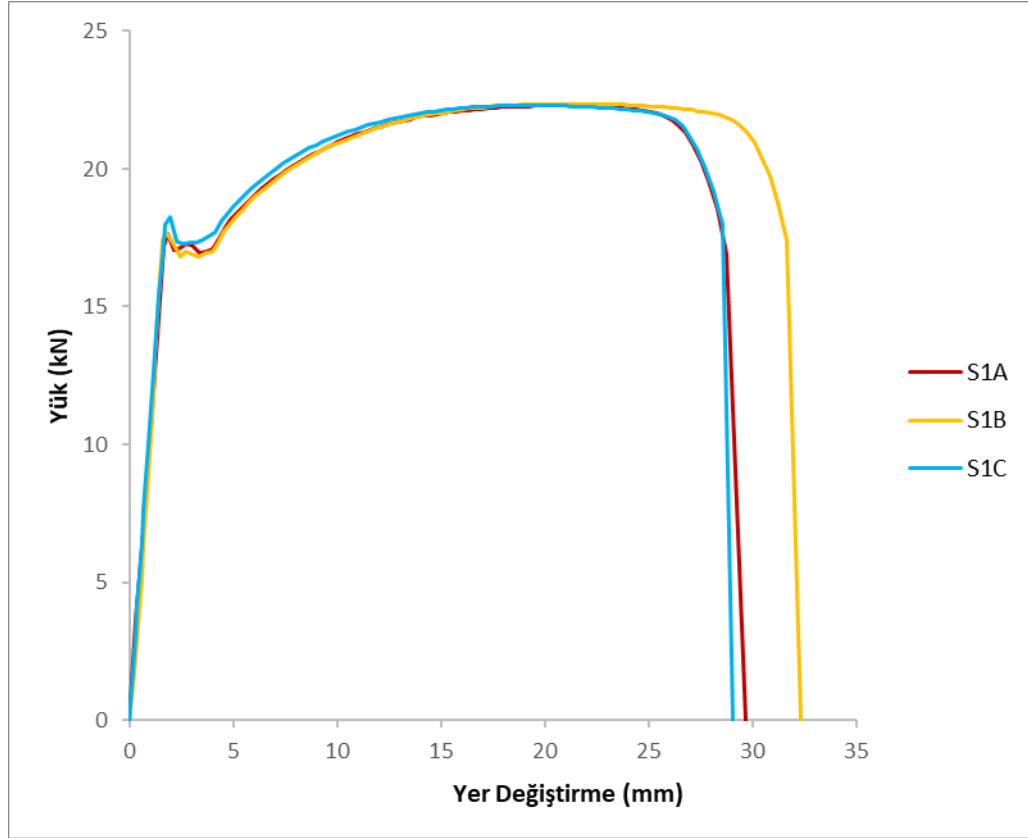
Şekil 5.35. 1 nolu noktada T2C deney numunesindeki hasar durumu



Şekil 5.36. 2 nolu noktada T2C deney numunesindeki hasar durumu

5.13. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

S1A, S1B ve S1C deney numuneleri için elde edilen yük – yer değiştirme eğrileri Şekil 5.37’de verilmiştir. Bu üç numunede maksimum çekme yükleri sırasıyla 22.28 kN, 22.36 kN ve 22.29 kN olarak elde edilmiştir. Yükler arasındaki farkın en küçük yüke oranı 0.004 olarak hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler maksimum taşıma yükü için en düşük dayanımı veren S1A numunesi referans alınarak Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.37. S1A-S1B-S1C deney numunelerine ait yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 5.1. S1A-S1B-S1C deney numunelerine ait sonuçların karşılaştırması-yük değerleri

Numune adı	S1A*	S1B	S1C
Alt akma noktası (kN)	16.94	16.83	17.28
Alt akma noktası / Referans alt akma noktası	1.000	0.994	1.020
Üst akma noktası (kN)	17.66	17.71	18.28
Üst akma noktası / Referans üst akma noktası	1.000	1.003	1.035
Maksimum yük (kN)	22.28	22.36	22.29
Maksimum yük / Referans maksimum yük	1.000	1.004	1.000
Kopma yükü (kN)	16.93	17.42	17.96
Kopma yükü / Referans kopma yükü	1.000	1.029	1.061

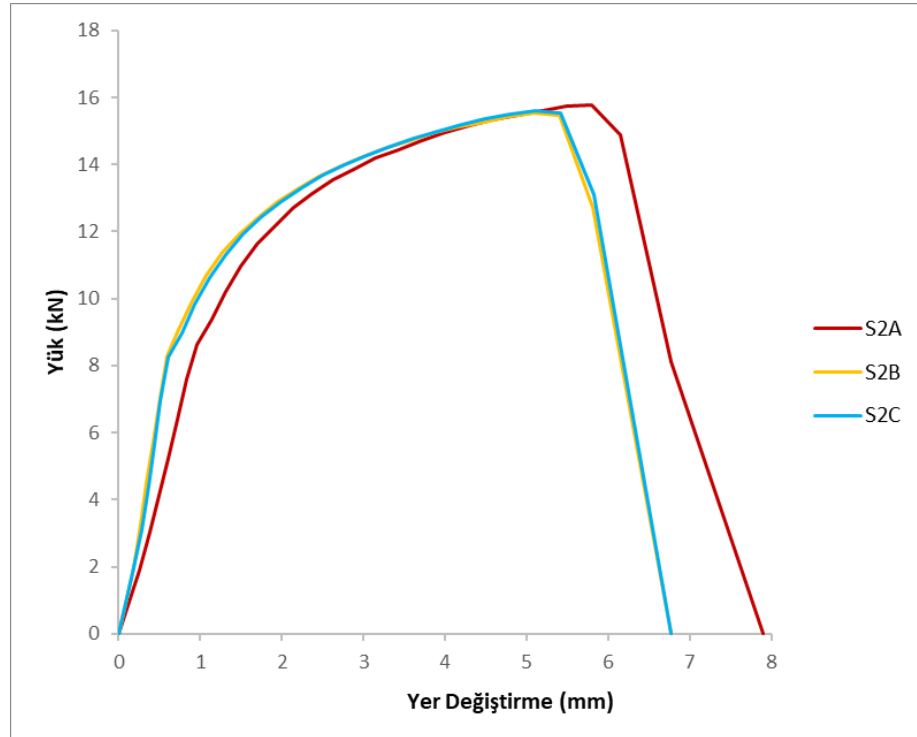
*: Referans numune

Çizelge 5.2. S1A-S1B-S1C deney numunelerine ait sonuçların karşılaştırması-yer değiştirme değerleri

Numune adı	S1A*	S1B	S1C
Akma yer değiştirme, ε_y (mm)	1.86	1.81	1.94
Akma yer değiştirme / Referans akma yer değiştirme	1.000	0.973	1.043
Maksimum yükteki yer değiştirme (mm)	20.49	20.52	19.40
Maksimum yükteki yer değiştirme / Referans maksimum yükteki yer değiştirme	1.000	1.001	0.947
Kopma yer değiştirme, ε_u (mm)	28.74	31.68	28.56
Kopma yer değiştirme / Referans kopma yer değiştirme	1.000	1.102	0.994
Deplasman süneklik oranı $\varepsilon_u/\varepsilon_y$	15.45	17.50	14.72

*: Referans numune

S2A, S2B ve S2C deney numuneleri için elde edilen yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması Şekil 5.38’de verilmiştir. Bu üç numunede maksimum yükler sırasıyla 15.76 kN, 15.52 kN ve 15.60 kN olarak belirlenmiştir. Yükler arasındaki farkın en küçük yüke oranı 0.015 olarak hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler maksimum taşıma yükü için en düşük dayanımı veren S2B numunesi referans alınarak Çizelge 5.3’te karşılaştırılmıştır.



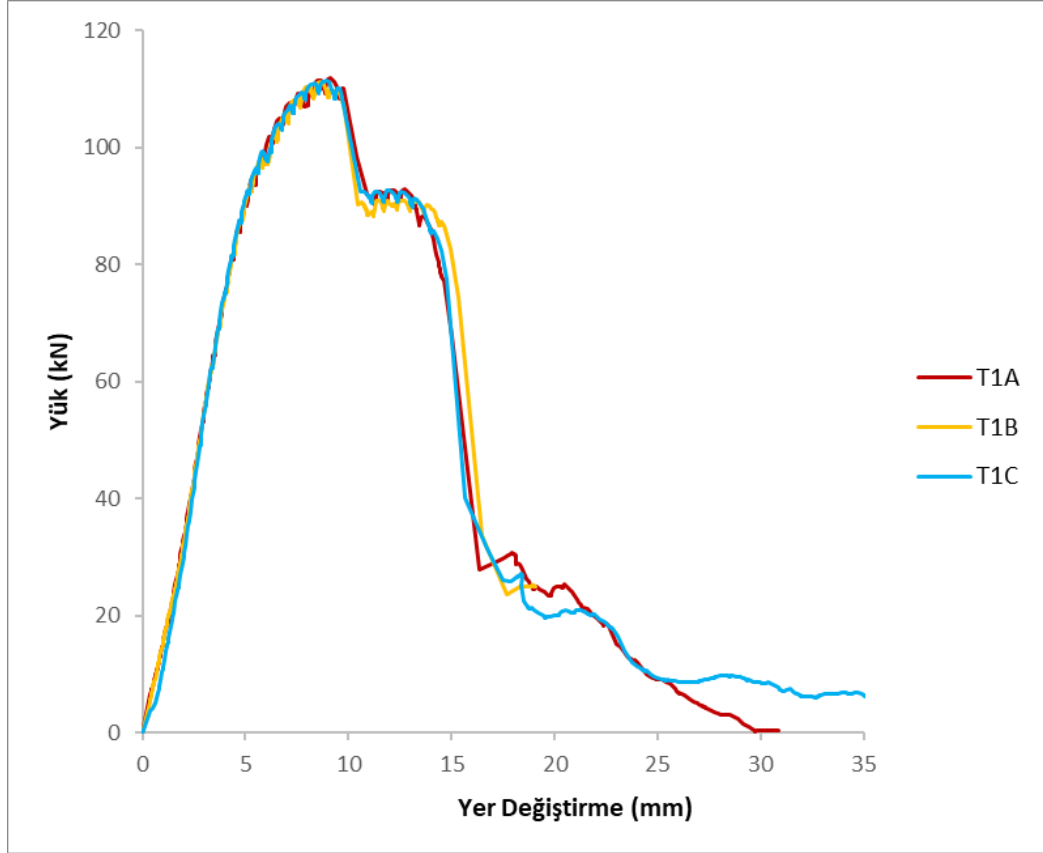
Şekil 5.38. S2A-S2B-S2C deney numunelerine ait yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 5.3. S2A-S2B-S2C deney numunelerine ait sonuçların karşılaştırması

Numune adı	S2A	S2B*	S2C
Maksimum yük (kN)	15.76	15.52	15.60
Maksimum yük / Referans maksimum yük	1.015	1.000	1.005
Maksimum yükteki yer değiştirme (mm)	5.80	5.09	5.10
Maksimum yükteki yer değiştirme / Referans maksimum yükteki yer değiştirme	1.139	1.000	1.002

*: Referans numune

T1A, T1B ve T1C deney numuneleri için elde edilen yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması Şekil 5.39’da verilmiştir. Bu üç numunede maksimum yükler sırasıyla 111.97 kN, 111.29 kN ve 111.40 kN olarak belirlenmiştir. Yükler arasındaki farkın en küçük yüke oranı 0.006 olarak hesaplanmıştır. Çekme bölgesinde kırılma olduktan sonra ulaşılan maksimum yükler ise sırasıyla 92.99 kN, 91.01 kN ve 92.78 kN’dur. Deneylerden elde edilen veriler maksimum taşıma yükü için en düşük dayanımı veren T1B numunesi referans alınarak Çizelge 5.4’te karşılaştırılmıştır.



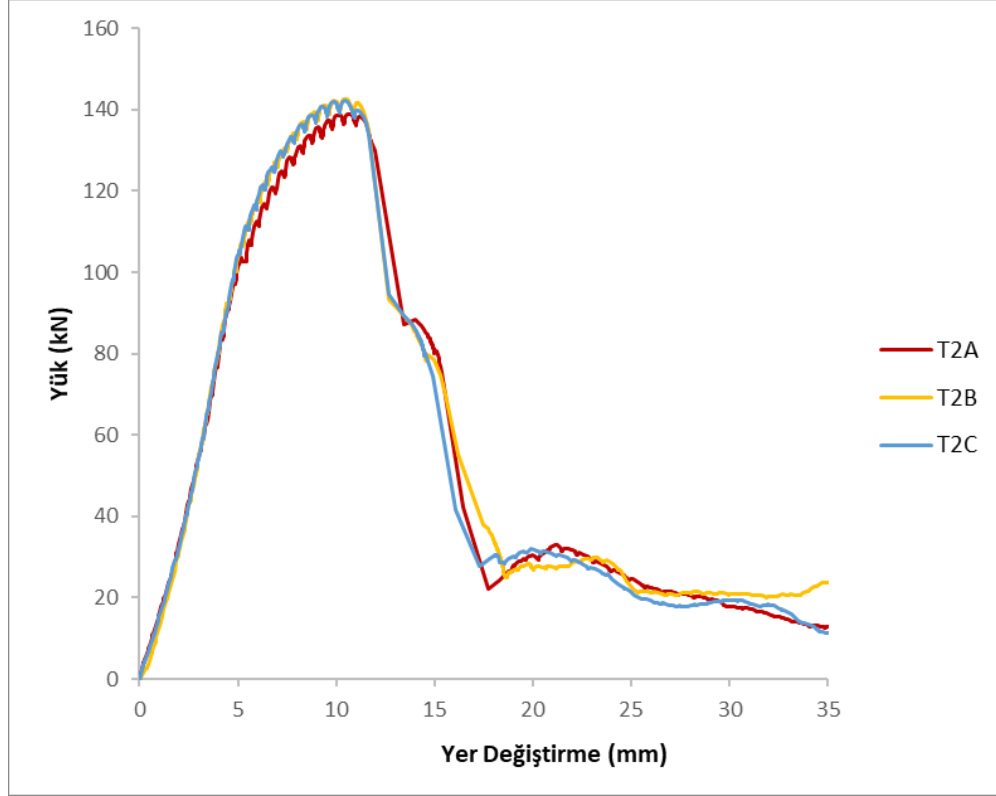
Şekil 5.39. T1A-T1B-T1C deney numunelerine ait yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 5.4. T1A-T1B-T1C deney numunelerine ait sonuçların karşılaştırması

Numune adı	T1A	T1B*	T1C
Maksimum yük (kN)	111.97	111.29	111.40
Maksimum yük / Referans maksimum yük	1.006	1.000	1.001
Maksimum yükteki yer değiştirme (mm)	9.1	8.6	8.9
Maksimum yükteki yer değiştirme / Referans maksimum yükteki yer değiştirme	1.058	1.000	1.035
Çekme bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	9.7	9.8	9.9
Çekme bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme / Referans yer değiştirme	0.990	1.000	1.010
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük	92.99	91.01	92.78
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük / Referans yük	1.022	1.000	1.019
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük için yer değiştirme	12.7	11.5	11.8
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük için yer değiştirme / Referans yer değiştirme	1.104	1.000	1.026
Kayma bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	13.8	14.9	14.5
Kayma bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme / Referans yer değiştirme	0.926	1.000	0.973

