
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FARKLI KESİTLERE SAHİP ALÜMİNYUM 7075 LEVHANIN SÜRÜNME-YAŞLANDIRMA ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Hasan Burak BULUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2023

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Hasan Burak BULUT

26.10.2023

FARKLI KESİTLERE SAHİP ALÜMİNYUM 7075 LEVHANIN SÜRÜNME-YAŞLANDIRMA ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan Burak BULUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2023

ÖZET

Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi, havacılık ve uzay sanayiinde kompleks geometriye ve entegre panel-kiriş yapısına sahip alüminyum parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılan, yapay yaşlandırma ve şekillendirme işleminin eşzamanlı gerçekleştirildiği ileri imalat yöntemlerinden biridir. Proses, sıcaklık altındaki malzemeye uzun süre gerinim uygulanarak gerçekleştirilir. Bu süreçte iş parçası şekillendirilirken malzeme bünyesinde sürünme deformasyonu, gerilim azalması ve çökelme sertleşmesi meydana gelir. Proses süresince, malzeme bünyesinde oluşan elastik deformasyonun tamamı plastik deformasyona dönüşmez. Plastik deformasyona dönüşemeyen elastik deformasyon, iş parçası bünyesinde ciddi geri yaylanma oranlarına sebep olur. Bu nedenle, doğru bir iş parçası üretebilmek için geri yaylanma oranlarını hesaplamak ve kalıp tasarımında geri yaylanmayı telafi etmek gerekmektedir. Bu çalışmada, AA7075-T651 alüminyum alaşımının sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi ile T73 temperine yaşlandırılırken eş zamanlı şekillendirilme durumunda farklı sıcaklık, numune kalınlığı ve otoklav basınç değerlerinin geri yaylanma davranışı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında deney numuneleri, şekillendirilmek istenen paneli bünyesindeki et kalınlıkları referans alınarak, AA7075-T651 plaka malzemeden üretilmiştir. Proses parametreleri, malzemeyi T651 temperinden T73 temperine yaşlandırmayı sağlayacak şekilde AMS2770 dokümanı referans alınarak belirlenmiştir. Şekillendirme esnasında malzeme kalınlığı boyunca oluşan gerilim dağılımı elde edebilmek için Pam-Stamp yazılımında, sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kalıp geometrisi, numune ölçüleri ve proses süresi sabit tutulduğu durumda; numune et kalınlığı ve proses sıcaklığının artması, geri yaylanma oranını azalttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Proses basıncı geri yaylanma oranına etki etmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca proses tekrar edebilir özellik göstermiştir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme, Otoklav-Yaşlandırma Şekillendirme, Gerilim azalması, Geri yaylanma, AA7075
Sayfa Adedi	:	93
Danışman	:	Doç. Dr. Ömer ASAL

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SPRINGBACK BEHAVIOR IN CREEP-AGE FORMING OF ALUMINUM 7075 SHEET WITH DIFFERENT SECTIONS

(M. Sc. Thesis)

Hasan Burak BULUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2023

ABSTRACT

Creep age forming prosess, is an advanced manufacturing method, commonly used in the aerospace industry for the manufacture of aluminum parts with complex geometry and integrated panel-beam structure. The process is conducted by applying strain to the material at elevated temperatures for an extended duration. During this process, creep deformation, stress relaxation and precipitation hardening occurs within the material while the workpiece is being formed. During the process, not all of the elastic deformation that occurs within the material converts into plastic deformation. The elastic deformation that wasn't able to convert to plastic deformation causes significant rates of spring-back withing the workpiece. Therefore, to manufacture the correct workpiece, it is necessary to calculate the spring-back rate in order to compensate the spring-back with the tool design. In this study, the effects of different temperatures, different plate thickness and different autoclave pressure values on the spring-back behaviour of the AA7075-T651 aluminum alloy in the case of simultaneous shaping while ageing to T73 temper by creep age forming process was experimentally examined. Experimental samples were produced from AA7075-T651 plate material, with reference to the wall thicknesses within the wing panel that was intended to be shaped. The AMS2770 document is determined as a reference for the process parameters to age the material from T651 temper to T73 temper. To achive stress distribution through the material thickness during forming, finite element analysis was conducted in Pam-Stamp software. As a result of this study, it has been experimentally observed that as long as the tool geometry, the sample sizes and the process time are kept constant; the increase of the sample wall thickness and the process temperature reduces the spring-back rate. It has been observed that the process pressure does not effect the spring-back rate. Additionally, the process is shown to be repeatable.

Science Code	:	91438
Key Words	:	Creep age forming, Autoclave-Age Forming, Stress Relaxation, Spring-back, AA7075.
Page Number	:	93
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Ömer ASAL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince kıymetli fikirleri ve desteklerinden dolayı hocalarım Prof. Dr. Abdulmecit GÜLDAŞ' a ve Doç. Dr. Ömer ASAL' a, Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmeme olanak sağlayan TUSAŞ kurumuna ve bu çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen değerli ekip arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Son olarak anlayış ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi 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 19

3.1. Alüminyum Hakkında Genel Bilgiler 19

3.2. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması 20

3.3. Alüminyum Alaşım Temperleri 21

3.4. Alüminyum Malzemelerin Havacılıkta Kullanımı 23

3.5. Sürünme ve Sürünme Aşamaları 25

3.6. Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme Prosesi 26

3.6.1. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin avantajları ve dezavantajları 27

3.6.2. Sürünme yaşlandırma prosesinin endüstriyel uygulamaları 28

3.6.3. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi mekanizması 30

3.6.4. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde geri yaylanma davranışı 33

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 39

4.1. Malzeme 39

4.2. Analiz Çalışması 40

Sayfa

4.3. Kalıp Tasarımı 48
4.4. Proses Akışı 49
4.5. Deney Parametrelerinin belirlenmesi 51
4.5. Sarf Malzemelerin Belirlenmesi 52
4.6. Deney Numunelerinin Üretilmesi 53
4.7. Deney Tasarımı 54
4.8. Deney Yöntemi 54
4.9. Deney Sonuçları 68
4.10. Numunelerin Mekanik Özellikleri ve Mikroyapılarının İncelenmesi 75
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 83
KAYNAKLAR 89
ÖZGEÇMİŞ 93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Farklı alüminyum alaşımlarının mekanik ve termal özelliklerinin değişimi 19

Çizelge 3.2. Dövme ve dökme alüminyum alaşım tanımlama sistemindeki alaşım elementleri 20

Çizelge 3.3. Temper terminolojisi: Alaşım numarasına son ek harfler veya rakamlar olarak eklenen semboller 22

Çizelge 3.4. Bazı alüminyum alaşımları ve temperlerinin mekanik özellikleri..... 23

Çizelge 3.5. Sivil hava araçlarında kullanılan malzeme oranları 24

Çizelge 4.1. AA7075'in kimyasal kompozisyonu 39

Çizelge 4.2. Al 7075 T651 fiziksel özellikler 40

Çizelge 4.3. Sarf malzeme listesi 53

Çizelge 4.4. Deneyde kullanılan numune tablosu..... 53

Çizelge 4.5. Deney listesi 54

Çizelge 4.6. Alüminyum 7075-T73 malzemenin sertlik ve iletkenlik değerleri, AMS2658..... 67

Çizelge 4.7. Deney numunelerinin setlik ölçüm değeri sonuçları 69

Çizelge 4.8. Deney numunelerinin iletkenlik ölçüm değerleri 70

Çizelge 4.9. Deney numunelerinin ortalama geri yaylanma değerleri..... 72

Çizelge 4.10. Deney numunelerinin ortalama geri yaylanma değerleri..... 76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Jet yolcu uçakları ve askeri taşımacılık uygulamaları için özellik gereksinimleri 25

Şekil 3.2. Zamana bağlı sürünme diyagramı 26

Şekil 3.3. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile üretilmiş uçak parçaları; (a) Airbus A380 hava aracının kanat paneli, (b) Gulsdtream G-IV hava aracının kanat paneli, (c) B-1B Long Range Combat hava aracının alt kanat paneli, (d) Airbus A380 hava aracına ait ekstrüzyon profil 29

Şekil 3.4. Sürünme-yaşlandırma şekillendirme prosesi aşamaları 31

Şekil 3.5. Proses öncesi ve sonrasında malzemenin kalınlığı boyunca oluşan gerilim dağılımı, (b) Proses süresinde oluşan gerilim azalması grafiği, (c) Proses süresince meydana gelen sürünme gerinimi grafiği, (d) Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme gerilim azalması grafiği 32

Şekil 3.6. Yük altında geometri, proses sonrası geometri ve başlangıç geometrisi şematik gösterimi. b) Yarı numune kalınlığı boyunca oluşan gerilim ve gerinim dağılımı. 33

Şekil 3.7. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi için elastik bölgede geri yaylanma davranışının şematik gösterimi 34

Şekil 3.8. Defleksiyon yöntemine göre geri yaylanma 35

Şekil 4.1. Numunenin kalıba değmeden hemen önceki gerilim dağılımı 41

Şekil 4.2. Numunenin kalıba değdikten hemen sonraki gerilim dağılımı 41

Şekil 4.3. 6 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı 42

Şekil 4.4. 5 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı 43

Şekil 4.5. 4 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı 43

Şekil 4.6. 3 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı 43

Şekil 4.7. 3 mm-8MPa analiz grafiği 44

Şekil 4.8. 4 mm-8MPa analiz grafiği 44

Şekil 4.9. 5 mm-7MPa analiz grafiği 45

Şekil 4.10. 5 mm-8MPa analiz grafiği 45

Şekil 4.11. 5 mm-9MPa analiz grafiği 46

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.12. 6 mm-8MPa analiz grafiği 46

Şekil 4.13. İş parçası et kalınlığının kalınlık boyunca maksimum gerilmeye etkisi..... 47

Şekil 4.14. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde kullanılan proses basıncının malzeme kalınlığı boyunca oluşan maksimum gerilmeye etkisi 47

Şekil 4.15. Sürünme-yaşlandırma şekillendirme deneyinde kullanılacak kalıp 49

Şekil 4.16. Proses akış şeması..... 51

Şekil 4.17. Hazırlanmış numune görseli 53

Şekil 4.18. Kalıp üzerine numune yerleşimi 55

Şekil 4.19. Geri yaylanma gösterimi..... 66

Şekil 4.20. Proses basıncına bağlı sertlik değeri dağılım grafiği 69

Şekil 4.21. Proses sıcaklığına bağlı sertlik değeri dağılım grafiği..... 69

Şekil 4.22. Numune kalınlığına bağlı sertlik değeri dağılım grafiği..... 70

Şekil 4.23. Proses basıncına bağlı iletkenlik değeri dağılım grafiği 71

Şekil 4.24. Proses sıcaklığına bağlı iletkenlik değeri dağılım grafiği..... 71

Şekil 4.25. Numune kalınlığına bağlı iletkenlik değeri dağılım grafiği 71

Şekil 4.26. Proses basıncına bağlı geri yaylanma değeri grafiği 73

Şekil 4.27. Proses sıcaklığına bağlı geri yaylanma değeri grafiği 73

Şekil 4.28. Numune kalınlığına bağlı geri yaylanma değeri grafiği 74

Şekil 4.29. Çekme testi numuneleri 75

Şekil 4.30. AA7075-T651 Gerilim-Gerinim grafiği 77

Şekil 4.31. AA7075-T73 Gerilim-Gerinim grafiği 77

Şekil 4.32. A) AA7075-T651 temperi, B) AA7075-T73 temperi, C) AA7075-OA temperi mikro yapı görüntüsü 79

Şekil 4.33. A) AA7075-T651 temperi, B) AA7075-T73 temperi, C) AA7075-OA temperi mikro yapı görüntüsü 80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Vakum torbası ve sızdırmazlık macunu testi 52

Resim 4.2. Kalıp ile numune arasındaki boşluklar 55

Resim 4.3. Kalıp ile numune arasındaki boşlukların kapatılması. 56

Resim 4.4. Kalıp üzerindeki delik ve boşaltmaların kapatılması. 57

Resim 4.5. Sızdırmazlık bandı uygulaması 58

Resim 4.6. Torbalama öncesi deney seti 59

Resim 4.7. Vakum torbası uygulaması 60

Resim 4.8. Vakum port uygulanması 61

Resim 4.9. Deney setinin statik testi 62

Resim 4.10. Deneylerin gerçekleştirildiği otoklav cihazı. 63

Resim 4.11. Otoklav sonrası deney seti 64

Resim 4.12. Vakum torbası, vakum port ve termocoupleların sökülmesi 64

Resim 4.13. Sarf malzemelerin temizlenmesi 65

Resim 4.14. Şekillendirilmiş numune görselleri 66

Resim 4.15. Sertlik ölçüm cihazı 67

Resim 4.16. İletkenlik ölçüm cihazı ve kalibrasyon kontrolü 67

Resim 4.17. Numunelerin iletkenlik ölçümü 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
cm^3	Santimetre küp
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Computer Numeric Control
E	Elastisite Modülü, MPa
g	Gram
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
m	Metre
M	Moment, Nmm
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
Q	Aktivasyon enerjisi
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	Spring Back
OA	Over-Aging
WQ	Water Quenching

1. GİRİŞ

Havacılık ve uzay sanayisinde üretilen ürünlerin gelişmesi ile birlikte kompleks geometriye sahip büyük boyutlu uçak parçalarının üretimine ihtiyaç doğmuştur. Bu ihtiyacı, geleneksel saç şekillendirme yöntemlerinden olan plastik şekillendirme yöntemi karşılayamamış ve yeni üretim yöntemlerinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak üzere Textron firmasının 1980'li yılında çalışmalara başlamış ve firma Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme (Creep Age Forming) adı verilen yeni bir saç şekillendirme yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem ile üç boyutlu forma sahip kompleks geometrili havacılık ve uzay araçlarına ait büyük boyutlu parçaların üretimi gerçekleştirilebilmiştir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi, iş parçasına şekil verilirken aynı zamanda yaşlandırma ısıl işleminin de gerçekleştirildiği ileri şekil verme yöntemlerinden biridir. Şekil verme işlemi malzemenin elastik sınırları içerisinde gerçekleştirildiğinden ötürü iş parçası üzerinde düşük kalıcı gerilmelerin kalmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca talaşlı imalatı tamamlanmış iş parçasının da şekillendirilmesine olanak sağlar. İleri şekillendirme yöntemlerinden biri olan Sürünme Yaşlandırma yöntemi, ticari ve askeri uçakların kanat panellerinin ve gövde panellerinin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca entegre panel kiriş yapılarına sahip uçak parçalarının şekillendirilmesi için de tercih edilmektedir.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi temel olarak sürünme deformasyonu ve yaşlandırma ısıl işleminden meydana gelir. Bu yöntem ile sadece yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilen malzemeler şekillendirilebilmektedir. Şekillendirme işlemi malzemenin elastik sınırları içerisinde uygulanmaktadır. Bu sebepten ötürü malzeme bünyesinde diğer şekillendirme yöntemlerine nazaran daha düşük kalıntı gerilmeler kalmaktadır. Sürünme mekanizması genel olarak gerilim azalmasına dayanmaktadır. Sabit gerinim uygulanan iş parçası üzerinde bir gerilim meydana gelmektedir. Bu gerilim değeri yeteri kadar uzun süre iş parçasına uygulandığı durumda iş parçası bünyesinde sürünmeden kaynaklı gerilim azalması meydana gelir. Bu durum malzeme üzerindeki elastik deformasyonun bir miktarını plastik deformasyona dönüşmesine sebep olur. Toplam gerinim değeri, elastik gerinim değeri ile plastik gerinim değerine eşittir ve değişmemiştir. Gerilme azalması etkisi ile iş parçası üzerinde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Sürünmeden kaynaklı plastik deformasyon iş parçası bir kalıp yüzeyine ittirilerek oluşturulması durumunda iş parçasının form almasını sağlamaktadır. Sürünme kaynaklı plastik deformasyona

dönüşemeyen elastik deformasyon ise iş parçası üzerinde meydana gelen geri yaylanmaya sebep olmaktadır. Geri yaylanma değerleri; şekillendirilen malzemenin cinsine, kalınlığına ve şekillendirme parametrelerine bağlı olarak %10 ile %80 aralığında değişebilmektedir. Bu sebepten ötürü geri yaylanma değerinin belirlenmesi, Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile doğru parça şekillendirilebilmesi için önemlidir. Malzemelerin geri yaylanma davranışlarının elde edilebilmesi için, malzeme cinsine ve et kalınlığına bağlı deneme üretimlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle büyük ölçekli parçaların geri yaylanma miktarının elde edilebilmesi için deneme üretim yapılması, ham malzeme ve kalıp üretimi açısından oldukça maliyetlidir. Bu durum ürün maliyetlerini arttırmaktadır.

Tez kapsamında, otoklav ortamında gerçekleştirilen Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesindeki otoklav basıncının, otoklav sıcaklığının ve malzeme kalınlığının geri yaylana davranışına etkisi incelenmiştir. T=0 anında numune kalınlığınca oluşan gerilmeler ile geri yaylanma davranışı arasında ilişki incelenmiştir. Malzeme kalınlığı, otoklav sıcaklığı ve otoklav basıncı hariç tüm parametreler deneylerde sabit tutulmuştur. Deney numunesi olarak havacılık sektöründe kullanımı yaygın olan alüminyum 7075 alaşımı tercih edilmiştir. Deneylerde sıcaklık ve zaman parametreleri malzemenin yaşlandırma parametrelerine göre belirlenmiştir. Malzemenin yaşlandırma parametreleri AMS2770 standardına göre T651 temperindeki bir plaka malzemenin T73 temperine dönüşmesi için gerekli olan sıcaklık ve zamana göre belirlenmiştir. Numune kalınlıkları, uçak panellerinde yaygın olarak rastlanan kalınlık değerlerine bağlı olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda otoklav parametreleri ve malzeme kalınlığına bağlı olarak elde edilen geri yaylanma değerlerinin, bu prosesle üretilecek parçalar için tasarlanan kalıplara uygulanacak geri yaylama değerleri için bir girdi sağlanması beklenmektedir. Ayrıca bu çalışma yerli ve milli uçaklarımızın kanat ve gövde panelleri dahil olmak üzere büyük ölçekli ve kompleks geometrili uçak parçalarının üretiminde kullanılacak bir yöntem olarak literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Denise M. Hambrick (Avcc Aerostructures Division), B-1B Long Range Combat uçağı projesi kapsamında, uçağın üst ve alt kanat kabuklarını Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile üretilmesi üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada 2800 mm kanat genişliği ve 15240 mm kanat uzunluğuna sahip, et kalınlığı 2,54mm-63,5 mm aralığında değişen kanat kabuklarının şekillendirilmesi istenmiştir. Kanat kabuğu malzemesi olarak alüminyum 2024 ve 2419 kullanılmıştır [1].

Şekillendirme prosesinde malzemenin geri yaylanma değerini belirleyebilmek için, 3300 mm yarıçap sahip deney kalıbı tasarlanmıştır. Bu deneyde şekillendirilecek numune ölçülerini 75x1168 mm ve 1220x1220 mm ölçülerinde belirlenmiştir. Numune kalınlıkları alüminyum 2124 malzemede 20,32mm, 35,05mm, 54,61 mm; alüminyum 2419 malzemede 20,32mm, 38,10mm, 63,5 mm olarak belirlenmiştir. Şekillendirmek için kullanılan basınç değeri 200 psi, yaşlandırma parametreleri alüminyum 2124 için; 12 saat ve 190°C ±5°C ve alüminyum 2419 için: 18 saat ve 177°C ±5°C olarak belirtilmiştir. Deney sonucunda AA2124 alaşımlı numunede %76, %61, %47; AA2419 alaşımlı numunede %31, %21, %14 geri yaylanma gözlemlenmiştir. Numunelerde et kalınlığı azaldıkça geri yaylanma oranının arttığı tespit edilmiştir. Hambrick, yapmış olduğu deney çalışmalarından elde ettiği geri yaylanma değerlerini referans alarak kanat kabukları için kalıp tasarımı yapmış ve beş adet kanat kabuğu şekillendirmiştir. AA2419 alaşımından üretilen kabuk için ilk deneme de doğru parça üretilmiş, AA2124 alaşımından üretilen kanat kabuğunda ilk denemede 11mm'lik sapma elde edilmiştir. Kalıp yüzeyine verilen geri yaylanma telafi değeri düzenlenmiş ve tekrar bir üretim gerçekleştirilmiş ve doğru uçak parçası elde edilmiştir [1].

Yaptıkları çalışma sonucunda Sürünme-Yaşlandırma yöntemi ile doğru kanat kabuğunun üretilebilir olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda;

- Malzeme et kalınlıklarında değişim olmadığı,
- Yöntemin tekrarlanabilir olduğu,
- Parça formundaki tutarsızlıkların kalıp formundaki değişiklikler ile düzeltilebilir olduğu,
- Diğer imalat yöntemlerine kıyasla ölçüsel istikrar ve daha düşük iç gerilmeli parçaların üretilmesine olanak sağladığı,
- Proses esnasında yaşlandırma ile istenilen malzeme özelliklerinin sağlanabileceği,

- Bu yöntem ile kompleks parçaların tipik hava aracı toleranslarında üretilebileceğinin ispatlanmış olduğunu ifade etmektedir [1].

Diego ve arkadaşları, AA7475 malzemeden üretilen güçlendirilmiş uçak kanat kabuğunun Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Şekillendirme işleminde numune üzerinde oluşacak geri yaylanma değerini tahmin edebilmek için literatürden referans bir model edinmişlerdir. Referans olarak almış oldukları çalışma dikkate alınarak şekillendirmek istedikleri test numuneleri için başlangıç geri yaylanma değerini %70 olarak belirlemişlerdir. Şekillendirme kalıbı alüminyum malzemeden 3750 mm sabit yarıçapa sahip bir şekilde üretilmiştir. Üç adet deney numunesi 600mm X 300 mm ölçülerinde, 50,8 mm et kalınlığına sahip AA7475-T7351 malzemeden üretilmiştir. Deney numuneleri 30mm'lik yöne doğru güçlendirici yap bulundurmaktadır. Kabuk tabanı ve güçlendiriciler farklı et kalınlıkları bulundurmaktadır. Bu ölçüler uçak kabuğunun küçük bir alanını temsil etmektedir. Deney ham malzemesi SAE AMS4202D standardına uygun olarak tercih edilmiştir. Ham malzeme talaşlı imalat sonrası solüsyon ısıl işlemine tabi tutulmuş ve 121°C'de 6 saat yaşlandırılmıştır. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme işlemi otoklav şartlarında gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme parametreleri, 163°C sıcaklık, 0.7MPa otoklav basıncı ve 24 saat yaşlandırma süresidir. Bu yaşlandırma parametreleri, şekillendirme işlemi sonrası deney numunesini T73 kondüsyonuna yaşlandırmıştır. Şekillendirme işlemi sonrası Rockwell B sertlik yapılmıştır. 3D tarama cihazı ile şekillendirilmiş numuneler ölçülmüş ve deformasyon miktarı belirlenen her kesit için incelenmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda elde edilen verilere göre prosesin tekrar edilebilir olduğunu gözlemlemişlerdir. Deney numunesi üzerindeki geri yaylanma değerleri incelendiği durumda, ölçüm alınan her kesitte farklı bir geri yaylanma değeri gözlemlemişlerdir. Buda nihai uçak parçasının üretilebilmesi için kalıpta, uçak parçasının ilgili kesitine göre farklı geri yaylanma telafi değerlerinin verilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu çalışmada, geri yaylanma değerlerinin %55 ile %86 aralığında değişmiş olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak bir panelin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesi sürecinde geri yaylanmanın tespit edilebilmesi için, panelin bir bölümünün incelenmesi geri yaylanma değeri hakkında fikir sahibi olunmasını sağlayacağı söylenebilir [2].

Lei ve arkadaşları AA7075 ve AA2124 malzemelerin yüksek sıcaklıktaki sürünme davranışlarını tek eksenli sabit yüklemeli sürünme testi ile deneysel olarak incelemiştir. AA7075 ve AA2124 yüksek sıcaklık sürünme davranışlarını tanımlayan kurucu modeller sürekli hasar mekaniği (CDM) yöntemine dayalı olarak oluşturulmuştur. AA7075 malzemenin T651 temperine, AA2124 malzeme t851 temperine yaşlandırılacak şekilde ısıl işlem parametreleri belirlenmiştir. Numuneler ASTN E8M-4 standardına göre talaşlı imalat ile üretilmiştir. Sabit yüklü tek eksenli sürünme testi MTS-GWT2105 test cihazında ASTN E139-06 standardına göre yapılmıştır. İlk olarak test numunesi istenilen sıcaklığa 10K/dakika hız ile ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra yük uygulanmıştır. AA7075 numune için 30 saat boyunca test devam etmiş, AA2124 numune kopana kadar test devam etmiştir. AA7075 numuneye 393 K sıcaklık altında 230MPa, 260MPa, 290MPa; 423 K sıcaklık altında 200MPa, 230MPa, 260MPa gerilme uygulanmıştır. AA2124 numunelere 473 K sıcaklık altında 235MPa, 245MPa, 255MPa; 503 K sıcaklık altında 180MPa, 190MPa, 200MPa; 533K sıcaklık altında 120MPa, 140MPa, 160MPa gerilme uygulanmıştır [3].

Yapılan çalışma sonunda sürünme zamanının ve sıcaklığının sürünme davranışı üzerinde ciddi etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen grafiklerde sürünme olayının üç aşamada gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Numune üzerine uygulanan yüke bağlı olarak sürünme gerinmesinde artış gözlemlenmiştir. AA7075 numune için kısa birincil aşama gözlemlenmiştir. Birincil aşamada sürünme gerinimi oranında azalma gözlemlenirken ikincil sürünme aşamasında sabit oranda artış gözlemlenmiştir. AA2124 numune için yapılan test koşullarında direk üçüncül sürünme aşaması gözlemlenmiştir. AA2124 malzemeye uygulanan gerilme ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak birincil ve ikincil sürünme aşamaları çok kısa sürmüştür [3].

AA7075 ve AA2124 malzemelerin yüksek sıcaklık sürünme davranışlarını açıklamak için sürekli hasar mekaniğine (CDM) dayalı yapısal modeller geliştirilmiştir. AA7075 alüminyum alaşımının birincil ve ikincil sürünme gerilmelerini tahmin etmek için basitleştirilmiş bir CDM modeli oluşturulmuştur ve ölçülen ve tahmin edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. AA2124 alüminyum alaşımının sürünme davranışlarını (özellikle üçüncül sürünme aşamasında) açıklamak için değiştirilmiş bir yapısal model önerilmiştir. Ölçülen ve tahmin edilen sonuçlar arasında tatmin edici bir uyum elde edilir, bu da yerleşik kurucu modellerin AA7075 ve AA2124 malzemelerinin

sürünme davranışlarını doğru ve kesin olarak tahmin edebildiğini gösterir [3].

Başaran, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii bünyesinde AA2024-T3 malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde meydana gelen geri yaylanma değerlerini elde etme üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında 0,810; 1,016; 1,270 ve 1,600 mm et kalınlığına sahip numuneleri farklı basınç değerleri altında otoklav ortamında şekillendirilmelerini araştırmıştır. Yapılan çalışmada SAE AMS QQ-A-250/5 standardına uygun AA2024-T3 malzeme T81 temperine yaşlandırılırken şekillendirilmiştir. Malzemeye uygulanan yapay yaşlandırma ısıl işlemi, AMS 2770 dokümanı referans alınarak 190°C ve 10-12 saat olarak belirlenmiştir. Proses basıncı 0.6, 0.7, 0.8 ve 0.9 MPa olarak belirlenmiştir. Kullanılacak olan sarf malzemeler olarak DPT-1000 vakum torbası, ULTRAWAVE 1332 battaniye ve A-800-3G sızdırmazlık bandı kullanmışlardır. Deney tasarımında kullanılan numune ölçüleri her et kalınlığı için 100x225 mm olarak belirlenmiştir. Deney her kalınlık ve basınç değeri için toplamda iki numune şekillendirilerek gerçekleştirilmiştir. Kullanılan otoklav cihazının 5°C/DK ısınma hızı ve ±1°C sıcaklık ölçüm toleransına sahiptir [4].

Şekillendirilen numunelerin geometrik ve boyutsal ölçüleri, sertlik ve iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Geri yaylanma oranları defleksiyon metoduna göre ölçülmüştür. Sertlik ve iletkenlik ölçümleri ASTM E10 ve ASTM E1004 standartlarına uygun gerçekleştirilmiştir [4].

Yapılan çalışma sonucunda AA2024-T3 sac malzeme T81 temperine yaşlandırılırken şekillendirilmiştir. Numuneler üzerinden alınan setlik ve iletkenlik ölçüm değerleri AMS 2658 standardının isterlerini sağlamaktadır. Malzemenin sertlik ve iletkenlik değerleri, büyük oranda malzemenin yaşlandırma parametrelerine bağlı olduğu söylenebilir. Başaran yapmış olduğu çalışma sonucunda AA2024-T3 malzemesinin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile şekillendirilebileceğini göstermiştir. Şekillendirme esnasında malzeme kalınlığının ve otoklav basıncının artması geri yaylanma değerini azalttığını tespit edilmiştir [4].

Safari ve arkadaşları AA7075 malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesinde geri yaylanma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada 136 x 15 x 2 mm ölçülerinde sac malzeme kullanmışlardır. Deney numunelerinin et kalınlığı 68 mm boyunca işlenerek 1 mm'ye düşürmüşlerdir.

Şekillendirme işlemi oda koşullarında numune iki kalıp arasına alınarak fırında yaşlandırarak gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca aynı boyutlara sahip 1 ve 2 mm et kalınlığına sahip numunelerin de Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme davranışları incelemişlerdir. İşlenmiş numuneler; 6, 10, 18 ve 22 saat ve 160, 180, 200, 220 ve 240°C parametrelerine bağlı yaşlandırılmış ve toplamda 11 numune şekillendirilmiştir. Yaptıkları deneyler sonucunda kesit daralmasına sahip olmayan numunelerde düzgün şekil değişimi olurken işlenmiş numunelerde şekillenme istikrarında bozulma gözlemlemişlerdir. Sıcaklık ve zaman parametrelerinin her ikisi de artış gösterdiği durumda, geri yaylanma değerlerinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Maksimum ve minimum geri yaylanma değerleri sırası ile %82 ve %4 olarak tespit etmişlerdir. Sobol metodu ile yaptıkları analiz sonucunda geri yaylanma değerlerinde, kalın kesitli malzemeler için sıcaklığın %68, zamanın %32 ve ince kesitli malzemelerde sıcaklığın %78 ve zamanın %22 ehemmiyetli olduğunu tespit etmişlerdir [5].

