GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

SIVAMA PARAMETRELERİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Murat ÖZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2015

Murat ÖZCAN tarafından hazırlanan "SIVAMA PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Zafer TEKİNER

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Hüdayim Başak

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 10/02/2015

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

…….……

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü

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.

…….…….

Murat ÖZCAN

10/02/2015

SIVAMA PARAMETRELERİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Murat ÖZCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2015

ÖZET

Metal sıvama, günümüzde sıklıkla kullanılan bir yöntem olmasına rağmen sıvama işleminin tahmin modeli henüz oluşturulmamıştır. Sıvama operasyonlarının ekonomik ve verimli şekilde gerçekleştirilebilmesi için, parametrelerin önceden tayininin hazırlık zamanı, ayar zamanı ve ilk ürün elde etme maliyetinin düşürülmesi açısından önemli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, ilerleme hızı, sac malzeme et kalınlığı, malzeme türü ve devir gibi parametreler güvenilirliği ispatlanmış bir sonlu elemanlar yazılımıyla incelenmiştir. Bunun için öncelikle sıvama parçalarının modelleri bilgisayar ortamında tasarlanmıştır. SolidWorks programında tasarlanan model önceki çalışmalardan farklı olarak Simufact Forming analiz programına aktarılarak veri girişleri gerçekleştirilmiştir. Her parametre için üç farklı değer belirlenerek en az üç analiz gerçekleştirilmiştir. Bunlara göre parça üzerindeki gerilme ve gerinmeler, kalınlık dağılımı, malzeme akışı, elastik deformasyon, sıvama kuvvet diyagramları incelenmiştir. Farklı parametre durumlarına göre elde edilen sonuçlar, birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sıvama işlemlerinde işlem kalitesinin ve ölçüsel tamlığın kullanılan parametre değerlerine bağlı olarak değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Çalışmanın başlangıç parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir rehber olması beklenmektedir.

Bilim Kodu	:	708.3.028
Anahtar Kelimeler	:	Metal sıvama, sıvama parametreleri, sonlu elemanlar analizi
Sayfa Adedi	:	77
Danışman	:	Prof. Dr. Zafer TEKİNER

FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE SPINNING PARAMETERS

(M. Sc. Thesis)

Murat ÖZCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

Although metal spinning, which is often used today, is a method of forming processes, the prediction model has not yet been established. Predetermination of parameters in an economic and efficient way to perform the spinning process, the preparation time, setting time and cost of first product is known to be important in terms of lowering. Parameters such as, the feedrate, the thickness of metal, material type and revolutions per minutes were investigated in this work. The reliability of a proven finite element software was examined. To do this, model of the spinning parts in a computer environment is used first. In contrast to previous studies, the model was desgined in SolidWorks software and it was transferred to the Simufact-Forming analysis program to implement the data inputs. For each parameter, three different values were determined and at least three analysis were performed. On the component were values such as stress, strain, the thickness distribution of the flow of materials, elastic deformation region, the forming force diagrams, investigated. Different parameters according to the obtained results were compared to each other. In the spinning process, the process quality and dimensional completeness, it is understood that changed depending on the value of the parameter that is used. In the determination of the initial parameters of the study is expected to be an important guide.

Science Code	:	708.3.028
Key Words	:	Metal spinning, spinning parameters, finite element analysis
Page Number	:	77
Supervisor	:	Prof. Dr. Zafer TEKİNER

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin oluşturulmasına görüş ve düşünceleriyle yön veren değerli Danışmanım Sn. Prof. Dr. Zafer TEKİNER'e; tez çalışmalarımda bana yardımcı olan değerli arkadaşım Yusuf SİYAMBAŞ'a; ayrıca, her zaman anlayışları ve destekleri ile bana güç veren sevgili eşim Hülya ÖZCAN'a burada teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. SIVAMA İŞLEMİ 11

3.1. Sıvamanın Tanımı ve Tarihsel Gelişimi 11

3.1.1. Sıvamanın tanımı 11

3.1.2. Sıvamanın tarihsel gelişimi 11

3.2. Sıvama Yöntemleri 16

3.2.1. Standart sıvama 16

3.2.2. Yatırmalı sıvama (Bağımlı-Et kalınlığı değişimli sıvama) 20

3.2.3. Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvama 26

3.2.4. Boğaz sıvama 29

3.2.5. Profil sıvama 30

3.3. Sıvama İşleminde Etkin Olan Parametreler 34

4. MALZEME VE METOD 37

4.1. Elemanların Modellenmesi 37

4.2. Sac Malzeme Modellerinin Oluşturulması 39

Sayfa

4.3. Örgü Modelinin Oluşturulması 42

4.4. Sınır Şartları Ve Temas Yüzeyleri 44

5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA 49

5.1. İlerleme Hızının Etkilerinin Değerlendirilmesi 50

5.2. Devir Sayısının Etkilerinin Değerlendirilmesi 58

5.3. Kullanılan Malzemenin Etkilerinin Değerlendirilmesi 63

5.4. Sac Malzeme Et Kalınlığının Etkilerinin Değerlendirilmesi 67

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 73

KAYNAKLAR 75

ÖZGEÇMİŞ 77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Standart sıvama ile yatırmalı sıvama arasındaki farklar 24

Çizelge 3.2. Yatırmalı sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen parçalar için ulaşılabilir bitmiş parça toleransları 26

Çizelge 3.3. Sıvama işlemlerinde etkin olan parametre grupları 35

Çizelge 4.1. SUS304 malzemesine ait mekanik ve kimyasal özellikler 40

Çizelge 5.1. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu. 50

Çizelge 5.2. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu. 51

Çizelge 5.3. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu. 58

Çizelge 5.4. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu. 63

Çizelge 5.5. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu. 68

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. El ile yapılan sıvama işlemini gösteren bir illüstrasyon 12

Şekil 3.2. Sıvama tezgahlarında takım destek düzenekleri 13

Şekil 3.3. Elektrik tahrikli sıvama makinesi ve ekillendirici takım için el çarkı düzeneği 14

Şekil 3.4. Şekillendirici makarası hidrolik sistem ile tahrik edilen sıvama tezgahı 14

Şekil 3.5. Şekillendirici makara grubunun kontrolü için şablon kopya sistemi kullanılan bir tezgahın şematik gösterimi 15

Şekil 3.6. Standart sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen çeşitli parça formları 17

Şekil 3.7. DIN 8582 ve DIN 8584'e göre standart sıvama 18

Şekil 3.8. Standart sıvama tezgahının şematik gösterimi 18

Şekil 3.9. Şekillendirici makara ilerlemesinin farklı yönleri için iş bölgesinde oluşan gerilme dağılımları 19

Şekil 3.10. Sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen çeşitli parçalar 20

Şekil 3.11. Tek makaralı yatırmalı sıvama prosesinin ana prensibi 21

Şekil 3.12. DIN 8582 ve DIN 8584'e göre yatırmalı sıvama 22

Şekil 3.13. Yatırmalı sıvama 22

Şekil 3.14. Yatırmalı sıvama operasyonu için paralelogram uygulaması 23

Şekil 3.15. Yatırmalı sıvamada imal edilen parça formları 25

Şekil 3.16. Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvama yönteminin şematik gösterimi 27

Şekil 3.17. Boğaz Sıvama işlemleri. 1- Kısmen kapatma, 2- Tamamen kapatma..... 30

Şekil 3.18. Yarma işleminin şematik gösterimi 31

Şekil 3.19. Yığma işleminin şematik gösterimi 32

Şekil 3.20. Bükme işleminin şematik gösterimi 32

Şekil 3.21. Düzleştirme işleminin şematik gösterimi 33

Şekil 3.22. Ön-katlama ve katlama işlemlerinin şematik gösterimi. 33

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.23. Ön-Profil oluşturma ve fonksiyonel profil oluşturma işlemlerinin şematik gösterimi 34

Şekil 4.1. Elemanların CAD (SolidWorks) ortamında modellemesi. 38

Şekil 4.2. Elemanların teknik resim görünüşleri. A-Mandrel, B-Baskı plakası, C- Sıvama diski 38

Şekil 4.3. Elemanların simufact ortamına aktarılmış hali. 39

Şekil 4.4. Sac malzemenin işlenmeden önceki yüzey modellemesi. 39

Şekil 4.5. Sac malzemenin şekillendirmeden sonraki yüzey modellemesi. 39

Şekil 4.6. SUS304 malzemesi için sıcaklığa bağlı gerilme değişim grafiği. 41

Şekil 4.7. SUS304 malzemesinin farklı sıcaklıklarda deneysel olarak elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri. 41

Şekil 4.8. Sac malzemenin örgü modeli. 42

Şekil 4.9. Sac malzeme örgü modeline ait genel özellikler. 43

Şekil 4.10. Hexahedral örgü modeli. 44

Şekil 4.11. Sıvama diski (Roller) başlangıç pozisyonu 46

Şekil 4.12. En sık kullanılan sıvama diski tipi 46

Şekil 5.1. İlerleme hızının sıvama kuvvetine etkisi 51

Şekil 5.2. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızındaki gerilmeler. 52

Şekil 5.3. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızındaki gerinmeler. 53

Şekil 5.4. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızlarındaki deformasyon sertleşmesi katsayısı. 54

Şekil 5.5. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızlarındaki kalınlık değişimleri... 55

Şekil 5.6. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızlarındaki sıcaklık değişimleri... 56

Şekil 5.7. SUS304 malzemesi için değişik devir sayılarındaki gerilmeler. 58

Şekil 5.8. SUS304 malzemesi için değişik devir sayılarındaki gerinimler. 59

Şekil 5.10. SUS304 Malzemesi için değişik devir sayılarındaki kalınlık değişimleri.... 61

Şekil 5.11. SUS304 malzemesi için değişik devir sayılarındaki sıcaklık değişimleri 62

Şekil 5.12. Farklı malzeme türleri için aynı ilerme hızındaki yüzey gerilmeleri. 64

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.13. Farklı malzeme türleri için aynı devir sayısındaki yüzey gerinimleri. 64

Şekil 5.14. Farklı malzeme türleri için yüzey deformasyon oranı. 65

Şekil 5.15. Farklı malzeme türleri için et kalınlığı değişimleri. 66

Şekil 5.16. Farklı malzeme türleri için yüzey sıcaklık dağılımları. 67

Şekil 5.17. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki yüzey gerilmeleri. 68

Şekil 5.18. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki yüzey gerinmeleri. 69

Şekil 5.19. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki deformasyon oranı. 70

Şekil 5.20. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki incelemeler. 70

Şekil 5.21. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki sıcaklık dağılımları. ... 71

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. CNC kontrollü deney düzeneği 8

Resim 3.1. Taklit sistemli sıvama tezgahında operatörün prototip bir parça işlemesi ... 16

Resim 3.2. Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvamada işlem öncesi ön formlu ve bitmiş parçalar 27

Resim 3.3. Boğaz sıvama ile imal edilmiş örnek Parçalar..... 30

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simge	**Açıklama**
S_0	Sıvanmamış düz malzeme kesiti kalınlığı, mm
S_0`	Sıvanmamış konik malzeme kesiti kalınlığı, mm
S_1	Düz malzemeden sıvanmış iş parçası kesit kalınlığı, mm
S_1`	Konik malzemeden sıvanmış iş parçası kesit kalınlığı, mm
D_0	Sıvama öncesinde iş parçası dış, mm
D_1	Sıvama sonrasında iş parçası dış çapı, mm
D_S	Hidrolik silindirlerde silindir iç çapı, mm
d_i	Boru biçimli iş parçası iç çapı, mm
L_0	İş parçasının sıvama öncesi uzunluğu, mm
L_0`	İş parçasının sıvanmayan kısmının uzunluğu, mm
L_1	Takım hareket yönüne dik kuvvet, N
r	Röle burun yarıçapı, mm
h	Röle adımı, mm
b	Röle izi derinliği, °
α	Sıvanmış iş parçası koniklik açısı, °
β	Sıvanmamış iş parçası koniklik açısı, °
θ	Çok röleli sistemlerde rölelerin eşdeğer açısı, °
γ	Sıvama rölesi etkin açısı, °
δ	Sıvama rölesi süpürme açısı, °
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, µm
F_R	Radyal kuvvet, N
F_A	Eksenel kuvvet, N
F_T	Teğetsel kuvvet, N
V	Rölenin eksenel yönde ilerleme hızı, mm/sn.
V`	Rölenin eksenel yönde, iş parçası devrine bağlı ilerleme hızı, mm/sn
n	İş parçası dönüş devri, dev/dk.
p	Basınç, Mpa

Simge	Açıklama
σak `	Akma Mukavemeti
S_{em}	Emniyet Katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
CAE	Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
CAD	Computer Aided Designed (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
DIN	Deutsche Industrie Norm (Alman Standartları)
FE	Finite Element (Sonlu Elemanlar)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
EKDS	Et Kalınlığı Değişimli Sıvama
HLA	Hydraulic Linear Axis (Hidrolik Lineer Eksen)

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel parça üretiminde en çok dikkat edilen hususlardan biri ekonomikliktir. Ürün maliyetinin düşürülmesi ve kullanılan ham malzeme miktarının azaltılması ekonomik bir üretim yönteminin belirlenmesi ile mümkündür. Metal Şekillendirme endüstrisinde sıvama yöntemi, yüksek üretim esnekliği, düşük maliyeti, işlem verimliliği ve yüksek parça hassasiyeti ile ön plana çıkarak dikkatleri üzerine çeken bir yöntem olmuştur. İnce cidarlı, eksenel simetrili parçaların üretiminde özellikle de uzay, havacılık ve silah sanayisinde vazgeçilmez bir imalat yöntemidir [1, 2].

Son yıllarda teknolojik imkânların gelişmesiyle önemi daha da anlaşılan sıvama yöntemi, araştırmacıların, deneysel ve teorik çalışmalarla, sıvama işleminde karşılaşılan problemlerin belirlenmesine yönelik çalışmalara odaklanmasına sebep olmuştur.

Sıvama işlemlerinde işlem verimliliğine ve parça kalitesine etki eden birçok farklı parametre vardır. Sıvama işleminin düzenli olarak yapılabilmesi, sıvama işlemini etkileyen bu parametrelerin doğru ve uygun seçilmesine bağlıdır. Yapılan bu çalışma kapsamında, sac kalınlığı, ilerleme hızı, sac malzeme cinsi ve devir sayısı olmak üzere sıvama işlemini etkileyen 4 farklı parametre değeri incelenmiştir. Literatürde bu parametreler hakkında her birinin aynı anda değerlendirildiği çok fazla araştırma yapılmamış olup bu değerlerin belirlenmesi, deneme yanılma yoluyla elde edilen nitel gözlemlere dayanmaktadır. Konu hakkında yazılı kaynak olmayışı ve bilimsel çalışma eksikliği buna en büyük etkendir [3].

Üretilecek herhangi bir unsurun, sistemin yahut mekanizmanın üretimine geçmeden karşılaşılabilecek bütün problemleri en düşük seviyede tutabilmek için teknolojinin mühendisliğe en önemli hizmetleri, kuşkusuz ki Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) yazılımlarıdır. Bu yazılımlar sayesinde, bilgisayar ortamında tasarlanan herhangi bir şeyin, gerçekçi ortam koşullarıyla teste tâbi tutulabilmesi mümkün kılınabilmektedir. Elle hesaplama yöntemiyle yapılamayacak analizlerin olanaklı hale gelmesi “bilgisayar destekli” analizlerin önemini arttırmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu (FEM), karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metottur. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi ve çözüm teknikleri hızlı gelişmeler kaydetmiş ve birçok pratik problemin çözümü için kullanılan en iyi metotlardan biri olmuştur [4].

Literatür incelendiğinde deneysel çalışmaların sonuçlarıyla sonlu elamanlar yöntemiyle yapılan çalışmaların sonuçları birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Analiz yönteminin pratikliği, ekonomikliği ve sonuçlarının güvenilir olması bu çalışmada tercih edilmesine yol açmıştır.

Simülasyon, karmaşık sistemlerin tasarımı ve analizinde kullanılan en güçlü analiz araçlarından birisidir. Genel anlamda simülasyon, zaman içinde sistemin işleyişinin taklididir. Sistemin zaman boyutundaki gelişmesini gösteren simülasyon modeline dinamik simülasyon modeli, bu modelle yapılan simülasyona da dinamik simülasyon denir. Bu modellerdeki değişkenler veya varlıklar zaman içerisinde değişim ve etkileşimler gösterirler. Bu açıdan sıvama işlemlerinde zaman içerisinde meydana gelen birçok değişim ve etkileşim, daha güvenilir sonuçlar alınması bakımından analiz sürecini dinamik simülasyon modelleriyle birleştirmeyi gerektirmektedir.

Farklı parametre değerlerinin uygulandığı bu çalışmanın temel amacı, sıvama parametrelerinin sıvama işlemi üzerindeki etkilerinin sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi olarak kısaca özetlenebilir.

Bu kapsamda öncelikle sıvama yönteminin anlaşılması için yıllar içerisindeki tarihi gelişimi ve bu yöntemlere ilişkin temel tanımlamalar 3. bölümde anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde farklı sıvama yöntemlerinin detayları ve birbirinden ayırt edici özellikleri de anlatılarak konuya açıklık getirilmiştir.

Çalışmanın analiz aşamasında öncelikle kullanılacak parametre değerleri belirlenmiştir. Bu kapsamda ürün imalatında çok tüketilen malzemelerden SUS304 paslanmaz çelik, AL6061 alüminyum ve AA1100 alüminyum malzeme tipleri tercih edilmiştir. Et kalınlığı olarak 0,8 mm, 1,0 mm ve 1,5 mm olmak üzere üç farklı değer belirlenmiştir. Sıvama hızının Şekillendirme işlemindeki etkilerinin tespit edilmesi amacıyla 0,8 mm/sn, 1,6 mm/sn ve 3,2 mm/sn olmak üzere üç farklı ilerleme hızında şekillendirme şartları incelenmiştir. Mandrel devir sayısının etkisini belirlemek amacıyla da 100 dev/dk, 300 dev/dk ve 600 dev/dk olmak üzere üç farklı değer kullanılmıştır. Belirlenen tüm parametre değerleri, ayrı ayrı tüm sıvama işlemleri için tekrarlanarak malzeme üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Sonlu elemanlar metodunda sonuca etki eden en önemli etmen muhakkak ki veri girişleridir. Yapılan işlem için kullanılan eleman tipleri, eleman tipinin boyutları, eleman sayısı, nodların yerleştirilmesi, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve simülasyon programına aktarılarak veri girişlerinin sağlanması 4. bölümünde anlatılmıştır. Analiz süreci oluşturulurken daha önceki araştırmacıların modelleri temel olarak ele alınmıştır. Çalışma sonuçlarının, ele alınan parametreler ölçüsünde önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyum gösterdiği görülmüştür.

Elde edilen çok sayıdaki analiz sonuçlarının incelenmesi, sıvama işleminin gerçek doğasının anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İmalat sektöründe sıvama işlemlerinde iş parçası üzerde yırtılma, kırışıklık, eksenel kaçıklık, sıcaklık değişimi ve yüzey kalitesinin bozulması gibi bir takım olumsuz durumlarla karşılaşılmaktadır. Yüksek kaliteli iş parçaları elde etmek ve bu gibi sorunların ortaya çıkmasını engellemek için işleme etki eden parametrelerin iyi ayarlanması gerekmektedir. Sıvama işlemlerinde yüzey kalitesinin ve ölçü tamlığının istenilen tolerans sınırları içerisinde kalmasını sağlamak, zaman ve üretim kaybını önleyerek işleme maliyetini düşürmeye yardımcı olmaktadır. Bu amaçla çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalardan bazıları aşağıda özetlenerek sunulmuştur.