*: Referans numune

T2A, T2B ve T2C deney numuneleri için elde edilen yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması Şekil 5.40’ta verilmiştir. Bu üç numunede maksimum yükler sırasıyla 138.97 kN, 142.53 kN ve 142.29 kN olarak belirlenmiştir. Yükler arasındaki farkın en küçük yüke oranı 0.026 olarak hesaplanmıştır. Çekme bölgesinde kırılma meydana geldikten sonra ulaşılan maksimum yükler ise sırasıyla 88.38 kN, 93.42 kN ve 94.71 kN’dur. Deneylerden elde edilen veriler maksimum taşıma yükü için en düşük dayanımı veren T2A numunesi referans alınarak Çizelge 5.5’te karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.40. T2A-T2B-T2C deney numunelerine ait yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 5.5. T2A-T2B-T2C deney numunelerine ait sonuçların karşılaştırması

Numune adı	T2A*	T2B	T2C
Maksimum yük (kN)	138.97	142.53	142.29
Maksimum yük / Referans maksimum yük	1.000	1.026	1.024
Maksimum yükteki yer değiştirme (mm)	10.6	10.5	10.4
Maksimum yükteki yer değiştirme / Referans maksimum yükteki yer değiştirme	1.000	0.991	0.981
Çekme bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	12.0	11.6	11.7
Çekme bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme / Referans yer değiştirme	1.000	0.967	0.975
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük	88.38	93.42	94.71
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük / Referans yük	1.000	1.057	1.072
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük için yer değiştirme	14.0	12.7	12.7
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük için yer değiştirme / Referans yer değiştirme	1.000	0.907	0.907
Kayma bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	15.1	15.0	14.9
Kayma bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme / Referans yer değiştirme	1.000	0.993	0.987

*: Referans numune

6. ANALİTİK ÇALIŞMA VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Giriş

Bu çalışmada, blok kırılma sınır durumuna ulaşan bulonlu birleşimlerin davranışını incelemek için sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır. Blok kırılma dayanımını belirleyen denklemleri geliştirmek ve mevcut denklemleri değerlendirmek için blok kırılma sınırı durumu taşıma yükünün doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir (Kara, 2005). Blok kırılma sınır durumunda taşıma gücü çekme ve kayma alanlarından elde edilen taşıma gücü değerlerinin toplamı olarak elde edilmektedir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında blok kırılma sınır durumuna ulaşan birleşimlerde maksimum yükün belirlenmesine ilave olarak çekme alanında kırılma gerçekleştikten sonraki yük ve yer değiştirme değerlerini doğru tahmin eden bir sonlu eleman modeli oluşturulması amaçlanmıştır. Analizleri gerçekleştirmek için genel amaçlı sonlu elemanlar analiz programı ABAQUS kullanılmıştır.

6.2. Malzeme Özellikleri

Çeliğin doğrusal olmayan gerilme – birim şekil değiştirme davranışı, izotropik sertleşme ile Von Mises akma kriteri kullanılarak modellenmiştir. Bu davranışta malzeme akma noktasına kadar elastik davranmaktadır. Çelik levhaların elastisite modülü 210000 MPa ve poisson oranı 0.3 olarak kabul edilmiştir (Eurocode 3, 2005). Elastik bölgeyi sırasıyla akma platosu, pekleşme bölgesi, boyun verme ve kırılma aşamaları takip etmektedir. Şekil 6.1’de S1A, S1B ve S1C numunelerine ait çekme deneylerinden elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Şekil 6.1’deki gerilme değeri uygulanan çekme kuvvetinin toplam kesit alanına oranı olan mühendislik gerilmesini ($\sigma_{müh}$) birim şekil değiştirme değeri ($\epsilon_{müh}$) de toplam uzamanın ilk uzunluğa oranını göstermektedir. Gerçek gerilme değeri σ_{gr} , boyun verme sırasında kesit alanı azaldığından dolayı Denklem 6.1 ile hesaplanmaktadır. Gerçek birim şekil değiştirme ϵ_{gr} ise uzamanın toplam uzunluğa oranının integrasyonudur. Sınır şartları belirlenerek integrasyonun çözülmesi ile Denklem 6.2 elde edilmektedir.

$$\sigma_{gr} = \sigma_{müh}(1 + \epsilon_{müh}) \quad (6.1)$$

$$\epsilon_{gr} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \epsilon_{müh}) \quad (6.2)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

σ_{gr} = gerçek gerilme [MPa]

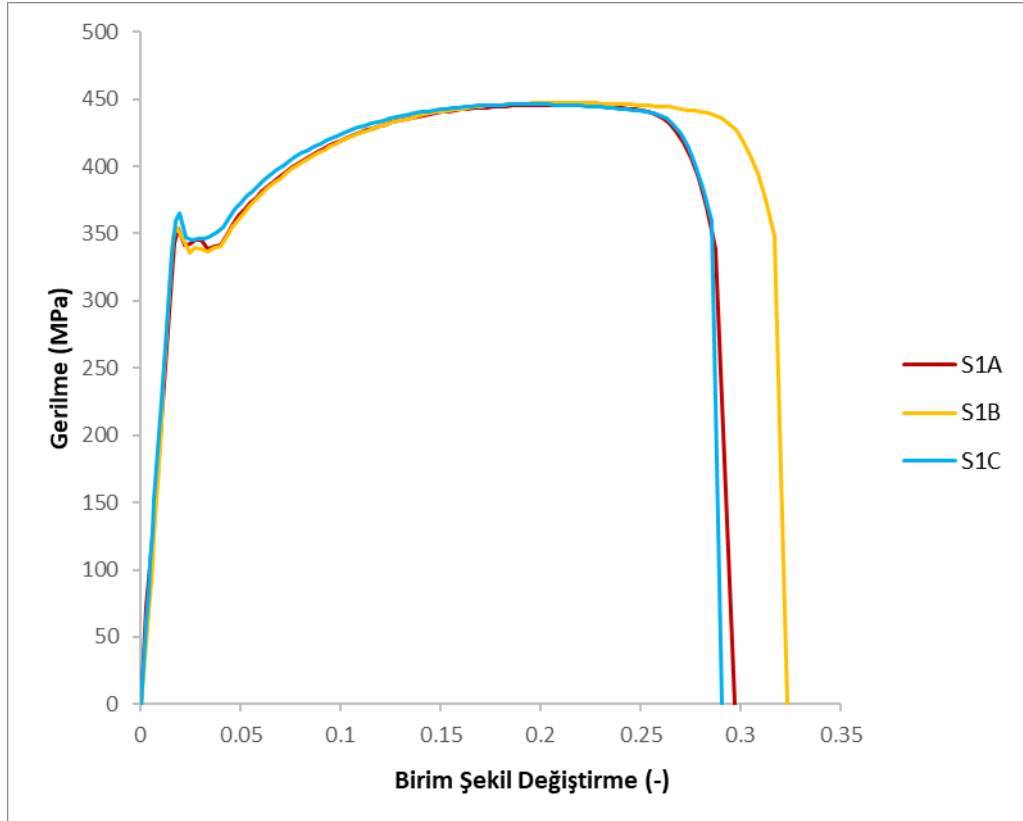
$\sigma_{müh}$ = mühendislik gerilmesi [MPa]

ϵ_{gr} = gerçek birim şekil değiştirme [-]

$\epsilon_{müh}$ = mühendislik birim şekil değiştirmesi [-]

l = şekil değiştirmiş boy [mm]

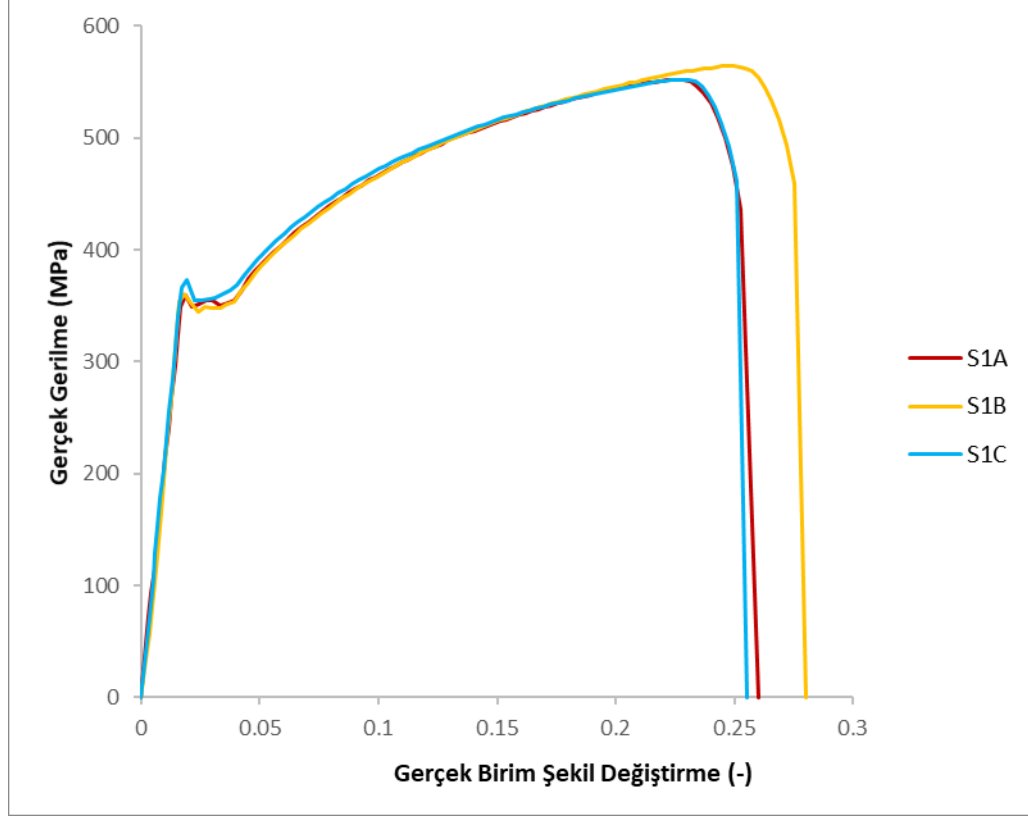
l_0 = ilk boy [mm]



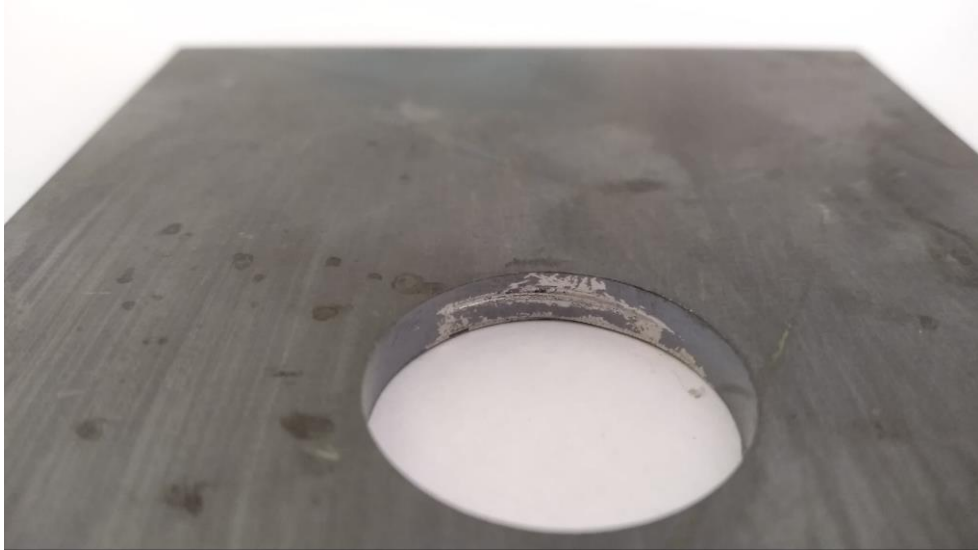
Şekil 6.1. S1A-S1B-S1C numunelerine ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri

Denklem 6.1 ve Denklem 6.2 kullanılarak elde edilen gerçek gerilme – gerçek birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Deney sonucunda elde edilen grafiklerde başlangıç rijitliğinin 210000 MPa seviyesinde olmadığı, deney cihazından numunelere yük aktarmak için yapılan bulonlu bağlantıların başlangıç rijitliğini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Deney cihazındaki bağlantılarda kullanılan M20-8.8

bulonlar için hazırlanan delikler lazer kesim ile açılmıştır. Buna rağmen bu bağlantılarda bulonların aynı anda değil sırayla yük aldıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca deney sonrasında M20 bulon deliklerinin içinde diş izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 6.3).

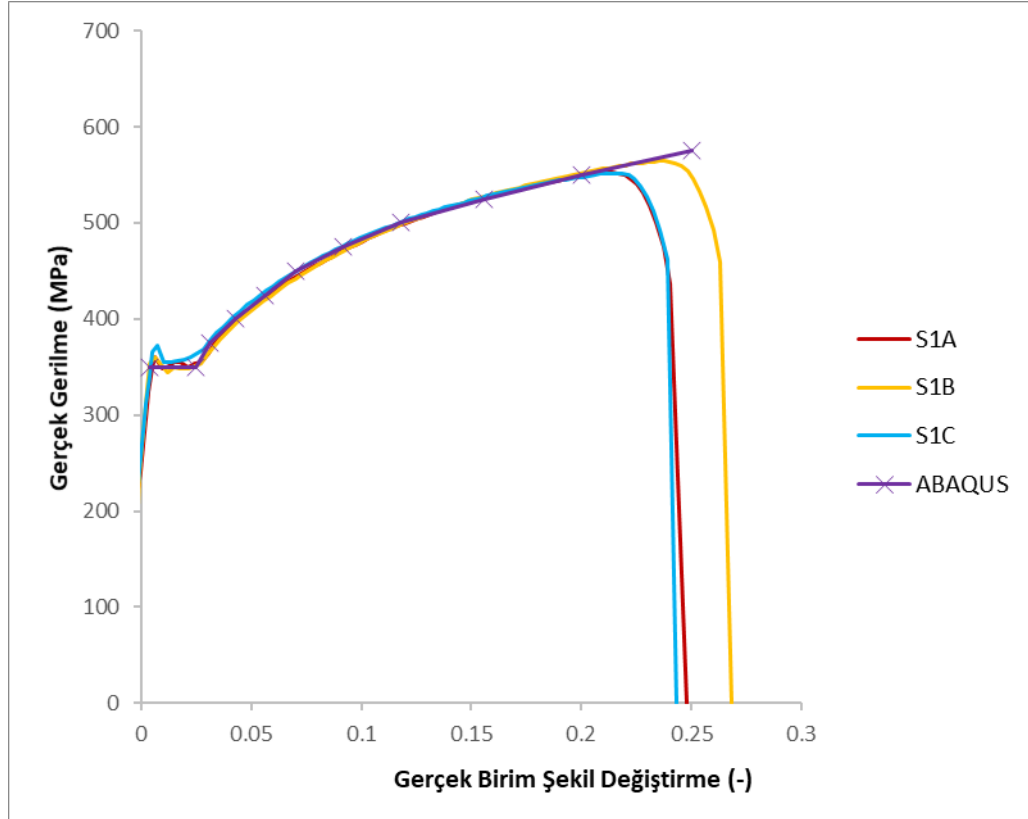


Şekil 6.2. S1A-S1B-S1C numunelerine ait gerçek gerilme – gerçek birim şekil değiştirme eğrileri



Şekil 6.3. S1A numunesi bulon deliği içinde oluşan bulon diş izi

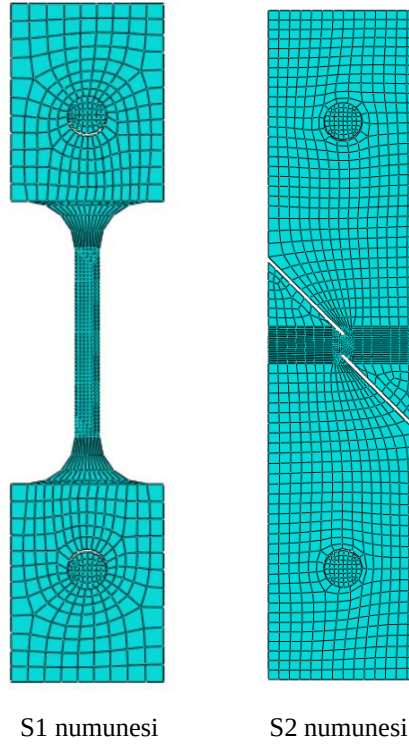
Başlangıç rijitliğindeki düşüklük sebebiyle gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri elastisite modülünün 210000 MPa olması durumunda ulaşması gereken birim şekil değiştirme değerine ötelenmiştir. Elde edilen grafik Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Bu eğriler üzerinde işaretlenen noktalar ile gerçek gerilme – gerçek birim şekil değiştirme verisi elde edilmiştir. Gerçek birim şekil değiştirmeden elastik birim şekil değiştirme çıkarılarak gerçek plastik birim şekil değiştirme hesaplanmış ve boyun verme noktasına kadar ABAQUS programında izotropik sertleşme tanımlanmıştır. Program girilen son veriden sonra, gerilme değerinin sabit kaldığını kabul etmektedir. Bu sebeple elde edilen grafiğin son doğru parçasının sahip olduğu eğiminde ileri noktalar tanımlanmıştır. Bulonlarda plastik şekil değiştirme tespit edilmediği için programda bulon malzemesi elastik olarak tanımlanmıştır.