Haoliang Yang ve arkadaşları bu çalışmada 200 mm × 48 mm yekpare güçlendirilmiş AA2219 plakalar, 156 mm yarıçapına sahip iki kalıp arasında ve 175°C sıcaklık altında 18 saat süre ile Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme deneyi gerçekleştirmiştir. Şekillendirme işlemi düz, kirişli, waffle ve izogirit yapıya sahip dört farklı plaka için gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi sırasında numune üzerindeki cepleri korumak için PTFE dolgu malzemesi kullanılmıştır. Farklı cep yapıya sahip tasarımları için yapılan deneysel çalışmalarda plakaların geri yaylanma değerleri %15; %14,7; %15,7 ve %12,2 olarak ölçülmüştür. Bu alaşım için belirlenen Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme malzeme sabitleri kullanılarak sonlu elemanlar modeli ABAQUS programında kullanıcı tanımlı olarak geliştirilmiştir. Oluşturulan sonlu elamanlar modeli deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Farklı yaşlandırma koşullarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen geri yaylanma değerleri arasında sadece %6,3 farklılık gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonunda en az geri yaylanma değeri izogrid işlenmiş numunelerde gözlemlenmiştir [6].

Fenggong Lyu arkadaşları, semer şeklindeki AA7050 malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesindeki geri yaylanma davranışlarını tanımlamak için kurucu denklemler belirlemişlerdir. AA7050'nin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi malzeme sabitlerini belirlemek için testler yapmışlardır. Yapılan çalışmada haddelenmiş 7050 T451 alüminyum plaka kullanılmıştır. Tek eksenli sürünme çekme testi 160°C altında 20 saat boyunca, 179, 202, 246 MPa gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Belirlemiş

oldukları denklemleri ile ABAQUS yazılımında kullanıcı tanımlı bir alt program (CREEP) oluşturmuşlardır. Şekillendirme işlemi 600*600*6 mm ölçülerindeki numune ile 1333-4000mm yarıçapa sahip semer şeklindeki kalıp üzerinde gerçekleştirilmiştir. CREEP programı ile malzemenin dış formunu ve akma mukavemetini tahmin eden bir analiz gerçekleştirdiler. Elde ettikleri sonuçlar ile deney sonuçlarını karşılaştırıldı. Araştırma sonucunda, Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde gerilim azalması ve sürünme deformasyonunun çoğunlukla başlangıç aşamasında gerçekleştiğini görmüşlerdir. Analiz sonucu ile deney parçasının ölçüm sonucu arasında yakın bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Parçanın yaklaşık %90'lik alanında 0,5 mm'den daha küçük sapma ölçülmüştür. Hesaplanan akma mukavemeti ile test edilen akma mukavemeti arasında %-1,18 ve %7,22 hata tespit edilmiştir. Bu sonuçlar sayısal hesaplamanın geçerliliğini kanıtlamışlardır [7].

Youliang Yang ve arkadaşları, yüksek mukavemetli alüminyum malzemelere solüsyon ısıl işlemi ile yapay yaşlandırma prosesleri arasında ön deformasyon vermenin söndürme (quench) kaynaklı iç gerilmelerin azaldığını ve malzemenin mekanik özellikleri iyileştiğini bildirir. Yaptıkları çalışmada, Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile form verilmiş 2219 alaşımlı alüminyum plakada ön deformasyon uygulamanın geri yaylanmaya, malzemenin mikro yapısına ve malzemenin mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deney numuneleri sıcak haddelenmiş AA2219 malzemeden 10 mm kalınlıkta iki numune üretilmiştir. Numuneler 320 x 220 x 10 mm ölçülerinde dikdörtgen şekilde hadde yönünde işlenmiştir. Her iki numune elektrik rezistanslı fırında 535°C ve 60 dakika solüsyon ısıl işlemine tabi tutulmuş ve ardından suda söndürülmüştür (quenching). Numunelerden bir tanesi hadde yönünde %7 oranında gerdirilmiştir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme test otoklav ortamında gerçekleştirilmiş ve sıcaklık ve basınç ±1.5°C ±0,01 MPa hassasiyetinde kontrol edilmiştir. İlk olarak plakalar 1160 mm yarıçapa sahip tek eğrili kalıp yüzeyine yerleştirilmiştir. Plakaya üst yüzeyinden 0.5 MPa basınç uygulanarak diğer yüzeyinin kalıp ile tamamen temas etmesi sağlanmıştır. Daha sonra deney seti otoklava gönderilmiş 165°C ve 12 saat süre ile Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesine tabi tutulmuştur. Numune üzerinden basınç kaldırıldığı durumda geri yaylanma oluşmuştur. Diğer numune için de aynı deney aşamaları uygulanarak şekillendirme işlemi tamamlanmıştır. Şekillendirilen numuneler ATOS Raster tarayıcı ile ölçülmüştür. Numunelere çekme testi uygulanmış ve mikro yapıları incelenmiştir [8].

Elde ettikleri sonuçlara göre, ön deformasyon uygulamanın kayda değer derecede geri yaylanmayı azalttığını ifade etmişlerdir. Ön deformasyon (gerdirme) uygulanmış deney numunelerinde geri yaylanma oranı %15,3 olarak hesaplanmışken ön gerilme uygulanmadan şekillendirilmiş numunelerde geri yaylanma oranı %29,1 olarak hesaplanmıştır. Ön deformasyon uygulanmış numunelerin mekanik özellikleri, ön gerilme uygulanmayanlara nazaran daha iyi olduğunu keşfetmişlerdir. Ön deformasyon uygulanmamış numunelere kıyasla, ön deformasyon uygulanmış numunelerde çekme dayanımların %7,3; akma dayanımlarında ise %20,8 iyileştiği bildirilmiştir [8].

R. Arabi Jeshvaghani ve arkadaşları alüminyum 7075 alaşımının Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde zaman ve sıcaklığın etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney numuneleri AA7075 malzemeden 400x100x3 mm ölçülerinde üretilmiştir. Numunelerin şekillendirilmesi için kullanılan kalıp 310 mm yarıçapa sahip ve numuneye 65 mm deformasyon verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Kalıplar dişi ve erkek olacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Tüm numuneler 475°C, 50 dakika solüsyon ısıl işlemine tabi tutulmuş ve ardından suda söndürülmüştür (quenching). Şekillendirme sıcaklığı, malzeme için gerekli olan metalürjik özelliklere göre belirlenmiştir. 7000 serisi alüminyum malzemeler için yaşlandırma sıcaklığı genel olarak 120°C ile 190°C aralığındadır. Alüminyum alaşımları söz konusu olduğunda sürünme sıcaklığı 0,4-0,5 TM (TM: alüminyum ergime sıcaklığıdır.) aralığındadır [bu bilgiye atıf yap]. Geri yaylanma ile mekanik özellikler arasında iyi bir uyum yakalayabilmek adına yaşlandırma ısıl işlemi 150°C ve 190°C sıcaklık altında 6-72 saat aralığında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi hadde yönünde, oda sıcaklığında INSTRON 5500 makinesi ile 2mm/dakika çene hızı ile gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik ölçümü F/D2 = 5 yük derecesi ile gerçekleştirilmiştir. Yapmış oldukları çalışma sonucu sıcaklık ve zamanın azaltılması sonucunda geri yaylanmanın arttığını tespit etmişleridir. Geri yaylanma ve mekanik özellikler bakımından en uygun prosesin 150°C ve 24h olduğunu tespit etmişlerdir [9].

Paulo ve arkadaşları, AA7050 malzemenin Temper to Age Forming ısıl işlemindeki halini Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde kullanarak proses süresini azaltma üzerinde çalışmışlardır. Deney numuneler AMS4050 standardına uygun AA7050-TAF malzemeden üretilmiştir. Numuneler 700mm X 70mm X 10, 400mm, 70mm, 15mm ölçülerinde 25.4 mm ek kalınlığına sahip plakadan işlenerek üretilmiştir. Şekillendirme işlemi 1600 mm yarıçapa sahip kalıp ile otoklav ortamında gerçekleştirilmiştir.

Yaşlandırma parametreleri AMS2770 dokümanına göre T74 temperi elde edilecek şekilde belirlenmiştir. Malzeme için sürünme testi ASTN E8 dokümanına göre gerçekleştirilmiştir. Sürünme testi 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Sürünme testi için sıcaklık ve zaman parametreleri T74 temperini sağlayacak şekilde AMS2770 dokümanına göre belirlenmiştir. Sürünme testi 193MPa ve 290MPa olmak üzere iki gerilme değeri altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneyler sonucunda; Sürünme- Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde geri yaylanma değerleri malzeme iç gerilmelerine bağlı olduğu gözlemlenmişti. Düşük iç gerilemeler altında yüksek geri yaylanma değerleri elde edilmiştir. AA7050 TAF temperindeki malzemenin şekillendirilmesinden elde edilen geri yaylanma değerleri literatürde bulunan benzer malzemelerin geri yaylanma değerleri ile uyumludur. 193 MPa gerilim altında yapılan sürünme testi literatürdeki emsalleri ile benzer sonuçlar vermektedir. 290MPa gerilme altında gerçekleştirilen sürünme testi ise literatürdeki diğer AA7XXX serisi malzemelere göre daha yüksek sürünme gerinimi değeri vermiştir. AA7050-TAF malzeme, akma mukavemetinin %70'i kadar bir başlangıç gerilmesine sahip şekillendirme durumlarında kullanılabilir. AA7050-TAF malzemesi ile gerçekleştirilen Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme işlemi 8 saatte tamamlanmıştır. Bu durum üretim süresini yaklaşık %50 kısaltmış ve üretim maliyetinin azalmasını sağlamıştır. Yapılan araştırma sonucu AA7050 malzemenin TAF temperindeki halinin Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme yöntemine uygun olduğu gösterilmiştir [10].

Lou ve arkadaşları, alüminyum lidyum alaşımlı malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizi yöntemi ile plastik ve sürünme deformasyonlarının geri yaylanma değerlerine etkileri incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi için malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme sabitleri belirlenmiş ve kullanıcı tanımlı bir alt program oluşturulmuştur. Daha sonra, güçlendirilmiş panelin tasarımı için büyük önem taşıyan yapısal unsurların boyutu, yerleşim ve konumunun prosese olan etkisini incelemişlerdir. Şekillendirmek istedikleri panel 1092 mm X 792 mm ölçülerinde, bünyesinde entegre kirişler ve boşaltmalar bulundurmaktadır. Şekillendirme işlemi değişik eğrilere sahip kalıp üzerinde 165°C sıcaklık altında 10 saat süre ile gerçekleştirmişlerdir. Malzemeye ısı vermeden numune kalıp üzerine ittirildiği durum için geri yaylanma değerini %91,1 olarak ölçmüştür. 10 saat süre ile Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme prosesine tabi tuttuğu durumda geri yaylanma değerini %82,3 olarak ölçmüştür. Sürünme ve elastik deformasyonun aynı derecede panel üzerinde oluşan geri yaylanma değerini etkilediği

gözlemlemiştir. Güçlendirilmiş panel üzerinde deformasyon, boşaltmanın bulunduğu alanda yoğunlaşmış. Değişken et kalınlığına sahip taban levhası üzerinde daha düşük deformasyon meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada; yapı boyutlarının, yerleşiminin ve yapısal unsurların pozisyonu numunenin final şeklini ciddi anlamda etkilediğini belirtilmiştir. Yaptıkları deneysel çalışma ile sonlu elemanlar analizi sonucu arasındaki farklılığın 0,6 mm'den az olduğunu alan, toplam alanın yaklaşık %90'ına denk geldiği gözlemlenmiş ve bu şekilde yapılan analiz doğrulanmıştır [11].

Brandão ve arkadaşları, AA7050 sac malzemenin tek ve çift eğrili forma Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirirken meydana gelen geri yaylanma değerini analiz etmek istemişlerdir. Kurdukları analiz modelini Norton'un güç kanunları ile basitleştirerek sonlu elemanlar modeli oluşturmuş ve proses sonunda geri yaylanma değerini elde etmeye çalışmışlardır. Kurmuş oldukları analiz modelini deneysel olarak doğrulamaya çalışmışlardır. Yapılan deneyler ile $\varepsilon=K*\sigma*n_{initial}$ (K, n- malzeme sabitleri, $\sigma_{initial}$ – von Mises gerilme değeri, ε- sürünme deformasyon oranı) formülünde bulunan sabitlerin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. K ve n değerlerini belirleyebilmek için iki kalıp arasında Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile numuneleri şekillendirmişler ve iç gerilmeler ile geri yaylanma değerlerini kaydetmişlerdir. Aynı kalıplar kullanılarak FEM analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar kıyaslanarak K ve n değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonucu geri yaylanma ile deney sonucu geri yaylanma değerleri birbirini doğrulayana kadar bu işlemi tekrarlamışlar ve sonucunda K ve n değerleri elde etmişlerdir. K ve n değerleri belirlenirken gerçekleştirilmiş olan Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme testlerinde 3mm ve 9 mm kalınlığında, 18 mm genişliğinde ve 170 mm uzunluğunda AA7050 malzeme kullanılmıştır. Kullanılan kalıp yarıçapı 1500mm, 2000mm ve 2500mm'dir. Daha sonrasında 12mm kalınlığında esas şekillendirilmek istenen numune için analiz gerçekleştirilmiş ve numune deneysel olarak şekillendirilerek sonuçlar kıyaslanmıştır. Deney numunesi şekillendirilirken 174°C sıcaklık ve 8 saat proses süresi kullanılmıştır. Kalıp yarıçapı çift eğrili olarak 4055mm ve 3582mm olarak tasarlanmıştır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda; AA7050 malzemenin 174°C sıcaklık altında elastisite modülünde %11,5 oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Malzemenin akma mukavemeti yaşlanma boyunca artmış ancak daha sonra aşırı yaşlanma sebebi ile azaldığını gözlemlemiştir. Yapmış oldukları geleneksel sürünme testi ile Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme modelini tanımlayamamışlardır. Ancak bu test ile ikincil ve üçüncül aşamalar arasındaki geçiş zamanını belirlemek mümkün olmuştur.

Malzemenin akma mukavemeti ve sürünme deformasyonu dikkate alındığında proses süresinin 8 saat olması uygun görülmüştür. Yaptıkları analiz sonucu elde ettikleri geri yaylanma değerleri ile deney sonucu elde ettikleri geri yaylanma değerleri birbirleri ile uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada elde etmiş oldukları geri yaylanma değerleri ile literatür de buldukları geri yaylanma değerleri birbiri ile uyumludur. Geri yaylanma değerini azaltmak için proses süresini arttırmak mümkündür ancak malzemenin akma mukavemetinin istenilen değerler aralığında olunmasına emin olunmalıdır [12].

Takafumi ve arkadaşları Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinin farklı kalınlıktaki çift eğrili kabuklarda uygulanabilirliğini incelemiş ve geri yaylanma miktarını tahmin etmek için bir metot geliştirmişlerdir. Bu sayede uçak kanat kabuğunun üretim maliyetini ve uçağın ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Şekillendirilecek malzeme olarak havacılıkta yaygın kullanım alanı bulunan AA7475-T7351 malzeme kullanılmıştır. Şekillendirilmek istenen kabukta içbükey ve dış bükey olmak üzere iki eğrili bir yapı mevcuttur. Şekillendirme işlemi otoklavda gerçekleştirilmiştir. Malzeme T651 temperinden T7351 temperine 8 saat 177°C sıcaklık ile getirilmiştir. Deney esnasında kullanılan takım yarıçap ölçüleri, uçak kanat kabuğu eğrilerine göre belirlenmiştir. Numune otoklav ortamında şekillendirilmiştir. Geri yaylanma değerini tahmin etmek için farklı bir yaklaşım denemiştir. Başlangıç olarak Sürünme- Yaşlandırma Modül adı verdiği bir parametre tanımlamıştır. Bu parametreyi Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinden elde ettiği gerinim değeri ile numunenin kalıp yüzeyine temas ettiği andaki iç gerilmeler ile tanımlamıştır. Gerilme değerleri FEM analizi ile elde edilmiştir. Elde edilen Sürünme-Yaşlandırma Modülü, geri yaylanma tahmin etmek için yapılan FEM analizinde kullanılmıştır. Oluşturulan FEM analizinde, oda sıcaklığındaki elastisite modülü ile poisson oranı Sürünme-Yaşlandırma Modülü ile beraber kullanılmıştır. Analiz oda sıcaklığındaki numunenin kalıp yüzeyine ittirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu deformasyondan numune bünyesinde oluşan gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu gerilme değerleri ile Sürünme-Yaşlandırma Modülü (Elastisite modülü ile sürünme deformasyonundan elde edilen bir data) değerleri hesaba katılarak elde edilen değer tahmini geri yaylanma değeri olarak kabul edilmiştir. FEM analizi sonucu elde edilen geri yaylanma değeri ile deney sonucu elde edilen geri yaylanma değeri arasında en fazla %7 bir sapma gözlemlenmiştir. Bu değer uygulanan analiz yönteminin geri yaylanmayı tahmin etmek için etkili olduğunu göstermektedir. Çalışma sonucu olarak AA7475 malzemeden üretilmiş kanat kabuğunun T651 temperinden T7351temperine yaşlandırılırken Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme

yönteminin kullanılabileceği anlaşılmıştır. Prosesin yüksek tekrar edilebilir özelliği bulunmaktadır [13].

Ribeiro ve arkadaşları Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yönteminin teorik kısımları ile kendi elde ettikleri deneysel sonuçları incelemek amacı ile bu çalışmayı yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada 12x100x300 mm ölçülere sahip AA7475 plaka kullanmışlardır. Şekillendirilmek istenen plakanın final yarıçapı 12000mm'dir. Malzemenin kalıp yarıçapına temas ettiği andaki gerilme değerlerini elde edebilmek için MARC yazılımı ile FEM analizi gerçekleştirmişlerdir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme sıcaklık ve zaman parametreleri MIL-H-6088 askeri standardına göre 163°C ve 24 saat olarak belirlenmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı ve zamanı, numuneyi W temperinden T7651 temperine yaşlandıracak şekilde belirlenmiştir. Yapılan FEM analizi sonucu otoklav basıncı 6,9MPa olarak belirlenmiştir. Yaptıkları literatür taraması sonucu 12000 mm parça formuna sahip olabilmek için gerekli olan kalıp yarıçapı 3750 mm olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışma bu parametrelere bağlı olarak otoklav ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekillendirilen numuneler CMM cihazı yardımı ile ölçülmüş ve geri yaylanma değerleri hesaplanmıştır. Deneysel ve analitik çalışma sonucu elde ettikleri geri yaylanma değerleri incelendiği durumda, en fazla %1,1 sapma ile doğru geri yaylanma değeri hesaplandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak basit parçalar için analitik hesap ile geri yaylanma değerlerinin hesaplanabileceği ancak entegre panel-kiriş yapıları için ise geri yaylanma değerinin tahmininin daha zor olduğuna karar vermişlerdir [14].

M. E. Khamneh ve arkadaşları Al-Zn-Mg alaşımının Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesindeki geri yaylanma değerlerini ve prosesin malzemenin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney; 545,2mm yarıçapa salip 30 mm derinlikte form verebilen kalıp üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri AA7075-Alcalad sac malzemeden 3,2x100x350 mm ölçülerinde üretilmiştir. Şekillendirme işlemi öncesi numune 480°C sıcaklıkta solüsyon ısıl işlemine tabi tutulmuş ve suda soğutulmuştur. Şekillendirme işlemi otoklav cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme sıcaklığı malzemenin metalürjik özellikleri dikkate alınarak 120°C ve 180° olarak belirlenmiştir. Yaşlandırma süresi 6-72 saat olarak belirlenmiştir. Malzemeye oda sıcaklığında çekme testi 5mm/dk hız ile gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik ölçümü F/d2=5 oranında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; Artan sıcaklık ve form verme süresinin, gerilim azalmasına etkisinden dolayı geri yaylanmayı azalttığı tespit edilmiştir. Geri yaylanma ve

mekanik özelliklerin iyileştirilmesi bakımından Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme proses parametrelerinin 180°C ve 24 saat olarak uygun olduğu ifade edilmiştir. 180°C proses sıcaklığında daha yüksek akma mukavemeti değeri elde edildiği belirtilmiştir [15].

R. Arabi ve arkadaşları çok aşamalı ısıl işlem ile gerçekleştirilen Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinin AA7075 malzemenin mekanik özelliklerine, pullanma korozyonuna ve geri yaylanmaya miktarına etkisini incelemiştir. Numuneler AA7075 sac malzemeden 3 x 100 x 400 mm ölçülerinde üretilmiştir. Tüm numuneler 475°C ve 50 dakika solüsyon ısıl işlemine tabi tutulmuş ve ardından su verilerek soğutulmuştur. Şekillendirme işlemi numunenin dişi ve erkek kalıp arasına sıkıştırılması sureti ile fırında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kalıp 65 mm şekillendirme derinliğini sağlayan 310 mm yarıçapa sahip dişi ve erkek parçadan oluşmaktadır. Çekme testi numuneleri 2mm/dk çekme hızı ile deforme edilerek gerilme-gerinme değerleri elde edilmiştir. Pullanma korozyon testi ASTM G34-01 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Malzemenin mikro yapısı TEM mikroskopu ile incelenmiştir [16].

Deney sonucunda 150°C sıcaklık altında yaşlandırılmış numunenin 24 saat sonra 450MPa olan maksimum akma mukavemetine eriştiği, 190°C sıcaklık altında yaşlandırılan numunenin 6 saat sonra 300MPa olan maksimum akma mukavemeti değerine eriştiği gözlemlenmiştir. Araştırmacı bu değerlerin çökelme ve gerinim sertleşmesine bağlı olarak bu şekilde değiştiğini ifade etmektedir [16].

Şekillendirme işlemi farklı beş ısıl işlem yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ısıl işlemler;

- Numune A: 150°C / 24 saat
- Numune B: 150°C / 24 saat + 190°C / 6 saat
- Numune C: 150°C / 24 saat + 190°C / 20 dk + 120°C / 24 saat
- Numune D: 150°C / 24 saat + 190°C / 40 dk + 120°C / 24 saat
- Numune E: 150°C / 24 saat + 190°C / 90 dk + 120°C / 24 saat

Yapılan deney sonucunda elde edilen maksimum çekme dayanımı, akma dayanımı ve geri yaylanma değerleri sırası ile; Numune A için 535MPa, 450MPa, %37; Numune B için 400MPa, 250MPa, %30; Numune D için 530MPa, 450MPa, %34 dür. C, D ve E numuneleri

benzer sonuçları vermiştir. Yapılan pullanma korozyon testi sonucunda D numunesinin korozyon dayanım direnci en yüksek iken, korozyon dayanım direnci en düşük olan numune B numunesi olarak belirlenmiştir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde çok aşamalı ısıl işlem ile AA7075 malzemenin mekanik özelliklerinin ve geri yaylanma değerlerinin iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir [16].

Ribeiro ve arkadaşları bu çalışmada, çift değişken eğrili ve kirişsiz uçak kanat panellerinin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme (CAF) süreci ile imalatını sayısal olarak modellemişlerdir. Tek eksenli ve yaşlanma koşullarındaki sürünme davranışının modellenmesi, basitleştirilmiş ve birleşik modeller kullanılarak gerçekleştirilmiş ve AA7010 alaşımı için literatür verileriyle karşılaştırılmıştır. Birleşik bir model, FORTRAN dilinde kodlanmış bir alt program aracılığıyla MSC.Marc sonlu elemanlar yöntemi programına uygulanmıştır. Ardından, AA7475 alüminyum alaşımından asimetrik bir panelin CAF süreci temsil etmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Elde edilen geometri, gerçek bir deney ile karşılaştırılmıştır. Tek eksenli modellenme sonuçları, referans olarak kullanılan literatür modeline kıyasla basitleştirilmiş modelin %46 daha kesin olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, sürünme üzerinde yaşlanmanın etkisinin daha iyi bir şekilde nicelendirilmesi durumunda iyileştirilebilir. Simülasyon yöntemi malzeme davranışını açıklamış olsa da modellenme ve deneysel sınırlamalar %20'lik hatalara neden olmuştur [17].

Heng Li ve arkadaşları, Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde, şekillendirilecek malzemenin başlangıç temperinin malzemenin sürünme davranışına ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde malzemenin başlangıç ısıl işlemi olarak beş farklı temper seçilmiştir. Bu temperler; çözelti alma (solution), T6 (peak aging), T73 (over-aging), retrogression ve tekrar çözelti alma (re-solution) temperleridir. Al-Zn-Mg-Cu alaşımının yukarıdaki başlangıç temperine sahip Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde şekillendirilebilirliği ve performansı, sürünme ve gerilim azalma-yaşlandırma testleri, mekanik özellik testleri, korozyon direnci testleri yapılmış ve malzemenin mikro yapısı incelenmiştir. Şekillendirilebilirlik farklılıkları, farklı dağıtılmış matris çökeltilerinin (MPts) dislokasyon hareketi üzerindeki engellemelerine atfedilmiştir, yani matris çökeltileri (MPts) ne kadar kaba olursa, dislokasyon hareketi o kadar kolay olduğu ifade edilir. Sürünme yaşlandırma işlemi sırasında ince matris çökeltileri (MPts) ile çözelti, retrogression ve çözünme temperleri için mekanik özellikler iyileşirken, matris

çökeltilerinin kabalaşması nedeniyle T6 ve T73 temperleri için mekanik özellikler kötüleşmektedir. Çökeltilerin tane sınırı dağılımı süreksiz hale geldiğinden, sürünme yaşlandırılmış numunelerin korozyon dirençleri tüm başlangıç temperleri için artmaktadır. Hem mekanik özellikler hem de korozyon dirençleri dikkate alındığında, Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde parça formunun doğruluğundan ziyade bileşenlerin yüksek performansı elde etmeleri için tekrar çözelti alma (resolution) temperi tercih edilen bir seçim olabilir [18].

Haoliang Yang ve arkadaşları AA7055 malzemenin farklı kalıplama yöntemi ile Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde şekillendirilmesi sonucu oluşacak geri yaylanma miktarını tespit edilmesi üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada mekanik tabanlı Sürünme-Yaşlandırma denklemlerini kullanarak ABAQUS yazılımında kullanıcı tanımlı bir alt program oluşturmuşlardır. Gerçekleştirilen analizde şekillendirme işlemi, otoklav ortamında numuneye sabit basınç uygulayarak ve numunenin kenarlarından mekanik klemp yardımı ile kalıp yüzeyine çektirilmesi sureti ile gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi 1400 mm kalıp yarıçapına sahip silindirik kalıp üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekillendirilen numune 12mm x 80mm x 370mm ölçülerine sahiptir. Şekillendirme işlemi 120°C sıcaklık altında ve 20 saat süreyle gerçekleştirilecek şekilde analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda otoklav şartlarında gerçekleştirilen analizde numune ile kalıp arasında numunenin kenarına yakın kısımlar haricinde tam temas gözlemlenmiştir. Klemp ile kalıp yüzeyine çektirilen numunede temas sadece numunenin orta kısmında ve klamp'e yakın kenar kısımlarda gerçekleşmiştir. 20 saatlik yaşlandırma işlemi sonrasında klemplenen numunede, numune ile kalıp arasında oluşan boşlukta artış gözlemlenmiştir. Uniform basınç altında şekillendirilen numunede ise yaşlandırma süresi boyunca kalıp ile numune arasındaki boşlukta azalma gözlemlenmiştir. Uniform basınç yüklemesi için geri yaylanma değeri, numunenin uç kısımları hariç eşittir [19].

Klemplenen numune için geri yaylanma değeri malzeme boyunca değişmektedir. İki yükleme koşulu arasında gözlenen bu farklılıklar, bileşen boyutuyla birlikte artacak ve dolayısıyla oluşturulan parçaların eğriliğinde önemli farklılıklara neden olacaktır. Bu nedenle büyük ölçekli parçalarda uç klempleme yöntemi değişken geri yaylanma değerlerinden dolayı kullanılmamalıdır [19].

Yong Li ve arkadaşları, AA2050 malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirilirken malzemenin başlangıç temperinin üretilen parçanın mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Başlangıç temperi olarak WQ, T34 ve T84 temperleri tercih edilmiştir. Numunelere 150MPa gerilme, 155°C sıcaklık altında değişken sürelerde Sürünme-Yaşlandırma testi yapılmıştır. Yaşlandırılmış numuneler oda sıcaklığında çekme testine tabi tutularak numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Sürünme-Yaşlandırma prosesi uygulanmış numunelerin plastik deformasyon boyunca çökelti-dislokasyon etkileşim mekanizmasının anlaşılabilmesi için deformasyon sertleşmesi analizi yapılmıştır [20].

AA2050-T34 alaşımının akma mukavemeti, Cu kümelerinin çözünmesi nedeniyle ilk 2 saatlik sürünme yaşlandırma sürecinde 269MPa'dan 245MPa'a düşmüş ve sonrasında 18 saatlik proses devamında önemli ölçüde artış göstermiştir. AA2050-WQ alaşımı için akma dayanımı, incelenen 24 saatlik sürünme yaşlandırma süreci boyunca artmaktadır. Çekme dayanımı, akma mukavemeti ile aynı eğilimi gösterirken, düzgün uzama hem sürünme yaşlandırmalı WQ hem de T34 alaşımları için tam tersi bir eğilim göstermiştir. 50 saatlik test süresi sonrasında AA2050-T84 alaşımı için akma dayanımı, çekme dayanımı ve üniform uzama özellikleri sabit bir seviyeye gelmiştir. Yaygın olarak kullanılıyor olan bu üç başlangıç temperi arasında Sürünme Yaşlandırma Prosesi için en uygun başlangıç temperinin T34 olduğuna karar verilmiştir. AA2050 alaşımı için T34 temperi, WQ temperi ile benzer akma mukavemetlerine erişebiliyor iken daha yüksek üniform deformasyona uğrayabilmektedir. Aynı zamanda T84 temperi ile benzer gerilme seviyelerinde daha yüksek sürünme gerinimine erişebilmektedir. WQ, T34, ve T84 başlangıç temperleri sahip AA2050 alaşımının farklı mekanik özellikler ve deformasyon sertleşmesi göstermesinin sebebi farklı çökelme davranışı göstermesinden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Sürünme-yaşlandırma prosesi uygulanmış T34 ve T84 alaşımları başlıca Al2CuLi çökeltisi içerir, buda daha yüksek bir mukavemet ve Al2CuLi ve Al3Li çökeltilerinin aynı anda bulunduğu WQ alaşımına göre biraz daha düşük sertleşme hızına sebep olduğu tespit edilmiştir [20].