Gün, yapmış olduğu çalışmada belirli kriterlere uygun olarak bir disk sıvama makinesi tasarlamış ve üretimini gerçekleştirmiştir. Bu model Türkiye'de tasarlanmış ve üretilmiş ilk CNC sıvama makinesi olma özelliğini taşımaktadır. Kompleks bir makine tasarımı gerçekleştirildiği için iş parçasının sıvama işlemi sonrasındaki ölçü tamlığı ve şekil hassasiyetini etkiyen parametreler incelenmemiştir. Yapılan çalışmada sıvama diski tasarlanırken yüzey kalitesine etkisi araştırılmış ve iş parçasının sıvama işlemi sonrasında hangi yüzey kalitesine olacağı hesaplanmıştır [2].

Biro, yapmış olduğu çalışmasında cidar ezmeli sıvama yönteminde şekillendirici makara sayısının altı adede çıkarılmasının işlem karakteristikleri ile parça kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Buradaki asıl amacı cidar ezmeli sıvama yönteminde parça şekillendirme hızının yavaş olmasına bir çözüm bulabilmektir. Bunun için standart olarak kullanılan 2 röle yerine 6 röleli bir tasarım geliştirerek deneyler yapılmıştır. İşlemin sonucunda cidar ezmeli sıvama yönteminde şekillendirici makara sayısının arttırılması, poligonal etkiyi minimize ederek, ilerleme hızının daha yüksek değerlere arttırılmasına imkân vermiştir. Çalışmada sadece röle sayısı araştırılmış olup diğer parametreler incelenmemiştir [5].

Zhan ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada sıvama diski ilerleme hızının sıvama işlemine etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Bunun için sıvama işlemi süreci Abaqus/standart paket programıyla modellenmiştir. Modelleme esnasında sıvama diskinin iş parçası üzerindeki en uygun konumunun belirlenmesi amacıyla ayrıntılı teorik hesaplamalar yapılmıştır. Çalışma sonucunda ilerleme hızının sıvama kuvveti ve yüzey

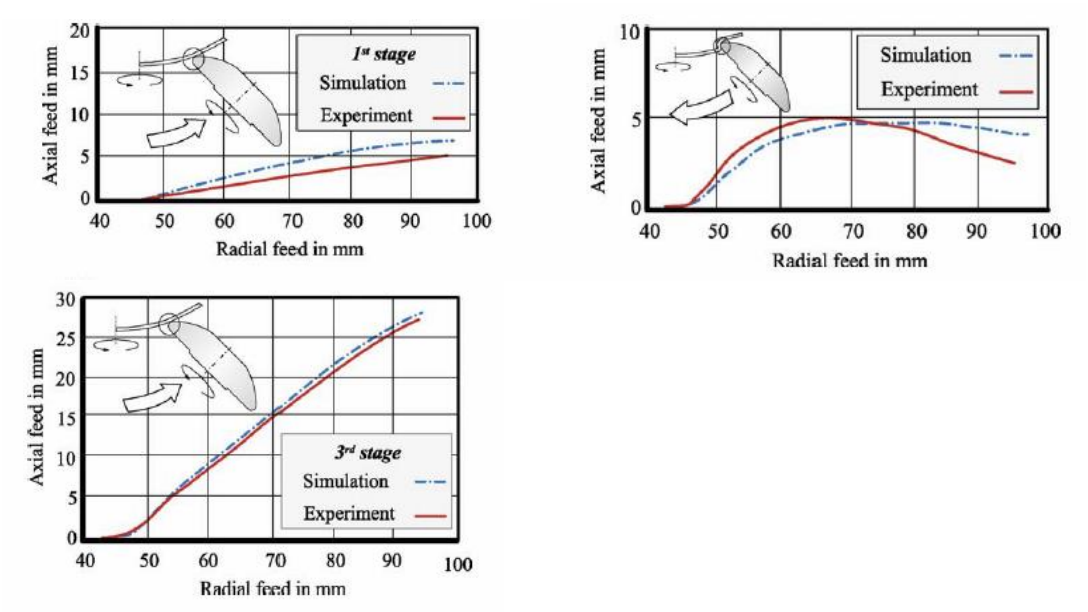
kalitesinde önemli etkilerinin olduğu belirlenmiştir. İlerleme hızının artması durumunda iş parçasının şekil ve boyut hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca ilerleme hızının artırılması durumunda parça üzerindeki karmaşık kuvvet değişiklikleri nedeniyle iş parçasında dönme esnasında yalpalanmalarda ve yüzey kırışıklıklarında artış olduğu gözlemlenmiştir [7].

Quigley ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada konvansiyonel sıvama işlemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesini geliştirme için araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada sıvama işleminde analiz sırasında karşılaşılan olumsuzlukların ortadan kaldırılmasını hedeflemişlerdir. Sonlu elemanlar yönteminde en sık karşılaşılan olumsuzluklardan bir tanesi de analiz süresinin çok uzun olmasıdır. En basit bir sıvama işleminin bile analiz süresi en uygun parametreler belirlendiğinde bir ayı geçmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak için çalışmada o zamanın şartlarında göre en üst düzeyde bir bilgisayar sistemi kullanılmıştır. Öncelikle ilk olarak analiz yönteminde bölge (domain) ayrıştırma yöntemi ve paralel işleme teknikleri kullanılmıştır. Donanım platformu olarak Dell/intel destekli çift çekirdekli bir sistem kullanılmıştır. Paralel işleme tekniği tek çekirdekli işlemcilere nazaran oldukça önemli bir parametre olan zamanı oldukça verimli bir hale getirdiği çalışma sonucunda gözlemlenmiştir. İşlem zamanının yanı sıra örgü modeli ve sınır şartları gibi parametreler de incelenerek daha önce karşılaşılan olumsuz durumların çözümü adına öneriler de yapılmıştır. Çalışma sonucunda bu yöntemle elde edilen analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve yöntemin güvenilirliği ispatlanmıştır [8, 9].

Hua ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada tüp sıvama işleminde 3 adet sıvama diski kullanmanın etkilerini sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışmada alüminyum alaşımlı boru şekilli bir tüp tercih edilmiştir. İşlem Ansys paket programı ile simüle edilmiştir. Düzenek modellenirken teorik hesaplamalar ayrıntılarıyla açıklanıp tüm şartlar gerçeğe uygun olarak belirlenmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak iş parçası ve sıvama diski arasındaki ilişkinin yanı sıra iş parçası ve mandrel arasındaki ilişki de incelenmiştir. Ayrıca iş parçası-mandrel ve iş parçası-sıvama diski arasındaki sürtünme nedeniyle sıvama diski rotasyonu pasif olarak kabul edilmiştir. Ayrıca çalışmada sıvama diskinin uç yarıçapının etkisi de araştırılmıştır. Çalışma sonucunda tüp sıvama işleminde iş parçası üzerindeki gerginlik dağılımlarının çok karmaşık olduğu belirlenmiştir. Tüpün iç ve dış temas yüzeylerinde yerel gerinmeler ortaya çıkmıştır. Bu temas yüzeylerinde eksenel sıvama işlemi sırasında gerilmelerden dolayı bazı çatlakların oluşması muhtemeldir. Ayrıca çapta

farklılıklar olması da söz konusudur. Çalışma sadece sıvama sırasında oluşan deformasyonun davranışlarını yansıtmaktadır. Bu çalışma göz önüne alınarak sıvama işlemindeki parametrelerin optimizasyonu sağlanabilir [10].

Sebastiani ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada bir sıvama işlemi sürecinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi durumunda karşılaşılan önemli sorunları incelemişlerdir. Çalışmayı üç ana bölüme ayırmışlardır. İlk olarak geleneksel sıvama yöntemine uygun bir model tasarlanmıştır. Uygulama esnasında geleneksel standart bir sıvama işlemi düzeneği kullanılmıştır. İkinci aşamada sıvama işlemi için sonlu elemanlar yönteminde giriş parametreleri belirlenmiştir. Sınır şartları, mesh hassasiyeti gibi sonlu elemanlar analizini etkileyen parametreler farklı değerlerde incelenmiştir. Uygulama için LS-Dyna paket programı tercih edilmiştir. Üçüncü aşamada ise programa girilen değerler ve deneysel araştırma sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak Şekil 2.1.'deki değerler elde edilmiştir [11].

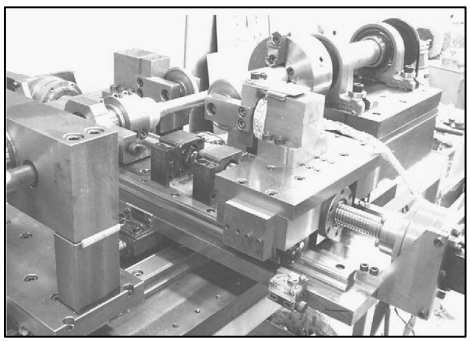


Şekil 2.1. Deney ve Analiz Sonuçlarının karşılaştırması [11]

Araştırma sonuçlarına göre sıvama işlemi araştırmalarında sonlu elemanlar yöntemi tercih edildiğinde sınır şartları ve mesh özellikleri gibi parametreler belirlenirken uygun değerlerin kullanılması analiz sonuçlarını deneysel sonuçlara oldukça yaklaştırmaktadır. Bu da demek oluyor ki uygun parametreler belirlendiğinde sonlu elemanlar yöntemi çalışmalarda oldukça güvenilir sonuçlar ortaya koymaktadır.

Qian ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada ince cidarlı alüminyum alaşımlı sac malzemenin mandrel üzerindeki geri esneme oranını sonlu elemanlar metoduyla incelemişlerdir. Bunun için Abaqus/standart sonlu elemanlar paket programını kullanmışlardır. FE modelini oluştururken teorik ve deneysel güvenilirliği çalışma sırasında doğrulamışlardır. İşlem basamakları ele alındığında farklı değerlerde kalınlık ve sıvama kuvveti uygulanması sonucu oluşan gerilmeler karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar kompleks bir sıvama işleminde iş parçası geri esneme oranını araştırmak için sonlu elemanlar yönteminin tercih edilebilir bir yöntem olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda lokal deformasyonu en küçük değere indirmek için uygun parametrelerin seçimi oldukça önem arz etmektedir. Yapmış oldukları çalışma geri esneme miktarını en aza indirmek için sıvama kuvveti ve kalınlık arasındaki bağıntıya göre uygun değerlerin belirlenmesinde önemli bir kılavuz olarak literatürdeki yerini almıştır [12].

Jianguo ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada dairesel alüminyum tüp sıvama işleminde birbirine paralel iki sıvama diski kullanıldığındaki girintileme hızının etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun için Resim 2.1'deki gibi CNC kontrollü prototip bir deney düzeneği kurulmuştur. Boru şekilli bir alüminyum parça üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sıvama diskinin girintilenme hızı arttırıldığında eksenel gerilmeler sabit hale geldiği ve iş parçasının çap doğruluğu olumsuz etkilendiği ve yüzey sertliğinin yanı sıra yüzey pürüzlüğünün kötülenmesinde de bir artış gözlendiği tespit edilmiştir [13].



Resim 2.1. CNC kontrollü deney düzeneği [13]

Music ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada metal sıvama işlemlerinin genel mekaniğini teorik olarak incelemişlerdir. Bunun için özellikle İngiltere, Almanya ve Japonya'da yapılan bilimsel çalışmaların sonuçlarını karşılaştırma yoluna gitmişlerdir. Bu karşılaştırma sonucunda metal sıvama işlemleriyle alakalı yapılan araştırmalarda

değinilmeyen parametreleri ve sıvama işlemine en çok etki eden parametreleri ortaya çıkarmışlardır. Sıvama işleminin karmaşık doğası nedeniyle bu parametrelerinin tahmin modelinin oluşturulamadığını fakat özellikle sonlu elemanlar yöntemiyle parametrelerin belirlenerek analizinin yapılıp iş parçası üzerindeki gerilme ve gerinme değerlerinin incelenmesinin yüzey kalitesi ve ölçü tamlığı açısından olumlu sonuçlarının olduğunu ve tüm araştırmaların bu doğrultuda gerçekleştirildiğini tespit etmişlerdir [14].

Wang ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada sıvama operasyonlarında sürece etki eden parametrelerden sıvama diski takım yolunu araştırmışlardır. Bunun için dört farklı takım yolu tasarlayarak modeli sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir. İçbükey, doğrusal, dışbükey ve içbükey dışbükey birleştirilmiş takım yolları oluşturulmuştur. Analizlerde Abaqus/Explicit sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Buldukları sonuçlara göre içbükey oluşturulan takım yollunda en büyük sıvama kuvvetlerinin meydana geldiğini bulmuşlardır. Analiz sonuçlarına göre içbükey takım yollarında sıvanan iş parçası et kalınlığındaki azalmanın daha fazla olduğu, dışbükey takım yolunun kullanılması durumunda sıvanan iş parçası et kalınlığı değişiminin daha az olduğu tespit edilmiştir [15, 16].

Watson ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada geleneksel sıvama işlemlerinde oluşan kırışıklık sorununu incelemişlerdir. Bunun için deneysel ve sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan sonuçları karşılaştırarak işlemin güvenilirliğini kontrol etmişlerdir. Deney ve analiz çalışmalarında sac malzeme üzerindeki sıvama diskinin uyguladığı kuvvetler ölçülmüştür. Elde edilen değerlere göre yüzey gerilmeleri incelenmiştir. İşlem sonucunda iş parçasının sıvanmayan iç bölgelerinde kırışıklıklar meydana geldiği görülmüştür. Sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde bu kırışıklıkların ana sebebinin sıvama işlemi süresince parçanın uç kısımlarında yoğunlaşan elastik gerinme enerjisinin olduğu tespit edilmiştir [17].

Literatürde sıvama işleminin dışında sonlu elemanlar yönteminde kullanılan matris çözme yöntemleri, sonlu elemanlar yönteminin mühendislikte uygulamaları ve sac metal ürünlerde geri esneme miktarının tespiti ile ilgili çeşitli çalışmaların olduğu da tespit edilmiştir [18-20].

Yapılan literatür araştırması sonucunda, sıvama işlemi sürecinde işleme performansına, iş parçası kalitesine ve ölçü tamlığına etki eden faktörlerden; sıvama diski takım yolu, ilerleme

hızı, devir sayısı, malzeme türü, sıcaklık, et kalınlığı gibi parametrelerin etkileri ile ilgili çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Deneysel çalışmaların yanı sıra form verme işlemi sırasında oluşan deformasyonların, oluşan kuvvetlerin ve gerilmelerin incelendiği analiz çalışmalarının da sıklıkla kullanıldığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle farklı paket programlarla yapılan bu analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında oldukça yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Farklı sıvama parametrelerinin iş parçasının yüzey kalitesini nasıl etkilediği ve en uygun sıvama şartlarına ulaşabilmek için sıvama diski geometrisinde ne gibi değişiklikler yapılması gerektiği ve sıvama işlemlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak işlem sonucunun tahmin edilebilirliği gibi çalışmalar dikkat çekmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda özellikle sıvama diski tasarımında ve konumunun belirlenmesinde disk uç radyüsüne bağlı olarak çeşitli matematiksel modeller geliştirildiği gözlenmiştir. Yapılan bu çalışmada ise sıvama işlemlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak işlem sürecine etki eden ilerleme hızı, devir sayısı, sac malzeme et kalınlığı ve sac parça malzeme türü gibi parametreler birlikte incelenmiştir. Bunun için sıvama işlemlerine özel olarak tasarlanan bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Her bir parametre ayrı ayrı analiz edilerek iş parçası üzerindeki gerilmeler, gerinmeler, et kalınlığı değişimleri, deformasyon sertleşme oranları ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir.

3. SIVAMA İŞLEMİ

3.1. Sıvamanın Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

3.1.1. Sıvamanın tanımı

Sıvama, sac veya boru biçimli malzemelerin, kendi eksenleri etrafında döndürülürken, çeşitli takımlar ile uygulanan radyal ve/veya eksenel yönde kuvvetler neticesinde şekillendirilmesidir. Sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen parçalar, dönme eksenine göre simetriktirler; örneğin dairesel kesilmiş plakalar, borular vb. geometridedirler. Sıvama, bu tanıma uygun olan fakat birbirinden farklı birçok yöntemi kapsar. İşlem esnasında, sıvama tipine göre, malzeme belirli bir kalıbın üzerine sıvanarak şekillendirilebileceği gibi, belirli bir kalıp geometrisi olmadan, boşlukta da şekillendirilebilir. Şekillendirme, işlemin gereklerine göre soğuk veya sıcak proses şeklinde yapılır [3].

Sıvama ile imalatta, talaş kaldırılmaması ve imalat hızının yüksek olması, sıvamayı cazip kılan temel etmenlerdir [1].

3.1.2. Sıvamanın tarihsel gelişimi

Metal sıvama teknolojisinin tarihi çok eski zamanlara dayanmaktadır. Her ne kadar, metal malzemeleri şekillendirmek için bu tekniğin kullanıldığına dair ilk kanıtlar orta çağdan kalmış olsa da, büyük olasılıkla, antik Mısırlıların çömlek imalatında kullandıkları tekerlekler bu tekniğin temelini oluşturmuştur. Yapılan çeşitli kazılarda, metal kapların, sıvanmasında kullanılan çeşitli tahta parçaları bulunmuştur [3].

Sıvama yönteminin, 10 yüzyılda Çin'de kullanıldığına dair kanıtlar mevcuttur. 3.Edward döneminde (14. yy) İngiltere'ye geldiği bilinmektedir. 19. yüzyılda ise Amerika'da kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, eski zamanlarda, metal sıvama işlemi tahta bir sıvama tornası üzerinde bir aparat (çubuk) yardımıyla sağlanırdı. Malzemeyi şekillendirmek için gerekli dönme hareketi ise, genellikle ayrı bir kişi tarafından elle tahrik edilen ve göreceli olarak çok büyük ebatlarda bir çark mekanizması tarafından sağlanırdı [3].

Günümüzde kullanılan en düşük özelliklere sahip sıvama tezgâhının bile en az 1,5 kW elektrik motor gücüne sahip olduğu dikkate alınırsa, yukarıda anlatılan sistemin şekillendirme kabiliyetleri oldukça düşüktür. Bahsedilen çubuklu mekanizma ile yalnızca, çok ince ve yumuşak metal malzemeler sıvanabilirdi. Çeşitli dezavantajlarına rağmen, bu yöntem, döküm ve dövmeye nazaran önemli avantajlar getirmiştir [1].

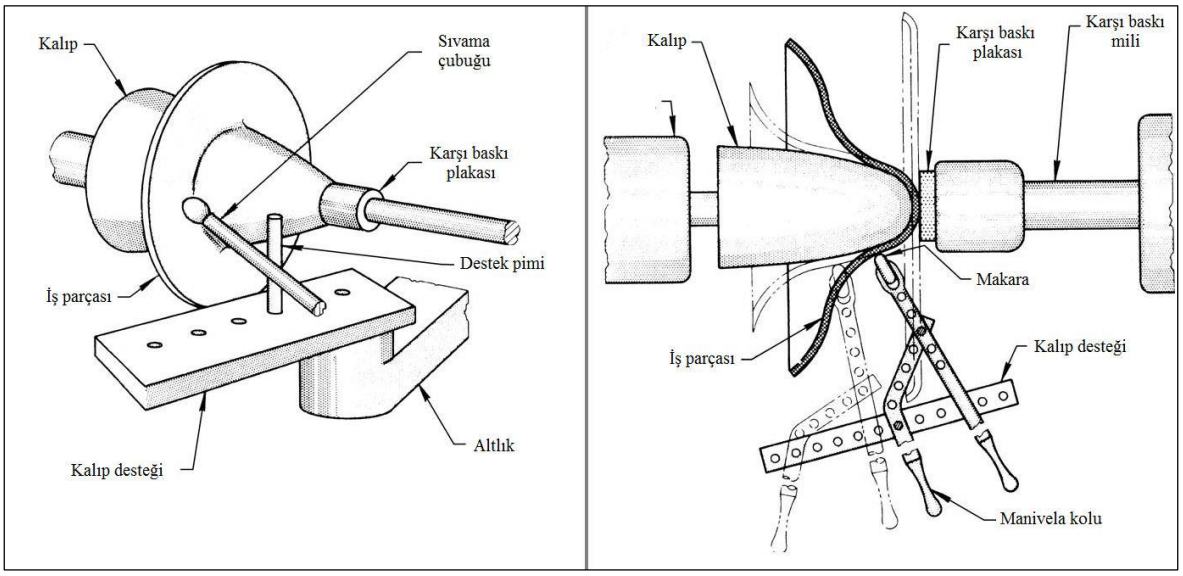
Zaman içinde, fener milini döndürmek için hem su gücünden hem de buhar gücünden yararlanılmıştır. Buna rağmen, düz plaka şeklindeki malzemeyi, yuvarlak içi boş iş parçasına dönüştürmek için gerekli şekillendirme hareketi için hala insan gücü kullanılmaktadır.