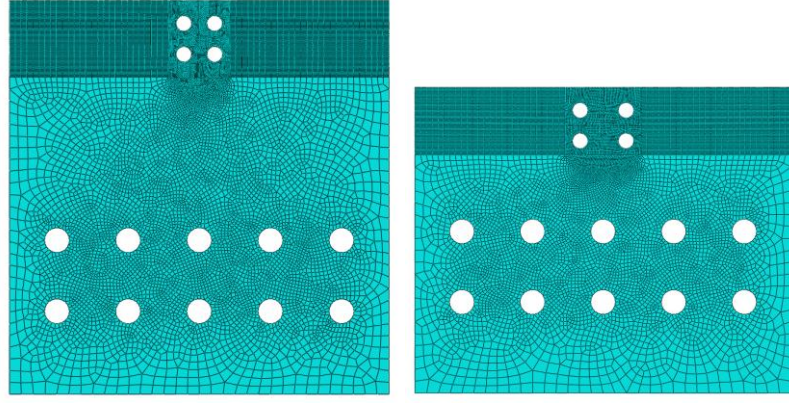
Şekil 6.4. ABAQUS programına girilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi

6.3. Sonlu Eleman Modelleri ve Sonuçların Deneyel Çalışma ile Karşılaştırılması

Deneyel çalışma yapılan numuneler için ABAQUS programında modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da gösterilmektedir. Sonlu eleman yönteminde en önemli parametrelerden biri sonlu eleman ağı boyutudur. Sonlu eleman ağı boyutunun küçük seçilmesi elde edilen verilerin hassasiyetini artırırken analiz süresini de oldukça uzatmaktadır. Analiz süresini makul seviyede tutmak için modeldeki düğüm noktası sayısı azaltılabilmektedir. Bu modellerde de hasar oluşmayan bölgelerde sonlu eleman ağı büyük seçilerek düğüm noktası sayısı azaltılmıştır. Ayrıca T1 ve T2 tipi numuneler için yapılan ön analizlerin sonucunda gerilmelerin çok küçük seviyede kaldığı bölgeler modelden çıkarılarak analiz süresi kısaltılmıştır. Sonuç olarak Şekil 6.7’de gösterilen modeller elde edilmiştir. Modellerde sonlu eleman olarak C3D8R isimli 8 noktalı brick/tuğla elemanlar kullanılmıştır (Şekil 6.8).



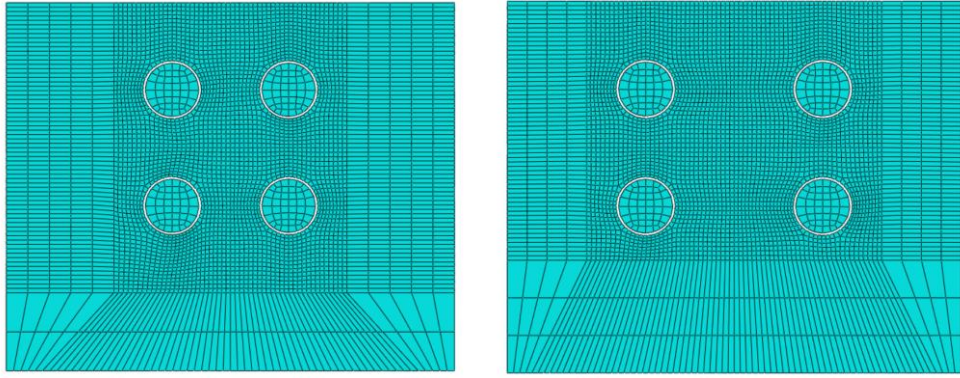
Şekil 6.5. ABAQUS programında oluşturulan malzeme deney numunelerine ait modeller



T1 numunesi

T2 numunesi

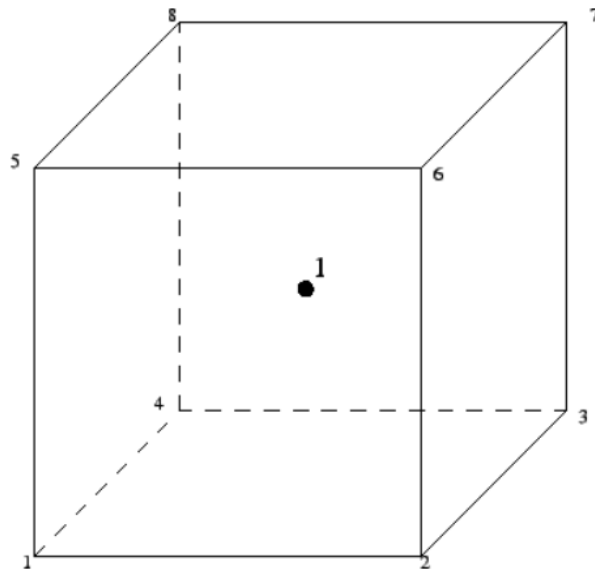
Şekil 6.6. ABAQUS programında oluşturulan T1 ve T2 tipi numunelere ait modeller



T1 numunesi

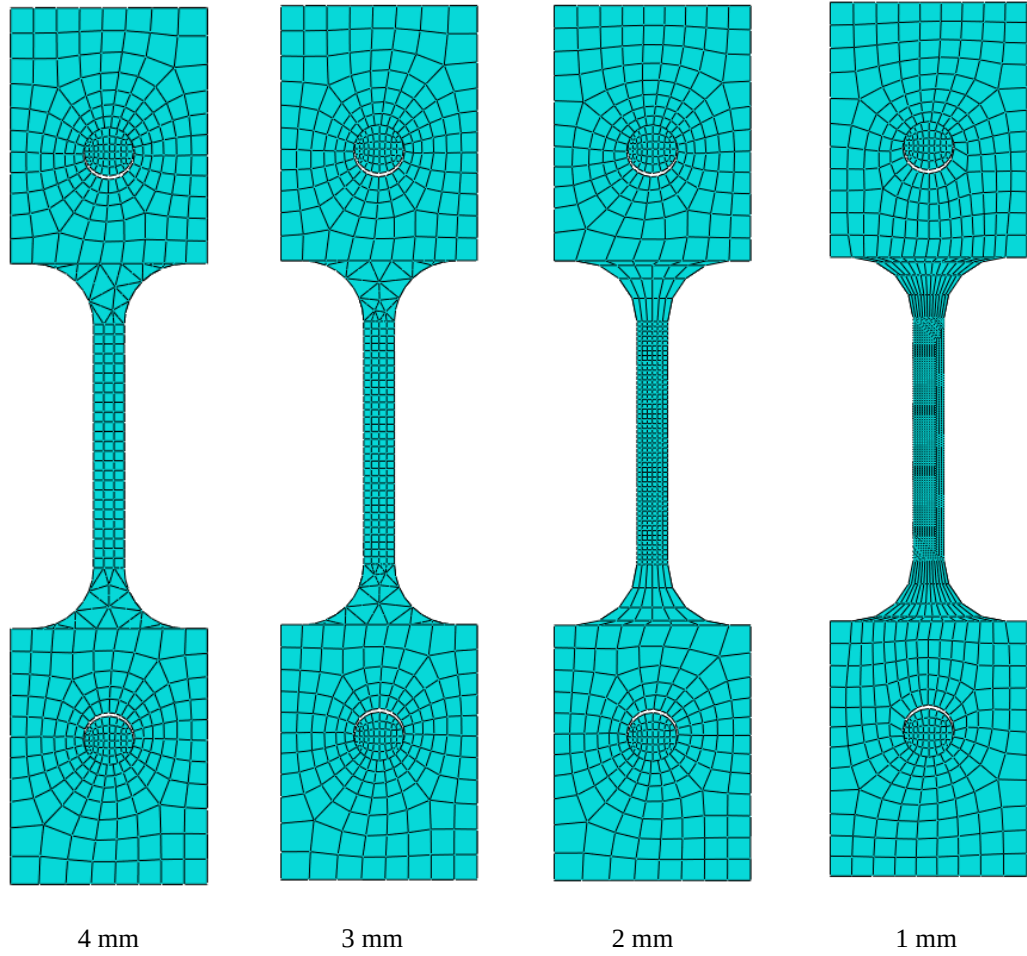
T2 numunesi

Şekil 6.7. T1 ve T2 tipi numuneler için kullanılan modeller



Şekil 6.8. C3D8R sonlu elemanı (ABAQUS, 2014)

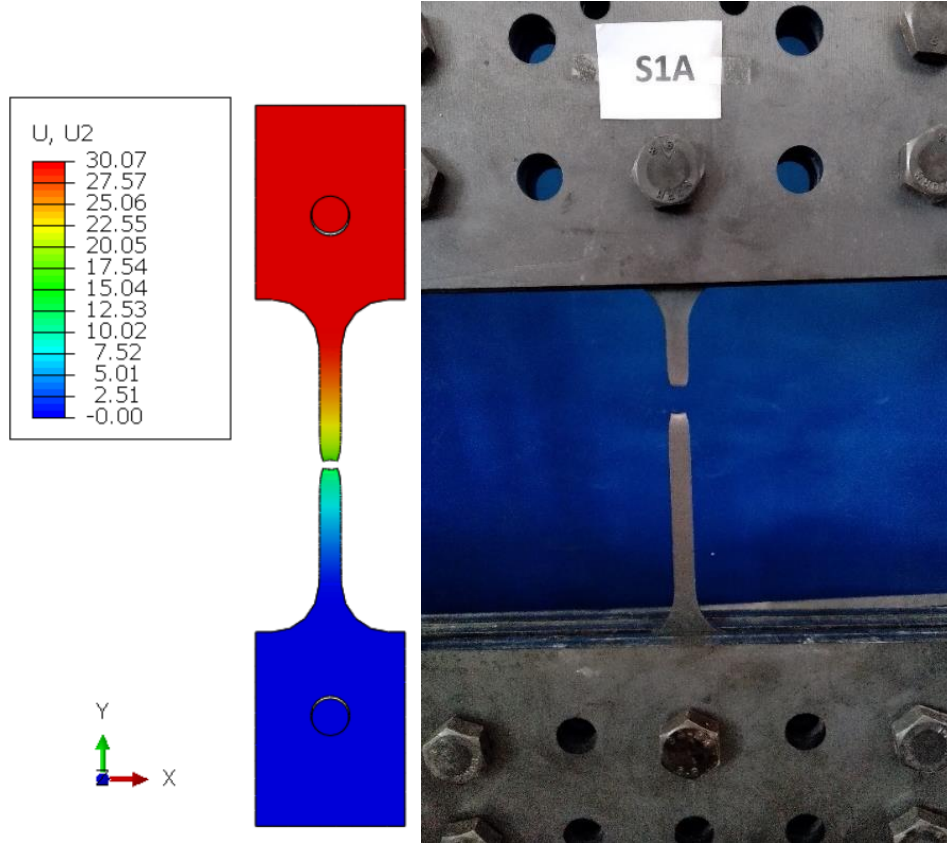
Sonlu eleman modellerinde bulonlara yer değiştirmeler verilerek çekme deneyi tanımlanmıştır. İlk olarak S1 numune modeli için analizler yapılmıştır. Bu analizlerde sonlu eleman boyutunun etkisi incelenmiştir. S1 modelinde 4, 3, 2 ve 1 mm sonlu eleman boyutu için analizler yapılmıştır (Şekil 6.9). 10 mm yer değiştirmede numunede oluşan en büyük Von Mises gerilmesi değerleri 4, 3, 2 ve 1 mm sonlu eleman boyutu için sırasıyla 490.39 MPa, 481.41 MPa, 480.40 MPa ve 479.69 MPa olarak bulunmuştur. 2 mm’den 1 mm sonlu eleman boyutuna geçildiğinde maksimum gerilme değeri 0.002’den daha az değiştiği için sonlu eleman boyutu 1 mm olarak seçilmiştir.



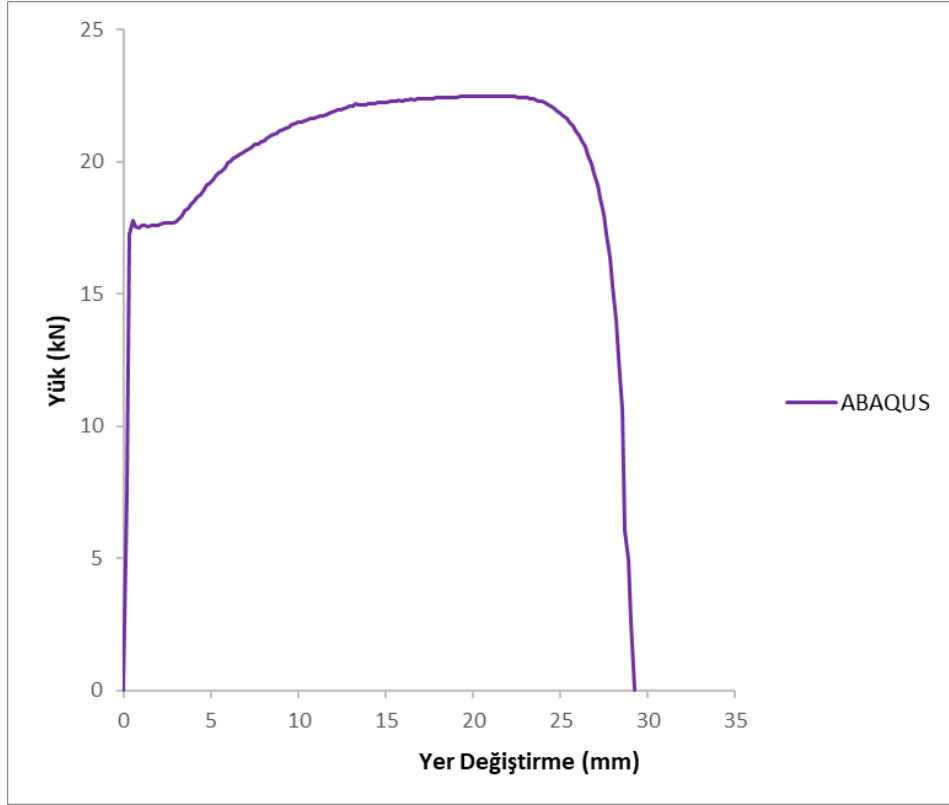
Şekil 6.9. 4, 3, 2 ve 1 mm sonlu eleman boyutlu modeller

