



**DİYAFRAMLA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNDE
KONTURLU YAPIYA SAHİP BÜKÜM PARÇALARINDAKİ KIRIŞMA
PROBLEMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Gürhan YILGIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2019

Gürhan YILGIN tarafından hazırlanan “DİYA FRAMLA HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNDE KONTURLU YAPIYA SAHİP BÜKÜM PARÇALARINDAKİ KIRIŞMA PROBLEMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/10/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gürhan YILGIN

21/10/2019

DİYAFRAMLA HİDROLİK ŞEKİLENDİRME YÖNTEMİNDE KONTURLU
YAPIYA SAHİP BÜKÜM PARÇALARINDAKİ KIRIŞMA PROBLEMİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Gürhan YILGIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2019

ÖZET

Sac metal şekillendirme üretim yöntemleri havacılık ve otomotiv sektörü başta olmak üzere, birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemlerinden biri olan diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi, esnek üretim kolaylığı ve çoklu parça şekillendirmesine olanak sağlaması sebebiyle tercih edilmektedir. Havacılık sektöründe dış bükey kontur yapısına sahip parçalarla sıkça karşılaşmaktadır. Bu yapıda olan parçalarda, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile üretilirken sac metaline form verilmesi esnasında, kırışmaların yaşanması yaygın bir hata olarak gözlemlenmektedir. Bu hata sonucunda oluşan hurda parçalar nedeniyle zaman kayıpları ve maliyet artışları yaşanmaktadır. Kırışma durumunun üretimden önce öngörülebilirliğinin artırılması sayesinde zaman kayıpları ve maliyet artışları engellenmiş olacaktır. Kırışmaya neden olan parametrelerden bazıları; malzeme, kontur dış bükey yarıçapı, flanş uzunluğu ve malzemenin kalınlığı gibi değişkenlerdir. Bu tez çalışmasında, konturlu yapılardaki form verme işlemlerinin diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemindeki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler kapsamında, belirlenen basınç ve parametrelerde şekil verme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil verme işlemleri için, havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Al-2024-O ve Al-2024-W sac metal malzemeleri seçilmiştir. Yapılan deneylerde sac metal malzemeler 0,635 mm, 1,27 mm, 1,60 mm ve 2,0 mm kalınlıklarında seçilmiş, üretilecek parçanın flanş uzunlukları 20 mm, 30 mm, 40 mm olacak şekilde farklı yarıçap kontura sahip kalıpta diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirme sonuçlarında 125 mm yarıçap kontura sahip parçalarda yoğun şekilde kırışma meydana gelmiştir. 2,00 mm kalınlığındaki parça şekillendirmelerinde ise kırışmanın kayda değer biçimde azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar doğrultusunda belirlenen parametrelerin etkisi incelenmiştir. Kırışmanın meydana geldiği koşulları ve güvenli alanları gösteren grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca, PAM-STAMP analiz programında şekillenme prosesi çözümlenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada analiz sonuçlarının, deneysel sonuçları kesin biçimde yansıtmadığı belirlenerek deneysel çalışmanın önemli ve gerekli olduğu görülmüştür. Bu çalışma sonucunda elde edilen verilerle, üretimde meydana gelebilecek zaman ve maliyet kaybının önüne geçilmiştir.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Diyaframla hidrolik şekillendirme, parça şekillendirme, kırışma problemi, konturlu yapı
Sayfa Adedi : 145
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WRINKLING DEFECT DURING HYDROFORMING OF FORMED CONTOURED PARTS

(M. Sc. Thesis)

Gürhan YILGIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2019

ABSTRACT

Sheet metal forming methods are widely used in many sectors, especially in the aerospace and automotive. Hydroforming with membrane diaphragm, which is one of these methods, is mostly preferred due to its ease of production and its ability to form many parts. The number of convex contoured parts is quite high in the aviation industry. While these parts are formed by hydroforming method, it is observed as a common error that wrinkles occurring during sheet metal forming. As a result of this wrinkling error, waste of time and cost increase occur due to the scrap parts. By increasing predictability of this wrinkle condition before production, waste of time and high cost will be prevented. Some of the parameters that cause wrinkling are variables such as the material of the part to be produced, the contour convex radius, the flange length and the thickness of the material. In this thesis work, the behavior of contoured parts formed by hydroforming with membrane diaphragm method is investigated experimentally. The experimental setup is prepared and forming processes are performed at the specified pressure and parameters. For forming processes Al-2024-O and Al-2024-W sheet metal materials, which are widely used in the aerospace industry, are selected. In the experiments, sheet metal materials were chosen in thicknesses of 0,635 mm, 1,27 mm, 1,60 mm, and 2,0 mm. The parts which has 20 mm, 30 mm, 40 mm flange lengths are formed by hydroforming with diaphragm in the tool with different radius contour. In the forming results, intense wrinkling occurred on the parts with 125 mm radius contour. It is concluded that the wrinkling decreases significantly for the part forming of 2,00 mm thick material. The effect of the parameters determined in accordance with all the results obtained is examined. The conditions in which the wrinkling occurred and the safe areas are identified and their graphs are presented. In addition, the forming process is analyzed in PAM-STAMP analysis program and compared with experimental results. In the comparison, it is determined that the analysis results are not the same with the experimental results accurately. Therefore, experimental study is important and necessary. The obtained results helps to reduce the loss of product time and reductive in cost.

Science Code : 91438

Key Words : Hydroforming with diaphragm process, forming, wrinkling defect, contoured parts

Page Number : 145

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgileri ile katkıda bulunan, bu süreç boyunca bana destek olan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a,

Bilgisi ve yorumları ile çalışmaya katkıda bulunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK'e

Tez çalışmam için sağladığı olanaklar ve destek için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'ye,

Bilgisini ve desteğini esirgemeyen, teknik anlamda çok yardımcı olan çalışma arkadaşım Dr. Hasan Ali HATİPOĞLU'na, kalıp tasarımı ile ilgili desteğinden dolayı çalışma arkadaşım Ahmet AKTAŞ'a ve süreçlerin hızlanmasında bana çok yardımcı olan ve içten desteğini hissettiğim arkadaşım Kutay BEYAZGÜL'e

Hayatımın her anında beni güvende hissettiren, maddi manevi her şekilde desteklerini her daim hissettiğim, hep yanımda olan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen babam Sadri YILGIN'a, annem Nurten YILGIN'a ve kardeşim Beyza MANCO'ya,

Her konuda beni destekleyen, yanımda olan, yardım eden, ufkumu açan, bana huzur, mutluluk ve güç veren hayat arkadaşım, sevgili eşim Zeynep Gökçe YILGIN'a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Hidrolik Şekillendirme Yöntemi.....	5
2.1.1. Hidrolik kabuk şekillendirme.....	5
2.1.2. Hidrolik tüp şekillendirme	6
2.1.3. Hidrolik sac şekillendirme	7
2.2. Diyaframla Hidrolik Şekillendirmede Kırışma Problemi	15
2.3. Anizotropi	18
2.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı	20
2.5. Literatürde Yer Alan Çalışmalar	24
2.6. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	33
3. MALZEME, METOD VE DENEYSEL YÖNTEM	35
3.1. Malzeme	35
3.1.1. Alüminyumun genel yapısı	35
3.1.2. Alüminyum alaşımlarda ısıtıl işlem	36
3.1.3. Malzeme çekme testi.....	37

	Sayfa
3.1.4. Şekillendirme sınır diyagramı testleri	39
3.2. Deneysel Yöntem ve Ekipmanlar.....	40
3.2.1. Deney parametreleri ve numuneler	42
3.2.2. Kalıp tasarımı	47
3.2.3. Deneyin yapılışı	48
4. ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR	55
4.1. Deneysel Çalışma.....	55
4.1.1. Deneysel çalışma sonuçları	55
4.1.2. Deney sonuçları tartışmaları	81
4.2. Sayısal Çözümleme ve Sonuçlar	83
4.2.1. Analiz edilecek modellerin oluşturulması.....	83
4.2.2. Sayısal çözümleme sonuçları ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması	88
4.2.3. Analiz sonuçları tartışmaları	105
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
5.1. Sonuçlar.....	107
5.2. Öneriler	108
KAYNAKLAR	111
EKLER.....	115
EK-1. Deney sınıflandırması	116
EK-2. Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri	119
ÖZGEÇMİŞ	145

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Al2024 malzemesinin kimyasal kompozisyonu	35
Çizelge 3.2. Al2024-O malzemesinin anizotropi değerleri	38
Çizelge 3.3. Deney için belirlenen parametreler.....	43
Çizelge 4.1. Deney için belirlenen parametreler.....	71
Çizelge 4.2. Analiz programında kullanılan malzeme özellikleri.....	84
Çizelge 4.3. Farklı sürtünme katsayısı kullanılarak yapılan şekillendirme analizlerinde meydana gelen en büyük kırışıklık yükseklikleri	98
Çizelge 4.4. Analiz sonucunda oluşan en büyük kırışıklık yüksekliği ve deneysel şekillendirme sonucu oluşan en büyük kırışıklık yüksekliği	103

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Hidrolik tüp şekillendirme prosesi	7
Şekil 2.2. Hidromekanik derin çekme yöntemi	8
Şekil 2.3. Hidromekanik ve konvansiyonel derin çekme yönteminde malzeme incelmesi	9
Şekil 2.4. Gerdirerek hidrolik şekillendirme	10
Şekil 2.5. Gerdirerek hidromekanik derin çekme yöntemi: a) Sac metalin kalıba yerleştirilmesi, b) Sac metalinin sıvı ile şişirilmesi ve kalıpların ilerlemesi, c) Şekillendirme	11
Şekil 2.6. Diyaframla hidrolik şekillendirme	12
Şekil 2.7. Guerin yöntemi	12
Şekil 2.8. Marform yöntemi	13
Şekil 2.9. Verson yöntemi	13
Şekil 2.10. Hidroform yöntemi	14
Şekil 2.11. Sac metal şekli ve şekillenmiş parçanın kesit görüntüsü şematığı	17
Şekil 2.12. Malzemelerin hadde yönlerine göre derecelendirilmesi.....	19
Şekil 2.13. Çekme deneyinde kullanılacak numune geometrisi	19
Şekil 2.14. Şekillendirme sınır diyagramı	21
Şekil 2.15. Şekillendirme öncesi ve sonrası daire tanımlamaları	21
Şekil 2.16. Şekillendirmede malzeme şekil değiştirmeleri	22
Şekil 2.17. Şekillendirme sınır diyagramı test numuneleri a) ASTM E2218-02, b) ISO 12004-2	23
Şekil 2.18. a) SAE 1006 malzemesi için şekillendirme sınır diyagramı b) Al2024 malzemesi için şekillendirme sınır diyagramı	24
Şekil 2.19. Hidroform ile şekillendirme sırasındaki kritik konum	26
Şekil 2.20. Elektro-hidrolik yönteminin şematik biçimi	28
Şekil 2.21. a) Konvansiyonel şekillendirme b) Hidrolik şekillendirme yöntemi	30
Şekil 2.22. AA 5083 için hidrolik şekillendirme diyagramı	31

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Aslan'ın çalışmasında kullandığı deney düzeneği	33
Şekil 3.1. Al2024-O malzemesi için 0°, 45° ve 90° yönde kesilmiş numunelerin çekme testi sonucu grafiği.....	38
Şekil 3.2. Al2024-W ve Al2024-O malzemesi çekme testi sonucu grafiği.....	39
Şekil 3.3. Al2024-O ve Al2024-W malzemelerinin şekillendirme sınır diyagramları	40
Şekil 3.4. Quintus marka diyaframla hidrolik şekillendirme tezgahı şematığı	41
Şekil 3.5. Deneyde şekillendirilecek numune özelliklerinin şematik olarak gösterilmesi	43
Şekil 3.6. Belirlenen parametrelerin numunelerde kullanılması	44
Şekil 3.7. a) Numune geometrisi şematığı, b) Numune örneği	45
Şekil 3.8. Numune ölçüleri a) R 125 mm kontur yarıçapına sahip numune 1, numune 6, numune 11, b) R 250 mm kontur yarıçapına sahip numune 2, numune 7, numune 12, c) R 500 mm kontur yarıçapına sahip numune 3, numune 8, numune 13, d) R 1000 mm kontur yarıçapına sahip numune 4, numune 9, numune 14, e) R 1000 mm kontur yarıçapına sahip numune 5, numune 10, numune 15	46
Şekil 3.9. a) Tasarlanan kalıp üzerindeki deliklerin tanımı, b) Tasarlanan kalıp üzerindeki kontur ve bükme yarıçap değerleri.....	48
Şekil 3.10. Numunelerin sınır çizgilerinin ve pim deliklerinin gösterildiği resimlerinin mylar kağıdına basılmış baskı örnekleri.....	49
Şekil 3.11. Numune etiketlenmesi	49
Şekil 3.12. Damgalanmış numune	50
Şekil 3.13. Deney prosesi akış diyagramı	54
Şekil 4.1. Deneyde şekillendirilecek numune özelliklerinin şematik olarak gösterilmesi	70
Şekil 4.2. Al2024-O malzeme ve 0,635 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar	72
Şekil 4.3. Al2024-O malzeme, 1,27 mm ve 1,60 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar	73
Şekil 4.4. Al2024-W malzeme ve 0,635 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar	74

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Al2024-W malzeme ve 1,27 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar	75
Şekil 4.6. Al2024-W malzeme, 1,60 mm ve 2,00 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar	76
Şekil 4.7. Güvenli ve kırışma bölgesi grafik örneği	77
Şekil 4.8. Al2024-O 0,635 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği.....	78
Şekil 4.9. Al2024-W 0,635 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği.....	79
Şekil 4.10. zAl2024-W 1,27 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği.....	79
Şekil 4.11. Al2024-W 1,60 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği.....	80
Şekil 4.12. Deneyler sonucunda malzeme ve kalınlığa göre oluşturulmuş kırışma grafiği	80
Şekil 4.13. CAD programında oluşturulmuş numune, diyafram ve kalıp yüzeyleri.....	84
Şekil 4.14. Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenen numune a) deneysel şekillendirme, b) diyaframsız analiz çözümlemesi, c) diyaframlı analiz çözümlemesi.....	85
Şekil 4.15. Diyafram modelinin X ve Y yönünde sınırlandırılması	86
Şekil 4.16. Diyafram, kalıp ve numunede oluşturulan ağ yapısı	86
Şekil 4.17. Kritik bölgelerdeki uyarlanabilirlik özelliği ile ağ yapısı elemanlarının bölünmesi	87
Şekil 4.18. Diyaframa uygulanan basınç grafiği.....	87
Şekil 4.19. a) PAM-STAMP programında oluşturulan deney düzeneği, b) Analiz programındaki şekillendirme prosesi sırasında basınç uygulanmış diyaframın kalıbın üzerini sarması ve numunelerin şekillenme anı.....	88
Şekil 4.20. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 1 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=20 mm, c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=20 mm, d) Al2024-O; T=0,635 mm; R=1000 mm; F=20 mm, e) Al2024-O; T=0,635 mm; R=2000 mm; F=20 mm.....	90

Şekil	Sayfa
Şekil 4.21. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 2 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-O; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-O; T=1,27 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al2024-O; T=1,27 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al2024-O; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=30 mm, e) Al2024-O; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=30 mm.....	92
Şekil 4.22. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 3 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-W; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-W; T=0,635 mm; R=250 mm; F=20 mm, c) Al2024-W; T=0,635 mm; R=500 mm; F=20 mm, d) Al2024-W; T=0,635 mm; R=1000 mm; F=20 mm, e) Al2024-W; T=0,635 mm; R=2000 mm; F=20 mm.....	94
Şekil 4.23. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 4 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al2024-W; T=1,27 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al2024-W; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=30 mm, e) Al2024-W; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=30 mm.....	96
Şekil 4.24. Analiz programında farklı sürtünme katsayıları ile çözümlenerek elde edilen kırışma yükseklikleri a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm; f=0,075 b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm; f=0,1 c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm; f=0,125	97
Şekil 4.25. Analiz programında farklı sürtünme katsayıları ile çözümlenerek elde edilen kırışma yükseklikleri a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm; f=0,075 b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm; f=0,1 c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm; f=0,125	97
Şekil 4.26. Analiz programında farklı sürtünme katsayıları ile çözümlenerek elde edilen kırışma yükseklikleri a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm; f=0,075 b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm; f=0,1 c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm; f=0,125	98
Şekil 4.27. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 1 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=20 mm, c) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=20 mm.....	100
Şekil 4.28. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 8 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=1000 mm; F=30 mm	101
Şekil 4.29. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 9 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=40 mm, c) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=40 mm, d) Al 2024-O; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=40 mm	102

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.30. Al2024-O 0,635 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki deneysel ve analiz sonuçlar ile oluşturulan kırışma grafiği	104
--	-----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Küresel Hidrolik şekillendirilme ile üretilmiş LPG tankı.....	5
Resim 2.2. a) Kaynak, b) Hidro şekillendirme uygulaması, c) Form almış parça	6
Resim 2.3. a) Hidrolik basınç kullanmadan yapılan şekillendirme b) Hidrolik basınçla yapılan şekillendirme	25
Resim 2.4. Tasarlanan zımba uçları a) Kestamit Uç b) Desenli uç	29
Resim 3.1. Diyaframla hidrolik şekillendirme tezgahının operatör kontrol paneli	42
Resim 3.2. Numunelerin genel görüntüsü.....	47
Resim 3.3. Numunelerin kalıba yerleştirilmesi.....	51
Resim 3.4. a) Numunelerin kalıba yerleştirilmesi, b) Diyaframla hidrolik şekillendirilme işlemi ile şekillendirilmiş kalıp üzerindeki numuneler	52
Resim 3.5. Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenen numune örneği	53
Resim 4.1. Deney 1 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışmalar; Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm.....	55
Resim 4.2. Deney 5 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm	56
Resim 4.3. Deney 6 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışmalar; Al2024-O; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm.....	57
Resim 4.4. Deney 7 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışma; a) Al2024-O; T=1,60 mm; R=125 mm; F=30 mm.....	58
Resim 4.5. Deney 9 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=40 mm, c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=40 mm	59
Resim 4.6. Deney 10 & Deney 11 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-O; T=1,27 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-O; T=1,60 mm; R=125 mm; F=40 mm	60
Resim 4.7. Deney 13 ve Deney 14 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=20 mm.....	61

Resim	Sayfa
Resim 4.8. Deney 15 & deney 16 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-W; T=2,00 mm; R=125 mm; F=20 mm	62
Resim 4.9. Deney 17 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-W; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm	63
Resim 4.10. Deney 18 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar; Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm	64
Resim 4.11. Deney 19 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar; Al2024-W; T=1,60 mm; R=125 mm; F=30 mm	65
Resim 4.12. Deney 20 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışma; Al2024-W; T=2,00 mm; R=125 mm; F=30 mm	66
Resim 4.13. Deney 21 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=0,635 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=0,635 mm; R=250 mm; F=40 mm, c) Al2024-W; T=0,635 mm; R=500 mm; F=40 mm	67
Resim 4.14. Deney 22 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=250 mm; F=40 mm	68
Resim 4.15. Deney 23 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=1,60 mm; R=250 mm; F=40 mm	69
Resim 4.16. Deney 24 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışma; Al2024-W; T=2,00 mm; R=125 mm; F=40 mm	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\bar{R}$	Ortalama anizotropi
r_o	Bükme yarıçapı, mm
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
Al	Alüminyum
cm^2	Santimetrekare
Cr	Krom
Cu	Bakır
F	Flanş uzunluğu, mm
f	Gerinim faktörü
Fe	Demir
g	Gram
Mg	Magnezyum
mm	Milimetre
Mn	Manganez
MPa	Megapaskal
R	Anizotropi değeri
r	Belirlenen ilk uzunluk, mm
R	Kontur yarıçapı, mm
R_0	Kontur yarıçap değeri, mm
R_1	Numunenin boyu, mm
R_T	Parça merkezinin bükme yarıçapına olan uzaklık, mm
Si	Silisyum
T	Malzeme kalınlığı, mm
Ti	Titanyum
Ti	Titanyum
w	Malzemenin eni, mm
w_0	Test öncesi malzemenin eni, mm

Simgeler**Açıklamalar****Zn**

Çinko

 α

Flanş açısı, derece

 ΔR

Düzlemsel anizotropi

 ε

Gerinim

 ε_r

Radyal gerinme

 ε_t

Kalınlık gerinme

 ε_w

Enine şekil değiştirme

 ε_0

Gerçek gerinim

 ρ

Şekillenme sonrasındaki uzunluk, mm

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

FCC

Yüzey merkezli kristal

LPG

Sıvılaştırılmış petrol gazı

SAE

Otomotiv Mühendisleri Derneği

TUSAŞ

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.

1. GİRİŞ

Endüstri devriminden bu yana dünyada hızla ilerleyen üretim sektörü gün geçtikçe üretim yöntemlerini geliştirmekte ve bu konudaki çalışmalarına devam etmektedir. Üretim yöntemleri geliştikçe üretilebilirlik ve üretim kapasitesi artışı, maliyet azalması gibi faktörlerin gerçekleşmesi sayesinde toplumlarda kalkınma ve refah seviyesi de artmaktadır [1]. Kalkınma ve refah seviyesi artan toplumlar, bu sayede güç kazanarak dünyada söz sahibi olmaktadır. Dünyaya ve teknolojiye yön vermek isteyen bu toplumlar üretim sektöründeki araştırmalarını sürdürmekte ve avantajlı opsiyonlar sunan üretim yöntemlerini yüksek oranda tercih etmektedirler.

Sac metal şekillendirme üretim yöntemi havacılık ve otomotiv sektörü başta olmak üzere, beyaz eşya, haberleşme ekipmanları, iklimlendirme cihazları gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde bir binek aracın kaput, kapı, tampon gibi birçok parçası sac şekillendirme üretim yöntemi ile üretilme potansiyeline sahiptir [2]. Havacılık sektöründe de sac metal şekillendirme yöntemi ile üretilen parçaların sayısı oldukça fazladır ve bu nedenle önemini korumaktadır.

Geçmişten günümüze sac metal üretim yöntemleri çalışmalarının sayısı oldukça fazladır. Üretilen parçanın kaliteli ve düşük maliyetli olması esas alınarak, alternatif sac metal üretim yöntemleri üzerinde çalışmalar da yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Alternatif yöntemler arasında oldukça avantajlı yöntemlerden biri olan diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi özellikle havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekillendirme yöntemi, kapalı sistemin sıvı ile basınçlandırılması ve bu basınç sayesinde sistemdeki diyaframın şişirilmesi mantığına dayanmaktadır. Şişirilen diyafram parça üzerine baskı yapar ve şekillendirme gerçekleştirilir. Farklı parçaların kolay, hızlı ve çoklu şekilde üretilebilmesine imkan sağlar [3].

Havacılık sektöründe çeşitliliği fazla olan parçalar olmasına karşın bu parçaların yıllık üretim oranları düşüktür. Bu yüzden, diyaframla hidrolik şekillendirme havacılık sektörü için çok avantajlı bir üretim yöntemidir. Yöntemde diyafram, kalıbın üzerine baskı yaparak parçanın kalıp ile diyafram arasında sıkıştırılır ve üst kalıp yerini alır. Böylece parça şekillenmiş olur [4]. Diyaframın esnek üretim kabiliyeti sayesinde birden fazla parçanın bir arada şekillendirilmesine olanak tanır.

Havacılık sektöründe üretilen sac metal şekillendirme parçaları genellikle kompleks yapılara sahip parçalardır. Özellikle dış bükey kontur yapısına sahip flanşlı parçalar oldukça fazladır. Bunların üretiminde maliyetin, zamanın ve üretim prosesindeki aşamaların en aza indirilmesi hedeflenerek üretim planları hazırlanmaktadır. Bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemle, hem üretim aşamasında ihtiyaç duyulan üretim takımı sayısı azaltılır hem de birçok parçayı bir arada şekillendirilebilecek bir ortam kullanılarak üretim hızlandırılır [5]. Bu önemli avantajların yanında bu gibi parçaların şekillendirilmesinde karşılaşılan bazı sorunlar mevcuttur. Bu sorunların başında kırışma yer almaktadır. Kırışmanın yanında geri esneme ve malzemenin yırtılması gibi sorunlar da gözlenmektedir. Ayrıca, diyaframın şekil verebilmesi için yüksek basınçlar gerekmektedir.

Diyaframla hidrolik şekillendirme ile üretim esnasında meydana gelen kırışmalar, temin edilme süresi ve fiyatı yüksek olan uçak parçalarının hurdaya ayrılmasına neden olur. Bu gibi durumlarda deneme yanılma yöntemi ile kırışma tespit edilir. İlk şekillendirilen uçak parçasında kırışma meydana gelirse, bu parça hurda olarak kabul edilir ve tespit edilen kırışmanın oluşmaması için şekillendirme takımının iyileştirilmesi yoluna gidilir. Bu da ek zaman ve ek işçilik maliyeti yaratmaktadır. Birbirini tetikleyen olayların oluşmasına neden olan bu durum, üretimden elde edilecek kar payını aşağıya çekmekte ve üretim takviminin gerisinde kalmaya yol açmaktadır. Bunların yanında, şekillendirme takım tasarımlarında diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde üretilen her parçanın kırışacağı yaklaşımında bulunarak tasarım yapmak da takım maliyetini ve takım boyutunu artırdığı için verimsiz bir yaklaşım olacağından bu yaklaşım tercih edilmemektedir.

Amaç ve hedefler

Bu tez çalışmasında diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde konturlu yapıya sahip büküm parçalarındaki kırışma problemlerinin deneysel olarak incelenmesi sonucunda, kırışma probleminin önceden tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Böylece kalıp tasarımlarındaki gereksinimler ilk tasarımda uygulanacak ve maliyet, zaman kayıpları engellenecektir.

Çalışmadan elde edilecek sonuçlar doğrultusunda aşağıdaki maddelerde belirtilen durumlar hakkında sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir.

- Al2024-O ve Al2024-W malzemeli sac metallerin, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile konturlu yapıya sahip parça üretme işleminde, malzemenin kırışma problemi bakımından davranışlarının belirlenmesi.
- Sac metal kalınlık değişiminin diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde kırışmaya olan etkisinin incelenmesi.
- Şekillenme sonucunda elde edilen parça flanş uzunluklarının kırışma üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- Kontur yarıçap değerlerinin, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilen parçalarda meydana gelebilecek kırışmaya karşı olan etkisinin incelenmesi.

Tez çalışmasında belirlenen amaç ve hedefler kapsamında, kırışmaya neden olabilecek parametreleri sağlayabilecek bir kalıp tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca deneyde kullanılacak numuneler seçilip parça şekilleri tasarlanmış ve bu numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. - TUSAŞ şirketinde şekillendirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada 120 adet parça şekillendirilmiş, belirtilen yöntem sonucundaki davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımı ile sınır grafikleri oluşturulmuştur. Deney çalışmasının yanı sıra diyaframla hidrolik şekillendirme işlemi, belirlenen numuneler için PAM-STAMP analiz programında çözümlenmiş ve analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Üretim sırasında oluşacak kırışmanın öngörülebildiği takdirde şekil verilecek takımlar, ilk seferde kırışmanın meydana gelmesini önleyecek şekilde tasarlanacaktır ve ortaya çıkacak ek işçilik, zaman ve malzeme kayıplarının önüne geçilecektir. Bu durum neticesinde üretimi istenen ürüne ilk üretim uygulamasında ulaşılabilecektir. Bu avantajı yakalamak için bu tez çalışmasında diyaframla hidrolik şekillendirme üretim yönteminde meydana gelen kırışmalar deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, bilgisayar ortamında yapılan analizler ile karşılaştırılmıştır. Kalıp tasarımının daha doğru biçimde yapılmasını ve nihai ürünün tekrarlanmadan elde edilmesini sağlayacak veriler elde edilmiştir.

Çalışmanın İçeriği

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde sac metal şekillendirmenin önemi, yaygın kullanılan sektörler, diyaframla hidrolik şekillendirme hakkında genel bilgi ve araştırmanın amacından, hedeflerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde literatür araştırması

yapılmış ve bu kapsamda hidrolik şekillendirme yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca diyaframla hidrolik şekillendirmede kırılma problemi anlatılmış, malzeme özelliklerinin tanımları verilmiş ve hidrolik şekillendirme ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde malzeme özellikleri, malzeme test sonuçları verilmiştir ve deneysel yöntem sunulmuştur. Deneysel yöntemde kalıp ve tezgah hakkında bilgi, numune özellikleri, deney parametreleri ve deneyin yapılışı hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde elde edilen deney sonuçları sunulmuş ve sonuçlar tartışılmıştır. Bunun yanında, çalışmada PAM-STAMP analiz programı ile gerçekleştirilen analiz işlemi detaylı şekilde anlatılmış ve elde edilen analiz sonuçları sunulmuştur. Analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Son bölümde ise tez çalışması sonuçları sunulmuş, tartışılmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

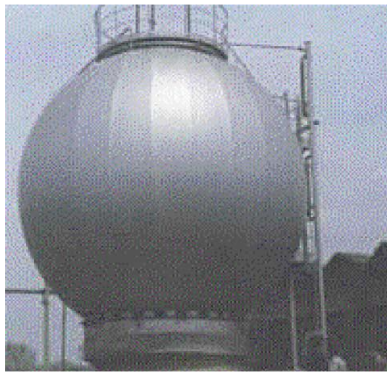
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Hidrolik Şekillendirme Yöntemi

Hidrolik şekillendirme yöntemi, şekillendirme yapılmak istenen parçanın üzerine sıvı yardımıyla kuvvetin iletilmesi ile gerçekleşen şekillendirme prosesidir. Yöntemde kapalı bir sistemdeki sıvının basınçlandırılması ile kuvvet oluşturulur ve bu kuvvet parça şekillendirilmesinde kullanılır. Bu prensiple kabuk şekillendirme, tüp şekillendirme ve sac şekillendirme başlıkları altında tanımlanabilirler.

2.1.1. Hidrolik kabuk şekillendirme

1980'lerin ortalarında Harbin Teknoloji Enstitüsünde başlatılan çalışmalarla hidrolik kabuk şekillendirme yöntemi gelişmeye başlamıştır. Bu yöntem genellikle dekorasyon parçalarının üretiminde kullanılmasının yanı sıra, LPG tankları gibi basınçlı kaplar da bu yöntem ile üretilmesi mümkündür (Resim 2.1 ve Resim 2.2). Hidrolik kabuk şekillendirme prosesi öncelikle oluşturulacak ürünün parçalarının kesilmesi işlemi ile başlar. Daha sonra bu parçalar silindirler aracılığı ile bükülürler. Bükülen parçalar genellikle kaynak yardımı ile birleştirilir. Elde edilen parça son olarak hidrolik kabuk şekillendirme ile istenilen forma getirilir [6,7].



Resim 2.1. Küresel Hidrolik şekillendirilme ile üretilmiş LPG tankı [7]



Resim 2.2. a) Kaynak, b) Hidro şekillendirme uygulaması, c) Form almış parça [8]

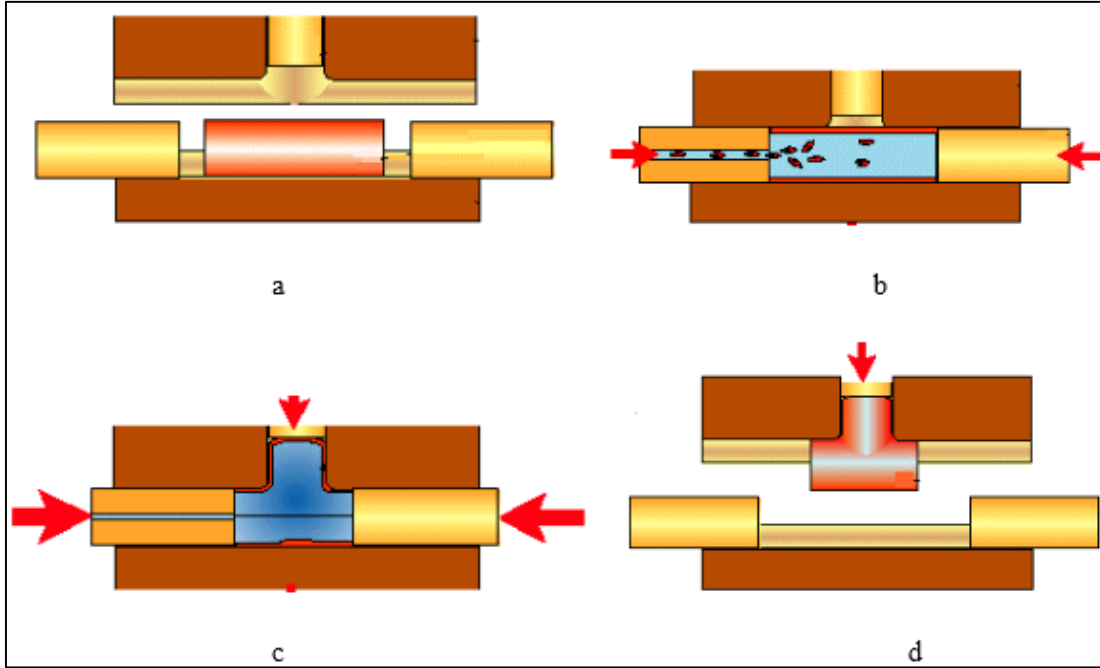
2.1.2. Hidrolik tüp şekillendirme

Hidrolik tüp şekillendirme yönteminde şekil alması istenilen tüp borunun içine uygulanan sıvı basıncı ile parçanın içinde bulunduğu kabın şeklini alması ile şekillendirme meydana getirilmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe tercih edilen bu yöntemde günümüzde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir.

Elde edilmek istenilen parçanın geometrisine göre uygulanan basınç değişmektedir. Karmaşık parçaları üretmek için yüksek basınçlar gerekmektedir. Alçak basınçlı hidrolik şekillendirme yönteminde 80 MPa ile 100 MPa civarında kuvvet uygulanırken yüksek basınçlı hidrolik şekillendirmelerde ise 690 MPa'lık basınçlar uygulanmaktadır [9].

Hidrolik tüp şekillendirme yöntemi temel olarak 4 adım ile gerçekleşmektedir (Şekil 2.1).

- Boru tüp önceden şekillendirilmiş ya da şekillendirilmemiş olarak kalıpların içine yerleştirilir.
- Kalıplar pistonlar yardımıyla kapanır. Eksenel olarak gelen pistonlar da boruyu tutar ve sızdırmazlığı sağlanan borunun içine sıvı akışı başlar. Sıvı olarak su kullanımının yaygındır.
- Ortam içine gönderilen sıvı ile parçanın duvarlarına kuvvet uygulanır ve parça şişirilerek kalıpların duvarlarına sıvanır. Bu adım sonrası parça kalıp şeklini almış olur.
- Son olarak sıvı basıncı azaltılır, sıvı ortamdan uzaklaştırılır. Kalıplar açılarak tüm işlem tamamlanmış olur [9].



Şekil 2.1. Hidrolik tüp şekillendirme prosesi [9]

Karmaşık ve zor parçaları daha kolay elde etmek için hidrolik tüp şekillendirmeden önce parçaya ön şekillendirme uygulaması yapılabilir. Yöntem için kullanılacak kalıplar iç kuvvetlerin büyük olmasından dolayı yüksek mukavemetli olmalıdırlar. Ayrıca parça yüzey kalitesinin iyi olması için kalıpların yüzey kalitesinin iyi olması gerekmektedir.

Hidrolik tüp şekillendirme sayesinde ince parçaların şekillendirilmesinin yapılabiliyor olması ile hafif parçalar elde edilebilmektedir ve bu sayede otomotiv gibi sektörlerde çok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajına karşın proseste yırtılma, bükülme ve burulma gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu problemlerle ilgili çalışmalar sürmekte ve proses üzerindeki parametrelerin bu gibi sorunlarda nelere etki ettiği araştırmaları yapılmaktadır [10].

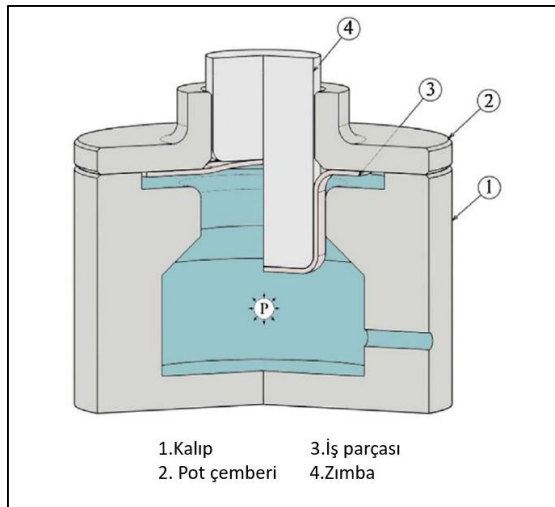
2.1.3. Hidrolik sac şekillendirme

Hidrolik sac metal şekillendirme yöntemi diğer hidrolik şekillendirme yöntemlerinde olduğu gibi sıvı basıncı kuvvetinin şekillendirmede kullanılması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde sac metal şeklini alacağı kalıba yerleştirilir. Üzerine uygulanacak kuvvet hidrolik basınç yardımı ile oluşturulur. Basınç sonucu sac malzeme kalıbın şeklini alır. Burada en büyük avantaj kalıp maliyetinin azalmasıdır. Bunun nedeni, şekillendirilecek geometriye

sadece bir kalıp yardımı ile ulaşılabilir olmasıdır. Kuvvet uygulayan üst kalıp yerine hidrolik kuvvet uygulandığı için, üst kalıba ihtiyaç duyulmadan parça için istenilen geometriye ulaşılmaktadır.

Hidromekanik derin çekme

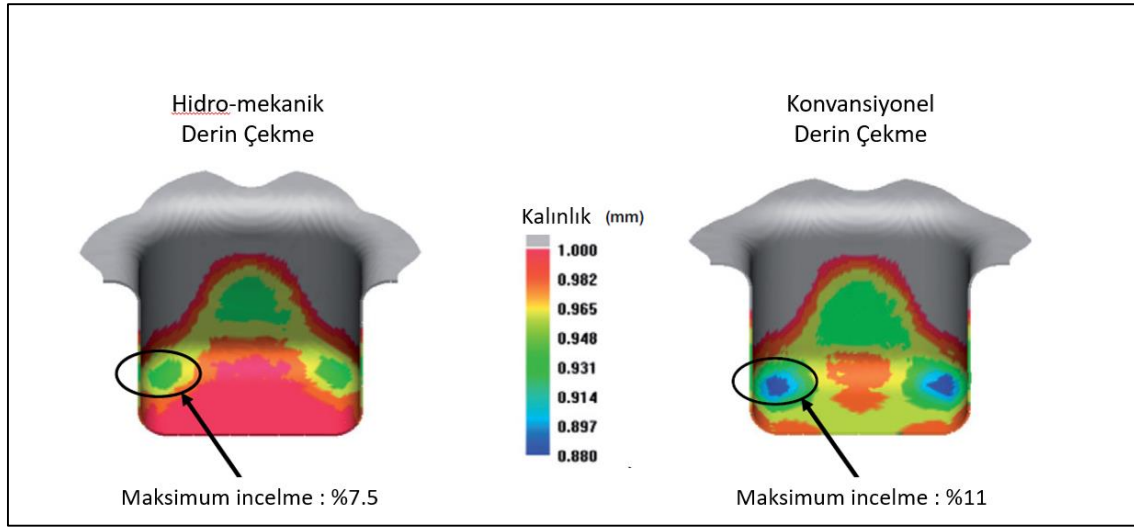
Hidromekanik derin çekme yönteminde, klasik derin çekme işlemini hidrolik bir basınçla yaparak derin çekme üretimindeki kabiliyetler artırılmaktadır. Yöntemde baskı presine bağlı kalıp, şekillendirilmek istenen metal sacın üzerine doğru hareket eder. Sacın altında bir sıvı havuzu bulunmaktadır. Kalıp sac metalinin üzerine doğru ilerledikçe sac, hidrolik sıvı ile kalıp arasında sıkışmaya başlar. Preslenme ve sıkışma arttıkça sac metalin üzerine gelen kuvvet de artar ve sac metal kalıbın şeklini almaya başlar. İstenilen formun verilebilmesi için kalıbın gerekli ilerlemesi sağlanarak şekillendirme için gerekli basınç değerlerine ulaşılır. Şekillendirmenin tamamlanmasıyla kalıba bağlı pres ilk konumunu alır. Bu şekilde sac metale istenilen form verilmiş olur (Şekil 2.2) [11].



Şekil 2.2. Hidromekanik derin çekme yöntemi [12]

Bu yöntemin klasik derin çekme işleminden birçok yön olarak daha avantajlı olduğu söylenebilir. Konvansiyonel yönteme göre hidromekanik derin çekme işleminde şekillendirilen parçanın boyutsal doğruluğu daha iyi olmaktadır. Derin çekme işleminde parçanın derinliği göz önünde bulundurulduğunda en çok karşılaşılan problemlerden bir tanesi de parça şekillendirme esnasında yırtılma yaşamasıdır. Derin çekme işleminde karşılaşılan bu problem, hidromekanik yöntemde malzeme uzamasındaki bölgesel malzeme

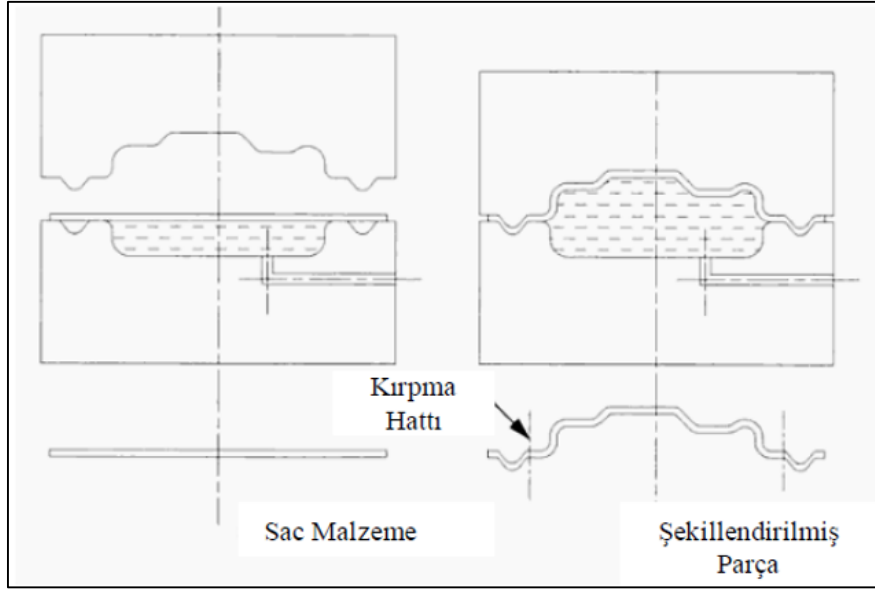
yığılmalarının klasik yöntemle göre daha avantajlı olması nedeniyle parçanın yırtılma olasılığı daha az olduğu yapılan deneylerle gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı özelliklere sahip malzemenin konvansiyonel ve hidromekanik derin çekme ile şekillendirilmesi karşılaştırılması yapılan çalışmalarla, derin çekme prosesinde malzemenin şekillenmesi sonucunda parçada oluşan malzeme incelmesinin konvansiyonel yöntemle göre az olduğu ortaya konulmuştur (Şekil 2.3) [13].



Şekil 2.3. Hidromekanik ve konvansiyonel derin çekme yönteminde malzeme incelişimi [13]

Gerdirmeye yapılarak hidrolik şekillendirme

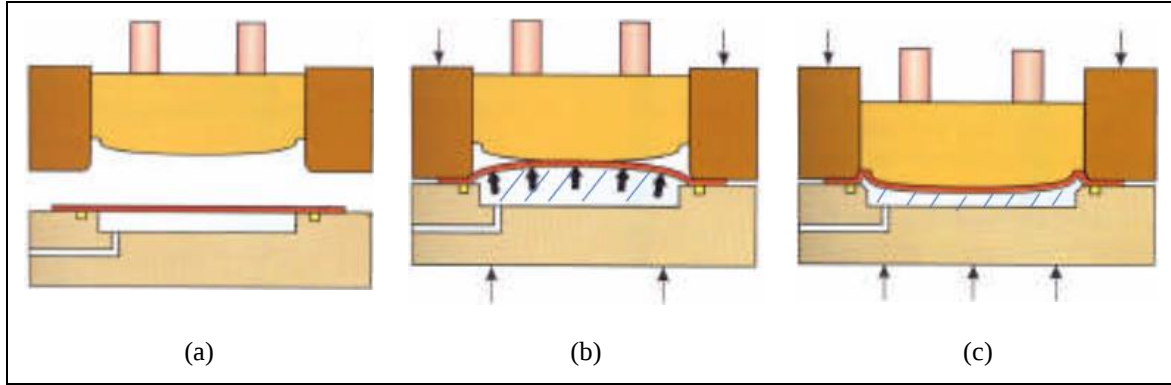
Yöntem, gerdirerek sac şekillendirme yöntemindeki kuvvetin hidrolik basınç ile sağlanmasıyla şekillendirmenin gerçekleştirilmesidir. Bu yöntemde alt ve üst kalıp olmak üzere iki kalıp kullanılmaktadır. Sac metal kalıplar arasına yerleştirilir. Kalıbın hareketi ile sac metal iki kalıp arasında sıkışarak kenarlarından sabitlenir. Tek taraftan sıvı basıncı sağlanarak malzeme diğer kalıba doğru ilerlemesi ve basıncın artışı ile kalıba sıvanması sağlanır. Bu işlem gerçekleşirken, malzemenin kenarlarından kilitlenmesi sonucunda malzeme sabit olan bu kenarlardan gerilir ve şekillendirme sırasında basıncın artışı ile gerdirmeye işlemi de devam eder. Sıvama işlemi tamamlandığında sıvı basıncı düşürülür ve kalıplar birbirinden ayrılarak proses tamamlanmış olur (Şekil 2.4) [14].