You-liang ve arkadaşları AA2524 alaşımlı malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirirken geri yaylanma davranışını incelemişlerdir. Malzemenin çekme gerilmesi altındaki sürünme davranışlarını ve basma gerilmesi altındaki sürünme davranışlarını sırasıyla açıklayabilen iki takım yapısal denklem türetilmiştir. Denklemlerde kullanılan malzeme sabitlerini elde edebilmek için deneyler

gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde malzemenin basma ve çekme gerilmesi altındaki sürünme davranışı incelenmiştir. Çekme sürünme ve basma sürünme test numuneleri, sıcak haddelenmiş olarak temin edilen ham malzemeden üretilmiştir. Çekme sürünme numunesi hadde yönünde 3.5 mm kalınlığında, basma sürünme numuneleri ise 5 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde üretilmiştir. Çekme numuneleri 498°C sıcaklıkta 52 dakika, basma numuneleri 65 dakika bekletilerek çözelti ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin doğal yaşlanması engellenmesi için soğuk bir ortamda test zamanına kadar muhafaza edilmiştir. Tek eksenli çekme ve basınç sürünme testleri, sırasıyla 180, 190 ve 200 °C sıcaklıkta ve 140, 180, 190 ve 210 MPa gerilim altında 16 saat boyunca numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elaman analizi ve deneysel çalışma için 300mm x 80mm X 3,5 mm ölçülerinde deney numunesi tasarlanmıştır. Bu numune 1000mm yarıçapa sahip kalıp üzerinde kalıp üzerinde Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesine tabi tutulmuştur. Simülasyonda numune üzerine düzgün basınç uygulanarak kalıp yüzeyi ile temas etmesi sağlanmıştır. Simülasyon ve analizde 12 saat proses süresi ve 180°C proses sıcaklığı kullanılmıştır. Deney sonucunda simülasyon ve deneysel çalışma için geri yaylanma değerleri ölçülmüştür. Simülasyon sonucunda, yalnızca levha kalınlığı boyunca var olan çekme gerilimi dikkate alındığında levhanın geri yaylanma miktarının %61,12 olduğunu göstermektedir; ancak çekme ve basınç gerilmelerini birlikte dikkate aldığımızda levha geri yaylanma değerinin %65,93'e yükseldiği gözlemlenmiştir. Şekillendirilen dikdörtgen levhanın geri yaylanma değeri %68,2 olarak ölçülmüştür, bu da %65,93'e çok daha yakın bir değerdir. Bu, levhanın şekillendirme sonrası geri yaylanma değerini doğru bir şekilde tahmin edebilmek için levha kalınlığı boyunca hem çekme hem de basınç gerilmelerinin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir [21].

Literatür araştırmalarının sonucuna göre, alüminyum AA7075 malzemenin Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi için uygun olduğu görülmüştür. Ancak, alüminyum 7075 T651 plaka malzemeden üretilen 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 6 mm kalınlığındaki numunelerin Sürünme-Yaşlandırma-Şekillendirme prosesi sırasındaki geri yaylanma oranlarını açıklayan bir deneysel çalışma bulunamamıştır. Özellikle otoklav basıncı ve numune kalınlığına bağlı olarak numune içinde oluşan gerilmelerle ilişkili geri yaylanma oranlarının belirlenmesine yönelik bir çalışma eksikliği tespit edilmiştir.

3. KAVRAMSAL BİLGİLER

3.1.Alüminyum Hakkında Genel Bilgiler

Dünyada kullanılan hafif metallerin en önemlileri Alüminyum Titanyum ve Magnezyum elementleridir. Alüminyum, üretilebilirlik, şekil verilebilirlik ve maliyet açısından en çok kullanılan hafif metalik elementtir. Alüminyum manyetik olmayan metalik malzemeler ailesinin bir üyesidir. Genel metaller arasında kıyaslama yapılırsa hacimsel kullanım olarak demirden sonra en çok kullanılan metalik elementtir. Diğer hafif metalik malzemelere göre oldukça düşük maliyetli olsa da çoğu çelik malzemeden yaklaşık iki kat daha pahalıdır.

Alüminyum alaşımlandırılarak mekanik özellikleri değiştirilebilmektedir. Bu sayede saf hali ile kendisinden daha iyi mekanik özelliklere sahip olan demirden çok daha mukavemetli hale getirilebilmektedir.

Alüminyum içerisinde kullanılan başlıca alaşım elementleri, Bakır (Cu), Magnezyum (Mg), Silisyum (Si), Demir (Fe), Manganez (Mn), Çinko (Zn). Alüminyum içerisinde az kullanılan alaşım elementleri, Krom (Cr), Titanyum (Ti), Lityum (Li), Nikel (Ni) şeklindedir.

Çizelge 3.1. Farklı alüminyum alaşımlarının mekanik ve termal özelliklerinin değişimi

Genel Özellikler			
Yoğunluk	2,64E+03	2,81E+03	Kg /m^3
Mekanik Özellikler			
Young Modül	69	75	GPa
Çekme Dayanımı (Elastik Limit)	109	439	MPa
Çekme Dayanımı	186	510	MPa
Yüzde Uzama	2,5	14	% gerinim
Sertlik- Vickers	57	155	HV
1 Milyon Çevrimdeki Yorulma Dayanımı	68,2	169	MPa
Kırılma Tokluğu	23	38	MPa.m^0,5
Termal Özellikler			
Ergime Noktası	524	650	°C
Maximum Çalışma Sıcaklığı	99,9	170	°C
Thermal İletkenlik	121	187	W/m.°C
Özgül Isı Kapasitesi	882	999	J/kg. °C
Termal Genleşme Katsayısı.	21,6	24,6	µstrain/°C

3.2. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Metalürji üzerine çalışan araştırmacılar, değişen ihtiyaçları karşılayabilmek için Alüminyumu alaşımlandırarak mekanik elektriksel ve üretilebilirlik özelliklerini iyileştirmiştir. Alüminyum alaşımları genel olarak döküm ve dövme ile üretilebilir şeklinde iki sınıfa ayrılır. Alüminyum alaşımları Aluminum Association (AA) tarafından geliştirilen evrensel kullanıma yönelik basit bir sınıflandırma ile adlandırılmaktadır. Aluminum Association dövme alüminyum alaşımlarını genellikle 4 sayısal rakam ile, bazı durumlarda ön ek veya son ek ekleyerek tanımlar.

- İlk basamak, serinin o sayı ile başlayan ana alaşım sınıfını tanımlar.
- İkinci basamak, orijinal temel alaşımdaki varyasyonları tanımlar: bu basamak, orijinal bileşim için sıfır (0), birinci varyasyon için bir (1), ikinci varyasyon için iki (2), benzer şekilde devam eder.
- Üçüncü ve dördüncü basamaklar, seri içindeki belirli alaşımı belirtir; bu rakamların değerlerinin özel bir önemi yoktur ve zorunlu olarak sırayla kullanılmazlar. Varyasyonlar tipik olarak eklenen elementin seviyesine bağlı olarak bir veya daha fazla alaşım elementindeki farklılıklarla tanımlanır.

Çizelge 3.2. Dövme ve dökme alüminyum alaşım tanımlama sistemindeki alaşım elementleri

Dövme Alaşımlar			
Alaşım Grubu	Temel Alaşım Elementleri	Diğer Alaşım Elementleri	Isıl İşlem Uygulanabilirlik
1xx.x	>99	-	Hayır
2xx.x	Al, Cu	Mg, Mn, Si, Cr, Ti, Zn, Li, Fe, Zr, V, Ni, Pb, Bi	Çözündürme ve Yaşlandırma
3xx.x	Al. Mn	Mg	Hayır
4xx.x	Al, Si	Cu, Mg, Ni	Silisyum seviyesine bağlı uygulanabilir.
5xx.x	Al, Mg	Fe, Zn, Mn, Si, Cr, Cu, Ti	Sadece yüksek Mg içerenler.,
6xx.x	Al, Mg, Si, Zn	Fe, Cu, Mn	Çözündürme ve Yaşlandırma
7xx.x	Al, Zn, Mg	Cu, Cr, Fe, Mn	Çözündürme ve Yaşlandırma
8xx.x	Al, Li	Fe, Cu, Mg, Si, Ce	Çözündürme ve Yaşlandırma
Döküm Alaşımlar			
Alaşım Grubu	Temel Alaşım Elementleri	Diğer Alaşım Elementleri	Isıl İşlem Uygulanabilirlik
1xx.x	>99.5Al	-	Hayır
2xx.x	Al, Cu	Mn, Mg, Si, Ti, Fe, Zn	Çözündürme ve Yaşlandırma
3xx.x	Al, Mg, Cu	Fe, Mn, Si, Ti, Zn	Sadece%5,6 dan daha az Bakır içeren
4xx.x	Al, Si	Fe, Cu, Zn, Mn, Ti, Mg, Cr, Ni, Sn	Hayır
5xx.x	Al, Mg	Cu, Fe, Mn, Ni, Si, Sn, Ti, Zn	Hayır
6xx.x	Uygulanabilir Değil		
7xx.x	Al, Zn	Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Si, Ti	Çözündürme ve Doğal / Yapay Yaşlandırma

Alüminyum alaşımı: İçeriğinde %90 ila %96 oranında alüminyum olmak üzere iki veya daha fazla elementten oluşan ve metalik özelliklere sahip madde olarak tanımlanabilir. Çoğu alüminyum alaşımı istenilen mekanik ve karakteristik özellikleri sağlamak için içerisine bir veya daha fazla başka element bulunabilir. Özel imalat veya performans özellikleri kazandırmak için ana alaşım elementine ek olarak birkaç küçük alaşım elementi de eklenmektedir.

Gerinmeyle sertleştirilebilir alüminyum alaşımı: Ana ve küçük alaşım elementlerinin herhangi bir ısıl işlem sırasında önemli bir katı çözelti ve çökelme mukavemeti sağlamayan alaşımlarda gerinim sertleştirmesiyle (yani, soğuk haddeleme veya çekme ile) malzeme özelliklerinde değişim sağlayan alaşımlara gerinim ile sertleştirilebilir olarak adlandırılır.

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşım: Ana ve bazı küçük alaşım elementleri, çözelti ısıl işlemi ve akabinde yaşlanma ile birlikte önemli katı çözelti ve çökelme mukavemeti sağlayan alaşımlara ısıl işlem görebilir olarak adlandırılır.

Dövme alüminyum alaşımı: Külçe veya kütük şeklinde üretilen yarı mamul ürünler üretmek için haddeleme, ekstrüzyon, dövme, çekme veya diğer metal işleme işlemleri gibi bir dizi işlemden herhangi biri ile işlenen alaşımlara denir.

Dökme alüminyum alaşımı: Genellikle nihai veya nihai şekle yakın döküm parçalarda ve bu tür dökümlerin yapıldığı külçede kullanılan alaşımları ifade etmek için kullanılır. Genel olarak, dökme alaşım bileşimleri sonraki haddeleme, ekstrüzyon, dövme veya diğer metal şekillendirme işlemleri için kullanılmaz. Döküm, genellikle külçe, kütük veya daha sonra metal işlemeye yönelik stokların üretimi için uygulanabilir değildir.

3.3. Alüminyum Alaşım Temperleri

Temper tanımı, alaşım tanımının hemen ardında bir tire ile ayrılarak gösterilir (Örn. 2014-T6). Temper tanımındaki ilk karakter, bir harf ile genel işlem sınıfını tanımlamaktadır. Tanımlamadaki harflerin karşılığı aşağıdaki şekilde açıklanır:

F, üretildiği gibi: Spesifik özellikler elde etmek için termal koşullar üzerinde özel bir kontrolün olmadan ve gerinimle sertleştirme işlemlerinin uygulanmadan şekillendirme işlemleriyle yapılan dövme veya döküm ürünler için geçerlidir.

O, tavlanmış: Genellikle düşük mukavemetli temper elde etmek dolayısıyla işlenebilirliği artırmak için dövme yöntemi ile üretilen malzemelere uygulanan ısıl işlemdir. Döküm malzemeler için O, sünekliği ve boyutsal kararlılığı iyileştirmek için uygulanan bir ısıl işlemdir.

H, gerinim sertleştirilmiş: Gerinim sertleştirmesi ile mukavemeti arttırılmış ürünler için geçerlidir. Mukavemette bir miktar azalma sağlamak için ek termal işlemlere sahip olabilirler veya olmayabilirler. H'yi her zaman iki veya daha fazla rakam takip eder.

W, çözelti ısıl işlemi uygulanmış: Yalnızca çözelti ısıl işleminden sonra kendiliğinden yaşlanmış alaşımlar için geçerlidir. Bu atama, yalnızca doğal yaşlanma dönemini belirtmek için W ile birlikte basamaklar kullanıldığında özeldir, örneğin W ½ saat.

T, F, O veya H dışında stabil temperler üretmek için uygulanan ısıl işlemdir: Stabil temperler üretmek için ilave gerinim sertleştirmesi ısıl işlemi uygulanmış veya uygulanmamış malzemeleri tanımlanmaktadır. T'nin ardından her zaman bir veya daha fazla rakam gelir.

Çizelge 3.3. Temper terminolojisi: Alaşım numarasına son ek harfler veya rakamlar olarak eklenen semboller [24]

F, O, H, T veya W son eki temel işlem veya durumu belirtir.	Harften sonraki ilk rakam, özellikleri etkilemek için kullanılan ikincil işlemi gösterir.	Harften sonraki ilk rakam, özellikleri etkilemek için kullanılan ikincil işlemi gösterir.
F: İşlendiği gibi		
O: Sadece tavlanmış, dövme malzemeler		
H: Soğuk işlenmiş, gerinimle sertleştirilmiş	1: Soğuk işlenmiş	2: 1/4 sertleştirimiş
	2: Soğuk işlenmiş ve kısmi tavlanmış	4: 1/2 sertleştirimiş
	3: Soğuk işlenmiş ve stabil edilmiş	6: 3/4 sertleştirimiş
		8: Sertleştirimiş
		9: Ekstra sertleştirimiş
W: Çözelti ısıl işlemi görmüş		
T: Isıl işlem görmüş, kararlı	1: Kısmi çözelti + doğal yaşlandırma	
	2: Tavlanmış (sadece döküm ürünler)	
	3: Çözelti + soğuk işleme	
	4: Çözelti + doğal yaşlanma	
	5: Sadece yapay olarak yaşlandırılmış	
	6: Çözelti + yapay olarak yaşlandırılmış	
	7: Çözelti + stabil edilmiş	
	8: Çözelti + soğuk işlem görmüş + yapay olarak yaşlandırılmış	
	9: Çözelti + yapay olarak yaşlandırılmış + soğuk işlem görmüş	

Çizelge 3.4. Bazı alüminyum alaşımları ve temperlerinin mekanik özellikleri [24]

Alaşım	Temper	Akma Mukavemeti 0.20% (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kesme Mukavemeti (MPa)	Sertlik Brinell HB	Sertlik Vickers HV
AA2011	0	35	80	50	21	20
	T4	270	350	210	90	95
	T6	300	395	235	110	115
	T8	315	420	250	115	120
AA6082	0	60	130	85	35	35
	T5	275	325	195	90	95
	T6	310	340	210	95	100
AA7075	0	105	225	150	60	65
	T6	505	570	350	150	160
	T7	435	505	305	140	150

3.4. Alüminyum Malzemelerin Havacılıkta Kullanımı

Güçle çalışan uçuşun ilk günlerinden itibaren, uçak tasarımcıları minimum ağırlığı elde etmek için çaba gösterdiler. 1903'ten yaklaşık 1930'a kadar, pratik uçuş için mutlak minimum ağırlık gerekliliği vardı. Sonuç olarak, dayanıklılık/ağırlık oranı (özgül dayanıklılık) malzeme seçiminde temel etken oldu ve günümüzde hala büyük önem taşımaktadır. İlk 25 yıl boyunca, uçak gövdesi tellerle takviye edilmiş ve verniklerle kaplanmış kumaşlarla kaplanmış ahşap bir yapıydı. Sitka ladin, düzgün ve düğümsüz ince, düz bir tahıl yapısına sahip olması nedeniyle en çok tercih edilen yapısal malzeme idi. Kumaş genellikle sık dokunmuş yün veya pamuktu ve üzerine 'dope' olarak adlandırılan bir vernik uygulanırdı. Motor, bağlantı elemanları ve teller hariç, erken dönem uçaklarında yapıda çok az miktarda metal kullanılıyordu. Wright kardeşler, kendi tasarladıkları içten yanmalı motorun krank muhafazası için alüminyum-bakır dökme alaşımı kullandılar çünkü alaşımın dayanıklılığı ve uçağın ağırlık gereksinimleri açısından tercih edildi. Bununla birlikte, alüminyum, çökelme sertleştirmesi Alfred Wilm tarafından keşfedildikten bir süre sonra uçak gövdelerinde kullanılmaya başlandı.

1920'lerde Dr. Hugo Junkers, Claudius Dornier ve Adolph Rohrbach gibi bazı tasarımcılar alüminyum uçaklar üzerinde deneyler yaptı. Alüminyumun düşük özgül ağırlığı (2.7), yüksek özgül özelliklere yol açar ve bunun sonucunda ağırlık açısından kritik uygulamalarda alüminyum alaşımlarının seçilmesini tercih eder. Junkers, bakır, magnezyum ve manganez katkıları içeren, yaşlanmaya uğrayabilen bir alüminyum alaşımı olan 'duralumin'i seçti. Duralumin, 1906'da hafif alaşım olarak pirinç yerine kullanılabilecek bir malzeme arayan Alman kimyager Alfred Wilm tarafından keşfedilmiştir. Duralumin, zeplinlerde kullanılsa da havaya maruz kaldığında kabuk soyulması korozyonuna maruz kalıyordu ve Junkers tasarımından önce uçakların yük taşıyan

bileşenlerinde kullanılmıyordu. Ancak 1927'de, Alcoa'daki metalurji uzmanları, kabuk soyulması korozyonuna duyarlı olmayan saf alüminyumla alüminyum alaşımlarını kaplama yöntemi geliştirdi ve böylece agresif bir ortamda koruma sağladı. Aynı dönemde, alüminyum yüzeyinde çok kalın ve koruyucu bir oksit filmi oluşturmak için anotlama adı verilen bir yöntem İngiltere'de geliştirildi. Anotlanmış film genellikle kromatlar gibi kimyasal bileşikler içerir, bunlar anotlama banyosundan toplanır ve havada doğal olarak oluşan filmlere göre daha korozyona dayanıklı hale getirir. Kaplama ve anotlama tarafından sağlanan koruma, havacılık yapıları için büyük ölçüde yeni bir temel oluşturdu ve 1927'den sonra alüminyum alaşımları uçak gövdelerinde yaygın hale geldi. Günümüzde modern ticari uçaklarda polimer matris kompozitler (PMK) kullanılmaktadır, örneğin Airbus A340'ün yatay stabilizatöründe ve Boeing 777'de; ancak alüminyum alaşımları hala uçak gövdeleri için tercih edilen birincil malzemedir.

Çizelge 3.5. Sivil hava araçlarında kullanılan malzeme oranları

Uçak Modeli	Alüminyum (% ağırlık oranı)	Çelik (% ağırlık oranı)	Titanyum (% ağırlık oranı)	PMC's (% ağırlık oranı)	Diğer (% ağırlık oranı)
Boeing 747	81	13	4	1	1
Boeing 757	78	12	6	3	1
Boeing 767	80	14	2	3	1
Boeing 777	70	11	7	11	1
DC-10	78	14	5	1	2
MD-11	76	9	5	8	2
MD-12	70	8	4	16	2

Malzeme Özellikleri;

Korozyon

CYS=Basmadaki akma dayanımı sınırı (Compressive Yield Strength)

E = Elastisite Modülü

FAT = Yorulma (Fatigue)

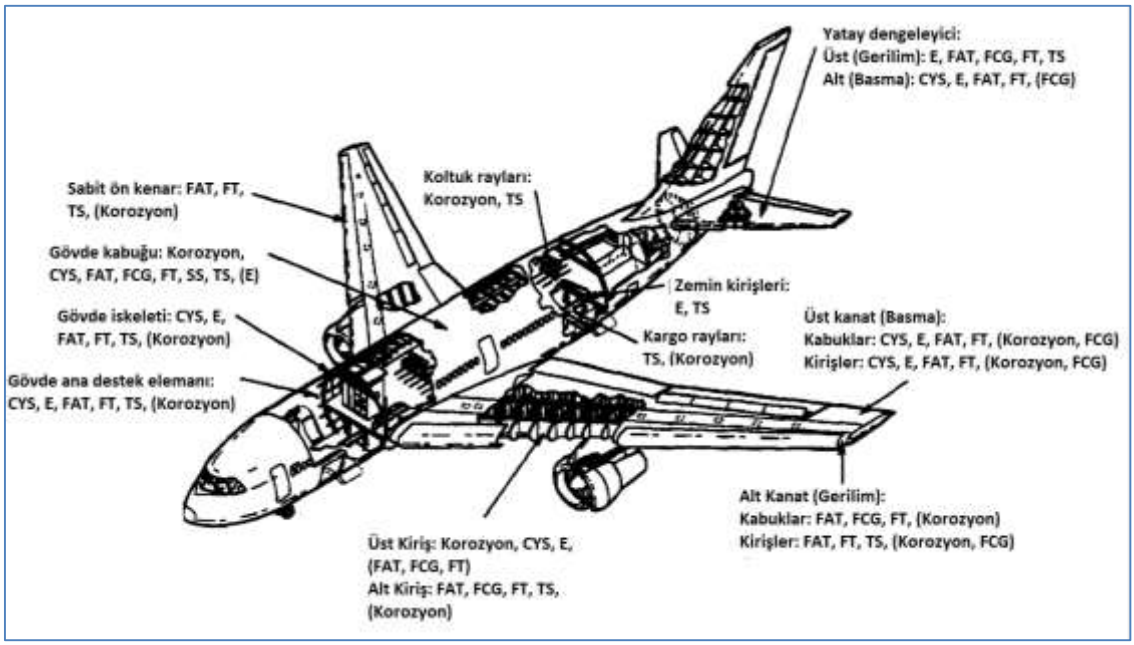
() = Önemli fakat kritik olmayan tasarım gereksinimleri

FCG = Yorulma çatlağı büyümesi (Fatigue Crack Growth)

FT = Kırılma tokluğu (Fracture Toughness)

SS = Kayma mukavemeti (Shear Strength)

TS = Çekme dayanımı (Tensile Strength)



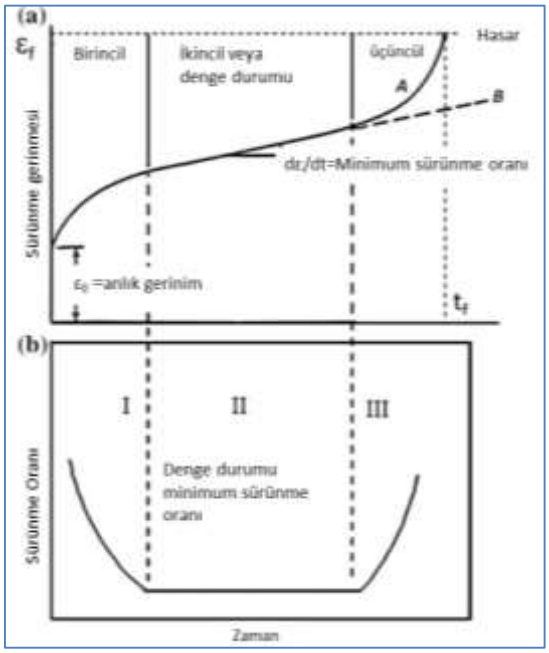
Şekil 3.1. Jet yolcu uçakları ve askeri taşımacılık uygulamaları için özellik gereksinimleri [24]

3.5. Sürünme ve Sürünme Aşamaları

Metallerin ve alaşımların sıcaklık arttıkça mukavemetleri azalır ve deformasyon zamana bağlı hale gelir. Yüksek sıcaklıklarda sabit bir yüke maruz kalan metaller ve alaşımlar, 'sürünme' olarak bilinen zamana bağlı bir uzama geçirir. T/Tm> 0.4 şeklindeki homolog sıcaklıklarda (burada T test sıcaklığını, Tm ise mutlak sıcaklık ölçeğindeki erime noktasını temsil eder), sürünme mühendislik açısından önemlidir. Güç santralleri, petrokimya endüstrisi ve uçak motorları gibi yüksek sıcaklık yapısal uygulamaları için tasarlanan malzemeler, sürünme deformasyonu ve kırılma karşı daha iyi dayanıklılığa sahip olmalı ve bu nedenle sürünme performansı açısından değerlendirilmelidir. Metalik malzemelerin zamana bağlı deformasyonu, zamanla şekil değişiminin gelişimini tanımlayan bir 'sürünme eğrisi' ile karakterize edilir (bkz. Şekil 3.2a'daki şematik). Bu tür bir eğri genellikle yük uygulandıktan sonra üç ayrı aşama gösterir: (i) birincil veya geçici sürünme, sürünme hızının genellikle zamanla azaldığı aşama; (ii) ikincil veya dengeli sürünme, sürünme hızının bir minimuma ulaştığı ve sabit kaldığı aşama (bkz. Şekil 3.2b); ve (iii) üçüncül sürünme, sürünme hızının sürekli olarak zamanla arttığı ve kırılma meydana gelene kadar devam ettiği aşama. Sürünme eğrisinin dengeli bölümü, sürünme ömrünün çoğunu oluşturur ve dolayısıyla mekanizmalarla ilgili olarak en çok dikkat çeken kısımdır. Üçüncül sürünme genellikle mikro boşluk ve tane sınırı boşluğu oluşumu nedeniyle başlar ve kırılma

hızlı bir şekilde meydana gelebilir: bu nedenle mühendislik tasarımı, üçüncül sürünmeyi önlemeye yöneliktir. Şekil 3.2a'da gösterilen üçüncül sürünme eğrisi A ve B eğrilerine ayrılmıştır. Bu, üçüncül sürünme davranışının yükleme koşullarına bağlı olduğu anlamına gelir: sabit gerilim altında A eğrisi izlenirken, sabit gerilmeye göre B eğrisi izlenir, çünkü malzeme uzaması gerilmeyi rahatlatır. Sürünme davranışı, yükleme koşullarının yanı sıra diğer faktörlerden de etkilenir. Özellikle çevresel etkileşimler zararlı olabilir. Bu nedenle, tasarım mühendislerinin, hem düşmanca hem de zararsız veya inert ortamlarda sürünme olayları hakkında net bir anlayışa sahip olmaları önemlidir, böylece kritik bileşenler, belirli güvenlik sınırları içinde çalışacak şekilde tasarlanır (yukarıda belirtildiği gibi üçüncül sürünmeyi önlemeyi içerir). Bu, özellikle uçak motorları ve nükleer enerji santralleri gibi kritik teknolojiler için önemlidir.

Şematik sabit sıcaklıkta sürünme eğrisi, birincil, ikincil ve üçüncül sürünme gibi üç aşamayı gösterir ve b zaman karşısında sürünme hızı grafiği, sürünme hızının önce azaldığını, sonra sabit kaldığını ve sonunda arttığını gösterir.



Şekil 3.2. Zamana bağlı sürünme diyagramı [23]

3.6. Sürünme Yaşlandırma Şekillendirme Prosesi

Havacılık ve uzay sanayinin gelişimi ile beraber kompleks geometrili ve büyük ölçekli havacılık panellerinin üretim ihtiyacı artmıştır. Plastik şekil verme yöntemleri, büyük ölçekli havacılık

panellerinin üretiminde makine ve teçhizat ihtiyacı, şekillendirme prosesinde yüksek enerji ihtiyacı, kimyasal işlem ihtiyacı gibi sebeplerden ötürü yetersiz veya yüksek maliyetli kalmıştır. 1980'li yıllarda Textron firması bu sorunlara çözüm getirecek yeni bir sac şekillendirme tekniği geliştirmiştir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi, kompleks geometriye sahip büyük ölçekli panellerin üretilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu yöntem, malzemenin akma mukavemeti düşürerek, yaşlandırma ısıl işlemi ile beraber şekillendirme işleminin gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Şekillendirme işlemi malzemenin oda koşullarındaki akma mukavemeti altında gerçekleştiriliyor olması, yüksek geri yaylanma oranları ile karşı karşıya kalmamıza ve düşük kalıcı gerilmeler ile iş parçası üretmemize olanak sağlamaktadır. Yüksek geri yaylanma oranları, iş parçasını şekillendirmeden önce doğru belirlememiz gereken ve kalıp üretiminde dikkate almamız gereken önemli parametrelerden biridir. Düşük kalıcı gerilmeli parça üretimi ise, iş parçalarının yorulma ömrünü uzatan, dolayısı ile daha yüksek performanslı havacılık parçası üretilmesine imkan sağlar. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi, malzemenin yaşlandırma parametrelerine bağlı kalarak şekillendirme işleminin yapıldığı bir yöntemdir. Yaşlandırma parametreleri malzemenin yaşlandırma sonrası mekanik özelliklerini belirleyen etkenlerdir. Bu sebepten ötürü yaşlandırma parametreleri, iş parçasının şekillendirme sonrası mekanik özellikleri dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu yöntem yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilen alüminyum alaşımları şekillendirilebilmektedir.

3.6.1. Sürünme yaşlandırma şekil verme prosesinin avantajları ve dezavantajları

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi, diğer imalat yöntemlerine nazaran farklı bir şekillendirme mekanizmasına sahiptir. Bu sebepten ötürü diğer imalat yöntemlerine nazaran bu prosesin farklı avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinin avantajları:

- Şekillendirme işlemi, malzemenin elastik gerilme bölgesinde gerçekleştiriliyor olmasından dolayı malzeme bünyesinde oluşan kalıntı gerilmeler diğer imalat yöntemlerine göre daha düşüktür. Bundan dolayı diğer imalat yöntemlerine nazaran malzemenin yorulma direnci daha yüksektir [23].
- Bu prosesle üretilen iş parçalarında daha yüksek korozyon direncine sahiptir [23].
- Entegre panel-kiriş yapılara, farklı et kalınlıklarını ve boşaltmalara sahip kompleks geometrili iş parçalarının bu yöntem ile şekillendirilmesi mümkündür.

- Şekillendirme işleminin tek kalıp yardımı ile gerçekleştirilebiliyor olması, şekillendirme işleminin yaşlandırma işlemi ile eş zamanlı yapılıyor olması ve şekillendirme işleminde tecrübeli iş gücüne ihtiyaç olmaması gibi parametrelerden ötürü maliyet efektif bir üretim yöntemidir.
- Şekillendirme işlemi diğer imalat yöntemlerine kıyasla daha çevre dostudur.
- Bu proses yüksek tekrar edilebilirlik göstermektedir. Proses parametreleri belirlendikten sonra tolerans içinde iş parçası üretimi kolaydır.
- Entegre panel-kiriş yapıların şekillendirilebiliyor olmasından ötürü, daha hafif iş parçalarının üretimini daha az insan gücü ile maliyet ve zaman efektif olarak üretilebilmektedir.

