



**ALÜMİNYUM 2024 SACLARIN SÜRÜNME-YAŞLANDIRMA
ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Başaran Bekir BAŞPINAR

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2022

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.

Başaran Bekir BAŞPINAR

08.03.2022

ALÜMİNYUM 2024 SACLARIN SÜRÜNME-YAŞLANDIRMA ŞEKİLENDİRME
PROSESİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Başaran Bekir BAŞPINAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2022

ÖZET

Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi havacılık ve uzay sanayisinde büyük ölçekli kompleks geometrilere sahip panellerin ve entegre panel olarak da bilinen özellikle askeri havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılan entegre yapıların imal edilebileceği ileri imalat yöntemlerinden biridir. Yaşlandırma ısı işlemi ve şekillendirme prosesi eş zamanlı hibrit bir şekilde gerçekleşmektedir. Elastik yükleme altında gerçekleştirilen proseste plastik deformasyon oluşumu, kalıp konturu ile sınırlandırılan iş parçasının prosesin başından sonuna dek sabit bir gerinim altında tutulması sonucu meydana gelen, gerilim gevşemesiyle mümkün olmaktadır. Yüksek geri yaylanma oranlarının meydana geldiği proseste üretim aşamasındaki en kritik aşama geri yaylanma oranının bilinmesi ve buna uygun kalıp tasarımının gerçekleştirilmesidir. Bu çalışmada 2024 T3 alüminyum alaşımının sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile T81 temperine yaşlandırılırken eş zamanlı şekillendirilme durumunda farklı sac kalınlığı ve farklı basınç değerlerindeki geri yaylanma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında havacılıkta yaygın olarak kullanılan 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm kalınlığındaki 2024 T3 sac malzemeler tercih edilmiştir. 2024 T3 temperindeki bir alaşımın T81'e yaşlandırılması için gereken sıcaklık ve süre bilgileri AMS2770'e göre belirlenmiştir. Bu sebeple tüm numuneler 190 °C sıcaklıkta ve 12 saat süreyle sürünme yaşlandırma şekil verme prosesine tabi tutulmuştur. Numuneler 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Kalıp geometrisi, parça ölçüleri, proses süresi ve sıcaklığı gibi parametreler sabit tutulduğunda malzeme kalınlığı arttığında geri yaylanma oranının azaldığı, aynı şekilde diğer parametreler sabitken şekillendirme basıncının artmasıyla geri yaylanma oranının azaldığı deneysel olarak gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91421
Anahtar Kelimeler : Sürünme-yaşlandırma şekil verme prosesi, Gerilim gevşemesi, Yaşlandırma ısı işlemi, AA 2024, Geri yaylanma
Sayfa Adedi : 99
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih AYCAN

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SPRINGBACK BEHAVIOR OF AA2024
SHEETS IN CREEP AGE FORMING

(M. Sc. Thesis)

Başaran Bekir BAŞPINAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2022

ABSTRACT

The CAF process is one of the advanced manufacturing methods in which panels with large-scale complex geometries can be produced in the aerospace industry and integrated structures, also known as integrated panels, which are frequently used in military aviation applications. The aging heat treatment and the shaping process are carried out simultaneously in a hybrid manner. In the process carried out under elastic loading, the formation of plastic deformation is possible by stress relaxation, which occurs as a result of keeping the workpiece limited by the mold contour under a constant strain from the beginning to the end of the process. In the process where high springback rates occur, the most critical step in the production phase is to know the springback rate and to design the mold accordingly. In this study, the springback behavior of 2024 T3 aluminum alloy at different sheet thickness and different pressure values in the case of simultaneous shaping while aging to T81 temper by CAF process was experimentally investigated. Within the scope of the study, 2024 T3 sheet materials with a thickness of 0,810, 1,016, 1,270 and 1,600 mm, which are widely used in aviation, were preferred. The temperature and time information required for aging an alloy in 2024 T3 temper to T81 have been determined according to AMS2770. For this reason, all samples were subjected to creep aging shaping process at 190 °C for 12 hours. The samples were shaped under pressure of 0,6, 0,7, 0,8 and 0,9 MPa. It has been experimentally observed that when the parameters such as mold geometry, part dimensions, process time and temperature are kept constant, the springback rate decreases when the material thickness increases, and likewise, the springback rate decreases with the increase of the forming pressure while the other parameters are constant.

Science Code : 91421
Key Words : Creep age forming, AA2024, Stress relaxation, Aging heat treatment, Springback
Page Number : 99
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Mehmet Fatih AYCAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince önemli desteklerinden dolayı hocalarım Prof. Dr. İbrahim USLAN ve Dr. Mehmet Fatih AYCAN'a, TUSAŞ'ta deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemde yardımlarını esirgemeyen kıymetli ekip arkadaşlarıma, manevi desteklerinden dolayı aileme ve son olarak tez çalışmam süresince sabrını ve anlayışını esirgemeyen eşime sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. KAVRAMSAL BİLGİLER.....	17
3.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması.....	17
3.1.1. Dövme alüminyum alaşımlar	18
3.1.2. Döküm alüminyum alaşımlar	18
3.2. Alüminyum Alaşımların Temperleri.....	19
3.3. Alüminyum Alaşımlarının Havacılıktaki Önemi ve Kullanım Alanları	22
3.4. Alüminyum Alaşımların Isıl İşlemleri	26
3.4.1. Çözeltiye alma ısıl işlemi	27
3.4.1. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılması	30
3.5. Metal Malzemelerin Sürünme Davranışı	32
3.5.1. Sürünme aşamaları	34
3.5.2. Sürünme mekanizmaları	35
3.6. Gerilme Gevşemesi	38
3.7. Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme Prosesi	41

Sayfa

3.7.1. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin avantaj ve dezavantajları..	42
3.7.2. Sürünme yaşlandırma prosesinin endüstriyel uygulamaları	43
3.7.3. Sürünme yaşlandırma şekillendirme proses mekanizması.....	45
3.7.4. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde geri yaylanma davranışı	50
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	55
4.1. Malzeme	55
4.2. Kalıp Tasarımı.....	56
4.3. Proses Akışı.....	57
4.4. Deney Parametrelerinin ve Sarf Malzemelerin Belirlenmesi.....	58
4.5. Numunelerin Hazırlanması	59
4.6. Deney Tasarımı	60
4.7. Deney Yöntemi	61
4.8. Deney Sonuçları	75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	89
EKLER.....	95
EK-1. Ultraweave 1332 bilgi sayfası	96
EK-2. A-800-3G bilgi sayfası	97
EK-3. DPT-1000 bilgi sayfası.....	98
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımların ısıtıl işlem uygulanabilirliği.....	17
Çizelge 3.2. H temperine ait özellikler	21
Çizelge 3.3. T temperine ait özellikler.....	21
Çizelge 4.1. 2024 T3 fiziksel özellikleri.....	55
Çizelge 4.2. Al 2024'ün kimyasal kompozisyonu	55
Çizelge 4.3. Sarf malzeme listesi.....	59
Çizelge 4.4. Toplam numune adedini veren tablo	59
Çizelge 4.5. Deneylerin listesi	61
Çizelge 4.6. 2024 T81 alüminyum alaşımın sertlik ve iletkenlik değerleri, AMS 2658.....	73
Çizelge 4.7. Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları	76
Çizelge 4.8. Numunelerin iletkenlik ölçüm sonuçları	78
Çizelge 4.9. Numunelerin geri yaylanma oranlarının ölçüm sonuçları	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Ticari ve askeri uçaklardaki alüminyum kullanım oranları.....	22
Şekil 3.2. Alüminyum alaşımlarının ısıtım işlem kategorilerine göre sıcaklık aralıkları...	27
Şekil 3.3. Alüminyum bakır alaşımları denge diyagramı.....	29
Şekil 3.4. (a) Isıtım işleme uygun 2XXX serisi bir alüminyum alaşımının Al-Cu faz diyagramı ve (b) Al-Cu alaşımlarına uygulanan tipik ısıtım işlem sekansı	30
Şekil 3.5. TEM ile çökeltilerin görüntüsü, (a) GP Bölgeleri, (b) θ'' oluşumu, (c) θ' oluşumu, (d) θ oluşumu	31
Şekil 3.6. Yaşlandırma süresince alaşımın mikroyapısında meydana gelen aşamalar...	32
Şekil 3.7. Sürünmenin aşamalarının $\varepsilon - t$ grafiği ile gösterimi.....	34
Şekil 3.8. Sürünme mekanizma haritası	36
Şekil 3.9. Kayma ve dislokasyonların etkisi ile gerçekleşen dislokasyon sürünmesi	37
Şekil 3.10. Atom ve atom boşluklarının hareket yönleri.....	38
Şekil 3.11. 2219 alüminyum alaşımının 165°C’de farklı mekanik gerilmeler altındaki gerilim gevşemesi davranışı	40
Şekil 3.12. 7150-T7751 alüminyum alaşımının aynı mekanik gerilim ve farklı termal şartlardaki gerilim gevşemesi davranışı	41
Şekil 3.13. Sürünme yaşlandırma prosesine örnek parçalar A380 kanat paneli, GKN firmasına ait motor iç yapısal parçası, G5 kanat paneline ait sürünme yaşlandırma şekillendirme kalıbı	44
Şekil 3.14. Prosesin üç temel aşaması	45
Şekil 3.15. (a) Proses anında iş parçasının kesiti boyunca oluşan gerilim dağılımı ve gerilim gevşemesinin etkisi, (b) Proses süresince meydana gelen gerilim gevşemesi, (c) Proses süresince iş parçası üzerinde oluşan sürünme gerinimi, (d) Prosesle ait gerilim-gerinim grafiği	47
Şekil 3.16. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanma durumu.....	51
Şekil 3.17. Elastik gerilmeler altında gerçekleştirilen bir sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesine ait gerilim gerinim diyagramı.....	51
Şekil 3.18. Defleksiyon ve yarıçap metodlarına göre geri yaylanma.....	53
Şekil 4.1. Proses akışı.....	58

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Numunelerin sertlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi.....	76
Şekil 4.3. Numunelerin sertlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi.....	77
Şekil 4.4. Numunelerin iletkenlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi.....	78
Şekil 4.5. Numunelerin iletkenlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi.....	79
Şekil 4.6. Proses basıncı ve geri yayanma oranı arasındaki ilişkiyi veren dağılım grafiği	81
Şekil 4.7. Malzeme kalınlığı ve geri yayanma oranı arasındaki ilişkiyi veren dağılım grafiği	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde kullanılacak olan kalıplar.....	56
Resim 4.2. CNC router ile kesilmiş numune fotoğrafı.....	60
Resim 4.3. Kalıp üzerine pozisyonlanmış sürünme yaşlandırma şekillendirme numuneleri.....	62
Resim 4.4. Kalıp ve numune arasındaki boşluk	63
Resim 4.5. Kalıp ve numune arasındaki boşluğu kapatmak için kullanılan gap detayı .	63
Resim 4.6. Teflon bant kullanımı	64
Resim 4.7. Sızdırmazlık bandının yapıştırılması.....	65
Resim 4.8. Termal çift, dişi vakum portu ve battaniyenin yerleştirilmesi	66
Resim 4.9. Vakum torbasının yapıştırılması	67
Resim 4.10. Vakum portlarının kalıcı bağlantısının yapılması ve sızdırmazlık bandı kullanımı.....	68
Resim 4.11. Seyyar vakum motoru ile vakum torbasında kaçak kontrolü	69
Resim 4.12. Proseslerin gerçekleştirildiği otoklav	70
Resim 4.13. Çevrimi tamamlanıp otoklav dışına alınan numuneler.....	71
Resim 4.14. Vakum torbası, termal çift ve vakum portları söküldükten sonra	71
Resim 4.15. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi ile şekillendirilmiş numuneler	72
Resim 4.16. Kalıptan çıkarılmış şekillendirilmiş numuneler	72
Resim 4.17. Sertlik ölçüm cihazı.....	74
Resim 4.18. İletkenlik ölçüm cihazı kalibrasyon kontrolü.....	74
Resim 4.19. Numunelerin sertlik ölçümleri.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

cm³	Santimetre küp
CMM	Bilgisayar ölçüm cihazı
CNC	Bilgisayarlı sayısal kontrol
E	Elastisite Modülü, MPa
g	Gram
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
m	Metre
M	Moment, Nmm
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
Q	Aktivasyon enerjisi
R	Gaz sabiti
σ	Gerilme, MPa
ϵ	Gerinim mm/mm

Kısaltmalar

Açıklamalar

AMS	Uzay ve Havacılık Malzeme Standardı
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Enstitüsü
SAE	Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği
SB	Geri Yaylanma

1. GİRİŞ

Uzay ve havacılık sanayisindeki ürünlerin gelişmesiyle birlikte üç boyutlu konturlara sahip kompleks geometrili ve oldukça geniş boyutlardaki parçaların ihtiyaçlarının karşılanmasında plastik şekillendirme yöntemleri yetersiz kalmış ve ileri imalat yöntemleri arayışlarına girilmiştir. 1980'li yıllarda Textron firması tarafından kompleks geometrilere sahip havacılık ve uzay araçlarına ait büyük ölçekli parçaların üretilebilmesi için sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi ismini verdikleri bir imalat metodu geliştirilmiştir. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi iş parçalarının yaşlandırma ısı işlemi ve şekillendirme proseslerinin eş zamanlı gerçekleştiği ileri şekil verme yöntemlerinden biridir. Gelişmiş imalat yöntemlerinden birisi olan sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi, ticari ve askeri uçakların kanat panellerinin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca panel-kiriş gibi entegre havacılık yapılarının üretiminde tercih edilen bir imalat yöntemidir.

Prosesin temelinde sürünme deformasyonu ve yaşlandırma ısı işlemi vardır. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesiyle yalnızca yaşlandırma ısı işlemi uygulanabilen alaşımlar şekillendirilebilir. Elastik yüklemeler altında gerçekleştiriliyor olması da iş parçaları üzerinde şekillendirme sonrasında daha az kalıntı gerilmeler oluşmasına neden olmaktadır. Şekillendirme mekanizması gerilme gevşemesine dayanmaktadır. Sabit gerinim altındaki iş parçalarının üzerine yapılan mekanik yüklemeler sonucunda metalürjik etkenler ve sürünmeden kaynaklı gerilme gevşemesi ismi verilen bir fenomen meydana gelmektedir ve iş parçası üzerindeki gerinimin bir miktarı plastik gerinime dönüşmektedir. Toplam gerinim prosesin başlangıcından prosesin sonuna kadar sabittir. Toplam gerinim plastik gerinim ve elastik gerinimin toplamı şeklindedir. Gerilme gevşemesinin etkisiyle iş parçasında plastik gerinim meydana gelmektedir. Meydana gelen plastik gerinim parçanın proses öncesi haliyle kalıp geometrisi arasında bir form almasını sağlarken elastik gerinim ise parça üzerindeki gerilme kalktıktan sonra geri yaylanma olarak sonuçlanır. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki kalıp tasarımı ve imalat süreçleri açısından en önemli parametre geri yaylanma davranışının belirlenmesidir. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki proses mekanizması ve yükleme tipinin plastik şekillendirme metotlarından farklı olmasından dolayı geri yaylanma davranışı da aynı malzeme şekillendiriliyor olmasına rağmen geleneksel şekillendirme yöntemlerinden farklıdır. Geri yaylanma davranışı bilinmeyen bir malzemenin şekillendirilmesinde deneme üretimleri

gerçekleştirilir ve şirketler açısından bu ürün maliyetini artırmaktadır. Özellikle büyük ölçekli parçalarda kalıp boyutları itibarıyla maliyet oldukça büyük bir önem kazanmaktadır. Proje takvimi ve işçilik açısından da oldukça kritiktir.

Tez kapsamında, otoklav ortamında gerçekleştirilen sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki otoklav basıncının ve malzeme kalınlığının geri yaylanma oranına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Malzeme kalınlığı ve otoklav dışındaki parametreler tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Deney malzemesi olarak havacılık sektöründe oldukça önemli bir malzeme olan alüminyum 2024 alaşımı tercih edilmiştir. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde sıcaklık ve süre belirlenirken yaşlandırma parametreleri ile karar verilmektedir. Yaşlandırma parametreleri olan sıcaklık ve yaşlandırma süresi AMS2770 standardına göre T3 temperindeki bir sac malzemenin T81 temperine dönüşmesi için gerekli olan sıcaklık ve süreye göre belirlenmiştir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm kalınlığındaki sac malzemeler kullanılmıştır. Otoklav basıncı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen deneysel geri yaylanma oranlarının bu prosesle üretilecek olan parçaların kalıp tasarımı aşamalarında ışıık tutacak bir girdi olması beklenmektedir. Aynı zamanda ülkemiz içerisinde üretilen yerli ve milli uçaklarımızın kanat ve gövde panelleri dahil olmak üzere pek çok kompleks ve büyük ölçekli uçak parçalarının üretiminde kullanılacak bir metot olarak literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Textron firması tarafından geliştirilen ve uygulanan bir üretim yöntemi olan sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi entegre güçlendirilmiş panellerin, kanat panelleri, entegre panel çita yapılarının üretimi ve gövde panellerinin üretiminde uygulanan gelişmiş bir imalat yöntemidir. İlk kez 1989 yılında Brewer tarafından bir makale yayınlanarak proses mekanizması ve detaylarıyla paylaşılmıştır. Prosesin elastik yüklemeler altında gerçekleştiriliyor olması diğer plastik şekillendirme yöntemleri ile kıyaslandığında sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile üretilen parçalarda diğer metotlara göre daha az kalıntı gerilme meydana gelmesi özellikle havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında prosesi oldukça önemli hale getirmiştir. Bilgisayar kontrollü otoklavlarda prosesin yayılı bir yükleme altında gerçekleştiriliyor olması da diğer metotlara kıyasla daha kontrollü olmasını sağlamaktadır ve ölçüsel açıdan tekrar edilebilirliği oldukça yüksektir. Brewer yaptığı çalışmada proses mekanizmasını açıklamasının yanı sıra farklı metotlarla şekillendirilen parçaların maruz kaldığı kalıntı gerilmeler ile sürünme yaşlandırma şekil verme prosesiyle şekillendirilen aynı iş parçasının üzerindeki kalıntı gerilmeleri kıyaslamıştır. Dikdörtgen alüminyum 7075 çubuk numuneler kullanılmıştır. T651 7075 alaşımındaki numuneler sırası ile roll şekillendirme ve abkant şekillendirme yöntemleri ile şekillendirilerek sonrasında T7351 temperine yaşlandırılmıştır. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile 7075 T651 numunesi şekillendirilirken aynı zamanda yaşlandırılarak T7351 temperine ve diğer numunelerle aynı forma sahip duruma getirilmiştir. Konveks ve konkav bölgelerden yapılan ölçümler neticesinde sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde 53,7 ve 33,1 MPa kalıntı gerilme, abkant ile şekillendirilen ve yaşlandırılan numunelerde sırası ile 61,3 ve 59,3 MPa ve son olarak roll şekillendirme ile 68,9 ve 100,1 MPa kalıntı gerilmeler ölçülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde sürünme ve yaşlandırma şekil verme prosesi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerin diğerlerine kıyasla daha iyi olacağı kanısına ulaşılmaktadır. İlk askeri havacılık uygulaması olarak yine Textron firması B-1B uçağının kanat panellerini sürünme yaşlandırma şekil verme tekniğiyle üretmiştir. 15 m uzunluğunda ve 2,7 m en geniş yeri olan kanat panelleri üzerinde J profilde güçlendiriciler olacak şekilde işlenerek şekillendirilmiştir. 1984 ve 1987 yılları arasında toplamda 336 panel üretimi gerçekleştirilmiş olup panellerin form kalıplarının üretimi öncesinde geri yaylanma davranışının saptanması için deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve prodesteki en kilit noktanın geri yaylanma oranının saptanması gerektiği belirtilmiştir. Elastik yüklemeler altında gerçekleştirilmesi sebebiyle plastik şekillendirme yöntemlerine kıyasla çok daha yüksek oranlarda geri yaylanma

değerleri elde ettiklerini belirtmiştir. Ayrıca iş parçaları üzerindeki oyukların form öncesinde kesilebiliyor olması da şekillendirme sonrasında oyukların açılması için gerekli olacak fikstür ihtiyaçlarını da ortadan kaldırmaktadır [1].

Holman sürünme yaşlandırma şekil verme prosesini, yaşlandırma esnasında meydana gelen gerilim gevşemesi olgusuna dayanan bir metal şekillendirme prosesi olarak tanımlamaktadır. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin temeli gerilim gevşemesi fenomenine dayanmaktadır. Eğer ilk gerilme iş parçalarının üzerine akma dayanımının altında indüklenirse yükleme kaldırıldıktan sonra parçanın ilk haline döneceği kaçınılmazdır. İlk yükleme yapıldıktan sonra iş parçası sabit bir gerilim altında yaşlandırmaya maruz kalacak şekilde yükleme kaldırılmadan bırakılırsa belirlenen proses süresi sonunda iş parçasının üzerinden yükleme kaldırıldığında tamamen elastik bir toparlanma olmayacak ve bir miktar plastik deformasyon meydana gelecektir. Bu yaklaşıma göre elastik toparlanma miktarına geri yaylanma olarak adlandırmıştır. Holman'ın yaklaşımı ile yaşlandırma ve şekillendirme proseslerinin aynı anda gerçekleşiyor olması sürünme yaşlandırma şekil verme prosesini, temeli bükülme gerilme teorisine dayanan proseslerden ayırmaktadır. Holman aynı zamanda plastik deformasyon yöntemleri ile şekillendirilmiş ve sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile şekillendirilmiş numuneler üreterek proses sonrasında numuneler üzerindeki kalıntı gerilim miktarlarını ölçmüştür. Netice olarak sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile üretilen numunelerde 22,1 MPa değerinde kalıntı gerilme sonucu elde etmiştir. Plastik deformasyon yöntemlerinde ise abkant ile şekillendirdiği numunelerde 100 MPa kalıntı gerilme görmüştür. Yaşlandırılma sonrasında numune üzerindeki kalıntı gerilme 40 MPa'a düşmüştür. Holman yaptığı çalışmalar neticesinde havacılık ve uzay uygulamalarında çevrimsel yüklere maruz kalan parçaların yüksek kalıntı gerilmeler barındırması katastrofik sonuçlara sebebiyet doğrulabileceğinden sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin geniş konturlu panellerin üretiminde oldukça efektif bir yöntem olduğuna değinmiştir [2].

Adachi, Kimura, Nagayama, Takehisa ve Shimanuki sürünme yaşlandırma şekil verme prosesini, sürünme deformasyonu ile şekillendirme ve alaşımın eş zamanlı yaşlandırıldığı uçak kanat panellerinin şekillendirildiği bir proses olarak tanımlamaktadır. Adachi ve arkadaşları çift eksenli kontura sahip entegre kanat panelinin üretimi ve sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi sonrasında karşılaştıkları geri yaylanma değerleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Entegre bir kanat paneli yapısı ve geleneksel bir kanat paneli

çıta montajı karşılaştırıldığında mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından, yakıt veya akışkan kaçağının yaşandığı durumlardan sakınma, parça üretimi ve montajlanması açısından düşünüldüğünde sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile üretilebilen entegre bir panelin daha efektif olacağını göstermişlerdir. 1000 mm uzunluğunda ve 400 mm genişliğinde entegre yapıya sahip frezelenmiş numuneler kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada %70 ve %55 aralığında bir geri yaylanma ile karşılaşmışlardır. Kullanılan kalıpların kontur çaplarının artması ile geri yaylanma oranının da arttığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar neticesinde çift eksenli kontura sahip bir panelin sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile üretilmesinin detay üretimdeki kalıp maliyetinin, adam saat açısından montaj süresi ve diğer mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından efektif bir üretim tekniği olduğuna karar vermişlerdir. Ayrıca geri yaylanma değerlerinin doğru tahmin edilmesinin de kalıp maliyetini düşüreceğini belirtmişlerdir [3].

Ho, Lin ve Dean sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanmayı tahmin etmek için entegre sayısal teknikler geliştirmiştir. Fiziksel tabanlı sürünme denklemleriyle birincil sürünme esnasındaki sertleşme, yaşlanma esnasında gerçekleşen çökme ve gerilim gevşemesi, sürünme kaynaklı hasar ve alüminyum alaşımlarının sürünme deformasyon özelliklerini kullanarak kompleks bir denklem takımı oluşturmuşlardır. Elde ettikleri denklem takımları ile tek eksenli kontura sahip silindirik formlu alüminyum paneller ve küresel çift eksenli kontura sahip alüminyum paneller üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Farklı şekillendirme koşullarındaki alüminyum sacların gerilim gevşemesi ve sürünme deformasyonunu çalışmışlardır. Malzeme kalınlığının ve diğer proses parametrelerinin geri yaylanma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tipik bir sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde şekillendirilecek olan numunenin üzerine yapılan yükleme tipi elastiktir. Bu sebeple koşturdukları analizde ilk yükleme değeri malzemenin akma değeri altında bir belirlenmiştir. İş parçası üzerindeki gerilme değerinin artması ile daha fazla plastik sürünme ve daha hızlı gerilim gevşemesi oluştuğunu sürünme denklemleri ve gerilim gerinim diyagramları ile açıklamışlardır. Viskoplastik yüklemeler altında hem silindirik tek eksenli konturu olan iş parçası hem de küresel çift eksenli konturu olan parça için geri yaylanma üzerindeki proses etkilerini incelemişlerdir. Geri yaylanma oranının sürünme deformasyonu ile yönetildiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple proses süresinin uzun olması sürünme deformasyonunu artıracak ve beraberinde daha fazla sürünme gerinimi ve daha az geri yaylanma meydana gelecektir. Koşturdukları şekillendirme analizinden bu kanıya varmışlardır. Çift eksenli konturu olan numune için proses 20 saat sürdüğünde geri

yaylanma oranının %55 iken 6 saat gerçekleştirdiklerinde ise %58 olduğu sonucuna varmışlardır. İş parçasının kalınlığının artması ile gerilimin de elastik yükleme olduğundan dolayı lineer olarak artacağını saptamışlardır. 9, 18 ve 25mm kalınlığında kare iş parçaları üzerinde sonlu elemanlar çalışmaları yapmışlardır. Aynı elastik yükleme ve deformasyon süresi altında iş parçasının kalınlığının artması ile geri yaylanmanın azaldığı sonucunu elde etmişlerdir. 9 mm kalınlığındaki numune neredeyse tamamen eski haline dönerken 25 mm kalınlığındaki numune ise %70 oranında geri yaylanmıştır. Deformasyon esnasında kalınlık boyunca alınan bir kesitteki gerilim dağılımı düşünüldüğünde etkin sürünme bölgesi veya plastik bölge iş parçasının dış yüzeyinden merkezine doğru büyümektedir. Etkin sürünme bölgesi ve elastik bölge arasındaki orana bağlı olarak bu oranın 0 olması durumunda tamamen elastik bir deformasyon meydana geleceği ve iş parçası deformasyon öncesindeki orijinal haline dönecektir. Bu oranın 1'e yaklaşması ise daha fazla plastik deformasyon meydana geleceğini göstermektedir ve daha düşük oranlarda geri yaylanma etkin olacaktır. Aynı şekillendirme kondisyonunda iş parçasının kalınlığının artması ile elastik çekirdek bölgesinin artması plastik bölgenin artması kadar olmamaktadır. Plastik bölgenin artması ile de gerilim gevşemesi hızı artmaktadır. Çift eksenli konturlu bir geometrinin tek eksenli konturu olan bir iş parçasına göre geri yaylanma davranışını incelemek amacı ile sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının neticesinde parçanın genişlik/uzunluk oranının artmasıyla geri yaylanma oranının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca çift eksenli konturu olan bir iş parçasının aynı proses şartları altında tek eksenli konturu olan bir iş parçasına göre daha az geri yaylandığı sonucunu elde etmişlerdir. Bunun sebebi ise aynı şartlar altında küresel bir yapıda meydana gelen von mises gerilmesinin silindirik bir yapıya göre daha büyük olması ve daha büyük gerilmelerin daha fazla gerilim gevşemesi, daha fazla plastik sürünmeye sebep olması olarak belirtmişlerdir [4].

Jambu, Lenczowski ve Rauh Airbus'un düşük yoğunluklu, tokluk ve mukavemet değeri yüksek, kaynaklanabilirliği yüksek ve korozyon direnci yüksek olan 5XXX serisi alüminyum alaşımı geliştirmesinin hemen ardından şekillendirme denemelerinde bu malzemenin geleneksel şekillendirme yöntemlerine göre zayıf olduğunu saptamıştır. Bunun sebebi ise gövde profilinin çift eksenli konturunun olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Alternatif şekillendirme yöntemleri içerisinde sürünme-yaşlandırma şekil verme prosesini seçerek 5XXX serisi alaşımın bu prosesdeki şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Orta ve yüksek sıcaklıklarda deneme üretimleri gerçekleştirmişlerdir. Orta sıcaklıkta yapılan deneme üretiminde geri yaylanma oranı yüksek sıcaklıkta yapılan deneme

üretimine göre daha fazla gözlemlenmiştir. Bu sebeple orta sıcaklıkta gerçekleştirilen proste kullanılacak olan kalıbın daha derin gravürlere ihtiyacı olduğu fakat yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilecek olan proste ise orijinal kontura daha yakın bir geometri işlenerek istenilen konturun elde edilebileceği raporlanmıştır. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile istenilen gövde parçalarının üretiminin gerçekleşmesi ile 22 üretim adımından 9 üretim adımına düşürerek aynı parçanın imalatının gerçekleştirilebileceği raporlanmıştır [5].

Adachi, Kimura, Nagayama, Takehisa ve Shimanuki 7475 alüminyum alaşımlı entegre panelin sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki span ve kord kontur yarı çaplarına göre geri yaylanma davranışını incelemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Her iki konturun artmasının geri yaylanma oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada geri yaylanma oranı %70 ile %51 arasında değişmiştir. Bu çalışmalar neticesinde üretimsel bir bakış açısı ile incelendiğinde geri yaylanma oranının sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde belirlenmesi gereken en önemli karakteristik özellik olduğunu göstermişlerdir [6].

Robey, Prangnell ve Dif 7475, 6056 ve 2XU alüminyum alaşımlarının gerilme gevşeme davranışlarının karşılaştırılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin temelini oluşturan olgulardan biri olan gerilim gevşemesi davranışının farklı gerilme ve sıcaklık değerlerindeki davranışlarını incelemişlerdir. Akma mukavemet değerlerinin %70'i kadar bir gerilme altında gerçekleştirdikleri proste sıcaklığın artması ile birlikte gerilim gevşemesi hızının arttığını gözlemlemişlerdir. 2XU alaşımı için 127 MPa'lık bir gerilme davranışında 200 °C'de gerçekleştirilen proste gerilme değeri 4 saatten kısa bir süre içerisinde 60MPa'nın altına düşerken 190 °C'de gerçekleştirilen çalışmada 6 saatin üzerinde bir sürede 60Mpa'nın altına inmiştir. 6056 alaşımı 199.5 MPa'lık gerilme altında 210 °C'de yaklaşık 3 saatte 140 MPa seviyelerine gevşeme meydana gelirken 190 °C'de bu süre yaklaşık olarak 10 saattir. 7475 alaşımı üzerine ise 197 MPa'lık bir gerilme uygulanmıştır. 190°C'de yaklaşık 2 saatte 140 MPa altına gevşeme meydana gelirken 160°C'de bu süre yaklaşık 8 saattir. Yapılan çalışmalar neticesinde sıcaklık ve ilk gerilme değerinin gerilim gevşemesi davranışı üzerinde etkili olduğu raporlanmıştır [7].

Jeunechamps, Ho, Lin, Ponthot ve Dean alüminyum parçaların sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanma davranışının tahmin edilebilmesi için sayısal bir metod geliştirmiş ve programlamışlardır. Alüminyum 7010 alaşımının 150°C'deki mekanik ve metalürjik özelliklerini dikkate almışlardır. Fiziksel temelli proses denklemi yaşlanma sertleşmesi ve sürünme deformasyon özelliklerini temsil edecek şekilde hazırlanmıştır. Sadece bükme işlemi altında olduğunu varsaymışlardır. Malzeme kalınlığının etkisi, tek ve çift eksenlerde konturlu olma, yaşlandırma süresi ve gerilim gevşemesi özelliklerinin geri yaylanma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Denklemleri prosesi de tanımlayan üç aşamaya göre oluşturmuşlardır. Birincisi lineer yükleme, ikinci adım sürünme yaşlandırma ve gerilim gevşemesi, son olarak üçüncü adım ise gerilmenin iş parçası üzerinden kaldırılmasıdır. Geri yaylanmayı da plakanın orta noktasındaki sapmanın proses öncesindeki ve sonrasındaki duruma göre formüle etmişlerdir. Malzeme kalınlığının artması ile elastik çekirdeğin malzeme kalınlığına olan oranının azalması sayesinde geri yaylanmanın azaldığını gözlemlemişlerdir. Farklı eksenlerdeki konturların oranının 1'e yaklaşması ile geri yaylanmanın azaldığı birbirinden farklılaşıp aralarındaki oran azaldıkça geri yaylanmanın arttığını gözlemlemişlerdir. Sürünme deformasyonunu etkileyen en büyük anahtar parametrelerden biri olan sürenin artması ile geri yaylanma oranının azaldığını gözlemlemişlerdir [8].

Ribeiro, Marinho, Inforzato, Costa ve Batalha sürünme şekillendirme prosesinde meydana gelen yüksek geri yaylanma oranlarının tespiti için matematiksel bir denklem türetmişlerdir ve deneysel sonuçlarla da yaptıkları çalışmalar kıyaslamışlardır. Çalışmaları için 7475 alüminyum alaşımını belirlemişlerdir. 12x100x300 mm ebatlara sahip olan numuneyi 6.9 bar yayılı yükleme altında 24 saat 163°C'de şekillendirmişlerdir. Kullanılan kalıbın yarıçap değeri ise 3750mm'dir. Kalıp yarı çap değeri aynı zamanda iş parçasının alması beklenen konturun yarı çapıdır. Bilgisayarlı ölçüm tezgahında hassas bir ölçüm gerçekleştirmişlerdir. Üç farklı kesitten elde edilen sonuçlarda %87.3, %86.9 ve %82 oranında deneysel geri yaylanma değerlerine ulaşmışlardır. Türetmiş oldukları matematiksel denklem ve yazdıkları programa göre sonlu elemanlar analiz yöntemi ile edilen sayısal veriler arasında %1.1-%0.37 aralığında farklılıklar gözlemlemişlerdir. Oldukça efektif bir yaklaşım ile proses önce geri yaylanmanın tahmin edilebilmesi için faydalı bir model geliştirmişlerdir [9].

