

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CIVATA-SOMUN BAĞLANTILI ELEMANLARDA DELİKLER  
ARASI MESAFENİN VE DELİK ÇAPININ ÇEKME  
MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

**GÖZDE DEMİR KÜÇÜKATALAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**2010**



**CIVATA-SOMUN BAĞLANTILI ELEMANLARDA DELİKLER  
ARASI MESAFENİN VE DELİK ÇAPININ ÇEKME  
MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

**THE EFFECTS OF DISTANCE BETWEEN FASTENER  
HOLES AND HOLE DIAMETER ON TENSILE STRENGTH  
OF BOLT AND NUT JOINTS**

**GÖZDE DEMİR KÜÇÜKATALAY**

Başkent Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
MAKİNE Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan (Danışman) :  
Prof. Dr. Faruk ELALDI

Üye :  
Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Üye :  
Yrd. Doç. Dr. Cenk BALÇIK

**ONAY**

Bu tez 15 / 09 / 2010 tarihinde, yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

/ 09 / 2010

Prof.Dr. Emin AKATA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

## TEŐEKKÜR

Çalışmalarım boyunca karşılaştığım her zorlu yolda bana ışık gosteren ve katkılarıyla beni yonlendiren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Faruk ELALDI' ya, bilgilerini ve desteğini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Cenk BALÇIK 'a teőekkürlerimi arz ederim. Malzeme ve üretim konusunda destekleri nedeniyle 1. Ana Bakım Merkezi Komutanlığı' na teőekkürlerimi sunarım.

TAI' de çalışma fırsatı bulduğum yapısal analiz şefim Sayın Dr. Muvaffak HASAN'a sonlu eleman analizi konusunda yardımları için, iř arkadaşlarım Sayın Enver ÖZAKKAŐ, Sayın Muhsin ÖCAL'a, yakın arkadaşlarım Sayın S. Esra BİDECI' ye ve Sayın N. Ezgi İPEK' e desteklerinden ötürü teőekkür ederim.

Beni bu günlere getiren ve eğitimin her daim önemini benimseten annem Elmas DEMİR'e ve babam Ersin DEMİR'e, manevi desteği olmadan asla başaramayacağım sevgili eşim Atakan KÜÇÜKATALAY'a bu tezimi ithaf ediyorum.

## ÖZ

### **CIVATA-SOMUN BAĞLANTILI ELEMANLARDA DELİKLER ARASI MESAFENİN VE DELİK ÇAPININ ÇEKME MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

Gözde DEMİR KÜÇÜKATALAY

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışmada MIL A 46100 yüksek alaşımlı zırh çeliğinden yapılmış plakaların civata somun bağlantı elemanlar ile yatay ekseninde birleştirilerek, civata deliklerinin arasındaki mesafe ve delik çap büyüklüğünün çekme yükü altındaki davranışı incelenmiştir. M10, M10-A, M10-B, M12, M12-A, M12-B konfigürasyonları için MSC Nastran & Patran yazılımı kullanılarak çeşitli yükler altındaki akma erişimleri irdelenmiş ve M10, M12 numuneleri için çekme testi yapılmıştır. Deneyden elde edilen deformasyon geometrisi ve akma noktasındaki yük değeri, sayısal modelden elde edilenler ile paralellik göstermektedir. Çapı 12 mm olan modellerin yatak izdüşüm alanının büyük olması ve delik çevresindeki gerilme konsantrasyon etkisinin mesafe arttıkça düşmesinden dolayı aynı büyüklüklerdeki yüklemelerde akma noktasına en son ulaşan konfigürasyonun M12-B konfigürasyonu olduğu yani en son kalıcı deformasyona M12-B'nin uğradığı belirlenmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** MIL A 46100, zırh çeliği, sonlu eleman analizi, civata bağlantıları, çekme mukavemeti.

**Danışman:** Prof. Dr. Faruk ELALDI, Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECTS OF DISTANCE BETWEEN FASTENER HOLES AND FASTENER HOLE DIAMETER ON TENSILE STRENGTH OF BOLT-NUT JOINTS**

Gözde DEMİR KÜÇÜKATALAY

Başkent University Institute of Science and Engineering

Mechanical Engineering Department

In this study the effects of distance between fastener holes and fastener hole diameter for MIL A 46100 high strength armor steel samples, mounted by bolts and nuts, were investigated. Finite element analysis was performed for various forces for M10, M10-A, M10-B, M12, M12-A, M12-B configurations by using Nastran & Patran software. Tensile strength test was carried out only for M10 and M12 cases. Finally, it was observed that the deformation geometry of the test specimens was compatible with the shape obtained from FEM. Since the bearing area was higher at 12 mm diameter hole models and an increase in distance between fastener holes caused a decrease in stress concentration at the vicinity of the holes, the most effective configuration for carrying higher tensile load was found to be M12-B.

**KEYWORDS:** MIL A 46100, armor steel, finite element analysis, bolt-nut joints, tensile strength.

**Supervisor:** Prof. Dr. Faruk ELALDI, Başkent University, Mechanical Engineering Department.

# İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZ</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER LİSTESİ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>EKLER LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ZIRH ÇEŞİTLERİ</b> .....	<b>6</b>
2.1. Seramik Zırhlar .....	6
2.2. Şeffaf Zırhlar .....	6
2.3. Kompozit Zırhlar .....	7
2.4. Titanyum Zırhlar .....	7
2.5. Zayıflatılmış Uranyum Zırhlar .....	7
2.6. Alüminyum Zırhlar .....	8
2.7. Çelik Zırhlar .....	8
<b>3. ZIRH ÇELİKLERİ</b> .....	<b>9</b>
3.1. Zırh Çelik Tipleri .....	9
3.1.1. Karbon yüzdesine göre zırh çelikleri.....	9
3.1.2. Sertliklerine göre zırh çelikleri.....	9
<b>4. PROBLEMİN TANIMI</b> .....	<b>11</b>
<b>5. ÇEKME TESTİ</b> .....	<b>13</b>
5.1. Kullanılan Malzeme .....	13



5.2. Numune Boyutları .....	13
5.2.1. Numune boyutlarının belirlenmesinde temel kavramlar .....	13
5.2.2. Paralel uzunluğun genişlik değeri .....	14
5.3. Cıvata Seçimi .....	14
5.3.1. Cıvatalı bağlantıların diğer bağlantı şekillerine göre avantajları .....	14
5.3.2. Cıvataların belirlenmesi .....	15
5.4. Numune Boyutları .....	17
5.5. Deney Düzeneği ve Deneyin Yapılışı .....	19
5.6. Deneyden Elde Edilen Veriler .....	21
<b>6. SONLU ELEMAN MODELİ .....</b>	<b>28</b>
6.1. Sayısal Modelin Hazırlanması .....	28
6.1.1. Ağ yapısı ve eleman seçimi .....	28
6.1.2. Malzeme .....	30
6.1.3. Sınır koşullarının tayini .....	31
6.1.4. Sayısal modelin malzeme yönünden kontrolü .....	31
6.2. Çözüm .....	35
<b>7. DENEYSEL ve SAYISAL MODELDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR .....</b>	<b>39</b>
7.1. Sayısal Modelden Elde Edilen Sonuçlar .....	39
7.2. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Sonuçlar .....	43
7.3. Deney ile Sayısal Modelden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması .....	47
<b>8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>50</b>
8.1. Sonuç .....	50
8.2. Öneriler .....	50
<b>KAYNAKLAR LİSTESİ .....</b>	<b>51</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>61</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1 Çelik numunenin cıvatalı bağlantı geometrisi .....	11
Şekil 4.2 Deformasyon modları: net kesit alanı kopması, yataklarda yırtılma ve yatak deformasyonu .....	12
Şekil 5.4.1 M12 cıvata delikli numune boyutları.....	18
Şekil 5.4.2 M10 cıvata delikli numune boyutları.....	19
Şekil 5.5.1 Montajı yapılmış ve henüz deforme olmamış test numunesi .....	20
Şekil 5.5.2 Testin yapıldığı çekme cihazı .....	21
Şekil 5.6.1 Akma noktası belli olmayan malzemeler için kaydırma metodu.....	22
Şekil 5.6.2 M10-1 için kuvvet-gerinim grafiği. ....	23
Şekil 5.6.3 M10-2 için kuvvet-gerinim grafiği. ....	23
Şekil 5.6.4 M10-3 için kuvvet-gerinim grafiği. ....	24
Şekil 5.6.5 M12-1 için kuvvet-gerinim grafiği. ....	24
Şekil 5.6.6 M12-2 için kuvvet-gerinim grafiği. ....	25
Şekil 5.6.7 M12-3 için kuvvet-gerinim grafiği. ....	25
Şekil 5.6.8 M12 numunesinin çekme sonrası görünümü. ....	26
Şekil 5.6.9 M10 numunesinin çekme sonrası görünümü. ....	27
Şekil 6.1.1.1 Montaj halinin ağ gösterimi. ....	29
Şekil 6.1.1.2 Plakalar haricinde kalan bölümün ağ atım gösterimi.....	29
Şekil 6.1.2.1 Sonlu eleman modeline tanımlanan MIL A 46100 çeliğinin gerinme-gerinim grafiği.....	31
Şekil 6.1.4.1 Hazırlanan çekme testi numune modeli.....	32
Şekil 6.1.4.2 F=100kN için elde edilen gerinim dağılımı ve değerleri. ....	33
Şekil 6.1.4.3 F=405kN için elde edilen gerinim dağılımı ve değerleri. ....	33
Şekil 6.1.4.4 F=459kN için elde edilen gerinim dağılımı ve değerleri. ....	34
Şekil 6.2.1 M10 konfigürasyonun SEM deformasyon şekli. ....	36
Şekil 6.2.2 M10-A konfigürasyonun SEM deformasyon şekli. ....	36
Şekil 6.2.3 M10-B konfigürasyonun SEM deformasyon şekli. ....	37
Şekil 6.2.4 M12 konfigürasyonun SEM deformasyon şekli. ....	37
Şekil 6.2.5 M12-A konfigürasyonun SEM deformasyon şekli. ....	38

Şekil 6.2.6	M12-B konfigürasyonun SEM deformasyon şekli. ....	38
Şekil 7.1.1	d=10 değerine sahip modellerin kuvvet gerilme değerleri.....	41
Şekil 7.1.2	d=12 değerine sahip modellerin kuvvet gerilme değerleri.....	42
Şekil 7.2.1	M10-1 numunenin gerilme gerinim eğrisi.....	44
Şekil 7.2.2	M10-2 numunenin gerilme gerinim eğrisi.....	44
Şekil 7.2.3	M10-3 numunenin gerilme gerinim eğrisi.....	45
Şekil 7.2.4	M12-1 numunenin gerilme gerinim eğrisi.....	45
Şekil 7.2.5	M12-2 numunenin gerilme gerinim eğrisi.....	46
Şekil 7.2.6	M12-2 numunenin gerilme gerinim eğrisi.....	46
Şekil 7.3.1	DeneySEL ve sayısal çalışmaların deformasyon geometrisi. ....	49

## ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1.2.1 MIL A 46100 çeliği kimyasal bileşenleri. ....	10
Çizelge 4.1 Tüm konfigürasyonların boyut değerleri . ....	12
Çizelge 5.1.1 MIL 46100 çeliği malzeme özellikleri .....	13
Çizelge 6.1.1.1 Modellerdeki düğüm ve eleman sayısı. ....	30
Çizelge 6.1.4.1 Gerilme-gerinim eğrisinden okunan değerler ve modelden elde . edilen veriler .....	35
Çizelge 7.1.1 Sonlu eleman modelinden (SEM) elde edilen veriler. ....	39
Çizelge 7.2.1 M10 ve M12 için deneyden elde edilen ortalama akma noktası . değerleri.....	47
Çizelge 7.3.1 Sayısal model ve deneysel veriler arasındaki hata oranı. ....	47

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	Alan ( $\text{mm}^2$ )
d	Cıvata çapı, (mm)
F	Kuvvet (kN)
FEA	Finite Element Analysis
HB	Brinell Sertlik Değeri
MPC	Çok Noktalı Sınırlama (Multi Point Constrain)
P	Yatak kesit alanına düşen kuvvet, (kN)
$P_{cvt}$	Cıvata üzerine gelen yük (kN)
SEM	Sonlu Eleman Modeli
SPC	Tek Noktalı Sınırlama (Single Point Constrain)
$\sigma_{\zeta}$	Çekme gerilmesi
$\sigma_{max}$	Maksimum gerilme
$\sigma_{net}$	Net kesit alanındaki gerilme
$\sigma_{ytk}$	Yatak Gerilmesi
$\tau$	Kayma gerilmesi

## EKLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Ek 1 Konfigürasyonların Boyutları .....	54
Ek 2 MIL 46100 Çeliği Çekme Testi Sonucu .....	58

## 1. GİRİŞ

Bağlantı elemanlarının fonksiyonu yük iletmektir. Bu amaç için çeşitli bağlantı tipleri olan perçinli, cıvatalı, kör delikli bağlantı, kaynak bağlantıları vb bağlantı sistemleri geliştirilmiştir. Bunların içinde cıvata-somun bağlantı tipleri önemli bir yer tutar. Cıvata somun ikilisi sökülebilen makine elemanlarıdır. Bu özellikleri sebebiyle diğer bağlantı tiplerine göre kolayca sökülüp takılabilir ve montaj sonrasında malzeme üzerinde hasara neden olmaz [1].

Bağlanacak elemanlarda sadece bir delik delme ve vida açma işlemini gerektirdiği, cıvataların standart oluşları ve bu nedenle de çok sayıda üretilmesi düşünüldüğünde ekonomik bir bağlama yöntemidir. Cıvata bağlantıları genellikle eksenel kuvvetle zorlanacak şekilde düzenlenirler [2].

Endüstride kullanım alanı olarak geniş yere sahip olan cıvata-somun bağlantı elemanlarının en yaygın kullanım şekli bindirme veya alın plaka bağlantılarıdır. Yük transferi, plakaların yataklarına etkileyen yüklerle ve bağlantı elemanına etkileyen kayma yükleriyle gerçekleşir [3].

Koruyucu amaçlı olarak kullanılan zırh malzemeleri gerek sivil gerekse askeri amaçlı birçok kara, hava, deniz ve uzay aracında kullanım alanı bulmuştur. Kompozit ve yüksek performanslı alüminyum ve titanyum esaslı alaşım zırhların geliştirilmesine karşın, geleneksel çelik zırhlar günümüzde halen ağır zırhlı kara araçları ve sabit zırhlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Tank ve benzeri savunma amaçlı araçlarda en yaygın olarak zırh çeliğinin kullanılmasının başlıca nedenleri bu çeliklerin sahip olduğu yüksek dayanım, yeterli tokluk, iyi kaynaklanabilirlik gibi malzeme özellikleri ve çeliklerin diğer zırh malzemelerine göre daha düşük olan üretim maliyetleridir [5].

Zırh çeliğine ihtiyaç duyulan platformlarda kullanılma şekilleri dikkate alındığında malzemenin üzerindeki yük dağılımına bağlı olarak kaynak ve cıvata-somun bağlantılı sistemler, birleştirme elemanları olarak kullanılırlar. Yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı cıvata-somun bağlantı elemanları kullanım alanı olarak

kaynaklı bağlantılara göre daha çok tercih edilen birleştirme şeklidir. Ancak hafif veya ağır taşıtların engebeli arazilerdeki hareketlerinden dolayı özellikle zırh çeliklerinin civata delik bölgelerinde yorulma dirençlerinin yüksek olması ve kalıcı deformasyona izin verilmemesi gereklidir. Bu çalışmada civata-somun bağlantılı yüksek mukavemetli zırh çeliğinin belirli bir çekme yükü altında delik çevresindeki mekanik davranışları incelenmiştir.

Bu konuya benzer daha önceden yapılmış çalışmalarda; Karagöz Ş., ve Atapek H., [6] “Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı” adlı çalışmalarında, bor katkılı sac çeliklerine uygulanan değişik ısı işlemler sonrası elde edilen mikroyapı karakteristiği ve bu mikro yapıların mekanik test değerlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Ayrıca darbe testi ve kırılma yüzeylerindeki incelemeler sonrasında malzemenin kırılma davranışını belirlemiştir. Bu çalışmanın sonucunda sertleştirilmiş ve temperlenmiş çeliğin mikroyapısının oldukça homojen olduğu tespit edilmiş ve kırılma sonrası çelik içi çatlak başlangıç yönleri belirlenmiştir.

Saylan S., [7] genellikle çatı döşemeleri, zemin döşemeleri, duvar panelleri ve köprülerde kullanılan G300 ve G550 soğuk çekilmiş saclarla yapılan civatalı bağlantıların tasarımında, AS/NZS 4600, AISI gibi ulusal standartlar için çekme yükü altında meydana gelen üç farklı hata modunu incelemiştir. Deneyleri yapılan 0.42 mm kalınlığında G300 ( $\sigma_c=300$  Mpa) yumuşak sac ve 0.8 mm kalınlığında G550 ( $\sigma_c= 550$  Mpa) yüksek mukavemetli saclarla yapılan bağlantıların maximum yük taşıma kapasitesi, kesilmiş sacın şekline ve boyutlarına; civata tipine, sayısına ve sac üzerine yerleşimine bağlı olarak incelenmiştir. Yuva hatası, kenar yırtılması, net kesit hatası ve civata kesilmesi gibi olası hata modları çekme testi sonrasında irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan deneylerde, sadece G300 yumuşak çelik malzemesi için AISI ve AS/NZS 4600 tasarım standardının kenar yırtılma formülü gerçek değere yakın bir tahmin sağlayabilmiştir. Bunlara ek olarak sac malzemenin yırtıldığı civata bağlantılarında deformasyonların yuva hata moduna ait olabileceği düşünülmüştür.

Bouchair A. ve diğerleri, [8] çelik yapılarıdaki en yaygın bağlantı şekilleri olan bindirmeli plakalar ve alın bağlantılı plakalardaki civata bağlantıların çekme ve



kayma yükleri altındaki davranışlarını hem sayısal hem de deneysel çalışmalarla incelemişlerdir. Deneysel ve nümerik çalışmalardan elde ettiği sonuçlar, yatağa etkiyen deformasyon sınır kriterlerinin bindirmeli plaka bağlantılarında göz önünde tutulması ve alın plaka bağlantıları göstermiştir ki yüksek dayanımlı paslanmaz çelik, karbon çeliklerine göre daha sünek davranış sergilemektedir.

Eruslu ve Arkadaşları, [9] cıvatalı bağlanmış soğuk çekilmiş levha malzemelerin kayma gerilmesi altındaki yapısal davranışı ve yük taşıma kapasitesini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmalarında G300 ve G550 malzemelerini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar boyut faktörü ihmal edildiğinde en önemli hasarın cıvata yatağı çevresinde olduğunu, akma kriteri baz alındığında rondela çapı arttıkça yük taşıma kapasitesinin düştüğünü ve G300 malzemesinde elde edilen verilerde G550 malzemesine göre akma bölgesinin daha geniş alanda görüldüğünü tespit etmişlerdir.

Ling Y. , [10] çekme testinde malzemenin boyun vermesi anından hemen sonra gerçek gerilme gerinim eğrilerinin etkin bir şekilde bulunması için yeni geliştirilen ağırlıklı ortalama metodu ile yaygın kullanıma sahip olan Bridman metodunu hem sayısal hem de deneysel analizler yapılarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunda gerçeğe en yakın gerilme gerinim eğrisinin yeni hesaplama yöntemi olan ağırlıklı ortalama metodu ile hesaplanmış değerler olduğu sonucuna varmıştır.

Ruifen Q. ve Dingping, Z., [11] bir helikopterdeki iniş takımlarının elastisite-plastisite ve doğrusal olmayan deformasyon analizini MSC Nastran programı kullanarak yapmışlardır. Gerinimin lokal olarak yüksek olduğu alanlarda, büyük deformasyonlarda doğrusal olmayan lineer analizi kullanmışlardır. Programdan aldıkları sonuçların doğruluklarını statik testlerle ilişkilendirmişlerdir.

Oka S. ve arkadaşları, [12] araçlardaki kontrol kolunun çarpma yükü deformasyonunun elastik limiti aşmasından dolayı parçanın bu koşullar altında doğrusal olmayan statik analizini ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmanın doğruluğunu 'cedimento' adı verilen test düzeneği

ile kanıtlamışlardır. Elde ettikleri sonuçta araçlarda kullanılan kontrol kolunun üzerine gelen yükler hedeflenen büyüklükte çıkmıştır.

Kim, J.; Yoon, J. ve Kang, B.; tarafından yapılan çalışmada [13] çelik bir malzemenin bindirmeli plaka bağlantılarında civatalar yardımıyla bağlanan yapının simülasyonu için dört farklı civata bağlantısını temsil eden konfigürasyon modellerinin sonlu eleman analizi yapılmış ve dört farklı model için yapılan çalışmaların deney verileriyle uyumluluğu ölçülmüştür. Modeller şu şekildedir;

Model 1, civata “kati” elemanlar ile üç boyutlu olarak modellenmiş ve civata ile yapı arasında “kontak” elemanlar tanımlanmıştır.

Model 2, civatalar tek boyutlu kiriş elemanı ile modellenmiş olup yapıya çok noktalı sınırlama (MPC) yardımıyla bağlanmıştır.

Model 3; model 2’den farklı olarak civatanın ön gerilmesini temsilen civata başının oturduğu bölge tek noktadan sınırlama (SPC) yardımıyla altı eksen hareketi için sınırlanmıştır.

Model 4, son olarak civata bağlantısını temsil eden eleman yerine, sadece civatanın oturduğu yüzeylere basınç şeklinde ön gerilme verilmiştir.

Tüm modellerde, civataların kesme yükü altında çalışırken verdiği sonuçlar deney verileri ile karşılaştırıldığında aradaki farkın yer değiştirme cinsinden  $2 \times 10^{-5}$  mm olduğu görülmüştür.

Bursi, O. ve Jaspert, J.; tarafından yapılan bir diğer çalışmada [14] ise civataların yük altında hem ön gerilmeli, hem de ön gerilmesiz sonlu eleman modellerinin deney verileri ile karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak kesme yüküne maruz kalan civatalarda, ön gerilme değerlerinin etkisinin düşük olduğu görülmüştür.

