



KENDİNDEN KENETLENMELİ BAĞLANTI ELEMANLARINA
AİT BOYUTSAL ÖZELLİKLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Süleyman KAHRAMAN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Onur SARAY

2017



T.C

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENDİNDEN KENETLENMELİ BAĞLANTI
ELEMENLARINA AİT BOYUTSAL ÖZELLİKLERİN
YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman KAHRAMAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

BURSA

Şubat 2017

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

“SÜLEYMAN KAHRAMAN” tarafından “YRD. DOÇ. DR. ONUR SARAY” yönetiminde hazırlanan “KENDİNDEN KENETLENMELİ BAĞLANTI ELEMANLARINA AİT BOYUTSAL ÖZELLİKLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tez, kapsamı ve niteliği açısından incelenmiş ve **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Onur SARAY
(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Prof. Dr. Bahattin KANBER
(Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü)

Doç. Dr. Rukiye ERTAN
(Uludağ Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü)

Tez Savunma Tarihi: .../.../.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Doç. Dr. Murat ERTAŞ

.../.../20...

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Süleyman KAHRAMAN

İmzası:

X X X X

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında değerleri vakitlerini ayıran ve bu tezin baőlangıcından son aőamasına kadar yakından ilgilenen saygı değer Hocam Yrd. Doç. Dr. Onur SARAY'a, tez çalışması kapsamında deneysel numunelerin üretilmesi konusunda desteğini esirgemeyen değerli insan Akın KAYA'ya ve beni bugünlere kadar yetiőtiren aileme sonsuz teőkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında kullanılan MSC Simufact Forming paket programına ait lisansının sağlanmasıdaki yardımları için NETFORM Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. Őti firmasına teőkür ederim. Çalışmada kullanılan alüminyum malzemenin sağlanmasıdaki yardımları için TOFAŐ TÜRK OTOMOBİL FABRİKASI A.Ő. firmasına teőkür ederim.

Süleyman KAHRAMAN

İÇİNDEKİLER

sayfa no

Dış Kapak	
İç Kapak	
Tez Sınav Sonuç Formu	
İntihal Beyanı	
Teşekkür	
İçindekiler	v
Şekil Listesi	vii
Çizelge Listesi	xi
Sembol ve Kısaltma Listesi	xii
Özet	xiii
Abstract	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Hafif Gövde Parçalarının Üretiminde Kullanılan Güncel Malzeme Grupları	3
2.2. Şekillendirme ile Mekanik Birleştirme Yöntemleri	6
2.2.1 Çözülmeyen birleştirme yöntemleri	6
2.2.2 Kenetleme ile çözülebilir bağlantı noktalarının oluşturulmasına yönelik prosesler	12
2.3 Çalışmanın Amacı	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	15
3.1. Araştırma Planı	15
3.1.1 Kendinden kenetlemeli cıvatanın kavramsal tasarımı	16
3.1.2 Kendinden kenetlemeli cıvatanın boyutsal özelliklerinin etkilerinin araştırılması	19
3.1.3. Tasarım doğrulama deneyleri	20
3.2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu	21
3.3. Kendinden Kenetlemeli Cıvataların Tespit Deneyleri	22
3.4. Kendinden Kenetlemeli Cıvataların Eksenel Sökme Deneyleri	24
3.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi Modeli	25

	<u>sayfa no</u>
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	33
4.1. Bulgular	33
4.1.1 Alüminyum levhanın mekanik karakterizasyonu	33
4.1.2 Cıvata ve zımba imalatında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri	34
4.1.3 Sonlu elemanlar yöntemi modelinin kalibrasyonundan elde edilen bulgular	35
4.1.4. Cıvata geometrisine ait değişkenlerin etkisi	41
4.1.4.1 Yığılma bölgesi çapının (parametre-1) etkisi	49
4.1.4.2 Yığılma bölgesi yüksekliğinin (parametre-2) etkisi	54
4.1.4.3 Yığılma açısının (parametre-3) etkisi	62
4.1.4.4 Moment çapının (parametre-4) etkisi	68
4.1.4.5 Cıvata çapının (parametre-5) etkisi	76
4.1.4.6 Yığılma bölgesi geometrisi (parametre-6) etkisi	81
4.1.5 Geometrik sonuçların deneysel değerlendirilmesi (optimize parametre)	87
4.1.6 Optimize parametrenin imalatı ve deneysel sonuçları	95
4.2 Tartışmalar	
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
5.1 Sonuçlar	103
5.2 Öneriler	105
KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİL LİSTESİ

		<u>sayfa no</u>
Şekil 2.1	Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin mukavemet ve süneklik özellikleri	4
Şekil 2.2	Kenar kıvrıma prosesinin şematik gösterimi	8
Şekil 2.3	Perçinleme (kendinden delmeli) prosesinin şematik gösterimi	8
Şekil 2.4	Kenetleme prosesinin şematik gösterimi	8
Şekil 2.5	AA5032 alüminyum levhaların birleştirilmesinde perçinleme, kenetleme ve punta kaynağı yöntemleri kullanılması halinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri	9
Şekil 2.6	Kenetleme ile oluşturulmuş birleşme bölgesinin kesit görünümü	10
Şekil 2.7	Otomotivde kullanılan kenetleme örnekleri a) A direk, B direk ve kapı çerçevelerine uygulanmış Al/çelik kenetleme uygulamaları	11
Şekil 2.8	Kendinden kenetlemeli bağlantı elamanına ait uygulama prensiplerinin şematik gösterimi	13
Şekil 3.1	Tez çalışması kapsamında kullanılan araştırma planı	16
Şekil 3.2	Kendinden kenetlemeli cıvataların tespit işleminin şematik gösterimi. a: Kendinden kenetlenmeli cıvatanın alüminyum levhaya tespit etme düzeneğinin kesit şeması.	18
Şekil 3.3	Kendinden kenetlemeli cıvata (a) katı model görünümü, (b)teknik resmi	18
Şekil 3.4	Cıvatanın mekanik davranışlarının tespiti için değerlendirilen geometrilerin şematik gösterimi	20
Şekil 3.5	Çekme numunesinin teknik resmi	22
Şekil 3.6	Cıvata tespit işlemlerinde kullanılan yükleme düzeneği (a) fotoğrafı. (b)Teknik resmi	23
Şekil 3.7	Cıvata-Al levha çiftine uygulanan aksenal sökme deneylerinde kullanılan düzeneğin: (a) fotoğrafı, (b) teknik resmi	24
Şekil 3.8	Şekillendirme sürecinin simülasyonunda kullanılan SEY modeli (a) genel durum, (b) Levhanın ağ yapısı, (c) Cıvatanın ağ yapısı, (d) zımbanın ağ yapısı	27
Şekil 3.9	Eksenel sökme sürecinin simülasyonunda kullanılan SEY modeli (a) Proses başlangıcı, (b) Proses sonu (c) Proses başlangıcında cıvatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri , (d) Proses sonunda cıvatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri	28
Şekil 3.10	Eksenel döndürme momenti altında sökme sürecinin simülasyonunda kullanılan SEY modeli (a) Proses başlangıcı, (b) Proses sonu, (c) Proses başlangıcında cıvatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri , (d) Proses sonunda cıvatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri	29
Şekil 3.11	SEY modelindeki elemanların akış (Efektif gerilme-efektif gerinim) eğrileri (a) AA5182 alaşımı, (b) AISI 1050 çeliği ve (c) AISI 4140 çeliği	30
Şekil 4.1	AA5182 Al Malzemesine ait Gerilme Gerinim diyagramı	33

Şekil 4.2	Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması	37
Şekil 4.3	Alüminyum levhanın cıvata boşluğunu strok yük grafiğinde ortaya çıkan eğimlere göre doldurma bölgeleri	38
Şekil 4.4	Fiziksel olarak tespit edilen cıvatanın (a) EDM ile kesit alınmış numunesi (b) kalibre edilmiş analizin (Analiz-I) kesiti.	38
Şekil 4.5	Kalibre edilen SEY modeline ait (a). Alüminyum levhada oluşan gerinim dağılımı, (b) cıvatada meydana gelen gerinim dağılımı	39
Şekil 4.6	Alüminyum levhada meydana gelen malzeme akışı ve akış vektörü. (Akış hızı mm/sn)	40
Şekil 4.7	Kalibre edilen SEY modeline ait: (a) Alüminyum levhada oluşan gerilme dağılımı, (b) cıvatada meydana gelen gerilme dağılımı. (Gerilme birimi: MPa)	41
Şekil 4.8	Yığılma Bölgesi Çapı	42
Şekil 4.9	Yığılma bölgesi çapının cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) YBC=4,48 mm (kalibrasyon analizi), (b) YBC=4,52 mm (c) YBC=4,38 mm ve (d) YBC=4,28 mm	43
Şekil 4.10	Yığılma bölgesi çapının değişime ait (a) basma kuvveti-strok (b) aksel sökme kuvveti-strok (c) Aksel döndürme momenti – açı grafikleri	46
Şekil 4.11	Yığılma bölgesi çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) YBC = 4,52 mm, (b) YBC = 4,38 mm ve (c) YBC =4,28 mm	47
Şekil 4.12	Yığılma bölgesi çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) YBC = 4,52 mm, (b) YBC = 4,38 mm ve (c) YBC =4,28 mm (Gerilme birimi: MPa)	48
Şekil 4.13	Yığılma bölgesi yüksekliği	49
Şekil 4.14	Yığılma bölgesi yüksekliğinin cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) Kalibrasyon analizi YBY=4,5mm, (b)YBY=4,6mm ve (c) YBY=4,4mm	50
Şekil 4.15	Yığılma bölgesi yüksekliği değişime ait (a) basma kuvveti-strok (b) aksel sökme kuvveti-strok (c) Aksel döndürme momenti – açı grafikleri	52
Şekil 4.16	Yığılma bölgesi yükseklik değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) YBY = 4,60 mm, (b) YBC = 4,40 mm	53
Şekil 4.17	Yığılma bölgesi yükseklik değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) YBY = 4,6 mm, (b), YBC = 4,4 mm (Gerilme birimi:MPa)	54
Şekil 4.18	Yığılma açısı	55
Şekil 4.19	Yığılma açısının cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) Kalibrasyon analizi YA=81°, (b) YA=80°, (c) YA=85° ve (d) YA=90°	56
Şekil 4.20	Yığılma açısının değişimine ait (a) basma kuvveti-strok, (b) aksel sökme kuvveti-strok, (c) aksel döndürme momenti- açı grafikleri	59
Şekil 4.21	Yığılma açısı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) YA=80°, (b) YA=85° ve (c) YA=90°	60
Şekil 4.22	Yığılma açısı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada	61

	meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) YA=80°, (b) YA=85° ve (c) YA=90° (Gerilme birimi: MPa)	
Şekil 4.23	Moment çapı	62
Şekil 4.24	Moment çapının cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) kalibrasyon analizi MÇ=6,00 mm, (b) MÇ=6,50 mm, (c) MÇ=5,50 mm	63
Şekil 4.25	Moment çapının değişimine ait (a) basma kuvveti-strok, (b) aksenal sökme kuvveti-strok, (c) aksenal döndürme momenti-açı grafikleri	66
Şekil 4.26	Moment çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) MÇ=6,50 mm, (b) MÇ=5,50 mm	67
Şekil 4.27	Moment çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) MÇ=6,50 mm, (b) MÇ=5,50 mm (Gerilme birimi:MPa)	68
Şekil 4.28	Cıvata çapı	69
Şekil 4.29	Cıvata çapının cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) kalibrasyon analizi CÇ=7 mm, (b) CÇ=7,50 mm, (c) CÇ=7,25 mm, (d) CÇ=6,75 mm ve (e) CÇ=6,50 mm	70
Şekil 4.30	Cıvata çapının değişimine ait (a) basma kuvveti-strok, (b) aksenal sökme kuvveti-strok, (c) aksenal döndürme momenti-açı grafikleri	73
Şekil 4.31	Cıvata çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) CÇ=7,5 mm, (b) CÇ=7,25 mm, (c) CÇ=6,75 mm ve (d) CÇ=6,50 mm	74
Şekil 4.32	Cıvata çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) CÇ=7,5 mm, (b) CÇ=7,25 mm, (c) CÇ=6,75 mm ve (d) CÇ=6,50 mm (Gerilme birimi: MPa)	75
Şekil 4.33	Yığma bölgesi geometrisi	76
Şekil 4.34	Yığma bölgesi geometrisinin cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) kalibrasyon analizi YBG= İç Bükey, (b) YBG=Dış Bükey	77
Şekil 4.35	Yığma bölgesi geometrisinin değişime ait (a) basma kuvveti-strok (b) aksenal sökme kuvveti-strok (c) Aksenal döndürme momenti – açı grafikleri	80
Şekil 4.36	Yığma bölgesi geometrisine ait cıvata ve alüminyum levhada meydana gelen gerilme dağılımı	79
Şekil 4.37	Yığma bölgesi geometrisine ait cıvata ve alüminyum levhada meydana gelen gerime dağılımı (Gerilme birimi: MPa)	81
Şekil 4.38	Optimize parametreye ait (a) teknik resim, (b) 3 boyutlu isometrik görünüş, (c) 3 boyutlu ön görünüş	82
Şekil 4.39	Optimize (a) ve kalibrasyon (b) geometrilerine ait dolum profilleri	83
Şekil 4.40	Optimize ve kalibrasyon geometrilerine ait: (a) basma-strok eğrisi, (b) aksenal sökme-strok eğrisi, (c) aksenal döndürme moment-açı eğrileri	85
Şekil 4.41	Optimize geometriye ait cıvatanın alüminyum levhaya tespit edilmesi sonucu elde edilen alüminyum levha ve cıvatada	86

	ortaya çıkan (a) gerinim dağılımı, (b) gerilim dağılım. (Gerilme birimi: MPa)	
Şekil 4.42	Optimize parametre revizyonu sonrasında elde edilen cıvataya ait: (a) teknik resim, (b)-(c) CAD modeli	87
Şekil 4.43	Benzetim çalışmaları ile deneysel sonuçlardan elde edilen (a) şekillendirme-strok grafiği, (b) aksenal sökme-strok grafiği	90
Şekil 4.44	Fiziksel olarak tespit edilen cıvata ile analiz sonucu elde edilen cıvatanın (a) EDM ile kesit alınmış numunesi ile analiz kesiti, (b) çapak oluşum bölgesinin fiziksel durumu ile analiz durumunun karşılaştırılması	91
Şekil 4.45	Cıvata alüminyum levha çiftine ait aksenal sökme deneyi ve analiz sonuçlarına ait (a) üstten görünüş, (b) alttan görünüş	92
Şekil 4.46	Tespit işlemleri sırasında alüminyum levha ve cıvatada meydana gelen (a) gerinim, (b) dağılımı gerilme dağılımı (Gerilme birimi: MPa)	93
Şekil 4.47	Eksenal sökme işlemi sonrasında cıvata ve alüminyum levhada meydana gelen (a) gerinim , (b) gerilme dağılımı (Gerilme birimi:MPa)	94
Şekil 4.48	Alüminyum levhada (a) kalıntı gerilmelerin dahil edildiği (b) kalıntı gerilmelerin dahil edilmediği aksenal sökme kuvvet-strok grafiği	99
Şekil 4.49	Eksenal sökme prosesine ait kalıntı gerilmeleri içeren (sol) ve içermeyen alüminyum levha ve cıvatada meydana gelen gerinim dağılımları : (a) proses başlangıcı, (b) proses %50 ve (c) proses sonu	101

ÇİZELGE LİSTESİ

		<u>sayfa no</u>
Çizelge 3.1	Cıvatanın mekanik davranışlarının tespiti içinde değerlendirilen geometrilerin nümerik değerleri	21
Çizelge 3.2	AISI 1050 cıvata malzemesinin Hensel-Spittel eğrisine göre formülü ve kullanılan parametre değerleri	31
Çizelge 3.3	AISI 4140 Zımba malzemesinin Hensel-Spittel eğrisine göre formülü ve kullanılan parametre değerleri	31
Çizelge 3.4	SEY modelinde kullanılan parametrelerin aldığı değerler	32
Çizelge 4.1	AA 5182 levhanın mekanik özellikler	33
Çizelge 4.2	AISI 1050 ve AISI 4140 Çeliklerinin Mekanik Özellikleri	34
Çizelge 4.3	AISI 1050 ve 4140 Çeliklerinin Kimyasal Bileşimleri (% Ağırlık)	35
Çizelge 4.4	Gerçek değerlere yakınsaması adına yapılan deneme çalışmaları	37
Çizelge 4.5	Yığılma bölgesi çapının değişiminin şekillendirme stroğu, şekillendirme kuvveti, (basma yükü), eksenel sökme yükü ve eksenel döndürme momenti üzerinde etkileri	42
Çizelge 4.6	Yığılma bölgesi yüksekliğinin (Parametre-2) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksene döndürme momenti üzerindeki etkileri	49
Çizelge 4.7	Yığılma açısının (Parametre-3) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksenel döndürme momenti üzerindeki etkileri	56
Çizelge 4.8	Moment çapının (Parametre-4) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksenel döndürme momenti üzerindeki etkileri	62
Çizelge 4.9	Cıvata çapının (Parametre-5) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksenel döndürme momenti üzerindeki etkileri	69
Çizelge 4.10	Yığılma bölgesi geometrisinin (Parametre-6) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksene döndürme momenti üzerindeki etkileri	77
Çizelge 4.11	Optimize geometri ve kalibrasyon geometrisine ait strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme yükü ve eksenel döndürme moment değerleri	83
Çizelge 4.12	Optimize geometrinin deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksenel döndürme moment değerleri	88

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

Semboller	Açıklama
σ_F	Çekme mukavemeti (MPa)
T	Sıcaklık (°C)
φ	Gerinim
$\dot{\varphi}$	Gerinim Hızı (1/s)

Kısaltmalar	Açıklama
GYMÇ	Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler
AA	Alüminyum Alaşımları
BSK	Bölgesel Sac Kenetleme
YBÇ	Yığılma Bölgesi Çapı
YBY	Yığılma Bölgesi Yüksekliği
YA	Yığılma Açısı
MÇ	Moment Çapı
CÇ	Cıvata Çapı
TWIP	İkizlenmeli Plastisite Çelikleri
TRIP	Dönüşümlü Plastisite Çelikleri
HS	Borlu Çelikler
DP	Çift Fazlı Çelikler

ÖZET

KENDİNDEN KENETLENMELİ BAĞLANTI ELEMANLARINA AİT BOYUTSAL ÖZELLİKLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİNEMELİ

Süleyman KAHRAMAN

Bursa Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Yrd. Doç. Dr. Onur SARAY

2017, 109 Sayfa

Çevre uyumu ve yakıt ekonomisi beklentileri ağırlık azaltmayı otomotiv endüstrisinin temel hedeflerinden birisi haline getirmiştir. Otomobil gövde parçalarının üretilmesinde alüminyum alaşımları (AA) gibi özgül mukavemeti yüksek malzemelerin kullanılması bu konuda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu avantajdan faydalanılması için AA'dan imal edilmiş parçaların farklı tip malzemelerden üretilmiş diğer bileşenler ile montaj edilmesi gerekmektedir. Bunun için, kaynak gibi geleneksel yöntemleri kullanılması mümkün olmadığından, şekillendirmeye dayalı birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar sürmektedir. Bu çalışmada alüminyum alaşımlarına kenetleme esasına göre birleştirilebilen bağlantı elemanlarının geometrik özellikleri ile yük taşıma kapasiteleri arasındaki ilişkiler hem deneysel hem de sonlu elemanlar modelleri kullanılarak incelendi. Bu ilişkiler değerlendirilerek en yüksek mekanik performansın elde edilmesi için civata tasarımına ait temel geometrik parametrelerin alması gereken boyutlar belirlendi. Literatürde daha önce incelenmemiş olan bu konudan elde edilen verilerden, endüstriyel olarak kullanılabilir nitelikte bir prototip bağlantı elemanı modeli geliştirildi.

Anahtar Kelimeler: Ağırlık Azaltma, Kenetleme, Bağlantı Elemanları, Alüminyum Alaşımları.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF EFFECT OF DIMENSIONAL PROPERTIES ON THE LOAD BEARING CAPABILITY OF SELF-CLINCH FASTENERS.

Süleyman KAHRAMAN

Bursa Technical University
Graduate Scholl of Natural and Applied Science
Department of Mechanical Engineering Program

Master of Science Thesis

Asst. Prof. Dr. Onur SARAY

2017, 109 Pages

Expectations of environmental harmony and fuel economy have been become weight reduction into main objective of automotive industry. On that context, manufacturing automotive body parts from materials with high specific strength like aluminum alloys (AA) provide great benefits. In order to take advantage of these benefits, parts made of AA must be assembled with other components made of different types of materials. Due to joining of such dissimilar materials cannot be achieved by using conventional processes like spot welding, research efforts have been made to develop joining methods based on forming. In this study, relationships between geometrical properties and load bearing capabilities of fasteners that can be assembled based on principles of clinching were investigated via both experimental and finite element methods. By evaluating obtained these relationships, dimensions for basic geometric parameters of the fastener were determined that required to obtain superior mechanical performance. A prototype fastener model, which can be used in industrial scale was developed based on results this subject which has not been examined in the literature before.

Keywords: Weight Reduction, Clinching, Fasteners. Aluminum Alloys

1. GİRİŞ

Modern otomobillerden düşük yakıt tüketimi ve yüksek güvenlik tedbiri beklentilerinin her geçen gün daha da artması kompakt ve hafif tasarımların mükemmel mekanik performans sergilemesini gerektirmektedir. Bu durum yakın geçmişten beri “gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (GYMÇ)” otomobil imalatında yaygın bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur. Ancak geline noktada, hedeflenen araç hafifletme hedeflerinin sağlanabilmesi için “çoklu malzeme seçimleri ile tasarım yapma” yaklaşımı kullanılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda en sık kullanılan malzeme kombinasyonları arasında ise, GYMÇ ile alüminyum alaşımı çifti gelmektedir. Bu çift, özellikle GYMÇ’lerin sergiledikleri yüksek mukavemetle AA’ların sahip oldukları yüksek özgün mukavemet (mukavemet/yoğunluk) değerlerinin sinerjik etkisinden faydalanmak için tercih edilmektedir.

Çoklu malzeme seçimleri oluşturulan tasarımların üretilmesinde, önemli imalat süreci problemleri de ortaya çıkmaktadır. Nitekim çelik saclardan üretilen parçaların birleştirilmesinde etkin ve yaygın bir şekilde kullanılabilen punta kaynağının AA ve GYMÇ gibi fiziksel ve yapısal özellikler açısından farklı davranışlar sergileyen malzemelerin birleştirilmesinde kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu durum, farklı tip malzemelerden üretilmiş parçaların birleştirilmesinde kullanılacak alternatif yöntemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Mekanik birleştirmeler farklı tip malzemelerin birleştirilmesinde kullanılacak alternatif yöntemler arasında başı çekmektedir. Bunlardan bölgesel sac kenetleme (BSK), farklı tip metal türleri arasında bir şekil bağının plastik deformasyon ile (ergitmeden) oluşturulması ve böylece bir kenet bölgesinin ortaya çıkarılması esasına dayanmaktadır. Diğer mekanik birleştirme yöntemlerinden (perçinleme gibi) farklı olarak kenetleme işlemleri ek birleştirme elemanı kullanmadan uygulanıyor olması hem ürün ağırlığı hem de maliyet açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu durum özellikle yöntemin ürüne yönelik uygulanabilirliğini güçlendiren çok önemli bir proses avantajı olarak değerlendirilebilir. Bu avantajlara istinaden, özellikle Avrupa menşeli ana otomobil üreticileri tarafından kenetlemeli bağlantıların kullanımı ve geliştirilmesine yönelik yoğun araştırma çalışmalarının sürdürülmekte olduğu bilinmektedir. Bu çalışmalar temelde çözülemeyen tipte bağlantıların oluşturulmasını

hedeflemektedir. Diğer taraftan, sac metallerin şekillendirilmesi ile üretilmiş pek çok gövde bileşeninde çözülebilir bağlantı noktalarının oluşturulmasına yönelik uygulamalar da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu uygulamalar değerlendirildiğinde, söz konusu bağlantı noktalarının çelik sacların şekillendirilmesi ile üretilmiş gövde bileşenlerine somunlar ve saplamar gibi bağlantı elemanlarının kaynak edilmesi (projeksiyon kaynağı) ile sağlandığı bilinmektedir. Ancak, söz konusu yöntemin de gövde bileşenlerinin hafif alüminyum alaşımlarından üretilmesi durumunda kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, özellikle son yıllarda, bu tip bağlantı elemanlarının da kenetleme yöntemi ile birleştirilmesi fikri ortaya atılmıştır. Halen gelişme aşamasında olan bu fikir temelde, kenetleme işleminde türetilmiş olsa da özellikle uygulama prensipleri kenetlemeye uygun bağlantı elemanları tasarımı gibi temel konular üzerinde yapılmış az sayıda bilimsel çalışmaya rastlanılmıştır. Ayrıca, söz konusu bağlantı elemanlarının üretimi üzerine faaliyet göstermekte olan firmaların hepsinin yabancı menşeli olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum, söz konusu alanda ulusal bilgi birikiminin de güncel seviyelerde olmadığına işaret etmektedir.

Yukarıda açıklanan çerçevede, bu tez çalışmasında, farklı tip malzemelerden üretilmiş otomobil gövde bileşenleri arasında çözülebilir bağlantı noktalarının oluşturulmasına imkân veren kenetlemeli elemanların temel tasarım ilişkilerinin hem deneysel hem de hesaplamalı mühendislik araçlar kullanılarak araştırılmıştır. Bu kapsamda, kenetleme prosesinin bağlantı elemanlarına evrilmesinde kullanılacak boyutsal tasarım yaklaşımları ve uygulama prensipleri ile sonuçta elde edilecek mekanik davranışlar arasındaki ilişkileri ortaya konulmuştur. Bu sayede hem literatürdeki önemli bir eksikliğin giderilmesi hem de bu kapsamda yakın gelecekte oluşması muhtemel endüstriyel ihtiyaçların giderilmesinde kullanılabilecek sistematik, kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli çözümlerinde giderilmesi hedeflenmiştir.

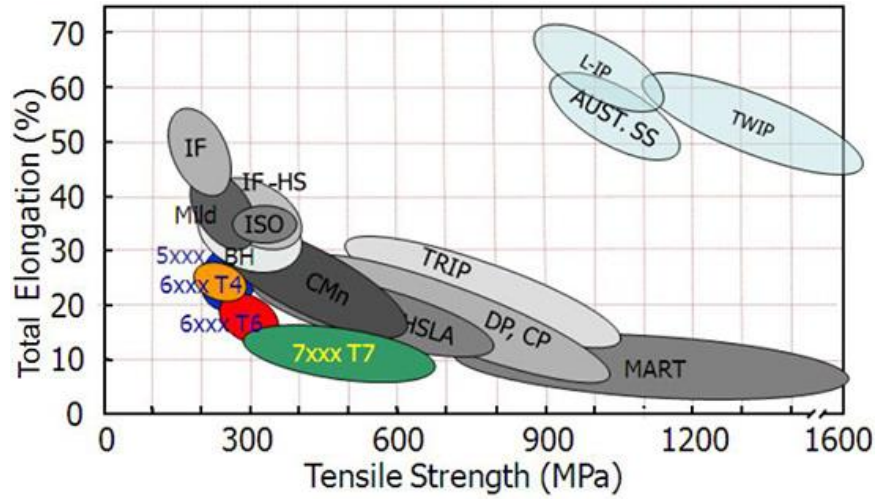
2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Hafif Gövde Parçalarının Üretiminde Kullanılan Güncel Malzeme Grupları

Araçların gövde bölümleri toplam araç ağırlığı içerisinde önemli orana sahiptir. Bu durum araç gövdesinin diğer tüm bileşenleri taşıma, farklı sürüş ve kullanım koşullarında yapısal bütünlüğü bütün fonksiyonel davranışlar ile birlikte sağlama görevini üstlenmesinden kaynaklanmaktadır. Araç gövdesinin sahip olduğu bu yüksek ağırlık oranı, araç hafifletme çalışmalarının da nispeten daha yoğun olarak sürdürülmesine neden olmaktadır [1, 2]. Araç gövdesinin hafifletilmesine yönelik çalışmalarda genellikle gövde bileşenlerinin geometrik tasarımları, kullanılan malzemeler ve üretim süreçlerinin yeniden ele alınmasını içeren oldukça karmaşık süreçleri içermektedir [3-5]. Ayrıca, ağırlık azaltma kapsamında getirilecek yaklaşımların güvenlik ile alakalı konularda da zafiyet ortaya çıkarmaması gerekmektedir. Bu durum, gövde bileşenlerinin mukavemet/özlük ağırlık oranı yüksek olan malzemelerin kullanılmasını ön plana çıkarmaktadır [2]. Bu oranın artırılması için yüksek mukavemetli ve/veya özlük ağırlığı düşük olan malzemelerin kullanılması daha avantajlı olacaktır [3-5]. Bu kapsamda, endüstriyel skalada uygulanabilir durumda olan güncel malzemeler değerlendirildiğinde, söz konusu oranın yüksek değerlerinin elde edilebildiği birkaç malzeme grubunun ön planda olduğu dikkati çekmektedir. Bu malzemeler, yaşlandırılabilir nitelikteki alüminyum alaşımları (2xxx, 6xxx serileri), yaşlandırma özelliği olmayan alüminyum alaşımları (5xxx serileri) [4, 5], geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (GYMÇ) ailesi (çift fazlı (DP) çelikler, borlu çelikler (HS) çelikleri, dönüşümlü plastisite (TRIP) ikizlenmeli plastisite (TWIP) çelikleri ile karbon lif takviyeli plastik matrisli kompozitler olarak sıralanabilir.

Otomotiv endüstrisinde kullanılmakta olan alüminyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemi, kütleli şekil verme prosesleri (ekstrüzyon ve dövme vb.) ve sac metal şekillendirme prosesleri ile etkin şekilde kullanılabilirdiği bilinmektedir [4]. Söz konusu prosesler ile motor gövdeleri, dişli kutusu ekipmanları ve gövdeleri, çarpışma ve darbe sönmüleme elemanları, yapısal parçalar ile şase parçaları olmak üzere farklı fonksiyonel görevlerde bulunan bileşenlerin imal edilebildiği bilinmektedir [1, 2]. Bu

üretim yaklaşımlarından sac metal şekillendirme kapsamında ise, 5XXX ve 6XXX alaşım gruplarının yaygın şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Bu alaşımlardan 5XXX serisi genellikle gözle görünür olmayan bölümlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu durum, söz konusu alaşımda üretilmiş sacların şekillendirilmesi sırasında oluşan Lüdens bandlarının neden olduğu kozmetik problemlerden kaynaklanmaktadır [3, 4]. Benzer yaklaşımla, dış panel parçaların üretiminde ise sözü edilen bantlaşmanın en düşük seviyelerde görüldüğü 6XXX alaşımları kullanılmaktadır [3, 4]. Söz konusu alaşımlar soğuk şekillendirildikten sonra boya kurutma aşamasında uygulanan termal etkiler ile yapay yaşlanma sürecine girerek mukavemet seviyelerinde önemli oranda artış ortaya çıkmaktadır [3, 4]. Bu durum söz konusu alaşımların yük taşıyan yapısal parçaların imalatında da kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır [3]. Bu mukavemet artırma yöntemi sayesinde, 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının özgül mukavemet seviyeleri artırılarak, ağırlık azalma konusunda önemli bir katma değer elde edilmektedir [1, 2]. GYMÇ'ler ise, 1000 MPa seviyelerine ulaşan mukavemetleri ve sac metal şekillendirme prosesleri kapsamında yeterli şekillendirilebilirlik davranışları ile otomotiv endüstrisinin son yıllarda sıklıkla kullandıkları malzemeler arasında yerini almaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin mukavemet ve süneklik özellikleri

GYMÇ ailesinden çift fazlı (ÇF) çelikler, yapılarında yüksek mukavemet değerlerinin elde edilebilmesini sağlayan martenzit ve/veya beyrit fazları içermektedir [6]. Bununla birlikte süneklik ve şekillendirilebilirlik özelliklerinin de

endüstriyel sac metal şekillendirme süreçleri için yeterli olmasının sağlanması için, söz konusu sert fazların yüksek süneklik ve şekillendirilebilirlik özelliklerine sahip ferrit fazından oluşan bir matris içerisinde dağılmış durumda bulunmaktadır [6, 7]. Bu nedenle, çift fazlı çeliklerin sergiledikleri mekanik davranışlar, yapıdaki yüksek mukavemetli fazların hacimsel oranlarına göre değişim sergilemektedir. Söz gelimi, çift fazlı çeliklerinin mukavemet değerlerinin artırılması için, martenzit ve beynit fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarının da artırılması gerekmektedir. Bu durum şekillendirilebilirlik özelliklerinin belli oranda azalmasını beraberinde getirmektedir [6-8]. Şekillendirilebilirlik özelliklerinin yüksek mukavemet ile bir arada sağlanabilmesi için, sert fazların plastik deformasyona sırasında oluşmasının sağlandığı dönüşüme dayalı plastisite çelikleri geliştirilmiştir [8, 9]. Söz konusu çeliklerin yapısında bulunan kalıntı ostenit fazı uygulanan plastik deformasyon sırasında martenzit fazına dönüşerek, şekillendirilmiş durumdaki mukavemet değerlerinin önemli oranda artırılmasına imkân sağlamaktadır [8, 9]. Söz konusu dönüşüm şekillendirme sırasında meydana geldiğinden, çeliğin pekleşme davranışı aynı mukavemet sınıfındaki diğer türlere göre üstün özellikler sergilemektedir. Bu durum, temelde şekillendirme davranışının önemli oranda artırılmasına olanak sağlamaktadır. Benzer yaklaşım ikizlenmeye dayalı plastisite çeliklerinde de oluşturulmuştur [10]. Söz konusu çeliklere uygulanan plastik deformasyon sırasında ostenitik yapı martenzit fazına dönüşerek 0,4 mertebelerinde pekleşme üssü elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır [10].

Yukarıda ifade edilen malzemelerin uygulandığı üretim prosesleri ve uygulama alanları göz önünde bulundurduğunda ise, alüminyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemi, kütleli şekil verme prosesleri (ekstrüzyon ve dövme) ve sac metal şekillendirme prosesleri ile etkin şekilde kullanılabilirdiği bilinmektedir. GYMÇ'lerin ise temelde sac metal şekillendirme prosesleri kapsamında uygulandığı bilinmektedir. Söz konusu malzemelerin tedarik süreci, tekrar edilebilirliği ve ulaşılabilirliği açısından endüstriyel gereksinimleri sağlayacak nitelikte ve hacimde hammadde üretimine sahip oldukları da bilinmektedir. Ancak, söz konusu malzemelerin sahip oldukları yüksek mukavemet seviyelerinin farklı termo-mekanik işlemler sonrasında elde edilmiş olması, konvansiyonel malzemelere kıyasla daha yüksek hammadde maliyetlerine sahip olmalarına neden olmaktadır. Karbon lif

takviyeli malzemelerde ise, üretim süreçleri güncel otomobil üretim süreçlerinden belirgin farklılıklar içermesi, uygulama esnekliğinin az olması, birim üretim süresinin yüksek olması nedeniyle, otomotivdeki kullanım alanlarının daha çok lüks araç sınıflarına hitap etmesini gerektirmektedir [1, 3, 7].

Otomobil gövde bileşenlerinin üretiminde kullanılacak malzemelerde yapılacak değişiklikler, sadece mekanik performansının kullanılacak uygulama için yeterli olması ile sağlanamamaktadır. Ham maddeden son ürüne kadar olan üretim sürecinde yer alan bütün üretim adımlarının da seçilen malzemelerin temel fiziksel özellikleri ile mekanik davranışları ile uyumlu olmasını gerektirmektedir [11]. Söz konusu üretim adımları en genel halde şekillendirme ve birleştirme süreçleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Diğer taraftan, elde edilmek istenen hafifletme hedefleri ile ürünün mekanik performansının istenilen seviyelerde sağlanabilmesi için farklı tip malzemelerin bir arada kullanılmasını da gerektirmektedir. Bu durumda ise, özellikle birleştirme sürecindeki üretim proseslerinin her iki malzeme türünün de temel özellikleri, malzemelere ait mekanik davranışlar ve elde edilmesi beklenen yük taşıma kapasitesi göz önünde bulundurularak elde edilebilmesi mümkün olabilir [11].

2.2 Şekillendirme ile Mekanik Birleştirme Yöntemleri

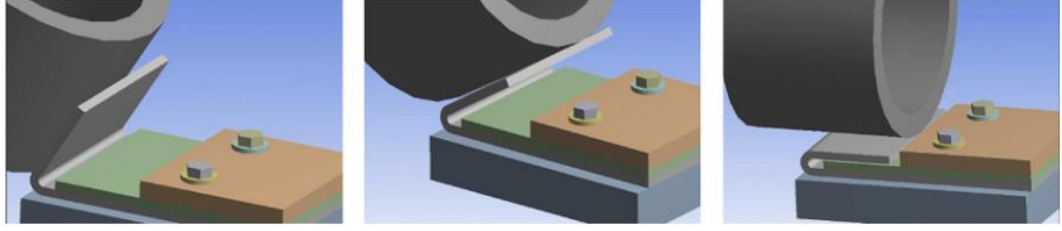
2.2.1 Çözülmeyle birleştirme yöntemleri

Mekanik birleştirme yöntemleri temelde birleştirilecek eşlerin arasında form verilerek bir şekil bağının oluşturulması esasına dayanmaktadır [12]. Bu kapsamdaki uygulamaların farklı yorumlarının 1989 yılından beri otomotiv endüstrisinde kullanılmakta olduğu söylenebilir. Bununla birlikte içlerinde beyaz eşya sektörü, havacılık ve uzay sanayi, elektronik ekipmanların gövde üretimleri gibi pek çok alanda da kullanımına yönelik uygulamalar olduğu bilinmektedir. Bu uygulamalarda, bütünsel olarak karmaşık geometrik özellikler sergileyen ve üretim süreci pahalı/zahmetli olan bileşenleri, daha basit üretilen bölümlere ayrılıp, sonrasında mekanik birleştirmeler ile bir araya getirilmesi şeklinde uygulanmıştır. Geline nokta ise, mekanik birleştirme yöntemleri farklı tipteki malzemelerden üretilmiş

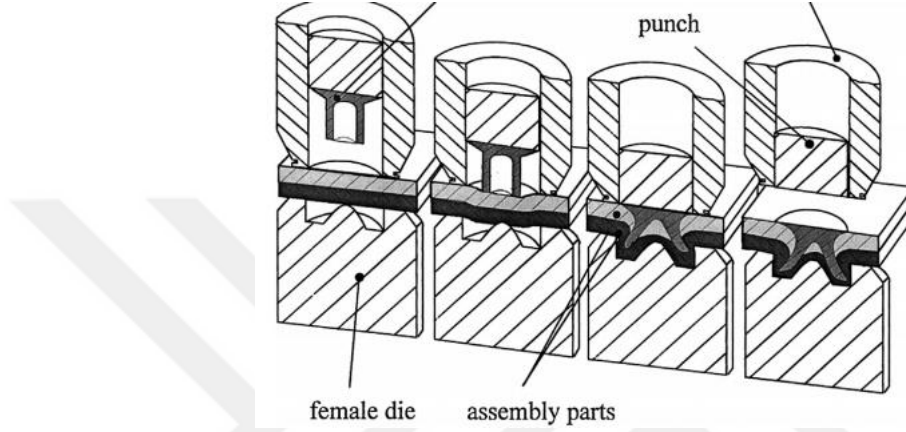
bileşenlerin birleştirilmesi için uygulanan temel üretim yöntemleri arasında yerini almıştır.

Mekanik birleştirme yöntemlerinin otomotiv endüstrisine uygulanması kapsamındaki çalışmalar temelde, havacılık sanayindeki uygulamalardan evrilmiştir. Hem ağırlık hem de yorulma davranışının kritik önem arz ettiği havacılık sektöründe kullanılan bu birleştirme türleri, otomotiv sektörünün temel güncel gereksinimlerini karşılar niteliktedir. Günümüzde özellikle birim uygulama sürelerinin çok kısa olması, düşük enerji tüketimi yüksek hızda uygulanabilen ekonomik birleştirme çözümleri sunmaları açısından giderek yaygınlaşan yöntemler arasında yer almaktadır. Özellikle ergitme usulüne göre uygulanan yöntemlerinde meydana gelen kalıntı termal gerilmeler, yeniden katılma sırasında ortaya çıkan poroziteler ve buna bağlı olarak gelişen çatlak oluşturma/ilerletme yatkınlığı gibi problemler, mekanik birleştirmelerin uygulanması halinde önemli oranda bertaraf edilmektedir.

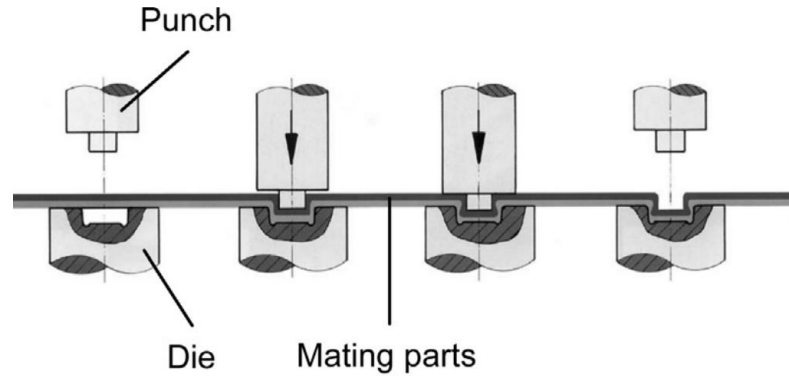
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde sac metallere üretilmiş parçaların birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemler arasında kenetleme, perçinleme ve kenar kıvrıma gelmektedir. Bu yöntemlerden kenar kıvrımda [13], bileşenler çepeçevre biri diğerinin üzerine eğilerek çizgisel olarak birleştirilmektedir (Şekil 2.2) [14]. Perçinleme ve kenetleme yöntemlerinde ise birleşme noktasal olarak sağlanmaktadır. Perçinleme yönteminde hem birleştirilecek parçalar hem de ilave bir birleştirme elemanı plastik deformasyona uğratılmaktadır [15] (Şekil 2.3). Bu özelliği nedeniyle, elde edilecek maliyet ve ağırlık açısından bir dezavantaj da sergilemektedir [15]. Kenetleme işleminde ise, birleştirilecek levhalar farklı kalınlık ve türlerde olsalar bile, ilave bir eleman ya da sarf malzeme kullanımına gerek kalmaksızın birleştirilebilirler [12, 16-18]. Bu nedenle, diğer yöntemlere kıyasla hem sarf malzeme tüketimi hem de enerji tüketimi açısından daha avantajlı bir yöntem olarak değerlendirilebilir [12, 16-18]. Klasik anlamda kenetleme prosesi için özel tasarlanmış karakteristik bir kalıp-zımba sistemi kullanılmaktadır [12, 16-18]. Bu sistemde birleştirme yapılacak metal çifti zımba vasıtası ile kalıp boşluğuna derin çekilir [14]. Ardından kalıp ve zımba arasında ezilerek Şekil 2.4'de gösterilen şekil bağının oluşturulması son derece pratik bir şekilde elde edilebilir [14].



Şekil 2.2 Kenar kıvrırma prosesinin şematik gösterimi.



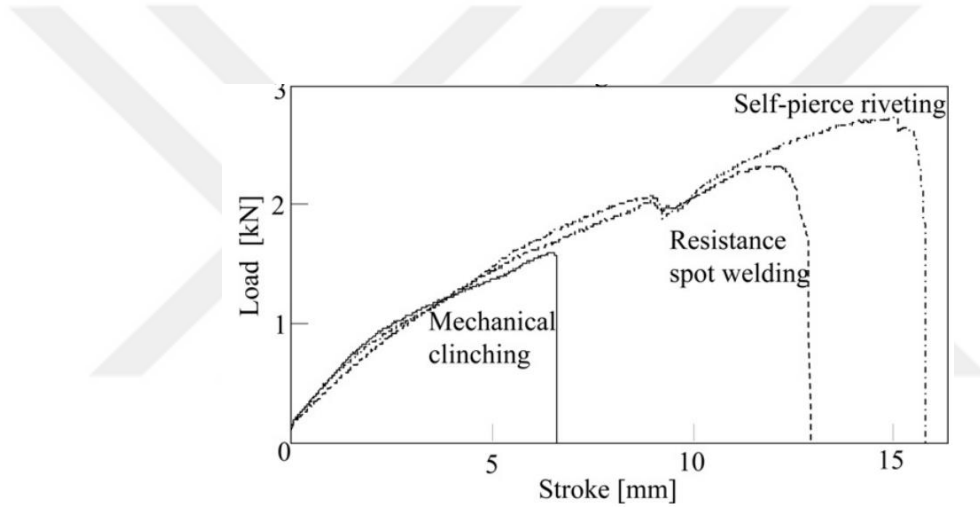
Şekil 2.3 Perçinleme (kendinden delmeli) prosesinin şematik gösterimi



Şekil 2.4 Kenetleme prosesinin şematik gösterimi [14]

Genel olarak kenetleme ve perçinleme yöntemleri punta kaynağına alternatif olarak geliştirilmiştir [15, 17, 19]. Bu nedenle söz konusu yöntemlerin mukavemet açısından karşılaştırıldığı çalışmalara rastlanmaktadır [15, 17, 19]. Bu kapsamda, literatürde var olan sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, perçinleme yöntemi ile elde edilen statik mukavemetin punta kaynağı ile elde edilen statik mukavemet ile benzer mertebelerde olduğu anlaşılmıştır [15, 17, 19]. Kenetleme yönteminde ise

ulaşılan dayanım değerlerinin daha çok uygulama sonrasında oluşan kenetleme bölgesine ait geometrik özellikler ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir [17]. Mori vd. tarafından yapılan bir çalışmada, A5052-H34 alüminyum alaşımının perçinleme, kenetleme ve punta kaynağı ile birleştirilmiş durumda uygulanan kesme kuvvetleri altında sergilediği davranışlar araştırılmış, ve Şekil 2.5’de verilen kuvvet deplasman eğrileri elde edilmiştir. Söz konusu eğrilerden neredeyse aynı boyutta elde edilen birleştirme bölgelerinin temel mukavemet ve süneklik özellikleri arasında belirgin farklılıkların ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Nitekim Şekil 2.5’den de anlaşılacağı gibi birleştirme bölgesinin mukavemetinin perçinleme sonrasında en yüksek değerleri aldığı bunu ise, punta kaynağı ile kenetleme yöntemlerinin izlediği dikkati çekmektedir.