Jeshvaghani, Emami, Shahverdi ve Hadavi sıcaklık ve zamanın alüminyum 7075 alaşımının sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanma davranışı ve mekanik

özellikleri üzerindeki incelemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. 400x100x3 mm sırası ile boy, en ve kalınlıkta sac numune kullanmışlardır. Kullanılan kalıbın yüzeyi silindirik bir formda olup maksimum derinliğin olduğu nokta ise 65 mm'dir. 150 ve 190 °C'de 6, 12, 18, 24 ve 48 saat süren prosesler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmaların neticesinde 190°C'de gerçekleştirilen proseste sürünme daha yüksek oranlarda sürünme gerinimi elde edildiği belirtilmiştir. 150°C, 24 saat ve 190 °C, 24 saatte gerçekleştirilen sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile geleneksel yaşlandırma prosesine tabi tutulan numunelerin brinell cinsinden sertlik değerleri, çekme dayanımı ve akma dayanımlarını ölçerek raporlamışlardır. Bunların sonucunda 150°C'de gerilme altında gerçekleştirilen numuneden elde edilen verilerin daha fazla olduğunu, 190°C'de gerçekleştirilen testler sonucunda ise yine gerilme altında gerçekleştirilen numunelerin sonuçlarının daha yüksek olduğunu raporlamıştır. Sıcaklık ve sürenin artması ile geri yaylanma oranının azaldığı, sıcaklığın artması ile maksimum sertlik değerine ulaşma süresinin azaldığı, sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki numuneler ile geleneksel yaşlandırma metodu kullanılarak yaşlandırılan numuneler arasında çok küçük farklar olduğunu belirtmiştir [10].

Quan, Zhao, Tian ve Haung sürünme yaşlandırma prosesi esnasında metal malzemenin mikroyapısında gerilmenin etkisi ile meydana gelen değişiklikleri incelemek için 2524 alüminyum alaşımı üzerinde izotermal bir test ortamında 170 °C'de 0, 173 ve 250 MPa'lık ilk gerilme değerleri altında sürünme cihazında deneyler gerçekleştirmiştir ve sonrasında TEM ile mikroyapı incelemeleri yapmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde gerilme altına yaşlandırılan yani sürünme yaşlandırma prosesine tabi tutulan numunelerde tepe sertlik değerine ulaşma süresi kısalmaktadır ve proses sonunda ilk gerilme değeri sıfır olan numuneye göre daha yüksek sertlik değerine ulaştığını gözlemlemişlerdir. Quan ve arkadaşları literatürdeki diğer çalışmalardan da alıntı yaparak genel olarak sertlik ve yaşlandırma süresi eğrilerini iki aşamadan meydana geldiğini belirtmiştir. Bu iki grup ise kümelenmelerin oluşması sonucunda meydana gelen hızlı sertleşme aşaması ve GP bölgelerinin oluşması ile homojenleşme sürecinin başladığı ikincil sertleşme aşamasıdır. Numuneler üzerindeki gerilmenin artması ile daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmasının sebebi ise yaşlandırmaya ek olarak gerinim sertleşmesinin de meydana gelmesidir sonucuna varmışlardır. Metalurjik incelemeleri sonucunda ise çökeltilerin boylarının daha kısa ve sayıca yoğunluğunun yalnızca yaşlandırılan numuneye göre daha fazla olduğu raporlanmıştır. Dislokasyonların artması ile çökelti boylarının kısaltıldıklarını ve elastik bir gerilmenin dislokasyon formasyonunu arttığını bildirmişlerdir. Dislokasyonların artması ise

dışarıdan bir kuvvet uygulanması durumunda alüminyum matriks içerisindeki boşlukların hızlı bir şekilde harekete geçmesi ile meydana gelmektedir [11].

Chen, Zhen, Jiang, Yang, Shao ve Zhang 7050 alüminyum alaşımın gerilme olmadan yaşlandırılması ve sürünme yaşlandırma prosesindeki yaşlandırılma davranışı arasındaki farkları incelemiştir. Farklı sürelerde numuneleri yaşlandırmış ve TEM mikroskobu altında mikroyapı incelemeleri yapmışlardır. Gerilme altında yaşlandırılan numunelerdeki tanelerin en-boy oranı, serbest halde yaşlandırılan numunelerdeki tanelerin en-boy oranından daha büyüktür. Ayrıca gerilim altında şekillendirilen numunelerdeki tane yapısı, gerilim uygulanmadan yaşlandırılan numunelerdeki tane yapısına göre daha oval olarak mikroskopta gözlemlenmiştir. Ek olarak eş eksenli tane oluşumunun gerilme altında daha çok türediği gözlemlenmiştir. Tane deformasyonunun artması ile birlikte de daha yüksek hızlarda ve oranlarda gerinim gözlemlenmiştir. Mikroyapıdaki deforme olmuş, yeniden oluşan ve yeniden kristallenen taneler incelendiğinde gerilim altında gerçekleştirilen proseste deforme olan tane sayısı ve yeniden kristallenme oranlarının serbest haldeki yaşlandırma prosesine göre daha yüksek oranda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Sürünme yaşlandırma prosesindeki temel olarak dislokasyonlar ve tane sınır hareketleridir. Elonge olmuş taneler tane sınırı hareketleri ile oluşmaktadır. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde de gerilmenin etkisi ile hadelleme yönünde tane sınırlarının hareket hızı ve oranı artmaktadır [12].

Nforzato, Junior, Fernandez ve Travessa literatürde herhangi bir güçlendirme veya entegre bir yapıda olmayan alüminyum sacların sürünme-yaşlandırma şekillendirme prosesindeki geri yaylanma denklemini entegre bir panelin şekillendirilmesi durumuna göre revize etmiştir ve yarı empirik bir formülizasyon türetmiştir. 300x600x50 mm ölçülerinde 11 tane güçlendirici feder olan AA7475 alaşımı çalışmalar için tercih edilmiştir. Panel ve federler farklı kalınlıklarda ve farklı ölçülerde CNC bir tezgahta işlenmiştir. Farklı kalınlıklarda işlenmesinin sebebi ise uçak panellerinin de sabit bir kalınlıkta olmayıp farklı kalınlıklara sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Proseste kullanılan kalıp malzemesini de alüminyum seçmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar neticesinde 3750 mm kontura sahip bir kalıp tasarımı yapmışlardır ve beklentileri 1120 mm'lik bir kontura sahip parça elde etmek yani %70 geri yaylanma olacağı ön görülmüştür. Vakum torbalama tekniği kullanılarak otoklavda 7 atm basınç altında 160 °C'de 24 saat süreyle parça şekillendirilmiştir. Lazer tarama metodu kullanılarak parçanın geometrik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar neticesinde

%55 ile %84 arasında değişken bir geri yaylanma değeri ölçölmüştür. Kalınlığın daha az olduğu kesitlerde daha fazla geri yaylanma görölmüştür. Kalınlığın artması ile geri yaylanmanın azaldığını ve federli entegre kanat panellerinin geri yaylanma oranlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sebebi ise büküm dayanım modölünün daha yüksek olmasıdır [13].

Zhang J., Deng, Li, Chen ve Zhang X.M. alüminyum 2124 alaşıımının tek eksenli kontur ve çift eksenli kontura sahip sac parçaların geri yaylanma davranışını araştırmak için deneysel ve sayısal metotlarla çalışmalar gerçekleştirmiştir. 1000mm-2000mm, 3000-6000mm sırası ile x ve y dönme eksenlerinde konturlara sahip kalıplar kullanmışlardır. Prosesleri 125 °C 24 saat, 165 °C 16 saat, 185°C 12 saat ve 200 °C 6 saatte gerçekleştirmişlerdir. Geri yaylanma oranları %50 ve %70 arasında seyretmektedir. Çalışmaları neticesinde yaşlandırma kondisyonundan bağımsız olarak istenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi durumunda sıcaklık ve zaman parametrelerinin optimum şekilde ayarlanması neticesinde geri yaylanma oranının minimum değere indirilebileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca tek eksenli kontura sahip parçalardaki geri yaylanma oranının çift eksenli kontura sahip parçaların geri yaylanma oranına göre daha yüksek olduğunu deneysel ve sayısal olarak açıklamışlardır. Maksimum gerilme mukavemeti, kırılma tokluğu ve akma mukavemeti değerleri kıyaslandığında ise yine çift eksene sahip parçalardaki mekanik değerlerin tek eksenli kontura sahip parçalardan çok az farklarla daha önde olduğunu belirtmişlerdir [14].

Xu, Zhan, Li ve Huang sürünme yaşlandırma şekil verme prosesini mekanik özellikleri iyileştirmek, büyük sac panellerin üretim giderlerini azaltmak sürünme şekillendirmesi ve ısıl işlemin beraber gerçekleştiği gelişmiş bir imalat yöntemi olarak tanımlamıştır. Proses sonrası meydana gelen geri yaylanmanın yaşlandırma sıcaklığı, proses süresi ve gerilmeye doğrudan bağlı olduğunu açıklamışlardır. Alüminyum 2124 alaşıımının geri yaylanma davranışının doğruya en yakın şekilde tahmin edilebilmesi için sürünme kurucu denklemleri oluşturmuşlardır. Farklı gerilim seviyelerinde sürünme testleri gerçekleştirilerek malzemenin sürünme davranışını ve oluşturulan denklemlerdeki sürünmeye bağlı katsayıları particle swarm optimisation metodunu hesaplamışlardır. MSC Marc programını kullanarak fortran yazılım dilinde denklem takımları oluşturulmuş ve yazılan denklemlerin doğrultusunda geri yaylanma analizi koşturmuşlardır. Ayrıca deney üretimleri de gerçekleştirerek türetilen denklemler ve katsayıları doğrulayabilmek için çalışmalar yapmışlardır. Deneysel olarak yapılan çalışmalar konturu 1000 mm olan ve 1500 mm olan

iki farklı kalıp üzerinde farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde toplamda üç parametreyi dikkate alacak şekilde çalışılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçları arasında %3'lük sapmalar gözlemlenmiştir. 185 °C, 190 °C ve 195 °C'de gerçekleştirilen deneylerde sırası ile %75, %73 ve %63'lük geri yaylanma değerleri gözlemlenmiştir. Proses süresinin artması ile geri yaylanma değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kalıp konturunun yarı çapının artması ile de daha yüksek geri yaylanma değeri gözlemlenmiştir [15].

Junior, Neto ve Wade sürünme yaşlandırma şekil verme prosesini sürünme ve yaşlandırma prosesinin eş zamanlı gerçekleştiği yüksek oranda zaman ve sıcaklığa bağlı bir proses olarak tanımlamaktadır. Yaklaşık %70 civarında geri yaylanmanın meydana geldiği yüksek geri yaylanma oranlarının görüldüğü bir proses olarak da ayrıca değinmişlerdir. 7475 alüminyum alaşımı üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Sürünme gerinim sabitlerini belirlemek için sabit gerilmeler altında sürünme testleri gerçekleştirmişlerdir. 190 MPa'da gerçekleştirilen deney neticesinde 8 saatin sonunda %0.1 gerinim değeri gözlemlerken 290 MPa'da gerçekleştirilen deney sonucunda 7 saatin sonunda %1.7 oranında gerinim gerçekleşmiş ve üçüncül sürünme bölgesine geçen numune kopmuştur. Gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda ilk gerilme değerinin yüksek olması durumunda daha düşük geri yaylanma oranları elde etmişlerdir. 0.7 MPa ilk gerilme değeri altında gerçekleştirilen proses sonucunda 400x70x10 mm ve 400x70x15 mm ölçülerindeki numunelerin geri yaylanma oranları sırası ile %60 ve %69 olarak ölçülmüştür [16].

Lam, Shi, Yang, Wan, Davies, Lin ve Zhou sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile şekillendirilen entegre panellerin geri yaylanma davranışını belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda alüminyum 2219 alaşımı kullanmışlardır. Düz, izogrid, waffle ve kırıli olmak üzere dört farklı panel tipinin geri yaylanma davranışını incelemişlerdir. Öncelikle sürünme yaşlandırma prosesi için Zhan tarafından türetilmiş olan denklem seti sayısal çözüm için tercih edilmiştir ve malzeme katsayılarının belirlenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Erkek ve dişili bir kalıp sistemi tercih edilmiş olup kalıp kontur yarı çapı 150-156 mm arasındadır. Düz, kırıli, waffle ve izogrid paneller sırası ile 211.6, 232.3, 233.6 ve 274.9 MPa'lık yüklemeler altında 18 saat süreyle şekillendirilmiştir. Numuneler üzerindeki yüklemeler kaldırıldıktan sonra ölçülen geri yaylanma değerleri sırası ile %15, %14.7, %15.7 ve %12.2 olarak ölçülmüştür. Numunelerin geometrik durumları dikkate alındığında en az geri yaylanmanın izogrid yapılarda meydana geldiği gözlemlenmiştir [17].

Yang, Zhan ve Li 2524 alüminyum alaşımı üzerinde CAF prosesini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal olarak yaptıkları çalışmada çekme sürünme davranışı ve basma sürünme davranışı üzerine 2524 için iki ayrı denklem türetmişlerdir. AA2524 malzemenin sürünme karakteristiği ve malzeme katsayılarını belirlemek için çeşitli testler yapmışlardır. Tek eksenli çekme ve basma yükleri altında sürünme testlerinde 180°C, 190°C ve 200°C altında 140, 180, 190 ve 210 MPa eksenel yüklemeler yaparak 16 saatlik çevrimlerden oluşan testler yapılmıştır. Kalibrasyonu yapılmış bir fırınlı test cihazı ve extensiyometre kullanılmıştır. Oda sıcaklığında havada soğutma uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 210MPa dışında yapılan tüm sürünme testleri birincil ve ikinci sürünme aşamalarını gösterirken yalnızca 210 MPa'da yapılan test de üçüncül sürünme gözlemlenmiştir. Sürünme gerinimi ise bası yükleri altında çeki yüklerine göre neredeyse iki kat daha yüksek değer de meydana gelmiştir. Daha önceki çalışmalara atıfta bulunan Yang ve arkadaşları sürünme geriniminin doğrudan yaşlandırma süresi, sıcaklık ve gerilme seviyesi ile alakalı olduğunu belirtmiştir. Yapılan deneyler sonucunda bazı basma yüklemeleri altında üçüncül sürünme aşamasına geçtiği görülmüştür. Bu durumda, genel bünye modellerinin birinci ve ikincil durumu yansıttığını fakat üçüncül durumu temsil etmediği gözlemlenmiştir. Sürekli hasar mekaniği temel alınarak sürünmenin üç aşamasını da temsil edecek bir denklem takımı Kowalewski tarafından geliştirilmiştir. Birinci sürünme aşamasındaki sürünme sertleşmesi ve üçüncül sürünme yumuşaması, dislokasyon sertleşmesi ve yüksek sıcaklıktaki yaşlandırma yumuşaması mekanizmaları ile meydana gelmektedir. Yumuşama aşaması ise tane sınırlarında meydana gelen çekirdeklenme ve büyüme ile oluşmaktadır. Özetle birincil, ikincil ve üçüncül sürünme aşamalarını temsil edecek olan basma yükleri ve çekme yükleri altında iki farklı denklem takımı oluşturmuşlardır. Malzeme karakterizasyonu çalışmalarını tamamladıktan sonra Fortran programını kullanarak basma yükleri ve çekme yükleri altında elde edilen denklemleri sonlu elemanlar programı içerisine gömerek geri yaylanma çalışmalarının yapılacağı algoritmalar oluşturulmuştur. 300 x 80 x 3.5 mm olarak numune ebatları belirlenmiştir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda deneysel olarak geri yaylanma değeri %68.20 olarak belirlenmiştir. Basma gerilmesine bağlı denkleme göre çalıştırılan çözümden %65.93 ve çekme gerilmesine göre çalıştırılan çözümden ise %61.12 geri yaylandığı gözlemlenmiştir. Deneysel veriler ve sayısal verilere bakıldığında ise basma yükleri altında çalıştırılan sonucun deneysel çalışmaya daha yakın sonuç verdiği ve pratik uygulamalarda kullanımının daha uygun olacağı gözlemlenmiştir. Gerçek uygulamalarda bir CAF prosesi incelendiğinde ise iş parçasının kalınlık kesiti ele alındığında üst yüzeyin basma ve dış yüzey çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Sayısal çalışmalar sonucunda pekleşme

üsteli olan n değeri basma yükleri için 2.78 ve çekme yükleri için 3.38 olarak belirlenmiştir. Her iki değer de 3'e yakındır. Bu durum şunu gösterir, çekme sünme deformasyon mekanizması küçük bir tane sınırı kaymasının eşlik ettiği dislokasyon kaymasıdır. Basma sürünme deformasyon mekanizması ise küçük dislokasyon kaymaları ile tane sınırı kayması ile kontrol edilir. Bu sebepten ötürü farklı geri yaylanma değerleri görülmüştür. Yang ve arkadaşları bu çalışmanın sonucu olarak sadece basma ve ya sadece çekme gerilmeleri dikkate alınarak CAF prosesindeki geri yaylanmanın nümerik olarak çözümlenmesini tavsiye etmemektedir [18].

Khamneh, Askari-Paykani, Shahverdi, Hadavi ve Emami alüminyum 7075 alaşımının sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki geri yaylanma davranışını tahmin etmek ve davranışının karakterizasyonunu modellemek için istatistiksel tabanlı bir deney tasarım metodu belirlemiştir. Zaman ve sıcaklığı efektif parametreler olarak belirlemişlerdir. D-optimal deney tasarım metodunu kullanarak deneysel verilerden elde ettikleri değerler ile matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Deneysel sonuçlarda ise sıcaklık ve zamanın artmasıyla geri yaylanma oranının azaldığını gözlemlemişlerdir. Zaman ve sıcaklık parametreleri aynı zamanda numunelerin mekanik özelliklerini de belirleyeceği için tasarım kriteri gereği istenen değerlere ulaşılması için ve üretimsel açıdan kalıp geri yaylanma oranlarının belirlenmesi için geri yaylanma davranışının bilinmesi oldukça kritiktir [19].

Safari, Hamidipour, Elahi ve Tashmasbi 7075 alüminyum alaşımının farklı kalınlığa sahip bir sacın sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanma davranışı ile ilgili olarak deneysel çalışmalar yapmıştır. Kalınlığı sabit bir sacın geri yaylanma davranışından daha kompleksdir. Geri yaylanma davranışını etkileyen girdiler olarak sıcaklık ve proses süresi belirlenmiştir. Lineer regresyon ve Sobol hassasiyet analizi ile elde edilen deneysel sonuçlara göre matematiksel denklemleri oluşturmuşlardır. Deney numunesi olarak 136x15x2 mm ölçülerinde sac kullanılmıştır. Sacın boyundan yarısının kalınlığı frezelenerek 1 mm'ye düşürmüşlerdir. 6, 10, 18 ve 22 saat ve 160, 180, 200, 220 ve 240 °C'de toplam 11 numune şekillendirmişlerdir. Çalışmalar neticesinde %82 ve %4 sırası ile maksimum ve minimum geri yaylanma değerleridir. Veriler Sobol metodu ile analiz ettikten sonra kalın kesitteki numunelerde zaman %32 sıcaklık ise %68 hassasiyetle gerçekleşmiştir. İnce numunelerde ise bu oran %22 zaman %78 sıcaklık olarak belirtilmiştir [20].

Wang, Zhan, Yang, Ma, Li ve Liu alüminyum 2219 alaşımının geri yaylanma davranışının tahmin edilebilmesi için temeli mikroyapısal değişim, yaşlandırma sertleşmesi ve gerilim gevşemesi davranışına dayanan birleşik yapısal bir model oluşturmuşlardır. Bu model içerisindeki sürünme parametrelerinin belirlenmesi için basınç, zaman ve sıcaklık açısından farklı koşullarda sürünme ve gerilim gevşemesi testleri yaparak malzeme katsayılarını belirlemişlerdir. Sonlu elemanlar analizi yönteminin altında kullanıcı programı yazarak simülasyon modelini entegre etmişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde iş parçası üzerine uygulanan ilk gerilmenin yaşlandırma çökmesini desteklediği ve maksimum mukavemet değerine çok daha hızlı sürede ulaştığını görmüşlerdir. Anı zamanda kalıntı gerilme ve akma mukavemeti değeri de ilk gerilmenin artması ile artmıştır şeklinde belirtilmiştir. Şekillendirme için entegre yapıya sahip 435x293 mm boyunda ve maksimum 17 mm kalınlığında AA2219 bir panel seçilmiştir. Kullanılan kalıbın kontur yarı çapı ise 1160 mm olarak bildirilmiştir. Şekillendirilen numunenin final kontur yarı çap değeri ise 1308 olarak verilmiştir. Şekillendirme deneylerinden sonra %12.8 oranında geri yaylanma ile karşılaşmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile arasındaki fark ise %3.6 olarak belirtilmiştir. [21].

Brandao, Delijaicov ve Bortolussi alüminyum 7050 alaşımların sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde geri yaylanma davranışının hesaplanabilmesi için deneysel ve sayısal bir yaklaşım ile çalışmışlardır. Norton güç yasasını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile çalışılmıştır. Kalınlıkları 3, 5, 9 ve 12 mm olan 4 farklı kalınlıkta numune ve tek eksenli konturu bulunan iş parçaları için 1500, 2000, 2500 mm kontur yarıçapların sahip kalıplar, çift eksenli konturu olan numuneler içinse 4055 ve 3582 mm kontura sahip bir kalıp tercih etmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar neticesinde sürünme yaşlandırma prosesi esnasında elastisite modülünün %11.5 düştüğünü saptamışlardır. Prosesin başlarında akma mukavemeti yaşlanma süresine bağlı olarak artar ve yoğun yaşlanma nedeniyle daha sonra azalmakta olduğunu belirtmişlerdir. Literatürdeki diğer çalışmalara paralel geri yaylanma oranları ile karşılaşmışlardır. Parçaların nihai tasarımlarında belirtilen isteklere bağlı olarak proses süresinin değiştirilmesi ile geri yaylanma oranında ciddi değişiklikler elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar neticesinde çift eksenli konturu olan parçaların daha fazla form aldıkları gözlemlenmiştir. Kalınlığın artması ile geri yaylanma oranının azaldığını gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ilk uygulanan gerilme değerinin artması ile geri yaylanma oranının azaldığı ve kalıp kontur yarı çapının azalması ile geri yaylanma oranının azaldığını gözlemlenmiştir [22].

Yapılan literatür araştırmaları neticesinde 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm kalınlığındaki alüminyum 2024 T3 sacların sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki geri yaylanma oranlarının otoklav basıncı ve malzeme kalınlığıyla olan ilişkisini açıklayan deneysel bir çalışmayla karşılaşılmamıştır.

3. KAVRAMSAL BİLGİLER

3.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Malzeme üreticilerinin ve müşterilerin ihtiyaçlarına göre saf alüminyum içerisine farklı oranlarda alaşım elementleri eklenerek çeşitli alüminyum alaşımları üretilmektedir. Günümüzdeki mühendislik uygulamalarında oldukça fazla alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Uluslararası standartlara göre yaklaşık 500 çeşit dövme ve döküm alaşım bulunmaktadır. Alaşımların sınıflandırılması ve global olarak kullanılabilir olması için 1954 yılında Aluminum Association (AA) tarafından basit ve geliştirilebilir bir isimlendirilme sistemi geliştirilmiştir. 1985 yılında ise Comité Européen de Normalisation (CEN) tarafından da kabul edilmiştir. Alüminyum alaşımları üretim şekillerine göre dövme ve döküm olarak iki ana grup altında incelenmektedir. İki farklı metot ile üretilen alaşımların iç yapıları ve kompozisyonları oldukça farklıdır. Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinko en önemli alaşım elementleridir. Alüminyum alaşımları 1xxx, 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serileri şeklinde sınıflandırılmıştır [23].

Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımların ısıtılma işlem uygulanabilirliği [24]

Dövme Alaşımlar		
Alaşım Grubu	Ana Alaşım Elementleri	Isıl İşlem Uygulanabilirliği
1xxx	Al	Yaşlandırılmaya uygun değil
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn veya Al-Mn-Cu	Yaşlandırılmaya uygun değil
4xxx	Al-Si Al-Mg	Yaşlandırılmaya uygun değil
5xxx	Al-Mg veya Al-Mg-Mn	Yaşlandırılmaya uygun değil
6xxx	Al-Mg-Si-Mn	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Zn-Mg veya Al-Zn-Cu-Mg	Yaşlandırılabilir
Döküm Alaşımlar		
1xxx	Al	Yaşlandırılmaya uygun değil
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılmaya uygun değil
3xxx	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
4xxx	Al-Si	Yaşlandırılmaya uygun değil
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaya uygun değil
6xxx	Al-Ms-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

3.1.1. Dövmе alüminyum alaşımlar

Bu alaşımlar öncelikle sıcak veya soğuk şekillendirme, talaşlı imalat, haddeleme, ekstrüzyon, dövme ve çekme imalat yöntemleri ile üretilecek olan ürünlerin hammaddesi olarak kullanılmaya uygundur. Sıcak veya soğuk işlem den önce doğrudan soğuk döküm veya şerit döküm işlemleriyle külçelere dökülürler. Dövmе alüminyum alaşımları, ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem uygulanamayan alaşım grupları olarak ikiye ayrılır.

- Isıl işlem uygulanabilen dövme alüminyum alaşımları uygun ısıl işlemleri ile istenen özelliklere getirilebilir.
- Isıl işlem uygulanamayan dövme alüminyum alaşımları ise ısıl işlem ile güçlendirilemezler. Güçlendirilme mekanizmaları doğrudan alaşım elementlerine bağlıdır ancak soğuk deformasyonlar sonucu oluşan dislokasyonlar sonucunda güçlendirilebilir.

Tipik veya minimum özellikteki spesifikasyon, alaşım bileşimi ve temper için benzersiz bir tanımlamanın kombinasyonunu, yani termo-mekanik işlemle mikro yapının durumunu gerektirir. Sıcak ve soğuk işleme sırasında optimum performans için dövme alaşımlar, belirli yarı üretim prosesine göre üretilirler. Belirli bir alaşımın ve ona ait temperin özellikleri, yarı mamulün tipine ve boyutlarına bağlı olarak değişebilir.

Amerikan (ANSI Standard H35.1(M)-1997) standartlarına göre alüminyum ve alüminyum alaşımları ve bunlara ait temperlerin isimlendirmesi yapılırken AA şeklinde bir ön ek alır. Örneğin 5754 bir alüminyum alaşımı isimlendirilirken AA 5754 olarak yazılmaktadır. ISO (ISO/DIS 209) standartlarına göre bir alüminyum alaşımı isimlendirilirken ise AA ön eki almadan yalnızca 5754 olarak yazılmaktadır. Avrupa standartlarına (EN573 alüminyum isimlendirmesi ve EN515 temper isimlendirmesi) göre ise 5754 alüminyum alaşımı EN AW-5754 veya EN AW-Al Mg3 şeklinde isimlendirilir [23].

3.1.2. Döküm alüminyum alaşımlar

Döküm alüminyum ve alüminyum alaşımları, öncelikle ergitilmiş alüminyum ve alaşım elementlerinin kalıpta katılaştırılmasıyla üretilmektedir. Döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımlarının özellikleri; malzeme kompozisyonu, önemli ölçüde kalıp tipi ve

kalıp doldurma işlemleri ile de ilgilidir. Döküm alaşımları, döküm prosesine göre uyarlanır. Bu nedenle kullanılan temel döküm işlemi, döküm alaşımı tanımlama sisteminin bir parçasıdır. Uluslararası dövme alüminyum alaşım tanımlama sistemlerinin (AA, ISO, CEN) aksine, döküm alaşımları ve dökümler için tanımlama sistemleri önemli ölçüde farklılık gösterir. Alaşımlar döküm çeşitlerine göre farklı özellikler göstereceğinden dört temel sınıfa ayrılmıştır.

D : Basınçlı kalıp dökümü

K : Soğuk döküm

L : Hassas döküm

K : Kum döküm

Avrupa standartlarına göre bir alüminyum alaşımı isimlendirilirken EN standardına dikkat edilir. A alüminyum alaşımı olduğunu, C döküm yöntemi ile üretildiğini göstermektedir. Alaşım kompozisyonu içinse 5 dijitle numara ve kimyasal semboller kullanılabilir. Örneğin EN AC-42000KT6 alaşımı incelendiğinde T6 temperine yaşlandırıldığını 4XXXX silisyum serisi olduğunu ve K ise kum döküm metodu ile üretildiğini göstermektedir.

Amerikan standartlarına (ANSI H35.1(M)-1997) göre bir döküm alüminyum alaşımının isimlendirilmesi ise 4 dijitle numara sistemi kullanılarak yapılmaktadır. Birinci dijitle alaşım grubunu tanımlamaktadır. İkinci dijitle alüminyum saflık derecesini göstermektedir. Son dijitle ise döküm veya ingot şeklinde olduğunu göstermektedir [23].

3.2. Alüminyum Alaşımların Temperleri

Alüminyum alaşımların temper tanımları genel olarak büyük bir harfle gösterilmektedir. Alaşım üzerinde gerçekleştirilen fabrikasyon işlemlerin ana sınıfını ve nasıl yapıldığı hakkında bilgi sağlayan bir sayı veya sayılar olarak verilir. Temperler adlandırılırken aşağıdaki terminoloji kullanılmaktadır.

T : Isıl işleme uygun alaşımlarda kullanılan gösterimdir. Alaşımın üretim metoduna göre birle beş dijitle arasında bir rakam ile temsil edilir. T'den hemen sonra gelen ilk dijitle ısıtma işlemi türünü temsil eder. Birinci dijitten beşinci dijite kadar olan rakamlar ise gerilim giderme işleminin uygulanıp uygulanmadığı hakkında bilgi vermektedir.

F : İmal edildiği şekliyle anlamına da gelen “as fabricated” terminolojisinden türetilmiştir. Bu tanım dövme veya döküm ürünler için kullanılır. Haddeleme, ekstrüzyon ve dövme gibi bazı şekillendirme işlemleriyle üretilen alaşımlara ait temperlerdir. Gerinim sertleşmesi veya çalışma esnasında spesifik özelliklere erişmek için termal kondisyon durumları yoktur. Döküm durumu hariç son konfigürasyonda yarı mamul olarak kullanılabilen ürünler için kullanılan temper dürümüdür. İkincil bir işlem ve ısıtım işlem uygulaması ile talep edilen temperlere dönüştürülebilir.

O : Tavlanmış halidir. Döküm veya dövme ürünler için kullanılır. Haddeleme, ekstrüzyon veya farklı şekillendirme yöntemlerde kullanılacak olan alaşımların şekillendirilme kabiliyetini artırmak için gerçekleştirilen ısıtım işlem sonucu alaşımların aldığı tempere verilen isimdir.

H : Gerinim sertleştirilmesi ile elde edilen temper durumudur. Isıtım işlemine uygun olmayan oda sıcaklığında gerinim sertleşmesi ile sertleştirilebilen alaşımların temper durumunu temsil eder.

W : Çözelti ısıtım işlemine tabi tutulan alaşımların ulaştığı temperdir. Bu aşamadan sonra alaşımlar doğal veya yapay yaşlandırılarak farklı temperlere dönüşmektedir. Çözelti ısıtım işleminde alaşım yüksek sıcaklıklarda tutulduktan sonra hızlı soğutma ile soğutulmaktadır [24].

T, F, O ve H olarak temel olarak bilgiler vermektedir. Temper dizaynının tam olarak anlaşılması ve anlamlı hale gelmesi harflerin yanına gelen tamamlayıcı ifadelerle sağlanmaktadır. T ve H en sıklıkla kullanılan temperlerdir. F, O ve W temperleri ise yanına bir ifade gelmeden yalnız kullanılmaktadır.

Isıtım işlem uygulanamayan alaşımlarda H temperinin incelenmesi

- H temperi soğuk şekillendirme veya soğuk işleme ile güçlendirilen alüminyum alaşımlara ait bir temper gösterimidir. H en az iki numara ile tamamlanmaktadır.
- H’den sonra gelen ilk numara gerinim sertleştirilmesi ile sertleştirilmiş alaşımların ısıtım işlem görmüş mü ve eğer öyleyse hangi prosedürle gerçekleştirildiğini ifade eder.
- İkinci dijit ise alaşımların ne kadar gerinim sertleşmesine maruz kaldığını göstermektedir.

- İlk iki dijitten sonra gelen dijit ise özel uygulamaları veya varsa ilk iki dijitten farklı gerçekleşen bir durumu temsil eder.

Çizelge 3.2. H temperine ait özellikler [24]

Birinci Dijit	
H1	Gerinim sertleşmesiyle güçlendirilmiş olduğunu göstermektedir. Öncesinde herhangi bir ısı işlem uygulanmamıştır.
H2	Gerinim sertleştirilmesi uygulanmış ve kısmi tavllanmış.
H3	Gerinim sertleştirilmesi uygulanmış ve düşük sıcaklıkta kararlı hale getirilmiş
H4	Gerinim sertleştirilmesi uygulanmış ve paint bake çevrimine maruz bırakılmış.
İkinci dijit	
HX2	$\frac{1}{4}$ sertleştirilmiş
HX4	$\frac{1}{2}$ sertleştirilmiş
HX6	$\frac{3}{4}$ sertleştirilmiş
HX8	tamamen sertleştirilmiş
Üçüncü dijit	
HX11	O ve HX1 temperleri arasında kısmi gerinim sertleştirmesine maruz bırakılmış.
H112	Mekanik özelliklerin limitasyonunda sıcak şekillendirilmiş, işlenmiş.
HXX5	HXX temper limitasyonunda kaynaklanmış borular.