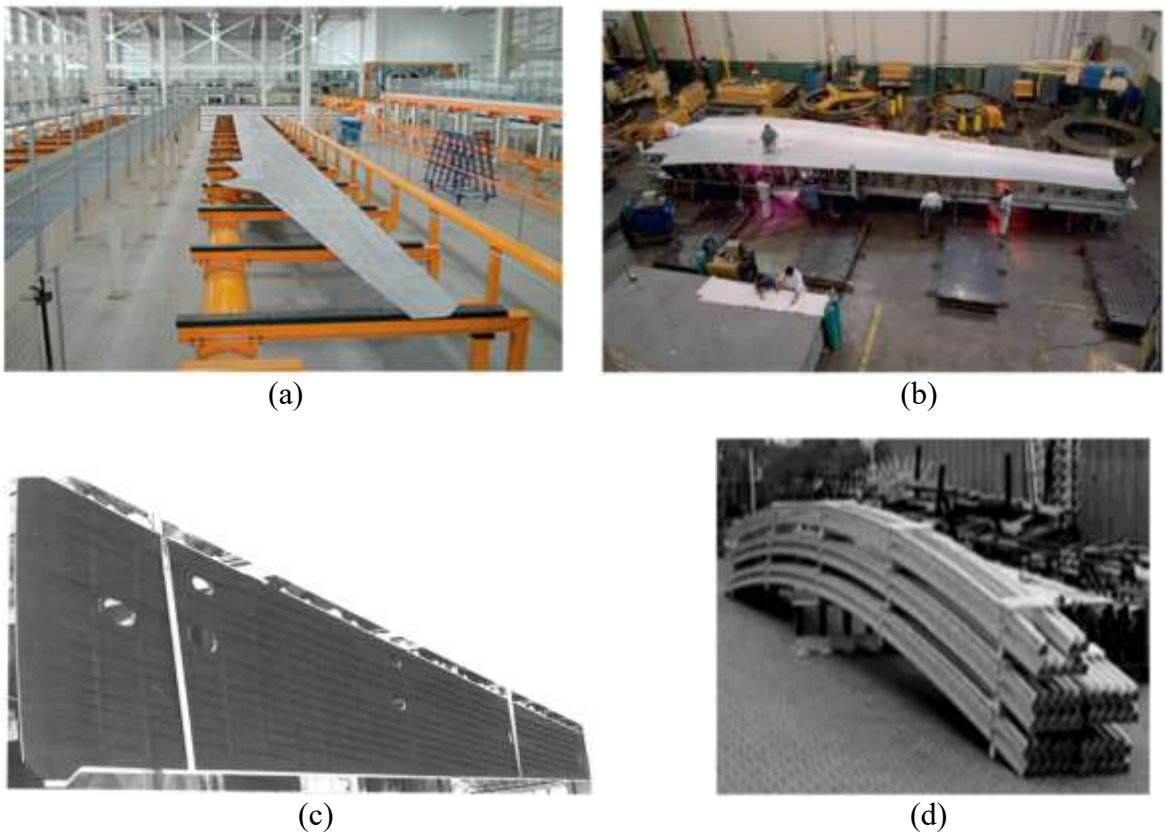
Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinin dezavantajları:

- Bu prosesin en büyük dezavantajı kalıba verilmesi gereken geri yaylama telafi değerinin tespit edilmesindeki zorluktur. Geri yaylanma miktarı; proses parametrelerine, malzeme cinsine, iş parçası et kalınlığına ve şekillendirilecek forma bağlıdır. Bundan dolayı şekillendirilecek her panel için geri yaylanma tespit çalışması yapılması gerekmektedir.
- Şekillendirme işlemi, plastik şekillendirme yöntemleri ile kıyaslandığı durumda daha uzun sürmektedir.
- Bu yöntem ile sadece yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilen malzemeler şekillendirilebilmektedir.
- Şekillendirme işlemi yaşlandırma sıcaklığında gerçekleştirildiğinden ötürü, bu prosese tabi tutulmuş iş parçaları için proses tekrarlanamamaktadır. Bunun sebebi, iş parçasının tekrar yaşlandırılacak olmasından ötürü mekanik özelliklerinde azalma meydana gelecektir.
- Şekillendirme işlemi sonrası istenilen mekanik özellikler, şekillendirme parametrelerinde etkilenmektedir.
- Bu yöntem ile aşırı kompleks geometrili parçalar şekillendirilememektedir. [26]
- Diğer şekillendirme yöntemlerine nazaran Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi yeni bir teknolojidir. Bu sebepten ötürü bu yöntem üzerine yeteri kadar araştırma yapılmamıştır.

3.6.2. Sürünme yaşlandırma prosesinin endüstriyel uygulamaları

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi 1980'li yıllarda B-1B Long Range Combat hava aracı prosesinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu proje kapsamında hava aracının alt ve üst kanat

kabukları 2XXX serisi alüminyum malzemeden üretilmiştir. Üretilen kanat panelleri yaklaşık 15240 mm boyunda, 2740-910 mm genişliğinde ve panel kalınlıkları 2,54-63,5 mm değişen ölçülere sahiptir. Kanat panelleri bünyelerinde entegre kiriş güçlendiriciler bulundurmaktadır. Kanat panelleri ham malzemeden düz formda talaşlı imalat ile üretilmiş ve daha sonra dişi kalıp üzerinde şekillendirilmiştir [1]. Textron Aerostructure firmasında Gulsdtream G-IV ve Airbus A330/A380 hava araçlarının üst kanat panellerinin üretiminde Sürünme Yaşlandırma Yöntemi kullanılmıştır. BAE Systems firması Hawk hava aracının üst kanat panelini AA7475 alüminyum malzemeden Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile üretmiştir. Bennetts Associates Airbus A380 hava aracının kanat panelini AA7055 malzemeden Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile üretmiştir [27]. Ayrıca Airbus A330, A340 ve A380 hava araçlarının kanat panelleri Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile üretilmiştir [8].



(a) (b)

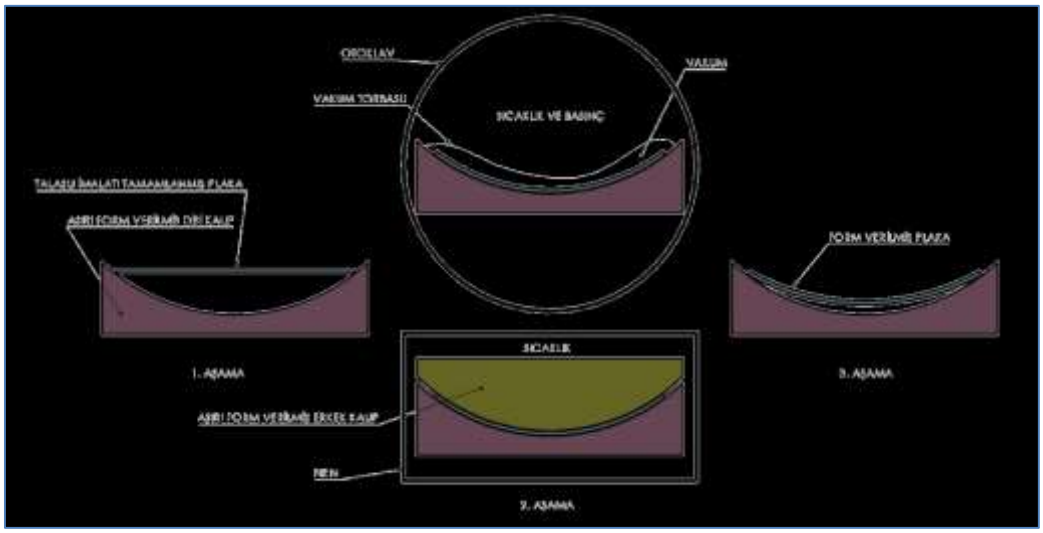
(c) (d)

Şekil 3.3. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile üretilmiş uçak parçaları; (a) Airbus A380 hava aracının kanat paneli [27], (b) Gulsdtream G-IV hava aracının kanat paneli [27], (c) B-1B Long Range Combat hava aracının alt kanat paneli [1], (d) Airbus A380 hava aracına ait ekstrüzyon profil [17]

3.6.3. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesi mekanizması

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi, sac ve plaka iş parçalarının, malzemenin oda koşullarındaki akma mukavemeti altındaki gerilmelerde şekillendirilmesine olanak sağlayan ileri imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile sadece yapay olarak yaşlandırılabilen malzemeler şekillendirilmektedir. Şekillendirme işlemi sürünme deformasyonu ve gerilim azalması mekanizmaları ile birlikte yaşlandırma ısıl işleminin gerçekleştirilmesi ile sağlanır. İş parçasının şekillendirilebilmesi için, parça iki kalıp arasında veya iş parçasının tek yüzüne uygulanan pozitif basınç ile bir kalıp yüzeyine ittirilir. Bu işlem malzeme bünyesinde gerilmeler oluşmasına sebep olur. Oluşan bu gerilmeler zamanla sürünme deformasyonuna yol açar ve iş parçası bünyesindeki gerilmelerde azalma meydan gelir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama talaşlı imalatı kısmen veya tamamen tamamlanmış iş parçasının form kalıbı üzerine pozisyonlanmasıdır. Bu aşamada iş parçasının form verme esnasında sabit kalacak şekilde kalıp ile kısıtlanması önemlidir. Daha sonra torbalama tekniği kullanılarak kalıp ile iş parçası arasında kalan hacim dış ortamdan izole edilir. Bu işlem sayesinde iş parçasının tek yüzeyine pozitif basınç uygulanabilecektir. İkincil aşama otoklav aşamasıdır. Bu aşamada otoklav cihazı malzemenin yaşlandırma parametrelerine göre sıcaklık, proses süresi ve basınç ayarı yapılır. Bu aşamada iş parçası yapay yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulurken aynı zamanda iş parçasının tek yüzüne uygulanan pozitif basınç yardımı ile şekillendirilir. Üçüncül ve son aşamada ise iş parçası üzerinden sıcaklık ve basınç kaldırılmasıdır. İş parçası üzerinden basıncın kaldırılması ile birlikte iş parçası kalıp yüzeyinden ayrılacak ve geri yaylanma gözlemlenecektir. Bu durumda, malzeme bünyesinde oluşan sürünme deformasyonundan kaynaklı malzeme kalıcı şekil değişimine uğrayacak ancak sürünme deformasyonuna dönüşemeyen gerilmeler de geri yaylanmaya sebep olacaktır.

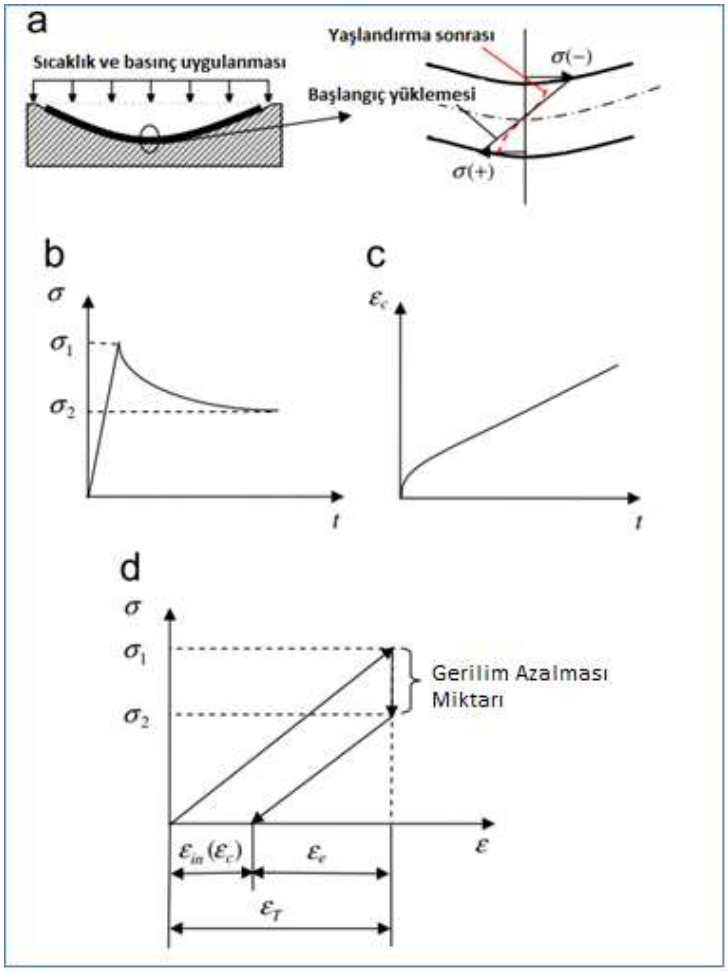
Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme işlemi otoklavda gerçekleştirilebildiği gibi, iş parçasının iki kalıp arasına alınması ile birlikte fırında da gerçekleştirilebilmektedir. Bu iki süreçte görsel olarak Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Sürünme-yaşlandırma şekillendirme prosesi aşamaları

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirme mekanizmasının temeli, şekillendirilen malzemenin yaşlandırma sıcaklığında bünyesinde meydana gelen sürünme deformasyonundan kaynaklanan gerilim azalmasıdır. Proses süresince, iş parçasına prosesin ilk aşamasında yüklenen gerilmeler, proses sıcaklığı yardımı ile azalacaktır. Sabit gerinim altında tutulan iş parçası gerilim azalmaları sebebi ile deformasyona uğrayacaktır. Prosesin ilk anında iş parçasına uygulanan gerinimin bir kısmı plastik gerinime dönüşürken bir kısmı plastik gerinim olarak kalacaktır. Geleneksel sac şekillendirme yöntemleri incelendiği durumda, şekillendirme gerilimleri malzemenin akma gerilimi altında kaldığı bölgelerde plastik deformasyon gerçekleştirilememektedir. İş parçasının üzerinden yük kaldırıldığı durumda iş parçası ilk haline geri dönmektedir. Sürünme-Yaşlandırma şekillendirme yönteminde ise durum farklıdır. Malzeme elastik gerilmeler altında uzun süre gerinime ve sıcaklığa maruz bırakıldığı durumda, malzeme bünyesinde oluşan gerilmelere bağlı olarak gerilim azalması meydana gelecek ve malzeme kalıcı deformasyona uğramış olacaktır. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde oluşan gerilim-gerinim mühendislik diyagramları ve grafikleri Şekil 3.5'de verilmektedir. Şekil 3.5 (a)'da otoklav sürecinde şekillendirilme yapılırken, iş parçasının kalınlığı boyunca oluşan gerilmeleri, proses başlangıç ve bitiş anındaki dağılımını göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere, iş parçası kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımı, gerilim azalması etkisi ile azalmaktadır. Ayrıca gerilmenin yüksek olduğu bölgelerde daha yüksek gerilim azalması meydana geldiği söylenebilir. Şekil 3.5 (b) 'de proses süresince iş parçası üzerinde gerçekleşen gerilim azalmasının zamana bağlı grafiği verilmektedir. Şekil 3.5 (c) 'de proses süresinde iş parçası bünyesinde gerçekleşen sürünme geriniminin zamana bağlı grafiği verilmektedir. Verilen

grafikte iş parçasının birincil ve ikincil sürünme bölgesinde şekillendirilmektedir. Üçüncül sürünme bölgesinde, sürünme deformasyonu hızı artarak ve malzeme kopmaya doğru hızlanarak gitmekte olduğundan ötürü bu bölgede şekillendirme yapılması istenmez. Şekil 3.5 (d) 'de verilen gerinme gerilim grafiği, iş parçasının belli bir gerinme altında bünyesinde meydana gelen gerilim azalmasını göstermektedir. Gerilim azalması temel olarak malzeme bünyesine indüklenen gerilmeye bağlı sürünme deformasyonuna ve proses sıcaklığına bağlıdır. Şekil 3.5'de verilen grafiklerde, şekillendirme prosesi başlangıcında malzeme bünyesine indüklenen gerilme σ_1'dir. σ_1 gerilme değeri, gerilme azalması sebebi ile σ_2 gerilme değerine düşmüştür. Bu değerler arasındaki gerilme farkı gerilme azalması miktarına eşittir. Toplam gerinim miktarını ε_T ifade etmektedir. ε_c sürünme gerinimini yani iş parçası bünyesinde meydana gelen plastik gerinimi ifade etmektedir. ε_e elastik gerinimi ifade etmektedir. Bu değer geri yaylanmanın oluşumuna sebep olmaktadır.

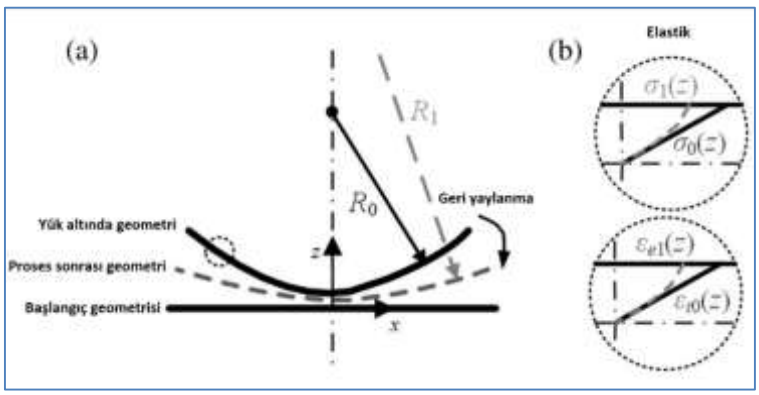


Şekil 3.5. Proses öncesi ve sonrasında malzemenin kalınlığı boyunca oluşan gerilim dağılımı, (b) Proses süresinde oluşan gerilim azalması grafiği, (c) Proses süresince meydana gelen sürünme gerinimi grafiği, (d) Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme gerilim azalması grafiği [28]

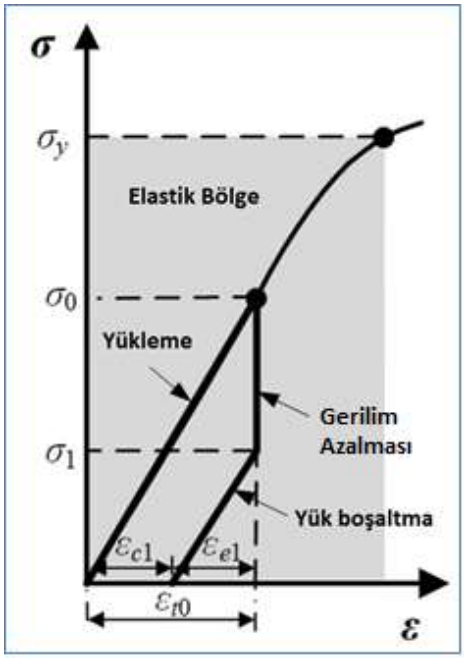
3.6.4. Sürünme yaşlandırma şekillendirme prosesinde geri yaylanma davranışı

Sürünme-Yaşlandırma şekillendirme prosesi, malzemenin elastik gerilme değerleri altında, iş parçasının kalıp yüzeyine temas ettirilmesi ve bu aşamada yapay yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulması sureti ile gerçekleştirilen bir şekillendirme yöntemidir. Elastik gerilme altında gerçekleştirilen proseste, sıcaklık ve zamanın etkisi malzeme bünyesinde gerilim azalmasına sebep olur. Bu sayede proses başlangıcında malzeme bünyesine indüklenen gerilmenin bir kısmı gerilim azalmasına maruz kalır. Gerilim azalması malzemenin kalıcı olarak şekil almasını sağlayan olgudur. Ancak gerilim azalması ile giderilemeyen iş parçası bünyesindeki gerilme değerleri geri yaylanmaya sebep olmaktadır. Geri yaylanma, prosesin son aşamasında iş parçasına uygulanan yüklerin kaldırılması sonucu, iş parçasının kalıp formundan ayrılma miktarı olarak tanımlanabilir. Geri yaylanma miktarı, iş parçasının proses başlangıcındaki formu ile kalıp formu arasında bir değerde olması beklenmektedir.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde, elastik yükleme ve sabit gerinim altında malzeme bünyesinde meydana gelen gerilim azalması Şekil 3.6.'da gösterilmektedir. Bu diyagramda σ_1 proses başında malzeme bünyesine indüklenen gerilme miktarını göstermektedir. σ_1 gerilmesi sıcaklık ve zamanın etkisi ile gerilim azalmasına uğrayacaktır. Prosessin son aşamasında malzeme bünyesinde kalan gerilme σ_2 ile ifade edilmektedir. Bu durum, ilk aşamasında malzeme bünyesinde oluşturulan elastik gerinimin bir miktarının plastik gerinime dönüştüğünü ifade etmektedir. Prosesin ilk aşamasında toplam gerinim elastik gerinime eşitken proses sonunda toplam gerinim plastik gerinim ile elastik gerinimin toplamına eşit olmakta ve değişmemektedir.



Şekil 3.6. Yük altında geometri, proses sonrası geometri ve başlangıç geometrisi şematik gösterimi. b) Yarı numune kalınlığı boyunca oluşan gerilim ve gerinim dağılımı. [29]



Şekil 3.7. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi için elastik bölgede geri yaylanma davranışının şematik gösterimi [29]

Prosesin başlangıç ve bitiş aşamalarındaki gerinim değerlerinin ilişkisi sırası ile denklem 3.1 ve 3.2'de gösterilmektedir.

$$\varepsilon t\,(z) = \varepsilon_e(z) \tag{3.1}$$

$$\varepsilon t\,(z) = \varepsilon_{e1}\,(z) + \varepsilon c\,(z) \tag{3.2}$$

Bu denklemlerde belirtilen elastik gerinim Hooke yasası ile ifade edilebilirken plastik gerinim Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi için türetilmiş olan sürünme gerinimi denklemleriyle ifade edilebilir. Proses süresince meydana gelen gerilim azalması sonrası malzeme bünyesinde kalan gerilmeye bağlı olarak yazılabilecek moment denklemi 3.4'de verilmektedir.

$$\sigma_2\,(z) = E\varepsilon_{e1}\,(z) \tag{3.3}$$

$$M_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2(z) \cdot z \cdot dz \tag{3.4}$$

Prosesin yük boşaltma aşmasında iş parçası üzerindeki yükler kaldırılır ve bu sayede malzeme bünyesindeki elastik gerilmeler ortadan kaldırılır. Bu aşamada iş parçasının geri

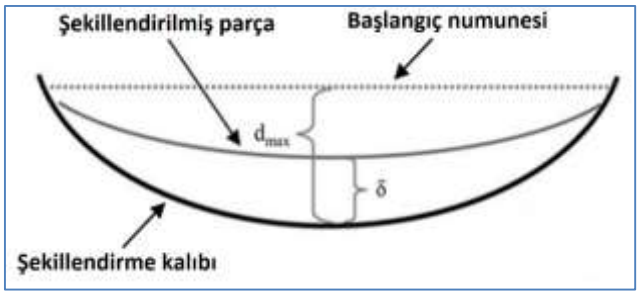
yaylandığı gözlemlenecektir. İş parçasının geri yaylanması, proses sonrasında iş parçası bünyesinde kalan elastik gerilmeler ile doğrudan ilişkili olacaktır. Malzeme üzerindeki yükler kaldırıldıktan sonra iş parçası üzerinde moment oluşmayacağından ötür M_3 değeri sıfır olacaktır. Bu durumda geri yaylanma değeri denklem 3.5 ile hesaplanabilir. Verilen denklemlerde I atalet momentini temsil ederken Δk konturdaki değişimi ifade etmektedir. Denklem 3.7'de geri yaylanma oranı verilmektedir.

$$\Delta k = \frac{M_3 - M_2}{EI} \tag{3.5}$$

$$k_1 - k_0 = \Delta k \tag{3.6}$$

$$\frac{\Delta k}{k_0} \tag{3.7}$$

Denklem 3.7' de verilen oran geri yaylanma miktarını ifade etmektedir. Bu oranın 1'e yaklaştığı durumda geri yaylanma miktarının arttığını, sıfıra yaklaştığı durumda geri yaylanma miktarının azaldığını ifade eder.



Şekil 3.8. Defleksiyon yöntemine göre geri yaylanma [9]

Defleksiyon yöntemi ile geri yaylanma hesaplanırken kalıbın en derin noktası ile şekillendirilme öncesi ve sonrası iş parçasının en derin noktası arasındaki fark dikkate alınmaktadır. Defleksiyon yöntemi ile geri yaylanma hesaplanması için denklem 3.8 kullanılmaktadır.

$$Geri\ Yaylanma\ (\%) = \frac{\delta}{d_{max}} x100 \tag{3.8}$$

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde geri yaylanmanın hesaplanabilmesi için şekillendirilecek malzemeye ait gerilim azalması, çökelme sertleşmesi ve deformasyon

sertleşmesi davranışlarının dikkate alınarak malzeme modellemesi yapılması gerekmektedir. Malzemenin geri yaylanma davranışlarını etkileyen parametreler aşağıda verilmektedir.

- Malzemenin mekanik özellikleri
- Gerilim azalması karakteristiği
- İş parçası kalınlığı
- İş parçası geometrisi (üç boyutlu büküme sahip olması, entegre güçlendiriciye ve boşaltmaya sahip olması)
- Şekillendirme proses parametreleri

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi kullanılarak kompleks geometrili ve büyük ölçekli havacılık parçalarının üretilmesi istendiği durumda, şekillendirme parametrelerine bağlı geri yaylanma oranının parça üretimine başlamadan belirlenmesi önemlidir. Geri yaylanma davranışının doğru belirlenmesi, üretilecek olan kalıp tasarımını doğru yapılması ve ilk seferde doğru parça üretilmesini mümkün kılacaktır. Ancak proseste çok belirsizlikler olmasından dolayı ilk seferde doğru parça üretilmesi iş parçası toleranslarına bağlı olarak zor olabilir. Bu sebepten ötürü, küçük ölçekli numuneler ile malzemenin geri yaylanma davranışının belirlenmesi ve daha sonra deneme üretimleri yapılması gerekmektedir. Numune yardımı ile belirlenen geri yaylanma oranları, iş parçası ile yapılacak denemelere nazaran çok daha düşük maliyetlere sahiptir. Bu sebep ile numune denemeleri ile geri yaylanma oranını etkileyecek tüm parametrelerin test edilme ve iş parçası için doğru geri yaylanma oranlarının tespit edilmesi proje maliyeti ve takvimi açısından önemlidir. Numune denemeleri ile elde edilen geri yaylanma oranları, iş parçasını üretecek olan kalıba telafi değeri olarak girdi sağlayarak kalıp tasarımı tamamlanır. Kalıp tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardan biri ise yukarda da bahsedildiği gibi geri yaylanma oranının iş parçasında numune denemelerine göre farklı olabileceğidir. Bu farkın oluşabileceği dikkate alınarak kalıp tasarımında geri yaylanma değerini üretim sonrasında değiştirmeyi mümkün kılan kalıp tasarımı yapılması önemlidir. İlk defa üretilecek olan iş parçaları için il etapta maliyet arttırıcı bir durum olarak göründe de bu durum, geri yaylanma oranında oluşabilecek bir değişimde kalıbın tamamen hurda olmasını engelleyecektir. Bu proseslerde kalıp üretimi yüksek maliyet ve uzun üretim süresi gerektirdiği göz önünde tutulmalıdır. Doğru geri yaylanma oranı verilerek iş parçası üretmenin önemlerinden bir diğeri ise iş parçası maliyetidir. Bilindiği üzere iş parçaları yaşlandırma ısıl işlemi ile beraber şekillendirilmektedir. Yani proses başlangıcında ve sonunda malzeme bünyesindeki tane

yapısı farklıdır. Bu durum, Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirilmiş bir iş parçasının istenilen geometriye gelmemesi durumunda tekrar bu prosese tabi tutulamayacağı anlamına gelir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirilmek üzere, havacılık standartlarına uygun ham malzemeden yüksek hassasiyet ile üretilmiş olan iş parçalarının maliyetleri oldukça yüksektir. Proses sonrasında istenilen şekillendirme toleransına girmeyen iş parçaları elle tekrar şekillendirilerek kullanılma ihtimalleri olsa bile kanat paneli gibi kritik parçalar için bu işlemlerin yapılması istenmez ve parçalar hurdaya ayrılır. Bu da proje süresini ve maliyetini kötü yönde etkilemektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Alüminyum 7075 T651 alaşımlı işlenmiş plaka malzemenin T73 temperine yaşlandırılırken Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile şekillendirildiği deneysel çalışmanın anlatıldığı bölümdür. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yönteminin en önemli olgularından biri olan geri yaylanma davranışıdır. Bu bölümde, proses basıncı ve plaka kalınlığının malzeme üzerinde oluşturduğu gerilme değerlerine bağlı olarak geri yaylanma davranışı incelenmiştir.