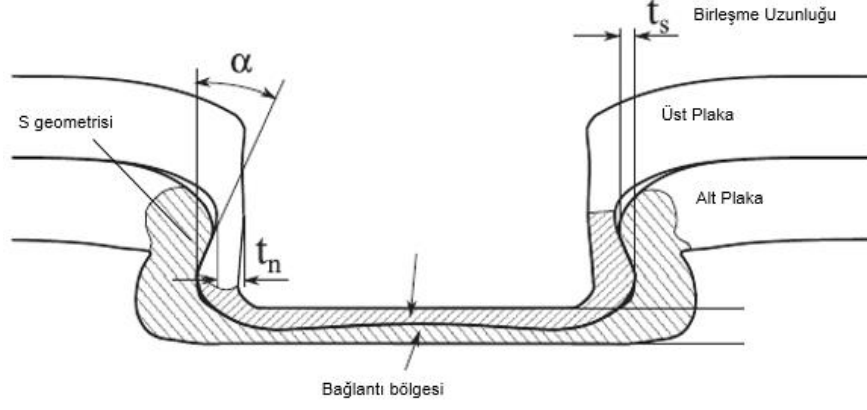


Şekil 2.5 AA5032 alüminyum levhaların birleştirilmesinde perçinleme, kenetleme ve punta kaynağı yöntemleri kullanılması halinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri [17]

Kenetleme prosesinin temelde farklı malzemelerden üretilmiş levhaların şekillendirilmesi ile sağlanması, prosesin uygulanmasında kullanılacak kalıp sistemlerinin birleştirilecek malzemelerin mekanik davranışları/özellikleri ve kalınlıkları dikkate alınarak tasarlanmasını gerektirmektedir [18, 20-22]. Kenetlemede kullanılan zımba kalıp sisteminde genellikle aksel simetrik karakterli ve oldukça basit geometrik özelliklere sahip elemanlardan oluşmaktadır [14, 23]. Kenetlenmiş durumdaki bir metal çiftinin kesit görünümü Şekil 2.6’da verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi, kenetleme bölgesinde sac kalınlıklarının homojen olmayan incelmeler sergilediği dikkati çekmektedir [14, 24]. Bu incelmeler temelde yük taşıma kapasitesi açısından olumsuzluk sergilemesi muhtemel görülmektedir [14, 24]. Ancak birleştirilecek bölgede malzemelerin kenetlenmesi sırasında

uygulanan plastik deformasyonun neden olduğu pekleşme davranışı ile sağlanan mukavemet artışının, inceme nedeniyle kaybedilen yük taşıma kapasitesinin belli oranda geri kazanıldığı anlaşılmıştır [14, 24]. Diğer taraftan kenetleme işlemi sonrasında sacların “S” biçimli bir kenetlenme bölgesi oluşturduğu da dikkati çekmektedir [12, 14, 15, 20-22]. Bu tip geometrik değişimlerin bütünü değerlendirildiğinde, kenetleme sonrasındaki yük taşıma kabiliyetinin kenetlenme bölgesinin geometrisine ait parametreler ile birleşme bölgesindeki sac kalınlığının (tn) artan değerleri ile birlikte artış sergilediği anlaşılmıştır. Kenetlenme bölgesinde taşınabilecek yük değerlerinin artırılması için yukarıda açıklanan parametrelerinin etkilerinin incelendiği birçok çalışma yapılmıştır [19, 20, 25, 26]. Bu çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan proses modellemelerinin etkin bir şekilde fiziksel sonuçları yakınsayabildiği gösterilmiştir [19, 20, 25, 26]. Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, birleştirilecek malzeme çiftlerindeki mukavemet-süneklik davranışları ile kalınlığın birleşme bölgesinin mukavemeti üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu çalışmalardan, düşük mukavemetli ve sünek davranış sergileyen sac metal eşinin kalıp tarafında, yüksek mukavemetli/düşük süneklik özelliklerine sahip olanın ise zımba tarafında konumlandırılarak birleştirilmesi halinde birleşme bölgesinin sergilediği yük taşıma kapasitesinin daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür [27].

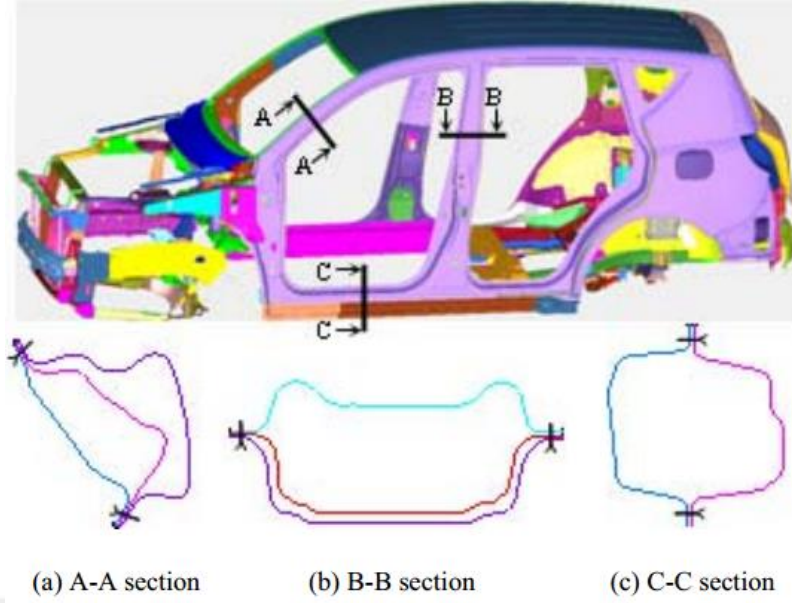
Farklı sac kalınlığına sahip parçaların birleştirilmesi durumunda ise kalınlığı daha ince olan sacın altta olması halinde, birleşme bölgesindeki sac kalınlıklarında belirgin incelmelerin ve boyun verme bölgelerinin ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Bu incelmeye istinaden, altta kalan ince sacın süneklik özelliklerinin de yetersiz olması halinde meydana gelen mikro-meso boyutlardaki çatlakların mukavemet özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu anlaşılmıştır [28, 29].



Şekil 2.6 Kenetleme ile oluşturulmuş birleşme bölgesinin kesit görünümü

Kenetleme yöntemi ile birleştirilmiş çiftlerin dinamik yükleme koşulları altındaki yorulma davranışlarını incelendiği çalışmalarda da punta kaynağına muadil seviyelerde bir yorulma performansı elde edilebildiği anlaşılmıştır [26-28, 30]. Bu durum özellikle havacılık ve otomotiv alanlarında kenetleme yöntemi ile elde edilen birleştirmelerin kullanımını yaygınlaştırma potansiyelini güçlendiren olumlu bir katma değer olarak değerlendirilmektedir.

Kenetleme yönteminin otomobil şasilerinin üretilmesinde kullanımına yönelik çalışmalara rastlamak mümkündür (Şekil 2.7). Genel olarak incelendiğinde söz konusu yöntemin otomobillerin A, B ve C direklerinin çekme dayanımı 590 MPa olan çelik sac ile 5052 alüminyum alaşımından üretildikten sonra birleştirilmesi sağlanmıştır [31]. Bunun yanında, soğuk haddelenmiş galvanizli sac malzemelerin otomobil iç trim parçalarında kullanımı için çalışmalar da gerçekleştirilmiştir [18, 29]. Bununla birlikte, kapı iç kısmında çelik/çelik kenetleme işlemi yapılmış ve yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir [27].

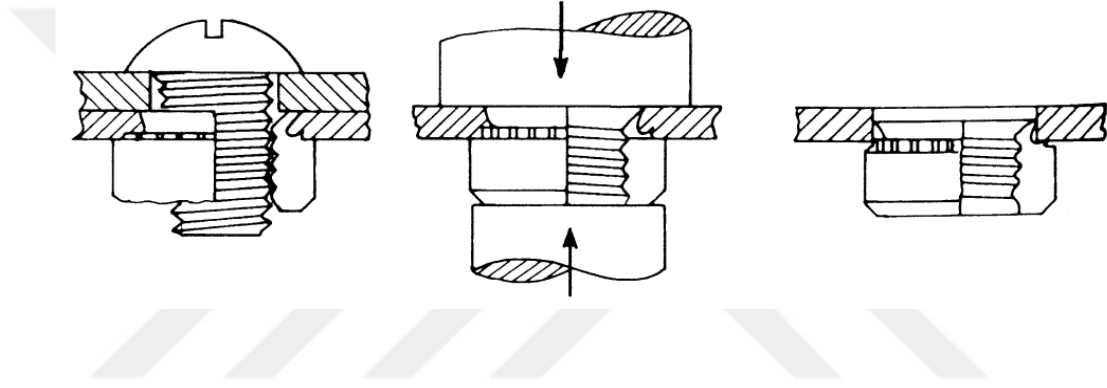


Şekil 2.7 Otomotivde kullanılan kenetleme örnekleri a) A direk, B direk ve kapı çerçevelerine uygulanmış Al/çelik kenetleme uygulamaları [31]

2.2.2 Kenetleme ile çözülebilir bağlantı noktalarının oluşturulmasına yönelik prosesler

Otomobil gövde bileşenlerinin kullanımı sırasında gerekli olan fonksiyonel özelliklerin sağlanabilmesi için çözülebilir nitelikte bağlantı noktalarının da oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca, otomobillerin tasarlanmasında kimi gövde bileşenlerinin zarar görmesi ya da kullanım ömürlerini tamamlamaları durumunda değiştirilmesini gerektiren durumlar da bulunmaktadır. Bunlar, son yıllardaki gövde hafifletme amaçlarının gerçekleştirilebilmesi amacıyla kullanılmakta olan alüminyum alaşımlarından imal edilmiş bileşenler üzerinde çözülebilir bağlantı noktalarının oluşturulmasını da zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, ergitme usulüne göre çalışmakta olan projeksiyon kaynağı gibi geleneksel yöntemler alüminyum alaşımlarından üretilmiş gövde bileşenlerine çelik bağlantı elemanlarının birleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Son yıllarda bu problemin çözülmesine yönelik olarak kendinden kenetlenebilen bağlantı elemanları (cıvata ve/veya somun) geliştirilmeye başlanmıştır [2, 12].

Kendinden kenetlemeli bağlantı elemanları temelde birleştirme işleminin uygulanacağı noktada bir şekil bağının tesis edilmesi ile sağlanmaktadır [2, 12]. Söz konusu şekil bağının oluşması için genellikle birleştirmenin uygulanacağı sac malzemede lokal bir deformasyon bölgesi oluşturularak, bağlantı elemanındaki bir oyuntunun (yığıma bölgesinin) doldurulması sağlanır [2, 12] (Şekil 2.8). Uygulanan plastik deformasyonun mertebesi ve elde edilen şekil bağına ait geometrik özellikler, uygulanan dış kuvvetler altında bağlantı elemanının temel mekanik davranışını belirlemektedir [34, 35].



Şekil 2.8 Kendinden kenetlemeli bağlantı elemanına ait uygulama prensiplerinin şematik gösterimi.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bağlantı elemanlarının tespit edilmesinde kenetleme yönteminin kullanılması üzerine çok az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Balon vd. tarafından yapılan çalışmada kendinden kenetlemeli tipteki bağlantı elemanlarının mekanik performansı, kaynaklı birleştirmeler yöntemi vasıtasıyla elde edilenler ile karşılaştırılmıştır [32]. Yapılan çalışmada, yüksek mukavemetli çeliklere uygulanan proses sonrasında elde edilen statik ve dinamik mukavemet değerlerinin projeksiyon kaynağından elde edilen sonuçlardan nispeten daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür [32]. Ancak, kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının sergiledikleri mekanik performansın otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmakta olan mukavemet gereksinimlerini rahatlıkla karşılayabilecek mertebelerde olduğuna da dikkat çekilmiştir [32]. Bununla birlikte, kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının kaynaklı birleştirmeler ile kıyasla üç kat daha ucuz olduğu sonucuna varılmıştır [32]. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerde görülen kıvılcım atlama gibi problemler nedeniyle meydana gelen görsel kusurlarında

kendinden kenetlemeli bağlantı elamanlarında görülmemesi önemli bir uygulama avantajı sağladığı ifade edilmiştir [32].

2.3 Çalışmanın Amacı

Plastik şekil verme yöntemi ile elde edilen birleştirme proseslerin genel olarak incelendiğinde ucuz, kolay uygulanabilir, yalın ekipmanlar gerektiren verimli bir yaklaşım olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmaların büyük oranda çözülemez tipteki bağlantıların oluşturulması üzerine olduğu da görülmüştür. Ayrıca, kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının alüminyum alaşımlarından üretilmiş gövde bileşenlerine uygulanmasına yönelik bir çalışmanın bulunmadığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, yapılan çalışmaların çoğunluğunda ticari olarak temin edilebilecek elemanların performans testlerine yer verilmiş, elemanlara ait boyutsal özelliklerin mekanik özellikler üzerindeki etkileri ise araştırılmamıştır. Günümüzde özellikle otomotiv endüstrisinin hedeflediği ağırlık azaltma yaklaşımlarının gerçekleştirilebilmesi için alüminyum alaşımları gibi yüksek özgül yoğunluğa sahip alaşımlarının kullanılmasının gerektiği aşikârdır. Bu durum, söz konusu malzemelerin üretimde kullanılması durumunda, ihtiyaç duyulacak birleştirme gereksinimlerinin de karşılanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, önerilen tez çalışmasında kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının kullanılması kapsamındaki boyutsal tasarım parametreleri, bağlantı elemanlarının tespiti sırasında ortaya çıkacak plastik deformasyon süreçlerinin incelenmesi ve benzetilmesi hedeflenmektedir. Böylece, kenetleme ile tespit edilen bağlantı elemanlarının çok eksenli yükleme hallerinde sergileyeceği mekanik performans üzerinde etkili olan geometrik parametreler ile proses parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

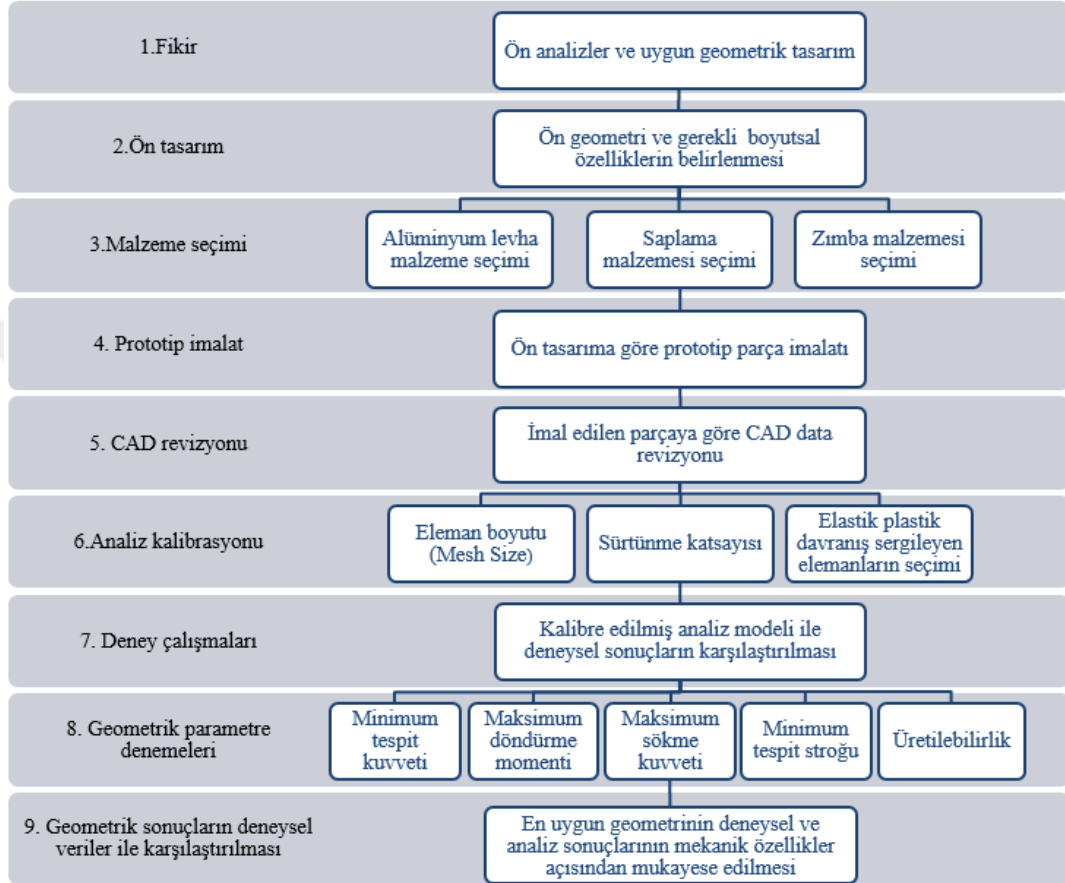
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Araştırma Planı

Bu tez çalışmasında, kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının geometrik tasarımı ve bu tasarım kapsamında göz önünde bulundurulmuş parametrelerin mekanik davranışlar üzerindeki etkileri Şekil 3.1’de verilen plan kapsamında araştırıldı. Bu plan kapsamında, kendinden kenetlemeli cıvataların işlevini yerine getirebilmesi için gerekli olan temel geometrik özellikler literatür çalışmalarından elde edilen öngörülere dayanarak belirlendi. Ayrıca bu aşamada, cıvataların imal edileceği çelik malzeme ile uygulamanın gerçekleştirileceği alüminyum alaşımı otomotivdeki uygulama alanları göz önünde bulundurularak seçildi. Söz konusu seçimler ile oluşturulan ön tasarımın, amaçlanan davranışları ne ölçüde karşılayabildiğinin anlaşılması için doğrulama ve kalibrasyon çalışmaları yapıldı. Bu çalışmalarda cıvatanın tespit edilmesi sırasında ortaya çıkacak şekillendirme süreci deneysel olarak uygulandı. Söz konusu tespit işleminin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) modelleri de oluşturularak, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile SEY modelinden elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıkların giderilmesi sağlandı. Bu kapsamda, eleman tipi, eleman boyut, temas yaklaşımları, sürtünme formülasyonları ve katsayıları, alüminyum levha ve cıvata için seçilen malzemelerin matematiksel modellerine ait parametrelerin aldığı değerlerin analiz sonuçları üzerindeki etkileri değerlendirildi. Bu sayede, kullanılan SEY modelinin incelenecek fiziksel problemi yeterli şekilde temsil edebilmesi sağlandı (Şekil 3.1).

Yapılan kavramsal tasarım ve ön çalışmalardan elde edilen SEY modeli kullanılarak, kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının mekanik özelliklerine etki eden geometrik değişkenler incelendi. Bu incelemelerde göz önünde bulundurulmuş geometrik özelliklerin aldıkları farklı değerlerin şekillendirme ile tespit süreçleri, tespit edilmiş cıvataları taşıdıkları aksenal sökülme kuvvetleri ve sökülme momentleri üzerindeki etkileri analiz edildi. Bu analizlerden üretilebilirlik açısından müsait olanlar arasından tespit işlemi sırasında en küçük zımba stroğu ve en küçük zımba kuvveti ile en yüksek aksenal sökme kuvveti ve sökme momentine direnebilen cıvataya ait değerler seçilerek en uygun geometrik özellikler olarak belirlendi. Bu geometrik özelliklere göre imal edilen cıvatalar, fiziksel olarak da üretilip

alüminyum levhaların tespit edilerek, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile SEY modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Aşağıdaki bölümlerde, Şekil 3.1’de verilen çalışma planında uygulanan deneysel ve hesaplamalı araştırmalarda izlenen yöntemlere ait detaylar ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.



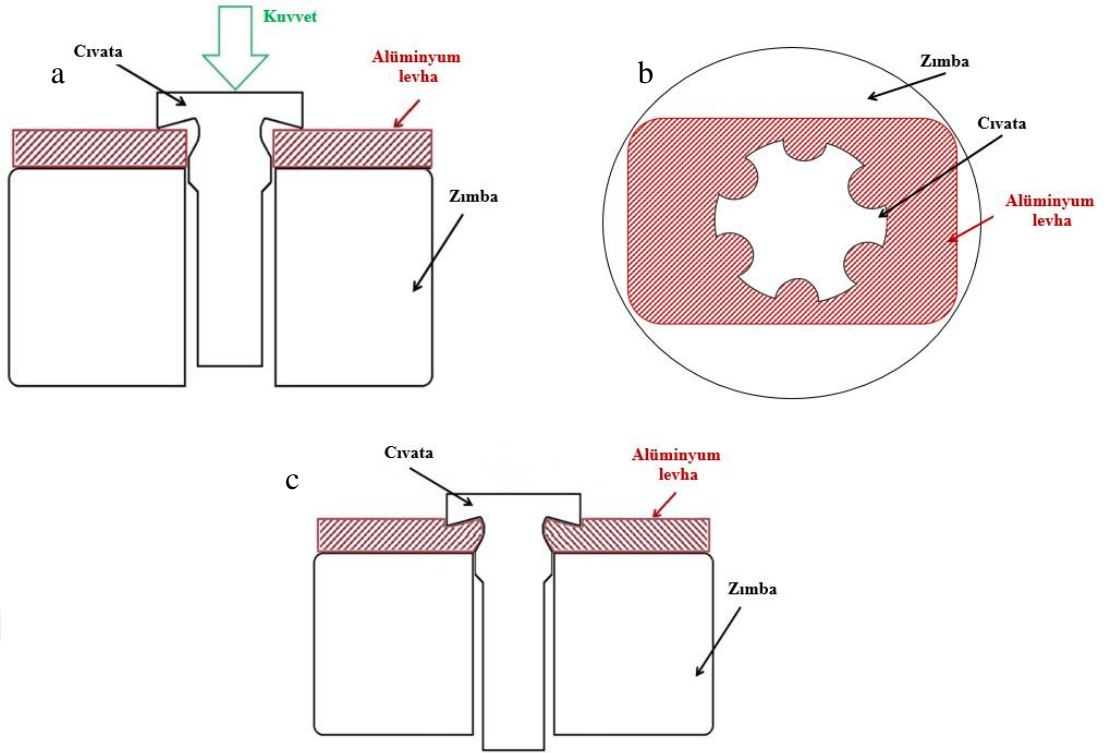
Şekil 3.1 Tez çalışması kapsamında kullanılan araştırma planı

3.1.1 Kendinden kenetlemeli civatanın kavramsal tasarımı

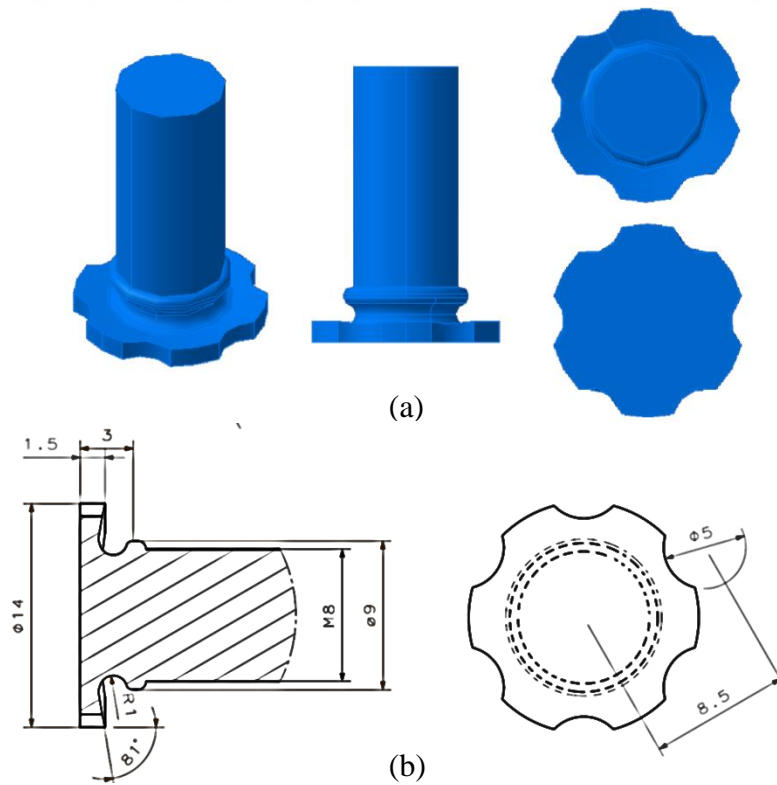
Endüstrinin çeşitli alanlarında farklı uygulamalarda kullanılmaya başlanan şekillendirerek birleştirme konsepti temelde elemanlar arasında plastik deformasyon ile şekil bağının oluşturulması esasına dayanmaktadır. Bu esasa uygun şekilde, kendinden kenetlemeli bir civata için kavramsal tasarım Şekil 3.2(a)-(c)’de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 3.2 (a)-(c) incelendiğinde delik içeren bir levhaya, bu levha ile aynı boyuttaki şaft çapına sahip bir civata yerleştirilmektedir. Bu şekilde yerleştirilmiş çifte eksenel yönde uygulanan kuvvet sayesinde, alüminyum levha bölgesel olarak plastik deformasyona uğrayarak civatadaki boşluğu dolduracak

biçimde yığılması sağlanmaktadır (Şekil 3.2(c)). Yığılma işlemi, cıvatanın baş kısmının alt kenarındaki konik geometrinin yük altında alüminyum levhayı deforme ederek metal akışını yönlendirmesi sayesinde elde edilmektedir (Şekil 3.2(a)). Elde edilen bu şekil bağı sayesinde alüminyum levha-cıvata çiftinin eksenel yönde uygulanan sökme kuvvetlerine karşı direnç göstermesi sağlanmıştır. Diğer taraftan, cıvatanın tespiti sırasında baş kısma açılmış olan oyukların da alüminyum levhaya gömülerek cıvatanın kendi eksenini etrafında alacağı sökme momentlerine de direnç gösterebilmesi sağlanmıştır.

Yukarıda açıklanan özellikler göz önünde bulundurularak kavramsal tasarıma ait ön boyutlar seçildi. Bu boyutlar, otomotiv endüstrisindeki yaygın örnekleri nedeniyle M8 diş ölçüsüne sahip cıvataya uygulandı. Benzer yaklaşımla, güncel otomobil tasarım yönelimleri göz önünde bulundurularak cıvata tasarımının tespit edileceği alüminyum levhanın kalınlığı ise 2,50 mm olarak seçildi. Seçilen ön boyutlar ile Şekil 3.3(a)'da gösterilen katı model dosyaları oluşturuldu. Oluşturulan cıvata katı modelinin bilgisayar destekli (talaşlı) imalat (CAM) yöntemi ile üretilebilirliği de göz önünde bulunduruldu. Bu kapsamda, geliştirilen kavramsal modelin bilgisayar destekli nümerik kontrollü (CNC) bir torna tezgâhında üretilebilir nitelikteki boyutlara sahip olması sağlandı. Kavramsal tasarım aşamasında elde edilen modelin kenetleme işlevine dair gereksinimleri ne ölçüde yerine getirebildiğinin anlaşılması için SEY analizleri yapıldı. Yapılan öncül SEY analizlerinden elde edilen boyutlara göre imal edilen cıvatalar alüminyum levhalara tespit edilerek, işlem sırasında ortaya çıkan yük-strok değerleri, malzeme akışı ve deformasyon davranışına yönelik özellikler SEY analizlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma rastlanılan farklılıkların ortadan kaldırılması için analiz kalibrasyon çalışmaları yapıldı (Şekil 3.1).



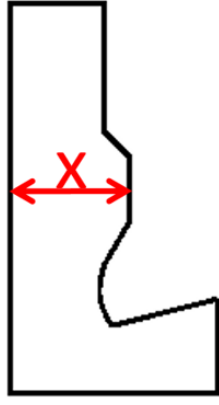
Şekil 3.2 Kendinden kenetlemeli civataların tespit işleminin şematik gösterimi. a: Kendinden kenetlemeli civatanın alüminyum levhaya tespit etme düzeneğinin kesit şeması. b: Bu düzeneğin üstten görünüşü. c: Alüminyum levhaya tespit edilmiş civatanın şematik gösterimi.



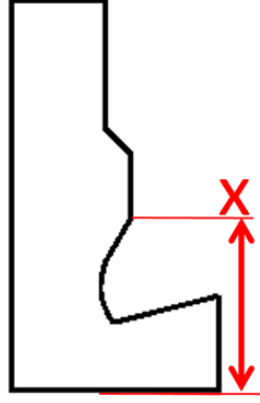
Şekil 3.3 Kendinden kenetlemeli civata (a) katı model görünümü, (b) teknik resmi

3.1.2 Kendinden kenetlemeli cıvatanın boyutsal özelliklerinin etkilerinin araştırılması

Analiz kalibrasyonu ile elde edilen SEY modeli kullanılarak, kendinden kenetlemeli cıvatanın Şekil 3.4’de şematik olarak ifade edilen geometrik özelliklerinin cıvatanın tespit edilmesi ve mekanik performansı üzerindeki etkileri incelendi. Bu kapsamda, söz konusu geometrik özelliklerin aldıkları farklı değerlerin (Çizelge 3.1) hem cıvatanın tespiti sırasında uygulanan plastik deformasyon sürecine, hem de tespit sonrasında elde edilecek mekanik performansa etkileri sistematik olarak belirlendi. Tespit işlemi sırasındaki şekillendirme süreci açısından, şekillendirme kuvvetinin şekillendirme stroğu ile değişimi belirlendi. Ayrıca, şekillendirme sırasında meydana gelen metal akışı, ölü metal bölgeleri ve çapak oluşumu (işlevsiz plastik deformasyon) gibi form verme hatalarının varlığı, kalıntı plastik gerinimler ve şekillendirme bölgesinde her bir bileşenin maruz kaldığı gerilme halleri hesaplandı. Şekillendirme sonrasında ise, cıvatanın aksenal yönde uygulanan normal kuvvetler ile cıvata ekseni etrafında uygulanan döndürme momentleri altında cıvata-Al levha çifti arasında oluşturulan şekil bağının ortadan kaldırılması için uygulanması gereken yükleme değerleri belirlendi. Bu kapsamda geometrik özelliklerin aldığı farklı değerlerden, en küçük zımba stroğu ve en küçük zımba kuvveti ile tespit edilebilen ve tespit sonrasında en yüksek aksenal sökme kuvveti ve sökme momentine direnebilen cıvataya ait değerler seçilerek en uygun geometrik özellikler olarak belirlendi.



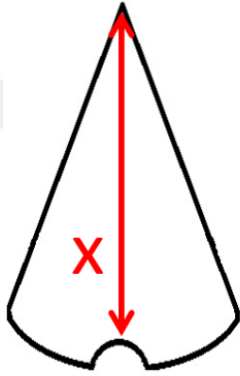
Parametre – 1
Yığıma bölgesi çapı



Parametre– 2
Yığıma bölgesi yüksekliği



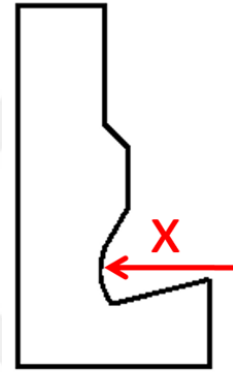
Parametre – 3
Yığıma açısı



Parametre– 4
Moment çapı



Parametre – 5
Cıvata çapı



Parametre – 6
Yığıma bölgesi geometrisi

Şekil 3.4 Cıvatanın mekanik davranışlarının tespiti için değerlendirilen geometrilerin şematik gösterimi

3.1.3 Tasarım doğrulama deneyleri

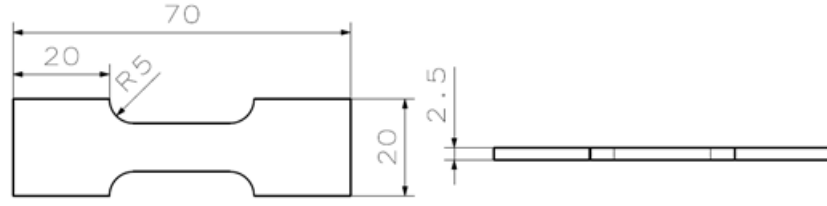
Analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, en uygun geometrik özelliklerin elde edildiği şartlarda imal edilen cıvatalar fiziksel olarak tespit edilerek, şekillendirme süreçlerinde ortaya çıkan metal akışları, şekillendirme süreci için gerekli olan zımba stroğu ve zımba yükleri deneysel olarak belirlendi. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırılarak, meydana gelen farklılıkların olası nedenleri ortaya konuldu. Aynı çalışmalar, tespit edilen cıvataların aksenal basma yüklemeleri altında sergiledikleri mekanik davranışlar için de tekrarlandı.

Çizelge 3.1 Cıvatanın mekanik davranışlarının tespiti içinde değerlendirilen geometrilerin nümerik değerleri

Parametre	Değişken					
	mm	mm	°	mm	mm	Şekil
Nominal (Prototip geometri)	4,48	4,50	81,00	6,00	7,00	İç bükey
Parametre 1	4,52	4,50	81,00	6,00	7,00	İç bükey
	4,38	4,50	81,00	6,00	7,00	İç bükey
	4,28	4,50	81,00	6,00	7,00	İç bükey
Parametre 2	4,48	4,60	81,00	6,00	7,00	İç bükey
	4,48	4,40	81,00	6,00	7,00	İç bükey
Parametre 3	4,48	4,50	80,00	6,00	7,00	İç bükey
	4,48	4,50	85,00	6,00	7,00	İç bükey
	4,48	4,50	90,00	6,00	7,00	İç bükey
Parametre 4	4,48	4,50	81,00	6,50	7,00	İç bükey
	4,48	4,50	81,00	5,50	7,00	İç bükey
Parametre 5	4,48	4,50	81,00	6,00	7,50	İç bükey
	4,48	4,50	81,00	6,00	6,50	İç bükey
	4,48	4,50	81,00	6,00	7,25	İç bükey
	4,48	4,50	81,00	6,00	6,75	İç bükey
Parametre 6	4,48	4,50	81,00	6,00	7,00	Dış bükey

3.2 Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu

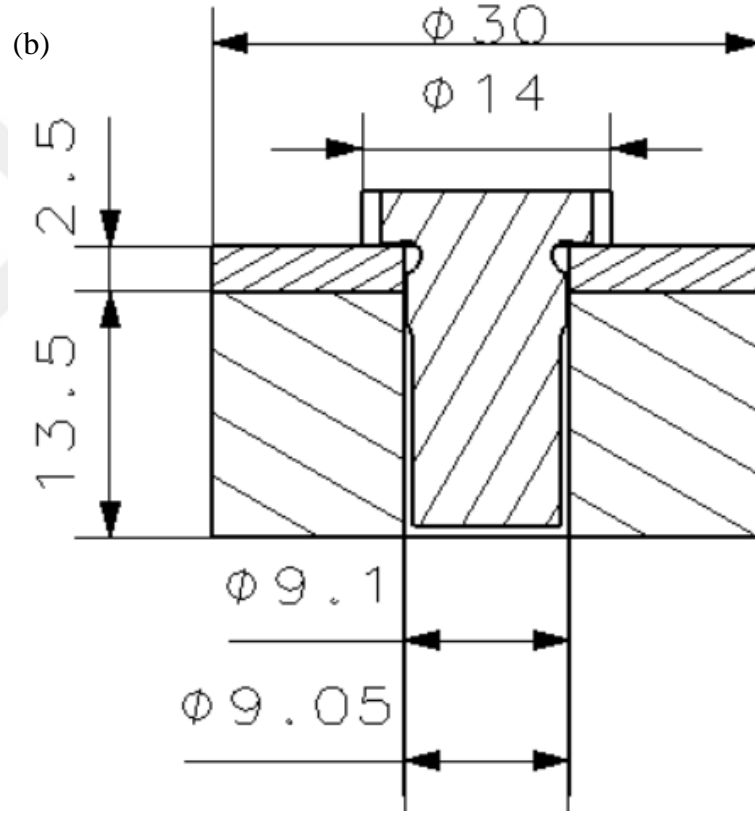
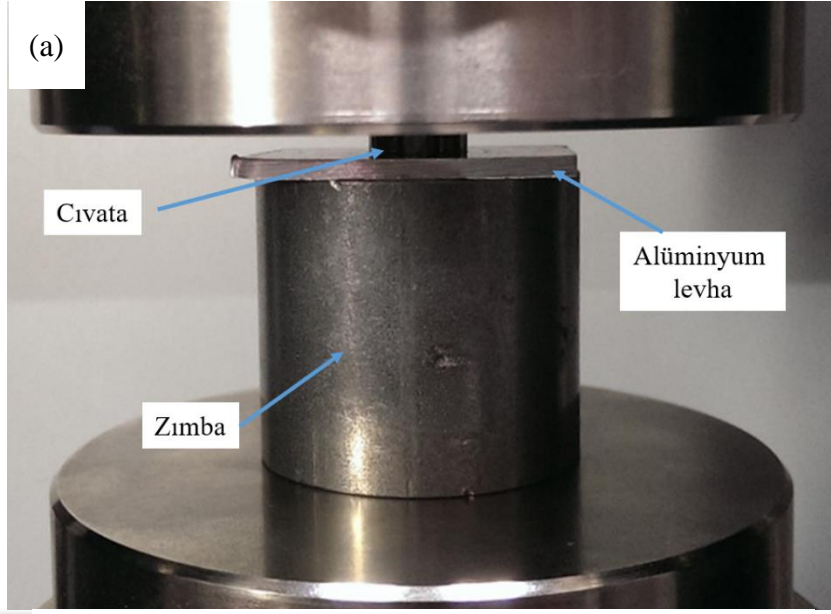
Tez çalışmasında kullanılan 2,5 mm kalınlığındaki AA5182 levhaların mekanik davranışlarının belirlenmesi için oda sıcaklığında çekme deneyleri yapıldı. Söz konusu deneyler için teknik resimleri Şekil 3.5’de verilen numuneler tel erozyon yöntemi ile çıkarıldı. Levhanın haddeleme yönüne paralel doğrultuda çıkarılan numuneler, 250 kN kapasiteli üniversal bir çekme-basma deney düzeneğinde 10^{-3} s^{-1} deformasyon hızında test edildi. Deneyler sırasında numunelere uygulanan çekme kuvvetleri bir yük hücresi, uzama değerleri ise video tip temassız bir uzama ölçer ölçülüp bir bilgisayar yardımı ile kayıt edildi. Elde edilen verilerden gerçek çekme gerilmesi ve gerçek çekme gerinim değerleri hesaplatılarak gerilme-gerinim eğrileri çizdirildi. Elde edilen verilerden, malzemeye ait akma dayanımı, çekme dayanımı, pekleşme katsayısı, pekleşme üssü, uniform uzama değerleri üç farklı numune üzerinden yapılan testlerden elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak belirlendi.



Şekil 3.5 Çekme numunesinin teknik resmi

3.3 Kendinden Kenetlemeli Cıvataların Tespit Deneyleri

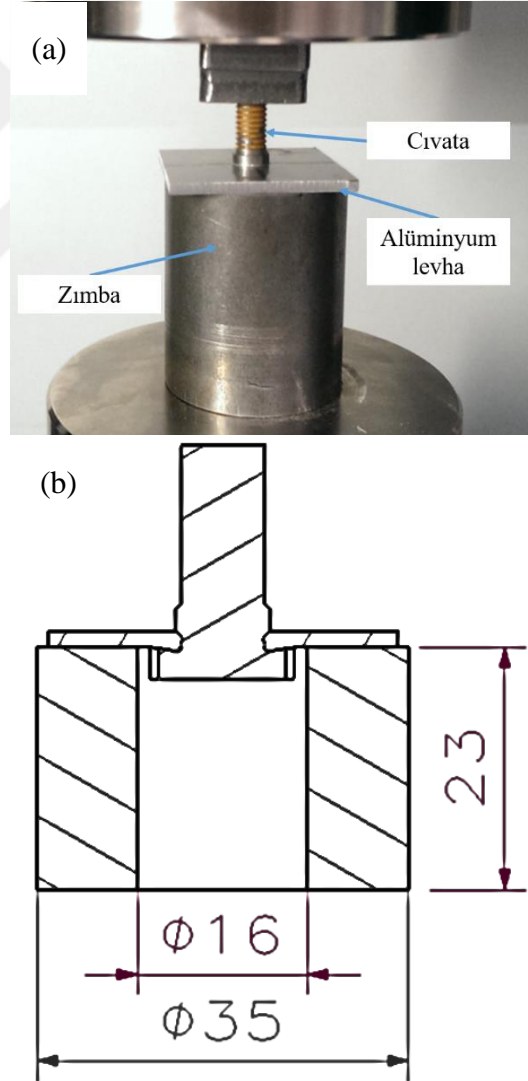
AISI 1050 imalat çeliğinden CNC tornalama yöntemi ile üretilen cıvataların alüminyum levhalara tespit edilmesinde Şekil 3.6'da verilen yükleme düzeneği kullanıldı. Yükleme sistemine ait elemanlar AISI 1050 imalat çeliğinden talaşlı imalat yöntemleri ile üretildi. Üretilen cıvataların alüminyum levhalara uygulanması sırasında cıvata şaft çapı ile aynı ölçüdeki bir delik talaşlı imalat yöntemleri ile açıldı. Delik delme işlemleri sırasında delik kenarlarında ortaya çıkan çapaklar zımpara ile temizlendi. Cıvataların tespit işlemleri sırasında cıvata kafasına 250 kN kapasiteli üniversal bir elektromekanik çekme-basma deney düzeneği kullanılarak 1 mm/s sabit hızla bası yüklemeleri uygulandı. Yüklemeler, SEY modellerinden elde edilen strok değerlerine kadar uygulandı. Söz konusu strok değerine ulaşıldığında yükleme kaldırıldı. Tespit işlemleri sırasında uygulanan basma kuvvetleri bir yük hücresi yardımı ile ölçüldü. Strok değerleri ise, deney makinesinin çene pozisyonu ölçüm sensörü yardımı ile belirlendi. Cıvata tespit işlemlerinde, yükleme düzeneğine ait elemanlar arasındaki boşlukların belli oranda giderilmesi için 5 N'luk ön basma yükü uygulandıktan sonra deney başlatıldı.



Şekil 3.6 Cıvata tespit işlemlerinde kullanılan yükleme düzeneği (a) fotoğrafı.
(b) Teknik resmi

3.4 Kendinden Kenetlemeli Cıvataların Eksenel Sökme Deneyleri

Kendinden kenetlemeli cıvataların alüminyum levhalardan eksenel kuvvet uygulanarak sökme deneylerinde Şekil 3.7’de verilen yükleme düzeneği kullanıldı. Yükleme sistemine ait elemanlar AISI 1050 imalat çeliğinden talaşlı imalat yöntemleri ile üretildi. Cıvataların sökülmesi sırasında cıvata kafasına 250 kN kapasiteli üniversal bir elektromekanik çekme-basma deney düzeneği kullanılarak 1 mm/s sabit hızla bası yüklemeleri uygulandı. Eksenel sökme deneyleri sırasında cıvata şaftına uygulanan basma kuvveti bir yük hücresi yardımı ile ölçüldü. Strok değerleri ise, deney makinesinin çene pozisyonu ölçüm sensörü yardımı ile belirlendi. Bu verilerden kuvvet-strok eğrileri çizdirilerek, cıvata-Al levha çiftinin sergilediği mekanik davranışlar belirlenmeye çalışıldı.