Şekil 2.4. Gerdirerek hidrolik şekillendirme [14]

Gerdirerek hidromekanik derin çekme yöntemi

Yöntem gerdirerek yapılan hidrolik şekillendirme ile hidromekanik derin çekme yönteminin birlikte kullanılması yolu ile gerçekleşmektedir. Bu yöntem, iki yöntemin de avantajını kullanarak derin çekme işleminden oluşan parçanın kaliteli şekilde üretilmesi planlanarak geliştirilmiştir. Burada sac metal kenarları kalıbın kapanma hareketi ile sıkıştırılır ve böylece kenarlar sabitlenmiş olur. Alt kalıpta kalan boşluğa sıvı doldurularak sacın üst kalıba doğru şişirilmesi sağlanır. Daha sonra şişirilmiş olan saca doğru üst kalıp ilerler. İlerleme arttıkça sacın alt kısmını dolduran sıvı basıncı artar ve parça şekillenmeye başlar. Parça bu sırada sabit tutulan kenarlarından gerilir. Üst kalıbın ilerlemesine karşın sıvı basıncının artması ile malzeme üst kalıbın şeklini almaya devam eder ve sonunda istenilen şekle ulaşır. Şekillenen parça iyi yüzey kalitesine sahip olur. Bu yöntem sayesinde derin çekme miktarında iyi seviyeler elde edilebilmektedir (Şekil 2.5) [15].



Şekil 2.5. Gerdirerek hidromekanik derin çekme yöntemi: a) Sac metalin kalıba yerleştirilmesi, b) Sac metalinin sıvı ile şişirilmesi ve kalıpların ilerlemesi, c) Şekillendirme [15]

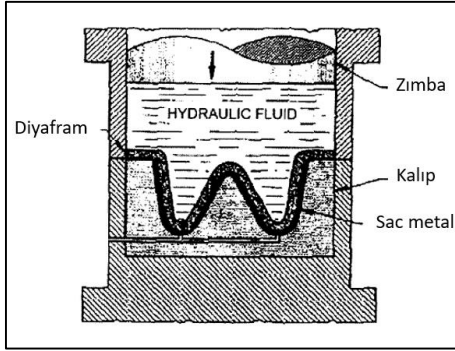
Diyaframla hidrolik şekillendirme

Diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde şekillendirme prensibi sıvının basıncına dayanmaktadır. Yöntemde sıvının bulunduğu bölge bir diyafram ile kapatılmaktadır. Buradaki amaç diyaframın esnekliğinde yararlanarak esnek bir üretim kabiliyeti sağlamaktır.

Şekillendirilmek istenilen sac metal kalıbın üzerine konulur ve kalıp diyaframla örtülmüş sıvı alanına doğru hareket eder. Kalıbın hidrolik havuza doğru ilerlemesi sac malzemenin diyafram ile kalıp arasında sıkışmasına neden olur. Diyaframın elastik yapısı sayesinde diyafram sac malzemeyi kalıbın üzerine sıvayarak üst kalıp görevini yerine getirmiş olur.

Diyaframın esneyerek üst kalıbı oluşturması ile birlikte yöntem çoklu parça üretimine olanak sağlar. Birden fazla kalıbın aynı diyaframa doğru aynı anda ilerlemesi ile oluşan basınç kuvveti sayesinde, diyafram tüm kalıpların üzerine baskı yaparak üst kalıp görevini yerine getirir. Böylece farklı parçaların bir arada üretilmesi sağlanmış olur.

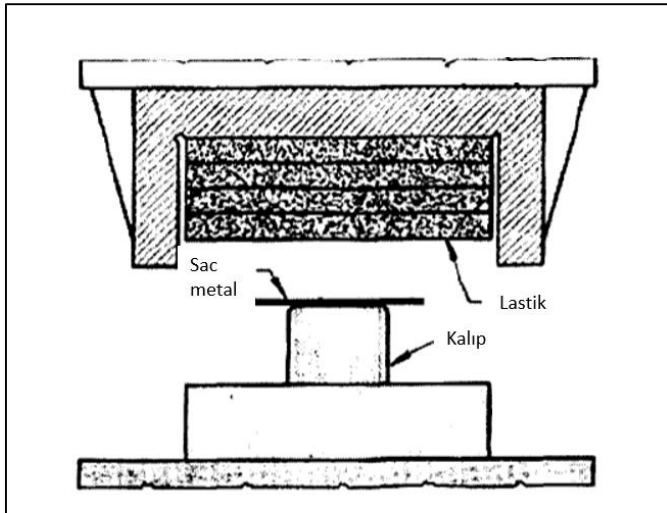
Havacılık sektöründe parça çeşitliliğinin fazla olması nedeni ile diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır [16, 17,18].



Şekil 2.6. Diyaframla hidrolik şekillendirme [16]

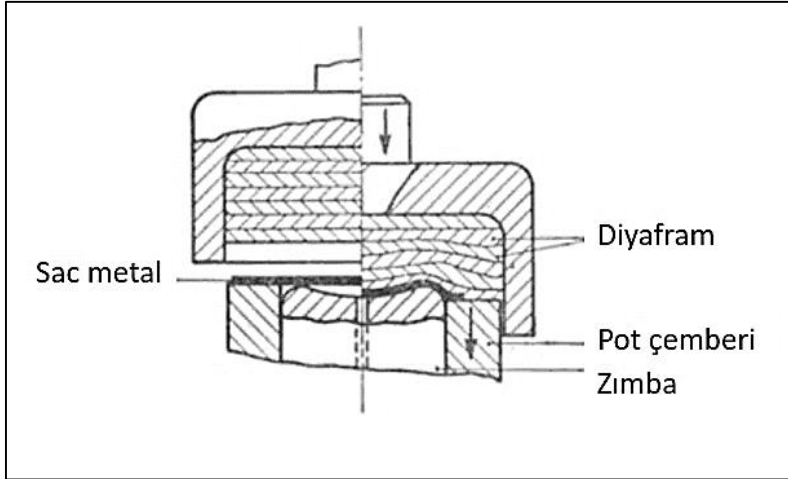
Diyaframla hidrolik şekillendirmenin teknikleri ve uygulanış biçimlerine göre farklı yöntem adları ile tanımlanmıştır. Bunlardan en çok bilinenleri Guerin, Marform, Verson ve Hidroform yöntemleridir.

Guerin yöntemi diyaframla şekillendirme denemelerinin ilk tekniklerdendir ve en basit halidir. Burada kalıbın üzerine ilerleyen ve ilerleme arttıkça iş parçasının üzerine baskı yapan lastik, şekil verme işleminde görev almaktadır (Şekil 2.7) [16, 17].



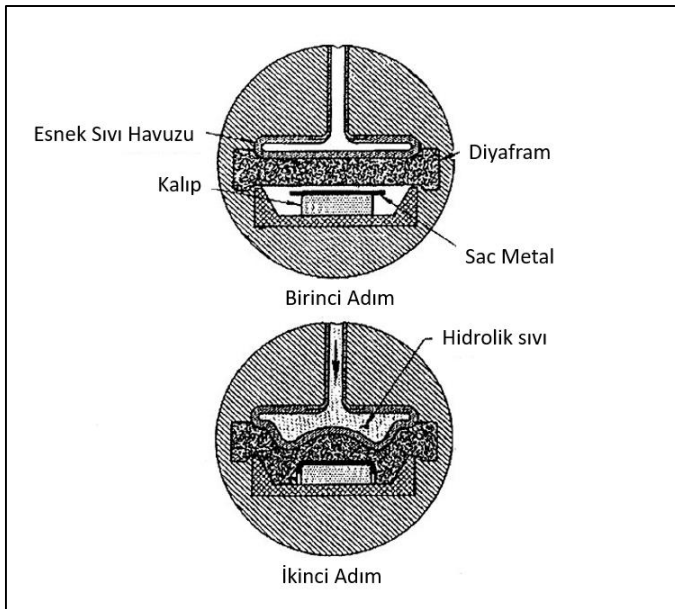
Şekil 2.7. Guerin yöntemi [16]

Marform yönteminde, sıvı havuzundaki hidrolik sıvının basınç değerleri pot çemberinin hareket etmesi ile proseste istenilen seviyelerde tutulur. Buradaki hidrolik sıvıyı istenilen değerlerdeki basınçlara ulaştırılması sayesinde kontrollü şekillendirme sağlanmış olur. Derin çekme işlemlerinde kontrollü üretim, üretim kalitesi açısından avantaj sağlamaktadır ve çekme oranının yüksek olmasına önemli derecede katkıda bulunmaktadır (Şekil 2.8) [17].



Şekil 2.8. Marform yöntemi [17]

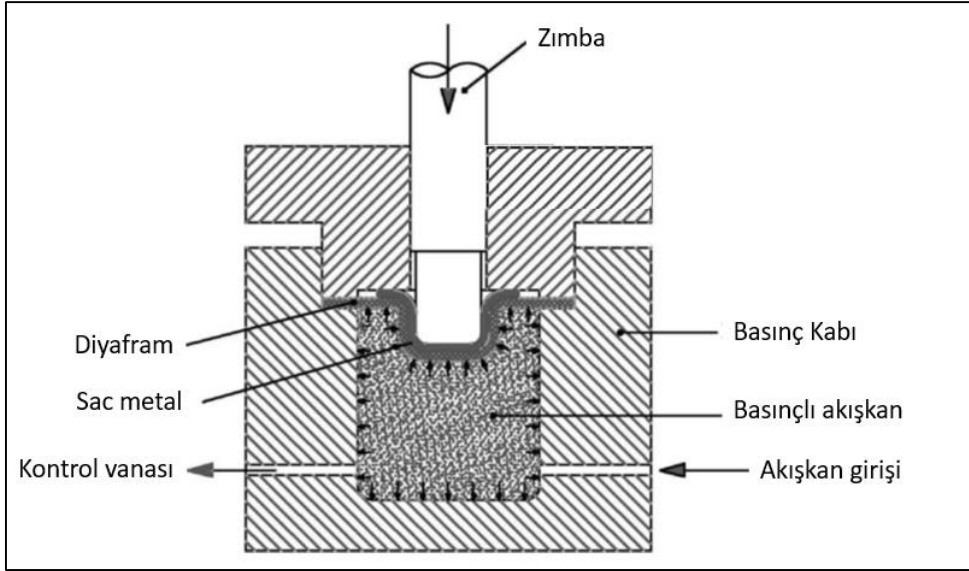
Verson yönteminde diyafram zar içinde basınçlandırılan hidrolik sıvı sayesinde kalıbın üzerine gelen kauçuk diyafram, sac metali şekillendirir. Bu yöntem ile konvansiyonel şekillendirmelere göre daha iyi şekillendirmeler elde edilir. Bunun nedeni, diyaframın basınçlandırılması ile sac metalin üzerine sıvanması ve parçanın üzerine de yanlarına da kuvvet dağılımı gösterip parçaya şekillendirme yapılmasıdır (Şekil 2.9) [16, 18].



Şekil 2.9. Verson yöntemi [16]

Hidroform yöntemi, hidrolik sıvı basılan basınçlandırma kabına kalıbın bulunduğu zımbanın ilerlemesi prensibine dayanır. Bu ilerleme ile sıvı basınçlandırılan bölmenin bir duvarındaki diyafram ile kalıp arasındaki sac metal sıkıştırılarak diyaframın sac metalini sarması ve sac

metalinin kalıba sıvanmasını sağlamaktadır. Zımbanın ilerlemesi karşısındaki hidrolik basıncın kontrol edilmesi ile şekillendirme işleminde oluşabilecek şekil bozukluklarının önüne geçilebilirliği sağlanmaktadır. Ayrıca diyaframın, şekillenme sürecinde sac metal sarması parçada meydana gelebilecek olası incelme problemini azaltmaya yardımcı olmaktadır (Şekil 2.10) [17,19].



Şekil 2.10. Hidroform yöntemi [11]

Genel olarak incelendiğinde hidrolik şekillendirmenin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Üretilen parçalar iyi yüzey kalitesine sahiptirler.
- Üst kalıp yerine hidrolik basınç kullanılması sebebiyle daha karmaşık ve zor geometrili parçalar bu yöntemle şekillendirilebilir.
- Üst kalıba ihtiyaç duyulmaması nedeniyle kalıp için gerekli olan maliyet, zaman ve işçilikten avantaj sağlanır.
- Şekillenen parçaların boyutsal hassasiyeti istenilen değerlere yakın olacak şekilde elde edilir [19].
- Hidrolik basınç, şekillenmesi istenilen parçayı şekillenme sırasında sardığı ve kuvveti daha homojen şekilde uygulaması sonucunda şekillenen parçada incelme olayı konvansiyonel yöntemle göre daha azdır [13].
- Üst kalıp yerine hidrolik basınç uygulaması sebebi ve bu hidrolik kısım alt kalıbın şekline göre şekillendirmek istenilen parçayı sardığı için farklı parçaların bir arada üretilmesi

mümkündür. Bu üretim şekli ile havacılık sektörü gibi parça çeşitliliği fazla olan sektörlerde maliyet açısından önemli miktarda avantaj sağlamaktadır.

Hidrolik şekillendirmenin avantajlarının çok olmasının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Farklı geometriye sahip parçaları bir arada üretebilmesi ile avantaj sağlamasına karşın tek tip parçanın üretiminde prosesin yavaş kalması nedeni ile seri üretime uygun değildir.
- Şekillendirmenin meydana gelmesi için yüksek hidrolik basınçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu basınçları elde etmek için yüksek maliyetli ekipmanlar kullanılması gerektiğinden ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- Hidrolik sızdırmazlık iyi olmasına rağmen her zaman sızdırma riski taşımaktadır.

Konvansiyonel yöntemler ile karşılaştırıldığında üretim kabiliyetlerinin yüksek olması ve yapılan araştırmalar neticesinde yöntemin sonuçları kapsamında yapılan değerlendirmelerle hidrolik şekillendirme yöntemi birçok sektörde tercih edilmektedir.

2.2. Diyaframla Hidrolik Şekillendirmede Kırışma Problemi

Endüstride sac metal şekillendirmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. İnce sac malzemeden kapaklar hazırlamak gibi basit parçalardan karmaşık, mukavemeti yüksek ve hafif olması istenilen uçak parçalarına kadar üretilen parça yelpazesi çok geniştir. Bu yaygın üretiminin gelişmesi, karmaşık parçaları üretilebilirlik seviyesinin yükselmesi ve karşılaşılabilecek sorunları en aza indirme davranışları üretime önemli derecede kazanç sağlayacaktır.

Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi özellikle havacılık sanayinde çokça kullanılan bir yöntemdir. Üretilen parçaların çok çeşitli olmasına karşın tek çeşit parça üretim adedinin az oluşu bu duruma etkindir. Bunun nedeni uçak teknolojisinin çok yüksek olması ve yıllık üretilen uçak sayılarının otomotiv sanayisi gibi seri üretim yapan sanayilere nazaran daha az nihai üretiminin gerçekleşmesidir. Havacılık sektöründe kullanılan ham maddeler özenle seçilmekte ve yüksek maliyetlerle elde edilmektedir. Bu nedenle üretimde hurda malzeme sayısını en az seviyede tutmak üretim karının yüksek olması yönünden büyük önem teşkil etmektedir.

Diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde yaygın olarak karşılaşılan problemlerin başında kırışma problemi yer almaktadır. Sac metallerin şekillendirilmesi sırasında kırışma ile en çok konturlu yapıya sahip parçalarda karşılaşılmaktadır. Konturlu yapıya sahip parçaların dış bükeydeki flanşlarının şekillendirilmesinde malzemenin yığılması sonucunda kırışma meydana gelmektedir. Bu duruma etki eden temel neden şekillendirme sonucunda elde edilecek flanşın yay uzunluğunun, şekillendirilmemiş olan sac malzemedeki yay uzunluğundan daha küçük olmasıdır. Bu yaklaşım ile flanşın boyunun artması sıkıştırma miktarının artışına neden olacaktır [20].

Altan ve arkadaşları [21] çalışmalarında sac metal şekillendirmede meydana gelen kırışmaları incelemiş ve matematiksel modelleme oluşturmuşlardır. Şekil 2.11’de konturlu yarıçapa sahip şekillenecek parçanın sac metal şekli ve şekillenmiş hali şematik olarak verilmiştir. Burada R_1 numunenin boyunu, R_0 ise şekillendikten sonra düz kalan alanın yarıçap değerini, R_T parçanın bükme yarıçap bitişine kadar olan uzaklığı, r_0 bükme yarıçapını, α ise flanş açısını göstermektedir. Kalıptaki kontur yarıçapı ve sac metalin bükülmesinden kaynaklanan bükülmede yarıçapı boyunca iç kısmında sıkışma, dış kısmında ise gerilme oluşmaktadır.

Hill'in [22] anizotropik malzemeler fonksiyonu kullanıldığında, gerinim faktörü (f) ve ortalama anizotropi ($\bar{R}$) ile aşağıdaki denklem elde edilmektedir;

$$\varepsilon_r = -\frac{\bar{R}}{1+\bar{R}}\varepsilon_\theta = -f\varepsilon_\theta \quad (2.4)$$

$$f = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_\theta} = \frac{\bar{R}}{1+\bar{R}} \quad (2.5)$$

2.1 ve 2.2 denklemlerini 2.3 denkleminde yerlerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilmektedir;

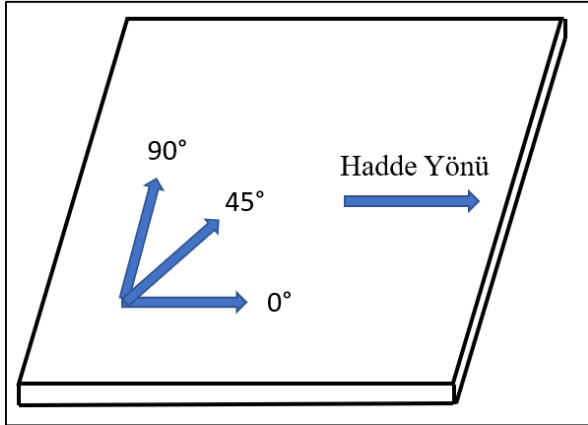
$$[\rho(s)]^f ds = r^f dr \quad (2.6)$$

Denklemden de görüldüğü gibi gerinim faktörü, flanş uzunluğu ve şekil değiştirme arasında bir ilişki vardır [21].

Kırışmanın meydana geldiği şekillendirilmiş parçaları düzeltmek mümkün olmamakta ve bu parçalar hurdaya ayrılmaktadır. Sac malzemenin şekillendirilmesiyle üretilen parça için gerekli olan malzeme temini, kalıp tasarımı, kalıp üretimi, malzeme kesimi ve temizlenmesi, malzemenin şekillendirilmesi gibi genel olarak işlemler sıralandığında tüm bu işlemler sonucu parçanın hurda ayrılması büyük ölçüde maddi kayba neden olmaktadır. Hurdaya ayrılan parça belirlendiğinde ilk yaklaşım olarak kırışma meydana gelmemesi için kalıba gereken iyileştirmeler yapılmaktadır. Eğer kalıp düzeltilemiyorsa yeni kalıp tasarlanır, imal edilir ve tüm proses bir daha işler. Bu durum üretim işleminin birden fazla tekrarlı şekilde yapılarak hem malzeme kayıplarına hem de işçilik kayıplarına neden olmaktadır.

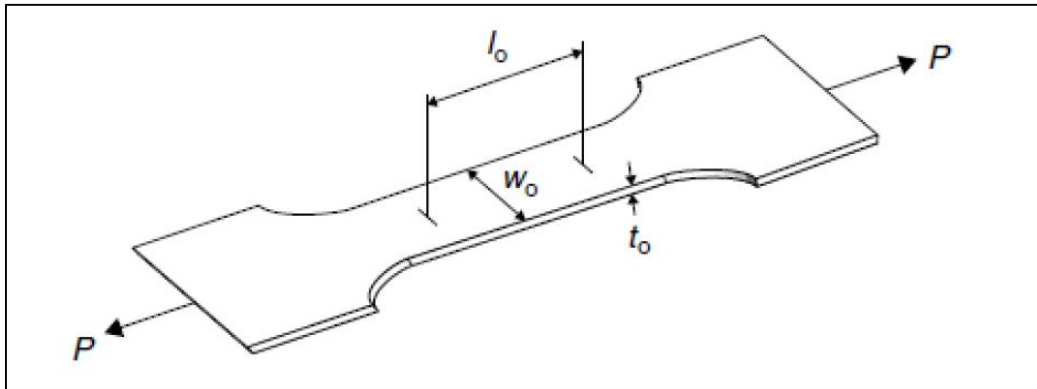
2.3. Anizotropi

Malzemelerin her yöndeki mekanik özellikleri aynı olması durumunda malzemeye izotropik malzeme adı verilmektedir. Malzeme bahsedilen izotropik malzeme tanımının aksine, farklı yönlerde farklı mekanik özelliklere sahip olabilir. Bu tür malzemelere ise anizotropik malzeme denir. Bu yönler genellikle haddelenmiş malzemelerde hadde yönüne 0° , hadde yönüne dik yöne 90° ve iki açı arasındaki yöne ise 45° olarak tanımlanmaktadır [23] (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Malzemelerin hadde yönlerine göre derecelendirilmesi

Çekme deneylerinde gerçekleşen şekil değiştirmedeki numunenin enindeki şekil değiştirme değeri ε_w , kalınlığındaki şekil değiştirme değeri ε_t ve anizotropi faktör değeri de R olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Çekme deneyinde kullanılacak numune geometrisi [24]

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (2.7)$$

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (2.9)$$

R değerinin 1'e eşit olması, malzemenin izotropik olduğunu göstermektedir.

0°, 45° ve 90° de alınan numunelerde yapılan çekme testinde farklı R değerleri sonuçlarına ulaşılabilir. Bu değerler sırasıyla, R_0 , R_{45} ve R_{90} olarak tanımlanır. Bu değerler ile düzlemsel anizotropi (ΔR) ve ortalama anizotropi ($\bar{R}$) değerlerine ulaşılabilir [24].

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (2.10)$$

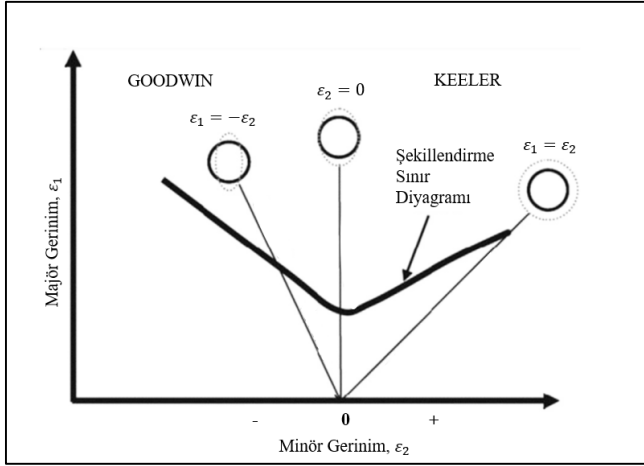
$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (2.11)$$

2.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı

Sac şekillendirme yöntemlerinde limitleri belirlemek için şekillendirme sınır diyagramlarından yararlanılır. Bu diyagramlar yapılacak şekillendirmeler ve gereksinimleri için yol gösterici olmaktadır. Bu nedenle şekillendirme sınır diyagramları malzeme seçimi ve üretim konularında büyük önem teşkil etmektedir.

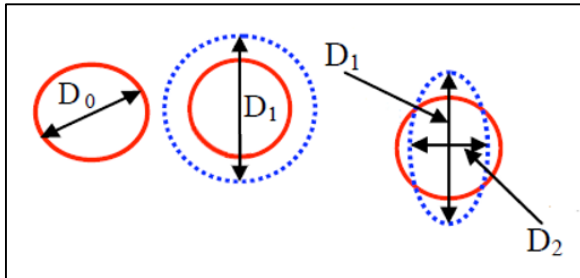
Sac malzemeler şekillendirilirken karşılaşılan en yaygın problemler kırışma, yırtılma ve şekillendirilen parça üzerinde meydana gelen dalgalanmalardır. Sac şekillendirilme işleminde karşılaşılan bu problemler malzeme yapısı ve davranışı sonucunda oluşmaktadır. Şekillendirme sınır diyagramları sayesinde bu sorunlara yol açacak malzemenin davranışları için öngörü sağlanabilmektedir. Öngörü sayesinde malzeme ve şekillendirme yöntemi belirlenerek üretimde meydana gelebilecek problemlerin önüne geçilebilir ve maliyet ve zaman kayıpları da önlenebilir.

Keeler [25], 1961 yılında şekillendirme sınır diyagramlarının temel taşlarını atmıştır. Gerçekleştirdiği çalışmasında diyagrama pozitif majör ($\varepsilon_1 > 0$) ve pozitif minör ($\varepsilon_2 > 0$) birim deformasyonlarını çizmiştir. Bu bölge kullanılan sınır diyagramlarının sağ tarafında bulunan alanı temsil etmektedir. Goodwin [26] ise çalışmaları ile diyagrama pozitif majör ($\varepsilon_1 > 0$) ve negatif minör ($\varepsilon_2 < 0$) gerinimlerini çizerek diyagramın sol kısmını oluşturmuştur. Böylece kullanılan sınır diyagramı yapısı tamamlanmıştır (Şekil 2.14).



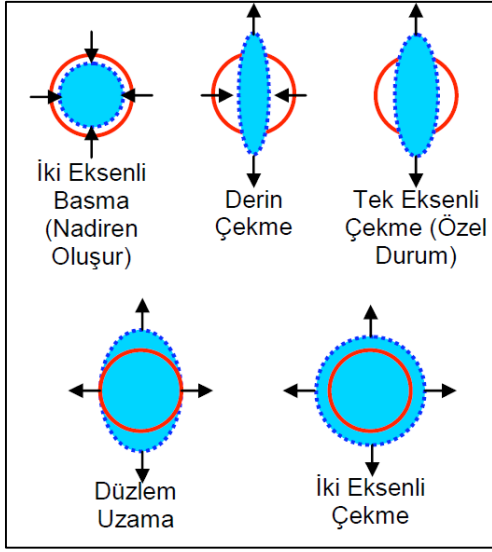
Şekil 2.14. Şekillendirme sınır diyagramı [27]

Şekillendirme sınır diyagramlarını oluşturmak için kullanılan yöntemlerden biri malzeme üzerine daire veya küre ızgaralar çizilmesidir. Üzerine daireler çizilen numune çekme deneyleri ile şekillendirilir ve çatlama, yırtılma olana kadar yük vermeye devam edilir. Şekillendirme öncesi işaretlenen dairenin çapı D_0 olarak kabul edilir. Şekillendirme sonrası belirlenen dairelerin en büyük eksenini D_1 , en küçük eksenini ise D_2 olarak tanımlanır (Şekil 2.15).



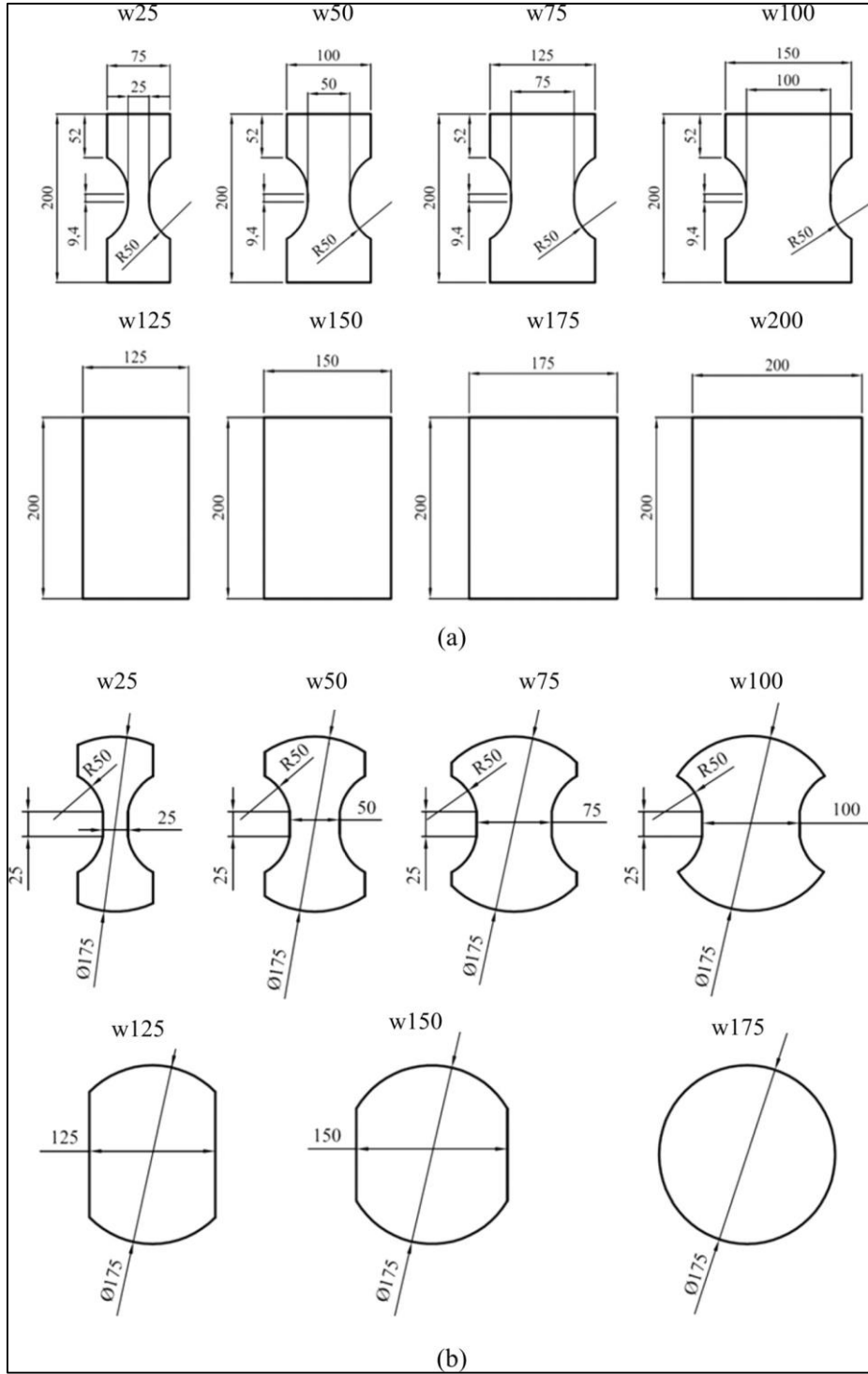
Şekil 2.15. Şekillendirme öncesi ve sonrası daire tanımlamaları [28]

Şekillendirme sonrasında Şekil 2.16'da belirtilen D_1 ve D_2 'nin D_0 a göre durumları karşılaştırılarak oluşan uzama, basma, derin çekme, basma, tek ve iki eksenli çekme oluşumları tespit edilerek şekillendirme sınır diyagramı oluşturulmaktadır [28].



Şekil 2.16. Şekillendirmede malzeme şekil değiştirmeleri [28]

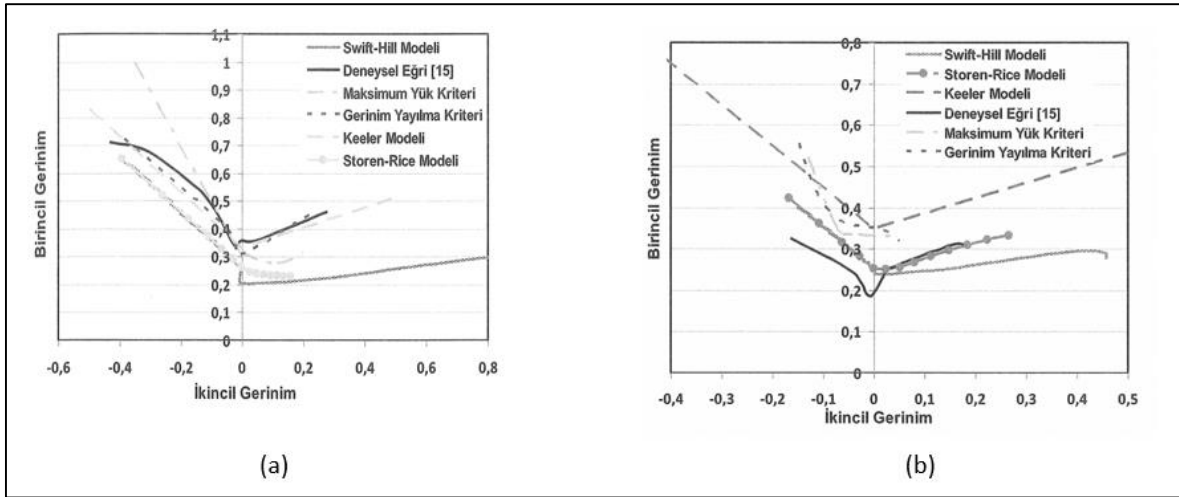
Dilmeç, Halkacı, Öztürk ve Türköz [29] çalışmalarında, ASTM E2218-02 ve ISO 12004-2 standartlarına göre oluşturdukları şekil sınır diyagramlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada Al2024-T4 ve AA5754-O malzemelerini kullanılmıştır. ISO standardında ve ASTM standardında hazırlanan numunelerin geometrileri birbirinden farklıdır (Şekil 2.17). Hazırlanan numuneler bir adet zımbaya sahip olan test düzeneğinde şekillendirilmiştir. Numune yırtılana kadar zımbanın ilerlemesi ve numune üzerindeki birim deformasyonların ölçülmesi yöntemi ile şekillendirme sınır diyagramları oluşturulmuştur. ISO standardındaki numunelerin dairesel olması nedeni ile düzgün bir yük dağılımı sağlanmış ve malzeme kubbe biçimde şekillenmiştir. ASTM standardındaki numunelerin şekillendirilmesi sırasında çift boyun sorunu ortaya çıkmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde ISO eğrilerinin ASTM standardına göre daha güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.17. Şekillendirme sınır diyagramı test numuneleri a) ASTM E2218-02, b) ISO 12004-2 [29]

Şanay ve Kaftanoğlu [30], 0,81 mm kalınlığında Al2024-O ve 0,58 mm kalınlığında SAE 1006 çeliği için şekillendirme sınır diyagramı yöntemleri yaklaşımları ile nümerik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak şekillendirme sınır diyagramları çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Nakazima test yöntemini kullanmışlardır. Dairesel

kalıptaki sac metal üzerine yarım küre şeklindeki zımbanın ilerlemesi prensibine dayanan yöntem ile her malzeme için 7 adet numune şekillendirerek deneysel sonuçları elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda elde ettikleri şekillendirme sınır diyagramlarında SAE 1006 malzemesinde deneysel ve nümerik sonuçların daha yakın olduğunu, Al2024-O malzemesinde ise deneysel sonuçların nümerik sonuçlar ile farklı olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.18).



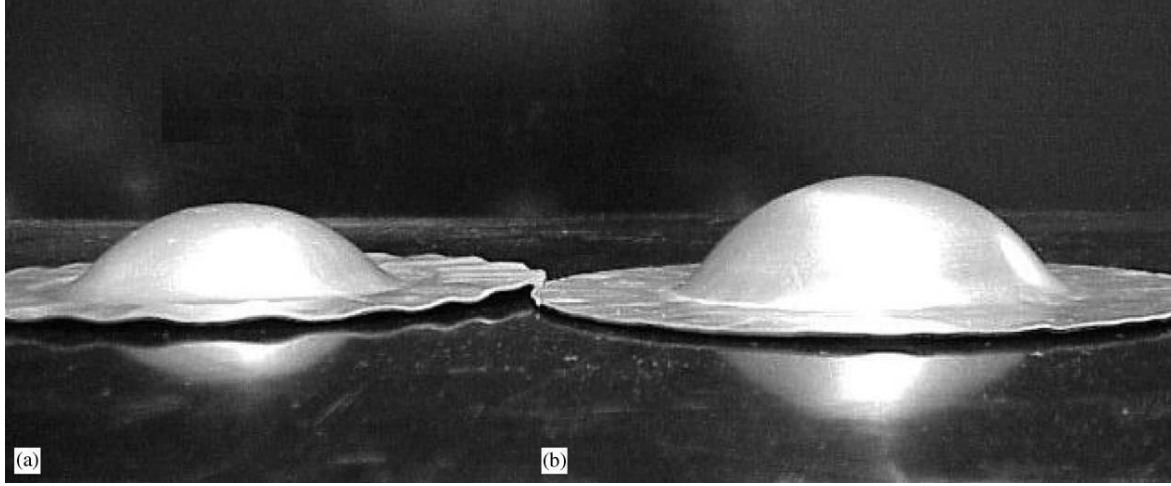
Şekil 2.18. a) SAE 1006 malzemesi için şekillendirme sınır diyagramı b) Al2024 malzemesi için şekillendirme sınır diyagramı [30]

Sac malzemeler için oluşturulan sınır diyagramı yaklaşımları deney koşullarında gerçekleştirilmektedir. Endüstriyel koşullarda uygulanan deneyler ise üretici bakımından daha yakın sonuçlar elde edilmesi sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında kırışma problemi için gerçekleştirilecek sınır şekillendirmeler endüstri ortamında oluşturulmaktadır ve üretim için yakın değerler elde edilmiştir.

2.5. Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Abedrabbo ve arkadaşları [31] yaptıkları çalışmalarında hidrolik şekillendirme yöntemi ile alüminyum 6111-T4 ün yarım küre şeklinde şekillendirilmesinde oluşan kırışıklıkları deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında deneysel olarak hidrolik basınç olmadan şekillendirme ve hidrolik basınç kullanarak şekillendirme yöntemini karşılaştırmışlardır. Hidrolik basınçlandırmasız olarak yaptıkları şekillendirme deneyinde zımba ilerlemesi 17,8 mm olarak belirlenmiş ve bu derinlikteki parçada kırışmalar oluşmuştur. Bu duruma karşın hidrolik basınçtan yararlanılarak yapılan şekillendirmede

zımbanın 30.5 mm ilerlemesine rağmen şekillenen parçada kırışıklık olmadığı gözlemlenmiştir (Resim 2.3).



Resim 2.3. a) Hidrolik basınç kullanmadan yapılan şekillendirme b) Hidrolik basınçla yapılan şekillendirme [31]

Sun, Wan ve Wu'nun [32] yaptıkları çalışmada Ti-15-3 malzemesinin kauçuk ile şekillendirilmesinde oluşan kırışıklıkları deneysel ve sonlu elemanlar analizinde incelemişlerdir. Sonlu eleman analiz programı olarak ABAQUS programını kullanmışlardır. Dış bükey form verdikleri parçada 4 adet kırışma oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Şekillendirdikleri bu parçayı sonlu analiz programında 3 mm x 3 mm mesh boyutları kullanarak analiz ettiklerinde sonucun deneysel sonuç ile çok yakın olduğunu, sadece %8 hata oranı ile gerçeğe yakın sonuçlar aldıklarını kaydetmişlerdir. Çalışmaları sonucunda Ti-15-3 malzemesinin şekillendirilmesinin zor olduğu kanaatine varmışlardır.

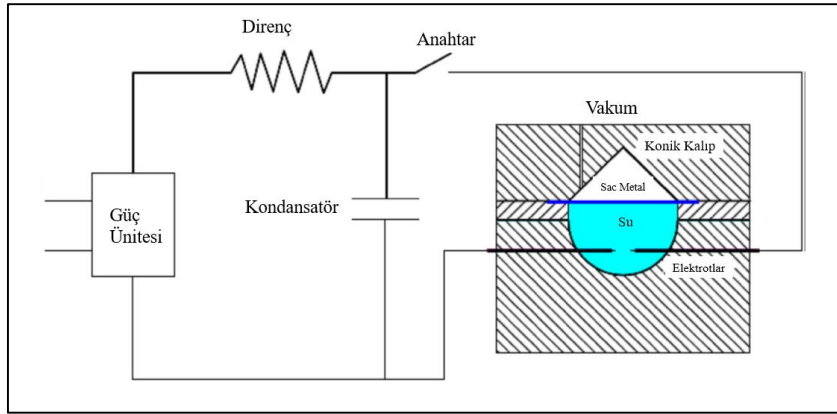
Vollertsen [33] tarafından gerçekleştirilen çalışmada hidroform yöntemiyle şekillendirilen sac metallerde oluşan kırışmalar incelenmiştir. Çalışmada, hidroform ile yapılan şekillendirmede konvansiyonel yöntemlerle oluşan kırışıklıklarının yanında bir de 'ters çekme kırışıklıkları' olarak adlandırılan kırışıklıklar üzerinde durulmuştur. Ters çekme kırışıklıklarının, hidroform yöntemi ile şekillendirme yapılması esnasında zımbanın hareket ederken zımba, diyafram ve tutucular arasındaki boşluktan oluştuğu değerlendirilmesi yapılmıştır (Şekil 2.19). Burada kullanılan analitik model ile 1mm lik çelik sacı için 6 MPa ilk basınç kullanılması kırışık oluşumunu engelleyen optimum basınç olarak belirlenmiştir. Ayrıca zımba kenar yarıçapının da kırışıklık oluşmasına önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.

tasarlanmıştır. Zımbanın yan duvarlarının kesiştiği yerler 5 mm yarıçap olarak işlenmiş, al kısmı ise 9,5 mm yarıçap boyutunda işlenmiştir. Deneyde her bir malzeme için hidrolik sıvı basınçlı ve hidrolik sıvı basıncı kullanılmadan şekillendirme yapılmıştır. Hidrolik basınç kullanılmadan yapılan şekillendirmelerde sac metaller yan duvarların şeklini almamış olarak gözlemlenmiştir. Hidrolik şekillendirmelerde ve hidrolik basınç kullanılmadan yapılan şekillendirmelerde C1006 serisi sac malzemesinin deneysel sonuçlarında, malzemenin düşük kalınlıkta olmasından dolayı en fazla kırışıklıkların bu malzemede olduğu gözlemlenmiştir. Birim uzama miktarlarına ve çekme yüksekliklerine bakılarak deneyde kullanılan malzemeler arasında C1006 serisi malzemenin hidrolik şekillendirme yönteminde en iyi şekillendirilebilen malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm deneyler sonucunda yapılan karşılaştırmalar ile hidrolik şekillendirme yönteminin sıvı basıncı kullanılmadan yapılan şekillendirmeler karşısında şekillendirme bakımından daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Liu ve arkadaşları [36] hidromekanik derin çekme yönteminde ön şişirme işlemi uygulanmasının şekillenen parçaya olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 1 mm kalınlığındaki Al 2A12 malzemesini kullanmışlardır. Tasarladıkları 260 mm x 167 mm x 80 mm ana boyutlarındaki parçayı belirledikleri parçayı ön şişirme kullanmadan ve ön şişirme uygulayarak hidromekanik şekillendirme yöntemi ile şekillendirmişlerdir. Ön şişirme ile basınçlandırılmadan zımbanın karşısındaki hidrolik basıncı 5 MPa ve 30 MPa olarak iki şekillendirmeyi deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. 5 MPa'lık şekillendirmede kırışıklıklar, 30 MPa'lık şekillendirme de ise yırtılmalar meydana gelmiştir. Ön şişirme yönteminde ise 3 farklı ön şişirme basıncı ve 15 MPa hidrolik şekillendirme basıncı kullanmışlardır. İlk deneylerinde 1 MPa ön şişirme basıncı uygulamışlar ve şekillendirme sonunda kırışıklıklar gözlemlenmişlerdir. İkinci deneyde 3,5 MPa, üçüncü deneylerinde ise 5 MPa ön şişirme basıncı uygulamışlar ve kırışiksız ürün elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda hidromekanik şekillendirme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen kavisli şekillendirmelerde ön şişirme basıncının teğetsel baskı stresini azalttığını ve bunun sonucunda kırışıklıkları azaldığı görülmüştür.

Cheng ve arkadaşları [37] hidrolik şekillendirme teknolojisinin konvansiyonel yöntemlere göre sac metallerinin daha iyi şekillendirilebilirliğinin avantajı konusunda yöntemin

teknolojisine katkıda bulunmak amacıyla konu üzerinde alternatif çalışma gerçekleştirmişlerdir. DP600 çelik sac metal elektro-hidrolik kalıpta şekillendirilebilme davranışı üzerinde incelemeler yapmışlardır. Yöntemde hidrolik şekillendirme yöntemindeki kalıba benzer bir kalıba ek olarak suyun bulunduğu kapalı oda tarafına elektrotlar yerleştirilmiştir. Elektrotlardaki yüksek voltaj sayesinde suda oluşan yüksek şok dalgaları ile metal sac kalıba sıvanmaktadır (Şekil 2.20).