4.1. Malzeme

Deney numuneleri SAE AMS-QQ-A250/12 standardına uygun havacılık endüstrisinde panel üretiminde yaygın olarak kullanılan 7075-T651 alüminyum alaşım plaka malzemeden üretilmiştir. Şekillendirme işlemi hadde yönüne dik olacak şekilde numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1'de, fiziksel özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AA7075'in kimyasal kompozisyonu

Element	Ağırlıkça Buluma Oranı [%]	
	Minimum	Maksimum
Çinko	5,1	6,1
Magnezyum	2,1	2,9
Bakır	1,2	2,0
Krom	0,18	0,28
Manganez	--	0,30
Demir	--	0,50
Silisyum	--	0,40
Titanyum	--	0,20
Diğer Elementler	--	0,15
Alüminyum	Geri kalan	

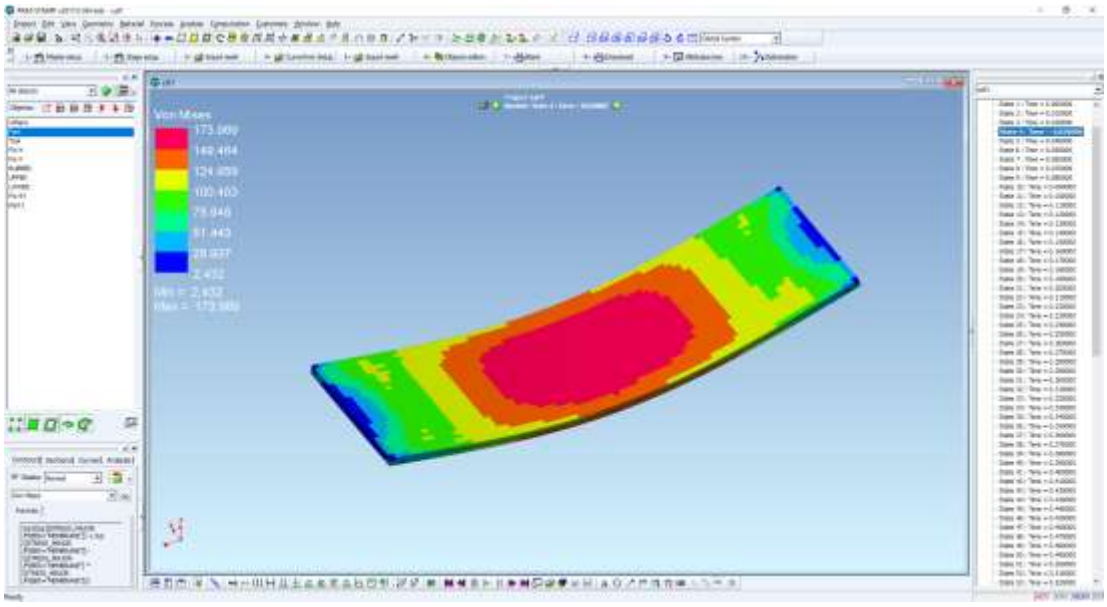
Çizelge 4.2. Al 7075 T651 fiziksel özellikler

Yoğunluk	2,81 g/cm^3
Erime sıcaklığı	477 °C
Elastisite modülü	71,7 GPa
Isıl kapasite	130 W/m.K
Isıl genleşme katsayısı	23 x 10^-6/K
Elektriksel iletkenlik	%33 IACS
Akma dayanımı	460 MPa
Çekme dayanımı	550 MPa
Kesme dayanımı	335 MPa
Uzama [%]	9

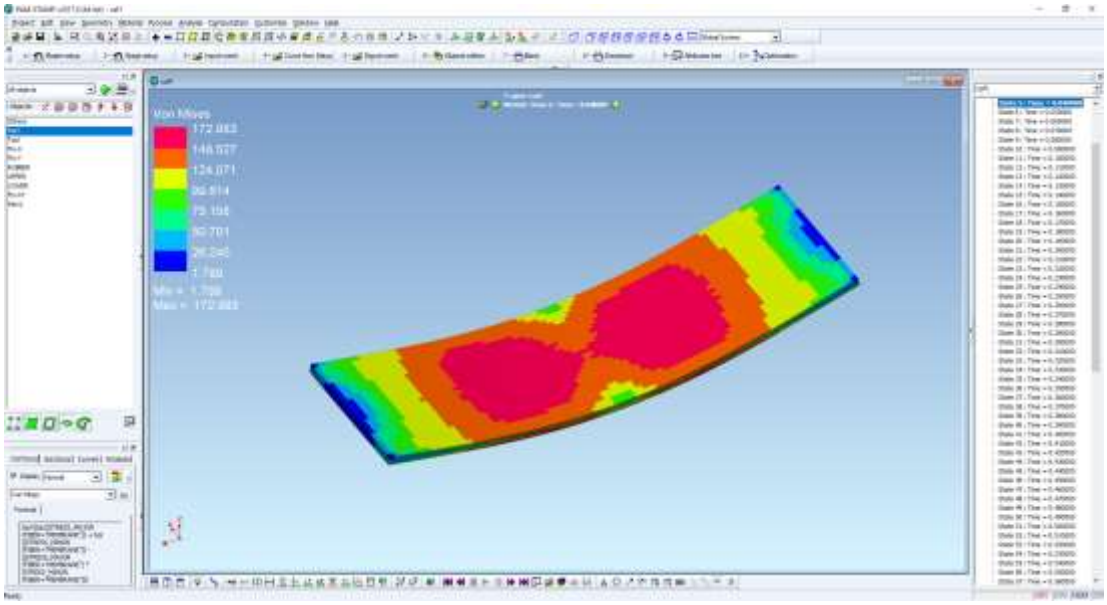
4.2. Analiz Çalışması

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi, malzemenin oda koşullarındaki akma mukavemeti altında iş parçasına şekil vermeyi amaçlayan bir prosestir. Şekillendirilmek istenen iş parçası kalıp yüzeyine ittirildiği zaman, iş parçasının bir yüzeyinde maksimum çekme gerilmesi, diğer yüzeyinde maksimum basma gerilmesi meydana gelir. İş parçası kalınlığı boyunca orta düzlemine yakın bir alanda ise gerilmenin sıfır olduğu bir eksen bulunmaktadır. Gerilmelerin maksimum olduğu yüzeylerdeki gerilme miktarının malzemenin akma mukavemetini geçmemiş olması, gerçekleşen deformasyonun tamamen sürünme deformasyonuna ait olduğunu gösterme açısından önem arz etmektedir. Bu sebepten ötürü PAM-STAMP programında sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analiz çalışmalarında, maksimum gerilmeler numune kalıba değdiği anda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1 ve 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Numunenin kalıba değmeden hemen önceki gerilim dağılımı



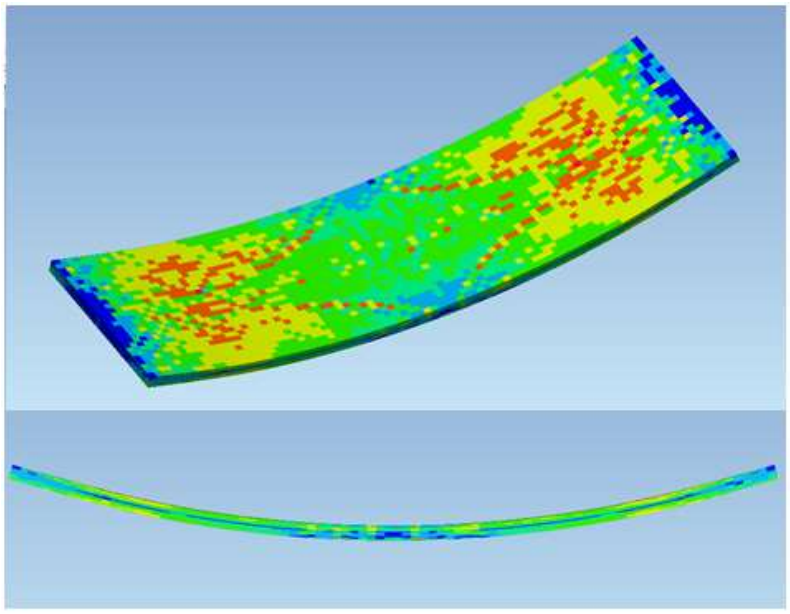
Şekil 4.2. Numunenin kalıba değdikten hemen sonraki gerilim dağılımı

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de de görüleceği üzere, deney numunesi kalıba değmeden hemen önce numune üzerinde indüklenen gerilmenin Von Mises cinsinden değeri yaklaşık 174 MPa iken, değdikten hemen sonraki gerilme değeri yaklaşık 173 MPa'a düşmektedir. Bu değerler AA7075-T651'in akma mukavemetinin altındadır.

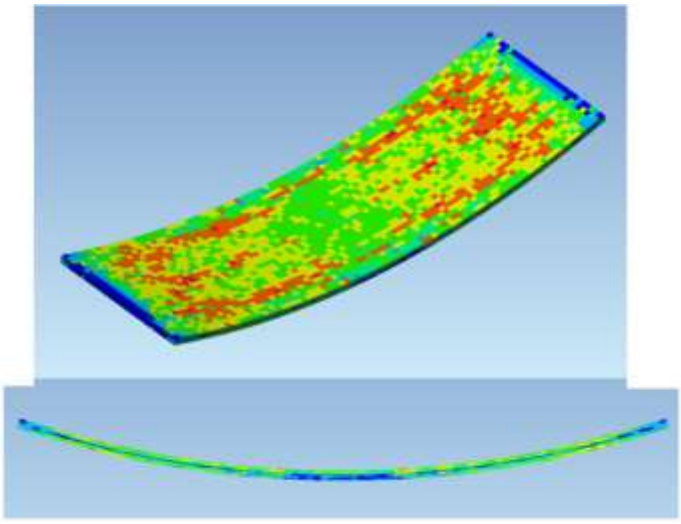
Yapılan bu çalışma dikkate alınarak kalıp formu ve deney numune kalınlıkları belirlenmiştir. Malzemenin akma mukavemeti üzerine çıkmadığına emin olmak için üretilen deney numuneleri kalıp üzerine yerleştirilerek kalıp formuna temas ettirilmiştir. Belirli bir süre bu

şekilde bekletilen numuneler üzerinden yük kaldırılmış ve deney numunesinin plastik deformasyona maruz kalmadığı gözlemlenmiştir.

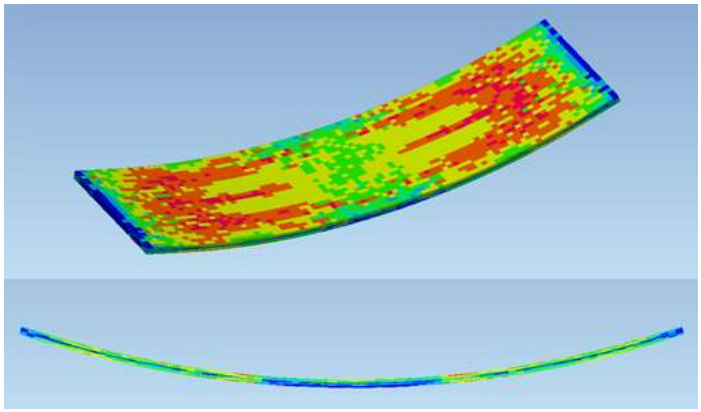
Yapılan literatür taramasında Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yönteminde malzemenin şekil alma miktarının iş parçası kalınlığı boyunca malzeme üzerine indüklenen gerilme ile oldukça ilişkili olduğu birçok araştırmacı tarafından vurgulanmaktadır. Bu çalışmada malzeme kalınlıklarının deney numuneleri boyunca oluşan gerilme etkileri incelenmek istenmiştir. Bu sebeple dört farklı kalınlıktaki deney numunelerinin kalıp formuna ittirilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilen gerilim dağılımları elde edilmiştir.



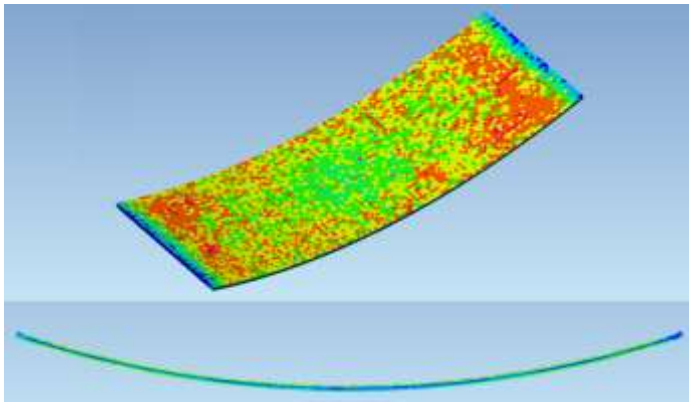
Şekil 4.3. 6 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı



Şekil 4.4. 5 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı

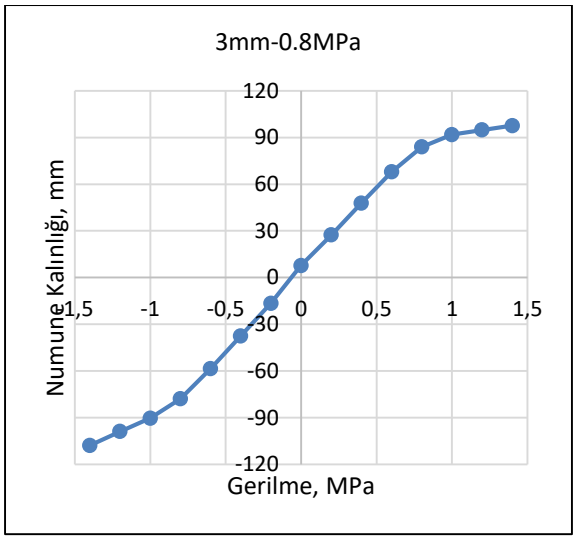


Şekil 4.5. 4 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı

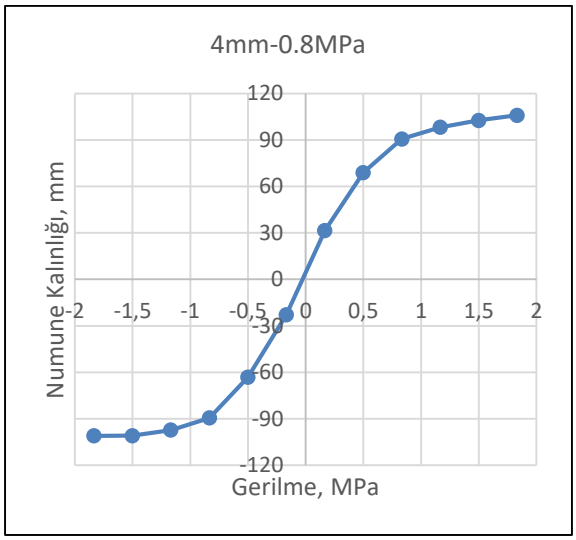


Şekil 4.6. 3 mm kalınlığındaki numune üzerindeki gerilim dağılımı

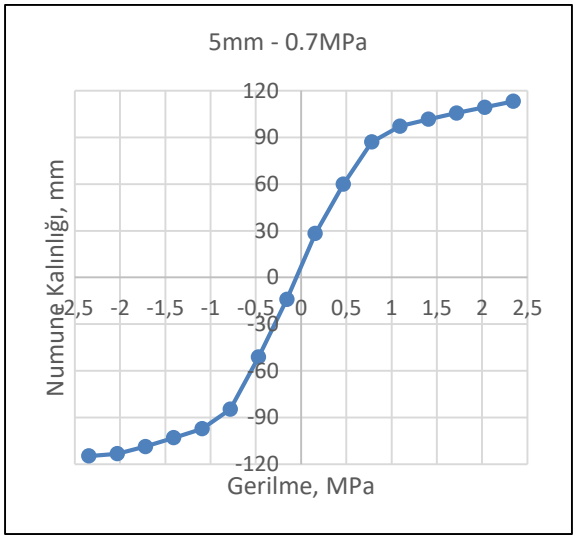
PAM STAMP programında yapılan analiz sonucu olarak elemanlar üzerindeki gerilme değerleri elde edilmiştir. Excell VBA ara yüzünde hazırlanan kullanıcı tanımlı bir alt program yardımı ile elde edilen eleman gerilme değerleri işlenerek numune kalınlığı boyunca oluşan gerilme değerleri elde edilmiştir. Kalınlık boyunca elde dilen gerilme değerleri, her katmandaki elemanların ortalama gerilme değerleri hesaplanarak elde edilmiştir. Yukarıdaki şekillerde görüleceği üzere, numunenin kısa kenarına yakın olan elemanlardaki gerilme değerleri kalıp yüzeyine kısıtlı temas etmelerinden dolayı düzensizlik göstermektedir. Bu sebepten ötürü malzemenin kalınlığı boyunca ortalama gerilme değeri hesaplanırken kısa kenara yakın olan elemanlardaki gerilme değerleri dikkate alınmamıştır. Yapılan çalışma sonucunda Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilen grafikler elde edilmiştir.



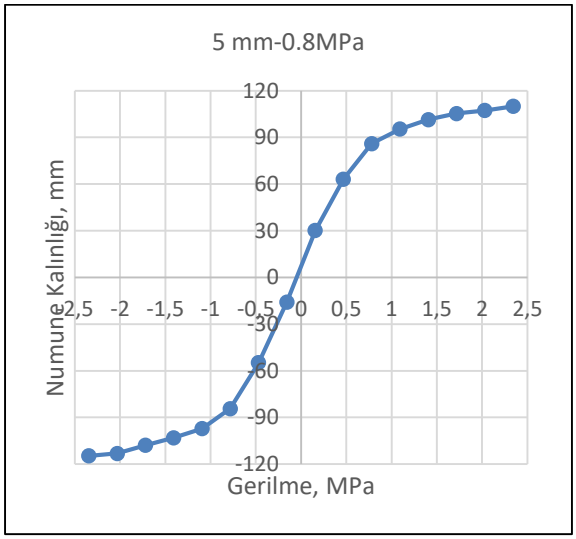
Şekil 4.7. 3 mm-8MPa analiz grafiği



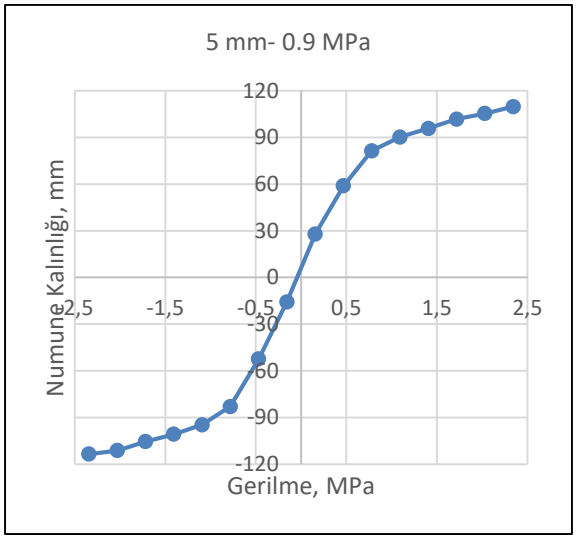
Şekil 4.8. 4 mm-8MPa analiz grafiği



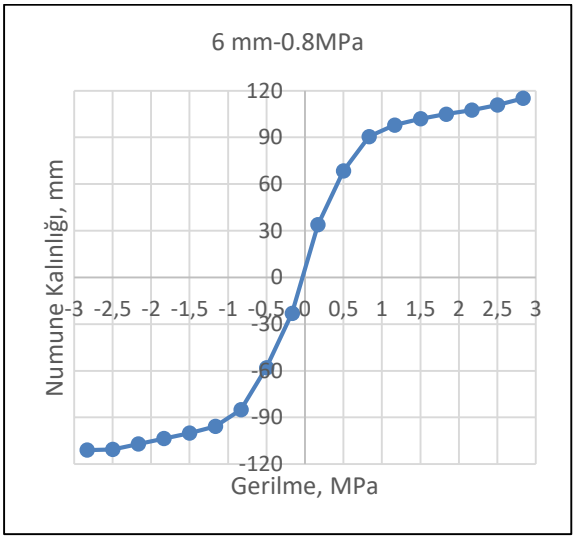
Şekil 4.9. 5 mm-7MPa analiz grafiği



Şekil 4.10. 5 mm-8MPa analiz grafiği



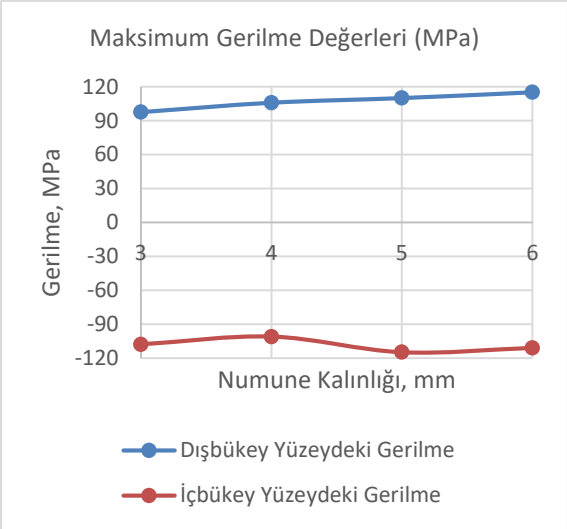
Şekil 4.11. 5 mm-9MPa analiz grafiği



Şekil 4.12. 6 mm-8MPa analiz grafiği

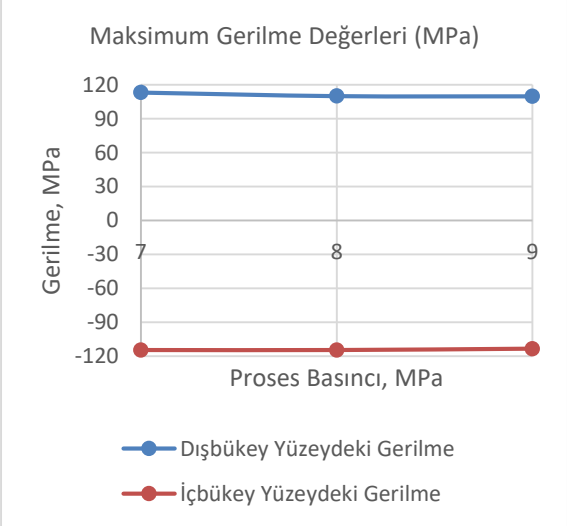
Yukarıdaki grafikler incelendiği durumda iş parçasının kalınlığı boyunca en yüksek gerilmelerin iş parçası dış yüzeyinde oluştuğu görülmektedir. İş parçasının kalınlığı boyunca merkezine yaklaşıldığında ise gerilmelerde azalma meydana gelmektedir. Nötr eksende ise gerilme sıfıra düşmektedir.

İş parçası et kalınlığı ile kalınlık boyunca oluşan maksimum gerilme değerleri Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Grafik incelendiği durumda, çekme ve basma bölgelerinde gerilme değerlerinin iş parçası et kalınlığı arttıkça arttığı gözlemlenmektedir. Bu grafik, Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme sürecinde daha kalın iş parçalarında daha az geri yaylanma meydana geleceğini göstermektedir.



Şekil 4.13. İş parçası et kalınlığının kalınlık boyunca maksimum gerilmeye etkisi

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde kullanılan proses basıncının malzeme kalınlığı boyunca oluşan maksimum gerilmeye etkisi Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Grafik incelendiği durumda proses basıncının malzeme kalınlığı boyunca meydana gelen gerilmeye ciddi bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Proses basıncının Sürünme-Yaşlanma Şekillendirme sürecinde geri yaylanma değerine etki etmesi beklenmemektedir.



Şekil 4.14. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde kullanılan proses basıncının malzeme kalınlığı boyunca oluşan maksimum gerilmeye etkisi

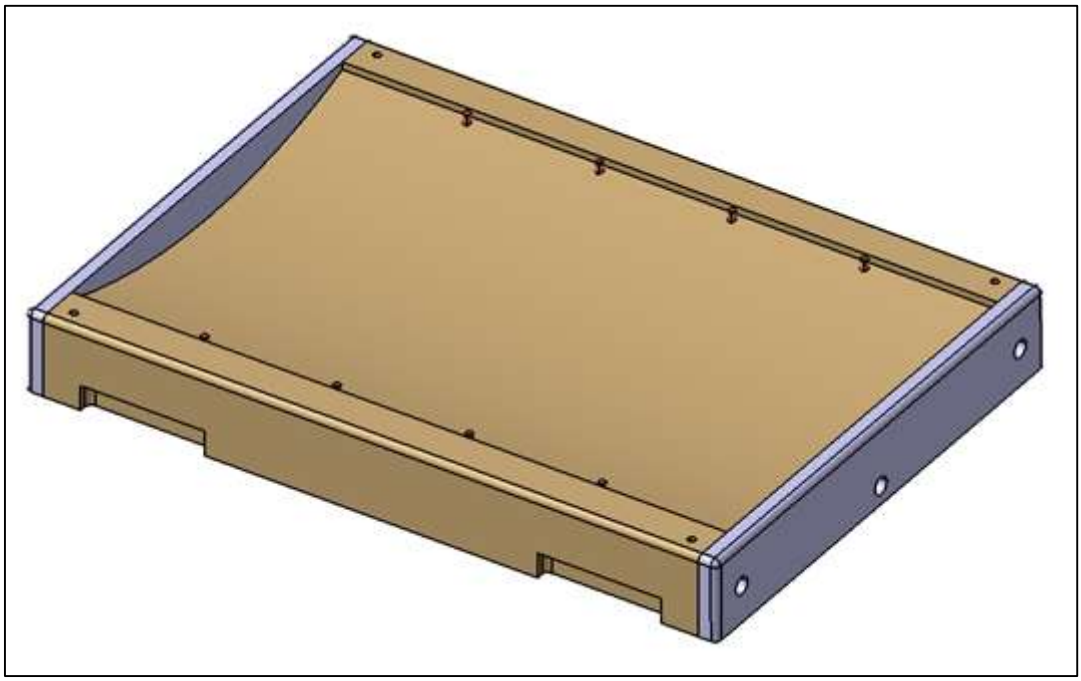
Bu çalışmada kullanılan iş parçaları, şekillendirme süreci başlamadan önce proses basıncı ile kalıp yüzeyine büyük oranda temas ettirildiğine dikkat edilmelidir. Şekillendirme sürecinin belli bir aşamasında iş parçasının kalıp yüzeyine temas ettirildiği deneyler dikkate

alındığında, proses basıncının geri yaylanma değerine ciddi oranda etki edeceği düşünülmektedir.

4.3. Kalıp Tasarımı

Kalıp tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken belirli hususlar vardır. Bunlar; kalıp malzemesi, proses sıcaklığı, geri yaylanma değeri, kalıp formu ve torbalama tekniğidir. Kalıp malzemesi; proses esnasında şekillendirilen malzemenin termal genleşme katsayısından ciddi oranda farklı bir termal genleşme katsayısına sahip malzeme tercih edilmemesi gerekmektedir. Bu sayede termal genleşmeden kaynaklı oluşacak yüzey bozuklukları elemine edilmiş olur. Geri yaylanma değeri, şekillendirilen malzemenin geri yaylanma değeri biliniyor ise bu değer telafi olarak kalıba yansıtılması gerekmektedir. Bu deney geri yaylanma değerini elde etmek üzere tasarlandığından ötürü kalıba geri yaylanma telafi değeri uygulanmamıştır. Kalıp formu; Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi, malzemenin oda koşullarındaki akma mukavemeti altında gerçekleştirilen bir şekillendirme yöntemidir. Tasarlanan deney kalıbında, malzemenin akma mukavemeti üzerine çıkmadığının ispat edilebilmesi için PAM-STAMP programında tüm kalınlıktaki malzemeler için analiz gerçekleştirilmiştir. Torbalama tekniği; kalıp ile deney numunesi arasındaki boşluğun vakum torbası ile izole edilmesi gerekmektedir. Bu izolasyonun proses boyunca bozulmadan devem etmesi proses açısından önem arz etmektedir. Buna istinaden kalıp tasarımı uygun köşe yarıçaplarına ve yeterli sızdırmazlık macunu alanına müsaade etmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda kalıp tasarımı yapılmış ve kalıp malzemesi alüminyum 6061 T651 olarak tercih edilmiştir.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinin süresi, şekillendirilecek malzemenin gelmesi istenen tempere bağlıdır. Bu deneyde kullanılan malzemenin T651 temperinden T73 temperine getirilebilmesi için 28 saat proses süresine ihtiyaç vardır. Proses maliyetini düşürme adına beş numuneyi aynı anda şekillendiren iki adet kalıp üretimine karar verilmiştir. Buna istinaden üretilen kalıpların görseli Şekil 4.15'de verilmektedir.



Şekil 4.15. Sürünme-yaşlandırma şekillendirme deneyinde kullanılacak kalıp

4.4. Proses Akışı

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile şekillendirilmek istenen ham malzemelerin büyük oranda talaşlı imalatı tamamlanmış olan malzemeler olması gerekmektedir. Buna istinaden ilk olarak şekillendirilmek istenilen plakaların talaşlı imalatları tamamlanır.

Proseste kullanılacak kalıbın ve sarf malzemelerin proses için uygun olup olmadığı kontrol edilir. Buna istinaden kalıp ve sarf malzemeler proses süresince proses koşullarına uygun çalışıp çalışamadığı test edilir. Bu testler sonrasında kullanılacak sarf malzemeler seçilir. Bu sayede numune şekillendirme esnasında olası basınç kaybı gibi hataların önüne geçilmiş, deney numunelerinin sağlıklı bir şekilde şekillendirilmesi sağlanmış olur.

Sızdırmazlık bandının proses boyunca sızdırmazlığı sağlayabilmesi için kalıp yüzeyine düzgün bir şekilde yapışması gerekmektedir. Düzgün yapışmanın sağlanabilmesi için sızdırmazlık bandının geçeceği yüzeylere zımpara uygulanarak yüzeyden kirleticiler uzaklaştırılır. Son olarak metil etil keton kimyasalı ile yüzeyler temizlenerek sızdırmazlık bandı yüzeye yapıştırılır.

Şekillendirilecek numuneler kalıp üzerine uygun şekilde yerleştirilir. Kalıp üzerinde

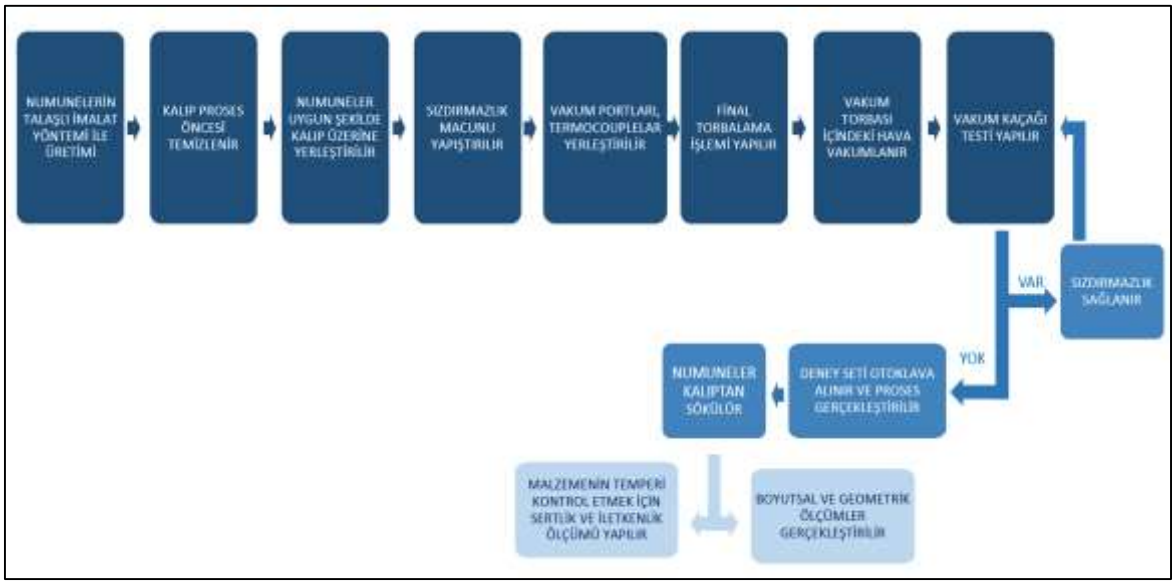
bulunan konumlandırıcı pimler sayesinde numuneler doğru pozisyonda kalıp üzerine yerleştirilir. Numunelerin proses esnasında forma doğru hareket etmeleri gerekecektir. Bu hareketin sağlanabilmesi için numuneler pimlerin teğetlerine değecek şekilde yerleştirilir ve uygun bantlar yardımı ile birbirlerine bantlanır.

Proses esnasında numune üzerinden sıcaklık bilgisi alınması gerekmektedir. Bu bilgi termocouple'lar sayesinde alınarak otoklavın kontrol sistemine iletilir. Proses hazırlığının bu aşamasında her bir numune üzerine bir termocouple yerleştirilir.

Vakum torbası ile kalıp arasında kalan havanın boşaltılması gerekmektedir. Bunun için vakum torbası uygun şekilde delinerek bu bölgelere vakum portları yerleştirilir. Vakum portlarından en az bir tanesine vakum ölçüm sayacı bağlanır. Seyyar vakum motorları yardımı ile kalıp ile vakum torbası arasında kalan hava vakumlanarak sızdırmazlık test edilir. Sızdırmazlık olması durumunda kaçak aranır veya torbalama işlemi tekrarlanır. Sızdırmazlık sağlandıktan sonra numuneler şekillendirilmek üzere otoklava gönderilir.