Literatür araştırmalarında, zırh çelikleri kullanılarak yapılan civata-somun bağlantılarının mekanik özellikleri üzerine detaylı çalışmaya rastlanmamıştır. Tank ve benzeri araçların üzerine montajı yapılan her bir bağlantı elemanının ağırlığı adet bazında toplandığında araç üzerinde ciddi ağırlık artışına neden olur. Bu çalışmanın amacı, tankın çalışma ve dayanım koşullarından ödün vermeden en az

miktarda civata-somun bağlantı elemanı kullanarak uygun delikler arası mesafe ve çap boyutlarının belirlenmesidir. Ayrıca literatürdeki boşluğu doldurmak ve gelecekte zırh çeliklerindeki civata-somun bağlantıları üzerine yapılacak çalışmalara kaynak sağlamak amacı güdülmüştür. Yapılan araştırma kapsamında zırh çelikleri için delik çap büyüklüğü ve delikler arası mesafe olmak üzere iki farklı parametrede, gerek deneysel gerekse sayısal verilerden elde edilen sonuçlar kıyaslanarak bir optimizasyon çalışması yapılmıştır.

## 2. ZIRH ÇEŞİTLERİ

Günümüzde savunma sanayinin en önemli parçası olan zırh ihtiyaç alanlarına göre üç ana başlıkta malzeme çeşitliliği göstermektedir. Bunlar;

1) Seramik ve Cam Zırhlar: Oksit esaslı alumina, zirkonya, oksit-dışı esaslı bor karbür, silikon karbür, borür ve nitrürler; sermet esaslı alumina/alüminyum, silikon karbür/alüminyum; camlar: S-2 zırh camları,

2) Metalik Zırhlar: Sert çelikler, zırh çelikleri, hafif alüminyum alaşımları, hafif titanyum alaşımları,

3) Polimer Kompozit Zırhlar: Cam takviyeli plastik lamineler, aramid elyaf takviyeli plastikler, kevlar petek sandviç paneller, karbon kompozitler [15].

### 2.1. Seramik Zırhlar

Seramik esaslı malzemelerin özellikle hafif zırhlı sistemlerin bir parçası olarak kullanılmasındaki temel neden yüksek sertlik ve düşük yoğunluk göstermeleridir. Ancak seramikler gevrek kırılma mukavemetine sahip olmaları nedeniyle maruz kalacakları yükün şiddetine göre kolaylıkla kırılabilirler.

Hafif zırh yapımında kullanılan seramik malzemeler arasında bor karbürün yanısıra alumina, silisyum karbür, titanyum diborür, alüminyum nitrür gibi malzemeler sayılabilir [16].

### 2.2. Şeffaf Zırhlar

Şeffaf zırhlar ışık veya diğer elektromanyetik radyasyon geçirimi istenilen ekipmanlarda, zırh koruması için etkili bir yöntem sağlarlar. Bunlara örnek olarak yüz-siperlikleri, gözlükler, araç camları, pencereler ve radar kubbeleri gösterilebilir. Şeffaf zırhlar, birçok askeri, sivil sistem ve ekipmanlara uygulanıyor sa da göreceli düşük kütle yoğunluğu ve gelişmiş şeffaf zırh malzemelerinin yüksek maliyeti bunların kullanımını sınırlamaktadırlar [17].

### **2.3. Kompozit Zırhlar**

Kompozit malzemeler yaygın şekilde havacılık, deniz taşıtları otomotiv, makine, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler genelde bir veya birkaç çeşit elyaf, çeşitli rijit parçacıkların reçinelerle veya metal/seramik matrislerle değişik şekillerde sürece sokulması sonucu elde edilirler. Bu amaçla kullanılan reçinelerin başlıcaları; epoksi, fenol, poliester ve üretan reçinelerdir. Pekiştirici olarak kullanılan elyaflar ise cam karbon, seramik, aramid ve karışık elyaf olabilmektedir. Bazen de elyaf yerine elyaftan üretilmiş keçe veya dokuma kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajları; fiziksel özelliklerinin ayarlanabilmesi, hafiflikleri, ağırlıklarına oranla yüksek mukavemet, uzun yorulma ömrü, kimyasal dayanım ve karmaşık şekillerin imalatıdır. Dezavantajları ise tasarım karmaşıklığı, analiz hesapları ve standart parça üretimindeki güçlüklerdir [18].

### **2.4. Titanyum Zırhlar**

Geliştirilen ilk titanyum alaşımlarının balistik testler sonucunda aşırı derecede gevrek oldukları tespit edilmesine rağmen zırh malzemesi olarak geliştirilmeye devam edilmiştir. Günümüzde yaygın kullanılan ve titanyum zırh alaşımı olarak tercih edilen malzeme Ti-6Al-4V' dir.

### **2.5. Zayıflatılmış Uranyum Zırhlar**

“Zayıflatılmış Uranyum (Depleted Uranium/DU)”, uranyumun yüksek radyoaktifiteli izotoplarının nükleer santrallerde yakıt olarak veya nükleer silahlarda kullanılmak üzere ayrıştırılması sonucunda geride kalan atıktır. DU diğer malzemelere göre balistik avantajları nedeniyle, zırhlarda ve standart bir NATO mühimmatı olarak anti-zırh silahlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda bazı çevrelerce, DU' nun savaş ortamı dışında insan ve çevre sağlığı açısından bir tehdit oluşturduğu ileri sürülmektedir [19].

## **2.6. Alüminyum Zırhlar**

Hava araçlarında (uçak, helikopter gibi) alüminyum malzemesi yaygın olarak kullanılır. Al 2024-T3 ve 7075-T6 malzeme tipleri zırh malzemeleri olarak tercih edilmişlerdir.

## **2.7. Çelik Zırhlar**

Savunma Sanayiinde, çelik malzemesinin zırh olarak kullanımı yaygındır. Geniş kullanımlarından dolayı çelik malzeme, diğer tüm zırhların değerlendirilmesinde karşılaştırma standardı olarak kullanılır.

Çelikler diğer zırh malzemelerine göre bazı avantajlara sahiptirler. 10 cm' lik bir çelik zırh plakanın 60 derecelik bir açıyla eğimlendirilmesi ile etkinliği, yaklaşık iki katı kalınlıktaki bir plakanın etkinliğine eşit olacak seviyede artırılabilir. Çelikler, çarpan mermileri bertaraf etmekteki etkinliklerinin yanı sıra, diğer zırh malzemelerine göre daha az maliyetlidirler. Mükemmel, kaynaklanabilir, dayanıklı, şekillendirilebilir, korozyona dirençli, diğer yapısal unsurlarla uyumlu ve onarılabilir malzemedir.

Çeliklerin maruz kalacakları yükün büyüklüğüne göre gerek statik gerekse dinamik koşullar altındaki dayanıklılığından ödün vermeden tokluk ve sertlik nitelikleri değiştirilebilir [15].

### 3. ZIRH ÇELİKLERİ

Zırhlı araçların maruz kalacakları kuvvet ve en zorlu yükleme koşulları altında özellikle bağlayıcı eleman deliklerinde meydana gelebilecek yorulma, çatlak oluşumu ve deformasyona karşı dirençli olmaları gereklidir. Bu nedenle günümüzde tank ve benzeri savunma amaçlı araçlarda en yaygın kullanılan zırh malzemesi çeliktir [20].

Zırh malzemeleri düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelikler sınıfına girer. Kaliteli homojen bir mikroyapı içermelidir. Yüksek temperlenmiş çelik çökeltili sertleşen martenzik bir mikroyapı içermektedir. Bu nedenle haddeme ile elde edilecek sac kesitinde sertleşme ve temperleme sonrası yüksek mukavemet elde edilmektedir.

#### 3.1. Zırh Çelik Tipleri

Az alaşımlı ve homojen yapıya sahip olan mukavemetli zırh çelikleri içerdikleri karbon yüzdelere ve sertliklerine göre iki gruba ayrılabilir.

##### 3.1.1. Karbon yüzdesine göre zırh çelikleri

Alaşımlı zırh çelikleri bileşenlerinde belli oranda karbon içerirler. İçerdikleri karbon seviyeli %0.3'ün altında kalanlar düşük, üstünde kalanlar ise yüksek karbonlu olmak üzere ikiye ayrılırlar. Karbon seviyesinin düşük olması tokluk ve kaynaklanabilme açısından tercih edilir.

##### 3.1.2. Sertliklerine göre zırh çelikleri

Alaşımlı zırh çelikleri sertliklerine göre üç gruba ayrılır. Bunlar;

- 1) Haddelenmiş homojen zırhlar: Brinell sertlik değeri yaklaşık 380'dir.
- 2) Yüksek sertlikli çelikler: Brinell sertlik değeri yaklaşık 550'dir.
- 3) İki defa sertleştirilmiş çelikler: Brinell sertlik değeri 440 ile 600 arasında olan çelikler.

Sert zırhlı çeliklerde (HB>500) gerilmeli korozyon sorunu çıkabilir. Özellikle gerinimli bölgede ve korozif bir ortamla karşılaştığında korozyon artışı gözlenir.

Bu çalışmada düşük alaşımlı yüksek mukavemetli, düşük karbon oranına sahip ve iki defa sertleştirilmiş MIL A 46100 çeliği kullanılmıştır [21]. Çizelge 3.1.2.1'de MIL A 46100 çeliğinin kimyasal bileşenleri gösterilmektedir.

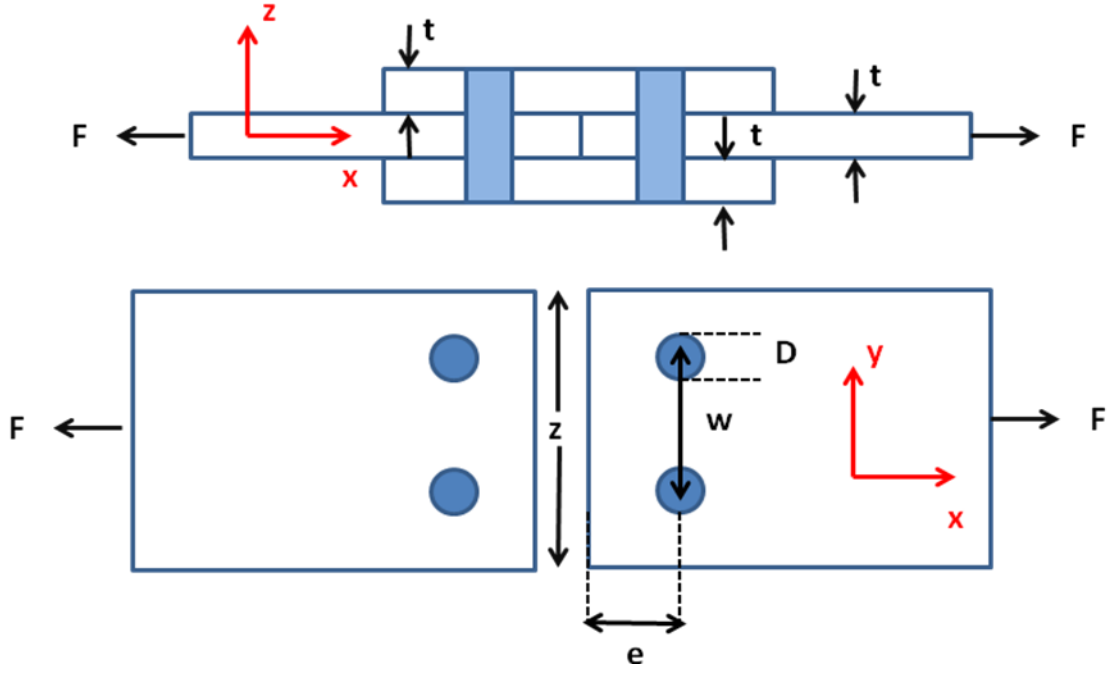
**Çizelge 3.1.2.1** MIL A 46100 çeliği kimyasal bileşenleri.

<b>Bileşenler</b>	<b>(%)</b>
Karbon	< 0.30
Mangan	1.20
Kükürt	0.005
Fosfor	0.012
Silisyum	0.2-0.4
Nikel	1.80
Krom	1.00
Molibden	0.3-0.5



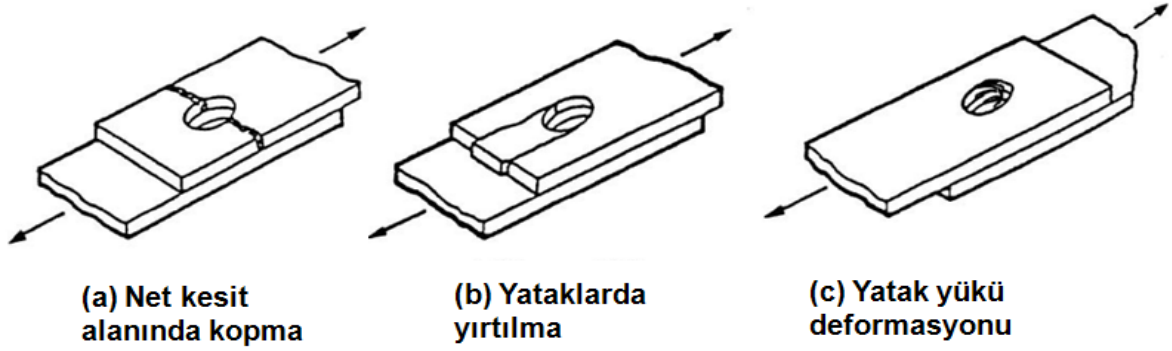
#### 4. PROBLEMİN TANIMI

Tez çalışmasının konusu olan çekme kuvveti ( $F$ ) altında cıvatalı, çift yönlü bindirmeli bağlantılarda delik çapının ve delikler arası mesafenin oluşturduğu problem Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.1** Çelik numunenin cıvatalı bağlantı geometrisi

Genellikle çekme kuvveti altında plakaları bir arada tutan cıvatalı bağlantılarda deformasyon (cıvata deformasyonu haricinde) üç şekilde oluşur. Bunlar net kesit alanından kopma, yataklarda yatak yükünden dolayı yırtılma ve yatak yükü deformasyonudur [22]. Şekil 4.2’de meydana gelebilecek deformasyon modları gösterilmiştir.



**Şekil 4.2** Deformasyon modları: a) Net kesit alanı kopması, b) Yataklarda yırtılma ve c) Yatak yükü deformasyonu.

Bu çalışmada delikler arası mesafenin ( $w$ ) ve delik çapındaki ( $d$ ) değişikliklerin çekme mukavemetine etkisi deneysel ve sayısal modelden elde edilen veriler doğrultusunda incelenmiştir. Sadece iki konfigürasyon için her biri üçer numune olmak üzere çekme testi gerçekleştirilmiş ve boyut seçimi Bölüm 5.2.1’de anlatılmıştır. Delikler arası mesafenin çekme mukavemetine olan etkisinin belirlenebilmesi için uygulamada en çok kullanılan ve tasarım ilkesi olan çap büyüklüğünün iki katı değerinden başlanarak, bağlantı ağırlığını azaltmak amacıyla delikler arası mesafe artımı yapılmıştır. Parametrelerdeki değişiklikler Çizelge 4.1’de ve tüm konfigürasyonlara ait boyutlar Ek 1’de detaylı olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1** Tüm konfigürasyonların boyut değerleri (birimler mm cinsinden).

	$w$	$e$	$z$	$D$	$t$	Deney/SEM
<b>M10</b>	40	25	90	10	3	Deney/SEM
<b>M10-A</b>	50	25	100	10	3	SEM
<b>M10-B</b>	60	25	110	10	3	SEM
<b>M12</b>	45	22.5	90	12	3	Deney/SEM
<b>M12-A</b>	50	22.5	95	12	3	SEM
<b>M12-B</b>	60	22.5	105	12	3	SEM

## 5. ÇEKME TESTİ

### 5.1. Kullanılan Malzeme

Çekme testi için kullanılan malzeme MIL A 46100 zırh çeliğidir. Malzeme özellikleri Çizelge 5.1.1'de belirtilmiştir.

**Çizelge 5.1.1** MIL 46100 çeliği malzeme özellikleri

<b>Çekme Mukavemeti (MPa)</b>	1660
<b>Akma Mukavemeti (MPa)</b>	1396
<b>Elastik Modülü (GPa)</b>	211.3
<b>Uzama (%)</b>	11
<b>Poisson oranı</b>	0,28
<b>Sertlik (HB)</b>	490

### 5.2. Numune Boyutları

#### 5.2.1. Numune boyutlarının belirlenmesinde temel kavramlar

Boyutların belirlenmesinde civata özellikleri ve numunenin paralel uzunluğuna ait genişlik değeri önemli bir rol oynamaktadır. Her iki niceliğin de beraber göz önüne alınarak uygun bir numune boyutu belirlenmesi gereklidir. Civataların malzemeyi deformasyona uğratacak yüke karşı dayanması, bu esnada malzemenin yük altında yataklardan deformasyonunun sağlanabilmesi için delikler arası mesafenin ve deliklerin kenara olan uzaklıklarının iyi ayarlanıp, net kesit alan bölgesinde yataklardan önce herhangi bir deformasyona, yırtılmaya veya kopmaya meydan verilmemesi gerekmektedir. Bu nedenle d, w ve z parametreleri literatürde [23] önerilen bağlayıcı elemanların yerleştirilme kriterlerine göre, dikkate alınarak belirlenmiştir.

### **5.2.2. Paralel uzunluğun genişlik değeri**

Standartlarda uygun paralel uzunluğun genişlik değeri araştırılmış, TSE, ISO, DIN vb kaynaklarda numune için uygun en büyük uzunluk değerinin 40 mm olduğu görülmüştür. Ancak, numunenin plastik deformasyon limitinin çok yüksek değerde olması nedeniyle ve bağlantı elemanlarının belirli bir çap değerinden aşağı seçilmemesi gereksinimi göz önünde bulundurularak, bu boyutlardaki standart numune kullanımı uygun bulunmamıştır [24].

Benzer bir çalışmada; Bouchaïr, A., Averseng ve J., Abidelah A. [8], civata ile bağlanmış numunenelerin yataklarındaki deformasyonu gözlemleyebilmek için kendilerince belirlemiş oldukları numune boyutlarına göre çift bindirmeli bağlantıda çekme testi yapmışlardır. Söz konusu makaledeki çalışma ve varsayım kullanılarak boyutların standartlar dışında belirlenmesine karar verilmiştir.

### **5.3. Civata Seçimi**

#### **5.3.1. Civatalı bağlantıların diğer bağlantı şekillerine göre avantajları**

Birbirinden ayrı iki veya daha fazla parçanın birbirleri üzerinden yük aktarımının devamını ve yük altında sistemin güvenli bölgede çalışır halde olması gerekliliğinden dolayı istenilen ihtiyacı karşılamak için bağlantı eleman çeşitliliğinde geniş bir yelpaze seçeneği ortaya çıkmıştır. En yaygın kullanılan bağlantı usulleri; perçin, kaynak, lehim, civata-somun bağlantılarıdır. Her birinin kendi içlerinde farklı özelliklere sahip olması doğru elemanın uygun yerde kullanılması gerekliliğini meydana getirmiştir.

Tank ve benzeri savunma araçlarında aracın karşılaşılabileceği en ağır koşullarda bile sağlam ve güvenli kalması çok önemlidir. Özellikle bağlantı bölgelerinde meydana gelecek kuvvetlerin büyük değerlerde olmaları nedeniyle bağlantı elemanlarının ve yatakların kalıcı deformasyonuna izin verilmez. Bu çalışmada

bağlantı şekli olarak cıvata-somun bağlantısı seçilmiştir. Diğer usullere (kaynak ve perçine) göre neden tercih edildiğini aşağıda maddeler halinde sıralanırsa;

1) Cıvatalar kaynak ve perçinlere göre çözülebilen elemanlardır. Kaynaklı bağlantılarda malzeme deforme olur bu nedenle bağlanmış parçalar birbirinden ayıramaz. Ayrıca kaynak yapılırken kaynak dikişinin mükemmel olması gerekir. Küçük bir çatlak oluşumu veya kaynak bölgesinde yorulma meydana gelmesi sistemin kopmasına neden olabilir.

Perçinler bağlanma şekline bakıldığında cıvatalar ile benzerlik gösterir; ancak perçinler çakılırken deformasyona uğrarlar. Sökülmek istenildiğinde yatağa zarar vermemek için perçinler deforme edilerek çıkarılırlar. Bu nedenle her seferinde çıkartılmış olanın yerine yeni perçin koyma ihtiyacını doğurur.

2) Her ne kadar perçinler sökülürken kendileri deforme olsalar da bağlantı deliklerinde bir miktar deformasyon veya çatlak oluşumuna neden olabilirler. Aracın bağlantı noktalarında, delik çevresindeki göreceği dinamik yüklemeye dolayı ömür kısalması yaşanabilir. Cıvatalar çözülebildikleri için delik yatağına perçinlere göre çok daha az zarar verirler.

3) Cıvatalar perçinlere nazaran daha fazla yük taşıyabilirler. Buna ek olarak perçinler kesme kuvvetlerine karşı dayanıklı olmak için tasarlanmışlardır. Çekme yükünü taşıma kapasiteleri yok denecek kadar azdır.

Tank üzerindeki zırh plakaların delik çapı ve delikler arası mesafenin optimizasyonu sırasında, yatakların maruz kalacağı çekme, basma, kesme yüklerini karşılayabilecek ve sökülmesi istendiğinde yatakta en az seviyede hasar oluşturacak bağlama elmanı cıvata-somundur. Bu nedenle çalışmada kullanılacak olan en uygun bağlantı tipi olarak seçilmiştir [25].

### **5.3.2. Cıvataların belirlenmesi**

Tezin konusu olan delikler arası mesafenin ve delik çap büyüklüklerinin belirlenmesinde rol oynayan parametre cıvata seçimidir. Cıvata tipinin belirlenmesindeki ön önemli kıstas, numuneyi deformasyona uğratacak yük altında

cıvataların kesme yüküne karşı mukavemetinin numunelere göre daha yüksek olmasıdır. Bu nedenle ilk aşama cıvatanın kalite grubunu belirlemektir. Malzemenin MIL A 46100 yüksek alaşımlı çelik olması ve akma dayanımınının 1396 MPa olması nedeniyle piyasadaki yaygın kullanıma sahip en yüksek kalite sınıfı olan 12.9' luk cıvata seçilmiştir.

Belirlenmesi gereken ikinci parametre cıvataların çaplarıdır. Piyasadaki yaygın kullanımlarından ve temin edilebilme kolaylığından ötürü, 10 mm ve 12 mm cıvata çapları seçilmiştir.

12.9 kalitedeki cıvatanın kayma mukavemetini bulmak için ilk adım ISO898-1'den [26] yararlanılarak nominal çekme dayanım mukavemet değerinin tespit edilmesidir. Standarda göre noktadan önceki sayı 100 ile çarpılıp MPa cinsinden nominal çekme mukavemet değeri hesaplanır. Noktadan sonraki sayı ise nominal akma dayanım noktasının belirlenmesinde kullanılır.