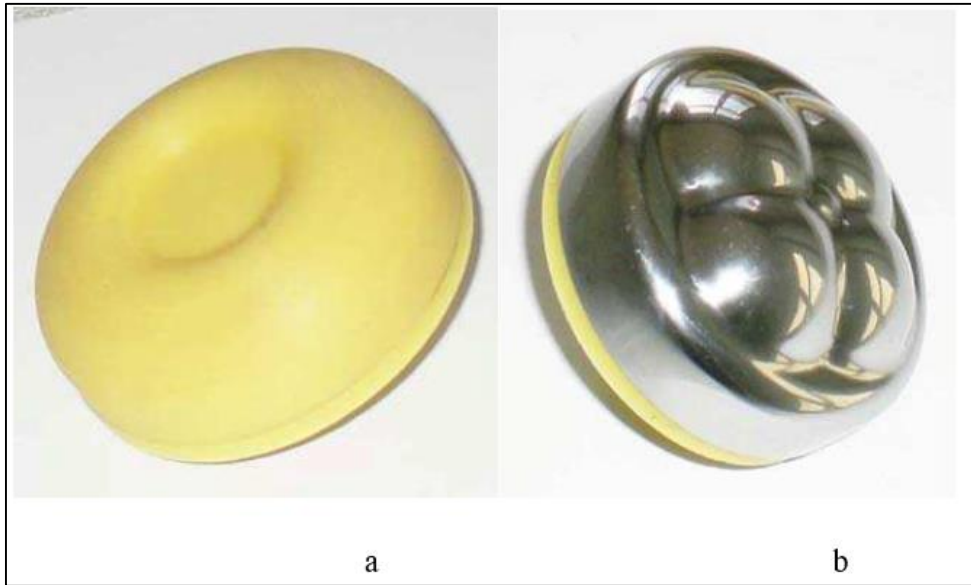
Şekil 2.20. Elektro-hidrolik yönteminin şematik biçimi [37]

Çalışma kapsamında, DP600 sac metalinin 38° lik V şeklindeki kalıpta elektro hidrolik yöntemi ile şekillendirilmesi yapılmıştır. Numunenin üst bölgesindeki şekillenmenin %120 daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebinin, şok dalgalarının yüksek hız ile numuneye çarpması olduğu belirtilmiştir [37].

Liu ve arkadaşları [38] hidrolik şekillendirmenin yaygın olarak kullanıldığı tüp şekillendirme yönteminde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Hidrolik tüp şekillendirme yönteminde oluşan kırılma sorununda gerilme oranının ve çap kalınlık oranının kırışıklıklara etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda tüpün orta bölgesinde alt ve üstte olacak şekilde iki nokta ve tüpün bir kenarının altında bir nokta seçerek bu noktalar için hesaplamalar yapmışlardır. Yapılan hesaplamalar ve deneyler ile şekillendirilen tüpün ortasının yan duvarının kırılma açısından en riskli bölge olduğunu tespit etmişlerdir. Çap kalınlık oranının artışında yüksek basınç ile kırışıklığın önlenmesi sağlanabilmekte olduğunu belirtmişlerdir.

Aydın [39], metal saclarının hidrolik şekillendirme metoduyla şekillenmesi üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma için hidrolik şekillendirmede kullanacağı kalıbı tasarlamıştır. Tasarlanan kalıbın iç çapı 120 mm ve maksimum çekme yüksekliği ise 81 mm dir.

Kullanılan zımbanın çapı ise 99 mm ve zımba kenar kavis yarıçapı 9,5 mm dir. Seçilen 0,8 mm kalınlığında Al 5754 sac malzemesini ön basınçlandırarak 35 mm yüksekliğinde, ön basınçsız şekilde de 33 mm yüksekliğinde silindirik olarak şekillendirmiştir. Ön basınçsız olarak gerçekleşen şekillendirmede flanşlarda kırışıklıkların meydana geldiği görülmüştür. 2 MPa ön basınçlandırma ile gerçekleştirdiği şekillendirme sonucunun daha kırışiksiz ve düzgün olduğunu belirtmiştir. Çalışmanın diğer aşamasında 90 mm dış çapa 32 mm yüksekliğe sahip kestamit zımba ucu tasarlamış ve 0,8 mm kalınlığında Al 5754 malzemesini ve 0,35 mm kalınlığında C1006 çelik sac malzemesini bu uç ile şekillendirmiştir. Al 5754 malzemesi ortalama 15 mm çekme yüksekliğinde hidrolik yöntemle şekillendirilmiştir ve yırtılma ya da kopma gözlemlenmemiştir. Bu şekillendirme için yapılan teorik analizler sonucunda kenarların üst kıvrımının kırışıklık için risk teşkil ettiği ve flanşlarda kırışıklıkların oluştuğu belirlenmiştir. C1006 çelik malzemenin kestamit zımba ile deneysel yapılan hidrolik şekillendirmede yırtılma gözlemlenmemiştir (Şekil 2.6.). Zımbanın uç tarafındaki şekillenmenin iyi olmasına karşın yan duvarda ve flanş kısmında kırışıklıkların oluştuğu deneysel yapılan çalışmada ve analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Çalışmada son olarak desenli zımba ucu ile hidrolik şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan desenli zımbanın dış çapı 70 mm, toplam yüksekliği 30 mm ve desen yüksekliği 10 mm dir (Resim 2.4).

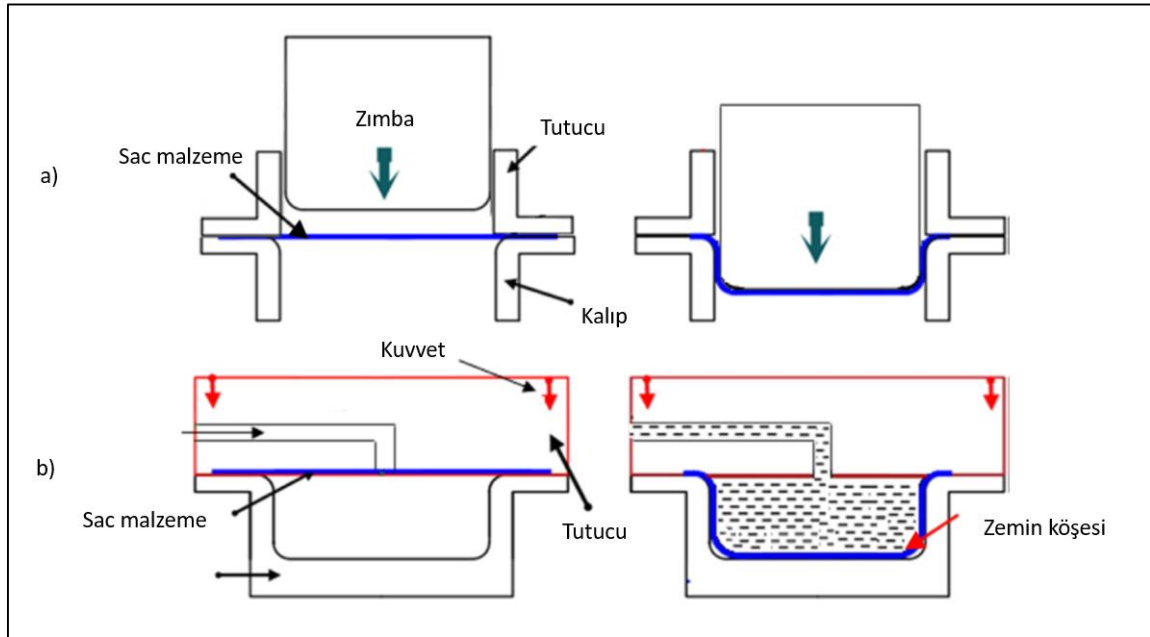


Resim 2.4. Tasarlanan zımba uçları a) Kestamit Uç b) Desenli uç [39]

Desenli uç ile Al 5754 için yapılan ön sıvı basınçlandırmasız 14,28 mm yüksekliğindeki hidrolik şekillendirmede ve 1 MPa ön sıvı basıncı kullanılarak 8,2 mm yüksekliğinde yapılan

hidrolik şekillendirme sonucu elde edilen parçalarda yırtılmalar gözlenmiştir. 0,35 mm kalınlığındaki C1006 serisi sac metalindeki şekillendirmede ise 7 MPa sıvı basıncında 28,78 mm yüksekliğinde şekillendirme yapılmış ve üretilen parçada desenin düzgün olarak elde edilmiş olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma rağmen parçanın yan duvarlarında ve flanşında kırışıklıklar tespit edilmiştir. Aynı deney 0,6 mm kalınlığındaki çelik sac için gerçekleştirildiğinde ise kırışıklıkların oluşmadığı gözlemlenmiştir [39].

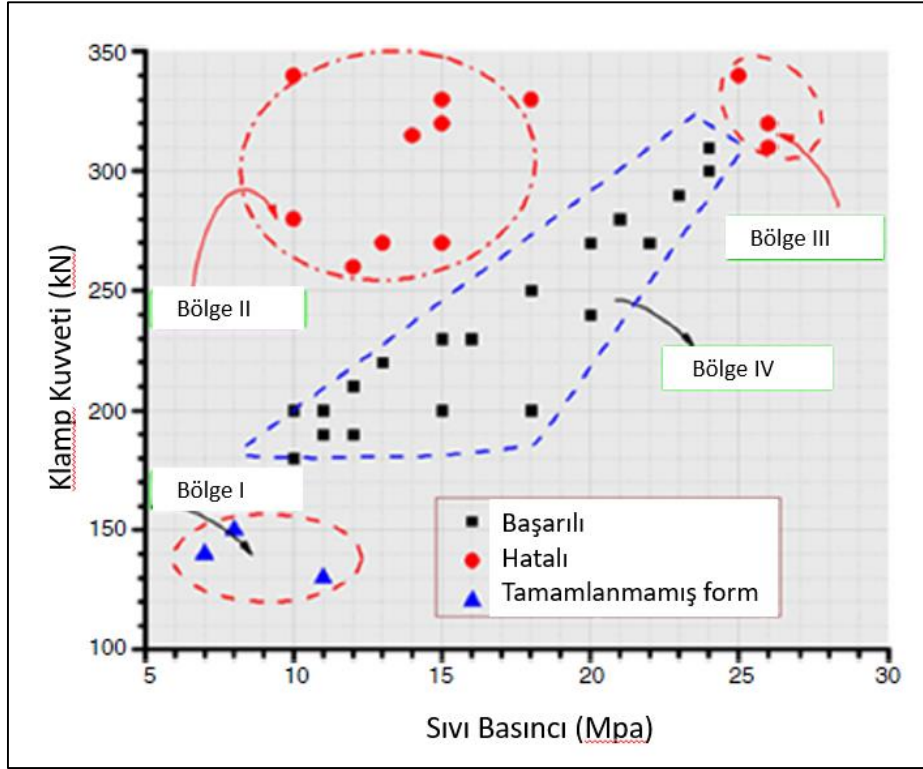
Feyissa ve Kumar [40] gerçekleştirdikleri çalışmalarında AA5083 sac malzemesinin hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesini incelemişlerdir. Çalışmalarında 1 mm kalınlığındaki AA5083 sac malzemesini konvansiyonel yöntemlerle ve hidrolik şekillendirme yöntemi ile deneysel olarak incelemişler (Şekil 2.21.a-b) ve LS-Dyna programında şekillenme analizlerini gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 2.21. a) Konvansiyonel şekillendirme b) Hidrolik şekillendirme yöntemi [40]

Şekillendirme 100 mm x 100 mm tabanlı ve 35 mm lik derinliğinde boyutlarda olacak şekilde belirlenmiştir. Hidrolik şekillendirme yöntemindeki deneylerde elde edilen grafik Şekil 2.22 de gösterilmiştir. Bölge I’de sıvı basıncı ve sızdırmazlık kuvvetinin az olması nedeni ile istenilen forma ulaşılammıştır. Bölge II’de kuvvet ve basınç kombinasyonları sonucu şekillenen parçada küçük boyutlu bir yırtılma meydana gelmiştir. Bölge III’te basınç ve kuvvetin büyük olması nedeniyle parçada incelme meydana gelmiş ve malzeme yırtılmıştır. Bu incelmenin maksimum % 24 - 25 olduğu tespit edilmiştir. Bölge I’de ise

kuvvet ve basınç kombinasyonu optimum durumda olup şekillendirme başarı ile gerçekleştirilmiştir.



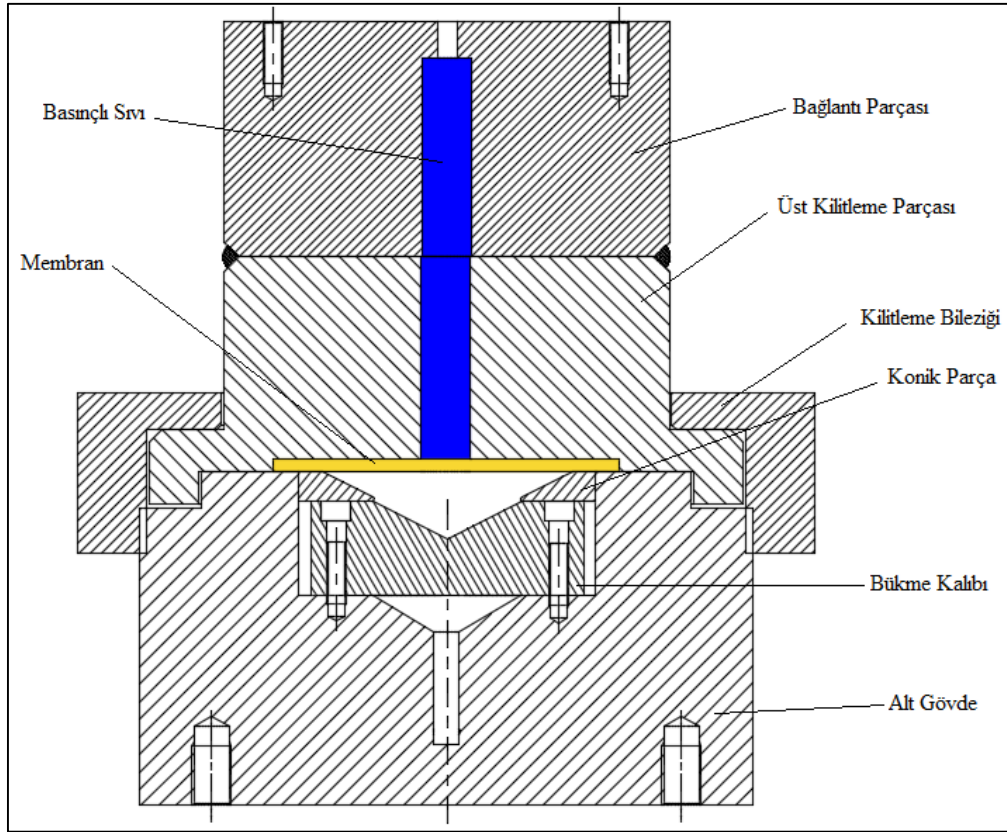
Şekil 2.22. AA 5083 için hidrolik şekillendirme diyagramı [40]

Ayrıca konvansiyonel yöntemlerle gerçekleştirdikleri deneysel ve analiz sonuçlarına göre yaptıkları karşılaştırmalar sonucunda, hidrolik şekillendirme yöntemleri ile yapılan şekillendirmelerdeki incelleme miktarlarının daha az olduğunu ve düzenli stres dağılımının gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu nedenlerden dolayı karmaşık ve zor parçaların üretiminde hidrolik şekillendirme yönteminin büyük potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [40].

Hatipoğlu [41] yaptığı çalışmasında hidrolik sac şekillendirme yöntemi ile ilgili deneysel ve numerik araştırmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmada hidrolik şekillendirmede karşılaşılan geri esneme ve kırılma problemlerini incelemiştir. Ayrıca farklı kalınlıktaki numuneleri hidrolik yöntemle şişirerek şekillenmedeki davranışlarını gözlemlemiştir. Şekillendirilen tüm parça malzemeleri için Al2024-T3 kullanılmıştır. Geri esneme incelemelerinde hidrolik basıncı 10 MPa, 40 MPa ve 80 MPa ile 0,6 mm, 1 mm, 1,6 mm ve 2 mm kalınlığındaki sac malzemeleri şekillendirmiştir. Ayrıca bir değişken olarak da büküm yarıçapı için de 2,5 mm, 5 mm ve 7,5 mm olarak değerlerde ayrı ayrı deneyler gerçekleştirmiştir. Geri yaylanmanın basınca ve

malzeme kalınlığı / büküm yarıçapı orana bağlı olduğunu belirtilmiştir. Malzeme kalınlığı / büküm yarıçapı arttıkça geri esnemenin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Basınç ile ilgili de belirli bir basınç artışına kadar geri esnemenin azaldığı, belirli basıncı aştıktan sonra basıncın geri esneme miktarına etki etmediği belirtilmiştir. Kırışma ile ilgili yapılan çalışmada ise değişkenler bükme yarıçapı, basınç ve kalınlık olarak belirlenmiştir. Tüm deneylerde seçilen dış bükey kontur 500 mm yarı çapındadır. Malzeme kalınlıkları 0,6 mm, 1 mm, 1,6 mm ve 2 mm seçilmiştir. Bükme yarıçapları 2,5 mm, 5 mm ve 7,5 mm olarak belirlenmiştir. Diğer bir değişken olan hidrolik sıvı basıncı ise 10 MPa ve 40 MPa olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kalınlığın kırışmaya etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Bükme yarıçapı değeri kırışmaya neredeyse hiç etki etmediği belirtilmiştir. Basıncın ise belirli bir seviyeye kadar etkili olduğu, belirli seviyeyi aştıktan sonra etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Aynı değişken kalınlığa sahip sac malzemeler ile yapılan şişirme deneyinde ise basıncın artışı ile şişirme derinliğinin arttığı ve belli bir derinlikten sonra malzemenin koptuğu gözlemlenmiştir. Tüm yapılan deneyler analiz programında incelenmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlara yakın bulunmuştur.

Aslan [42], V şeklindeki bükme parçalarını hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesinde karşılaşılan geri esneme durumu üzerine çalışmıştır. Tasarladığı deney düzeneğinde V yataklı dişi kalıbın üzerine yerleştirilen sac metali pompalanan sıvı basıncı ile kalıp yatağına itilerek şekillendirilmektedir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Aslan'ın çalışmasında kullandığı deney düzeneği [42]

Çalışmada alüminyum, pirinç ve bakır malzemeler için şekillendirmeler yapılmıştır. Şekillendirmeler 15° , 30° , 45° , 60° ve 90° büküm açılarında ve her büküm açısı için 10 MPa'dan 14,6 MPa'a kadar %10'luk artış ile 5 ayrı hidrolik basınçlandırma ile yapılmıştır. Sonuç olarak malzemenin akma geriliminin büyüklüğü arttıkça geri esneme miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Malzeme sertliğinin artışı ile de geri esnemenin arttığı belirtilmiştir. Basıncın artışı geri esneme miktarının azalmasına yol açmıştır. Geri esnemenin bükme açısının artışı ile arttığı gözlemlenmesinin yanında hidrolik şekillendirme yönteminde şekillenen parçalardaki geri esneme miktarının klasik yöntemle göre daha az olduğu belirtilmiştir.

2.6. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Sac metal şekillendirme yöntemi ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemini ile ilgili çalışmaların sayısı oldukça azdır. Literatürde yer alan bu çalışmaların çoğunluğu da geri esneme sorunu ile ilgilidirler. Ancak diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde en az geri esneme sorunu kadar önemli olan kırışma

problemi ile ilgili literatüre ciddi katkılar sağlayan çalışmalara rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tez kapsamında kırışma problemi üzerine literatüre önemli sonuçlar eklenmesi amaçlanmıştır.

3. MALZEME, METOD VE DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Malzeme

3.1.1. Alüminyumun genel yapısı

Alüminyum, dünya kabuğunda ağırlık bakımından en fazla bulunan elementtir. Tüm elementler arasında da oksijen ve silikondan sonra ağırlık olarak bakıldığında 3üncü olarak yer almaktadır [43]. Doğada saf halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunmaktadır. ‘Al’ sembolü ile gösterilir. 2,70 g/cm³ yoğunluğa sahiptir ve ergime sıcaklığı 660°C dir. Şekillendirilmesi diğer metal malzemelerle karşılaştırıldığında kolay olduğu söylenebilir [44].

Alüminyum belirli bir dizide üç boyutlu olarak düzenlenmiş atomlardan oluşmuş kristal yapısına ve oldukça sıkıştırılmış biçimde atomlara sahip bir metaldir. Bu durum ‘yüzey merkezli kristal’ (FCC) yapısına sahip olması ile sağlanmaktadır [45].

Alüminyum alaşımlar safsızlıklarına göre 1xxx serisinden 9xxx serisine kadar gruplanmaktadır. Bu alaşım grupları birbirinden farklı elementlerden oluşmaktadır. Alaşımlar mukavemet, korozyon direnci, kaynaklanabilirlik gibi farklı özelliklere sahiptirler. Çalışmada kullanılan 2024 grubu alüminyum malzemenin kimyasal yapısı çizelgede gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Al2024 malzemesinin kimyasal kompozisyonu [30]

Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Belirtilmeyen elementler %	Al %
0,5	0,5	3,8 – 4,9	0,3 – 0,9	1,2 – 1,8	0,1	0,25	0,15	0,15	kalan

Alüminyum alaşımlar gruplamanın yanında işlemlerine göre de harf kodları ile sınıflandırılırlar;

F: Fabrikadan çıktığı durum anlamına gelir. Haddelenmeden sonra kontrollü ya da kontrolsüz soğuduğu belli olmayan malzemelerdir.

O: Tavlanmış alüminyumların kontrollü soğutulması ile oluşan durum için kullanılır. Bu malzemelerin dayanımı diğer durumlara göre en düşüktür. İletkenlikleri ise maksimumdur. İri taneli yapılıdır. Şekillendirilmesi diğer durumlara göre daha kolaydır.

H: Sertliği soğuk şekillendirme yapılarak artırılmış malzeme durumudur. Bu durum için de 3 durum mevcuttur ve bunlar sayı ile gösterilmektedir.

- H1: Sadece soğuk şekillendirme yapılmıştır
- H2: soğuk şekillendirmenin yanında kısmen tavlama yapılmıştır.
- H3: Soğuk şekillendirme ile sertliği artırılmış malzemenin iç gerginliği de dengelenmiş biçimdedir.

W: Malzeme ısıtılarak kritik sıcaklığın üzerine çıkarılır ve hızlı bir biçimde soğutulur. Böylece malzeme kararsız hale getirilmiş olur. Bu kararsız hal W durumudur. Bu ara işlem genellikle sac şekillendirilmesinde kullanılacak malzemeler için kullanılır. Malzeme W durumuna getirilerek kararsız olmasından yararlanılır ve şekillendirme işlemi yapılır. W durumuna getirilen malzeme oda koşullarında bekletildiğinde W durumundan T durumuna geçer [45].

3.1.2. Alüminyum alaşımlarda ısıtma işlemi

Alüminyum alaşımların şekillendirme yönteminde, malzeme şekillendirme öncesi veya sonrasında mukavemeti artırmak, iç gerilmeleri gidermek için ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Isıtma işlemi süreci ısıtma, hızlıca soğutma ve yaşlandırma olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır [47].

İlk işlem olan ısıtma işleminde, şekillenecek parçanın mukavemetini artırmak amacı ile belirlenen sürelerde parçanın yüksek sıcaklıklara ısıtılması sağlanmaktadır. Bu işlem zarfında alaşımı oluşturan elementlerin çözünmesi ve homojen bir yapıya ulaşması sağlanırken, erime meydana gelmemesine ve malzemenin özelliklerinin kabul edilemez değişikliklere ulaşmamasına dikkat edilmektedir. Bu nedenle işlemde ulaşılan sıcaklık erime sıcaklığının altında olmalıdır. Alüminyum malzemede 488°C ile 499°C arasındadır. Parçanın büyüklüğüne bağlı olarak ısıtma işlemi süresi 10 dakika ile 45 dakika arasında değişmektedir.

İkinci aşama olan hızlı soğutma işleminin bir diğer adı da su verme işlemidir. Malzemenin yüksek sıcaklıkta yakalanan homojen yapısını korumak için bu işlem uygulanmaktadır. Isıtılan malzeme hızlı bir şekilde soğutulur. Bekletmenin 10 saniyeden fazla gecikmesi durumunda malzemenin mukavemetini ve korozyona karşı olan direncini azaltmaktadır. Soğutma işleminde genellikle %14 civarında glikollü su kullanılmaktadır. Suyun sıcaklığı 34°C olarak soğutma işlemi gerçekleştirilir. Soğutma işlemi süresi en az 2 dakika olacak şekilde yapılmaktadır [48].

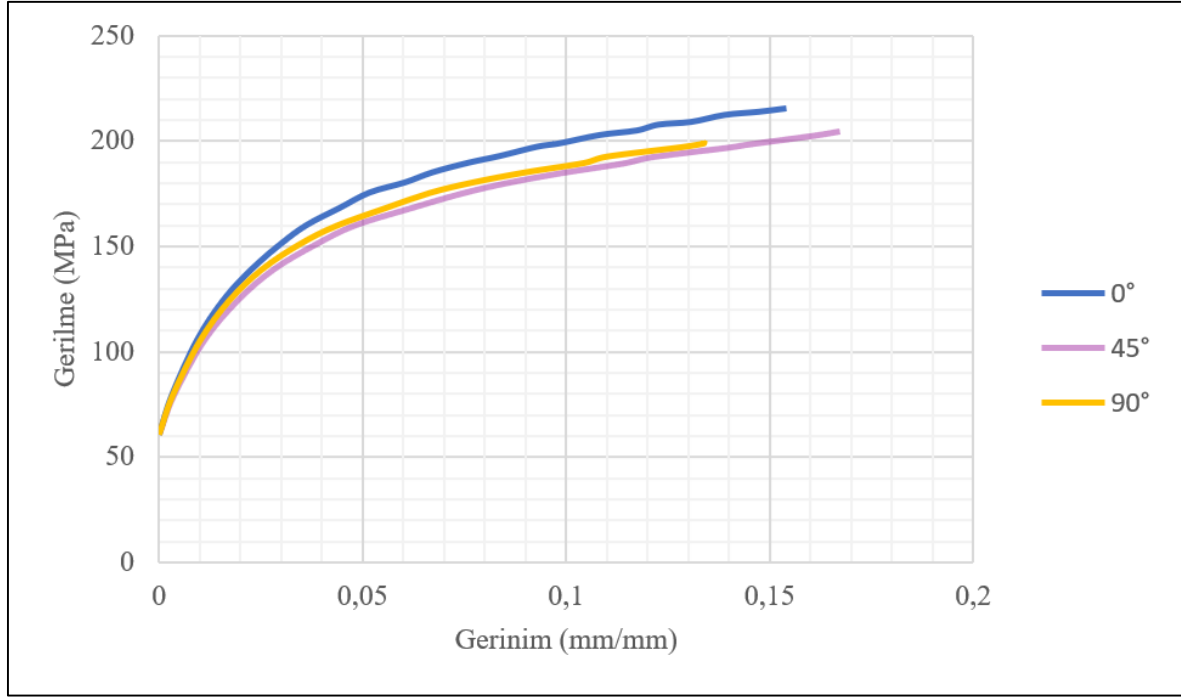
Isıl işlemde, üçüncü ve son aşama yaşlandırma işlemidir. Bu işlemde malzeme oda sıcaklığında mukavemetinin artması sağlanmaktadır.

Hızlı soğutma ve yaşlandırma arasındaki malzeme W durumundadır. Malzeme W durumunda kararsız bir haldedir. Yaşlandırılmış malzemelere göre mukavemeti daha düşük ve sünek özelliği daha fazladır. Bu yüzden şekillendirme işlemi sırasında malzemenin W durumunda olması şekillendirmenin kolaylaştırması nedeniyle tercih edilen bir durumdur. W durumunda olan parça oda sıcaklığında yaşlanma işlemine maruz kalacağından su verme işleminden sonra parçalar 30 dakika içerisinde şekillendirilmesi gerekir veya W durumunu muhafaza etmek için su verilmiş parçalar soğuk hava depolarında bekletilir. Şekillendirilme işlemi yapılacağı zaman parça soğuk hava deposundan alınarak W durumunda şekillendirilir.

3.1.3. Malzeme çekme testi

Malzeme çekme testi Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. proje çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Testler Zwick/Roell marka Z100 model test cihazında yapılmıştır. Testler 100 mm/dk hızında çekme ile gerçekleştirilmiştir. İki taraftan tutularak çekilen numunelerin enine ve boyuna uzama miktarları ölçülmüştür. Test dahilinde ulaşılan sonuçlar ile gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir.

Al2024-O malzemesinin 1,27 mm kalınlığında ve 0° yönünde kesilmiş numune ile yapılan çekme deneyinde akma mukavemeti 62 MPa değerinde, çekme dayanımı ise 216 MPa değerinde olduğu sonucu elde edilmiştir. $\epsilon = 0,16$ değerine ulaştığında malzemede kopma meydana gelmiştir. 45° ve 90° yönünde kesilmiş numunelerle yapılan deneylerden de birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.1).



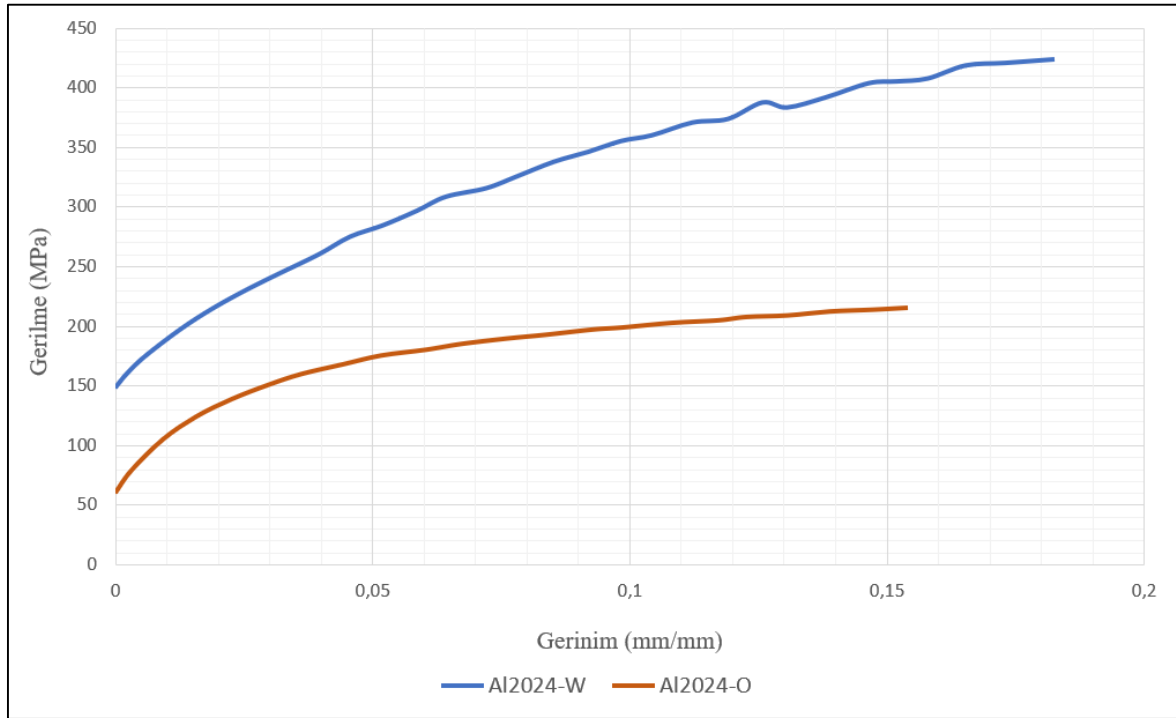
Şekil 3.1. Al2024-O malzemesi için 0°, 45° ve 90° yönde kesilmiş numunelerin çekme testi sonucu grafiği

Yapılan deneyler doğrultusunda Al2024-O malzemenin anizotropik değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.3).

Çizelge 3.2. Al2024-O malzemesinin anizotropi değerleri

Malzeme	R_0	R_{45}	R_{90}
Al2024-O	0,56	0,72	0,55

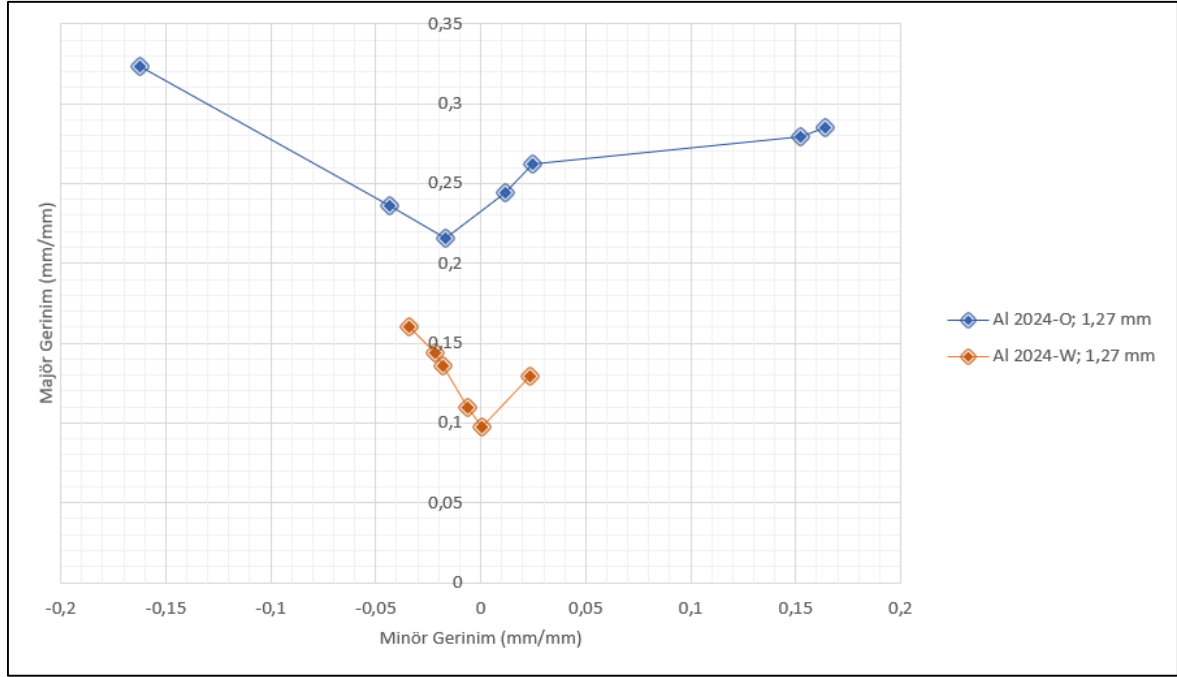
Al2024-W malzemesinin 1,27 mm kalınlığında ve 0° yönünde kesilmiş numune ile yapılan çekme deneyinde akma mukavemeti 148 MPa değerinde, çekme dayanımı ise 423 MPa değerinde olduğu sonucu elde edilmiştir. $\epsilon = 0,18$ değerine ulaştığında malzemede kopma meydana gelmiştir. Al2024-O malzemesine göre Al2024-W malzemesinin dayanımının artmış olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, ısıtılarak 'W' durumuna getirilen malzemenin kararsız yapısı gerilme-gerinim grafiğinde de görülmektedir. (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Al2024-W ve Al2024-O malzemesi çekme testi sonucu grafiği

3.1.4. Şekillendirme sınır diyagramı testleri

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'de, projelerde kullanım amacı ile Al2024-O ve Al2024-W malzemeleri için şekillendirme sınır diyagramları oluşturulmuş ve şirketin kütüphanesine eklenmiştir. Bu diyagramlar oluşturulurken Nakazima testi numuneleri 600 kN kapasiteli Zwick marka BUP 600 model sac metal test makinasında test edilerek deformasyon gerilim dağılımları belirlenmiş ve şekillendirme sınır diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Al2024-O ve Al2024-W malzemelerinin şekillendirme sınır diyagramları

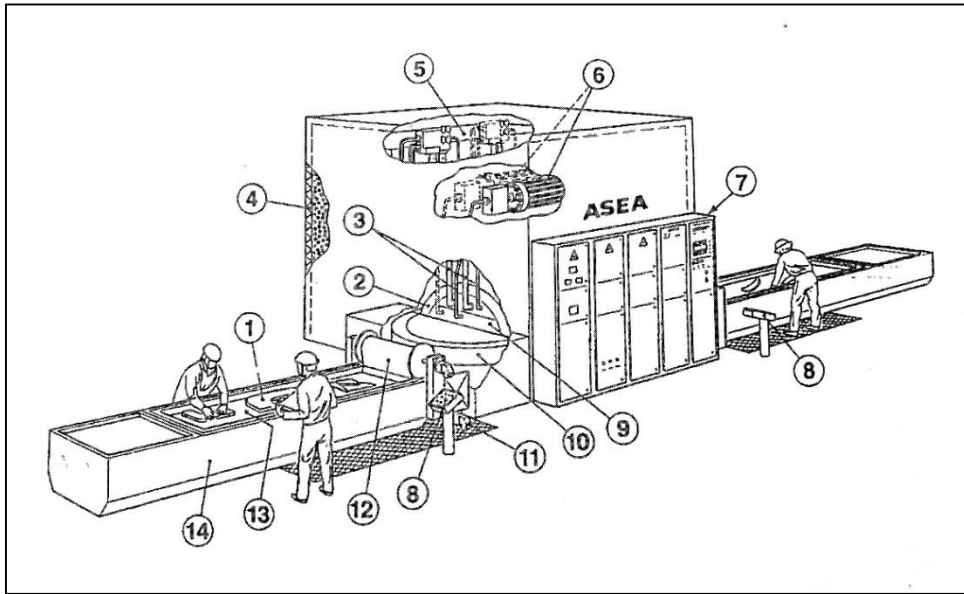
3.2. Deneysel Yöntem ve Ekipmanlar

Hazırlanan numunelerin şekillendirilmesi için ABB Metallurgy firmasının QFC 1.2 x 3-1400 pres tipli Quintus markası tezgah kullanılmıştır. Tezgah Verson yöntemi çalışma prensibine sahiptir. Yağ ile basınçlandırılan diyafram ile sac metali şekillendirilmesi yapılır. Tezgah 3 m x 1.2 m boylarında karşılıklı iki tablaya sahiptir. Tablalar 27 cm yüksekliğine kadar olan parçaların şekillendirilemesine imkan tanımaktadır. Şekillendirme işleminde 72000 ton kuvvet ve 140 MPa basınç değerlerine çıkabilmektedir. Tezgah, tabla boyutlarında ve 2,54 mm kalınlığında poliüretan kauçuktan yapılmış diyaframa sahiptir. Diyaframı basınçlandırmak için hint yağı kullanılmaktadır.

Şekillendirme işleminde öncelikle tezgah tablasına kullanılacak kalıp yerleştirilir. Kalıbın üzerine şekillendirilecek sac metali belirlenen delikler ve pimler yardımı ile sabitlenerek yerleştirilir. Kalıp, yerleştirilen tabla ile birlikte baskı makinasının içine sürülür ve üzerine diyaframın yer aldığı üst kapak presi otomatik olarak kapanır. Bu preste esnek diyafram yer almaktadır. Kapalı olan sisteme yağ pompalanır ve diyaframda oluşan basınç sayesinde sac metal kalıbın üzerine sıvanarak şekillenme işlemi gerçekleştirilir. Şekillendirme basıncının yüksek olması ve homojen bir şekilde dağılması sayesinde tek operasyonda istenilen forma ulaşılmasına olanak tanır. Şekillendirilen parça istenilen şekillendirme toleranslarına

ulaşılabilir. şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra diyaframın basınçlandırılması sonlandırılır. Diyaframın bulunduğu pres kalkar ve kalıbın bulunduğu tabla baskı makinesinde dışarı sürölür. şekillendirilmiş ürün kalıbın üzerinde çıkartılır. Malzemelerin şekillendirilmesinde ihtiyaç duyulan yüksek ve dağılmış kuvvet gereksinimleri diyafram basınçlandırılması sayesinde tezgahda elde edilir. Tezgah özellikleri sayesinde, istenilen şekillendirme karmaşık da olsa sonucun iyi bir şekilde elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemini uygulayan tezgah, kullandığı elastik diyafram sayesinde şekillenen parçanın kalıp üzerindeki yüzeyinin yanında diğer yüzeyinin de yüzey kalitesinin iyi olmasına imkan tanımaktadır. Yüzeyler çiziksiz, pürüzsüz olarak elde edilir. Ayrıca basıncın yüksek ve basınç dağılımının iyi olması sayesinde boyutsal olarak doğruluğu yüksek parçalar üretilir. şekil 3.4'te tezgah şematığı gösterilmiştir.



şekil 3.4. Quintus marka diyaframla hidrolik şekillendirme tezgahı şematığı [49]

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. Kalıp | 9. Sıvı basınçlı basma plakası |
| 2. Tel sargılı silindir çerçeve | 10. Eksenel çerçeve |
| 3. Yüksek basınçlı borular | 11. Tabla hareketi için hidrolik motor |
| 4. Gürültü önleyici yapı | 12. Aşınma lastiği sarma tamburu |
| 5. Hidrolik sistem | 13. Hareketli tabla |
| 6. Basınçlandırıcı | 14. Tabla istasyonu |
| 7. Kontrol paneli | |
| 8. Operatör kontrol paneli | |

3.2.1. Deney parametreleri ve numuneler

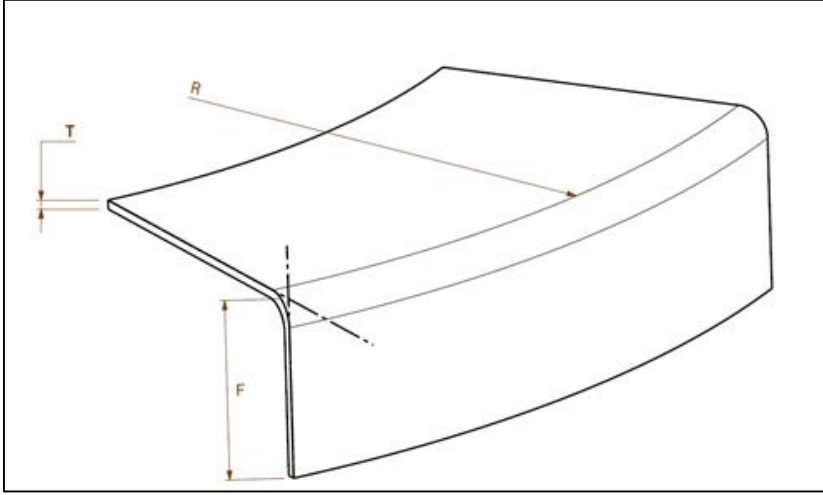
Havacılık sektöründe diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile üretilen parçalarda görülen kırışma problemleri göz önünde bulundurulduğunda konturlu yapıya sahip flanşlı parçalarda bu problemin çokça karşılaşıldığı gözlemlenmektedir. Deney parametreleri seçilirken sıklıkla karşılaşılan değerler kullanılarak üretimin iyileştirilmesi, maliyet ve zaman kaybının azalması amaçlanmıştır.

Deney, hidrolik şekillendirme sırasında üretimde genel olarak uygulanan 70 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme sırasında yağ sıcaklığı 45°C olarak sabit tutulmuştur. Ortam hava sıcaklığı ise 33.7°C dir. Şekillendirme işlemi ortalama 3 dakika sürmektedir. İstenilen 70 MPa değerindeki basınçta bekleme süresi ise 3 saniyedir. Şekil 3.6 da işlem sırasında basıncın en yüksek değere ulaştığı anda operatör kontrol ekranında görünen tezgah bilgileri gösterilmektedir.



Resim 3.1. Diyaframla hidrolik şekillendirme tezgahının operatör kontrol paneli

Deneyde uygulanan parametreler; malzeme cinsi, malzeme kalınlığı (T), parça kontur yarıçapı (R), ve flanş uzunluğu (F)'dur (Şekil 3.5).