Deney seti uygun bir şekilde otoklav içerisine yerleştirilir. Vakum portlarına vakum cihazı ve vakum ölçer otoklava bağlanır. Termocouple'lar proses sıcaklığını kontrol edebilmek için otoklava bağlanır. Deney setine bağlanan bu cihazlar sayesinde prosesin istenilen sıcaklık aralığında gerçekleşip gerçekleşmediği, vakum kaçağı olup olmadığı yani kalıba uygulanan pozitif basıncın sürekliliği gözlemlenebilir. Bu bilgiler çevrim raporu adı verilen monitör loğları ile bilgisayar ortamında kayıt altına alınır.

Proses tamamlandıktan sonra vakum torbası açılarak numuneler kalıptan sökülür. Isıl işlemin uygun şekilde gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini teyit etmek için numunelere sertlik ve iletkenlik testleri yapılır. Şekillendirilmiş numunelerin ölçümü CMM cihaz yardımı ile gerçekleştirilerek kayıt altına alınır. Elde edilen ölçüm değerleri, t=0 anında numune üzerinde oluşan gerilmeler ile kalıp formu arasındaki ilişki incelenerek geri yaylanma değerleri elde edilir. Şekil 4.16'de proses akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.16. Proses akış şeması

4.5. Deney Parametrelerinin belirlenmesi

Alüminyum 7075-T73, malzemenin mekanik özelliklerinin sağlamış olduğu avantajlardan dolayı havacılık sektöründe kanat ve gövde panel üretiminde sıklıkla kullanılan malzemelerdendir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarının nihayetinde elde edilen bilgi birikiminin havacılık sektörüne katkı sağlaması amaçlanmıştır. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi ile nihayetinde uçak parçası üretilmek istenmektedir. Bu sebepten ötürü malzemenin yaşlandırma parametreleri havacılık otoriteleri tarafından kabul görmüş bir standarda bağlanması gerekmektedir. Aksi taktirde üretilen parça için kalifikasyon işlemlerinin tekrarlanması gerekecektir. Buna istinaden yaşlandırma parametreleri uluslararası AMS2770 standardına uygun olarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

AMS2770 dokümanına göre 7075 T651 malzemenin T73 temperine yaşlandırılabilmesi için gerekli proses sıcaklığı 163°C ve proses süresi 26-28 saattir. Gerçekleştirilecek olan deneyin sıcaklık ve zaman parametreleri AMS2770 dokümanına göre belirlenmiştir. Ayrıca proses sıcaklığının geri yaylanmaya etkisinin incelenebilmesi için malzemenin aşırı yaşlandırılmasına karar verilmiş ve ikinci yaşlandırma sıcaklığı olarak da 183°C belirlenmiştir.

Kullanılan deney numunelerinin kalınlığı incelenen kanat panellerinin et kalınlıkları referans alınarak belirlenmiştir. Buna istinaden numune kalınlıkları 3,00; 4,00; 5,00; 6,00

mm olarak belirlenmiştir. Proses basıncı, kullanılacak otoklavın kapasitesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Buna istinaden deneylerin 0,7; 0,8; 0,9 MPa basınç altında gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Belirlenen bu parametreler ışığında, numune kalınlığının ve otoklav basıncının geri yaylanma değeri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

4.5. Sarf Malzemelerin Belirlenmesi

Deneyin gerçekleştirileceği sıcaklık, basınç ve zaman parametreleri belirlendikten sonra, bu parametrelere uygun bir şekilde çalışabilecek sarf malzemelerin belirlenmesi gerekmektedir. Buna istinaden şirket bünyesinde yaygın olarak kullanılan Airtech marka WN1500 vakum torbası, A-800-3G ve AT200Y sızdırmazlık bandı proses parametreleri ile test edilmesine karar verilmiştir. Test ile alakalı görseller Resim 4.1'de verilmektedir.



Resim 4.1. Vakum torbası ve sızdırmazlık macunu testi

Yapılan test sonucunda WN1500 vakum torbası, A-800-3G ve AT200Y sızdırmazlık bandı proses süresince başarı ile görevlerini yerine getirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda Çizelge 4.3' de verilen sarf malzemelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Standart malzemeler ile alakalı teknik dokümanlar EK-1, EK-2, EK-3 ve EK-4'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. Sarf malzeme listesi

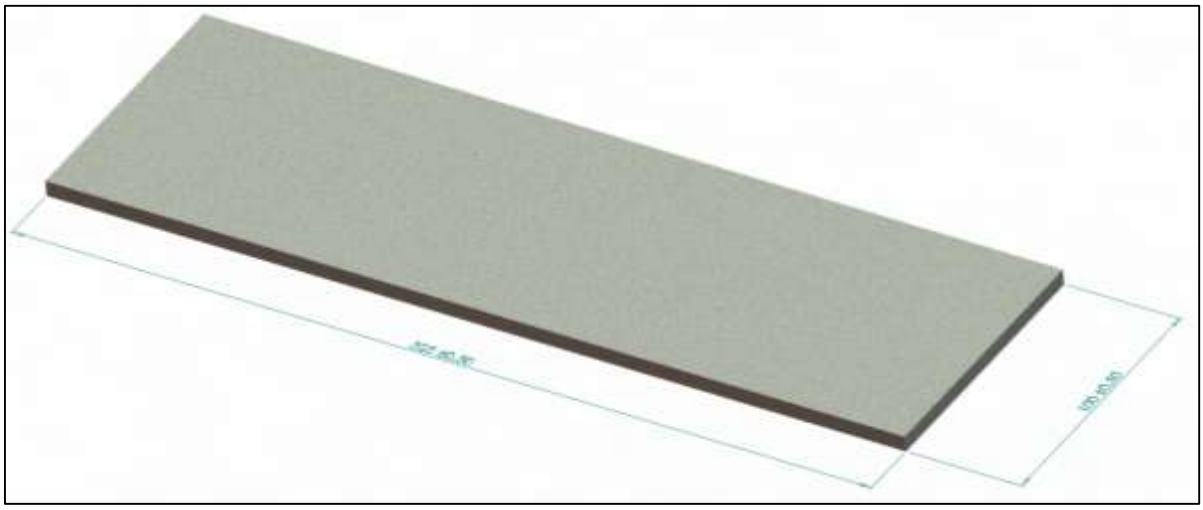
Battaniye	Vakum Torbası	Sızdırmazlık Bandı
AIRTECH ULTRAWEAVE 1332	AIRTECH WN1500	AIRTECH A-800-3G

4.6. Deney Numunelerinin Üretilmesi

Numuneler SAE AMS-QQ-A250/12 standardına uygun alüminyum 7075-T651 17,5 mm et kalınlığına sahip malzemeden üretilmiştir. Ham malzeme yüzey frezeleme tezgahında 3.00, 4.00, 5.00, 6.00 mm kalınlığa işlenmiş, hassas su jeti tezgahında 100x325 mm ölçülerine işlenmiştir. Numunelerin çapakları temizlendikten sonra ölçüleri kontrol edilmiştir. Numune görseli Şekil 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deneyde kullanılan numune tablosu

Deney Süresi	Otoklav Basıncı	0,9MPa	0,8MPa	0,7MPa	Otoklav Sıcaklığı
	Numune Kalınlığı	Numune Adedi			
26-28 Saat	3 mm		5 adet		163°C
	4 mm		5 adet		
	5 mm	5 adet	5 adet	5 adet	
	6 mm		5 adet		
	5 mm		5 adet		183°C



Şekil 4.17. Hazırlanmış numune görseli

4.7. Deney Tasarımı

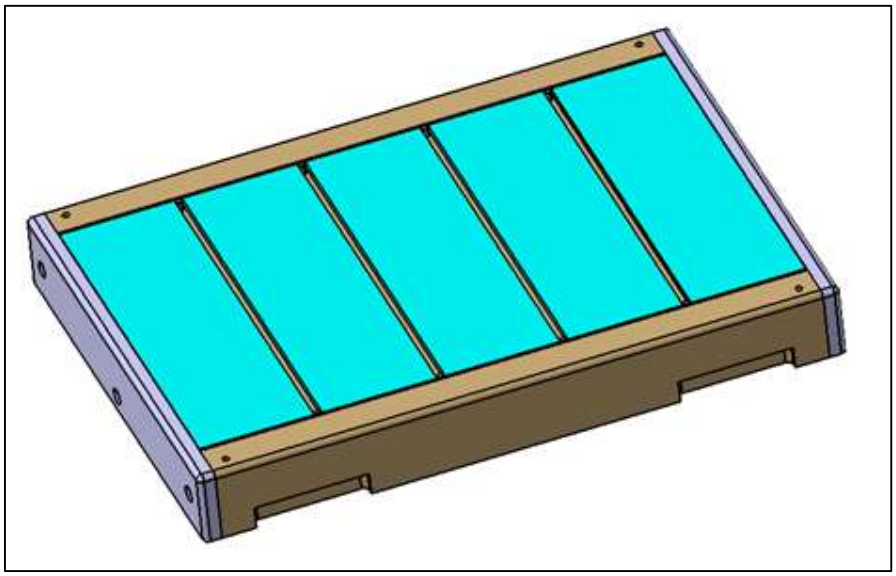
Çizelge 4.5'de görüldüğü üzere 3,00; 4,00; 5,00; 6,00 mm kalınlığındaki numuneler 0,8 MPa otoklav basıncı ve 163°C sıcaklık altında; 5,00 mm kalınlığındaki numuneler 0,7 MPa ve 0,9 MPa otoklav basıncı ve 163°C sıcaklık altında; 5,00 mm kalınlığındaki numuneler 0,8 MPa otoklav basınç ve 183°C altında şekillendirilmiştir. Tüm deneyler beş kez tekrarlanarak prosesin tekrar edilebilirliği incelenmiştir. Otoklav sıcaklığı ve basıncı elektronik olarak kontrol edildiğinden dolayı özdeş deneyler aynı kalıp üzerinde tek çevrimde tamamlanmıştır. Toplamda 7 farklı deney gerçekleştirilmiş ve toplamda 35 numune şekillendirilmiştir.

Çizelge 4.5. Deney listesi

<table>
<tr><th colspan="5">Deney No</th><th>Numune Kalınlığı [mm]</th><th>Proses Basıncı [MPa]</th><th>Proses Sıcaklığı [°C]</th></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td rowspan="4">0,8</td><td rowspan="5">163</td></tr>
<tr><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>4</td></tr>
<tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>5</td></tr>
<tr><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>6</td></tr>
<tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>5</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td><td>5</td><td>0,7</td></tr>
<tr><td>31</td><td>32</td><td>33</td><td>34</td><td>35</td><td>5</td><td>0,8</td><td>183</td></tr>
</table>

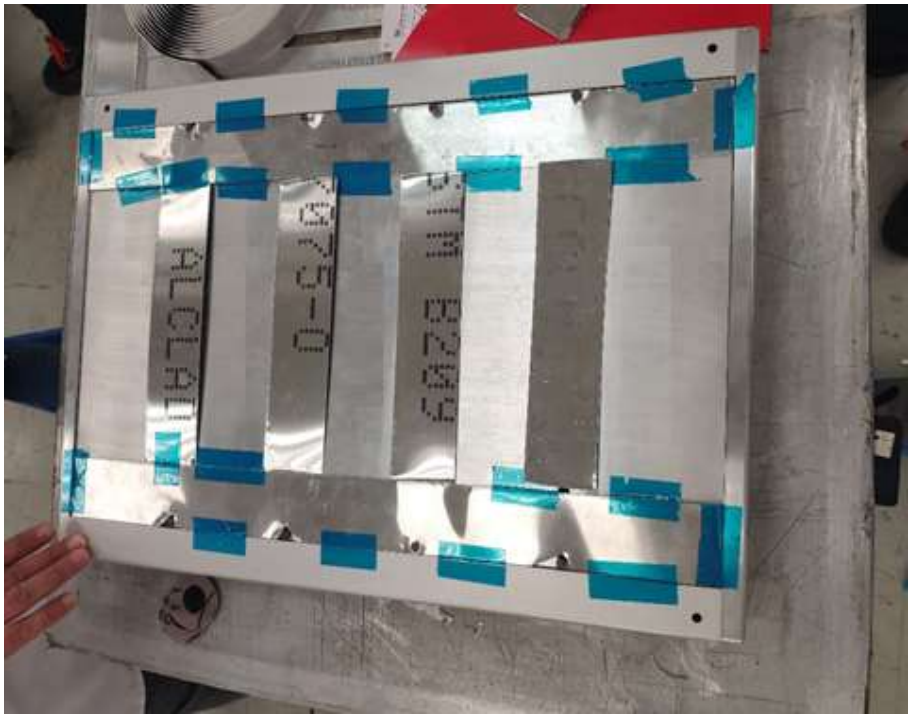
4.8. Deney Yöntemi

Bu çalışmada şekillendirilen numuneler otoklav şartlarında şekillendirilmiştir. Kalıp üretimi her proseste 10 numune şekillendirebilecek şekilde yapılmıştır. Buna istinaden aynı proses parametrelerine sahip numunelerin şekillendirilme işlemi beraber yapılmıştır. İlk deneyde 3 mm ve 4 mm kalınlığa sahip beşer numune kalıplar üzerine yerleştirilmiştir. Kalıp üzerindeki pozisyonlama pimlerine temas ettirilen numuneler Flashbreaker® 1 band yardımı ile birbirlerine yapıştırılarak pozisyonları sabitlenir.

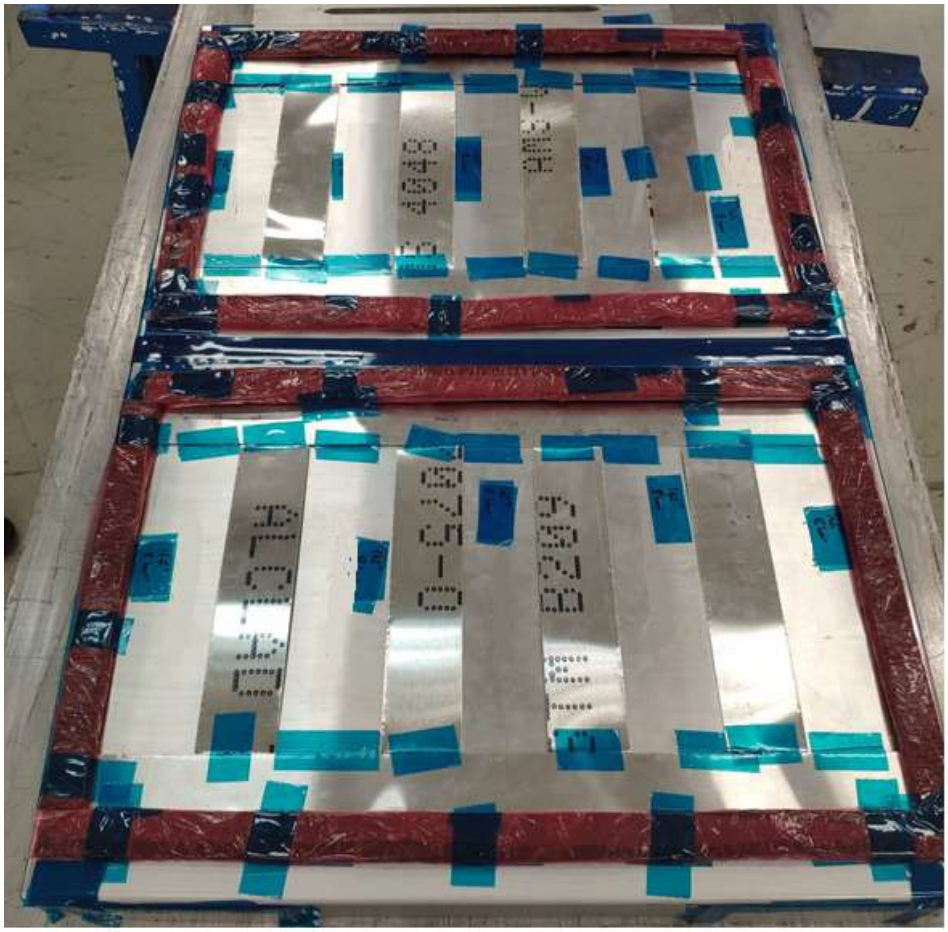


Şekil 4.18. Kalıp üzerine numune yerleşimi

Kalıp üzerine pozisyonlanan numune arasında ve numune ile kalıp arasında çalışma boşlukları mevcuttur. Bu boşluklar, vakumlama esnasında vakum torbasının kalıp ile numune arasına girmesine ve patlamasına sebep olabilir. Bu sebepten ötürü ince çelik şerit ve basınç macunları ile bu boşluklar kapatılarak vakum torbasının zarar görmesi engellenir. Bu işlem Resim 4.2 ve Resim 4.3'de gösterilmektedir.



Resim 4.2. Kalıp üzerindeki boşlukların metal şerit ile kapatılması



Resim 4.3. Kalıp ile numune arasındaki boşlukların kapatılması.

Kalıp üzerinde bulunan deliklerin ve boşaltmaların kapatılması gerekmektedir. Aksi taktirde bu bölgelerde vakum torbası üzerinde aşırı gerilme birikebilir ve vakum torbasında yırtılma meydana gelebilir. Kalıp üzerindeki delik ve boşaltmaların kapatılması Resim 4.4'da verilmektedir.



Resim 4.4. Kalıp üzerindeki delik ve boşaltmaların kapatılması.

Vakum torbası içinde kalacak hazırlıkların tamamlanmasından sonra vakum torbası uygulamasına geçilir. Takımları uygun şekilde torbalayabilmek için takımların altına düz plakalar yerleştirilmiştir. Sızdırmazlık macunu uygulanacak bölgeler, yapışmanın daha iyi sağlanabilmesi için zımparalanmış ve kimyasal temizleyiciler ile temizlenmiştir. Temizlenen yüzeylere A-800-3G sızdırmazlık bandı üç sıra şeklinde uygulanmıştır. Bu işlem Resim 4.5'de gösterilmektedir.



Resim 4.5. Sızdırmazlık bandı uygulaması

Deney süresince numune üzerinden sıcaklık ve basınç bilgilerinin alınabilmesi için numune üzerine termocouple'lar ve vakum portları yerleştirilmiştir. Deneyin gerçekleştirildiği otoklavda sıcak hava akışı tek yönden kalıba uygulanmaktadır. Dolayısı ile kalıbın sıcak havanın geldiği yöne olan tarafı daha hızlı ısınmakta, diğer tarafı ise daha yavaş ısınmaktadır. Numunelerin istenilen tolerans aralığında sıcaklığa maruz bırakılabilmesi için kalıbın her iki tarafına termocouple yerleştirilmiştir. Termocouple kabloları sızdırmazlık bandından dışarı çıkartılırken vakum kaçağına sebep vermeyecek şekilde ilave sızdırmazlık bandı kullanılmıştır. Vakum portları kalıp üzerine iki amaç için yerleştirilir. Bunlardan bir tanesi torba ile kalıp arasındaki havanın vakumlanması, diğeri ise torba ile kalıp arasındaki vakum basıncının ölçülmesidir. Bu sebepten ötürü vakum portları kalıp üzerine uygun aralıklar ile yerleştirilmiştir. Resim 4.6'de torbalama öncesi deney seti görseli verilmektedir.



Resim 4.6. Torbalama öncesi deney seti

Vakum torbası; otoklavın iç ortam basıncını numunenin tek yüzeyine uygulanmasını sağlayarak, numunenin kalıp yüzeyine ittirilmesini sağlamak amacı ile kullanılır. Proses boyunca görevini sağlıklı bir şekilde yapabilmesi için yırtılmaması ve sızdırmazlık bandı iyi bir şekilde yapışması gerekmektedir. Sızdırmazlık, kalıbın alt yüzeyine yerleştirilen düz plaka üzerinden sağlanmaktadır. Kalıbın torbaya değecek olan yüzeyi sızdırmazlık plakası yüzeyinden çok daha büyük olduğundan ötürü torbalama işleminde bu durum dikkate alınmalıdır. Bu sebepten ötürü sızdırmazlık bandı yardımı ile kalıp yüzeyine fazladan torba bırakılır. Vakumlama esnasında fazla bırakılan torba kalıp yüzeyine uygun şekilde yayılarak torbanın gerilmesi engellenir. Bu sayede vakum torbasının yırtılma ihtimali azaltılır. Vakum torbası uygulaması Resim 4.7'da gösterilmektedir.



Resim 4.7. Vakum torbası uygulaması

Torba ile kalıp arasında kalan havanın vakumlanması ve torba içi basıncın ölçülebilmesi için vakum portlarının deney setine bağlanması gerekmektedir. Bu işlem için torbalama öncesi deney setine yerleştirilen vakum port parçalarının bulunduğu bölgeden vakum torbası uygun şekilde yırtılır. Vakum portları uygun şekilde torba içindeki aparatlara bağlanır. Vakum portu ile torba arasından vakum kaçağı olmaması için bu bölgeler sızdırmazlık bandı ile sarılır. Vakum portlarının deney setine uygulanması Resim 4.8'da gösterilmektedir.



Resim 4.8. Vakum port uygulanması

Deney seti otoklav sürecine gönderilmeden önce, yapılan sızdırmazlık işlemlerinin uygun olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir. Deney setine yerleştirilen vakum portlardan bir tanesine vakum ölçer, diğerlerine ise vakum pompası bağlanarak deney seti sızdırmazlığı test edilmiştir. Torba içi vakum değeri 600 mmHg olana kadar torba içindeki hava vakumlanmış ve vakum kaynağı deney setinden sökülmüştür. 10 dakika kadar beklenerek vakum ölçerdeki değer takip edilmiş ve vakum sızıntısının olmadığı gözlemlenmiştir. Deney setinin statik test görseli Resim 4.9'de verilmektedir.



Resim 4.9. Deney setinin statik testi

Otoklav prosesi için tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra deney seti otoklava taşınmıştır. Otoklav sıcaklığının kontrol altında tutulabilmesi için termocouplelar otoklava bağlanmıştır. Deney seti üzerine yerleştirilmiş olan vakum portlardan bir tanesi otoklavın vakum ölçerine, diğerler ise vakum kaynağına bağlanmıştır. Otoklav süreci bu bağlantılar sayesinde süreç monitörü üzerinden takip edilecek ve kayıt altına alınacaktır.

Tüm deneyler 2014 yılında üretilmiş 2 metre uzunluğunda ve 1 metre çapında 1271-1413 model numaralı otoklavda gerçekleştirilmiştir. Otoklav görseli Resim 4.10'de verilmektedir



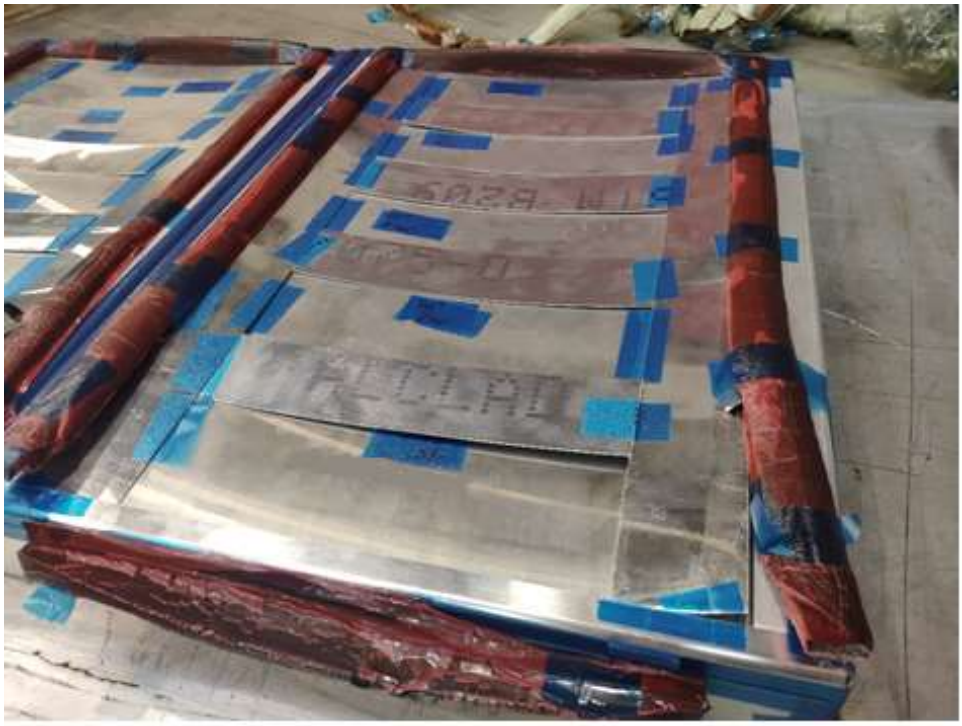
Resim 4.10. Deneylerin gerçekleştirildiği otoklav cihazı.

Otoklav 5°C/dk ısıtma hızına sahiptir. Sıcaklık sabitlendikten sonra ±1°C toleransta otoklav sıcaklığını sabit tutabilmektedir. Otoklav bu değerler ile AMS2770 dokümanına uygun olarak ısıl işlem gerçekleştirebilmektedir.

Otoklav süreci tamamlandıktan sonra deney seti otoklavdan çıkartılmıştır. Deney seti üzerinden vakum torbası sökülmüştür. Termocouplelar ve vakum portları uygun şekilde kalıp üzerinden kaldırılmıştır. Kalıp ve numune üzerindeki diğer sarf malzemeler temizlenmiş ve numune şekillendirmesi başarı ile tamamlanmıştır. Otoklav sonrası yapılan işlemlerin görselleri Resim 4.11, Resim 4.12, Resim 4.13 ve Resim 4.14'da gösterilmektedir.



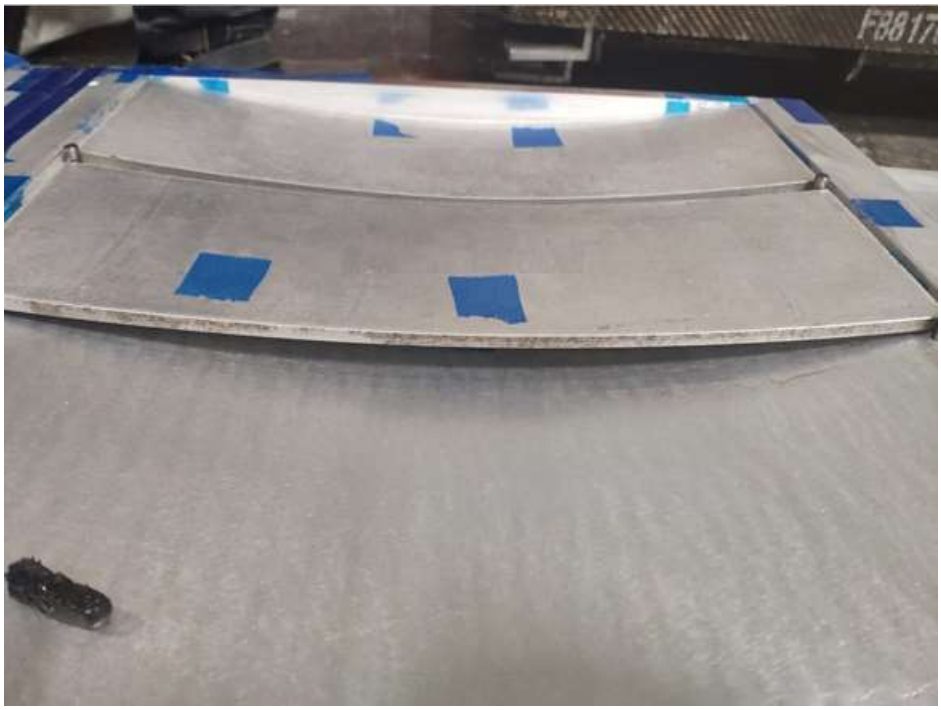
Resim 4.11. Otoklav sonrası deney seti



Resim 4.12. Vakum torbası, vakum port ve termocoupleların sökülmesi



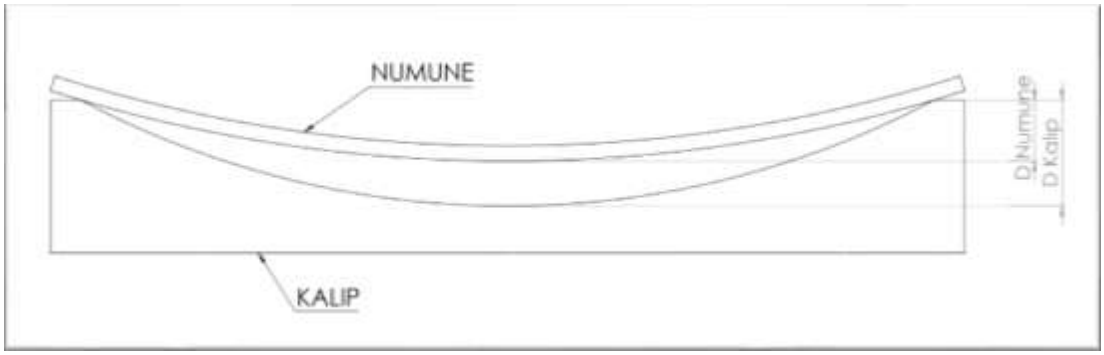
Resim 4.13. Sarf malzemelerin temizlenmesi



Resim 4.14. Şekillendirilmiş numune görselleri

Şekillendirilmiş numunelerin istenilen tempere gelip gelmediğini kontrol etmek için numunelere sertlik ve iletkenlik ölçümü yapılmıştır. Numunelerin geometrik ölçümleri CMM cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerdeki geri yaylanma değeri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır [1].

$$\%\text{Geri yaylanma} = \frac{D\ kalıp - D\ numune}{D\ kalıp} x100$$



Şekil 4.19. Geri yaylanma gösterimi

Numunelerin sertlik ve iletkenlik ölçümleri sırası ile ASTM E10 ve ASTM E1004 standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Alüminyum 7075 malzemenin T73 temperinin sertlik ve iletkenlik değerleri için referans AMS 2658 dokümanı alınmıştır. Bu

dokümana istinaden alüminyum 7075-T73 malzemenin sertlik ve iletkenlik değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Alüminyum 7075-T73 malzemenin sertlik ve iletkenlik değerleri, AMS2658

Alaşım	Temper	Brinell Sertliği, min	Sertlik HRB, min	Sertlik HRE, min	Sertlik HR15T, min	%İletkenlik
7075	T73	125	78	70 max	85	38,0-43,0

Sertlik ölçümü için Mitutoyo 810-203D sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. İletkenlik ölçümü Verimet M4900C ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihazların görselleri sırası ile Resim 4.15 ve Resim 4.16'de verilmiştir.

Ölçüm sonuçları detaylı bir şekilde Bölüm 4.9'da verilmiştir.



Resim 4.15. Sertlik ölçüm cihazı



Resim 4.16. İletkenlik ölçüm cihazı ve kalibrasyon kontrolü



Resim 4.17. Numunelerin iletkenlik ölçümü

4.9. Deney Sonuçları

Bu çalışmada toplamda 35 adet numune şekillendirilmiştir. Her bir farklı parametre için toplamda 5 adet numune şekillendirilmiştir. Numunelerin tekrarlı şekillendirilmesinin amacı, sürünme yaşlandırma prosesinin tekrar edilebilirliğini kontrol etmek ve yapılan deneysel çalışmanın doğruluğunu göstermektir.