Grafiğin maksimum çekme yükünden sonraki bölümü ise sünek malzeme hasarı tanımlanarak elde edilmiştir. Hasar modelleri sonlu eleman ağı boyutuna bağlı olduğu için hasar oluşması beklenen bölgelerin hepsinde 1 mm’lik sonlu elemanlar kullanılmıştır. Sünek malzeme hasarı için hasar değerleri, deneysel çalışmadan elde edilen ve S1 tipi sonlu eleman modelinden elde edilen yük – yer değiştirme eğrileri

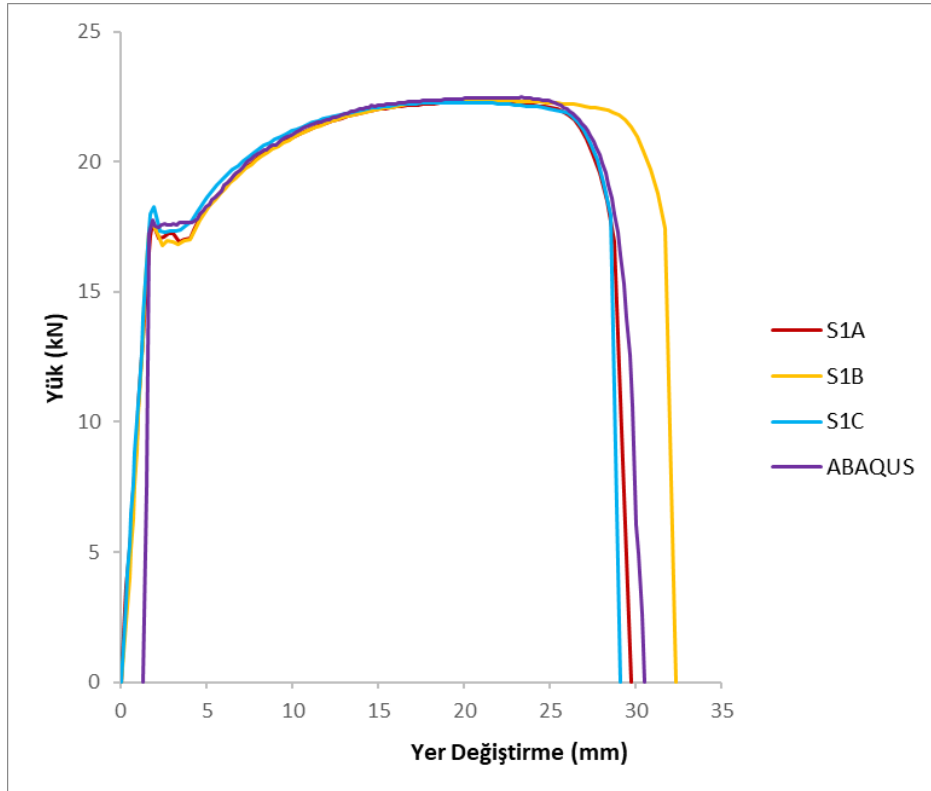
birbiri ile örtüşüne kadar iteratif bir çalışma yapılarak belirlenmiştir. Aynı işlem S2 numunesi için de uygulanmıştır. Şekil 6.10'da S1A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin deney sonu görüntüleri yan yana verilmiştir. Sonlu eleman modeli için elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 6.11'de gösterilmektedir. Şekil 6.12'de sonlu eleman modelinden elde edilen grafik, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda maksimum yük değeri 22.48 kN olarak bulunurken S1A, S1B ve S1C numunelerine ait deneylerden elde edilen ortalama maksimum yük değeri 22.31 kN'dur. Bu modelde 0.008 hata oranı ile maksimum yük değeri belirlenmiştir. Bu karşılaştırmalarda daha önce belirtilmiş olan başlangıç rijitliği problemi nedeniyle elde edilen grafikler ötelenmiştir. Ötelenme yapıldıktan sonra yük – yer değiştirme eğrilerinin büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.10. S1A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin deney sonu görüntüleri

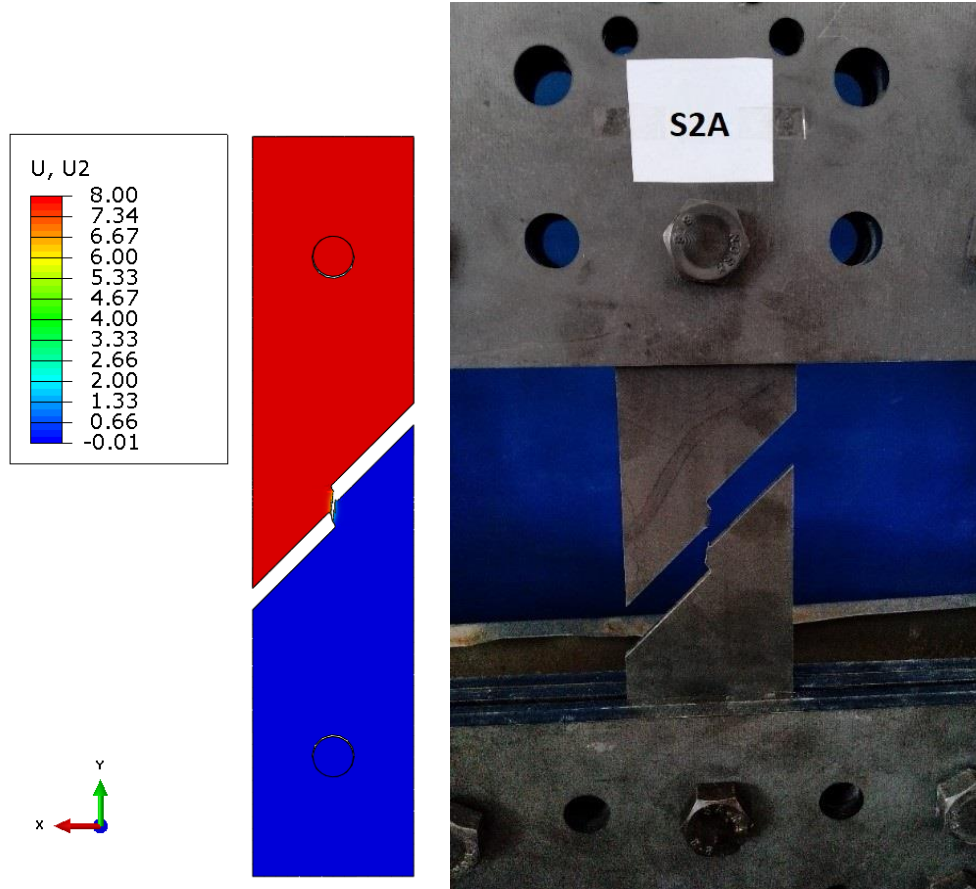


Şekil 6.11. S1 tipi sonlu eleman modelinin yük – yer değiştirme eğrisi

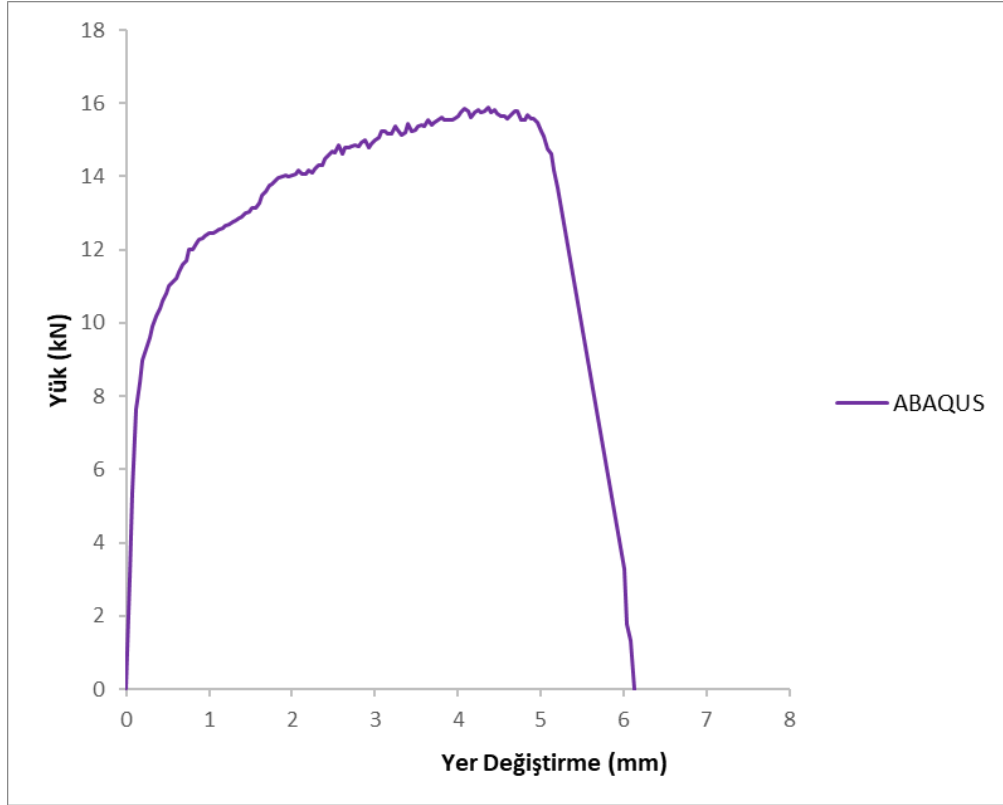


Şekil 6.12. S1A, S1B, S1C deney numuneleri ve sonlu eleman modeli yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

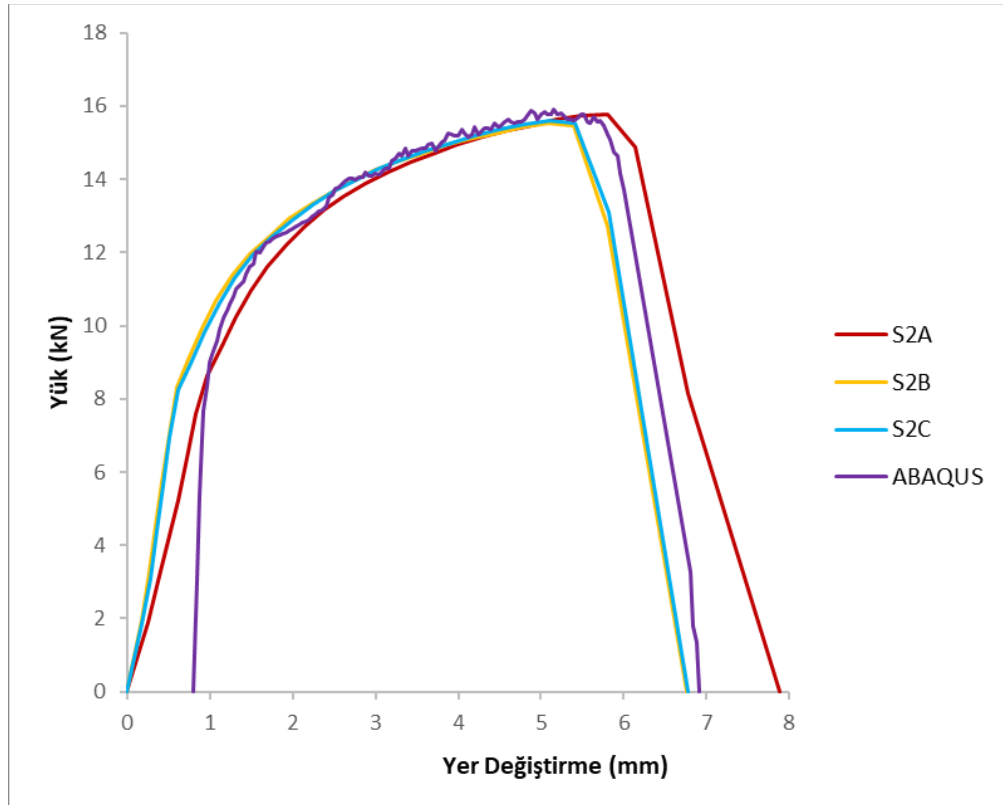
Şekil 6.13'te S2A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin deney sonu görüntüleri yan yana verilmiştir. Sonlu eleman modeli için elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 6.14'te gösterilmektedir. Şekil 6.15'te sonlu eleman modelinden elde edilen grafik deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda maksimum yük değeri 15.90 kN olarak bulunurken S2A, S2B ve S2C deneylerinde ortalama maksimum yük değeri 15.63 kN'dur. Bu modelde 0.017 hata oranı ile maksimum yük değeri belirlenmiştir. Ötelenme yapıldıktan sonra yük – yer değiştirme eğiliminin büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.13. S2A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin deney sonu görüntüleri

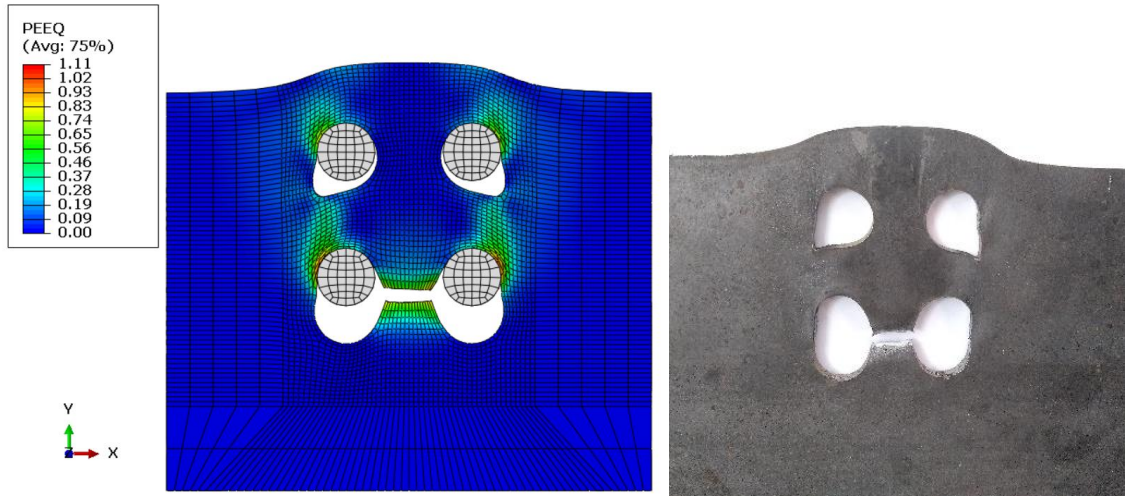


Şekil 6.14. S2 tipi sonlu eleman modelinin yük – yer değiştirme eğrisi

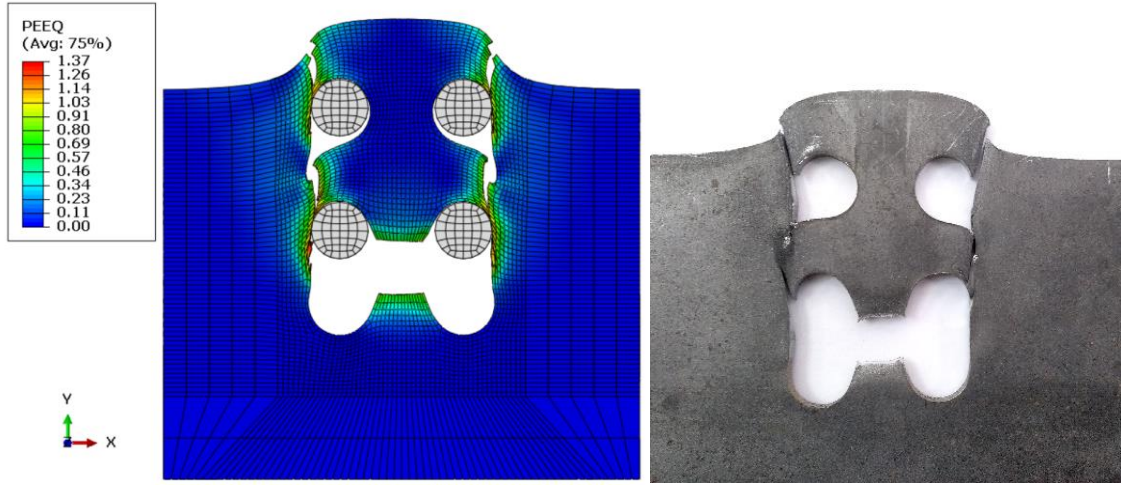


Şekil 6.15. S2A, S2B, S2C deney numuneleri ve sonlu eleman modeli yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