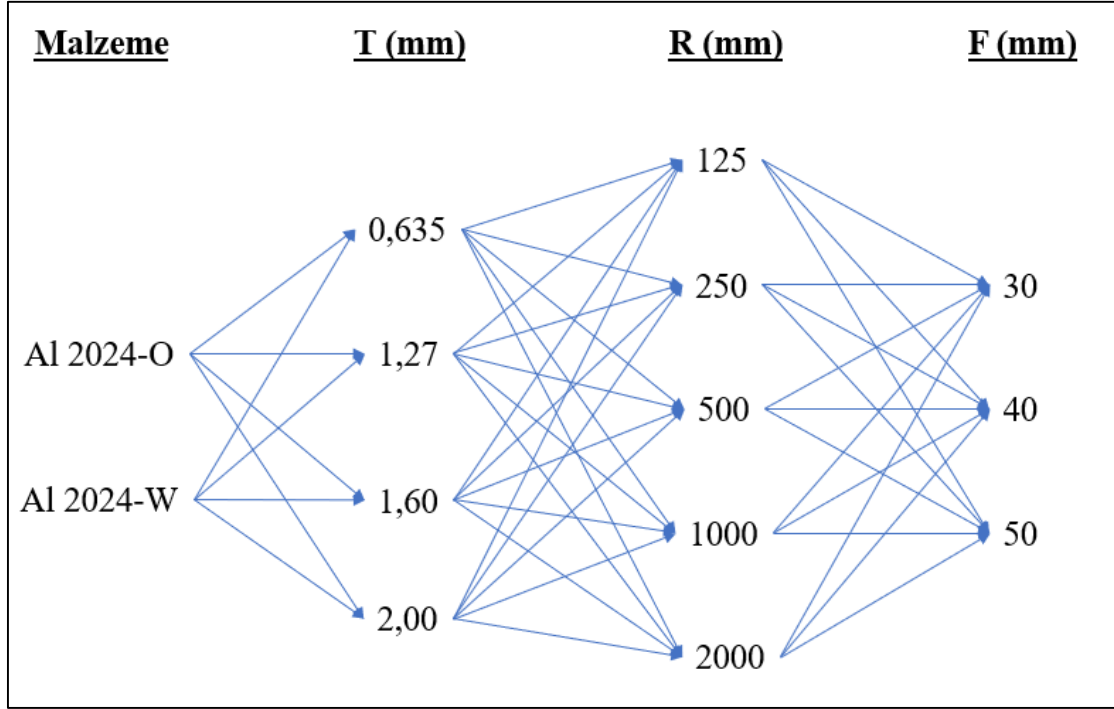
Şekil 3.5. Deneyde şekillendirilecek numune özelliklerinin şematik olarak gösterilmesi

Diyaframla hidrolk şekillendirme yönteminde alüminyum gibi sünek malzemelere sahip olan parçaların üretilmesi tercih edilmektedir. Bu nedenle malzeme olarak, Al2024-O ve Al2024-W malzemeleri seçilmiştir. 2 farklı malzeme ile tüm parametreleri içeren deneyler yapılmıştır. Belirlenen parametre değerleri çizelge 3.3’de gösterilmiştir. Bükme yarı çapı olarak ise 6 mm yarıçap değeri sabit tutulmuştur.

Çizelge 3.3. Deney için belirlenen parametreler

MALZEME	Al2024-O
	Al2024-W
MALZEME KALINLIĞI, T (mm)	0,635
	1,27
	1,60
	2,00
KONTUR YARIÇAPI, R (mm)	125
	250
	500
	1000
	2000
FLANŞ UZUNLUĞU, F (mm)	30
	40
	50

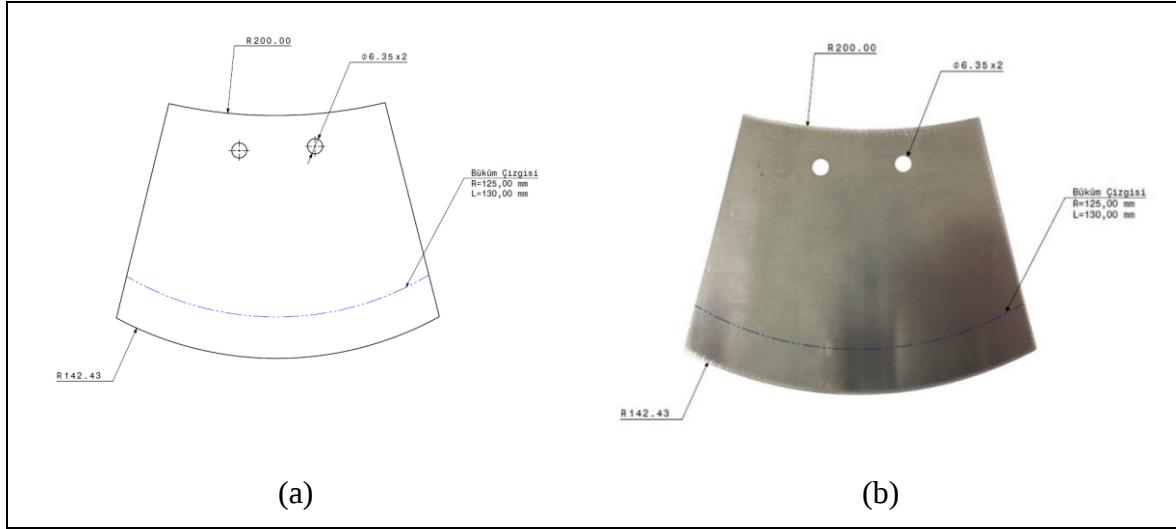
Şekil 3.6. da parametrelerin numuneler için kullanılma durumu gösterilmiştir. Bu çizelgede de belirtilen matris yapıda gösterildiği gibi, tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde toplam 120 adet sac numune şekillendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 3.6. Belirlenen parametrelerin numunelerde kullanılması

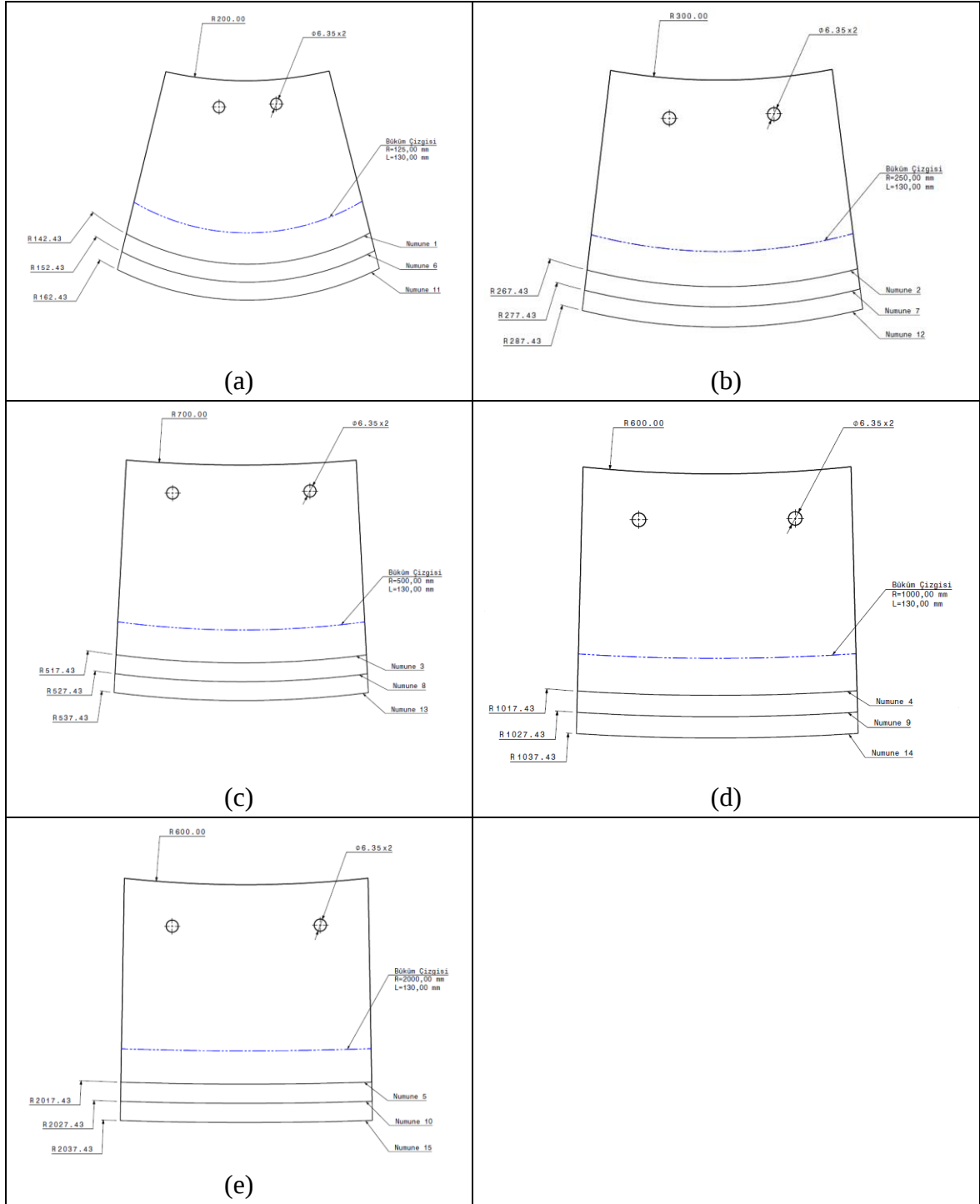
Deneydeki numunelerin geometrisi, şekillenecek sac metallerin şekillendirmeden sonra flanş uzunluklarının istenilen değerlere ulaşması hesaplanarak belirlenmiştir. Önem verilen başka bir konu ise tüm numunelerin bükülmenin gerçekleştiği yarım çemberin uzunluğunun eşit olması gerekliliğidir. Bunun nedeni, şekillenme işlemi sırasında flanş oluşum bölgesindeki bükme çizgisindeki malzemenin her numunede benzer şekilde davranmasını sağlamaktır. Böylece, kullanılan parametrelerdeki şekillenme değişimlerin karşılaştırılmasının daha sağlıklı incelenebilmesi amaçlanmıştır. Büküm çizgisi uzunluğu 130 mm olarak belirlenmiştir.

Numunelerin şekillendirme sırasında kalıba iki noktadan sabitlenmesi için her numuneye kalıpta karşılığı bulunan $\varnothing 6,35$ mm çapında iki adet delik açılmıştır. Bu delikler numunenin şekillenmeyen kısmında kaldığı için şekillenmeye bir etkisi yoktur. Ayrıca numunelerin takım üzerinde sabit kalan kenarının da şekillenmeye etkisi yoktur. Bu kısımlara sadece estetik açıdan değer verilmiştir. Şekil 3.8’de birinci numune şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7. a) Numune geometrisi şematığı, b) Numune örneği

Şekil 3.8 'de gösterilen numune, 125 mm yarıçapındaki konturlu yapıya ve 10 mm flanş uzunluğuna sahip parçanın sac açılımıdır. Aynı kontur yarıçapında 20 mm ve 30 mm flanş uzunluğuna sahip diğer parça numunelerinin geometrisi de birbirine benzer şekildedir. Numunenin boyu flanş boyuna göre değişiklik göstermektedir. Bu olay her beş farklı kontur yarıçapındaki parçalar için geçerlidir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Numune ölçüleri a) R 125 mm kontur yarıçapına sahip numune 1, numune 6, numune 11, b) R 250 mm kontur yarıçapına sahip numune 2, numune 7, numune 12, c) R 500 mm kontur yarıçapına sahip numune 3, numune 8, numune 13, d) R 1000 mm kontur yarıçapına sahip numune 4, numune 9, numune 14, e) R 1000 mm kontur yarıçapına sahip numune 5, numune 10, numune 15

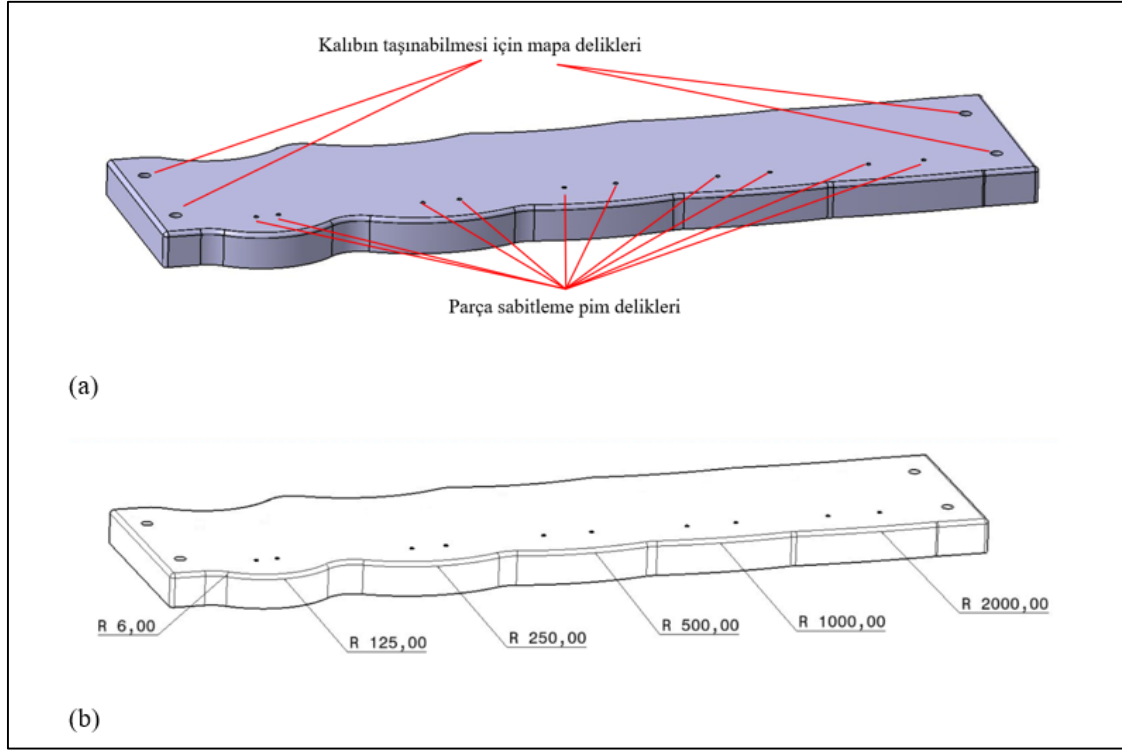
Numuneler bilgisayar ortamında Catia V5R26 programında tasarlanmıştır. 15 ayrı geometride, 2 ayrı malzemede ve 4 farklı kalınlıkta olmak üzere toplam 120 adet numune kullanılmıştır. Resim 3.2' de geometrik boyutlarına göre sınıflandırılmış şekilde gösterilmektedir.



Resim 3.2. Numunelerin genel görüntüsü

3.2.2. Kalıp tasarımı

Diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde kullanılan kalıplar diyafram ile yüksek basınçta temas etmesi nedeni ile kalıpların tasarımında keskin köşelerden kaçınılır. Keskin köşelerin yüksek basınç altındaki diyaframı patlatma riski vardır. Ayrıca kullanılan tezgah tablasına göre kullanılan takımların boyut sınırı vardır. Bu durumlar göz önünde bulundurularak deney için 5 farklı kontur yarıçapı barındıran kalıp tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3.9). Tasarım bilgisayar ortamında Catia V5R26 programında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kalıptaki kontur yarı çapları 125 mm, 250 mm, 500 mm, 1000 mm ve 2000 mm dir. Kalıbın boyutları 1230 mm x 340 mm x 50 mm dir. Yüksekliğinden dolayı en fazla 40 mm flanşa sahip parçaların şekillendirilmesi için uygundur.



Şekil 3.9. a) Tasarlanan kalıp üzerindeki deliklerin tanımı, b) Tasarlanan kalıp üzerindeki kontur ve bükme yarıçap değerleri

Kalıp malzemesinin seçimi için genel yaklaşım, şekillendirilecek parçanın mukavemet değerlerinden daha yüksek malzemeler seçilmelidir şeklindedir. Bunun yanında üretilen parça sayısı ile aşınmanın ne kadar olabileceği de göz önünde tutulmalıdır. Kalıp ağırlığı, kullanım kolaylığı gibi etkenler de kalıp malzemesi seçilirken düşünülmesi gereken durumlardır. Deneyde kullanılan kalıbın malzemesi ASTM A829 çelik alaşımı olarak seçilmiştir. Çelik alaşım, şekillendirilecek alüminyum alaşımlardan daha dirençlidir ve uzun kullanım ömrüne sahiptir.

3.2.3. Deneyin yapılışı

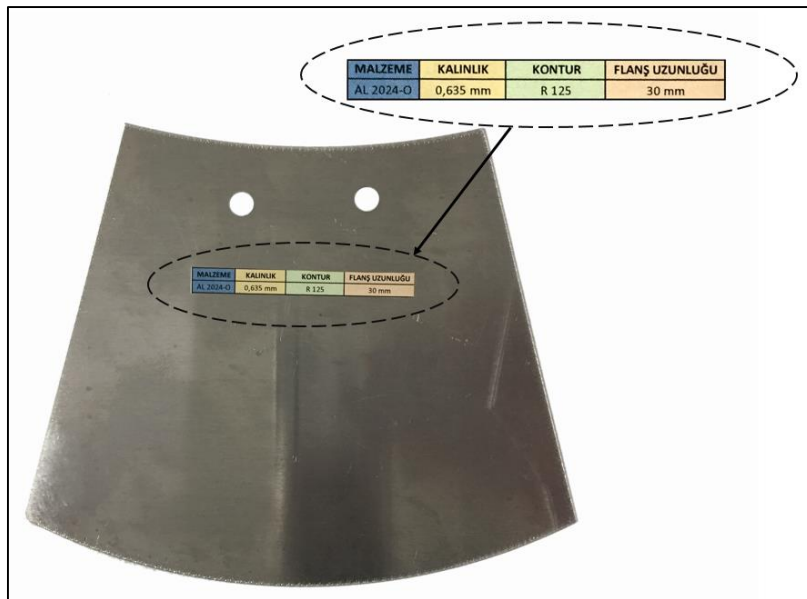
Tez kapsamındaki yapılan deney Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'nin üretim bölümünde gerçekleştirilmiştir. Deney hava araçları sac metal şekillendirilmesi ile üretilen parçaların üretim prosesi benzeri şekilde yapılmıştır. 0,635 mm, 1,27 mm, 1,6 mm ve 2,00 mm kalınlığındaki hava araçları parçaları için kullanılan Al2024 sac metal malzemeler firma bünyesinden temin edilmiştir. Tasarımı bilgisayar ortamında yapılan numuneler bilgisayar kontrollü freze tezgahında istenilen ölçülerde kesilmiştir. Kesme sonucunda numunelerin kenarlarında kalan çapaklar el ile çakı yardımıyla temizlenmiştir. Tüm numunelerin

geometrik boyutları birebir oranında özel bir baskı makinası ile mylar kağıdına basılmıştır (Şekil 3.10.).



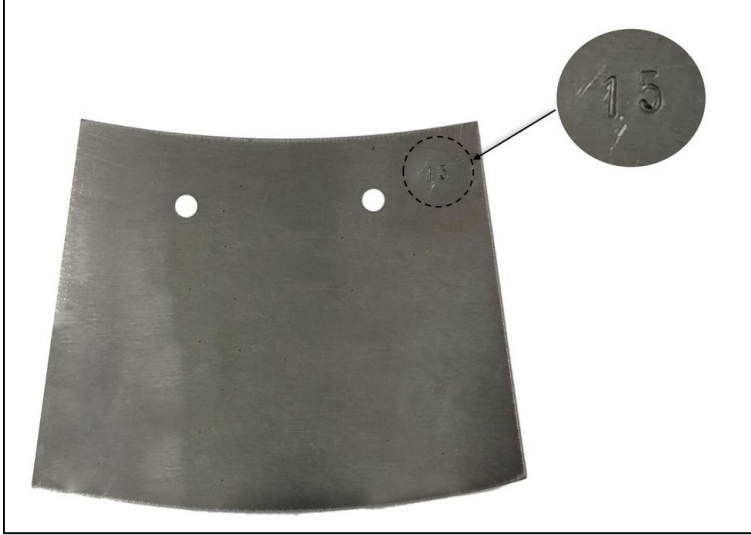
Şekil 3.10. Numunelerin sınır çizgilerinin ve pim deliklerinin gösterildiği resimlerinin mylar kağıdına basılmış baskı örnekleri

Elde edilen mylar baskıları ile kesilen numunelerin boyutsal doğruluğu kontrol edilmiştir. Doğruluğu onaylanan numunelerden ‘O’ halde şekillendirilecek numunelere malzeme, malzeme kalınlığı, kontur yarıçap değeri ve flanş uzunluğu bilgilerinin yer aldığı etiketleme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Numune etiketlenmesi

W malzeme durumunda şekillendirme yapılacak numuneler için, malzemenin O durumundan ısıtıl işlem görerek W durumuna getirilmesi gerekmektedir. Isıtıl işlem sırasında etiketlerin zarar göreceği düşünülerek bu numuneler damgalanarak numaralandırılmıştır (Şekil 3.12)

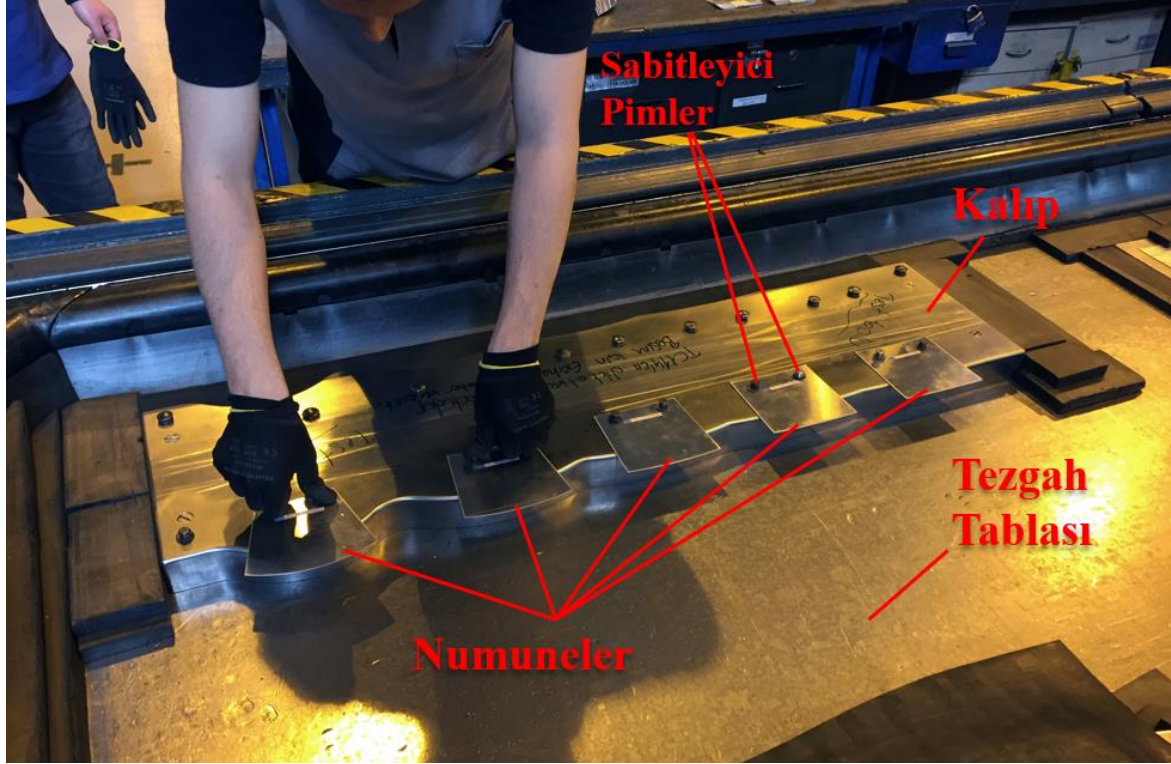


Şekil 3.12. Damgalanmış numune

Damgalanan ‘O’ halindeki numunelere ısıtıl işlem uygulanmış ve istenilen ‘W’ hale getirilmişlerdir. Bu işlemde ısıtılan malzemeler hızla soğutularak W haline getirilirler ve malzeme soğuk hava depolarında bekletilir. Eğer malzeme soğuk hava deposunda bekletilmezse malzemenin tanecik yapısı değişmeye devam eder ve malzeme W halinden T haline geçiş yapar. Bu durumun yaşanmaması ve şekillendirme işleminin istenilen malzeme özellikler kapsamında sağlıklı gerçekleştirilmesi amacıyla, numunelerin soğuk hava deposunda bekletilmesine rağmen, ısıtıl işlem uygulanması ile şekillendirme arasında geçen sürenin minimumda tutulmasına özen gösterilmiştir.

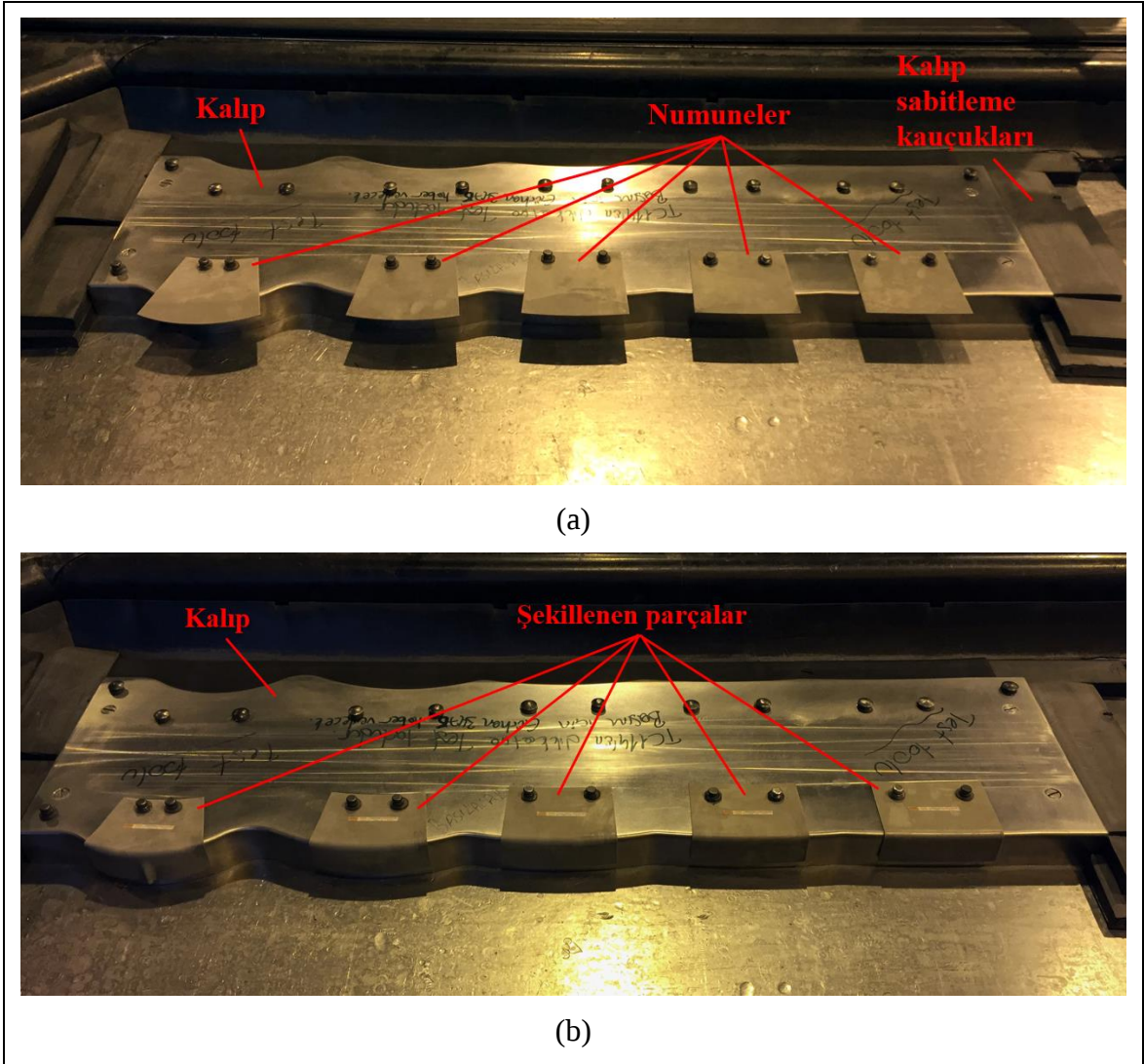
Tasarlanan kalıp tezgah tablasına, etrafına kauçuk yerleştirerek hareket etmesi engellenecek şekilde yerleştirilmiştir. Kalıp yarıçapı 125 mm, 250 mm, 500 mm, 1000 mm ve 2000 mm konturlu parçaları tek basım işleminde şekillendirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde hem zaman kaybının önüne geçilmiş hem de tezgahın çalışması ile oluşan maliyetten tasarruf sağlanmıştır. Yapılan plan doğrultusunda numuneler kalıba yerleştirilmiş ve şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numuneler $\varnothing 6,35$ mm çap değerine sahip olan özel üretilmiş pimler yardımı ile kalıba yerleştirilmiştir (Resim 3.3). Bu pimler diyaframa zarar

vermeyen ve pimin kalıptan kolayca çıkartabilmesine yardımcı olan pim kafalarına sahiptirler.

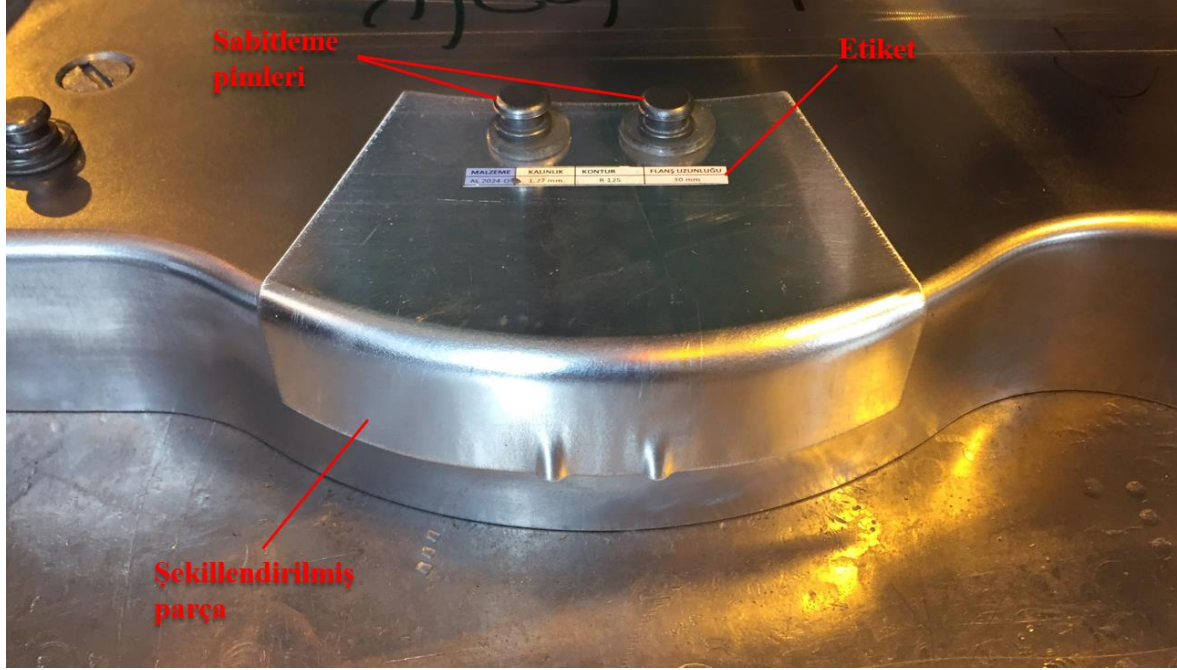


Resim 3.3. Numunelerin kalıba yerleştirilmesi

Al2024-W malzemesindeki numuneler soğuk hava deposundan çıkarılmadan şekillendirme planına göre gruplandırılması yapılmıştır. Gruplanan parçalar şekillendirme planına göre soğuk hava deposundan çıkarılmış ve kalıba yerleştirilerek şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece deneyde gözlemlenmek istenilen Al2024-W malzemenin karakteristik özelliğinin değişmemesi sağlanmıştır. Al2024-W numuneleri şekillendirildikten sonra üzerinde malzeme bilgisi, malzeme kalınlığı, kontur yarıçap değeri ve flanş uzunluğu bilgilerinin bulunduğu etiketleme işlemi yapılmıştır (Resim 3.4).

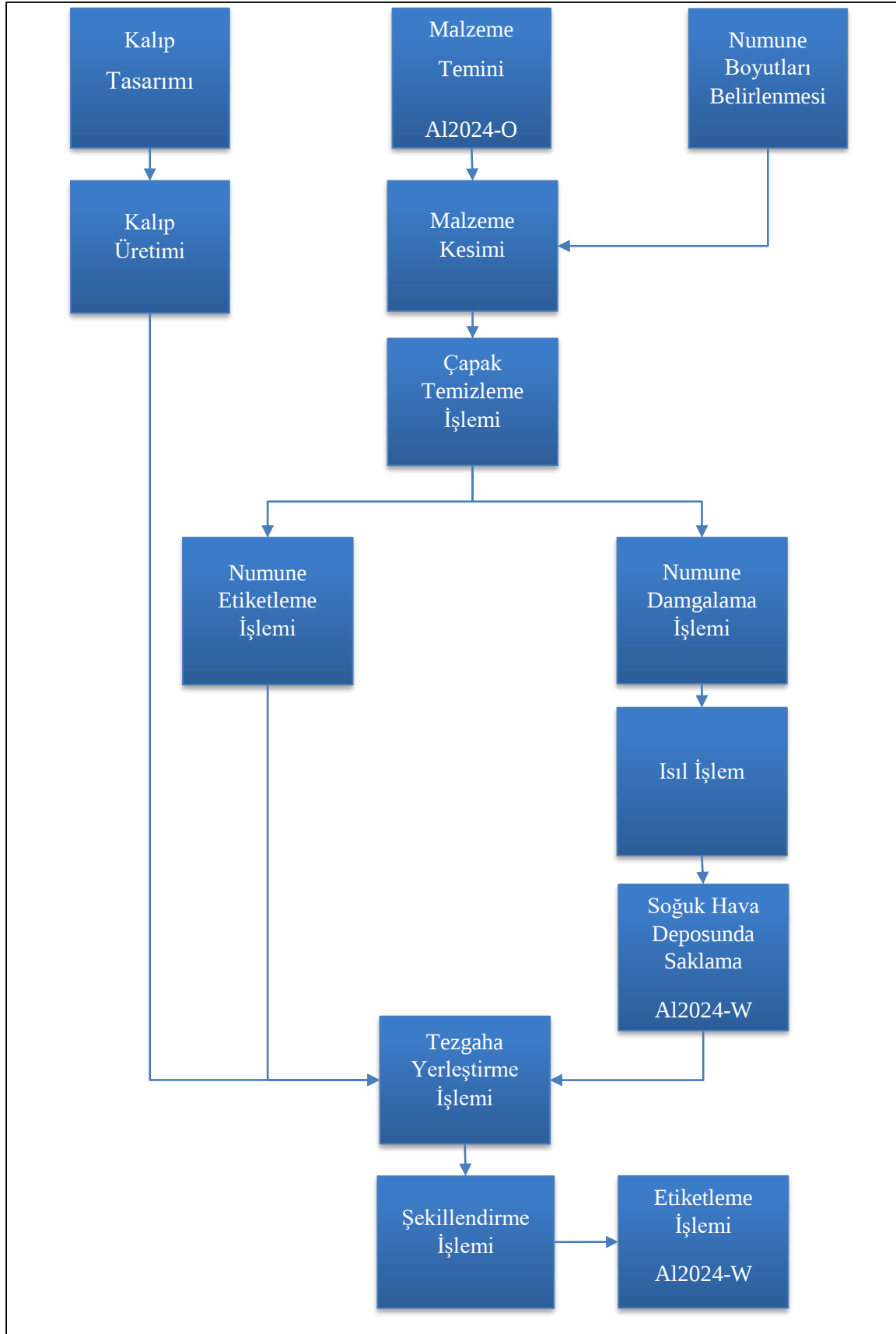


Resim 3.4. a) Numunelerin kalıba yerleştirilmesi, b) Diyaframla hidrolik şekillendirilme işlemi ile şekillendirilmiş kalıp üzerindeki numuneler



Resim 3.5. Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenen numune örneği

Kalıba yerleştirilen numuneler belirlenen 70 MPa basınç altında diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmişlerdir. Şekillendirme proses süresi ortalama 3 dk. olarak kaydedilmiştir. İstenilen 70 MPa lık yükte kalma süresi 3 saniye olarak kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan akış diyagramı Çizelge 3.1 de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Deney prosesi akış diyagramı

4. ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

4.1. Deneysel Çalışma

4.1.1. Deneysel çalışma sonuçları

Diyaframla hidrolik şekillendirme deneyleri, tasarlanan kalıp sayesinde her bir deneyde 5 adet numuneyi bir arada şekillendirilerek gerçekleştirilmiştir. Belirlenen tüm parametreleri içeren numunelerin şekillendirilmesi için 24 adet deney yapılmıştır. İlk 12 deneyde Al2024-O malzemesi şekillendirilmiş, kalan 12 deneyde ise Al2024-W malzemesi şekillendirilmiştir. Ek-1’de deneylerde kullanılan numunelerin özellikleri verilmiştir.

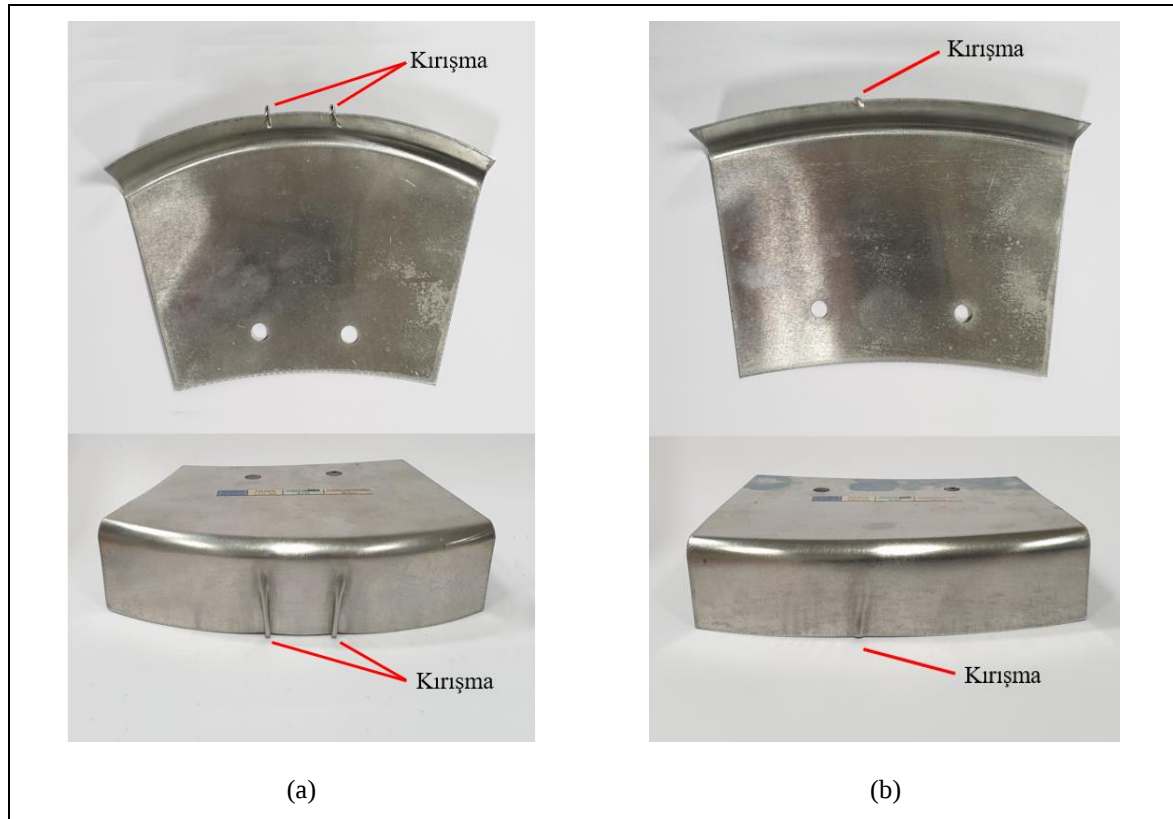
Deney 1’de, 0,635 mm kalınlığında Al2024-O malzemesinden kesilmiş numuneler şekillendirilmiş ve şekillenme sonucunda 20 mm flanş uzunluğuna sahip parçalar elde edilmiştir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden sadece R 125 mm yarıçap kontura sahip parçada kırışma oluşmuştur, diğer parçalarda kırışma gerçekleşmemiştir. Kırışma oluşan parçalar Resim 4.1’de gösterilmiştir. Deneydeki diğer şekillendirilmiş parçalar EK-2’de verilmiştir.



Resim 4.1. Deney 1 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışmalar; Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm

Deney 2’de 1,27 mm kalınlığında, Deney 3’te, 1,60 mm kalınlığında ve Deney 4’te 2,00 mm kalınlığında AL2024-O malzemesine sahip numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 20 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneylerde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilme sonucu elde edilen parçalarda kırışma gerçekleşmemiştir. Elde edilen parçalar EK-2’de gösterilmiştir.

Deney 5’te, 0,635 mm kalınlığında AL2024-O malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125 mm ve R 250 mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma oluşmuştur, diğer parçalarda kırışma gerçekleşmemiştir. Kırışma meydana gelen parçalar Resim 4.2’te gösterilmiştir. Diğer parçalar ise EK-2’de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Deney 5 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm

Deney 6’da, 1,27 mm kalınlığında AL2024-O malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125 mm yarıçap kontura sahip parçada kırışma oluşmuştur ve Resim 4.3’de gösterilmiştir. Kırışma olmayan parçalar ise EK-2’de gösterilmiştir.



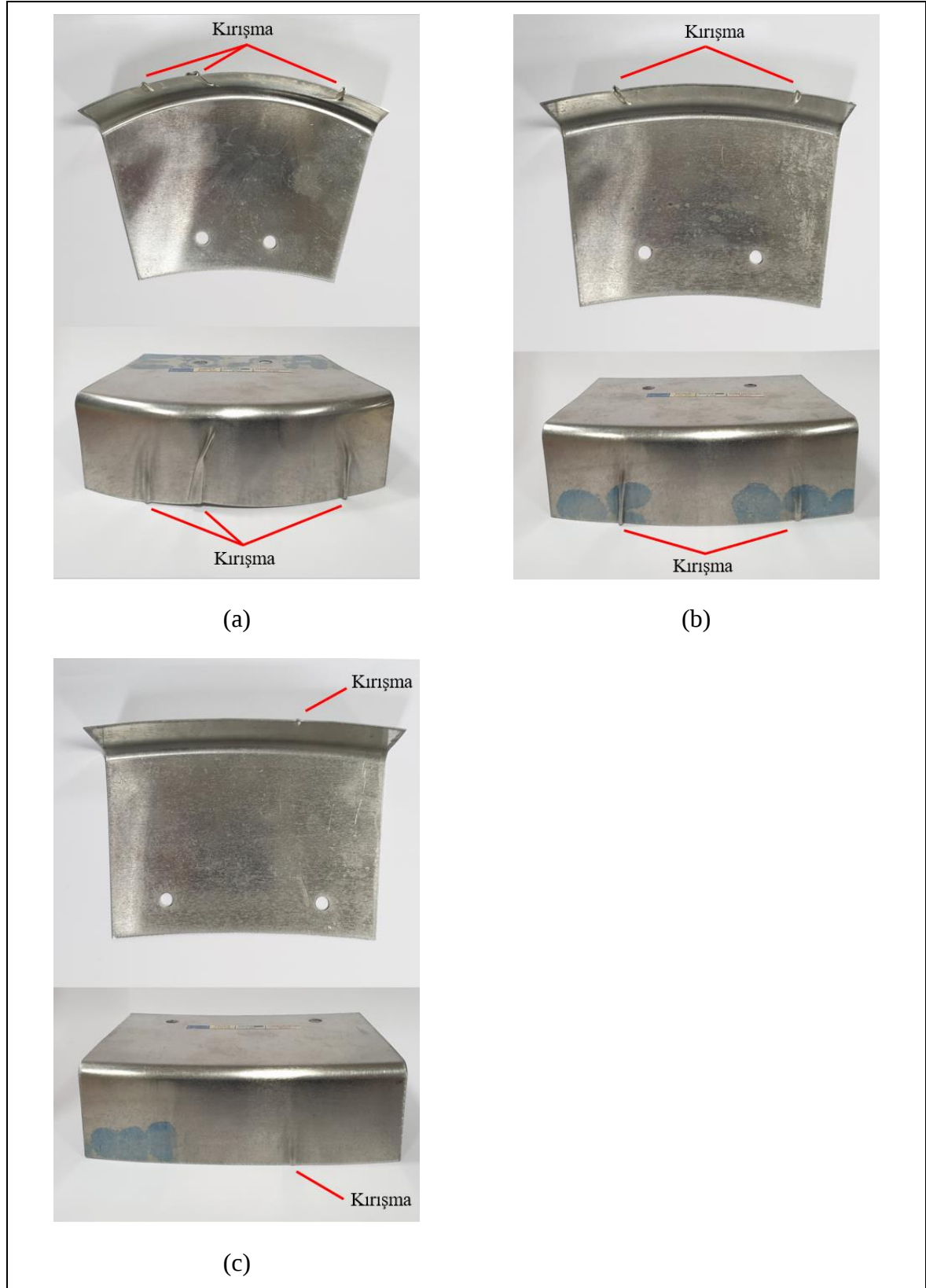
Resim 4.3. Deney 6 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışmalar; Al2024-O; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm

Deney 7’de, 1,60 mm kalınlığında, Deney 8’de 2,00 mm kalınlığındaki AL2024-O malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneylerde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden sadece Deney 7’de R 125 mm yarıçap kontura sahip parçada kırışma oluşmuştur, diğer parçalarda kırışma gerçekleşmemiştir (Resim 4.4). Kırışma meydana gelmeyen parçalar EK-2’de gösterilmiştir.