Şekil 3.7 Cıvata-Al levha çiftine uygulanan eksenel sökme deneylerinde kullanılan düzeneğin: (a) fotoğrafı, (b) teknik resmi

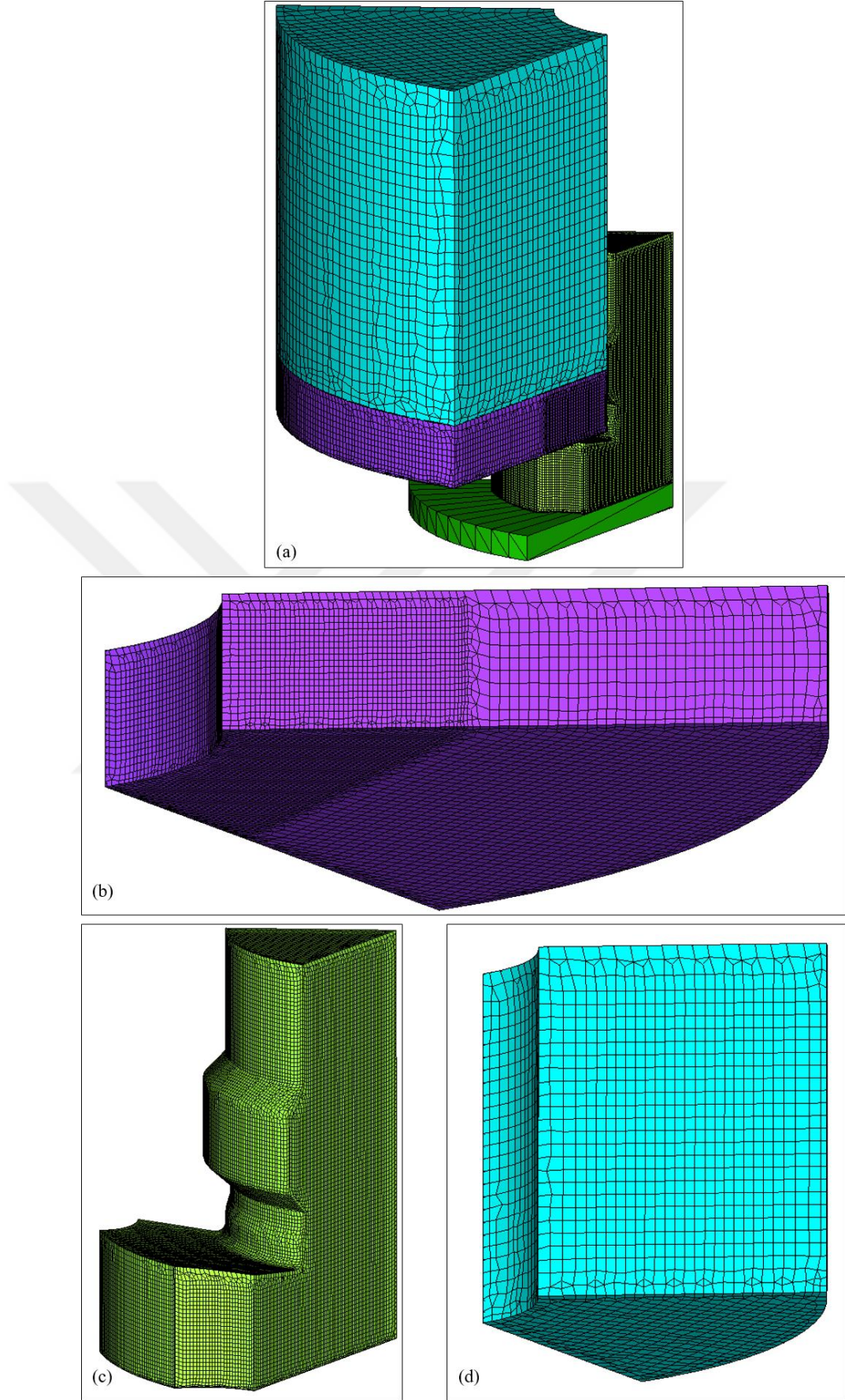
3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi Modeli

Çalışmada kullanılan şekillendirme ve şekillendirme sonrasındaki mekanik performans testlerinin simülasyonlarını içeren SEY modelleri oluşturuldu. Söz konusu modeller, MSC Simufact-Forming yazılımı kullanılarak oluşturuldu. Oluşturulan modellerin çözdürülmesi ise MSC Marc kodu kullanılarak gerçekleştirildi. İncelenen problemin şekillendirme süreci ile eksenel kuvvet altında sökme, ve eksenel moment altında sökme deneyleri için ayrı modeller kullanıldı. Bu modeller dâhilinde, şekillendirme sırasında ortaya çıkan şekil değişimleri ile kalıntı plastik gerilmeler eksenel kuvvet ve moment altında sökme deneylerinde kullanılan modellere aktarıldı. Ele alınan geometrinin sahip olduğu simetri şartları nedeniyle, 1/6'i modellendi. Şekillendirme süreci ile eksenel kuvvet altında sökme ve eksenel moment altında sökme deneyleri için oluşturulan SEY modelleri Şekil 3.8-3.10'da verilmiştir. SEY modellerinde yüklemeler cıvataya uygulanan deplasman üzerinden tanımlandı. Söz konusu deplasman, 1 mm/s hızla uygulandı. Bu hız, şekillendirme ve şekillendirme sonrasındaki eksenel kuvvet altından sökme deneylerinde de kullanıldı. Eksenel moment altında sökme deneylerinde ise 2,5 °/s'lik açısal hız kullanıldı. Sistemdeki kalıp bileşenlerinin ise, bütün yönlerdeki serbestlik dereceleri sıfır alındı.

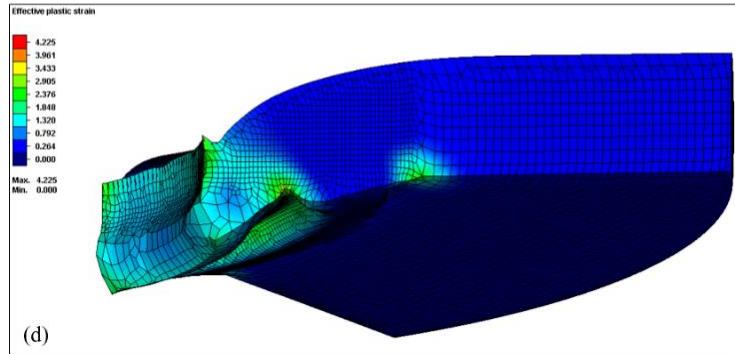
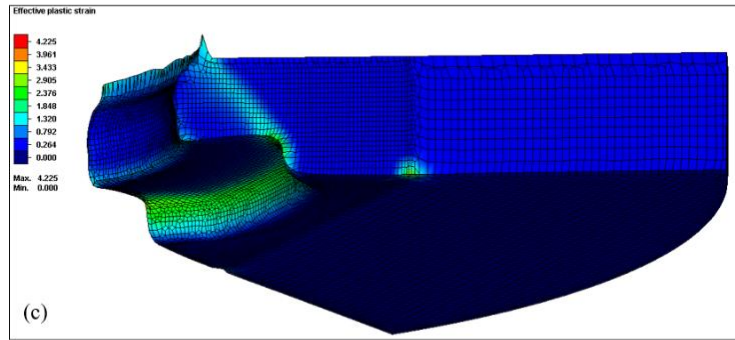
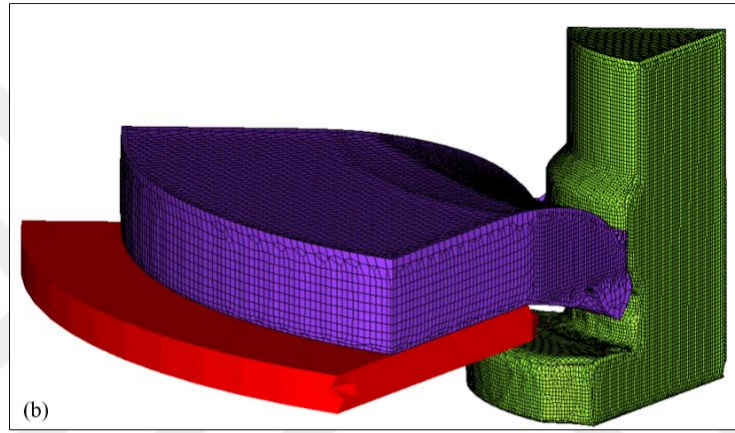
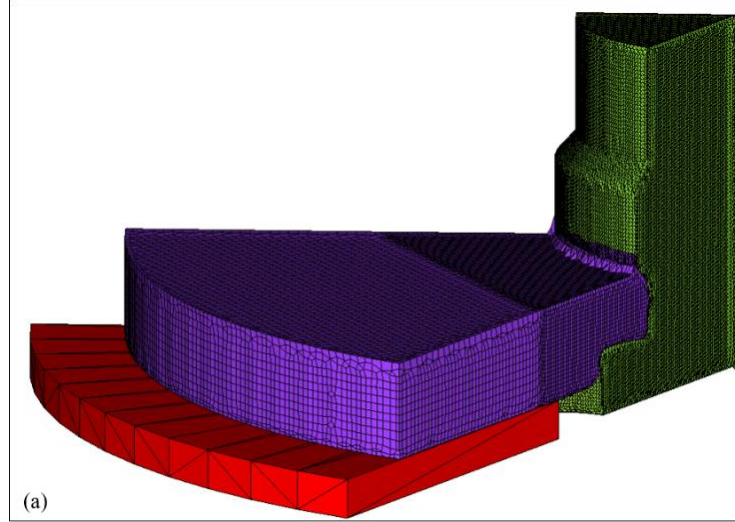
Kullanılan bütün SEY modellerinde AA 5182 alüminyum levhaya ait akış eğrisi çekme deneylerinden elde edilen sonuçların parçalı-doğrusal (piecewise-linear) olarak tanımlandı. Cıvatanın üretilmiş olduğu AISI 1050 çeliği ve zımbanın üretilmiş olduğu AISI 4140 çeliğine ait malzeme modelleri ise program kütüphanesinde tanımlı olan malzeme modelleri kullanıldı. SEY modelinde kullanılan malzeme modellerine ait efektif gerilme-efektif gerinim eğrileri Şekil 3.11'de verilmiştir. Program kütüphanesinden alınan bu malzemeler Hensel-Spitzel eğrisine göre formülize edilmiştir (Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3). SEY modellerinde katı prizmatik elemanlardan oluşan bir ağ yapısı örüldü. Ağ yapısında kullanılan elemanların boyutları ve modelde yer alan bileşenlerin eleman sayıları Çizelge 3.4'de verildiği gibi belirlenmiştir. Söz konusu eleman boyutlarının belirlenmesinde, farklı boyutlardaki eleman sayılarının sonuçlar üzerindeki etkileri de araştırıldı. Bu araştırma kapsamında farklı eleman boyutlarında elde edilen sonuçlar ile, kavramsal tasarım aşamasında oluşturulan cıvata modelinin fiziksel deneme çalışmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmadan, fiziksel denemeden ölçülen

zimba kuvveti ve zimba stroğu değerlerine en yakın sonuçların elde edildiği eleman boyutu değerleri belirlendi.

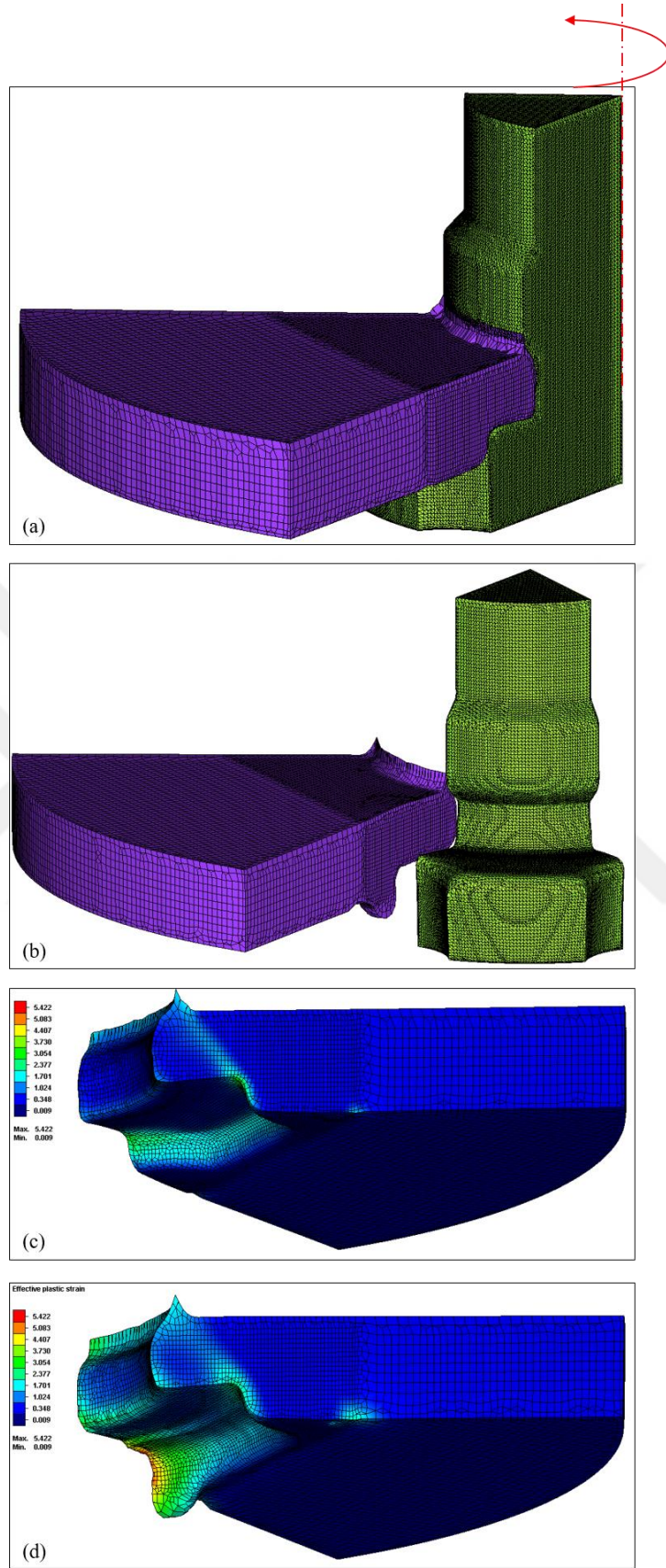
İncelenen problemdeki geniş plastik gerinim değerlerine ulaşıldığından, deformasyon sırasında ağ yapısının çarpılmalarının ortadan kaldırılabilmesi için bölgesel ağ inceltme uygulandı. Böylece, incelemeye esas olan deformasyon bölgesindeki metal şekillendirme süreçlerinin daha yüksek doğruluk ile benzetilmesi hedeflendi. Ayrıca, şekillendirme sırasındaki eleman çarpılmalarının sonraki zaman adımlarında neden olacağı problemlerin önüne geçişebilmesi için çözümle uyumlu (adaptif) yeniden ağ örme algoritması kullanıldı. Bu algoritma kapsamında, modeldeki gerinim değerlerinin 0.1 değerini aşması durumunda ya da her 2 çözüm adımında bir ya da elemanlardaki temas penetrasyonunun 0.05 mm değerinden büyük olması durumunda, analizin sonraki zaman adımına geçmeden, Çizelge 3.4'de verilen eleman boyutları kullanılarak yeniden ağ ördürüldü. Bileşenler arasındaki temas düğüm noktası- yüzey temas algoritması kullanılarak belirlendi. Bu algoritma uygun temas toleransı ve meyli seçilerek yürütüldü. Kontak toleransı 0.02 mm olarak seçildi. Bileşenler arasındaki sürtünme etkileri Bilineer Colomb yaklaşımına göre belirlendi. Bu yaklaşım kapsamında sürtünme katsayısı 0,1 ve sürtünme katsayısı toleransı ise 0,04 olarak alındı. Modellerin çözdürülmesinde elastik-plastik karakterdeki deformasyon adımlarının bütünü 100 zaman adımına bölündü. Bütün analizler Intel Core i7 6700 Hz işlemci, 16GB DDR4 ram donanımına sahip kişisel bilgisayar kullanılarak çözdürüldü.



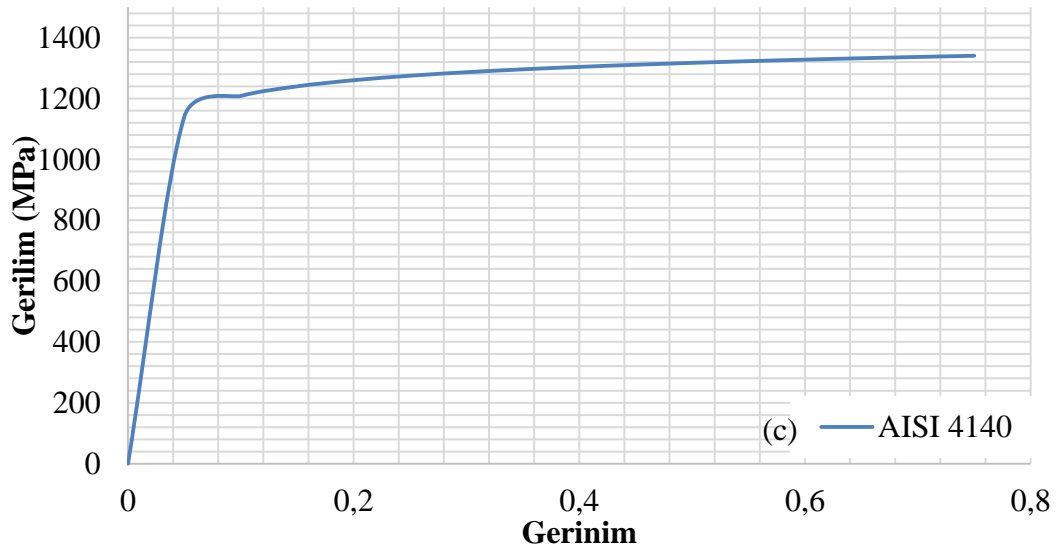
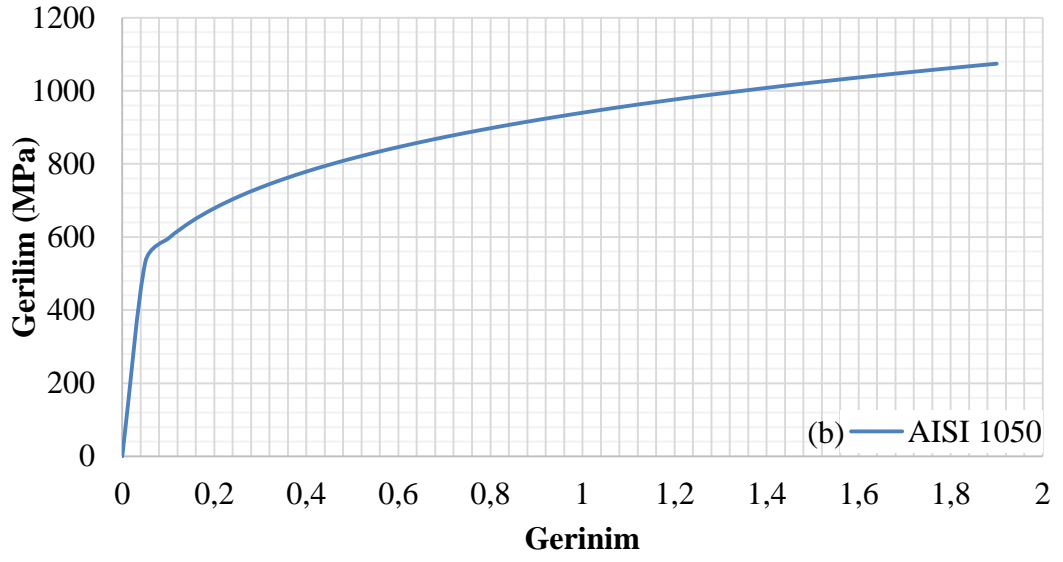
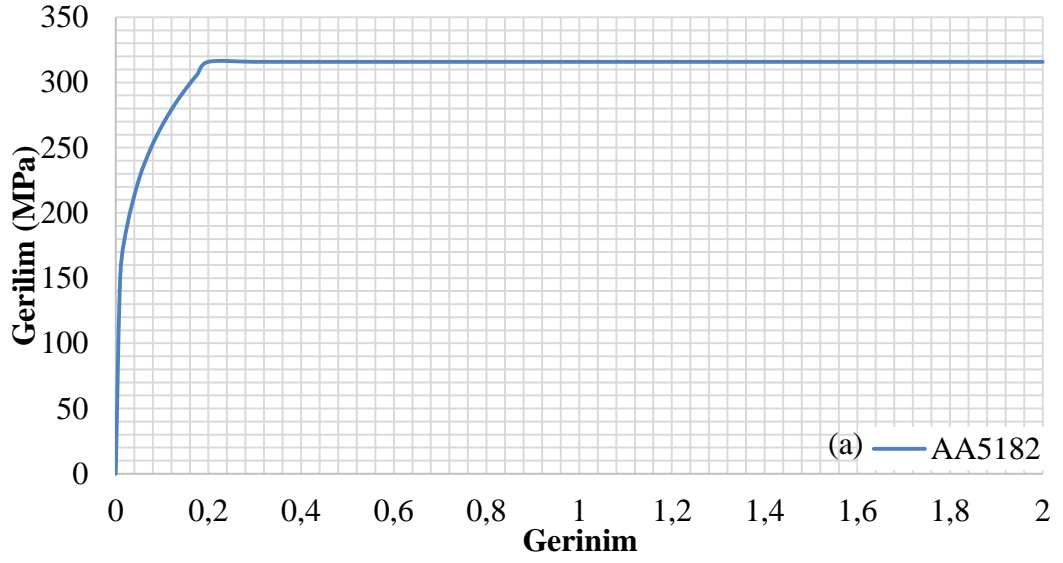
Şekil 3.8 Şekillendirme sürecinin simülasyonunda kullanılan SEY modeli (a) genel durum, (b) Levhanın ağ yapısı, (c) Cıvatanın ağ yapısı, (d) zımbanın ağ yapısı



Şekil 3.9 Eksenel sökme sürecinin simülasyonunda kullanılan SEY modeli (a) Proses başlangıcı, (b) Proses sonu, (c) Proses başlangıcında civatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri , (d) Proses sonunda civatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri



Şekil 3.10 Eksenel döndürme momenti altında sökme sürecinin simülasyonunda kullanılan SEY modeli: (a) Proses başlangıcı, (b) Proses sonu, (c) Proses başlangıcında civatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri , (d) Proses sonunda civatanın ağ yapısı ve kalıntı gerilmeleri



Şekil 3.11 SEY modelindeki elemanların akış (Efektif gerilme-efektif gerinim) eğrileri (a) AA5182 alaşımı, (b) AISI 1050 çeliği ve (c) AISI 4140 çeliği

Çizelge 3.2 AISI 1050 cıvata malzemesinin Hensel-Spittel eğrisine göre formülü ve kullanılan parametre değerleri

$$\sigma_F = A \cdot e^{T \cdot m_1} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot \dot{\varphi}^{m_3}$$

Parametre	Kısaltma	Birim	Değer
Sıcaklık	T	°C	20
Gerinim	φ	-	0,01-2,00
Gerinim Hızı	$\dot{\varphi}$	1/s	0,01
Parametre 01	A	-	956,965
Parametre 02	m_1	-	-0,00097
Parametre 03	m_2	-	0,2102
Parametre 04	m_3	-	0,00772
Parametre 05	m_4	-	0,00312

Çizelge 3.3 AISI 4140 Zımba malzemesinin Hensel-Spittel eğrisine göre formülü ve kullanılan parametre değerleri

$$\sigma_F = c_1 \cdot e^{(c_2 \cdot T)} \cdot \varphi^{(n_1 \cdot T + n_2)} \cdot e^{\left(\frac{I_1 \cdot T + I_2}{\varphi}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_1 \cdot T + m_2)}$$

Parametre	Kısaltma	Birim	Değer
Sıcaklık	T	°C	20
Gerinim	φ	-	0,05-0,8
Gerinim Hızı	$\dot{\varphi}$	1/s	0,01
Parametre 01	c_1	-	1322,77
Parametre 02	c_2	-	-0,00142925
Parametre 03	n_1	-	-0,000362843
Parametre 04	n_2	-	0,0455338
Parametre 05	I_1	-	-4,913933e-05
Parametre 06	I_2	-	-0,0020945
Parametre 07	m_1	-	0,000145938
Parametre 08	m_2	-	-0,015337

Çizelge 3.4 SEY modelinde kullanılan parametrelerin aldığı değerler

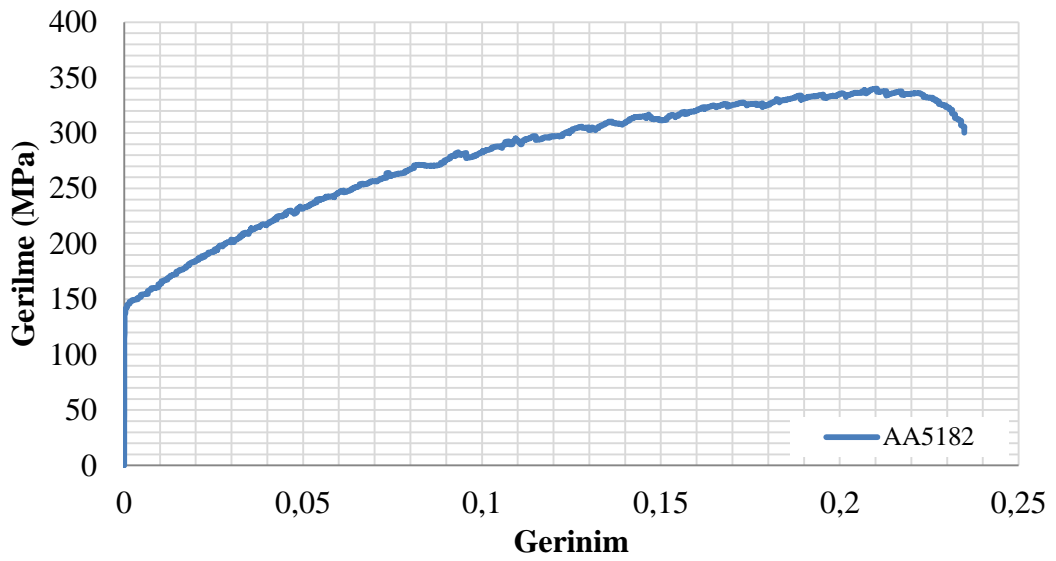
Bileşen	Malzeme	Eleman tipi	Eleman boyutu	Eleman sayısı
Al-levha	AA5182	Prizmatik katı	0,23	58482
Cıvata	AISI1050	Prizmatik katı	0,10	139446
Zımba	AISI4140	Prizmatik katı	0,49	13683
Matris	AISI1045	Rijit	-	-

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Bulgular

4.1.1 Alüminyum levhanın mekanik karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan alüminyum alaşımının çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrileri ile standart mukavemet ve süneklik özellikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 AA5182 Al Malzemesine ait Gerilme Gerinim diyagramı

Çizelge 4.1 AA 5182 levhanın mekanik özellikler

Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uniform uzama	Pekleşme üssü	Pekleşme katsayısı (MPa)
148.6	336.2	0.1940	0.206	469.3

AA 5182 levhanın gerilme-gerinim eğrisi incelendiğinde (Şekil 4.1), deformasyon davranışının pekleşme mekanizması etkin şekilde gerçekleştiği söylenebilir. Nitekim söz konusu malzemenin 148,6 MPa’lık akma dayanımından sonra 0,194’lük üniform gerinim sergileyerek 336,2 MPa’lık çekme dayanımına ulaştığı görülmektedir (Şekil 2.1 ve Çizelge 4.1). Ayrıca, Çizelge 4.1’den görülebileceği gibi AA 5182 levhanın

pekleşme üssünün 0,206 ve pekleşme katsayısının da 469,3 MPa seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Ölçülen bu değerler AA 5182 levhanın makul seviyede bir şekillendirilebilirlik sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, deneylerde malzemenin boyun vererek kırıldığı da görülmüştür. Bu durum malzemenin genel mekanik davranışının sünek karakterde olduğunu göstermektedir.

4.1.2. Cıvata ve zımba imalatında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Tez çalışması kapsamında kullanılan cıvata ve baskı zımbasının üretiminde kullanılan imalat çeliklerine ait standart mekanik özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Söz konusu malzemelerin kimyasal bileşimleri ise, Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 AISI 1050 ve AISI 4140 Çeliklerinin Mekanik Özellikleri [33]

Malzeme	Çekme dayanımı MPa	Akma dayanımı MPa	Kopma uzaması (%)
AISI 1050	610	595	15
AISI 4140	1185	1110	8

Cıvata imalatında kullanılan AISI 1050 çeliğinin mekanik özellikleri incelendiğinde akma dayanımının 595 MPa ve çekme dayanımının 610 MPa kopma uzamasının ise %15 olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 4.2). Bu değerler söz konusu çeliğin hem yeterli mukavemet hem de süneklik ve tokluk sergilediğini göstermektedir. Bu duruma göre, AISI 1050 malzemesinin mekanik özelliklerinin hem talaşlı imalat yöntemlerinde, hem de dövme gibi kütle metal şekillendirme yöntemlerinde kullanılmasına müsaade eder nitelikte olduğu söylenebilir. Ayrıca cıvata imalatında kullanılan AISI 1050 çeliğinin kimyasal kompozisyonunun da üretim sonrasındaki ısı işlemler için uygun olduğu, yağda ve suda sertleştirilebilir olduğu söylenebilir (Çizelge 4.3). Bu nedenle, tez çalışması kapsamında söz konusu malzemenin seçilmesinin tezden elde edilen sonuçların endüstriyel uygulanabilirlik açısından da uygun olacağına işaret etmektedir.

Zımba imalatında kullanılan AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri incelendiğinde akma dayanımının 1110 MPa ve çekme dayanımının 1185 MPa olduğu görülmektedir. Bununla beraber söz konusu malzemenin %8 kopma uzamasına sahip olduğu da Çizelge 4.2'den anlaşılmaktadır. Söz konusu değerlerden, çeliğin yüksek mukavemete ve buna bağlı olarak da rijitliğe sahip olduğunu söylenebilir.

Çizelge 4.3 AISI 1050 ve 4140 Çeliklerinin Kimyasal Bileşimleri (% Ağırlık) [33]

Malzeme	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
AISI 1050	0,42- 0,55	0,60- 0,90	-	<0,04	<0,050	-	-
AISI 4140	0,38- 0,43	0,75- 1,00	0,15- 0,35	<0,035	<0,040	0,80- 1,10	0,15- 0,30

4.1.3. Sonlu elemanlar yöntemi kalibrasyonundan elde edilen bulgular

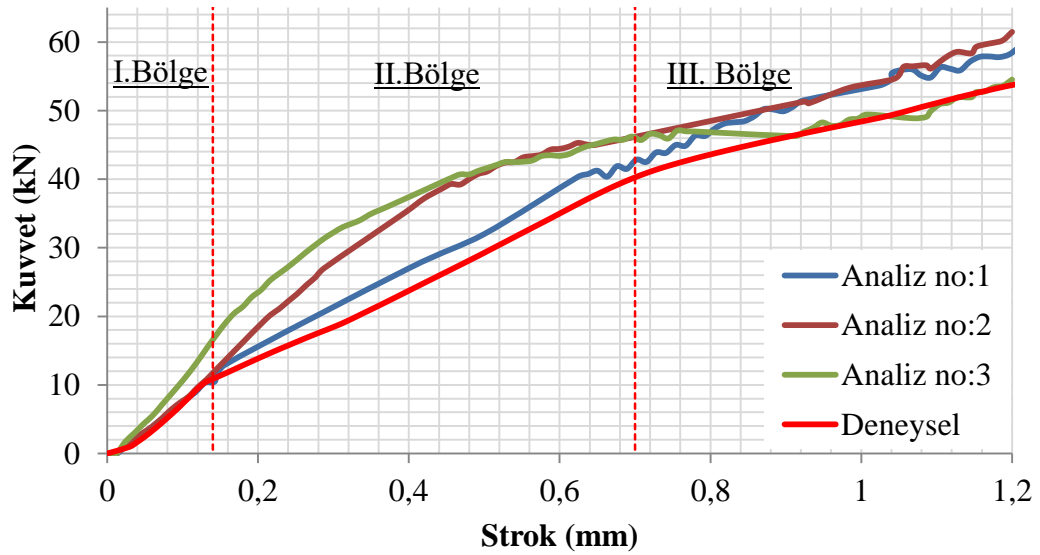
Ön tasarım çalışmalarından elde edilen cıvata modelinin AA 5182 levhalara tespiti sırasında elde edilen zımba kuvveti-zımba stroğu (F-X) eğrileri Şekil 4.2'de verilmiştir. Söz konusu metal şekillendirme prosesinin benzetimi için, Çizelge 4.4'de verilen parametreler ve bunların aldıkları farklı değerlere göre oluşturulan SEY modellerinden elde edilen F-X eğrileri de Şekil 4.2'de verilerek, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Cıvatanın alüminyum levhaya tespiti esnasında ortaya çıkan deneysel F-X eğrisi incelendiğinde, eğri eğiminin sergilediği farklılıklara bağlı olarak üç farklı deformasyon bölgesinin tanımlanabileceği söylenebilir (Şekil 4.2). Şekil 4.2 genel olarak incelendiğinde, deformasyon bölgeleri içerisinde eğrinin genel olarak doğrusal bir karakteristik sergilediği görülmektedir. Deneysel F-X diyagramındaki I. Bölge incelendiğinde, sisteme dâhil olan bileşenlerinin daha çok elastik deformasyona uğradığı söylenebilir. Söz konusu deformasyon bölgesinde, bileşenler arasındaki geometrik düzgünsüzlükler ve/veya boşluklar nedeniyle, eğri eğiminin başlangıç bölgelerdeki değerlerinde doğrusallıktan sapmanın görüldüğü de dikkati çekmektedir. Şekillendirmenin ilerleyen safhalarında şekillendirme kuvvetinde meydana gelen artış ile plastik deformasyon başlamaktadır (Şekil 4.2 ve Şekil

4.3(b)). Sistemde plastik deformasyon öncelikli olarak cıvata ve AA-levhalarındaki bölgesel temas bölgesinde başlamakta ve yaygınlaşmaktadır (Şekil 4.3(b)). Plastik deformasyonun başlaması ile meydana gelen metal akışı sonucunda, eğri eğiminde belirgin bir azalma ortaya çıktığı da dikkati çekmektedir (Şekil 4.2). Bu akış alüminyum Al-levha ve cıvatada kararlı şekilde devam ederek, cıvatanın altında kalan bölgelerde lokal plastik deformasyon oluşturmaktadır (Şekil 4.3(b)). Plastik deformasyonun başlaması ile birlikte, eğri eğiminde de belirgin bir azalma meydana gelmektedir (Şekil 4.2). Şekillendirme eğrisinin ikinci bölgesinde, artan strok değerleri ile birlikte alüminyum levhanın cıvata boşluğunu büyük oranda doldurması eğri eğiminin de giderek artmasına neden olmaktadır. Şekillendirme sürecinin üçüncü bölgesinde ise, cıvata boşluğunun tamamen doldurulması sırasında metal akışının zorlaşması belli bölgelerde çapak oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 4.2). Bu oluşum, cıvata boşluğundan metal çıkışına neden olduğundan, eğri eğiminin de belli oranda azalmasını sağlamaktadır.

Şekillendirme sürecinin benzetimi için hazırlanan SEY modellerinin bütününde yukarıda açıklanan deformasyon bölgelerinin meydana geldiği dikkati çekmektedir. Bu çerçevede değerlendirildiğinde, oluşturulan SEY modelinin şekillendirmedeki genel deformasyon davranışını önemli oranda yansıttığı söylenebilir. Ancak, Şekil 4.2'den de anlaşılacağı gibi, deneysel olarak elde edilen F-X diyagramı ile farklı parametreler kullanılarak oluşturulan modellerden elde edilen F-X diyagramları arasında farklılıklar olduğu da aşikârdır (Şekil 4.2). Söz konusu farklılıkların 1 numaralı analiz kapsamında seçilen parametreler sonrasında en düşük mertebelerde olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 4.4). Nitekim deneysel F-X diyagramı ile ve Analiz No:1'den elde edilen F-X diyagramlarının 1. bölgedeki davranışları neredeyse örtüşmektedir. Şekillendirme sürecinin 2. bölgesinde ise, deneysel F-X diyagramı ile 2 kN mertebelerinde bir fark ortaya çıkmıştır. Cıvata boşluğunun tamamıyla doldurularak ve çapak oluşumunun başladığı 3. Bölge'de (Şekil 4.3) Analiz No:1'den elde edilen verilerin dalgalanma göstermekle birlikte, genel olarak deneysel veriye yakın mertebelerde seyrettiği söylenebilir. Söz konusu dalgalanmanın sebebi çapak oluşumundan kaynaklı eleman çarpılmaları nedeniyle, çözücünün yeniden ağ örmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu açıklamalara istinaden, Analiz No:1'in Çizelge 2.4'de verilen parametrelerinin tez kapsamında ele alınacak problemin benzetilmesinde kullanılacak en uygun değerler olarak alınmıştır.

Prosesin fiziksel uygulaması ile benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçların kıyaslanmasında, cıvata ve alüminyum levhada meydana gelen deformasyon halleri ve metal akışı da göz önünde bulunduruldu (Şekil 4.4). Şekil 4.4 incelendiğinde, şekillendirme sürecinin benzetiminden elde edilen metal akışının fiziksel deneylerden elde edilen durumu ile benzer özellikler sergilediği söylenebilir. Özellikle şekillendirme deneylerinden tespit edilen metal akışı düzensizlikleri ile buna bağlı olarak cıvata boşluğunda meydana gelen dolmamış bölgelerin hem lokasyon hem de boyut özelliklerinin yüksek doğrulukla modellenebildiği görülmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.2 Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması

Çizelge 4.4 Gerçek değerlere yakınsaması adına yapılan deneme çalışmaları

Analiz no	Sürtünme katsayısı		Mesh boyutu (mm)		
	Zımba	Cıvata	Zımba	Cıvata	Alüminyum
1	0,10	0,10	0,49	0,10	0,23
2	0,10	0,25	Rijit	0,12	0,25
3	0,10	0,25	0,25	0,25	0,25

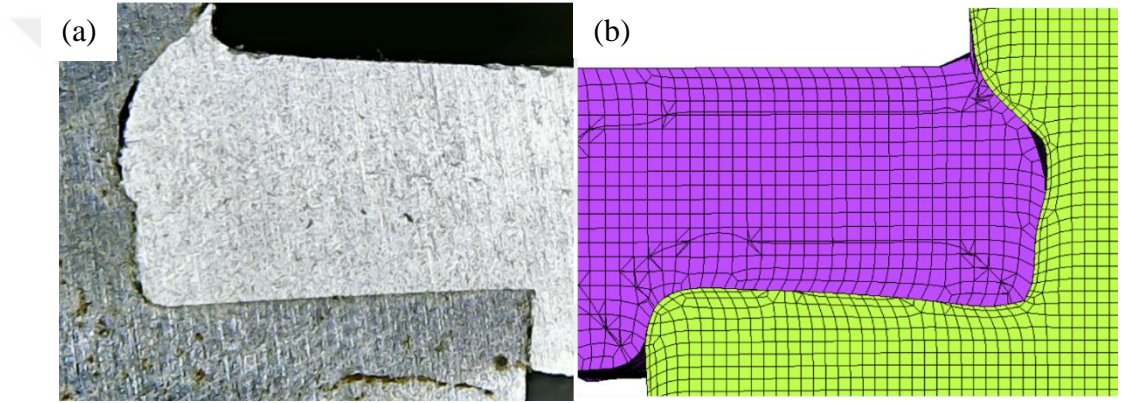


(a) I. Bölge

(b) II. Bölge

(c) III. Bölge

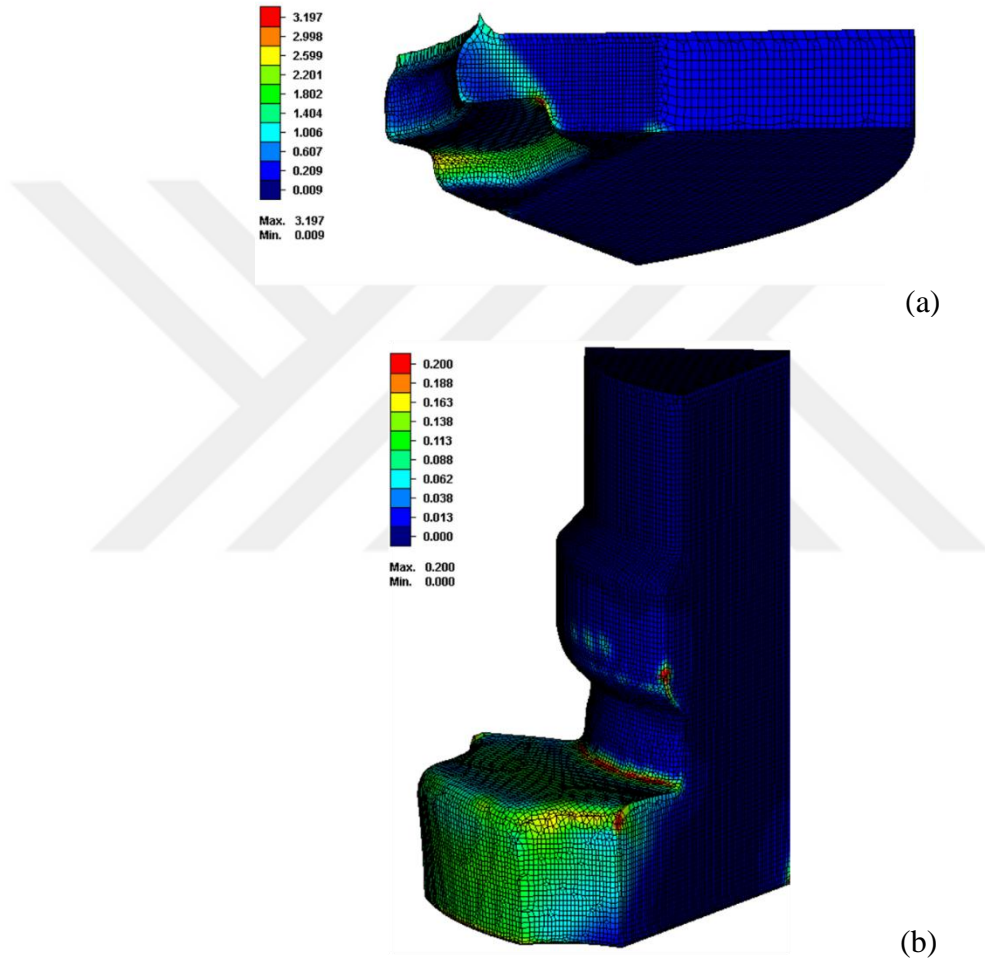
Şekil 4.3 Alüminyum levhanın cıvata boşluğunu strok yük grafiğinde ortaya çıkan eğimlere göre doldurma bölgeleri



Şekil 4.4 Fiziksel olarak tespit edilen cıvatanın (a) EDM ile kesit alınmış numunesi (b) kalibre edilmiş analizin (Analiz-I) kesiti

Uygulanan şekillendirme prosesi sırasından meydana gelen eş değer gerinim değerlerinin deformasyon bölgesindeki dağılımı Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu dağılım incelendiğinde, Al levhadaki gerinim değerlerinin bölgesel olarak yoğunlaşma sergilediği dikkati çekmektedir (Şekil 4.5 (a)). Ayrıca, söz konusu değerlerin çapak oluşumunun meydana geldiği kısımlarda da yüksek mertebelere ulaştığı söylenebilir. Bu durum deformasyon bölgesindeki malzeme akışından da görülmektedir (Şekil 4.6). Nitekim şekillendirme sırasında alüminyum levhanın sergilediği malzeme akışı vektörlerinin deformasyon bölgesinde hem doğrultu hem de büyüklük açısından belirgin değişimler sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 4.6). Tespit işlemi sırasında cıvatanın döndürme momentlerine direnç gösteren baş kısmında da belirgin bir şekil değişiminin meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.5 (b)). Nitekim cıvata baş kısmının alüminyum levhaya temas ettiği bölgelerde meydana gelen yüksek gerilme

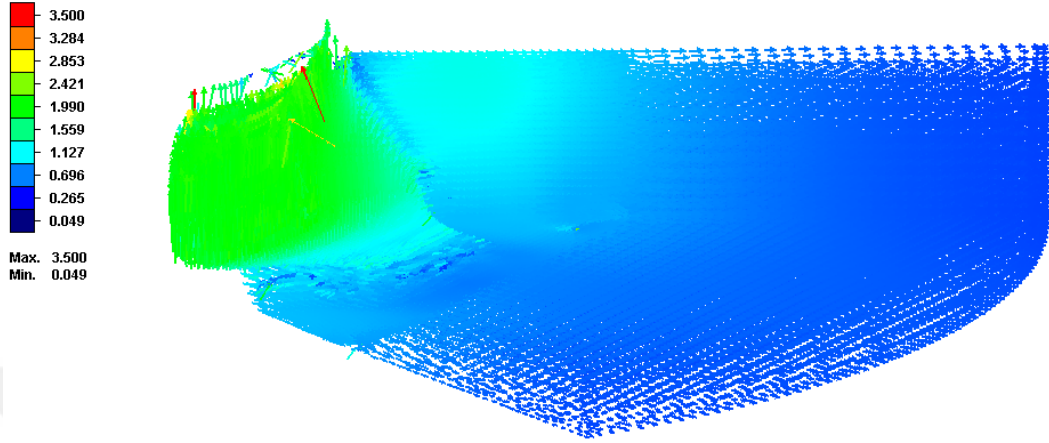
yığılmalarına bağı olarak keskin köşelerin kütleştiği dikkati çekmektedir (Şekil 4.5 (b)). Ayrıca söz konusu gerilmeler cıvata baş kısmının ezilmesine neden olduğu da dikkati çekmektedir (Şekil 4.4 (b) ve Şekil 4.6 (b)). En yüksek plastik gerinimin cıvata baş kısmının cıvata şaftı ile kesiştiği kenarda meydana geldiği de söylenebilir. Bu durum tespit işlemleri sırasında baş kısmının eğilme deformasyonuna maruz kaldığını gösteriyor olabilir.