Isıl İşlem uygulanamayan alaşımlarda T temperinin incelenmesi

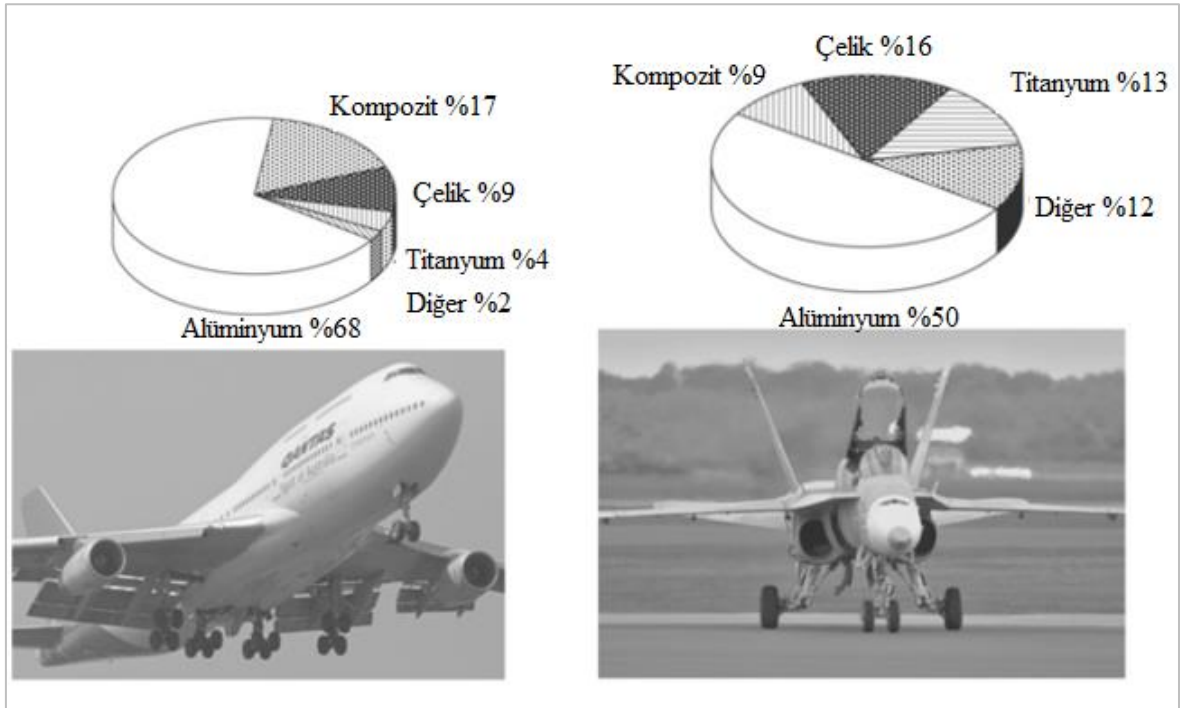
Çizelge 3.3. T temperine ait özellikler [24]

Birinci Dijit	
T1	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlanmaya bırakılmış.
T2	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlanmaya bırakılmış
T3	Çözeltiliye alma işlemi yapılmış, soğul şekillendirilmiş ve doğal yaşlanmaya bırakılmış.
T4	Çözeltiliye alma işlemi yapılmış ve doğal yaşlanmaya bırakılmış.
T5	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış.
T6	Çözeltiliye alma işlemi yapılmış ve yapay yaşlandırma yapılmış.
T7	Çözeltiliye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.
T8	Çözeltiliye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.
T9	Çözeltiliye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlanmaya bırakılmış.
T10	Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırma yapılmış.

Döküm metodu ile üretilmiş alüminyum alaşımlarında ise T4, T5, T6 ve T7 temperleri mevcuttur. Diğer temperler uygulanamamaktadır.

3.3. Alüminyum Alaşımlarının Havacılıktaki Önemi ve Kullanım Alanları

1930’lu yıllardan bu yana ağırlık çözümleri odaklı geliştirilen havacılık yapıları çözümünde alüminyum önemli rol alan bir malzemedir. Yüksek irtifa ve yüksek hız isterlerinin karşılanmasında gövde ve panele ait komponentlerin yapısının oluşturulmasında yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Titanyum, magnezyum, çelik ve kompozit gibi diğer temel havacılık malzemeleri ile karşılaştırıldığında alüminyum kullanım oranı olarak diğer malzemelerin çokça üzerinde yer almaktadır. Modern havacılık yapılarındaki yapısalarda yaklaşık %60-70 oranında alüminyum kullanılmaktadır. Sivil ve askeri havacılık uygulamalarında yıllık 400 000 ton alüminyum kullanılmaktadır. Sırası ile 1960 ve 2000 yıllarında üretilen Boeing’in 747 ve F18 Hornet uçağına ait malzeme kullanım oranları verilmiştir [25].



Şekil 3.1. Ticari ve askeri uçaklardaki alüminyum kullanım oranları [25]

B747 uçağı dikkate alındığında temel yapısal elemanlardan gövde, kanat ve empenaj bölümü alüminyum ile üretilmiş olup yalnızca iniş takımı, türbin gibi alüminyumun özelliklerinin karşılayamadığı komponentlerde farklı malzemeler tercih edilmiştir. Modern savaş uçaklarındaki alüminyum alaşım kullanımı yapısal tasarıma bağlı olarak değişkenlik göstermekte olmasına karşılık çoğu alüminyum ağırlıklı bir yapısal yapıya sahiptir. F18

Hornet uçağı da son 30 yıl içerisinde yapılmış ve en çok alüminyum kullanılmış savaş uçaklarından biridir.

Alüminyumun havacılık sektöründeki en çok kullanılan malzeme olmasının gerekçeleri aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir [25].

- Orta maliyet
- Üretim kolaylığı, örneğin dövme, döküm ve ısıt işlem.
- Düşük ağırlık (2.7g/cm^3)
- Özgöl sertliğinin ve mukavemetinin yüksek olması.
- Süneklik, tokluk ve yorulma direncinin yüksek olması.
- Mekanik ve ısıt işlemler ile özelliklerinin kontrol edilebilmesi, iyileştirilebilmesi.

Diğer havacılık malzemelerine göre dezavantajları ise şu şekildedir.

- $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve üzerindeki servis sıcaklıklarında düşük mekanik özellikler göstermesi.
- Gerilim korozyon çatlak ilerleme davranışındaki kararsızlık.
- Karbon fiberli kompozit bir yapı ile temas halinde galvanik korozyon oluşması.

1XXX serisi alüminyum alaşımları

1XXX serisi, alüminyum alaşımları içerisinde saflık oranı en yüksek olan seridir. Alüminyum oranı %99'dan fazladır. Nadiren de olsa çok küçük oranlarda diğer alaşım elementleri bulunmaktadır. Ticari adı saf alüminyum olarak da geçmektedir. %1'lik oranda içerisinde olan diğer elementlerin ayrıştırılması oldukça zor ve pahalıdır. Çok düşük konsantrasyonda bulunmasına rağmen saf alüminyuma göre akma mukavemeti ve kopma gerilmesi açısından sırası ile %30 ve %40'lık artış sağlamaktadır. Bu mukavemet artışının sebebi ise tane yapısındaki incelme ve katı çözelti sertleşmesinden dolayıdır.

1XXX Serisi alüminyum alaşımları, akma mukavemeti ve yorulma direnci açısından oldukça zayıftır fakat yüksek süneklikte bir alaşımdır. Havacılık yapılarında yapısal elemanlarda kullanılmamaktadır. Yüksek mukavemetin gerekmediği, ağırlık ve maliyetin öne çıktığı bölgelerde çok düşük oranlarda tercih edilmektedir. Yakıt tankları, kozmetik gereksinimi olan kapaklarda ve kanat ucu tamirinde kullanılmaktadır [25].

2XXX serisi alüminyum alaşımları

Havacılık yapısalarda ve yarı-yapısal olarak nitelendirilen parçalarda yoğun bir kullanımı söz konusudur. Ana alaşım elementi bakırdır. Yaşlandırma ısı işlemi ile mekanik özellikleri kolayca tasarıma uyarlanabilir. Tokluk, yorulma direnci ve yüksek mukavemet gerektiren yapısal parçalarda tercih edilmektedir. Bu özellikler 2XXX serisi alüminyum alaşımlarını gövde ve kanat panellerinde ve kontrol yüzeylerinde sıklıkla kullanılmasını sağlamaktadır. 2XXX serisi alüminyum alaşımların sayısı oldukça fazladır fakat havacılık ve uzay endüstrisinde 2024 alaşımı en çok tercih edilendir. 2XXX alaşımı, yüksek yorulma direnci gerektiren ticari uçakların alt kanat kaplamaları ve gövde yapısı gibi hasara dayanıklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Alaşım ayrıca kaporta, kaporta ve kanat uçları gibi yapısal olmayan parçalarda da kullanılır. 2024 alaşımından daha üstün özelliklere sahip yeni alaşımlar tanıtılıyor. Örneğin, 2054 Al, kırılma tokluğu açısından %15-20 daha yüksek ve 2024 alaşımının yorulma direncinin iki katıdır. Uçaklarda kullanılan diğer 2XXX serisi alaşımları ise 2018 Al, 2025 Al, 2048 Al, 2117 Al ve 2124'tür. Safsızlığın azaltılması, özellikle demir ve silikonun azaltılması, daha yüksek kırılma tokluğu ve yorulma çatlak başlangıcına ve çatlak büyümesine karşı daha iyi dirençle sonuçlanmıştır. Alaşım elementleri, alüminyumun işlenmesine veya güçlendirilmesine yardımcı olan önemli özellikler sağlar. Cu, Mg ve Zn, katı çözültü güçlendirmesi ve çökelme sertleşmesi yoluyla yüksek mukavemet sağlar. Bu elementler, ısı işlem sırasında, mukavemeti ve yorulma direncini artıran intermetalik çökeltiler (örn. CuAl_2 , Al_2CuMg , ZnAl) oluşturmak için alüminyum ile reaksiyona girer. Mn ve Cr, tane büyümesini sınırlayan ve böylece tane sınırı sertleşmesiyle akma mukavemetini artıran dispersoid partiküller üretmek için küçük miktarlarda bulunur. Eser miktarda (%0.1-0.2) Ti ilavesi de tane boyutunu azaltır. Si, erimiş alüminyumun viskozitesini azaltmak için eklenir, böylece boşluk içermeyen kalın ve karmaşık şekillere dökmeyi kolaylaştırır. Fe, dökümde sıcak çatlamayı azaltmak için kullanılır. Ancak Si ve Fe, kırılma tokluğunu düşüren kaba intermetalik parçacıklar ($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, Mg_2Si) oluşturur ve bu nedenle bu elementlerin miktarı düşük bir konsantrasyonda tutulur [25].

3XXX serisi alüminyum alaşımları

Bu serideki ana alaşım elementi, katı çözültü sertleştirilmesi ile mukavemette bir miktar iyileştirme sağlayan manganezdır. Manganez, ısı işlem sonrasında alüminyumda çökelti

oluşturmadığından 3XXX alaşımları yaşlandırmak mümkün değildir. Çoğu 3XXX alaşımın akma dayanımı 200 MPa'nın altındadır ve bu nedenle uçaklarda nadiren kullanılırlar. % 1,2 Mn içeren 3003 Al alaşımı, bazı uçaklarda kaporta, tank, burunluk ve kapaklarda yapısal olmayan bir malzeme olarak kullanılır. 3XXX alaşımları çoğunlukla otomotiv bileşenleri (örneğin radyatörler, iç paneller ve trim) gibi havacılık dışı bileşenlerde kullanılır [25].

4XXX serisi alüminyum alaşımları

4XXX alaşımları önemli miktarda silikon içerir. Bu alaşımlar, yüksek mukavemetli çökeltiler (Mg_2Si) oluşturmak için magnezyum mevcut olmadığı sürece ısıtılma işlemle güçlendirilemez. 4XXX alaşımlarının uçaklarda kullanımı sınırlıdır, çünkü alüminyum matriste sünekliği ve kırılma tokluğunu azaltan kırılmalı bir silikon fazı oluşabilir. 4XXX alaşım, havacılık dışı uygulamalarda, özellikle sert lehimleme ve kaynak dolgu malzemeleri olarak kullanılmaktadır [25].

5XXX serisi alüminyum alaşımları

Bu alaşımlardaki ana alaşım elementi, genellikle yüzde birkaç konsantrasyonda bulunan magnezyumdur. Magnezyum, alüminyumda (Mg_2Al_3) alaşımın gücünü artıran sert intermetalik çökeltiler oluşturur. Bununla birlikte, bu çökeltilerin oluşumu ve büyümesi ısıtılma işlemle kontrol edilemez ve bu nedenle 5000 serisi alaşımlar yaşlandırmayla sertleştirilemez. Diğer yaşlanmayla sertleşmeyen alaşımlarda olduğu gibi, yapısal olmayan uçak parçalarında zaman zaman 5XXX alaşım kullanılmaktadır. Örneğin, %2,5 Mg ve %0,25 Cr içeren 5052 Al alaşımı, mevcut olan en yüksek mukavemetli, yaşlandırmayla sertleştirilemeyen alaşımlardan biridir ve kanat nervürlerinde, kanat uçlarında, takviyelerde, tanklarda, kanallarda ve borularda kullanılır [25].

6XXX serisi alüminyum alaşımları

6XXX serisindeki başlıca alaşım elementleri magnezyum ve silikondur. 6XXX alaşım, Mg_2Al_3 ve Mg_2Si çökeltilerinin oluşumu ile yaşlandırılabilir. 6XXX alaşım, binalar, vagonlar, tekne gövdeleri, gemi üst yapıları gibi geniş bir havacılık dışı bileşenler yelpazesinde ve giderek artan bir şekilde otomotiv bileşenlerinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu alaşımlar düşük kırılma tokluklarından dolayı uçaklarda nadiren

kullanılmaktadır. 6061 Al (Al-1%Mg-0.6Si) ara sıra kanat kanatlarında, kanallarda, tanklarda, kaportada ve çerçevelerde kullanılır, ancak bu alaşım uçaklarda kullanılan çok az sayıdaki alaşımdan biridir [25].

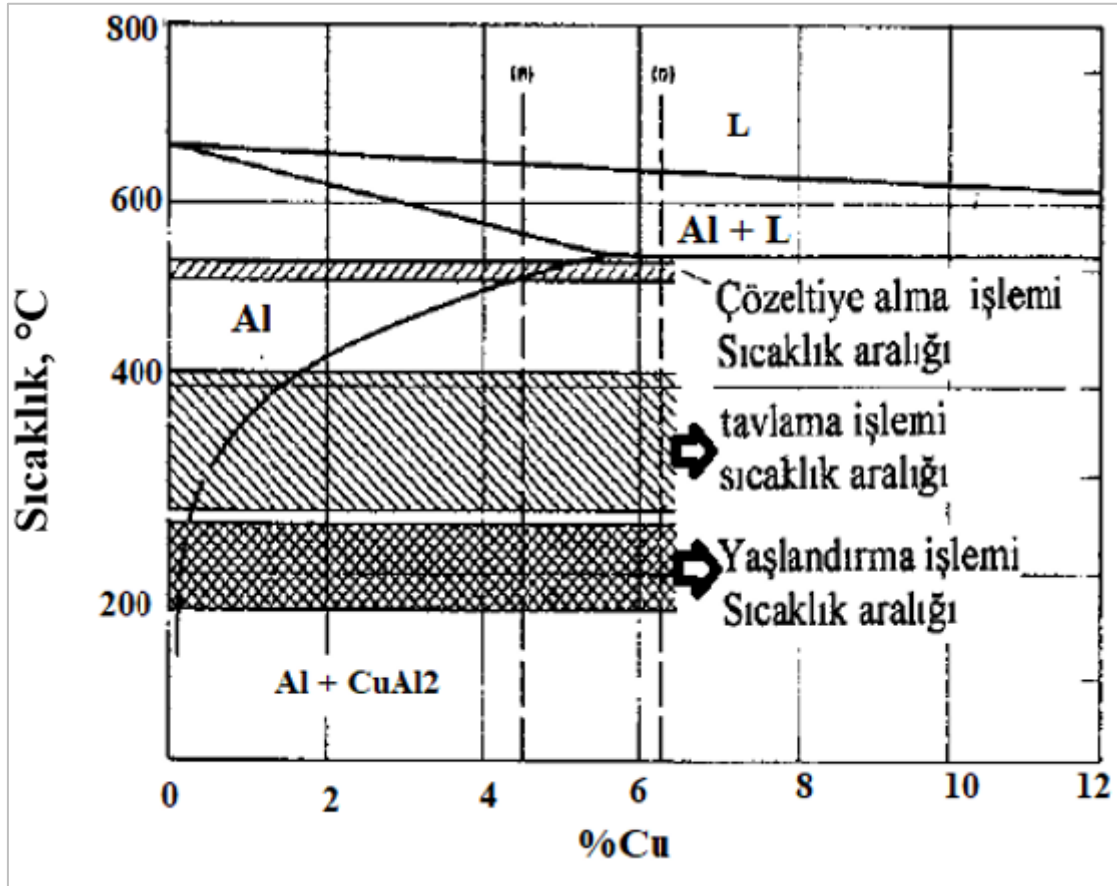
7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

2XXX alaşımlarıyla birlikte 7XXX alaşım, uçaklarda kullanılan açık ara en yaygın alüminyum alaşımlarını temsil eder. 7XXX alaşımındaki ana alaşım elementleri bakır ve çinko olup, çinko içeriği bakırdan üç ila dört kat daha fazladır. Magnezyum da önemli bir alaşım elementidir. Bu elementler, alüminyum yaşlandırıldığında yüksek dayanımlı çökelti (CuAl₂, Mg₂Al₃) oluşturur. 7XXX alaşımları genellikle 2xxx alaşımlarından daha yüksek mukavemete sahiptir. Uçaklarda kullanılan 2XXX alaşımlarının akma mukavemetleri, yaklaşık 300 ila 450 MPa arasındayken 7XXX alaşım serisi 470 ila 600 MPa aralığındadır. Bu nedenle, alt kanat yüzeyleri, direkler, kirişler, çerçeve, basınçlı perdeler ve geçişler gibi kritik yapısal bölgelerde 2XXX serisi yerine daha yüksek gerilimleri taşımak için gereken uçak yapılarında 7XXX serisi kullanılır. Uçaklarda en sık kullanılan 7XXX serisi alaşımı 7075 alüminyum alaşımıdır. Uçak yapılarında kullanılan diğer 7XXX alaşımlar arasında 7049, 7050, 7079, 7090, 7091, 7178 ve 7475 alaşımları bulunur [25].

3.4. Alüminyum Alaşımların Isıl İşlemleri

Alüminyum alaşımlarının ısı işlemleri sıkı kontroller altında gerçekleştirilir. Bu kontroller sertleştirme ve yaşlandırma ısı işlemleriyle güvenli ve dayanıklı bir ürünün üretilmesi için gerçekleştirilmektedir. Isıl işlemin gerçekleştiği fırınlarda proses süresince sıcaklık, standartlar ile belirlenen aralıklarda tutulmalıdır. Ürün kalitesi için bu durum oldukça kritiktir ve üreticiler tarafından dikkat edilmektedir. Bu yüzden özel fırınlar kullanılmaktadır. Global ölçekli düşünüldüğünde farklı üreticiler, tedarikçiler ve ısı işlemciler tarafından üretilen ürünlerin aynı özellikleri sağlaması ve tekrarlanabilir bir ürün elde edilebilmesi için standartlar kullanılmaktadır. Havacılıkta en yaygın kullanılan standart AMS2770'dir. Bu standartla çözeltiliye alma ısı işleminin süresi, proses sıcaklığı, soğutucular, soğutucuların konsantrasyonları ve yaşlandırma ile ilgili pratik bilgiler verilmektedir. Uçak üreticileri için de kalite provizyonlarını içermektedir. AMS2770 standardı 1100, 2004, 2014, 2017, 2024, 2098, 2117, 2124, 2219, 2224, 3003, 5052, 6013, 6061, 6063, 6066, 6951, 7049, 7050, 7075, 7149, 7178, 7249, 7475 alüminyum alaşımlarının

ısıtılma işlem prosedürlerini kapsamaktadır. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırma ve sertleştirme ısıtılma işlemleriyle mekanik özellikleri iyileştirilebilir, kuvvetlendirilebilirler. Tavlama prosesiyle de sünekliği azaltan unsurlar ve denge dışı oluşan iç yapıların kusurları yok edilir.



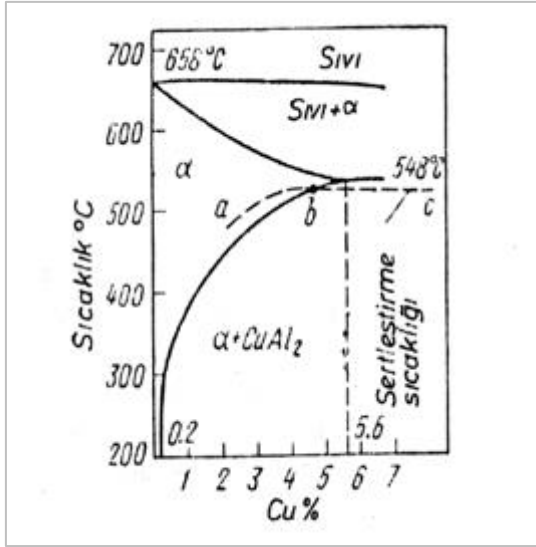
Şekil 3.2. Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlem kategorilerine göre sıcaklık aralıkları [27]

3.4.1. Çözeltiye alma ısıtılma işlemi

Çözeltiye alma ısıtılma işleminin amacı çözünürlüğün artmasından faydalanılarak yapı içerisindeki çökelti ve bileşikler aynı faz içinde çözülüp aşırı doymuş tek fazlı katı eriyik elde etmektir. Erime eğrisinin üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılarak bu sıcaklıkta yapıda yer alan ikinci faz, α -katı fazı içerisinde tamamen çözünene kadar proses sürdürülür. Yapı tamamen α fazına dönüştükten sonra ani soğutma işlemine tabi tutulur. Alüminyum alaşımlarının çözeltiye alma sıcaklığı 465 - 564 °C arasında değişmektedir [26]. Üçlü ve dördü sistemlerde çözeltiye alma sıcaklığı diğer elementlerin etkisi göz önüne alınarak belirlenmelidir. Örneğin; Al-Li alaşımlarında magnezyum, lityumun alüminyum içerisindeki çözünürlüğünü

azaltır. Al-Cu sisteminde Mg, ötektik sıcaklığın düşmesine neden olur. Çözeltiye alma sıcaklığının, çökeltilerin sayısına, boyutuna, morfolojisine ve aynı zamanda tane sınırlarının bileşimine etki ettiği saptanmıştır. Bunun sonucu olarak çözeltiye alma sıcaklığı alaşımın nihai özelliklerine etki etmektedir. Yapılan araştırma sonuçları çözeltiye alma sıcaklığı arttığında genellikle akma ve çekme mukavemetinin arttığı, buna karşın gerilmeli korozyon direncinin düştüğünü göstermiştir. Çözeltiye alma sıcaklığının yüksek olması durumunda tane sınırlarında çökelti fazlarının oluşması korozyon direncinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olmuştur. Çözeltiye alma işleminde ısıtma hızı da önem taşımaktadır. Örneğin; %4 Cu içeren alüminyum alaşımında yer alan Al_2Cu fazı, yavaş bir şekilde ısıtılarak $500\text{ }^{\circ}C$ 'ye ulaşıldığında tamamen çözünmüş olur. Buna karşılık ısıtma hızlı yapılırsa bu faz yapıda tamamen çözünemez. Bu yapıdaki alaşım, ötektik sıcaklığına veya üzerine ısıtıldığında matris ile Al_2Cu fazının ara yüzeyinde ergime başlar ve alaşım, söz konusu sıcaklıktan ani soğutulursa yapıda ince ötektik rozetleri oluşur. Çözeltiye alma sıcaklığı normalden düşük tutulduğunda ikinci fazın tamamen çözünmesi mümkün olamaz ve malzemede sertlik düşer. Çözeltiye alma süresi parçanın kalınlığına bağlıdır. İnce levhalarda süre bir dakikanın altında, büyük döküm parçalarda ise 20 saate kadar olabilir. Genellikle her 25 mm kalınlık için 1 saat süre yeterlidir. Fırın içerisindeki yük miktarı ve sıcak havanın sirkülasyonu da süreye etki eden faktörlerdir. Genellikle parçalar arasındaki aralık en az 50 mm olmalıdır. Ancak, karmaşık şekilli ve büyük parçalar için mesafenin daha fazla olması gerekir [27]

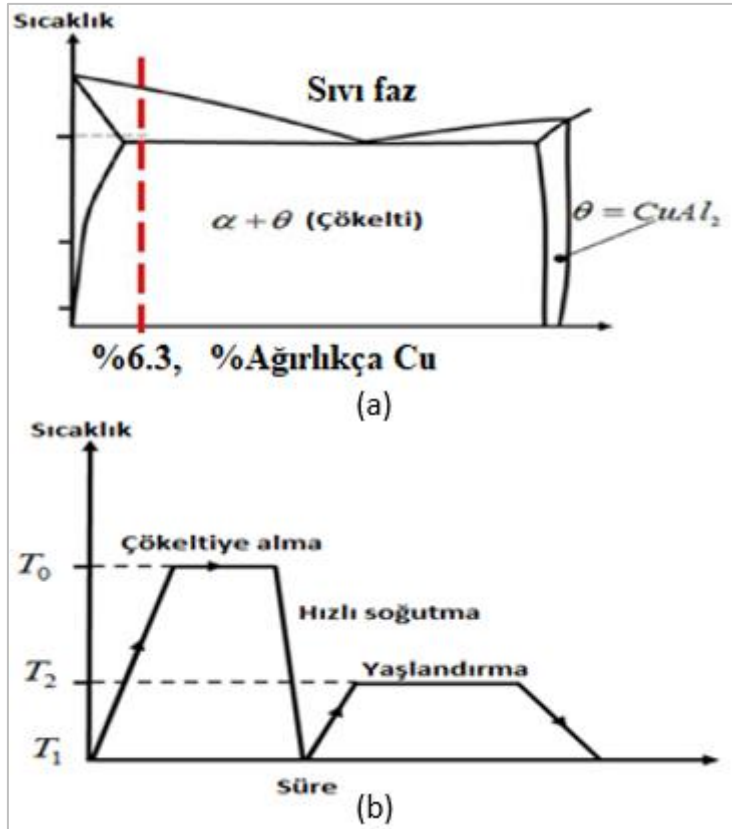
Örneğin Al-Cu sisteminin alaşımları (Şekil 3.3) için sertleştirme sıcaklığı abc çizgisiyle saptanmış olup bu çizgi, % 5.6 dan az Cu içeren alaşımlar için maksimum eriyebilme çizgisinin üstünden ve bu orandan daha çok bakır içeren alaşımlar için ötektik çizgisinin ($548^{\circ}C$) altından geçer. %5.6'ya kadar bakır içerikli alaşımların sertleştirilmesi için ısıtıldıklarında, $CuAl_2$ fazının fazlası tamamen erir. Müteakip hızlı soğutulmada sadece fazla doymuş α katı eriyiği mevcut olur ve alaşımda bulunan kadar bakır içerir. %5.6'dan fazla bakır içeren alaşımların içyapısı, sertleştirmeden sonra, b noktasıyla gösterilmiş bileşimde bir fazla doymuş α katı eriyiği ile ısıtmada erimemiş $CuAl_2$ birleşiminden ibaret olur. Metaller arası fazları eritmek için gerekli sertleştirme sıcaklığında tutma süresi, alaşımın iç yapısal durumu, ısıtma fırınının tipi ve sertleştirilecek parçanın kalınlığına bağlıdır [28].



Şekil 3.3. Alüminyum bakır alaşımları denge diyagramı [28]

Tipik bir çözeltiye alma ısııl işlemindeki sekans özetlenirse;

- Alaşım elementlerinin çözünüp tek faz haline gelmesi için T0 çözeltiye alma sıcaklığına ısıtılır.
- Çözeltiye alınan alaşım hızlı soğutma tekniği ile oda sıcaklığına veya alaşımdan istenen özelliklere uygun sıcaklıklara soğutularak T1 sıcaklığında meta-kararlı aşırı doymuş katı çözeltisi elde edilir. Denge halindeki yapı $\alpha + \Theta$ formundadır. Sebebi ise difüzyon süresinin kısıtlamasından dolayıdır ki yapının tamamı Θ formuna dönüşemez.
- Son aşamada ise yapı doğal yaşlandırma veya istenen özelliklere göre yapay yaşlandırmaya maruz kalacaksa T2 sıcaklığına maruz bırakılır. Bu sıcaklık çözeltiye alma sıcaklığından daha düşüktür. Aşırı doymuş haldeki yapı ince dağınık çökelekler haline dönüşür.



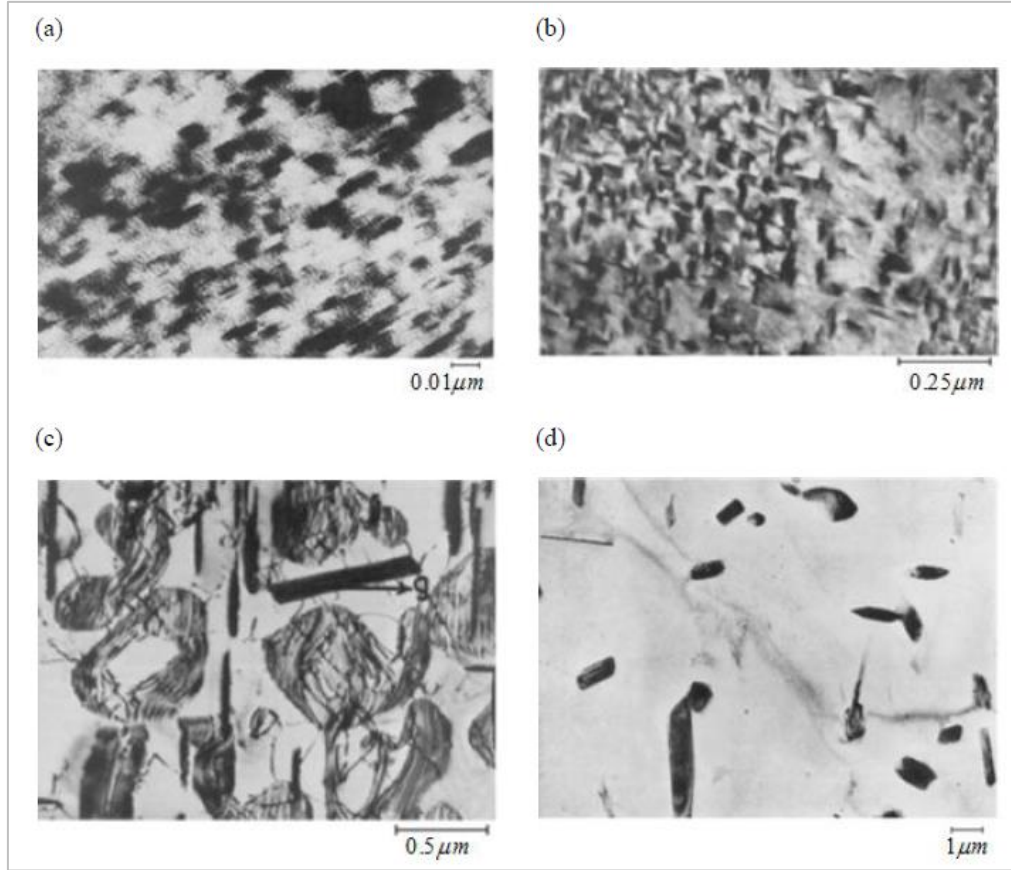
Şekil 3.4. (a) Isıl işleme uygun 2XXX serisi bir alüminyum alaşımının Al-Cu faz diyagramı ve (b) Al-Cu alaşımlarına uygulanan tipik ısıl işlem sekansı [29]

3.4.1. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılması

İzotermal şartlarda gerçekleştirilen bir yaşlandırma ısıl işleminin genel sekansı aşağıdaki gibidir.

$$a_0 \rightarrow a_1 + GP \rightarrow a_2 + \theta'' \rightarrow a_3 + \theta' \rightarrow a_4 + \theta \quad (3.1)$$

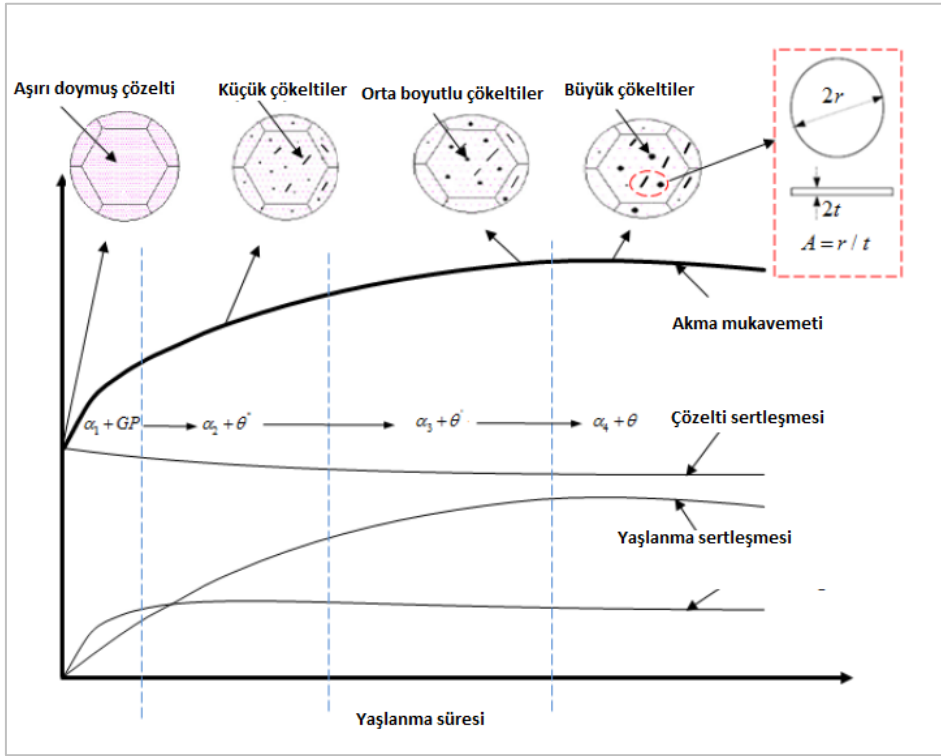
α , Al ve Cu'dan oluşan tekil faz çözeltisini göstermektedir. GP ise Guinier-Prestion bölgeleridir. θ'' ve θ' ise θ (CuAl_2) çökeltisinin geçiş fazlarıdır. α çözeltisi üzerindeki oluşumlar, çözeltideki Cu miktarının çökelek oluşturduğunu göstermektedir. Bu fark Cu miktarının çözelti içerisindeki kompozisyonun azalması ile anlaşılmaktadır. Mikroyapıda meydana gelen bu değişim Şekil 3.5'te gösterilmiştir [30].