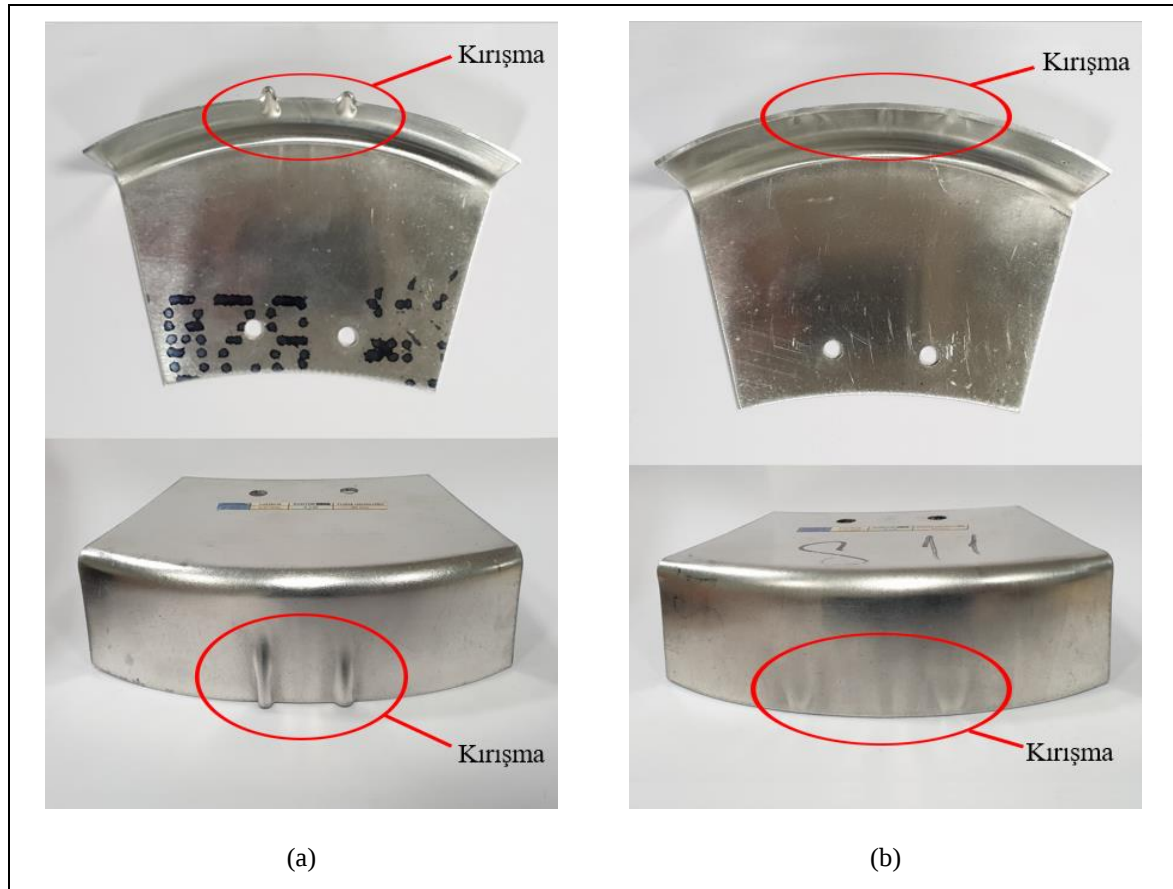
Resim 4.4. Deney 7 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışma;
a) Al2024-O; T=1,60 mm; R=125 mm; F=30 mm

Deney 9’da, 0,635 mm kalınlığında AL2024-O malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125mm, R 250 mm ve R 500mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma oluşmuştur (Resim 4.5). R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma gerçekleştirilmemiştir (Ek-2).



Resim 4.5. Deney 9 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=125$ mm; $F=40$ mm, b) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=250$ mm; $F=40$ mm, c) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=40$ mm

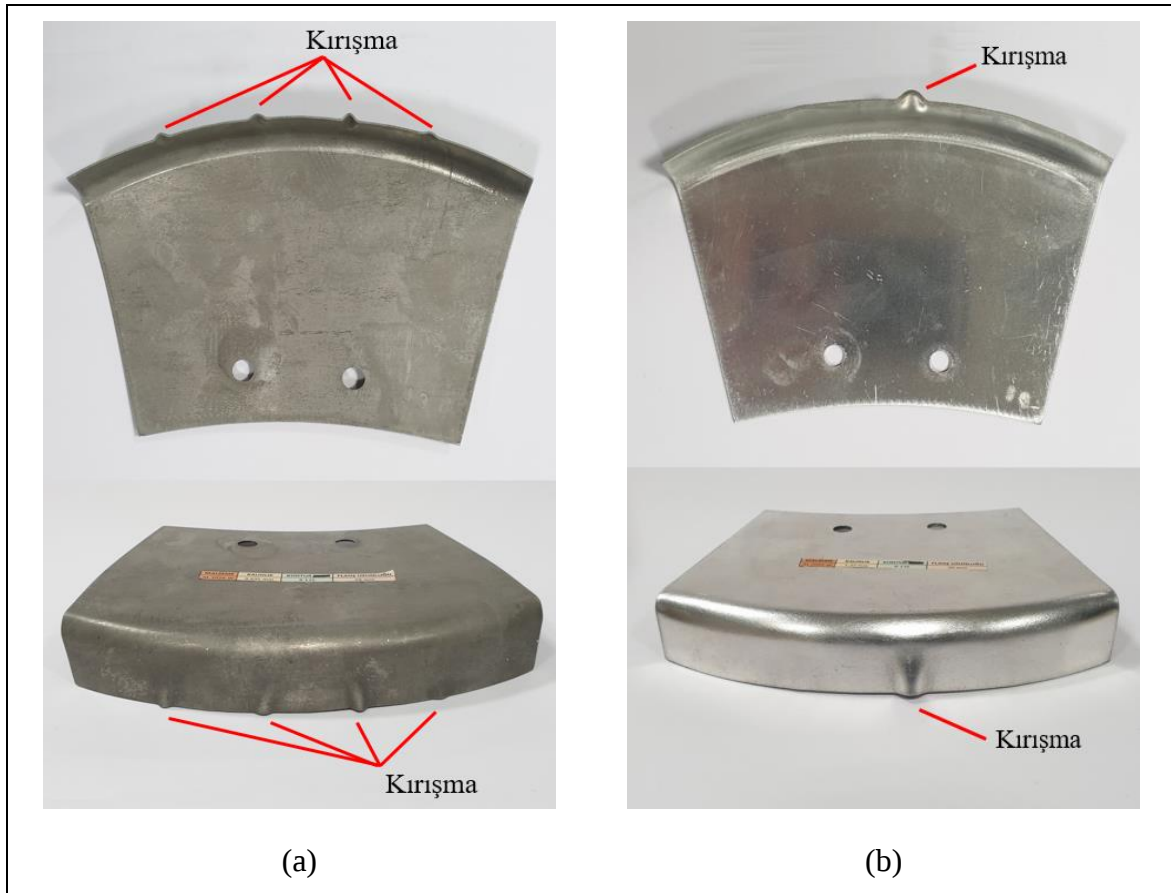
Deney 10'da, 1,27 mm kalınlığında, Deney 11'de 1,60 mm kalınlığındaki AL2024-O malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmelerde elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneylerde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Her iki kalınlıktaki şekillendirilen numunelerden R 125 mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma oluşmuştur, Resim 4.6'de gösterilmiştir. Kırışma meydana gelmeyen parçalar Ek-2'de gösterilmiştir.



Resim 4.6. Deney 10 & Deney 11 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-O; T=1,27 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-O; T=1,60 mm; R=125 mm; F=40 mm

Deney 12'de, 2,00 mm kalınlığında AL2024-O malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden kırışma oluşmamıştır. Parçalar Ek-2'de gösterilmiştir.

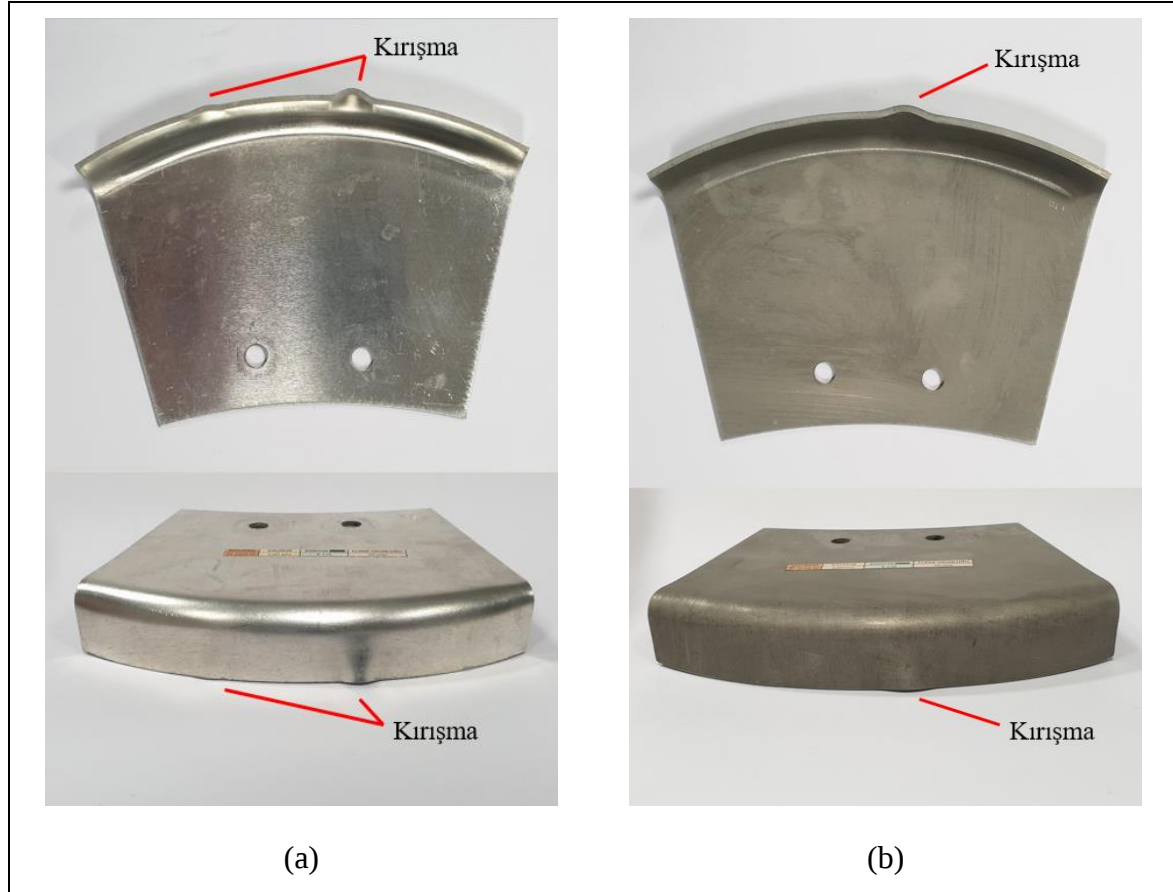
Deney 13’de 0,635 mm kalınlığında, Deney 14’te 1,27 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 20 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneylerde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen her iki kalınlıktaki numunelerden R 125mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma meydana gelmiştir ve Resim 4.7’de gösterilmiştir.



Resim 4.7. Deney 13 ve Deney 14 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=20 mm

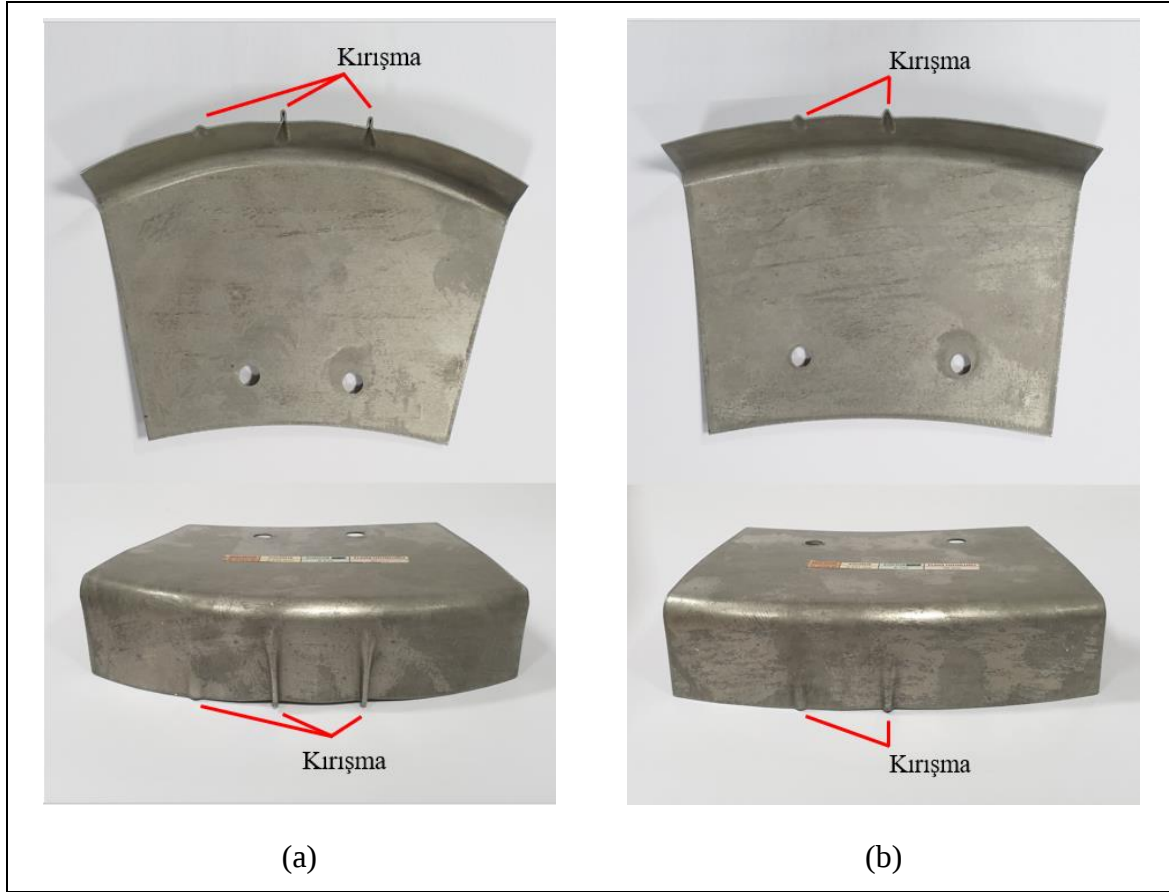
Deney 15’de 1,60 mm kalınlığında, Deney 16’da 2,00 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 20 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneylerde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Her iki kalınlıktaki şekillendirilen

numunelerden sadece R 125 mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma oluşmuştur (Resim 4.8). Kırışma meydana gelmeyen parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



Resim 4.8. Deney 15 & deney 16 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-W; T=2,00 mm; R=125 mm; F=20 mm

Deney 17’de, 0,635 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125mm ve R 250 mm yarıçap kontura sahip parçalarda resim 4.9’de gösterildiği gibi kırışmalar meydana gelmiştir. Kırışma oluşmayan parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



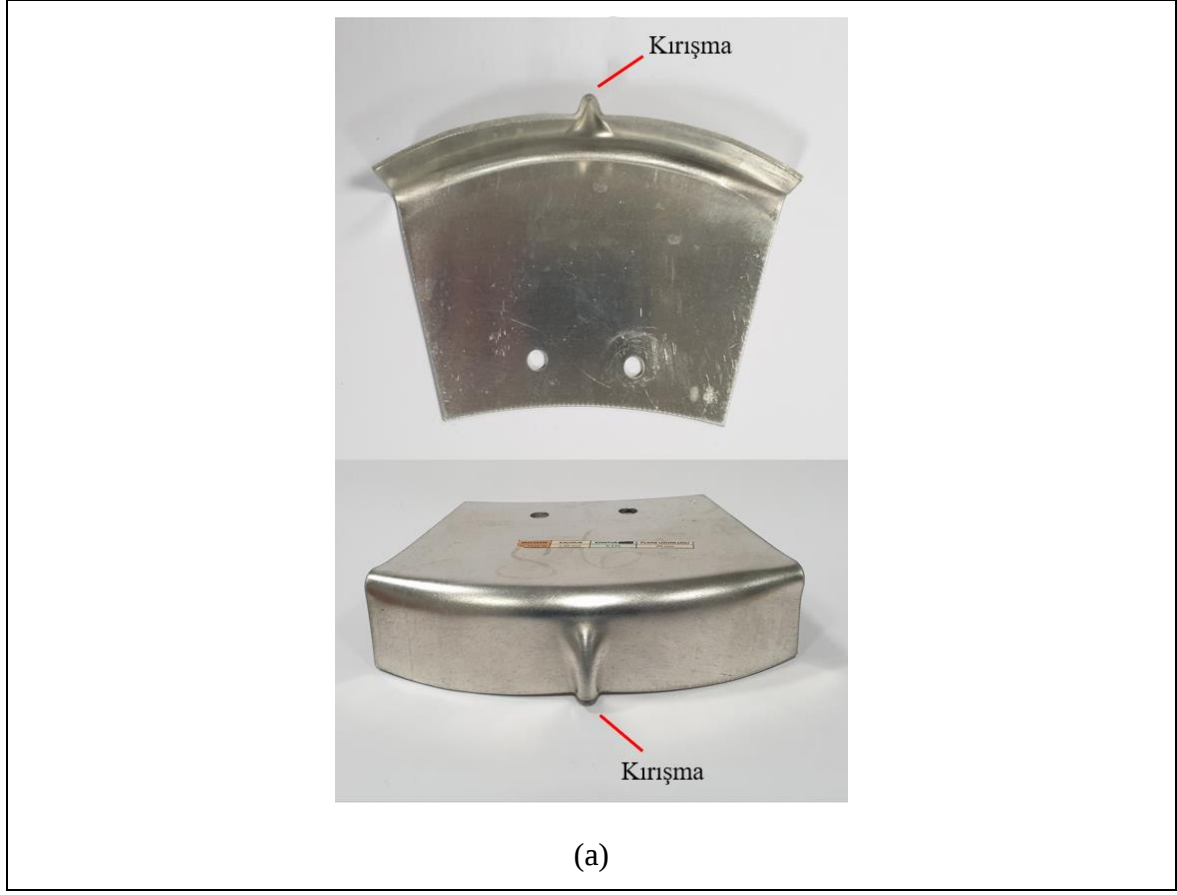
Resim 4.9. Deney 17 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-W; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm

Deney 18’de, 1,27 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirilmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125 mm yarıçap kontura sahip parçada kırışma oluşmuştur ve Resim 4.10’da gösterilmiştir. Kırışma meydana gelmeyen diğer parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



Resim 4.10. Deney 18 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar; Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm

Deney 19’da, 1,60 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirilmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125 mm yarıçap kontura sahip parçada kırışma oluşmuştur (Resim 4.11). Kırışma meydana gelmeyen parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



Resim 4.11. Deney 19 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar; Al2024-W; T=1,60 mm; R=125 mm; F=30 mm

Deney 20’de, 2,00 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125mm yarıçap kontura sahip parçada Resim 4.12’de gösterildiği gibi kırışma meydana gelmiştir. Kırışma gerçekleşmeyen parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



Resim 4.12. Deney 20 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışma; Al2024-W; T=2,00 mm; R=125 mm; F=30 mm

Deney 21’de, 0,635 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125mm R 250 ve R 500 mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma oluşmuştur (Resim 4.13). Kırışma meydana gelmeyen R 100 mm ve R 2000 mm yarıçapa sahip parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



(a)



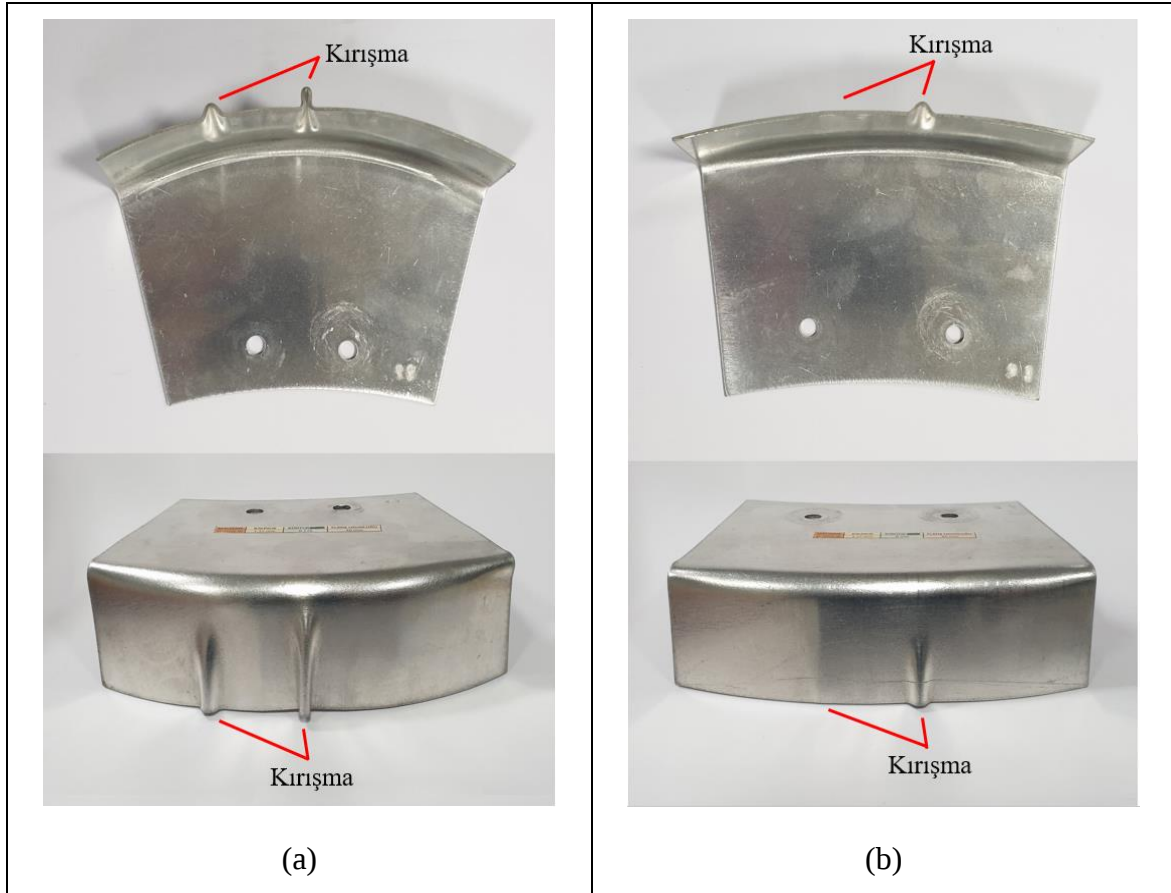
(b)



(c)

Resim 4.13. Deney 21 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=125$ mm; $F=40$ mm, b) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=250$ mm; $F=40$ mm, c) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=40$ mm

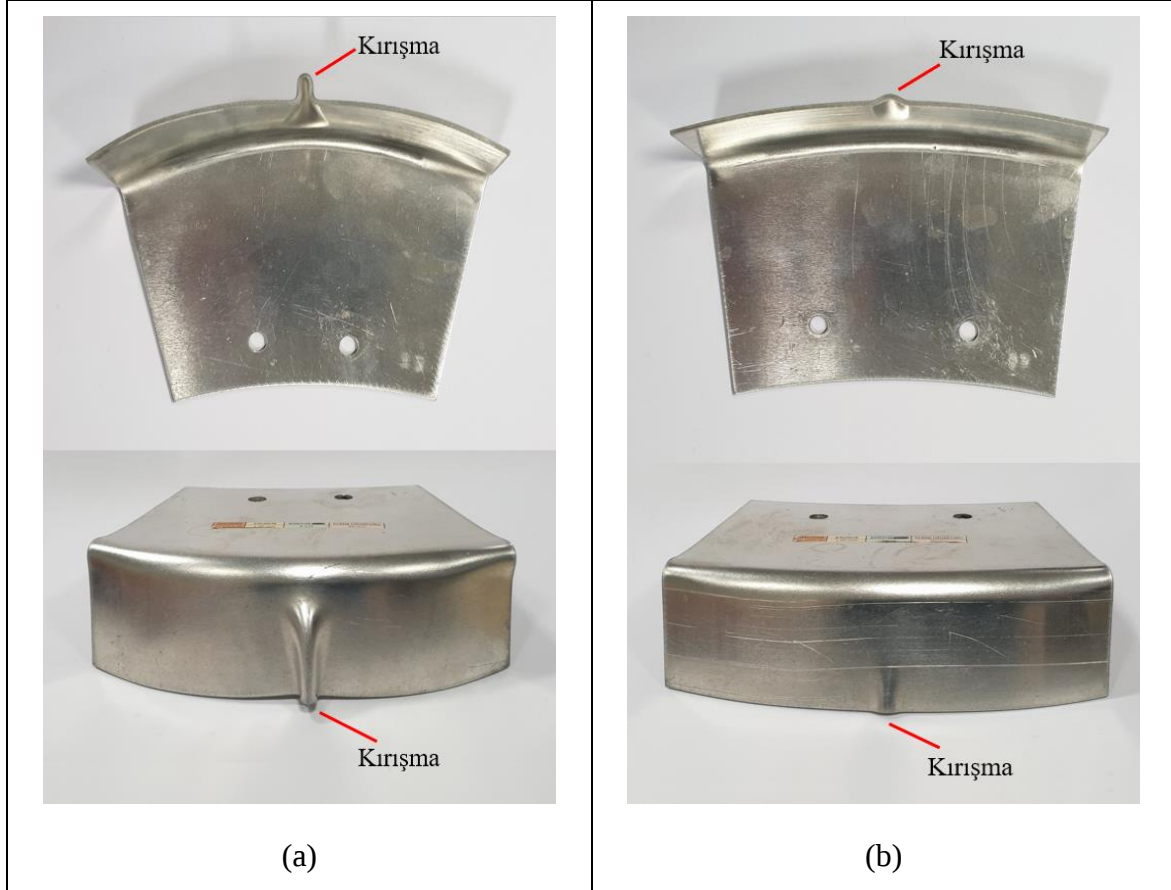
Deney 22’de, 1,27 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125 mm ve R 250 mm yarıçap kontura sahip parçalarda kırışma oluşmuştur, kırışmalar Resim 4.14’da gösterilmiştir. Kırışma meydana gelmeyen parçalar Ek-2’de gösterilmiştir.



Resim 4.14. Deney 22 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=250 mm; F=40 mm

Deney 23’de, 1,60 mm kalınlığında AL2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden R 125 mm ve R 250 mm yarıçap kontura sahip parçalarda

kırışma oluşmuştur (Resim 4.15). Kırışma görülmeyen R500, R 1000 mm ve R 2000 mm kontur yarıçapına sahip parçalar Ek-2' de gösterilmiştir.



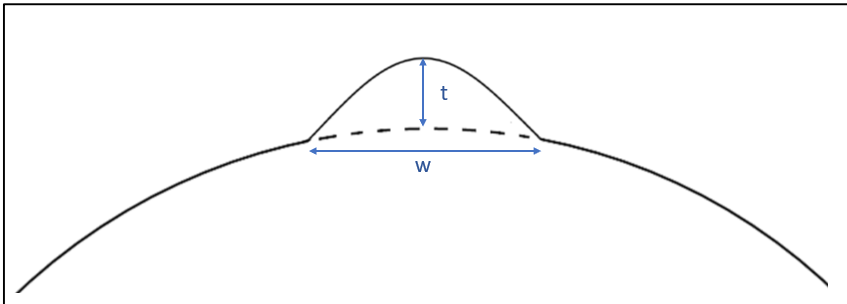
Resim 4.15. Deney 23 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalarda meydana gelen kırışmalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=1,60 mm; R=250 mm; F=40 mm

Deney 24'de, 2,00 mm kalınlığında Al2024-W malzemesindeki numuneler diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Şekillendirmede elde edilen parçalar 40 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Deneyde numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıpta şekillendirilmiştir. Şekillendirilen numunelerden sadece R 125 mm yarıçap kontura sahip parçada kırışma oluşmuştur ve Resim 4.18'te gösterilmiştir. Kırışma meydana gelmeyen diğer şekillendirilmiş parçalar Ek-2'de gösterilmiştir.



Resim 4.16. Deney 24 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçada meydana gelen kırışma; Al2024-W; $T=2,00$ mm; $R=125$ mm; $F=40$ mm

Şekillendirilen parçalarda oluşan kırışıklıkların yüksekliği t , genişliği ise w olarak gösterilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Deneyde şekillendirilecek numune özelliklerinin şematik olarak gösterilmesi

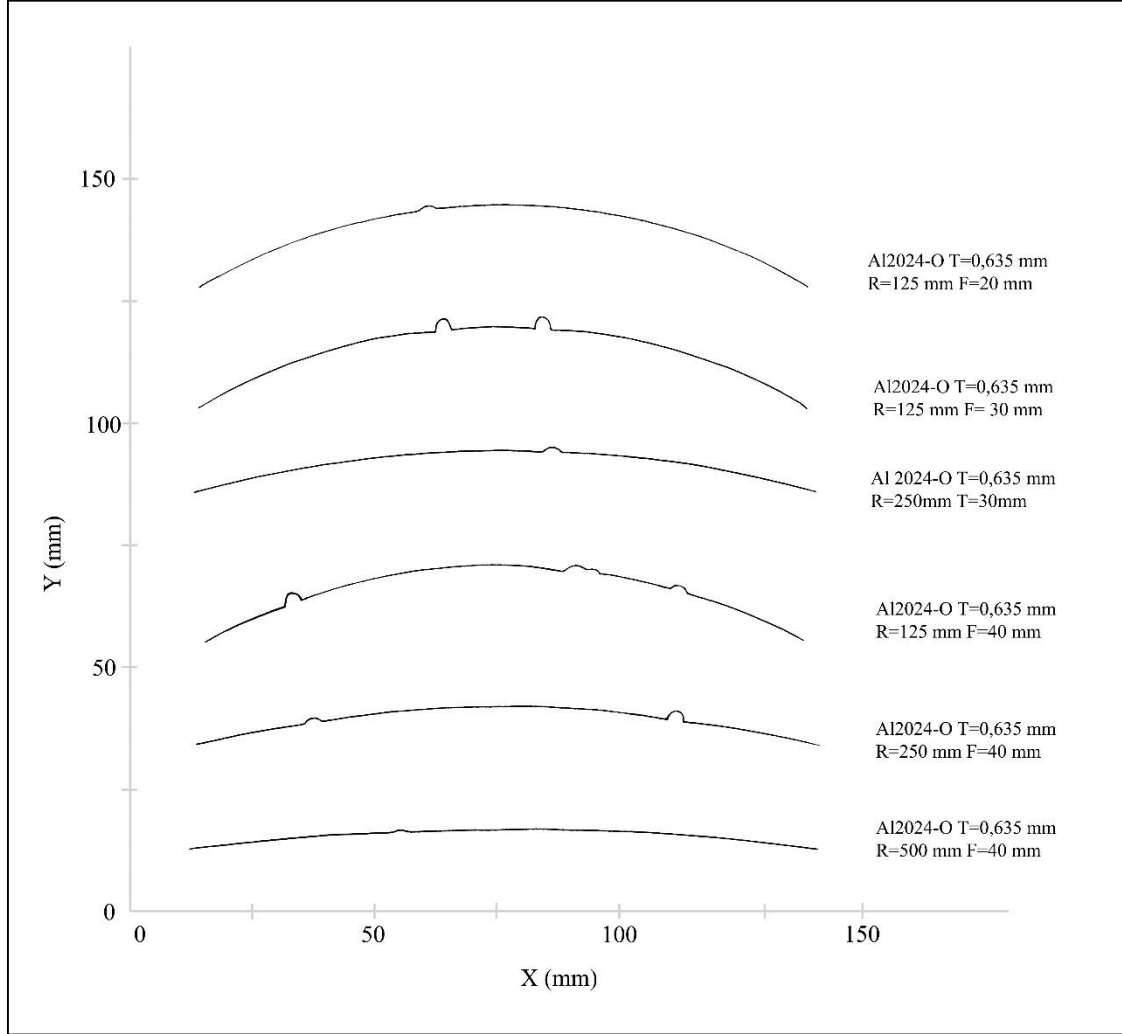
Deneyler sonucunda meydana gelen kırışıklıklar ölçülerek, kırışıklık yükseklikleri elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Deney 9’da şekillendirilen Al2024-O malzemesindeki 0,635 mm kalınlığa, 125 mm kontur yarıçapına ve 40 mm flanş uzunluğuna sahip parçanın en büyük kırışıklık yüksekliği ölçülememiştir. Bunun nedeni, diyaframla şekillendirme işlemi

gerçekleşirken parçada oluşan kırışmanın diyafram basınç kuvveti altında ezilerek diyafram ile parça yüzeyi arasında şekil değiştirmesidir.

Çizelge 4.1. Deney için belirlenen parametreler

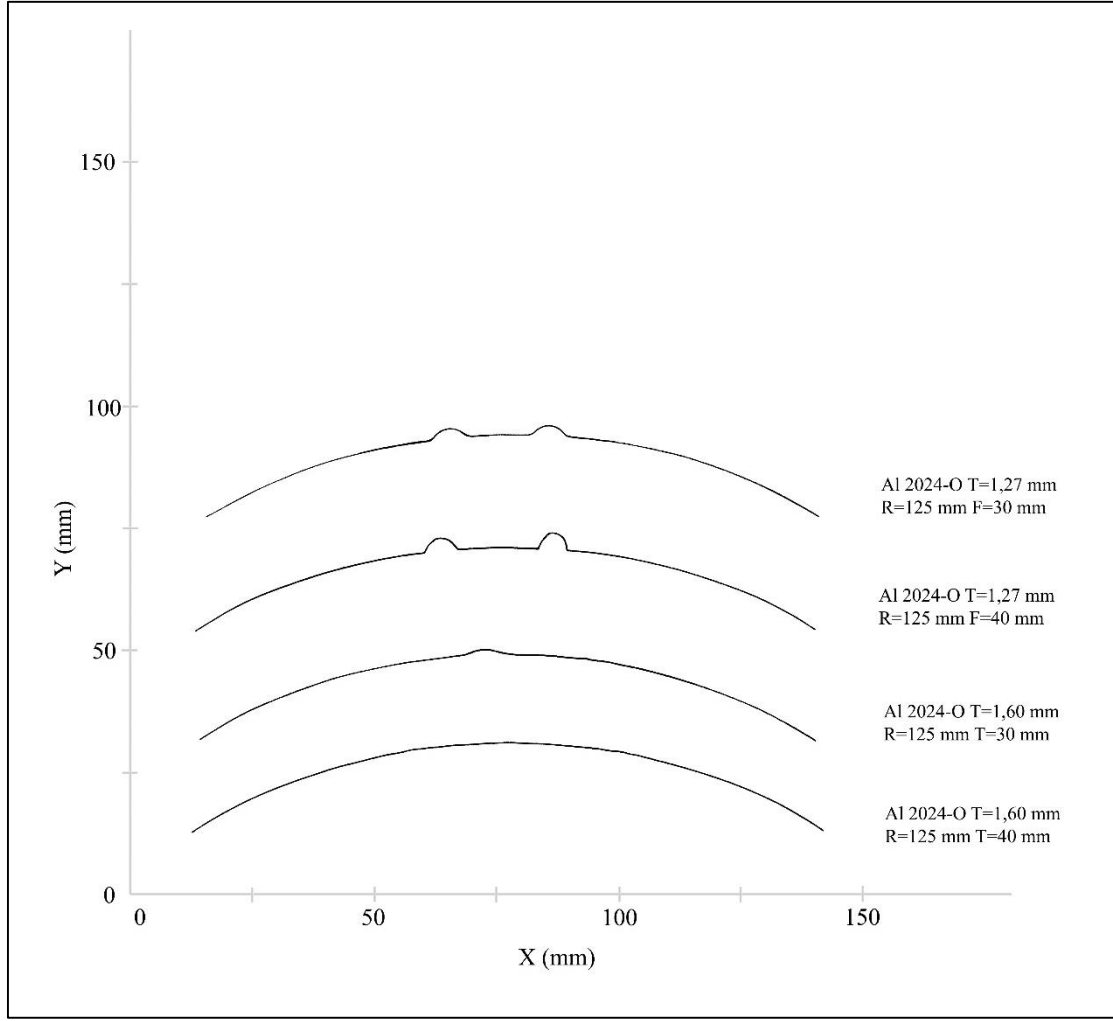
DENEY NO	MALZEME	T (mm)	R (mm)	F (mm)	KIRIŞMA SAYISI	t ₁ x w ₁ (mm)	t ₂ x w ₂ (mm)	t ₃ x w ₃ (mm)	t ₄ x w ₄ (mm)
1	Al2024-O	0,635	125	20	1	0,82 x 3,48	-	-	-
5	Al2024-O	0,635	125	30	2	2,55 x 3,18	2,42 x 2,98	-	-
	Al2024-O	0,635	250	30	1	1,05 x 3,62	-	-	-
6	Al2024-O	1,27	125	30	2	2,18 x 7,25	1,81 x 7,11	-	-
7	Al2024-O	1,60	125	30	1	1,28 x 7,39	-	-	-
9	Al2024-O	0,635	125	40	3	Ölçülemedi	1,97 x 3,88	1,09 x 3,74	-
	Al2024-O	0,635	250	40	2	1,92 x 3,43	1,12 x 3,29	-	-
	Al2024-O	0,635	500	40	1	0,58 x 2,93	-	-	-
10	Al2024-O	1,27	125	40	2	3,27 x 5,93	2,47 x 6,77	-	-
11	Al2024-O	1,60	125	40	2	0,34 x 4,04	0,31 x 2,96	-	-
13	Al2024-W	0,635	125	20	4	1,84 x 4,91	1,36 x 5,07	1,43 x 4,71	1,03 x 4,26
14	Al2024-W	1,27	125	20	1	2,77 x 8,79	-	-	-
15	Al2024-W	1,60	125	20	2	2,28 x 11,53	0,94x8,71	-	-
16	Al2024-W	2,00	125	20	1	1,89 x 16,37	-	-	-
17	Al2024-W	0,635	125	30	3	3,34 x 4,04	3,24 x 3,22	1,20 x 4,44	-
	Al2024-W	0,64	250	30	2	2,33 x 4,21	1,26 x 4,48	-	-
18	Al2024-W	1,27	125	30	3	4,14 x 8,16	2,94 x 9,14	1,24 x 9,38	-
19	Al2024-W	1,60	125	30	1	5,67 x 9,63	-	-	-
20	Al2024-W	2,00	125	30	1	5,81 x 13,97	-	-	-
21	Al2024-W	0,635	125	40	2	4,18 x 2,97	3,77 x 4,42	-	-
	Al2024-W	0,635	250	40	2	2,54 x 3,73	2,19 x 4,31	-	-
	Al2024-W	0,635	500	40	1	1,69 x 4,07	-	-	-
22	Al2024-W	1,27	125	40	2	5,76 x 3,73	3,62 x 7,83	-	-
	Al2024-W	1,27	250	40	1	3,32 x 8,16	-	-	-
23	Al2024-W	1,60	125	40	1	7,34 x 6,71	-	-	-
	Al2024-W	1,60	250	40	1	2,19 x 10,75	-	-	-
24	Al2024-W	2,00	125	40	1	7,69 x 9,83	-	-	-

Tez çalışması kapsamında seçilen parametreler ile yapılan diyaframla hidrolik şekillendirme deneylerinde , numunelerde meydana gelen ve tabloda boyutları verilen kırışmalar grafiklendirilmiştir. Al2024- O malzemesinde 0,635 mm kalınlığına sahip parçaların grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



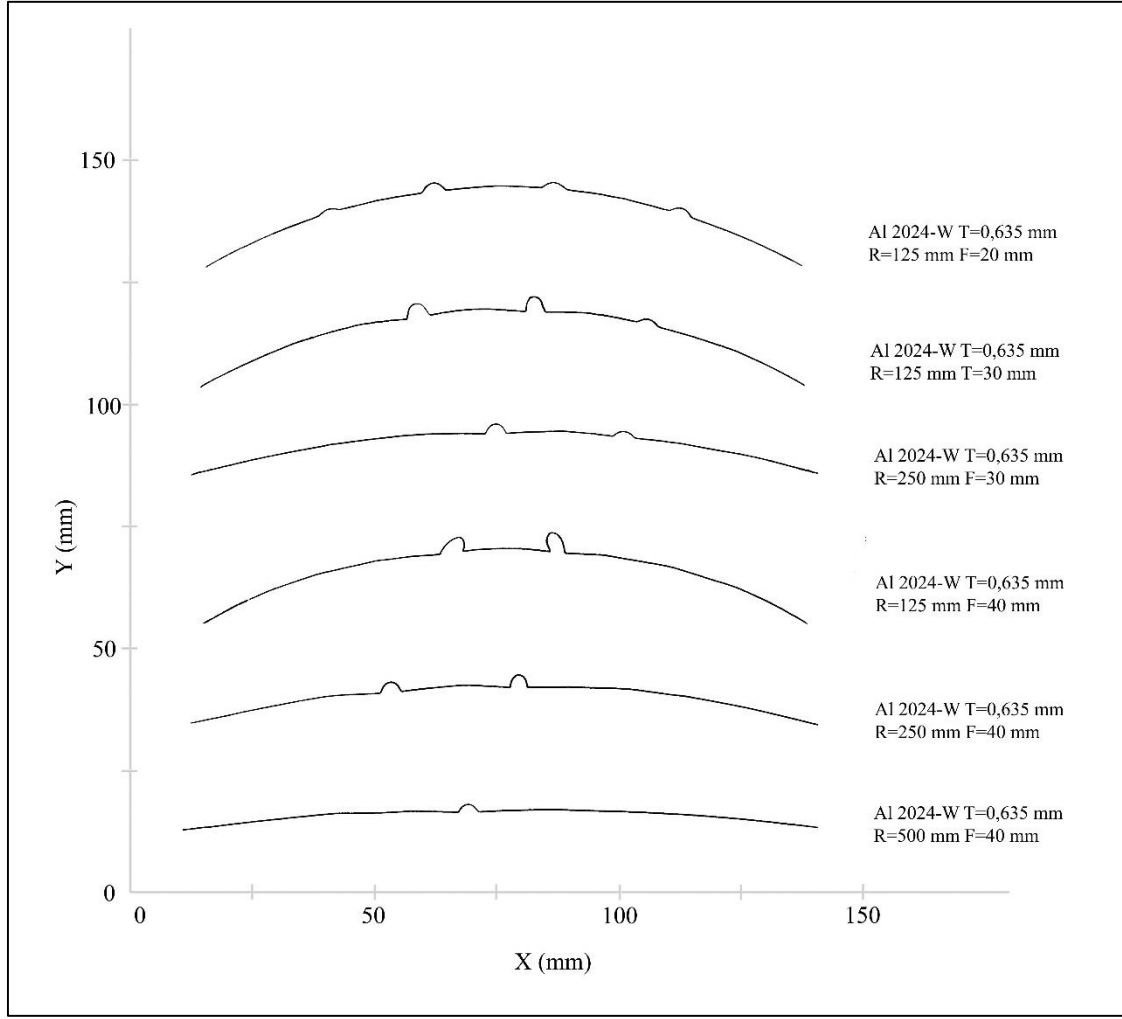
Şekil 4.2. Al2024-O malzeme ve 0,635 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar

Al2024-O malzemesinde 1,27 mm ve 1,60 mm kalınlığına sahip şekillendirilmiş parçalar arasında toplamda 4 adet parçada kırışma meydana gelmiştir. Aynı malzemedeki 2,00 mm kalınlığa sahip parçalarda kırışma meydana gelmemiştir. Kırışmalar, Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