Buradan 12.9 kaliteye sahip M10 ve M12' lik cıvataların kesme kuvveti değerleri;

$12 \times 100 = 1200$  MPa (nominal çekme dayanımı)

$1200 \times 0.9 = 1080$  MPa (nominal akma dayanımı)

Maksimum kayma gerilmesi kriterine göre;  $\sigma = 2 \tau$  (kayma gerilmesi dayanımı)

$\tau = 2P / A$  (N/mm) (cıvatanın kesme dayanım kuvveti)

***M12 cıvata için***

$P_{cvt} = \tau \pi d^2 / 8$

$P_{cvt} = 540 \pi (144) / 8$

=61 kN

### **M10 civata için**

$$P_{cvt} = \tau \pi d^2 / 8$$

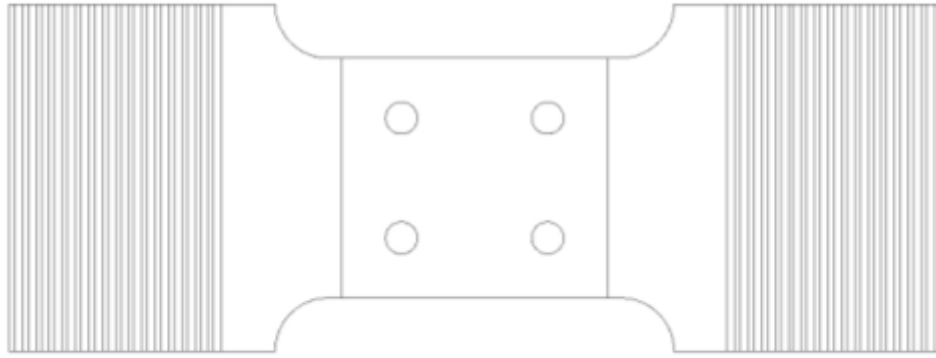
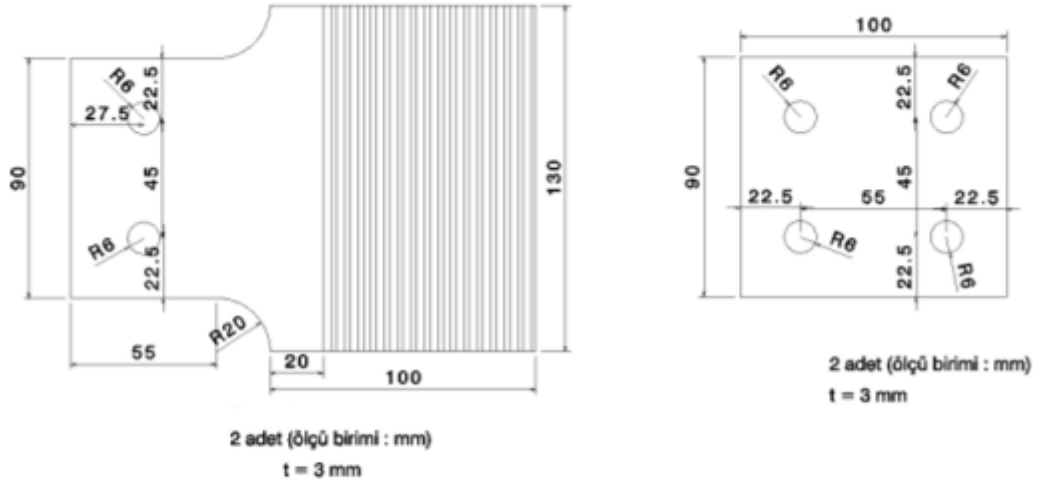
$$P_{cvt} = 540 \pi 100 / 8$$

$$= 42.4 \text{ kN}$$

Cıvatalar çift kesmeye maruz kalacaklarından dolayı bulunan değerlerin iki katı büyüklüğündeki kuvvete kesme yönünde direnç göstereceklerdir. (Güvenli tarafta kalmak için nominal akma dayanım değeri referans alınıp maximum kayma gerilmesi ilkesine göre hesaplamalar yapılmıştır.)

### **5.4. Numune Boyutları**

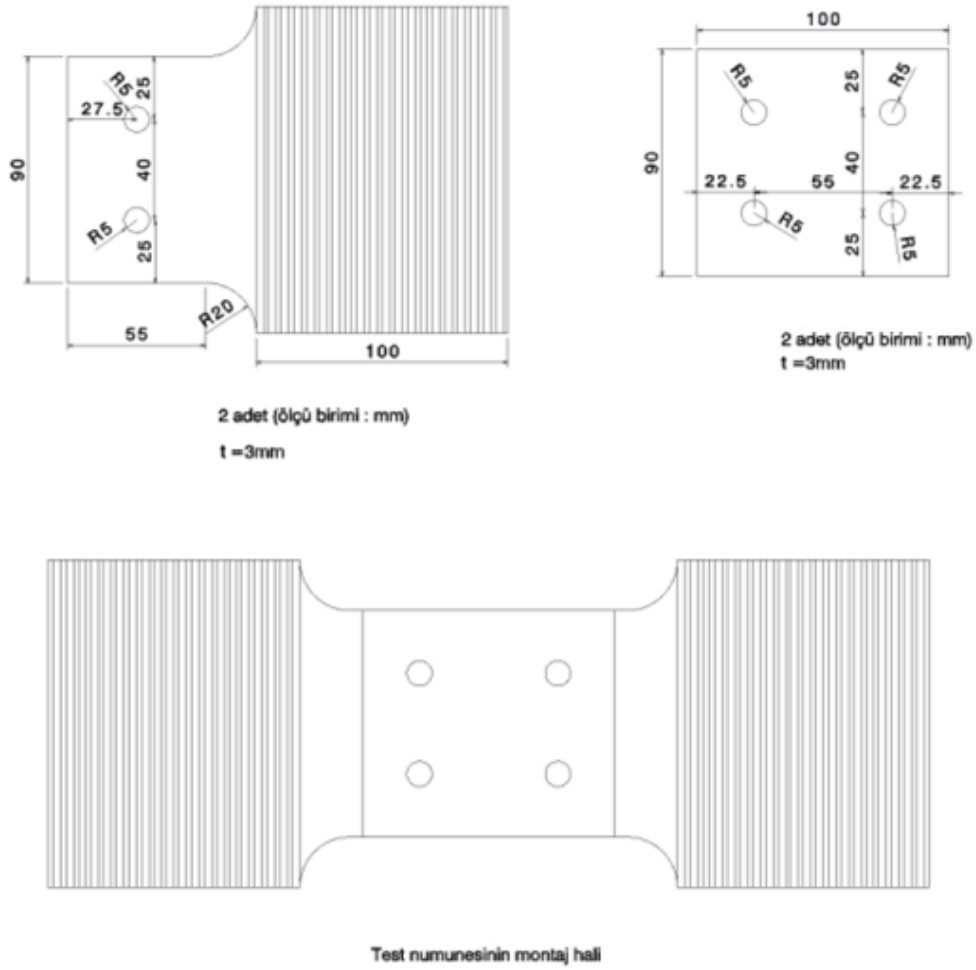
Numune ve plaka kalınlıklarının 3mm olması nedeniyle havşa başlı bağlantı elemanı seçilmemiştir. Ayrıca cıvataların dişsiz kısmının uzunluğu (civata boyu) toplam uzunluktan (numune + iki plaka kalınlığı=9mm) daha büyük olmasına dikkat edilmiş, bunlara ek olarak bağlayıcı eleman deliklerine klavuz çekme işlemi uygulanmamıştır. Tüm civata delikleri +0.3 mm tolerans ile açılmıştır. Yukarıda belirtilen kriterler göz önünde bulundurularak numune boyutları ve civata delik yerleşimi Şekil 5.4.1 ve Şekil 5.4.2' de sırasıyla gösterilmektedir.



Test numunesinin montaj hali

Şekil 5.4.1 M12 cıvata delikli numune boyutları





**Şekil 5.4.2** M10 cıvata delikli numune boyutları

M10'luk cıvata deliğine sahip numunedan 3, M12'lik cıvata deliğine sahip numunedan 3'er adet olmak üzere toplamda 6 adet test numunesi üretilmiştir.

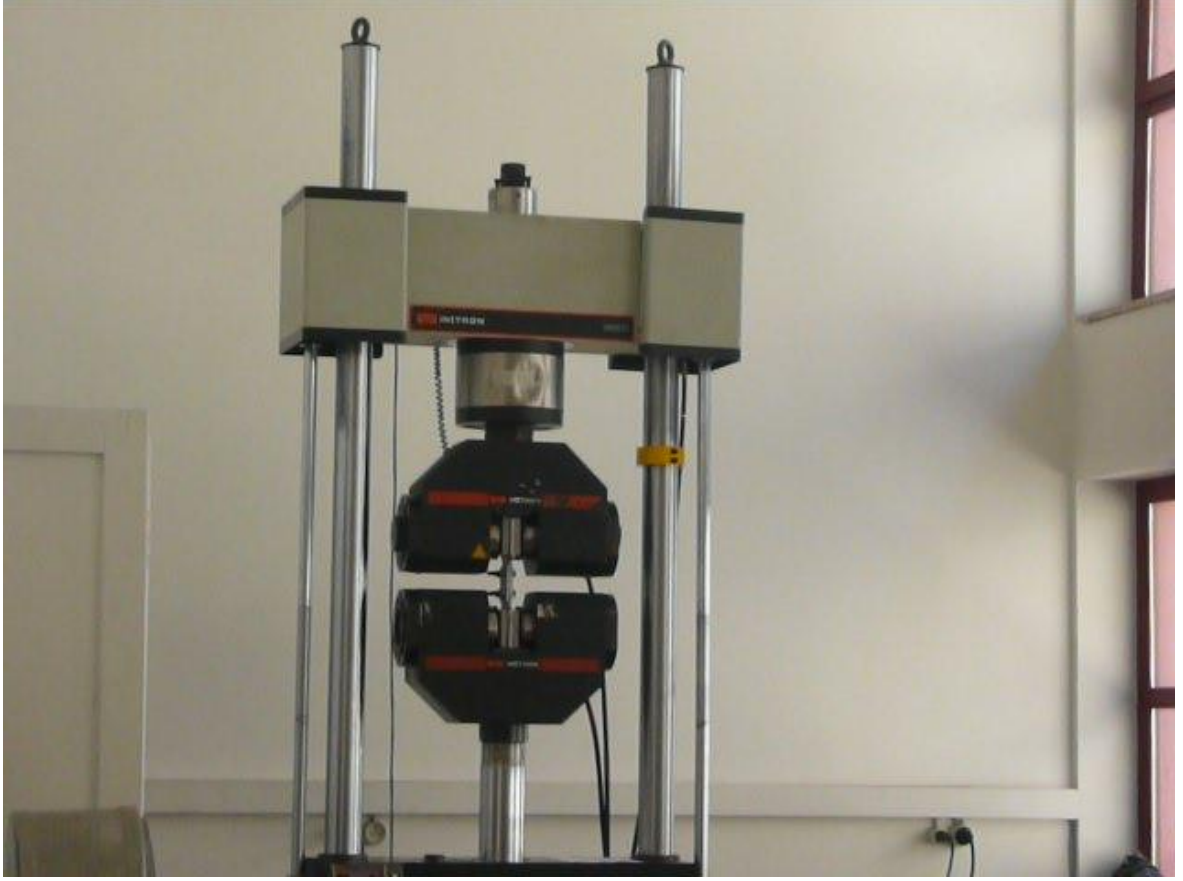
### 5.5. Deney Düzenegi ve Deneyin Yapılışı

Boyutları belirlenen 6 adet numune 50 tonluk Instron çekme cihazı ile çekilerek her biri için kuvvete karşı uzama değerleri elde edilmiştir. (Şekil 5.5.1 örnek bir numuneye ait numune montaj halini gösterilmektedir.) Testler yapıldıktan sonra numuneler söküldüğünde yataklarda yırtılma ve deformasyon ile karşılaşılmıştır. Cıvatalarda ve kapak işlemi gören plakalarda deformasyona rastlanamamıştır.



**Şekil 5.5.1** Montajı yapılmış ve henüz deforme olmamış test numunesi

Şekil 5.5.2' de gösterilen çekme testi cihazında numune üzerine bağlanan uzama ölçer (ekstansiyometre) bulunmaması nedeniyle ölçülen uzama değerlerinde düzeltme katsayısı kullanılmasına karar verilmiştir. Bu nedenle standart MIL A 46100 çeliğinden yapılmış üç adet kaynaklı test numunesi, ekstansiyometreye sahip başka bir cihazda çekilerek, elde edilen uzama değerlerinin düzeltilmesinde kullanılacak bir katsayı bulunmuştur.

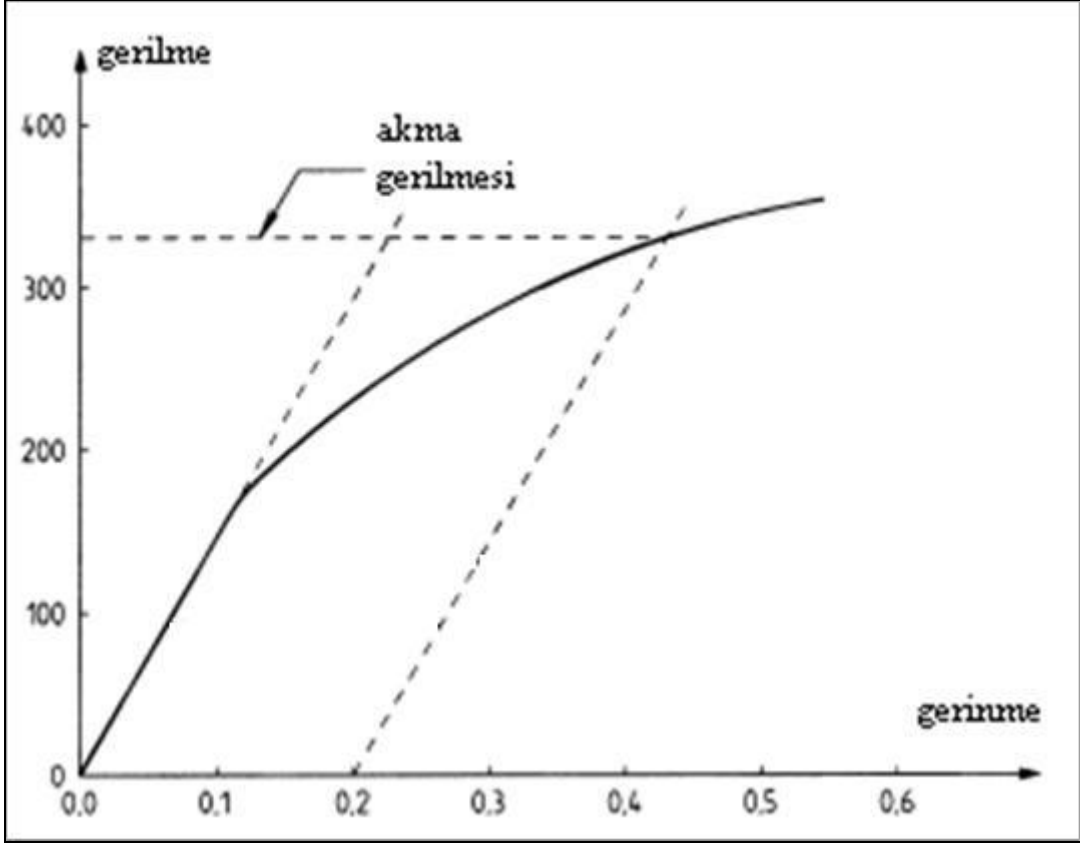


**Şekil 5.5.2** Testin yapıldığı çekme cihazı

### **5.6. Deneyden Elde Edilen Veriler**

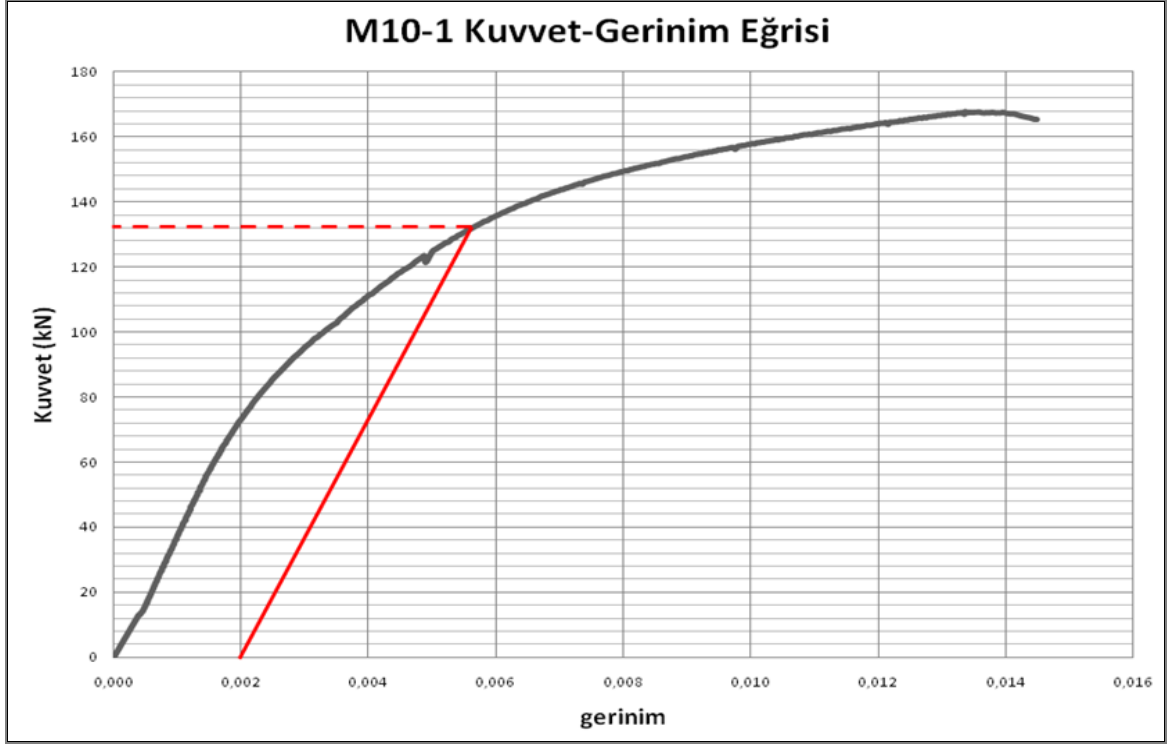
Deney sonrasında elde edilen veriler kuvvet ve uzama bilgileridir. Uzama değerleri ekstansiyometreli cihazdan çekme testi sonrası elde edilen katsayı ile çarpılarak düzenlenmiştir.

Akma noktası, malzemeye uygulanan çekme kuvvetinin etkisi altında plastik şekil değişiminin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünlük gösterdiği gerilme değeridir. Çekme cihazı, civata bağlantılı plakalı sistemin akma noktasını vermemektedir. Deney sonrası elde edilen kuvvet uzama verileri Şekil 5.6.1'de gösterilen kaydırma (0.2% kaydırma (offset)) metodu uygulanarak yaklaşık hangi değerde akma noktasına ulaşılacak kuvvet değerini vermektedir. Bu yöntemle göre paralel doğrunun grafik eğrisiyle kesiştiği nokta kuvvet değerini verir.

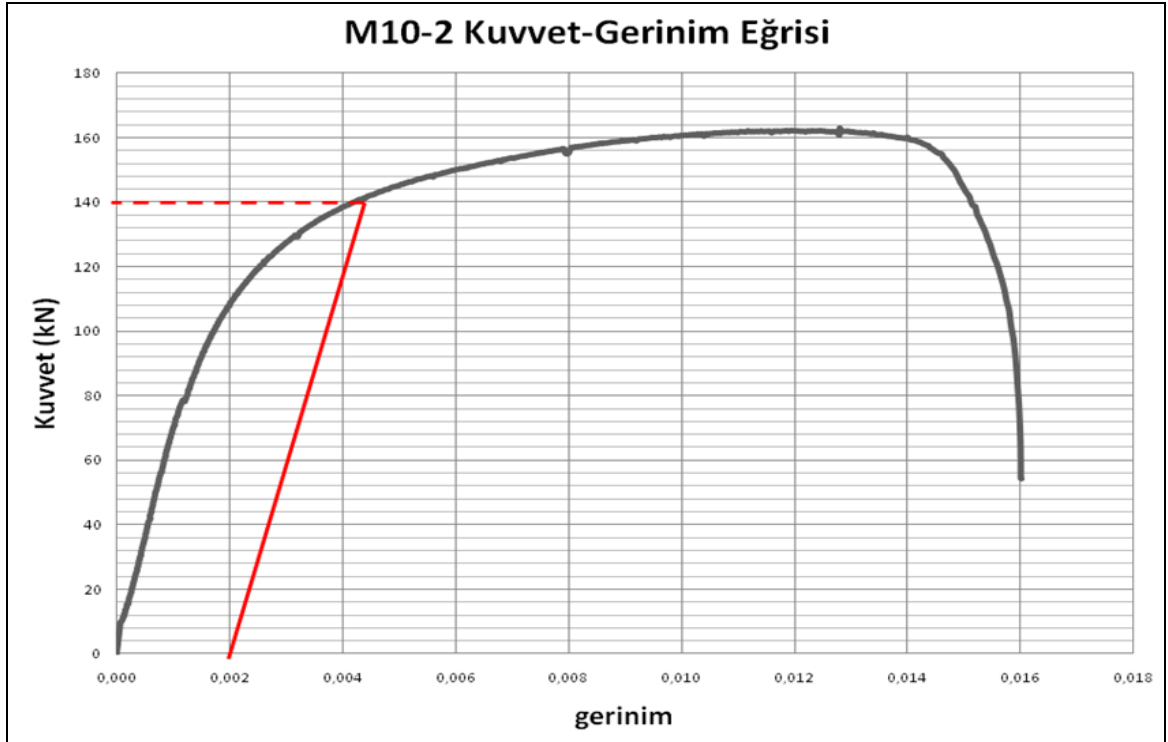


**Şekil 5.6.1** Akma noktası belli olmayan malzemeler için kaydırma metodu.

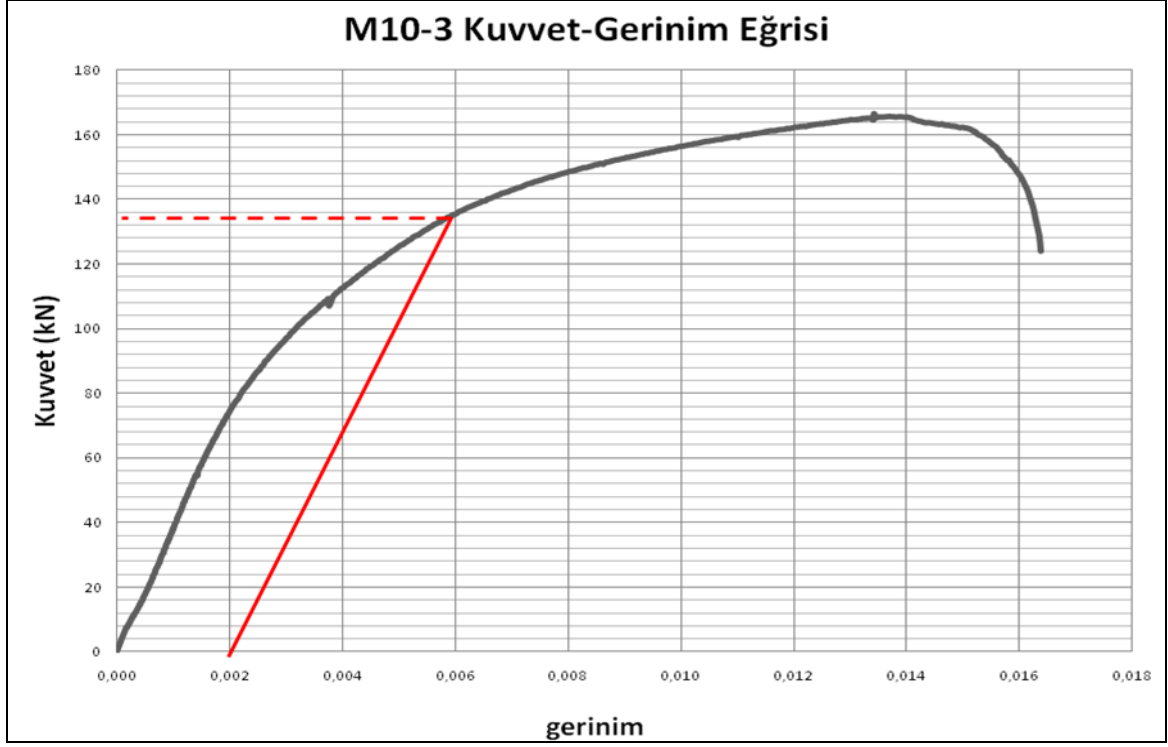
Test sonrası elde edilen kuvvet- gerinim grafikleri Şekil 5.6.2-5.6.7'de sırasıyla gösterilmiştir. Elde edilen kuvvet yer değiştirme eğrisinde çok belirgin bir akma noktası oluşturulamadığından, 0.2%'lik kaydırma metodunu kullanabilmek için tüm grafikler kuvvet gerinim eğrilerine dönüştürülmüştür.