Şekil 3.5. TEM ile çökeltilerin görüntüsü, (a) GP Bölgeleri, (b) θ'' oluşumu, (c) θ' oluşumu, (d) θ oluşumu [30]

Alüminyum matris içerisindeki aşırı doymuş olan çözelti yaşlandırma aşamasına kadar korunur. Yaşlandırma prosesinin erken safhalarında sıralı ve zengin kümeler gözükmemektedir. Bunların özel isimleri Guinier Preston olarak adlandırılır. GP bölgeleri kalınlıkta sadece bir veya iki atom düzlemidir ve Al matrisinininkine benzer bir kristal yapıyı korur ve yapışıktır. Bu nedenle, ara yüzey enerjileri düşüktür ve çekirdeklenmelerini kolaylaştırır. GP bölgesi oluşumu alaşımın sertliğini artırır, ancak GP bölgeleri küçük ve yapışık olduğu için dislokasyonlarla kesilebilirler. Disk şeklinde ve matrisle tamamen yapışık halde olan θ'' çökeltileri zamanla büyük ölçüde artar. θ'' hali de GP gibi dislokasyonlar ile kesilebilecek haldedir. Alaşım yaşlandırılmaya devam edildikçe θ' fazı θ'' fazının yerini almaya başlar. θ' fazı daha stabil ve alüminyum matrise yarı yapışık haldedir. Bu aşamada, çökeltilerin boyutu artar ve matris fazındaki bileşenlerin sayısı sürekli olarak azalır ve denge değerine yaklaşır. Matris ile yapışık halde olmayan θ çökeltileri maksimum sertlik değerine ulaşır ve dislokasyonlarla kesilemeyecek hale gelir. Dislokasyonla sertleşme mekanizmasında bir değişiklik meydana gelir ve çökeltiler kesilmeyerek Orowan mekanizması ile dislokasyon sertleşmesi gerçekleşir. Yaşlandırma sürecinin devam etmesi ile Orowan mekanizmasının

da etkisiyle daha büyük çökeltiler meydana gelir. Tane sınırlarında kaba çökeltilerin çekirdeklenmesi ve büyümesi nedeniyle tane sınırlarına bitişik çökeltilsiz bölgeler oluşur. Böylece malzeme yaşlandırıldığında homojen olmayan ve oldukça kompleks olan bir yapı haline gelir [31-32].



Şekil 3.6. Yaşlandırma süresince alaşımın mikroyapısında meydana gelen aşamalar [32]

3.5. Metal Malzemelerin Sürünme Davranışı

Sürünme, sabit mekanik gerilmelerin etkisi altında malzemenin plastik deformasyon davranışını dikkate alan bir süreklilik mekaniği dalıdır. Malzemeler akma mukavemetinin altında uzun süreli bir yüklemeyle maruz kaldıklarında plastik deformasyonlar meydana gelir. Sürünme aynı zamanda sabit yükler altındaki deformasyon artışı olarak da tanımlanmaktadır. Ayrıca uzun süreli termal etkilere maruz kalması durumunda da malzemeler de sürünme davranışı gözlemlenir. Malzemelerin erime noktasına yaklaşırken sürünme eğilimleri artar. Sürünme mekaniği, yüksek sıcaklıklarda metallerden veya alaşımlardan yapılmış mühendislik bileşenlerinin mekanik davranışını modellemeye odaklanır. Sürünme davranışı yalnızca metal ve metal alaşımlarında değil aynı zamanda seramik, polimer, beton, kompozit vb. malzemelerde de görülmektedir. Sürünmenin meydana gelebilmesi için malzeme özelliklerine bağlı olarak bazı malzemeler için sıcaklık

daha baskın bir parametre iken bazı malzemeler için de mekanik yükler daha baskın bir parametredir. Zaman da muhakkak en önemli parametrelerden biridir. Önemli bir detaydır ki Uluslararası Teorik ve Uygulamalı Mekanik Topluluğu her on yılda bir sempozyum organize ederek yapılarıdaki sürünme konusunu 1960'dan bu yana işlemektedir. Bu sempozyum, metal ve metal alaşımları için gerçekleştirilen uzun süreli deneysel çalışmaların paylaşıldığı bir organizasyondur. 2000 yılından bu yana da kısa süreli testler de dikkate alınmaktadır. Sürünme davranışı oldukça spesifik olup 0 °C altında bir buzda meydana gelen sürünme durumunu da incelemiş ve sürünme meydana geldiğini 1983 yılında Weertman tarafından yapılan deneylerle sonuçlandırmıştır. Sürünmenin tarihçesi incelendiğinde 19. Yüzyılın ikinci yarısından sonra buhar makinalarında meydana gelen katastrofik başarısızlıklardan sonra incelenmeye başlanmıştır. İlk defa 20. Yüzyılın başlarında Costa Andrade tarafında 1910 yılında bir terminoloji oluşturulmuştur. Tek eksenli sürünme testleri sabit yük veya gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Bunun neticesinde birinci, ikincil ve üçüncü sürünme konseptini oluşturmuştur. Norton 1929 yılında çeşitli metallere yönelik uygulamalarla ilgili olarak ikincil sürünme için güç yasasını araştırdı. Tanıtılan sürünme yasası oldukça basit olup yalnızca iki malzeme parametresi içerir.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = A \sigma^n \quad (3.2)$$

ε = Sürünme gerinimi

σ = Tek eksenli Gerilme

$\dot{\varepsilon}$ = Sürünme gerinim hızı

A = Mukavemet katsayısı

1934 yılında ise çok eksenli yüklemeye maruz kalınan sürünme denklemi F.K.G Odqvist tarafından geliştirilmiştir.

$$\dot{\varepsilon} = f(\sigma_{eq}) \quad (3.3)$$

$\dot{\varepsilon}$ = Gerinim hızı tensörü

σ_{eq} = Von Mises eşdeğer gerilimi

Norton yasasının kabul edilmesi ile birlikte $f(\sigma_{eq})$ skalar fonksiyon olarak yazılabilmektedir.

$$f(\sigma_{eq}) = \frac{3}{2} A \sigma_{eq}^{n-1} \quad (3.4)$$

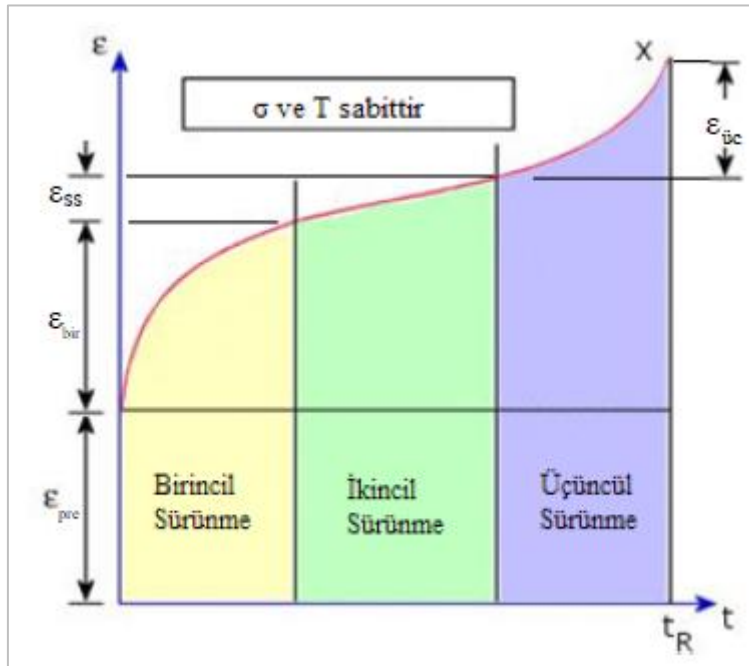
Odqvist'in teorisi, zamandan bağımsız plastisite için von Mises teorisine benzerdir. Bu yaklaşımın formüle edilmesi kolaydır, çünkü denklemin yalnızca iki parametreye ihtiyacı vardır. Kat sayıların elde edilmesi için tek eksenli bir sürünme testi gerçekleştirmek yeterli olacaktır. İkincil sürünme bölgesi için efektif bir formül iken sertleştirme, yumuşama ve hasar parametrelerinin de ilave edilmesi ile birincil ve üçüncül sürünme bölgeleri için de kullanılan bir denkleme dönüştürmek mümkündür [33].

Sürünme en genel gösterimi ile aşağıdaki gibi fonksiyonlaştırılabilir [34].

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma, T, t) \quad (3.5)$$

3.5.1. Sürünme aşamaları

Costra Andrade tarafından temelleri oluşturulan terminoloji günümüzde geçerliliğini korumaktadır ve sürünme aşamaları birincil sürünme, ikincil sürünme ve üçüncül sürünme olarak mühendislik çalışmalarında dikkate alınmaktadır. Şekil 3.7'de metal malzemelerin sürünme davranışının evrelerini açıklayan bir sürünme zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7. Sürünmenin aşamalarının $\epsilon - t$ grafiği ile gösterimi [35]

ε_{pre} = Ön yükleme uzaması

ε_{bir} = Birincil sürünme uzaması

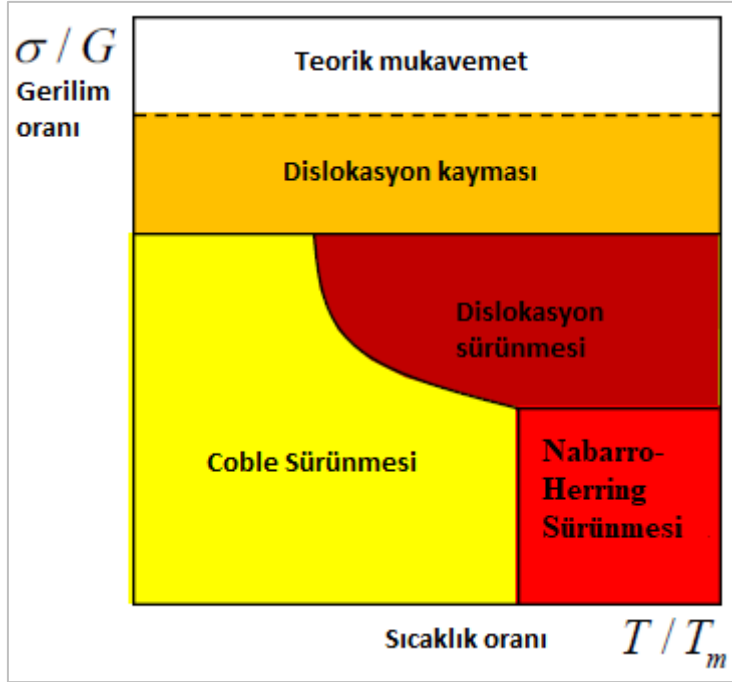
ε_{ss} = Kararlı sürünme uzaması

$\varepsilon_{üç}$ = Üçüncül sürünme uzaması

- Birincil sürünme aşaması, yavaşlayan sürünme ve süreksiz sürünme olarak da adlandırılmaktadır. Sürünme hızı oldukça yüksek olmasına rağmen zamanla hızı düşmektedir. Malzemenin sürünmeye karşı direnci artış göstermektedir. Sebebi ise dislokasyon yoğunluğunun yani pekleşme etkisinin daha belirgin olarak gözükmesidir [36].
- Deformasyonun artmasıyla, gerilme oranı minimuma ulaşacak ve ikincil aşama başladığında neredeyse sabit hale gelecektir. Bu, pekleşme ve termal yumuşatma arasındaki dengeden kaynaklanmaktadır. İkincil aşama sıklıkla kararlı durum sürünme olarak adlandırılır. Bununla birlikte, bu aşamada çeşitli mikroyapısal süreçlerin gerçekleştiğini belirtmek gerekir. Bu aşamada malzemenin mukavemeti çok küçük oranda değişmektedir [37].
- Üçüncül sürünme aşaması malzemenin kararsız bir şekilde uzayıp koptuğu bölgedir. Malzemenin boyun vermesi ve malzemedeki boşlukların oluşumu üçüncül aşamanın en karakteristik özelliğidir. Mikroyapıda yeniden kristalleşme, çökeltilerin aşırı büyümesi ve fazlar arasında yayınma üçüncül sürünme aşamasında gözükmektedir [37].

3.5.2. Sürünme mekanizmaları

Sıcaklık ve mekanik yüklere bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleşen sürünme mekanizmaları vardır. Yayınma sürünmesi ve dislokasyon sürünmesi olarak iki temel başlık altında incelenmektedir. Sürünme mekanizmaları haritası Şekil 3.8’de verilmiştir.

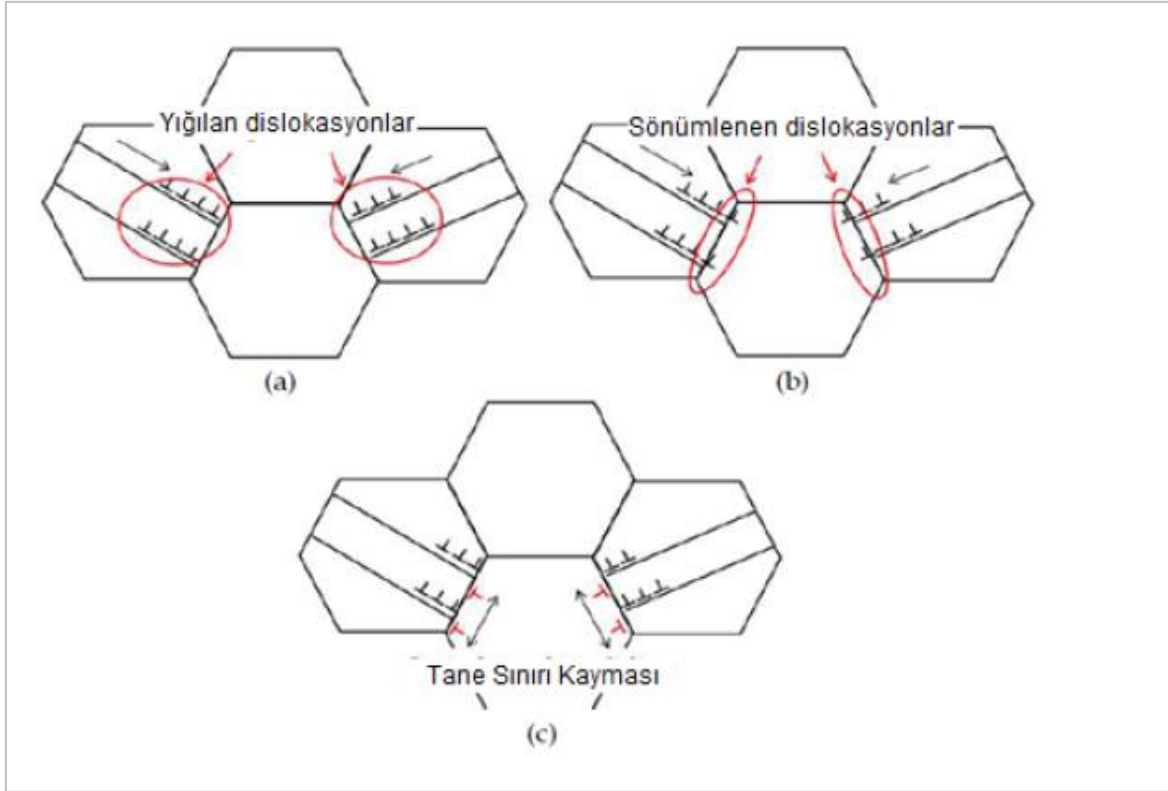


Şekil 3.8. Sürünme mekanizma haritası [38]

Dislokasyon sürünmesi

Dislokasyon hareketlerinin neticesinde oluşur. Yüksek gerilme ve düşük sıcaklıklarda görülmektedir. Dislokasyonlar kayma düzlemlerinde kayma hareketi ile hareket ederler. Mekanik etkilerin altında gerçekleşen fiziksel bir olay olduğu için yüksek seviyede bir ısı etkiye ihtiyaç duymazlar. Gerilmenin artması ile dislokasyonlar artmakta ve plastik deformasyon oranı artmaktadır. Genel sürünme denklemlerinde tanımlanan n ile sembolize edilen gerilim üssü ise dislokasyon sürünmelerinde 3-8 aralığında seçilirken difüzyon sürünmelerinde 0-1 aralığında kabul edilmektedir. Bu durum dislokasyon kaynaklı sürünme difüzyonla gerçekleşen sürünme olayına göre etkilidir [38].

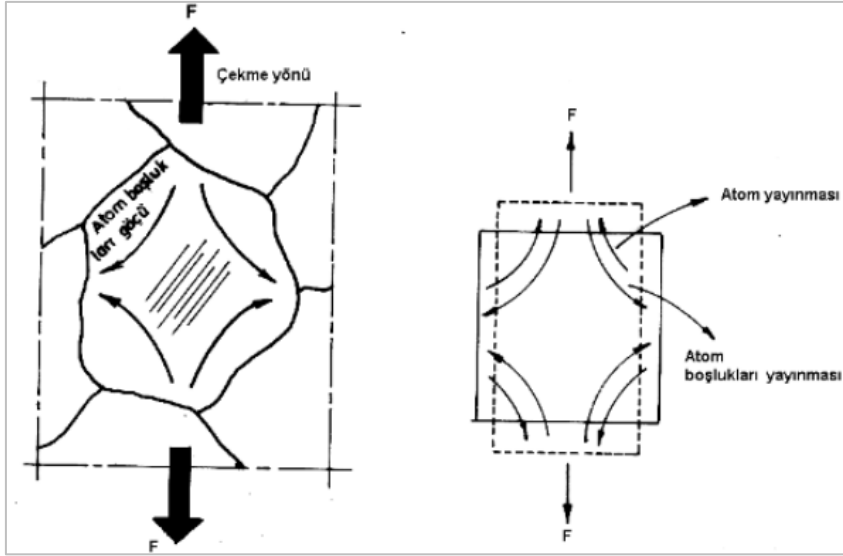
Dislokasyon sürünmesi, boşluk yayınmasıyla tırmanma ve kayma mekanizmaları ile tetiklenmektedir. Orowan ve Bailey tarafından geliştirilen model ile açıklanmaktadır. Orowan ve Bailey, kararlı sürünme hızının deformasyon sertleşmesi ve ısıl toparlanma arasındaki dengeden oluştuğunu açıklamıştır. Kayma mekanizmasının birim şekil değişimi ve tırmanma mekanizmasının ise birim şekil değişim hızını kontrol ettiğini öne sürmüştür. Tane içerisinde harekete başlayan dislokasyonların tane sınırlarında sönmülmesi ve ısıl etkilerin bir sonucu olarak meydana gelen toparlanma durumu ile tane sınırında kayma olmaksızın tırmanma etkisiyle sürünme davranışı olduğunu açıklamaktadır [39,40].



Şekil 3.9. Kayma ve dislokasyonların etkisi ile gerçekleşen dislokasyon sürünmesi [40]

Difüzyon sürünmesi

Yüksek sıcaklıklarda ve düşük gerilme koşulunda oluşmaktadır. Difüzyon sürünmesi kristalli malzemeler için gerekli gerilmenin altında, sıcaklık etkisiyle gerçekleşebilir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle atomlar gerilmenin etki ettiği yönde ve atom boşlukları ise gerilme yönüne dik yönde hareket ederler. Metaller gerilmeye maruz kaldıklarında stres yönü boyunca tanelerin deformasyonu ile tepki verirler. Difüzyon sürünmesinde ise yüksek sıcaklığın etkisi mekanik bir itici kuvvet gibi çalışmaktadır. Herhangi bir dislokasyon hareketi olmaksızın kristal kafesin içerisindeki kusurlardan kaynaklı komşu olan kafes yapılarından birinden diğerine atom transferi gerçekleşmektedir. Kusurlar, sıkıştırma yönü boyunca tane sınırlarına göç eder. Bu da net kütle transferine neden olur ve kristali maksimum sıkıştırma yönünde kısaltır. Difüzyon sürünme metotları içerisinde en yaygın olarak bilinenler Coble ve Nabarro Herring sürünmesidir [41].



Şekil 3.10. Atom ve atom boşluklarının hareket yönleri [42]

Nabarro-Herring sürünme mekanizması yüksek sıcaklık ve düşük gerilme durumunda çalışır. Atom boşluklarının malzeme yüzeyinden gerilme eksenine doğru hareketi ile gerçekleşir. Sabit bir gerilme uygulanması durumunda gerilme düzlemine normal olan tane sınırlarında basma, paralel olan tane sınırlarında ise çekme gerilmeleri gözlemlenir. Atom boşlukları çekme altındaki bölgelerden basma yüklemesi altındaki bölgelere doğru hareket eder. Atomlar ise zıt yönde hareket ederler. Bu yüzden sürünme deformasyonunun artış yönü çekme gerilmelerinin hakim olduğu ekseninde gerçekleşir. Kitle difüzyon tekniği gerçekleşir. Şekil 3.10'da bu mekanizmanın gerçekleşme görselidir [41].

Coble sürünmesinde ise difüzyon tane sınırlarında gerçekleşmektedir. Düşük aktivasyon enerjisi ile sürünme başlar. Bu nedenle düşük sıcaklık ve düşük gerilme durumlarında en çok gözlemlenen sürünme türüdür. Bu yüzden tane sınırları ile sürünme hızı ters orantılıdır. Tanelerin büyümesi ile tane sınırı azalacağından sürünme hızı azalır. Daha küçük taneli yapılarda ise sürünme hızı tane sınırı artacağından artmaktadır [43].

3.6. Gerilme Gevşemesi

Sürünme ve gerilim gevşemesi aynı mekanizmalardan oluşmaktadır. Bir iş parçası üzerine belirli bir sıcaklıkta mekanik bir gerilme uygulandığında iş parçası sabit bir gerinim altında tutulursa gerilimin zamanla azaldığı gözlenecektir. Toplam gerinimin sabit olması koşuluyla zamanla elastik gerinim plastik gerinime dönüşmektedir [44-48]

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c \quad (3.6)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_e}{dt} + \frac{d\varepsilon_c}{dt} \quad (3.7)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \quad (3.8)$$

$$\sigma = \varepsilon E \quad (3.9)$$

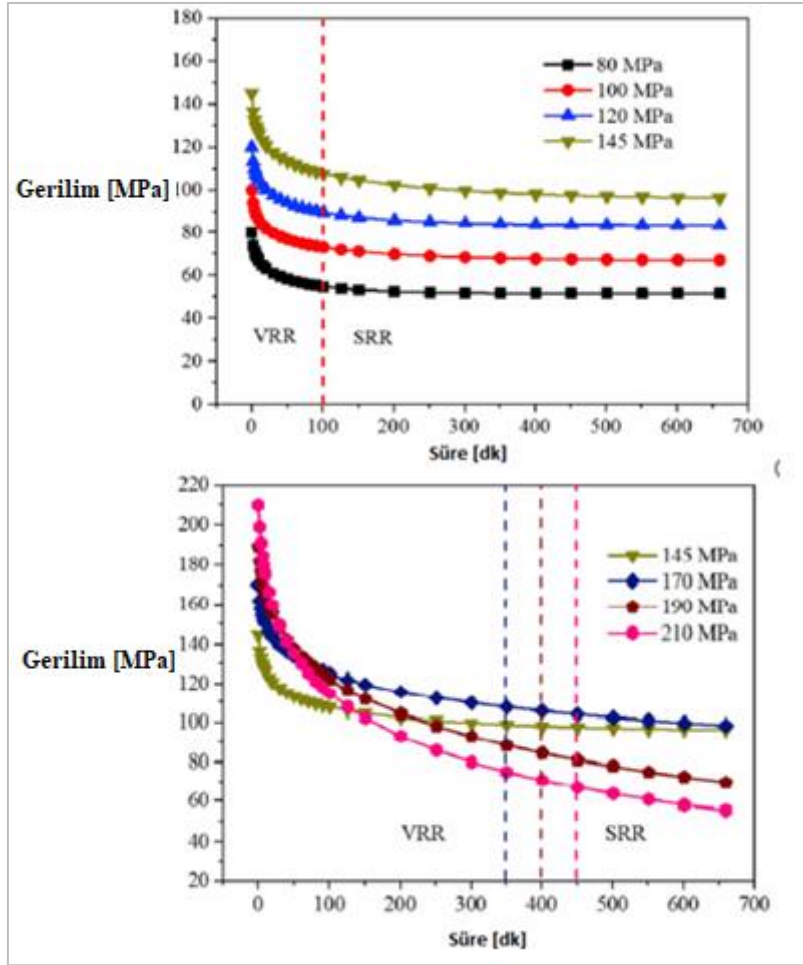
$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = -\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (3.10)$$

ε , ε_e ve ε_c sırasıyla toplam gerinim, elastik gerinim ve plastik gerinimi göstermektedir. E elastik gerilme, σ uygulanan gerilme, n pekleşme üsteli, R (8.314 J/mol.K) gaz sabiti, Q aktivasyon enerjisi, T sıcaklığı göstermektedir. Denklem 3.6 ile bir iş parçası üzerinde meydana gelen gerinim durumu verilmiştir. Her iki tarafın zamana bağlı türeviyse denklem 3.7’de verilmiştir. Sürünme gevşemesinin meydana gelebilmesi için prosesin başlangıcından sonuna kadar toplam gerinim sabit olmalıdır. Denklem 3.8 toplam gerinimin proses boyunca sabit olduğu durumu ifade etmektedir. Hooke kanuna göre elastik gerinim ifadesi yazılır ve denklem 3.8’de elastik gerinim ifadesinin yerine yazıldığında denklem 3.10’daki gibi ifade edilmektedir. ε_c ise denklem 3.11 ile tanımlanmaktadır.

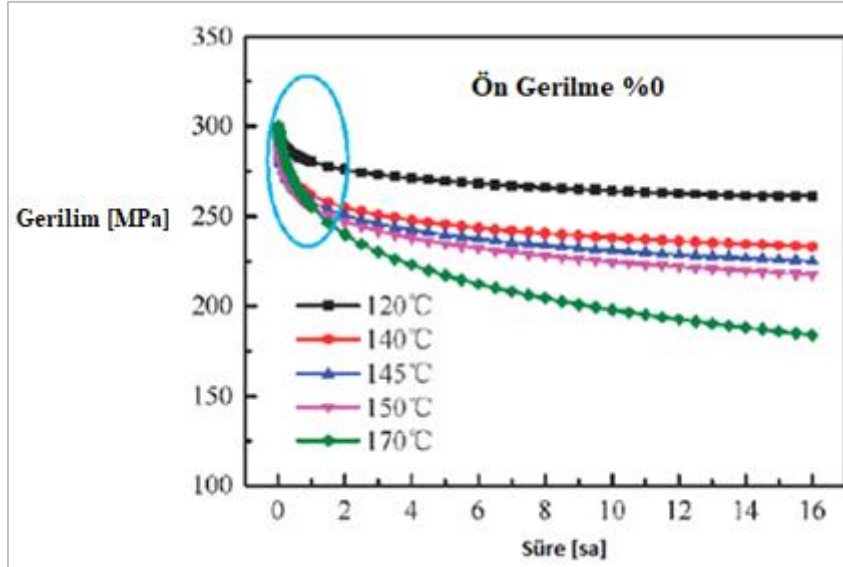
$$\varepsilon_c = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3.11)$$

Gerilim gevşemesi, sürünmenin özel bir davranışı olarak nitelendirilir. Matematiksel bir model oluşturulmak istenirse denklem 3.10 ve 3.11, denklem 3.7’de yerine yazılarak bu mümkün kılınır. Zaman, sıcaklık ve gerilme, gerilme gevşemesini etkileyen en temel parametrelerdir. Genel olarak gerilim gevşeme eğrileri iki aşamaya ayrılabilen tipik bir logaritmik düşüş eğilimi göstermektedir. İlk aşamada değişken hızlı gevşeme olarak adlandırılan bir süreç hakimdir. Değişken hızlı gevşeme aşamasında gerilimin büyük bir kısmı hızla düşüş gösterir. Zamanla neredeyse sabit hızla azalma durumuna geriler ve bu aşamaya ise sabit hızlı gevşeme ismi verilir. Gerilim gevşemesindeki en uzun süreç standart hızlı gevşemedir. Şekil 3.11’de iki aşamayı da içeren farklı gerilmeler ve farklı sıcaklıklar altında gerçekleştirilen gerilim gevşeme prosesine örnekler mevcuttur. VRR olarak

gösterilen bölge değişken hızlı gevşeme bölgesini temsil ederken SRR olarak gösterilen bölge ise sabit hızlı gevşeme bölgesini temsil etmektedir. 80, 100, 120, 145, 170, 190 ve 210 MPa ilk gerilim değerleridir. Aynı koşullar altında gerilimin artması, gerilim gevşemesi ile daha fazla gerilimin yapıdan uzaklaştırılacağını göstermektedir. Bu da yüksek gerilim değeri yüksek gerilim gevşemesi hızı meydana getirir diyerek sonuçlandırılabilir [49].



Şekil 3.11. 2219 alüminyum alaşımının 165°C’de farklı mekanik gerilmeler altındaki gerilim gevşemesi davranışı [50]



Şekil 3.12. 7150-T7751 alüminyum alaşımının aynı mekanik gerilim ve farklı termal şartlardaki gerilim gevşemesi davranışı [51]

3.7. Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme Prosesi

Havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında daha yüksek şekillendirilebilirlik, dayanıklılık ve maliyet verimliliğinin öneminin artması ile birlikte büyük ölçekli kompleks geometrili panellerin üretimi ve entegre panel olarak da bilinen yekpare kanat kiriş yapılarının üretimi için sac metal üretim teknikleri ve kalıp tasarımı konularında oldukça çok mühendislik çalışmaları yapılmaktadır. Havacılık uygulamalarındaki en çok dikkat edilen mekanik hususlardan bir tanesi de yorulma ve yorulma çatlak oluşma olasılığıdır. Bu durumun tetiklenmesi ise şekillendirilen iş parçaları üzerindeki kalıntı gerilmeler neticesinde olmaktadır. Panelin dış yüzeyinde yüksek artık gerilim kalırsa ve panel, değişken bir yüklemeye maruz kalırsa, yorulma çatlama olasılığı büyük ölçüde artar. Rulo şekillendirme ve gerdirerek şekillendirme gibi plastik deformasyon teknikleri temelli prosesler yardımıyla üretilen iş parçaları üzerinde yüksek kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir. Bu problemlerin katastrofik sonuçlara sebep olmasından sonra 1980'li yılların sonuna doğru Textron firması tarafından kompleks geometrili ve büyük ölçekli panellerin şekillendirilmesi ve plastik deformasyon ile şekillendirmeyi esas olan şekillendirme yöntemlerine göre daha az kalıntı gerilim içeren ve daha iyi mekanik özellikler elde edilebilecek olan sürünme-yaşlandırma şekillendirme olarak adlandırılan gelişmiş imalat prosesini geliştirilmiştir. Bu metot ile iş parçaları yaşlandırılırken aynı zamanda yaşlandırma ısı işlemine de tabi tutulur. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi yalnızca ısı işlem

uygulanabilir alaşımlara uygulanabilmektedir. Havacılık uygulamaları dikkate alındığında 2XXX, 6XXX ve 7XXX alaşımları ısıtma işlemi uygulanabilen alaşımlardır [1,2,8].

3.7.1. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin avantaj ve dezavantajları

Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi gerek şekillendirme mekanizması gerekse diğer özellikleri açısından geleneksel şekillendirme metodlarından oldukça farklıdır. Gelişmiş imalat yöntemlerinden biri olan bu prosesin avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur.

Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin avantajları:

- Elastik gerilme altında şekillendirilen iş parçaları oldukları için plastik deformasyon yöntemlerine göre daha düşük kalıntı gerilmeler barındırır. Bu sebeple yorulma direnci ve stres korozyon direnci diğer plastik deformasyon ile şekillendirilmiş parçaların dirençlerinden daha yüksektir [2].
- Elastik gerilmeler altında gerçekleşen bir proses olmasının diğer bir avantajı ise plastik kararsızlık neticesinde oluşacak bir kopma veya çatlak oluşma durumu gözlenmemektedir. Örneklendirmek gerekirse uçakların gövde panellerinin şekillendirildiği plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan gerdirerek şekillendirme metodunda çene kuvvetleri doğru ayarlanmadığı takdirde sac parçada yırtılmalar veya kopma gözlemlenebilir.
- Entegre panel yapıları gibi üretimi oldukça zor ve kompleks olan komponentlerin üretiminde oldukça tercih edilen bir üretim yöntemidir.
- Havacılıkta oldukça yaygın olarak karşılaşılan büyük ölçekli ve kompleks geometrili panellerin şekillendirilmesi aşamasında kalıp, işçilik ve tezgah ilk yatırım maliyetleri açısından kıyaslandığında sürünme yaşlandırma şekil verme prosesine ait giderler diğer metotlara göre daha düşük maliyetli bir prosestir. Basınçlı bir otoklav büyük bir maliyet kalemi olsa dahi plastik metotlara göre erkek-dişi kalıp sisteminden yalnızca erkek veya yalnızca dişi bir kalıp ile üretim gerçekleştiriliyor olması, şekillendirilme sonrası yaşlandırma işlemleri için ekstra yaşlandırma fırını maliyetini ortadan kaldırdığı için ve insan faktörünü çok ciddi seviyelerde azalttığı için hem kısa süreç hem de uzun süreçli bir fabrikadaki işletme maliyetleri açısından oldukça efektifir.

- Şekillendirme prosesinin ve yaşlandırma prosesinin eş zamanlı gerçekleşiyor olması da yeşil bir dünya için enerji tasarrufu sağlamaktadır.
- Yaşlandırma işlemi şekillendirme ile eş zamanlı olarak gerçekleştiğinden gerilme yönünde çökeltiler elde edilebileceğinden mekanik özellikleri kontrol etmek ve gereksinimler doğrultusunda müdahale etmek mümkün olacaktır. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının etkilerini dengeleyerek güçlü kristalografik dokuların oluşumu ile anizotropiyi de kontrol etmenin bir yolu olarak görülmektedir [52].

Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin dezavantajları:

- Yalnızca yaşlandırma ısısal işleminin uygulanabileceği alaşımlar için uygulanabilen bir metot olması malzeme skalasını daraltmaktadır.
- Bir parçanın üretimi için gereken süre plastik deformasyon yöntemleri ile şekillendirilen parçalara kıyasla daha uzundur.
- Geri yaylanmayı etkileyen sıcaklık, zaman, malzeme kalınlığı, kontur yarıçapı, gerilme ve malzeme özellikleri gibi pek çok parametre olmasından dolayı geri yaylanma davranışının tahmin edilmesi oldukça zordur. Maliyetli üretim geliştirme çalışmaları ve sayısal çalışmalar gerektirmektedir.
- Dezavantajlarından bir tanesi ise geleneksel yaşlandırma prosesine tabi tutulmuş bir numune ile gerilme altında gerçekleştirilen bir yaşlandırma prosesi sonrasında numunelerin akma mukavemetleri kıyaslandığında sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile üretilen numunenin akma mukavemeti daha düşük elde edilmektedir [53].

3.7.2. Sürünme yaşlandırma prosesinin endüstriyel uygulamaları

Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi havacılık yapıları üzerinde oldukça yaygın olarak kullanılan gelişmiş bir imalat teknolojisidir. Amerika'nın bombardıman amacı ile üretmiş olduğu B1B Long Range Combat Aircraft olarak isimlendirdiği uçağın alt ve üst kanat panellerinin üretimi için sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi kullanılmıştır. Bu paneller kanat kirişleri ile entegre olarak tasarlatılmış ve üretilmiştir. Panelin boyu 15,2m, 2,7 m'den 0,9 m'ye daralan bir en ve 63,5 mm'den 2,5mm'ye kadar düşen bir kalınlıktadır. Öncelikle düz bir şekilde frezelenmiştir, kalınlıklar lokal olarak tasarıma uygun ölçülere indirilmiş ve kirişler işlenmiştir. Ardından otoklav ortamında şekillendirilerek istenen konturda entegre kanat panelleri üretilmiştir [2]. Airbus ise sürünme yaşlandırma şekil

verme prosesini ticari bir uçak olan A380'in kanat panellerinin üretimin de kullanmıştır. Panel boyu 33 m olup, gövde kanat kök bölgesindeki genişliği ise 2,8 m'dir. Parça kalınlığı ise 3-28 mm arasında değişmektedir. Kök bölgesinde en kalın olan kesitte iken kanat ucunda en düşük kalınlığa sahiptir. Bu parçanın konturu ise iki eksen de olup çift eksen de konturludur [54]. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi ile üretilen en büyük parçalardan biri de Gulfstream firmasına ait G-5 uçağının kanat panelleridir [55]. Hava araçlarının yapısal parçalarının dışında GKN firması motor iç yapılarına ait bazı parçaların üretiminde ve Rolls Royce firması da yine aynı şekilde birincil yapısal parçaların dışında bazı parçaların üretiminde sürünme yaşlandırma şekillendirme metodunu kullanmıştır [55-56].



(a)



(b)

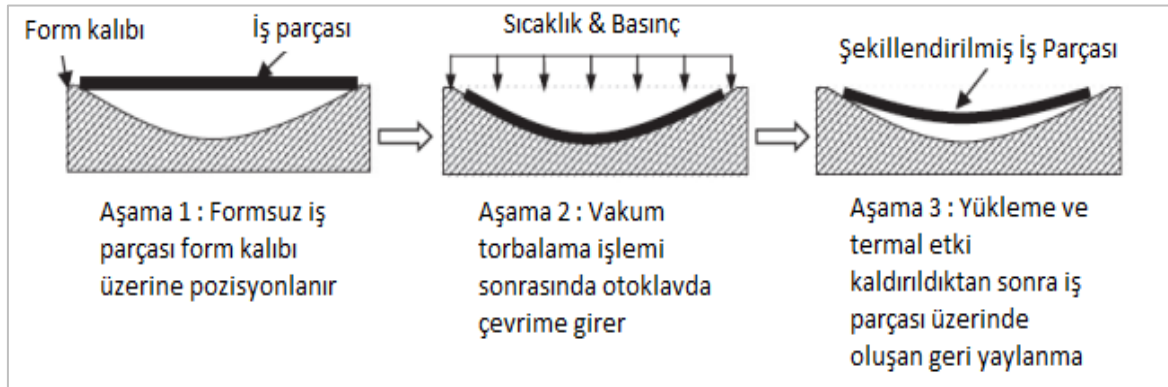


(c)

Şekil 3.13. Sürünme yaşlandırma prosesine örnek parçalar A380 kanat paneli [57], GKN firmasına ait motor iç yapısal parçası [56], G5 kanat paneline ait sürünme yaşlandırma şekillendirme kalıbı [55]

3.7.3. Sürünme yaşlandırma şekillendirme proses mekanizması

Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi, yapay yaşlandırmaya uygun bir alüminyum alaşımın sürünme deformasyonu ve gerilim gevşemesi mekanizmaları ile iş parçasının istenen forma getirildiği ve yapay yaşlandırma ısıl işleminin eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği gelişmiş bir şekillendirme prosesidir. Uygulanan kısıtlayıcı kuvvetler nedeniyle iş parçasında oluşan gerilmeler, sürünme geriniminin artmasıyla kademeli olarak gevşer [55]. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi üç temel aşamadan oluşur (Şekil 3.14). Birinci aşamada düz bir şekilde işlenmiş olan iş parçası form kalıbı üzerine pozisyonlanır. Daha sonra vakum torbalama tekniği kullanılarak parça ve kalıbın oluşturduğu sistem vakum torbalama tekniği ile atmosferle olan ilişkisi kesilir. İkinci aşamada ise otoklav içerisine alınan vakumlanmış iş parçası üzerine yapay yaşlandırma sıcaklığı ve yaşlandırma süresi, prosesin gerçekleştirileceği basınç değerine göre otoklav ayarlanır. Yaşlandırma süresi boyunca iş parçası yaşlandırma sıcaklığına ve şekillendirme için uygulanan basınca maruz bırakılır. Üçüncü ve son aşamada ise iş parçası üzerindeki basınç ve ısıl etkiler kaldırılır. Parça, vakum torbası açılmamış bir şekilde otoklavın dışına alınır. İş parçası üzerinde sürünme deformasyonundan kaynaklı bir miktar kalıcı deformasyon meydana gelirken yüksek oranlarda geri yaylanma meydana gelir.

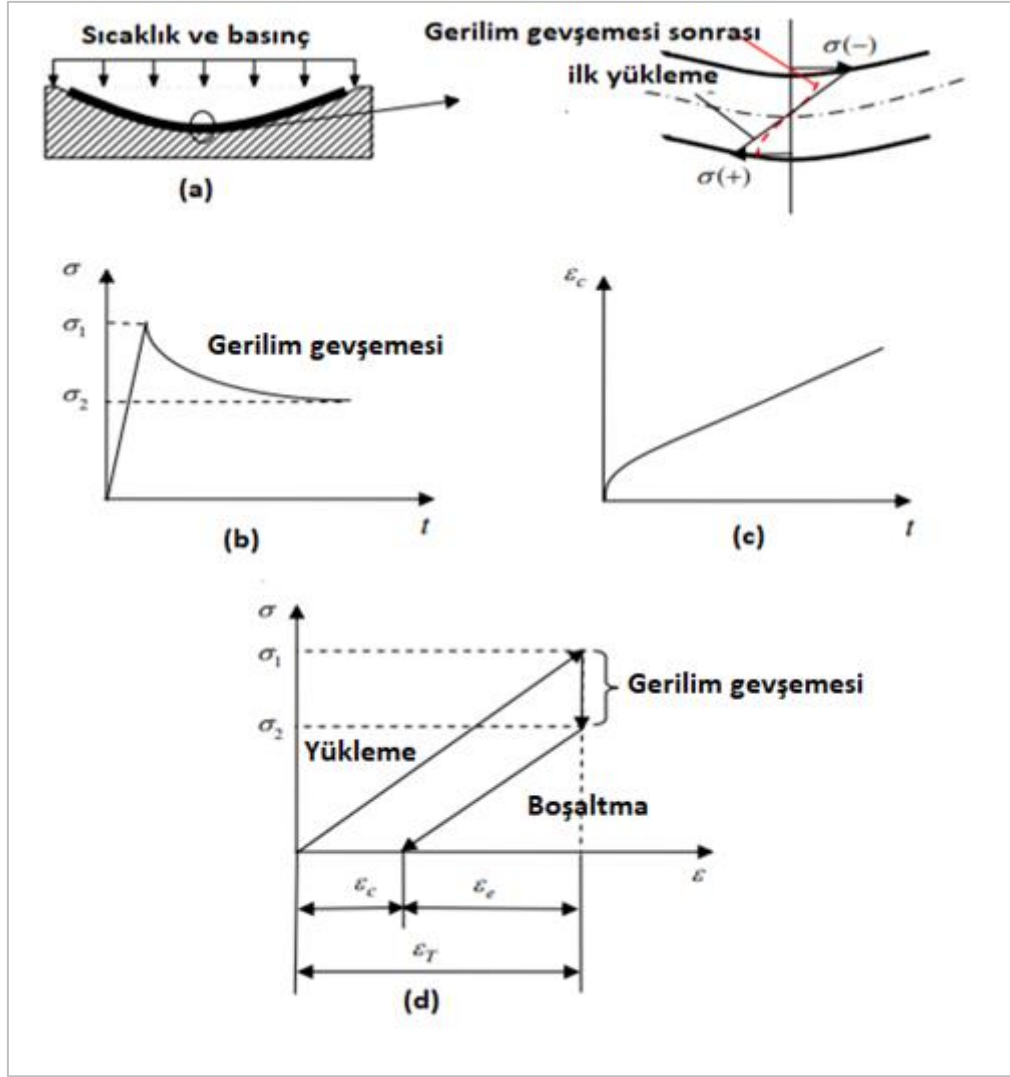


Şekil 3.14. Prosesin üç temel aşaması [55]

Sürünme-yaşlandırma şekil verme prosesindeki şekillendirme mekanizmasının temeli, yaşlandırma sıcaklığında meydana gelen sürünmeden dolayı oluşan gerilim gevşemesine dayanmaktadır. Proses boyunca ilk yüklemeden sonra metal içerisinde oluşan gerilmeler yapay yaşlandırma ısıl işlemi boyunca gevşeyecektir. Ayrıca sürünmeye maruz kalan sabit gerilim altındaki bir metalin sürünme geriniminin artmasıyla iş parçası üzerindeki toplam

gerininin bir miktarı plastik gerinime dönüşecektir ve iş parçası üzerindeki gerilme azalacaktır. Geleneksel şekil verme metotları incelendiğinde ilk yükleme sonucunda oluşan iç gerilmeler malzemenin akma dayanımının altındaysa iş parçası üzerindeki yükleme kaldırıldığında elastik toparlanma gereğince şekillendirme öncesindeki orijinal haline dönecektir [57].

Fakat sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde elastik bir yükleme sonucunda uzun bir süre gerilmeye ve sıcaklığa maruz kalan malzeme içerisindeki gerilmenin büyük bir kısmının gevşemesine izin verilir ve iş parçası orijinal haline dönemmez. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde oluşan gerilim-gerinim mühendislik diyagramları ve ilgili grafikler şekil 3.15’de verilmiştir. Şekil 3.15 (a)’da otoklav içerisinde elastik yükleme altında olan bir iş parçasının kalınlık kesitindeki düzlemsel bükme etkisi altındaki gerilme dağılımı gösterilmektedir. Yapı üzerinde oluşan gerilme dağılımı yaşlandırmanın da etkisiyle gerilim gevşemesine maruz kalmaktadır ve gerilme dağılımı Şekil 3.15 (a)’daki gibi değişmektedir. Şekil 3.15 (b)’de verilen gerilim-gerinim diyagramı proses süresinde iş parçası üzerinde meydana gelen gerilim gevşemesinin zamana bağlı grafiği, Şekil 3.15 (c)’de verilen grafik proses boyunca iş parçası üzerinde oluşan sürünme deformasyonunun zamana bağlı grafiğidir. Proses süresince iş parçası birincil ve ikinci sürünme bölgesinde şekillendirilmektedir. Elde edilen grafikler ise bunu kanıtlar niteliktedir. Şekil 3.15 (d)’de verilen grafik ise proses boyunca iş parçası üzerinde oluşan gerilim-gerinim grafiğidir. Gerilim gevşeme davranışı temel olarak sürünme ve ısı işleme bağlıdır. İlk yükleme sonucu iş parçası üzerinde oluşan gerilim değeri σ_1 ’dır. Gerilim gevşemesinin etkisi ile σ_2 ’ye düşmüştür. σ_1 ve σ_2 arasında oluşan bu fark gerilim gevşemesi değerine eşittir. ϵ_T toplam gerinim değerini ifade etmektedir. ϵ_e elastik gerinimi ve ϵ_c ise sürünme gerinimini yani iş parçası üzerinde meydana gelen plastik gerinimi ifade etmektedir. Şekil verme prosesi sonucunda parçanın geometrisinin bağlı olduğu gerinim değeri de ϵ_c ’dir. ϵ_e ise iş parçasının eski haline dönme eğilimi ile alakalıdır.



Şekil 3.15. (a) Proses anında iş parçasının kesiti boyunca oluşan gerilim dağılımı ve gerilim gevşemesinin etkisi, (b) Proses süresince meydana gelen gerilim gevşemesi, (c) Proses süresince iş parçası üzerinde oluşan sürünme gerinimi, (d) Prosesle ait gerilim-gerinim grafiği [55]

Sürünme yaşlandırma prosesinin yalnızca bir sürünme deformasyonu değil aynı zamanda yaşlandırma prosesinin de beraber gerçekleşiyor olmasından dolayı sürünme geriniminin ifade edilebilmesi için çok fazla araştırma yapılmıştır. Malzeme davranışının doğru tahmin edilebilmesi ve malzeme davranışının modellenenebilmesi için gerilme gevşemesi, yaşlandırma sertleşmesi ve çökelen tanelerin şekil ve boyutlarını içeren denklemler türetilmiştir.

$$\dot{\epsilon}_c = A_1 \sinh\{B_1[\sigma(1 - \bar{\rho}) - k_0\sigma_y] \text{sign}\{\sigma\}\} \quad (3.12)$$

$$\dot{\sigma}_A = C_A \bar{r}^{\bar{m}_1} (1 - \bar{r}) \quad (3.13)$$

$$\dot{\sigma}_{ss} = C_{ss} \bar{r}^{\dot{m}_2} (\bar{r} - 1) \quad (3.14)$$

$$\dot{\sigma}_{dis} = A_2 \cdot n \cdot \bar{\rho}^{n-1} \cdot \dot{\bar{\rho}} \quad (3.15)$$

$$\sigma_y = \sigma_{ss} + \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_{dis}^2} \quad (3.16)$$

$$\dot{\bar{r}} = C_r (Q - \bar{r})^{m_3} (1 + \gamma_0 \bar{\rho}^{m_4}) \quad (3.17)$$

$$\dot{\bar{\rho}} = A_3 (1 - \bar{\rho}) |\dot{\epsilon}_C| - C_p \bar{\rho}^{m_5} \quad (3.18)$$

$A_1, B_1, k_0, C_A, m_1, C_{ss}, m_2, A_2, n, C_r, Q, m_3, \gamma_0, m_4, A_3, C_p$ ve m_5 malzeme sabitleridir.

Eşitlik 3.12 sürünme geriniminin değişimini tanımlamaktadır. Sürünme şekillendirme prosesi esnasında sürünme gerinimi yalnızca bir gerilme fonksiyonu değil aynı zamanda dislokasyon yoğunluğu, yaşlanma sertleşmesi, çözünme sertleşmesi ve dislokasyon sertleşmesinin bir fonksiyonudur.

Verilen denklem sisteminde akma mukavemeti; dislokasyon sertleşmesi, çökelti sertleşmesi ve çözünme sertleşmesinin etkileri ile üç kaynak tarafından doğrudan etkilenmektedir. Proses süresince bu üç kaynak dinamik bir şekilde değişmektedir. Çökelek yarıçaplarının tahmin edilmesi, gelişimi ve izotermal bir yaşlandırma esnasındaki tanecik büyümesinin modellenmesi oldukça kritiktir. Fakat izotermal bir yaşlandırma prosesi dikkate alındığında iki farklı sıkıntı ile karşılaşmak mümkündür. Bunlardan bir tanesi farklı alüminyum alaşımlarında farklı şekillerde çökeltmeler yaşanabilir. İkincisi ise çökelti arasındaki boşluk çökelti sertleşmesi süresince akışın davranışı ve sertleştirme denklemlerinin tahminini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple normalize çökelti çapı bilinmelidir ve denklem 3.19 türetilmiştir.

$$\bar{r} = \frac{r}{r_c} \quad (3.19)$$

$\bar{r}$ değeri aşırı yaşlandırılma durumundaki çökelti boyunu vermektedir. Bu değerin 0 ile 1 arasında olması az yaşlandırıldığını, 1'e eşit olması pik yaşlandırma yapıldığını ve 1'in üzerinde olması ise aşırı yaşlandırılmış olduğunu göstermektedir. Denklem 3.12'de verilen

$(1 - \bar{\rho})$ ifadesi ise birincil sürünme aşamasındaki dislokasyon yoğunluğunun sürünme hızına katkısını ifade etmektedir. Gerinim sertleşmesi ile aynı etkiyi yaratmaktadır. Denklem 3.13 ve 3.14’de ise yaşlanma sertleşmesi ve çözünme sertleşmesi normalize çökelti boyutu ve çökeltinin değişim hızı cinsinden ifade edilmektedir. C_A ifadesi ise dislokasyonlar ve dislokasyonlar ile kesilebilir çökeltiiler arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Denklem 3.14’de ise dislokasyon hareketlerini engellemek için çözünmüş olan atomların direnç gösterdiği bölgelerde oluşan katı çözeltili sertleşmesini fiziksel olarak göstermektedir. C_{ss} çökeltinin boyutu ile ilgili bir sabittir. Çözünme modülü ve elektriksel eşleşmeme modülü olarak da tanımlanmaktadır. Çözünmüş atomların konsantrasyonunun azalması ile katı çözeltili mukavemeti azalır diğer bir deyişle yumuşama mekanizması devreye girmektedir. Denklem 3.15’te ise dislokasyon sertleşmelerinin, $\bar{\rho}$, değişimi tanımlanmaktadır.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho - \rho_i}{\rho_m} \quad (3.20)$$

ρ_i terimi malzemenin proses başlangıcındaki dislokasyon yoğunluğunu ifade ederken ρ_m ise malzemenin sahip olabileceği maksimum dislokasyon yoğunluğunu ifade etmektedir. ρ ise anlık dislokasyon yoğunluğunu göstermektedir. $\bar{\rho}$ ise bu sebepten ötürü 0 ile 1 arasında bir değer alabilmektedir. Denklem 3.18’de eşitliğin sağ tarafındaki ilk ifade sürünme deformasyonuna ve dinamik toparlanmaya bağlı olarak dislokasyon yoğunluğunun değişimini gösterirken ikinci ifade ise yüksek sıcaklıktaki dislokasyon yoğunluğunun statik toplanmasını temsil etmektedir.

Denklem 3.16 ise denklem 3.13 ve 3.15’den meydana gelmektedir. 3.13 ve 3.15 denkleminde mevcut olan terimlerin açıklanmasının ardından denklem 3.16 dikkate alınırsa akma mukavemetinin sürünme yaşlandırma prosesi boyunca dinamik olarak değişeceği görülmektedir. Denklem 3.18’de verilen dislokasyon yoğunluğu durumuna bağlı olarak çekirdeklenme ve çökeltiilerin büyümesi durumu kullanılarak yaşlandırma prosesindeki çökelti boyutu büyümesi modellenebilmektedir. Fakat sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi sürünme ve yaşlandırmanın kombine bir biçimde gerçekleştiği bir proses olduğu için dinamik yaşlandırma prosesini tanımlayabilmek adına dislokasyon yoğunluğunu da içermektedir. Bu nedenle dislokasyon yoğunluğu veya sürünme deformasyonu arttıkça yaşlanma etkileri de artmaktadır. Çökeltiilerin çekirdeklenmesi ve büyümesi üzerinde dislokasyon yoğunluğunun etkisi γ_0 ve m_4 parametreleri ile tanımlanmaktadır. Geleneksel bir yaşlandırma işleminde sürünme olmayacağından normalize dislokasyon yoğunluğu da

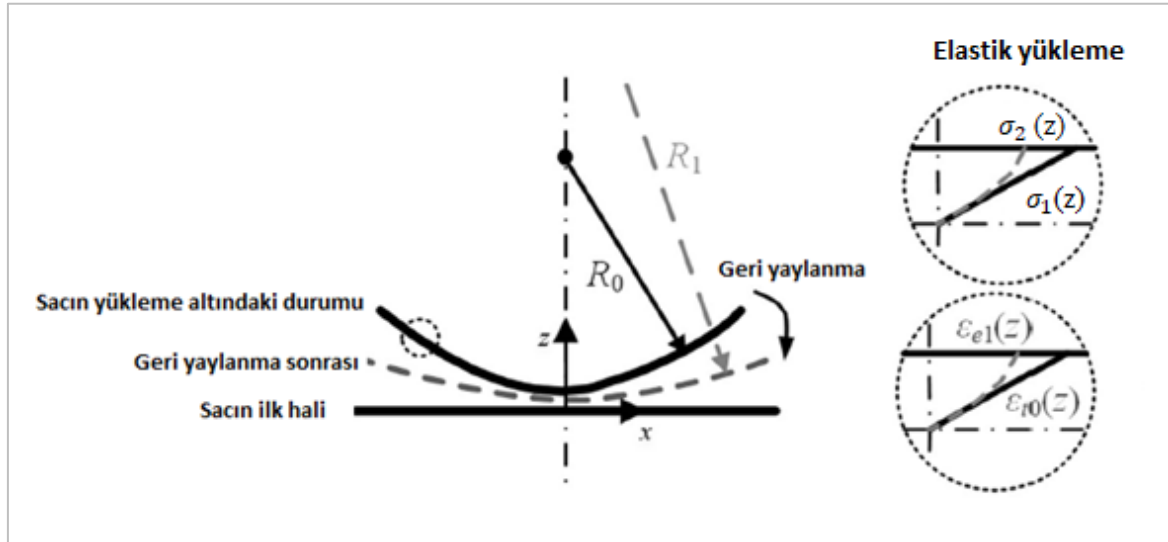
sıfır olacaktır. Bu sebeple denklem 3.17 yalnızca statik yaşlandırma davranışını temsil edecektir. Geleneksel yaşlandırma prosesine paralel olarak sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde de çökeltilerin boyutu azalarak artan bir büyüme davranışı göstermektedir. Geleneksel bir yaşlandırmadan ayırtırmak adına statik bir denklem halinden dinamik bir denklem haline dönüştürmek adına araştırmacılar normalize çökelti boyutunu kullanmaktadır. Bu durumun bazı avantajları mevcuttur. Bu avantajlardan ilki normalize bir boyut kullanılarak terimler ve sayısal zorluklardan kurtulmaktadır. Q ise bir matriksin, çökeltiye doygunluğunu temsil etmek için kullanılan bir malzeme sabitidir. Örneğin; 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementi olan çinko alüminyum matriks içerisinde çökelmeye başlar, çökeltme prosesi sonlanır, büyüme başlar ve büyüme durur. İlgili malzeme modelinin hazırlanması için çok sayıda denklem gerçekleştirmek ve elde edilen değerleri belirlenen sayısal algoritmalar ile çözümleyerek nihai modele ulaşılmaktadır. Bu sebeple bir malzemenin karakterizasyonunu yapılması oldukça maliyetli bir süreçtir [32].

3.7.4. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde geri yaylanma davranışı

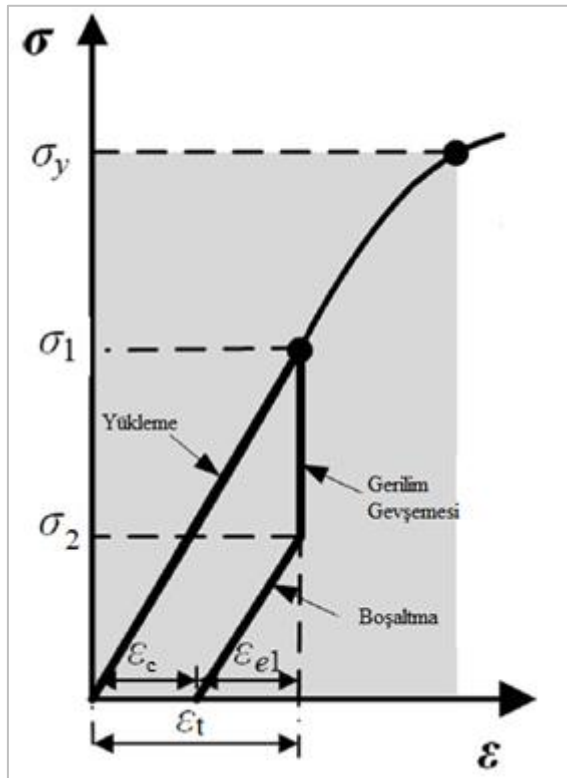
Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi vakum torbalama tekniği kullanılarak bir panelin kalıp üzerinde elastik yükleme altında gerçekleştirilen şekillendirme ve yaşlandırmanın gerçekleştiği hibrit bir prosestir. Kalıp yüzeyi ile tamamen kontak halinde olan iş parçası elastik bir gerilme altında yaşlandırılacak olan tempere ait belirlenmiş sıcaklıkta ve sürede tutulmaktadır. Elastik yükleme, sürünme-yaşlandırma ve boşaltma aşamalarından meydana gelen prosesin ilk safhasında elastik yükleme altındaki iş parçası sabit bir gerinim altında sürünmenin ve yaşlandırmanın etkisiyle gerilim gevşemesi meydana gelmektedir ve iş parçası üzerindeki gerinimin bir miktarı plastik deformasyon olarak iş parçasının şekillendirilmesini sağlarken büyük bir bölümü ise boşaltma aşamasında iş parçası üzerinden yük kaldırıldığında geri yaylanma olarak sonuçlanmaktadır. Geri yaylanma neticesinde iş parçası kendi orijinal hali ve kalıp konturu arasında bir forma sahip olur. Geri yaylanma, iş parçasının şekillendirilme sonrasında parçanın elastik bölgesinde bulunan gerilmenin toparlanması olarak da adlandırılır.

Şekil 3.17 referans alınarak açıklanırsa σ_1 ilk gerilmesi altında şekillendirilme gerilmesi altındaki bir numune sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinin ikinci aşamasında gerilim gevşemesi davranışı gösterecektir ve σ_2 gerilmesine gevşeyecektir. Bu aşamada sabit

bir gerinim altında olan iş parçası üzerindeki elastik gerinimin bir miktarı da plastik gerinime dönüşecektir. Üç aşamadan oluşan prosesin ilk aşamasında, yükleme aşamasında, toplam gerinime eşitken proses sonunda toplam gerinim sabit kalırken plastik gerinim ve elastik gerinimin toplamına eşit olmaktadır.



Şekil 3.16. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanma durumu [58]



Şekil 3.17. Elastik gerilmeler altında gerçekleştirilen bir sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesine ait gerilim gerinim diyagramı [58]

Prosesin ilk ve son aşamalarındaki gerinim ilişkisi incelendiğinde sırasıyla denklem 3.21 ve 3.22 ile gösterilebilir.

$$\varepsilon_t(z) = \varepsilon e(z) \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_t(z) = \varepsilon e_1(z) + \varepsilon_c(z) \quad (3.22)$$

Elastik gerinim Hooke yasası ile ifade edilebilirken plastik gerinim ise sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi için türetilmiş olan sürünme gerinimi denklemi ile ifade edilebilir. Gerilim gevşeme sonrasında iş parçası üzerinde kalan gerilmeye bağlı olarak yazılabilecek olan moment denklemi 3.24 gibidir.

$$\sigma_2(z) = E \varepsilon_{e1}(z) \quad (3.23)$$

$$M_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2(z) \cdot z \cdot dz \quad (3.24)$$

Boşaltma aşamasında, parça üzerindeki yüklemeler kaldırılır ve gerilim gevşemesi sonrasındaki gerilmeye tamamen salındıktan sonra iş parçasının geri yaylandığı gözlemlenecektir. İş parçasının konturundaki değişim, yani geri yaylanma iş parçası üzerinde gerilim gevşemesi sonrasında kalan moment ile doğrudan ilişkili olacaktır. Yükler kaldırıldıktan sonra iş parçası üzerinde bir moment oluşmayacağından ve M_3 değeri sıfır olacağından geri yaylanma değeri denklem 3.25 yardımı ile hesaplanabilir. Δk konturdaki değişimi ve I ise atalet momentini temsil etmektedir.

$$\Delta k = \frac{M_3 - M_2}{EI} \quad (3.25)$$

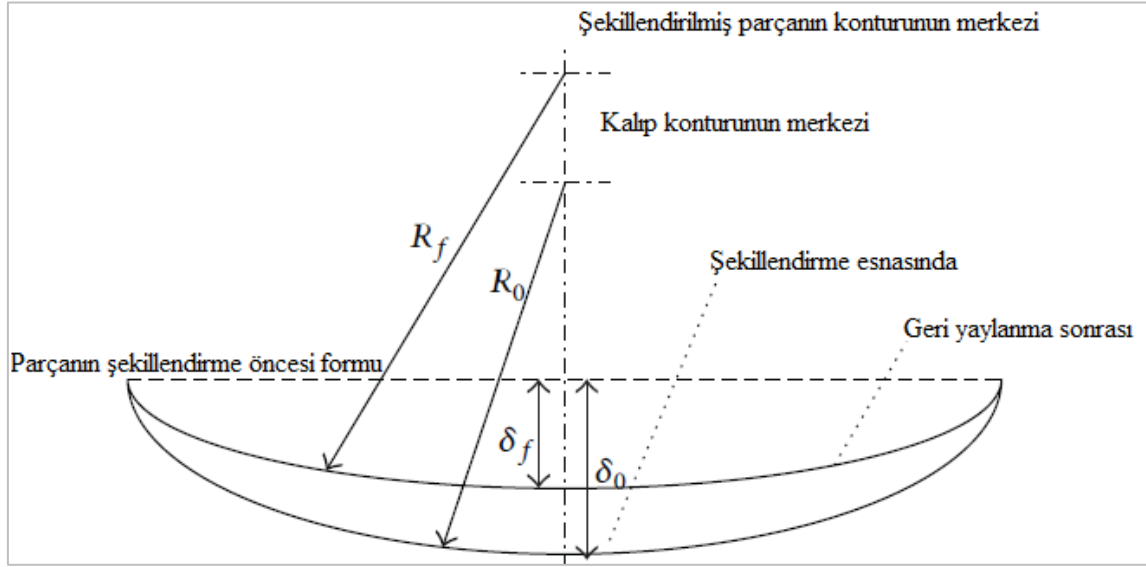
$$k_1 - k_0 = \Delta k \quad (3.26)$$

$$\frac{\Delta k}{k_0} \quad (3.27)$$

Denklem 3.27 geri yaylanma oranını vermektedir.

Bu oranın sıfır olması iş parçası üzerinde geri yaylanma olmadığını, oranın bir olması ise tamamen geri yaylanma olduğunu göstermektedir. Sürünme yaşlandırma prosesinde geri

yaylanma oranının hesaplanması için gerilim gevşemesi davranışı, gerilim-gerinim kondisyonu ve diğer sürünme parametreleri oldukça iyi bilinmelidir ve malzeme modellemesi gerçekleştirilmelidir.



Şekil 3.18. Defleksiyon ve yarıçap metotlarına göre geri yaylanma [59]

Defleksiyon metoduna göre geri yaylanma iş parçası ve şekillendirileceği kalıp arasındaki maksimum yükseklik ve şekillendirme sonrası aynı nokta arasındaki farkı dikkate almaktadır. Denklem 3.28 ile defleksiyon metodunda uygulanan geri yaylanma formülü verilmiştir. SB geri yaylanma oranını temsil etmektedir.

$$SB = \left(1 - \frac{\delta_f}{\delta_0}\right) \times 100\% \quad (3.28)$$

Geri yaylanma oranını etkileyen pek çok parametre mevcuttur. Bunlar aşağıda belirtilmiştir.