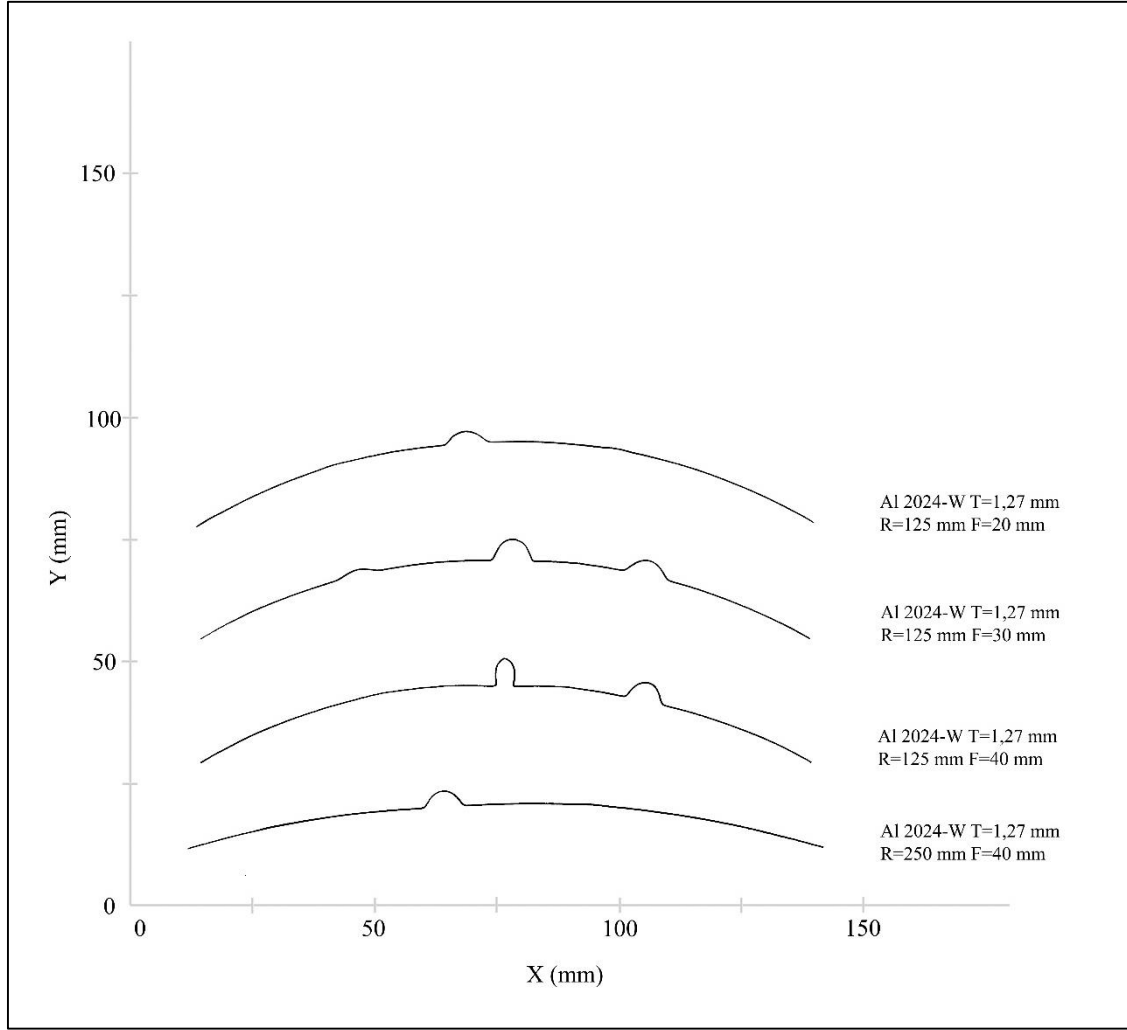


Şekil 4.3. Al2024-O malzeme, 1,27 mm ve 1,60 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar

Al2024-W malzemesindeki 0,635 mm kalınlığındaki parçaların flanşlarında meydana gelen kırışmalar Şekil 4.4'te, 1,27 mm kalınlığındaki parçalarda meydana gelen kırışmalar ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

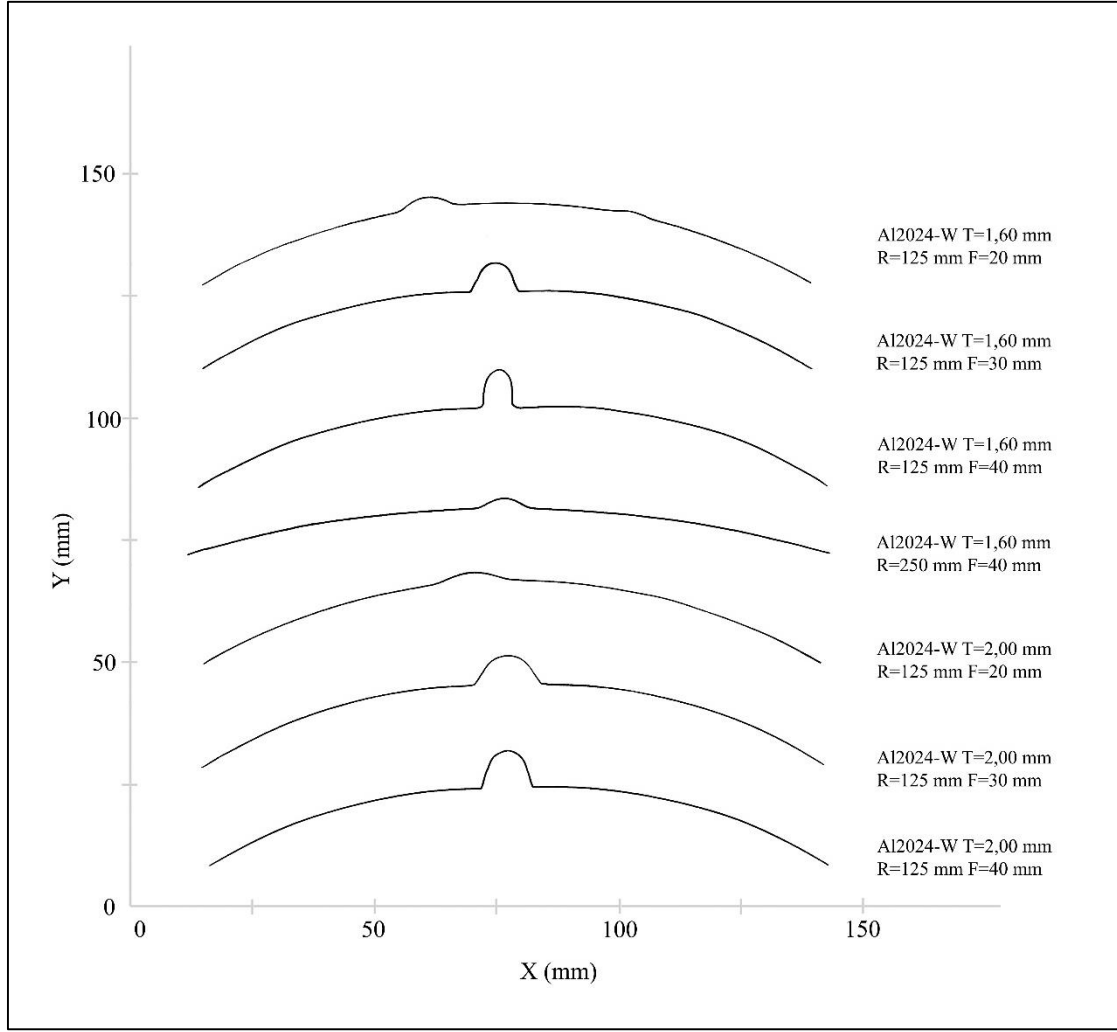


Şekil 4.4. Al2024-W malzeme ve 0,635 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar



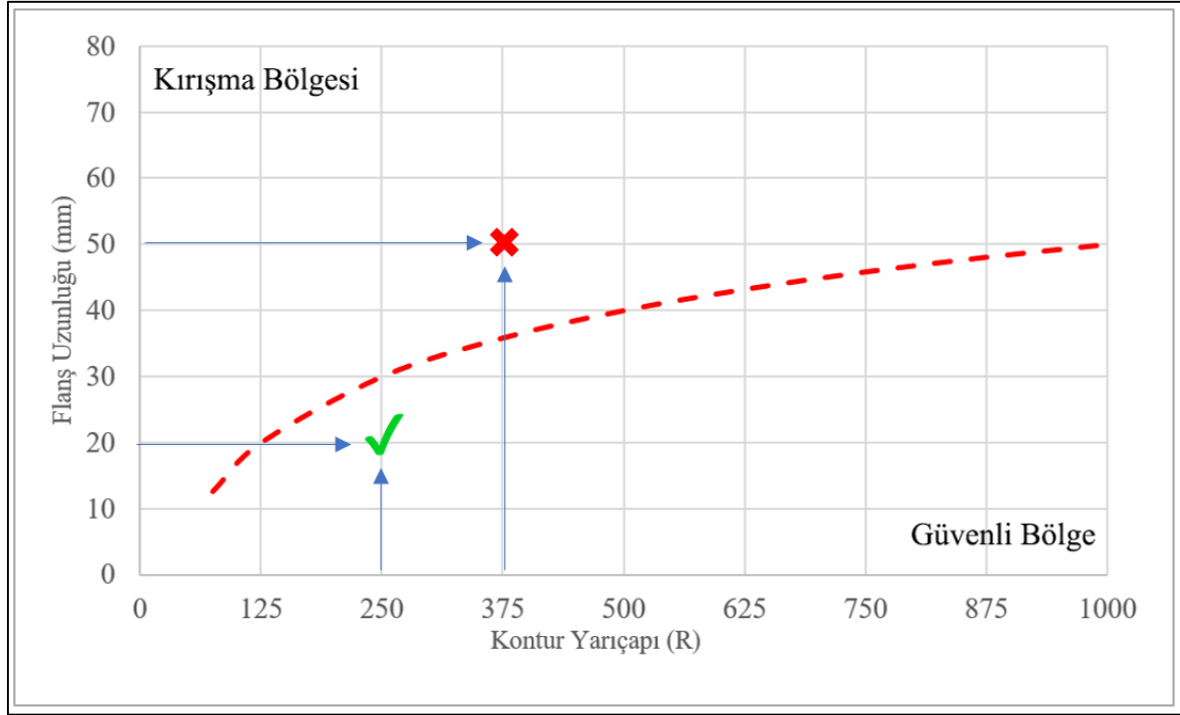
Şekil 4.5. Al2024-W malzeme ve 1,27 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar

Al2024-W malzemedede, Al2024-O malzemesine göre daha fazla kırışma meydana gelmiştir. Al2024-O malzemesinde 2,00 mm kalınlıktaki şekillenen hiçbir parçada kırışma gözlemlenmezken, Al2024-W malzemesindeki 2,00 mm kalınlığındaki 2 adet parçada kırışma meydana gelmiştir. Al2024-W 1,60 mm ve 2,00 mm kalınlığındaki parçalarda meydana gelen kırışıklıklar Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



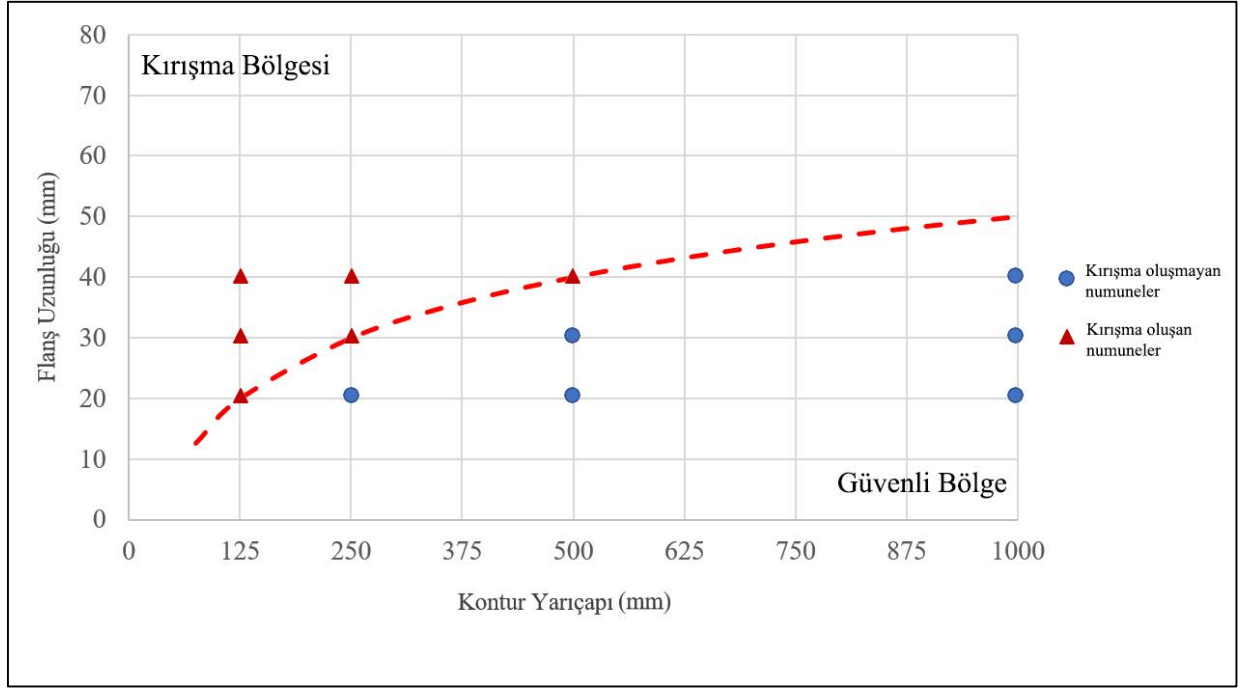
Şekil 4.6. Al2024-W malzeme, 1,60 mm ve 2,00 mm kalınlığına sahip numunelerin flanşlarında meydana gelen kırışıklıklar

Tez çalışması kapsamında belirlenen malzeme ve kalınlıktaki, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile üretilen parçalar için kırışma oluşma alanları ve güvenli alanlar grafik olarak oluşturulmuştur. Örnek olarak Şekil 4.7’de gösterilen grafik için 375 mm kontur yarıçapına ve 50 mm flanş uzunluğuna sahip bir parça, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile üretildiğinde parça flanşında kırışıklık meydana gelmektedir. Yine aynı grafiğe göre 250 mm kontur yarıçapına ve 20 mm flanş uzunluğuna sahip parça diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile üretildiğinde kırışıklık meydana gelmeden parça elde edilebilecektir. Bu kapsamda deney sonuçları kullanılarak kırışma ve güvenli bölgelerin belirlendiği grafikler oluşturulmuştur.



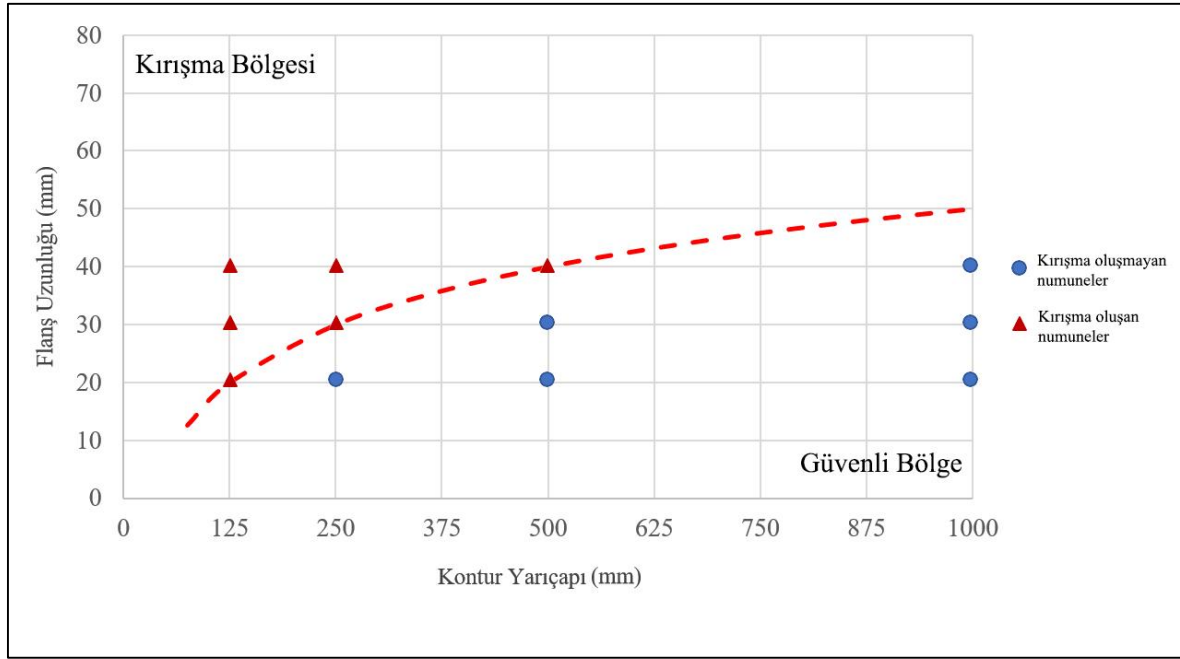
Şekil 4.7. Güvenli ve kırışma bölgesi grafik örneği

Al2024-O malzemesindeki numuneler için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar neticesinde 0,635 mm kalınlıktaki malzemeler için kullanılan parametreler dahilinde kırışma ve güvenli bölge alanları oluşturulmuştur (Şekil 4.8). Deneyler sonucunda kırışma bölgesini ve güvenli bölgeyi ayıran eğri denklemi ' $y = 14,427 \ln(x) - 49,658$ ' şeklinde belirlenmiştir. Al2024-O malzemesindeki 1,27 mm 1,60 mm ve 2,00 mm kalınlığındaki numuneler ile belirlenen kontur yarıçap değerleri ile yapılan deneylerde belirtilen üç farklı kalınlık için, 20 mm flanş uzunluğuna sahip şekillendirilmiş parçalarda kırışma meydana gelmemiştir. Bu nedenle, bahsedilen bu kalınlık ve malzemede kırışma bölgesi grafikleri oluşturulamamıştır.

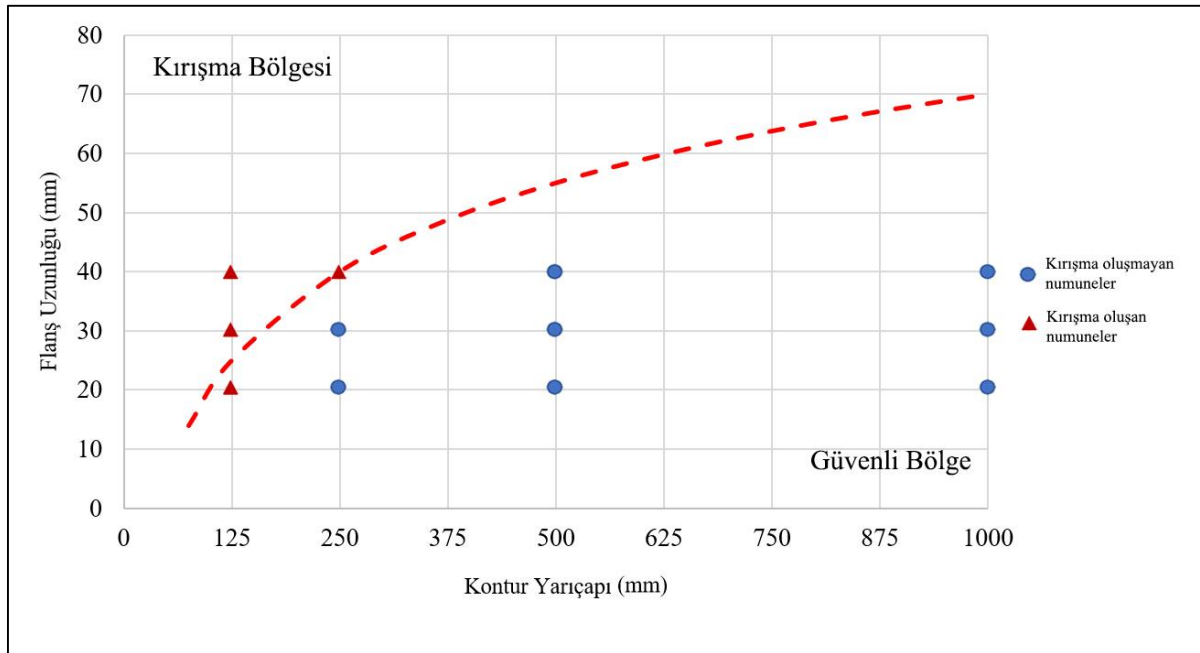


Şekil 4.8. Al2024-O 0,635 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği

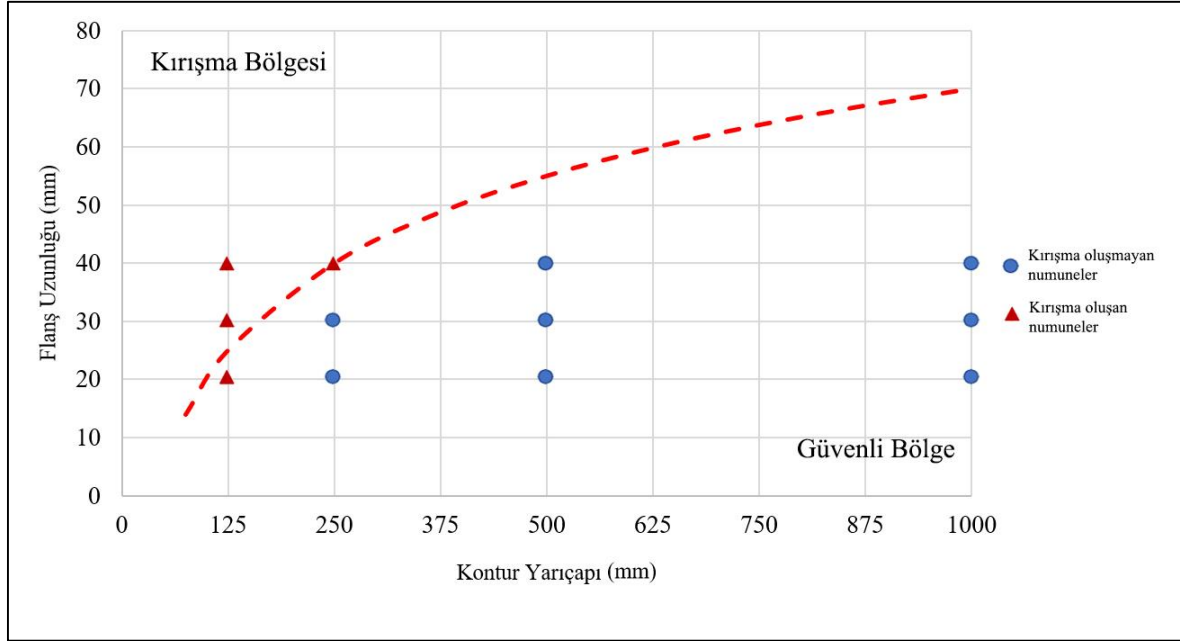
Al2024-W malzemesindeki numuneler için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar doğrultusunda, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilen 0,635 mm, 1,27 mm, ve 1,60 mm kalınlıktaki malzemeler için kullanılan parametreler dahilinde kırışma ve güvenli bölge alanları oluşturulmuştur (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11). Deneyler sonucunda Al2024-W, 0,635 mm kalınlıktaki malzeme için kırışma bölgesini ve güvenli bölgeyi ayıran eğri denklemi ' $y = 14,427 \ln(x) - 49,658$ ' şeklinde belirlenmiştir. Al2024-W, 1,27 mm ve 1,60 mm kalınlıktaki malzemeler için kırışma bölgesini ve güvenli bölgeyi ayıran eğri denklemi ise ' $y = 21,64 \ln(x) - 79,487$ ' şeklinde belirlenmiştir. Al2024-W malzemesinde 2,00 mm kalınlığına sahip, belirlenen tüm flanş uzunluğundaki numuneler ile yapılan deneylerde, sadece 125 mm kontur yarıçapına sahip parçalarda kırışma meydana gelmiştir. Alınan sonuçlar doğrultusunda 2,00 mm kalınlıktaki malzemeler için grafik oluşturulamamıştır.



Şekil 4.9. Al2024-W 0,635 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği

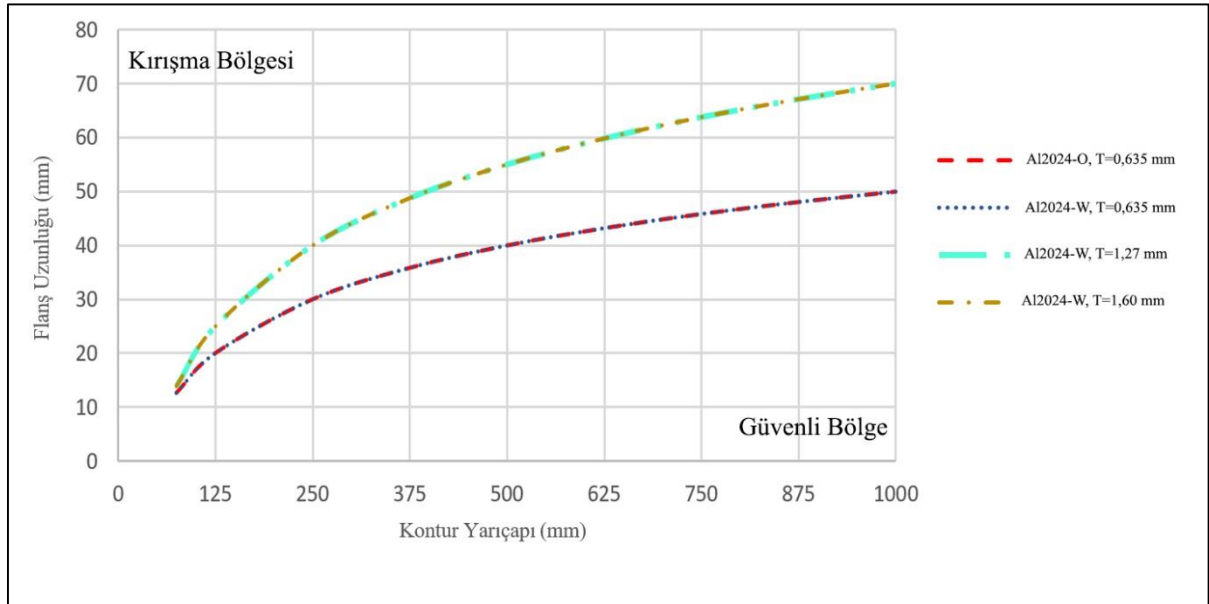


Şekil 4.10. Al2024-W 1,27 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği



Şekil 4.11. Al2024-W 1,60 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki kırışma grafiği

Deneylerden elde edilen sonuçlar ile oluşturulan grafikler Şekil 4.12'de beraber gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Deneyler sonucunda malzeme ve kalınlığa göre oluşturulmuş kırışma grafiği

4.1.2. Deney sonuçları tartışmaları

Tez çalışmasında, diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde meydana gelen kırışıklıkların incelenmesinde rol oynayan malzeme cinsi, malzeme kalınlığı, flanş uzunluğu ve kontur yarıçapı değerlerinin karşılaştırılabilmesi amacı göz önünde tutularak deneylerin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırılan deneyler toplamda 24 adettir ve her bir deneyde 5 adet numune şekillendirilmiştir.

- Deneylerin tümü göz önünde bulundurulduğunda flanş boyunun kırışma üzerinde büyük etkisi olduğu görülmektedir. 20 mm flanş boylarındaki şekillendirilmiş 40 adet parçadan sadece 5 adet parçada kırışma gözlemlenmiştir. Parça kalınlıklarının artması ile bu kırışıklık oluşumlarının azaldığı ve yok olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu veriden, kırışmanın ince parçalarda daha yoğun gerçekleştiği sonucuna varılmaktadır. Bu sonuç Hatipoğlu'nun [40] çalışması ile örtüşmekte ve beklenen yaklaşımları karşılamaktadır.
- Deneylerin 19 tanesinde, R 125 mm kontur yarıçapına sahip şekillendirilmiş parçalarında kırışma meydana gelmiştir. Aynı parametrelere sahip parçalarda kontur yarıçapı arttıkça kırışma azalmış ve yok olmuştur. R 2000 mm kontur yarıçapına sahip tüm şekillendirme deneylerinde ise kırışma gözlemlenmemiştir. R kontur yarıçapı sonsuz olduğunda şekillenme sadece flanş bükme şeklinde olacak ve konturlu yapıya göre malzemenin flanş yanlarına doğru olan gerinimi azalacaktır. Konturlu yapı arttıkça flanş yanlarında olan gerinim artarak kırışma riskini artırmaktadır. Abedrabbo ve arkadaşlarının [30] gerçekleştirdiği çalışmada da yarım küre şeklinde şekillendirilen parçaların yarıçapı arttıkça kırışma azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar birbirini destekler niteliktedir.
- Şekillenme, diyaframın hidrolik basınç sayesinde sac metal numuneyi kalıbın üzerine sıvaması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu durumda hazırlanan numunenin flanş olarak bükülecek kısmının yay uzunluğu, şekillenmeden sonraki yay uzunluğuna dönüşmektedir. Şekillenme öncesindeki yay uzunluğu, şekillenme sonrasındaki yay uzunluğundan daha fazladır. 40 mm flanş uzunluğuna sahip deney 9 ile deney 12 ve deney 21 ile deney 24 arasındaki deney sonuçlarında en fazla kırışıklık meydana gelen parçalar mevcuttur. Bunun nedeni bahsedilen yay uzunluğu farkıdır. Flanş uzunluğunun 40 mm olmasından dolayı ilk yay uzunluğu ve şekillendikten sonra oluşan yay uzunluğu arasındaki fark fazladır. Şekillenme sonucu flanşın oluşumu ile malzeme kenarlardan flanşın orta kısma doğru yığılmaktadır ve bu farktan dolayı malzeme yığılması fazla olmaktadır. Bunun sonucunda deneyde karşılaşılan yoğun kırışma meydana gelmiştir.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deney sonuçları, Altan ve arkadaşlarının [21] konturlu yapıya sahip parçaların matematiksel modelleme çalışmaları sonucunda çıkardıkları flanş uzunluğunun şekil değiştirme arasındaki ilişki yaklaşımlarıyla örtüşerek, flanş uzunluğunun artışı ile kırışma yoğunluğu orantılı şekilde arttığı sonucunu göstermektedir.

- Deney 6 ve deney 18’de 1,27 mm kalınlığındaki numuneler şekillendirilmiştir. İki deney arasındaki tek fark deney 6’da Al2024-O, deney 18’de ise Al2024-W malzemeleri seçimidir. Şekillenme sonuçları ile deney 18’de deney 6’ya göre daha fazla kırışma meydana geldiği tespit edilmiştir. Al2024-W malzemesi ısıtılma işlemi ile oluşmakta ve kararsız bir yapıya sahip olmaktadır. Bu malzemedeki tanecik yapısı küçük, homojen fakat kararsız biçimdedir. Bu nedenle kırışmalar daha fazla ve daha büyük şekilde meydana gelmektedir.
- Tüm sonuçlar incelendiğinde ve yorumlandığında deneylerden en fazla kırışıklığın Al2024-W malzemesinde, en büyük flanşlı parçada, kalınlığı en düşük malzemede ve en küçük kontur yarıçap değerine sahip olan parçada meydana gelmesi beklentisini destekler biçimde en çok kırışma deney 21’deki ilk numunede meydana gelmiştir. Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenen bu parça Al2024-W malzemesinde, 0,635 mm kalınlığında, 40 mm flanş uzunluğunda ve R 125 mm değerinde kontur yarıçapına sahiptir.
- 2,00 mm kalınlığındaki numunelerde kırışma meydana gelmemesi veya çok az oluşması beklenirken Deney 24’te malzeme flanşın orta bölgesine yığılmış ve büyük bir kırışıklık meydana gelmiştir. Basınçlandırılmış diyaframın kırışıklık bölgesinin uç kısmını sıkıştırması sonucunda malzemede çatlak meydana gelmiştir. Ayrıca malzemenin kalınlığından dolayı, diyaframın kırışıklık bölgesine basınç uygulaması ile flanşın yanlarında ve büküm bölgelerinde deformasyonlar oluşmuştur. Kalın parçalardaki kırışma diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenen parçaların, basıncın iletilmesi ile farklı bölgeleri de deformasyonlara yol açabilmektedir. Deney 9’daki ilk numunede ise parçanın 0,635 mm kalınlığa sahip olmasından dolayı oluşan kırışmalar diyaframdaki basınç nedeni ile ezilmiş ve parçanın farklı bölgelerinde deformasyona neden olmamıştır.
- Deneyler sonucu oluşturulan kırışma grafiklerinde güvenli bölgeler ve kırışmanın meydana geleceği alanlar belirlenmiştir. Grafikler malzemenin cinsine ve kalınlıklarına göre oluşturulmuştur. Grafiklerde oluşturulan çizgiler kırışma sınırlarıdır. Bu çizginin altındaki bölgelerde yer alan özelliklere sahip parçaların kırışması beklenmektedir.

Grafiklerde, kırışma alanlarında aşağıya ve sağa doğru düz bir çizgide ilerledikçe kırışma miktarlarının artması beklenmektedir.

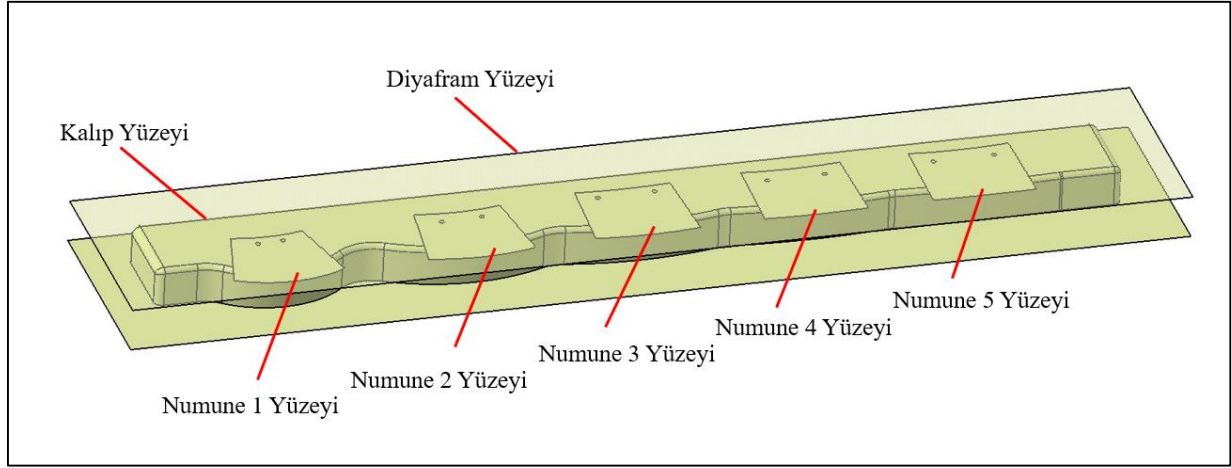
4.2. Sayısal Çözümleme ve Sonuçlar

Analiz programları, çözümlemeleri ve yaklaşımları sayesinde meydana gelecek bir olaydan elde edilecek sonuçları simüle etmektedir. Sonuçlar hakkında bir fikir sunabilen analiz programları, günümüz teknolojisinin ilerlemiş olmasına rağmen programların gerçekleştirdiği hesaplamaların yanında birçok kabulün yer aldığı çözümlemeler sunarak sonuçlar elde etmesi nedeni ile her zaman gerçeği yansıtmaz. Özellikle sac şekillendirmelerinde oluşan kırışıklıklar gibi malzemenin ve diğer faktörlerin önemli derecede rol oynadığı durumlar hakkında sonuçlar gerçeği tamamen yansıtamamaktadır.

Bu bölümde, çalışma kapsamında gerçekleştirilen diyaframla hidrolik şekillendirilme deneylerinin bir kısmı PAM-STAMP analiz programında çözümlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünün amacı sayısal çözümleme yöntemi ile deneysel olarak elde edilen gerçek sonuçların karşılaştırılmasıdır.

4.2.1. Analiz edilecek modellerin oluşturulması

PAM-STAMP program çözümlemesinde deneydeki şekillendirme metodu örnek alınarak, tasarlanan kalıpta 5 adet numunenin diyaframla hidrolik şekillendirilmesi çözümü incelenmiştir. Öncelikle deneylerde kullanılan elemanların yüzeyleri Catia programında çıkarılmıştır. Numune yüzeylerine ek olarak kalıp yüzeyi ve diyaframın kalıba ve numunelere temas eden yüzeyi oluşturulmuştur. (Şekil 4.12) Oluşturulan yüzeyler PAM-STAMP programına aktarılmıştır. Yüzeyler programda X, Y, Z kordinatları içinde yerleştirilmiştir. Z kordinatı diyafram yüzeyine dik olarak konumlandırılmıştır. Bu sayede Z eksenini doğrultusunda basınç sağlanarak basınçlı diyafram altında numunelerin şekillendirilmesi çözülecektir.



Şekil 4.13. CAD programında oluşturulmuş numune, diyafram ve kalıp yüzeyleri

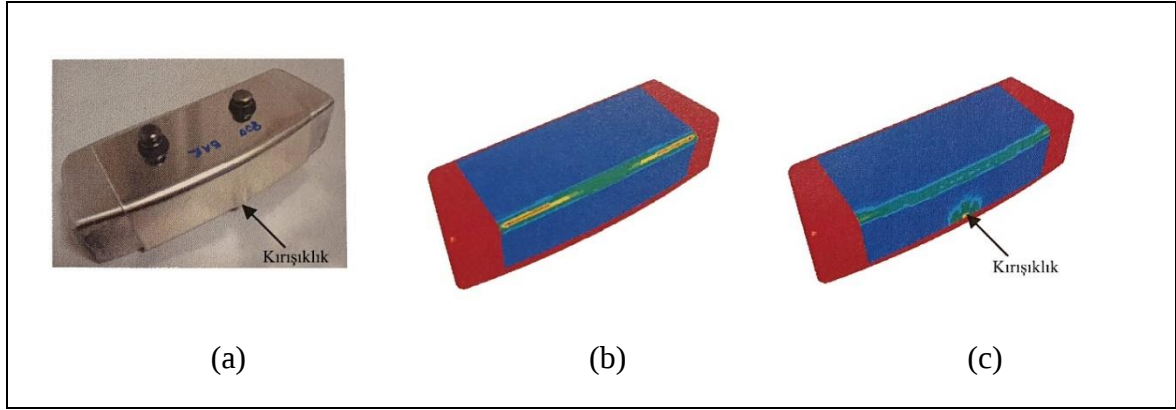
PAM-STAMP analiz programına aktarılan yüzeyler programda tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda kalıp yüzeyine 0,1 mm kalınlık verilmiş ve rijit olduğu programa tanımlanmıştır. Ayrıca, her bir numune için kalınlıklar, malzeme bilgisi, malzeme özellikleri programa tanımlanmıştır. Malzeme kalınlıkları 0,635 ve 1,27 mm olarak seçilmiştir. TUSAŞ projelerinde kullanılmak amacı ile hazırlanan şekillendirme sınır diyagramları PAM-STAMP programında kullanılmıştır. Çekme testlerinden elde edilen akma mukavemet değerleri ve malzeme karakteristikleri analiz programında malzeme özellikleri belirlemede kullanılmıştır. Kullanılan değerler Çizelge 4.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Analiz programında kullanılan malzeme özellikleri

	Yoğunluk (ton/mm ³)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı
Al2024-O	2.7e-9	62	216	0.33
Al2024-W	2.7e-9	148	423	0.33

Hatipoğlu ve arkadaşlarının [50] gerçekleştirdiği çalışmada, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilen numunelerin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümlemeler ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirdikleri deneyde, diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi kullanılarak Al2024-T3 malzemeye, 1 mm kalınlığa, 500 mm yarıçaplı kontura ve 40 mm flanş uzunluğuna sahip parça şekillendirilmiştir. Şekillendirme sonucunda parçanın flanşında kırışıklık meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.13.a). Deneysel olarak gerçekleştirilen numunelerin şekillendirilmesi, LS-DYNA analiz programında 2 ayrı şekilde çözümlenmiştir. Çözümlemelerde deneysel parametreler aynı şekilde simüle edilmiştir fakat bir

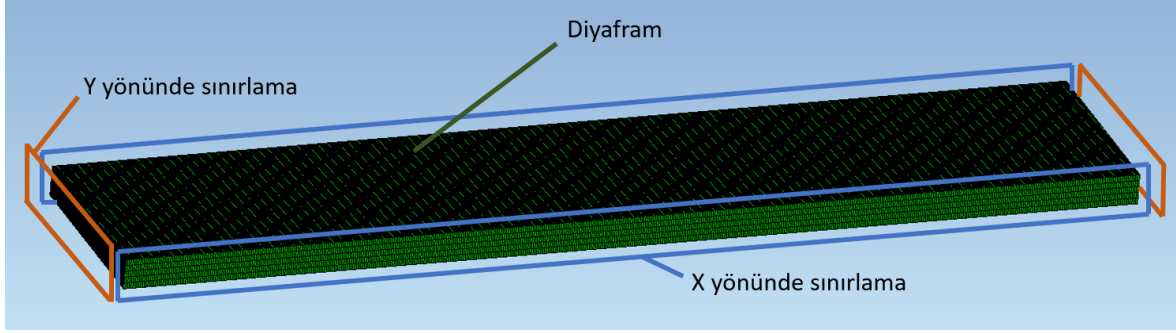
çözümlemede diyafram yer alırken diğer çözümlemede ise diyafram hesaba katılmamıştır. Böylece analiz ortamında diyaframın çözümlemeye etkisi belirlenmiştir. Diyaframsız çözümleme sonucunda parçada kırışıklık oluşmadığı sonucuna ulaşılmış ve gerçek sonuç yakalanamamıştır (Şekil 4.13.b). Diyafram uygulanarak yapılan çözümleme neticesinde ise deneysel olarak oluşan kırışma çözümleme sonucunda da meydana gelmiştir (Şekil 4.13.c). Böylece, diyaframın analizlerde çözümlemeye etkisinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.14. Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenen numune a) deneysel şekillendirme, b) diyaframsız analiz çözümlemesi, c) diyaframlı analiz çözümlemesi

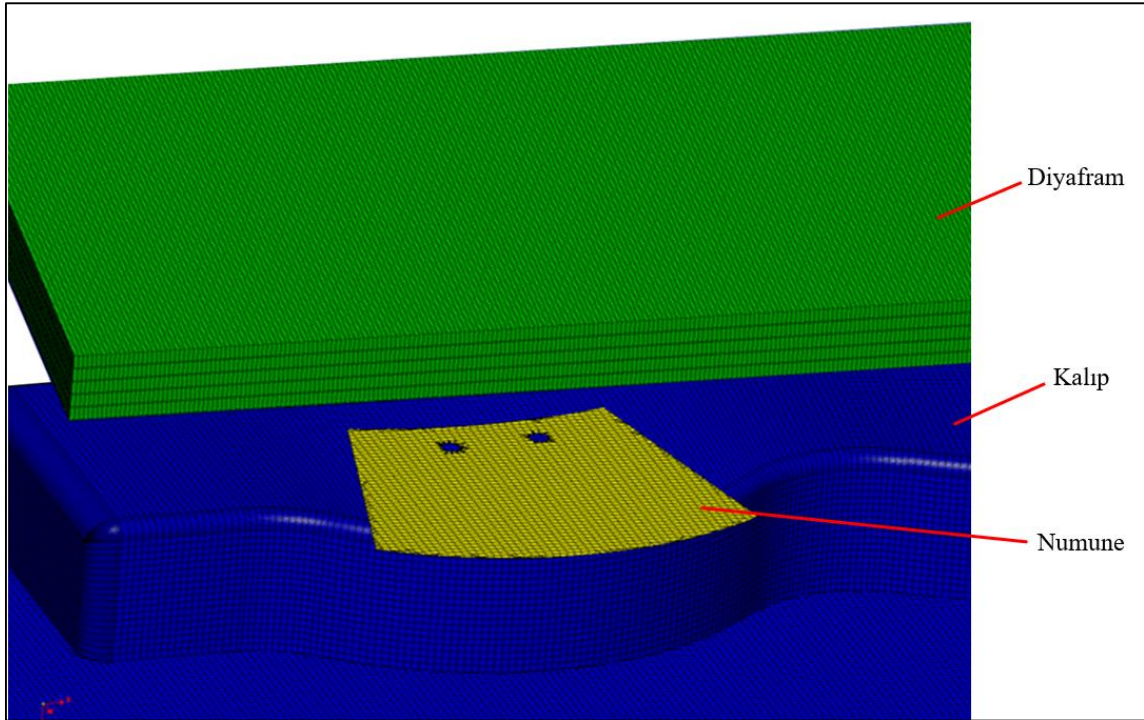
Hatipoğlu ve arkadaşlarının [50] çalışması gözönünde bulundurularak analiz çözümlemesinde diyafram modellemesi yapılmıştır. Modellenerek elde edilen diyafram yüzeyi kullanılarak 40 mm kalınlığında diyafram oluşturulmuştur. Diyaframın üst yüzeyi ile kalıp ve numunelerle temas eden alt yüzeyi ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Oluşturulan elemanların şekillendirme sırasında gerçekteki gibi davranmaları için bazı kısıtlamalar getirilmelidir. Kalıp X, Y ve Z eksenlerinde sabitlenerek deneydeki görevini yerine getirilmesi sağlanmıştır. Deneylerde numuneler pim ile kalıba yerleştirilmiştir. Analiz programında da numunelerde bulunan pim delikleri çevresi X, Y ve Z eksenlerinde sabitlenmiştir. Böylece numuneler kalıba yerleştirilmiştir. Diyafram ise X ve Y eksenlerinde sabitlenmiş ve Z ekseninde ise hareketi serbest bırakılmıştır (Şekil 4.14). Böylece Z eksenindeki basınç sayesinde kalıba doğru ilerleyecek ve kalıp ile diyafram arasında kalan numuneler şekillenecektir.