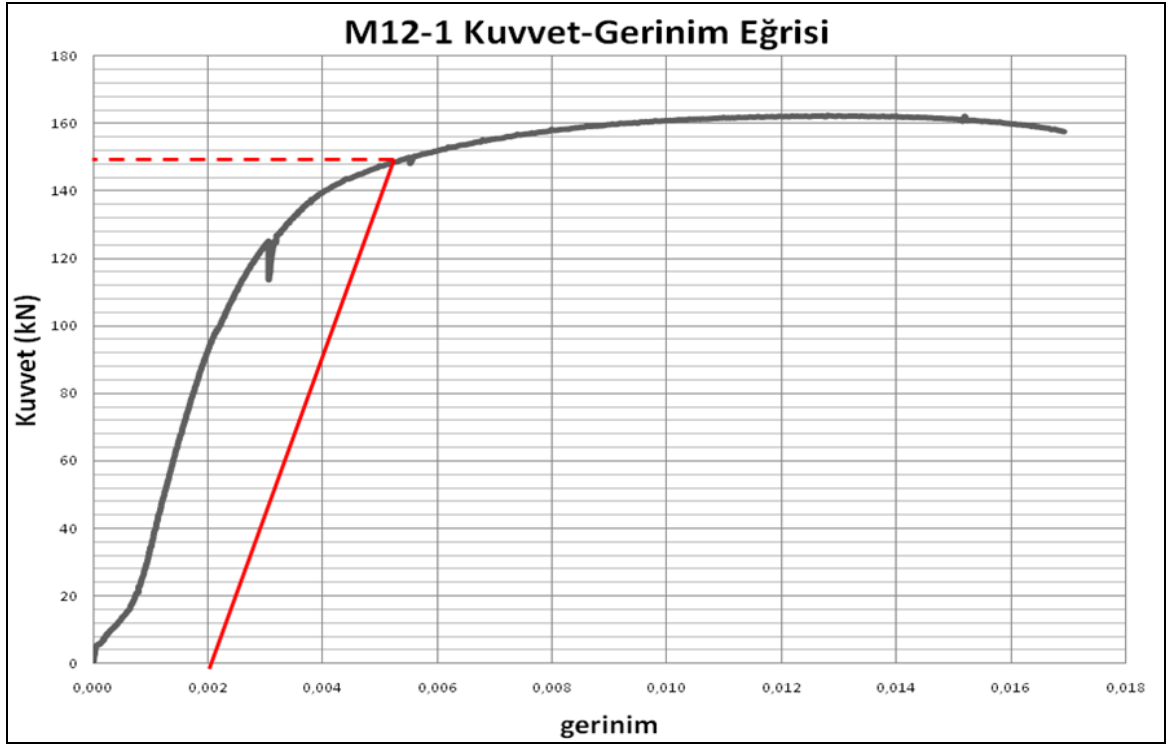
**Şekil 5.6.2** M10-1 için kuvvet-gerinim grafiği.



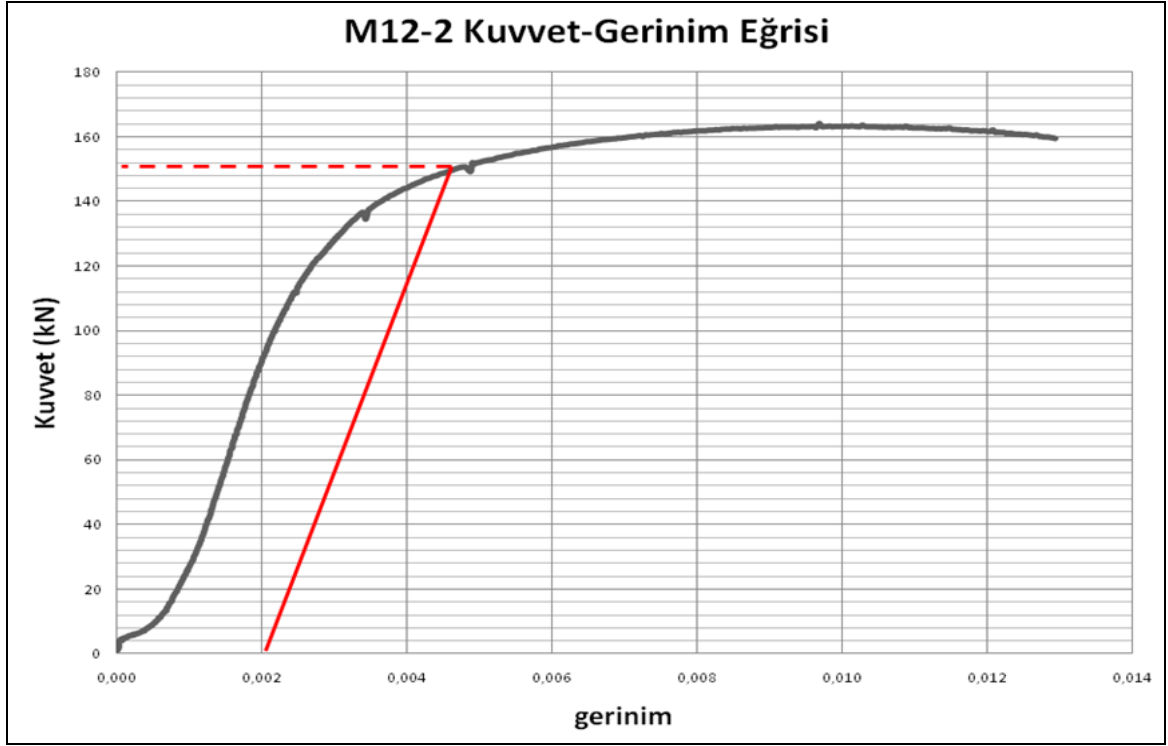
**Şekil 5.6.3** M10-2 için kuvvet-gerinim grafiği.



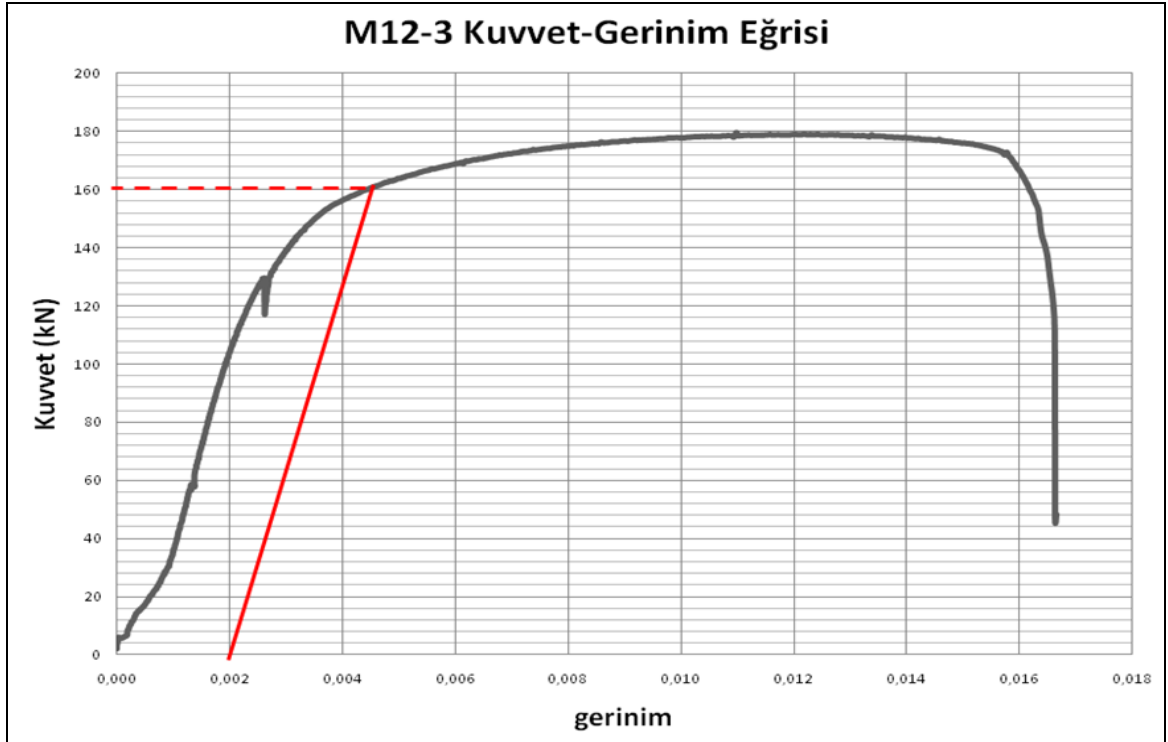
**Şekil 5.6.4** M10-3 için kuvvet-gerinim grafiği.



**Şekil 5.6.5** M12-1 için kuvvet-gerinim grafiği.



Şekil 5.6.6 M12-2 için kuvvet-gerinim grafiği.



Şekil 5.6.7 M12-3 için kuvvet-gerinim grafiği.

Numunelerin sökölme işlemleri sonrasında deformedasyonların sadece yataklarda meydana geldiği görölmüşür. Civatalar ile üst plakalarda deformedasyona rastlanmamıştır. M10 ve M12 numunelerinin çekme sonrası görünömleri Şekil 5.6.8 ve Şekil 5.6.9'da gösterilmektedir.



**Şekil 5.6.8** M12 numunesinin çekme sonrası görünümü.





**Şekil 5.6.9** M10 numunesinin çekme sonrası görünümü.

## **6. SONLU ELEMAN MODELİ**

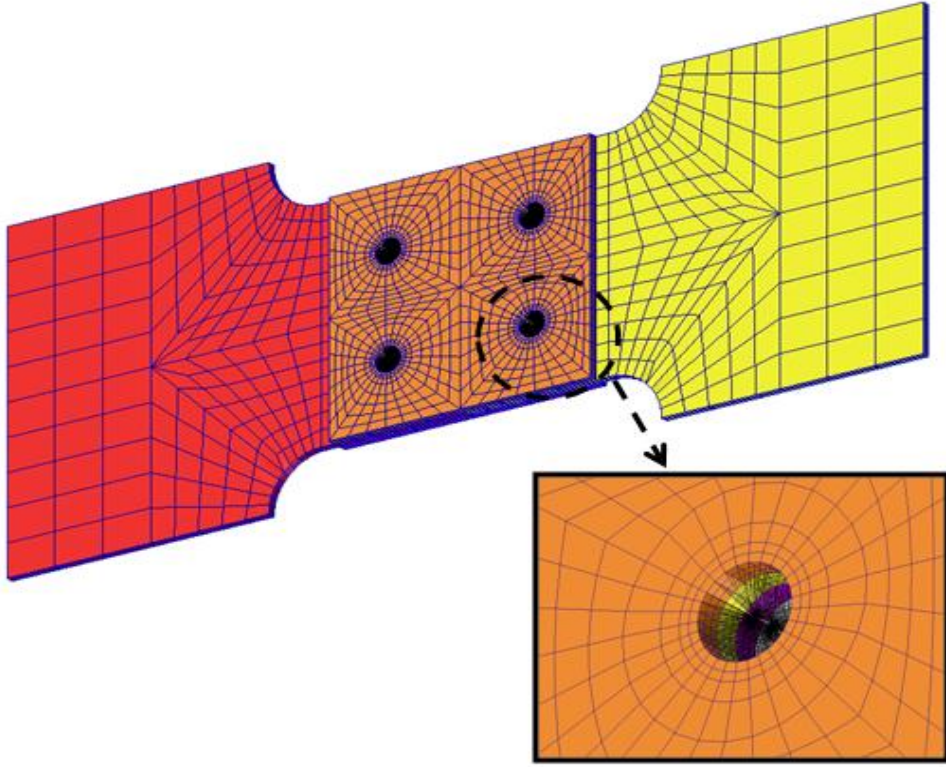
Tez çalışmasında sonlu eleman analiz yöntemini kullanarak çözüm yapan bir matematiksel model kullanılmıştır. Buna göre Başkent Üniversite'sinde lisanlı kurulumu yapılmış ve yaygın kullanımı olan sonlu eleman modeli yazılımlarından MSC Nastran 2005r1 ve MSC Patran 2005r2'nin tez çalışmasında kullanılmasına karar verilmiştir.

Boyutları ve delik yerleşimleri belirlenen altı adet konfigürasyonların çizimleri MSC Patran yazılımının okuyabileceği formatta üç boyutlu olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan çizimler MSC Patran yazılımına yüklenip problem çözümüne uygun şekilde modellenmiştir.

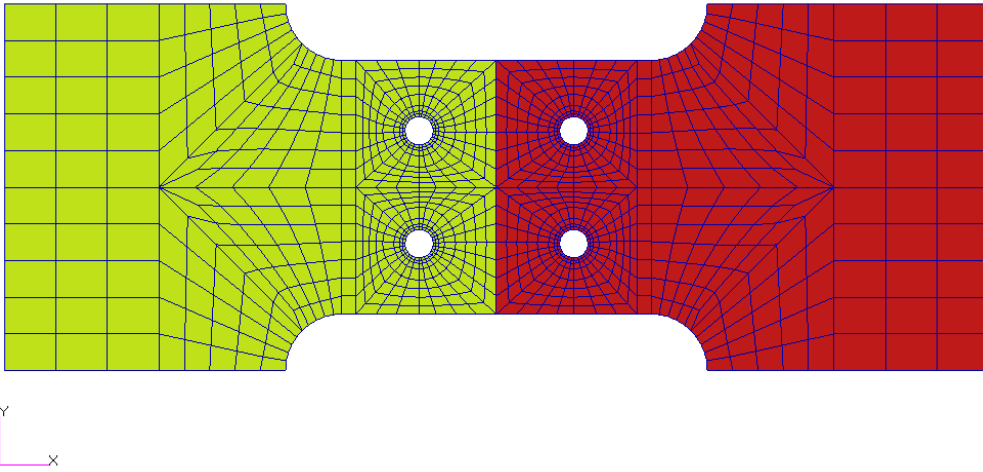
### **6.1. Sayısal Modelin Hazırlanması**

#### **6.1.1. Ağ yapısı ve eleman seçimi**

Gerek 10 mm'lik gerekse 12 mm'lik bağlayıcı eleman deliklerine sahip konfigürasyonlara ağ eleman yerleşiminde delik etrafında yoğun deliklerdeki gerilme konsantrasyonundan uzaklaştıkça daha az yoğun olmak üzere ağ atımı düzenlemesi yapılmıştır. ( Şekil 6.1.1.1 ve Şekil 6.1.1.2 )



**Şekil 6.1.1.1** Montaj halinin ağ gösterimi.



**Şekil 6.1.1.2** Plakalar haricinde kalan bölümün ağ atım gösterimi.

Altı adet konfigürasyonun modellemesinde en doğru sonucu veren sekiz köşeli kübik “hex” eleman kullanılmıştır [27]. Buna ek olarak “Nastran Reference Manuel” de [28] eleman matris kurulumu dikkate alınarak tezdeki probleme uygun çözüm sağlayan, gerçeğe en yakın sonucu verecek olan sekiz köşeli kübik elemanların kullanılmasına karar verilmiştir.

Bütün modellerin toplam eleman ve düğüm sayısı Çizelge 6.1.1.1’de belirtilmiştir.

**Çizelge 6.1.1.1** Modellerdeki düğüm ve eleman sayısı.

	<b>Düğüm Sayısı</b>	<b>Eleman Sayısı</b>
<b>M10</b>	13358	9144
<b>M10-A</b>	10676	6768
<b>M10-B</b>	11170	6728
<b>M12</b>	11794	8076
<b>M12-A</b>	10674	6368
<b>M12-B</b>	11036	6421

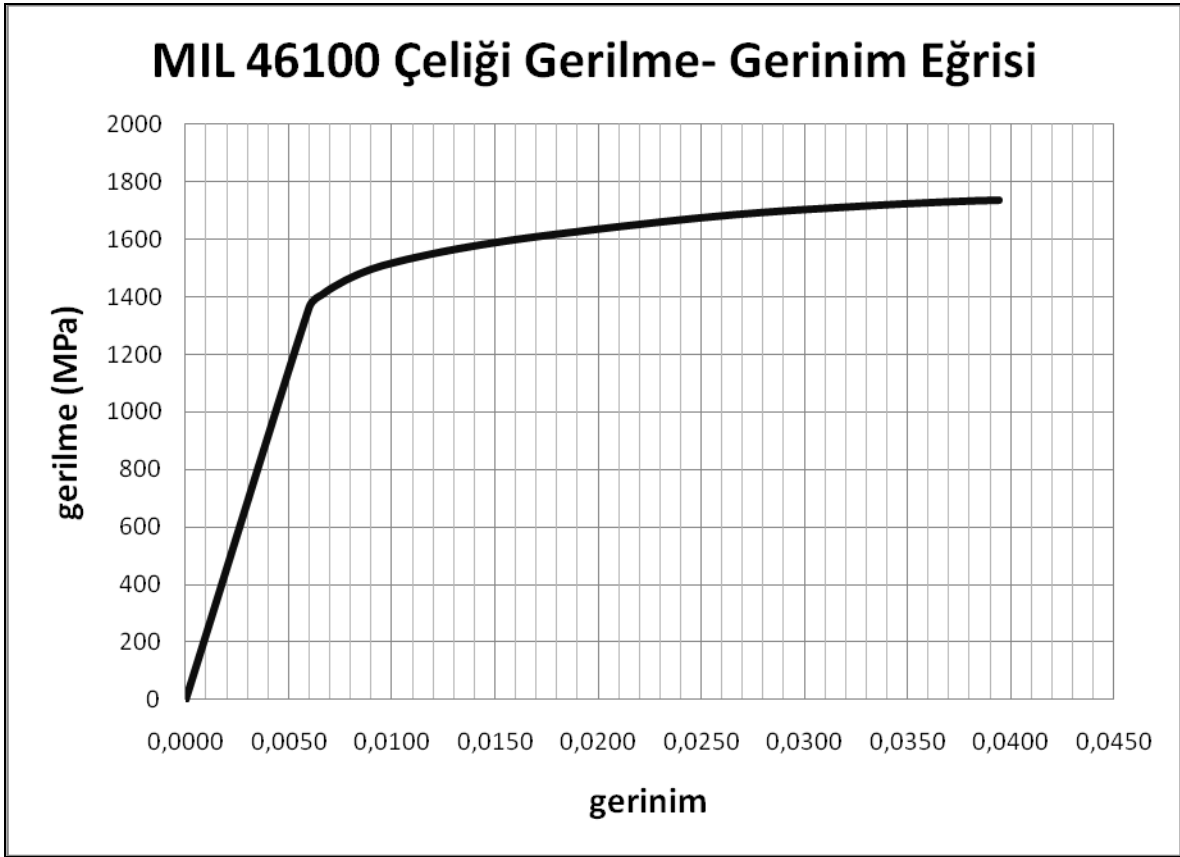
Bu çalışmada hazırlanan civata modellemesi için çekme, basma, eğilme yüklerini taşıyabilen kiriş (cbeam) elemanı kullanılmıştır [13, 14]. Ayrıca sistemde civatalar çekme testi esnasında sadece kesme yüküne maruz kalacaklarından dolayı herhangi bir ön gerilme değeri modele girilmemiştir.

### **6.1.2. Malzeme**

Sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçların deneyden elde edilen veriler ile paralellik göstermesinde malzeme tanımının doğru yapılması gerekir. Programa izotropik, doğrusal olmayan malzeme özelliği tanımlanmıştır.