- Elastisite modülü
- Malzeme kalınlığı
- Parça konturu ve parçaya ait diğer geometrik isterler (çift eksen de konturu olması yada tek eksen de konturu olması durumu)
- Gerilim gevşemesi karakteristiği
- Şekillendirme basıncı
- Vakum torbalama hassasiyeti

- Proses süresi
- Proses sıcaklığı

Havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında sürünme yaşlandırma prosesi ile büyük ölçekli ve kompleks geometrili parçaların üretimi için kullanıldığından geri yaylanma oranının parça üretimi öncesinde belirlenmesi önemlidir. Geri yaylanma davranışının kalıp tasarımı ve ilk parça üretimi öncesinde doğru tahmin edilmesi, malzeme davranışının bilinmesi deneme üretimi maliyetlerini ortadan kaldıracaktır. Ürünün doğruluk ve kalite oranını artıracaktır. Aksi takdirde çok sayıda deneme üretimleri yapılarak optimum kalıp geometrisi belirlenebilir. Fakat hatalı bir kalıp üretimi gerçekleştirilir ve yeniden işlenmesi mümkün olmazsa büyük ölçekli bir kalıp hurda edilecektir. Maddi anlamda hiçbir şirketin kabul etmek istemeyeceği bir maliyet kalemi oluşmaktadır. Ayrıca hatalı üretilen ürünlerin rötuş işlemleri yapılarak tekrar kullanılabilir hale getirilmesi ise hem mekanik özellikleri zayıflatmakta hem de aerodinamik açıdan negatif etkiler oluşturmaktadır. Havacılık uygulamalarında elle şekillendirme prosesi rötuş aşamasında kullanılan efektif yöntemlerden biridir. Fakat bu prosesin dezavantajlarından biri lokal bölgelere uygulanmasından dolayı profil toleransının dışına çıkılabiliyor olmasıdır. Diğer dezavantajlarından biri de ilki ile ilişkili olarak yüzeyde oluşan dalgalanmalar neticesinde aerodinamik bir kayıp olarak karşımıza çıkmaktadır. Tasarım aşamasında belirlenen yüzey akış katsayısının dışında bir durum elde edilmesi ilgili hava aracını olumsuz olarak etkilemektedir. Tüm bu süreçler iş parçalarının mekanik özellikleri ve aerodinamik özellikleri dışında proje yönetimi açısından da takvimsel olarak da olumsuz etkiler yaratmaktadır. Kalıpların yeniden üretilmesi yada rötuşlanması, kalıp boyutları dikkate alındığında üretim safhaları ve lojistik anlamda uzun süreceğinden takvime etki etmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Alüminyum 2024 T3 alaşımının sürünme yaşlandırma şekil verme prosesi ile T81 temperine yaşlandırılıp ve aynı zamanda şekillendirildiği deneysel çalışmaların anlatıldığı bölümdür. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki en büyük fenomenlerden biri olan geri yaylanma davranışına proses basıncının ve malzeme kalınlığının etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

4.1. Malzeme

Deney numuneleri için SAE AMS QQ-A-250/5 standardına uygun havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 2024-T3 alüminyum alaşım sac malzemeler kullanılmıştır. Malzemenin fiziksel özellikleri Çizelge 4.1’de, kimyasal kompozisyonu ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 2024 T3 fiziksel özellikleri

Yoğunluk	2,78 g/cm ³
Erime sıcaklığı	502 °C
Isıl genleşme katsayısı	23x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Elastisite modülü	73.1 GPa
Isıl kapasite	121 W/mK
Elektriksel iletkenlik	%30 IACS
Akma dayanımı	310 MPa
Çekme dayanımı	448 MPa
Uzama [%]	12%

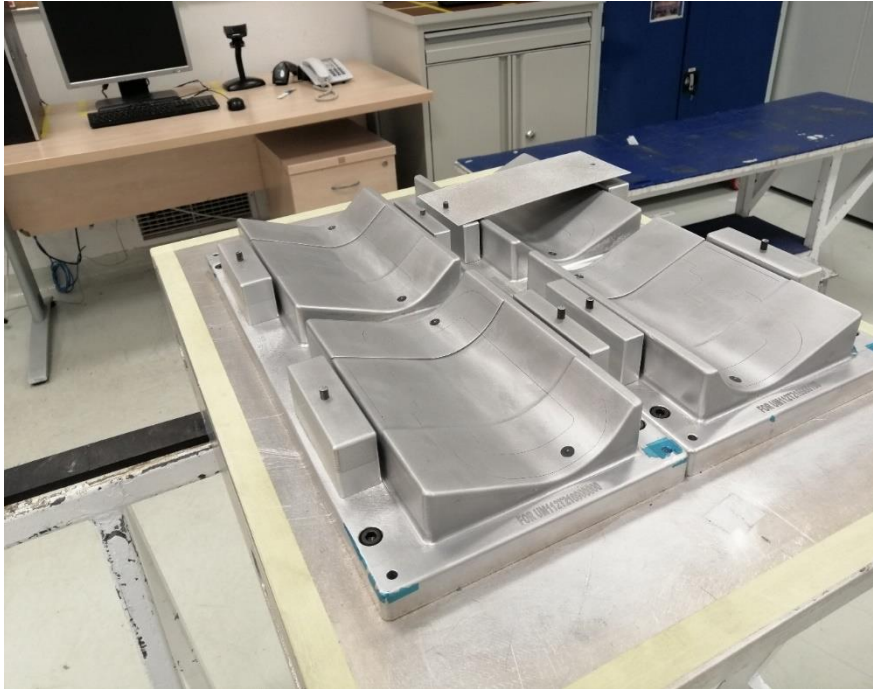
Çizelge 4.2. Al 2024’ün kimyasal kompozisyonu

Element	Ağırlıkça Bulunma Oranı [%]	
	Minimum	Maksimum
Bakır	3,80	4,00
Magnezyum	1,20	1,80
Manganez	0,30	0,90
Demir	-	0,50
Silikon	-	0,50
Krom	-	0,10
Çinko	-	0,25
Diğer alaşım elementleri	-	0,15
Alüminyum	-	Geriye kalan

4.2. Kalıp Tasarımı

Kalıp tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken çeşitli parametreler vardır. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde kullanılacak olan şekillendirme kalıpları tasarımı öncesinde iş parçasının malzemesi ve geometrisi dikkate alınır. Geometri terimi açıklanacak olursa parçanın konturunun yarı çapı ve tek eksende yada çift eksende konturlu olması, iş parçasının boyu, genişliği ve kalınlığı dikkate alınmalıdır. Proses özelinde de dikkate edilmesi gereken hususlar vardır. Bunlar ise prosesin gerçekleştirileceği sıcaklık, iş parçası üzerine uygulanacak olan gerilme ve kritik aşamalardan biri olan vakum torbalama tekniği dikkate alınmalıdır. Bu doğrultuda alüminyum 6061 alaşım T651 plaka kalıp malzemesi olarak tercih edilmiştir.

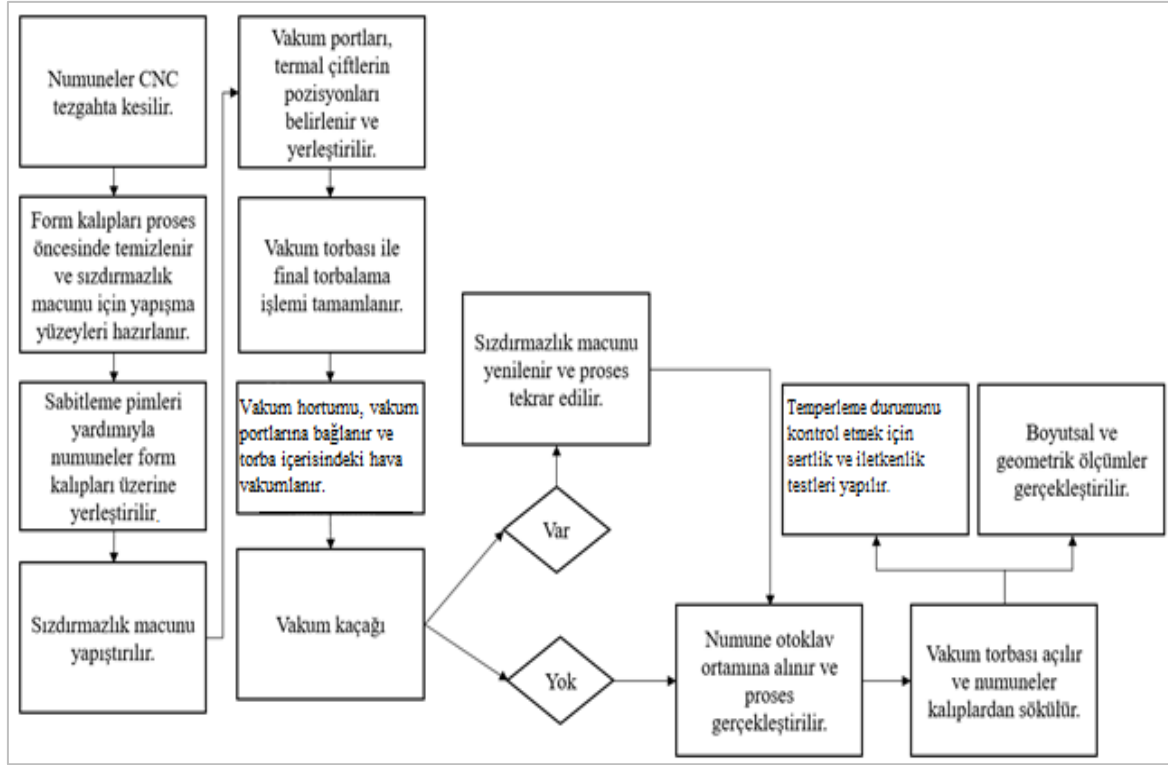
Sürünme yaşlandırma prosesinin süresini, iş parçasının final temperi belirlemektedir. Gerçekleştirilen deneylerde 2024 alüminyum alaşımı T3'den T81'e yaşlandırılmaktadır. Proses süresinin uzun olmasından dolayı Resim 4.1'deki gibi dört gözlü bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Böylece deneyler dörder set halinde gerçekleştirilmiştir. İş parçalarının proses esnasında kayma problemi yaşamaması için pimler tercih edilmiştir. Kalıp gravürlerinin yanında kalan düz alan ise vakum torbalama yapılırken sızdırmazlık bandının kullanılması için tasarlanmıştır.



Resim 4.1. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde kullanılacak olan kalıplar

4.3. Proses Akışı

Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi, şekillendirilmemiş halde bir sacın kesilmesi aşaması ile başlamaktadır. CNC router, CNC punch veya istenen tolerans değerlerine uygun bir kesim tekniği ile iş parçası net ölçülerine kesilmektedir. Tesviye işlemleri gerçekleştirilerek iş parçasının etrafındaki çapaklar temizlenmelidir. Aksi durumda vakum torbası üzerinde delikler açılmasına ve vakum etkisinin ortadan kalkarak iş parçasının hurda olması ile sonuçlanabilmektedir. Kesim işlemleri yapılırken zamanı efektif yönetebilmek için şekillendirme kalıbının da yüzeyinde temizlik işlemleri gerçekleştirilir. Yapışma yüzey kalitesinin artırılması için sızdırmazlık bandının geleceği bölgeler zımparalanıp ardından kimyasal temizleyiciler ile temizlenmelidir. Proses süresi ve sıcaklığı yaşlandırma süresi ve sıcaklığına eşittir. Bu yüzden vakum torbalama prosesinde kullanılacak olan sarf malzemeler bu sıcaklıklara dayanacak şekilde seçilmelidir. Parçalar kalıp üzerine yerleştirilip vakum torbalama işlemleri yapılırken termal çiftler ve vakum portları da yerleştirilir. Vakum torbalama işlemi tamamlandıktan hemen sonra sızdırmazlık kontrolleri yapılmalıdır. Seyyar vakum motorları kullanılarak torba altındaki hava vakumlanmalıdır. Vakum değerleri vakum ölçüm cihazı üzerinden ölçülür. Sızdırmazlık söz konusu ise vakum torbalama prosesi tekrar gerçekleştirilir. Son aşama olan otoklavda şekillendirme aşaması gerçekleştirilmeden hemen önce otoklav ortamına alınan parçaların takibini yapabilmek adına termal çift ve vakum bağlantıları yapılır. Proses esnasında otoklav içerisine girilerek fiziksel bir müdahale gerçekleştirilemez. Bu sebeple vakum torbasının açılıp açılmama durumu, standartlarda belirlenen sıcaklık bandında ısıl işlemin gerçekleşme durumu ve iş parçası üzerindeki pozitif basınç görüntülenebilir. Bunlar çevrim raporu ismi verilen monitör loglarıyla bilgisayar ortamında kaydedilmektedir. Proses sonlandığında vakum torbası kaldırılır ve iş parçaları kalıplar üzerinden sökülür. Isıl işlem durumunu teyit edebilmek için sertlik ve iletkenlik testleri yapılır. Geometrik isterlerin kontrolü içinse CMM yardımı ile ölçümler gerçekleştirilir. Kompleks bir geometri değilse parçanın net formuna ait şablonlar ve diğer ölçüm aletleri ile de kontrol edilebilir. Şekil 4.1’de özet proses akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.1. Proses akışı

4.4. Deney Parametrelerinin ve Sarf Malzemelerin Belirlenmesi

Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde üretilecek olan parçaların nihai temper durumları mutlaka belirli olmalıdır. Aksi durumda havacılık otoriteleri ürünü kalifiye edemeyeceğinden uçan bir parça haline gelemmez. Bu yüzden iş parçalarının final kondisyonlarındaki temperleri mutlaka parçaya ait ilgili dokümanlar içerisinde verilir. Isıl işlem durumları AMS2770 standardına göre tanımlanmaktadır. 2024 malzemenin çeşitli mekanik avantajlarından dolayı kanat ve gövde panellerinden sıklıkla tercih edilmektedir. Bu sebeple tez sonucunda elde edilecek olan bilgiler ışığında hava araçlarına ait kompleks geometrili panellerin sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde gerçekleştirilecek olan kalıp tasarım süreçlerine katkı sağlayacağından 2024-T3 alüminyum sacın T81'e yapay yaşlandırılması ve şekillendirilmesi olarak belirlenmiştir.

AMS 2770'e göre alüminyum 2024 T3 temperindeki bir sacın T81 temperine dönüşmesi için verilen sıcaklık ve süre 190 °C ve 10-12 saattir. Bu sebeple proses süresi ve sıcaklığı AMS 2770'e göre belirlenmiştir.

Proses basıncı ve kalınlığın geri yayılma üzerindeki etkilerinin incelenmesi için prosesin gerçekleştirileceği otoklavın kapasitesi dahilinde proses basınçları 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa olarak belirlenmiştir. Malzeme kalınlıkları ise gövde ve kanat panellerinde yaygın olarak tercih edilen 0,810, 1,016, 1,270, ve 1,600 mm olarak seçilmiştir.

Deneylerin gerçekleştirileceği sıcaklık, basınç ve süre belirlendikten sonra vakum torbalama aşaması için kritik olan vakum torbası, sızdırmazlık bandı ve vakum prosesinin homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan battaniye seçimi yapılmıştır. Vakum torbası, battaniye ve sızdırmazlık bandına ait teknik dokümanlar EK-1, EK-2 ve EK-3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sarf malzeme listesi

Vakum Torbası	Battaniye	Sızdırmazlık Bandı
DPT-1000	ULTRAWAVE 1332	A-800-3G

4.5. Numunelerin Hazırlanması

SAE AMS QQ-A-250/5 standardına uygun 0,810, 1,016, 1,270, ve 1,600 mm kalınlıklarındaki 2024-T3 alüminyum alaşımı sac lar GFM CNC Router ile 100x225 mm dikdörtgen numuneler kesilmiştir. Yan yüzeylerindeki ve pim deliğindeki çapaklar ise raspa ile alınmıştır. Resim 4.2’de kesilmiş bir numune fotoğrafı verilmiştir.

Çizelge 4.4. Toplam numune adedini veren tablo

Numune Kalınlığı [mm]	Deneylerde kullanılacak numune adedi				İhtiyaç adedi
	0,6 MPa	0,7 MPa	0,8 MPa	0,9 MPa	
0,810	2	2	2	2	8
1,016	2	2	2	2	8
1,270	2	2	2	2	8
1,600	2	2	2	2	8
Toplam numune adedi					32



Resim 4.2. CNC router ile kesilmiş numune fotoğrafı

4.6. Deney Tasarımı

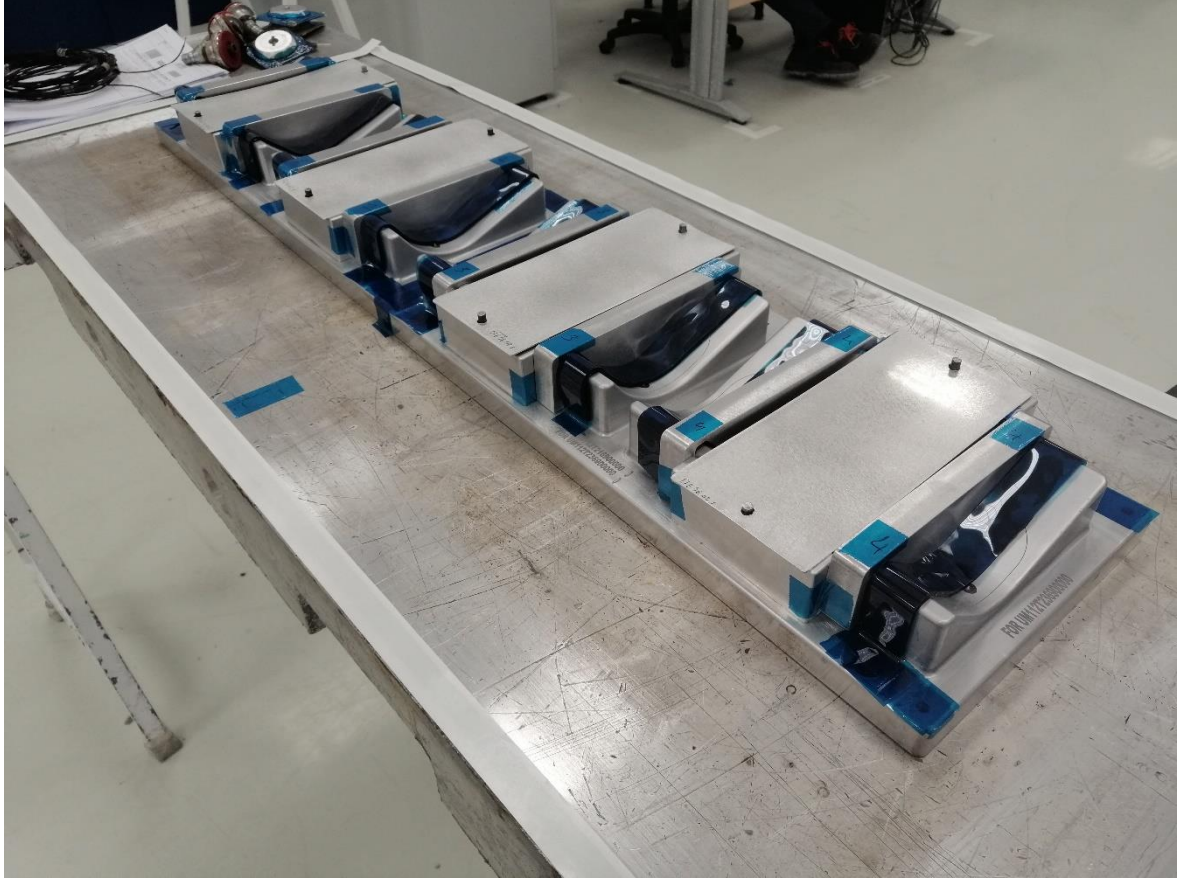
Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm kalınlıklarındaki numuneler sırası ile 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa yayılı yükleme altında şekillendirilecek şekilde deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. 0,810 mm kalınlığındaki dört numune dört farklı çevrime girecektir. Aynı şekilde diğer kalınlıklardaki numunelerde 4 farklı çevrime girecektir ve toplamda 16 deney gerçekleştirildikten sonra ilk çevrim sonuçlandırılacaktır. Ardından birinci çevrim ile özdeş ikinci çevrim gerçekleştirilecektir. Örneğin 1 numaralı deney ile 17 numaralı deney özdeştir. Elde edilen verilerin doğruluğunu sağlamak ve prosesin tekrarlanabilirliğini göstermek adına özdeş deneyler gerçekleştirilmiştir. Toplam deney sayısı 32'dir.

Çizelge 4.5. Deneylerin listesi

Deney No		Numune Kalınlığı [mm]	Otoklav Basıncı [MPa]
1	17	0,810	0,6
2	18	1,016	0,6
3	19	1,270	0,6
4	20	1,600	0,6
5	21	0,810	0,7
6	22	1,016	0,7
7	23	1,270	0,7
8	24	1,600	0,7
9	25	0,810	0,8
10	26	1,016	0,8
11	27	1,270	0,8
12	28	1,600	0,8
13	29	0,810	0,9
14	30	1,016	0,9
15	31	1,270	0,9
16	32	1,600	0,9

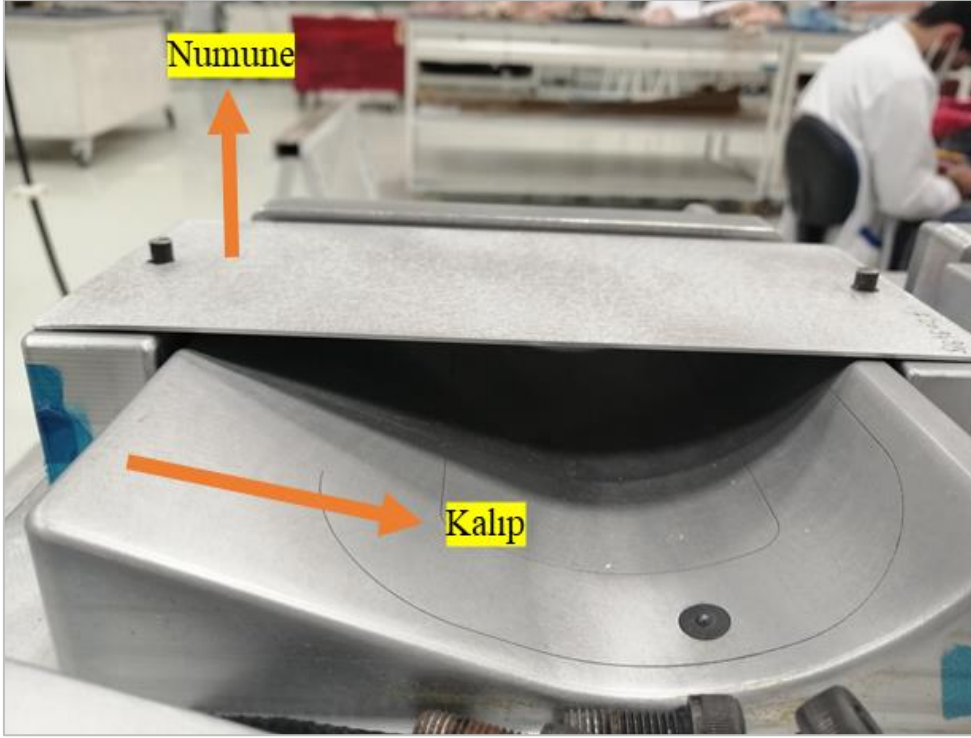
4.7. Deney Yöntemi

32 adet numunenin kesimleri gerçekleştirilmiştir. Her otoklav çevriminde dört numune şekillendirilmektedir ve aynı anda otoklav içerisine giren dört numune aynı proses basıncı, sıcaklığı ve süreye maruz kalmıştır. Bu sebeple sırası ile her çevrimde 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm kalınlığında birer numune kalıp üzerine pozisyonlanmıştır.

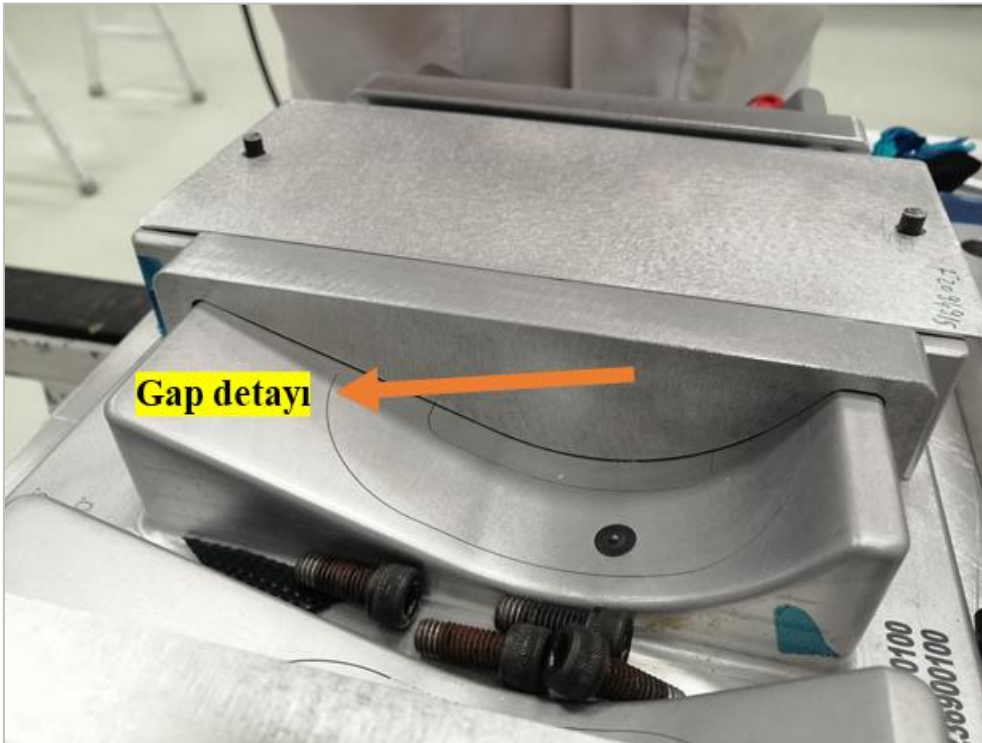


Resim 4.3. Kalıp üzerine pozisyonlanmış sürünme yaşlandırma şekillendirme numuneleri

Numuneler Resim 4.3'teki gibi kalıp üzerine pozisyonlandıktan sonra gap kapama ismi verilen ve Resim 4.5'te gösterilen kalıp detayları kalıp ve parça arasındaki boşlukları kapatmak için kullanılmıştır. Kullanılmaması durumunda vakum torbalama sonrasında vakum motorunun açılmasını takiben parçayla kalıp arasına giren vakum torbası otoklav içerisinde pozitif basıncında etkisiyle sızdırmazlık macunlarının üzerinden koparak torbanın açılmasına sebebiyet verecektir.

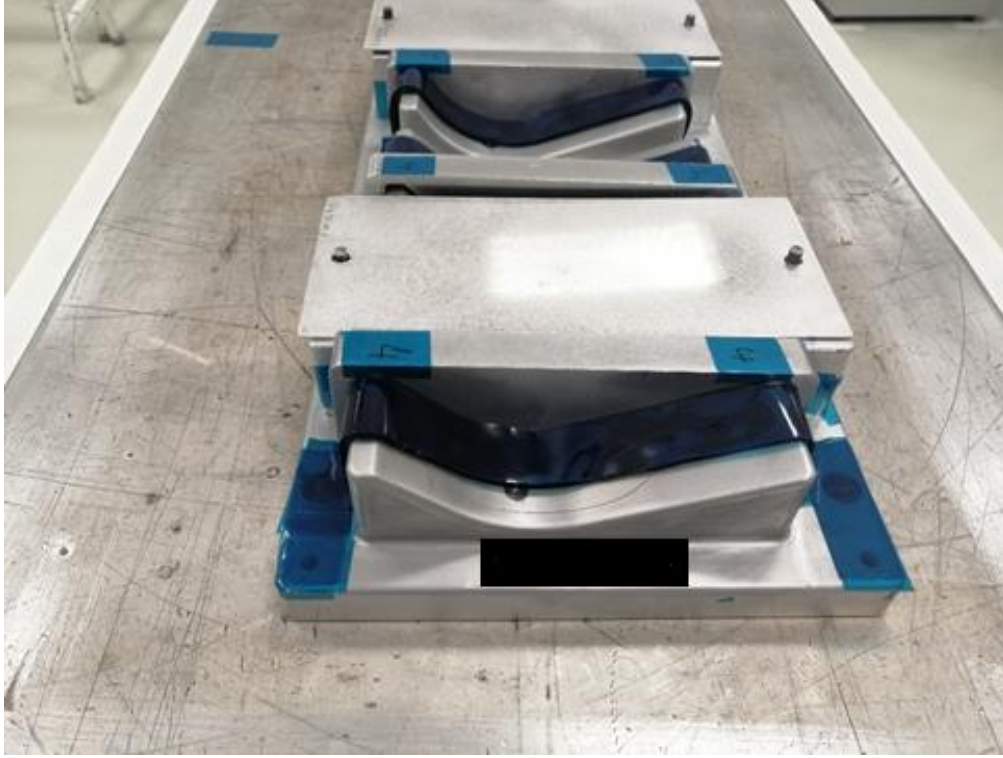


Resim 4.4. Kalıp ve numune arasındaki boşluk



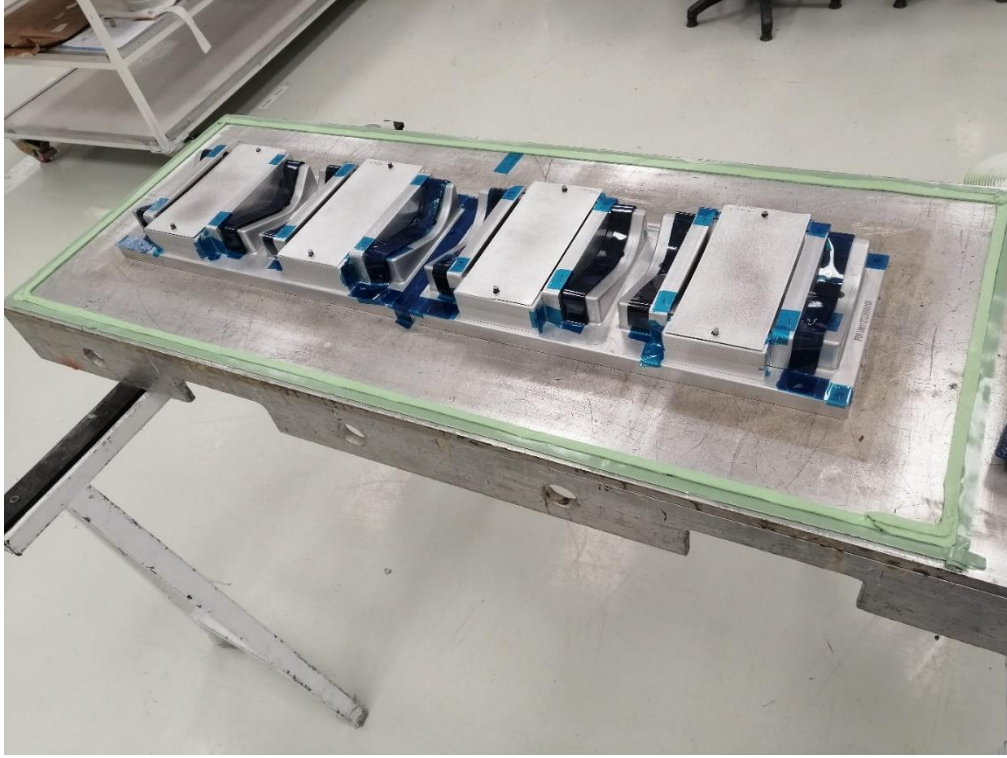
Resim 4.5. Kalıp ve numune arasındaki boşluğu kapatmak için kullanılan gap detayı

Gap detayı ve kalıp arasındaki oluşabilecek olası boşluğun vakum torbasını olumsuz etkilememesi için Resim 4.6'daki gibi teflon bant kullanılmıştır.



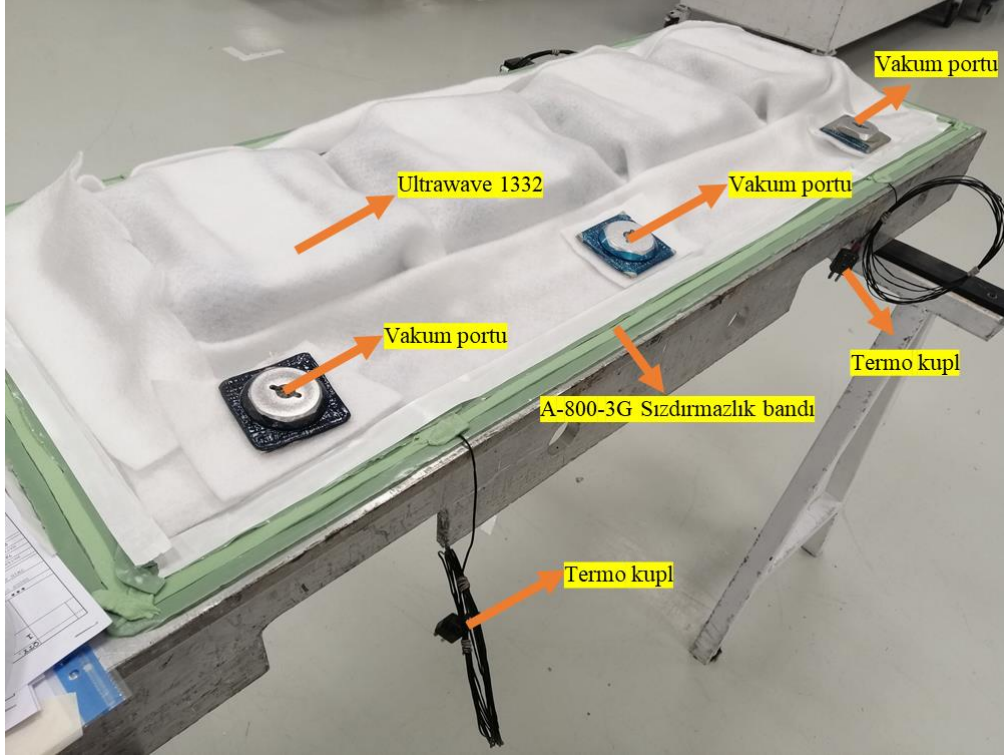
Resim 4.6. Teflon bant kullanımı

Teflon bantların yapıştırılmasından sonra vakum torbalama aşamasına geçilmiştir. İlk olarak sızdırmazlık bandı olarak kullanılacak olan A-800-3G alt plakayı çepeçevre saracak şekilde Resim 4.7’de gösterildiği gibi üç tur yapıştırılmıştır. Sızdırmazlık bantlarını yapıştırmadan önce yapışma kalitesini artırmak için yapıştırma yüzeyi zımparalanıp kimyasal temizleyiciler ile temizlenmiştir.



Resim 4.7. Sızdırmazlık bandının yapıştırılması

Sızdırmazlık bandı yapıştırıldıktan sonra vakum portları ve termal çiftler yerleştirilmiştir. Vakum portlarının pozisyonları belirlenirken homojen bir vakumlama işleminin gerçekleştirilebilmesi için kalıbın uzun kenarı boyunca eşit aralıklı 3 adet vakum portu yerleştirilmiştir. Fakat vakum portlarının yeri bu aşamada sabitlenmemektedir. Vakum torbası yapıştırılırken vakum torbası üzerine açılan boşluklardan erkek portlar bağlanıp sızdırmazlık bandı ile bağlantısı tamamlanmaktadır. Termal çiftler ise yerleştirilirken dikkat edilen husus farklıdır. Otoklavda tek eksenli hava akışı mevcuttur. Çıkış noktasına yakın olan taraf diğer taraftan daha hızlı ısındığı için her iki uçtaki ısınma süreleri farklı olacaktır. Bu sebeple en yakın ve en uzak parçalara göre termal çiftler yerleştirilmiştir. Resim 4.8’de ise vakum portları, termal çift, sızdırmazlık bandı ve battaniyenin görselleri mevcuttur.