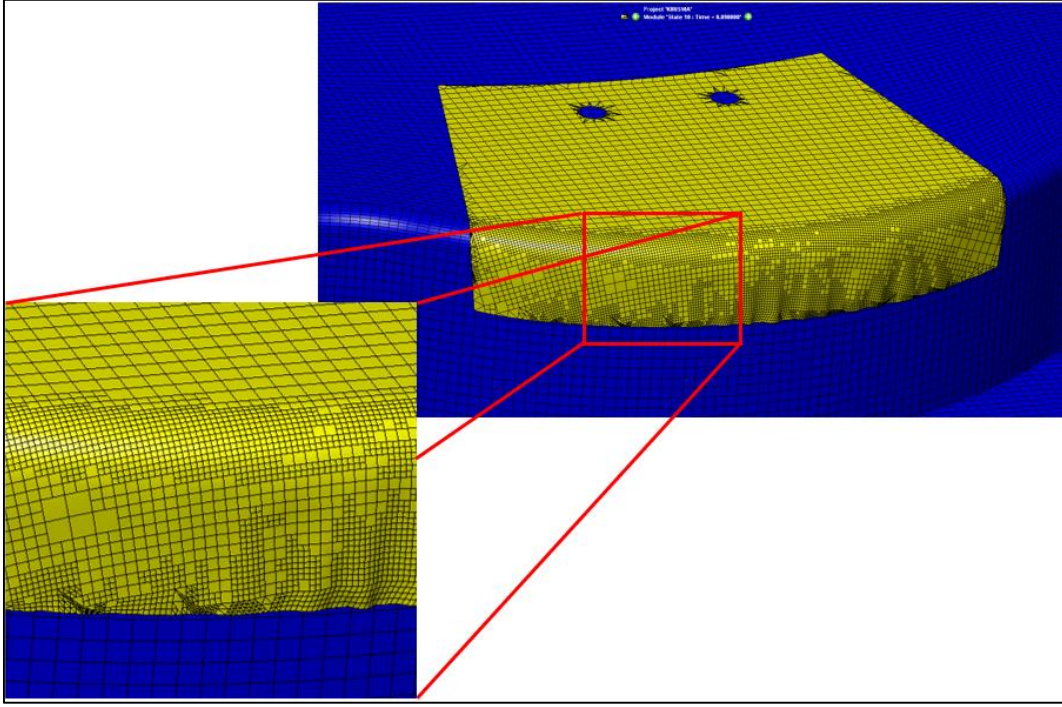


Şekil 4.15. Diyafram modelinin X ve Y yönünde sınırlandırılması

Oluşturulan modeller 2,5 mm x 2,5 mm ağ yapısı elemanlarına bölünmüştür (Şekil 4.15). Bu boyuttaki ağ yapısı elemanları çözüm için uygundur. Ayrıca PAM-STAMP programının uyarlanabilirlik özelliği kullanılarak, numunelerin büküldüğü bölgeler gibi kritik bölgelerde ağ yapısı elemanlarının 2'ye yani 1,25 mm x 1,25 mm ya da 3'e yani 0,625 mm x 0,625 mm boyutlarına bölerek daha doğru biçimde sonuçlar elde edilmiştir Şekil (4.16).

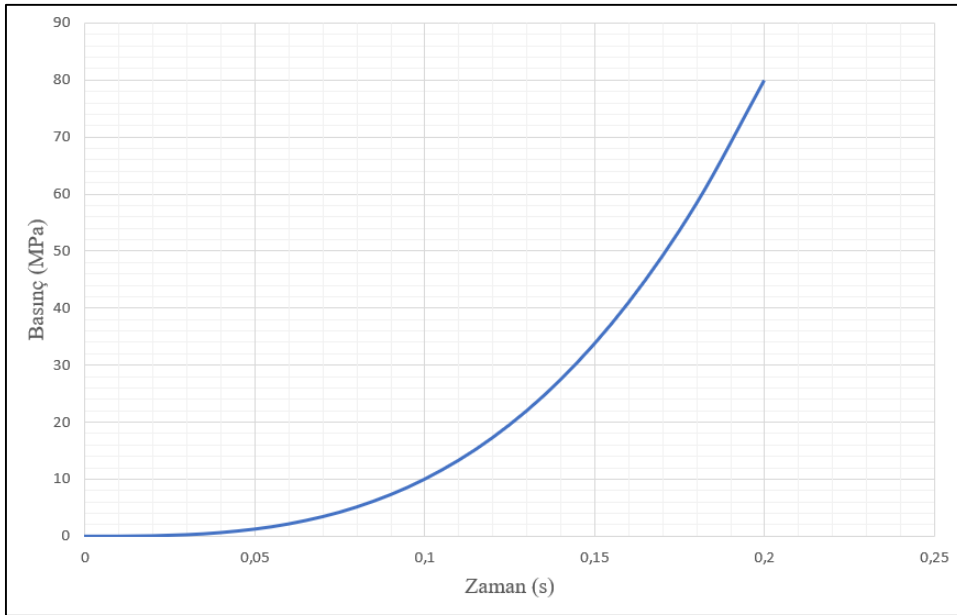


Şekil 4.16. Diyafram, kalıp ve numunede oluşturulan ağ yapısı



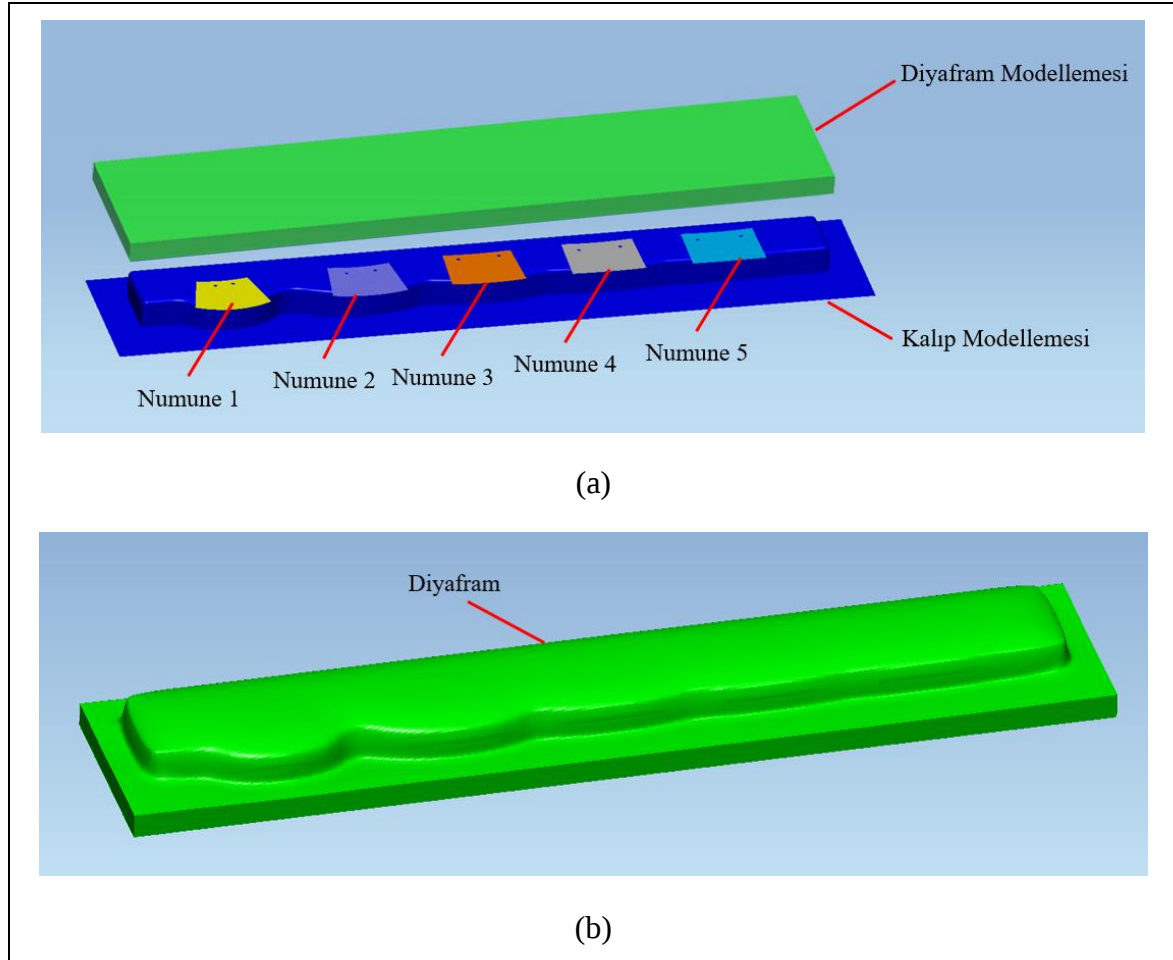
Şekil 4.17. Kritik bölgelerdeki uyarlanabilirlik özelliği ile ağ yapısı elemanlarının bölünmesi

PAM-STAMP programında şekillenme işlemi genellikle gerçek işlem hızının 100 katı olarak alınmaktadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen analizde proses süresi 0,2 s olarak alınmıştır. Ayrıca analizde uygulanacak basınç, belirlenen bu süre içerisinde artarak uygulanmış ve şekillenme bu değerler altında incelenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.18. Diyaframa uygulanan basınç grafiği

Yapılan tüm işlemlerin yanı sıra, numunelerin şekillenecek sac malzeme şeklinde, kalıbın rijit kalıp şeklinde ve diyaframın kauçuk yapısının tanımlanması sonucunda deney düzeneği analiz programında oluşturulmuştur. Uygulanan basınç sayesinde diyafram ile şekillendirme sonucunda numunelerin şekillendirilmesi incelenmiştir (Şekil 4.18).



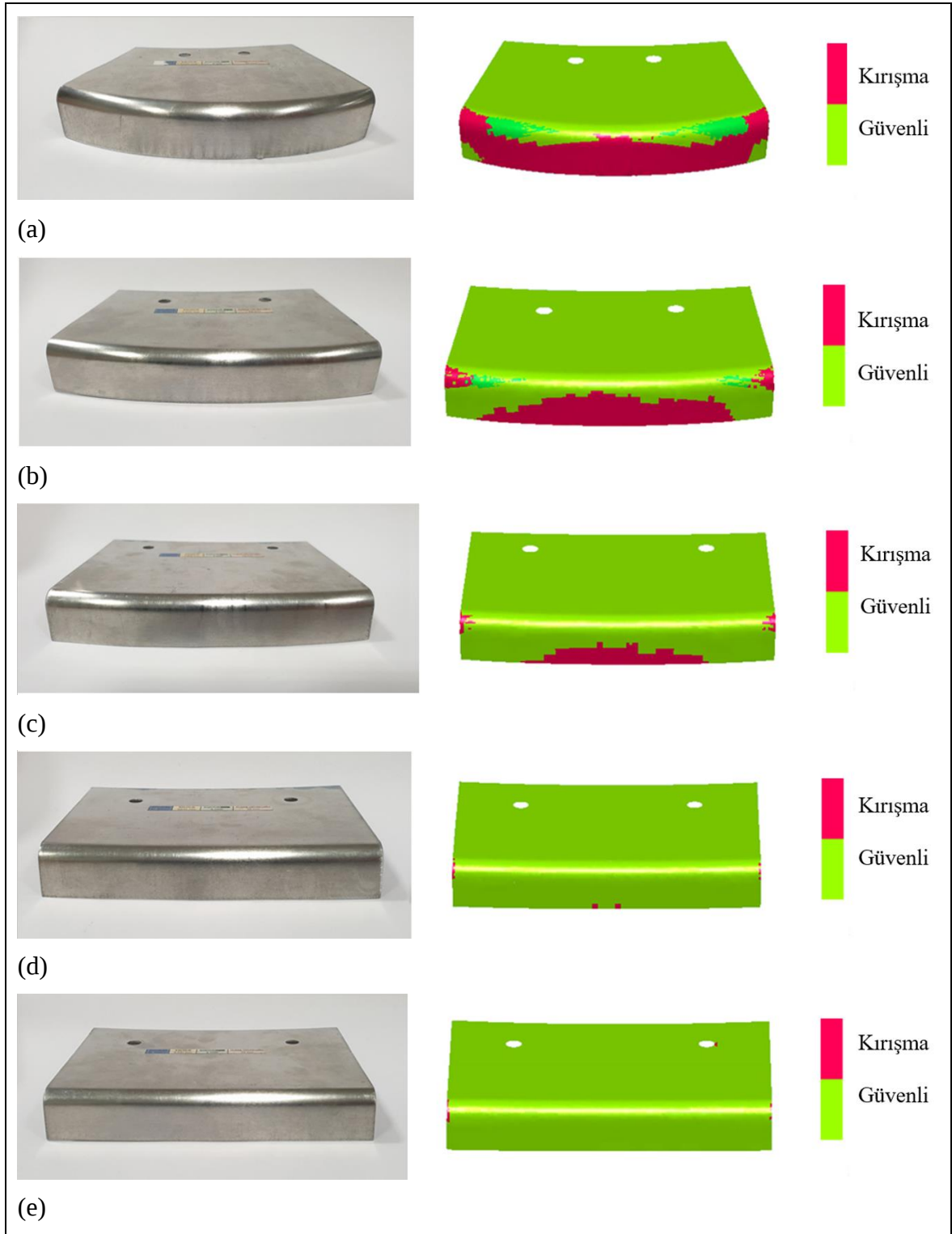
Şekil 4.19. a) PAM-STAMP programında oluşturulan deney düzeneği, b) Analiz programındaki şekillendirme prosesi sırasında basınç uygulanmış diyaframın kalıbın üzerini sarması ve numunelerin şekillenme anı

4.2.2. Sayısal çözümleme sonuçları ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

PAM-STAMP analiz programında havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan 0,635 mm kalınlığındaki ve 1,27 mm kalınlığındaki numuneler için çözümleme yapılmıştır. Belirtilen kalınlıktaki malzemelerin 20 mm ve 30 mm flanş uzunluğuna sahip parçalar için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler Al2024-O ve Al-2024-W malzeleri olan her iki malzemede de çözümlenmiştir. Analizlerde, deneylerde kullanılan R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R

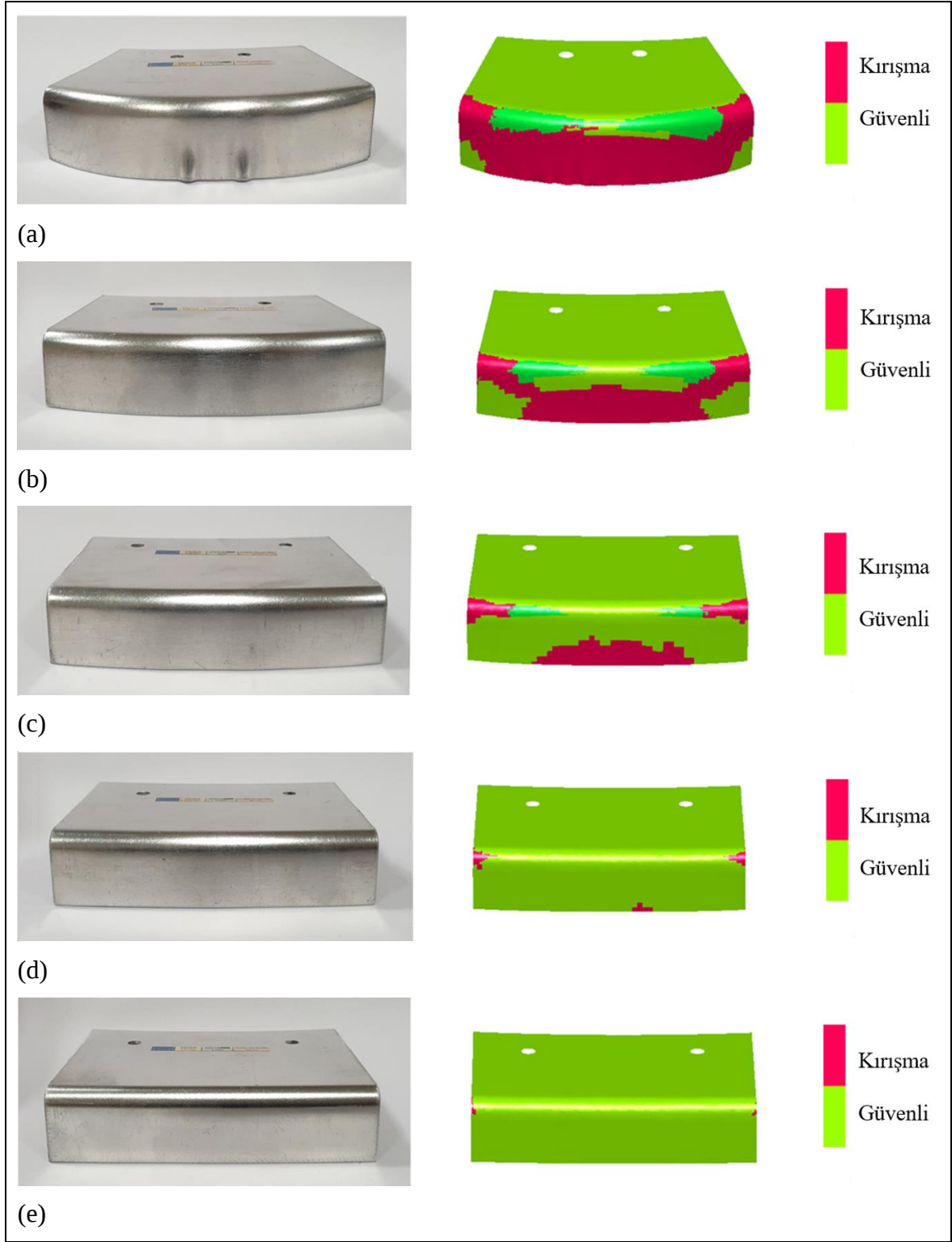
1000 mm ve R 2000 mm kontur yarıçap değerlerinin hepsi için çözüm yapıp sonuçlara ulaşılmıştır.

Analiz 1’de, 0,635 mm kalınlığında Al2024-O malzemesindeki numunelerin şekillendirilmesi çözülmüş ve sonuçlara ulaşılmıştır. Çözümlemede elde edilen parçalar 20 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıptaki şekillendirilmesi çözülmüştür. Analiz çözümlemesinde elde edilen sonuçlar, deneysel yöntem ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.19).



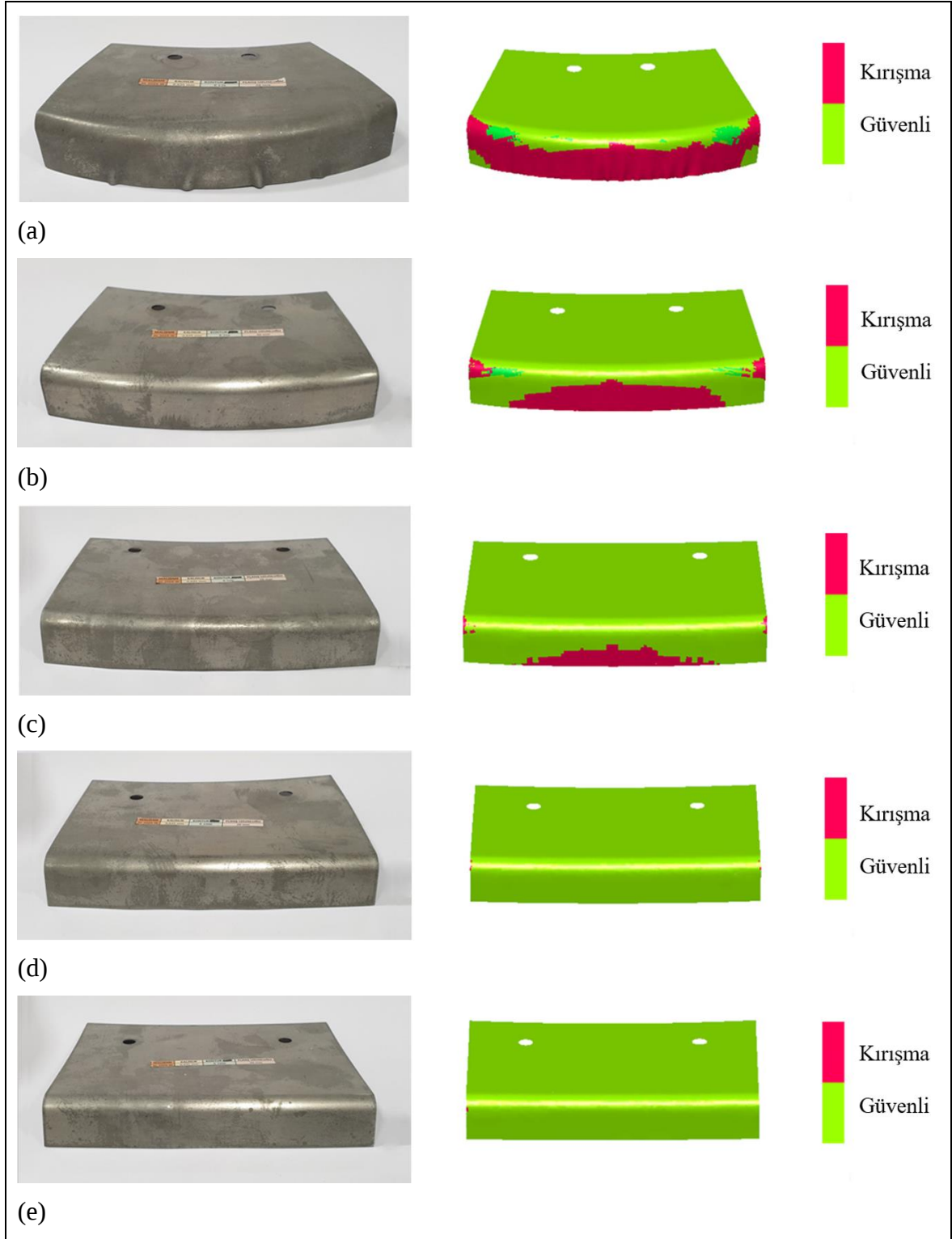
Şekil 4.20. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 1 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=125$ mm; $F=20$ mm, b) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=250$ mm; $F=20$ mm, c) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=20$ mm, d) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=20$ mm, e) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=2000$ mm; $F=20$ mm

Analiz 2’de, 1,27 mm kalınlığında Al2024-O malzemesindeki numunelerin şekillendirilmesi çözülmüş ve sonuçlara ulaşılmıştır. Çözümlemede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıptaki şekillendirilmesi çözülmüştür ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.20).



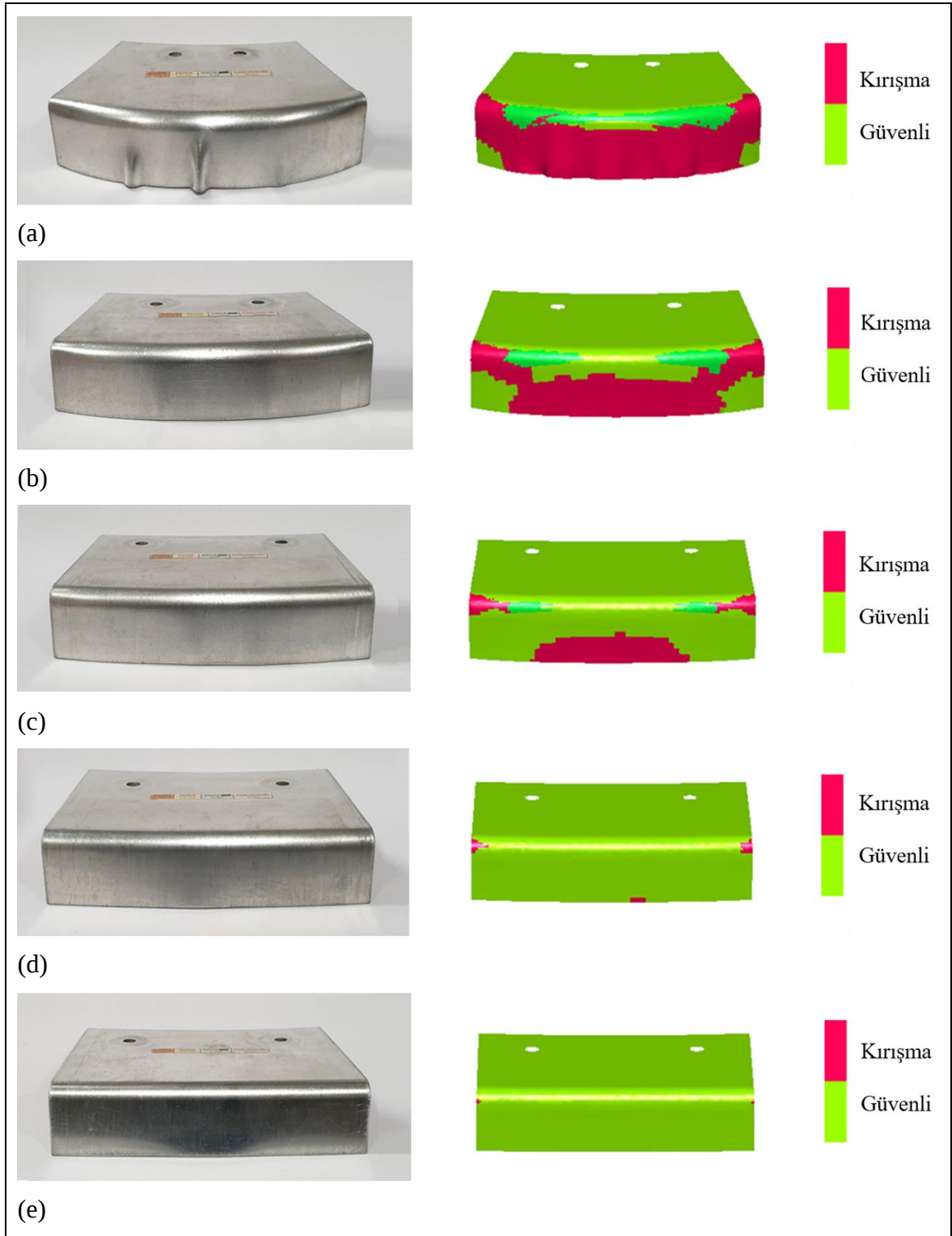
Şekil 4.21. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 2 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-O; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-O; T=1,27 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al2024-O; T=1,27 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al2024-O; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=30 mm, e) Al2024-O; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=30 mm

Analiz 3’de, 0,635 mm kalınlığında Al2024-W malzemesindeki numunelerin şekillendirilmesi çözülmüş ve sonuçlara ulaşılmıştır. Çözümlemede elde edilen parçalar 20 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıptaki şekillendirilmesi çözülmüştür ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.21).



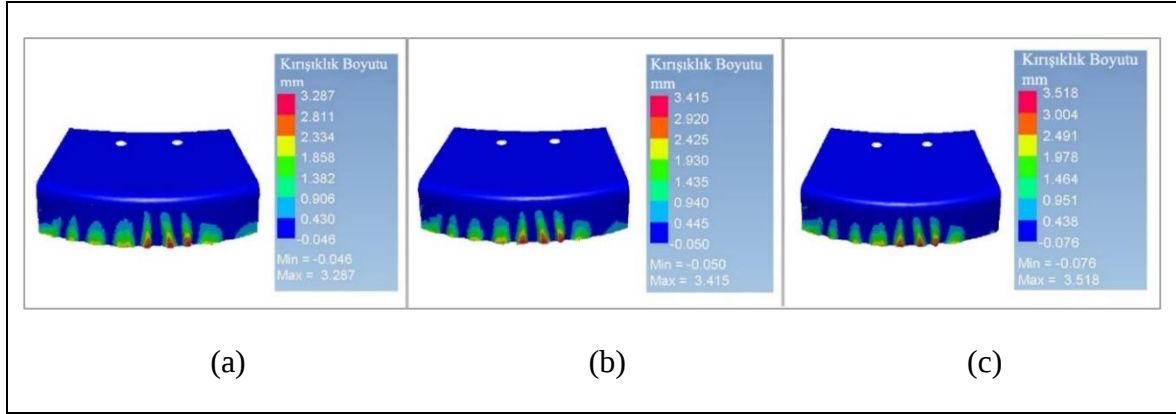
Şekil 4.22. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 3 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=125$ mm; $F=20$ mm, b) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=250$ mm; $F=20$ mm, c) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=20$ mm, d) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=20$ mm, e) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=2000$ mm; $F=20$ mm

Analiz 4’te, 1,27 mm kalınlığında Al2024-W malzemesindeki numunelerin şekillendirilmesi çözülmüş ve sonuçlara ulaşılmıştır. Çözümlemede elde edilen parçalar 30 mm flanş uzunluğuna sahiptir. Numuneler R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıptaki şekillendirilmesi çözülmüştür ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.22).

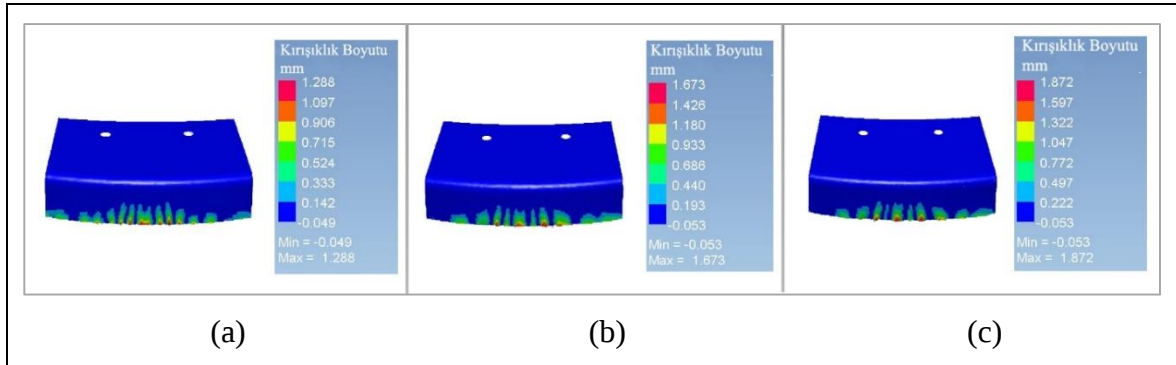


Şekil 4.23. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 4 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al2024-W; T=1,27 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al2024-W; T=1,27 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al2024-W; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=30 mm, e) Al2024-W; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=30 mm

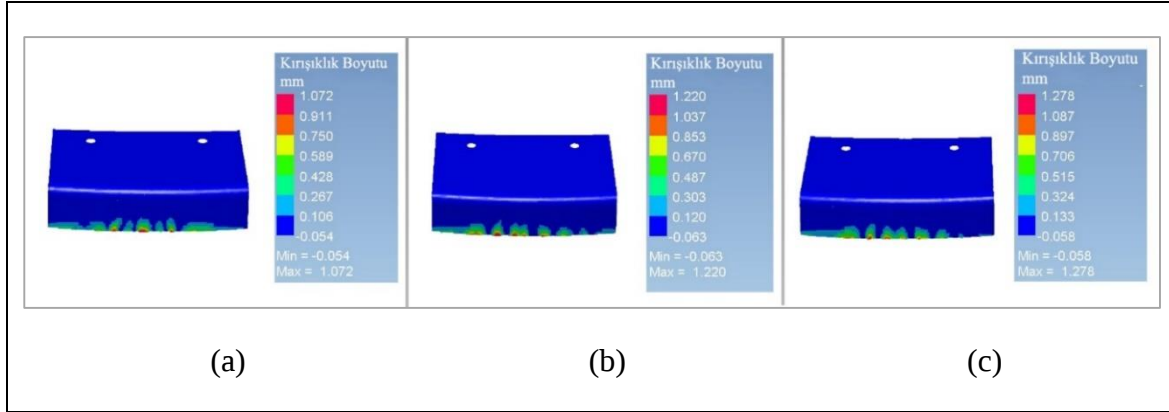
Analiz çözümlemesinde diyafram ile numune arasındaki sürtünme katsayısı 0.1 alınmıştır. Bu sürtünme katsayısının farklı değerlerde olmasının sonuca olan etkisini inceleme amacıyla farklı sürtünme katsayıları kullanılarak Analiz 5, Analiz 6 ve Analiz 7 çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde 0,635 mm kalınlığında ve 30 mm flanşa sahip AL2024-O malzemesindeki numuneler, R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm yarıçaplı dış bükey konturlu kalıptaki şekillendirilmeleri çözümlenmiştir. Analiz 5 te sürtünme katsayısı 0,075, Analiz 6 da sürtünme katsayısı 0,1 ve Analiz 7 de ise sürtünme katsayısı 0,125 değerlerinde alınmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarında oluşan en büyük kırışma boyları ölçülmüş (Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25) ve çizelge 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.24. Analiz programında farklı sürtünme katsayıları ile çözümlenerek elde edilen kırışma yükseklikleri a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm; f=0,075 b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm; f=0,1 c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=30 mm; f=0,125



Şekil 4.25. Analiz programında farklı sürtünme katsayıları ile çözümlenerek elde edilen kırışma yükseklikleri a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm; f=0,075 b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm; f=0,1 c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=30 mm; f=0,125



Şekil 4.26. Analiz programında farklı sürtünme katsayıları ile çözümlenerek elde edilen kırışma yükseklikleri a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm; f=0,075 b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm; f=0,1 c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=30 mm; f=0,125

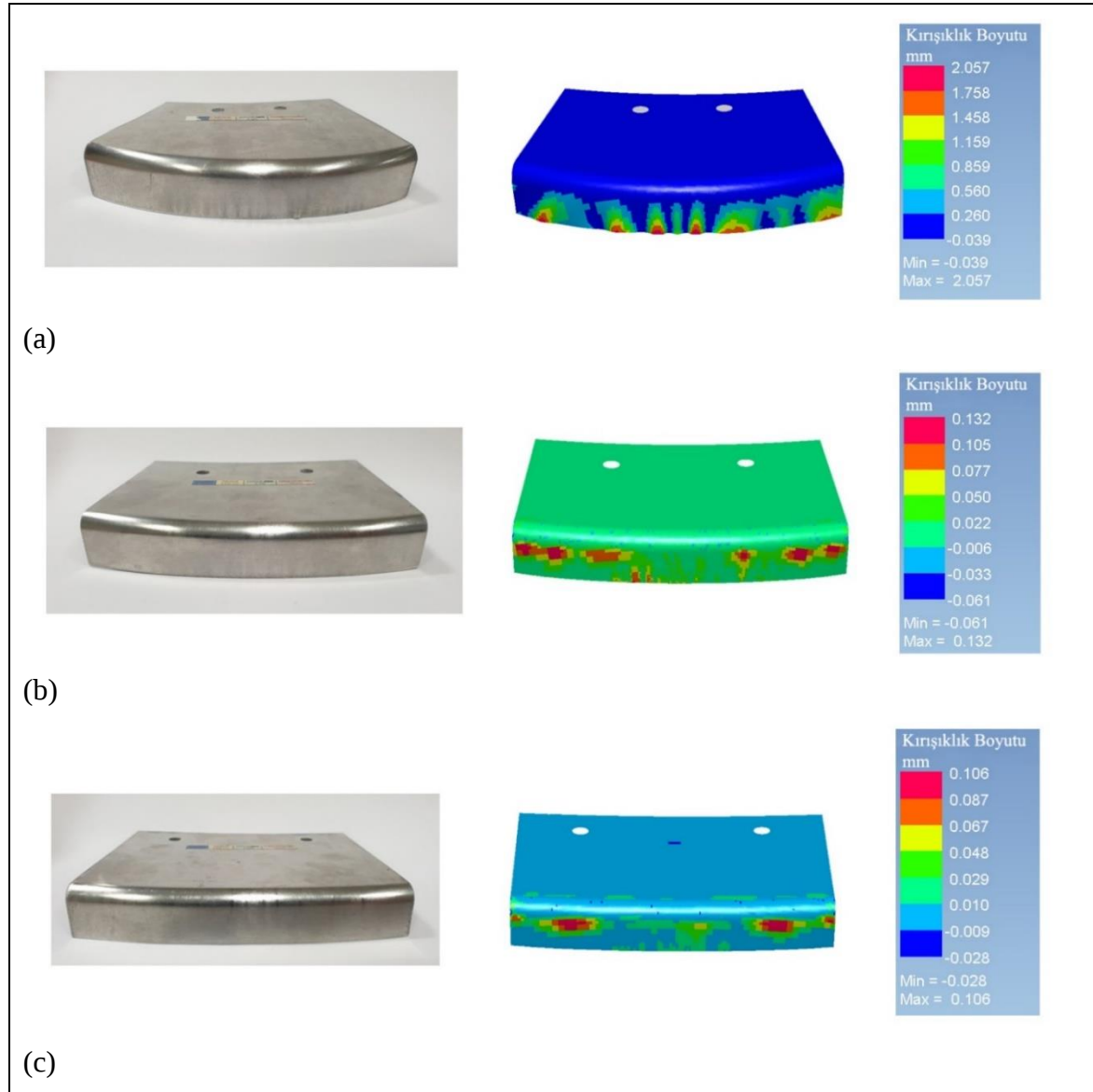
Çizelge 4.3. Farklı sürtünme katsayısı kullanılarak yapılan şekillendirme analizlerinde meydana gelen en büyük kırışıklık yükseklikleri

MALZEME	KALINLIK (mm)	KONTUR AÇISI, R (mm)	FLANŞ UZUNLUĞU, F (mm)	Analiz 5 f=0.075	Analiz 6 f=0.1	Analiz 7 f=0.125	Analiz 5 & Analiz 6 arasındaki fark	Analiz 6 & Analiz 7 arasındaki fark
Al2024-O	0,635	125	30	3,287	3,415	3,518	% 3,7	% 3
Al2024-O	0,635	250	30	1,288	1,673	1,872	% 23	% 11,9
Al2024-O	0,635	500	30	1,072	1,22	1,278	% 12,1	% 4,7

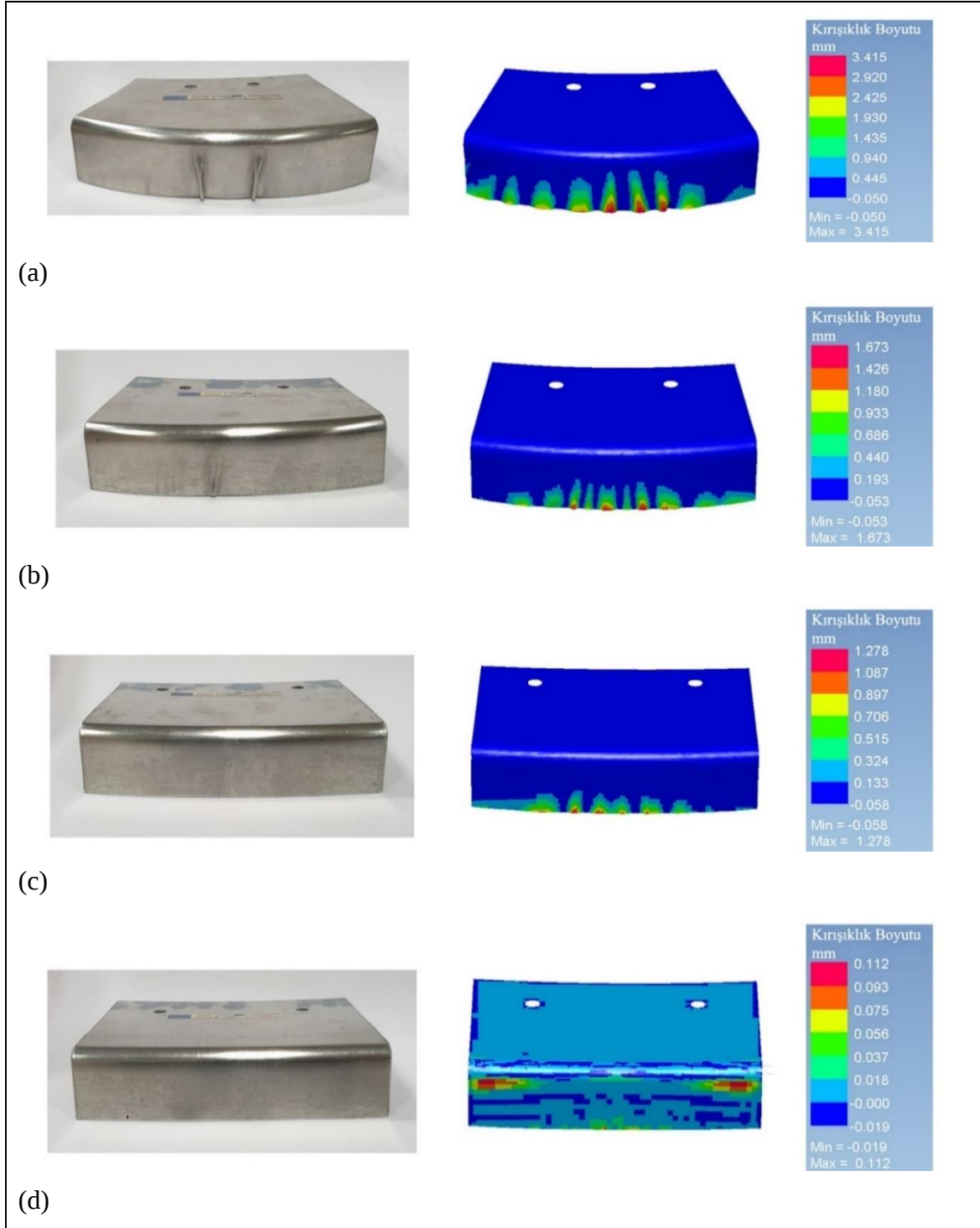
Analiz çözümlemelerinde kullanılan sürtünme katsayılarının artması sonucunda kırışma yüksekliği artışı analiz sonuçlarında elde edilmiştir. En yüksek kırışıklığın, seçilen en yüksek sürtünme katsayısı olan 0,125 ile yapılan analiz sonucunda meydana geldiği görülmektedir. Konturlu parçaların diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillenmesi sırasında, diyaframla sac metal arasında meydana gelen sürtünme kuvveti kırışmaya etki eden faktörlerdendir. Diyafram ile sac metal malzeme arasındaki sürtünme kuvveti, parçanın şekillenmesi sırasında malzemenin, kontur kenarlarından flanşın orta kısma doğru akmasına ve yığılmasına etki etmektedir. Malzeme yığılması sonucunda parçada kırışıklıklar meydana gelmektedir ve yığılmanın artması ile kırışıklıkların boyutları artmaktadır. Sürtünme kuvvetinin artması ile diyafram, daha çok malzemenin flanşın orta kısmına doğru yığılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle diyafram ile numune arasındaki sürtünme katsayısının büyümesi ile kırışıklık artmaktadır. Analiz sonuçları sürtünme katsayısı yaklaşımını destekler nitelikte olup, yapılan analizlerde diyafram ile numune

arasındaki sürtünme katsayısının değişiminin kırışıklık yüksekliğini etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

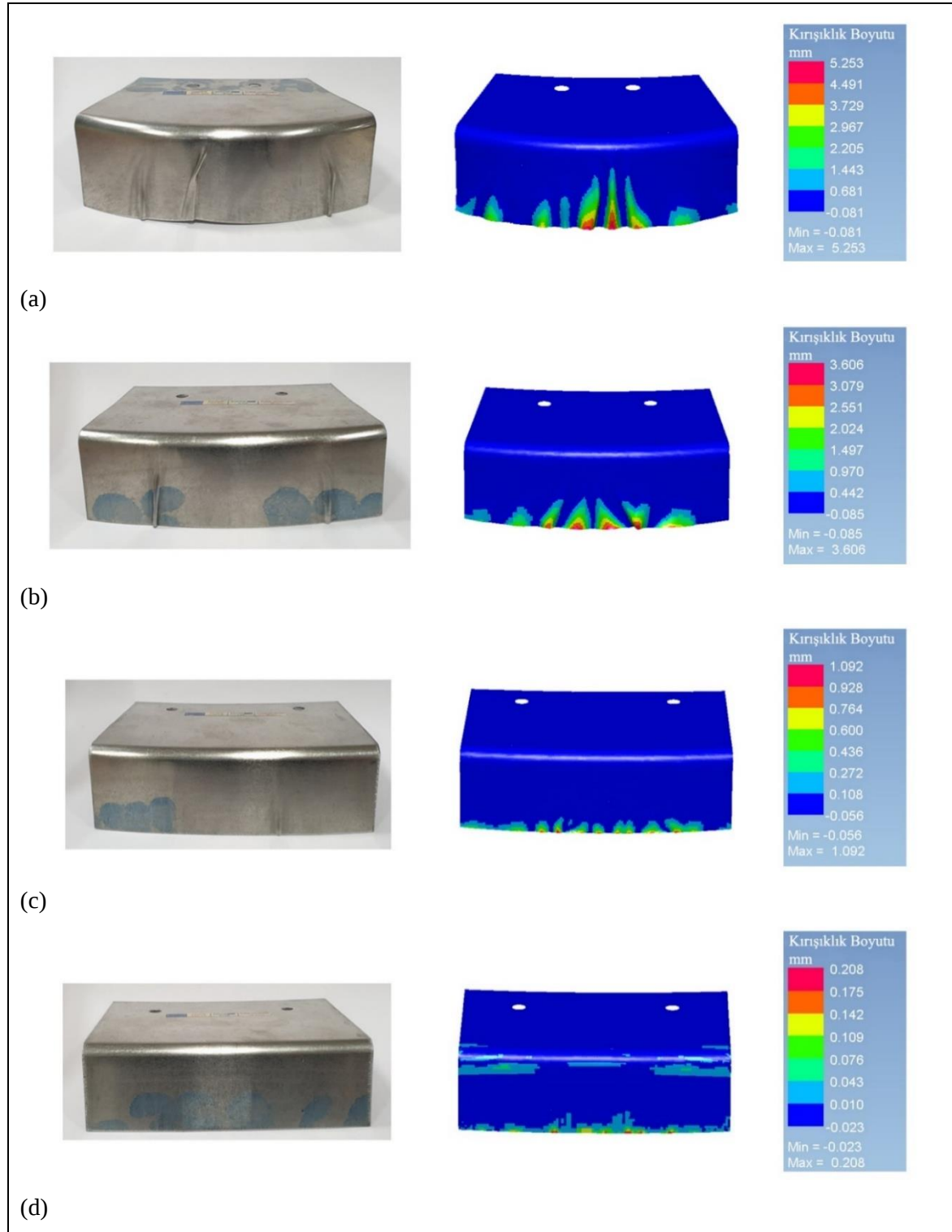
Analiz 1’de Al2024-O 0 0,635 mm kalınlığında 20 mm flanş boyutuna sahip numunelerin şekillendirilmesi, Analiz 8’de Al2024-O 0,635 mm kalınlığındaki 30 mm flanş uzunluğuna sahip numunelerin şekillendirilmesi ve Analiz 9’da Al2024-O 0,635 mm kalınlığındaki 40 mm flanş uzunluğuna sahip numunelerin şekillendirilmesi çözümlenmiştir. Sonuçlar deneysel sonuçlar ile birlikte Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28’te gösterilmiştir. Ayrıca, çözümleme sonuçlarında oluşan kırışıkların en büyük uzunluğa sahip kırışıkların boyutları (t_a) ile deneysel sonuçlarda elde edilen en büyük kırışma uzunluğu yükseklikleri (t_1), izelge 4.4’te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.27. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 1 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=20 mm, c) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=20 mm