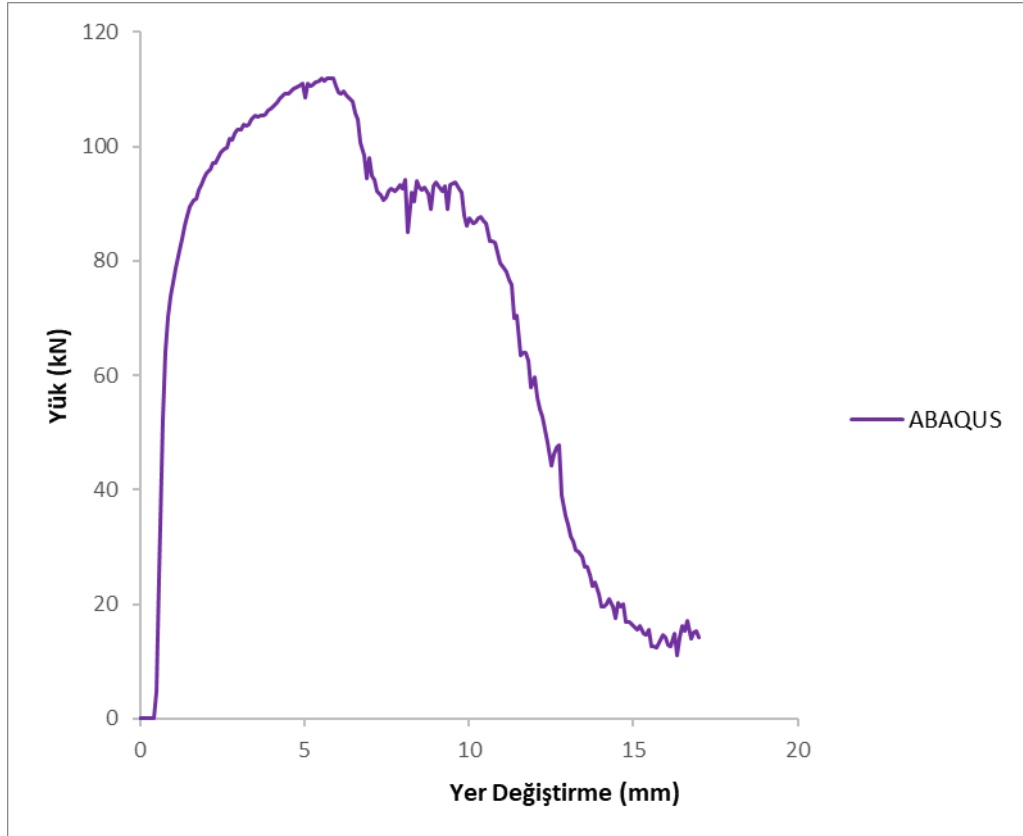
Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de T1 tipi 3 deney numunesi benzer davranış gösterdiğinden dolayı örnek olarak T1A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin sırasıyla çekme ve kayma bölgelerinde kırılma meydana geldikten sonraki deney sonu görüntüleri yan yana verilmiştir. Sonlu eleman modeli için elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 6.18’de gösterilmektedir. Şekil 6.19’da sonlu eleman modelinden elde edilen grafik deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda maksimum yük değeri 111.91 kN olarak bulunurken T1A, T1B ve T1C deneylerinde ortalama maksimum yük değeri 111.55 kN’dur. Bu modelde 0.003 oranda hata ile maksimum yük değeri belirlenmiştir. Analizde çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük değeri 94.18 kN olarak bulunurken deney sonuçlarının ortalaması 92.26 kN’dur. Grafikte ötelenme yapıldıktan sonra yük – yer değiştirme eğilerinin büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Kayma bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra kalan yükün sürtünme etkisi ile oluştuğu analiz sonuçlarından tespit edilmiştir. Çizelge 6.1’de T1 tipi deneysel çalışmaların ortalama değerleri ile ABAQUS programından elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.



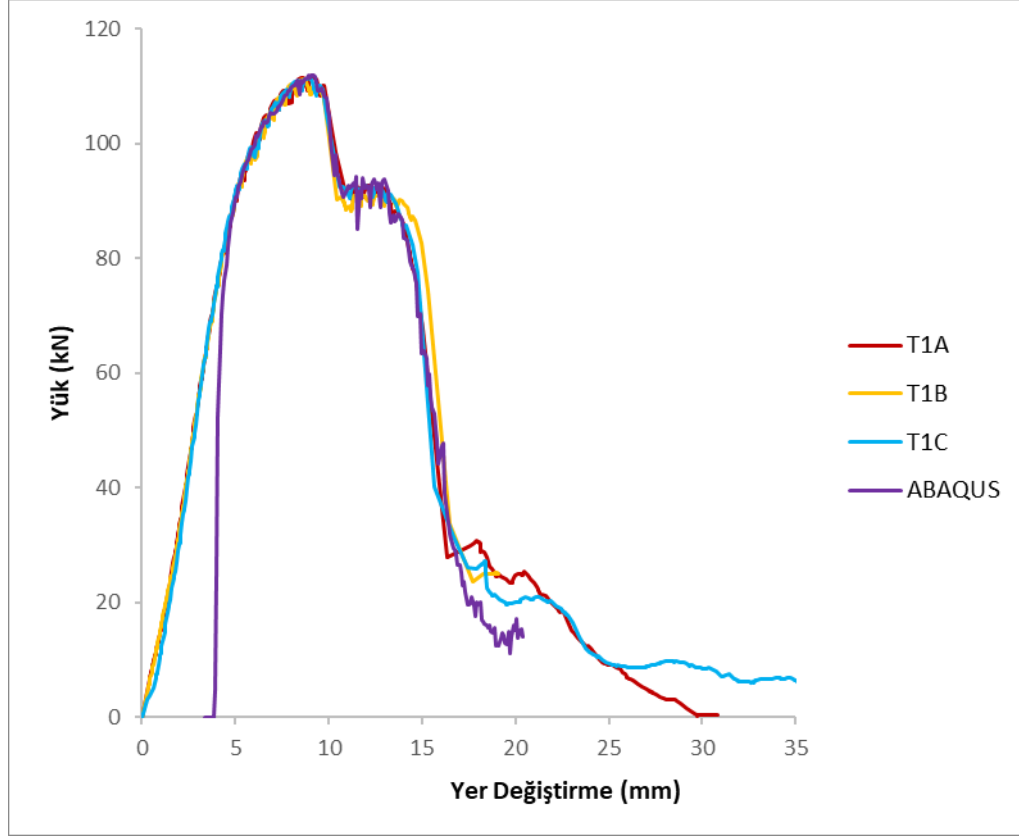
Şekil 6.16. T1A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra görüntüleri



Şekil 6.17. T1A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin kayma bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra görüntüleri



Şekil 6.18. T1 tipi sonlu eleman modelinin yük – yer değiştirme eğrisi



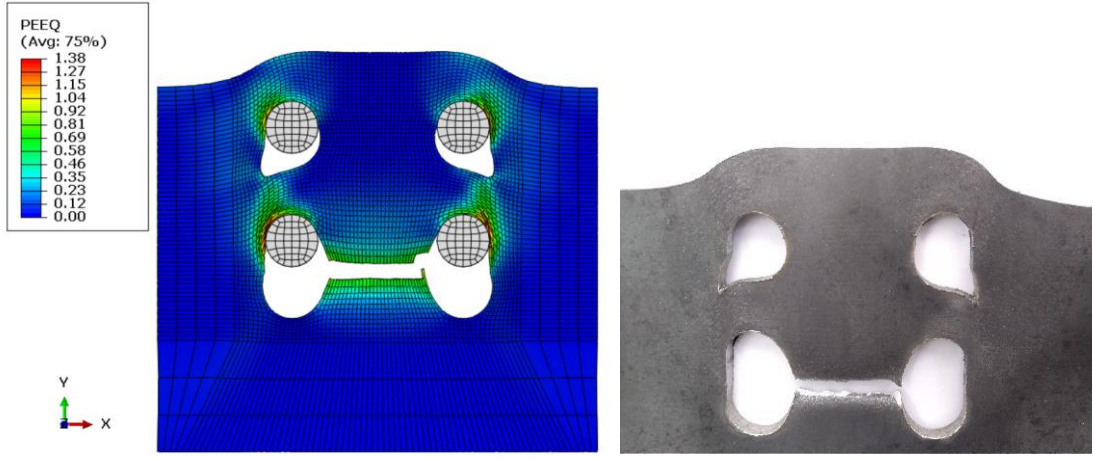
Şekil 6.19. T1A, T1B, T1C deney numuneleri ve sonlu eleman modeli yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 6.1. T1A-T1B-T1C deney numunelerine ait sonuçların ABAQUS programından elde edilen veriler ile karşılaştırması

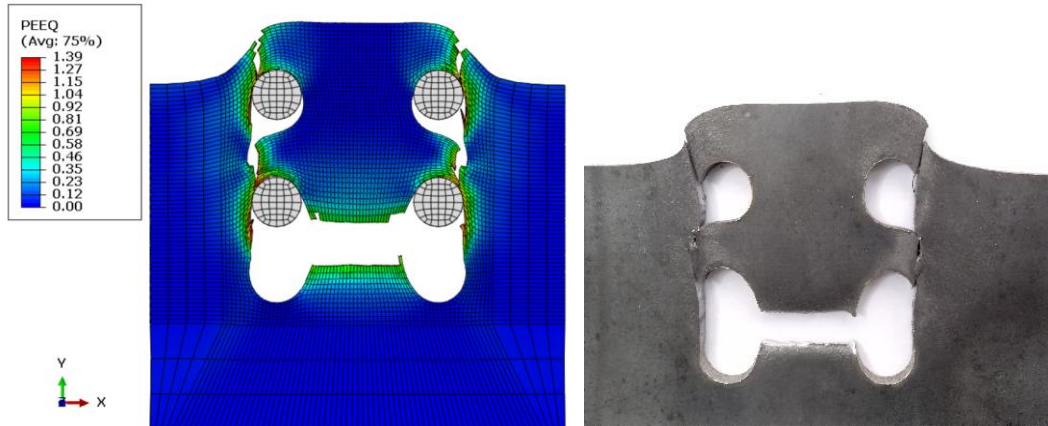
	T1A - T1B - T1C deney sonuçlarının ortalaması	ABAQUS sonuçları	ABAQUS sonuçlarının deneysel sonuçlara oranı
Maksimum yük (kN)	111.55	111.91	1.003
Maksimum yükteki yer değiştirme (mm)	8.9	8.3	0.933
Çekme bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	9.8	9.9	1.010
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılın maksimum yük	92.26	94.18	1.021
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılın maksimum yük için yer değıştırme	12.0	11.5	0.958
Kayma bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	14.4	14.0	0.972

Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de T2 tipi 3 deney numunesi benzer davranış gösterdiğinden dolayı örnek olarak T2A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin sırasıyla çekme ve kayma bölgelerinde kırılma meydana geldikten sonraki deney sonu görüntüleri yan yana verilmiştir. Sonlu eleman modeli için elde

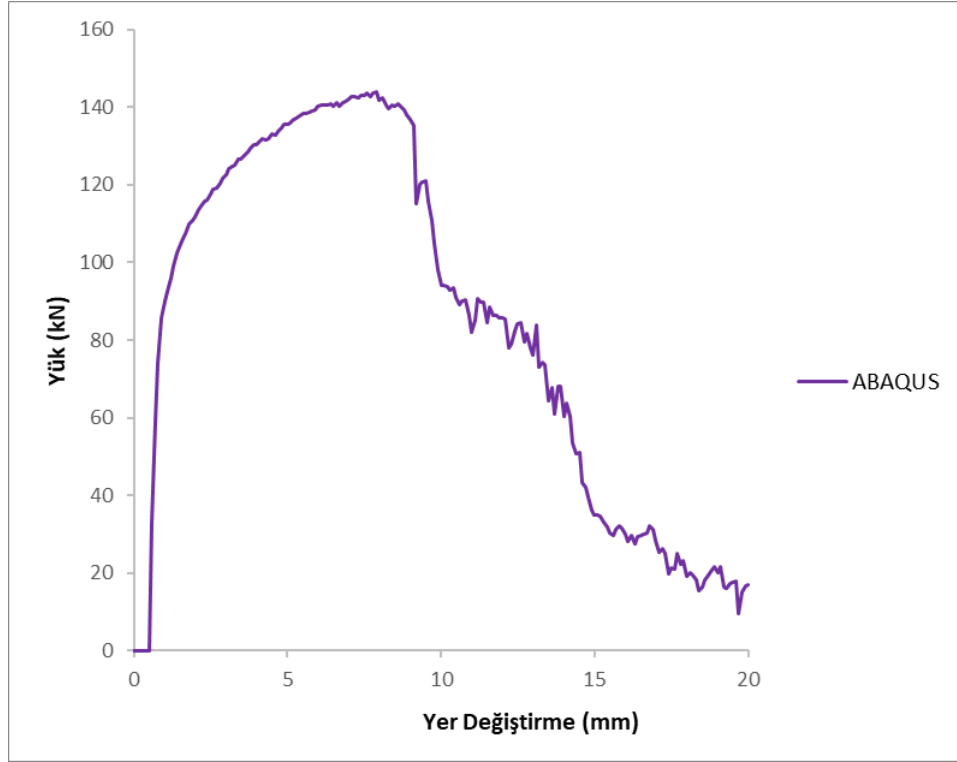
edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 6.22’de gösterilmektedir. Şekil 6.23’te sonlu eleman modelinden elde edilen grafik deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda maksimum yük değeri 143.92 kN olarak bulunurken T2A, T2B ve T2C deneylerinde ortalama maksimum yük değeri 141.26 kN’dur. Bu modelde 0.019 hata oranı ile maksimum yük değeri belirlenmiştir. Analizde çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılan maksimum yük değeri 94.05 kN olarak bulunurken deney sonuçlarının ortalaması 92.17 kN’dur. Grafikte ötelenme yapıldıktan sonra yük – yer değiştirme eğilerinin büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmektedir. Çizelge 6.2’de T2 tipi deneysel çalışmaların ortalama değerleri ile ABAQUS programından elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.