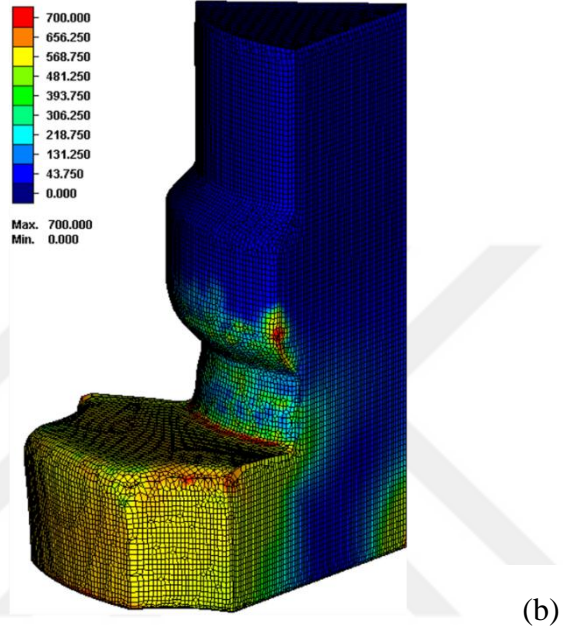
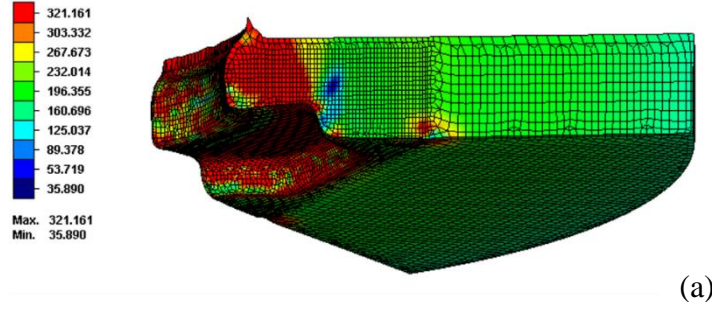
Şekil 4.5 Kalibre edilen SEY modeline ait: (a) Alüminyum levhada oluşan gerinim dağılımı, (b) cıvatada meydana gelen gerinim dağılımı

Kalibre edilen SEY modelinde cıvata ve alüminyum levhada meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 4.7’de verilmiştir. Alüminyum levhadaki gerilme dağılımı incelendiğinde, cıvata altında şekillendirilen bölgelerdeki gerilme değerlerinin diğer bölgelerden daha yüksek seviyelerde olduğu dikkati çekmektedir. Ayrıca, alüminyum levhada oluşan maksimum gerilmenin malzemenin çekme dayanımına

yakın bir değer aldığı da anlaşılmaktadır. Bu bölgelerin yakın komşuluğunda ise, gerilme değerlerinin ani bir azalma sergilediği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde plastik gerilme değerlerinin de baskın olarak cıvata kafası altında ezilen bölgelerde ortaya çıktığı söylenebilir.



şekil 4.6 Alüminyum levhada meydana gelen malzeme akışı ve akış vektörü (Akış hızı mm/s)



Şekil 4.7 Kalibre edilen SEY modeline ait: (a) Alüminyum levhada oluşan gerilme dağılımı, (b) cıvata meydana gelen gerilme dağılımı. (Gerilme birimi: MPa)

4.1.4. Cıvata geometrisine ait değişkenlerin etkisi

Kendinden kenetlemeli cıvatanın farklı geometrik özelliklerinin tespit işlemleri ve sonrasındaki mekanik davranışlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi için kalibrasyonu yapılan SEY modeli tekrar çözdürüldü. Bu kapsamda, Şekil 3.4’de verilen geometrik özelliklerin aldığı farklı değerlerin etkileri değerlendirildi.

4.1.4.1 Yiğma bölgesi çapının (parametre-1) etkisi

Cıvata tespit işlemleri sırasında alüminyum levha tarafından doldurulması istenilen boşluğun en büyük çapı “Yiğma bölgesi çapı (YBÇ)” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.8). Söz konusu parametrenin prototip cıvata tasarımı sırasında nominal değeri 4,48mm olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.5). Bu parametrenin Çizelge 4.5’de verilen

4,52 mm, 4,38 mm ve 4,28 mm değerlerini almasıyla şekillendirme süreci ve şekillendirme sonrasında cıvata-Al levha çiftinin sergilediği mekanik performans üzerindeki etkileri değerlendirildi. Söz konusu değer aralığında, YBÇ'nin 4,52 mm olarak seçilmesi, zımba ile YBÇ arasındaki boşluğun olabilecek en düşük seviyeye getirilmesini ifade etmektedir.



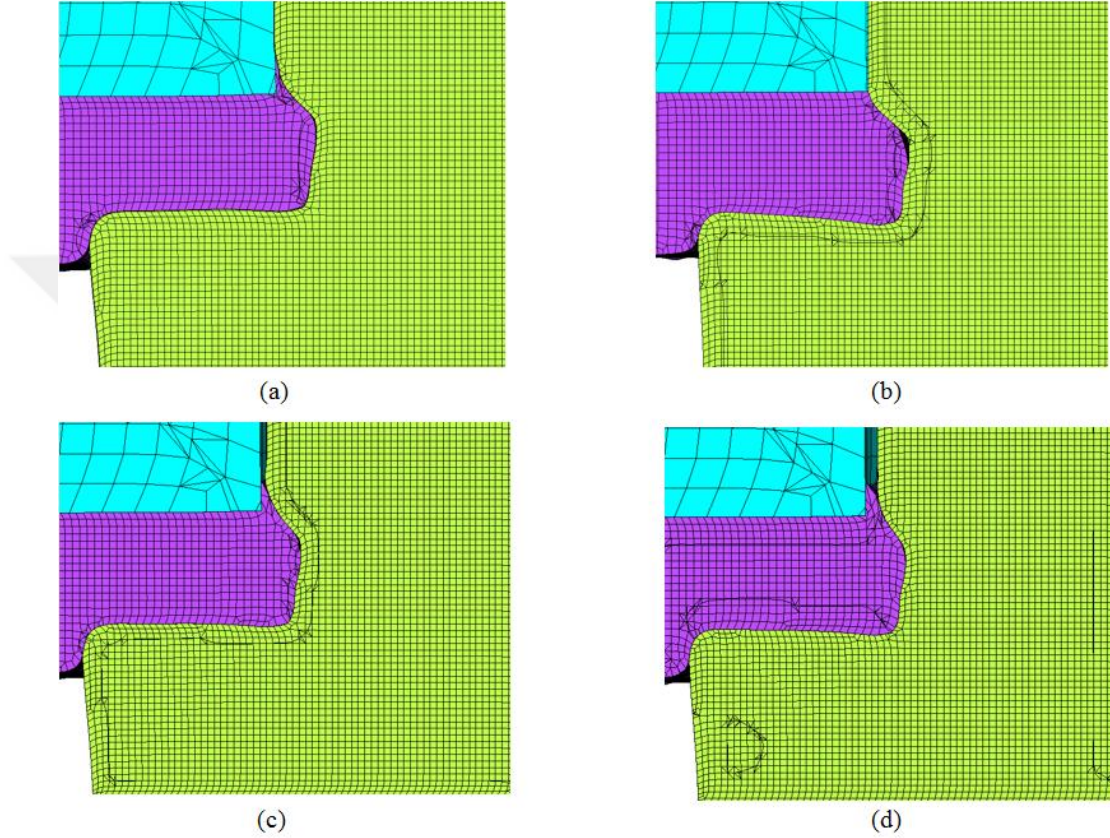
Şekil 4.8 Yığma Bölgesi Çapı

Çizelge 4.5 Yığma bölgesi çapının değişiminin şekillendirme stroğu, şekillendirme kuvveti, (basma yükü), aksenal sökme yükü ve aksenal döndürme momenti üzerinde etkileri

Parametre	YBÇ (mm)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
P-1-1	4,52	0,99	57,00	8,56	34,76
Nominal (Kalibrasyon analizi)	4,48	1,19	58,10	8,40	38,25
P-1-2	4,38	1,17	58,10	8,65	37,67
P-1-3	4,28	1,12	56,90	9,64	37,29

Yığma bölgesi çapının cıvata tespit işlemleri kapsamında meydana gelen şekillendirme üzerindeki etkileri genel olarak değerlendirildiğinde, YBÇ değerinin 4,52 mm olması durumunda, cıvata boşluğunu tam olarak doldurabilecek kapasitede bir metal akışının elde edilemediği anlaşılmaktadır (Şekil 4.9(b)). Söz konusu parametrenin 4,5 mm'den daha küçük değerler alması durumunda ise, cıvata

boşluğunun tam olarak doldurulabildiği görülmüştür (Şekil 4.9 (c)-(d)). Ancak, YBÇ'nin azalan değerleri ile birlikte, şekillendirme sırasında meydana gelen çapak oluşturma etkilerinin daha belirgin hale geldiği dikkati çekmektedir. Nitekim YBÇ'nin 4,28 mm değerini alması halinde deformasyon bölgesinde meydana gelen çapaklanma etkisinin diğer parametreler kıyasla çok daha belirgin olarak ortaya çıktığı Şekil 4.9 (d)'den açıkça görülmektedir.



Şekil 4.9 Yığma bölgesi çapının civata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) YBÇ=4,48 mm (kalibrasyon analizi), (b) YBÇ=4,52 mm (c) YBÇ=4,38 mm ve (d) YBÇ=4,28 mm

Yığma bölgesi çapının aldığı farklı değerler ile oluşturulan civataların tespit işlemlerinden elde edilen F-X eğrileri Şekil 4.10(a)'da verilmiştir. Söz konusu eğriler incelendiğinde, YBÇ'nin aldığı farklı değerlerin F-X eğrisinin karakteristik özellikleri üzerinde belirgin bir değişime neden olmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.10(a)). Tespit işleminin tamamlanması için gerekli olan strok değerleri karşılaştırıldığında (Çizelge 4.5), YBÇ'nin azalan değerleri ile birlikte şekillendirme için gerekli olan stroğun da azaldığı da söylenebilir. Benzer şekilde azalan YBÇ

değerleri ile birlikte şekillendirme kuvvetinde az da olsa azalma meydana geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.10(a) ve Çizelge 4.5).

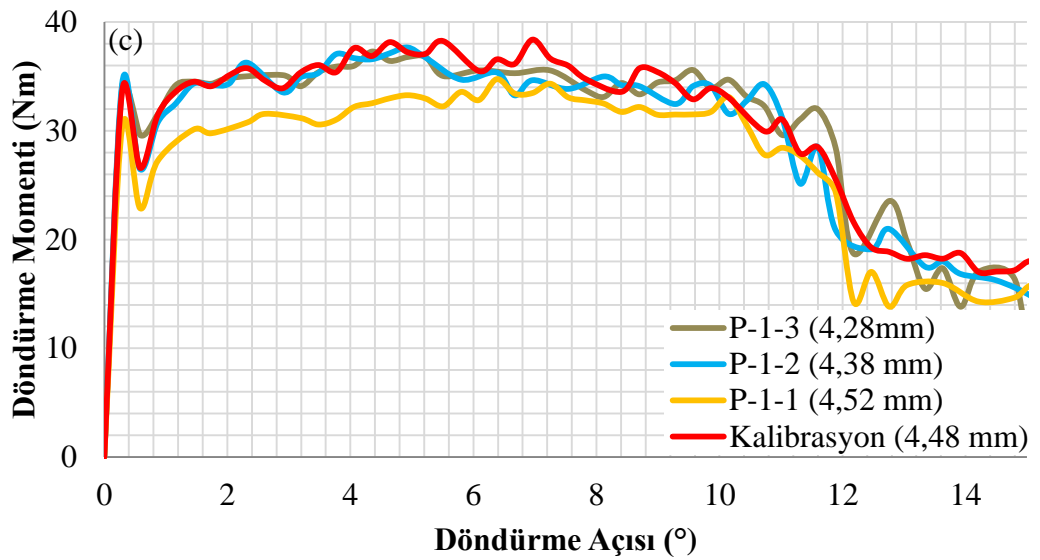
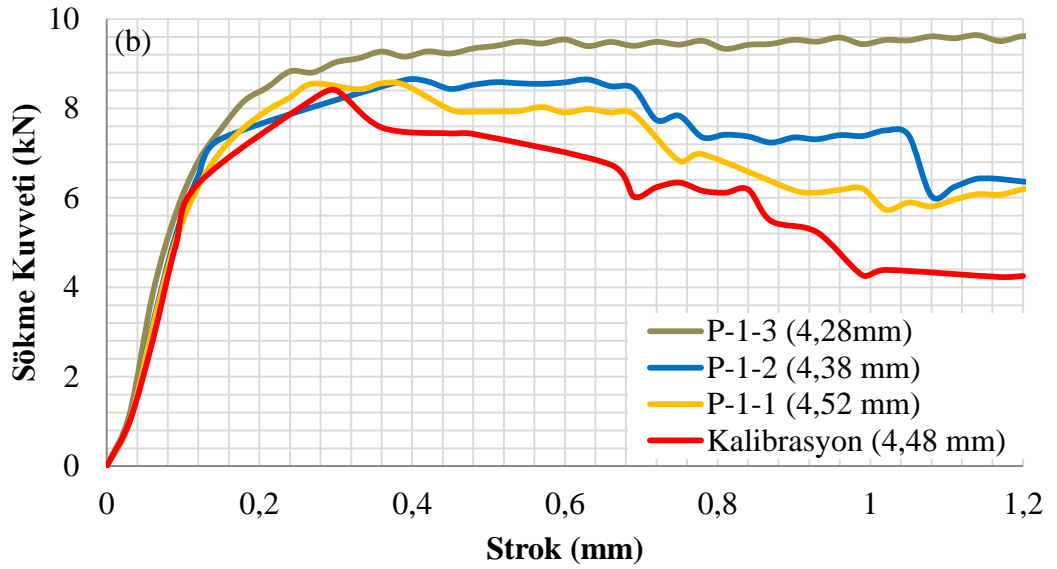
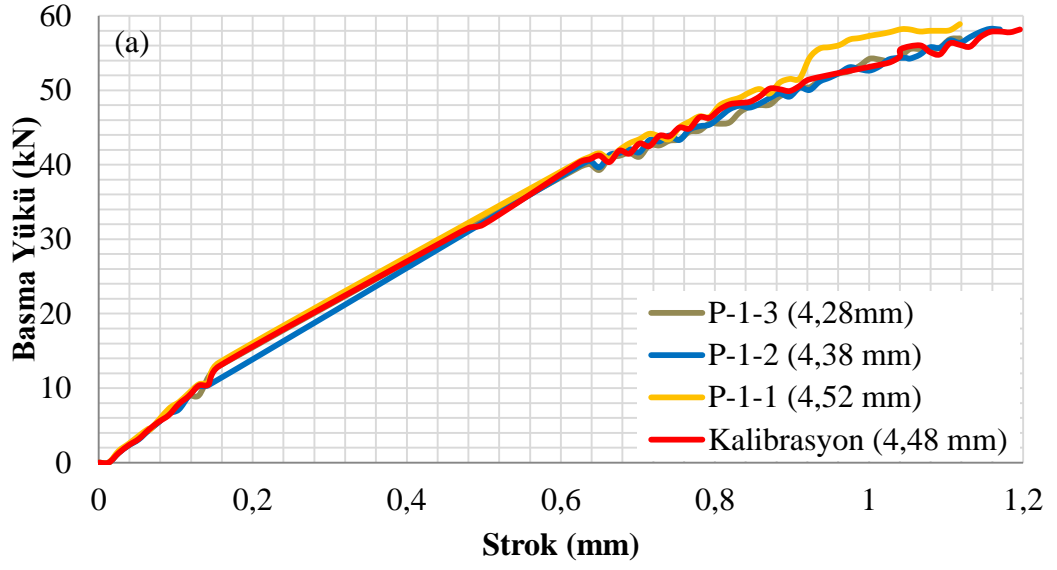
Yığılma bölgesi çapının aldığı farklı değerler ile oluşturulan cıvataların tespit işlemleri sonrasında aksenal sökme kuvvetleri altında sergiledikleri kuvvet-strok sökme ($F_{sökme}$)-(X) eğrileri Şekil 4.10(b)'de verilmiştir. Bu eğrilerden belirlenen en büyük sökme kuvveti değerleri ise Çizelge 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.10 (b) ve Çizelge 4.5 incelendiğinde, YBÇ'nin azalan değerleri ile birlikte, cıvata-Al levha çiftinin $F_{sökme}$ 'ye karşı sergilediği direncin belirgin olarak arttığı söylenebilir (Çizelge 4.5). Nitekim, söz konusu parametrenin 4.52 mm ve 4.28 mm değerlerini alması durumunda sergilediği en büyük aksenal $F_{sökme}$ değerinin 8,56 kN'dan 9,64 kN değerine yükseldiği Çizelge 4.5'den anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu parametrenin aldığı değerlerin ($F_{sökme}$)-strok (X) davranışı üzerinde de etkili olduğu Şekil 10(b)'den anlaşılmaktadır. Nitekim YBÇ'nin 4,28 mm'den daha büyük değerler alması durumunda eğri karakteristiğinin en yüksek kuvvet değerine ulaştıktan sonra ani bir düşüş sergilediği görülmektedir (Şekil 10(b)). Buna karşın söz konusu değerlerin 4,28 mm olması durumunda ise, cıvata-Al levha çiftinin aksenal sökme kuvvetine karşı sergilediği direncin bir plato davranışı sergilediği söylenebilir (Şekil 10(b)). Bu durum, YBÇ'nin 4,28 mm olarak seçilmesi durumunda cıvata-Al levha çiftinin $F_{sökme}$ karşısında geniş bir strok aralığında (yaklaşık 1,2 mm) direnç sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.10(b)).

Yığılma bölgesi çapının aldığı farklı değerlerin aksenal sökme momenti üzerindeki etkileri Şekil 4.10(c)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en büyük sökme momenti değerleri ise Çizelge 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.10 (c) ve Çizelge 4.5 incelendiğinde, YBÇ'nin sökme momenti üzerindeki etkisinin belli belirsiz olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim, söz konusu parametrenin 4,28 mm- 4,52 mm aralığında aldığı farklı değerler ile oluşturulan tasarımların, 34,80 Nm- 38,25 Nm aralığındaki sökme momentlerine karşı direnç sergilediği görülmektedir (Şekil 4.10 (c) ve Çizelge 4.5).

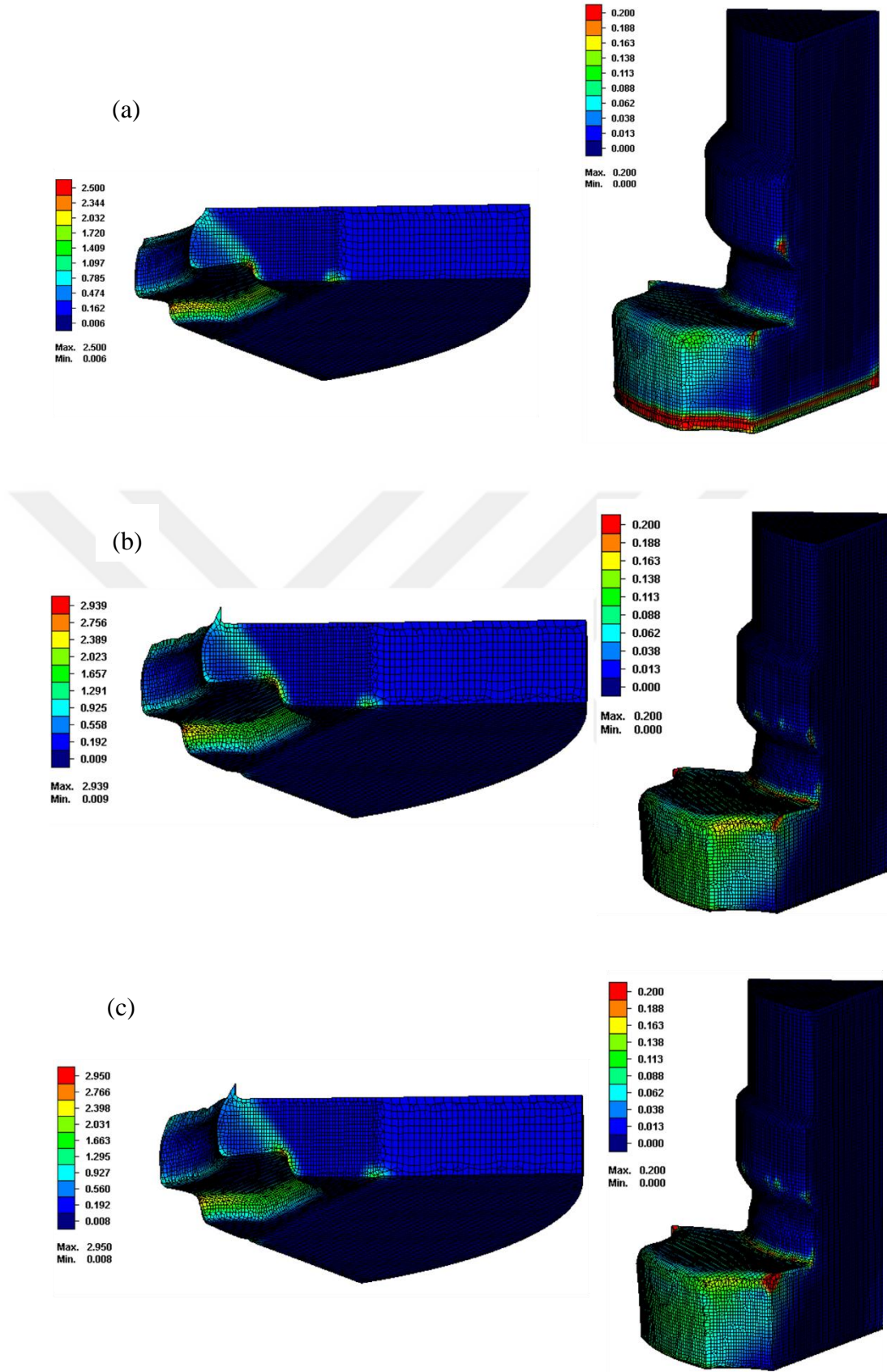
Yığılma bölgesi çapı (Parametre-1) kapsamında değerlendirilen geometrilerde şekillendirme analizi sonucunda ortaya çıkan gerinim dağılımları Şekil 4.11'de verilmiştir. Yığılma bölgesi çapının 4,52mm (P-1-1) seçilmesi ile yığılma bölgesi

apında apak oluşumuna müsaade edilmemektedir (Şekil 4.11). Buna istinaden söz konusu bölgedeki gerinim 2.377 değerine kadar artmaktadır. Buna karşın YB'nın 4,38 mm ve 4,28 mm olması durumunda ise en yüksek gerinim değerlerinin 2.939 ile 2,950 değerlerine ulaştığı Şekil 4.11'den görülmektedir. Bu durum YB'nın azalan değerleri ile birlikte deformasyon bölgesindeki en yüksek gerinimin artma eğilimi sergilediğini göstermektedir (Şekil 4.11).

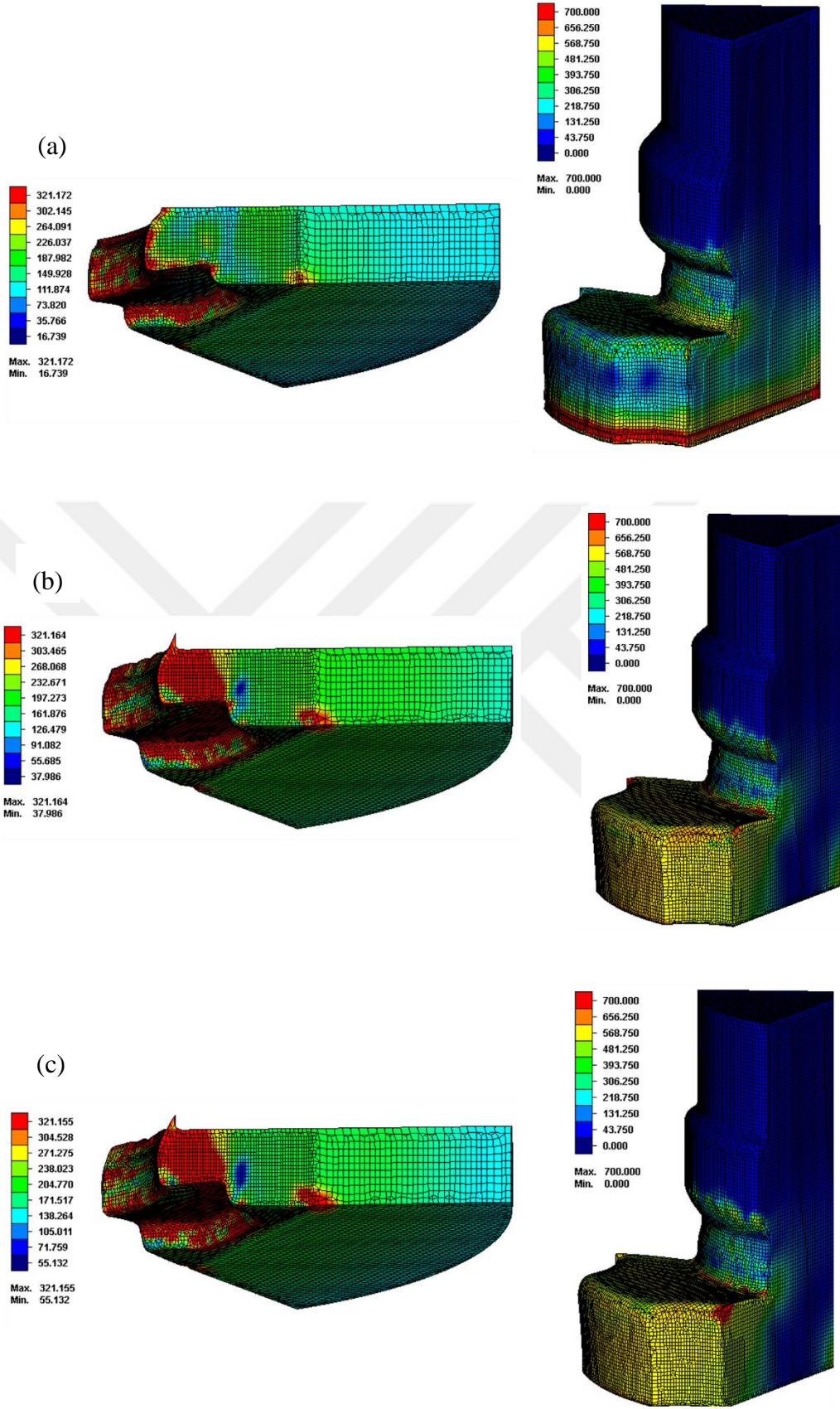
Şekil 4.12'de verilen gerilme dağılımları incelendiğinde maksimum gerilmenin görüldüğü bölgeler ile gerinim dağılımının benzer karakteristik özellikler sergilediği görülmektedir. Nitekim deformasyon bölgesinde görülen en yüksek gerilme değerlerinin, plastik gerinimlerin lokalleştiği bölgelerde ortaya çıktığı Şekil 4.12'den anlaşılmaktadır. Bu lokalleşme ile ilişkili olarak, söz konusu gerilme değerlerinin malzemenin çekme dayanımı mertebelerinde değerler aldığı ve deformasyon bölgesinden uzaklařtıķa ani bir Şekilde azalma sergilediği dikkati çekmektedir. Bu durum, özellikle Al-levhada çok daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Cıvata da ise maksimum gerilmenin görüldüğü bölgeler ile gerinim dağılımının yine benzer karakteristik özellikler sergilediği görülmektedir (Şekil 4.12). Şekillendirme sırasında cıvatanın baş kısmının dış kenarlarında ortaya çıkan kütleşme ve cıvata başında ortaya çıkan eğilme etkileri gerilmelerin bu bölgelerde daha yüksek değerler almasına neden olduğu söylenebilir. Nitekim Şekil 4.12'den de anlaşılacağı gibi cıvata ortaya çıkan en yüksek gerilme değeri cıvata şaftı ile cıvata başının keşiştiği kenar boyunca 700 MPa mertebelerinde meydana gelmektedir.



Şekil 4.10 Yığma bölgesi çapının değişime ait : (a) basma kuvveti-strok (b) eksenel sökme kuvveti-strok (c) Eksenel döndürme momenti – açığırafikleri



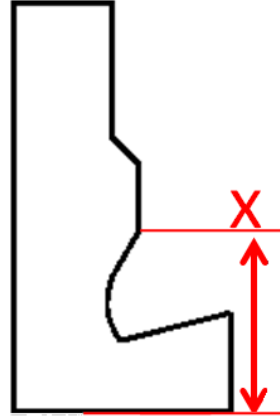
Şekil 4.11 Yiğma bölgesi çapı değişiminin alüminyum levha ve civatada meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) YBC = 4,52 mm, (b) YBC = 4,38 mm ve (c) YBC = 4,28 mm



Şekil 4.12 Yığıma bölgesi çapı değişiminin alüminyum levha ve civatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) YBC = 4,52 mm, (b) YBC = 4,38 mm ve (c) YBC = 4,28 mm (Gerilme birimi: MPa)

4.1.4.2. Yığma bölgesi yüksekliğinin (parametre-2) etkisi

Alüminyum levhanın cıvata da doldurması istenilen boşluğun boyu “Yığma bölgesi yüksekliği (YBY)” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.13) Söz konusu parametrenin prototip cıvata tasarımı sırasında nominal değeri 4,50 mm olarak ölçülmüştür. Söz konusu parametrenin Çizelge 4.6’da verilen 4,40 mm ve 4.60 mm değerlerinin şekillendirme öncesi ve sonrası süreçler üzerindeki etkileri incelenmiştir.



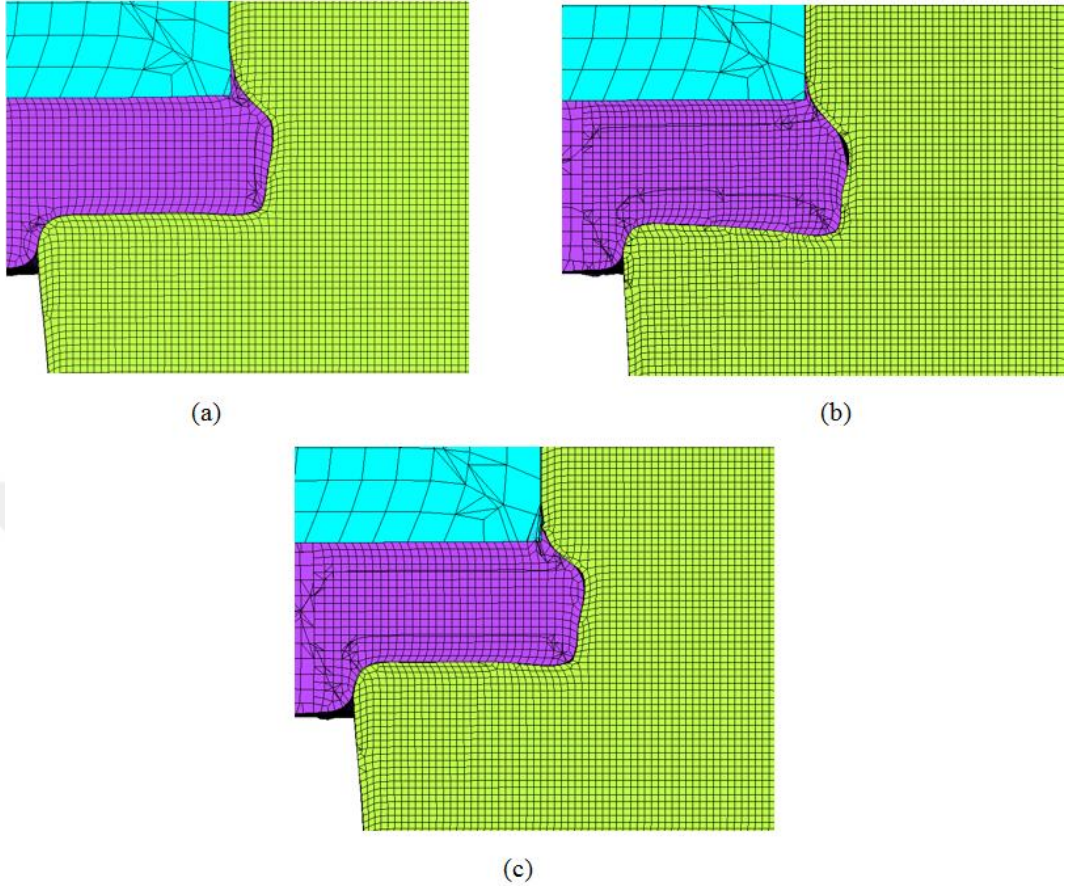
Şekil 4.13 Yığma bölgesi yüksekliği.

Çizelge 4.6 Yığma bölgesi yüksekliğinin (Parametre-2) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), aksenal sökme kuvveti ve aksenal döndürme momenti üzerindeki etkileri

Parametre	YBY (mm)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
P-2-2	4,40	1,14	57,00	8,81	41,21
Nominal (Kalibrasyon analizi)	4,50	1,19	58,10	8,40	38,25
P-2-1	4,60	0,96	52,50	8,90	34,75

Yığma bölgesi yüksekliğinin 4,60 mm değerini alması durumunda cıvatanın alüminyum levhaya tespit edilmesi için yeterli metal akışının sağlanamadığı ve yığma bölgesinin tam olarak doldurulamadığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.14(b)). Söz konusu parametrenin 4,50 mm ve 4,40 mm değerlerini alması durumunda ise, cıvata

boşluğunun tam olarak doldurulabildiği ve belli oranda da çapak oluşumuna rastlandığı Şekil 14 (a)-(c)'den anlaşılmaktadır.



Şekil 4.14 Yığma bölgesi yüksekliğinin cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) Kalibrasyon analizi YBY=4,5mm, (b)YBY=4,6mm ve (c) YBY=4,4mm

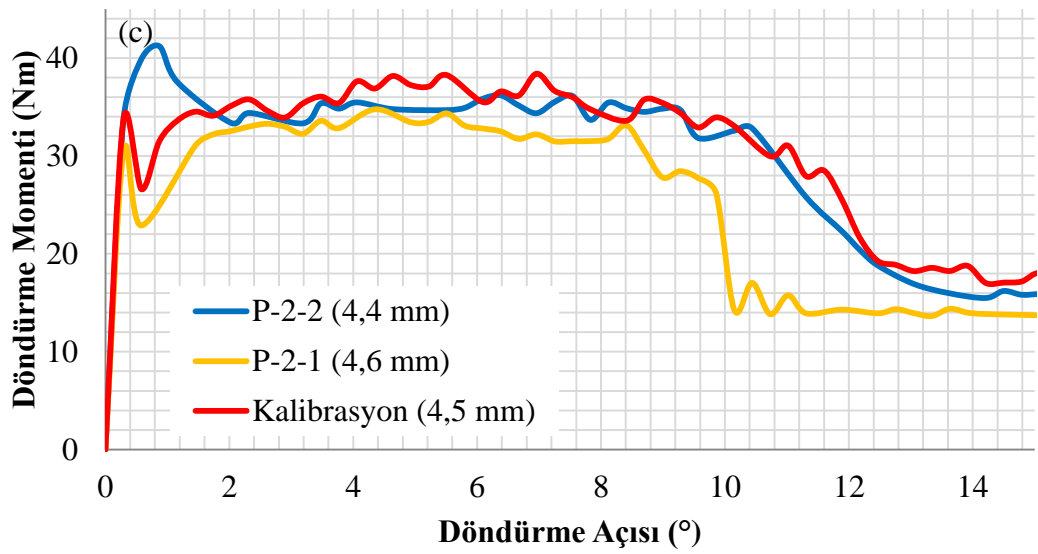
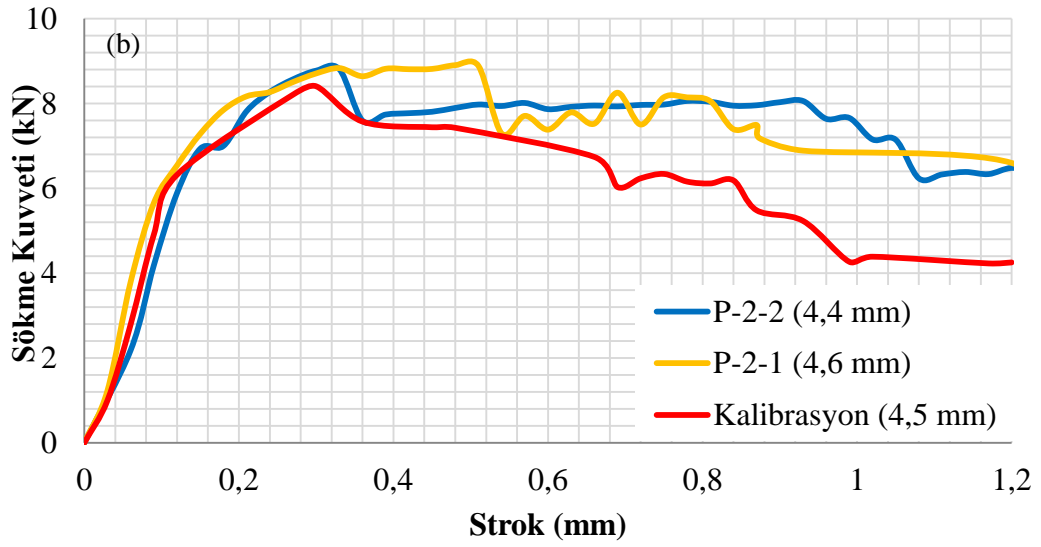
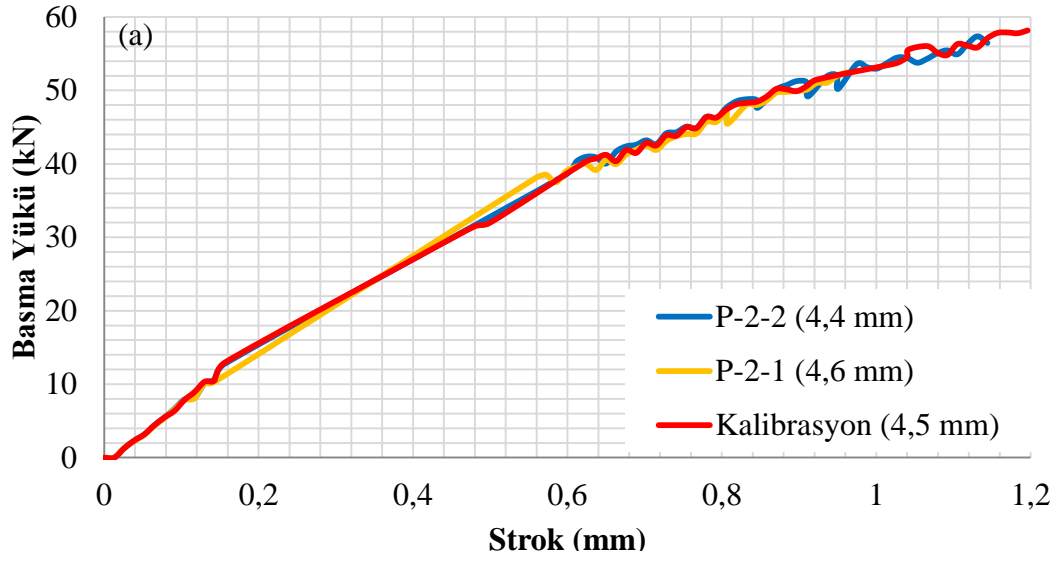
Yığma bölgesi yüksekliğinin aldığı farklı değerler ile oluşturulan cıvatanın tespit işlemlerinden elde edilen F-X eğrileri Şekil 4.15(a)'da verilmiştir. Söz konusu eğriler incelendiğinde YBY'nin aldığı farklı değerlerin F-X eğrisinin karakteristiğinde belirgin bir farka neden olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, YBY'nin azalmasıyla birlikte şekillendirme için gerekli kuvvet ve strok değerinin de az da olsa azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.6 ve Şekil 4.15 (a)).

Yığma bölgesi yüksekliğinin almış olduğu farklı değerlerin tespit sonrasındaki aksel sökme kuvveti üzerindeki etkileri şekil 4.15(b)'de verilmiştir. Bu eğrilerden ortaya çıkan en büyük aksel sökme kuvvetleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu iki veri incelendiğinde YBY'nin azalması durumunda cıvata alüminyum levha çiftinin aksel sökme kuvvetine karşı göstermiş olduğu tepkinin arttığı görülmektedir.

Nitekim bu değerin 4,40 mm olarak seçilmesi durumunda aksel sökme kuvvetinin belirgin Şekilde artarak en büyük değerine (8,81 kN) ulaştığı dikkati çekmektedir. Bununla birlikte, söz konusu parametrenin aldığı değerlerin ($F_{sökme}$)-strok (X) davranışı üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir (Şekil 4.15(b)).

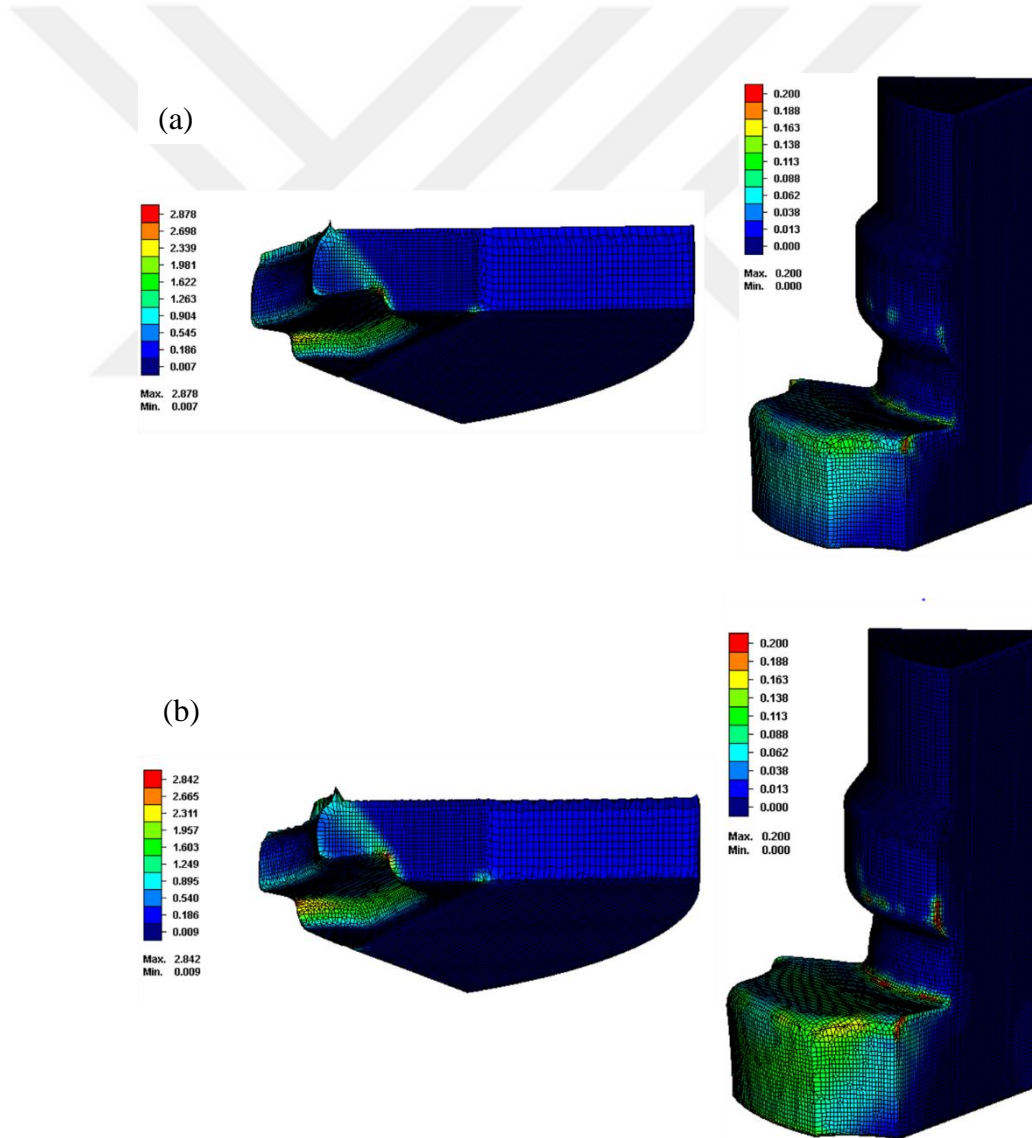
Yığma bölgesi yüksekliğinin aldığı farklı değerlerin aksel döndürme momenti üzerindeki etkileri Şekil 4.15(c)'de, bu eğriler üzerinden elde edilen maksimum döndürme moment değerleri ise izelge 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.15(c) ve izelge 4.6 incelendiğinde, YBY'nin azalan değerleri ile birlikte döndürme momentlerine karşı gösterilen direncin belirgin olarak arttığı görülmektedir (Şekil 4.15(c)). Nitekim yığma bölgesi yüksekliğinin 4,60 mm'den 4,40 mm değerine azalması durumunda aksel döndürme momentinin 38,25 Nm'den 41,21 Nm değerine yükseldiği belirlenmiştir.