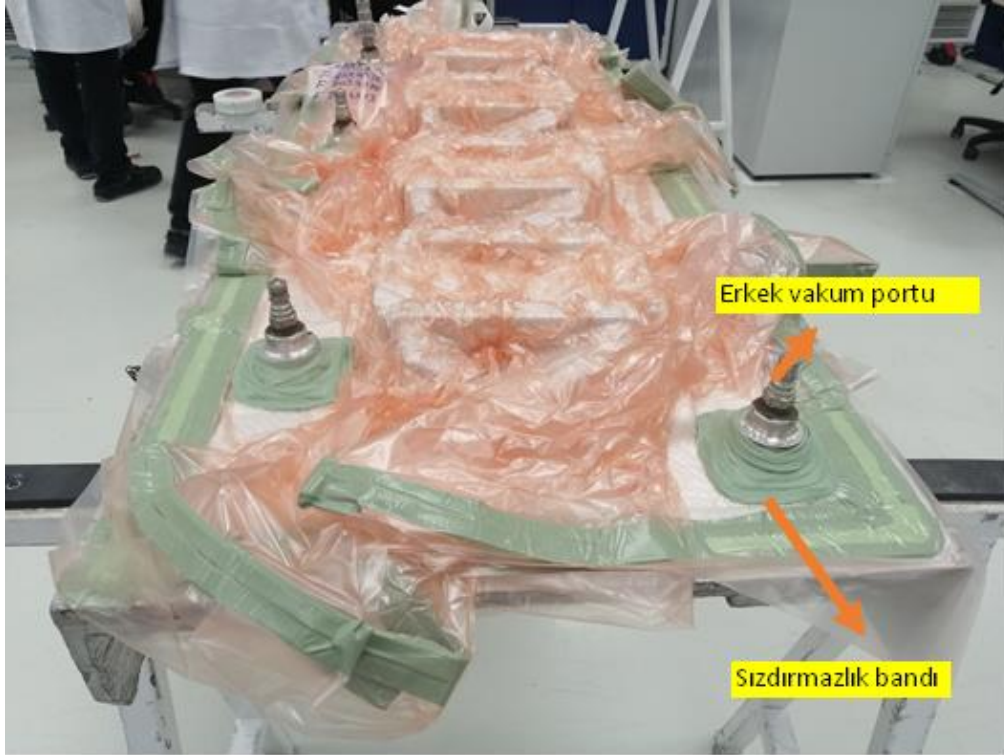
Resim 4.8. Termal çift, dişi vakum portu ve battaniyenin yerleştirilmesi

Vakum torbalama aşamasına gelinmiştir. Vakum torbalamasını yaparken torbanın pozitif otoklav basıncı ve proses süresince vakum motorunun negatif basıncı etkisinde kalacağı düşünülmüştür. Bu sebeple vakum torbasının ölçüleri alt plaka yüzey alanında daha fazla belirlenmiştir. Sızdırmazlık bantlarına denk gelen bölgelerde ve parçanın da şekillendirme aşamasında hareketiyle torbanın yırtılması ve açılması gibi problemlerin önüne geçmek için Resim 4.9'daki gibi yerleştirilmiştir.



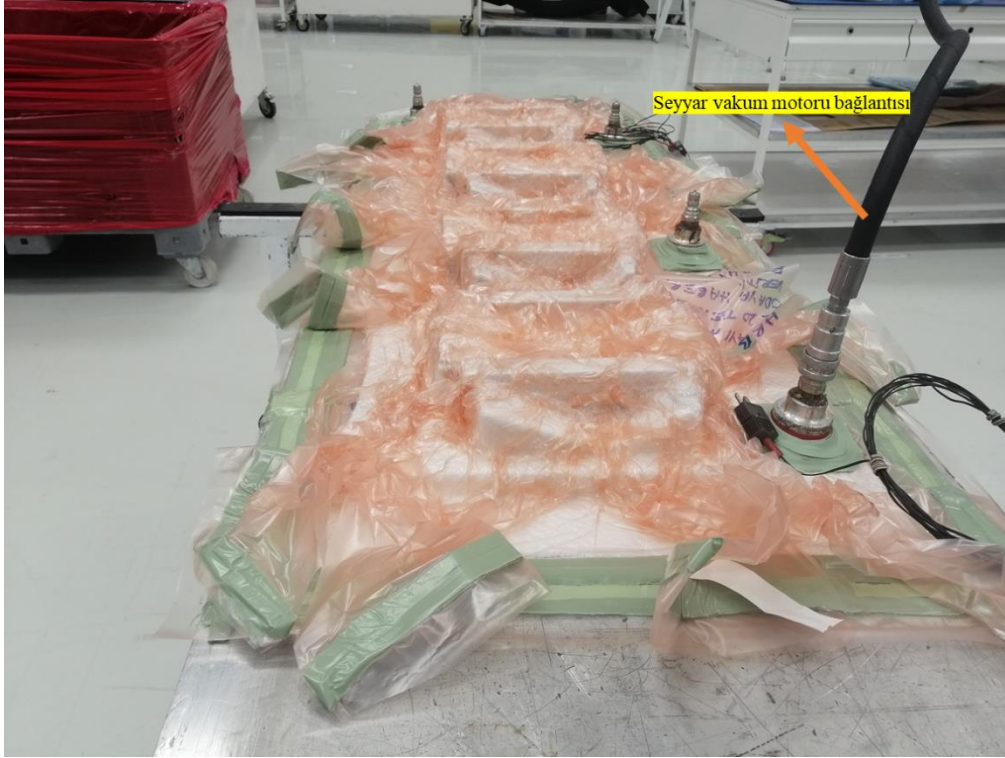
Resim 4.9. Vakum torbasının yapıştırılması

Vakum torbası yapıştırıldıktan sonra erkek vakum portlarının bağlanacağı şekilde torba üzerinde boşluklar oluşturulmuştur. Erkek vakum portları bağlandıktan sonra olası vakum kaçaklarının önüne geçmek için torba ve vakum portu arasında Resim 4.10'daki gibi sızdırmazlık bandı kullanılmıştır.



Resim 4.10. Vakum portlarının kalıcı bağlantısının yapılması ve sızdırmazlık bandı kullanımı

Seyyar vakum motoru ile vakum portlarına bağlantı yapılmıştır. Vakum motoru çalıştırılarak vakum torbalama tekniğinin durumu kontrol edilmiştir. Herhangi bir kaçak gözlemlenmemiştir. Bu durum torbalama tekniğinin doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Seyyar vakum motoru bağlantısı ise Resim 4.11’de verilmiştir.



Resim 4.11. Seyyar vakum motoru ile vakum torbasında kaçak kontrolü

Vakum kontrollerinin tamamlanmasından sonra numuneler otoklava alınmıştır. Otoklav içerisinde vakum motoru bağlantısı ve termal çiftlerin bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bağlantılar sayesinde otoklav kontrol ünitesi üzerinden her bir dakika için veri kaydı yapmaktadır. Proses esnasında otoklav içerisine fiziksel olarak müdahale etmek iş güvenliği açısından mümkün değildir. Bu sebeple proses monitör üzerinden kontrol edilmektedir.

Tüm prosesler 1 m çapında ve 2 m uzunluğundaki 1271-1413 model numaralı 2014 yılında üretilmiş olan otoklavda gerçekleştirilmiştir. Otoklavın görseli resim 4.12’de verilmiştir.



Resim 4.12. Proseslerin gerçekleştirildiği otoklav

Otoklavın dakikadaki ısınma hızı 5°C 'ye kadar çıkabilmektedir ve sıcaklık sabitlendikten sonraki toleransı ise $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'dir. AMS 2770'e göre hem ısınma hızı hem de sıcaklık toleransı, toleranslar içerisinde. Parçaların proses süreleri tamamlandıktan parçalar dış ortama alınmıştır. Vakum torbası sökülüştür. Vakum portları ve termal çiftler sökülüştür. Parçaların üretimleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Söküm aşamalarını ve proses sonucunda çıkan parçalara ait resimler sırası ile Resim 4.13, Resim 4.14, Resim 4.15 ve Resim 4.16'da verilmiştir.



Resim 4.13. Çevrimi tamamlanıp otoklav dışına alınan numuneler



Resim 4.14. Vakum torbası, termal çift ve vakum portları söküldükten sonra



Resim 4.15. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi ile şekillendirilmiş numuneler



Resim 4.16. Kalıptan çıkarılmış şekillendirilmiş numuneler

Şekillendirilmiş olan numunelerin geometrik ve boyutsal ölçümleri, sertlik ve iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Geometrik ve boyutsal ölçümlerin gerçekleştirilmesi için CMM kullanılmıştır. Defleksiyon metoduna göre geri yaylanma oranları ölçülmüştür.

Sertlik ve iletkenlik ölçümleri ise sırası ile ASTM E10 ve ASTM E1004 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 2024 T81' e yaşlandırılmış olan alüminyum alaşımının sertlik ve iletkenlik değerleri için AMS 2658 referans alınmıştır. Uygun sertlik ve iletkenlik değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Sertlik ölçümleri için Mitutoyo 810-203D sertlik ölçüm cihazı kullanılarak sertlikleri ölçülmüştür. İletkenlik ölçümleri ise Verimet M4900C ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm sonuçları Bölüm 4.8'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.6. 2024 T81 alüminyum alaşımın sertlik ve iletkenlik değerleri, AMS 2658

Alaşım	Temper	Malzeme Kalınlığı	Sertlik HRB	Sertlik HRE	Sertlik HRH	Sertlik HR15T	İletkenlik %IACS
2024	T81	Tüm kalınlıklarda	65-88	97	-	-	35-45



Resim 4.17. Sertlik ölçüm cihazı



Resim 4.18. İletkenlik ölçüm cihazı kalibrasyon kontrolü



Resim 4.19. Numunelerin sertlik ölçümleri

4.8. Deney Sonuçları

Toplamda 32 deney gerçekleştirilmiştir. İlk 16 deney ve son 16 deney birbirinin tekrarı niteliğindedir. Tekrarlı bir çalışma olmasının amacı sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi ile üretilen ürünlerin sonuçlarının tekrarlanabilirliğini gösterebilmek ve yapılan çalışmaların doğruluğunu kontrol etmektir.

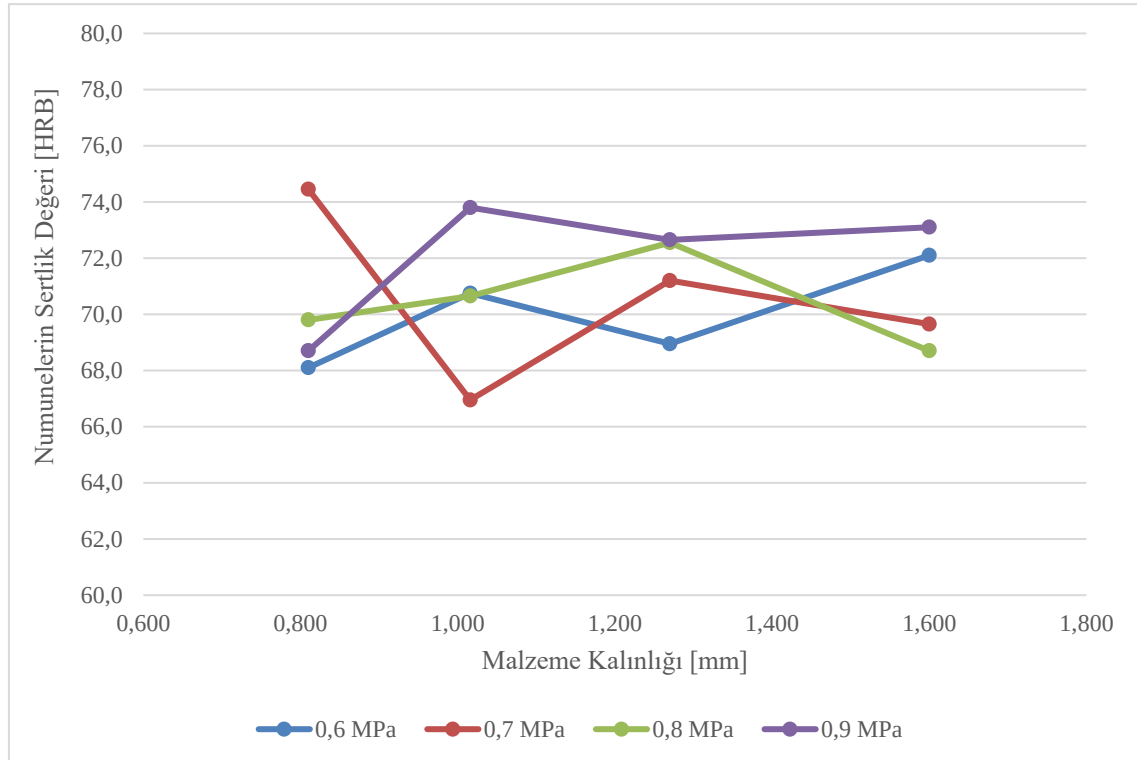
Gerçekleştirilen deneylerin sonuçları çizelgeler ve grafikler halinde detaylı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışmalar neticesinde alüminyum 2024 T3 bir sacın T81'e yaşlandırılmış ve şekillendirilmiştir. Çizelge 4.6'da 2024 T81 bir numunenin iletkenlik ve sertlik değerleri AMS 2658 referans alınarak paylaşılmıştır. Numunelerin sertlik değeri 65-88 HRB aralığında olması gerekirken iletkenlik değeri %IACS cinsinden 35-45 aralığında olmalıdır.

Numunelerin sertlik ölçümleri ASTM E10 standardına uygun olarak mitutoyo 810-203D sertlik ölçüm cihazında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7'de tüm deneylerin sertlik ölçüm sonuçları ve standart sapma değeri paylaşılmıştır.

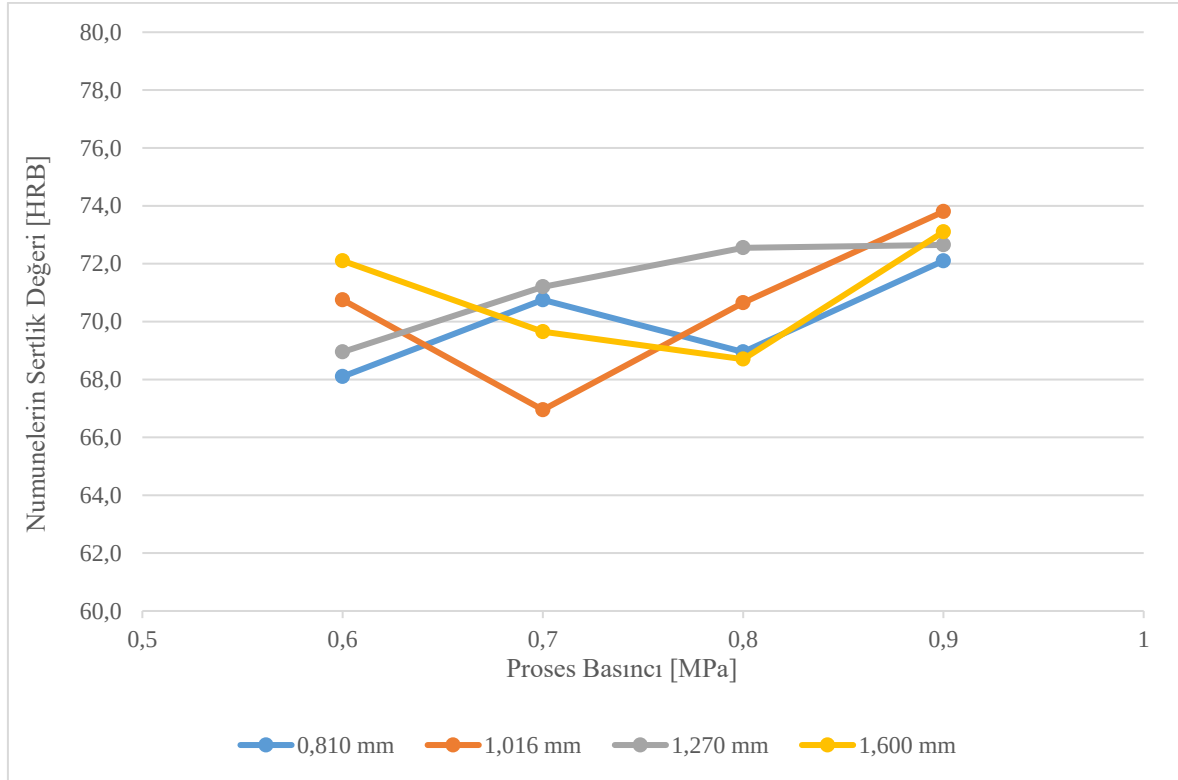
Çizelge 4.7. Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları

Deney No	Deney No	Sertlik [HRB]	Sertlik [HRB]	Ortalama Sertlik [HRB]	Standart Sapma
1	17	67,9	68,3	68,1	0,3
2	18	70,3	71,2	70,8	0,6
3	19	68	69,9	69,0	1,3
4	20	72,6	71,6	72,1	0,7
5	21	74,3	74,6	74,5	0,2
6	22	66,7	67,2	67,0	0,4
7	23	71,2	71,2	71,2	0,0
8	24	69,9	69,4	69,7	0,4
9	25	69,6	70	69,8	0,3
10	26	70,2	71,1	70,7	0,6
11	27	72,8	72,3	72,6	0,4
12	28	69,3	68,1	68,7	0,8
13	29	67,3	70,1	68,7	2,0
14	30	74	73,6	73,8	0,3
15	31	72,8	72,5	72,7	0,2
16	32	73	73,2	73,1	0,1

Ölçümleri gerçekleştirilen deney numunelerinin sonuçları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te HRB cinsinden verilmiştir.



Şekil 4.2. Numunelerin sertlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi



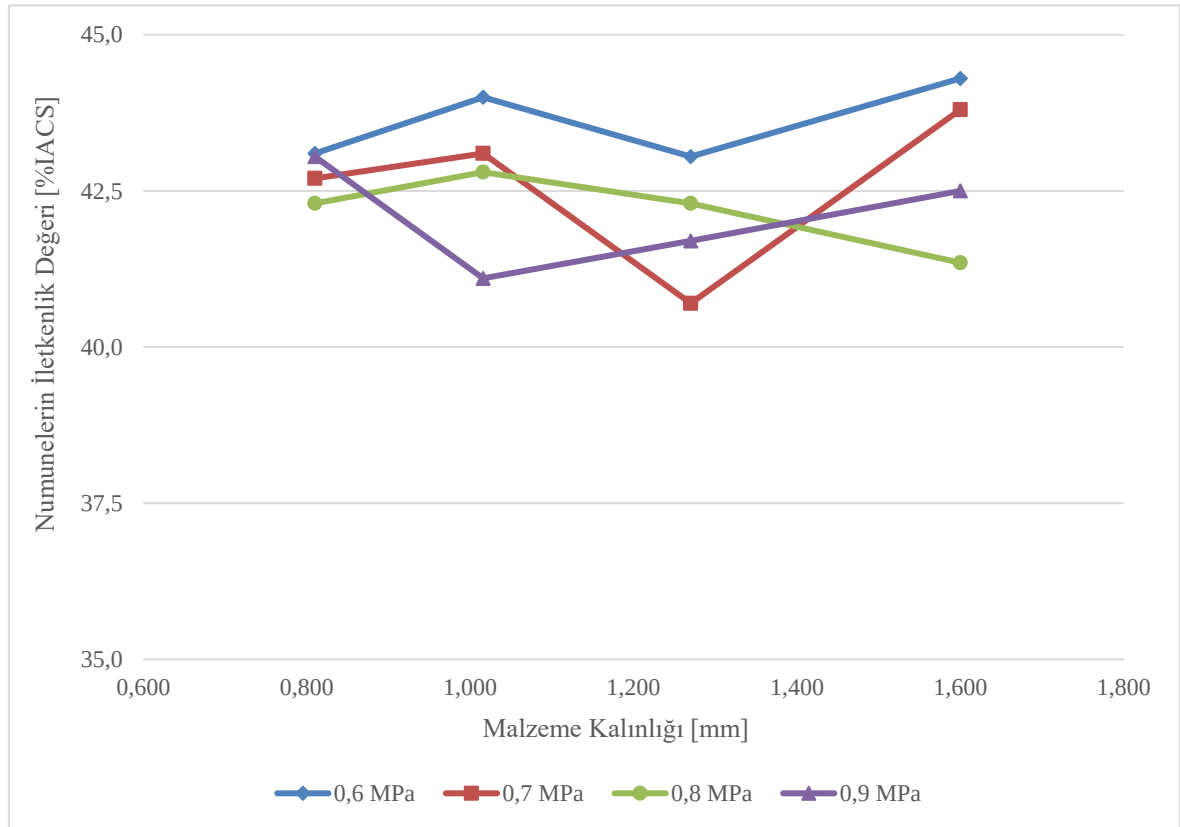
Şekil 4.3. Numunelerin sertlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te numunelerin sertlik değerleri, malzeme kalınlığı ve şekillendirme basıncıyla olan ilişkileri verilmiştir. Numunelerin sertlik değerlerini etkileyen parametre proses sıcaklığı ve süresidir. Tüm numuneler 190 °C'de ve 12 saatlik çevrime tabi tutulmuştur. Bu sebeple tüm numuneler AMS2770'e göre yaşlandırılmış ve numunelerin AMS 2658'e göre sertlik değeri kontrol edildiğinde 2024 T81 temperindeki bir sacın olması gereken sertlik değerinin verildiği aralık içerisindeydir.

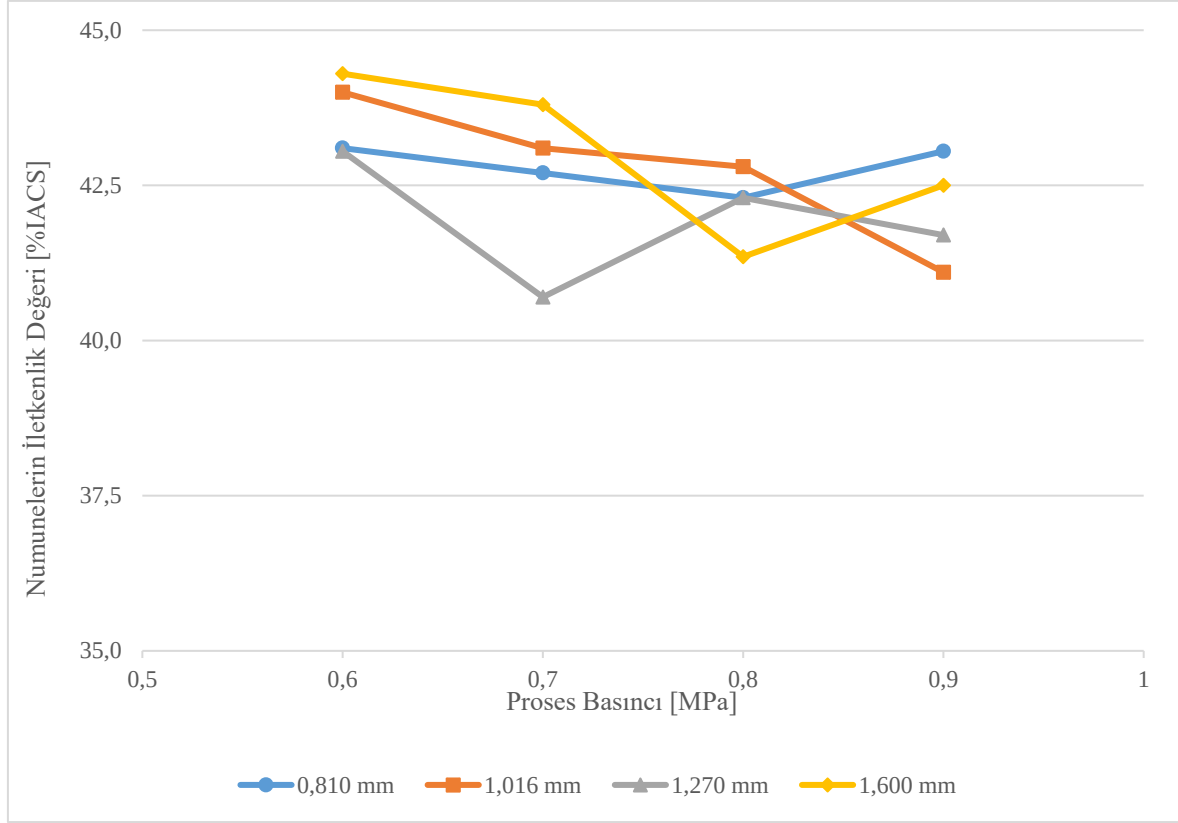
ASTM E1004 standardına uygun olarak Verimet M4900C iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.8, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de deney numunelerinin iletkenlik değerleri % IACS cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.8. Numunelerin iletkenlik ölçüm sonuçları

Deney No	İletkenlik [%IACS]	Deney No	İletkenlik [%IACS]	Ortalama İletkenlik [%IACS]	Standart Sapma
1	44,1	17	42,1	43,1	0,7
2	44,2	18	43,8	44,0	0,1
3	41,8	19	44,3	43,1	0,9
4	44,5	20	44,1	44,3	0,1
5	42,4	21	43,0	42,7	0,2
6	42,2	22	44,0	43,1	0,6
7	40,4	23	41,0	40,7	0,2
8	43,8	24	43,8	43,8	0,0
9	42,1	25	42,5	42,3	0,1
10	41,5	26	44,1	42,8	0,9
11	42,5	27	42,1	42,3	0,1
12	41,1	28	41,6	41,4	0,2
13	42,0	29	44,1	43,1	0,7
14	41,0	30	41,2	41,1	0,1
15	41,4	31	42,0	41,7	0,2
16	41,9	32	43,1	42,5	0,4



Şekil 4.4. Numunelerin iletkenlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi



Şekil 4.5. Numunelerin iletkenlik değerlerinin dağılım grafiğiyle gösterimi

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te numunelerin iletkenlik değerleri, malzeme kalınlığı ve şekillendirme basıncıyla olan ilişkileri verilmiştir. Numunelerin iletkenlik değerlerini etkileyen parametre proses sıcaklığı ve süresidir. Tüm numuneler 190 °C'de ve 12 saatlik çevrime tabi tutulmuştur. Bu sebeple tüm numuneler AMS2770'e göre yaşlandırılmış ve numunelerin AMS 2658'e göre iletkenlik değeri kontrol edildiğinde 2024 T81 temperindeki bir sacın olması gereken iletkenlik değerinin verildiği aralık içerisindeydir. Grafiğin alt ve üst sınırları için 35-45 belirlenmiştir. Bu aralık AMS 2658'e göre 2024 T81 bir numunenin iletkenlik değerinin olması gereken aralıktır.

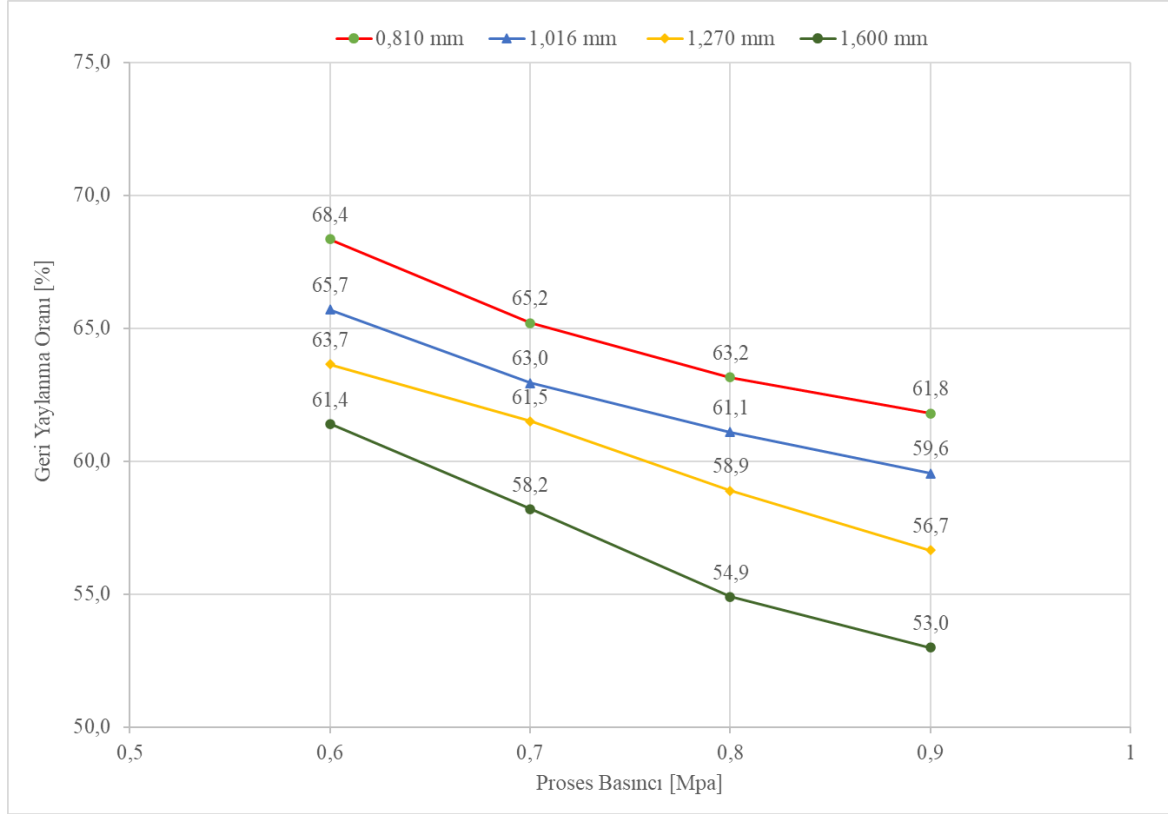
Geri yaylanma ölçümlerini yapabilmek için CMM kullanılmıştır. Maksimum defleksiyon metoduna göre çalışılmış olup kalıp üzerindeki en derin nokta referans alınarak ve denklem 3.28 kullanılarak geri yaylanma oranları belirlenmiştir.

$$SB = \left(1 - \frac{\delta_f}{\delta_0}\right) \times 100\% \quad (3.28)$$

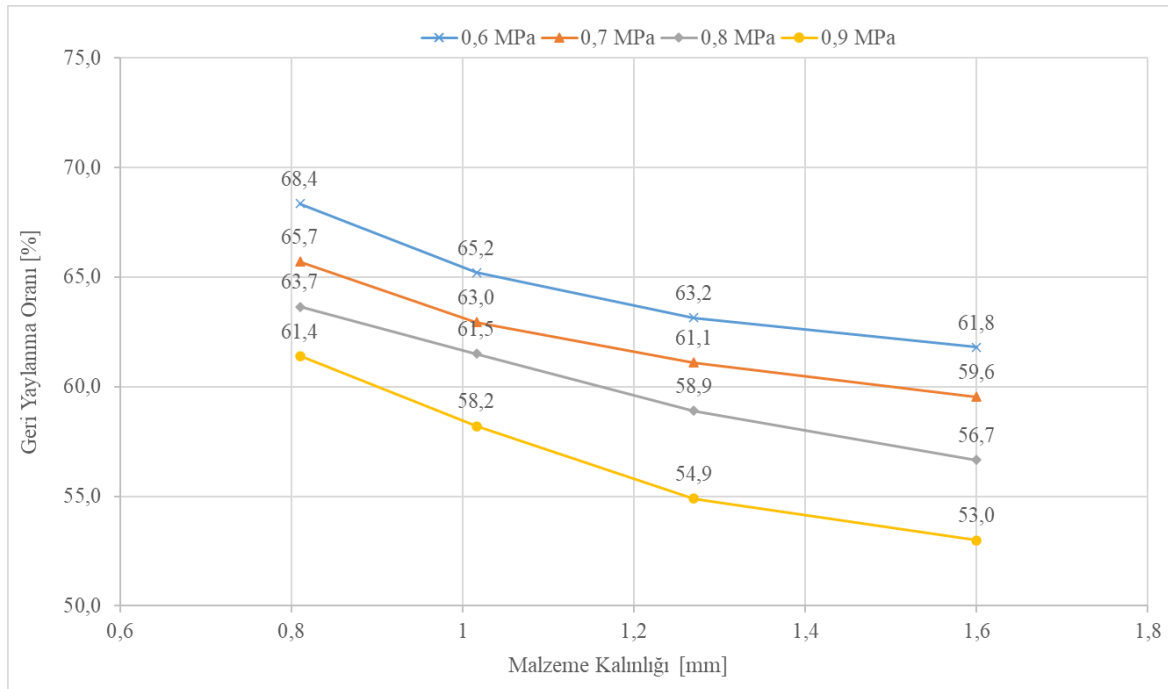
Çizelge 4.9. Numunelerin geri yaylanma oranlarının ölçüm sonuçları

Deney No	Malzeme Kalınlığı [mm]	Şekillendirme Basıncı [MPa]	Geri Yaylanma Oranı [%]	Deney No	Geri Yaylanma Oranı [%]	Ortalama Geri Yaylanma Oranı [%]	Standart Sapma
1	0,81	0,6	68,3	17	68,4	68,4	0,07
2	1,016	0,6	65,6	18	65,8	65,7	0,14
3	1,27	0,6	63,6	19	63,7	63,7	0,07
4	1,6	0,6	61,3	20	61,5	61,4	0,14
5	0,81	0,7	65,1	21	65,3	65,2	0,14
6	1,016	0,7	62,9	22	63	63,0	0,07
7	1,27	0,7	61,5	23	61,5	61,5	0,00
8	1,6	0,7	58,2	24	58,2	58,2	0,00
9	0,81	0,8	63,2	25	63,1	63,2	0,07
10	1,016	0,8	61,1	26	61,1	61,1	0,00
11	1,27	0,8	58,9	27	58,9	58,9	0,00
12	1,6	0,8	54,9	28	54,9	54,9	0,00
13	0,81	0,9	61,9	29	61,7	61,8	0,14
14	1,016	0,9	59,6	30	59,5	59,6	0,07
15	1,27	0,9	56,7	31	56,6	56,7	0,07
16	1,6	0,9	53	32	53	53,0	0,00

Çizelge 4.9’da numunelerin geri yaylanma oranlarını veren ölçüm sonuçlar ve standart sapma değerleri gösterilmektedir. Dört gözlü bir kalıp tasarımı gerçekleştirildiği önceki bölümlerde verilmişti. Deney numuneleri de bu sebeple 1-4, 5-8, 9-12 ve 13-16 aynı çevrime girecek şekilde prosese tabi tutulmuştur. Bu deneylere özdeş olan deneyler de sırasıyla 17-20, 21-24, 25-28 ve 29-32’dir. Ölçüm sonuçları neticesinde özdeş deneyler arasındaki farklar incelendiğinde bu fark maksimum %0,2 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Proses basıncı ve geri yaylanma oranı arasındaki ilişkiyi veren dağılım grafiği



Şekil 4.7. Malzeme kalınlığı ve geri yaylanma oranı arasındaki ilişkiyi veren dağılım grafiği

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilen tüm deneylerde kalıp kontur yarıçapı, proses süresi, proses sıcaklığı, prosesin gerçekleştirildiği otoklav, vakum torbalama aşamasında kullanılan sarf malzemeler ve ölçümlerin gerçekleştirildiği CMM aynıdır. Bağımsız değişkenler sırasıyla proses basıncı ve malzeme kalınlığıdır.