MIL A 46100 çeliğinden yapılan standart test numunesi çekilerek elde edilen gerilme-gerinim eğrisinin grafiği Şekil 6.1.2.1’de mevcuttur. Bu grafikten, Matlab yazılımı kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile 175 adet gerilmeye karşı gerinim değerleri elde edilmiştir. Veriler Patran yazılımına malzeme gerilme gerilim eğrisini

oluşturacak şekilde liste biçiminde tanımlanmıştır. Bağlantı elemanları için lineer malzeme bilgisi programa girilmiştir.



**Şekil 6.1.2.1** Sonlu eleman modeline tanımlanan MIL A 46100 çeliğinin gerinme-gerinim grafiği.

Malzeme bilgisi verileri Ek 2' de verilmiştir.

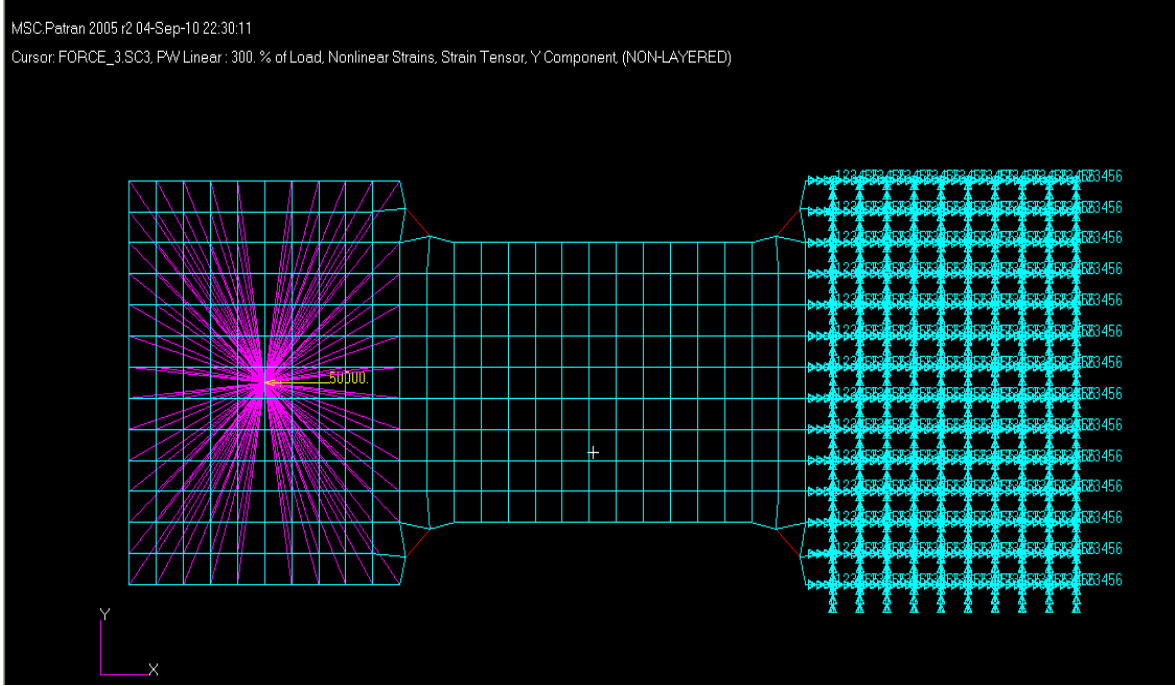
### 6.1.3. Sınır koşullarının tayini

Çekme testi simülasyonunu yaparken modelin statik dengede olması gereklidir. Bu nedenle çenelerin oturduğu yüzeylerin bir tanesindeki düğümler tek noktalı sınırlamaya (SPC), diğer tarafta kalan düğümler ise yüke maruz bırakılmıştır.

### 6.1.4. Sayısal modelin malzeme yönünden kontrolü

Hazırlanan altı adet konfigürasyon modellerinin doğru çalıştığını kanıtlamak ve malzemenin doğru şekilde programa girildiğini görebilmek için basit bir çekme test

numunesi simulasyonu hazırlanmıştır. Modelde “hex” eleman ağırlıklı olmak üzere sadece köşelerde “tetra” eleman kullanılmıştır. Modelin bir ucu sabitlenip diğer ucundan yük uygulanmıştır. Şekil 6.1.4.1’de hazırlanan test numunesi modeli gösterilmektedir.



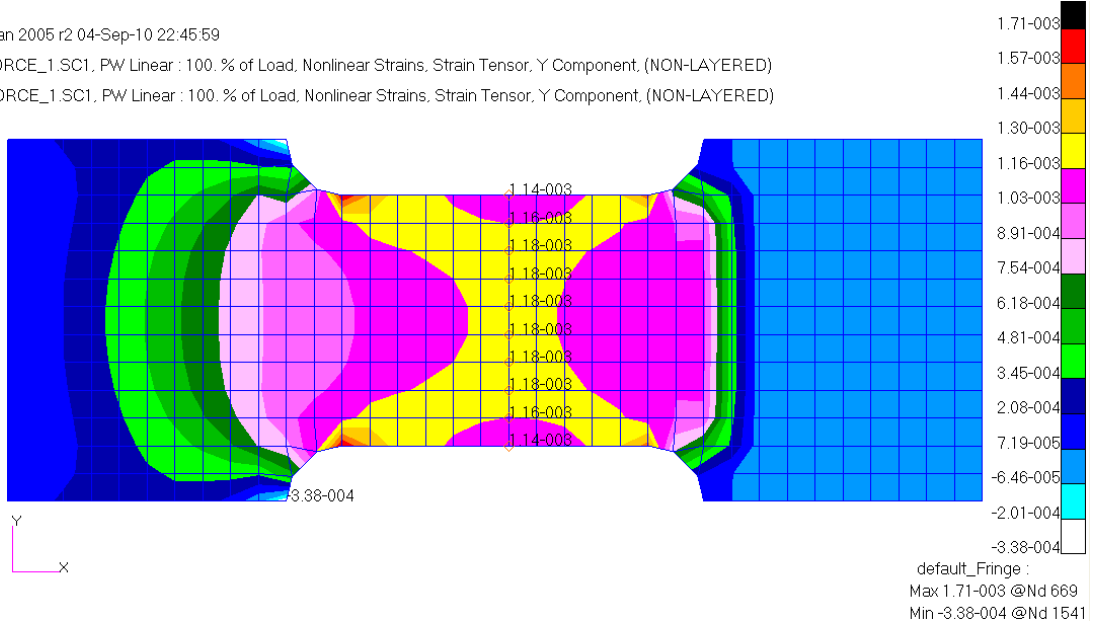
**Şekil 6.1.4.1** Hazırlanan çekme testi numune modeli.

Biri elastik bölgede ikisi plastik bölgede olmak üzere 3 adet kuvvet değeri modele çekme yükü olarak uygulanmıştır. Kuvvetler rastgele belirlenmiş olup sırasıyla 100, 405, 459 kN'dur. Üç kuvvet noktası için sayısal modelden elde edilen gerinim dağılımları ve düğüm noktalarının gerinim cinsinden büyüklükleri Şekil 6.1.4.2'den Şekil 6.1.4.4'e kadar gösterilmiştir.

MSC.Patran 2005 r2 04-Sep-10 22:45:59

Fringe: FORCE\_1.SC1, PW Linear : 100. % of Load, Nonlinear Strains, Strain Tensor, Y Component, (NON-LAYERED)

Cursor: FORCE\_1.SC1, PW Linear : 100. % of Load, Nonlinear Strains, Strain Tensor, Y Component, (NON-LAYERED)

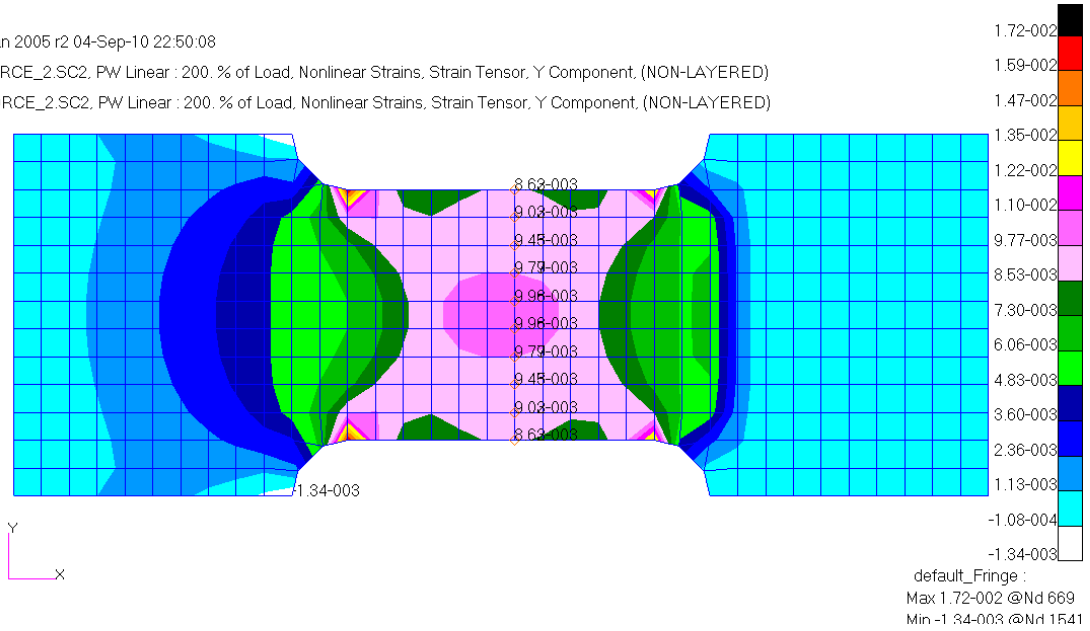


**Şekil 6.1.4.2** F=100kN için elde edilen gerinim dağılımı ve değerleri.

MSC.Patran 2005 r2 04-Sep-10 22:50:08

Fringe: FORCE\_2.SC2, PW Linear : 200. % of Load, Nonlinear Strains, Strain Tensor, Y Component, (NON-LAYERED)

Cursor: FORCE\_2.SC2, PW Linear : 200. % of Load, Nonlinear Strains, Strain Tensor, Y Component, (NON-LAYERED)

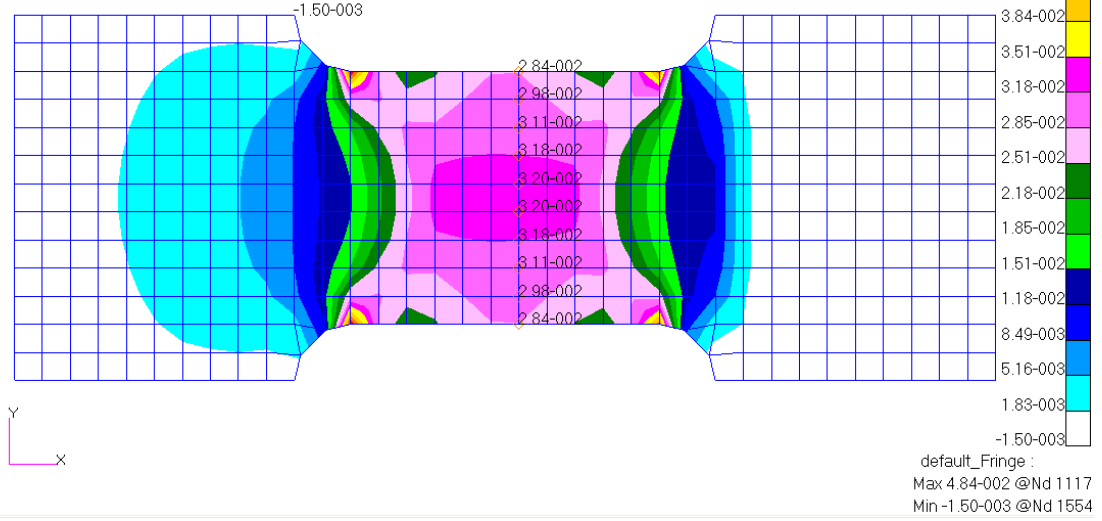


**Şekil 6.1.4.3** F=405kN için elde edilen gerinim dağılımı ve değerleri.

MSC.Patran 2005 r2 04-Sep-10 22:54:23

Fringe: FORCE\_3.SC3, PW Linear : 300. % of Load, Nonlinear Strains, Strain Tensor, Y Component, (NON-LAYERED)

Cursor: FORCE\_3.SC3, PW Linear : 300. % of Load, Nonlinear Strains, Strain Tensor, Y Component, (NON-LAYERED)



**Şekil 6.1.4.4** F=459kN için elde edilen gerinim dağılımı ve değerleri.

Kesit alanı 270 (90mm x 3mm) mm<sup>2</sup> olan numune için her bir yük koşulundaki gerilme değerleri

$$\sigma = \frac{F}{A} (N / mm^2) \quad (6.1)$$

formülünden; 370.37,1500 ve 1700 MPa olarak bulunmuştur. Bulunan gerilme değerleri Ek 2'deki malzemenin gerilme-gerinim eğrisine gidilerek bu noktalara karşılık gelen gerinim değerleri lineer interpolasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Okunan değerler ve modelden elde edilen veriler Çizelge 6.1.4.1'de gösterilmiştir.



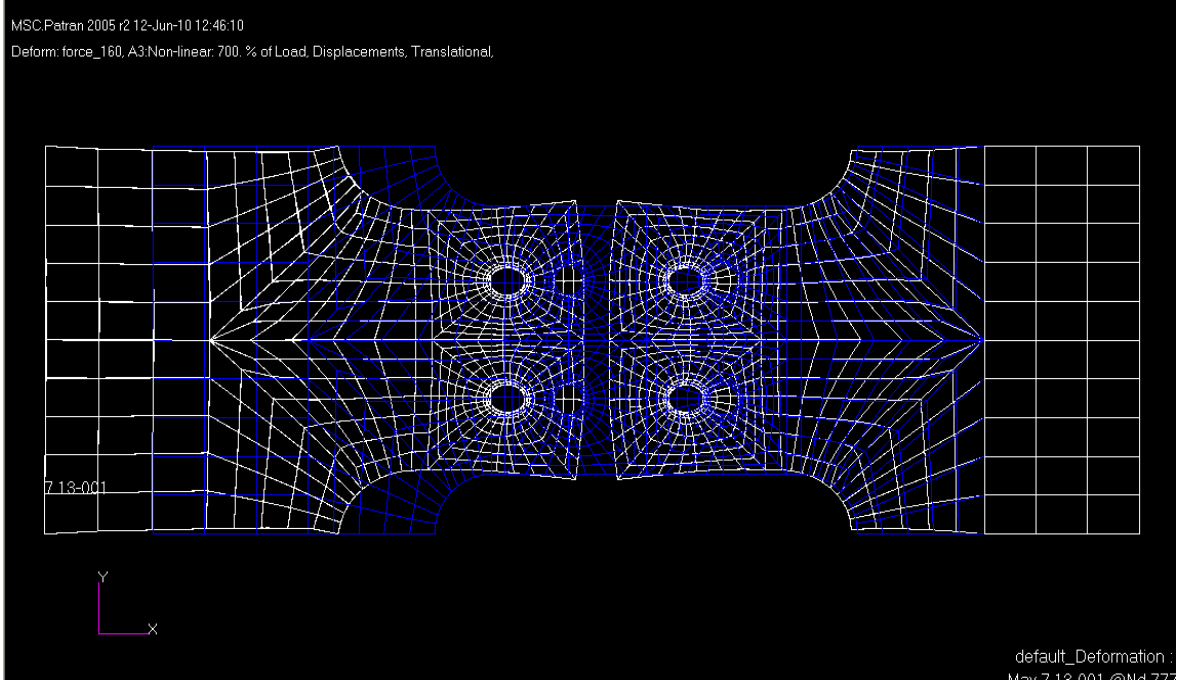
**Çizelge 6.2.4.1** Gerilme-gerinim eğrisinden okunan değerler ve modelden elde edilen veriler

Hesaplanan Gerilme Değeri (Mpa)	Hesaplanan Gerilme Değerinin Malzeme Gerilme-Gerinim Aralığına Karşılık Gelen Değerleri		İnterpolasyon Değeri	SEM'inden Elde Edilen Gerinme Değeri
	Malzeme Gerinim Değeri	Malzeme Gerilme Değeri (MPa)		
370	0.000599820	194.0	0.0011713	0.00118
	0.001199281	378.6		
1500	0.008959741	1493.6	0.0092400	0.00996
	0.009554213	1507.3		
1700	0.029558802	1699.5	0.0297000	0.00320
	0.030141157	1702.1		

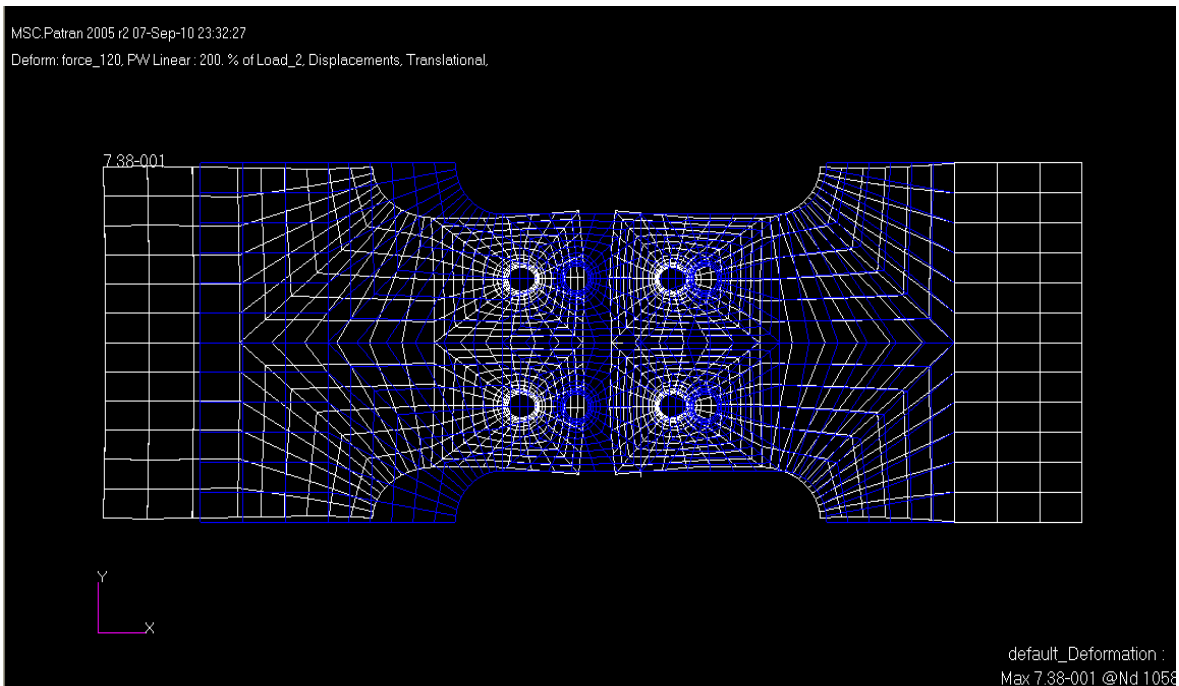
Sonlu eleman analizinden çıkan değerler ile malzeme eğrisinden elde edilen gerinim değerleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Bu da sayısal modelin çözüm esnasında önceden girilmiş olan gerilme gerinim eğrisini izlediğini göstermektedir.

## 6.2. Çözüm

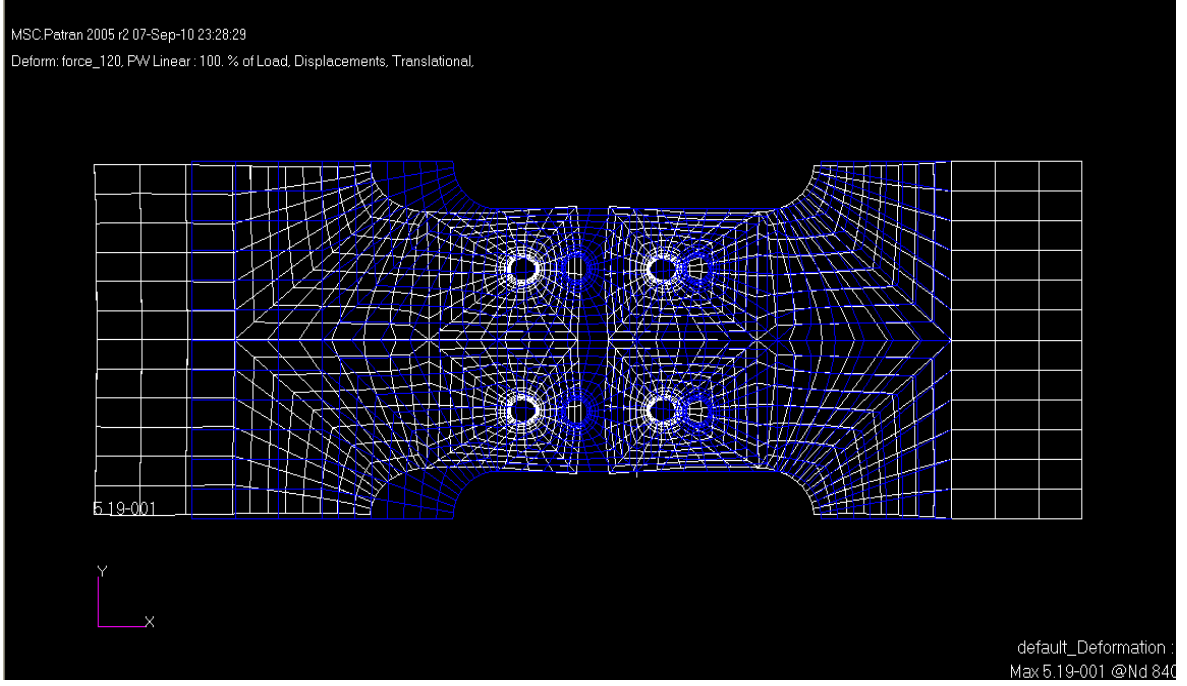
Sonlu eleman modellerinde çözüm yöntemi olarak doğrusal olmayan statik çözüm metodu seçilmiştir [28]. Her bir konfigürasyon için 100, 120, 140, 160 kN kuvvetlerinde karşılık gelen sonuçlar elde edilmiştir. Çözüm sonunda elde edilen deformasyon şekilleri Şekil 6.2.1- Şekil 6.2.6'de gösterilmektedir.