Yığma bölgesi yüksekliği kapsamında değerlendirilen geometrilerin (Parametre-2) cıvata ve alüminyum levhada oluşturduğu gerinim dağılımları Şekil 4.16'da verilmiştir. Yığma bölgesi yüksekliğinin artmasıyla birlikte apak oluşumunun da azalması gerinim dağılımı üzerinde de etkili olmaktadır. Nitekim YBY'nin 4,40 mm olması durumunda cıvata kafasının altından apak oluşum bölgesine uzanan belirgin bir deformasyon bandının oluştuğu dikkati çekmektedir (Şekil 4.16(b)). Söz konusu deformasyon bandı YBY'nin 4,6 mm olması durumunda ise, etkinliğini belirgin oranda kaybetmektedir. Bununla beraber YBY'nin 4,40 mm ve 4,60 mm olması durumunda en yüksek efektif plastik gerinim değerinin, gerek deformasyon bandı içerisinde ve gerekse Şekillendirme bölgesinin genelinde önemli oranda değişmeyerek, 2,84- 2,87 aralığında değerler aldığı görülmektedir (Şekil 4.16)

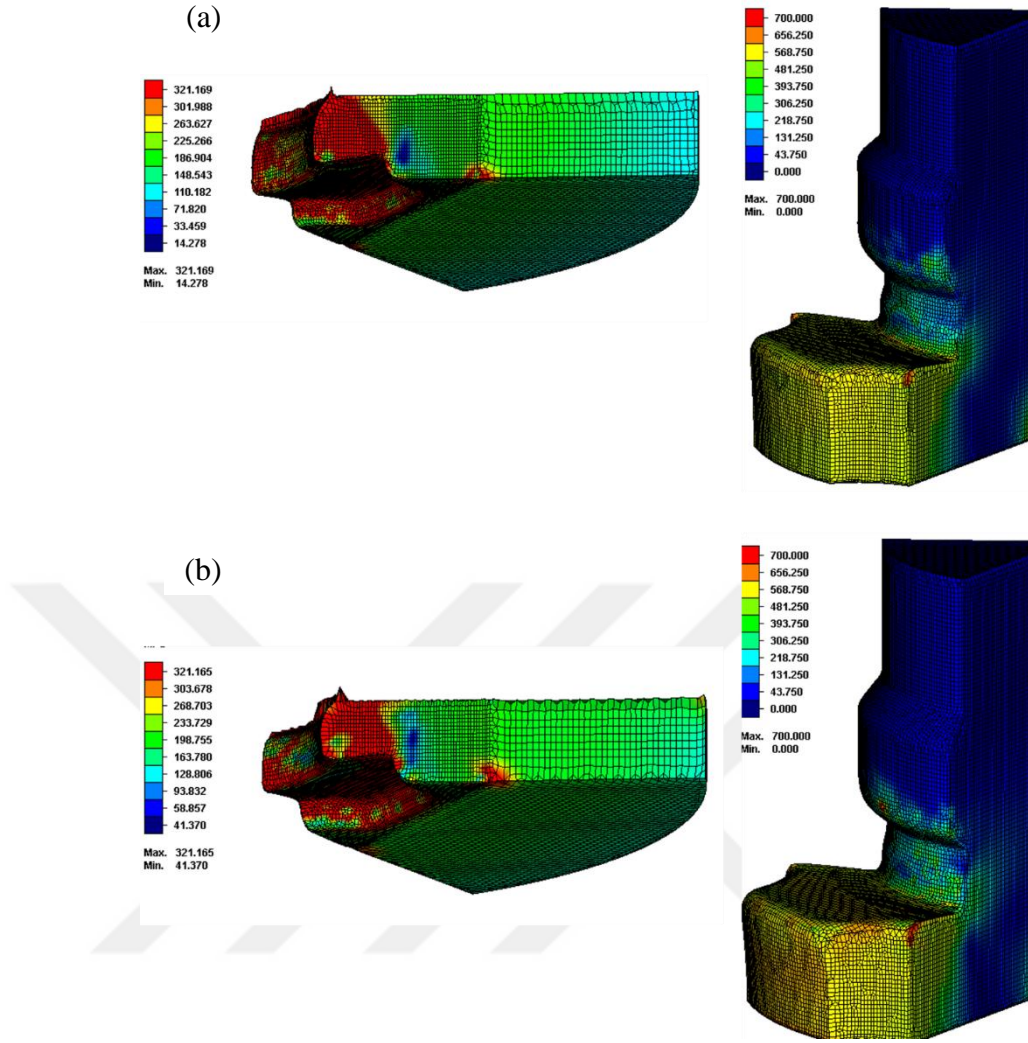


Şekil 4.15 Yığıma bölgesi yüksekliği değişime ait : (a) basma kuvveti-strok (b) aksenal sökme kuvveti-strok (c) Aksenal döndürme momenti – aç grafiikleri

Şekil 4.17’de yığma bölgesi yüksekliğindeki değişimin cıvata ve alüminyum levhadaki gerilme dağılımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Alüminyum levhada meydana gelen maksimum gerilme bölgeleri lokal plastik şekil verme nedeniyle, malzemenin çekme dayanımına yakın mertebelere ulaşmaktadır. Cıvatada en yüksek gerilme değerlerinin elde edildiği bölgeler, cıvatanın baş kısmında ve bu kısmın cıvata şaftı ile kesiştiği bölgelerde meydana gelmektedir. Şekillendirme sırasında cıvatanın baş kısmının dış kenarlarında ortaya çıkan kütleşme ve cıvata başından ortaya çıkan eğilme ile bağlantılı olarak gerilim ve gerilme değerlerinin de bu bölgelerde yoğunlaştığı söylenebilir (Şekil 4.17(a)-(b)). Bununla birlikte Şekil 4.17’den de anlaşılacağı gibi cıvata ortaya çıkan en yüksek gerilme değeri cıvata şaftı ile cıvata başının kesiştiği kenarda ve 560 MPa mertebelerinde oluşmaktadır (Şekil 4.17 (a)-(b)).



Şekil 4.16 Yığma bölgesi yükseklik değişiminin alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerilim dağılımı: (a) YBY = 4,60 mm, (b) YBÇ = 4,40 mm



Şekil 4.17 Yığma bölgesi yükseklik değişiminin alüminyum levha ve civatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) YBY = 4,6 mm, (b), YBÇ = 4,4 mm (Gerilme birimi:MPa)

4.1.4.3. Yığma açısının (parametre-3) etkisi

Cıvata tespit işlemleri esnasında deforme olan alüminyum levhanın cıvata boşluğuna yönlendirilmesini sağlayan açı “Yığma açısı (YA)” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.18). Söz konusu parametrenin prototip cıvata tasarımı sırasında nominal değeri 81° olarak ölçülmüştür. Yığma açısının verilen 80° , 85° ve 90° değerlerini alması durumunda şekillendirme ve şekillendirme sonrası süreçler üzerindeki etkileri parametre-3 (Şekil 4.18) kapsamında değerlendirildi (Çizelge 4.7).



Şekil 4.18: Yığma açısı

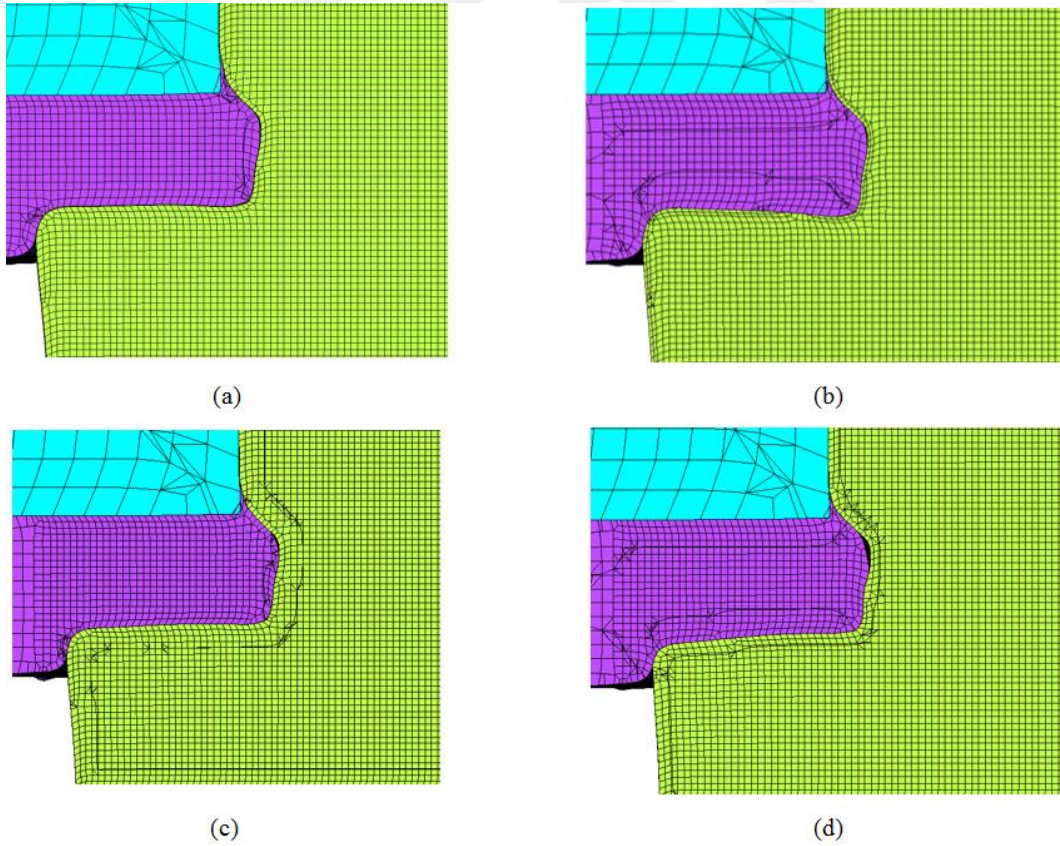
Söz konusu parametrenin 90° olması durumunda (P-3-3) şekillendirme sırasında alüminyum levhanın cıvata boşluğunu tam doldurmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.19 (d)). Ayrıca şekillendirme sırasında meydana gelen yüklemelerin cıvata kafa kısmında belirgin deformasyonların oluşmasına neden olduğu da dikkati çekmektedir. Bu kapsamda, kafa kısmının belirgin bir şekilde ezildiği söylenebilir. Bununla birlikte, YA'nın şekillendirmeden önceki değerinin (90°) şekillendirme sırasında stabil kalmadığı ve artma eğilimi sergilediği de dikkati çekmektedir. (Şekil 4.19 (d)). Yığma açısının azalan değerleri ile birlikte cıvata kafasında ortaya çıkan deformasyonun giderek azaldığı Şekil 4.19(b)'den anlaşılmaktadır. Ancak, YA'nın $80^\circ - 85^\circ$ aralığında seçilmesi durumunda belirgin çapak oluşumunun meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.19 (b)-(c)).

Yığma açısının aldığı farklı değerler ile oluşturulan cıvata geometrilerinin, alüminyum levhaya tespit işlemi esnasında elde edilen F-X eğrileri Şekil 4.20(a)'da verilmiştir. Söz konusu eğriler incelendiğinde cıvata boşluğunun tam doldurulması için gerekli olan strok değerlerinin YA'nın artması ile birlikte azaldığı görülmektedir (Çizelge 4.7). Bunun yanı sıra tespit işlemi için gerekli olan kuvvet değerinin de az da olsa artış gösterdiği Şekil 4.20(a) ve Çizelge 4.7'den anlaşılmaktadır. Elde edilen F-X eğrileri incelendiğinde, artan YA değerleri ile birlikte eğri eğiminin artış gösterdiği, YA değerinin 90° olduğu P-3-3 parametresinde bu etkinin en yüksek değerine ulaştığı söylenebilir. (Şekil 4.20(a)). Bunun yanı sıra YA'nın aldığı tüm değerler için, alüminyum levhanın cıvata boşluğuna dolmaya başladığı strok olan 0,7

mm değerinden (Şekil 4.3'de gösterilen 3. bölge) itibaren ortaya çıkan eğri karakteristiklerinin birbirlerine yakın eğimde olduğu görülmektedir (Şekil 4.20(a)).

Çizelge 4.7 Yığılma açısının (Parametre-3) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), aksel sökme kuvveti ve eksene döndürme momenti üzerindeki etkileri

Parametre	YA (derece)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
P-3-1	80,00	1,18	57,10	8,44	48,14
Nominal (Kalibrasyon analizi)	81,00	1,19	58,10	8,40	38,25
P-3-2	85,00	1,06	58,50	8,96	36,59
P-3-3	90,00	0,85	55,00	8,38	31,00



Şekil 4.19 Yığılma açısının civata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) Kalibrasyon analizi YA=81°, (b) YA=80°, (c) YA=85° ve (d) YA=90°

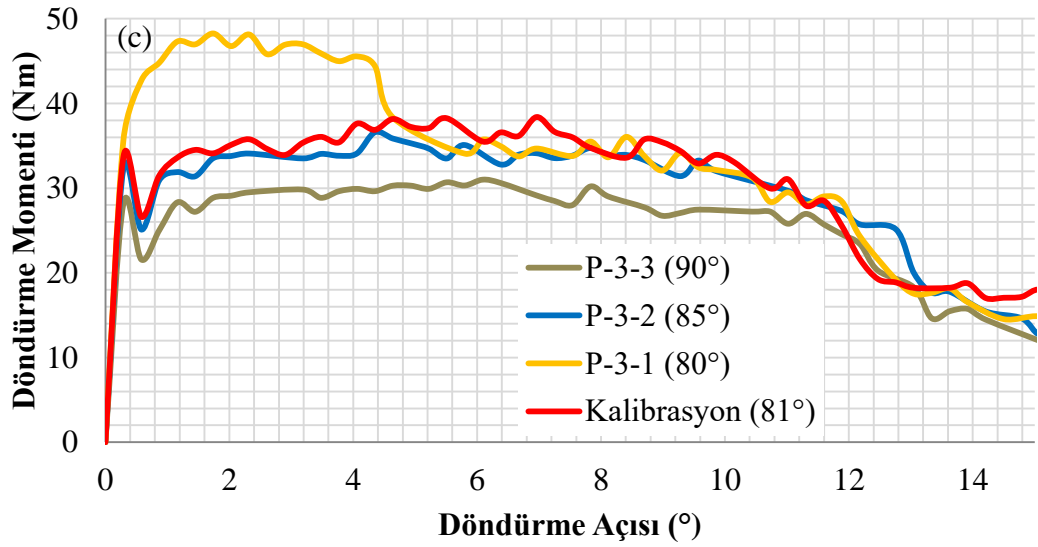
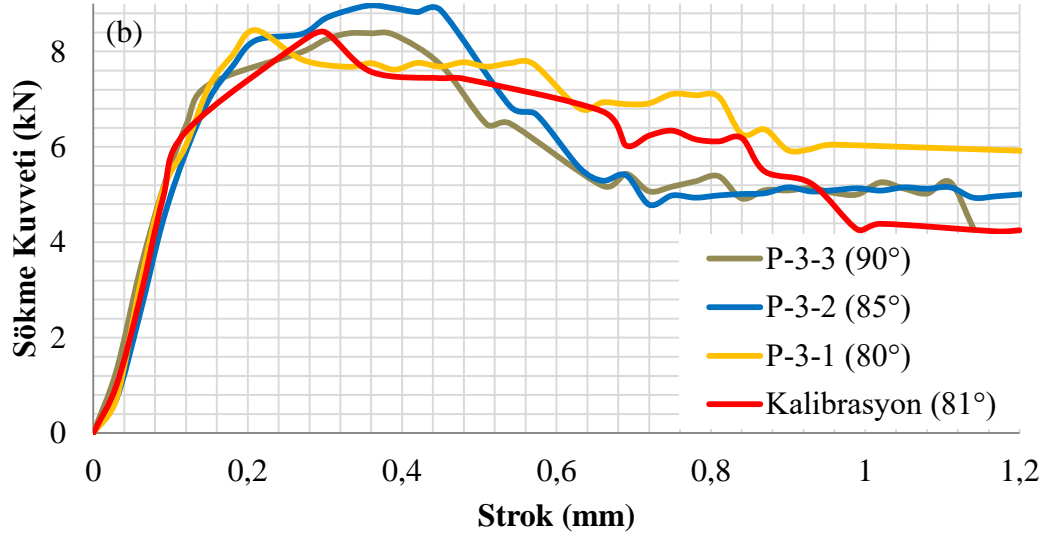
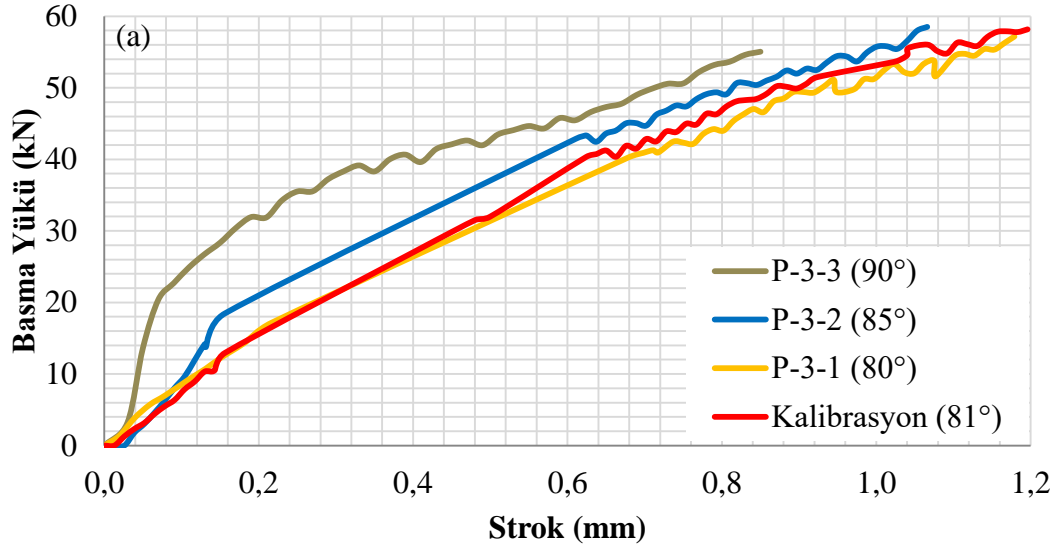
Yığma açısının aldığı farklı değerler ile oluşturulan cıvataların tespit işlemleri sonrasındaki eksenel sökme kuvvetine karşı gösterilen tepki Şekil 4.20(b)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en yüksek tepki kuvveti değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.20(b) ve Çizelge 4.7'dan elde edilen veriler incelendiğinde, YA'nın 80° olması ile 81° olması durumunda elde edilen eksenel sökme kuvvetleri arasında belirgin bir fark olmadığı ve yaklaşık 8,40 kN değerini aldığı anlaşılmaktadır. Yığma açısının 85°'ye yükselmesi durumunda ise bu değer 8,96 kN'a ulaştığı görülmektedir (Çizelge 4.7). Bununla birlikte, söz konusu parametrenin aldığı değerlerin ($F_{\text{sökme}}$)-strok (X) davranışı üzerinde etkileri incelendiğinde, en büyük eksenel sökme kuvvet değerine ulaştığı stroğun YA'nın artması ile birlikte arttığı görülmektedir (Şekil 4.20(b)).

Yığma açısının aldığı farklı değerlerin eksenel sökme momenti üzerindeki etkileri Şekil 4.20(c)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en büyük sökme moment değerleri ise Çizelge 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.20(c) ve Çizelge 4.7 incelendiğinde, YA'nın sökme momenti üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim YA'nın artan değerleri ile birlikte, cıvatanın direnç gösterebildiği sökme momenti değerleri belirgin olarak azalmaktadır (Şekil 4.20(c)). Yığma açısının 80° olması durumunda (P-3-1) elde edilen döndürme momentinin döndürme açısı ile değişimi incelendiğinde, 4°'lik döndürme açısına kadar döndürme momentinin önemli değişim sergilemeyerek, bir plato davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.20(c)). YA'nın 80°'den daha yüksek değerler aldığı durularda ise cıvata-Al levha çiftinin direnebildiği momentin en büyük değere ulaştıktan sonra ani bir azalma sergilediği görülmektedir (Şekil 4.20 (c)). Ayrıca söz konusu parametrenin artan değerleri ile birlikte döndürme moment değerlerinde azalma eğilimi sergilediği de dikkati çekmektedir. Nitekim söz konusu parametrenin 80° olması durumunda elde edilen 48,14 Nm'lik moment değerinin artan YA değerleri ile birlikte azalarak, YA'nın 90° olması durumunda 31,00 Nm'ye düşmektedir (Şekil 4.20(c) ve Çizelge 4.7).

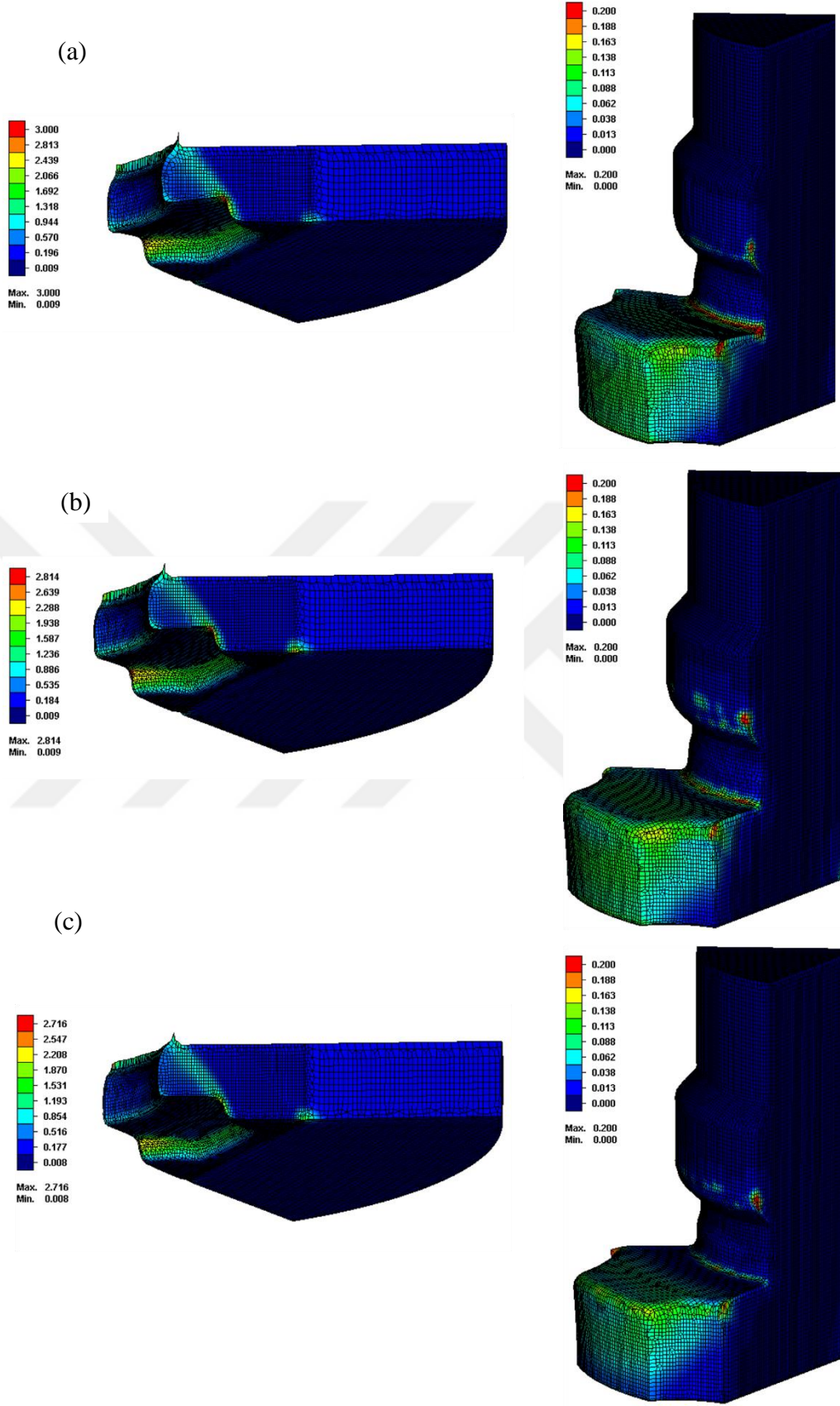
Yığma açısı (Parametre-3) kapsamında değerlendirilen geometrilerin şekillendirme sonrası alüminyum levha ve cıvatada oluşturduğu gerinim dağılımları Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekil 4.21 incelendiğinde alüminyum levhada görülen lokal gerinim

dağılımında belirgin bir fark ortaya çıkmazken, artan YA ile birlikte deforme olan alüminyum levhada oluşan gerinim değerlerinin belli oranda azaldığı söylenebilir. Nitekim YA'nın 80° (P-3-1), 85° (P-3-2) ve 90° (P-3-3) değerlerini alması durumunda meydana gelen gerinim değerlerinin sırasıyla 3,00, 2,81 ve 2,72 değerlerini aldığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.21 (a)-(c)). Tespit işlemi sonrası cıvata baş kısımlarının en dış çapında oluşan gerinim dağılım bölgelerinin artan YA ile birlikte daraldığı de görülmektedir (Şekil 4.21). Bununla beraber cıvata baş kısmı ile cıvata shaftının kesiştiği kenarda ortaya çıkan gerinim değerlerinin de artan YA ile birlikte azaldığı Şekil 4.21'den anlaşılmaktadır.

Şekil 4.21'de YA'daki değişimin cıvata ve alüminyum levhada oluşturduğu gerilme dağılımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Alüminyum levhada oluşan gerilme değerlerinin malzemenin çekme dayanımına yakın değerler aldığı görülmektedir (Şekil 4.21). Şekillendirme sırasında cıvatanın baş kısmının dış kenarlarında ortaya çıkan kütleşme ve cıvata başının eğilmesi ile bağlantılı olarak gerinim ve gerilme değerleri de bu bölgelerde yoğunlaştığı söylenebilir. Şekil 4.21'den de anlaşılacağı gibi cıvatada ortaya çıkan en yüksek gerilme değeri cıvata shaftı ile cıvata başının kesiştiği kenar bölgede görülmektedir. Bu bölgede ortaya çıkan gerilme dağılım değerleri artan YA ile birlikte azaldığı söylenebilir. Bu bölgelerde gerilmenin aldığı değerler artan YA değerine göre sırasıyla 700 MPa, 600 Mpa ve 390MPa mertebelerinde olmaktadır (Şekil 4.21 (a)-(c)).

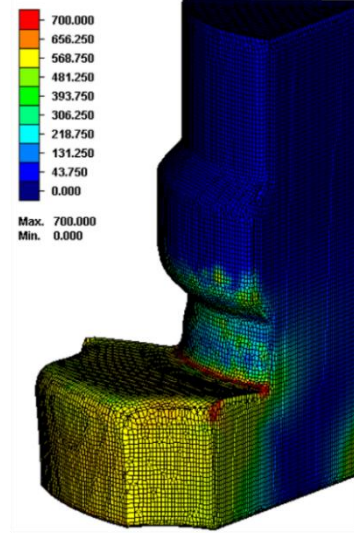
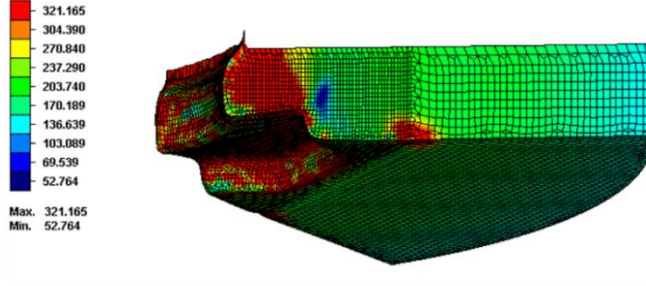


Şekil 4.20 Yığma açısının değişimine ait: (a) basma kuvveti-strok, (b) eksenel sökme kuvveti-strok, (c) eksenel döndürme momenti-açı grafikleri

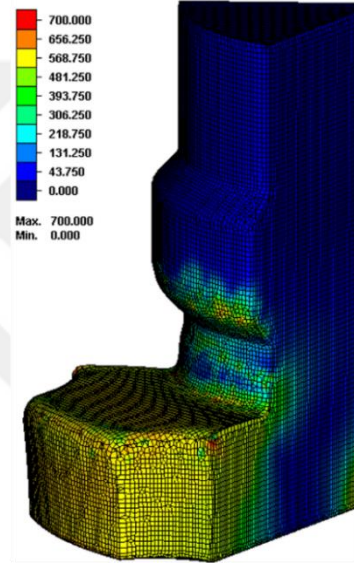
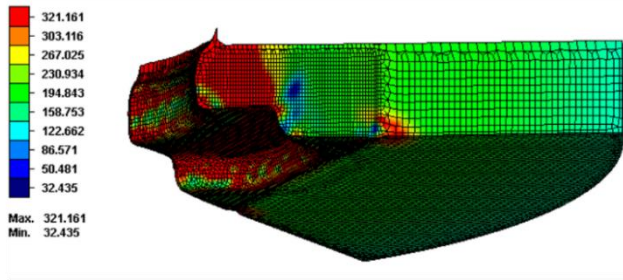


Şekil 4.21 Yığıma açısı değişiminin alüminyum levha ve civatada meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) YA=80°, (b) YA=85° ve (c) YA=90°

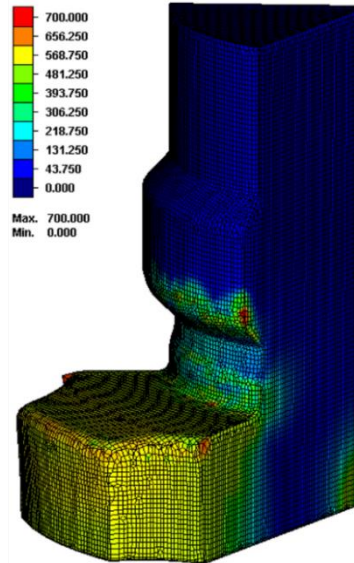
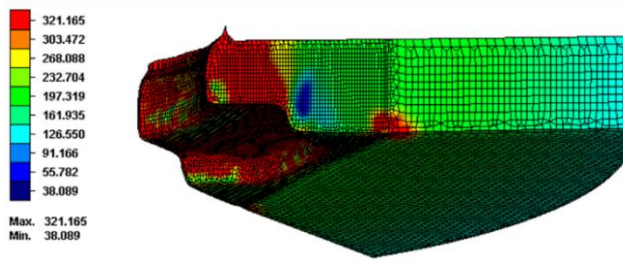
(a)



(b)



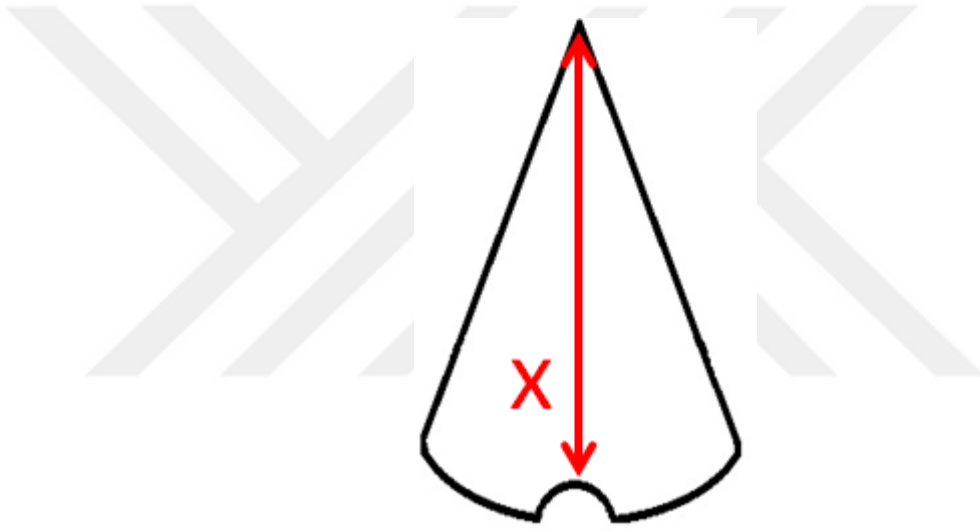
(c)



Şekil 4.22 Yığıma açısı değişiminin alüminyum levha ve civatada meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) YA=80°, (b) YA=85° ve (c) YA=90° (Gerilme birimi: MPa)

4.1.4.4. Moment çapının (parametre-4) etkisi

Cıvata tespit işlemleri esnasında alüminyum levha tarafından doldurularak tespit işlemi sonrası eksenel döndürme momentine karşı koyması için oluşturulmuş olan geometrik detay “Moment apı (MÇ)” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.23). Söz konusu parametrenin prototip cıvata tasarımı sırasında oluşturulan nominal değeri 6,00 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerin şekillendirme süreci ve şekillendirme sonrasında cıvata alüminyum levha çiftinin sergilemiş olduğu mekanik davranışlar üzerindeki etkileri parametre-4 kapsamında ortaya konuldu. Bu amaçla MÇ’nın Çizelge 4.8’de verilen 6,50 mm ve 5,50 mm değerlerini alması durumunun şekillendirme ve sonrasındaki özellikler üzerindeki etkisi değerlendirildi.

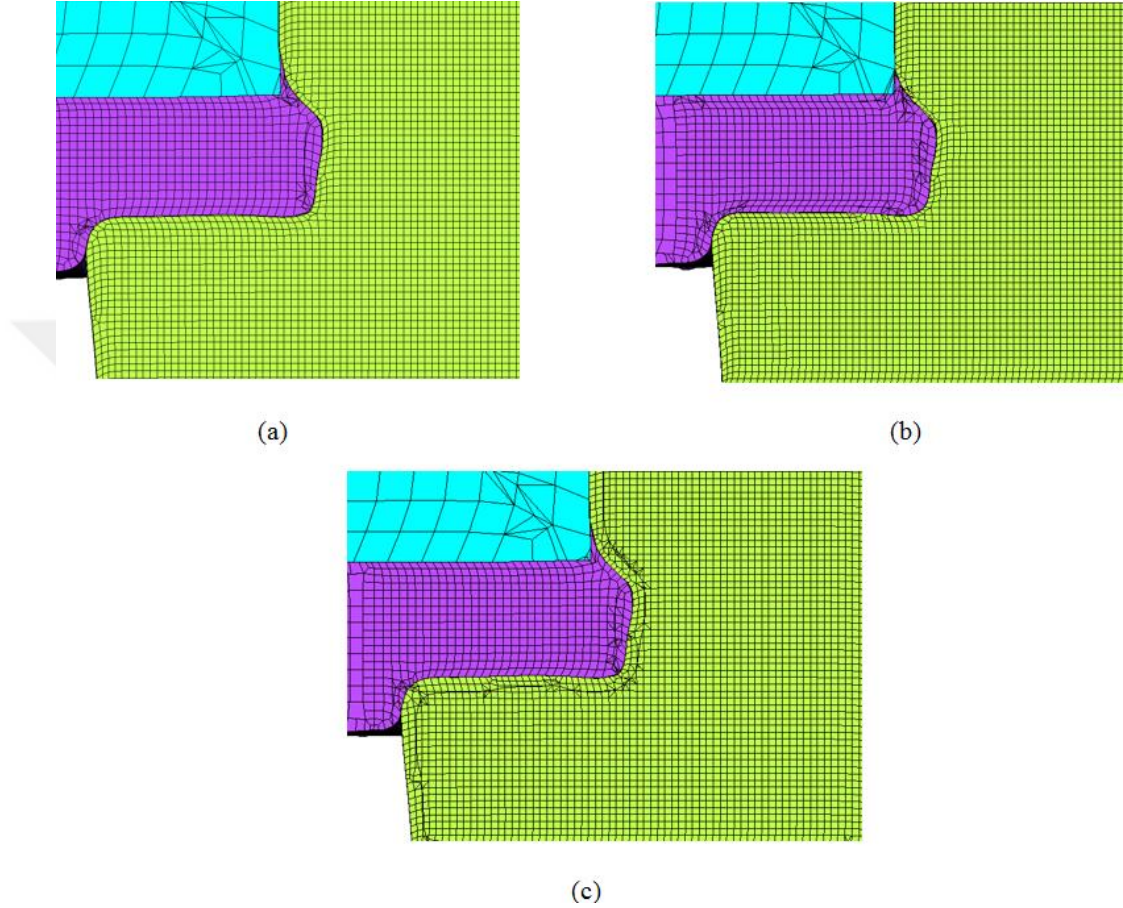


Şekil 4.23: Moment apı

Çizelge 4.8 Moment apının (Parametre-4) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksenel döndürme momenti üzerindeki etkileri.

Parametre	MÇ (mm)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
P-4-2	5,50	1,19	49,60	8,55	56,12
Nominal (Kalibrasyon analizi)	6,00	1,19	58,10	8,40	38,25
P-4-1	6,50	1,14	65,00	8,44	32,15

Moment çapının aldığı farklı değerlerin malzeme akışı açısından belirgin bir fark oluşturmadığı Şekil 4.24'den anlaşılmaktadır. Ancak söz konusu değer 5,50 mm olması durumunda (P-4-2) çapak oluşumunun nispeten daha belirgin olarak ortaya çıktığı söylenebilir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Moment çapının cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) kalibrasyon analizi MÇ=6,00 mm, (b) MÇ=6,50 mm, (c) MÇ=5,50 mm

Moment çapının aldığı farklı değerler ile oluşturulan cıvataların tespit işlemlerinden elde edilen F-X eğrileri Şekil 4.25(a)'da verilmiştir. Söz konusu eğriler incelendiğinde, MÇ'nin aldığı farklı değerlerin F-X eğrisinin karakteristik özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.25(a)). Bu kapsamda, MÇ'nin azalan değerleri ile birlikte şekillendirme kuvvetinin azalma eğilimi sergilediği Çizelge 4.8 ve Şekil 4.25(a)'dan anlaşılmaktadır. Ancak, söz konusu değer 5,5 mm - 6,5 mm aralığında aldığı değerlerin, şekillendirmenin tamamlandığı strok değerleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır (Çizelge 4.8). Bu durum, MÇ'nin artan değerleri ile birlikte, şekillendirme kuvveti

ve strok eğrisinin eğiminin artma eğilimi sergilediğine işaret etmektedir (Şekil 4.25(a)).

Moment çapının almış olduğu farklı değerlerin tespit işlemleri sonrasındaki eksenel sökme kuvvetlerine karşı sergiledikleri direnç üzerinde üzerindeki etkileri Şekil 4.25(b)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en büyük sökme kuvvet değerleri ise Çizelge 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.25(b) ve Çizelge 4.8 incelendiğinde, MÇ değerinin 5,50 mm ve 6,00 mm değerlerini alması durumunda elde edilen sökme kuvvet değerlerinin birbirine yakın mertebelerde olduğu söylenebilir (Şekil 4.25(a)). Ancak MÇ'nin 6,50 mm olması durumunda ortaya çıkan sökme kuvvetinde belirgin bir azalma olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.25 (b)). Bununla birlikte, söz konusu parametrenin aldığı farklı değerlerin ($F_{sökme}$)-strok (X) davranışı üzerinde etkisinin belirgin olduğu Şekil 4.25(b)'den anlaşılmaktadır. Nitekim MÇ'nin 5,50 mm olması durumunda cıvata alüminyum levha çiftinin eksenel sökme kuvvetine karşı sergilediği direncin platoya yakın bir davranış sergilediği görülmektedir (Şekil 4.25(b)). Buna karşın bu değer 6,00 mm ve 6,50 mm aralığında olması durumunda en yüksek eksenel sökme kuvvetine ulaşmasının ardından ani bir kuvvet azalması görülmektedir (Şekil 4.25(b)).

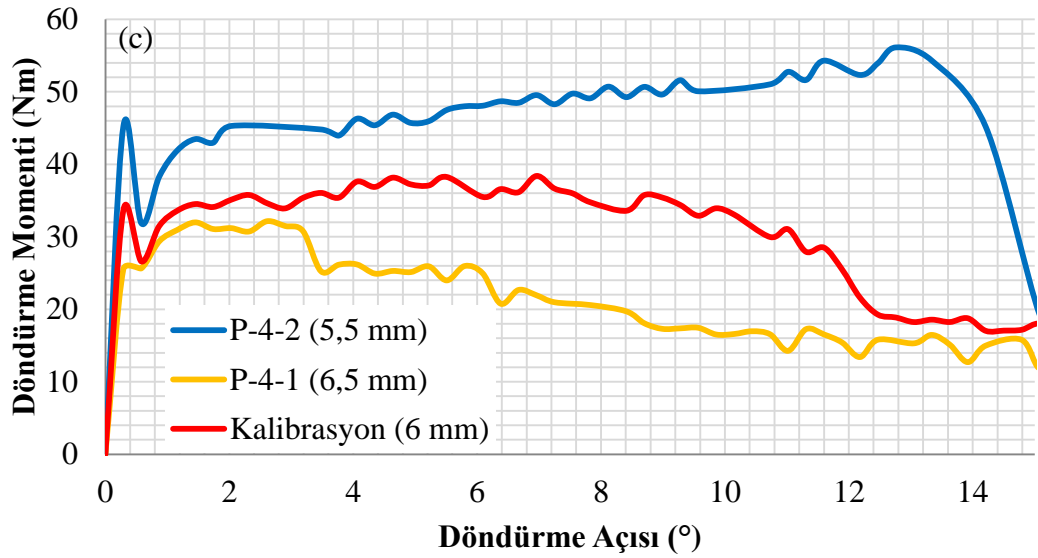
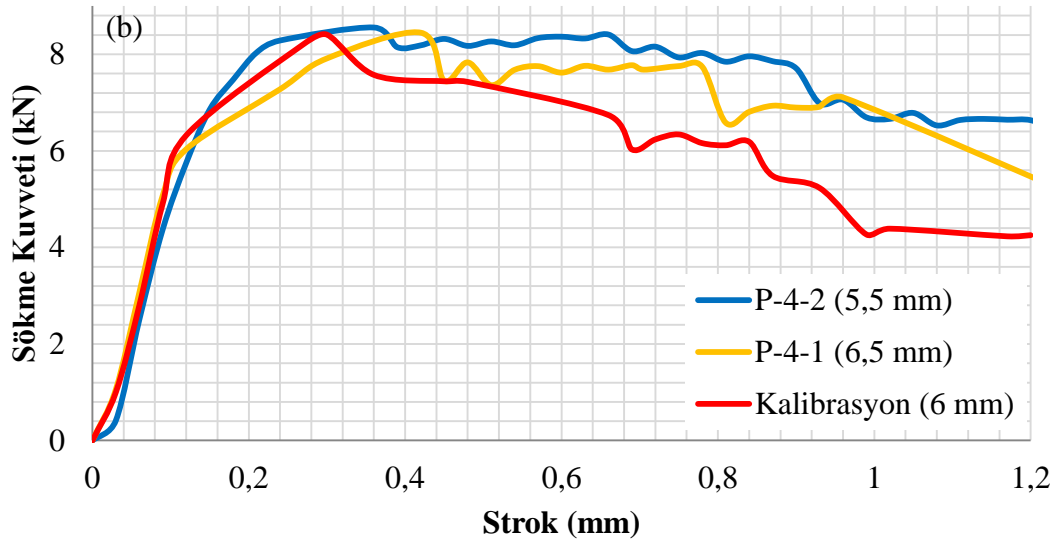
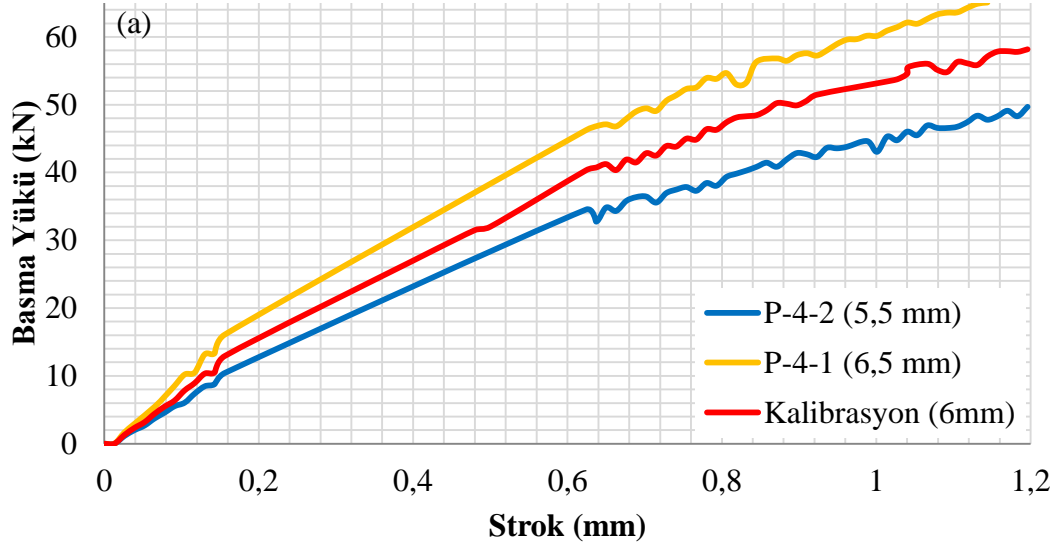
Moment çapının aldığı farklı değerlerin eksenel sökme momenti üzerindeki etkileri Şekil 4.25(c)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en büyük sökme moment değeri ise Çizelge 4.8'de verilmiştir. Bu iki veri incelendiğinde MÇ'nin azalması durumunda ortaya çıkan en büyük eksenel sökme kuvvetinde belirgin bir artış (56,12 Nm) görülmektedir. Bunun yanında MÇ'nin artması ile eksenel sökme momentinde belirgin azalma meydana gelmektedir (Çizelge 4.8). Maksimum momente ulaşılan döndürme açısı değeri MÇ'nin azalan değerleri ile birlikte belirgin bir artış da sergilemektedir. Nitekim MÇ'nin 6,50 mm olması durumunda en büyük döndürme momentine yaklaşık 12° 'de ulaşıırken, aynı değer MÇ'nin 6,00 mm ve 5,5 mm olması durumlarında ise $2,5^\circ$ seviyelerine gerilemektedir (Şekil 4.25(c)).