Şekil 3.1. El ile yapılan sıvama işlemini gösteren bir illüstrasyon [3]

20. yüzyıl başlarında, sıvama işlemi, bir bilimden daha çok bir sanatkâr seviyesindeydi. Sıvama işleminin başarısında, şekillendirme işlemini yapan kişinin kabiliyetinin ve yeteneklerinin çok büyük bir önemi vardı. Sonuç olarak sıvama yöntemi, bu sanatkârlar tarafından, genellikle eve ait gereçler, çorba kabı, pişirme kapları gibi tekrarlanabilirliğin ve ölçüsel toleransların çok önemli olmadığı parçaların imalatında, basit bir torna tezgâhı benzeri tezgâhlarda kullanılmaya başlandı. Yapılan operasyon her ne kadar kalifiye bir tecrübeli çalışan gerektirse de, ortaya çıkan bu maliyet artışı, düşük kalıp maliyetleri ile dengelenmiştir [3].

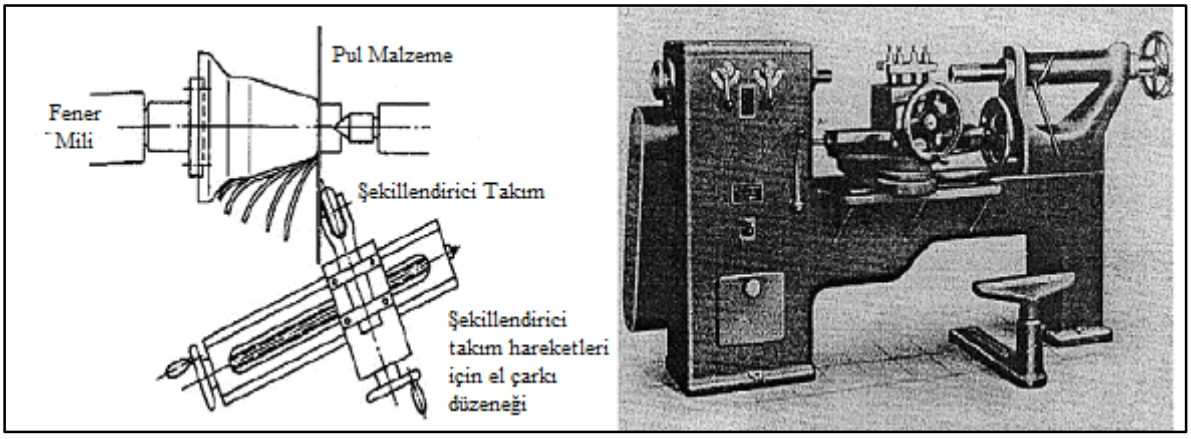
Fener milinin tahriki için, elektrik motorlarının kullanılmasıyla, el kontrollü sıvama tezgâhlarının kapasitesi, sıvama operatörünün gücüyle kısıtlanmıştır. Bir sonraki adımda sıvamacı, çeşitli yardımcı güç ekipmanları ile desteklenerek, şekillendirilebilir ürün çeşitliliği arttırılmıştır [5].

Fener mili tahriki için elektrik gücü kullanan ilk sıvama makinesi 1930'lu yıllarda imal edildi. Bu makinede, dönen iş parçası genellikle çelikten yapılan bir çubuk yardımıyla şekillendirilmekteydi. Sıvamacının hareket kabiliyetini arttırmak ve en büyük güçle çalışmasını sağlamak amacıyla şekillendirici takım, "takım desteği" (T-rest) adı verilen bir platformdan destek alınarak kullanılmaktaydı. Şekil 3.2'de gösterilen kalıp desteği üretilecek parçanın özelliklerine göre farklı bir pozisyona bağlanabilir ve yüksekliği ile açısı ayarlanabilirdi. Büyük çaplı malzemelerde eteklerde ki kırışmayı önlemek için, parçanın etek kısmını destekleyen ilave bir arka destek mekanizması da kullanılmaktadır [6].



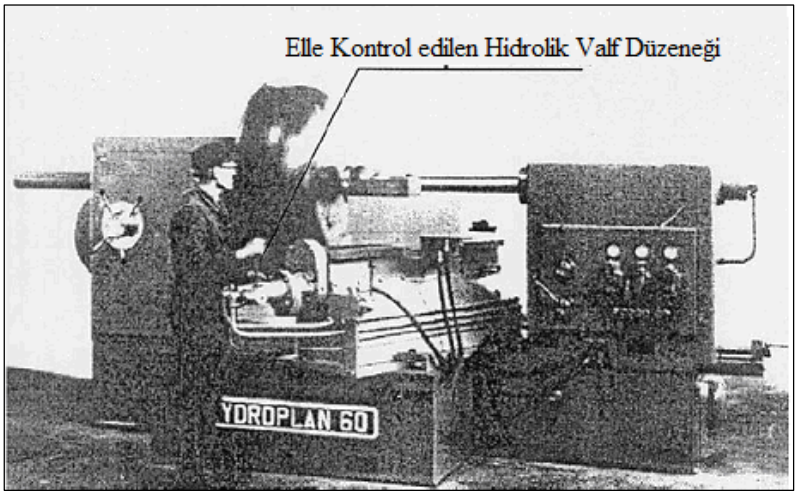
Şekil 3.2. Sıvama tezgahlarında takım destek düzenekleri [4]

Şekillendirici takımın hareketi için el çarkına bağlamış vidalı miller de kullanılmıştır. Fakat bu sistemler işlem sırasında gerekli hızları yeterince sağlayamadıkları için olumlu neticeler vermemişlerdir.



Şekil 3.3. Elektrik tahrikli sıvama makinesi ve şekillendirici takım için el çarkı düzeneği [3]

Sıvama teknolojisi alanındaki gerçek gelişme, şekillendirici takım yerine şekillendirici makaraların kullanılması ve bu makaranın hidrolik güç kullanılarak tahrik edilmesiyle ortaya çıkmıştır [1]. 1945 yılında, hidrolik güç tahrikli ilk tezgâh üretilmiştir. Bu tezgahta operatör, Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, bir el kumandalı valf yardımıyla şekillendirici makara sistemini kontrol etmekteydi [3].



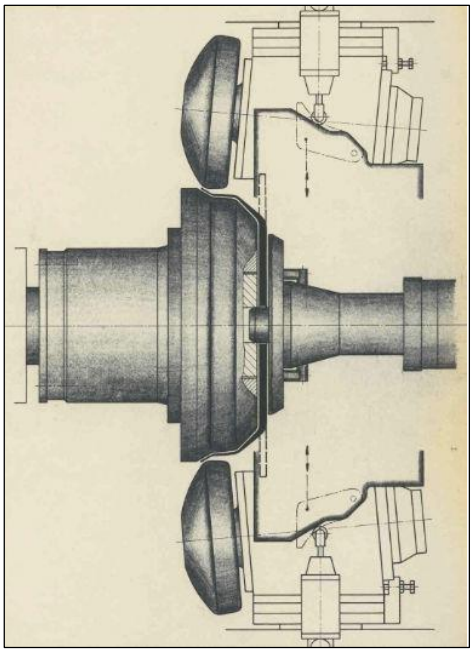
Şekil 3.4. Şekillendirici makarası hidrolik sistem ile tahrik edilen sıvama tezgahı [3]

Geliştirilen hidrolik tezgâhlar sayesinde, eski sistemlere göre daha kalın ve daha yüksek mukavemetli malzemeler şekillendirilebilmiştir. Ayrıca hidrolik tahrikli tezgâhlar, "yatırmalı sıvama" ve "cidar ezmeli sıvama" gibi daha yeni teknolojilerin geliştirilmesine imkân sağlamıştır [1].

Bütün bu geliştirmelere rağmen operatör tarafından elle kontrol edilen bu tezgâhlarda üretilen her bir parçanın başarısı, halen operatörün kabiliyetlerine ve dikkatine bağımlıdır. Diğer bir deyişle, insan faktörü halen devrededir [5].

Yüksek tekrarlanabilirlik için ihtiyaç duyulan çözüm, şablon sistemi ve hidrolik kopya sistemi ile gelmiştir. Bu sistem makinelere çok büyük bir esneklik kazandırmıştır [5].

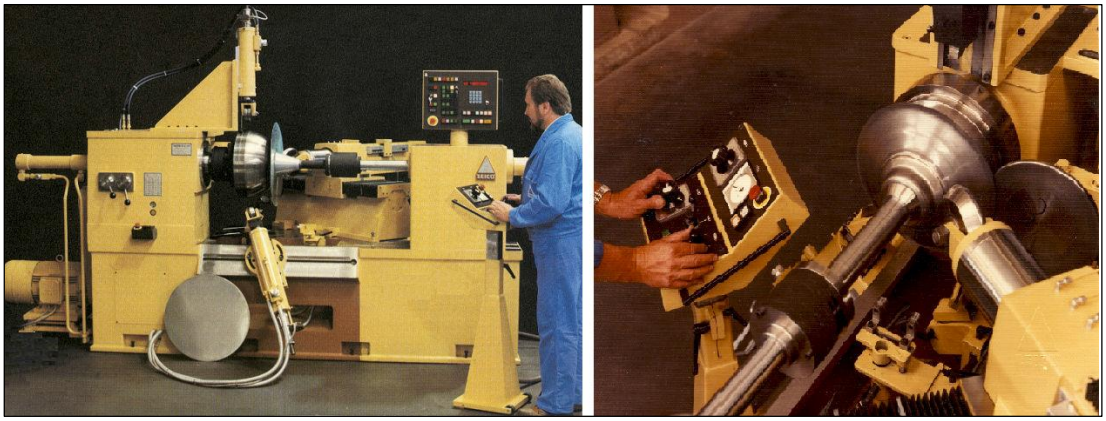
Kopya plakasının çalışma prensibi, standart ev anahtarlarının kopyalanmasına benzetilebilir. Bu işlemde hidrolik bir valf grubuna bağlı olan küçük bir kol, bir plaka üzerine işlenmiş profili takip ederken, rölelere bağlı hidrolik silindirler, bu kolun hareketlerine bağlı olarak iş parçasını şekillendirirler. Örnek bir kopya plakası ve kopya başlığı Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Bir ürünün profili için genel hatlarıyla hazırlanan kopya plakası, ürünün tam şekli hassas olarak elde edilene kadar, çeşitli denemelerle tekrar tekrar işlenerek seri üretime hazır hale getirilirdi. Bu nedenle kopya sistemli tezgâhlarda optimizasyon işlemi uzun ve zorlu bir süreçti. Ayrıca hazırlanan kopya plakası, yalnızca bir ürün tipi için kullanılabilirdi [5].



Şekil 3.5. Şekillendirici makara grubunun kontrolü için şablon kopya sistemi kullanılan bir tezgahın şematik gösterimi [5]

Kopya plakaları ile çalışan sıvama makineleri 1970'li yılların sonlarına kadar imal edilmişlerdir. Bugün halen bu makinelerden faal olanlarını görmek mümkündür. Gelişen teknoloji ile birlikte, 1970-1980'li yıllarda elektronik kontrol sistemleri ile çalışan sıvama

makineleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu ilk elektronik kontrol sistemleri daha çok taklit sistemleri olarak bilinirler [5].



Resim 3.1. Taklit sistemli sıvama tezgahında operatörün prototip bir parça işlemesi [5]

Resim 3.1'de bir örneği görülen taklit sistemli bir sıvama tezgahında, şekillendirici makara grubun hareketlerinin sisteme tanıtılması amacıyla, sıvama konusunda tecrübeli bir operatör makarayı elle kumanda ederek, prototip bir parça işler. Bu esnada elektronik kontrol sistemi, operatörün makine üzerinde yaptığı bütün hareketleri hafızasına kaydeder. Bu hareketler seri üretim esnasında da sistem tarafından aynen taklit edilerek istenen ürün imal edilirdi [5].

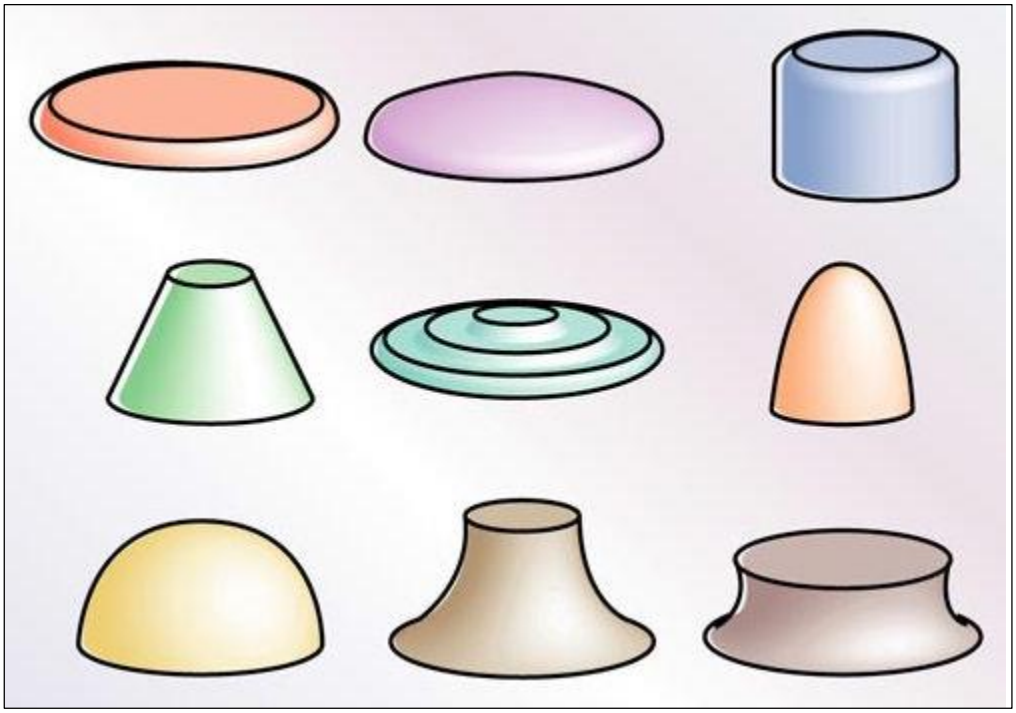
Kopya plakası ve taklit sistemleri ile çalışan sıvama makinelerinin yerini 1990'lı yıllarda ortaya çıkan NC kontrollü ve daha sonra da CNC kontrollü sıvama makineleri almıştır. Günümüzde imal edilen hemen hemen tüm endüstriyel sıvama makineleri CNC kontrollüdür. Bu sayede parça daha işlenmeden rölelerin hareketleri belirlenmekte, G-kodları kontrol sistemine tanımlanmakta ve tezgâhın hareketleri sanal olarak simüle edilebilmektedir. Eldeki veriler kolaylıkla kayıt altına alınmakta, kopyalanmakta ve hatta internet üzerinden uzaktan erişimle makinelerin ayarları ve ürün programları dünyanın herhangi bir yerinden değiştirilebilmektedir [2].

3.2. Sıvama Yöntemleri

3.2.1. Standart sıvama

Standart sıvama, düz pul (genellikle yuvarlak forma sahip) veya ön formlu (konik, konkav vb.) malzemeden, döner yönde simetrik, içi boş parçaları şekillendirmek için kullanılan bir

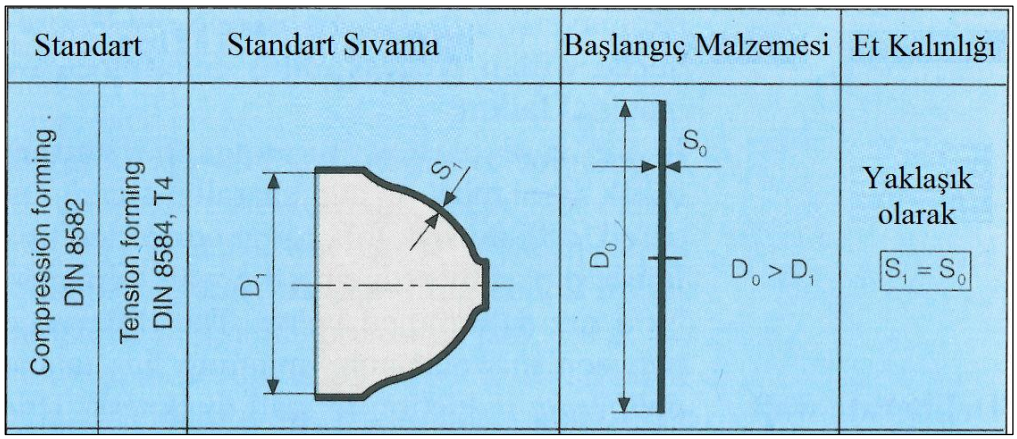
tekniktir. Şekil 3.6'da standart sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen çeşitli parça formları şematik olarak gösterilmiştir [5].



Şekil 3.6. Standart sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen çeşitli parça formları [4]

Başlangıç malzemesi, genellikle yuvarlak forma sahip plaka biçimli malzemelerdir. Düz pul, sıvama kalıbı ile karşı baskı grubuna rulmanlı bir yapı ile bağlanmış olan karşı baskı plakası arasında sıkıştırılır. Fener mili tahrik edilirken; şekillendirici makaralar, radyal veya eksenel doğrultuda hareketler yaparak parçayı şekillendirirler. Gerçekleşen bir dizi hareketten sonra iş parçası dönen sıvama kalıbının üzerine sıvanır. İşlem çok pasoda gerçekleşen bir işlemdir. Her bir pasoda malzeme, kalıba bir miktar daha yatırılmaktadır [1].

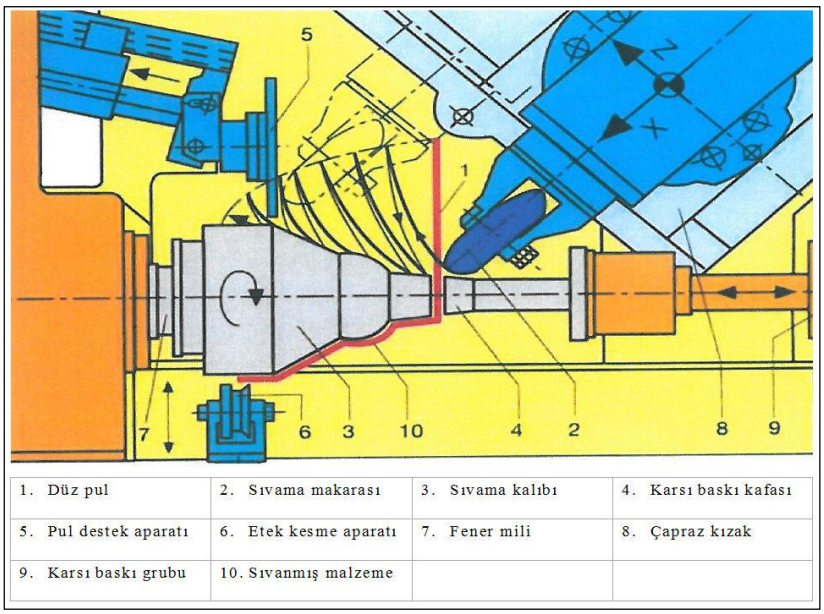
Şekil 3.7'de DIN 8582 ve DIN 8584'e göre standart sıvamada başlangıç ve bitiş malzemesinin sahip olduğu geometrik özellikler gösterilmiştir [5].