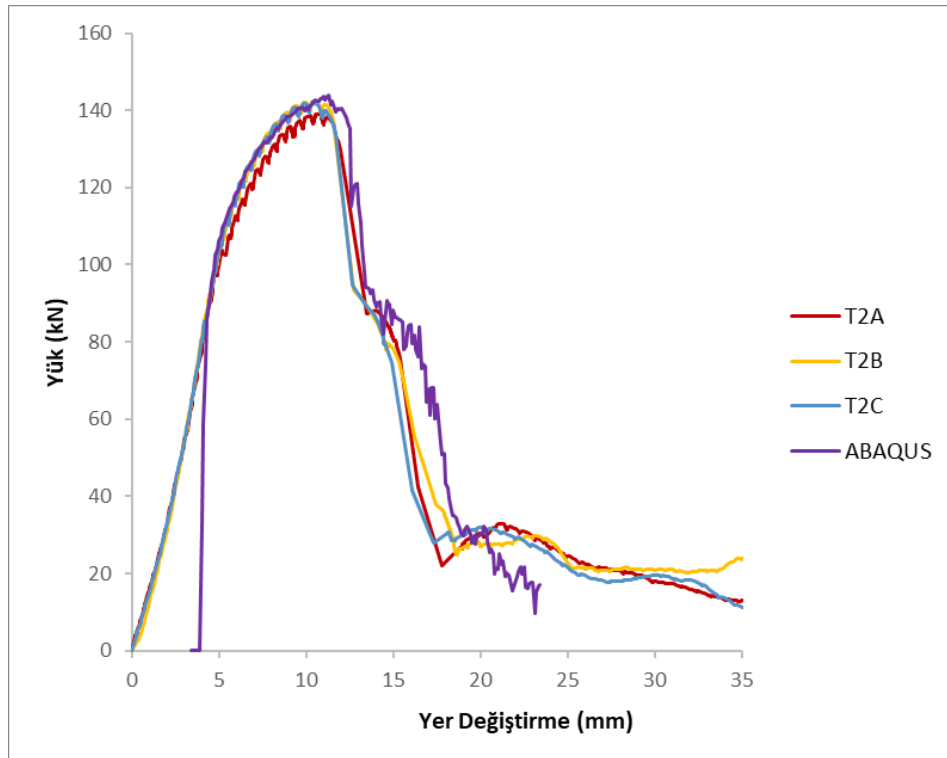
Şekil 6.20. T2A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra görüntüleri



Şekil 6.21. T2A deney numunesinin ve oluşturulan sonlu eleman modelinin kayma bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra görüntüleri



Şekil 6.22. T2 tipi sonlu eleman modelinin yük – yer değiştirme eğrisi



Şekil 6.23. T2A, T2B, T2C deney numuneleri ve sonlu eleman modeli yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 6.2. T2A-T2B-T2C deney numunelerine ait sonuçların ABAQUS programından elde edilen veriler ile karşılaştırması

	T2A – T2B – T2C deney sonuçlarının ortalaması	ABAQUS sonuçları	ABAQUS sonuçlarının deneysel sonuçlara oranı
Maksimum yük (kN)	141.26	143.92	1.019
Maksimum yükteki yer değiştirme (mm)	10.5	11.3	1.076
Çekme bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	11.8	12.5	1.059
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılacak maksimum yük	92.17	94.05	1.020
Çekme bölgesinde kırılma gerçekleştikten sonra ulaşılacak maksimum yük için yer değiştirme	13.1	13.4	1.023
Kayma bölgesinde kırılmanın gerçekleştiği yer değiştirme	15.0	16.5	1.100

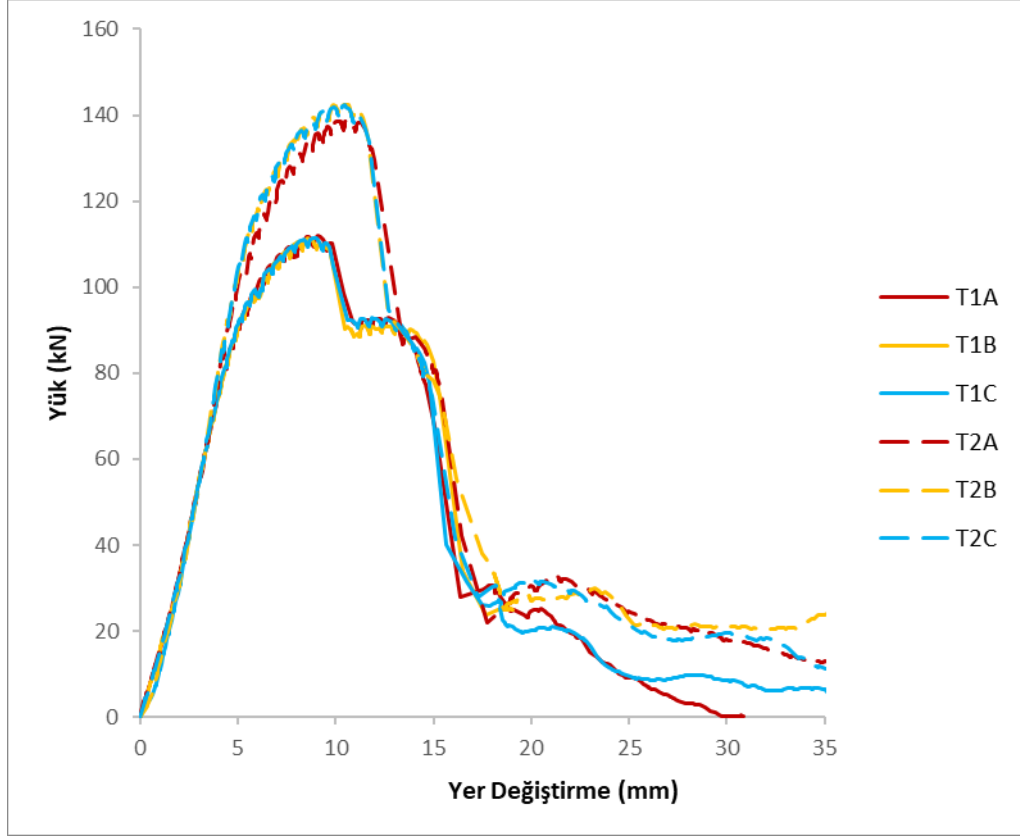
Çizelge 6.3'te mevcut yönetmelik formüllerine göre T1A ve T2A numuneleri için hesaplanan karakteristik dayanım değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması yapılmıştır. Bu hesaplamalarda malzemenin akma dayanımı S1A, S1B ve S1C deneylerindeki alt ve üst akma noktalarının ortalaması olan 348.97 MPa, çekme dayanımı da çekme gerilmelerinin ortalaması olan 446.20 MPa olarak alınmıştır. Deneylerde yük ve dayanım ile ilgili bir belirsizlik olmadığı için yönetmeliklerde verilen yük ve dayanım katsayıları 1'e eşit alınarak karakteristik taşıma gücü değerleri bulunmuştur. Yönetmelik formüllerinde blok kırılma dayanımını belirlemek için birleşimdeki çekme ve kayma alanları hesaplanmıştır. Net alanlar hesaplanırken bulonlar için açılan delik alanları toplam alandan çıkarılmıştır. ÇYTHYE-2018, CSA S16-14 ve SBC-2007 yönetmeliklerine göre çekme ve kayma bölgelerinde net alan hesaplanırken bulon delik boyutları delik çapından 2 mm büyük olarak gözönüne alınmaktadır. CSA S16-14 yönetmeliğinde, deliklerin matkapla delinmesi durumunda hesapta bulon delik boyutlarındaki bu artırmayı yapmanın zorunlu olmadığı belirtilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde Eurocode 3 (2005) ve AIJ (1990)'ın aynı sonuçları verdiği görülmüştür. AIJ (1990)'da kapasitenin hesaplanması için Denklem 2.7 ve Denklem 2.8'den küçük sonuç verenin kullanılacağı belirtilmiştir. İncelenen birleşimlerde Denklem 2.7 daha küçük dayanım değeri vermektedir. AIJ (1990)'da verilen Denklem 2.7 ile Eurocode 3 (2005)'te verilen kapasite denklemi aynı olduğu için Eurocode 3 (2005) ve AIJ (1990)'a göre elde edilen sonuçlar aynı bulunmuştur. En düşük dayanım değerlerini T1 tipi numuneler için 0.521 ve T2 tipi numuneler için 0.576 oranı ile SBC (2007) yönetmeliği vermektedir. Oranların bu seviyede düşük çıkmasının

sebeplerinden biri bulon deliğinin açılması sırasında delik çevresine hasar verme ihtimalinden dolayı delik çaplarının 2 mm fazla olarak gözönüne alınmasıdır. Birleşimdeki çekme ve kayma alanlarının az olması bu 2 mm'lik azaltımın etkisini oransal olarak büyötmektedir. Deneysel sonuçlara en yakın değeri T1 tipi numuneler için 0.986 ve T2 tipi numuneler için 0.943 oranı ile CSA S16-14 yönetmeliğı vermektedir. Yönetmeliklerin önerdiği denklemler incelendiğinde CSA S16-14'ün diğeri yönetmeliklerdeki denklemlerden farkı blok kırılma dayanımı için toplam kayma alanındaki gerilmenin çekme ve kayma gerilmelerinin ortalaması bir gerilme olacağını öngörmesidir. ÇYTHYE-2018 yönetmeliğı AISC 360-16 yönetmeliğı ile aynı denklemleri önerdiği için AISC 360-16 değeri tabloda gösterilmemiştir.

Çizelge 6.3. T1 ve T2 tipi deney numuneleri için ÇYTHYE-2018, Eurocode 3 (EN 2005), CSA S16-14, IS: 800 (2007), AIJ (1990), SBC (2007) yönetmeliklerinden ve ABAQUS programından elde edilen blok kırılma dayanımlarının karşılaştırması

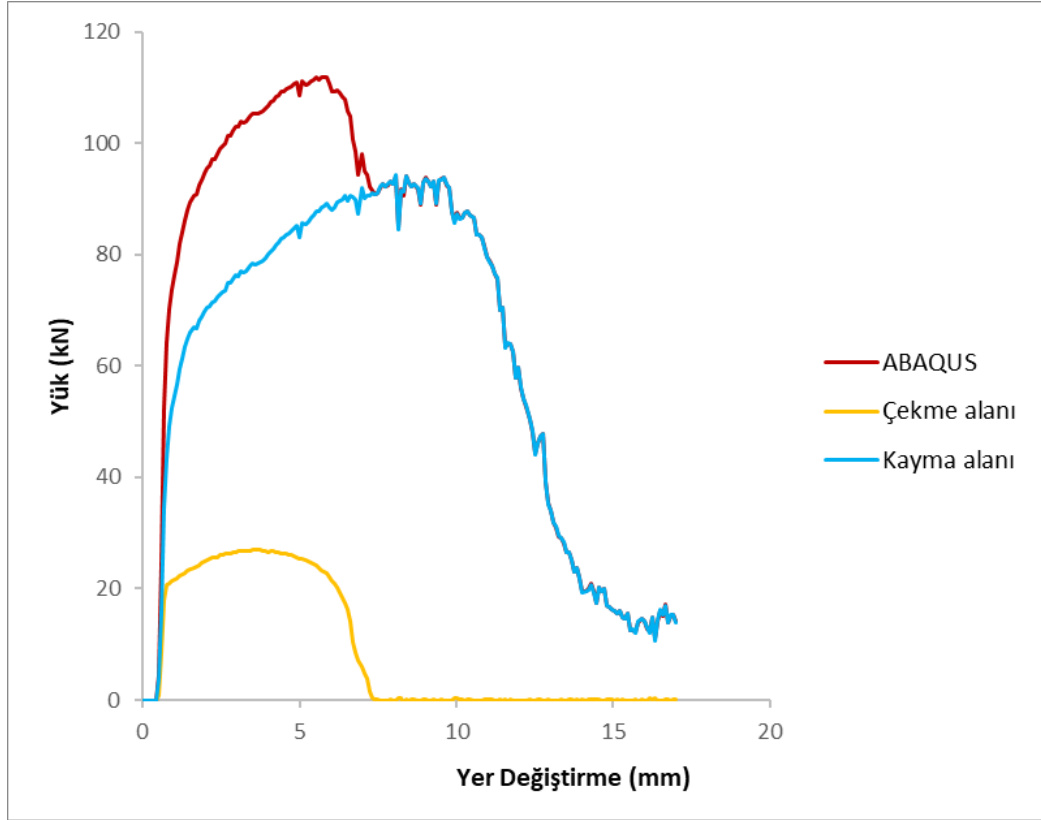
	T1 tipi numuneler için dayanım (kN)	Deneysel sonuca oranı (%)	T2 tipi numuneler için dayanım (kN)	Deneysel sonuca oranı (%)
Deneysel sonuçlar (Ortalama değeri)	111.55	-	141.26	-
ABAQUS	111.91	1.003	143.92	1.019
ÇYTHYE-2018	68.89	0.618	92.10	0.652
Eurocode 3 (EN 2005)	65.11	0.584	88.31	0.625
CSA S16-14	110.04	0.986	133.24	0.943
IS: 800 (2007)	84.52	0.758	102.66	0.727
AIJ (1990)	65.11	0.584	88.31	0.625
SBC (2007)	58.16	0.521	81.36	0.576

Deneysel çalışmada incelenen bütün blok kırılma numunelerinin sonuçları Şekil 6.24'te gösterilmektedir. T1 ve T2 tipi numunelere ait deney sonuçları karşılaştırıldığında başlangıç rijitliklerinin aynı olduğu belirlenmiştir. T2 tipi numune deneylerinde çekme alanı daha büyük olduğu için toplam yükün değeri daha büyük elde edilmiş ve çekme kırılması daha geç gerçekleşmiştir. T2 tipi deneylerde çekme kırılması gerçekleştikten sonra yük değeri T1 tipi numune deneyleri ile aynı seviyeye düşmüştür. Kayma alanında kırılma 6 deneyde de benzer yer değiştirmede meydana gelmiştir.

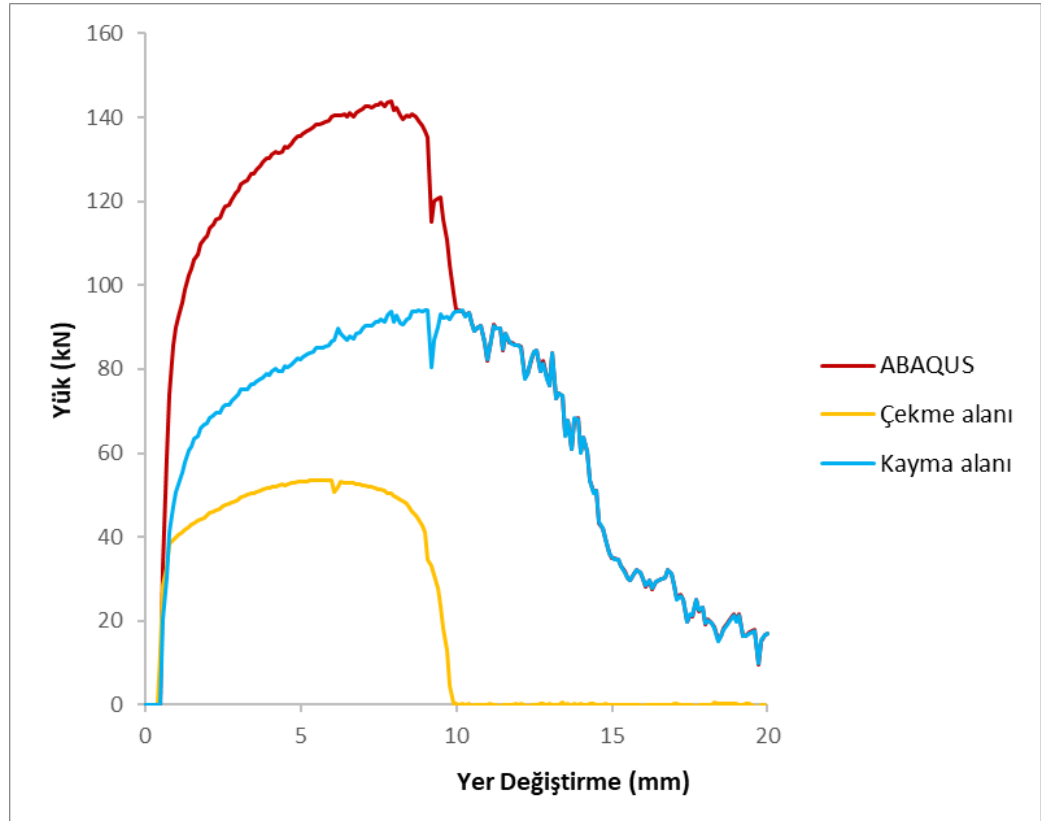


Şekil 6.24. T1A, T1B, T1C, T2A, T2B ve T2C deney numunelerine ait yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Yapılan blok kırılma deneylerinde çekme ve kayma alanlarının taşıdığı yükler ayrı ayrı bulunmaya çalışılmıştır. Malzeme özelliklerini belirlemek için yapılan S1 tipi numune deneylerinde maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra kopma noktasına kadar taşıma gücünde düşüş olduğu gözlenmiştir. S2 tipi numune deneylerinde ise kopma noktasına kadar yer değiştirme değeri arttıkça taşınan yük de artmıştır. Bu bilgilerin ışığında blok kırılma sınır durumunun olduğu T1 ve T2 tipi numunelere ait deneylerde elde edilen maksimum yükün her zaman çekme ve kayma alanlarının ayrı ayrı taşıdığı maksimum yüklerin toplamı olmayacağı sonucuna varılmıştır. Bu sebeple ABAQUS programında oluşturulan sonlu eleman modellerinde çekme ve kayma bölgelerinden aktarılan yükler ayrı ayrı elde edilmiştir. Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da T1 ve T2 tipi numunelere ait sonlu eleman modellerinde çekme ve kayma alanlarının taşıdığı yükler gösterilmektedir.