Moment çapı (Parametre-4) kapsamında değerlendirilen geometrilerin şekillendirme analizi sonucunda cıvata ve alüminyum levhada meydana getirdiği gerinim

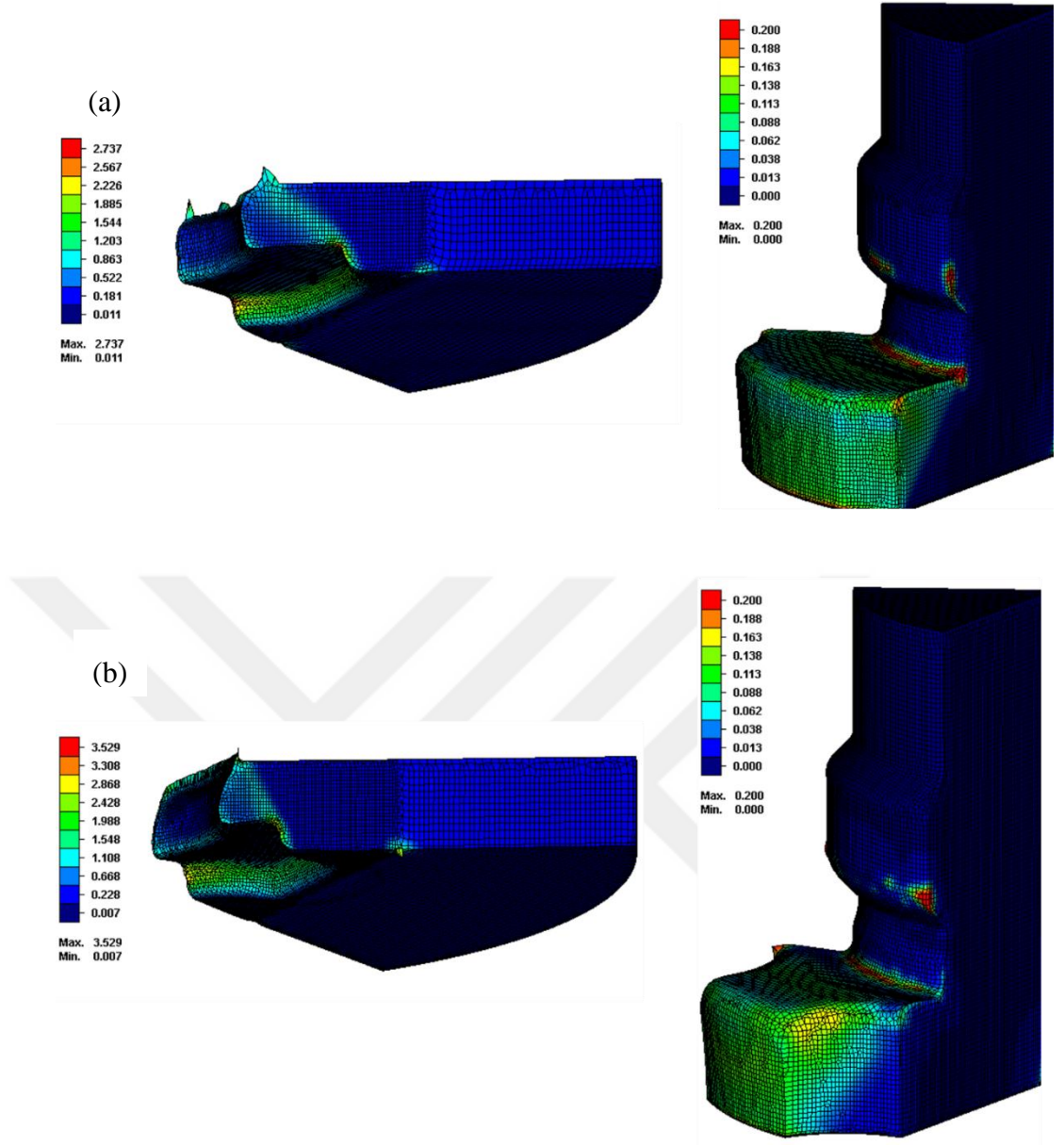
dağılımları Şekil 4.26’da verilmiştir. Moment çapının 6,50 mm seçilmesi durumunda (P-4-1) şekillendirme sonrası ortaya çıkan çapak şeklinin tüm alüminyum levha kenarı boyunca sürekli ve homojen olmadığı görülmektedir (Şekil 4.29(a)). Moment çapının 5,50 mm ve 6,00 mm olması durumunda ise homojen dağılmış ve neredeyse eşit yükseklikte çapak oluşumu meydana geldiği söylenebilir (Şekil 4.29(b)).

Moment çapının azalan değerleri ile birlikte alüminyum levhada meydana gelen gerinim değerlerinin azalma eğiliminde olduğu söylenebilir. Nitekim MÇ’nın 5,50 mm olması durumunda ortaya çıkan gerinim değerinin 3,53 mertebesine ulaştığı ve 6,50 mm olması durumunda ise söz konusu gerinim değerinin 2,74 mertebelerinde kaldığı görülmektedir (Şekil 4.29(a)-(b)). Ayrıca alüminyum levhada, cıvata kafasından çapak oluşum bölgesine uzanan gerinim bandının artan MÇ değerleri ile birlikte genişlediği görülmektedir (Şekil 4.26 (a)-(b)). Cıvatanın kafa kısmında meydana gelen gerinim değerleri incelendiğinde MÇ’nın artması ile birlikte gerinim yoğunlaşmasının görüldüğü bölgelerinin daraldığı söylenebilir (Şekil 4.26(a)-(b)). Bunun yanı sıra cıvata kafasından çapak oluşum bölgesine uzana gerinim bandının MÇ’nın azalması ile birlikte daraldığı Şekil 4.26’dan anlaşılmaktadır.

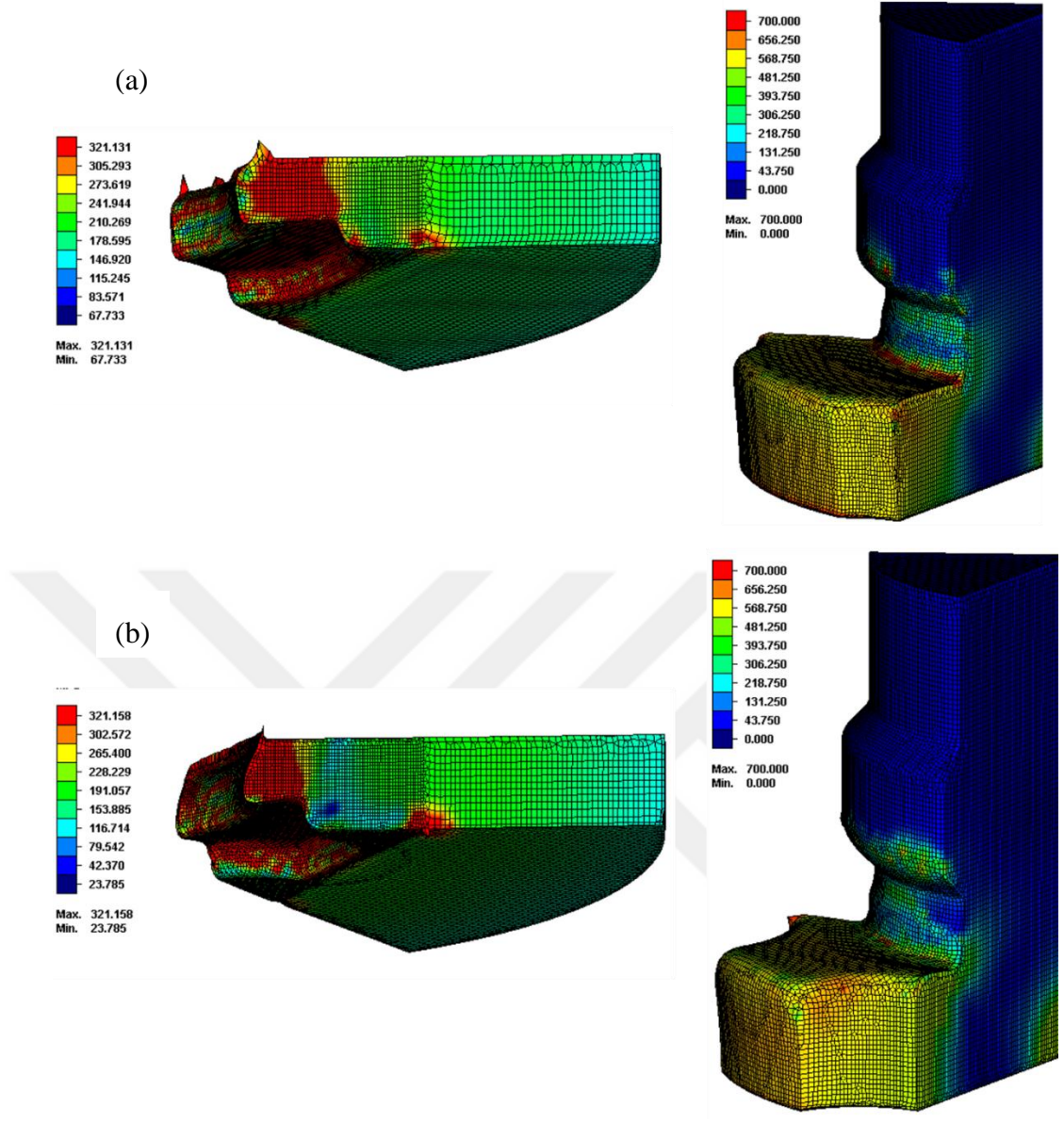
Şekil 4.27’de moment çapının değişiminin cıvata ve alüminyum levhada meydana getirdiği gerilme dağılımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 4.26’da verilen gerinim dağılımı şeklinden anlaşılacağı gibi maksimum gerinim değerlerinin görüldüğü bölgelerde maksimum gerilme değerlerine ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Özellikle alüminyum levhada meydana gelen maksimum gerilme bölgeleri lokal plastik şekil verme nedeniyle, malzemenin çekme dayanımına yakın mertebelere ulaştığı söylenebilir (Şekil 4.27 (a)-(b)). Şekillendirme sırasında cıvatanın baş kısmının dış kenarlarında ortaya çıkan kütleleşme ve cıvata başından ortaya çıkan eğilme ile bağlantılı olarak gerinim ve gerilme değerleri de bu bölgelerde yoğunlaştığı söylenebilir (Şekil 4.27 (a)-(b)). Şekil 4.27’den de anlaşılacağı gibi cıvata ortaya çıkan en yüksek gerilme değeri cıvata şaftı ile cıvata başının kesiştiği kenarda 700 MPa mertebelerinde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.25 Moment çapının değişimine ait (a) basma kuvveti-strok, (b) eksenel sökme kuvveti-strok, (c) eksenel döndürme momenti-açı grafikleri



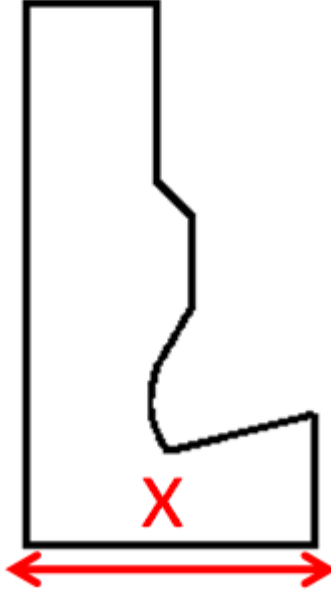
Şekil 4.26 Moment çapı değişiminin alüminyum levha ve civatada meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) MÇ=6,50 mm, (b) MÇ=5,50 mm



Şekil 4.27 Moment çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvata da meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) MÇ=6,50 mm, (b) MÇ=5,50 mm (Gerilme birimi:MPa)

4.1.4.5. Cıvata çapının (parametre-5) etkisi

Cıvatanın alüminyum levhaya tespit işlemi esnasında deformasyona katılan malzeme miktarını belirleyen boyutu “Cıvata çapı (CÇ)” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.28). Söz konusu boyutun şekillendirme ve şekillendirme sonrası süreçlerdeki mekanik davranışlar üzerindeki etkileri Parametre-5 kapsamında incelenmiştir. Bu kapsamda CÇ’nin Çizelge 4.9’da verilen 6,50 mm, 6,75 mm, 7,00 mm, 7,25 mm ve 7,50 mm değerlerini almasının şekillendirme ve sonrasındaki süreç üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

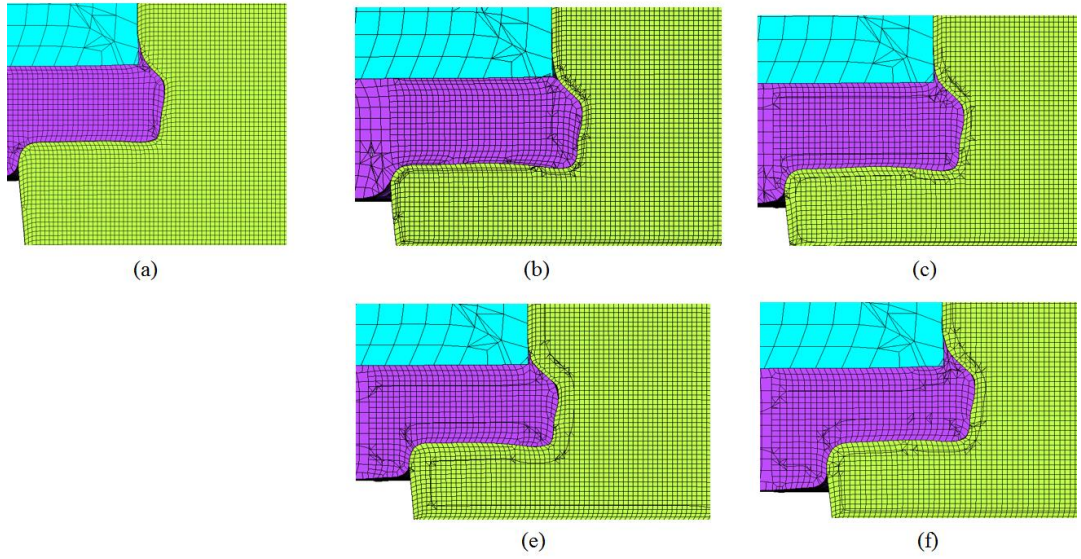


Şekil 4.28 Cıvata çapı.

Çizelge 4.9 Cıvata çapının (Parametre-5) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), eksenel sökme kuvveti ve eksenel döndürme momenti üzerindeki etkileri.

Parametre	Cıvata çapı (mm)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
P-5-1	7,50	1,17	77,10	9,80	41,78
P-5-2	7,25	1,17	70,60	9,08	38,34
Nominal (Kalibrasyon analizi)	7,00	1,19	58,10	8,40	38,25
P-5-3	6,75	1,26	54,70	7,43	39,16
P-5-4	6,50	1,32	46,20	7,92	47,30

Cıvata çapının aldığı farklı değerlerin şekillendirme süreci üzerindeki etkileri Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.29 değerlendirildiğinde, cıvata çapının azalan değerleri ile birlikte, çapak oluşumunun daha belirginleştiği dikkati çekmektedir. Nitekim CÇ'nın 6,50 mm değerini alması halinde bu etkinin en belirgin hale geldiği söylenebilir (Şekil 4.29 (d)). Bu durumun aksine CÇ'nın 7,00 mm'nin üstüne çıktığı durumlarda ise çapak oluşum miktarının azaldığı görülmektedir. Nitekim bu durum CÇ'nın 7,50 mm olması durumunda neredeyse hiç oluşmamaktadır (Şekil 4.29 (a)-(b)).



Şekil 4.29 Cıvata çapının cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) kalibrasyon analizi $CC=7$ mm, (b) $CC=7,50$ mm, (c) $CC=7,25$ mm, (d) $CC=6,75$ mm ve (e) $CC=6,50$ mm

Cıvata çapının aldığı farklı değerler ile oluşturulan cıvataların tespit işlemlerinden elde edilen F-X eğrileri Şekil 4.30(a)'da verilmiştir. Söz konusu eğriler incelendiğinde CC 'nin aldığı farklı değerlerin F-X eğrilerinde belirgin değişime neden olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.30(a)). Genel olarak Şekil 4.30(a) cıvata çapının artan değerleri ile birlikte eğrinin daha yüksek kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum birinci ve ikinci bölgede (Şekil 4.3 (a)-(b)) çok daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 4.30(a)). Üçüncü bölgede ise (Şekil 4.3(c)) eğri eğimlerinin bir birleri ile belli oranda paralel seyrettiği söylenebilir. Bunun yanı sıra tespit işlemleri için gerekli olan strok değerleri karşılaştırıldığında CC 'nin nominal değerden ($CC=7,00$ mm) daha büyük değerler alması durumunda şekillendirmenin tamamlandığı strokta belirgin bir değişme görülmemektedir (Çizelge 4.9). Söz konusu parametrenin $7,00$ mm'den daha küçük değerler alması durumunda ise şekillendirmenin tamamlandığı strok değerinde belirgin bir artış görülmektedir. Bu artış CC 'nin $6,50$ mm olduğu durumda (P-5-4) $1,32$ mm'ye kadar yükselmektedir (Çizelge 4.9).

Cıvata çapının almış olduğu farklı değerlerin, aksel sökme kuvveti üzerindeki etkileri Şekil 4.30(b)'de ve farklı CC değerlerinden elde edilen en büyük sökme kuvvet değerleri de Çizelge 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.30(b) incelendiğinde, CC 'nin artan değerleri ile birlikte en büyük aksel sökme kuvveti değerlerinin de artış

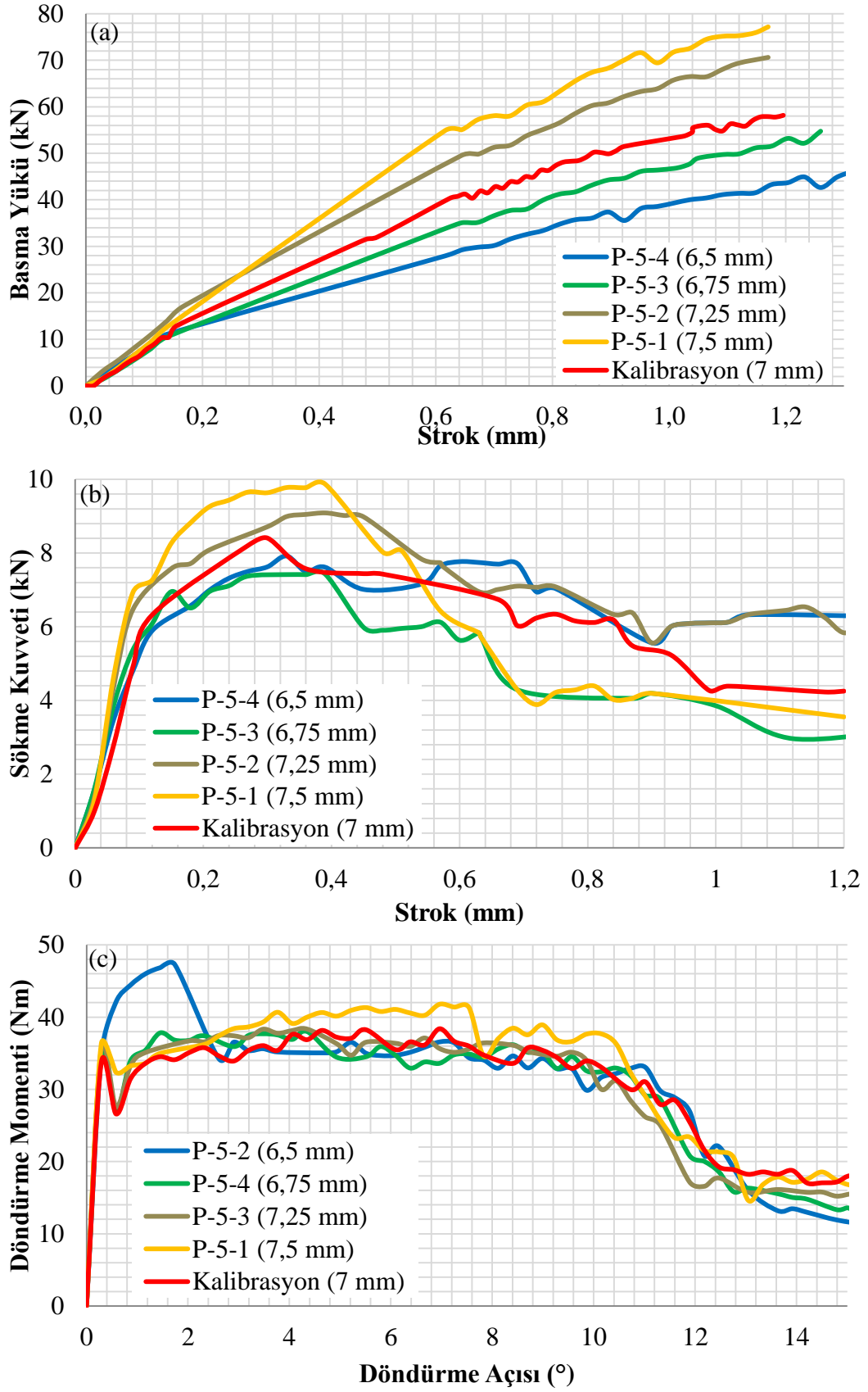
eğilimi sergilediği görülmektedir. Nitekim CÇ'nın 7,50 mm olması durumunda, aksenal sökme kuvvetine karşı ortaya çıkan tepki kuvvet değerinin 9,80 kN mertebelerine ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, söz konusu parametrenin aldığı değerlerin ($F_{sökme}$)-strok (X) davranışı üzerinde belirgin bir karakteristik fark görülmemektedir (Şekil 4.30(b)).

Cıvata çapının aldığı farklı değerlerin aksenal döndürme momenti eğriler üzerindeki etkileri Şekil 4.30(c)'de ve bu eğrilerde görülen en büyük döndürme moment değerleri ise Çizelge 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.30(c) ve Çizelge 4.9 incelendiğinde, farklı CÇ değerlerine sahip cıvataların döndürme momenti altında sergilediği davranışların söz konusu değerlerin 6.50 mm ve 7.50 mm olması durumunda belirgin farklılıklar sergilediği dikkati çekmektedir. Diğer CÇ değerlerinde (6.75 mm, 7,0 mm ve 7,25 mm) ise döndürme momenti altındaki deformasyon davranışlarının benzer nitelikte olduğu görülmektedir. Nitekim CÇ'nın 6.50 mm ve 7.50 mm olması durumunda elde edilen en yüksek döndürme momentleri sırasıyla 41,78 Nm ve 47,30 Nm olduğu görülmektedir (Çizelge 4.9). Diğer CÇ değerlerinden ise elde edilen en yüksek döndürme momentlerinin yaklaşık 38Nm-39Nm aralığında olduğu söylenebilir (Çizelge 4.9) .

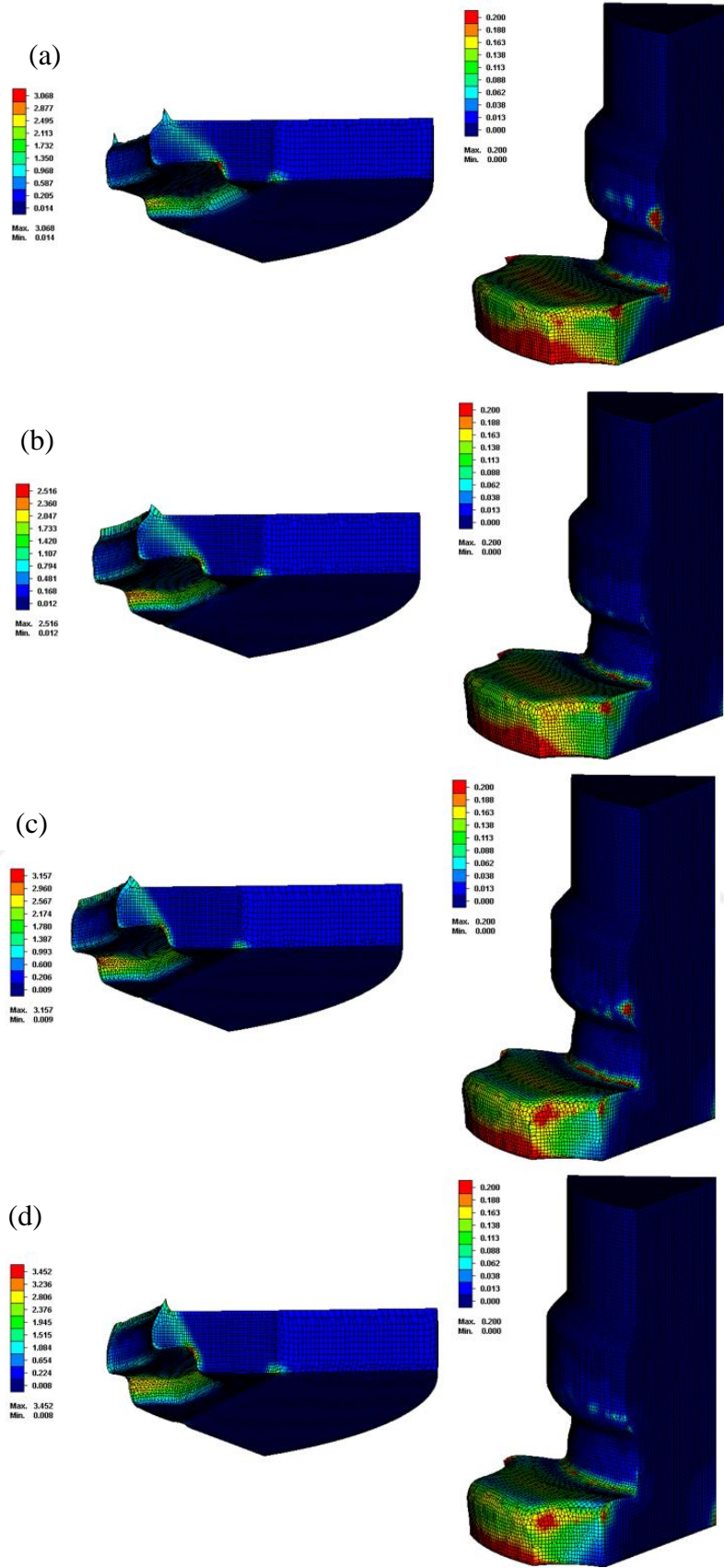
Cıvata çapı (Parametre-5) kapsamında değerlendirilen geometrilerin şekillendirme sonrası alüminyum levha ve cıvatada oluşturduğu gerinim dağılımları Şekil 4.31'de verilmiştir. Şekil 4.31'de incelendiğinde CÇ'nın 7,50 mm olması durumunda alüminyum levhada oluşan çapağın kenar bölgelerde yüksek ve orta kısımlarda neredeyse hiç oluşmadığı görülmektedir (Şekil 4.30(a)). Cıvatanın baş kısmından çapak oluşum bölgesine uzanan gerinim bandının P-5-1 parametresinde (CÇ=7,5 mm) daraldığı görülmektedir (Şekil 4.31(a)). Cıvata çapının 6,50 mm-7,50 mm aralığında değerler alması durumunda alüminyum levhada görülen gerinim değerleri 2,50-3,45 mertebelerinde oluşmaktadır. Cıvata tarafında ise, CÇ değerinin azalması ile cıvata kafasında gerinimden etkilenen bölgenin giderek daraldığı görülmektedir. Ancak bu bölge içerisinde etkili olan en yüksek gerinim değerinin CÇ'nın aldığı farklı değerlerde önemli bir değişim sergilemediği anlaşılmaktadır. (Şekil 4.30 (a)-(d)).

Şekil 4.32’de CÇ’deki değişimin cıvata ve alüminyum levhada oluşturduğu gerilme dağılımı üzerindeki etkileri görölmektedir. Alüminyum levhada meydana gelen maksimum gerilme bölgeleri lokal plastik şekil verme nedeniyle, malzemenin çekme dayanımına yakın mertebelere ulaşmaktadır. Şekillendirme sırasında cıvatanın baş kısmının dış kenarlarında ortaya çıkan kütleşme ve cıvata başının eğilmesi ile bağlantılı olarak gerinim ve gerilme değerleri de bu bölgelerde yoğunlaştığı söylenebilir. Şekil 4.32’den de anlaşılacağı gibi cıvatada ortaya çıkan en yüksek gerilme değeri cıvata şaftı ile cıvata başının kesiştiği kenar bölgede görölmektedir. Bu bölgede ortaya çıkan gerilme dağılım değerleri tüm CÇ değeri için 700 MPa mertebelerine ulaşmaktadır (Şekil 4.32 (a)-(d)).

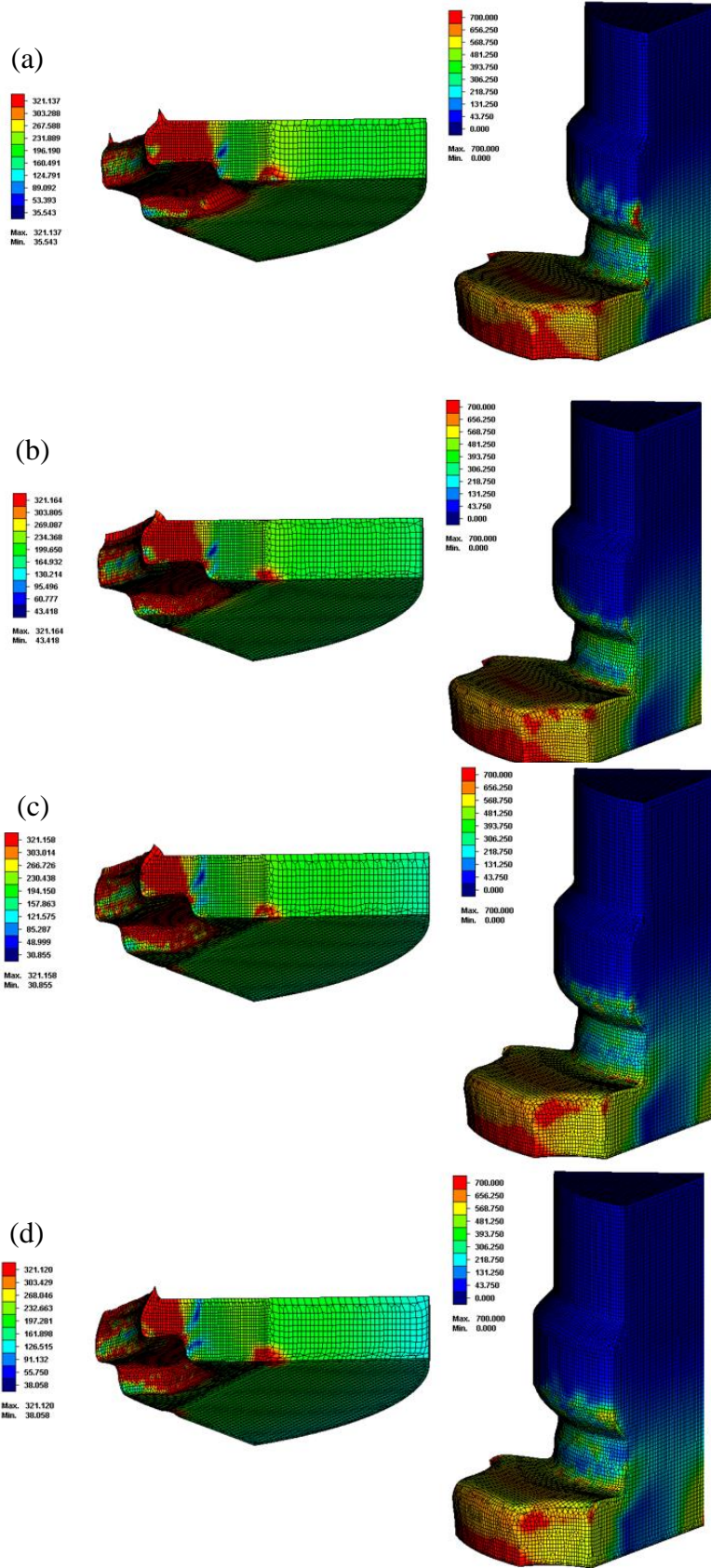




Şekil 4.30 Cıvata çapının değişimine ait (a) basma kuvveti-strok, (b) eksenel sökme kuvveti-strok, (c) eksenel döndürme momenti-açı grafikleri



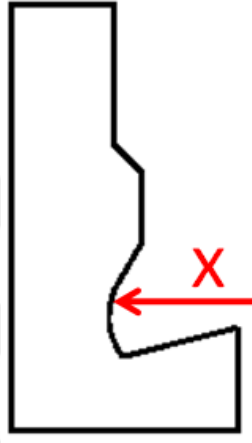
Şekil 4.31 Cıvata çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvata da meydana getirdiği gerinim dağılımı: (a) $C\check{C}=7,5$ mm, (b) $C\check{C}=7,25$ mm, (c) $C\check{C}=6,75$ mm ve (d) $C\check{C}=6,50$ mm



Şekil 4.32 Cıvata çapı değişiminin alüminyum levha ve cıvata da meydana getirdiği gerilme dağılımı: (a) $C\check{C}=7,5$ mm, (b) $C\check{C}=7,25$ mm, (c) $C\check{C}=6,75$ mm ve (d) $C\check{C}=6,50$ mm (Gerilme birimi: MPa)

4.1.4.6. Yığıma bölgesi geometrisi (parametre-6) etkisi

Cıvata tespit işlemleri esnasında alüminyum levhanın cıvata boşluğunu doldurduğu geometri “Yığıma bölgesi geometrisi (YBG)” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.33). Söz konusu parametre prototip cıvatada iç bükey bir geometriye sahiptir. Bu geometrinin dış bükey olması durumunun şekillendirme ve şekillendirme sonrası süreçlere etkisi parametre-6 kapsamında değerlendirilmiştir.

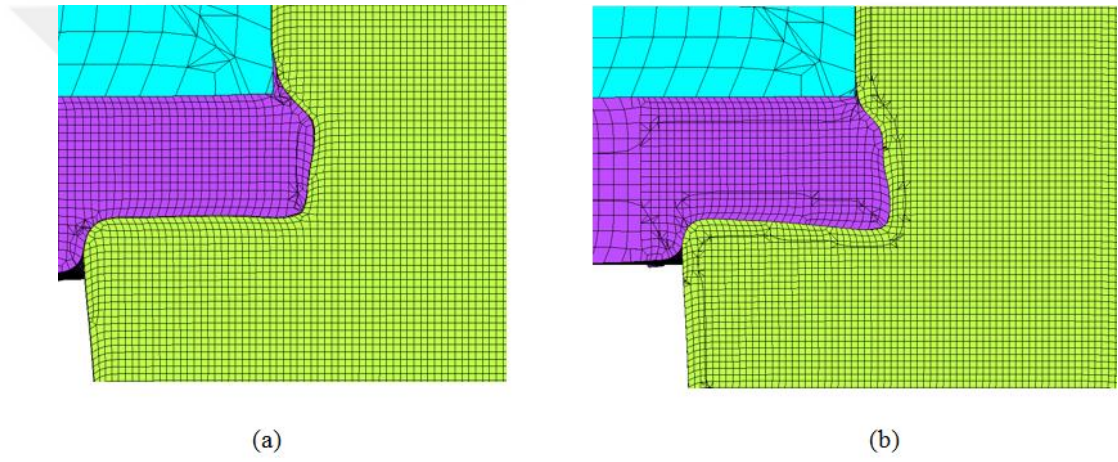


Şekil 4.33 Yığıma bölgesi geometrisi

Yığıma bölgesi geometrisinin iç bükeyden dış bükeye dönüştürülmesi durumunda, iki önemli etkinin meydana geldiği söylenebilir. Bunlardan ilki, YBG'nin dış bükey olması durumunda şekillendirme sırasında ortaya çıkan çapak oluşumunun söz konusu geometrinin iç bükey olmasına kıyasla belirgin olarak azalmasıdır (Şekil 4.34(b)). İkincisi ise YBG'nin iç bükeyden dış bükeye dönüştürülmesi durumunda cıvatada oluşan deformasyon davranışının belirgin olarak değişmesidir. Bu durum Şekil 4.34'den açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Söz konusu şekil incelendiğinde, YBG'nin dış bükey olarak tasarlanması halinde, cıvatanın kafa kısmında meydana gelen ezilmenin azaldığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.10 Yığma bölgesi geometrisinin (Parametre-6) aldığı farklı değerlerin strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), aksel sökme kuvveti ve aksel döndürme momenti üzerindeki etkileri

Parametre	YBG (Şekil)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
Nominal (Kalibrasyon analizi)	İç Bükey	1,19	58,10	8,40	38,25
P-6	Dış Bükey	0,92	51,50	8,45	40,62



Şekil 4.34 Yığma bölgesi geometrisinin cıvata tespit işlemindeki malzeme akışı üzerindeki etkileri: (a) kalibrasyon analizi YBG= İç Bükey, (b) YBG=Dış Bükey

Yığma bölgesi geometrisinin dış bükey olmasıyla oluşturulan cıvatanın, alüminyum levhaya tespit işlemi esnasında elde edilen F-X eğrisi Şekil 4.35(a)'da verilmiştir. Bu eğriden elde edilen en büyük şekillendirme kuvvet değeri ve alüminyum levhanın cıvata boşluğunu doldurmuş olduğu strok değeri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Yığma bölgesi geometrisinin dış bükey olması ile birlikte şekillendirmenin tamamlandığı strok değerinin büyük oranda azaldığı görülmektedir (Şekil 4.35(a)). Bunun yanı sıra alüminyum levhanın cıvata boşluğunu doldurması için gerekli olan kuvvet değerinin 58,10 kN'dan 51,50 kN'a düştüğü anlaşılmaktadır (Şekil 4.35(a)). Ayrıca söz konusu parametrenin eğri karakteristiğinde belirgin bir fark olmadığı görülmektedir. Nitekim bu iki eğri arasındaki az da olsa görülen farkın, alüminyum levhanın cıvata boşluğuna yığılmaya başladığı üçüncü bölgede (Şekil 4.3(c)) olduğu Şekil 4.35(a)'dan anlaşılmaktadır.

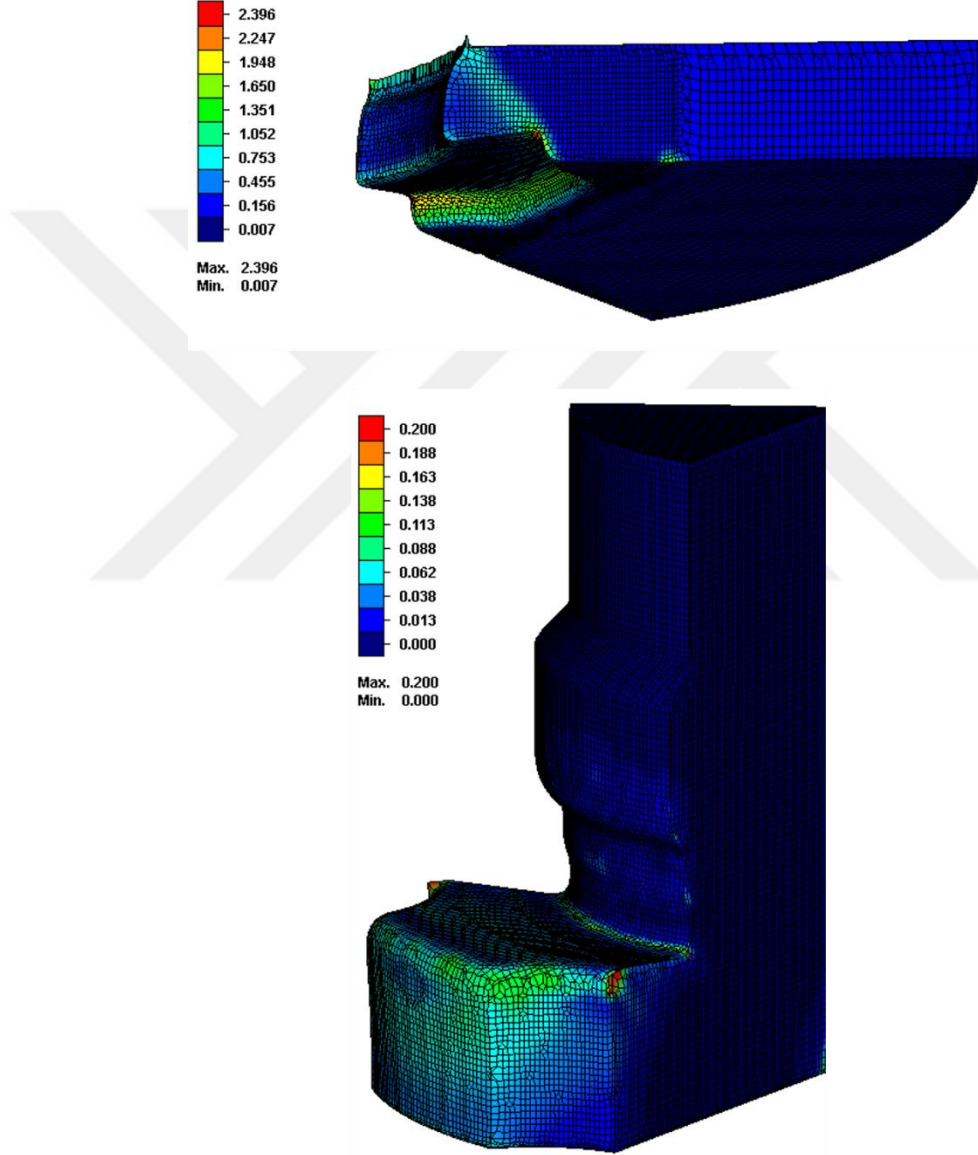
Yığıma bölgesi geometrisinin iç bükey olması durumunda civatanın tespit işlemleri sonrasındaki aksenal sökme kuvvetine karşı göstermiş olduğu tepki Şekil 4.35(b)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en yüksek tepki kuvveti Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, elde edilen aksenal sökme kuvvetlerinde belirgin bir fark görülmemektedir (Çizelge 4.10). Bununla birlikte, bu parametrenin ($F_{\text{sökme}}$)-Strok (X) eğrisi üzerindeki en belirgin etkisi; en yüksek sökme kuvvetine kadar oluşan eğri eğiminin YBG'nin iç bükey olmasıyla birlikte artış göstermiş olmasıdır (Şekil 4.35(b)).

Yığıma bölgesi geometrisinin dış bükey olması ile birlikte elde edilen aksenal sökme momentine karşı ortaya çıkan tepki momenti değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Elde edilen tepki değerlerinin döndürme açısına bağlı olarak değişimi Şekil 4.35(c) görülmektedir. Şekil 4.35(c) ve Çizelge 4.10 incelendiğinde YBG'nin değişimi ile elde edilen moment değerleri 38,25 Nm'den 40,62 Nm'e çıktığı görülmektedir (Çizelge 4.10). Yığıma bölgesi geometrisinin dış bükey olması durumunununki moment-açı değişimi değerlendirildiğinde, özellikle 0° - 4° aralığında belirgin bir karakteristik fark meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.35(c)). Nitekim YBG'nin dış bükey olması durumunda 4° 'lik döndürme açısına kadar elde edilen momentin önemli değişim sergilemeyerek, bir plato davranışı gösterdiği Şekil 4.35(c)'den anlaşılmaktadır.