Şekil 3.7. DIN 8582 ve DIN 8584'e göre standart sıvama [6]

Teorik olarak, işlem sırasında malzeme kalınlığı korunmaktadır. Bitmiş parçanın yüzey alanı, başlangıç malzemesinin alanı ile aynıdır, cidar kalınlığı ise çok küçük değişimler göstermektedir [1].

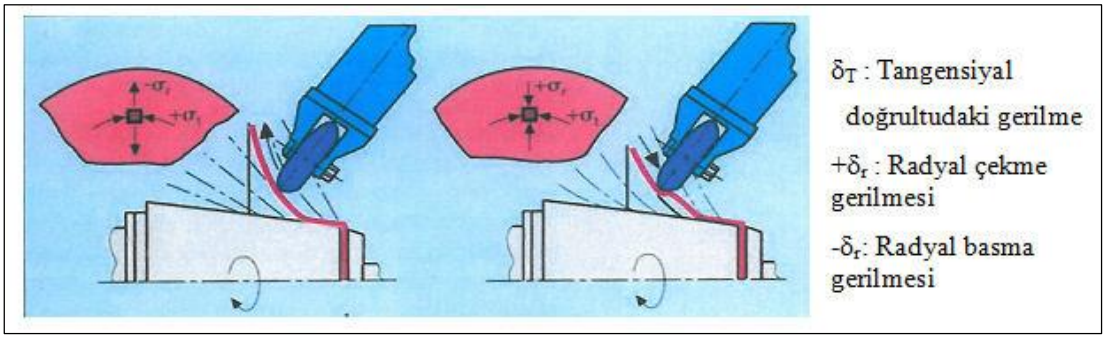
Yapılan deneysel çalışmalarda, standart sıvama işleminde rol oynayan parametrelere ve özellikle iş parçasının malzemesine bağlı olarak cidar kalınlığında küçük de olsa bir miktar azalma gözlemlenmiştir. İş parçasından istenen hassasiyete de bağlı olarak, kaba toleranslara sahip iş parçaları için en büyük %30'luk bir cidar kalınlığı azalması, standart sıvama prosesi için normal kabul edilir [5].



Şekil 3.8. Standart sıvama tezgahının şematik gösterimi [6]

Şekil 3.8'de standart sıvama tezgahının şematik gösterimi yer almaktadır. Klasik sıvama için kullanılan tezgâhlarda, torna tezgâhlarına benzer Şekilde; ana gövde (makine yatağı), ana fener mili, tahrik sistemi, karşı baskı grubu ve takım desteği yer alır. Fener milinin üzerine, normal tornalardaki sıkma çenesinin yerine, üretilecek parçanın iç konturuna sahip sıvama kalıbı bağlanmıştır [1].

Bunlara ilave olarak, şekillendirme sırasında, malzemenin kırışmaması için fener mili tarafında konumlandırılmış olan pul destek aparatı kullanılabilir. Sıvama prosesi esnasında; rölenin iş parçasına temas ettiği noktada lokal plastik deformasyon bölgesi oluşur. Bu lokal deformasyon bölgesinin avantajı sıvama esnasında ihtiyaç duyulan kuvvet ihtiyacının geleneksel presleme operasyonu ile kıyaslandığında çok daha az olmasıdır. Bu sebeple sıvamada kullanılan ekipmanlar ve kalıplar çok daha küçüktür [5].



Şekil 3.9. Şekillendirici makara ilerlemesinin farklı yönleri için iş bölgesinde oluşan gerilme dağılımları [6]

Şekil 3.9'da şekillendirici makara ilerlemesinin farklı yönleri için iş bölgesinde oluşan gerilme dağılımlarını göstermektedir. Bu bölgede basma ve çekme kuvvetleri birbirine eklenir ve böylece iş parçasının cidar kalınlığı şekillendirme esnasında sabit kalır. Makaranın ileri doğru hareketi sırasında çapsal doğrultuda gerilmeler ve teğetsel doğrultuda basma gerilmeleri oluşur. Gerilme sıvama kalıbı doğrultusunda bir akış üretmekte ve incelmeye yol açmaktadır ki, bu basma gerilmelerinin yol açtığı kalınlaşma etkisini dengeler [5].

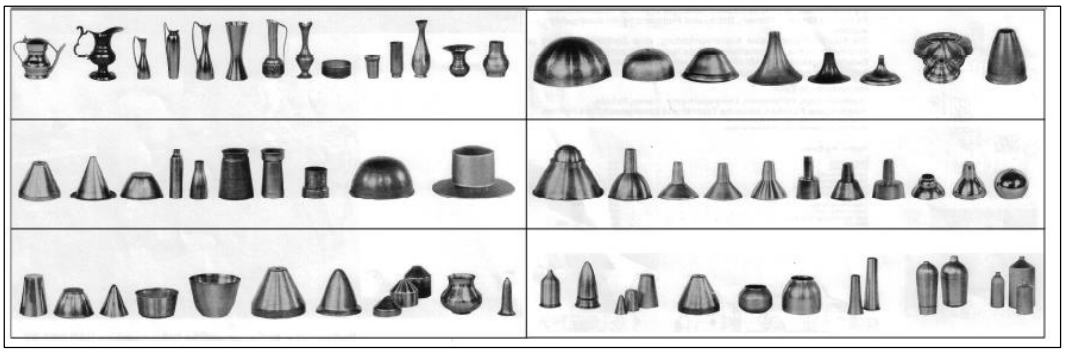
Makara, geriye giderken merkeze doğru bir hareket de yaparsa; rölenin önünde metal artışı olur. Bu da makara ve kalıp arasında; teğetsel doğrultuda ve yarıçapsal doğrultuda basma gerilimlerinin oluşmasına yol açar. Bu sıkıştırma streslerinin bir sunucu olarak malzeme

kalıp doğrultusuna yer değiştirir. Standart sıvama yöntemi kullanılarak çeşitli aydınlatma reflektörleri, gaz tüpleri, fren diskleri vb. parçalar imal edilebilir [5].

Kullanılan malzemeler, saç metal plakalar, alaşımsız veya düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, ısıya dayanıklı malzemeler, demir dışı metaller vb. oldukça çeşitlidir. Bazı malzemeleri şekillendirirken, bir ara tavlama işlemi gerekebilir. Bazı uygulamalarda ise bölgesel ısıtma işlemi ile şekillendirme gerçekleşebilir [6].

Standart sıvama ile 10 mm ile 5000mm çap aralığında ve 0,5 mm'den 30 mm'ye kadar cidar kalınlığına sahip malzemeler şekillendirilebilir [5].

Standart sıvama ile elde edilen tolerans değerleri sınırlıdır. Örneğin, yapılan çeşitli uygulamalarda, 500 mm çapa kadar olan parçaların cidar kalınlığı için ±0,1 mm tolerans değeri elde edilmiştir. Üretilen parçanın çapı ve kalınlığı arttıkça, üretilebilir tolerans aralığı artmaktadır. Gerçekleştirilen bir uygulamada, bir sıvı tankının ön ve arka kısmına kaynatılmak amacıyla üretilmiş olan, 3000 mm çapa ve 10 mm kalınlığa sahip parçada, ±0,4 mm cidar kalınlığı tolerans aralığı elde edilmiştir. Bu parçaların eş eksenliği ve doğrusallığı içinde benzer değerler gözlemlenmiştir. Genellikle standart sıvama ile imal edilen parçalar geniş tolerans aralığının kabul edildiği yerlerde, herhangi ilave bir işlem yapılmadan, nihai parça olarak kullanılırlar. Eğer hassas parça toleransları isteniyorsa, standart sıvamanın ardından çeşitli ilave şekillendirme proseslerinin yapılması gereklidir [6].



Şekil 3.10. Sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen çeşitli parçalar [5]

3.2.2. Yatırmalı sıvama (Bağımlı-Et kalınlığı değişimli sıvama)

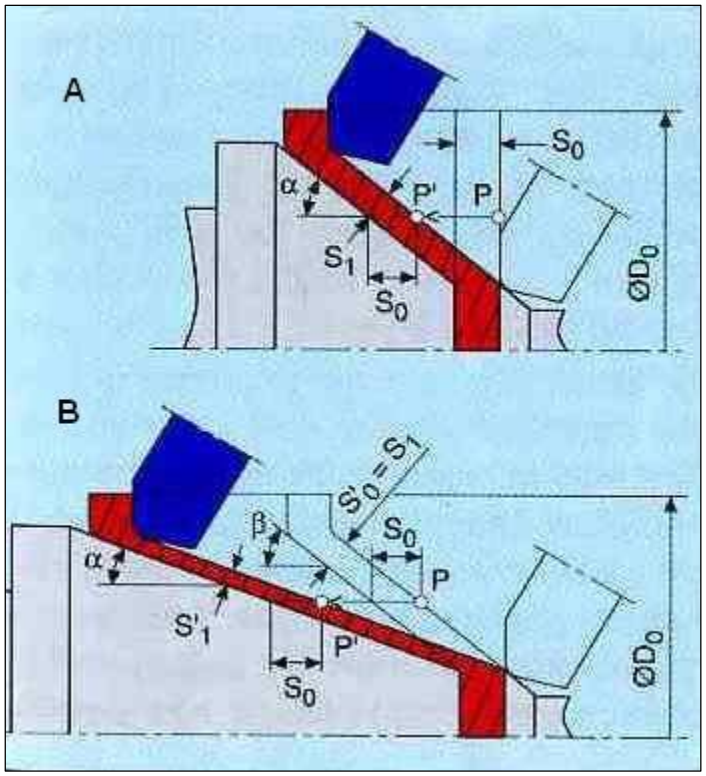
Yatırmalı sıvama, standart sıvamaya oldukça benzer bir sıvama tekniğidir. İki yöntem arasındaki ayırt edici temel özellik, bağımlı-et kalınlığı değişimli sıvamada is parçasının et

kalınlığının azaltılmasıdır. Ayrıca, standart sıvamadan farklı olarak, bağımlı et kalınlığı değişimli sıvamada işlem tek bir pasoda gerçekleştirilir ve islenen parçanın dış çapı işlem esnasında ve işlem bittikten sonra da sabit kalır. Uygun röleler kullanılarak, benzer parçalar için her iki yöntem de aynı makinede gerçekleştirilebilir. Sıvama prosesinde, hidrolik ekipmanların kullanılmasıyla beraber, ilk olarak İsviçre'de ortaya çıkmıştır [3].

Yatırmalı sıvama, içi boş, 8° ila 80° derecelik bir açıya sahip, konik veya konveks parçaların imalatı için sıvamadan türetilmiş bir yöntemdir [1].

Başlangıç malzemesi, pul ya da derin çekilmiş bir kap şeklinde ön formlu malzeme olabilir. Bu malzeme kalıp üzerine tutturulur. Şekillendirici makaralar, radyal ve eksenel doğrultuda hareket ederek kalıbın sahip olduğu formu, önceden hesaplanmış bir aralık mesafesinde takip ederler. Böylelikle iş parçası, makaraların önünde uzatılır ve ütülenir. Birçok uygulamada final şekle ulaşmak için tek bir paso yeterlidir. Birden fazla paso ihtiyacı varsa, her paso öncesinde sıvama kalıbın değiştirilmesi gereklidir [5].

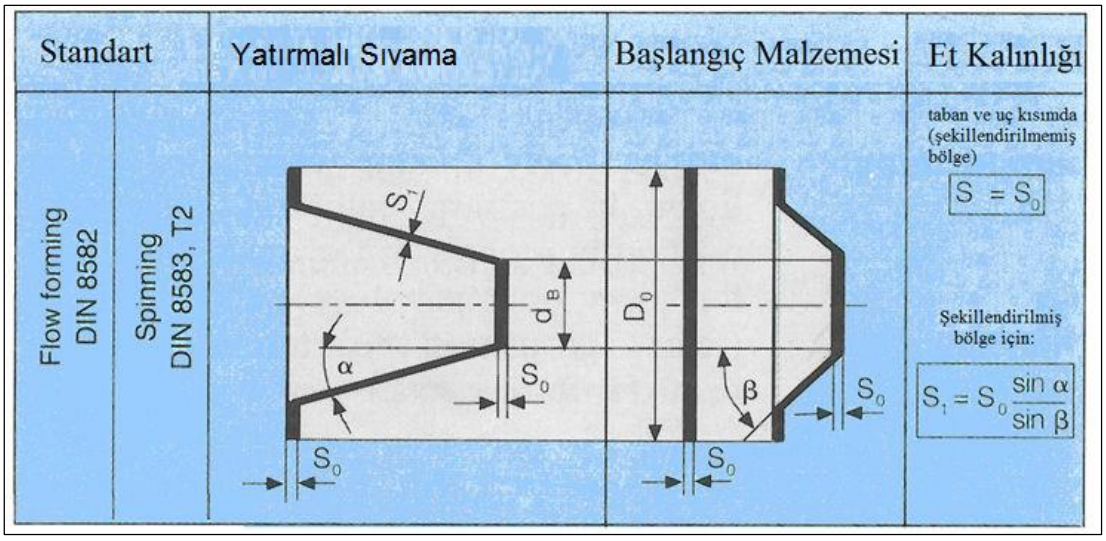
Şekil 3.11'de Yatırmalı sıvama prosesinin ana prensibi, şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Tek makaralı yatırmalı sıvama prosesinin ana prensibi [1]

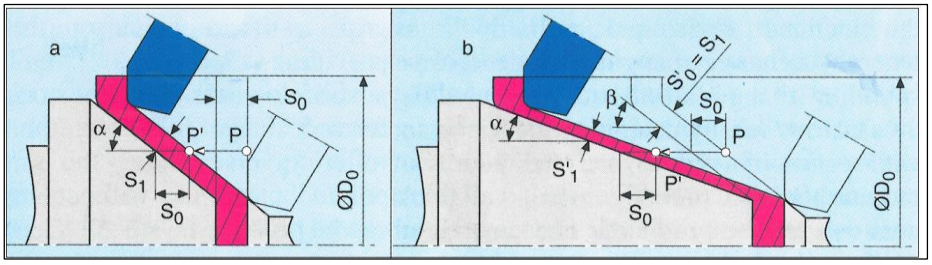
Yatırmalı sıvama sırasında, kuvvet röle ile şekil değiştiren malzeme arasındaki temas noktasına uygulanmaktadır. Bu prosesin belirgin özelliği herhangi bir an için malzemenin küçük bir alanına/bölgesine şekillendirme kuvvetlerinin etkimesidir, malzemenin geri kalanı, şekil değiştirmeden eski formunu korumaktadır. Bunun pratik uygulamada ki avantajı, verilen kalınlık için ihtiyaç duyulan şekil değiştirme enerjisinde ortaya çıkmaktadır. Yatırmalı sıvama için ihtiyaç duyulan şekil değiştirme enerjisi diğer birçok yönteme kıyasla önemli oranda düşüktür [1].

Şekil 3.12'de DIN 8582 ve DIN 8583'e göre yatırmalı sıvamada başlangıç ve bitiş malzemesinin sahip olduğu geometrik özellikler gösterilmiştir [5].



Şekil 3.12. DIN 8582 ve DIN 8584'e göre yatırmalı sıvama [6]

Yatırmalı sıvamada, standart sıvamanın aksine cidar kalınlığında belirgin bir değişim olur, bu değişim miktarı ön form pul malzemesinin cidar kalınlığına ve final formun makine ekseniyle arasında açı değerine bağımlıdır [5].



Şekil 3.13. Yatırmalı sıvama [6]

Yatırmalı sıvama prosesinde, işlem parametrelerine bakılacak olursa; özetle, sıvanan bölgenin cidar kalınlığı (S_1, S_1` ), islenmemiş parçanın cidar kalınlığının ($S_0$, $S_0$`) işlenmemiş parçanın kesit açısının (β) ve kalıbın kesit açısının (α) bir fonksiyonudur (Şekil 3.13.) [5].

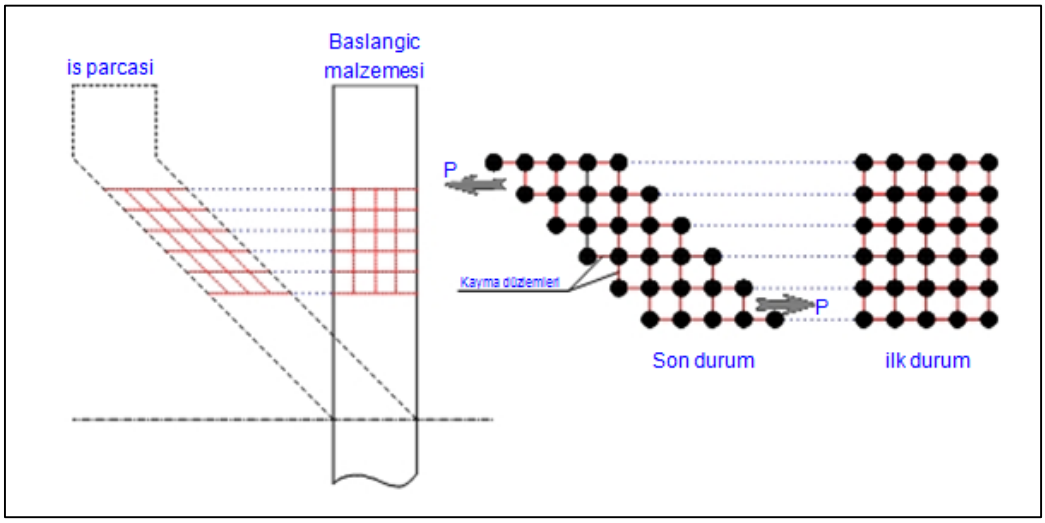
$$S_1 = S_0 . \sin\alpha \tag{3.1}$$

Alternatif olarak işlem, bir ön form verilmiş malzemelerden de yapılabilir. Bu durumda formülde ön formun ve nihai formun sahip olduğu açıların ilişkisinin de irdelenmesi gerekir [6].

$$S_1 = S_0 \frac{Sin_\alpha}{Sin_\beta} \tag{3.2}$$

Bu formüllerin ortaya koyduğu gibi, yatırmalı sıvama prosesinde, elde edilecek parçanın cidar kalınlığı, işlenmemiş parçadan, bağımsız olarak kontrol edilememektedir[5].

Parça üzerinde, Şekil 3.14'deki gibi dikdörtgen bir kesit düzlemi alınırsa, yatırmalı sıvama operasyonu bir paralellogramda ele alınabilir [1].



Şekil 3.14. Yatırmalı sıvama operasyonu için paralelogram uygulaması [1]

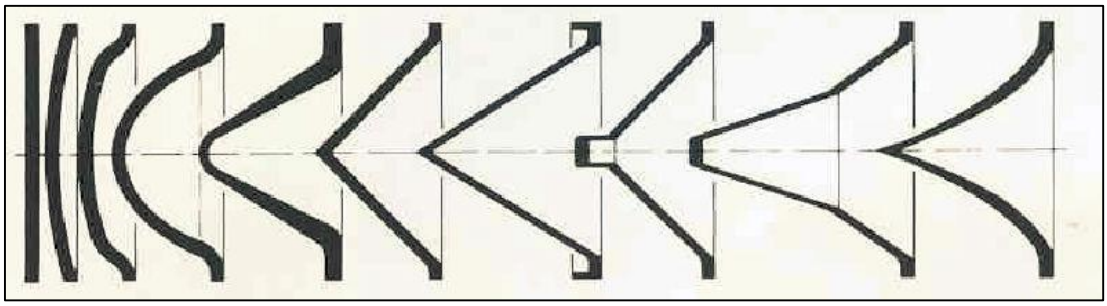
Başlangıç malzemesi, kalın cidarlı, yuvarlak ya da kare şeklinde pullar veya ön form verilmiş parçalar olabilir. Kalın cidarlı plakalar için genellikle, 180° açı ile karşılıklı yerleştirilmiş 2 adet şekillendirici makaraya sahip tezgâhlar kullanılır. Bu tip tezgâhlarda, şekillendirme

sırasında kalıp üzerinde oluşan kuvvetler karşılıklı makaralar ile dengelendiği için, daha düşük tolerans aralığına sahip parçaların üretilmesi mümkündür.