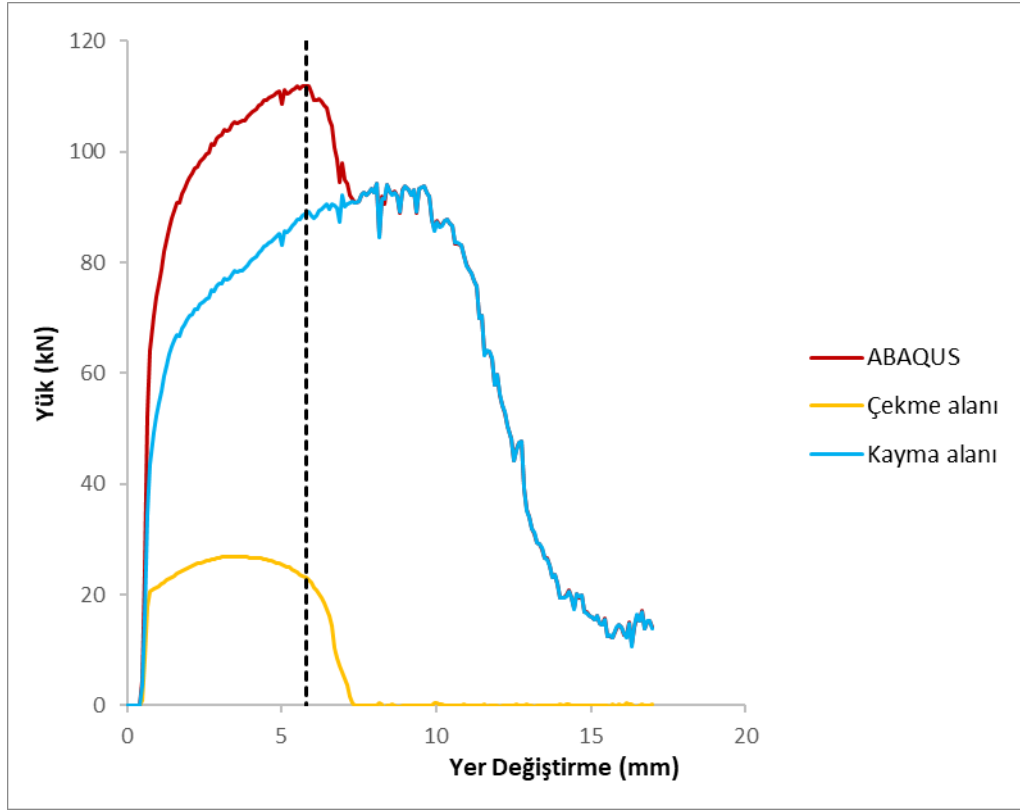


Şekil 6.25. T1 tipi sonlu eleman modelinde çekme ve kayma alanlarından aktarılan yükler



Şekil 6.26. T2 tipi sonlu eleman modelinde çekme ve kayma alanlarından aktarılan yükler

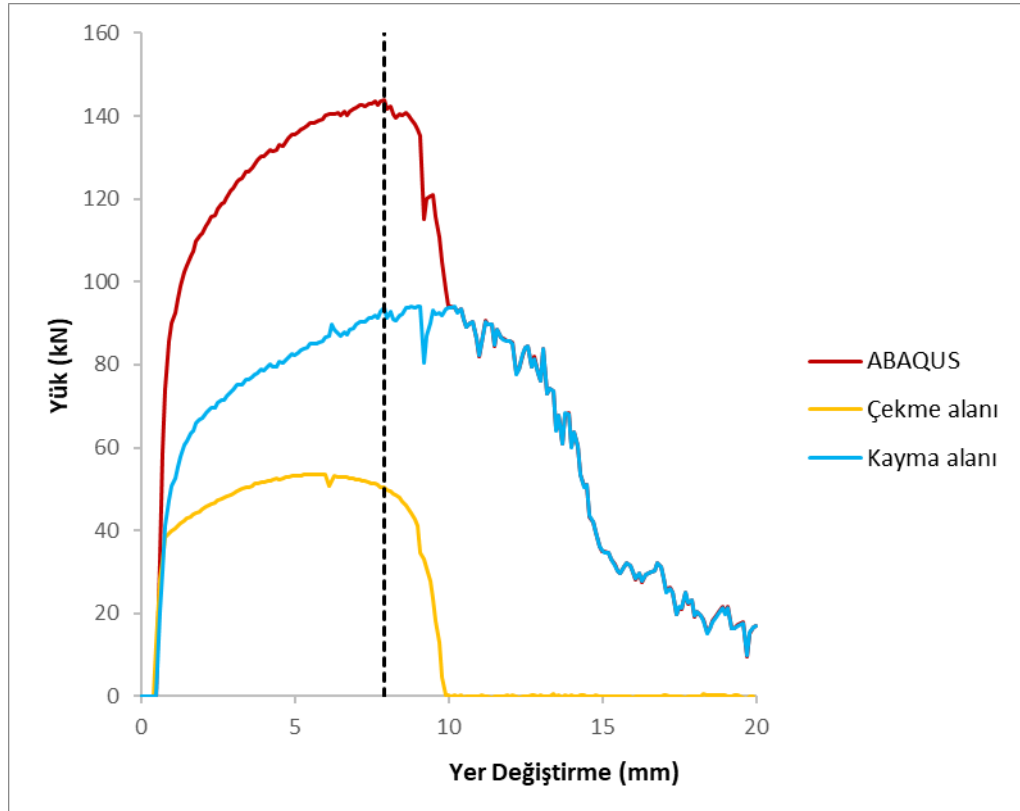
T1 numune tipi sonlu eleman modelinde çekme alanının taşıdığı maksimum yük 26.92 kN, T2 numune tipi modelinde ise 53.56 kN olarak belirlenmiştir. T2 modelindeki çekme alanı yükünün T1 modeline oranı 1.990 olarak bulunmaktadır. Bu değer T2 modeli net çekme alanının T1 modeli net çekme alanına oranı olan 2 değerine oldukça yakındır. Aynı miktarda kayma alanına sahip bu modellerde T1 modeli için kayma alanında taşınan maksimum yük 94.21 kN ve T2 modeli için 94.07 kN olarak bulunmuştur. Sonlu eleman modelinde çekme ve kayma alanlarında taşınan maksimum yüklerin eş zamanlı olarak gerçekleşmediği görülmektedir. Şekil 6.27’de T1 modeli için birleşimin taşıdığı maksimum yük değerinin çekme ve kayma bileşenleri işaretlenmiştir. Bu yük bileşenleri Çizelge 6.4’te yönetmeliklerde verilen kapasite denklemlerinin çekme ve kayma bileşenleri ile karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde T2 modeli için çekme ve kayma bileşenleri Şekil 6.28’de gösterilmiş ve Çizelge 6.5’te karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.27. T1 tipi sonlu eleman modelinde çekme ve kayma alanlarından aktarılan yükler

Çizelge 6.4. T1 tipi sonlu eleman modeli için ÇYTHYE-2018, Eurocode 3 (EN 2005), CSA S16-14, IS: 800 (2007), AIJ (1990), SBC (2007) yönetmeliklerinden elde edilen çekme ve kayma alanı dayanımlarının karşılaştırması

	Çekme alanında taşınan yük (kN)	Sonlu eleman modeli sonucuna oranı (%)	Kayma alanında taşınan yük (kN)	Sonlu eleman modeli sonucuna oranı (%)
ABAQUS	23.09	1.000	88.82	1.000
ÇYTHYE-2018	19.63	0.850	49.26	0.555
Eurocode 3 (EN 2005)	23.20	1.005	41.91	0.472
CSA S16-14	23.20	1.005	86.83	0.978
IS: 800 (2007)	36.29	1.572	48.23	0.543
AIJ (1990)	23.20	1.005	41.91	0.472
SBC (2007)	19.63	0.850	38.53	0.434



Şekil 6.28. T2 tipi sonlu eleman modelinde çekme ve kayma alanlarından aktarılan yükler

Çizelge 6.5. T2 tipi sonlu eleman modeli için ÇYTHYE-2018, Eurocode 3 (EN 2005), CSA S16-14, IS: 800 (2007), AIJ (1990), SBC (2007) yönetmeliklerinden elde edilen çekme ve kayma alanı dayanımlarının karşılaştırması

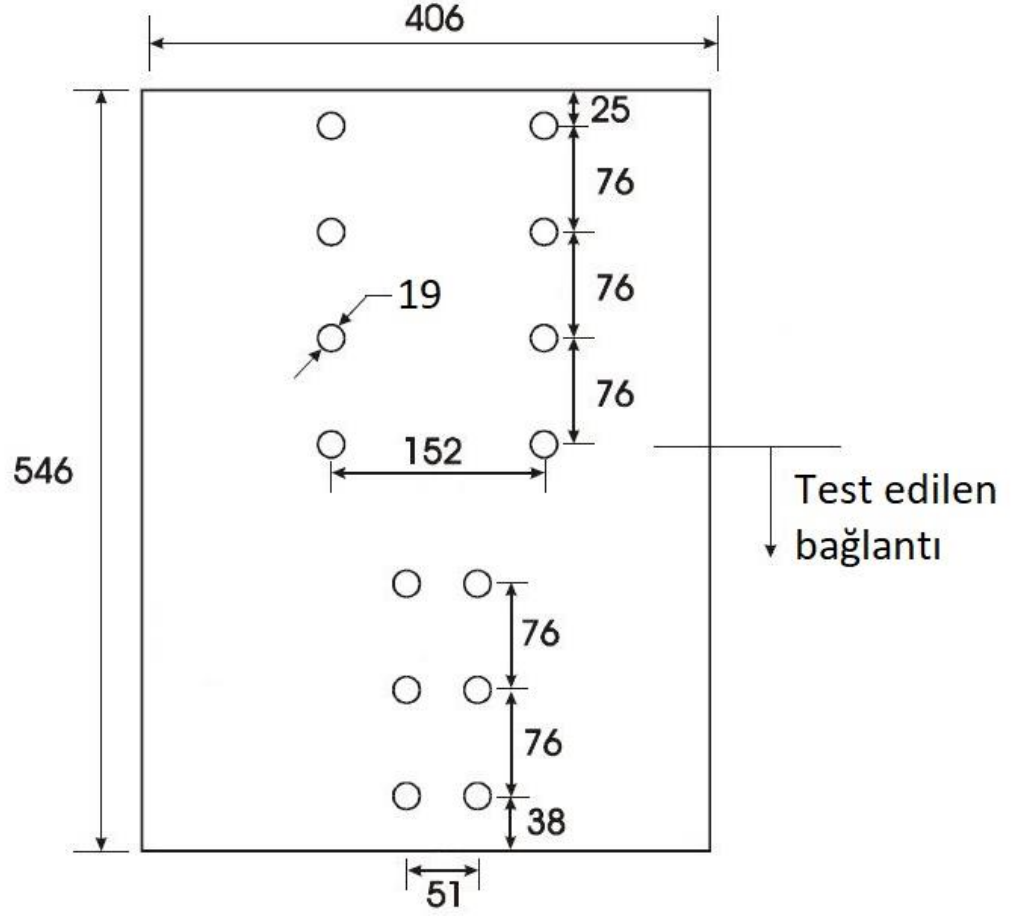
	Çekme alanında taşınan yük (kN)	Sonlu eleman modeli sonucuna oranı (%)	Kayma alanında taşınan yük (kN)	Sonlu eleman modeli sonucuna oranı (%)
ABAQUS	50.33	1.000	93.59	1.000
ÇYTHYE-2018	42.84	0.851	49.26	0.526
Eurocode 3 (EN 2005)	46.40	0.922	41.91	0.448
CSA S16-14	46.40	0.922	86.83	0.929
IS: 800 (2007)	54.44	1.082	48.23	0.515
AIJ (1990)	46.40	0.922	41.91	0.448
SBC (2007)	42.84	0.851	38.53	0.412

Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5 incelendiğinde yönetmeliklerin çekme alanında taşınan yükü, kayma alanında taşınan yüke göre daha iyi tahmin ettiği görülmektedir. Çekme alanı için yönetmelikler birbirine yakın değerler verirken kayma alanı için CSA S16-14 yönetmeliği diğer yönetmeliklerden daha iyi sonuç vermektedir. T1 tipi numunenin çekme alanında IS: 800 (2007) yönetmeliği diğer yönetmeliklere göre daha büyük hata oranına sahiptir.

6.4. Sonlu Eleman Metodolojisinin Literatürdeki Bir Deneysel Çalışma Üzerinde Uygulanması

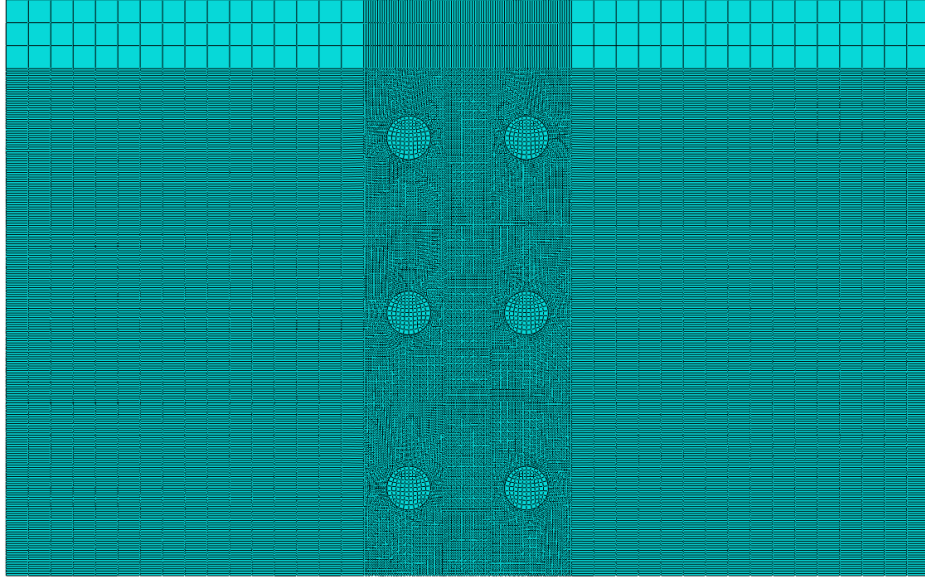
Bu bölümde daha önce elde edilen sonlu eleman metodolojisi literatürde yer alan farklı özelliklere sahip deney elemanlarının yer aldığı deneysel çalışma sonuçlarına uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Oluşturulan sonlu eleman metodolojisi Huns ve ark. (2002)'nin yaptıkları çalışmadaki tip 1 deneyi için uygulanmıştır. Tip 1 deneyi için ölçüler Şekil 6.29'da gösterilmektedir. Huns ve arkadaşları (2002) yaptıkları malzeme deneyleri sonucunda elastisite modülünün ortalama 197553 MPa, akma gerilmesini 336.3 MPa, çekme gerilmesinin 0.179 birim şekil değiştirmede 450.3 MPa olduğunu ve pekleşmenin 0.054 birim şekil değiştirmede başladığını belirtmişlerdir. Aynı ölçülerle yapılan 3 adet blok kırılma deneyi sonucunda taşınan maksimum yükler 696.0 kN, 690.8 kN ve 715.9 kN olarak belirtilmiştir.