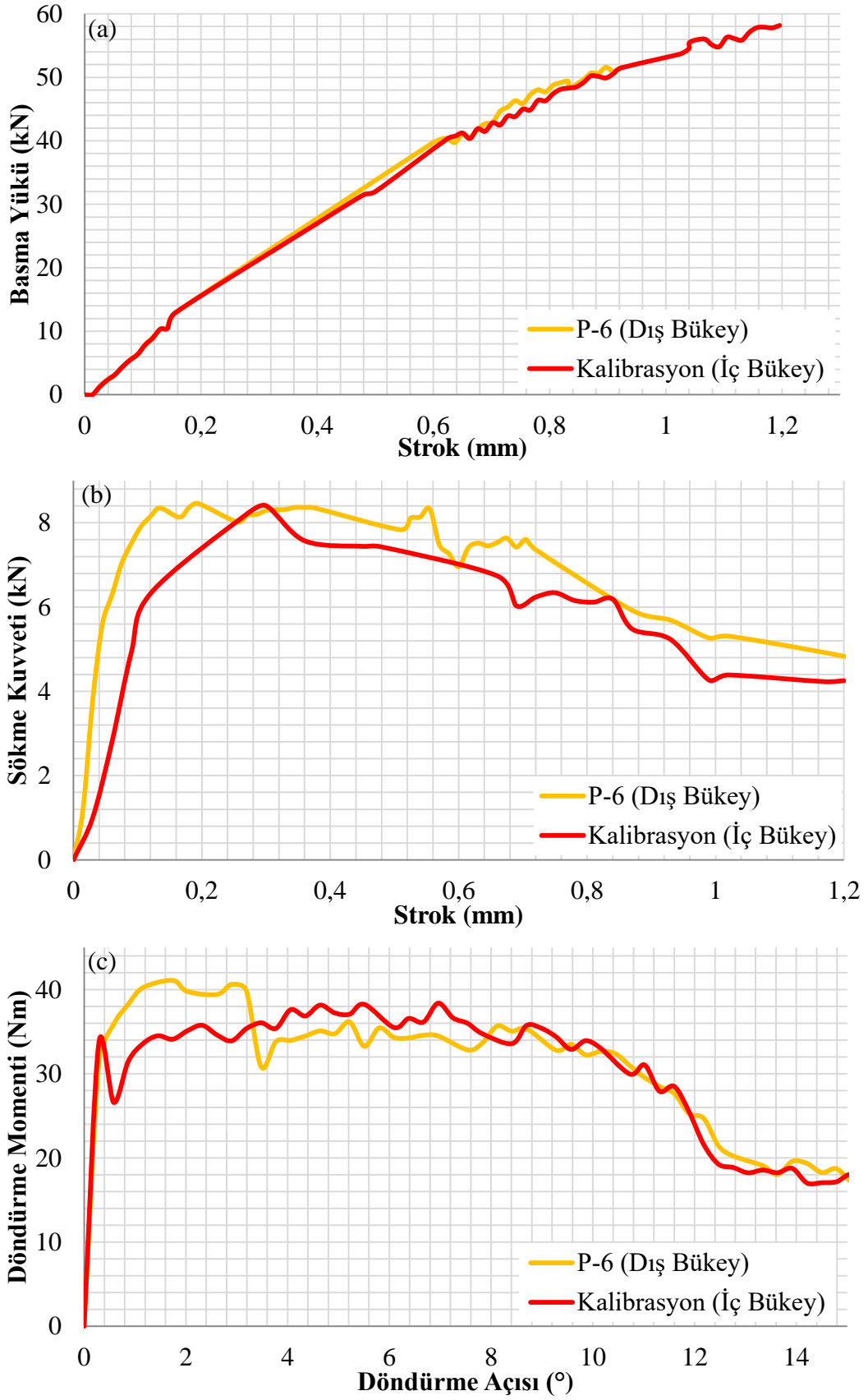
Şekil 4.36'da YBG'nin dış bükey olması durumunda şekillendirme sonrası alüminyum levha ve civatada meydana gelen gerinim dağılımları görülmektedir. Alüminyum levhanın civata boşluğunu doldurduğu anda meydana gelen gerinim değerinin 2,39 mertebelerine çıktığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.36). YBG'nin iç bükey geometriye sahip olması durumuna civatanın kafa kısmının dış kenarında meydana gelen gerinim yığılmasının olduğu bölgenin daraldığı görülmektedir (Şekil 4.36).

Şekil 4.37'de YBG'nin dış bükey olması durumunda şekillendirme sonrası alüminyum levha ve civatada meydana gelen gerilme dağılımları görülmektedir. Alüminyum levhada maksimum gerilme bölgeleri YBG'nin iç bükey veya dış bükey olmasından belirgin oranda etkilenmediği görülmektedir (Şekil 4.37). Nitekim her iki durumda da malzemenin çekme dayanımına yakın mertebelerdeki gerilme

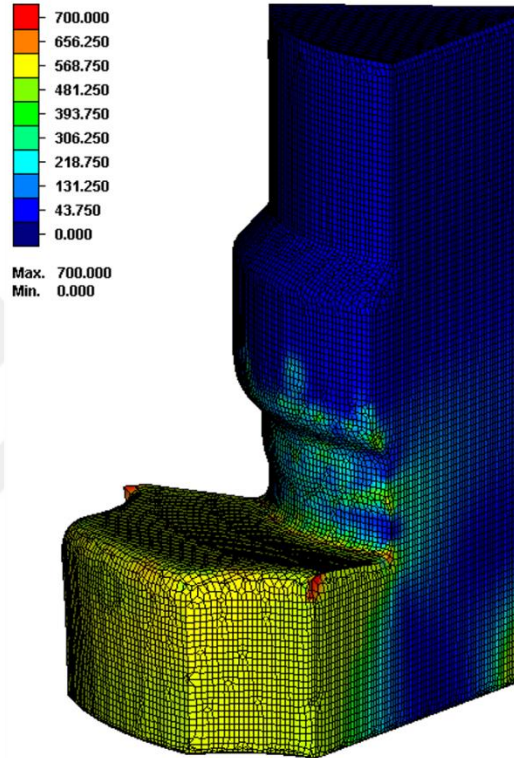
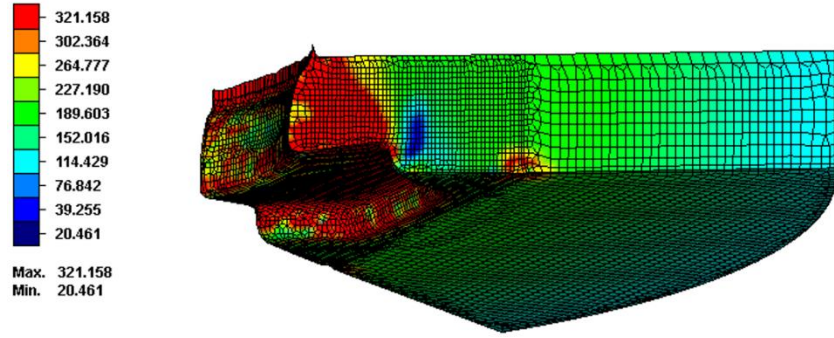
değerlerine ulaştığı söylenebilir (Şekil 4.37). Ancak cıvatada meydana gelen gerilme dağılımında belli farklar ortaya çıktığı da anlaşılmaktadır. Şekil 4.37 incelendiğinde YBG'nin dış bükey geometriye sahip olması durumunda cıvata kafasında meydana gelen gerilme değerlerinin azaldığı söylenebilir (Şekil 4.37(b)). Nitekim söz konusu gerilme değerleri iç bükey geometride 700 MPa (Şekil 4.7) iken, dış bükey geometri olması durumunda 560 MPa değerine düşmektedir (Şekil 4.37).



Şekil 4.36 Yıgma bölgesi geometrisine ait cıvata ve alüminyum levhada meydana gelen gerilim dağılımı



Şekil 4.35 Yığma bölgesi geometrisinin değişime ait (a) basma kuvveti-strok (b) eksenel sökme kuvveti-strok (c) Eksenel döndürme momenti – açı grafikleri



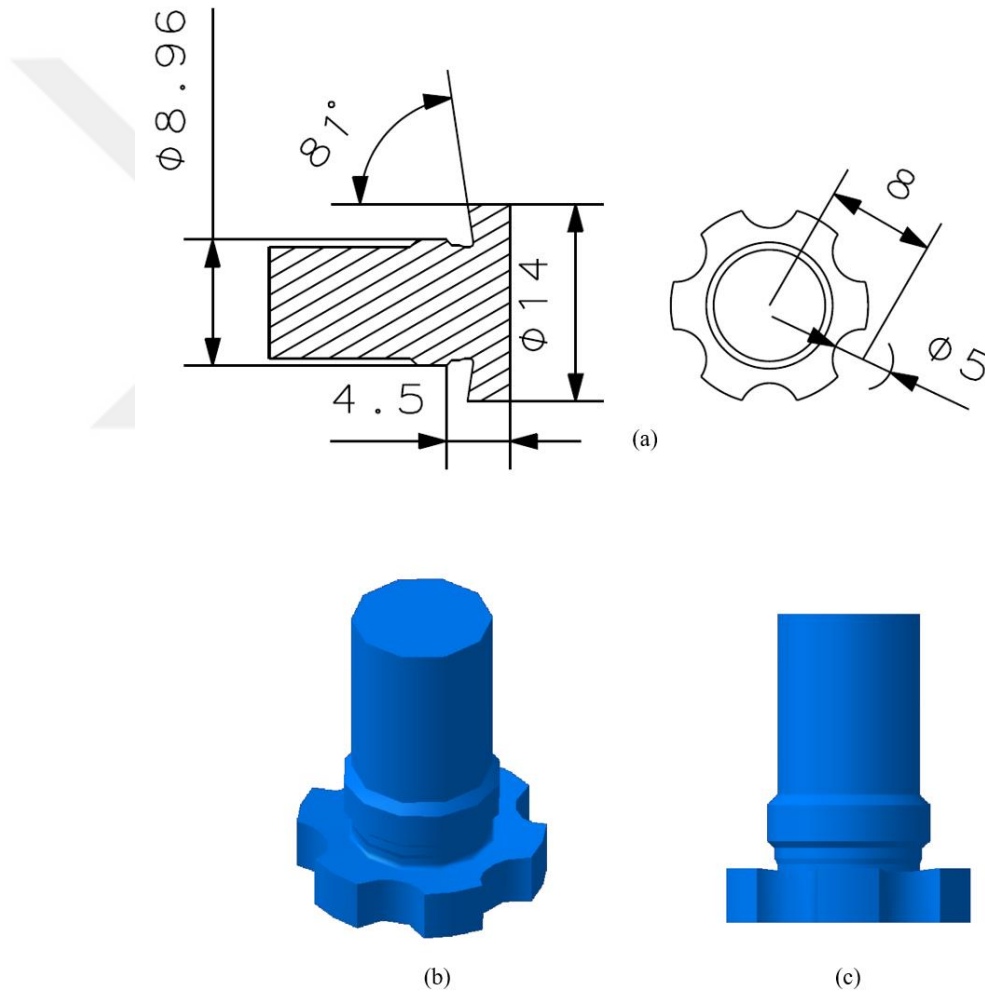
Şekil 4.37 Yığıma bölgesi geometrisine ait civata ve alüminyum levhada meydana gelen gerime dağılımı (Gerilme birimi: MPa)

4.1.5. Geometrik sonuçların deneysel değerlendirilmesi (optimize parametre)

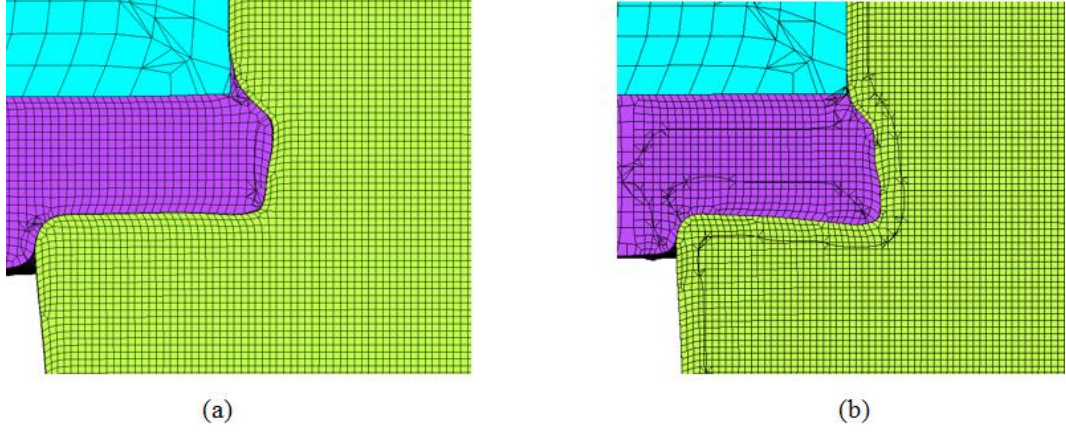
Benzetim çalışmalarından civata geometrisinin ihtiva ettiği temel ölçülerin civata tespit işlemi esnasında ve sonrasındaki mekanik davranışlar üzerindeki etkileri değerlendirilerek, hem yüksek mekanik test performansının elde edildiği hem de tespit işlemleri için gereken şekillendirme kuvveti ve şekillendirme stroğu değerlerinin en düşük mertebelerde kaldığı parametre seti belirlendi. Bu parametre seti tez amaçları da göz önünde bulundurularak optimize parametre (OP) seti olarak

değerlendirildi. Yukarıda ifade edilen bakış açısına göre oluşturulan OP geometrisine ait CAD modeli ve bu modelin teknik resimleri Şekil 4.38’de verilmiştir.

Geliştirilen OP’nin tespit işlemleri üzerinde önemli iyileştirmelerin elde edilmesini sağladığı söylenebilir. Bu kapsamda, OP’ye göre boyutlandırılan cıvata modelinin tespit işlemleri sırasında son derece düşük miktarlarda çapak oluşumuna neden olduğu Şekil 4.39’dan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, OP’ye sahip cıvata geometrisinin şekillendirme sırasında maruz kaldığı deformasyonun da belirgin şekilde azaltıldığı dikkat çekicidir (Şekil 4.39).



Şekil 4.38 Optimize parametreye ait: (a) teknik resim, (b) 3 boyutlu isometrik görünüş, (c) 3 boyutlu ön görünüş



Şekil 4.39 Optimize (a) ve kalibrasyon (b) geometrilerine ait dolum profilleri

Çizelge 4.11 Optimize geometri ve kalibrasyon geometrisine ait strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), aksenal sökme yükü ve aksenal döndürme moment değerleri.

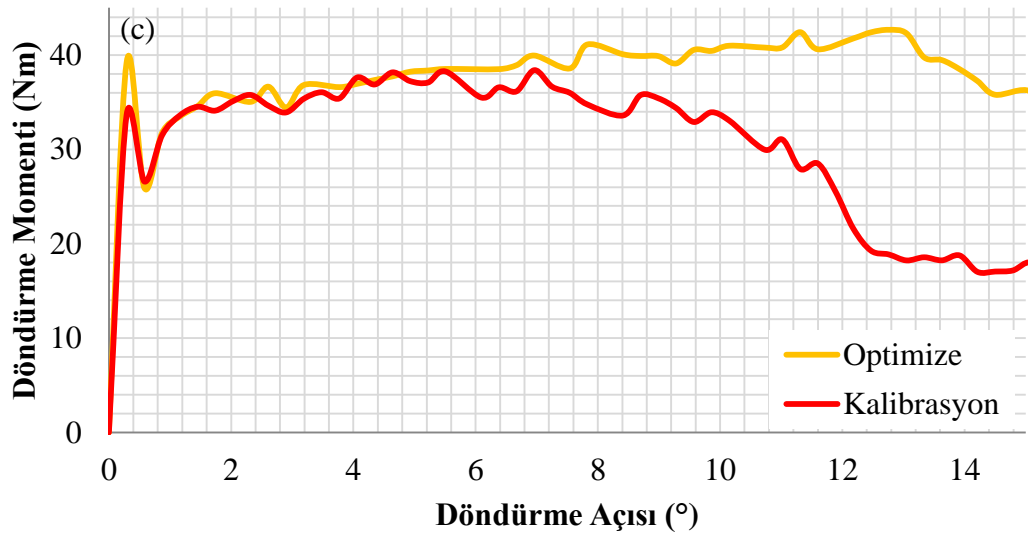
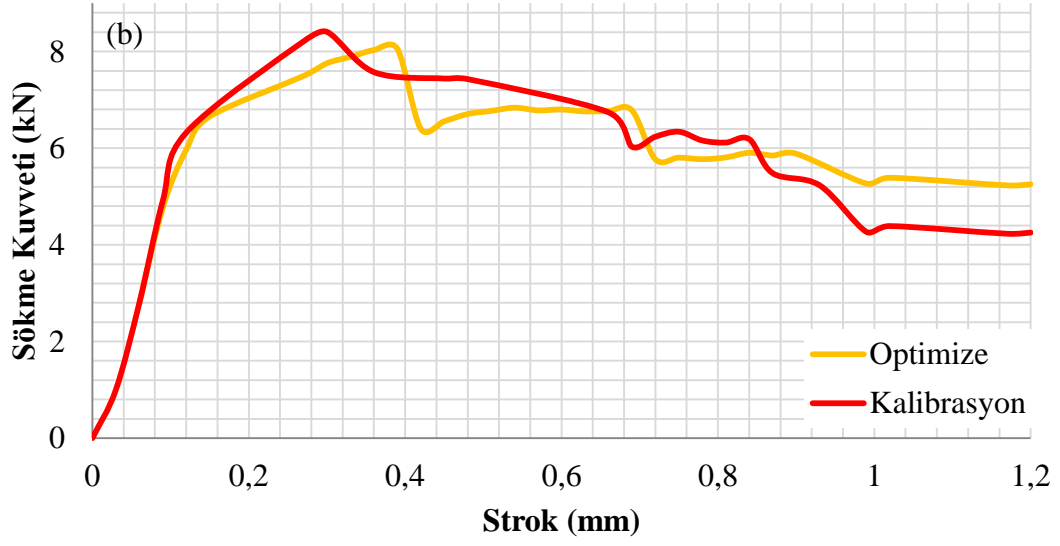
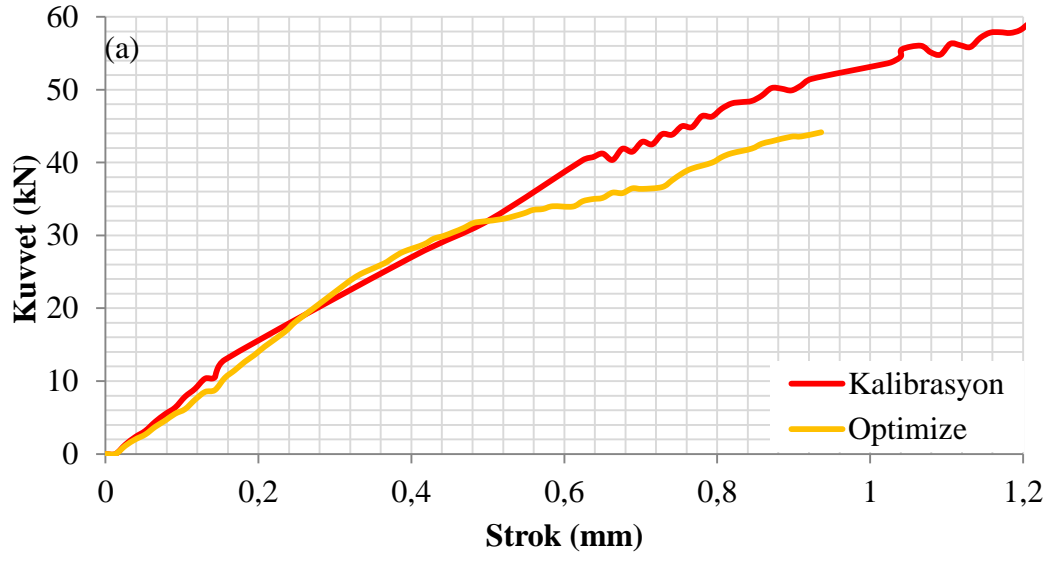
Parametre	YBG (Şekil) MÇ (mm)	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)	Döndürme momenti (Nm)
Nominal (Kalibrasyon analizi)	İç Bükey 6,00 mm	1,19	58,10	8,40	38,25
Optimize	Dış Bükey 5,50 mm	0,93	44,10	8,05	42,66

Optimize parametreye ait civatanın tespit işlemi esnasında elde edilen F-X eğrisi Şekil 4.40(a) gösterilmiştir. Bu eğriden elde edilen strok ve şekillendirme kuvvetleri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Söz konusu veriler incelendiğinde OP geometrisine sahip modelin daha düşük strok ve kuvvet değerleri ile civata boşluğunu doldurabildiği dikkati çekmektedir. Nitekim kalibrasyon geometrisine sahip civata modeli için gerekli olan şekillendirme kuvveti 58,10 kN iken bu değer, OP durumunda 44,10 kN’a kadar azalmaktadır (Çizelge 4.11). Benzer şekilde kalibrasyon geometrisine sahip civatanın tespiti için gerekli strok değeri 1,19 mm iken bu değer OP durumunda 0,93mm’e kadar azalmaktadır (Çizelge 4.11). Optimumum parametre setine sahip olan civatanın şekillendirme sürecinde sergilediği kuvvet-strok eğrileri karakteristiğinin diğer civata modelleri ile benzer nitelikte olduğu söylenebilir (Şekil 4.40(a)). Ancak elde edilen F-X eğri karakteristiğinin üçüncü bölgede (Şekil 4.3(c),(0,5 mm strok değerinden itibaren) eğri eğiminin bir miktar azaldığı görülmektedir (Şekil 4.40(a)).

Optimize parametreye ait cıvatanın aksenal sökme kuvvetine karşı göstermiş olduğu tepki Şekil 4.40(b)'de verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en yüksek tepki değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir. Elde edilen sökme kuvvet değerleri incelendiğinde OP geometrisine göre tespit edilen cıvatanın göstermiş olduğu tepkinin 8,05 kN olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.40(b) verilen ($F_{sökme}$)-strok (X) eğrileri incelendiğinde belirgin bir karakteristik fark görülmemektedir.

Optimize parametre kapsamında değerlendirilen cıvatanın aksenal sökme momenti üzerindeki etkisi Şekil 4.40(c)'de verilmiştir. Bu eğriden elde edilen en büyük sökme moment değerleri ise Çizelge 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.40(c) ve Çizelge 4.11 incelendiğinde, OP'ye ait cıvatadan elde edilen aksenal döndürme moment değerinin 42,26 Nm değerine ulaşarak, diğer cıvata modellerine kıyasla çok daha yüksek bir performans sergilemektedir. Bununla beraber, elde edilen bu yüksek sökme momenti direnci 13° gibi geniş bir döndürme açısında elde edilmektedir. Bu durum, optimize parametre setine sahip cıvatanın aksenal döndürme momentleri altında sklebilmesi için gerekli olan enerji değerinden diğer modellerden daha üstün olduğunu göstermektedir.

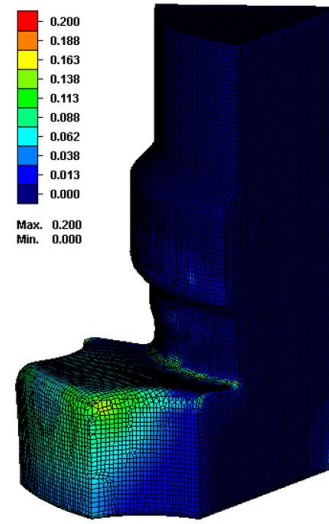
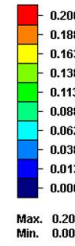
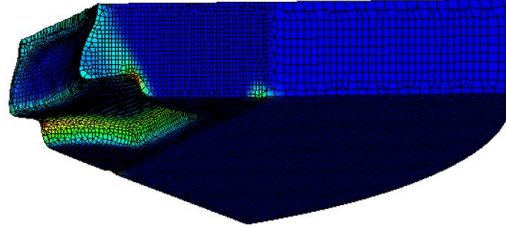
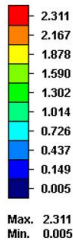
Optimize parametre geometrisine sahip cıvatanın tespit işlemi sonrası alüminyum levha ve cıvatada meydana getirdiği gerinim dağılımı Şekil 4.41(a)'da verilmiştir. Cıvatanın alüminyum levhayı deforme etmeye başladığı yüzeyden, apak oluşum bölgesine uzanan gerinim bandının, yığma bölgesine doğru ilerlediği görülmektedir (Şekil 4.41(a)). Alüminyum levhada görülen en büyük gerinim değerinin cıvatanın moment çapına karşılık gelen bölgelerinde ortaya çıktığı söylenebilir (Şekil 4.41(a)). Cıvatanın bu bölgesinde görülen gerinim değeri 2,31 mertebelerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.41(a)). Cıvatanın baş kısmının dış kısmında görülen gerinim dağılım alanının dar bir alanda oluştuğu Şekil 4.41(a)'dan anlaşılmaktadır. Al-levha ve cıvatada ortaya çıkan gerinim dağılımları genel olarak değerlendirildiğinde, optimum parametre setine sahip olan cıvata modelinin daha düşük deformasyon ile tespit edilebildiği anlaşılmaktadır. Bu sonuç, tespit işlemlerinde ihtiyaç duyulan şekillendirme stroğu ve şekillendirme kuvveti değerlerindeki azalış ile de uyumludur.



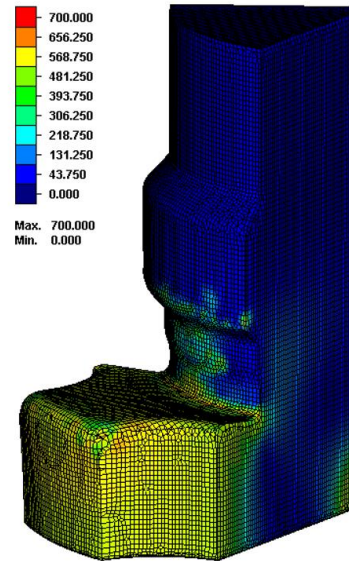
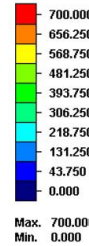
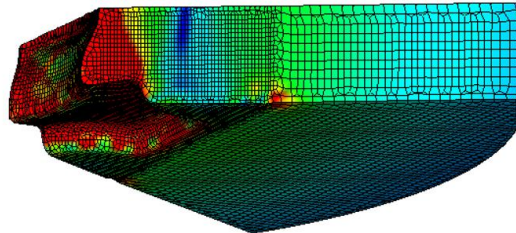
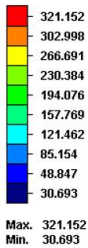
Şekil 4.40 Optimize ve kalibrasyon geometrilerine ait: (a) basma-strok eğrisi, (b) eksenel sökme-strok eğrisi, (c) eksenel döndürme moment-açı eğrileri

Şekil 4.41(b)'de OP geometrisine sahip cıvata da şekillendirme sonrası meydana gelen gerilme dağılımı verilmiştir. Şekil 4.41(b) incelendiğinde alüminyum levhada meydana gelen maksimum gerilme bölgeleri, lokal plastik şekil verme nedeniyle, malzemenin çekme dayanımına yakın mertebelere ulaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca alüminyum levhanın çekme dayanım noktasına ulaştığı alanın cıvata boşluğuna yığılan kısım ile sınırlı kaldığı belirgin olarak görülmektedir (Şekil 4.41(b)). Şekillendirme sırasında cıvatanın baş kısmının dış kenarında ortaya çıkan kütleşme ve cıvata başının eğilmesi ile bağlantılı olarak gerinim ve gerilme değerlerinin de bu bölgelerde yoğunlaştığı söylenebilir (Şekil 4.41 (a)-(b)).

(a)



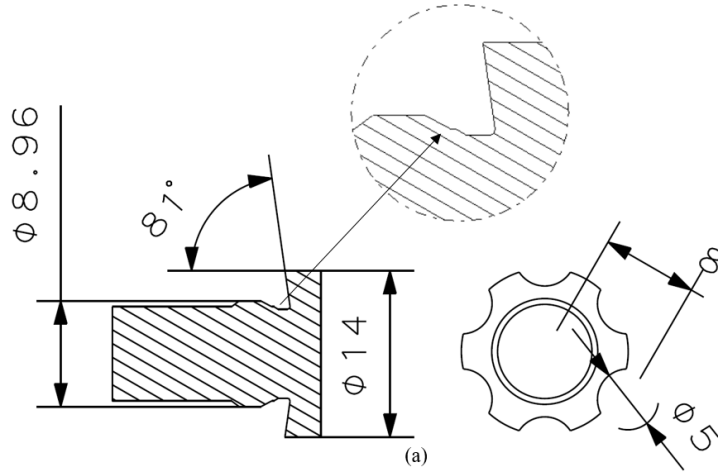
(b)



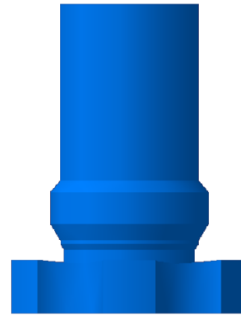
Şekil 4.41 Optimize geometriye ait cıvatanın alüminyum levhaya tespit edilmesi sonucu elde edilen alüminyum levha ve cıvata da ortaya çıkan (a) gerinim dağılımı, (b) gerilim dağılımı. (Gerilme birimi: MPa)

4.1.6. Optimize parametrenin imalatı ve deneysel sonuçları

Geliştirilen optimize parametrelere sahip cıvata modelinin benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçların fiziksel sonuçlar ile ne ölçüde örtüştüğünün anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu değerlendirmenin yapılabilmesi için OP boyutlarına sahip cıvatalar fiziksel olarak, talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak, üretildi. Ancak, talaşlı imalat kapsamında elde edilmesi zor olan geometrik detayların kolay ve pratik şekilde elde edilebilmesi için bazı boyutsal değişiklikler de uygulandı. Bu durum özellikle çalışılan geometrinin çok dar bir boyut aralığında üretilmek zorunda olması ve bu aralıkta fiziksel olarak gerçekleştirilebilir takım hareketlerinin de sınırı olmasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu boyutsal değişiklikler sonrasında elde edilen cıvata geometrisine ait CAD modeli ve bu modele ait teknik resim Şekil 4.42(a)'da verilmiştir. Üretilebilirlik kapsamında revize edilen bu geometri “Optimize parametre revizyonu (OR)” olarak adlandırıldı.



(b)



(c)

Şekil 4.42 Optimize parametre revizyonu sonrasında elde edilen cıvataya ait: (a) teknik resim, (b)-(c) CAD modeli

Çizelge 4.12 Optimize geometrinin deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen strok, şekillendirme kuvveti (basma yükü), aksenal sökme kuvveti ve aksenal döndürme moment değerleri.

	Strok (mm)	Basma yükü (kN)	Sökme yükü (kN)
Benzetim	1,19	39,50	7,66
Deneysel	1,20	39,52	6,33

Şekil 4.42(a)'da verilen teknik resme göre üretilmiş olan OR cıvatanın, deneysel ve analiz benzetim çalışmaları kapsamında ortaya çıkan F-X grafikleri Şekil 4.43(a)'da verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen en yüksek şekillendirme kuvveti ve stroğu Çizelge 4.12'de verilmiştir. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.43(a) incelendiğinde OR geometrisine ait cıvatanın alüminyum levhaya tespiti kapsamında meydana gelen şekillendirme sürecinin benzetiminin yüksek bir yakınsama ile birlikte elde edilebildiği açıkça görülmektedir. Nitekim, Şekil 4.43(a)'da verilen eğri karakteristikleri incelendiğinde deneysel çalışmadan ve analiz sonucundan elde edilen F-X eğrilerinin hem nicel hem de nitel özellikler açısından büyük benzerlikler sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalardan elde edilen 39,52 kN'luk şekillendirme kuvvetiyle 1,20 mm'lik şekillendirme stroğu, benzetim çalışmalarında 39,50 kN kuvveti ve 1,19 mm olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.12). Bu durumda, oluşturulan benzetim modelini prosese ait özellikleri yüksek yakınsama ile temsil ettiği net bir şekilde görülmektedir (Çizelge 4.12). Bu durum, fiziksel ve benzetim çalışmaları kapsamında elde edilen cıvata-alüminyum levha çiftine ait dolun profillerinden de görülmektedir (Şekil 4.44(a)). Nitekim Şekil 4.44(a)'dan da anlaşılacağı gibi şekillendirme esnasında cıvatanın kafa kısmında ortaya çıkan eğilme deformasyonu hem deneysel hem de benzetim çalışmalarında belirgin olarak görülmektedir (Şekil 4.44(a)). Bunun yanında şekillendirme sürecinde ortaya çıkan çapak oluşum profillerinin şekilsel özelliklerini önemli oranda benzer nitelikte olduğu da görülmektedir (Şekil 4.44(b)).

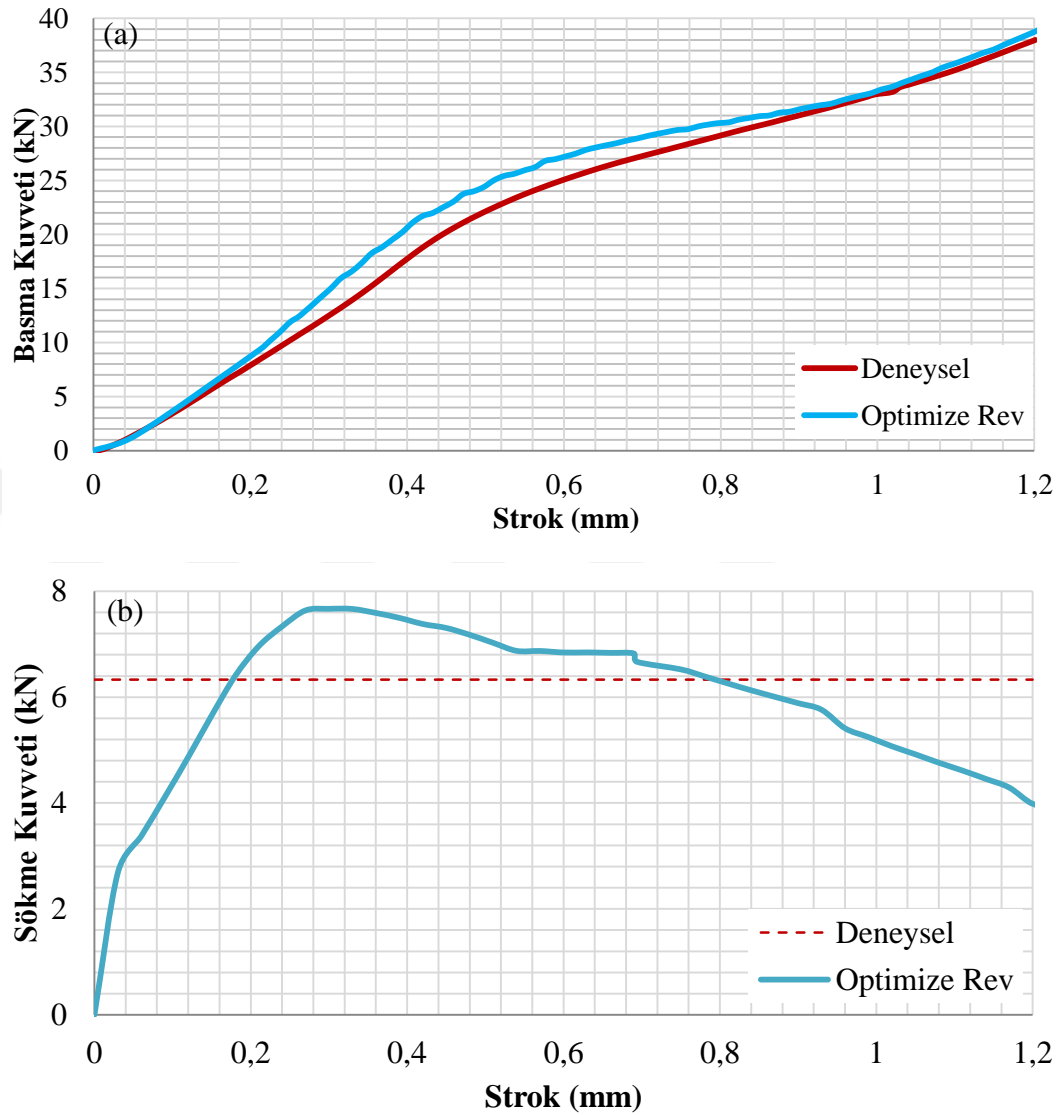
Alüminyum levha ve OR geometrisine ait cıvata çiftinin şekillendirme sonrası aksenal sökme kuvvetine karşı sergiledikleri tepki kuvvetlerinin deneysel ve benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçları Şekil 4.43(b)'de karşılaştırmıştır. Şekil 4.43(b)'de verilen eğriden ve deneysel olarak elde edilen en büyük aksenal

sökme kuvvetleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, deneysel ile benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar sırasıyla 6,3 kN ile 7,6 kN olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.12). Cıvatanın eksenel sökme deneyi kapsamındaki benzetim ve deneysel çalışmaların sonucundaki görünüşleri Şekil 4.45’de verilmiştir. Eksenel sökme deneyi sonrası alüminyum levhanın sökme kuvvetleri altında eğilmesi ile ortaya çıkan şekil değişimi, hem deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda, hem de benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlarda benzerlikler sergilemektedir (Şekil 4.45(a)). Bunun yanı sıra cıvatanın alüminyum levhaya tespiti esnasında oluşan çapağın, eksenel sökme deneyi sonucunda yığma bölgesi çapına doğru gömülmesi durumu analiz sonucunda da görülmektedir (Şekil 4.45(a)). Benzer şekilde cıvata geometrisinde bulunan moment çapının, alüminyum levhada oluşturmuş olduğu deformasyon, eksenel sökme deneyi sonrasında hem benzetim çalışmalarında hem de deneysel sonuçlarda belirgin olarak görülmektedir (Şekil 4.45(b)).

Tespit işlemleri sonrasında alüminyum levha ve cıvata üzerinde oluşan gerinim dağılımları Şekil 4.46(a)’da verilmiştir. Alüminyum levha üzerinde meydana gelen gerinim, yığma bölgesinde yaygın şekilde oluştuğu dikkati çekmektedir. Alüminyum levhanın cıvata boşluğunu doldurduğu anda meydana gelen gerinim değerinin 2,91 mertebelerine çıktığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.46(a)). Cıvatanın kafa kısmının dış kenarında meydana gelen gerinim yığılmalarının ise dar bir bölgede oluştuğu dikkati çekmektedir.

Şekil 4.46(b)’de OR geometrisine göre üretilen cıvatanın tespit işlemi sırasında alüminyum levha ve cıvatada meydana gelen gerilme dağılımlarının incelenen diğer modeller ile benzer özellikler sergilediği söylenebilir. Nitekim alüminyum levhada oluşan gerilmeler daha çok yığma bölgesinde meydana gelmekte ve çekme dayanımına yakın mertebelere ulaşmaktadır. Cıvatada ise, cıvata kafasının dış kenarlarında ortaya çıkan kütleşme ve cıvata kafasının eğilmesi ile bağlantılı olarak gerinim ve gerilme değerleri de bu bölgelerde yoğunlaştığı söylenebilir. Ancak, alüminyum levhada yığma bölgesi çapında uzaklaştıkça ortaya çıkan gerilme değerlerinin ani bir şekilde azalma gösterdiği görülmüştür (Şekil 4.46(b)). Cıvatada meydana gelen gerilme dağılım değerleri incelendiğinde, ortaya çıkan maksimum gerilme değerinin 560 MPa mertebelerinde olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.46(b)).

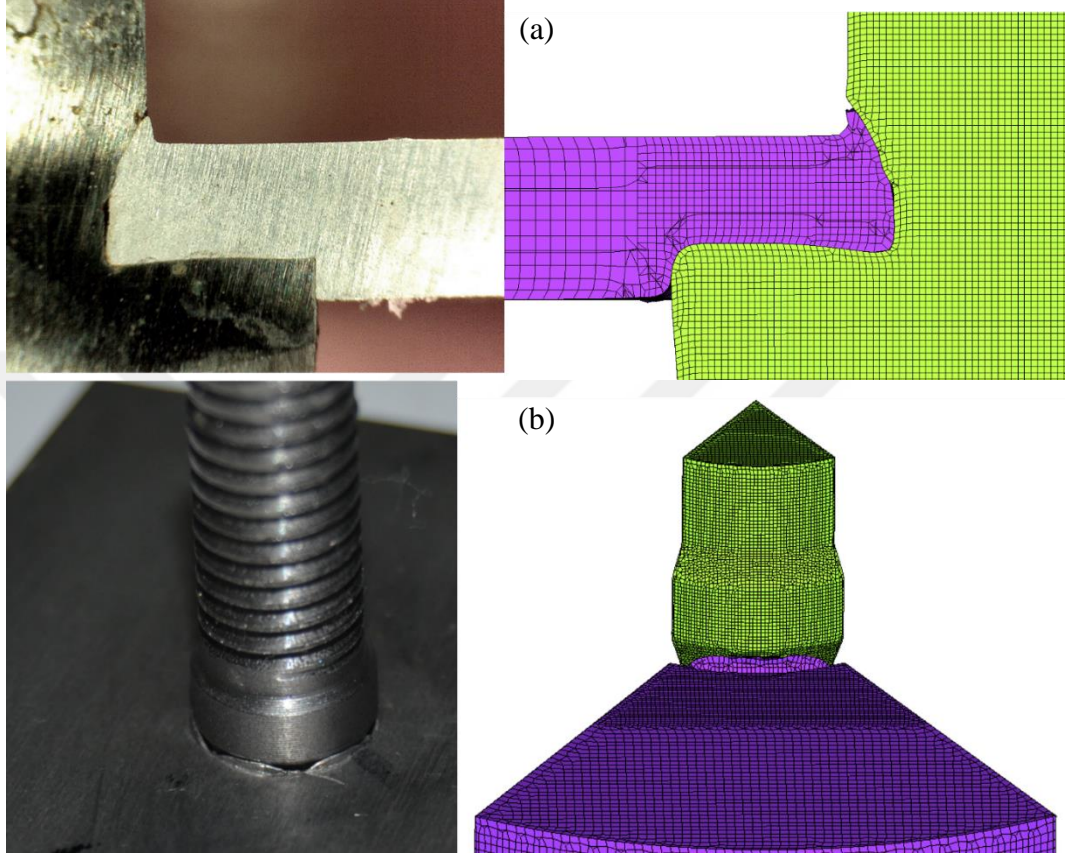
Bu deęer dięer cıvata modelleri ile kıyasla daha dūřuk mertebelerde olduęu sūylenbilir.



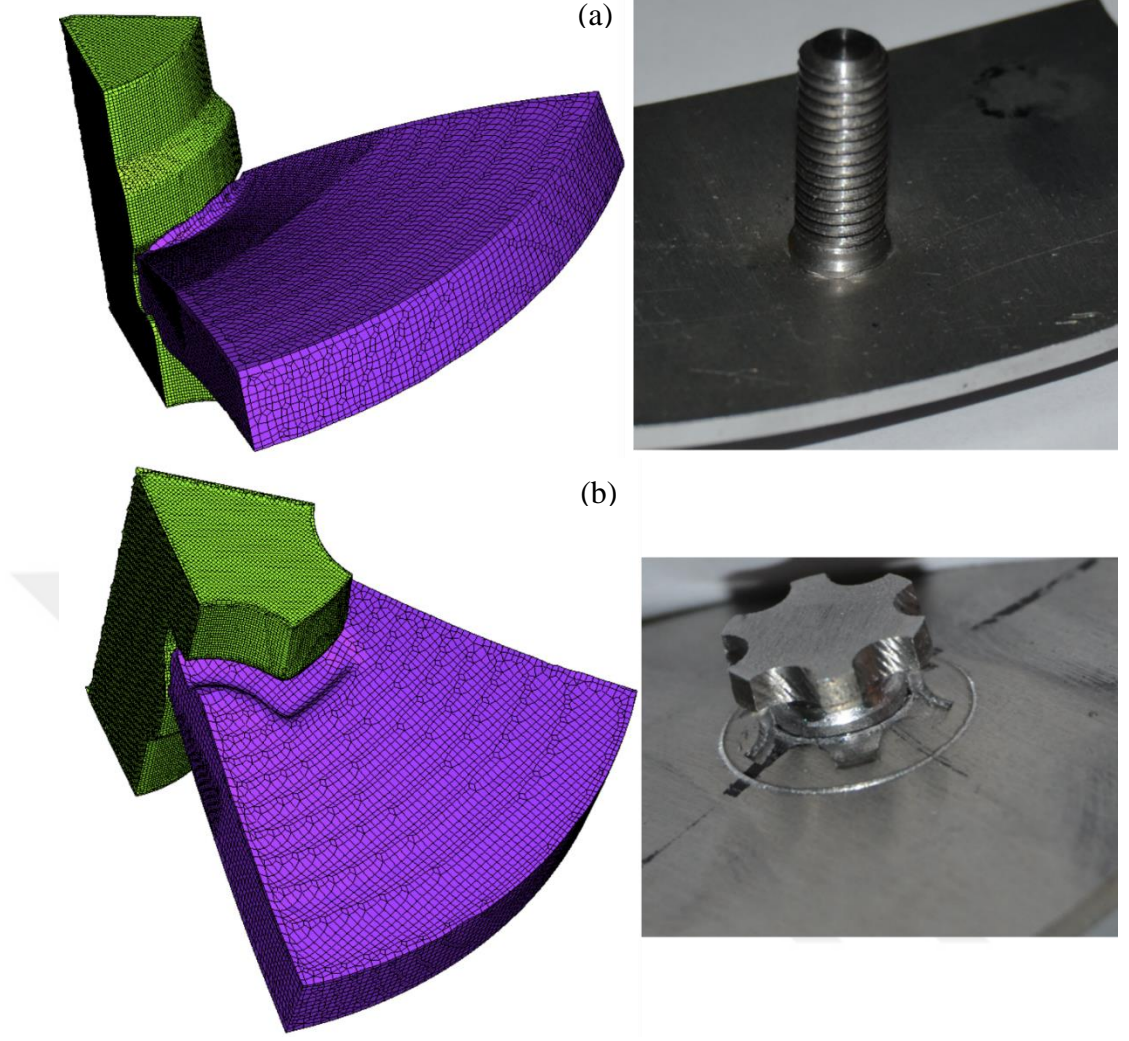
Şekil 4.43 Benzetim alışmaları ile deneysel sonuçlardan elde edilen (a) Şekillendirme-strok grafiği, (b) eksenel sōkme-strok grafiği

Eksenel sōkme işlemi sonrasında alūminyum levha ve cıvata da meydana gelen gerinim ve gerilme dağılımları Őekil 4.47(a)-(b)'de verilmiştir. Bu Őekiller incelendiğinde, gerilme ve gerilme yığılmalarının benzer bōlgelerde ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Alūminyum levhada cıvatanın moment çapına denk gelen bōlgelerinde, en bōyuk gerinim değerlerinin oluştuğu ve bu değerlerin 3,08 mertebelerine çıktığı gōr÷lmektedir (Őekil 4.47(a)). Ayrıca alūminyum levhada çekme dayanımına yakın mertebelerdeki gerilmelerin deformasyon boyunca daha da yayıldığı sūylenbilir (Őekil 4.47(b)). Cıvatanın yığma bōlgesi çapına denk gelen bōlgesinde eksenel sōkme işlemi sonrası meydana gelen gerilme değerinin 650 MPa

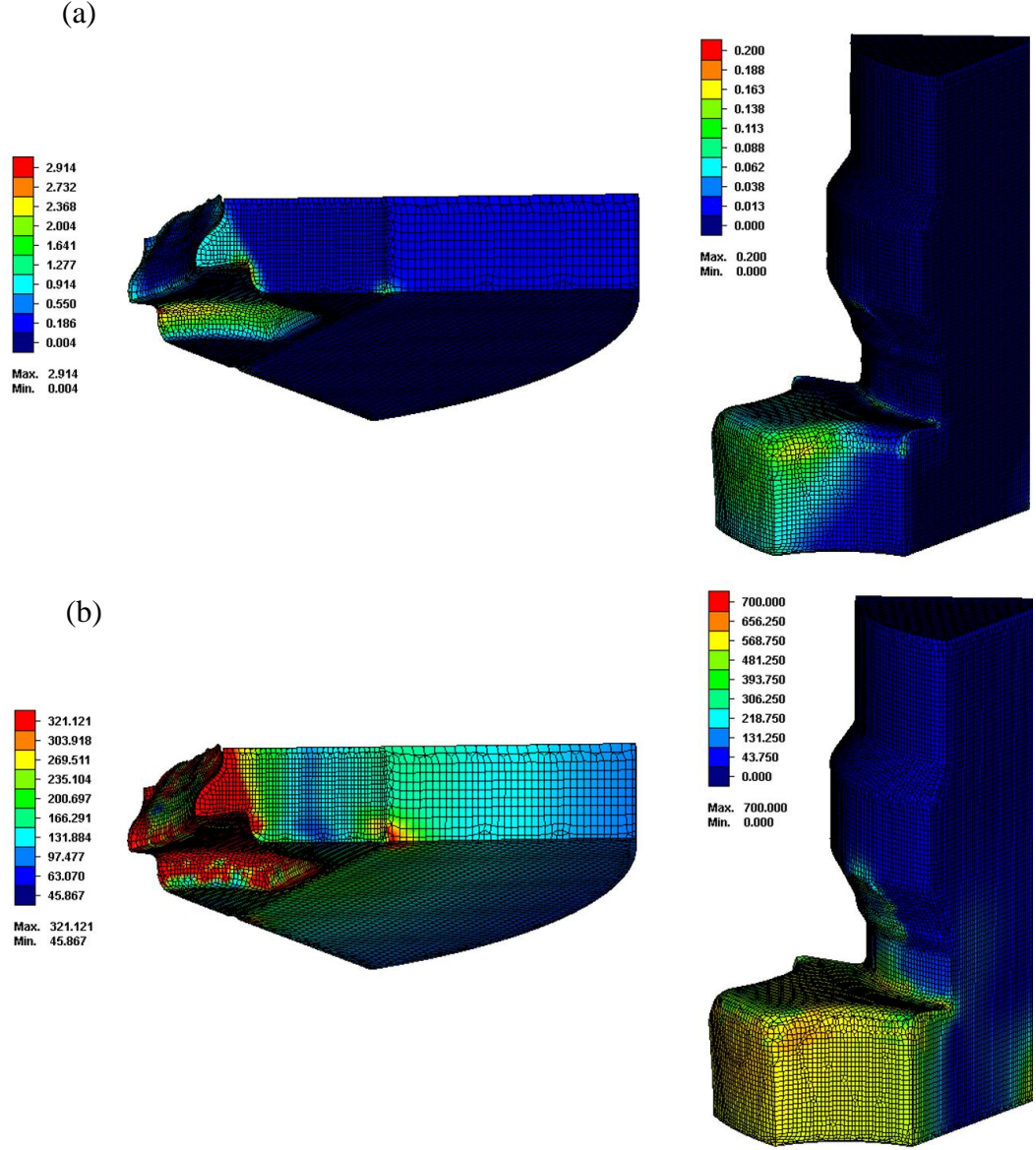
mertebelerine ulaşmaktadır (Şekil 4.47(b)). Bu durum, aksel sökme deneyleri sırasında uygulanan kuvvetin, cıvatanın yığılma bölgesi çapına denk gelen kısımları tarafından da taşındığını göstermektedir (Şekil 4.47(b)).