Çizelge 3.1. Standart sıvama ile yatırmalı sıvama arasındaki farklar [6]

STANDART SIVAMA(Şekil 3.2)	**YATIRMALI SIVAMA** (Şekil 3.8)
Makaranın birden fazla radyal ve eksenel yönde hareketi ile çok pasoda şekillendirme işlemi.	Genellikle tek pasoda şekillendirme işlemi.
$S_1 = S_O$	$S_1 = S_O \sin\alpha$ $S'_1 = S_0' \cdot \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$
Başlangıç malzemesi ve bitmiş parçanın cidar kalınlıkları aynıdır.	Bitmiş parçanın cidar kalınlığı, başlangıç malzemesinin cidar kalınlığına ve bitmiş parçanın açısına bağlı olarak değişim gösterir.
$A_1 = A_O$	$A_1 > A_O$
Başlangıç ve bitmiş parça yüzey alanları aynıdır	Bitmiş parça yüzey alanı daha büyüktür.
$D_0 > D_1$	$D_0 = D_1$
Başlangıç malzemesinin çapı, bitmiş parçanın çapından büyüktür.	Başlangıç ve bitmiş parça dış çapı aynıdır.

Şekil 3.15'de gösterildiği gibi, bitmiş parçanın şekli düz koni, konkav, konveks yapıda geometriler veya bunların birleşimi olabilir.



Şekil 3.15. Yatırmalı sıvamada imal edilen parça formları [5]

Daha önce de belirtildiği gibi bu işlem 8° ila 80° arası açılarda yapılabilir. Ancak, tek paso ile işlem yapılacaksa, en küçük açı değeri yaklaşık 13°'dir. 8° ila 13°derece açı arasındaki parçalar için 2 pasolu bir operasyon gereklidir [1].

Yatırmalı sıvama yönteminin avantajları [5]:

- Düşük kalıp maliyeti
- Yakın ölçüsel hassasiyet
- Yüksek üretim adetleri
- Malzeme tasarrufu
- Parçalarda pekleşme
- Üretim sırasındaki farklı parça için ayar işleminin hızlı ve kolay olması
- Yarı kalifiye elemanla kontrol edilebilecek kadar kolay tezgâh kontrolü

Yatırmalı sıvama yöntemi ile standart sıvamada olduğu gibi, plastik olarak Şekillendirilebilen tüm metal malzemeler sıvanabilmektedir. Sıvama sonucunda elde edilecek yüzey kalitesi, iş parçası malzemesine, rölenin ilerleme hızına, iş parçasının dönme hızına, vb. parametrelere bağlı olarak değişir [5].

Yatırmalı sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen parçalar için ulaşılabilir bitmiş parça toleransları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Yatırmalı sıvama yöntemi kullanılarak imal edilen parçalar için ulaşılabilir bitmiş parça toleransları [6]

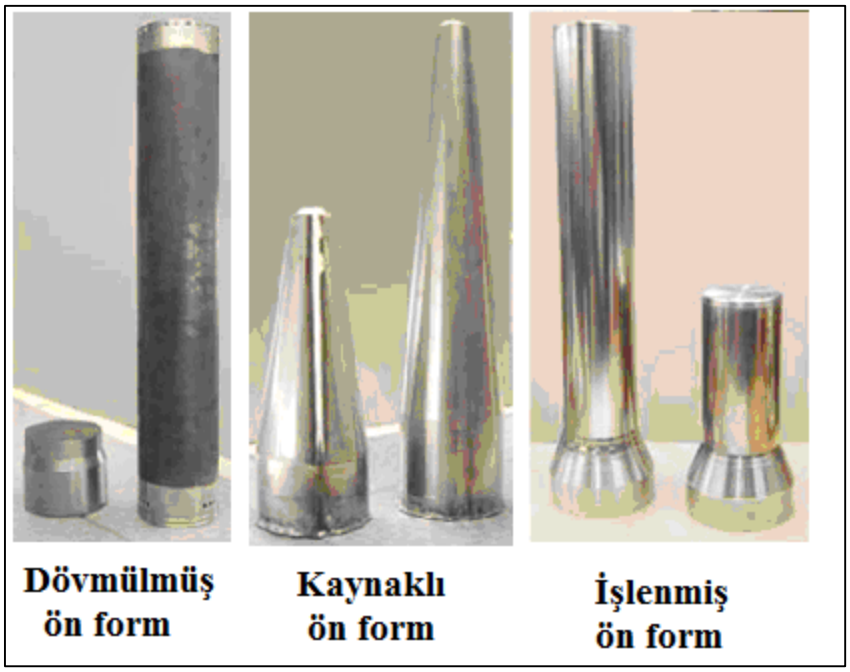
İş parçası referans ölçüleri		**Ulaşılabilir bitmiş parça toleransları**	
Koni yüksekliği	50 ila 300mm	Et kalınlığı (uzunlamasına)	± 0,03mm
Açık taraftaki çap	40 ila 300mm	Et kalınlığı (çevresel)	± 0,02mm*
Çıkış açısı	25° ila 50°	Ovalite (Disk pul)	< 0,04mm*
Et kalınlığı	2 ila 10mm	Ovalite (Kare pul)	< 0,08mm
Başlangıç malzemesi et kalınlığı	5 ila 13mm	Açı	± 0,05°
Malzeme	Cu (%99,9)	Yüzey kalitesi (ortalama)	< 0,4^m
* Başlangıç malzemesinin sahip olduğu özelliklere bağlı olarak daha düşük değerler elde edilebilir			

Savunma ve uzay sanayilerinde bu yöntemin kullanımına sıklıkla rastlanır. Roketlere ait çeşitli parçalar, zırh delici "H.E.A.T." mermilerine ait konik baslıklar bu yöntemle imal edilebilmektedirler [2].

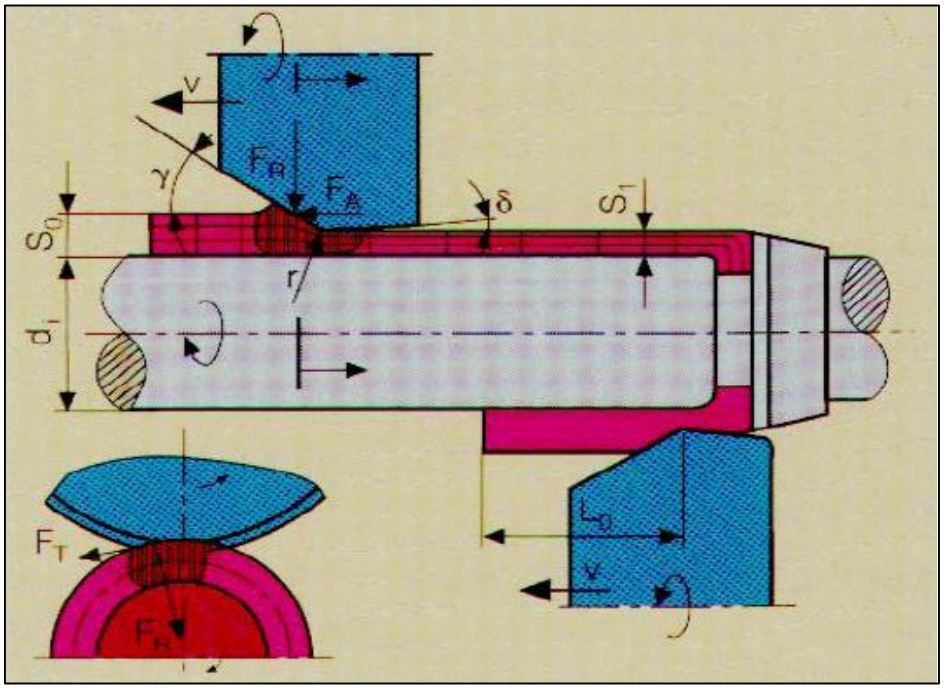
3.2.3. Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvama

Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvama yöntemi, plaka veya ön formlu malzemelerden, soğuk proses kullanarak, içi boş eksenel simetrik parçalar (çoğunlukla boru biçimli silindirik malzemeler) imal etmek için kullanılan bir yöntemdir [5].

Proses esnasında iş parçası, talaş kaldırmadan şekillendirilmektedir. Ön formlu başlangıç malzemesinin cidar kalınlığını inceltilerek, boyunun uzatılmasını sağlamaktadır. Ön formlu malzeme preslenmiş, dövülmüş, ekstrüde edilmiş ya da tornalanmış olabilir. İşlem sırasında, giriş malzemesi özelliklerine bağlı olarak cidar kalınlığında %95'e kadar varan bir redüksiyon yapılabilir [1].



Resim 3.2. Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvamada işlem öncesi ön formlu ve bitmiş parçalar [5]



Şekil 3.16. Bağımsız-Et Kalınlığı Değişimli Sıvama Yönteminin Şematik Gösterimi [2]

Bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama yönteminin prensibi Şekil 3.16'da görülmektedir. şekilde, sıvama kalıbının çapını; L0, sıvamaya başlanacak noktadan itibaren sıvanmamış is parçasının uzunluğunu; S0, sıvanmamış bölgenin et kalınlığını; S1, sıvanmış bölgenin et kalınlığını, FR, röle tarafından malzemeye uygulanan radyal kuvveti, FA, röle tarafından

malzemeye uygulanan eksenel kuvveti; FT, sürtünme sonucu ortaya çıkan tegetsel kuvveti; V, rölenin eksenel ilerleme hızını; , γ rölenin etkin açısını;, δ rölenin süpürme açsını ve r, rölenin burun yarıçapını ifade etmektedir [2].

İdeal şartlar altında ve is parçası boyunca sabit bir et kalınlığı elde edilecek şekilde yapılan bir sıvama işleminde, malzemenin hacminin değişmemesi gerektiği de göz önünde bulundurularak, is parçasının sıvama sonundaki uzunluğu aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir [6]:

$$L_1 = L_0 . \frac{S_0 . (d_1 + S_0)}{S_1 . (d_1 + S_1)} + L_0^{\iota} \tag{3.3}$$

Formülde;

L_1 : Sıvama sonunda elde edilen parça uzunluğu
L_0 : Sıvamaya başlanacak noktadan itibaren is parçasının uzunluğunu,
L_0^{ι} : Sıvanmayan kısmın uzunluğunu,
S_0 : İş parçasının başlangıç et kalınlığını,
S_1 : İş parçasının işlem sonrası et kalınlığını,
d_1 : İş parçasının iç çapını

ifade etmektedir [2].

Yöntem, boyun çapa oranının yüksek olduğu, ince cidarlı parçaların imalatı için idealdir. Genellikle, ölçüsel olarak hassas, yüksek dayanımlı, ince cidarlı silindirik parçaların imalatı için tercih edilir. Bu proses ile, ekstrem ölçüde düz ve eş eksenli parçaları, çapsal ölçüler ve cidar kalınlığı anlamında çok dar toleranslar dahilinde şekillendirmek mümkündür. Bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama yönteminin 3 temel tipi mevcuttur [2]:

- İleriye doğru bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama Sıvama (Forward Flow Forming).
- Geriye doğru bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama (Reverse Flow Forming).
- Yüzer mandrele sahip bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama

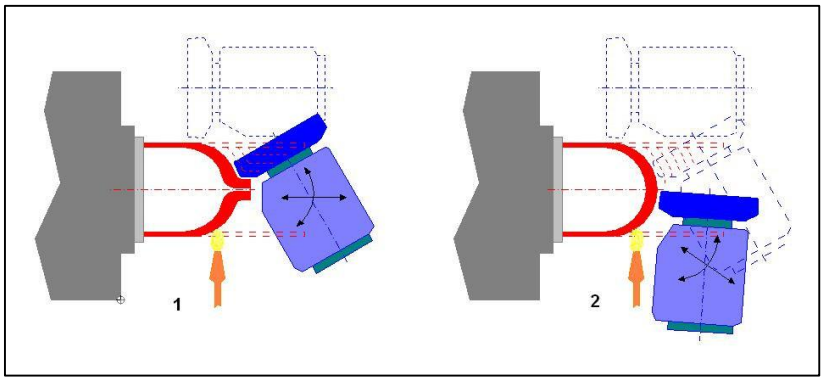
Bahsedilen tekniklerden ileri ve geriye doğru bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama yöntemleri, uzun yıllardır bilinen açıklanan iki yöntemdir.

Bağımsız et kalınlığı değişimli sıvama işlemleri, çok uzun malzemelerde, çok iyi ölçü toleransları sağlamalarından; işlenen parçaların yüzey kalitelerinin iyi olmasından, çoğu is parçası için soğuk olarak uygulanabilmelerinden, işlenen malzemelerin işlem öncesine göre daha mukavemetli olmalarından ve diğer imalat yöntemlerine nispeten hızlı ve ucuz üretim imkânı doğurmalarından dolayı endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Savunma ve uzay sanayilerinde; roket gövde ve parçalarının imalatları, nükleer uygulamalarda kullanılan hassas toleranslı boru biçimli elemanların imalatları ve otomotiv sektöründe kullanılan şaft mili ve benzeri parçaların imalatları bunlara örnek olarak verilebilir [2].

Bağımsız-et kalınlığı değişimli sıvamada, malzemenin özelliklerine bağlı olarak et kalınlığı %75 - %90 oranlarına kadar düşürülebilir. Bazı durumlarda, makinenin gücü bir seferde düşürülmek istenen et kalınlığı oranını karşılayamayabilir. Böyle durumlarda ikinci bir paso sıvama işlemi yapılabilir. Fakat unutulmaması gereken bir nokta, sıvama yapılmış bir is parçasının mukavemet özelliklerinin, parça malzemesine bağlı olarak, gelişmiş olacağıdır. Uygulamada, malzemenin et kalınlığının %20'den daha az düşürülmesi ise istenmeyen bir durumdur [6]. Bunun nedeni, röle ile malzeme arasında oluşan basınç bölgesinin, kalıp yüzeyine kadar ulaşmaması yani malzemenin et kalınlığının tamamının bu basınca maruz kalmamasıdır [2].

3.2.4. Boğaz sıvama

Boğaz sıvama işlemi çoğunlukla boru biçimli silindirik malzemelerin uçlarını tamamen kapatmak veya kısmen kapatmak için kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.17'de, boğaz sıvama ile kısmen kapatma ve tamamen kapatma işlemleri görülmektedir. Boğaz sıvama, kendine özgü makinelerde ve bu isleme özel geometrilere sahip röleler ile yapılır. İş parçası çoğunlukla sıcak olarak şekillendirilir. Boğaz sıvama işleminin en çok kullanıldığı endüstri alanı, dikişsiz basınçlı gaz tüpü imalatıdır [2].



Şekil 3.17. Boğaz Sıvama işlemleri. 1- Kısmen Kapatma, 2- Tamamen Kapatma [2]

İşlem yapılacak parçaların islenecek bölgeleri, öncelikle, makineye akuple edilmiş durumda veya ayrı durumda olabilen bir fırın veya indüksiyon bobini ile ısıtılır. Çelik malzemeler için, malzeme tipine bağlı olarak işlem sıcaklığı 900°C– 1000 °C arasındadır. Alüminyum alasımı malzemelerde ise bu sıcaklık 350 °C civarındadır. Bazı tip alüminyum malzemeler ve benzeri yumuşak metaller ısıtılmadan da boğaz sıvama yapılabilirler [2].

Resim 3.3. Boğaz Sıvama ile imal edilmiş Örnek Parçalar [2]

Boğaz sıvama işleminde, is parçasının çapı ile et kalınlığı arasındaki oranın yüksek olması işlemin kararlılığını artırır. Basınçlı gaz tüpleri gibi is parçalarında bu oran işlem için oldukça uygundur. Boğaz sıvama, çoğunlukla sıcak yapılan bir işlem olmasından dolayı, diğer sıvama yöntemlerinde elde edilen hassas is parçası ölçü toleranslarına bu yöntemde ulaşılamaz [2].

3.2.5. Profil sıvama

Profil sıvama işlemi, sac veya boru biçimli is parçalarını yeniden şekillendirmek ve iş parçası üzerinde fonksiyonel profiller oluşturmak için kullanılan bir soğuk şekillendirme

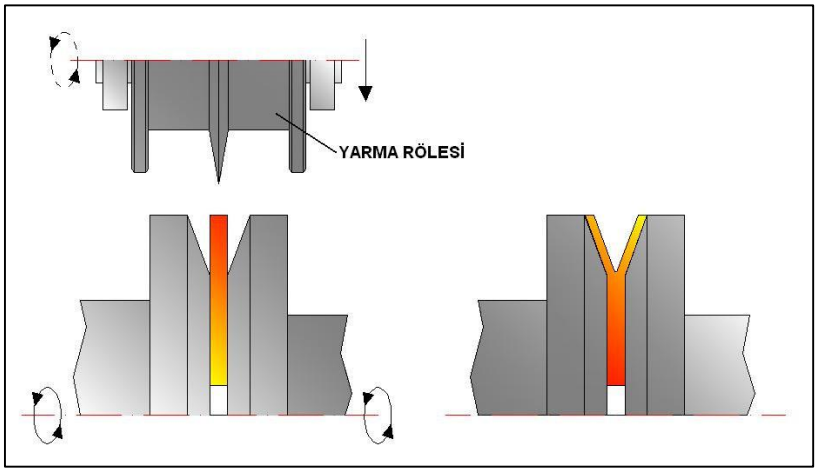
metodudur. Bahsi geçen fonksiyonel profiller özel uygulamalar dışında çoğunlukla, v-kayış kasnağı profili, dişli kayış kasnağı profili ve dişli profilidir. Profil sıvama işlemi, elde edilmek istenen geometriye ve isleme girecek is parçasının sıvama öncesi geometrisine bağlı olarak tek operasyondan veya sırayla yapılan çeşitli alt operasyonlardan oluşabilir [2].

Profil sıvama, seri imalat açısından oldukça verimli ve hızlı bir metottur. Diğer imalat yöntemleriyle üretilmeleri saatler alabilecek parçalar bu yöntem ile saniyeler içinde üretilebilirler. Fakat, ilk defa üretilecek bir parça için üretim adımlarına ve kullanılacak parametrelere karar vermek, profil sıvama konusunda ciddi bir tecrübe gerektirir. Tecrübe ve bilgi birikiminin yanında, çoğunlukla deneme yanılmalarla sonuca ulaşılır [2].

En genel uygulamaya sahip profil sıvama alt operasyonları şunlardır [2].