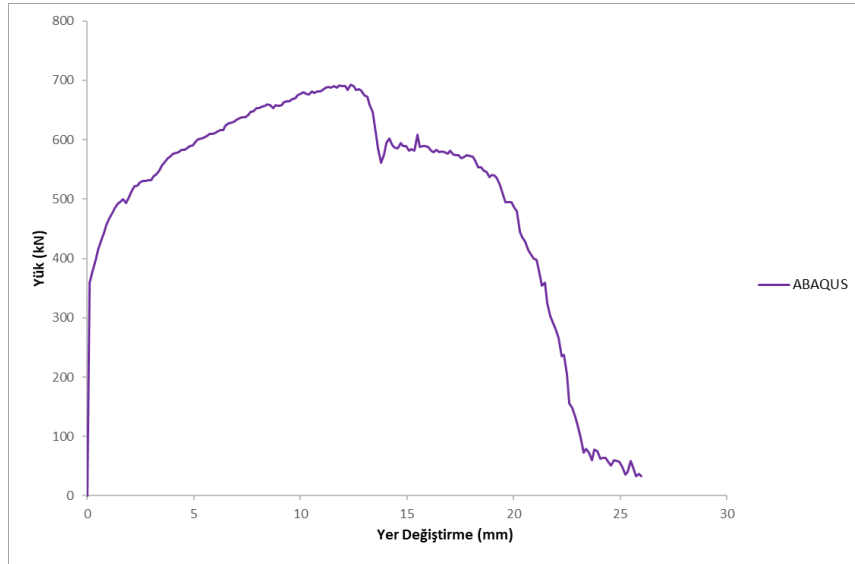
Şekil 6.29. Tip 1 numunesinin ölçüleri (Huns ve ark., 2002)

Yukarıdaki bilgilerin ışığında oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 6.30'da gösterilmektedir. Malzeme için plastik şekil değiştirmenin başladığı, pekleşmenin başladığı ve maksimum gerilmenin ulaşıldığı 3 nokta için veri girilmiştir. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi malzeme verisi son doğrunun eğiminde uzatılmıştır. Bulonlar elastik olarak tanımlanmıştır. Malzemenin akma ve çekme gerilmeleri bu çalışmada yapılan deneylerle benzerlik gösterdiği için daha önce oluşturulan hasar parametreleri bu modellerde de kullanılmıştır.

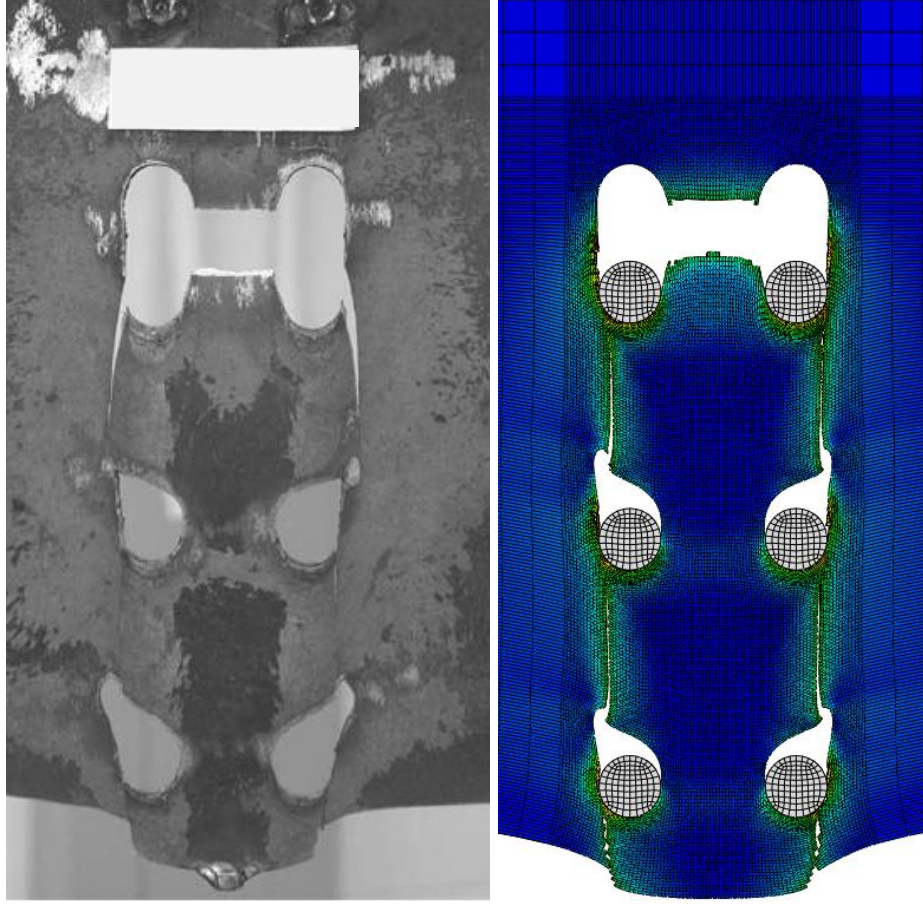


Şekil 6.30. Oluşturulan sonlu eleman modeli

Yapılan sonlu eleman analizi sonucunda Şekil 6.31'deki yük – yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Maksimum yük 3 deneyde bulunan sonucun ortalaması 700.9 kN'a göre 0.012 hata oranı ile 692.4 kN olarak belirlenmiştir. Deney sonu görüntüleri Şekil 6.32'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.31. Sonlu eleman modelinden elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi



Şekil 6.32. Huns ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışma (2002) ile ABAQUS programında oluşturulan sonlu eleman modeli görüntüleri

Ayrıca, Huns ve ark. (2002)'nin yaptığı çalışma için yönetmeliklerin önerdiği blok kırılma kapasite denklemleri sonuçları bulunmuş ve Çizelge 6.6'da karşılaştırmalar yapılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modelinin blok kırılma dayanımını yönetmeliklerden ve Huns ve ark. (2002) yaptığı sonlu eleman çalışmasından daha başarılı olarak tahmin ettiği görülmüştür. Yönetmelikler bakımından karşılaştırma yapıldığında ise önceki karşılaştırmaya benzer şekilde deneysel sonuçlara en yakın değer CSA S16-14 yönetmeliği denkleminde elde edilmiştir.

Çizelge 6.6. Literatürdeki çalışma için belirlenen mevcut yönetmeliklerin blok kırılma dayanımları ve deneysel sonuçlarla farkları

	Huns ve ark. (2002) çalışması için dayanım (kN)	Deneysel sonuca oranı (%)
Deneyisel sonuçlar	700.9	1.000
ABAQUS	692.4	0.988
Huns ve ark. (2002) oluşturduğu sonlu eleman modeli	633.0	0.903
ÇYTHYE-2018	636.0	0.907
Eurocode 3 (EN 2005)	516.8	0.737
CSA S16-14	734.3	1.061
IS: 800 (2007)	595.5	0.850
AIJ (1990)	516.8	0.737
SBC (2007)	511.9	0.730

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Blok kırılma sınır durumu çelik yapılarda çekme gerilmelerinin olduğu bölgelerde kontrol edilmesi gereken önemli bir göçme modudur. Yönetmelikler blok kırılma dayanımını tahmin etmek için denklemler önermektedir. Ancak bu denklemler her zaman yüksek doğrulukta tahminde bulunamamaktadır. Bu araştırmada blok kırılma kapasitesini yönetmeliklerin önerdiği denklemlerden daha yüksek doğrulukta hesaplamak için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının deneysel bölümü Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada S235 kalitesinde 4 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılmıştır. Malzeme özelliklerini belirlemek için 6 adet deney yapılmıştır. Çelik levha üzerinde oluşturulan bulonlu bağlantıda bulon yerleşimi değiştirilerek 2 farklı tipte deney elemanı oluşturulmuştur. İki tip numunenin herbirinden 3'er adet olmak üzere toplam 6 adet çekme deneyi yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

1. S1 tipi çekme deneylerinde malzemenin taşıma gücünde en fazla %0.4 sapma görülmüştür. Maksimum yükün olduğu yer değiştirme değerinde bu sapma %5.3 olmuştur. S2 tipi numune kayma deneylerinde ise bu değerler sırası ile %1.5 ve %13.9 olmuştur.
2. T1 tipi birleşimlerde 3 deney arasında maksimum yük %0.6 ve maksimum yükün olduğu yer değiştirme %5.8 fark göstermiştir. T2 tipi için bu değerler sırasıyla %2.6 ve %1.9 olarak bulunmuştur.
3. Yapılan sonlu eleman ağı boyutu çalışması sonucunda blok kırılma hasarının incelenmesi için 1 mm'lik sonlu eleman ağ boyutunun yeterli olduğu görülmüştür.
4. S1 ve S2 tipi numune deney sonuçlarına göre oluşturulup kalibre edilen sonlu eleman modeli, T1 tipi numune deneylerinde 3 deneyin maksimum yük değeri ortalamasını %0.3 hata ile tespit etmiştir. Çekme bölgesinde kırılma gerçekleşikten sonra ulaşılan maksimum yük değerinde ise hata oranı %2.1 olmuştur. İncelenen yer değiştirme değerlerinde ise bu hata oranı en fazla %6.7 olarak bulunmuştur. T2 tipi deneyler için bu hata oranları sırasıyla %1.9, %2.0 ve %10.0 olarak tespit edilmiştir.
5. Yönetmelikler arasında deneysel sonuçlara en yakın değerleri CSA S16-14, en farklı ve düşük değerleri SBC (2007) yönetmeliği vermiştir. Oluşturulan

sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlara yönetmeliklerden daha yakın tahminler yaptığı görülmüştür. Bulonlu bağlantılarda blok kırılma sınır durumu taşıma gücünü tahmin etmek için bu çalışmada sunulmuş olan sonlu eleman metodolojisi kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

6. Deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri sonlu eleman analizi ile yüksek doğrulukta elde edilmiştir. Bu sayede çekme ve kayma alanlarının taşıdığı yükler sonlu eleman analiz programı ile ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında yönetmeliklerin kullandığı blok kırılma kapasite denklemleri çekme ve kayma alanları için incelenmiştir. Yönetmeliklerde verilen dayanım denklemlerinin kayma alanının taşıdığı yükü belirlemekte zorlandığı tespit edilmiştir.
7. Oluşturulan sonlu eleman metodolojisi Huns ve ark. (2002) yaptığı çalışma için uygulanmıştır. Literatürdeki bu çalışmada bulon ara ve kenar mesafeleri minimum değerlerin üzerinde seçilmiştir. Sonlu eleman modelinin bu durumda da maksimum yükte %1.2 hata oranı ile yönetmeliklerden ve Huns ve ark. (2002) oluşturduğu sonlu eleman modelinden daha yüksek doğrulukta tahmin yaptığı görülmüştür.
8. Bulon ara ve kenar mesafelerinin uygulanabilirliğinin gösterilmesi ile minimum değerlerin altında seçilmesi durumunda yönetmeliklerin blok kırılma kapasitesini belirlemekteki başarısının azaldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen veriler değerlendirildiğinde bundan sonra yapılacak çalışmalarla ilgili öneriler aşağıda belirtilmiştir.

1. Farklı bulon dizilimleri ve birleşim geometrileri için blok kırılma dayanımı incelenebilir.
2. Çekme gerilmelerinin düzgün yayılmadığı durumlar için bir çalışma gerçekleştirilebilir. Sonlu eleman metodunda çekme ve kayma alanlarının taşıdığı yükler ayrı ayrı belirlenebildiği için bu bilgiler yeni blok kırılma kapasite denklemlerinin oluşturulması için kullanılabilirler.
3. Bu çalışmada bulon ara mesafeleri minimum seviyede tutulmuştur. Yönetmeliklerde izin verilen maksimum ara mesafeler kullanılarak bulon ara mesafelerinin etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2014, “ABAQUS User's Manual”, Version 6.14-4.
- AIJ (Architectural Institute of Japan), 1990, Standard for limit state design of steel structures.
- American Institute of Steel Construction, 2016, “ANSI/AISC360-16: Specification for structural steel buildings”. Chicago, America.
- ASTM B831-14, 2014, Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM E8/E8M-16a, 2016, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, West Conshohocken.
- CSA (Canadian Standards Association), 2014, Design of steel structures. CSA S16-14, Mississauga
- Cunningham T. J., Orbison J. G., Ziemian R. D., 1995, Assessment of American Block Shear Load Capacity Predictions, *J. Construct. Steel Research*, 35, 323-338.
- ÇYTHYE, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, 2018
- Driver, R. G., Grondin, G. Y., & Kulak, G. L., 2006, Unified block shear equation for achieving consistent reliability. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(3), 210-222.
- En BS (2005) Eurocode 3: design of steel structures—part 1–8: design of joints. British Standard Institute, London
- Franchuk C.R., Driver R.G., Grondin G.Y., 2003, Experimental investigation of block shear failure in coped steel beams, *Canadian Journal of Civil Engineering* ;30(5):871–81.
- Güçlü, G., 2019, http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/75/-files/Gokhan/Celik_Yapilar_2019/Celik_Yap_lar_2019_Sunum-5_v2.pdf [Ziyaret Tarihi: 4 Aralık 2020].
- Huns B.B.S., Grondin G.Y., Driver R.G., 2002, Block shear behaviour of bolted gusset plates, *Structural engineering report no. 248*, Edmonton (AB): Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
- Kara, E., 2005, A numerical study on block shear failure of steel tension members, Yüksek lisans tezi, *School of natural and applied sciences of Middle East technical university*, Department of Civil Engineering, 10-12.
- Kulak G.L., Grondin G.Y., 2001, AISC Rules for Block Shear in Bolted Connections, *Eng. J. Am. Inst. Steel Constr*, 4, 199-203

- Kulak G.L., Wu E.Y., 1997, Shear Lag in Bolted Angle Tension Members, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 123(9): 1144-52.
- Maleki, S. and Ghaderi-Garekani, M., 2020, Block shear failure in welded gusset plates under combined loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 170, p.106079.
- Oosterhof, S.A., and Driver, R.G., 2008, Block shear behaviour of concentrically loaded welded steel lap plate connections. In *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference*, Quebec City, QC, Canada (pp. 10-13)
- Oosterhof, S. A. and Driver, R. G., 2011, Effects of connection geometry on block shear failure of welded lap plate connections, *Journal of Constructional Steel Research* (67). 525-532.
- Saudi Building Code National Committee (SBCNC), 2007, Saudi building code. SBC 306
- Standard BI (2007), General construction in steel-code of practice. 3rd Revision, Bureau of Indian Standard, New Delhi. IS2007:800-2007
- Teh, L. H. and Clements, D., 2012, Mechanisms of block shear failure of bolted connections, *21st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction* (pp. 583-597).
- Topkaya C, 2004, A Finite Element Parametric Study on Block Shear Failure of Steel Tension Members, *Journal of Constructional Steel Research*, 1615-35
- Topkaya C., 2007, Block shear failure of gusset plates with welded connections, *Engineering Structures*, 29(1):11-20