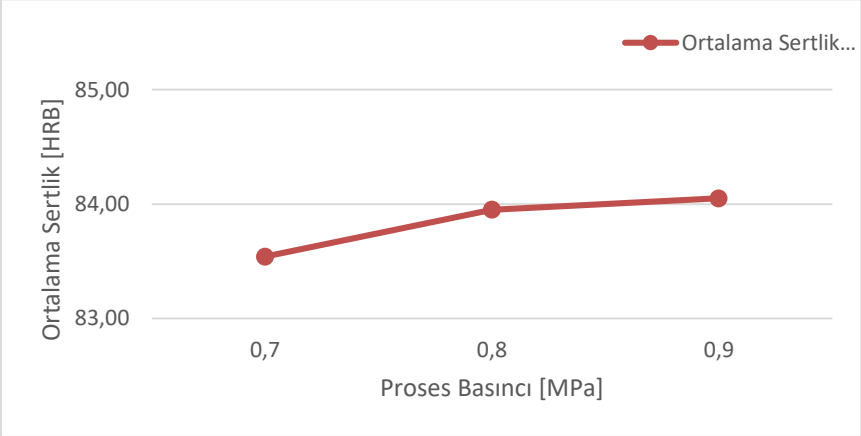
Yapılan çalışma neticesinde AA7075-T651 plaka malzeme T73 temperine yaşlandırılırken şekillendirilmiştir. Yapılan deneylerin ölçüm sonuçları grafikler ve çizelgeler halinde detaylı olarak verilmiştir. AA7075-T73 malzemenin sertlik ve iletkenlik değerleri AMS 2658 dokümanı referans alınarak Çizelge 4.6'da verilmiştir. AA7075-T73 malzemesi için AMS2658 dokümanına göre, sertlik değeri en az 78 HRB olması gerekirken malzemenin iletkenlik değeri %IACS cinsinden 38,0 ile 43,0 aralığında olması gerekmektedir.

Numunelerin sertlik ölçümleri, Mitutoy 810-203D sertlik ölçüm cihazı kullanılarak ASTM E10 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerin sertlik ölçüm sonuçları

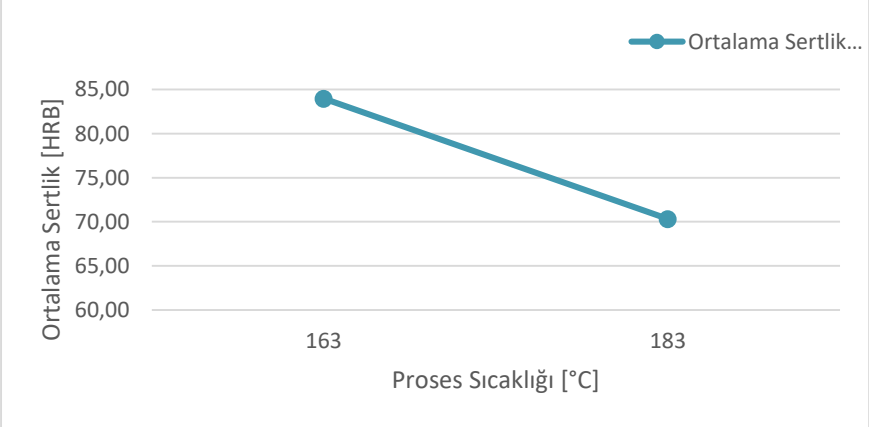
ve standart sapma değerleri Çizelge 4.7'de paylaşılmıştır. Şekil 4.20'de proses basıncına bağlı sertlik değerleri, Şekil 4.21'de proses sıcaklığına bağlı sertlik değerleri ve Şekil 4.22'de numune et kalınlığına bağlı sertlik değerleri grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 4.7. Deney numunelerinin setlik ölçüm değeri sonuçları

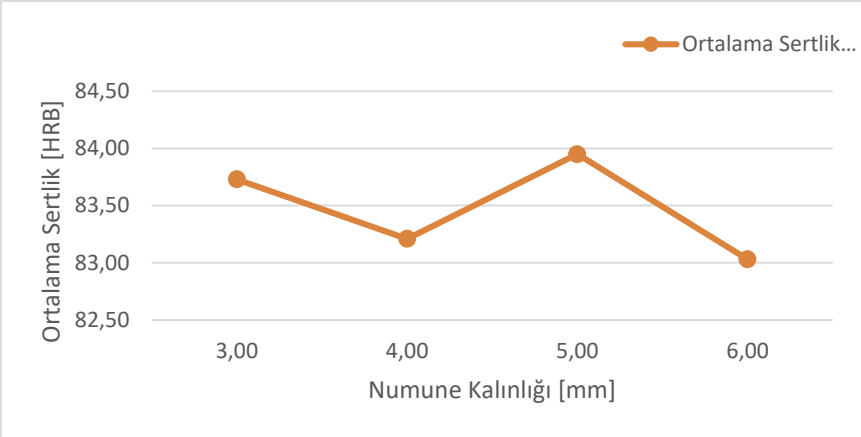
Proses Sıcaklığı [°C]	Proses Basıncı [MPa]	Numune Kalınlığı [mm]	Deney No	Sertlik [HRB]	Sertlik [HRB]	Sertlik [HRB]	Sertlik [HRB]	Sertlik [HRB]	Ortalama Sertlik	Standart Sapma
163	0,8	3	1-5	83,20	83,70	83,80	84,93	83,00	83,73	0,75
163	0,8	4	6-10	82,27	83,50	85,20	81,90	83,17	83,21	1,29
163	0,8	5	11-15	82,50	84,57	83,17	84,60	84,90	83,95	1,05
163	0,8	6	16-20	83,37	82,90	83,33	83,17	82,37	83,03	0,41
163	0,9	5	21-25	85,33	83,10	85,10	83,67	83,07	84,05	1,09
163	0,7	5	26-30	84,35	83,00	84,22	83,42	82,72	83,54	0,72
183	0,8	5	31-35	71,13	69,73	70,80	70,97	68,97	70,32	0,93



Şekil 4.20. Proses basıncına bağlı sertlik değeri dağılım grafiği



Şekil 4.21. Proses sıcaklığına bağlı sertlik değeri dağılım grafiği



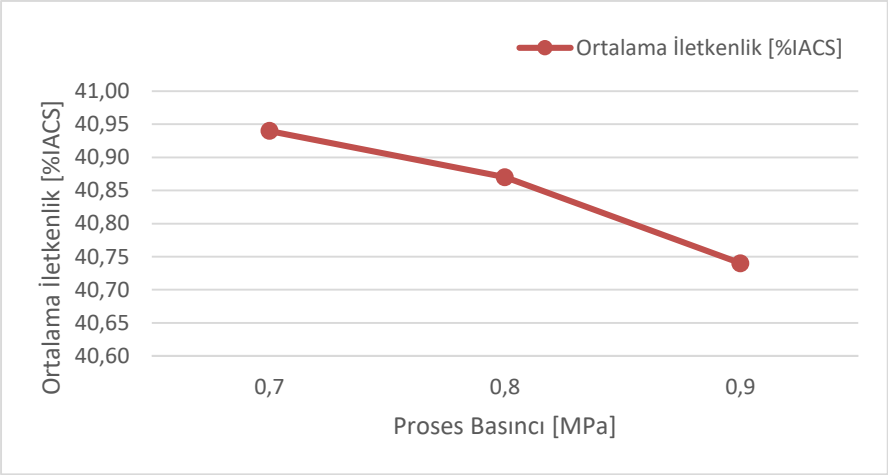
Şekil 4.22. Numune kalınlığına bağlı sertlik değeri dağılım grafiği

Yukarıda verilen grafikler incelendiği durumda proses basıncının ve numune kalınlığının sertlik değerine etki etmediği gözlemlenmiştir. Numune numaraları 1-30 aralığında olan numuneler AMS2770 dokümanına göre 163°C sıcaklık ve 28 saat proses süresinde şekillendirilirken numune numaraları 31-35 aralığında olan numuneler 185°C sıcaklıkta ve 28 saat proses süresinde şekillendirilmişlerdir. Bu değerler dikkate alındığında proses sıcaklığının artması ile numune sertlik değerlerinde azalma olduğu grafik değerleri incelenerek söylenebilmektedir. Deney sonucunda elde edilen sertlik değerleri, deney numarası 31-35 aralığında olanlar hariç diğer tüm numuneler için AMS2658 dokümanı gereksinimlerini sağlamaktadır.

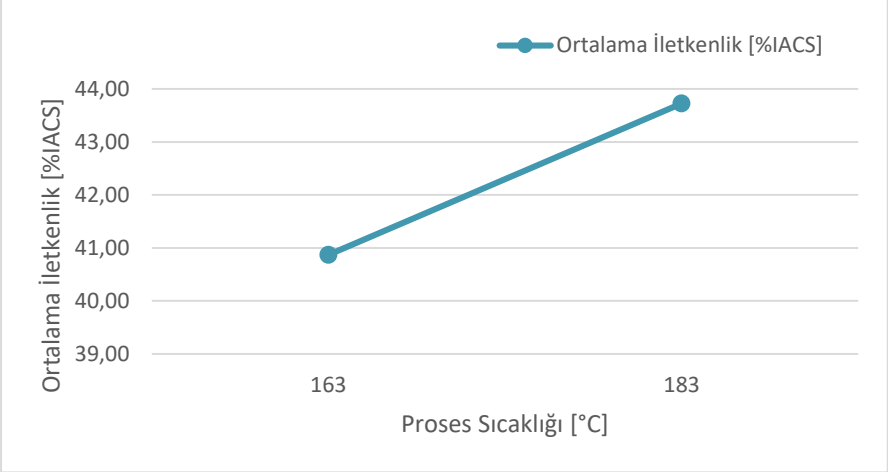
Deney sonrası numunelerin iletkenlik değerleri ASTM E1004 standardına uygun Verimet M4900C iletkenlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Çizelge 4.8'de deney numunelerinin iletkenlik ölçüm değerleri %IACS cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.8. Deney numunelerinin iletkenlik ölçüm değerleri

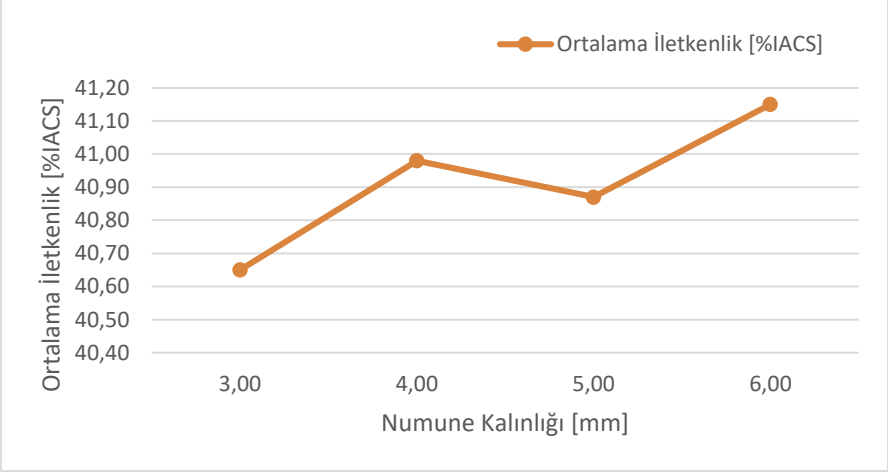
Proses Sıcaklığı [°C]	Proses Basıncı [MPa]	Numune Kalınlığı [mm]	Deney No	İletkenlik [%IACS]	İletkenlik [%IACS]	İletkenlik [%IACS]	İletkenlik [%IACS]	İletkenlik [%IACS]	Ortalama İletkenlik [%IACS]	Standart Sapma
163	0,8	3	1-5	40,77	40,70	40,67	40,43	40,70	40,65	0,13
163	0,8	4	6-10	41,30	40,87	40,60	41,20	40,93	40,98	0,28
163	0,8	5	11-15	41,20	40,83	41,20	40,67	40,47	40,87	0,33
163	0,8	6	16-20	41,13	41,30	41,13	41,07	41,10	41,15	0,09
163	0,9	5	21-25	40,40	41,07	40,70	40,77	40,77	40,74	0,24
163	0,7	5	26-30	40,77	41,18	40,92	40,92	40,93	40,94	0,15
183	0,8	5	31-35	43,60	43,70	43,70	43,63	44,00	43,73	0,16



Şekil 4.23. Proses basıncına bağlı iletkenlik değeri dağılım grafiği



Şekil 4.24. Proses sıcaklığına bağlı iletkenlik değeri dağılım grafiği



Şekil 4.25. Numune kalınlığına bağlı iletkenlik değeri dağılım grafiği

Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de numunelerin iletkenlik değerleri sırasıyla; proses basıncı, proses sıcaklığı ve numune kalınlığı ile ilişkileri gösterilmektedir. Numunelerin iletkenlik değerleri proses sıcaklığına ve süresine bağlı olarak değişmektedir [18]. Numune numarası 1-30 aralığında olan numuneler 164°C sıcaklıkta ve 28 saat proses süresiyle şekillendirilmişlerdir. AMS 2770 dokümanına göre yaşlandırılmış olan bu numunelerin iletkenlik değerleri AMS 2658 dokümanına uygun olarak T73 temperi gereksinimlerini sağladığı söylenebilir. Ancak numune numaraları 31-35 aralığında olan numuneler 184°C sıcaklıkta yaşlandırıldığından ötürü, yaşlandırma işlemi AMS2770 dokümanına uygun değildir. Yüksek sıcaklıkta yaşlandırılan bu numunelerin elektriksel iletkenlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu değerler AMS2658 dokümanında tanımlanan T73 temperi gereksinimlerini sağlamamaktadır.

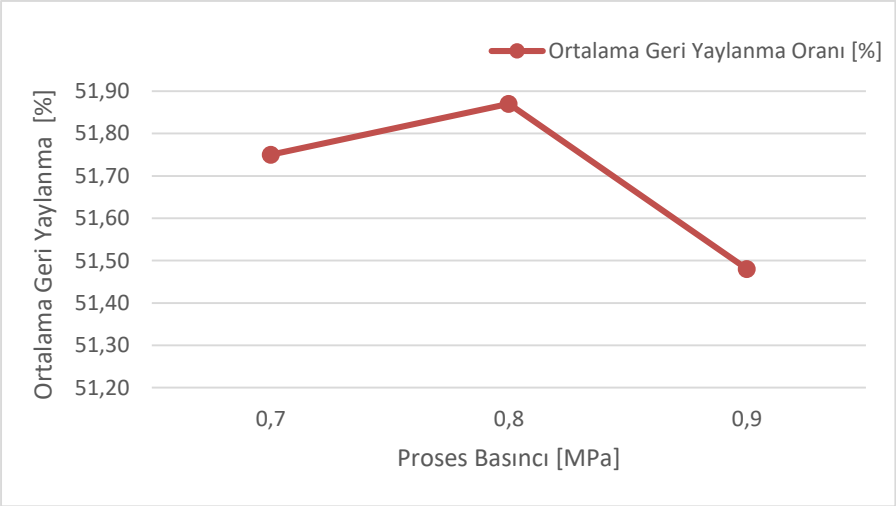
Deney sonrası numune ölçümleri ATOS 5X 3D ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Geri yaylanma değerleri maksimum defleksiyon metoduna göre, kalıp üzerindeki en derin nokta referans alınarak ve denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır [1].

$$\%\text{Geri yaylanma} = \frac{D\ kalıp - D\ numune}{D\ kalıp} x100 \quad (4.1.)$$

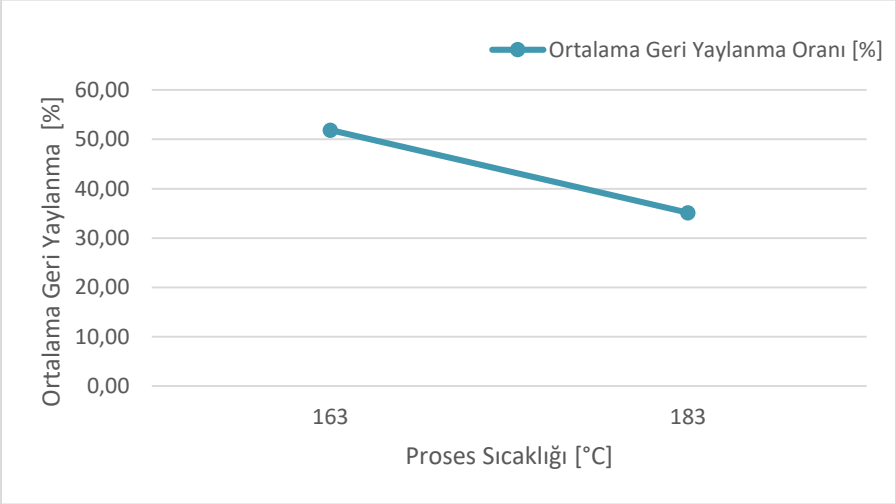
Çizelge 4.9. Deney numunelerinin ortalama geri yaylanma değerleri

Proses Sıcaklığı [°C]	Proses Basıncı [MPa]	Numune Kalınlığı [mm]	Deney No	Ortalama Geri Yaylanma Oranı [%]	Standart Sapma
163	0,8	3	1-5	59,01	2,02
163	0,8	4	6-10	51,68	1,46
163	0,8	5	11-15	51,87	1,12
163	0,8	6	16-20	43,60	1,43
163	0,9	5	21-25	51,48	1,35
163	0,7	5	26-30	51,75	0,69
183	0,8	5	31-35	35,13	0,34

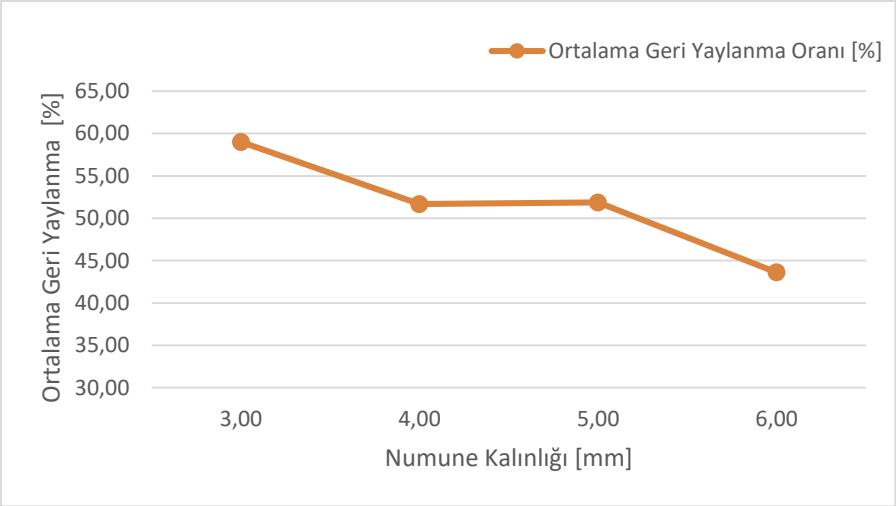
Çizelge 4.9'da numunelerin ölçüm sonuçlarına göre yaylanma oranları ve standart sapma değerleri verilmektedir. Numuneler beşerli olarak aynı kalıp üzerinde şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu sebeple yapılan deneylerde 1-5, 6-10, 11-15, 16-20, 21-25, 26-30 ve 31-35 aralıklarındaki deney numuneleri özdeştir. Yapılan ölçümler sonucunda özdeş deneyler arasındaki yüzde geri yaylanma değeri farklılığı maksimum %2,02 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26. Proses basıncına bağlı geri yaylanma değeri grafiği



Şekil 4.27. Proses sıcaklığına bağlı geri yaylanma değeri grafiği



Şekil 4.28. Numune kalınlığına bağlı geri yaylanma değeri grafiği

Bu çalışmada yapılan tüm deneylerde kullanılan kalıp, proses süresi, deneylerin gerçekleştirildiği otoklav, otoklav sürecinde kullanılan sarf malzemeler ve numunelerin ölçümü için kullanılan ATOS 5X 3D ölçüm cihazı aynıdır. Deney değişkenleri; proses sıcaklığı, proses basıncı ve numune kalınlığıdır.

Şekil 4.26'da proses basıncına bağlı geri yaylanma oranları grafik halinde verilmektedir. Grafik oluşturulurken özdeş numunelerin ortalama geri yaylanma değerleri kullanılmıştır. Grafik, 5 mm kalınlığındaki numunelerin farklı proses basıncı altındaki geri yaylanma oranlarını göstermektedir.

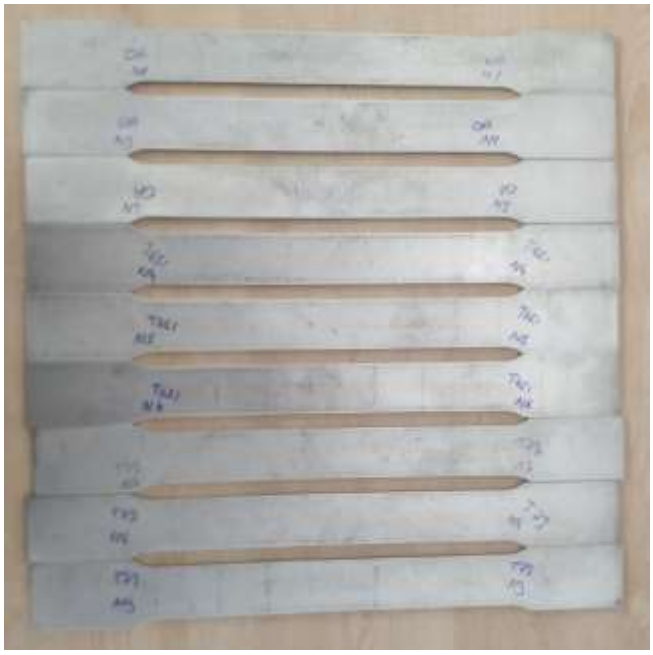
Şekil 4.27'de proses sıcaklığına bağlı geri yaylanma oranları grafik halinde verilmektedir. Grafik oluşturulurken özdeş numunelerin ortalama geri yaylanma değerleri kullanılmıştır. Grafik 5 mm kalınlığındaki numunelerin farklı proses sıcaklığı altındaki geri yaylanma oranlarını göstermektedir.

Şekil 4.28'da numune et kalınlığına bağlı geri yaylanma oranları grafik halinde verilmektedir. Grafik oluşturulurken özdeş numunelerin ortalama geri yaylanma değerleri kullanılmıştır. Grafik; 0,8 MPa proses basıncı altında farklı et kalınlıklarına sahip numunelerin geri yaylanma oranlarını göstermektedir.

4.10. Numunelerin Mekanik Özellikleri ve Mikroyapılarının İncelenmesi

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde malzeme uzun süre sıcaklık ve gerilime maruz bırakılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık ve zaman parametreleri malzemenin yaşlanma sürecine etki etmektedir. Farklı yaşlandırma parametreleri malzemenin sertlik ve iletkenlik değerlerini etkilediği gibi malzemenin mekanik özelliklerini ve mikro yapısınıda etkilemektedir. Bu çalışmada AA7075 malzemenin T651, T73 ve aşırı yaşlandırılmış (OA) temperleri ile şekillendirme işlemi yapılmıştır. T651 temperi numunenin şekillendirme öncesi temperi olurken T73 ve aşırı yaşlandırılmış temperler malzemenin şekillendirme sonrası temperleridir. Bu çalışmada AA7075 malzemenin T651, T73 ve aşırı yaşlandırılmış temperleri için çekme testi gerçekleştirilmiş ve malzemenin mikro yapısı incelenmiştir.

Çekme testi için AA7075-T651 numuneler frezelenerek 5 mm kalınlığa işlenmiştir. Plakalar ASTM E8 standartına uygun şekilde tel erezyon makinesinde kesilmiştir. Kesim işlemi hadde yönüne paralel şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numuneleri şekillendirilen numuneler ile beraber otoklava ortamında yaşlandırılmıştır. Numuneler sertlik ve iletkenlik testleri gerçekleştirilerek istenilen tempere getirildiğine emin olunmuştur. Çekme numuneleri Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Üç farklı temperdeki numunelerin her biri için üçer adet çekme testi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.29. Çekme testi numuneleri

Çekme test ASTM E8 standartına göre 27,5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Test 22°C sıcaklık altında ve %50 nem oranında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi Instron 8503 çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı Şekil 4.30'da gösterilmektedir.

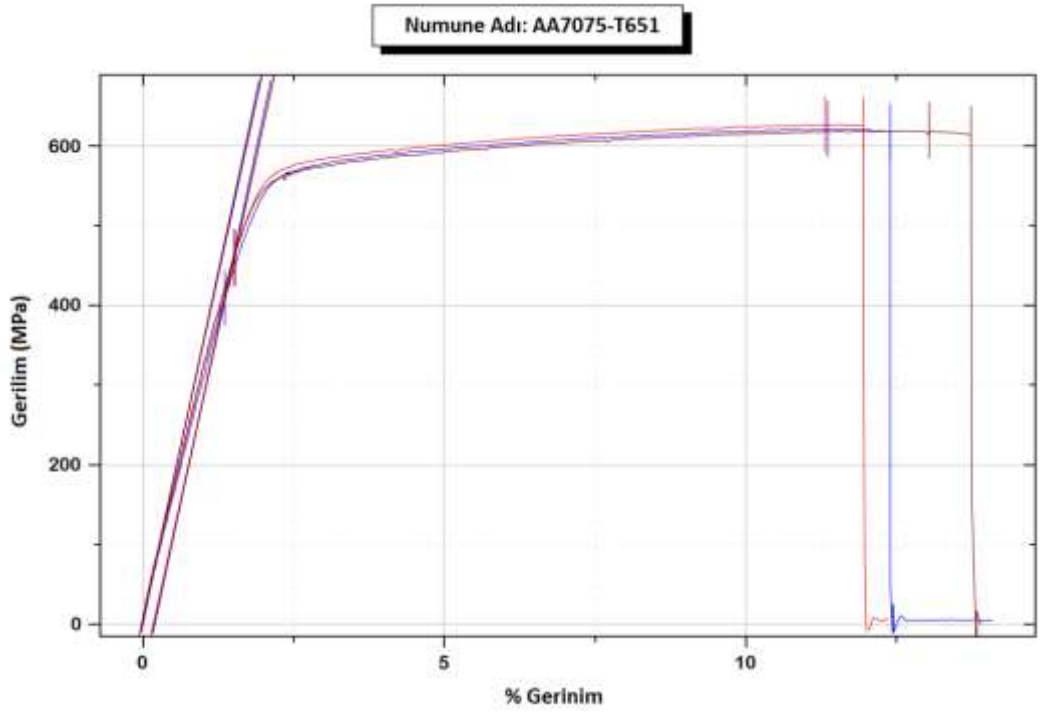


Şekil 4.30. Çekme testi cihazı

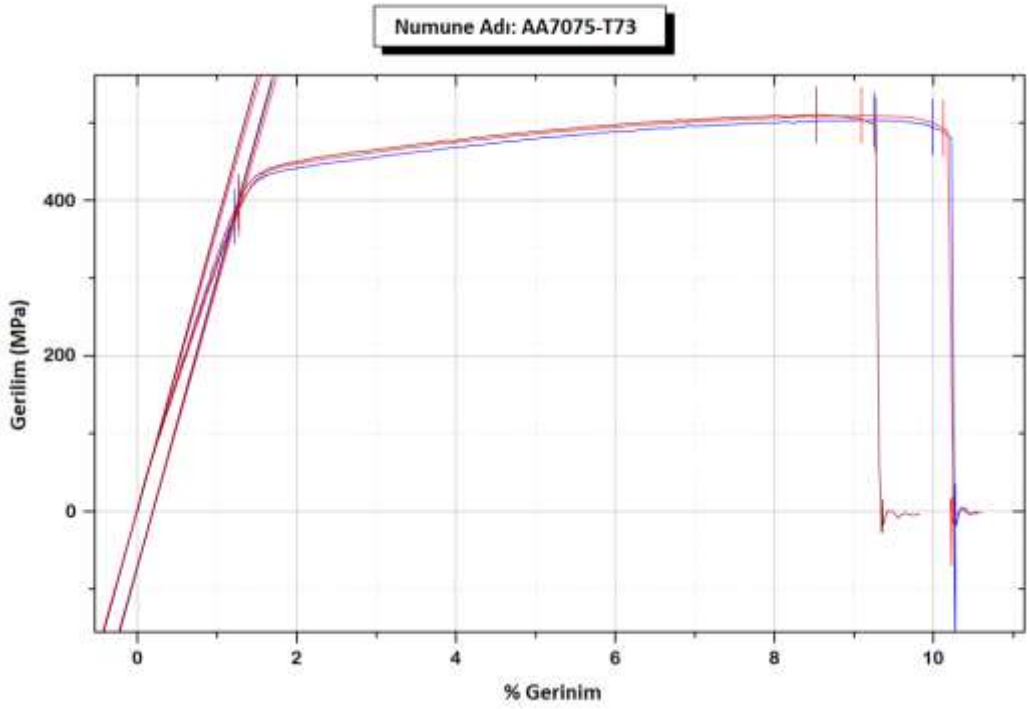
Yapılan çekme test sonucunda elde edilen değerler Çizelge 4.10'da verilmektedir. AA7075-T651, AA7075- T73 ve AA7075-OA numuneleri için gerçekleştirilmiş olan çekme testinden elde edilen değerler Çizelge 4.10'da verilmektedir. Numunelerin Gerilim-Gerinim grafikleri Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de verilmektedir.