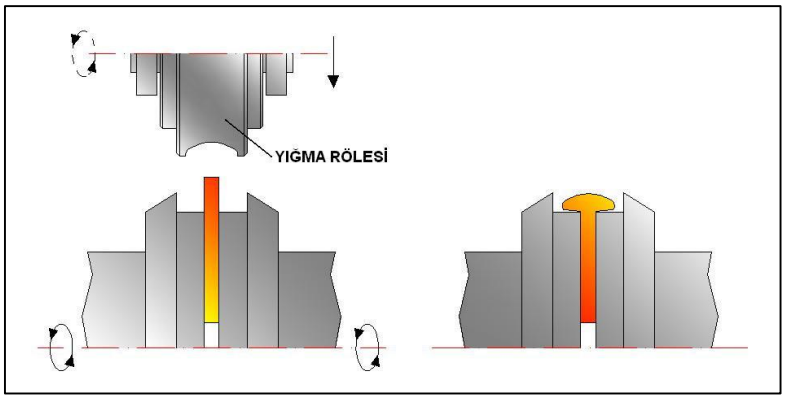
a. Yarma (Splitting)
b. Yığma (Upsetting)
c. Bükme (Curling)
d. Düzleştirme (Flattening)
e. Ön-Katlama, Katlama (Pre-Folding, Folding)
f. Ön-Profil Oluşturma, Fonksiyonel Profil Oluşturma (Pre-Profiling,Profiling)

Yarma işlemi, en basit manada, bir yarma rölesinin radyal yönde is parçasına dalması ve daldığı bölgede is parçasını ikiye ayırmasıdır. Bu yöntem tek kayış ile çalışacak v-kasnakların imalatında büyük kolaylık sağlar. Yarma işlemini açıklayan bir örnek Şekil 3.18'de görülmektedir [2].



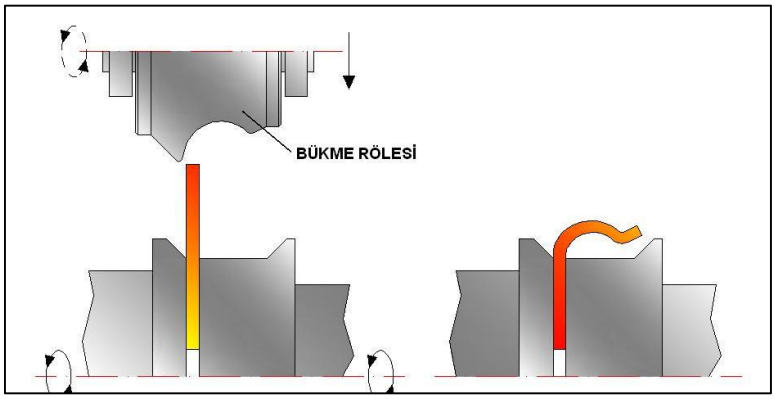
Şekil 3.18. Yarma işleminin Şematik Gösterimi [2]

Yığma işleminde, malzeme, yığma rölesi tarafından akıtılarak, is parçası üzerinde bir bölgede toplanır. Yığma işlemi ile çoğunlukla Şekil 3.19'da görüldüğü gibi, malzemenin dış yüzeyini genişletmek amaçlanır. Genişleyen dış yüzey daha sonra profil oluşturmak için kullanılır. Malzemenin toplandığı kesitte et kalınlığının artması, boğaz sıvama işlemindekine benzer biçimde hacmin sabit kalması prensibinden kaynaklanır.



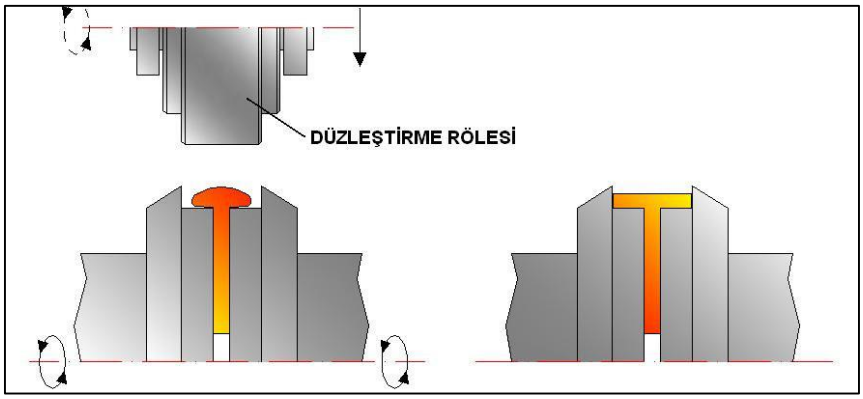
Şekil 3.19. Yığma işleminin Şematik Gösterimi [2]

Bükme işlemi, iş parçasının, bükme rölesi ile eğilmesidir. Şekil 3.20'de görülen bükme işlemi örneğinde, dikkat çekici bir husus rölenin is parçasına radyal yönde bastırmasıyla birlikte malzemenin yığılma eğilimi göstermek yerine bükülmesidir. Bunun sebebi malzemenin her zaman en kolay yolu seçmesi prensibidir. Burada, oldukça basit görünen bu olay kimi uygulamalarda beklenmeyen, şaşırtıcı sonuçlar doğurabilmektedir [2].



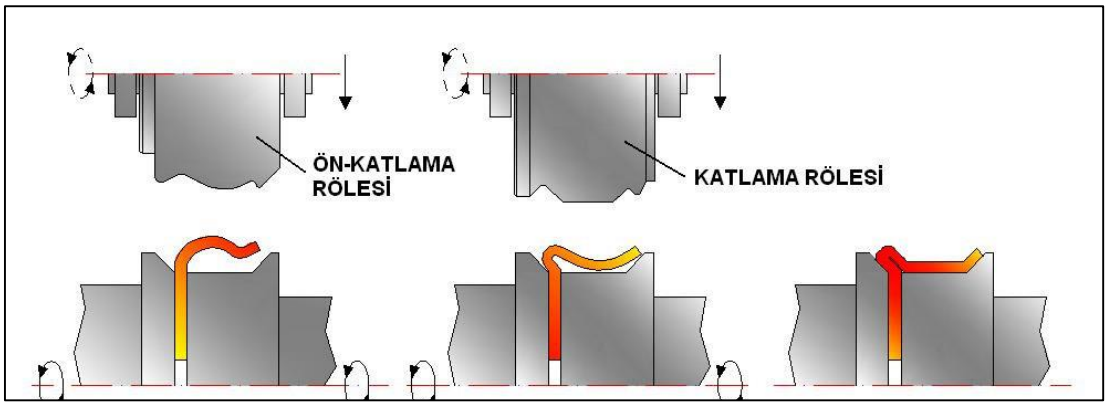
Şekil 3.20. Bükme işleminin Şematik Gösterimi [2]

Düzleştirme işlemi, çoğunlukla düz, silindirik olarak islenmiş bir röle ile is parçası üzerinde silindirik bölgeler yaratmak ve/veya yüzeyi düzeltmek için kullanılır [2].



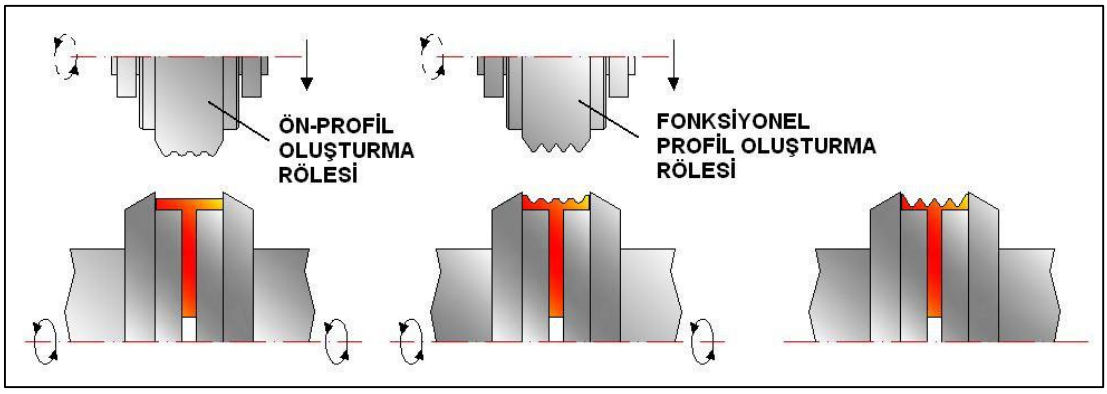
Şekil 3.21. Düzleştirme işleminin şematik Gösterimi [2]

Katlama işlemi, is parçasının, belirli bir bölgede, iç içe kıvrılıp basılarak üst üste katlanmasıdır. Bazı durumlarda, katlanmak istenen is parçasının geometrisine göre, ön-katlama yapılması gereklidir [2].



Şekil 3.22. Ön-Katlama ve Katlama işlemlerinin şematik Gösterimi [2]

Profil oluşturma işlemlerinde röle üzerine islenmiş bir profil, röle tarafından aynen is parçası üstüne sıvanır. Oluşturulan profiller çoğunlukla hassas toleranslara sahip işlevsel profillerdir. Bu nedenle, profiller, genellikle, tek röle ile değil, adım adım ilerlenerek birkaç röle ile sıvanır. Bu sayede hem islenen parçanın istenen toleranslarda elde edilmesi sağlanır, hem de röle ve is parçasının aşırı zorlanmasının ve rölenin hızla aşınmasının önüne geçilmiş olur [2].



Şekil 3.23. Ön-Profil Oluşturma ve Fonksiyonel Profil Oluşturma işlemlerinin şematik Gösterimi [2]

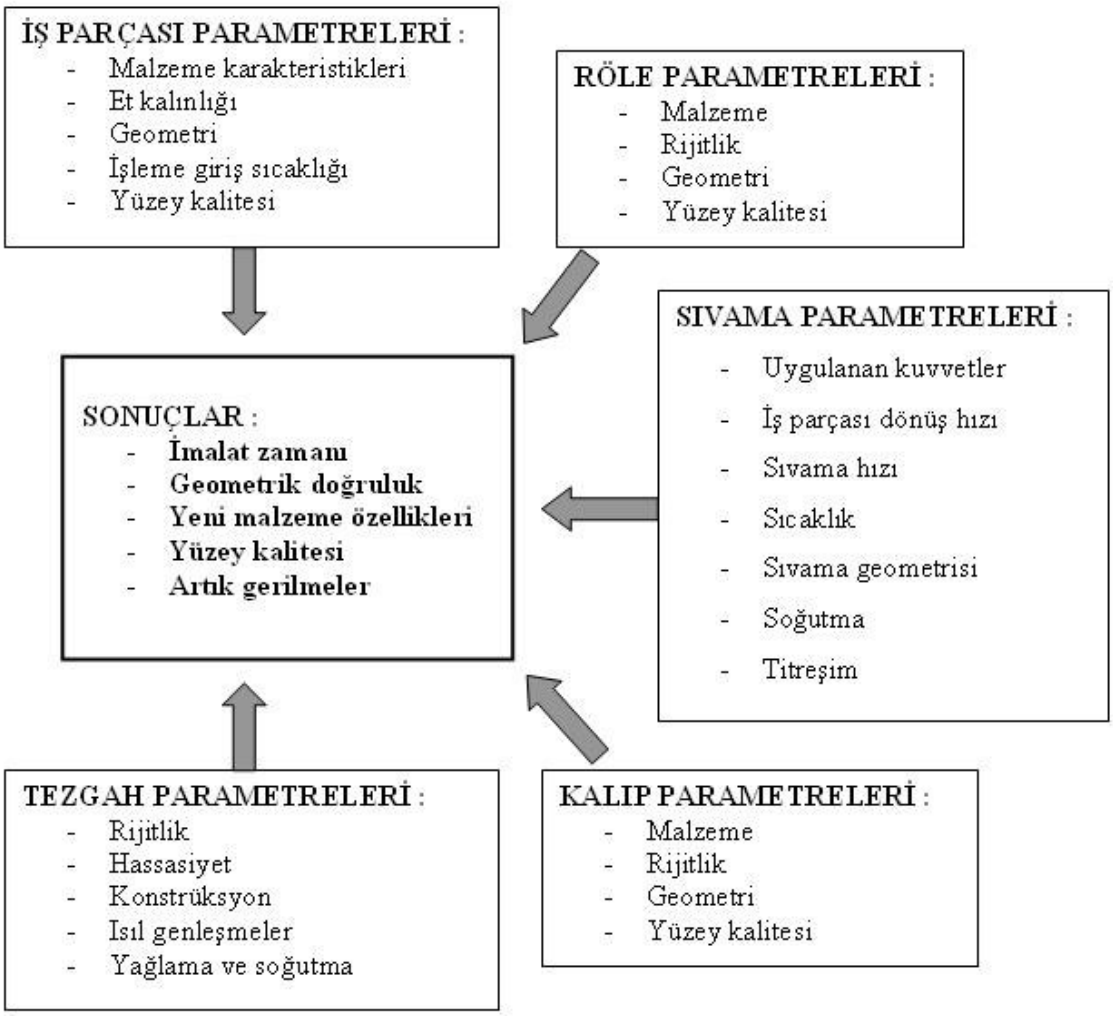
Profil sıvama ile hemen hemen tüm plastik şekillendirmeye uygun malzemeler sıvanabilir. Fakat elde edilmek istenen profilin de malzemeye uygun olması gereklidir [2].

3.3. Sıvama İşleminde Etkin Olan Parametreler

Sıvama işlemlerinde sonucu etkileyen birçok parametreyi mevcuttur ve bu parametrelerin büyük çoğunluğunun sayısal değeri sıvama işlemi esnasında her an değişmektedir. Bu sebepten dolayı bugün için dünyada, herhangi bir sıvama işlemini tam olarak tanımlayabilen bir matematiksel ifade bulunmamaktadır [2].

Sıvama işleminde etkin olan parametreler Çizelge 3.3'de gruplandırılmıştır [6].

Çizelge 3.3. Sıvama işlemlerinde Etkin Olan Parametre Grupları [6]



4. MALZEME VE METOD

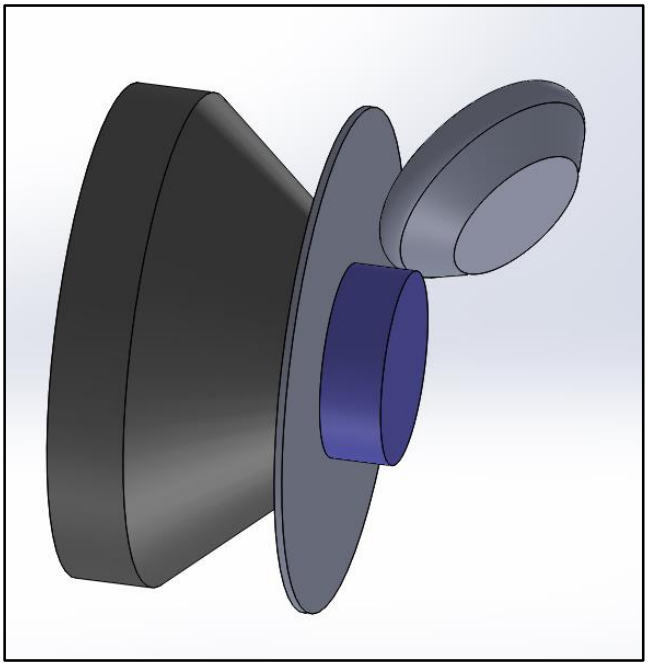
Şimdiye kadar sonlu elemanlar yöntemiyle sıvama işleminin simülasyonu ile ilgili çok az bilimsel çalışma olmuştur. Bu yüzden bu konuyu kapsayan yeni çalışmalar halen yapılmaktadır [14, 19]. Sac malzeme üzerinde meydana gelen deformasyonların sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak analizleri Simufact.Forming paket programının deneme sürümünde gerçekleştirilmiştir. Simufact.Forming, soğuk, sıcak ve ılık şekillendirme deformasyon işlemlerinin analizinde uluslararası düzeyde bilimsel kabul görmüş, yüksek güvenilirliğe sahip bir dinamik simülasyon programı olarak bilinmektedir.

Sıvama işleminin analiz edilebilmesi için öncelikle sıvama elemanlarının ve sac malzemenin bilgisayar ortamında modellenmesi, modelin analiz işleminin yapılacağı paket programa aktarılması, örgü modellerinin oluşturulması ve sac malzeme özelliklerinin atanması gerekmektedir.

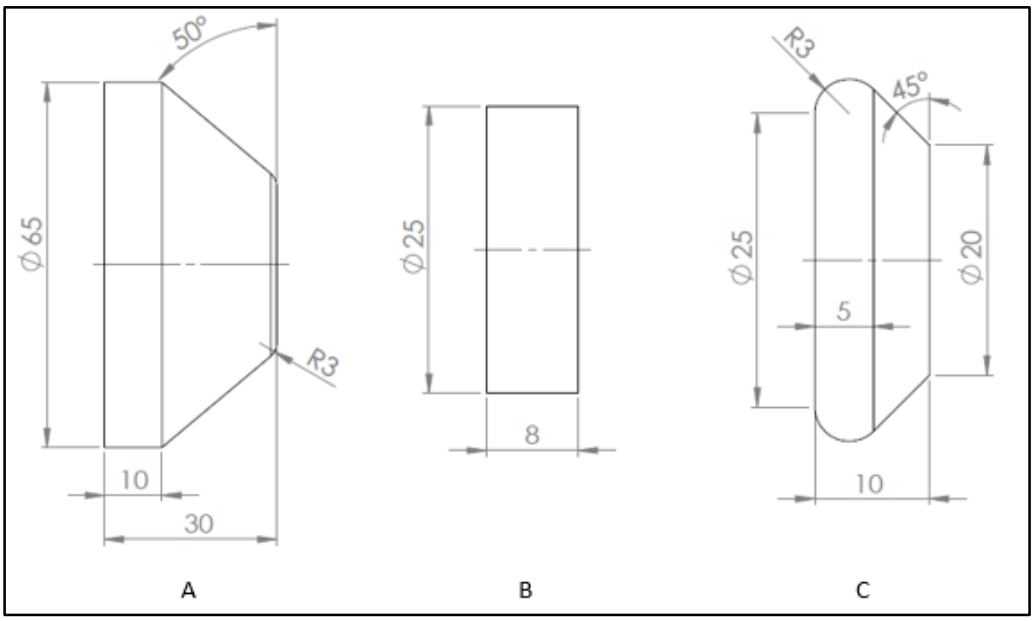
4.1. Elemanların Modellenmesi

Sıvama elemanlarının modellenmesi, SolidWorks 2012 paket programı ile tasarlanan katı model parça resimlerinin yüzey modellemeye çevrilmesi, ".stl" uzantılı olarak kaydedilmesi ve analiz programında açılmasıyla sağlanmaktadır.

Sac parçanın modellenmesi esnasında, sıvama elemanlarına ait bütün özellikler dikkate alınmıştır. Sac parçaya ait modeller bu şekilde hazırlanıp yüzey modelleme komutlarıyla yüzeye çevrildikten sonra ".stl" uzantısıyla kaydedilmiştir. Simufact.Forming paket programına oluşturulan modeller çağırılmıştır. Sıvama elemanları program içerisinde konumlandırılırken Simufact.Forming koordinat sistemi esas alınmıştır. Şekil 4.1'de SolidWorks ortamında modellenen elemanlar görülmektedir. Şekil 4.2'de ise mandrelin, baskı plakasının ve sıvama diskinin boyutlandırılmış teknik resimleri görülmektedir.