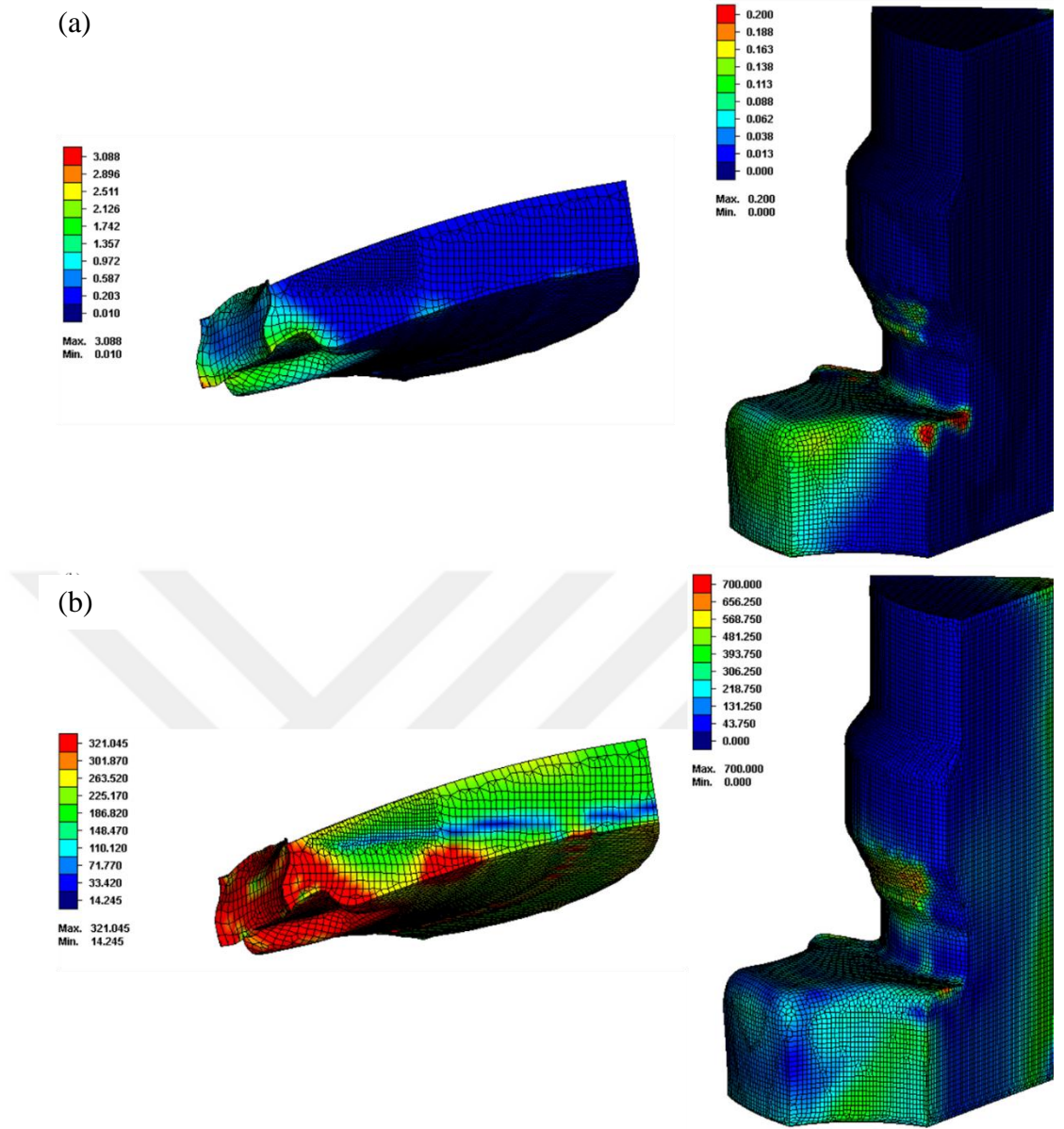
Şekil 4.44 Fiziksel olarak tespit edilen cıvata ile analiz sonucu elde edilen cıvatanın (a) EDM ile kesit alınmış numunesi ile analiz kesiti, (b) çapak oluşum bölgesinin fiziksel durumu ile analiz durumunun karşılaştırılması



Şekil 4.45 Cıvata alüminyum levha çiftine ait aksenal sökme deneyine ait deneysel ve benzetim çalışmalarına ait: (a) üstten görünüş, (b) alttan görünüş



Şekil 4.46 Tespit işlemleri sırasında alüminyum levha ve civatada meydana gelen (a) gerinim, (b) dağılımı gerilme dağılımı (Gerilme birimi: MPa)



Şekil 4.47 Eksenel sökme işlemi sonrasında civata ve alüminyum levhada meydana gelen (a) gerinim , (b) gerilme dağılımı (Gerilme birimi:MPa)

4.2. Tartışmalar

Tez kapsamında incelenen parametrelerin şekillendirme kuvveti üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde tüm parametrelerin artan değerleri ile birlikte şekillendirme kuvvetinin de artış sergilediği görülmektedir (Şekil 4.10(a), Şekil 4.15(a), Şekil 4.20(a), Şekil 4.25(a), Şekil 4.30(a), Şekil 4.35(a)). Bu durum, söz konusu parametrelerin artan değerleri ile birlikte lokal plastik deformasyon uğratılan malzeme hacminin de artmasından kaynaklanıyor olabilir. Dolayısıyla deformasyon miktarı, artan hacim ile birlikte artmakta ve şekillendirmenin tamamlanabilmesi için gerekli kuvvet değerleri artmaktadır.

Malzeme akışı üzerinde etkili olan parametrelerin şekillendirme kuvvetini de belirgin olarak etkilediği anlaşılmıştır. Bu durum en çok yığma bölgesi çapı (Parametre-1) ve yığma açısı (Parametre-3) kapsamında ortaya çıkmaktadır. Yığma bölgesi çapındaki (Parametre-1) değişim, şekillendirme sırasında ortaya çıkan çapak oluşumu üzerinde etkili olduğu söylenebilir (Şekil 4.9). Nitekim söz konusu parametrenin artan değerleri ile birlikte zımba ile yığma bölgesi çapı arasındaki boşluk azalmaktadır. Bu durum proses sırasında çapak oluşumunun engelleyen bir etki ortaya koymaktadır (Şekil 4.9-(b)). Aksi durumda da, söz konusu boşluk artarak yığma bölgesinden metal çıkışı (çapak oluşumu) kolaylaşmaktadır. İncelenen cıvata tespit işleminin küçük zımba kuvveti ile sağlanabilmesi metal akışının kolaylaştırılması ile birlikte mümkün olabilir. Şekillendirme prosesi sırasında yığma boşluğunun doldurulması halinde metal akışı da giderek zorlaşmaktadır. Bu durum malzemenin yığma boşluğu çeperi ile temasından kaynaklanan sürtünme gerilmelerinin artması nedeniyle oluşmaktadır. Sürtünme gerilmelerinin değeri yığma bölgesi çeperine uygulanan kuvvet ile direk ilişkilidir. Proses sırasında çapak oluşumunun engellenmesi, yığma bölgesi çeperine uygulanan kuvvetin ve hidrostatik basıncın da artmasına neden olacağından, sürtünme kuvvetlerinin artarak, metal akışının engellenmesi sonucunu doğurmaktadır. Bu durum hem şekillendirme sürecinin daha yüksek kuvvet gereksinimi ile sürmesine, hem de yığma bölgesi içerisinde ölü metal bölgeleri oluşmasını sağlayarak prosesin başarısız olmasına neden olmaktadır (Şekil 4.12(a)).

Yığma açısının (Parametre-3) metal akışı üzerinde etkileri değerlendirildiğinde ise söz konusu parametrenin azalan değeri ile birlikte şekillendirme kuvvetinin azaldığı

anlaşılmıştır. Bu durum söz konusu parametrenin azalması ile malzeme akışının kolaylaşmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim yığma açısının azalmasıyla iki önemli geometrik etki ortaya çıkmaktadır. Bunlar cıvatanın dış çapındaki kenarının keskinleşmesi ve metalin yığma bölgesine doğru yönlendirme etkisidir. Cıvata dış çapındaki kenarın keskinleşmesi bu bölgedeki gerilmelerin lokalleşerek metal akışının düşük strok ve daha düşük zımba kuvveti değerlerinde de başlamasına sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra artan yığma açısı ile birlikte, malzeme akışının artan sürtünme kuvvetlerine bağlı olarak zorlaştığı söylenebilir. Bu durum malzemenin deformasyonu için gerekli olan şekillendirme kuvvet değerinin artmasına da neden olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim yığma açının 90° olduğu P-3-3 parametresinde belirgin olarak görülmektedir (Şekil 4.20(a)). Ayrıca yığma açısının artan değerleriyle birlikte, proses sırasında malzemenin yığma bölgesine yönlenmesini azaltan bir etkisi de ortaya çıkmaktadır. Bu durum yığma bölgesinin doldurulması için gerekli olan gerinim değerinin de artmasına bağlı olarak zımba kuvvetlerinin daha yüksek seviyelerde seyretmesine yol açmaktadır. (Şekil 4.20(a)). Zımba kuvvetlerinin yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı artması, cıvataadaki gerilme ve gerinim halini de etkilemektedir. Nitekim Şekil 4.22(c)'den anlaşılacağı gibi yığma açısının artan değerleri ile birlikte cıvataadaki deformasyon da belirgin şekilde artmaktadır.

Deformasyona katılan malzeme hacminin artması şekillendirmenin tamamlandığı strok değerini etkilemektedir. Özellikle yığma açısının (Parametre-3), moment çapının (parametre-4) ve cıvata çapının (Parametre-5) artması ile şekillendirme için gerekli olan strok değerleri azalmaktadır (Şekil 4.20(a), Şekil 4.25(a), Şekil 4.30(a)). Cıvata tespit işlemlerinin tamamlanabilmesi için belirli hacimde bir yığma boşluğunun malzeme ile doldurulması gerekmektedir. Bunun sağlanması için cıvata geometrisine bağlı olarak değişen bir malzeme hacmi plastik deformasyona zorlanmalıdır. Bu deformasyon basitçe zımbanın hareket ettirilmesi ile elde edildiğinden, plastik deformasyondan etkilenen malzeme hacminin artması birim strokta yığma bölgesine transfer edilen malzeme miktarını da arttırmaktadır.

Cıvata boşluğu hacminin azalması durumunda, şekillendirme için gerekli olan strok değerleri de azalmaktadır. Bu durum yığma bölgesi çapının (Parametre-1), yığma bölgesi yüksekliğinin (Parametre-2) ve yığma bölgesi geometrisinin (Parametre-6)

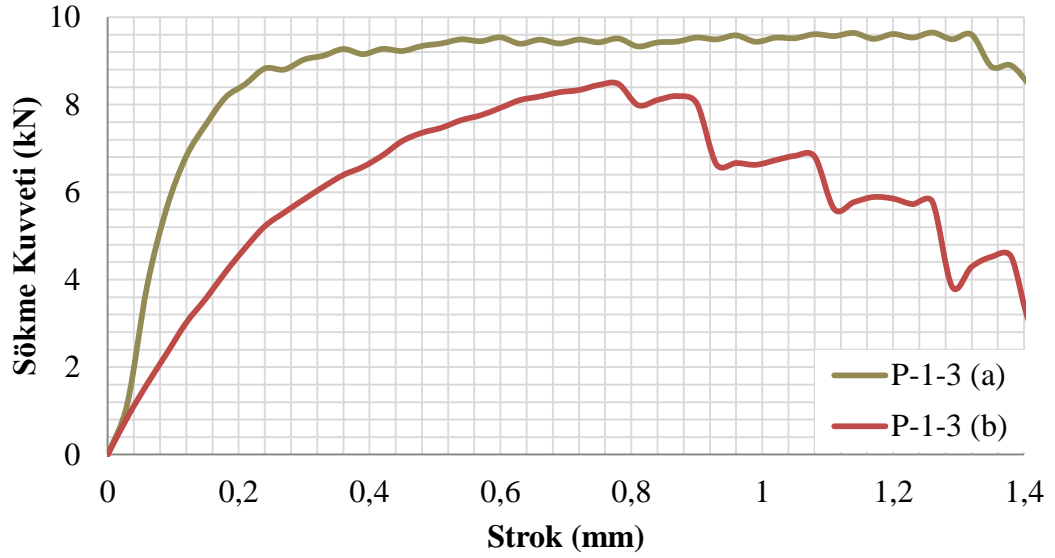
azalan değerleri ile birlikte Şekillendirmenin tamamlanabilmesi için gerekli olan strok değerlerinde azalma görülmektedir (Şekil 4.10(a), Şekil 4.15(a), Şekil 4.35(a)). Tespit işlemleri esnasında malzemenin cıvata boşluğuna dolması için gerekli olan plastik Şekil deęiŐtirme iŐinin, cıvata hacminin azalmasıyla birlikte azalacağı aşikârdır. Buna bağlı olarak Şekillendirme için gerekli strok değerinin azalması beklenen bir sonuçtur.

Tespit işlemleri sonrasında deformasyon bölgesindeki alüminyum levha kalınlığının artması sonucunda, eksenel sökme kuvvetine karşı cıvata-Al levha çiftinin sergilemiş olduğu tepkinin arttığı anlaşılmıştır. Bu durum yığma bölgesi çapının (Parametre-1), yığma bölgesi yksekliliğinin (Parametre-2), yığma bölgesi geometrisinin (Parametre-6) azalan değerleri ile ve yığma açısının (Parametre-3), cıvata çapının (Parametre-5) artan değerleri ile birlikte ortaya çıkmaktadır(Şekil 4.10(b), Şekil 4.15(b), Şekil 4.20(b), Şekil 4.30(b), Şekil 4.35(b)). Artan strok değerleri ile birlikte deforme olan alüminyum levha kalınlığı azaldığından, cıvatanın tespit edilmesi için gerekli olan strok artmaktadır. Bu artış eksenel sökme kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Al levha-cıvata çiftinin eksenel sökme kuvvetleri altındaki deformasyonu, alüminyum levhada eğilmeye neden olmaktadır. Bu durum alüminyum levhaya tespit ediŐmiŐ cıvataya, eksenel yönde kuvvet uygulandığında, cıvata-Al levha çiftinin birbirinden ayrılması için gerekli olan kuvvet değerinin, alüminyumun eğilmesi için gerekli olan kuvvet değerinden daha yüksek olmasından kaynaklanıyor olabilir. Deformasyon bölgesindeki alüminyum levha kalınlığının artmasıyla birlikte eğilme momentlerine karşı gösterilen direncin de artması beklenir. Bu durum sökme kuvvetlerinin de artmasına neden olmaktadır. Yukarıda belirtilen durumun aksine, moment çapının (Parametre-4) artan değerleri ile birlikte strok değerleri azalma görülmektedir. Buna rağmen, eksenel sökme kuvvetin de belirgin bir artış görülmemektedir (Şekil 4.25(b)). Bu durum eksenel sökme kuvveti üzerinde Şekillendirme sonrası moment çapında bulunan malzeme hacminin de etkili olduğunu gösteriyor olabilir (Şekil 4.25(b)). Nitekim moment çapının azalması durumunda cıvata kafasının evre uzunluğu artmaktadır. Ayrıca söz konusu parametrenin azalması ile birlikte cıvata kafasının alüminyum levhaya gmldğu derinlik de artmaktadır. Bu iki etki, cıvata kafasının alüminyum levhaya gmldğu yanal yüzeyin alanını da arttırmaktadır. Bu durumda söz konusu yüzeyde meydana gelen sürtünme etkilerinin de arttırması beklenir. Buna bağlı olarak da eksenel sökme

kuvvetlerine karşı gösterilen direncin arttığı düşünülmektedir. Başka bir değişle moment çapının azalan değerleri ile Al-levha kalınlığında görülen azalma dolayısıyla eksenel sökme kuvvetinde meydana gelmesi beklenen kayıplar, cıvata kafasındaki sürtünme yüzeyini artması ile karşılanıyor olabilir.

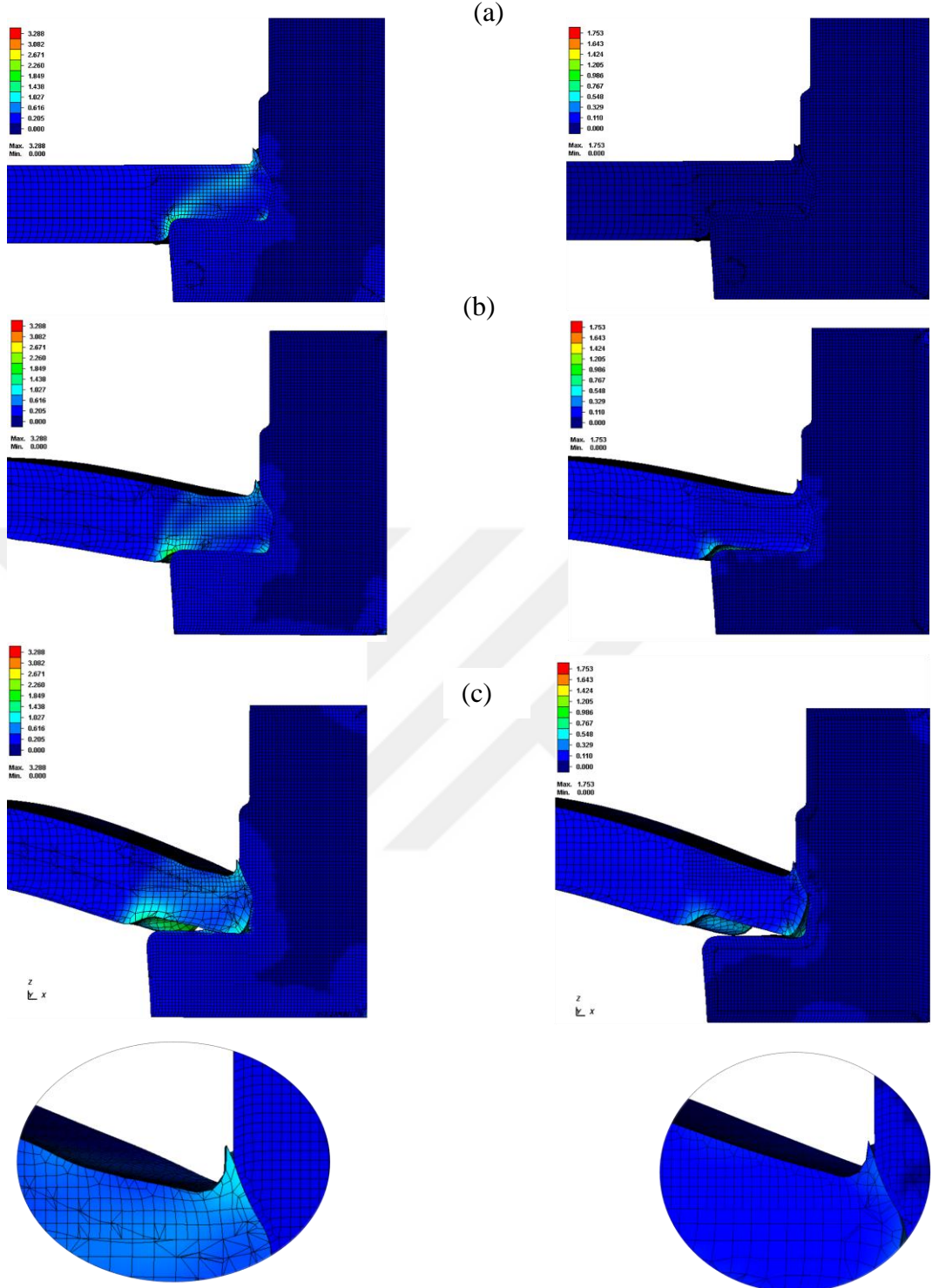
Eksenel sökme kuvveti-strok ($(F_{\text{sökme}})$ -strok (X)) grafikleri incelendiğinde, yığma bölgesi çapı (Parametre-1) ve moment çapı (Parametre-4) haricindeki parametrelerin azalan değerleri ile birlikte, en büyük sökme kuvvetine ulaşıldıktan sonra kuvvet değerlerinin ani bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.15(b), Şekil 4.20(b), Şekil 4.30(b) Şekil 4.35(b)). Başka bir değişle, yığma bölgesi çapının (Parametre-1) ve moment çapının (Parametre-4) azalan değerleri ile birlikte $F_{\text{sökme}}-X$ eğrileri bir plato davranışları sergilemektedir (Şekil 4.10(b), (Şekil 4.25(b)). Bu davranış cıvatanın kafa kısmından yığma bölgesi çapına doğru uzanan gerinim bandı boyunca malzemede oluşan pekleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkmış olabilir. Bu düşüncenin anlaşılması için, cıvata alüminyum levha çiftinin eksenel sökme kuvvetleri altındaki deformasyon davranışının incelenmesi yerinde olacaktır. Söz konusu deformasyon hali kapsamında uygulanan eksenel sökme kuvvetleri, cıvataya ait yığma bölgesi çapında oluşmuş çapakları ezerek deforme etmektedir. Bunun sonucunda, söz konusu bölgenin mekanik davranışlarının deformasyon için gereken kuvvet üzerinde önemli etkilere sahip olacağı aşikârdır. Söz konusu bölgede meydana gelen deformasyon bandındaki pekleşme etkisi nedeniyle ortaya çıkan mukavemet artışının eksenel sökme kuvvetlerine karşı gösterilen direnci arttıran bir etki ortaya koyması beklenir. Bundan daha da önemli deformasyonun ilerleyen adımlarında yığma bölgesi çapının çapağı ezmesi durumunda pekleşmenin oluştuğu gerinim bandı, alüminyum levhanın cıvata dan ayrılmasına karşı direnç göstermektedir. Bu direnç kuvvet değerlerinin ani bir şekilde azalmasını engelleyerek, söz konusu plato davranışına neden olduğu düşünülmektedir. Bu durumun net bir şekilde ortaya konulabilmesi için şekillendirme analizinde ortaya çıkan kalıntı gerilmeler dâhil edilmeden eksenel kuvvetler altında sökme analizi tekrarladı. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar ile kalıntı gerilmeleri içeren Al levha-cıvata çiftinin eksenel sökme analizleri karşılaştırıldı. Şekil 4.48’de kalıntı gerilmelerin eksenel sökme kuvvetine ait eğri karakteristiği üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil 4.48’de açık bir şekilde görüldüğü gibi kalıntı gerilmelerin dâhil edilmemesi durumunda, bütün geometrik özellikler aynı kalmasın rağmen,

maksimum eksenel sökme kuvvet değeri azalmakta ve plato davranışı görülmemektedir (şekil 4.48). Bu durum yukarıda açıklanan davranışın büyük oranda gerinim bandı boyunca oluşan pekleşmenin etkisiyle meydana geldiğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca, eksenel sökme kuvvetleri altında yukarıda açıklanan deformasyon halinin gelişimi de şekil 4. 49'da verilmiştir. Cıvata tespit işlemleri sırasında meydana gelen gerinim bandı şekil 4.49(a)'da, eksenel sökme kuvvetleri altındaki plastik deformasyonun %50'lik kısmı tamamlandığında ortaya çıkan durum şekil 4.49(b)'de ve deformasyon sonundaki gerinim hali ise, şekil 4.49(c)'de verilmiştir. Alüminyum levhada oluşan kalıntı gerinim dağılımı incelendiğinde, gerinimin şekillendirme sonrası oluşmuş olan apaktan, cıvata kafasının dış çapına doğru uzandığı görülmektedir (şekil 4.49(a)). Prosesin ilerleyen adımlarında ise, yığma bölgesi çapının çapağı ezme şeklinde bir davranış sergilediği açıkça görülmektedir. Bu davranışın gerinim bandı boyunca alüminyum levhanın cıvata dan ayrılmasını engelleyen bir etki oluşturduğu söylenebilir (şekil 4.49(b)). Kalıntı gerinimleri içermeyen analiz incelendiğinde alüminyum levhanın cıvata dan daha düşük strokta ayrılıyor olması, yukarıda açıklanan durumu teyit etmemiştir. Proses sonunda, apakta ortaya çıkan gerinim mertebesinin, kalıntı gerinimlerin dâhil edildiği durumda arttığı, ancak kalıntı gerinimlerin dâhil edilmediği durumda ise belirgin bir artış göstermediği anlaşılmaktadır (şekil 4.49(c)). Bununla birlikte şekil 4.49(c)'den eksenel sökme sırasında çapağın bölgesinin pekleşme etkisi altında olmasının, bu bölgenin yakın komşuluğundaki deformasyon halinin de belli oranda etkilendiği söylenebilir. Nitekim pekleşmiş apak bölgesinin cıvata tarafında deforme edilmesi halinde apak bölgesinin de yakın komşuluğunu bası gerilmeleri altında deforme olmaya zorladığı anlaşılmaktadır (şekil 4.49(c)). Bu durumun hem eksenel sökme kuvvetine karşı gösterilen direncin artmasına, hem de plato davranışının görülmesine katkı sağladığı söylenebilir.



Şekil 4.48 Alüminyum levhada (a) kalıntı gerilmelerin dâhil edildiği (b) kalıntı gerilmelerin dâhil edilmediği eksenel sökme kuvvet-strok grafiği

Proses edilmiş alüminyum levha-cıvata çiftinin, eksenel sökme momentine karşı göstermiş olduğu tepki, moment çapı çeperiyle temas halinde bulunan malzeme hacminin artması ile birlikte artış göstermektedir. Bu durum yığma açısının (Parametre-3) artan ve moment çapının (Parametre-4) azalan değerleri ile birlikte ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.20(c), Şekil 4.25(c)). Şekillendirme esnasında cıvatanın baş kısmında bir ezilme meydana gelmekte ve bu ezilmeyle birlikte yığma açısı giderek artmaktadır. Bu durumda yığma açısının artan değerleri ile birlikte deformasyon sonrası cıvatada görülen ezilme ve şekil/geometri değişimlerinin daha düşük mertebelerde olduğu söylenebilir (Şekil 4.19). Bunun sonucu olarak moment çapı altında deforme olan malzeme hacminin cıvata ile temas halinde olduğu yüzey alanı artmaktadır (Şekil 4.20(c)). Bu durum basitçe, cıvatanın döndürme esnasında süpürerek deforme etmesi gereken malzeme hacmini artırarak, döndürme momentine karşı gösterilen direnci de arttırmaktadır. Söz konusu deformasyon mekanizması moment çapının azalan değerleri içinde geçerlidir. Zira moment çapının azalan değerleri ile birlikte, deforme edilmesi gereken malzeme hacminde büyük bir artış görülmektedir (Şekil 4.25(c)).



Şekil 4.49 Eksenel sökme prosesine ait kalıntı gerilmeleri içeren (sol) ve içermeyen alüminyum levha ve civatada meydana gelen gerilim dağılımları : (a) proses başlangıcı, (b) proses %50 ve (c) proses sonu

Cıvatanın tespit işlemleri esnasında alüminyum levhada oluşan gerilme değerleri malzemenin (AA 5182) çekme dayanımı mertebelerine ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu durum incelenen tüm parametreler için ortak özellik niteliği taşımaktadır. Ayrıca alüminyum levhada meydana gelen gerilme değerleri civata ile temas halinde olan

yüzeyleyden dışa doğru gittikçe azalmaktadır. Nitekim cıvata boşluğu hacminde azalmaya neden olan, yığma bölgesi çapı (Parametre-1) , yığma bölgesi yüksekliği (Parametre-2) ve yığma bölgesi geometrisi (Parametre-6) parametrelerinin azalan değerleri gerilme yığılma bölgelerinin daralmasına neden olmaktadır. (Şekil 4.12(c), Şekil 4.17(b), Şekil 4.37). Ayrıca yığma bölgesi açısının (Parametre-3), moment çapının (Parametre-4) ve cıvata çapının (Parametre-5) azalan değerleri ile birlikte alüminyum levha boyunca oluşan gerilmelerin de azaldığı söylenebilir. Bu davranış parametrelerin şekillendirme esnasında deformasyona katılan malzeme hacminin azalmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.22(c), Şekil 4.27(b), 4.32(d)). Yukarıda bahsedilen durumlar cıvata tespit işlemleri esnasında gerilmelerin lokalleşmesine bağlı olarak oluştuğu söylenebilir.

Cıvatanın Al levhaya tespiti sırasında ortaya çıkan en yüksek gerilmeler cıvata kafasının dış çapında görölmektedir. Söz konusu durum tüm parametrelerde görölmüştür. Cıvata kafasının dış çapındaki bu yüksek gerilme hali, söz konusu bölgenin, prosesin başından sonuna kadar yükleme altında kalmasından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca söz konusu bölgenin keskin kenarlı bir geometriye sahip olması da bu etkinin, özellikle prosesin başlangıç safhalarında, daha belirginleşmesine katkıda bulunmaktadır. Cıvata şaftı ile cıvata kafasının birleştiği kenarda oluşan gerilme yığılmasının nedeni ise cıvata kafasının proses sırasında maruz kaldığı eğilme deformasyonudur. Bu durumda cıvatanın kafa kısmının dış kenarı ezilmeye ve cıvatanın şaft kısmı ile kafa kısmının kesiştiği bölgeyi dışa doğru açılmaya zorlamaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında otomotiv endüstrisinde alüminyum alaşımlarından üretilmiş gövde bileşenlerinde çözülebilir bağlantı noktalarının oluşturulmasına olanak sağlayan özgün bir cıvata tasarımı geliştirildi. Bu tasarımda birleşmenin deformasyon ile sağlanması esasına dayanan kendinden kenetlenme özelliği ve bu özellik kapsamındaki boyutsal parametrelerin etkileri incelendi. Çalışmadan elde edilen ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kendinden kenetlenme özelliği sahip bağlantı elemanlarının uygulama sırasındaki ve uygulama sonrasındaki mekanik davranışları, sahip olduğu geometrik boyutsal özellikler ile ilişkilidir. Bu ilişkiler, kullanılan malzemenin mekanik davranışları ile sonuçta bağlantı elemanının taşınmasının beklendiği yüklerin türü ve büyüklüğü göz önünde bulundurularak tasarım yapılmasını zorunlu kılmaktadır.
2. Kenetlemeli bağlantı yaklaşımı, kolay uygulanabilir ve birçok mühendislik uygulaması için yeterli mekanik performans sergileyebilecek bir birleştirme yöntemi sunmaktadır.
3. Kendinden kenetlemeli bağlantı elemanlarının uygulama ve uygulama sonrasındaki mekanik performans özelliklerinin değerlendirmesi kapsamındaki çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuş benzetim modellerinin deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları yüksek doğrulukta temsil edebildiği görülmüştür.
4. Tez kapsamında incelenen yığma açısı, moment çapı ve cıvata çapının artan değerleri ile yığma bölgesi çapı, yığma bölgesi yüksekliği ve yığma bölgesi geometrisinin artan değerleri ile şekillendirme kuvveti de artış sergilemektedir. Bu durum, söz konusu parametrelerin artan değerleri ile birlikte lokal plastik deformasyon uğratılan malzeme hacminin de artmasından kaynaklanmaktadır.
5. Cıvata tespit işlemleri sırasında çapak oluşumunu engeller nitelikteki geometrik özellikler (yığma bölgesi çapı, yığma açısı) şekillendirme için gerekli kuvvet değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, yığma bölgesi çeperindeki hidrostatik basıncın çapak oluşumunun engellenmesi durumunda artmasıyla ilişkilidir. Bu artış, çeperdeki sürtünme etkilerin daha belirgin hale gelmesine

neden olarak metal akışının zorlaşmasına ve şekillendirme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır.

6. Cıvata tespit işlemleri sırasında yığma açısının 80° - 85° arasında bir değerde belirlenmesi ile metal akışının şekil bağının sağlanmasında rol oynayan yığma bölgesine gerçekleşmesini sağlanarak şekillendirmenin daha düşük kuvvet gereksinimi ile tamamlanması mümkün olmaktadır.
7. Yığma açısı, moment çapı ve cıvata çapının artması durumunda deformasyona katılan malzeme hacminin de artması şekillendirmenin tamamlandığı strok değerini azaltmaktadır.
8. Tespit işlemleri sonrasında deformasyon bölgesindeki alüminyum levha kalınlığının artması, aksel sökme kuvvetine karşı cıvata-Al levha çiftinin sergilemiş olduğu tepkiyi arttırmaktadır. Bu durum yığma bölgesi çapının yığma bölgesi yüksekliğinin, yığma bölgesi geometrisinin azalan değerleri ile ve yığma açısının, cıvata çapının artan değerleri ile birlikte ortaya çıkmaktadır.
9. Yığma bölgesi çapının ve moment çapının azalan değerleri ile şekillendirme sonrasında uygulanan aksel sökme deneylerinden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri bir plato davranışı sergilemektedir. Bu durum, cıvatanın şekillendirme ile tespit edilmesi sırasındaki uygulanan plastik gerinimlerin neden olduğu pekleşme etkisi ile meydana gelmektedir.
10. Cıvata tespit işlemleri sırasında uygulanan plastik deformasyonun lokal olarak uygulanması bu bölgelerin içerisinde bulunduğu gerilme halini çekme dayanımına yakın mertebelere ulaşmasına neden olmaktadır. Ancak deformasyon bölgesinden uzaklaştıkça hem gerilme hem de gerinim değerleri ani bir şekilde azalma sergilemektedir.
11. Cıvata tespit işlemleri sırasında cıvata ortaya çıkan gerilmeler, cıvata kafasının dış çapında ve cıvata shaftının cıvata kafasıyla kesiştiği kenarda yoğunlaşmaktadır. Söz konusu bölgelerde ortaya çıkan gerilmelerin ulaştığı mertebeler boyutsal parametreler ile yakından ilişkili bulunmuştur.
12. Kendinden kenetlemeli bağlantı elemanının tespit işleminden sonra uygulanan aksel döndürme momentine karşı sergilemiş olduğu performansı etkileyen en temel unsur cıvata kafasında bulunan ve moment çapı olarak tanımlanan geometridir. Söz konusu geometrinin azalan değerleri ile birlikte aksel döndürme momentine karşı gösterilen tepki belirgin oranda artış sergilemektedir.

5.2. Öneriler

1. Alüminyum alaşımlarında olduğu gibi yüksek özgül mukavemet özelliği taşıyan magnezyum alaşımlarının birleştirilmesinde tez kapsamında çalışılan kendinden kenetlenme bağlantı konseptinin uygulanabilirliği çalışılabilir.
2. Tez kapsamında belirlenen geometrinin farklı alüminyum levha kalınlıklarına tespit çalışması yapılabilir.
3. Benzetim çalışmaları için tez kapsamında ortaya konan SEY modelinin hasar mekanizmalarının da dâhil edilerek şekillendirme sürecine ve şekillendirme sonrası mekanik davranışlara etkisinin tespiti çalışılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Schönemann, M., Schmidt, C., Herrmann, C.Thiede, S., Multi-level Modeling and Simulation of Manufacturing Systems for Lightweight Automotive Components, *Procedia CIRP*, **2016**, 41, 1049-1054.
- [2] Gould, J., Joining aluminum sheet in the automotive industry—A 30 year history, *Welding Journal*, **2012**, 91, 23-34.
- [3] Henriksson, F.Johansen, K., On Material Substitution in Automotive BIWs – From Steel to Aluminum Body Sides, *Procedia CIRP*, **2016**, 50, 683-688.
- [4] Fridlyander, I. N., Sister, V. G., Grushko, O. E., Berstenev, V. V., Sheveleva, L. M.Ivanova, L. A., Aluminum Alloys: Promising Materials in the Automotive Industry, *Metal Science and Heat Treatment*, **2002**, 44, 365-370.
- [5] Cole, G. S.Sherman, A. M., Light weight materials for automotive applications, *Materials Characterization*, **1995**, 35, 3-9.
- [6] Aydin, H., Essadiqi, E., Jung, I.-H.Yue, S., Development of 3rd generation AHSS with medium Mn content alloying compositions, *Materials Science and Engineering: A*, **2013**, 564, 501-508.
- [7] Kuziak, R., Kawalla, R.Waengler, S., Advanced high strength steels for automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **2008**, 8, 103-117.
- [8] Nasser, A., Yadav, A., Pathak, P.Altan, T., Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests, *Journal of Materials Processing Technology*, **2010**, 210, 429-436.
- [9] Grajcar, A., Kuziak, R.Zalecki, W., Third generation of AHSS with increased fraction of retained austenite for the automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **2012**, 12, 334-341.
- [10] Busch, C., Hatscher, A., Otto, M., Huinink, S., Vucetic, M., Bonk, C., Bouguecha, A.Behrens, B.-A., Properties and Application of High-manganese TWIP-steels in Sheet Metal Forming, *Procedia Engineering*, **2014**, 81, 939-944.
- [11] Groche, P., Wohletz, S., Brenneis, M., Pabst, C.Resch, F., Joining by forming—A review on joint mechanisms, applications and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, **2014**, 214, 1972-1994.
- [12] Klocke, F., Joining by Forming, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.

- [13] Le Maoût, N., Thuillier, S., Manach, P. Y., Drawing, flanging and hemming of metallic thin sheets: A multi-step process, *Materials & Design*, **2010**, 31, 2725-2736.
- [14] Varis, J., Ensuring the integrity in clinching process, *Journal of Materials Processing Technology*, **2006**, 174, 277-285.
- [15] Voelkner, W., Present and future developments of metal forming: selected examples, *Journal of Materials Processing Technology*, **2000**, 106, 236-242.
- [16] Messler, R. W., *Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology*, Butterworth-Heinemann, London, 2004.
- [17] Mori, K., Abe, Y., Kato, T., Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting, *Journal of Materials Processing Technology*, **2012**, 212, 1900-1905.
- [18] Mucha, J., Kaščák, L., Spišák, E., Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **2011**, 11, 135-148.
- [19] Hamel, V., Roelandt, J. M., Gacel, J. N., Schmit, F., Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing, *Computers & Structures*, **2000**, 77, 185-200.
- [20] He, X., Liu, F., Xing, B., Yang, H., Wang, Y., Gu, F., Ball, A., Numerical and experimental investigations of extensible die clinching, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **2014**, 74, 1229-1236.
- [21] He, X., Zhao, L., Yang, H., Xing, B., Wang, Y., Deng, C., Gu, F., Ball, A., Investigations of strength and energy absorption of clinched joints, *Computational Materials Science*, **2014**, 94, 58-65.
- [22] Mori, K.-i., Bay, N., Fratini, L., Micari, F., Tekkaya, A. E., Joining by plastic deformation, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **2013**, 62, 673-694.
- [23] Mäkeläinen, P., Kesti, J., Advanced method for lightweight steel joining, *Journal of Constructional Steel Research*, **1999**, 49, 107-116.
- [24] Varis, J., Economics of clinched joint compared to riveted joint and example of applying calculations to a volume product, *Journal of Materials Processing Technology*, **2006**, 172, 130-138.
- [25] Eshtayeh, M., M., Hrairi, M., Recent and future development of the application of finite element analysis in clinching process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **2016**, 84, 2589-2608.
- [26] de Paula, A. A., Aguilar, M. T. P., Pertence, A. E., M., Cetlin, P. R., Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, **2007**, 182, 352-357.

- [27] Nordberg, H., *Fatigue Properties of Stainless Steel Lap Joints. Spot Welded, Adhesive Bonded, Weldbonded, Laser Welded and Clinched Joints ff Stainless Steel Sheets-A Review of their Fatigue Properties*, 2005, SAE International.
- [28] Lambiase, F., Di Ilio, A.Paoletti, A., Joining aluminium alloys with reduced ductility by mechanical clinching, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **2015**, 77, 1295-1304.
- [29] Mucha, J., The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint, *Materials & Design*, **2011**, 32, 4943-4954.
- [30] Eckert, A., Israel, M., Neugebauer, R., Rössinger, M., Wahl, M.Schulz, F., Local–global approach using experimental and/or simulated data to predict distortion caused by mechanical joining technologies, *Production Engineering*, **2013**, 7, 339-349.
- [31] Zhou, Y., Lan, F.Chen, J. *Notice of Retraction Influence of tooling geometric parameters on clinching joint properties for steel-aluminum hybrid car-body structures*. in *Computer Science and Information Technology*. 2010. IEEE.
- [32] Balon, P.Świątoniowski, A. *Forming of Automotive Parts with Nuts Clinch Process in Comparison to Welding of Nuts*. in *Key Engineering Materials*. 2014.
- [33] Bauccio, Michael, *SM Metals Reference Book, Third edition*, , Ed. ASM International, Materials Park, OH, 1993

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı SOYADI : **Süleyman KAHRAMAN**
Doğum Tarihi ve Yeri : **09/09/1989 – Kırcaali/Bulgaristan**
Yabancı Dili : **İngilizce, Almanca**
E-posta : **sueyleymankahraman@gmail.com**

ÖĞRENİM DURUMU

<u>Derece</u>	<u>Alan</u>	<u>Üniversite Adı</u>	<u>Mezuniyet</u>
Lisans	Makine Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2,86/4

İŞ TECRÜBESİ

<u>Yıl</u>	<u>Firma/Kurum</u>	<u>Görevi</u>
2014-2015	Feka Otomotiv	Proje Kalite Mühendisi
2015-Halen	Kırpart Otomotiv	Kalite Güvence Mühendisi