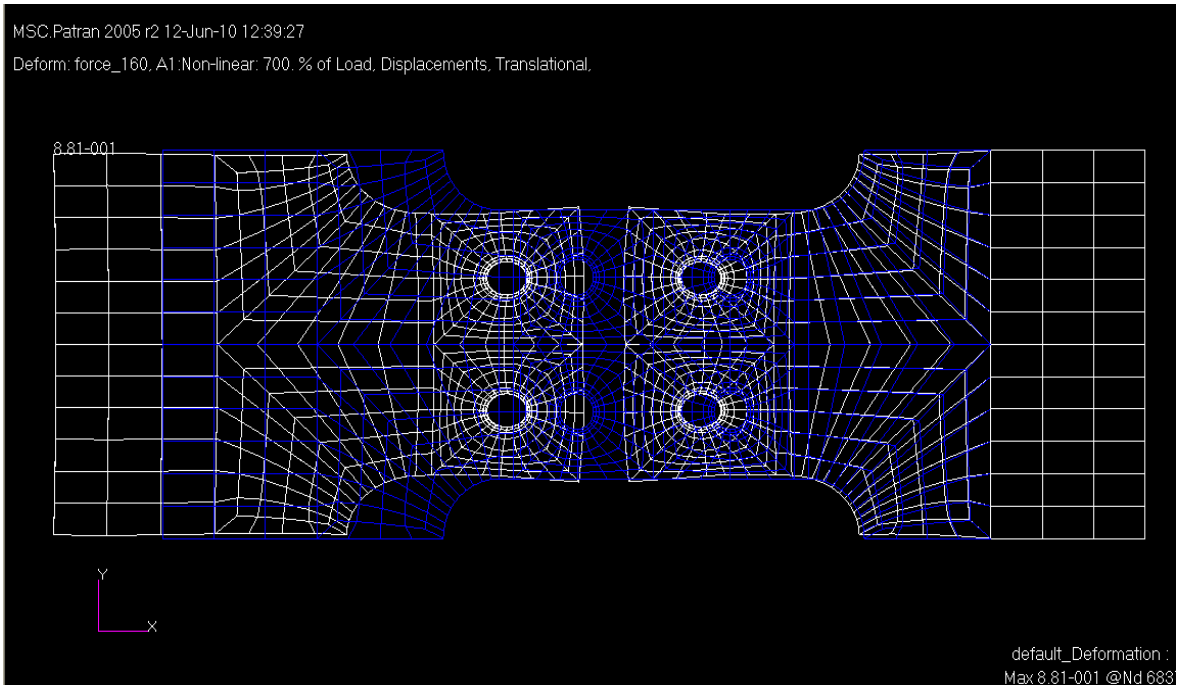
**Şekil 6.2.1** M10 konfigürasyonun SEM deformasyon şekli.



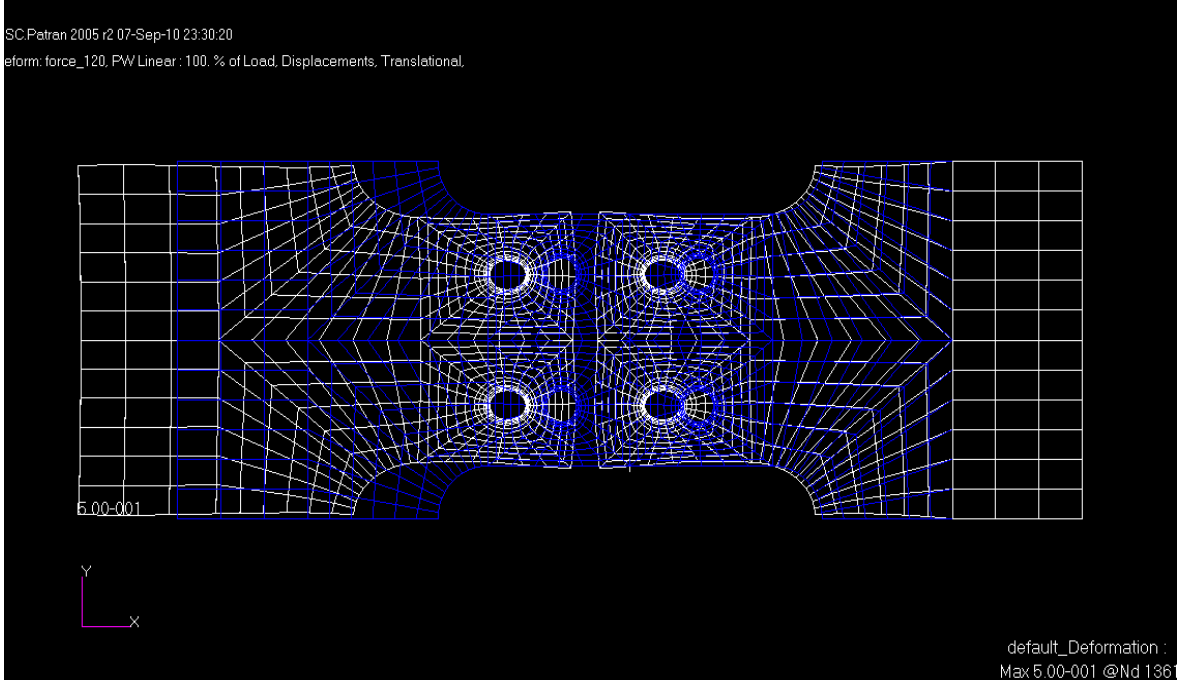
**Şekil 6.2.2** M10-A konfigürasyonun SEM deformasyon şekli.



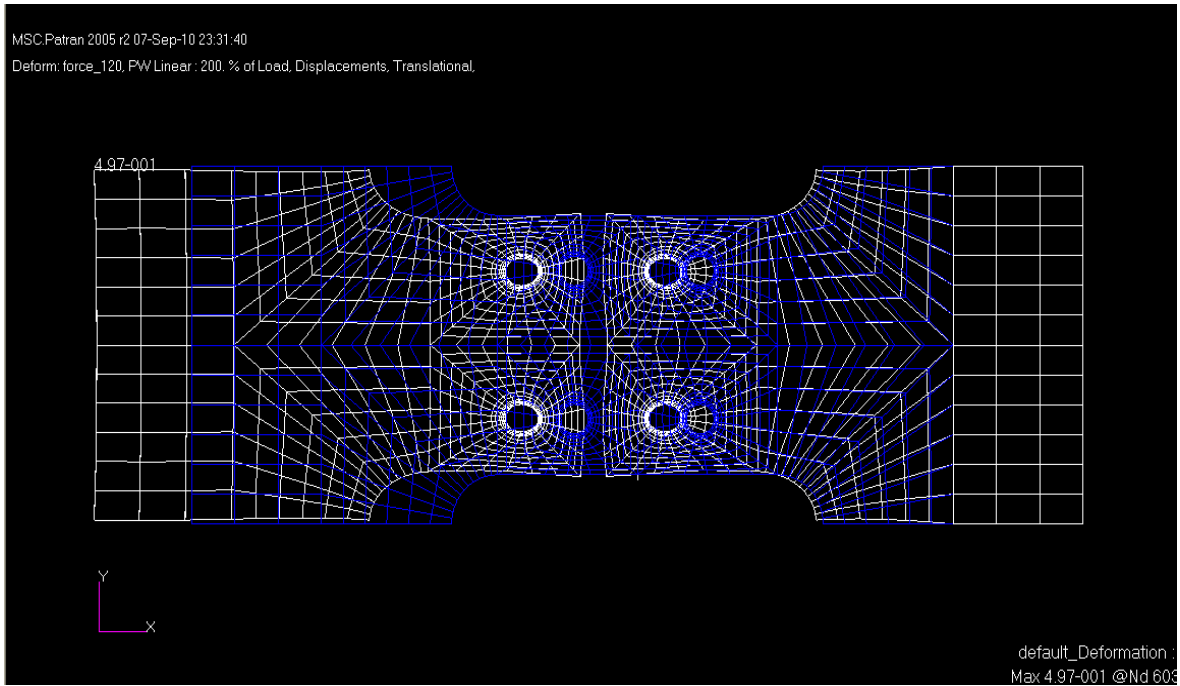
**Şekil 6.2.3** M10-B konfigürasyonun SEM deformasyon şekli.



**Şekil 6.2.4** M12 konfigürasyonun SEM deformasyon şekli.



**Şekil 6.2.5** M12-A konfigürasyonun SEM deformasyon şekli.



**Şekil 6.2.6** M12-B konfigürasyonun SEM deformasyon şekli.

## 7. DENEYSEL ve SAYISAL MODELDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

### 7.1. Sayısal Modelden Elde Edilen Sonuçlar

Çapları ve delikler arası mesafesi değişik altı adet model için 100kN, 120kN, 140kN ve 160 kN olmak üzere dört adet doğrusal olmayan çözüm sonucu alınmıştır. Uygulanan kuvvet değerlerine göre gerilme değerleri elde edilmiştir. Delik etrafında ve iki delik arasının tam ortasından alınan Von-Mises verileri Çizelge 7.1.1'de gösterilmektedir. Gerilme değerleri üzerine lineer interpolasyon yöntemi kullanarak her bir konfigürasyonun 1396MPa 'daki akma noktasına eriştiği bölgede, uygulanan kuvvet değerleri bulunmuştur. Bu değerler deneyden elde edilen verilerle de ayrıca karşılaştırılacaktır.

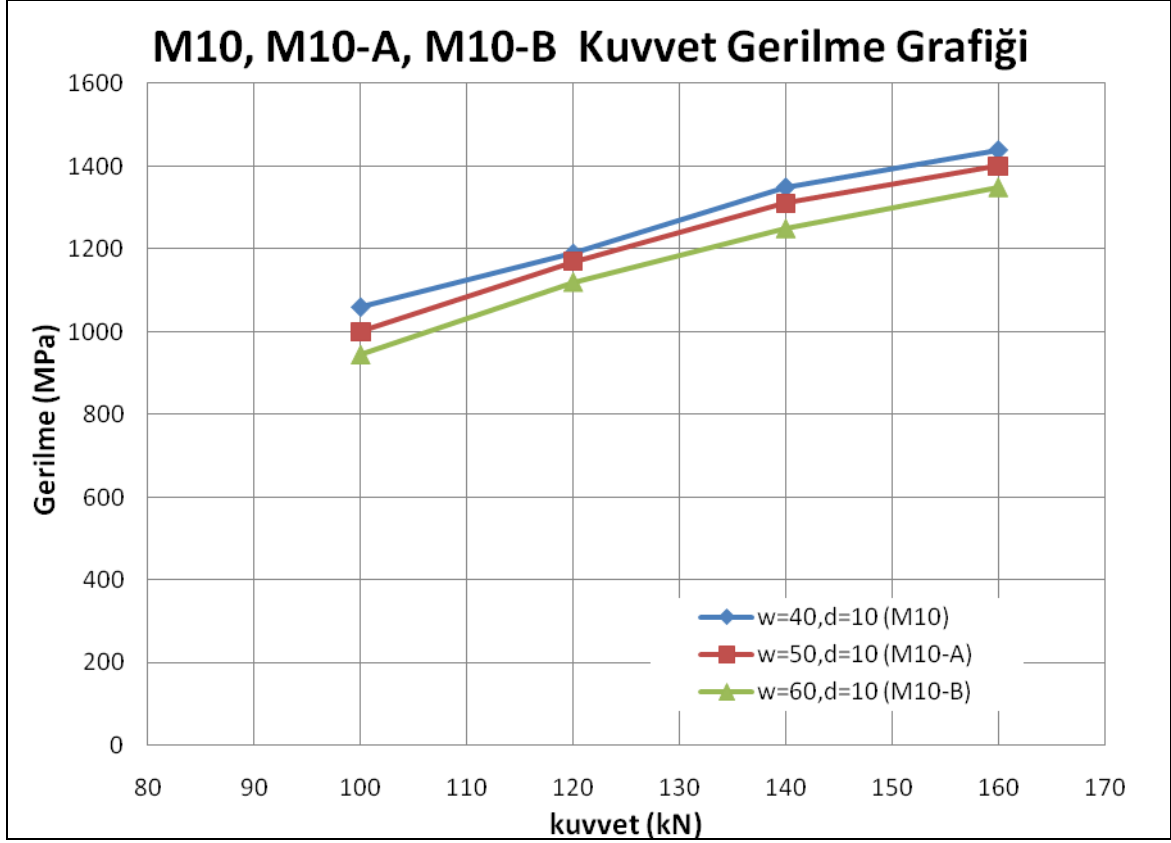
**Çizelge 7.1.1** Sonlu eleman modelinden (SEM) elde edilen veriler.

	Kuvvet s(kN)	Deliklerdeki Yatak Gerilmesi (MPa)	Net Kesit Alanındaki Normal Gerilme (MPa)	z (mm)	d (mm)	Akma Noktasındaki Kuvvet Değeri (kN)
<b>M10</b>	100	1060	282	40	10	142.67
	120	1190	318			
	140	1350	359			
	160	1440	385			
<b>M10-A</b>	100	1000	267	50	10	151.56
	120	1170	312			
	140	1310	349			
	160	1400	372			
<b>M10-B</b>	100	944	189	60	10	162.4
	120	1120	224			
	140	1250	249			
	160	1350	271			

	Kuvvet (kN)	Deliklerdeki Yatak Gerilmesi (MPa)	Net Kesit Alanındaki Normal Gerilme (MPa)	z (mm)	d (mm)	Akma Noktasındaki Kuvvet Değeri (kN)
<b>M12</b>	100	883	235	45	12	168
	120	1060	282			
	140	1210	323			
	160	1330	355			
	170*	1370	367			
<b>M12-A</b>	100	881	235	50	12	174.86
	120	1060	282			
	140	1200	320			
	160	1310	350			
	170*	1345	371			
<b>M12-B</b>	100	851	227	60	12	176.4
	120	1020	272			
	140	1170	312			
	160	1280	341			
	170*	1330	355			

\*170kN 'daki değerler akma noktasının belirlenmesi için SEM'de çözdürülmüştür.

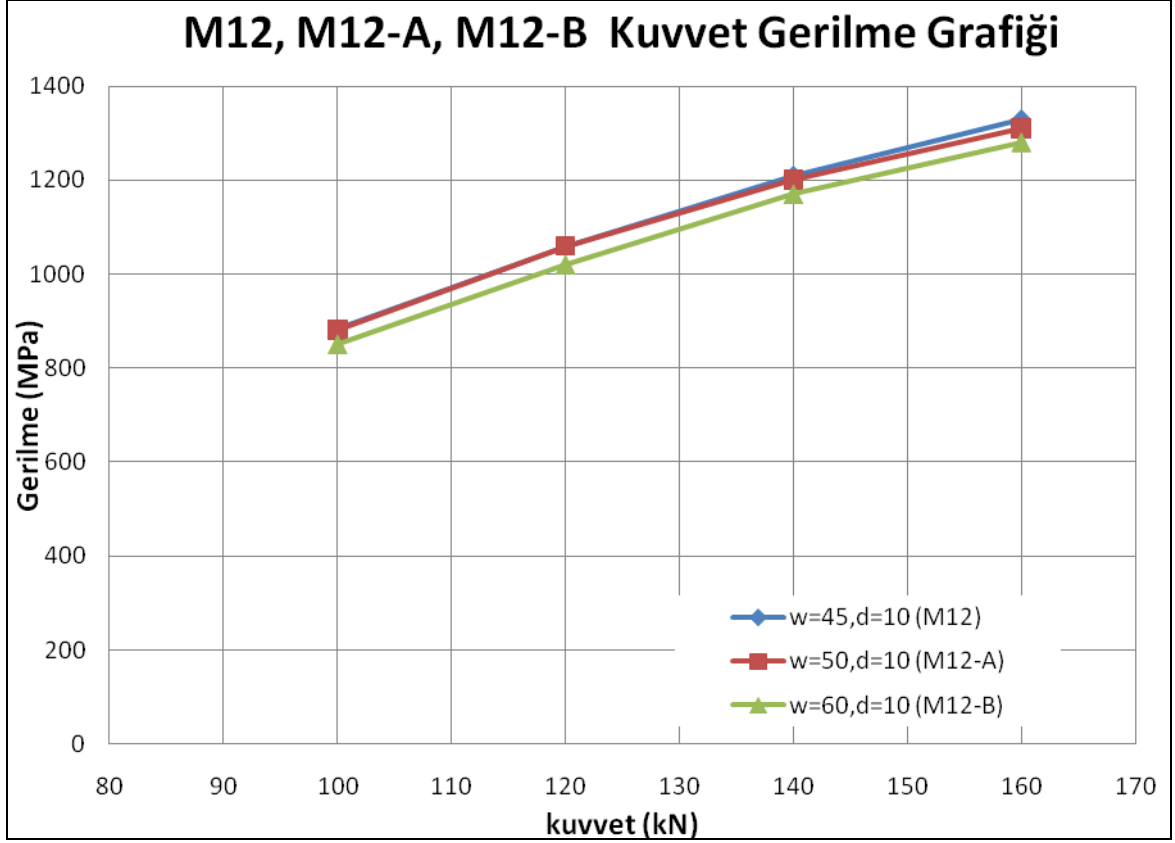
Çapı 10mm ve delikler arası mesafesi 40 mm, 50 mm, 60 mm olan modellerin delik bölgesindeki kuvvet-gerilme grafiği Şekil 7.1.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 7.1.1** d=10 değerine sahip modellerin kuvvet gerilme değerleri.

Grafikteki tüm eğriler aynı doğrultuda artış göstermektedir. Delikler arası mesafesi en büyük olan M10-B konfigürasyonu, M10-A'ya göre daha az gerilmeye sahiptir. M10 diğerlerine kıyasla yük altında plastik bölgeye en erken ulaşacak konfigürasyondur. Bu nedenle elde edilen veriler ışığında delikler arası mesafe ve delik çap değişimi göz önüne alındığında, akma noktasına en geç M10-B modeli ulaşacağı gözükmemektedir.

Çapı 12 mm ve delikler arası mesafesi 45 mm, 50 mm, 60 mm olan modellerin delik bölgesindeki kuvvet gerilme grafiği Şekil 7.1.2'de gösterilmiştir. Buna göre;



**Şekil 7.1.2**  $d=12$  değerine sahip modellerin kuvvet gerilme değerleri.

Grafikteki tüm eğriler birbirleriyle aynı doğrultuda artış göstermektedir. M12 ile M12-A 'daki gerilmelerin yakın çıkması delikler arası mesafe farklarının M12-B 'ye göre daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Delikler arası mesafe ve delik çap değişimi göz önüne alındığında, akma noktasına en geç ulaşacak konfigürasyonun M12-B olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 7.1.1'e bakıldığında tüm konfigürasyonlar için yüksek gerilme değerlerinden dolayı deformasyonlar bağlantı elemanı yataklarında başlamıştır. Net kesit alanlarından alınan gerilme büyüklükleri akma noktasından çok uzak değerdedir ve plastik deformasyonun net kesit alanlarında olmayacağı görülmüştür.

10 mm lik ve 12 mm lik delik çapları dikkate alındığında yatak alan izdüşümü büyük olan aynı kuvvet altında daha az gerilme değeri oluşturmaktadır. Bu



nedenle çapı 12 mm olan konfigürasyonlar çapı 10 mm olanlara göre akma noktasına daha geç erişmektedirler.

## 7.2. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Sonuçlar

M10 ve M12 konfigürasyonlarına ait kuvvet-gerinim değerleri gerilme gerinim grafiklerine dönüştürülmüştür. Yatak gerilmesinin malzemenin akma noktasına eriştiği noktalar bulunarak test numunesini akma noktasına ulaştıracak kuvvet değerleri elde edilmiştir.