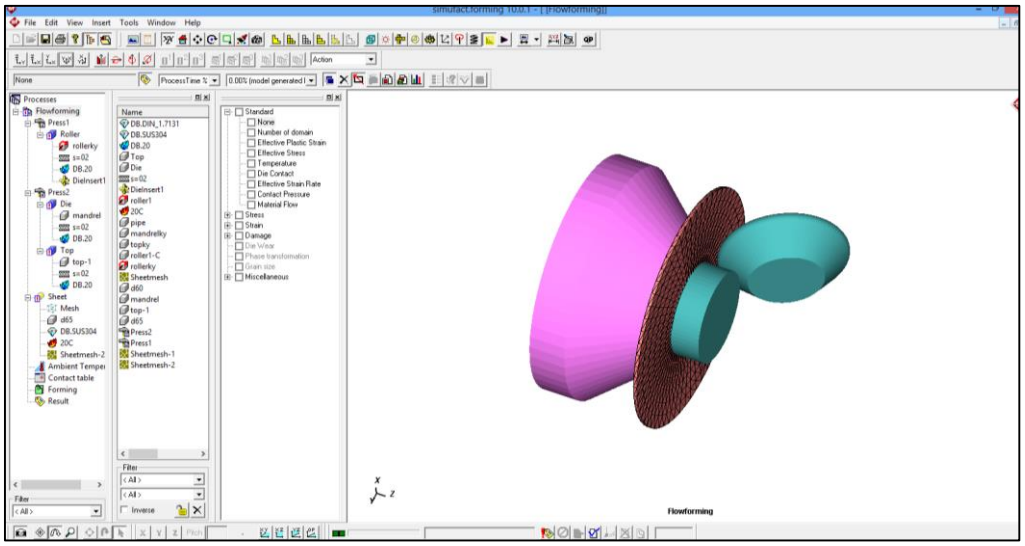


Şekil 4.1. Elemanların CAD (SolidWorks) ortamında modellemesi



Şekil 4.2. Elemanların teknik resim görünüşleri A-Mandrel, B-Baskı plakası, C- Sıvama diski

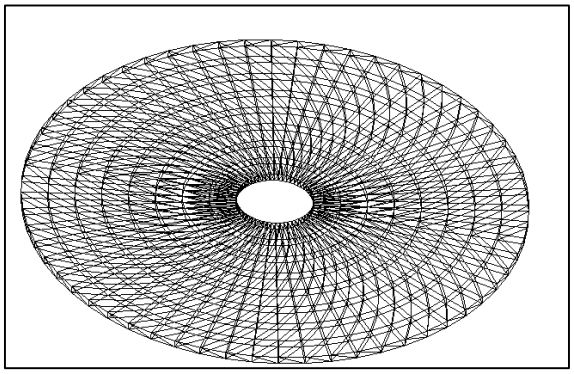
Şekil 4.3'de SolidWorks ortamında modellenmiş olan elemanların ".stl" formatına dönüştürülerek simufact.forming ortamına aktarılmış hali görülmektedir.



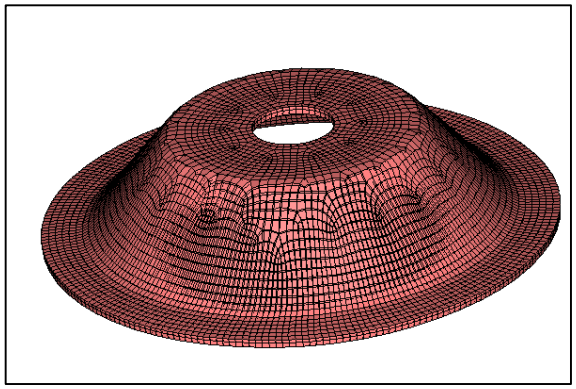
Şekil 4.3. Elemanların simufact ortamına aktarılmış hali

4.2. Sac Malzeme Modellerinin Oluşturulması

Analizler öncesinde, sıvama elemanlarının modellenmesinin ardından, çözümlemede kullanılacak olan sac malzemelerin modelleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.4. Sac malzemenin işlenmeden önceki yüzey modellemesi



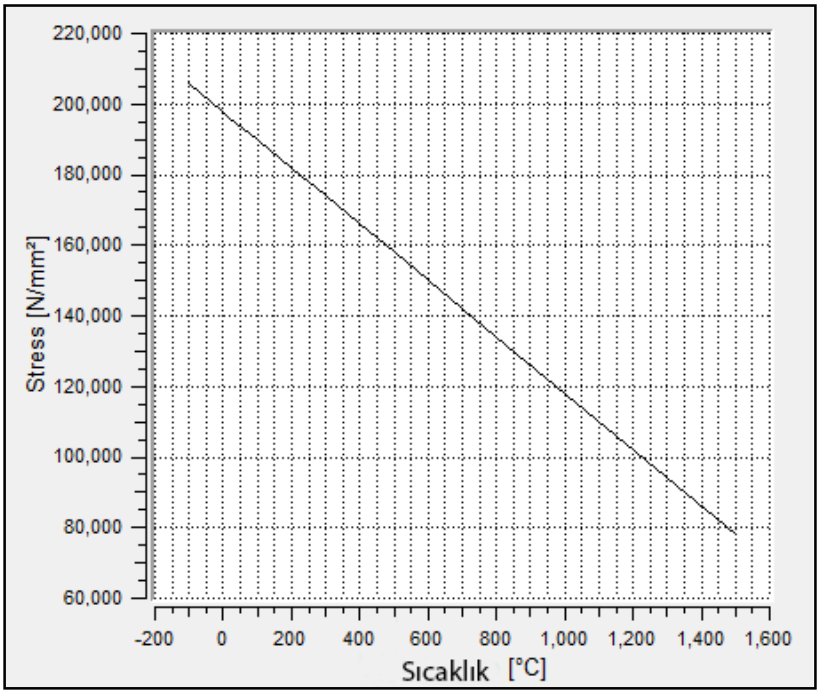
Şekil 4.5. Sac malzemenin şekillendirmeden sonraki yüzey modellemesi

Analizlerde bütün malzemeler için lineer elastik malzeme modelleri kullanılmıştır. Malzeme modelleri için gerekli olan elastisite modülleri (E), Poisson oranları (ν) ve yoğunlukları (g) belirlenmiştir. Bunun gibi açık (explicit) analizlerde standart değerlerin yanı sıra farklı sıcaklıklarda meydana gelen değişimlerden dolayı deneysel yollarla elde edilmiş deformasyon eğrilerine ihtiyaç vardır. Bir malzemenin gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkisi o malzemenin gerilme-deformasyon eğrisi olarak bilinir. Malzemeye özgüdür ve farklı zaman aralıklarında uygulanan çekme veya basma gerilmelerinin yarattığı deformasyon miktarı kaydedilerek bulunur. Gerilme-Şekil değiştirme eğrisi malzemeden malzemeye değişir ve numunenin sıcaklığına ve uygulanan yükün süratine bağlı olarak eğrideki sonuçlar farklılık gösterebilir. Bu eğriler bakımından simufact kütüphanesi deneysel sonuçlarla elde edilen oldukça geniş bir veri tabanı sunmaktadır.

Malzeme etkisinin incelenmesi hariç diğer parametrelerde sektörde sıklıkla kullanılan SUS304 paslanmaz çelik malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemeye ait mekanik ve kimyasal özellikler Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.6'da malzemeye ait gerilme-sıcaklık grafiği de gösterilmiştir.

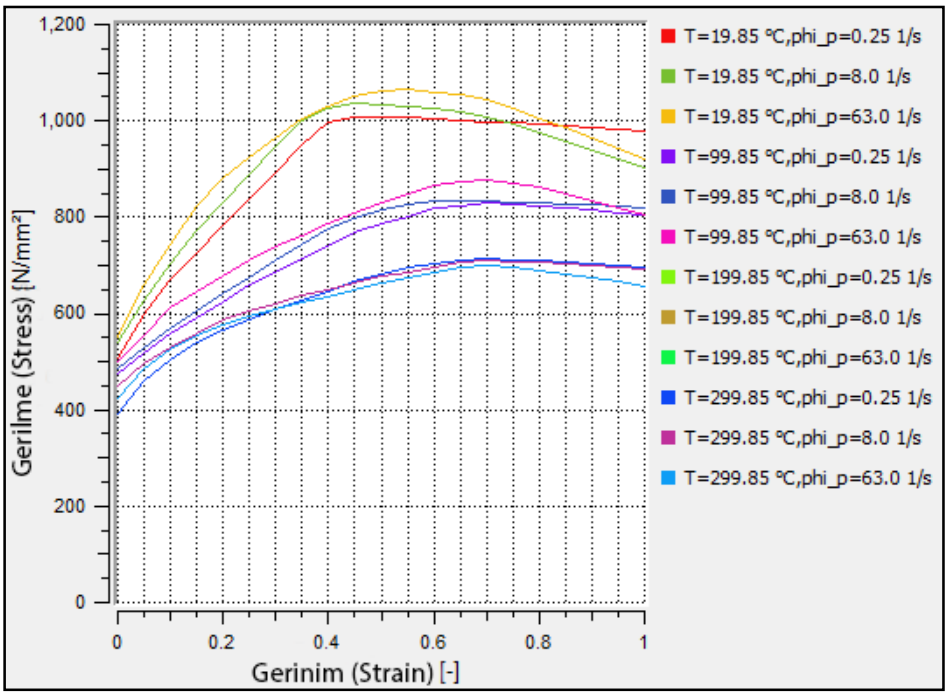
Çizelge 4.1. SUS304 malzemesine ait mekanik ve kimyasal özellikler

SUS304 PASLANMAZ ÇELİK					
Elastik Özellikleri			**Plastik özellikleri**		
Elastisite modülü (Young's Modulus)	193053	Mpa	En küçük akma gerilmesi (Minumum yield stress) (S)	90	Mpa
Poisson Oranı (Poisson's Ratio)	0,28		Akma Sabiti (yield constant) (C)	1451,3	Mpa
yoğunluk (Density)	8027,2	kg/m^3	Deformasyon sertleşmesi oranı (Strain Hard. Exp.) (N)	0,6	
Isı iletkenliği (Termal Conductivity)	16,2686	Watt	ısıl genleşme katsayısı (Coeff. Of Thermal Expansion)	1,73E-05	1/Kelvin
Özgül ısı kapasitesi (Specific heat capacity)	502	Joule			
Genel Kapsam			**Kimyasal bileşimi (%)**		
en küçük sıcaklık	19.85	°C	Mn	2	
en büyük sıcaklık	1099.85	°C	Si	0,75	
en küçük gerinme oranı (min. Strain rate)	0.25	1/s	P	0,045	
en büyük gerinme oranı (max. Strain rate)	63.0 1	1/s	S	0,03	
			Cr	18-20	
			Ni	10,5	
			N	0,1	



Şekil 4.6. SUS304 malzemesi için sıcaklığa bağlı gerilme değişim grafiği

SUS304 paslanmaz çelik malzemesinin farklı sıcaklarda deneysel olarak elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri de Şekil 4.7' de gösterilmiştir.

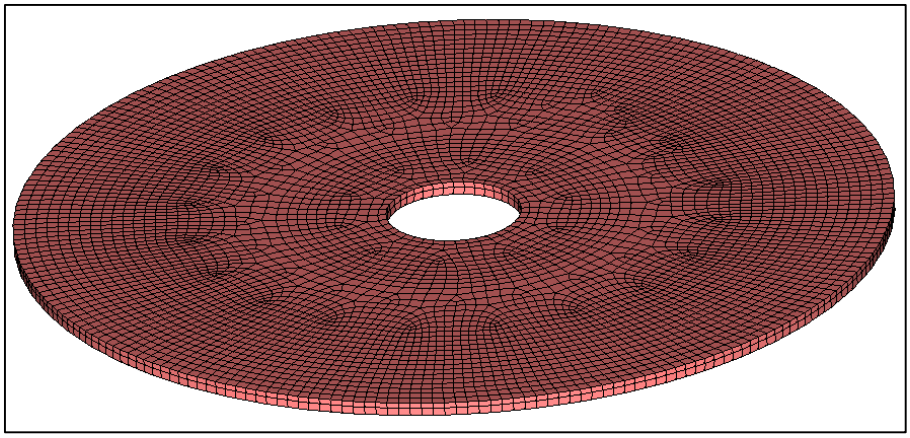


Şekil 4.7. SUS304 malzemesinin farklı sıcaklıklarda deneysel olarak elde edilen gerilme-deformasyon eğrileri

4.3. Örgü Modelinin Oluşturulması

Simufact.Forming programında sac malzemenin örgü modeli (mesh) ayrı ayrı oluşturularak analiz işlemi öncesi hazırlıklar tamamlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, sac malzemedeki deformasyon işleminin incelenmesi esas hedef olduğundan mandrel, sıvama diski ve baskı plakasına ait örgü modelleri zaman kaybını önlemek amacıyla oluşturulmamıştır. Malzemeler sisteme ısı iletkenliği olan rijit malzemeler olarak tanıtılmıştır. Baskı plakası ve kalıp setinin örgü modelinin analiz sonucunda etkili olmadığı, buna karşılık çözümleme süresini önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı, sıvama elemanları üzerindeki örgü modeli oluşturulmamış, sadece sac malzemenin örgü tipi hassas olarak ayarlanmıştır. Mandrel, sıvama diski ve baskı plakasına ait veriler programın özelliği gereği bu parçalara ait malzeme, sıcaklık ve sürtünme katsayıları belirlenerek kullanılmıştır. Bunlara ait detaylar bölüm 4.4'de incelenmiştir.

Şekil 4.8'de sac malzemeye ait örgü modeli gösterilmiştir.

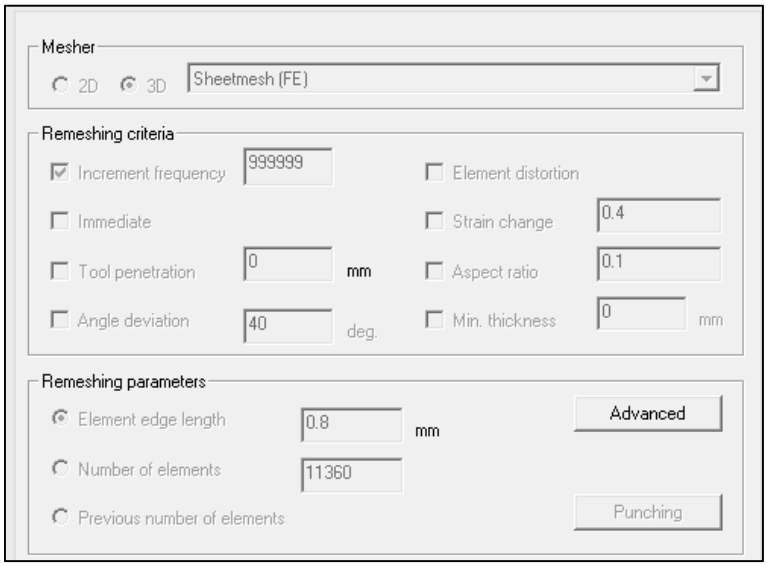


Şekil 4.8. Sac malzemenin örgü modeli

Analiz hassasiyetini arttırmak amacıyla örgü aralıkları mümkün olduğu kadar küçük tutulmaya çalışılmıştır. Sac kalınlığı parametresinin incelenmesi hariç diğer analizlerde sac malzeme başlangıç çapı 60 mm ve kalınlığı 1 mm olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Program tarafından malzeme özelliklerine göre otomatik olarak belirlenen en uygun örgü aralığı 0,8 mm'dir. Buna göre sac kalınlığı program tarafından iki eşit parçaya bölünüp aralığı 0,8 mm olan 11360 adet parça elde edilmiştir. Örgü aralığı elle daha da küçültülüp daha hassas sonuçlar alınabilir fakat bu durumda analiz süresi çok fazla uzamaktadır. Örgü aralığının 0,4 mm belirlenmesi durumunda analiz süresinin 8 hafta gibi uzun bir zamana

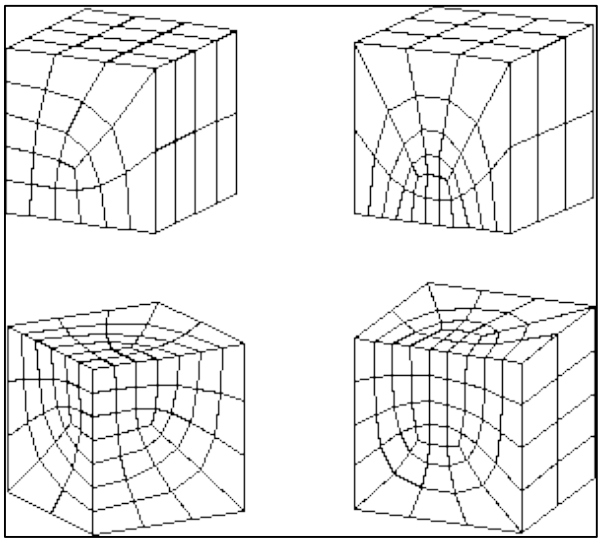
yayıldığı tespit edilmiştir. Bu durumda en az zamanda en hassas çözüm olarak programın otomatik olarak belirlediği 0,8 mm örgü aralığı kullanılmıştır.

Sac malzemenin örgü modeline ait genel özellikler Şekil 4.9' da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Sac malzeme örgü modeline ait genel özellikler

Örgü modelinin eleman tipi olarak sac parçaların analizinde sağladığı hassasiyet bakımından Hexahedral bir yapı kullanılmıştır. Hexahedral şekilli elemanlar aynı serbestlik derecesine sahip olmaları durumunda üçgen ve tetrahedral şekilli elemanlara göre daha iyi performansa sahiptir. Ayrıca hexahedral şekilli elemanların kullanılması eleman sayısını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu düşüş sonucunda da analiz zamanı ve analiz sonrası işlem zamanı da önemli oranda azalmaktadır. Doğrusal olmayan sistemler için ve elemanların dizilişinin fiziksel olarak önemli olduğu yerlerde hexahedral şekilli elemanların kullanımı daha uygun olmaktadır. Elemanların dizilişinin önemli olduğu uygulamalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve kompozit malzemelerin simülasyonudur. Şekil 4.10'da hexahedral bir örgü modelinin küp parça üzerine uygulanmış hali gösterilmektedir.

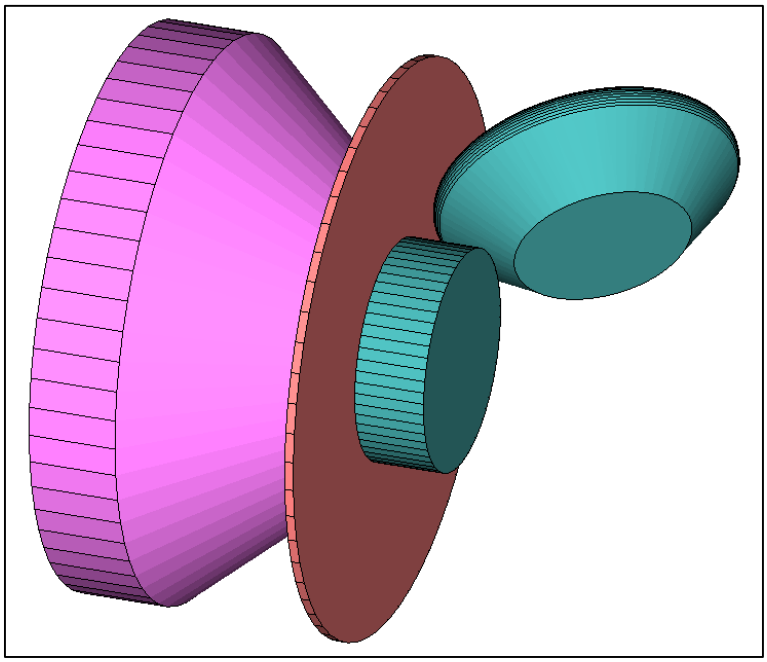


Şekil 4.10. Hexahedral örgü modeli

Simufact paket programı, sonlu elemanlar analizini MSC.Sfmarc çözücüsünü kullanarak gerçekleştirmektedir. Sfmarc; MSC yazılım firmasının geliştirmiş olduğu doğrusal olmayan (nonlineer) bir çözücü olup Simufact arayüzü ile desteklenerek kullanıcıya sunulmaktadır. Değişen malzeme, yük, mesnet kontak vb. şartlar altında güvenilirdir ve büyük projeleri kolaylıkla karşılayabilir. Yüksek eleman sayıları gerektiren ve ileri derecede doğrusal olmayan çözümlerde başarılı sonuçlar vermektedir. Simufact içerisinde çalışan SfMarc çözücüsü, açık (explicit) çözümleme yöntemini uygulayarak form verme işlemlerini hızlı ve güvenilir bir şekilde oluşturmaktadır.