Çizelge 4.10. Deney numunelerinin ortalama geri yaylanma değerleri

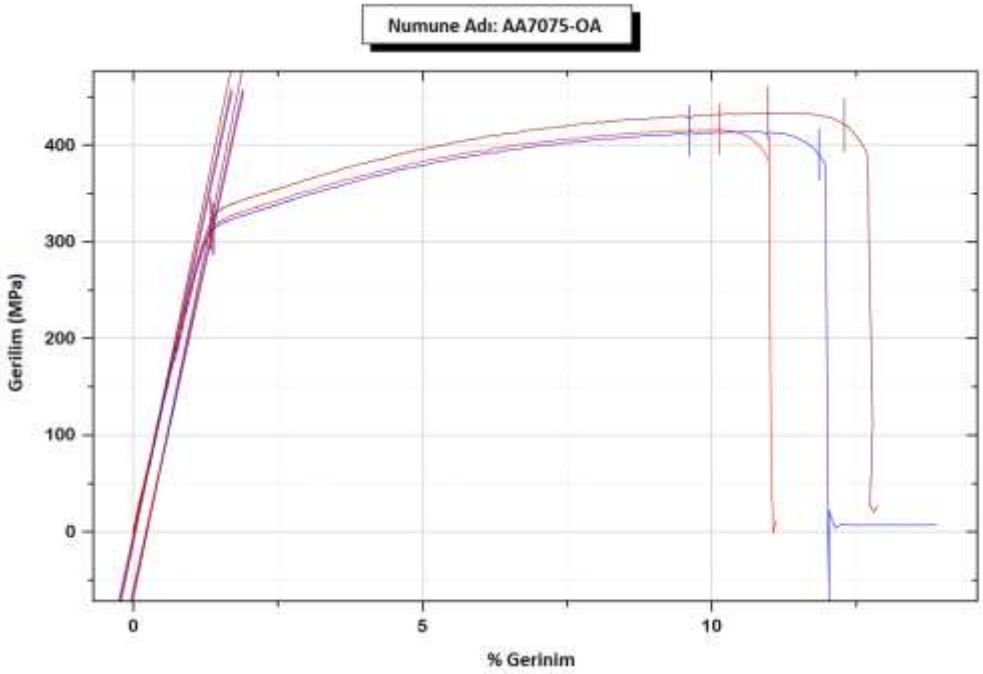
Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yüke Kadar % Gerinim (%)	Kopma Noktasına Kadar % Gerinim (%)	Kırılma Enerjisi (J)
AA7075-T651	460	622	619	11,9	12,68	2729
AA7075-T73	388	508	494	8,95	9,79	1695
AA7075-OA	315	421	398	10,23	11,71	1659



Şekil 4.301. AA7075-T651 Gerilim-Gerinim grafiği



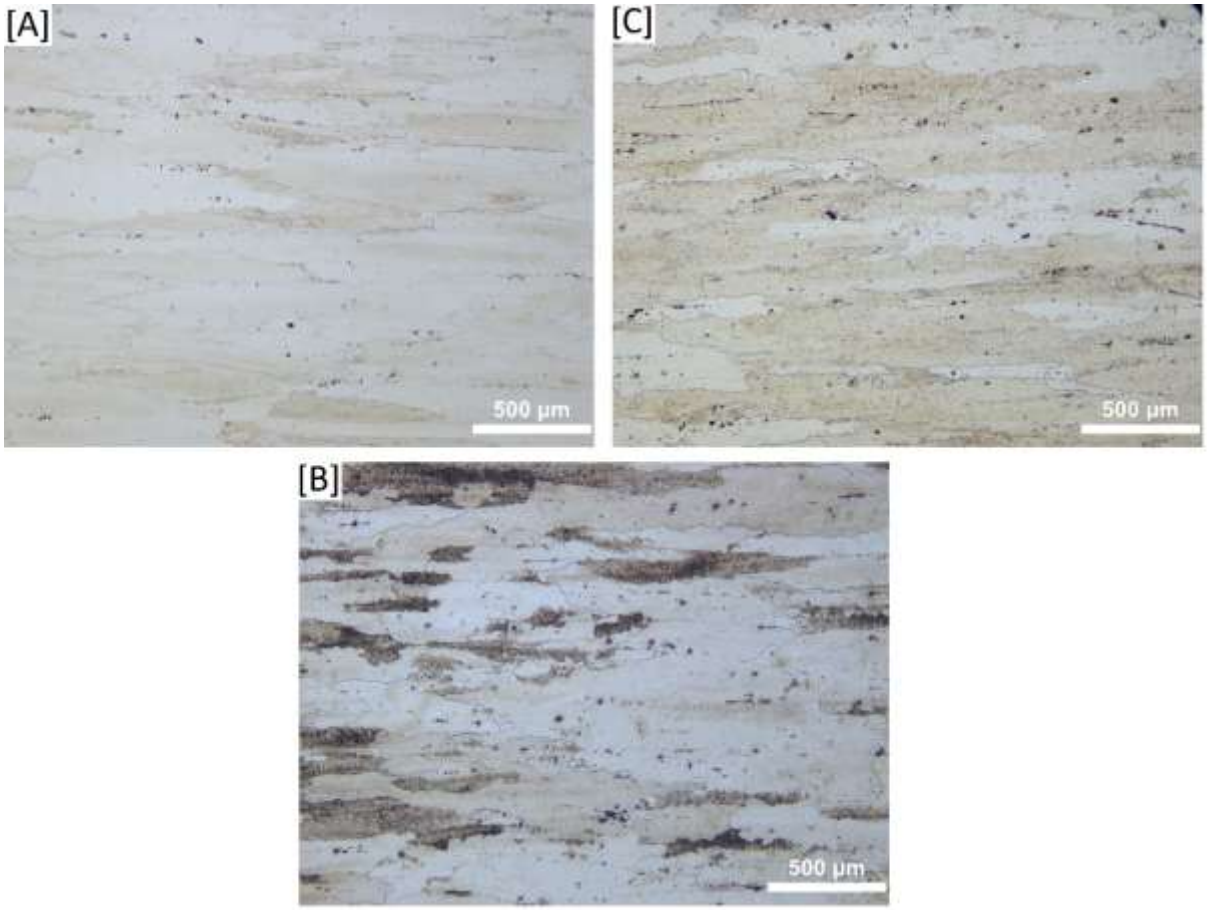
Şekil 4.312. AA7075-T73 Gerilim-Gerinim grafiği



Şekil 4.33. AA7075-OA Gerilim-Gerinim grafiği

Yapılan çekme testi sonuçları incelendiği durumda AA7075 T651 numunenin yaşlandırma sıcaklığı arttırıldığı durumda mekanik özelliklerinde azalma meydana gelmiştir. Numunelerden T651 tempere sahip olanda 460 MPa akma mukavemeti gözlemlenirken T73 temperine sahip olan numunede 388 MPa akma mukavemeti gözlemlenmiştir. Aşırı yaşlandırılmış olan numunenin akma mukavemeti değeri diğer numunelere göre daha düşük olarak 315 MPa olarak ölçülmüştür. Yapılan yaşlandırma sonucunda AA7075 T651 malzemenin yaşlandırıldığı durumda mekanik özelliklerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

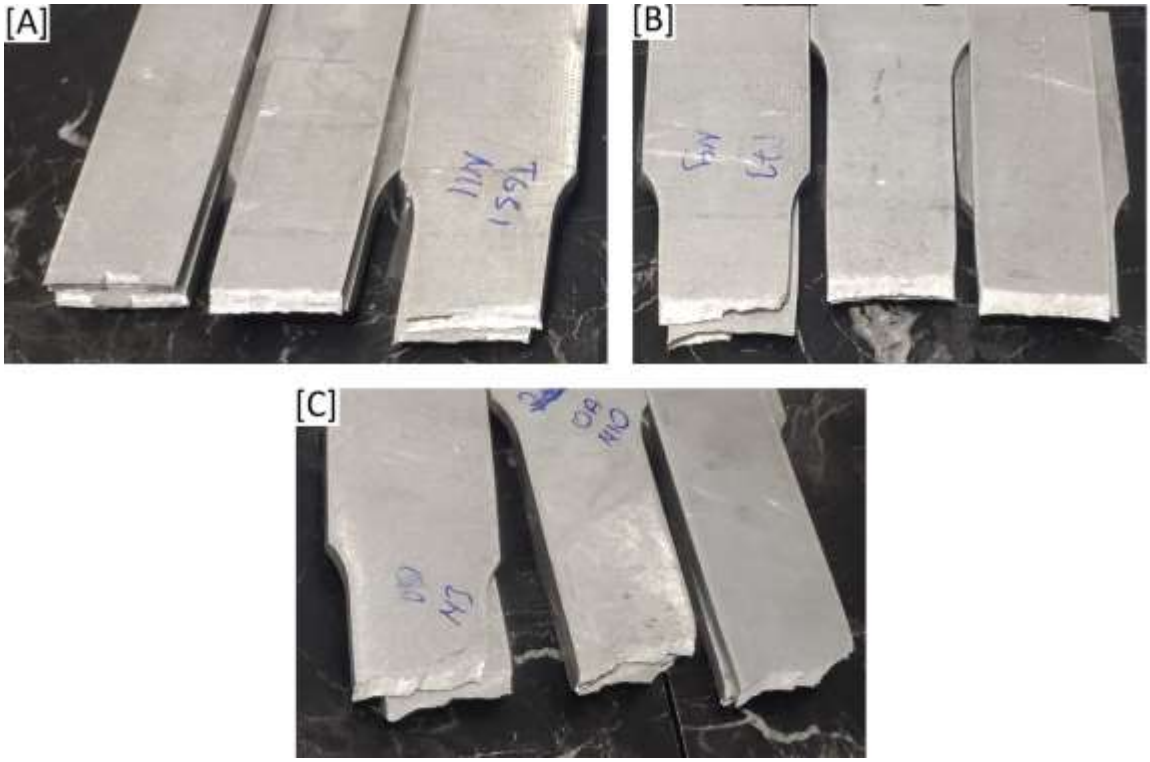
Malzemelerin mikro yapıları Leica DMI 5000M cihazı ile ASTM E3 standartına göre hazırlanmış numuneler üzerinden incelenmiştir. Numuneler, hadde yüzeyleri incelenecek şekilde hazırlanmıştır. Yapılan inceleme sonucu elde edilen mikroyapılar Şekil 4.34'da verilmektedir.



Şekil 4.324. A) AA7075-T651 temperi, B) AA7075-T73 temperi, C) AA7075-OA temperi mikro yapı görüntüsü

Elde edilen mikro yapı görüntüleri incelendiği durumda, AA7075-T651 malzemenin yaşlandırılması durumunda malzeme bünyesinde bulunan tanelerin boyutlarının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Malzeme aşırı yaşlandırılma durumunda da tane yapılarında T73 temperine göre büyümeler meydana geldiği gözlemlenmiştir. T651 temperinde malzemenin hadde yönü tane yapılarından bariz belli olurken T73 ve OA temperlerinde malzemenin tane yapıları hadde yönüne dik yönde daha büyük oranda büyüdüğü gözlemlenmiştir.

Mikro yapıda tane yapılarının büyümesi, çekme testinde numunenin kırılma şeklini etkilemektedir. Şekil 4.35'de çekme testi numunelerinin kırılma bölgelerinin görselleri verilmektedir.



Şekil 4.335. A) AA7075-T651 temperi, B) AA7075-T73 temperi, C) AA7075-OA temperi mikro yapı görüntüsü

Çekme testi numunelerinin kırılma bölgeleri incelendiği durumda AA7075-T651 temperindeki numunede diğer numunelere göre daha gevrek bir kırılma gözlemlenmiştir. AA7075-T73 temperindeki numunede kırılma bölgesinde gözle görülür boyun verme gözlemlenmiştir. Bu numune T651 temperindeki numuneye göre daha sünek bir şekilde kırıldığı söylenebilir. Bu ili numunede de hadde yönüne dik bir kırılma gözlemlenmiştir. Aşırı yaşlandırılmış numunenin kırılma bölgesi incelendiği durumda, kırılma noktasında kesit daralması gözlemlenmiş fakat bu kesit daralması T73 temperindeki kesit daralmasından ayırt edilecek seviyede değildir. Ancak T73 temperindeki numune hadde yönüne dik bir yönde kırılma gerçekleştirmişken aşırı yaşlandırılmış numune hadde yönüne göre ciddi seviyede bir açı yapacak şekilde kırılma göstermiştir. Numunelerin kırılma bölgelerinde meydana gelen farklı kırılma şekilleri, numunelerin mikro yapıları ile doğrudan ilişkilidir. T651 temperindeki numunelerin tane yapıları hadde yönü boyunca uzanmakta ve diğer temperdeki numunelerin tane yapılarına göre daha ince durumdadır. Bu sebepten ötürü numune hadde yönüne dik ve gevrek bir kırılma gerçekleştirmiştir. T73 temperindeki numunelerde tane boyutları T651 temperine göre büyüme göstermiştir. Bu büyüme kırılma bölgesinde numunenin daha sünek davranmasına ve kopma öncesi bir miktar kesit daralması göstermesine sebep olmuştur. Aşırı yaşlandırılmış numunenin kırılma bölgesi incelendiği

durumda, tane büyümesi bu numunede sünek bir kırılmaya sebep olmuştur. Tane yapıları büyüdükçe deformasyon esnasında gerilmeler daha kısıtlı alanlarda birikmekte ve bu durum malzemenin mekanik özelliklerini ve kırılma şekillerini değiştirmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sertlik ölçümleri, ASTM E10 standardına uygun olarak Mitutoyo 810-203D sertlik ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. AMS2658 dokümanına göre AA7075-T73 malzeme için Rockwell B sertlik değeri minimum 78 HRB olarak tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen 35 deney numunesi için ölçülen sertlik değerleri incelendiği durumda, en düşük sertlik değeri 68,97 HRB ve en yüksek sertlik değerinin 85,2 HRB olarak ölçülmüştür. Numune numarası 1-30 aralığında olan numuneler için bu değerler AMS2658 dokümanının belirlediği sınırlar içindedir. Numune numarası 31-35 aralığında olan numunelerin dertlik değerleri AMS2658 dokümanına uygun değildir. Bunun sebebi sürünme deformasyonunda sıcaklık değişiminin etkisini incelemek için proses sıcaklığının 183°C olarak seçilmesidir. 163°C sıcaklıkta şekillendirilen deney numunelerindeki sertlik farklı; malzeme bünyesindeki kimyasal bileşenlerin farklılığına ve proses süresince numunelerin tam anlamı ile aynı sıcaklığa maruz kalamamasından kaynaklanmaktadır. Standartlarda belirtilen sertlik ve iletkenlik değerlerinin bir aralıkta olmasının sebebi bu farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

İletkenlik ölçümleri, ASTME1004 standardına uygun Verimet M4900C iletkenlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. IACS ölçüm birimi, tavlanmış bakırı referans alan uluslararası iletkenlik ölçüm birimidir. AMS2658 dokümanına göre AA7075-T73 malzeme için iletkenlik değeri 38,0-43,0 %IACS olarak tanımlanmıştır. Deney numuneleri üzerinde yapılan ölçümler sonucunda, numune numarası 1-30 aralığında olan tüm numunelerin ölçüm değerlerinin bu aralıkta olduğu gözlemlenmiştir. Numune numarası 30-35 aralığında olan numunelerin iletkenlik değerlerinin standardın üst sınırını aştığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi standart dışı olan 183°C proses sıcaklığının tercih edilmiş olmasıdır. Yapılan ölçümler sonucunda numune numarası 1-30 aralığında olan tüm numunelerin başarılı bir şekilde T73 temperine yaşlandırıldığı söylenebilmektedir.

0,8 MPa proses basıncı ve 163°C sıcaklık altında şekillendirilen numunelerin kalınlıkları sırası ile 3, 4, 5, 6 mm'dir. Çizelge 4.11 incelendiği durumda 3 mm et kalınlığına sahip numunelerde ortalama %59,06 oranında geri yaylanma ölçülmüştür. Bu değer yapılan deneyler arasında en yüksek geri yaylanma oranını göstermektedir. 0,8 MPa proses basıncı altında şekillendirilen numunelerden en az ortalama geri yaylanma oranına sahip olan numune %53,6 oranı ile 6 mm et kalınlığına sahip olan numunedir. 4 mm ve 5 mm et kalınlığına sahip numunelerde ortalama geri yaylanma oranı sırası ile %51,68 ve %51,87

olarak ölçülmüştür. 0,8 MPa gerilme altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda malzeme kalınlığının artması ile geri yaylanma oranının azaldığı gözlemlenmiştir.

163°C sıcaklık altında 5 mm et kalınlığına sahip numuneler; 0,7MPa, 0,8MPa, 0,9MPa olmak üzere farklı proses basınçlar altında şekillendirilmiş ve geri yaylanma davranışları incelenmiştir. 0,7MPa proses basıncı altında şekillendirilen numunenin ortalama geri yaylanma oranı %51,75 olarak ölçülmüştür. 0,8MPa proses basıncı altında şekillendirilen numunenin ortalama geri yaylanma oranı %51,87 olarak ölçülmüştür. 0,9MPa proses basıncı altında şekillendirilen numunenin ortalama geri yaylanma oranı %51,48 olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları karşılaştırıldığı durumda değerler neredeyse birbirleri ile aynı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, aynı kalınlıklardaki numunelerin farklı proses basınçları altında şekillendiriliyor olmasına rağmen bu proses basınçlarının malzeme kalınlığı boyunca aynı gerilmelere sebep olmasından kaynaklı olduğu söylenebilir. Farklı bir deyiş ile, tüm proses basınçları numunenin kalıp yüzeyine tam anlamı ile oturmasını sağlamıştır. Eğer numune deney daha yüksek et kalınlığına sahip numuneler ile gerçekleştiriliyor olsaydı ve proses basınçları numunenin kalıba değmesine yeterli olmasaydı, farklı basınç değerleri numune et kalınlığı boyunca farklı gerilme değerleri oluşturacak olduğundan ötürü geri yaylanma değerleri değişiyor olacaktı [4].

0,8 MPa proses basıncı altında şekillendirilen 5mm kalınlığındaki numunenin 163°C ve 183 °C sıcaklık altında geri yaylanma davranışları incelenmiştir. 163°C proses sıcaklığı altında şekillendirilen 5 mm et kalınlığındaki numunelerin ortalama geri yaylanma oranı %51,87 olarak ölçülmüştür. 183°C proses sıcaklığı altında şekillendirilen 5 mm et kalınlığındaki numunelerin ortalama geri yaylanma oranı %35,13 olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları karşılaştırıldığı durumda daha yüksek proses sıcaklığında şekillendirilen numunelerin ortalama geri yaylanma oranlarında %16,74 düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Geri yaylanma oranında sıcaklığın etkisi, sıcaklığın gerilim azalması ile olan ilişki ile açıklanabilir. Sabit gerinim altında tutulan malzeme bünyesinde gerinime bağlı gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler zamana bağlı olarak malzeme bünyesindeki taneler arasında kaymaya sebep olur. Bu olay gerilim azalması yani malzeme bünyesinde gerinime bağlı oluşan gerilmelerde düşüşe sebep olur. Sıcaklık, malzeme bünyesindeki tanelerin kayma hızını arttırdığından ötürü sıcaklık yükseldikçe geri yaylanma oranında azalma gözlemlenir. Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde üretilen havacılık parçalarının kalifiye

edilmiş yöntemler ile üretilmesi zorunludur. Bu sebep ile havacılığa uygun dokümanlarda belirtilen yaşlandırma parametreleri sadık kalınarak proses sıcaklığı belirlenmektedir.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ilk anında numune kalıp yüzeyine ittirildiği durumda iş parçası bünyesinde gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler numunenin et kalınlığı boyunca alt ve üst kısımlarında en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Numunenin orta kısmında gerilmenin sıfır veya sıfıra çok yakın olduğu bir bölge mevcuttur. Bu bölgede gerilmenin çok düşük olmasından ötürü prosesin ilerleyen safhalarında sürünme deformasyonu meydana gelmez. Bu duru numune orta ekseninde elastik bir bölgenin var olduğunu ve bu bölgeden ötürü Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde geri yaylanmanın hiçbir zaman sıfır olmayacağını gösterir. Elastik orta eksenin malzeme kalınlığına olan oranı incelendiği durumda, bu oranın sıfır olması numune kalınlığı boyunca gerilim azalması meydana gelecek ve malzeme bünyesinde oluşan tüm elastik deformasyon plastik deformasyona dönüşecektir. Bu durumda malzeme bünyesinde geri yaylanma meydana gelmeyecektir. Elastik orta eksenin malzeme kalınlığına oranının 1 olması durumunda malzeme bünyesinde plastik deformasyon meydana gelmeyeceğinden ötürü malzeme şekil almayacaktır. Teorik olarak bu iki durumun gerçekleşebilir ancak pratik uygulamada gerçekleşmesi mümkün değildir. Malzeme kalınlığının artması, malzeme orta eksenindeki elastik bölgenin malzeme kalınlığına oranını azaltacağından (sıfıra yaklaştıracağından) ötürü geri yaylanma oranını azaltmaktadır [4].

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesinde plastik deformasyonun mümkün kılan olgu gerilim azalmasıdır. Deney numunesi kalıp üzerinde yerleştirilip tek yüzeyinden kalıp formuna ittirilmesi durumunda, numune bünyesinde gerilmeler meydana gelecektir. Prosesin ilk anlarında malzeme bünyesinde oluşan gerilmeler elastik sınır altında yani plastik deformasyona sebep olamamaktadır. Proses ilerledikçe malzeme bünyesinde gerilim azalması meydana gelmekte ve malzeme bünyesinde oluşan elastik deformasyonun bir kısmı plastik deformasyona dönüşmektedir. Proses süreci ilerledikçe gerilim azalması miktarı artmakta ve malzeme bünyesinde oluşan plastik deformasyon artmaktadır. Bu durum deney numunesi bünyesinde oluşan geri yaylanma miktarını azaltmaktadır.

Yapılan çalışma neticesinde numune et kalınlığının artması ile numune kalınlığı boyunca oluşan gerilmelerin arttığı, yüksek gerilmelerin yüksek oranda gerilim azalmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum geri yaylanma oranını azaltıcı yönde etki göstermiştir.

Proses sıcaklığının artması, gerilim azalması olgusunun hızını arttırdığından ötürü geri yaylanma oranına azaltıcı yönde etki etmektedir. Proses basıncının geri yaylanma oranına etkisi, numune kalınlığı ve kalıp formu ile ilgili olarak, proses basıncının numuneyi hangi oranda kalıp yüzeyine temas ettirdiğine göre değişmektedir. Numune tüm farklı proses basıncı değerleri için kalıp yüzeyine %100 temas ettiğini varsayarsak, proses basıncının geri yaylanma oranına etkisi olmadığını söyleyebiliriz. Ancak farklı proses basınçları numuneye farklı deformasyon miktarları uyguluyor ise, yüksek basınç değerinde daha düşük geri yaylanma değerlerinin görüleceği söylenebilir. Yapılan çalışmadan elde edilen veriler ile literatürdeki veriler birbirini doğrular niteliktedir.

Deney sonucundan öğrenilen kazanımlar aşağıda verilmektedir:

Malzeme kalınlığı hariç diğer tüm proses parametrelerinin sabit tutulduğu durumda, malzeme kalınlığının artması geri yaylanma oranını azalttığı gözlemlenmiştir.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme prosesi ile iş parçası şekillendirilirken malzeme kalınlığı, proses süresi ve proses sıcaklığına bağlı geri yaylanma oranlarının önceden biliniyor veya tahmin ediliyor olması, kalıp tasarım sürecini hızlandıracaktır. Kalıp geometrisinde daha az sayıda iyileştirmeler yapılarak doğru parça üretilebilecektir. Bu durum proje maliyetine ve sürecine olumlu yönde etki sağlayacaktır.

Proses esnasında vakum torbası ile kalıp arasındaki boşluğun dış ortamdan tamamen izole edildiğine emin olabilmek için otoklav öncesi statik sızdırmazlık testi uygulanması önemlidir. Bu sayede otoklav ortamında uygulanan pozitif basıncın kalıp ile vakum torbası arasına girerek şekillendirme sürecini olumsuz yönde etkilemesinin önüne geçilmiş olur.

Sızdırmazlık macunları belirli bir sıcaklık altında belirli bir süre ile sızdırmazlık sağlayabilmektedirler. Alüminyum plakaya yapıştırılmış olan sızdırmazlık macununu dikkate alırsak, alüminyum malzemeye değen kısım sıcaklığı alüminyum malzemenin sıcaklığına eşittir. Ancak torba tarafında kalan kısım ise otoklavın ortam sıcaklığına eşittir. Sızdırmazlık macununun görevini sağlıklı bir şekilde yapabilmesi için otoklavın ortam sıcaklığının sızdırmazlık macununun çalışma sıcaklığının üzerine çıkmayacağına emin olunmalıdır.

İş parçası bünyesinde gerçekleşecek geri yaylanma oranları numuneler ile test edilmiş geri yaylanma oranlarından farklı olacaktır. Bu sebepten ötürü iş parçası şekillendirmek için kalıp tasarımının yapılırken, kalıp geometrisine verilmiş olan geri yaylanma telafi değerinin daha sonradan arttırılıp azaltılabilir olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Aksi halde kalıp talaşlı imalat ile iş parçasının şekillendirilmesine uygun hale getirilebilecek iken tamamen yeniden üretilmesi gerekebilir.

TUSAŞ bünyesinde gerçekleştirilmiş olan bu çalışma ile birlikte şirkete AA7075 malzeme için deneyim kazandırılmıştır. Elde edilen bu deneyimler sayesinde, yerli ve ticari havacılık ürünleri için çeşitli panel yapıların üretimi hedeflenmektedir. Ayrıca üretilen deney seti ile farklı malzemelerin geri yaylanma davranışlarını test etmek mümkün hale gelmiştir.

Literatür taraması esnasında kazanılan bilgiler ışığında;

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi, havacılık ve uzay sanayisinde yaygın olarak kullanılan entegre panel-kiriş yapılarının şekillendirilmesini mümkün kılar.

Proseste yüksek oranda geri yaylanma meydana geldiğinden dolayı, iş parçası şekillendirilmeden önce iş parçasına benzer numuneler ile beraber daha düşük maliyetli testler gerçekleştirilerek geri yaylanma oranının belirlenmesi gerekmektedir.

Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme yöntemi, diğer metal şekillendirme yöntemlerine nazaran şekillendirilmiş numune bünyesinde daha düşük kalıcı gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum iş parçasının yorulma ömrünü olumlu yönde etkilemektedir.

KAYNAKLAR

1. Hambrick, D.M. (1985). Age forming technology expanded in an autoclave. *Avcc Aerostructures Division*, 4(1985), 649-664.

2. 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, 596-602.

3. Li, L., Lin, Y.C., Zhou, H., and Jiang, Y. (2013). Modeling the high-temperature creep behaviors of 7075 and 2124 aluminum alloys by continuum damage mechanics model. *Computational Materials Science,* 73, 72–78.

4. Başpınar, B.B. (2022). *Alüminyum 2024 Sacların Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme Prosesindeki Geri Yaylanma Davranışının Deneysel Olarak Araştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

5. Safari, M., Hamidipour, S., Elahi, S. H., and Tahmasbi, V. (2019). Creep age forming of aluminum 7075 tailor-machined blanks: statistical modeling, sensitivity analysis and multi-objective optimization. *Transactions of the Indian Institute of Metals, 7*3, 831–841.

6. Lam, A. C. L., Shi, Z., Yang, H., Wan, L., Davies, C. M., Lin, J., and Zhou, S. (2014). 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.

7. Lyu, F., Huang, X., Zeng, Y., Shi, Z., and Wang, M. (2017). *Numerıcal Simulation For Creep Age Forming Of Alumınum Alloy 7050 Saddle-Shaped Part.* International Conference on the Technology of Plasticity, Cambridge, United Kingdom.

8. Yang, Y., Zhan, L., Ma, Q., Feng, J., and Li, X. (2015). Effect of pre-deformation on creep age forming of AA2219 plate: Springback, microstructures and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 697–702.

9. 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, 8795–8799.

10. Juniora, P. R. C., Neto, C. M., and Wade, D. A. (2014). Evaluation of a 7050-TAF aluminum alloy submitted to creep age forming. *Journal of Materials Research,* 17(3), 603-611.

11. Luo, H., Li, W., Li, C., and Wan, M. (2017). Investigation of creep-age forming of aluminum lithium alloystiffened panel with complex structures and variable curvature. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 91, 3265–3271.

12. 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, 3273-3284.

13. Adachi, T., Kimura, S., Nagayama, T., Takehisa, H., and Shimanuki, M. (2004). *Age forming technology for aircraft wing skin.* Proceedings of the 9th International Conference on Aluminium Alloys, Fuji Heavy Industries Ltd. Aerospace Company, Japan, 320-8564.

14. Ribeiro, F.C., Marinho, E.P., Inforzato, D.J., Costa, P.R., and Batalha, G.F. (2010). Creep age forming: a short reviewof fundaments and applications. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering,* 43(1), 353-361.

15. Khamneh, M. E., Shahverdi, H.R., and Hadavi, M. M. (2015). Ceep Age Forming of Al-Zn-Mg Alloys With Optimization of Mechanical Properties. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 12, 28-33.

16. Jeshvaghani, R. A., Zohdi, H., Shahverdi, H.R., Bozorg, M., and Hadavi, S.M.M. (2012). Influence of multi-step heat treatments in creep age forming of 7075 aluminum alloy: Optimization for springback, strength and exfoliation corrosion. *SciVerse ScienceDirect, Materials Characterization,* 73, 8–1 5.

17. Ribeiro, F. C., Scarpin, B. T., and Batalha, G. F. (2016). Experimental and numerical modelling and simulation of the creep age forming of aeronautic panels AA7XXX aluminium alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2(1), 1-20.

18. İnternet: Li, H., Yang, H., and Lei, C. (2017). *Chapter formability and performance of Al-Zn-Mg-Cu alloys with different ınitial tempers in creep aging process.* URL: https://library.oapen.org/viewer/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/20.500.12657/49184/57060.pdf?sequence=1&isAllowed=y, Son Erişim Tarihi: 02.05.2023.

19. Yang, H., Davies, C.M., Lin, J., and Dear, J.P. (2013). Prediction and assessment of springback in typical creep age forming tools. *Journal of Engineering Manufacture*, 227(9), 1340-1348.

20. Li, Y., Yang, Y. L., Rong, Q., Shi, Z., Lin, J., and Said, R. (2019). Effect of initial tempers on mechanical properties of creep-aged AA2050. *Manufacturing Review,* 6, 1-8.

21. Yang, Y., Zhan, L. and Li, J. (2015).Constitutive ınodeling and springback siınulation for 2524 aluininuin alloy in creep age forming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China,* 25(2015) 3048-3055

22. Bouzekova-Penkova, A., and Miteva, A. (2022). Some aerospace applications of 7075 (B95) aluminium alloy. *Bulgarian Academy of Sciences-Space Research and Technology Institute-Aerospace Research in Bulgaria*, 34, 165-179.

23. Prasad, N. E., and Wanhill, R. J. (Eds.). (2017). *Aerospace materials and material technologies* (Vol. 1, pp. 29-52). Singapore: Springer.

24. Starke, Jr, E. A., and Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3), 131-172.

25. 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.

26. Lam, A. C. (2015). *A flexible tool design and integrated modelling techniques for springback compensation in creep-age forming*. Doctoral dissertation, Imperial College London.

27. 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.

28. Yang, H. (2013). *Creep age forming investigation on aluminum alloy 2219 and related studies* (Doctoral dissertation, Department of Mechanical Engineering London).

29. 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*, 121-134.

30. Lin, Y.C., Jiang, Y., Zhou, H., and Liu, G. (2014). A new creep constitutive model for 7075 aluminum alloy under elevated temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance,* 16, 4350–4357.

31. Vasudevan, A. K., and Doherty, R. D. (Eds.). (1989). *Treatise on materials science and technology: aluminum alloys-contemporary research and applications*. London: Academic Press.

32. Li, Y., Yang, Y. L., Rong, Q., Shi, Z., Lin, J., and Said, R. (2018). Effect of initial temper on mechanical properties of creep-aged Al-Cu-Li alloy AA2050. *Manufacturing Review,* 6, 1-8.



Gazili olmak ayrıcalıktır