Buradan gerilme gerinim grafikleri için yataklarda oluşacak gerilmenin hesaplanması şu şekildedir [29],

$$\sigma_{ytk} = \frac{F \times 1000}{A_{ytk} \times 2} (N / mm^2) \quad (7.1)$$

$$A_{ytk} = \frac{d \times t \times \pi}{2} (mm^2) \quad (7.2)$$

F: Çekme cihazının ölçtüğü kuvvet (kN)

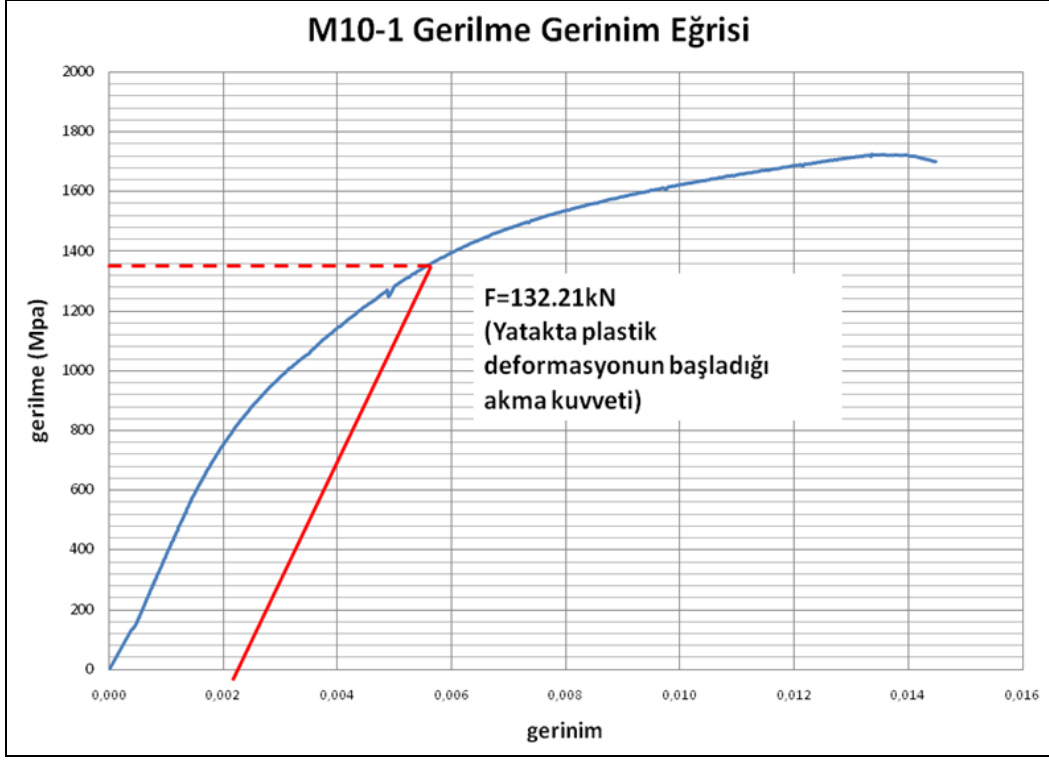
Çapı 12mm olan numunenin alanı:

$$A_{ytk(M12)} = 12.3 \times 3 \times \pi / 2 (mm^2) = 57.9 mm^2 \quad (7.3)$$

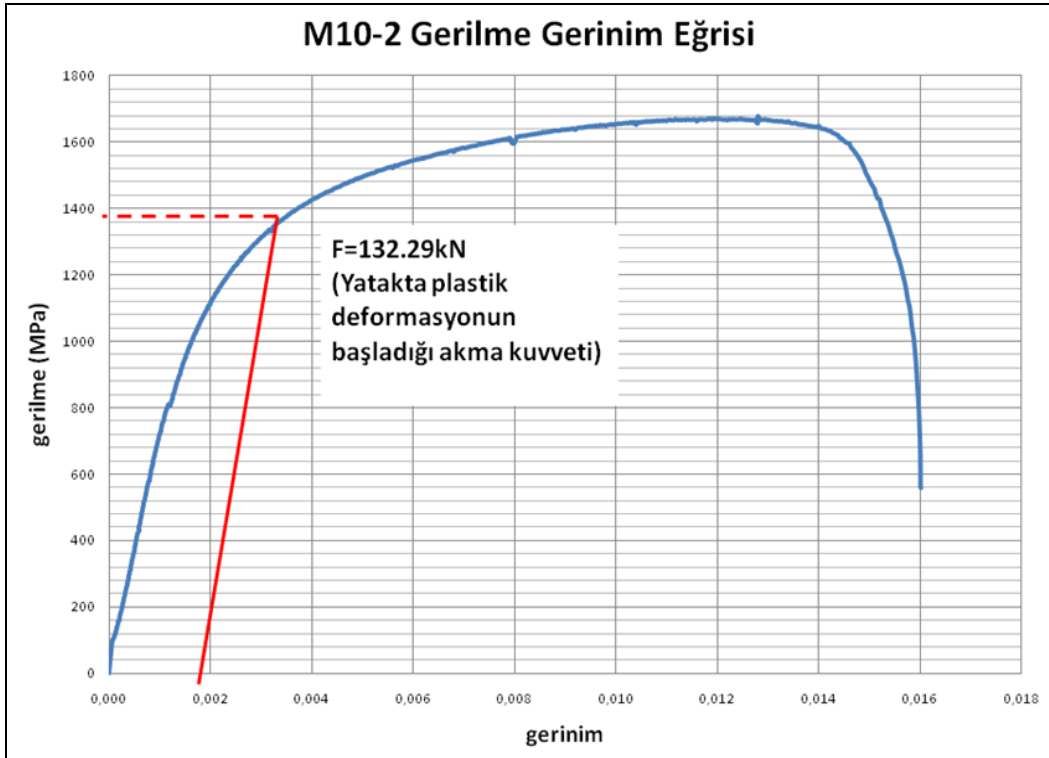
Çapı 10mm olan numunenin alanı:

$$A_{ytk(M10)} = 10.3 \times 3 \times \pi / 2 (mm^2) = 48.5 mm^2 \quad (7.4)$$

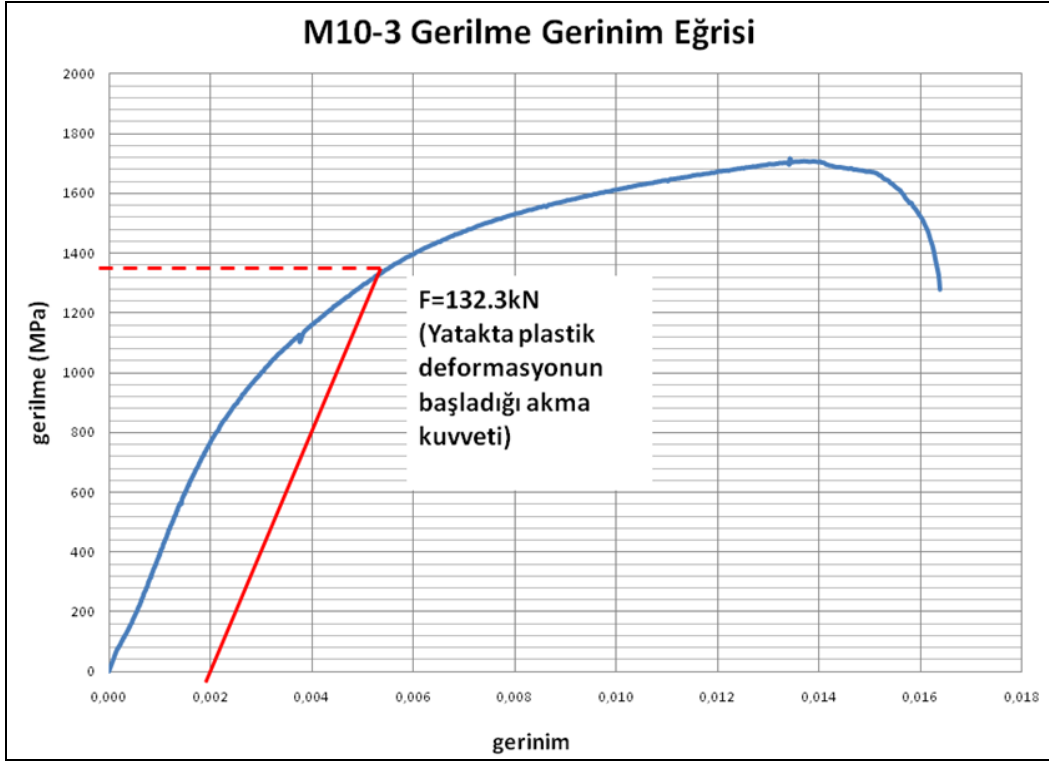
Hesaplamalar sonucunda 1396 MPa değerine karşılık gelen akma kuvveti değerleri bulunmuştur. Bu noktalar %0.2'lik kaydırma metoduyla oluşturulan eğrilerle aynı noktaları göstermektedirler. Elde edilen gerilme-gerinim grafikleri Şekil 7.1.3 - Şekil 7.1.8'de gösterilmiştir.



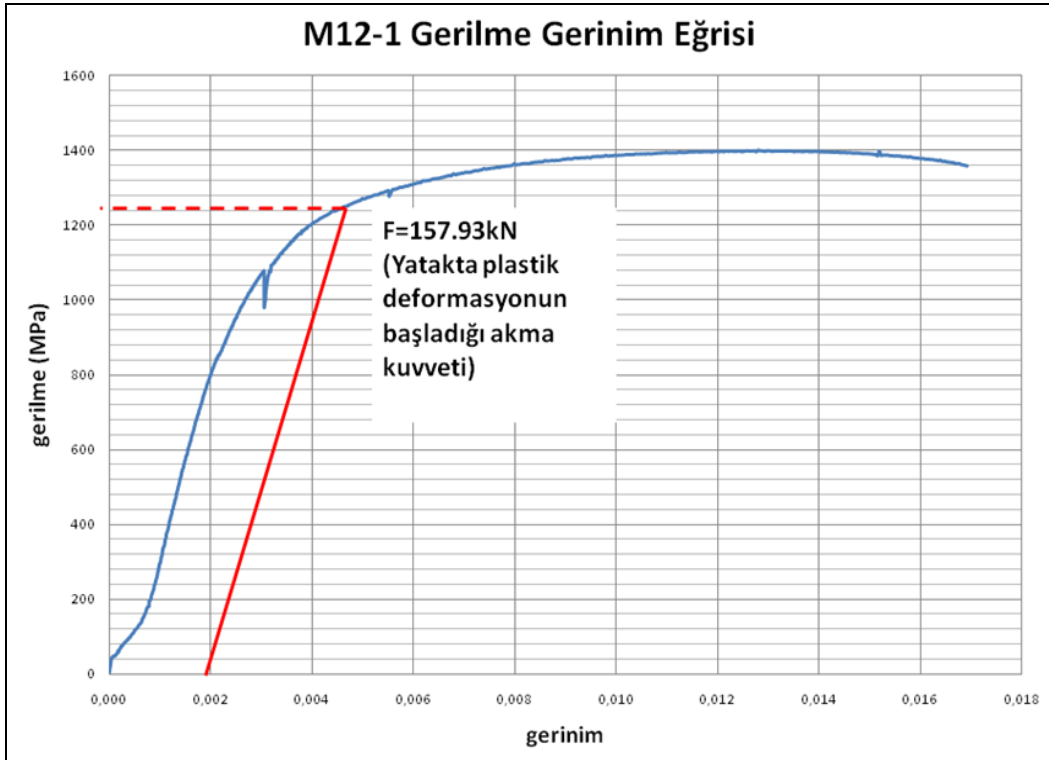
Şekil 7.2.1 M10-1 numunenin gerilme gerinim eğrisi.



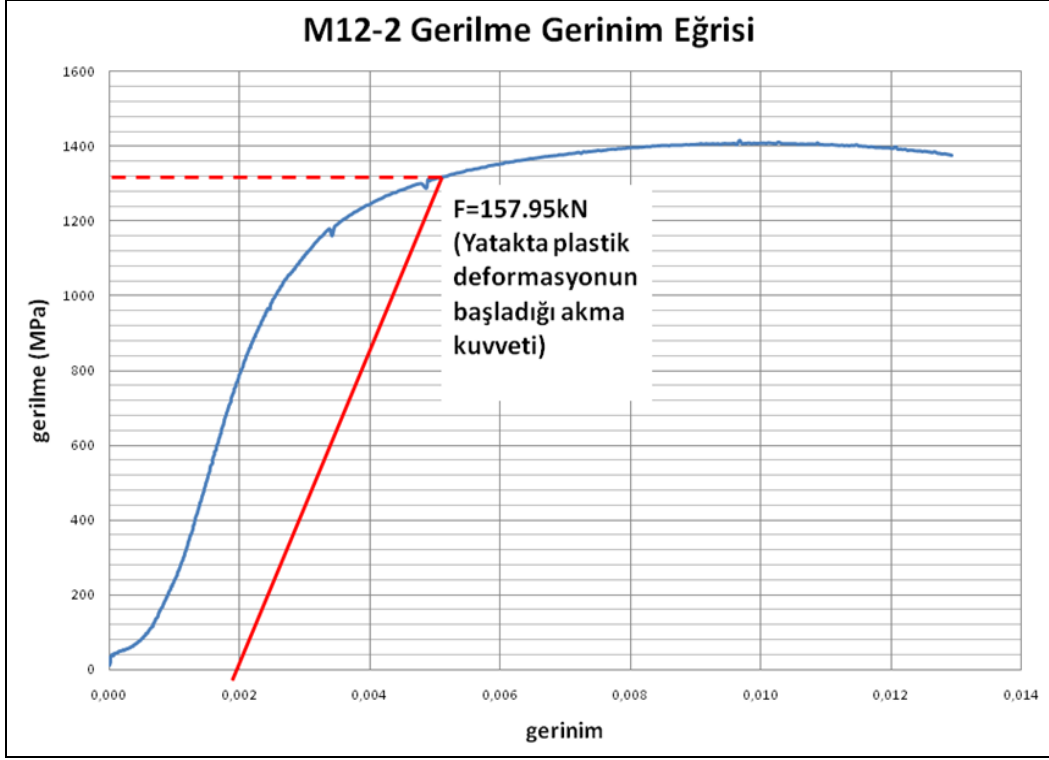
Şekil 7.2.2 M10-2 numunenin gerilme gerinim eğrisi.



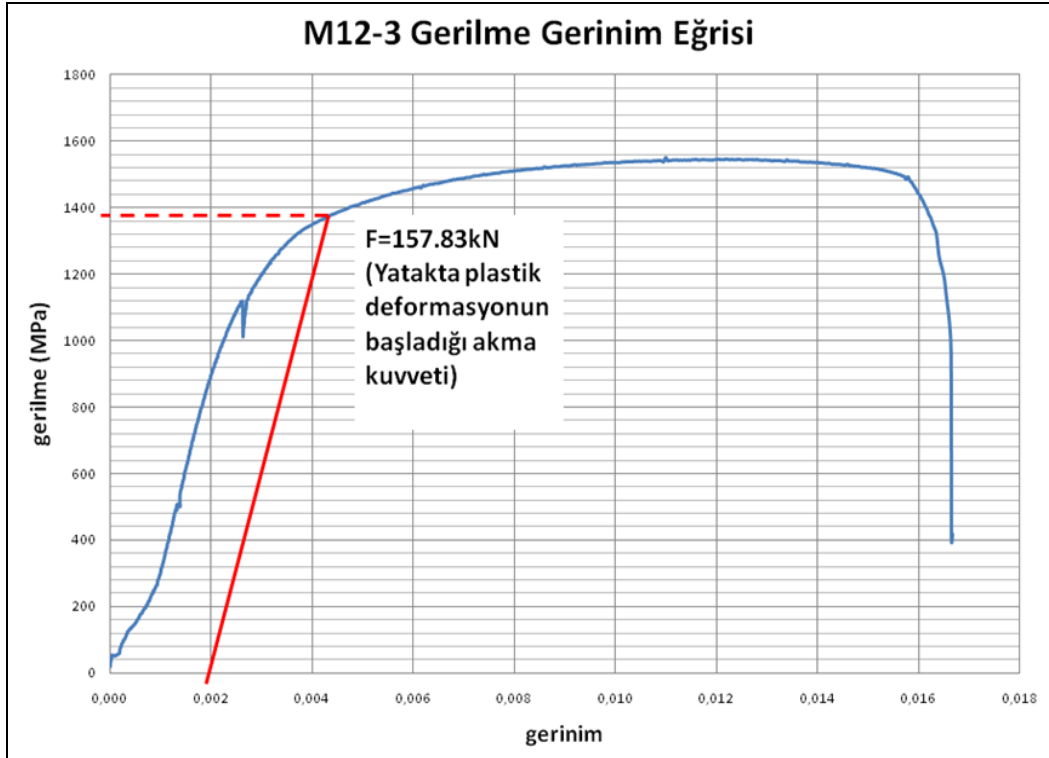
**Şekil 7.2.3** M10-3 numunenin gerilme gerinim eğrisi.



**Şekil 7.2.4** M12-1 numunenin gerilme gerinim eğrisi.



Şekil 7.2.5 M12-2 numunenin gerilme gerinim eğrisi.



Şekil 7.2.6 M12-2 numunenin gerilme gerinim eğrisi.

Buradan her bir konfigürasyonun akma noktasına eriştiği kuvvet değerinin ortalamaları alındığında elde edilen değerler Çizelge 7.2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 7.2.1** M10 ve M12 için deneyden elde edilen ortalama akma noktası değerleri.

	Akma Kuvveti (kN)	Ortalama Akma Kuvveti (kN)
M10-1 (w=40mm)	132.2	132.2
M10-2 (w=40mm)	132.3	
M10-3 (w=40mm)	132.3	
M12-1 (w=45mm)	157.9	157.9
M12-2 (w=45mm)	157.9	
M12-3 (w=45mm)	157.8	

### 7.3. Deney ile Sayısal Modelden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 7.1.1’de sonlu eleman modelinden elde edilen akma noktalarındaki kuvvetler ile deneyden elde edilen malzemenin plastik deformasyona ulaştığı noktadaki kuvvetler karşılaştırılıp birbirleri arasındaki % hata oranı hesaplanmıştır. Çizelge 7.3.1’de elde edilen veriler gösterilmektedir .

**Çizelge 7.3.1** Sayısal model ve deneysel veriler arasındaki hata oranı.

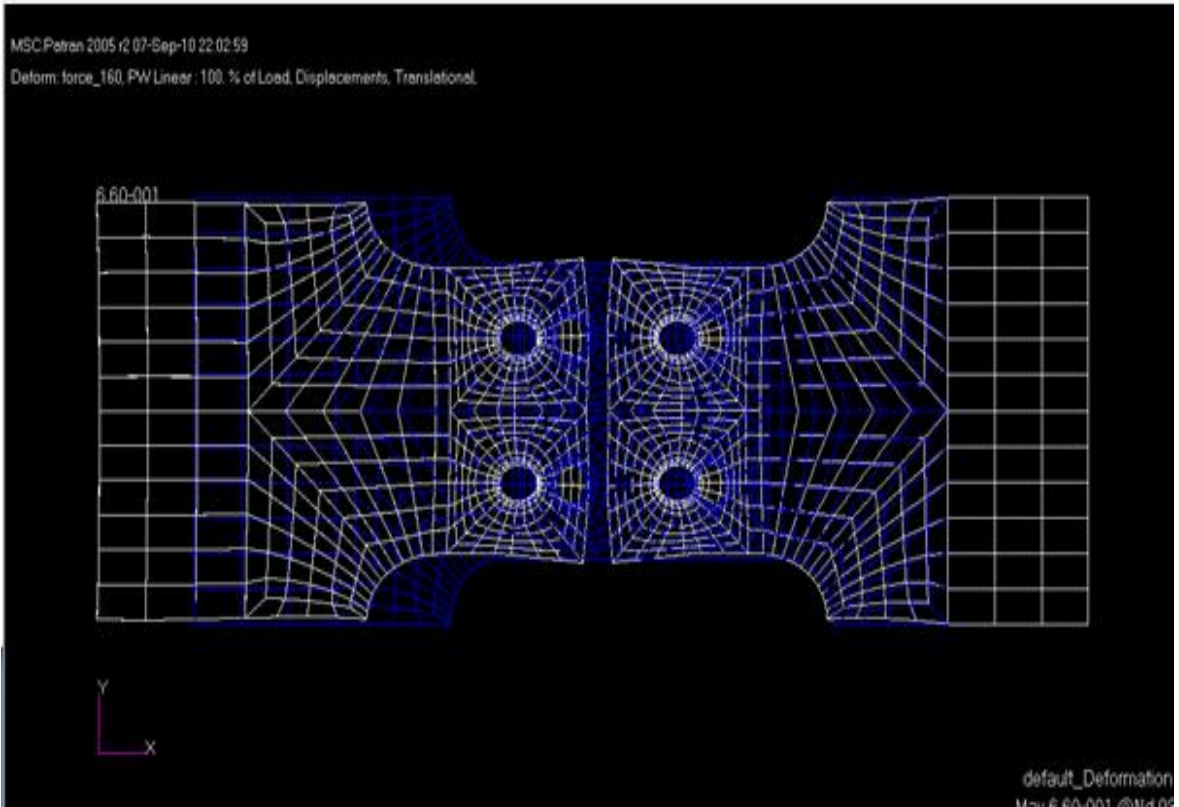
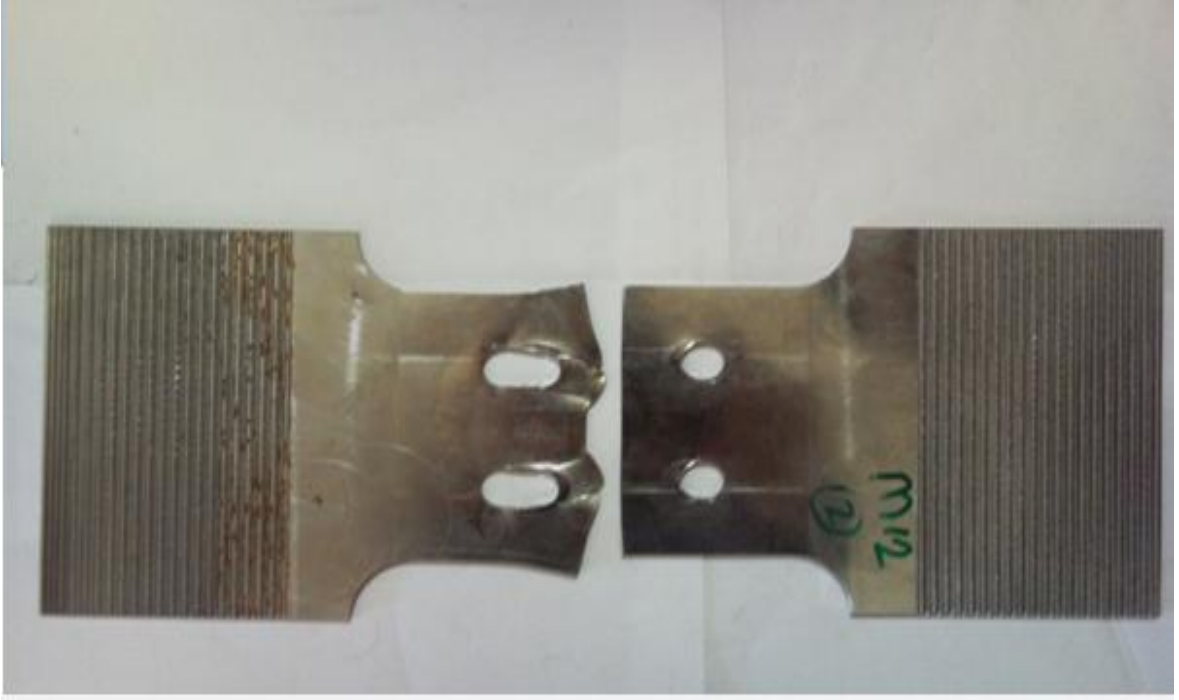
	Deney Kuvvet (kN)	SEM Kuvvet (kN)	% Hata
M10	132.26	142.66	7.86
M12	157.90	168.00	6.39

$$\% Hata = \frac{|Kuvvet(SEM) - Kuvvet(Deney)|}{Kuvvet(Deney)} \times 100 \quad (7.5)$$

Deneylerden ve sayısal modelden elde edilen veriler birbirlerini teyit eder niteliktedir. Bunlara ek olarak sayısal modelden elde edilen veriler ile deney sonrası numuneler üzerinde oluşan deformasyonların birbirine benzer yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 7.3.1'de bir adet test numunesi ile sayısal model çıktısı örnek olarak gösterilmiştir.

Görülen hataların olası kaynakları ise;

- 1) SEM 'de deliklerdeki toleranslar modele katılmamıştır.
- 2) Cıvataların malzeme özellikleri, sonlu eleman modeline izotropik özellikli lineer elastik olarak tanımlanmıştır.
- 3) Deney aşamasında plakaları ve numuneleri bir arada tutmak için cıvatalara 60Nm uygulanarak sıkıldığı ve bu sıkılmadan ötürü plakaların yüzeyleri üzerinden birbirlerine yaptığı kuvvetler modele etki ettirilmemiştir.
- 4) Deneyden elde edilen kuvvete karşı uzama verileri, aynı malzemedan üretilmiş kaynaklı bir numunenin çekme testi cihazında çekilerek elde edildiği kat sayı ile çarpılmıştır. Bu nedenle düzeltme katsayısından kaynaklanan bir hata payı mevcuttur.