Şekil 4.6’da proses basıncı ve geri yaylanma oranı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Değerler özdeş numunelerin geri yaylanma değerlerinin ortalamasıdır. Kırmızıyla gösterilen fonksiyon 0,810 mm kalınlığındaki numunelerin farklı şekillendirme basıncı altındaki geri yaylanma oranlarını ifade etmektedir. Maviyle gösterilen fonksiyon 1,016 mm kalınlığındaki numuneleri, sarıyla gösterilen fonksiyon 1,270 mm kalınlığındaki numuneleri ve yeşille gösterilen lineer fonksiyonsa 1,600 mm kalınlığındaki numunelerin farklı şekillendirme basınçlarındaki geri yaylanma oranlarını göstermektedir.

Şekil 4.7’de malzeme kalınlığı ve geri yaylanma oranı arasındaki ilişkiyi veren grafik verilmiştir. Değerler özdeş numunelerin geri yaylanma değerlerinin ortalamasıdır. Mavi fonksiyon 0,6 MPa, turuncu fonksiyon 0,7 MPa, gri fonksiyon 0,8 MPa ve sarı fonksiyonsa 0,9 MPa şekillendirme basıncı altında şekillendirilen farklı kalınlıklardaki numunelerin geri yaylanma oranını göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

ASTM E10 standardına uygun olarak mitutoyo 810-203D sertlik ölçüm cihazında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. AMS 2658'e göre Rockwell B sertlik değeri minimum 65 olarak istenmektedir. Gerçekleştirilen 32 deneyin sonuçları incelendiğinde minimum sertlik değeri 66,7 HRB ve maksimum sertlik değeri ise 74,6 HRB olarak ölçülmüştür. AMS 2658'e uygun değerler gözlemlenmiştir. Farkların oluşmasının sebebi ise sac malzemelerin farklı lot ve grup numaralarına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple de standartlarda sertlik ve iletkenlik değerleri verilirken kimyasal kompozisyonunda belirtilen element aralıkları referans alınarak belirlenmektedir.

ASTM E1004 standardına uygun olarak Verimet M4900C iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. IACS olarak verilen birim uluslararası kabul edilmiş iletkenlik birimidir. Tavlanmış bakırı referans almaktadır. AMS2658 standardında alüminyum 2024 T81 için verilen aralık 35-45 %IACS'dir. Elde edilen veriler ise minimum 40,4 ve 44,5 %IACS aralığındadır. Sürünme ve yaşlandırma prosesinin eş zamanlı gerçekleştirildiği sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki mekanizmalardan biri olan yaşlandırma ısı işlemi tüm numunelerde başarıyla gerçekleştirilerek tüm numunelerin T81 temperine yaşlandırıldığı gözlemlenmiştir.

0,6 MPa altında şekillendirilen ilk deney numunelerinin kalınlıkları sırasıyla 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm'dir. Çizelge 4.9 incelendiğinde 0,810 mm kalınlığındaki numune 1'in %68,4 oranında geri yaylandığı ve en yüksek geri yaylanma oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. 0,6 MPa şekillendirme basıncı altında gerçekleştirilen proseste en az geri yaylanma oranıysa %61,4'lük oranla 1,600 mm kalınlığa sahip en kalın numunede gözlemlenmiştir. 1,016 ve 1,270 mm kalınlıklarındaki numunelerde ise sırası ile %65,7 ve %63,7 oranlarında geri yaylanma oranları ölçülmüştür. 0,6 MPa altında gerçekleştirilen deneylerin neticesinde kalınlığın artması ile geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

0,7 MPa altında şekillendirilen ikinci deneyin numune kalınlıkları sırasıyla 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm'dir. Çizelge 4.9 incelendiğinde en yüksek geri yaylanma oranı 0,810 mm kalınlığındaki numunede %65,2 geri yaylanma oranı görülürken 1,600 mm kalınlığındaki en kalın olan 8 numaralı numunedeysen %58,2 geri yaylanma oranı ölçülmüştür. 1,016 ve 1,270

mm kalınlıklarındaki numunelerdeyse sırasıyla %63 ve %61,5 geri yaylanma oranı ölçülmüştür. 0,6 MPa'da şekillendirilen numunelerdeki sonuçlara paralel olarak 0,7 MPa'da şekillendirilen numunelerde de daha kalın numunelerde daha az geri yaylanma oranı gözlemlenmiştir.

Üçüncü deney olan 0,8 MPa'da şekillendirilmiş numunelerde 1. ve 2. deney sonuçlarına paralel olarak 1,600 mm kalınlığındaki en kalın numunede geri yaylanma oranı %54,9 iken 0,810 mm kalınlığındaki 9 numaralı numune %63,2 oranında geri yaylanma ölçülmüştür. 1,016 ve 1,270 mm kalınlığındaki numunelerde ise sırasıyla %61,1 ve %58,9 oranında geri yaylanma oranları ölçülmüştür. İlk iki deneyden elde edilen sonuçlara paralel olarak malzeme kalınlığı dışındaki tüm parametrelerin sabit tutulduğu durumda malzeme kalınlığının artmasıyla geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

Son deneyler ise 0,9 MPa otoklav basıncı altında gerçekleştirilmiştir. İlk üç deneyin sonuçlarına benzer şekilde en yüksek geri yaylanma oranı 0,810 mm kalınlığındaki numunede %61,8 oranında meydana gelirken en düşük geri yaylanmayla en kalın olan 1,600 mm kalınlığındaki numunede %53 oranında ölçülmüştür. 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa basınçlar altında gerçekleştirilen tüm deney sonuçları incelendiğinde bağımsız değişkenler malzeme kalınlığı ve proses basıncıdır. Bu iki parametre dışındaki tüm değerler, gerçekleştirilen deneylerin hepsinde sabit tutulmuştur. Tez çalışması kapsamınca yalnızca proses basıncı ve malzeme kalınlığının geri yaylanma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa basınçlar altında şekillendirilen numunelerin her birinde kalınlık parametresi dışında diğer değişkenlerin sabit tutulması durumunda malzeme kalınlığı ve geri yaylanma oranı arasında ters bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme kalınlığının artmasıyla geri yaylanma oranı azalmaktadır. Tüm şekillendirme basınçları için gerçekleştirilen deneylerde sonuçlar bunu kanıtlar niteliktedir.

Proses başlangıcında yapılan yükleme sonrasında numunelerin alt ve üst yüzeylerindeki gerilme en yüksek değere ulaşmaktadır. Deney numunesinin kalınlık kesiti boyunca gerilme dağılımı dikkate alındığında malzemenin merkezindeki gerilme değeri neredeyse sıfırdır ve bu sebepten ötürü gerilim gevşemesi de ihmal edilebilecek seviyede az gerçekleşir. Bu durum elastik bir çekirdeğin varlığını ve sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki geri yaylanma değerinin asla sıfır olamayacağının bir göstergesidir. Elastik çekirdeğin malzeme

kalınlığına oranı dikkate alındığında bu oranın sıfır olması parçanın kalınlık kesiti boyunca tamamen gerilim gevşemesine uğrayacak ve bunu takiben %100 plastik deformasyon gerçekleşecektir. Bu durumda geri yaylanma oranı %0 olacaktır. Tam tersi bir durumda ise elastik çekirdek kalınlığının oranının malzeme kalınlığına oranı 1 olması durumunda geri yaylanma %0 olacaktır. Teorik olarak %0 ve %100 durumlarının gerçekleşmesi mümkün olsa da pratik de mümkün olmamaktadır. Malzeme kalınlığının artması ile birlikte elastik çekirdek bölgenin malzeme kalınlığına olan oranı azalmaktadır bu sebeple geri yaylanma oranı da düşmektedir [8].

Literatürdeki sürünme yaşlandırma şekil verme prosesindeki diğer araştırmalar dikkate alındığında malzeme kalınlığı dışındaki diğer parametreler sabit tutularak aynı koşullarında gerçekleştirilen deneylerde malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanma oranının azaldığı bilinmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerle aynı şekillendirme basıncı, kalıp konturu, proses süresi, malzeme ve malzeme kalınlığında gerçekleştirilen çalışmalar olmadığından birebir sayısal olarak karşılaştırmak mümkün değildir. Fakat farklı şekillendirme parametreleri ve farklı alaşımlar için gerçekleştirilen deneylerde malzeme kalınlığı dışındaki diğer parametrelerin sabit tutulması sonucunda gerçekleştirilen çalışmalarda malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanma oranının azaldığı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Tez kapsamında elde edilen deney sonuçları da literatürdeki yaklaşımla örtüşmektedir.

Şekillendirme basıncı ve geri yaylanma arasındaki ilişki incelendiğinde proses basıncı dışındaki tüm parametreler sabit tutulmuştur. 0,810, 1,016, 1,270 ve 1,600 mm kalınlığındaki numuneler sırası ile 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa şekillendirme basıncı altında otoklav ortamında form edilmiştir.

0,810 mm kalınlığındaki numunelerin 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa altında gerçekleştirilen deneylerinde geri yaylanma oranları sırasıyla %68,4, %65,2, %63,2 ve %61,8 olarak ölçülmüştür. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde tüm parametreler sabitken proses basıncının artırılmasıyla geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

1,016 mm kalınlığındaki numunelerin 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa altında gerçekleştirilen deneylerinde geri yaylanma oranları sırasıyla %65,7, %63, %61,1 ve %59,6 olarak ölçülmüştür. En yüksek geri yaylanma oranı 0,6 MPa'da şekillendirilen 2 numaralı

numunede %65,8 iken en düşük geri yaylanma oranı ise 0,8 MPa'da şekillendirilen 14 numaralı numunede %59,6 olarak ölçülmüştür.

1,270 mm kalınlığındaki numunelerin 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa altında gerçekleştirilen deneylerinde geri yaylanma oranları sırasıyla %63,7, %61,5, %58,9 ve %56,7 olarak ölçülmüştür. En yüksek geri yaylanma oranı 0,6 MPa'da şekillendirilen numunede %63,7 iken en düşük geri yaylanma oranıysa 0,9 MPa'da şekillendirilen numunede %56,7 olarak ölçülmüştür. Bu deneylerde de diğer deney sonuçlarına paralel olarak en düşük geri yaylanma oranı en yüksek şekillendirme basıncıyla şekillendirilen numunede en yüksek geri yaylanma oranıysa en düşük şekillendirme basıncıyla şekillendirilen numunede gözlemlenmiştir.

En kalın numune olan 1,600 mm kalınlığındaki deney numuneleri sırasıyla 0,6, 0,7, 0,8 ve 0,9 MPa altında şekillendirilmiştir. Geri yaylanma oranları sırasıyla %61,4, %58,2, %54,9 ve %53,0 olarak ölçülmüştür. En yüksek geri yaylanma oranı diğer deney sonuçlarına paralel olarak en düşük şekillendirme basıncı olan 0,6 MPa'da şekillendirilen numunelerde ölçülmüştür. En düşük geri yaylanma oranıysa en yüksek şekillendirme basıncı olan 0,9 MPa'da şekillendirilen numunelerde ölçülmüştür.

Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinde plastik gerininin oluşmasının temel kaynağı gerilim gevşeme prosesidir. Kalıp üzerine yerleştirilen deney numunelerini vakum torbalama prosesinden sonra vakumlanmaktadır ve deney süresince pozitif otoklav basıncı altında şekillendirilmektedir. Kalıp ve deney numunelerinin ilk temas anı dikkate alındığında iş parçası üzerindeki gerininin tamamı elastik gerinimken gerilim gevşemesi davranışı sayesinde sabit gerinim altındaki deney numuneleri üzerinde bir miktar elastik gerinim, plastik gerinime dönüşmektedir. Gerilim gevşeme prosesindeki gevşeyen gerilim değerinin artması ile birlikte iş parçası üzerinde daha fazla elastik gerinim plastik gerinime dönüşecektir ve şekillendirilen deney numuneleri üzerindeki geri yaylanma oranı azalacaktır [51].

Gerçekleştirilen 32 deney dikkate alındığında şekillendirme basıncı hariç diğer tüm parametreler sabitken şekillendirme basıncının artmasıyla geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek geri yaylanma oranı en düşük şekillendirme basıncıyla

şekillendirilen numunelerde meydana gelirken en düşük geri yaylanma oranıysa en yüksek şekillendirme basıncında şekillendirilen numunelerde ölçülmüştür.

Şekillendirme prosesinin temeli iş parçası üzerinde oluşturulan plastik gerinime, geri yaylanma ise elastik gerinime bağlıdır. Bu sebeple literatürdeki araştırmacıların ulaştığı sonuçlara paralel olarak şekillendirme basıncının artması ile daha fazla gerilim gevşemesi meydana gelmesi ve buna bağlı olarak daha yüksek plastik şekillendirme ve daha düşük geri yaylanma oranının meydana geldiği deneyler sonucunda yapılan ölçümlerde anlaşılmıştır.

Deneyler sonucunda öğrenilen kazanımlar aşağıda verilmiştir:

Şekillendirme yarıçapı, şekillendirme basıncı, sıcaklık ve zaman parametreleri sabit tutularak gerçekleştirilen deneyler neticesinde malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekillendirme yarıçapı, malzeme kalınlığı, sıcaklık ve zaman parametrelerinin sabit tutularak gerçekleştirilen deneyler neticesinde şekillendirme basıncının artması ile geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

İlgili iş parçasının şekillendirileceği proses basıncı ve malzeme kalınlığına bağlı olarak sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesindeki geri yaylanma davranışının önceden biliniyor veya tayin edilebiliyor olması kalıp tasarımı sürecini hızlandıracak ve üretim maliyetlerini düşürecektir. Geri yaylanma davranışı bilinmeden üretilecek olan kalıpların ikincil bir işlem ile düzeltilmesi maliyet ve zaman kaybı yaratacaktır.

Proses esnasında vakum torbasının açılması durumunda deney numuneleri ile kalıp arasındaki havanın tahliye edilememesi deney numunesinin şekillendirilememesine sebep olacaktır. Vakum torbalama prosesi gerçekleştirildikten sonra otoklav ortamına alınmadan hemen önce seyyar vakum motoru ile sızdırmazlık kontrolleri gerçekleştirilmelidir.

Geri yaylanma oranı ve kalıp maliyeti arasında bir ilişki kurulmak istenirse tasarım ve analiz çalışmaları sonucunda bir kalınlık bandı içerisinde seçim yapılması koşuluyla daha kalın bir malzeme seçiminde kalıp üzerinde işçilik maliyet düşecektir. Daha ince bir malzemenin şekillendirilmesi durumunda üretilecek kalıpta ise işçilik maliyeti artacaktır. Kalın bir

malzeme seçiminin de yapısal anlamda ekstra bir ağırlığa sebep olacağı kaçınılmazdır. Bu sebeple kayıp-kazanç durumları değerlendirilmelidir.

Deneylerin gerçekleştirildiği kurum olan TUSAŞ için ileri imalat yöntemi kazandırılmıştır. Elde edilen tecrübe ve kazanımlar ile çeşitli komponentlerin panellerinin üretimi hedeflenmektedir. Ayrıca üretilen kalıplar ile farklı malzemelerin de geri yaylanma davranışının kontrol edilmesi için bir deney seti kazandırılmıştır.

Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi üzerine gerçekleştirilen literatür araştırmaları esnasında kazanılan bilgiler ışığında;

Havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında entegre panel olarak bilinen yekpare kanat-kiriş yapılarının üretimini mümkün kılar.

Yüksek oranlarda geri yaylanmaların meydana geldiği bir proses olmasından dolayı geri yaylanma davranışının mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Aksi durumda deneme üretimleri ile geri yaylanma davranışının belirlenerek parça üretiminin gerçekleştirilmesi şirketler için oldukça maliyetli olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Brewer, H. (1989). Age forming integrally stiffened, aluminum aerospace structures in an autoclave. *Aircraft Design and Operations Meeting*, 2087.
2. Holman, M. C. (1989). Autoclave age forming large aluminum aircraft panels. *Journal of Mechanical Working Technology*, 20, 477-488.
3. Adachi, T., Kimura, S., Nagayama, T., Takehisa, H., and Shimanuki, M. (2004, 2-5 August). *Age forming technology for aircraft wing skin*. Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys, Brisbane, Australia, 202-207.
4. Ho, K. C., Lin, J., and Dean, T. A. (2004). Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets. *International Journal of Plasticity*, 20(4-5), 733-751.
5. Jambu, S., Lenczowski, B., Rauh, R., and Juhl, K. (2002). Creep forming of AlMgSc alloys for aeronautic and space applications. *International Congress of the Aeronautical Sciences, Toronto*, 632-641.
6. Adachi, T., Kimura, S., Nagayama, T., Takehisa, H., and Shimanuki, M. (2004). Age forming technology for aircraft wing skin. In *Materials Forum*, 28, 202-207.
7. Robey, R. F., Prangnell, P. B., and Dif, R. (2004). *A comparison of the stress relaxation behavior of three aluminium aerospace alloys for use in age-forming applications*. Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys, Brisbane, Australia, 132-138.
8. Jeunechamps, P. P., Ho, K. C., Lin, J., Ponthot, J. P., and Dean, T. A. (2006). A closed form technique to predict springback in creep age-forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(6), 621-629.
9. Ribeiro, F. C., Marinho, E. P., Inforzato, D. J., Costa, P. R., and Batalha, G. F. (2010). Creep age forming: a short review of fundamentals and applications. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 43(1), 353-361.
10. Jeshvaghani, R. A., Emami, M., Shahverdi, H. R., and Hadavi, S. M. M. (2011). Effects of time and temperature on the creep forming of 7075 aluminum alloy: Springback and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29-30), 8795-8799.
11. Quan, L. W., Gang, Z. H. A. O., Ni, T. I. A. N., and Huang, M. L. (2013). Effect of stress on microstructures of creep-aged 2524 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(8), 2209-2214.
12. Chen, J. F., Zhen, L., Jiang, J. T., Yang, L., Shao, W. Z., and Zhang, B. Y. (2012). Microstructures and mechanical properties of age-formed 7050 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 539, 115-123.
13. Inforzato, D. J., Costa Junior, P. R., Fernandez, F. F., and Travessa, D. N. (2012). Creep-age forming of AA7475 aluminum panels for aircraft lower wing skin application. *Materials Research*, 15(4), 596-602.

14. Zhang, J., Deng, Y. L., Li, S. Y., Chen, Z. Y., and Zhang, X. M. (2013). Creep age forming of 2124 aluminum alloy with single/double curvature. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(7), 1922-1929.
15. Xu, X. L., Zhan, L. H., Li, Y. G., and Huang, M. H. (2013). Constitutive modelling and springback prediction for creep age forming of 2124 aluminium alloy. *Materials Science and Technology*, 29(9), 1139-1143.
16. Costa Junior, P. R., Moura Neto, C. D., and Wade, D. A. (2014). Evaluation of a 7050-TAF aluminum alloy submitted to creep age forming. *Materials Research*, 17(3), 603-611.
17. Lam, A. C., Shi, Z., Yang, H., Wan, L., Davies, C. M., Lin, J., and Zhou, S. (2015). Creep-age forming AA2219 plates with different stiffener designs and pre-form age conditions: Experimental and finite element studies. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 155-163.
18. Yang, Y. L., Zhan, L. H., and Jie, L. I. (2015). Constitutive modeling and springback simulation for 2524 aluminum alloy in creep age forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(9), 3048-3055.
19. Khamneh, M. E., Askari-Paykani, M., Shahverdi, H., Hadavi, S. M. M., and Emami, M. (2016). Optimization of spring-back in creep age forming process of 7075 Al-Alclad alloy using D-optimal design of experiment method. *Measurement*, 88, 278-286.
20. Safari, M., Hamidipour, S., Elahi, S. H., and Tahmasbi, V. (2020). Creep age forming of aluminum 7075 tailor-machined blanks: Statistical modeling, sensitivity analysis and multi-objective optimization. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(4), 831-841.
21. Wang, K., Zhan, L. H., Yang, Y. L., Ma, Z. Y., Li, X. C., and Liu, J. (2019). Constitutive modeling and springback prediction of stress relaxation age forming of pre-deformed 2219 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(6), 1152-1160.
22. Brandão, F. M., Delijaicov, S., and Bortolussi, R. (2017). CAF—a simplified approach to calculate springback in Al 7050 alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9), 3273-3284.
23. European Aluminum Association. (2002). Joining-mechanical joining. *The Aluminum Automotive Manual*, 10-15
24. Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. ASM International, 185-194.
25. İnternet: Aerospace materials. Web: <https://w3sdev.com/chapter-8-aluminium-alloys-for-aircraft-structures-introduction-to-aerospace-materials.html>, Son Erişim Tarihi: 23/11/2021.

26. Baydoğan, M. (2003). *Retrogresyon ve yeniden yaşlandırma uygulanan 2014 ve 7075 kalite alüminyum alaşımlarının mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
27. Geçkinli, E. (2002). *Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemi*, 2. Isıl İşlem Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 30-36.
28. Oguz, B. (1990). *Demirdışı metaller kaynağı metalurji-uygulama*. İstanbul: Oerlikon Yayınları, 74-95.
29. Rioja, R. J., Mooy, D. C., Liu, J. T., and Bovard, F. S. (2014). *Methods of aging aluminum alloys to achieve improved ballistics performance*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. U.S. Patent No. 8,758,530.
30. Porter, D. A., and Easterling, K. E. (2009). *Phase transformations in metals and alloys (revised reprint)*. Ohio, USA: CRC Press, 18-22.
31. Liu, G., Zhang, G. J., Ding, X. D., Sun, J., and Chen, K. H. (2003). Modeling the strengthening response to aging process of heat-treatable aluminum alloys containing plate/disc-or rod/needle-shaped precipitates. *Materials Science and Engineering: A*, 344(1-2), 113-124.
32. Zhan, L., Lin, J., Dean, T. A., and Huang, M. (2011). Experimental studies and constitutive modelling of the hardening of aluminium alloy 7055 under creep age forming conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(8), 595-605.
33. Altenbach, H., and Eisenträger, J. (2020). Introduction to creep mechanics. *Encyclopedia of Continuum Mechanics*, 1337-1344.
34. Newby, J. (1987). *ASM metals handbook 8*, Oklahoma: American Society of Metals, 151-180.
35. Demirkol, M. (2007). *Malzemelerin mekanik davranışı*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Ders Notları, 10-21.
36. Courtney, T. H. (2005). Some fundamental experiments on high temperature creep, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 3(2), 85-88.
37. Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 35-57.
38. Vega, Jr R. (2020). *Computational methods for creep modeling*, Doctoral dissertation, The University of Texas at El Paso, Department of Mechanical Engineering Texas, USA, 54-58.
39. Rotherham, L., and Larke, L. W. (1950). Creep deformation of metals, *Research*, 3, 434-436.
40. Dieter, G. E., and Bacon, D. (1976). *Mechanical metallurgy*. New York: McGraw-Hill. 3.

41. Matsunaga, T., and Sato, E. (2012). Estimation of grain boundary sliding during ambient-temperature creep in hexagonal close-packed metals using atomic force microscope. *Scanning Probe Microscopy-Physical Property Characterization at Nanoscale, InTech, Croatia*, 203-214.
42. Collins, J. A. (1993). *Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention*. Nev York, NY: John Wiley & Sons. 106-108.
43. Kayalı, S., ve Çimenoglu, H. (1995). *Plastik şekil verme ilke ve uygulamaları*. İstanbul: Bilim Teknik Yayınları, 71-77.
44. İnternet: Birol, Y. (t.y.). MMM 2402 malzeme bilimi ders notları. Web: <https://docplayer.biz.tr/12476423-Mmm-2402-malzeme-bilimi-yucel-birol.html> Son Erişim Tarihi: 22/12/2021.
45. Solberg, J. K. (1986). A semi-empirical model for stress relaxation including primary and secondary creep stages. *Journal of Materials Science*, 21(2), 630-636.
46. Jeong, C. Y., Nam, S. W., and Ginsztler, J. (1999). Activation processes of stress relaxation during hold time in 1Cr-Mo-V steel. *Materials Science and Engineering: A*, 264(1-2), 188-193.
47. Chandler, H. D. (2010). A comparison between steady state creep and stress relaxation in copper. *Materials Science and Engineering: A*, 527(23), 6219-6223.
48. Chen, J. F., Jiang, J. T., Zhen, L., and Shao, W. Z. (2014). Stress relaxation behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy in simulated age-forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 775-783.
49. Wang, Y., Dong, J., Zhang, M., and Yao, Z. (2016). Stress relaxation behavior and mechanism of AEREX350 and Waspaloy superalloys. *Materials Science and Engineering: A*, 678, 10-22.
50. Zheng, J. H., Pan, R., Li, C., Zhang, W., Lin, J., and Davies, C. M. (2018). Experimental investigation of multi-step stress-relaxation-ageing of 7050 aluminium alloy for different pre-strained conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 710, 111-120.
51. Yang, Y., Zhan, L., Liu, C., Wang, X., Wang, Q., Tang, Z., and Hu, Z. (2020). Stress-relaxation ageing behavior and microstructural evolution under varying initial stresses in an Al-Cu alloy: experiments and modeling. *International Journal of Plasticity*, 127, 102646.
52. Cai, Y., Zhan, L., Xu, Y., Liu, C., Wang, J., Zhao, X., and Huang, M. (2019). Stress relaxation aging behavior and constitutive modelling of AA7150-T7751 under different temperatures, initial stress levels and pre-strains. *Metals*, 9(11), 1215.
53. Hargarter, H., Lyttle, M. T., and Starke, E. A. (1998). Effects of preferentially aligned precipitates on plastic anisotropy in Al-Cu-Mg-Ag and Al-Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 257(1), 87-99.

54. Zhu, A. W., and Starke Jr, E. A. (2001). Materials aspects of age-forming of Al-xCu alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(3), 354-358.
55. Zhan, L., Lin, J., and Dean, T. A. (2011). A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(1), 1-17.
56. Mavromihales, M., Mason, J., and Weston, W. (2003). A case of reverse engineering for the manufacture of wide chord fan blades (WCFB) used in Rolls Royce aero engines. *Journal of Materials Processing Technology*, 134(3), 279-286.
57. Zhan, L., Lin, J., and Huang, M. (2011, May). Constitutive modelling and springback prediction in creep age forming of AA7055 doubly curved panels. In *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 1353(1), 235-235.
58. Li, Y., Rong, Q., Shi, Z., Sun, X., Meng, L., and Lin, J. (2019). An accelerated springback compensation method for creep age forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(1), 121-134.
59. Zhan, L., Tan, S., Yang, Y., Huang, M., Shen, W., and Zhao, X. (2014). A research on the creep age forming of 2524 aluminum alloy: springback, mechanical properties, and microstructures. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 707628.

EKLER

EK-1. Ultraweave 1332 bilgi sayfası



18, ZI Haneboesch
L-4562 Differdange
LUXEMBOURG

Phone : +352 58 22 82 1
Fax : +352 58 49 35

E-mail : sales@airtech.lu
Website : www.airtech.lu

Data Sheet

ULTRAWEAVE® 1332

Heavy weight nylon breather/ bleeder

■ DESCRIPTION

All Ultraweave® products have a higher temperature softening point and will not compress like polyester allowing for increased airflow.

Ultraweave® 1332 is the most reliable heavy duty breather made for high temperature and pressure autoclave cures. When slit, it can be used as an edge durable breather. This product eliminates the need for multiple layers of polyester breather.

■ BENEFITS

- High temperature nylon fibre helps prevent vacuum lock-off.
- Best breather performance in autoclave cycles.
- Maintains higher vacuum levels for better part quality.

■ TECHNICAL DATA

Fibre type	Nylon 6,6
Colour	White
Weight (approx.)	441 g/m ²
Maximum use temperature	232°C
Fire retardant	Yes
Shelf life	Unlimited when stored in original packaging at 22°C

■ SIZES

Width	Length	Packaging
152 cm (60 inches)	50 m (55 yards)	1 roll
up to 457 cm (180 inches)	50 m (55 yards)	special order

■ NOTES

- Material can be slit in special widths upon request (1 standard roll as minimum order quantity).
- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.
- Packaging is clear with red print.

Last updated : 2018-09-20

Catalogue position : **Breathers & Bleeders**

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech Europe does not assume any responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is".
Airtech Europe disclaims, and buyer waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. This translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is Luxembourg.

EK-2. A-800-3G bilgi sayfası



5700 Skylab Road
Huntington Beach
CA 92647 USA

Phone : +1 714-899-8100
Fax : +1 714-899-8179

E-mail : airtech@airtechintl.com
Website : www.airtechonline.com

Data Sheet

A-800-3G

Vacuum bag sealant tape for temperature use up to 800°F (427°C)

■ DESCRIPTION

A sealant tape suitable for very high temperature applications. With heat it gets tackier and works up to 800°F (427°C).

■ BENEFITS

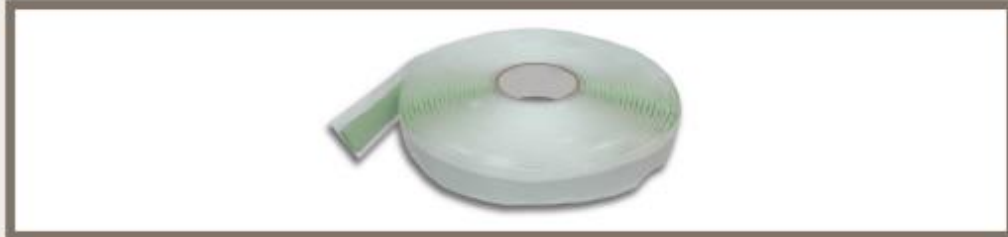
- Highest temperature rating so thermoplastics can be processed.
- Good shelf life avoids material scrap costs.
- High temperature rating for safer high temperature cures.

■ TECHNICAL DATA

Color	Light green
Base material	Silicone
Maximum use temperature	800°F (427°C)
Shelf life	12 months from date of manufacture
Storage conditions	Tape must be stored flat in original packaging at 72°F (22°C) Do not refrigerate

■ SIZES

Dimensions	Packaging	Remarks
1/8 inch x 1/2 inch x 25 feet (3 mm x 12 mm x 7.5 m)	40 rolls per case	Can be sold per unit roll



■ NOTES

- For clean removal, it is recommended to strip the tape from the mold surface once it has cooled down to room temperature.
- A second strip of GS-213-3 or GS-43MR can be used in conjunction with the A-800-3G to seal easily at room temperature. This strip becomes sacrificial above 450°F (232°C) where the A-800-3G is secure.
- The maximum use temperature is dependent upon the duration at maximum temperature and is process specific, Airtech recommends testing prior to use.

Distributed by
Freeman Manufacturing & Supply Co.
www.freemansupply.com (800) 321-8511



Last updated : 2016-01-25

Catalog position : Vacuum bag sealant tapes

As the conditions or methods of use, including storage, are beyond our control, Airtech International, Inc. does not assume responsibility for the performance of this material for any particular use. The material is sold "as is". Airtech International, Inc. disclaims, and hereby waives, any and all implied warranties, including without limitation the implied warranties of merchantability and of fitness for particular use. The information contained herein represents typical properties and should not be used for specification purposes. Any translation is provided for your convenience only. The official language is English and the official law is California, USA.

EK-3. DPT-1000 bilgi sayfası



ZI Haneboesch
L-4562 Differdange
LUXEMBOURG

Phone : +352 58 22 82 1
Fax : +352 58 49 35

E-mail : sales@airtech.lu
Website : www.airtech.lu

SECTION GUIDE

Bagging films

Name	Description	Maximum use temperature	Elongation at break	Colour	Page
Securlon® L-500Y	Nylon, multi-layer	171 °C	350 %	Yellow	1
Securlon® V-45	Multi-layer	171 °C	400 %	Translucent purple	2
Securlon® L-750	Multi-layer	177 °C	350 %	Milky violet	3
Securlon® L-1000	Nylon, multi-layer	202 °C	500 %	Purple	4
Securlon® L-2000	Nylon, multi-layer	218 °C	450 %	Blue	5
Big Blue L-100	Polyolefin, multi-layer	121 °C	350 %	Blue	6
Stretchlon® 200	Thermoplastic elastomer	121 °C	500 %	Green	7
Stretchlon® 255	Thermoplastic elastomer	124 °C	>700 %	Semi opaque yellow	8
Stretchlon® HT-350	Thermoplastic elastomer	162 °C	>550 %	Grey	9
Stretchlon® 700	Thermoplastic elastomer	195 °C	500 %	Cream	10
Stretchlon® 800	Nylon	204 °C	450 %	Orange	11
Stretchlon® 850	Nylon	204 °C	450 %	Orange	12
Ipplon® KM1300	Nylon	212 °C	425 %	Pink	13
Ipplon® DP1000	Nylon	212 °C	450 %	Salmon	14
Ipplon® DPT1000	Nylon	246 °C	375 %	Orange	15
Ipplon® WN1500	Nylon	246 °C	375 %	Blue	16
Wrightlon® 5400	Nylon	177 °C	375 %	Clear	17
Wrightlon® 7400	Nylon	204 °C	400 %	Green	18
Wrightlon® 8400	Nylon	232 °C	350 %	Blue	19
WL600V	-	190 °C	400 %	Violet	20
Dahlar® Release Bag 125	Polyolefin, multi-layer	141 °C	400 %	Green	21
Dahlar® Release Bag 375R	Nylon, Polyolefin, multi-layer	155 °C	475 %	Red	22
Dahlar® Release Bag 460	PMP, Nylon, multi-layer	190 °C	425 %	Clear	23
Dahlar® Release Bag 500	ETFE, Nylon, multi-layer	230 °C	400 %	Orange	24
Dahlar® Release Bag 921	Polyolefin	145 °C	800 %	Translucent white	25
VB-3	Fluoropolymer	315 °C	500 %	Green	26
Thermalimide	Polyimide	426 °C	95 %	Amber	27
Airdraw 2	Polyamid compound	121 °C	450 %	Pink	28
Econolon	Nylon	149 °C	375 %	Clear	29
Resin compatibility	-	-	-	-	30
Bagging film dimensional chart	-	-	-	-	31



GAZİ GELECEKTİR...