Şekil 4.28. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 8 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al 2024-O; $T=0,635$ mm; $R=125$ mm; $F=30$ mm, b) Al 2024-O; $T=0,635$ mm; $R=250$ mm; $F=30$ mm, c) Al 2024-O; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=30$ mm, d) Al 2024-O; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=30$ mm



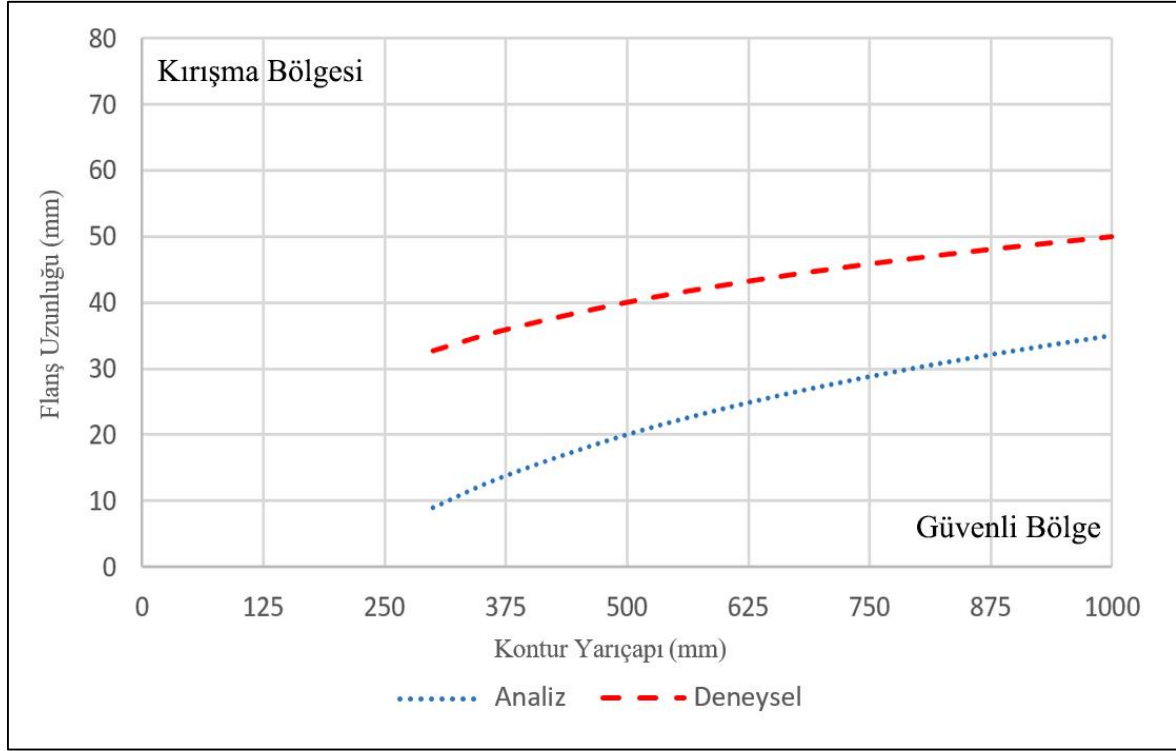
Şekil 4.29. Deneysel olarak elde edilmiş sonuçlar ve Analiz 9 çözümlemesinde elde edilen sonuçlar a) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm; F=40 mm, c) Al 2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=40 mm, d) Al 2024-O; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=40 mm

Çizelge 4.4. Analiz sonucunda oluşan en büyük kırışıklık yüksekliği ve deneysel şekillendirme sonucu oluşan en büyük kırışıklık yüksekliği

DENEY NO	MALZEME	T (mm)	R (mm)	F (mm)	$t_a, \max$ (mm)	$t_1, \max$ (mm)	Analiz ve Deneysel Sonuçlar Arasındaki Fark
1	Al2024-O	0,635	125	20	2,057	0,82	%60
	Al2024-O	0,635	250	20	0,132	-	Hesaplanamadı
	Al2024-O	0,635	500	20	0,106	-	Hesaplanamadı
	Al2024-O	0,635	1000	20	-	-	-
	Al2024-O	0,635	2000	20	-	-	-
5	Al2024-O	0,635	125	30	3,415	2,55	%39
	Al2024-O	0,635	250	30	1,673	1,05	%37
	Al2024-O	0,635	500	30	1,278	-	-
	Al2024-O	0,635	1000	30	0,112	-	-
	Al2024-O	0,635	2000	30	-	-	-
9	Al2024-O	0,635	125	40	5,253	Ölçülemedi	Hesaplanamadı
	Al2024-O	0,635	250	40	3,606	1,92	%46
	Al2024-O	0,635	500	40	1,092	0,58	%47
	Al2024-O	0,635	1000	40	0,208	-	Hesaplanamadı
	Al2024-O	0,635	2000	40	-	-	-

Çizelgede deneysel ve analiz sonucunda oluşan kırışıklık yükseklikleri karşılaştırılmıştır ve yükseklik farkları hesaplanmıştır. Analizde kırışma meydana gelen bazı parçalarda deneysel olarak kırışma meydana gelmemiştir. Bu yüzden bu parçalar için yükseklik hesaplaması yapılamamıştır. Ayrıca Deney 5'te Al2024-O malzemesindeki 0,635 mm kalınlıktaki 125 mm yarıçap ve 40 mm flanşa sahip parçadaki kırışıklığın diyafram tarafından ezilmesi nedeniyle yüksekliği ölçülememiştir. Bu nedenle bu parça için yükseklik farkı hesaplaması yapılamamıştır.

Analiz 1, Analiz 8 ve Analiz 9 sonuçlarında meydana gelen kırışmalar ve kırışma meydana gelmeyen durumlar göz önünde tutularak kırışıklık ve güvenli bölge grafiği oluşturulmuştur. Analizler sonucunda Al2024-O, 0,635 mm kalınlıktaki malzeme için kırışma bölgesini ve güvenli bölgeyi ayıran eğri denklemi ' $y = 21,64 \ln(x) - 114,49$ ' şeklinde belirlenmiştir. Deneyler sonucunda oluşturulan güvenli bölge grafiği ile analiz ile oluşturulan güvenli bölge grafiği Şekil 4.29'da karşılaştırmalı şekilde verilmiştir.



Şekil 4.30. Al2024-O 0,635 mm kalınlıkta konturlu yapıya sahip parçaların şekillendirilmesindeki deneysel ve analiz sonuçları ile oluşturulan kırışma grafiği

Tez kapsamında elde edilen deneysel ve analitik sonuçlar ile kırışma ve güvenli bölgelerin belirlendiği grafik 4.29’da gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi güvenli ve kırışma bölgeleri, analiz ve deneysel sonuçlarda farklılık göstermektedir. Buradaki farklılık, aşağıda bahsedilen durumlarda kaynaklanabilir:

- Diyaframla hidrolik şekillendirme prosesinde parça-kalıp, diyafram-parça temas yüzeylerinin genişliğinden dolayı sürtünme kuvvetleri sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Analizlerde kullanılan sürtünme katsayısının temas yüzeylerine eşit dağıldığı kabul edilmektedir. Oysa ki yapılan gerçek fiziksel deneylerde, bu eşit dağılımın elde edilemediği gözlemlenmiştir. Bu durum, analiz ve deneysel elde edilen kırışıklık farklarının en büyük nedenlerinden biri olduğu tespit edilmiştir.
- Ayrıca, deneylerde kullanılan diyaframın malzeme yıpranma payı analizlerde hesaba katılmamıştır. Diyaframın yıpranması, proses esnasındaki mekanik davranışını etkilemektedir. Bu da kırışıklık farklarının bir başka nedeni olabilir.

- Son olarak, analizdeki proses modeli tezgah tepsisinin bütününe değil, kalıbın yerleştiği aktif alana yapılmıştır. Bu da diyafram sınır koşullarını değiştirerek kırışma sonuçlarını etkilemiş olabilir.

Deneysel sonuç grafiğindeki güvenli alan analiz sonucunda oluşturulan kırışma grafiğindeki güvenli alanı kapsadığı için, analiz sonuçlarının kırışma bakımından güvenli olduğu görülmektedir. İki grafik göz önünde bulundurulduğunda, güvenli alan bölgeleri arasında kalan parçalarda gerçekte kırışma oluşmamaktadır ancak analizde kırışma meydana gelmektedir. Bu parçalar için analiz referans alındığında, gerçekte gerekli olmayan kırışıklık önleyici önlemler alınacaktır. Bunun sonucunda maliyet artışı ve zaman kaybı yaşanacaktır. Deneysel yöntemle göre analiz yöntemi daha hızlıdır ve maliyeti daha düşüktür. Bu önemli avantajlara rağmen, araştırmalarda deneysel yöntemle de ihtiyaç duyulduğu ve deneysel yöntemin önemi bu tez çalışmasında görülmektedir. Literatürde bu alanda yapılan çalışma sınırlı olduğundan sonuçlar için herhangi bir karşılaştırma yapılamamıştır.

4.2.3. Analiz sonuçları tartışmaları

Deneysel yapılan çalışmalar PAM-STAMP analiz programında çözümlendirilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

- Analiz 1 ile analiz 3, analiz 2 ile analiz 4 çözümlerinde kullanılan parametreler aynı olup analizde tanımlanan numuneler için malzemeler farklıdır. Deneylerde elde edilen sonuçlar ile, Al2024-W malzemesi Al2024-O malzemesine göre daha fazla kırışmaya eğilimli olduğu tespit edilmiştir. Bu kırışma eğilimi analiz sonuçlarında deneylerde olduğundan çok daha az görülmektedir.
- Analiz 1’de ilk numune örneği için neredeyse tüm flanşta kırışma gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Deney ile karşılaştırıldığında kırışma bölgesinin analiz programında gösterilenden çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum ikinci numune için de geçerlidir. Üçüncü numunede deney sonucunda herhangi bir kırışma gerçekleşmezken analiz programında kırışma olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dördüncü ve beşinci numuneler ise analiz programı sonuçları, deneyde ulaşılan sonuçlar gibi kırışksız görülmektedir.
- Analiz 2’de ilk numunede kırışıklıkların flanşta büyük bir bölge olarak görünmektedir. Deneyde alınan sonuçta ise kırışıklık iki bölgede yoğunlaşarak oluşmuştur. İkinci ve

üçüncü numunelerde, deney sonucunda kırıxıklık oluşmamasına rağmen analiz programında az da olsa kırıxıklık sonucuna ulaşlmıştır.

- Analiz 3'te ilk numunede gerçekleşen kırıxmalar flanş bölgesine yayılmış şekildedir ve deneyde ulaşılan sonuca yakındır. Ancak ikinci ve üçüncü numunelerde deneylerde kırıxma gerçekleşmesine rağmen analiz programında az da olsa kırıxma meydana geldiği sonucuna ulaşlmıştır.
- Analiz 4'te tüm numuneler için ulaşılan sonuçlardaki kırıxma bölgeleri, deneylerdeki kırıxma yoğunluklarından daha fazla olmasına rağmen, deneylerde elde edilen sonuçlara yakın sonuçlardır. Analiz 2'de de sonuçlar gerçeğe analiz 1 ve analiz 2 den daha yakındır. Flanşın uzunluğu arttıkça, yani şekillenecek malzeme arttıkça analiz sonuçları gerçeğe daha da yaklaşmaktadır.
- Tüm analizler göz önünde tutulduğunda analiz sonuçları kırıxma oluşumunda gerçek yoğunluktan daha fazla kırıxma yoğunluğu sonucunu vermesine rağmen kırıxma meydana gelme durumu hakkında deneysel sonucu kapsayan bilgiler vermektedir.
- Analiz programında sürtünme kuvvetlerinin doğru belirlenmesi ile, deneysel ve analiz sonuçlar birbirine yaklaştırmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Al2024-O ve Al2024-W malzemeleri ile hazırlanmış 0,635 mm, 1,27 mm, 1,60 mm ve 2,00 mm kalınlığındaki numuneler kontur yarıçapı R 125 mm, R 250 mm, R 500 mm, R 1000 mm ve R 2000 mm olacak şekilde hidrolik diyaframla şekillendirme yöntemi ile deneysel olarak şekillendirilmiştir ve deney sonucunda parçalarda meydana gelen kırışıklıklar incelenmiştir. Deneysel çalışmanın yanı sıra, numunelerin şekillendirilmesi nümerik olarak da analiz edilmiştir. Elde edilen verilerin kullanılması ile diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde oluşabilecek kırışıklıkların ve maliyet artışlarının önüne geçilecektir.

5.1. Sonuçlar

- Elde edilen sonuçlarda parça kalınlığının, şekillenecek parçanın kontur yarıçap ve flanş uzunluğu değerlerinin kırışmaya etkisi olduğu belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerin kırışıklığa yol açtığı durumlar ve güvenli bölgeler tespit edilmiştir. Belirlenen güvenli ve güvenli olmayan bölgeler sayesinde, elde edilen veriler göz önünde bulundurularak tasarlanan kalıplar ile diyaframla hidrolik şekillendirme işleminde tek seferde istenilen ürün elde edilebilecektir. Bu sayede zaman kaybı, hurda, fazladan işçilik gibi maliyeti büyük oranda artıran işlemler azaltılacaktır.
- Her iki malzemedeki şekillenen 2 mm kalınlığındaki parçalar tüm deneylerde, sadece 125 mm kontur yarıçapında şekillendirildiğinde kırışma meydana gelmiştir. Deneyde kullanılan parametreler dahilinde 2 mm kalınlığındaki Al2024-O ve Al2024-W malzemeli parçalar 250 mm ve üzeri yarıçap değerlerinde kırışma meydana gelmeden istenilen parça elde edilebilmektedir.
- Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerde en fazla kırışıklık, Al2024-O ve Al2024-W malzemelerinde, 0,635 mm kalınlığında, 125 mm kontur yarıçapta ve 40 mm flanş uzunluğuna sahip parçalarda meydana gelmiştir.
- Malzeme kalınlığının artışı ile kırışma azalmaya eğilim göstermektedir. Parça kalınlıkları incelidikçe flanşlardaki kırışıklıkların büyüklüğü ve yoğunluğu artmaktadır.
- Kontur dış bükey yarıçap değerinin küçülmesi ile şekillenen parçadaki kırışıklıklarda artış yaşanmaktadır. Kontur yarıçap değerinin küçülmesi ile oluşan kırışma yoğunluğu ve kırışıklık bölgesi artmaktadır.

- Flanş uzunluğunun artması ile malzeme yığılması artışı yaşanarak kırışmanın arttığı tespit edilmiştir. Flanş uzunluğu artışı kırışma riskini artırmaktadır.
- R 2000 mm kontur yarıçapındaki parçalar için gerçekleştirilen tüm deneylerde hiçbir kırışma olayı tespit edilmemiştir. Belirlenen parametre değerleri ile şekillenen R 2000 mm kontur yarıçaplı tüm şekillendirmeler kırışma durumu göz önünde bulundurulduğunda güvenli bölgede yer almaktadırlar.
- Diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemi ile yapılan deneyler sonucunda Al2024-O malzemesinde, Al2024-W malzemesine göre daha az kırışıklık oluştuğu tespiti yapılmıştır. Bunun nedeni Al2024-O malzemesinin daha yumuşak ve Al2024-W malzemesinin kararsız bir durumda olmasından kaynaklanmaktadır.
- Al2024-W malzemenin ısıtılma işlem görmesi nedeni ile 0,635 mm kalınlığındaki numunelerde ve şekillenme sonucunda oluşan parçalarda çarpılmalar oluşmuştur. Diğer kalınlıktaki malzemelerde çarpılmalara rastlanmamıştır.
- PAM-STAMP programında yapılan şekillendirme analizleri sonuçları, deney sonuçlarını kapsamaktadır. Bunun yanında deneysel ve analiz sonuçları arasında fark oluşmaktadır. Bu fark sürtünme kuvvetleri, sınır şartları ve diyafram mekanik özellikleri üzerinde çalışılarak en aza indirilebilir.

5.2. Öneriler

- Tez çalışmasında en düşük kontur yarıçap değeri R 125 mm olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Minimum belirlenen bu değer Al2024-O malzemesindeki 1,60 mm ve 2,00 mm kalınlığında, 20 mm flanş uzunluğundaki şekillenen parçalarda kırışma sınırlarını belirlemek için yeterli olmamıştır. Belirtilen değerlerdeki parçalar için kırışma sınır değerlerinin belirlenmesi amacı ile kontur yarıçap değeri küçültülerek deneyler yapılabilir.
- Tez çalışması kapsamında şekillenen parçaların bükme yarıçapı değiştirilerek parça şekillenmesi sonrasında oluşacak kırışmalardaki değişim karşılaştırılabilir.
- Şekillendirme için tasarlanan kalıpta flanş açısı 90° olarak belirlenmiştir. Bu açı değiştirilerek kırışmalarda meydana gelebilecek değişiklikler gözlemlenebilir.
- Havacılık sektöründe kullanılan titanyum malzemeler için tez çalışmasına benzer çalışma yapılarak parçalarda oluşacak kırışmalar incelenebilir.

- Çalışma kapsamında, sürtünme katsayısının diyaframla hidrolik şekillendirme yöntemindeki önemi gözlemlenmiştir. Diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde sürtünme katsayısı ile ilgili çalışmalar yapılabilir.
- Tez çalışmasında nümerik analiz sonucu elde edilen sonuçlar ve deneyler arasındaki farklar da referans alınarak nümerik olarak analiz sayısı çoğaltılabilir ve daha fazla veri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Erçağ, G. (2017). *4. Endüstri devrimi için yol haritası belirlenmesinde farklı ülke örneklerinin incelenmesi ve Türkiye için model önerisi*. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
2. Vahl, M. E. I. K., Hein, P. and Bobbert, S. T. E. F. A. N. (2000). Hydroforming of sheet metal pairs for the production of hollow bodies. *Revue de Métallurgie–International Journal of Metallurgy*, 97(10), 1255-1263.
3. Lang, L. H., Wang, Z. R., Kang, D. C., Yuan, S. J., Zhang, S. H., Danckert, J. and Nielsen, K. B. (2004). Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 165-177.
4. Ramezani, M. and Ripin, Z. M. (2012). *Rubber-pad forming processes: Technology and applications*. Şehir: Cambridge: Elsevier, 1-12.
5. Jiang, W. (1990). *Investigation of hydroforming sheet metal with varying blankholding loads*. Doctoral Dissertation, Ohio University The Faculty of the College of Engineering and Technology Ohio.
6. Yuan, S., Fengzhi, W. and Wang, Z. R. (1997). Safety analysis of 200 m³ LPG spherical tank manufactured by the dieless hydro-bulging technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 70(1-3), 215-219.
7. Yuan, S. J., Teng, B. G., Dong, X. Y. and Wang, R. W. (2004). Progress in large vessel forming: introduction of some innovations of Prof. ZR Wang. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 12-17.
8. Zhang, Q. and Wang, Z. R. (2015). Shape improvement of a dieless hydro-bulged sphere made of hexagonal and pentagonal shaped panels. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 87-95.
9. İnternet: Langerak, N., Rout, D. K., Verma, R., Manikadan, G. and Haldar, A. (2004). Tube hydroforming in automotive applications. 2014-01-16). URL: http://www.tatasteelaautomotive.com/file_source/StaticFiles/Automotive/Tube%20Hydroforming%20in%20Automotive%20Applications, Son Erişim Tarihi: 23 Şubat 2017.
10. Nikhare, C., Weiss, M. and Hodgson, P. D. (2017). Buckling in low pressure tube hydroforming. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 1-10.
11. Kandil, A. (2003). An experimental study of hydroforming deep drawing. *Journal of materials processing Technology*, 134(1), 70-80.
12. Alizad-Kamran, M., Gollo, M. H., Hashemi, A. and Seyedkashi, S. H. (2018). Determination of critical pressure in analyzing of rupture instability for hydromechanical deep drawing using advanced yield criterion. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1), 103-113.

13. Önder, E. and Tekkaya, A. E. (2008). Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(5), 532-542.
14. Anket, O. (2011). *DC04 otomotiv sacının hidromekanik yöntem ile şekillendirilebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
15. Mentella, A. (2004). Introduction to the hydroforming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 94, 105- 110.
16. Sala, G. (2001). A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: Part II—Aluminium alloys rubber-forming. *Materials & Design*, 22(4), 299-315.
17. Davidson, A. (2016). *Handbook of precision engineering: Forming processes*. London: Macmillan International Higher Education, 144-150.
18. Kumar, A., Kumar, S. and Yadav, D. R. (2014). *Review of rubber based sheet hydro-forming processes*. In 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR), Guwahati, Assam.
19. Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, A., & Elyasi, M. (2012). Developments in sheet hydroforming for complex industrial parts. *Metal Forming-Process, Tools, Design*.
20. Lee, M. G., Kim, C., Pavlina, E. J. and Barlat, F. (2011). Advances in sheet forming—materials modeling, numerical simulation, and press tec D FRACTURE IN SHEET, -IBRAR(STRETCHhnologies. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133(6), 061001.
21. Wang, C. T., Kinzel, G. and Altan, T. (1995). Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(3-4), 759-780.
22. Hill, R. (1979, January). *Theoretical plasticity of textured aggregates*. In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 85(1), 179-191. Cambridge University Press.
23. Daxin, E., Wang, Y., Zhang, W. and Fan, Z. (2018). Research on the effect of the derived transverse stress during instability processes in the sheet metal's uniaxial tensile test. *Journal of Alloys and Compounds*, 748, 418-429.
24. Chang, K. H. (2016). *e-Design: computer-aided engineering design*. London: Academic Press, 144-150.
25. Keeler, S. P. (1961). *Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches*. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology,. Cambridge.
26. Goodwin, G. M. (1968). Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *SAE Transactions*, 380-387.

27. Hussaini, S. M., Krishna, G., Gupta, A. K. and Singh, S. K. (2015). Development of experimental and theoretical forming limit diagrams for warm forming of austenitic stainless steel 316. *Journal of Manufacturing Processes*, 18, 151-158.
28. Anket, O., Koruvatan, T. and İrfan, A. Y. (2011). Sac malzemelerin şekillendirilmesinde şekillendirme sınır diyagramlarının kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.
29. Dilmec, M., Halkaci, H. S., Ozturk, F. and Turkoz, M. (2012). Detailed investigation of forming limit determination standards for aluminum alloys. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(1), 10-21.
30. Şanay, B. and Kaftanoğlu, B. (2011). Sac metal şekillendirmesinde plastik kararsızlık ve şekillendirme limitlerinin belirlenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 12(1), 18-27.
31. Abedrabbo, N., Zampaloni, M. A. and Pourboghrat, F. (2005). Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(3), 333-358.
32. Sun, Y. N., Min, W. A. N. and Wu, X. D. (2013). Wrinkling prediction in rubber forming of Ti-15-3 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(10), 3002-3010.
33. Vollertsen, F. and Lange, K. (2002). Process layout avoiding reverse drawing wrinkles in hydroforming of sheet metal. *CIRP (açılımı yazılmalı) College International pour la Recherche en Productique Annals*, 51(1), 203-208.
34. Zhang, F., Li, X., Xu, Y., Chen, J., Chen, J., Liu, G. and Yuan, S. (2015). Simulating sheet metal double-sided hydroforming by using thick shell element. *Journal of Materials Processing Technology*, 221, 13-20.
35. Ağyel, T. (2009). *Metalik sacların hidrolik şekillendirme ile şekillenebilirliğinin teorik ve deneysel incelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
36. Liu, W., Xu, Y. and Yuan, S. (2014). Effect of pre-bulging on wrinkling of curved surface part by hydromechanical deep drawing. *Procedia Engineering*, 81, 914-920.
37. Cheng, J., Green, D. E. and Golovashchenko, S. F. (2017). Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 244, 178-189.
38. Liu, G., Peng, J., Yuan, S., Teng, B. and Li, K. (2015). Analysis on critical conditions of sidewall wrinkling for hydroforming of thin-walled Tee-joint. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 97, 42-49.
39. Aydın, M. (2009). *Metalik sacların hidro şekillendirme yöntemiyle şekillenebilirliğinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
40. Feyissa, F. T. and Kumar, D. R. (2019). Enhancement of drawability of cryorolled AA5083 alloy sheets by hydroforming. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 411-423.

41. Hatipoglu, H. A. (2007). *Experimental and numerical investigation of sheet metal hydroforming (flexforming) Process*. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
42. Aslan, Y. (2012). *Sıvı basıncıyla V bükme prosesinde geri esnemenin deneysel araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
43. Kara, R., Yıldırım, G., Çolak, F. and Tinas, M. (2017). TIG ve Elektrik Ark Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Journal of Science and Engineering*, 4(2), 274-281.
44. Aluminum Association. (1984). *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Ohio: ASM international, 1-21.
45. Totten, G. E. and MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: Physical metallurgy and processes* (Vol. 1). New York: CRC Press, 33-41.
46. Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. United States of America: American Society for Metals International: Materials Park, 39-76.
47. Barenji, A. B., Eivani, A. R., Hasheminasari, M., Park, N. and Jafarian, H. R. (2019). Application of hot forming cold die quenching for facilitating equal channel angular pressing of AA2024 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 791, 265-277.
48. ASM Handbook, (1991). *Heat treating of aluminum alloys*. (Volume 4). United States of America: American Society for Metals International, 841-879.
49. ABB Metallurgy, Quintus press type QFC q.wx3-1400 manual book. İnternet: <https://quintustechnologies.com/knowledge-center/data-sheet-fluid-cell-type-qfc-0-7-x-1-8-800-1400-us>, Son Erişim Tarihi: 16 Ocak 2017.
50. Hatipoğlu, H. A., Polat, N., Koksall, A. and Tekkaya, A. E. (2007). *Modeling flexforming (fluid cell forming) process with finite element method*. Ankara: Trans Tech Publications, 469-476.

EKLER

EK-1. Deney sınıflandırması

DENEY NO	MALZEME	KALINLIK, T (mm)	KONTUR YARIÇAPI, R (mm)	FLANŞ UZUNLUĞU, F (mm)
1	AL2024-O	0,635	125	20
	AL2024-O	0,635	250	20
	AL2024-O	0,635	500	20
	AL2024-O	0,635	1000	20
	AL2024-O	0,635	2000	20
2	AL2024-O	1,27	125	20
	AL2024-O	1,27	250	20
	AL2024-O	1,27	500	20
	AL2024-O	1,27	1000	20
	AL2024-O	1,27	2000	20
3	AL2024-O	1,60	125	20
	AL2024-O	1,60	250	20
	AL2024-O	1,60	500	20
	AL2024-O	1,60	1000	20
	AL2024-O	1,60	2000	20
4	AL2024-O	2,00	125	20
	AL2024-O	2,00	250	20
	AL2024-O	2,00	500	20
	AL2024-O	2,00	1000	20
	AL2024-O	2,00	2000	20
5	AL2024-O	0,635	125	30
	AL2024-O	0,635	250	30
	AL2024-O	0,635	500	30
	AL2024-O	0,635	1000	30
	AL2024-O	0,635	2000	30
6	AL2024-O	1,27	125	30
	AL2024-O	1,27	250	30
	AL2024-O	1,27	500	30
	AL2024-O	1,27	1000	30
	AL2024-O	1,27	2000	30
7	AL2024-O	1,60	125	30
	AL2024-O	1,60	250	30
	AL2024-O	1,60	500	30
	AL2024-O	1,60	1000	30
	AL2024-O	1,60	2000	30
8	AL2024-O	2,00	125	30
	AL2024-O	2,00	250	30
	AL2024-O	2,00	500	30
	AL2024-O	2,00	1000	30
	AL2024-O	2,00	2000	30

EK-1. (devam) Deney sınıflandırması

DENEY NO	MALZEME	KALINLIK, T (mm)	KONTUR YARIÇAPI, R (mm)	FLANŞ UZUNLUĞU, F (mm)
9	AL2024-O	0,635	125	40
	AL2024-O	0,635	250	40
	AL2024-O	0,635	500	40
	AL2024-O	0,635	1000	40
	AL2024-O	0,635	2000	40
10	AL2024-O	1,27	125	40
	AL2024-O	1,27	250	40
	AL2024-O	1,27	500	40
	AL2024-O	1,27	1000	40
	AL2024-O	1,27	2000	40
11	AL2024-O	1,60	125	40
	AL2024-O	1,60	250	40
	AL2024-O	1,60	500	40
	AL2024-O	1,60	1000	40
	AL2024-O	1,60	2000	40
12	AL2024-O	2,00	125	40
	AL2024-O	2,00	250	40
	AL2024-O	2,00	500	40
	AL2024-O	2,00	1000	40
	AL2024-O	2,00	2000	40
13	AL2024-W	0,635	125	20
	AL2024-W	0,635	250	20
	AL2024-W	0,635	500	20
	AL2024-W	0,635	1000	20
	AL2024-W	0,635	2000	20
14	AL2024-W	1,27	125	20
	AL2024-W	1,27	250	20
	AL2024-W	1,27	500	20
	AL2024-W	1,27	1000	20
	AL2024-W	1,27	2000	20
15	AL2024-W	1,60	125	20
	AL2024-W	1,60	250	20
	AL2024-W	1,60	500	20
	AL2024-W	1,60	1000	20
	AL2024-W	1,60	2000	20
16	AL2024-W	2,00	125	20
	AL2024-W	2,00	250	20
	AL2024-W	2,00	500	20
	AL2024-W	2,00	1000	20
	AL2024-W	2,00	2000	20

EK-1. (devam) Deney sınıflandırması

DENEY NO	MALZEME	KALINLIK, T (mm)	KONTUR YARIÇAPI, R (mm)	FLANŞ UZUNLUĞU, F (mm)
17	AL2024-W	0,635	125	30
	AL2024-W	0,635	250	30
	AL2024-W	0,635	500	30
	AL2024-W	0,635	1000	30
	AL2024-W	0,635	2000	30
18	AL2024-W	1,27	125	30
	AL2024-W	1,27	250	30
	AL2024-W	1,27	500	30
	AL2024-W	1,27	1000	30
	AL2024-W	1,27	2000	30
19	AL2024-W	1,60	125	30
	AL2024-W	1,60	250	30
	AL2024-W	1,60	500	30
	AL2024-W	1,60	1000	30
	AL2024-W	1,60	2000	30
20	AL2024-W	2,00	125	30
	AL2024-W	2,00	250	30
	AL2024-W	2,00	500	30
	AL2024-W	2,00	1000	30
	AL2024-W	2,00	2000	30
21	AL2024-W	0,635	125	40
	AL2024-W	0,635	250	40
	AL2024-W	0,635	500	40
	AL2024-W	0,635	1000	40
	AL2024-W	0,635	2000	40
22	AL2024-W	1,27	125	40
	AL2024-W	1,27	250	40
	AL2024-W	1,27	500	40
	AL2024-W	1,27	1000	40
	AL2024-W	1,27	2000	40
23	AL2024-W	1,60	125	40
	AL2024-W	1,60	250	40
	AL2024-W	1,60	500	40
	AL2024-W	1,60	1000	40
	AL2024-W	1,60	2000	40
24	AL2024-W	2,00	125	40
	AL2024-W	2,00	250	40
	AL2024-W	2,00	500	40
	AL2024-W	2,00	1000	40
	AL2024-W	2,00	2000	40

EK-2. Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)

(b)



(c)

(d)

Resim 4.1. Deney 1 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=250 mm, F=20 mm b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=500 mm; F=20 mm, c) Al2024-O; T=0,635 mm; R=1000 mm; F=20 mm, d) Al2024-O; T=0,635 mm; R=2000 mm; F=20 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)



(d)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(e)

Resim 4.2. Deney 2 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; $T=1,27$ mm; $R=125$ mm; $F=20$ mm b) Al2024-O; $T=1,27$ mm; $R=250$ mm; $F=20$ mm, c) Al2024-O; $T=1,27$ mm; $R=500$ mm; $F=20$ mm, d) Al2024-O; $T=1,27$ mm; $R=1000$ mm; $F=20$ mm, e) Al2024-O; $T=1,27$ mm; $R=2000$ mm; $F=20$ mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)



(d)



(e)

Resim 4.3. Deney 3 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=1,60 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-O; T=1,60 mm; R=250 mm; F=20 mm, c) Al2024-O; T=1,60 mm; R=500 mm; F=20 mm, d) Al2024-O; T=1,60 mm; R=1000 mm; F=20 mm, e) Al2024-O; T=1,60 mm; R=2000 mm; F=20 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)



(d)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(e)

Resim 4.4. Deney 4 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=2,00 mm; R=125 mm; F=20 mm, b) Al2024-O; T=2,00 mm; R=250 mm; F=20 mm, c) Al2024-O; T=2,00 mm; R=500 mm; F=20 mm, d) Al2024-O; T=2,00 mm; R=1000 mm; F=20 mm, e) Al2024-O; T=2,00 mm; R=2000 mm; F=20 mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)

Resim 4.5. Deney 5 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=30$ mm, b) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=30$ mm, c) Al2024-O; $T=0,635$ mm; $R=2000$ mm; $F=30$ mm



(a)

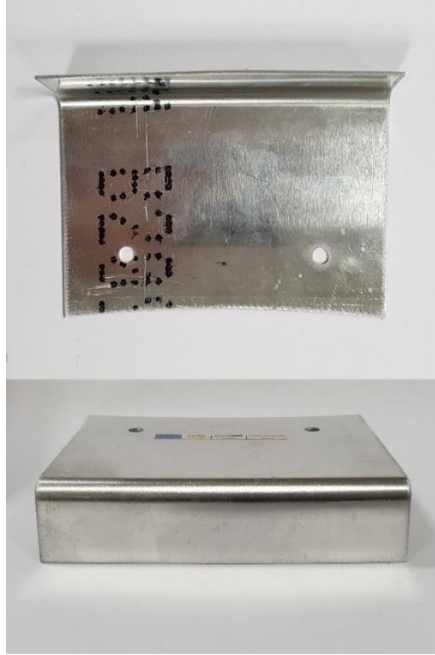


(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)



(d)

Resim 4.6. Deney 6 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=1,27 mm; R=250 mm; F=30 mm b) Al2024-O; T=1,27 mm; R=500 mm; F=30 mm, c) Al2024-O; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=30 mm, d) Al2024-O; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=30 mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)

(d)

Resim 4.7. Deney 7 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; $T=1,60$ mm; $R=250$ mm; $F=30$ mm, b) Al2024-O; $T=1,60$ mm; $R=500$ mm; $F=30$ mm, c) Al2024-O; $T=1,60$ mm; $R=1000$ mm; $F=30$ mm, d) Al2024-O; $T=1,27$ mm; $R=2000$ mm; $F=30$ mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)



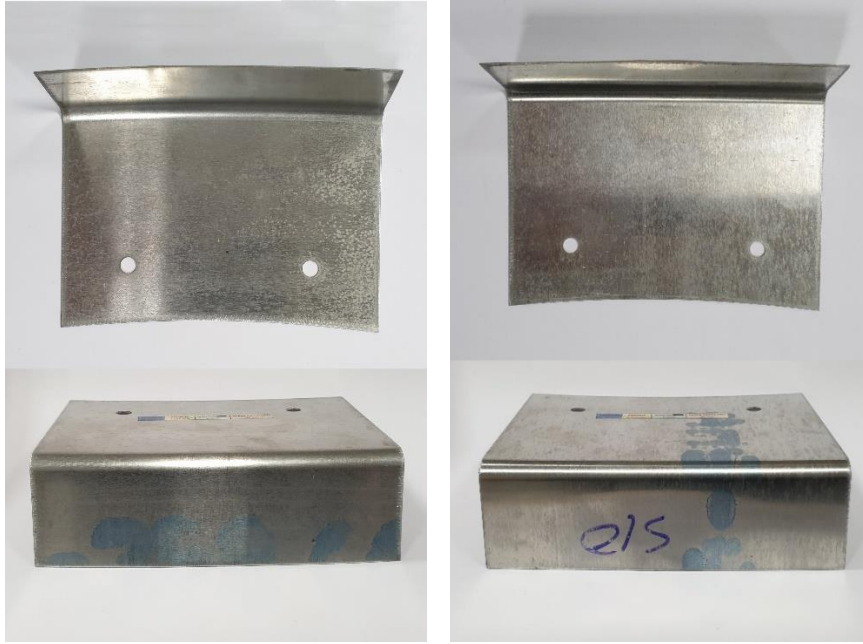
(d)



(e)

Resim 4.8. Deney 8 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=2,00 mm; R=125 mm; F=30 mm, b) Al2024-O; T=2,00 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al2024-O; T=2,00 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al2024-O; T=2,00 mm; R=1000 mm; F=30 mm, e) Al2024-O; T=2,00 mm; R=2000 mm; F=30 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)

(b)

Resim 4.9. Deney 9 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=0,635 mm; R=1000 mm; F=40 mm, b) Al2024-O; T=0,635 mm; R=2000 mm; F=40 mm



(a)

(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)



(d)

Resim 4.10. Deney 10 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=1,27 mm; R=250 mm; b) Al2024-O; T=1,27 mm; R=500 mm; F=40 mm, c) Al2024-O; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=40 mm, d) Al2024-O; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=40 mm



a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)



(d)

Resim 4.11. Deney 11 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=1,60 mm; R=250 mm; b) Al2024-O; T=1,60 mm; R=500 mm; F=40 mm, c) Al2024-O; T=1,60 mm; R=1000 mm; F=40 mm, d) Al2024-O; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=40 mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)



(d)



(e)

Resim 4.12. Deney 12 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-O; T=2,00 mm; R=125 mm; F=40 mm, b) Al2024-O; T=2,00 mm; R=250 mm; F=40 mm, c) Al2024-O; T=2,00 mm; R=500 mm; F=40 mm, d) Al2024-O; T=2,00 mm; R=1000 mm; F=40 mm, e) Al2024-O; T=2,00 mm; R=2000 mm; F=40 mm



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 4.13. Deney 13 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=250$ mm; $F=20$ mm, b) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=20$ mm, c) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=20$ mm, d) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=2000$ mm; $F=20$ mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 4.14. Deney 14 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; $T=1,27$ mm; $R=250$ mm; $F=20$ mm, b) Al2024-W; $T=1,27$ mm; $R=500$ mm; $F=20$ mm, c) Al2024-W; $T=1,27$ mm; $R=1000$ mm; $F=20$ mm, d) Al2024-W; $T=1,27$ mm; $R=2000$ mm; $F=20$ mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)

(b)

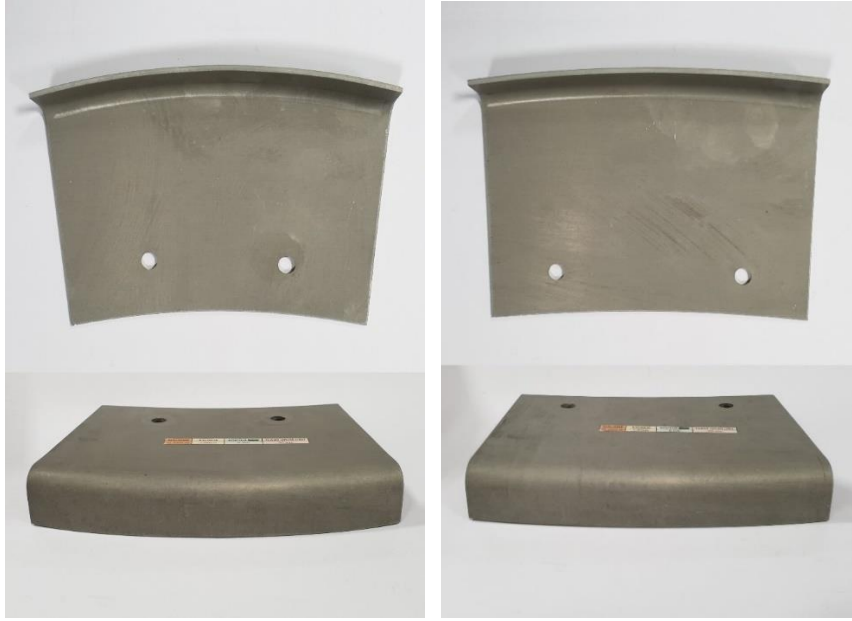


(c)

(d)

Resim 4.15. Deney 15 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=250 mm; F=20 mm, b) Al2024-W; T=1,60 mm; R=500 mm; F=20 mm, c) Al2024-W; T=1,60 mm; R=1000 mm; F=20 mm, d) Al2024-W; T=1,60 mm; R=2000 mm; F=20 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)

(b)



(c)

(d)

Resim 4.16. Deney 16 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; $T=2,00$ mm; $R=250$ mm; $F=20$ mm, c) Al2024-W; $T=1,60$ mm; $R=500$ mm; $F=20$ mm, d) Al2024-W; $T=2,00$ mm; $R=1000$ mm; $F=20$ mm, e) Al2024-W; $T=2,00$ mm; $R=2000$ mm; $F=20$ mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)

Resim 4.17. Deney 17 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=500$ mm; $F=30$ mm, b) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=30$ mm, c) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=2000$ mm; $F=30$ mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 4.18. Deney 18 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=1,27 mm; R=250 mm; F=30 mm, b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=500 mm; F=30 mm, c) Al2024-W; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=30 mm, d) Al2024-W; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=30 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 4.19. Deney 19 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=250 mm; F=30 mm, b) Al2024-W; T=1,60 mm; R=500 mm; F=30 mm, c) Al2024-W; T=1,60 mm; R=1000 mm; F=30 mm, d) Al2024-W; T=1,60 mm; R=2000 mm; F=30 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 4.20. Deney 20 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=2,00 mm; R=250 mm; F=30 mm, c) Al2024-W; T=1,60 mm; R=500 mm; F=30 mm, d) Al2024-W; T=2,00 mm; R=500 mm; F=30 mm, e) Al2024-W; T=2,00 mm; R=2000 mm; F=30 mm

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(a)



(b)

Resim 4.21. Deney 21 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=1000$ mm; $F=40$ mm, b) Al2024-W; $T=0,635$ mm; $R=2000$ mm; $F=40$ mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)

Resim 4.22. Deney 22 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=1,27 mm; R=500 mm; b) Al2024-W; T=1,27 mm; R=1000 mm; F=40 mm, d) Al2024-W; T=1,27 mm; R=2000 mm; F=40 mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)

Resim 4.23. Deney 23 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=1,60 mm; R=500 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=1,60 mm; R=1000 mm; F=40 mm, c) Al2024-W; T=1,60 mm; R=2000 mm; F=40 mm



(a)



(b)

EK-2. (devam) Deneylerde kırışma meydana gelmeden şekillenmiş parça resimleri



(c)

(d)

Resim 4.24. Deney 24 sonucunda elde edilen şekillendirilmiş parçalar a) Al2024-W; T=2,00 mm; R=250 mm; F=40 mm, b) Al2024-W; T=1,60 mm; R=500 mm; F=40 mm, c) Al2024-W; T=2,00 mm; R=1000 mm; F=40 mm, d) Al2024-W; T=2,00 mm; R=2000 mm; F=40 mm

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILGIN, Gürhan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.05.1986, Ankara
 Medeni hali : Evli
 e-mail : guruhanyilgin@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2012
Lisans	Ankara Atatürk Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii	Takım Tasarım Mühendisi
2016-2018	Atlas KBS Mühendislik	Tasarım Mühendisi
2014-2016	Johnson Controls	Makina Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yılmaz, O., Yılgin G. (2019). *Diyaframla hidrolik şekillendirme yönteminde konturlu yapıya sahip büküm parçalarındaki kırışma probleminin deneysel olarak incelenmesi*. 1. Uluslararası 23 Nisan Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, Ankara, 395.

Hobiler

Fotoğrafçılık, sinema, müzik



GAZİ GELECEKTİR..