**Şekil 7.3.1** Deneysel ve sayısal çalışmaların deformasyon geometrisi.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1. Sonuç

Bu çalışmada yüksek alaşımlı MIL A 46100 çeliğinin iki taraflı bindirmeli plakalı bağlantılarında, delik çapı ve delikler arası mesafenin çekme yükü altında akma mukavemetine etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

Buna göre;

- 1) Numunelerin deformasyon şekline bakıldığında deformasyonun sadece yataklarda meydana geldiği görülmüştür. Net kesit alanı bölgesinde herhangi bir deformasyon söz konusu değildir. Sayısal modelden elde edilen deformasyon geometrisi deneysel çalışmayla paralellik göstermektedir.
- 2) Yatak izdüşümü alanı büyük olan numuneler aynı kuvvet altında daha az gerilme yığılması oluşmaktadır. Bu nedenle hem deneysel hem de sayısal verilere göre M12'lik numuneler M10'luk numunelere göre plastik deformasyona izin vermeksizin daha fazla yük taşıyabilmektedirler.
- 3) Sayısal model sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda M12-B konfigürasyonu ( $d=12$  mm,  $w=60$  mm) malzemenin akma noktasına ulaşma kriterine göre kıyaslandığında diğer tasarımlara nazaran daha fazla yük taşıyabilmektedir. Bunun nedeni ikinci maddede bahsedilen yatak izdüşüm alanı etkisine ek olarak, delikler arası mesafe açıldıkça delik etrafındaki gerilme konsantrasyon etkisinin düşmesidir.

### 8.2. Öneriler

Konu üzerine çalışmalara devam etmek istenirse daha farklı çap, numune kalınlıkları ve delikler arası mesafeler kullanılarak; bindirmeli plaka bağlantılı sisteminin çekme, basma, eğme mukavemetine etkisi araştırılabilir.



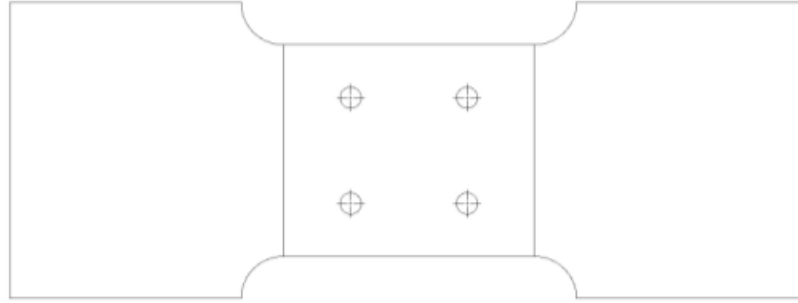
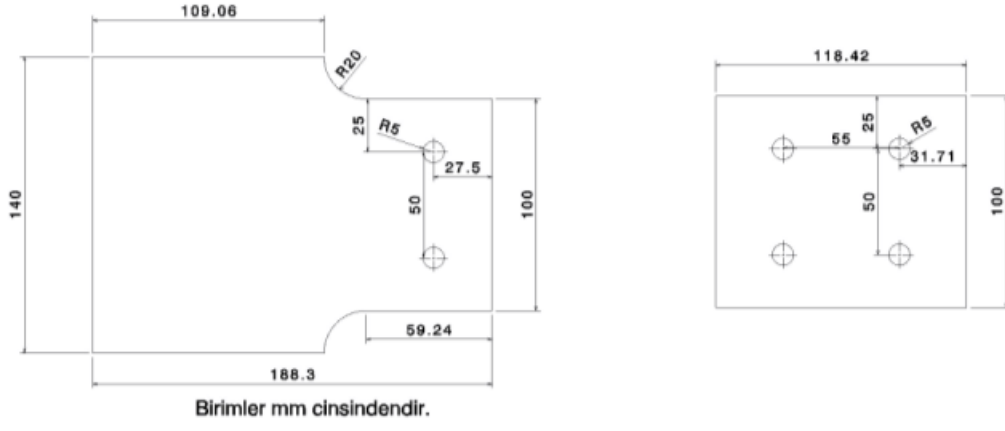
## KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Ay, İ., SAKİN, R., Civatalı Bağlantılarda Gözlenen Hatalar, Mühendis ve Makina, s.17-20, cilt:36, sayı:431, 1995.
- [2] AKKURT, M., Makine Elemanları, Birsen Yayın Evi, 2000.
- [3] Solmaz, E., Çavdar, K., Vida Veriminin Deneysel Tespiti, TMMOB Makine Mühendisleri Odası II. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya-Türkiye, 2003.
- [4] ŞİMŞİR, C., YILDIRIM, O., ÖGEL, B., Çelik Zırh Plakaların Çekiç Düşürme Deneyim ile Düşük Hızlarda Balistik Karakterizasyonu, SAVTEK 2002, ODTU, Ankara-Türkiye, 2002.
- [5] ATAPEK, H., 'Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalürjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu', Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006.
- [6] Karagöz, Ş., Atapek, H., Bor Katkılı Zırh Çeliklerinin Kırılma Davranışı, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul-Türkiye, s.186-196, 2007.
- [7] SAYLAN, S., Civatalı Bağlantılarda Gerilme Analizi, Yük. Lis. Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2002.
- [8] BOUCHAIR, A., AVERSENG, J., ABIDELAH, A., Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections, Journal of Constructional Steel Research, vol.64, s. 1264–1274, 2008.
- [9] Eruslu, S., Özses, Ç., Soğuk Çekilmiş Levha Malzemelerde Gerilme Analizi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, s.129-138, cilt:8, sayı:1, 2006.
- [10] Ling. Y., Uniaxial true stress-strain after necking, AMP Journal of Technology, vol. 5, s.37-48, 1996.

- [11] Ruifen, Q., Dingping, Z., Nonlinear finite element analysis on landing skid of helicopter, Chinese Helicoptern Research and Devetopment Institute, Jingdezhen, 333001, 2001.
- [12] OKA, S., YALIN, Z.; Simulation of Cedimento test of a McPherson Front Suspention Control Arm by Using Finite Element Method, Figes A.Ş.; YPS A.Ş.; 2007.
- [13] Kim, J.; Yoon,J., Kang, B., Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints,www.sciencedirect.com, s.895-911,2007.
- [14] BURSI, O.; JASPART, J., Benchmarks for finite element modeling of bolted steel connections, www.sciencedirect.com, s.17-41,1997.
- [15] Gençoğlu, S., Zırh Teknolojilerindeki Gelişmeler, Savunma Sanayii Gündemi, s.58-67, sayı:5, 2008.
- [16] ÜNAL, E., İleri Teknoloji Seramiklerin Hafif Zırh Yapımında Kullanılması, Savunma Sanayiindeki Teknolojik Gelişilmeler Sempozyumu-Bildiriler Kitabı, s. 231-23, cilt:1, 1997.
- [17] Patel, J., Gilde, A., Dehmer, G., McCauley, W., Weapons and Materials Research Directorate, Army Research Laboratory; AMPTIAC; [http://ammtiac.alionscience.com/pdf/AMPQ4\\_3.pdf](http://ammtiac.alionscience.com/pdf/AMPQ4_3.pdf); 2000.
- [18] Tavman, H., Kompozit Malzemelerin Savunma Sanayiinde Kullanımı, Savunma Sanayiindeki Teknolojik Geliflmeler Sempozyumu-Bildiriler Kitabı, s. 959-966, cilt:2, 1997.
- [19] Gulflink.Osd.Mil Web Sitesi; <http://www.gulflink.osd.mil/du/>; 1998.
- [20] Karagöz, Ş., Atapek, H., Yılmaz, A., Bor Katkılı Zırh Çelikleri: Alaşım ve Isıl İşlemler Doğrultusunda Mekanik Özelliklerin Geliştirilmesi, SAVTEK 2008, ODTU, Ankara-Türkiye, 2008.

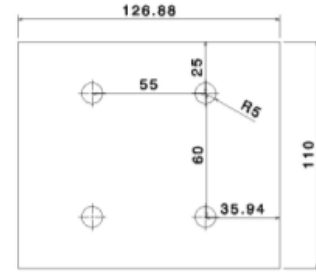
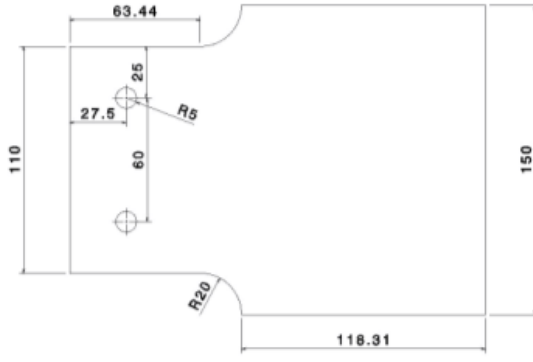
- [21] MIL-A-46100D; Military Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness, 1990.
- [22] İçten, B., Okutan, B., Karakuzu, R., Failure strength of Woven Glass Fiber-epoxy Composites Pinned Joints, Journal of Composite Materials, Vol.37, no 15, 2003.
- [23] NIU, Michael, Airframe structural design, 1<sup>nd</sup> Edition, Conmilit Press, 1988.
- [24] Türk Standardı TS 138 EN 10002-1 ,Metalik Malzemeler-Çekme Deneyi-Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu, TSE, Nisan 2004.
- [25] SHIGLEY, J. and MISCHEKE, R., Mechanical engineering design, 7th Edition, McGraw-Hill, 2004.
- [26] ISO 898-1, Mechanical Properties of Fasteners Made of Carbon Steel and Alloy Steel, Part 1, Bolts, Screw and Studs, 3<sup>th</sup> Edition, 1999.
- [27] “User’s Guide, Getting Started with MSC/NASTRAN®” 1st Edition The MacNeal-Schwendler Corporation© 1993.
- [28] MSC Nastran 2004, Reference Manuel
- [29] OKUTAN, B., Stress and Failure Analysis of Laminated Composite Pinned Joints, M.Sc. thesis, İzmir Dokuz Eylül University, İzmir, 17p, 2001.

## Ek 1 Konfigürasyonların Boyutları

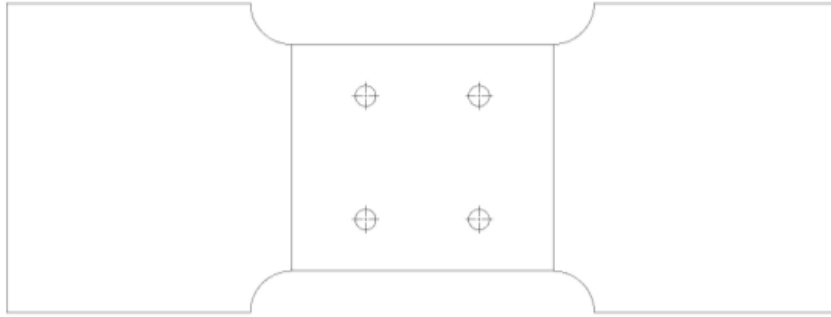


Numunenin montaj halı

M10 A KONFIGURASYONU

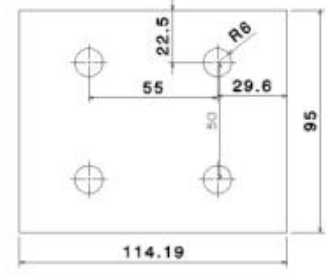
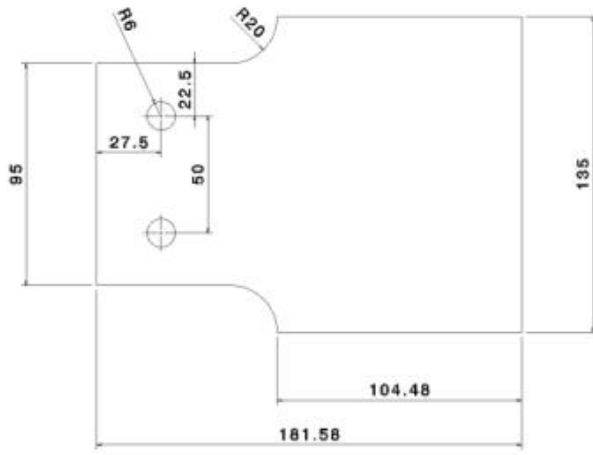


Birimler mm cinsindedir.

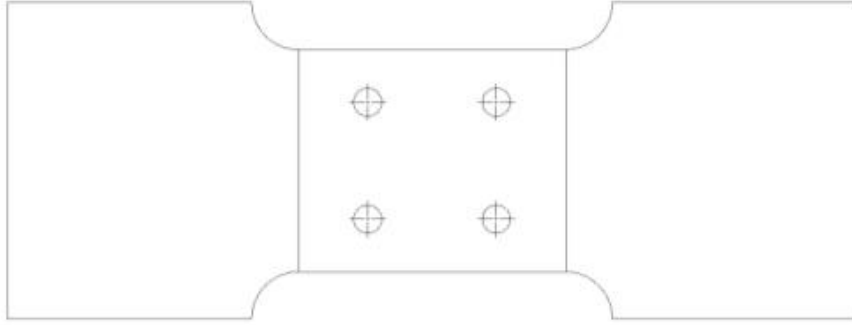


Numunenin montaj halidir.

M10 B KONFIGURASYONU

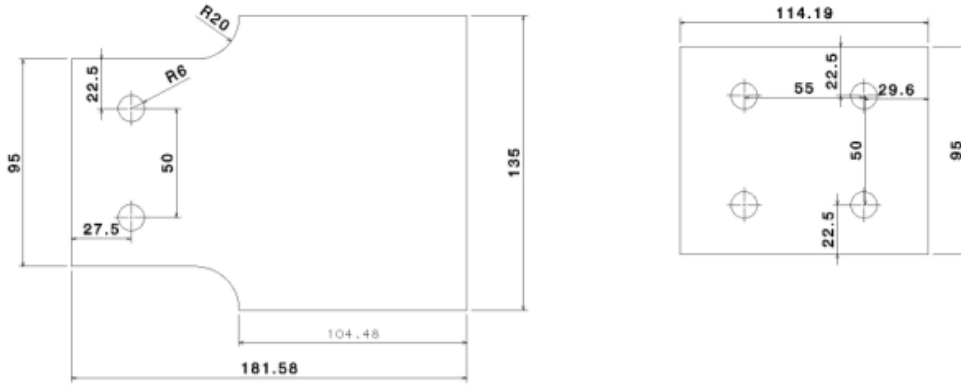


Birimler mm cinsindedir.

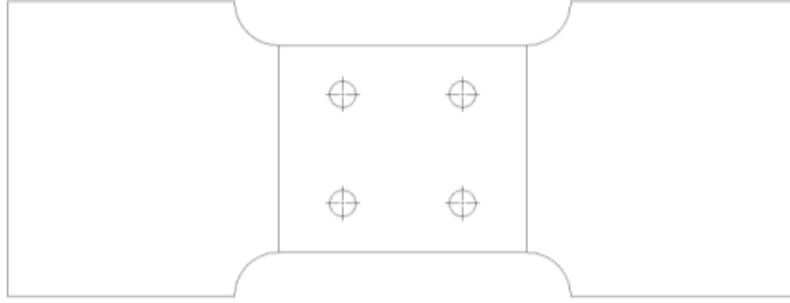


Numunenin montaj halı

M12 A KONFIGURASYONU



Birimler mm cinsindedir.



Numunenin montaj halli

M12 B KONFIGURASYONU

## Ek 2 MIL 46100 Çeliği Çekme Testi Sonucu



**MALZEME ENSTİTÜSÜ**  
**Mekanik Testler Laboratuvarı**

02.03.2009

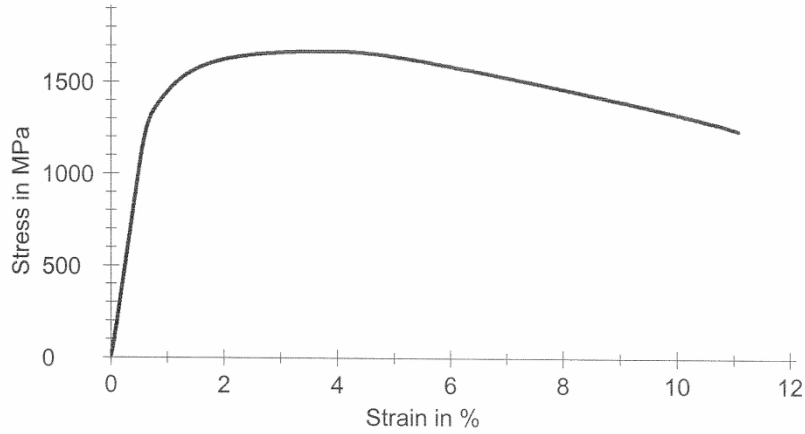
### Parameter table:

Müşteri : CELAL EVCİ Load cell : 250 kN  
Testi yapan : A.G - H.T Extensometer : Multisens  
Test standardı : TS 138 EN 10002-1 Specimen grips:  
Malzeme : Numune - 1 Test hızı : 2 mm/min

### Results:

Nr	cap d0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	L0 mm	E-Modulus MPa	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	RB MPa	A %
1	10,07	79,64	45,02	211303,49	1396,23	1667,79	1234,02	10,48

### Series graphics:



### Statistics:

Series n = 1	cap d0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	L0 mm	E-Modulus MPa	Rp 0.2 MPa	Rm MPa	RB MPa	A %
x	10,07	79,64	45,02	211303,49	1396,23	1667,79	1234,02	10,48
s	-	-	-	-	-	-	-	-
min.	10,07	79,64	45,02	211303,49	1396,23	1667,79	1234,02	10,48
max.	10,07	79,64	45,02	211303,49	1396,23	1667,79	1234,02	10,48
R	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



<b>Analiz İçin Sonlu Eleman Modeline Tanıtılan Malzeme Verileri</b>					
<b>gerinim</b>	<b>gerilme</b>	<b>gerinim</b>	<b>gerilme</b>	<b>gerinim</b>	<b>gerilme</b>
0.0000	0	0.0400	1734.1	0.0734	1550.8
0.0060	1362.6	0.0406	1733.3	0.0740	1544.5
0.0066	1404.7	0.0411	1731.7	0.0746	1538.2
0.0072	1433.2	0.0417	1729.3	0.0751	1531.9
0.0078	1457.1	0.0423	1726.3	0.0757	1525.7
0.0084	1477.1	0.0429	1722.7	0.0762	1519.7
0.0090	1493.6	0.0434	1718.8	0.0768	1513.9
0.0096	1507.3	0.0440	1714.5	0.0773	1508.2
0.0101	1518.6	0.0446	1710	0.0779	1502.6
0.0107	1528.9	0.0452	1705.3	0.0784	1496.9
0.0113	1538.6	0.0457	1700.7	0.0790	1491.3
0.0119	1547.7	0.0463	1696.1	0.0796	1485.6
0.0125	1556.2	0.0469	1691.8	0.0801	1479.9
0.0131	1564.3	0.0475	1687.7	0.0807	1474.2
0.0137	1571.8	0.0480	1684.1	0.0812	1468.5
0.0143	1578.9	0.0486	1680.9	0.0818	1462.8
0.0149	1585.7	0.0492	1678.3	0.0823	1457.1
0.0155	1592.1	0.0497	1675.7	0.0829	1451.4
0.0161	1598.1	0.0503	1673.3	0.0834	1445.7
0.0167	1603.9	0.0509	1670.9	0.0840	1440
0.0173	1609.5	0.0515	1668.6	0.0845	1434.2
0.0178	1614.9	0.0520	1666.4	0.0851	1428.5
0.0184	1620.1	0.0526	1664.2	0.0856	1422.8
0.0190	1625.3	0.0532	1662.1	0.0862	1417
0.0196	1630.3	0.0537	1660	0.0867	1411.2
0.0202	1635.3	0.0543	1657.9	0.0873	1405.5
0.0208	1640.3	0.0549	1655.8	0.0878	1399.7
0.0214	1645.2	0.0554	1653.7	0.0884	1393.9
0.0220	1650	0.0560	1651.6	0.0889	1388.1
0.0225	1654.7	0.0566	1649.5	0.0895	1382.3
0.0231	1659.3	0.0571	1647.4	0.0900	1376.5
0.0237	1663.8	0.0577	1645.2	0.0906	1370.7
0.0243	1668.1	0.0583	1643	0.0911	1364.9
0.0249	1672.3	0.0588	1640.8	0.0917	1359
0.0255	1676.3	0.0594	1638.7	0.0922	1353.2
0.0261	1680.2	0.0600	1636.7	0.0928	1347.4
0.0266	1683.9	0.0605	1634.7	0.0933	1341.5
0.0272	1687.5	0.0611	1632.8	0.0939	1335.7

0.0278	1690.8	0.0617	1630.9	0.0944	1329.8
0.0284	1693.9	0.0622	1629	0.0949	1323.9
0.0290	1696.8	0.0628	1627	0.0955	1318
0.0296	1699.5	0.0634	1625	0.0960	1312.2
0.0301	1702.1	0.0639	1622.9	0.0966	1306.3
0.0307	1704.6	0.0645	1620.7	0.0971	1300.4
0.0313	1707.1	0.0650	1618.3	0.0977	1294.5
0.0319	1709.6	0.0656	1615.8	0.0982	1288.5
0.0325	1712.1	0.0662	1613.2	0.0988	1282.6
0.0330	1714.5	0.0667	1610.3	0.0993	1276.7
0.0336	1716.8	0.0673	1607.2	0.0998	1270.8
0.0342	1719.1	0.0678	1603.8	0.1004	1264.8
0.0348	1721.3	0.0684	1600.1	0.1009	1258.9
0.0354	1723.3	0.0690	1595.8	0.1015	1252.9
0.0359	1725.3	0.0695	1591.1	0.1020	1246.9
0.0365	1727.1	0.0701	1586.1	0.1026	1241
0.0371	1728.8	0.0706	1580.8	0.1031	1235
0.0377	1730.4	0.0712	1575.1	0.1036	1229
0.0383	1731.8	0.0718	1569.3	0.1042	1223
0.0388	1733	0.0723	1563.2		
0.0394	1734	0.0729	1557.1		

## **ÖZGEÇMİŞ**

Gözde Demir Küçükatalay, 1984 yılında Ankara'da doğdu. İlköğrenimini Yüce-tepe İlkokulu'nda, ortaokul ve lise eğitimini TED Ankara Koleji'nde tamamladı. 2003 yılında kazandığı Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2007 yılında mezun oldu. Ocak 2008 yılından bu yana, TAI-TUSAŞ Havacılık ve Uzay Sanayi Anonim Şirketi'nde yorulma ve hasara tolerans analiz mühendisi olarak görev yapmaktadır. Araştırma konuları, uçak yapısı, malzemelerin yorulma ve hasara tolerans analizleri, sonlu elemanlar analizidir.