4.4. Sınır Şartları Ve Temas Yüzeyleri

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi 60 mm çapında ve 1,0 mm kalınlığında olan iş parçası "v" şekli verilmiş ve dönmekte olan mandrele bir baskı plakası ile sıkıştırılarak dönmesi sağlanmıştır.

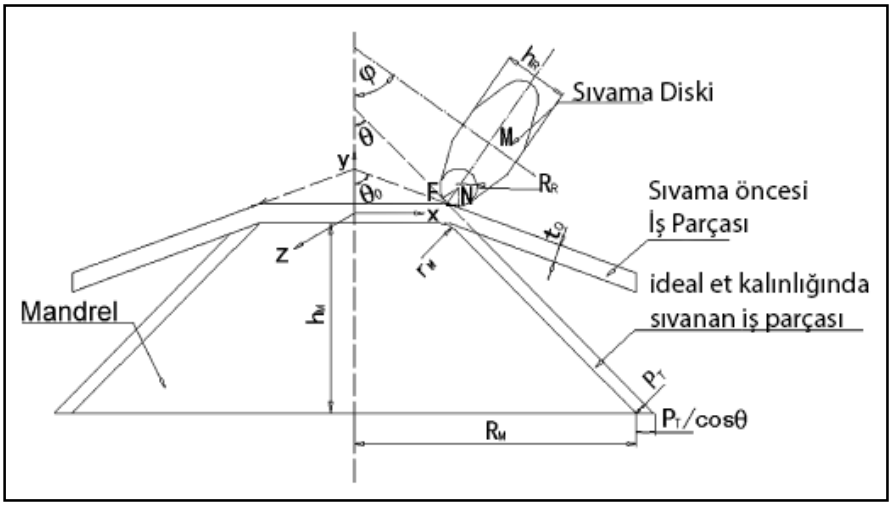


Şekil 4.10. Analiz düzeneğinin genel yapısı

Sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirildiği sıvama işlemlinde sıvama diskinin başlangıç konumu belirlenirken Zhan ve arkadaşlarının geliştirmiş olduğu uygun ve pratik bir yöntem kullanılmıştır [7]. Yani burada, sıvama diski referans noktası için sıvanmamış iş parçası ve mandrelin montaj pozisyonundan bir konum denklemi oluşturulmuştur. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi tüm sistemin orijin noktası silindirik iş parçasının orta noktası olarak belirlenmiştir. İş parçası (Blank) et kalınlığı t_0, sıvama diski (roller) uç radyüsü R_R , mandrel büyük çapı R_M , Mandrel kalınlığı H_M, yarım koni açısı θ_0 olup, θ mandrelin yarım koni açısı ve φ Sıvama diskinin eğiklik açısı olarak belirlenmiştir. Sinüs kanunu bir çembersel üçgende (kirişler üçgeni) bir kenar ve bu kenar karşısındaki açının sinüsleri oranının sabit olduğunu açıklar. Sinüs, dik açılı üçgenlerde dik olmayan bir açının karşısında kalan dik kenar ile hipotenüs (dik açının karşısında kalan kenar) ün birbirine oranıdır. Sinüs Kanunu'na göre sapma oranı (Δ) göz önünde bulundurularak iş parçasının bükülmüş kısmının ideal kalınlığı

$$PT = t0 \sin \theta / \sin (\theta 0) (1 + \Delta) \tag{4.1}$$

olarak ifade edilebilir [7].

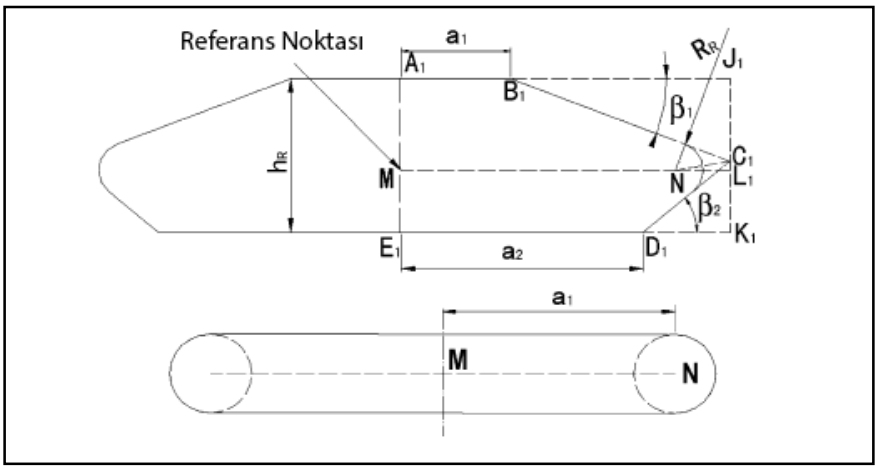


Şekil 4.11. Sıvama diski (Roller) başlangıç pozisyonu [7]

Şekil 4.11'de gösterildiği gibi iş parçası sıvama başlangıç noktası ve mandrelin dış yüzeylerinin kesişim noktasının koordinatları için (F) harfini kullandığı varsayılırsa F'nin orijin noktasına göre x ve y düzlemindeki koordinatları (Fx, Fy), aşağıdaki formülle ifade edilebilir [7].

$$Fx = R_M + \frac{\Delta t_0 \sin\theta}{\sin(\theta_0 - \theta)} - h_M tg\theta \tag{4.2}$$

$$Fy = \frac{t_0}{2\sin\theta_0} - \frac{\Delta t_0 \sin\theta ctg\theta_0}{\sin(\theta_0 - \theta)} \tag{4.3}$$



Şekil 4.12. En sık kullanılan sıvama diski tipi [7]

Genellikle sıvama işlemlerinde Şekil 4.12'de gösterilen tipte sıvama diskleri kullanılır. Sıvama diskinin uç radyüsünün koordinatları için (N) harfinin kullanıldığı varsayılırsa

N'nin orijin noktasına göre X ve Y düzlemindeki koordinatlarını (Nx ,Ny) aşağıdaki formülle ifade edilebilir [7].

$$Nx = F_X + R_R \frac{\cos(\theta_0+\theta)/2)}{cos(\theta_0-\theta)/2)} \tag{4.4}$$

$$Ny = F_y + R_R \frac{\sin(\theta_0+\theta)/2)}{cos(\theta_0-\theta)/2)} \tag{4.5}$$

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi Sıvama diski uç radyüsü (N) ve Sıvama diski referans noktası (M) arasındaki mesafeyi hesaplamak için aşağıdaki formülden faydalanılmıştır [7].

$$MN = \frac{h_R+a1tg\beta1+a2tg\beta2}{tg\beta1+tg\beta2} - \frac{R_R cos((\beta2-\beta1)/2)}{\sin((\beta1+\beta2)/2)} \tag{4.6}$$

$$MN = a1 \tag{4.7}$$

Sıvama diskinin referans noktasını (M) harfiyle ifade edecek olursak M'nin orijin noktasına göre X ve Y düzlemindeki koordinatları (Mx ,My) aşağıdaki formülle ifade edilmiştir [7].

$$M_x = N_x + MN \cos\varphi \tag{4.8}$$

$$M_y = N_y + MN \sin\varphi \tag{4.9}$$

Konum koordinatları yukarıdaki denklemler yardımıyla belirlendikten sonra işlemde kullanılacak malzemeler ve sınır şartları belirlenmiştir.

Üç Eleman tipinde de kullanılan malzeme ve sınır şartlarının genel özellikleri aşağıdaki gibidir.

• Tipi:	Rijit malzeme
• Malzemesi:	H-13
• Sürtünme katsayısı:	s=0,2
• Başlangıç sıcaklığı:	20.0 °C
• Ortam ısı transfer katsayısı:	50.0 W/(m²·K)
• İş parçası ısı transfer katsayısı:	20000.0 W/(m²·K)

Devir sayısının etkisi hariç diğer parametrelerin incelenmesinde mandrelin devir sayısı 100 dev/dak olarak belirlenmiştir.

Baskı plakası sac malzemeyi mandrel üzerine 20 Mpa baskı kuvveti ile sıkıştırmaktadır.

Sıvama diski ilerleme hızı etkisi hariç diğer parametrelerin incelenmesinde 1,6 mm/sn. olarak belirlenmiştir. Sıvama diskinin uç yarıçapı ise diğer parametrelerde 3,0 mm olarak belirlenmiştir.

Birçok geniş ölçekli bilimsel ve mühendislik hesaplamalarında, seyrek bir lineer sistemin çözümü söz konusudur. Bu çözüm dolaylı yöntem ve dolaysız yöntem olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Tek boyutlu problemlerde lineer denklem sistemlerinin direk yöntemlerle çözümü uygun olabilir. Ancak genellikle iki ve üç boyutlu problemlerde, bilgisayar belleği ve zaman gereksinimi nedenleriyle, dolaylı yöntemlerin kullanılmasının gerekli hale geldiği görülür. Geleneksel seyrek matris faktörizasyon algoritmalarında genellikle dolaylı adreslendirmeler kullanılır. Dolaylı adreslendirmeler, performanslarını sınırlayan düzensiz bellek kullanımına sebep olurlar. Multifrontal yöntem gibi bazı dolaysız yöntem algoritmaları ise, seyrek bir matrisin satır ve sütunlarındaki uygun düzenlemeleriyle bellek kullanımını ve işlem süresini kayda değer oranda azaltabilirler[18]. Bu yüzden matris çözme yöntemi olarak program tarafından sac malzemelerde en uygun yöntem olan multifrontal Sparse (2d/3d) matris çözüm algoritması tercih edilmiştir.

Tüm analizler sistem olarak 3,6 Ghz hızında, intel i7 yonga setli 8gb ram'li, 8 çekirdekli bir iş istasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Bu tip sıvama işlemlerinde aynı anda farklı dönme hareketleri ve ilerleme hızlarından dolayı statik hesaplamalara nazaran daha karmaşık hesaplamalar ortaya çıkmaktadır. Bu da işlem süresini çok uzatmaktadır. Simufact.Forming paket programının paralel işlem (parallel processing) özelliğini desteklemesinden dolayı zamansal olarak çok büyük bir hız sağlanmıştır. Aksi takdirde tek çekirdekli bir sistem ile tek bir analizin süresi dört-altı hafta gibi bir zaman dilimine tekâmül etmektedir. Böylelikle tek bir analiz 24 saat gibi bir zaman diliminde tamamlanmıştır.

5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan analizlerde, sıvama işlemine etki eden parametrelerden, devir sayısı, ilerleme hızı, malzeme cinsi, sac malzeme kalınlığı ve sıvama diski uç radyüsü gibi sıvama kalitesini etkileyen unsurlar araştırılmıştır. Sıvama parametreleri olarak, 100, 300 ve 600 dev/dk olmak üzere üç farklı devir sayısı ve 0,8 mm/sn, 1,6 mm/sn ve 3,2 mm/sn olmak üzere üç farklı ilerleme hızı değerleri kullanılmıştır. Analizlerde sac malzeme olarak sektörde sıvama işlemlerinde sıklıkla kullanılan AA1100, AA6061 Alüminyum ve SUS304 paslanmaz çelik malzemeler 0,8mm, 1,0 mm ve 1,5 mm kalınlıklarında kullanılmıştır.

Bu girdiler esas alınarak her bir analiz için yeni bir süreç başlatmak suretiyle toplam 12 adet analiz yapılmıştır. Yukarıda belirtilen parametrelerinin girdi olarak değerlendirildiği deneysel çalışmada çıktı olarak; parça üzerindeki gerilmeler (effective stress), gerinmeler (effective plastic strain), Cockroft Latham modeli ile yüzey hasar oranı (Damage), sac malzeme kalınlık değişimi (Thickness), parça üzerindeki sıcaklık dağılımı (Temprature) gibi değerler incelenmiştir.

Çizelge 5.1’de tüm deneylerde elde edilen gerilmeler, gerinmeler, yüzey deformasyonu, kalınlık değişimi, parça üzerindeki sıcaklık dağılımı gibi değerler her bir deney için verilmiştir.

Çizelge 5.1. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu

Deney No	İlerleme, F, mm/Sn.	Devir, D, dev/dk.	Sac kalınlığı, t0, mm	Malzeme Cinsi	En yüksek gerilmeler, Mpa	En Yüksek gerinmeler	Yüzey Deformasyon oranı	En düşük et kalınlığı, mm	En yüksek sıcaklık, C°	Röle Uc Radyüsü, mm
1	0,8	100	1	SUS304	964,915	0,9	0,689	0,641	78,169	3
2	1,6				954,808	0,947	0,682	0,55	94,473	3
3	3,2				915,694	0,768	0,561	0,55	106,57	3
4	1,6	100	1	SUS304	954,808	0,947	0,682	0,55	94,473	3
5		300			938,88	0,797	0,684	0,637	101,9	3
6		600			895,496	1,087	17,282	0,388	161,45	3
7	1,6	100	0,8	SUS304	1036,29	0,718	0,574	0,337	94,473	3
8			1		954,808	0,947	0,682	0,55	94,473	3
9			1,5		932,027	1,34	0,756	0,442	114,3	3
10	1,6	100	1	Al1100	101,806	0,824	0,788	0,65	27,54	3
11		300		Al6061	101,806	0,824	0,732	0,55	27,54	3
12		600		SUS304	954,808	0,947	0,682	0,55	94,473	3

Deneylerden elde edilen bu veriler ışığında gerilmeler, gerinmeler, Cockroft Latham modeli ile yüzey deformasyonu, sac malzeme kalınlık değişimi, parça üzerindeki sıcaklık dağılımı grafikleri çizilerek analiz sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

5.1. İlerleme Hızının Etkilerinin Değerlendirilmesi

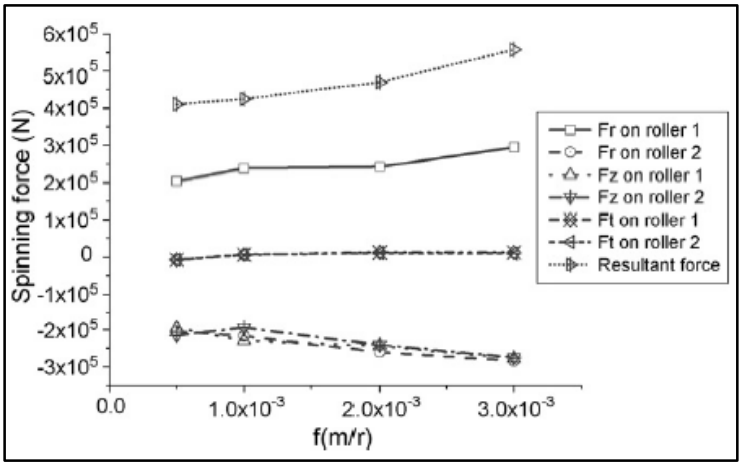
İlerleme hızının etkisini belirlemek amacıyla 0,8 mm/sn, 1,6 mm/sn. ve 3,2 mm/sn. olmak üzere üç farklı hızda analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda sac malzeme üzerindeki gerilmeler, gerinmeler, Cockroft Latham modeli ile yüzey deformasyonu, kalınlık değişimi, parça üzerindeki sıcaklık dağılımı gibi değerler incelenmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak seçilen parametrelerin sıvama işlemi üzerindeki etkisi yorumlanmıştır. Analiz süresince sabit tutulan değerler Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu

Sac malzeme başlangıç çapı	60 mm
Saç kalınlığı	1 mm
İlerleme hızı	-
Ortam sıcaklığı	25 °C
Devir sayısı	100 dev/dk.
Kullanılan malzeme	SUS304 (paslanmaz Çelik)
Mesh aralığı	0,8 mm

Bir sıvama ile şekillendirme işleminde, iş parçası ve sıvama diski arasında karşılıklı üç dikey bileşen üzerinde eksenel (Fz), radyal (Fr), ve teğetsel (Ft) olmak üzere üç farklı kuvvet oluşur. Zhan ve arkadaşları, iki sıvama diskinin kullanıldığı bir çalışmada iki disk üzerindeki tüm sıvama kuvvetlerinin birbirine yakın değerlerde olduğunu bulmuşlardır. İlerleme hızının artması eksenel, teğetsel ve radyal kuvvetlerde belli oranlarda artışa sebep olmuştur. İlerleme hızının artması ile eksenel kuvvetlerin artması, beklenen bir durumdur. Bu durumu; ilerleme hızının artışı sonucunda artan disk temas kesiti ile ilişkilendirmek mümkündür [3].

Temas kesitinin artması, sıvama için gerekli olan enerjinin de artması demektir. Enerjinin artması da eksenel kuvvetlerin artmasına sebep olmaktadır. Radyal ve eksenel kuvvetlerdeki artış teğetsel kuvvetlerdeki artıştan daha fazladır. Bu durum Şekil 5.1'de gösterilmiştir. İlerleme hızının artarak sıvama kuvvetlerinde artış meydana gelmesi, sıvama sonrası iş parçası üzerindeki silindirik izlerde artışa ve dönüş sırasındaki iş parçası kenarında kırışıklıklara sebep olmaktadır [7].

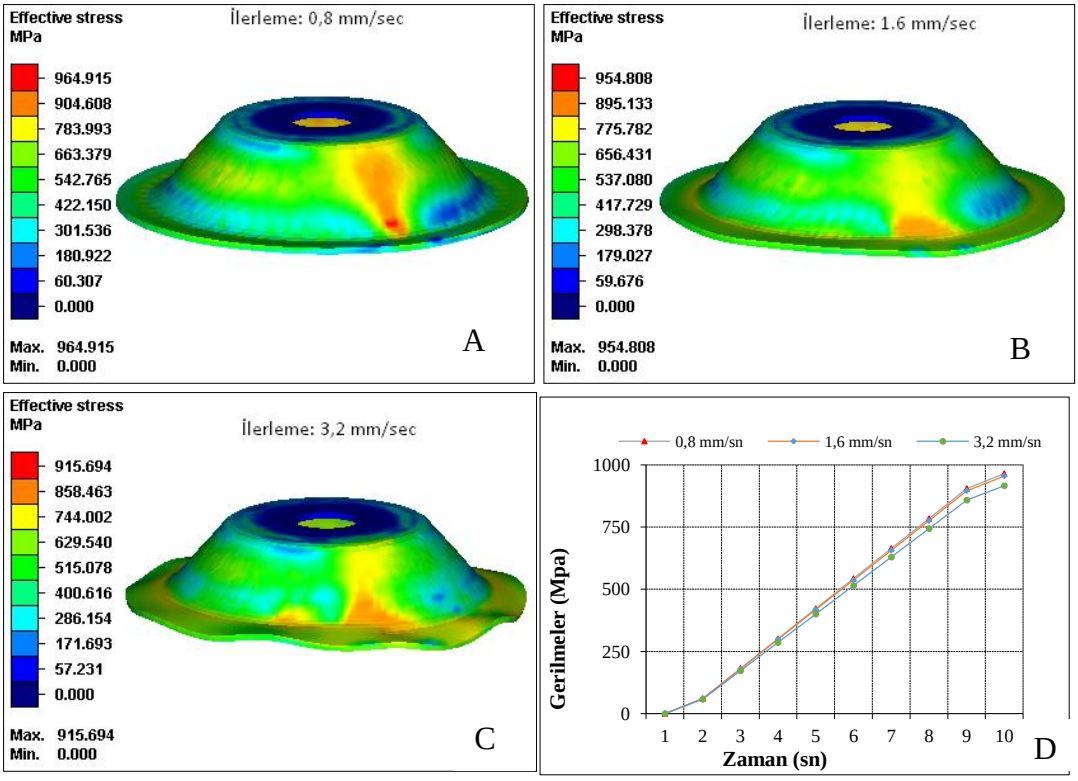


Şekil 5.1. İlerleme hızının sıvama kuvvetine etkisi [7]

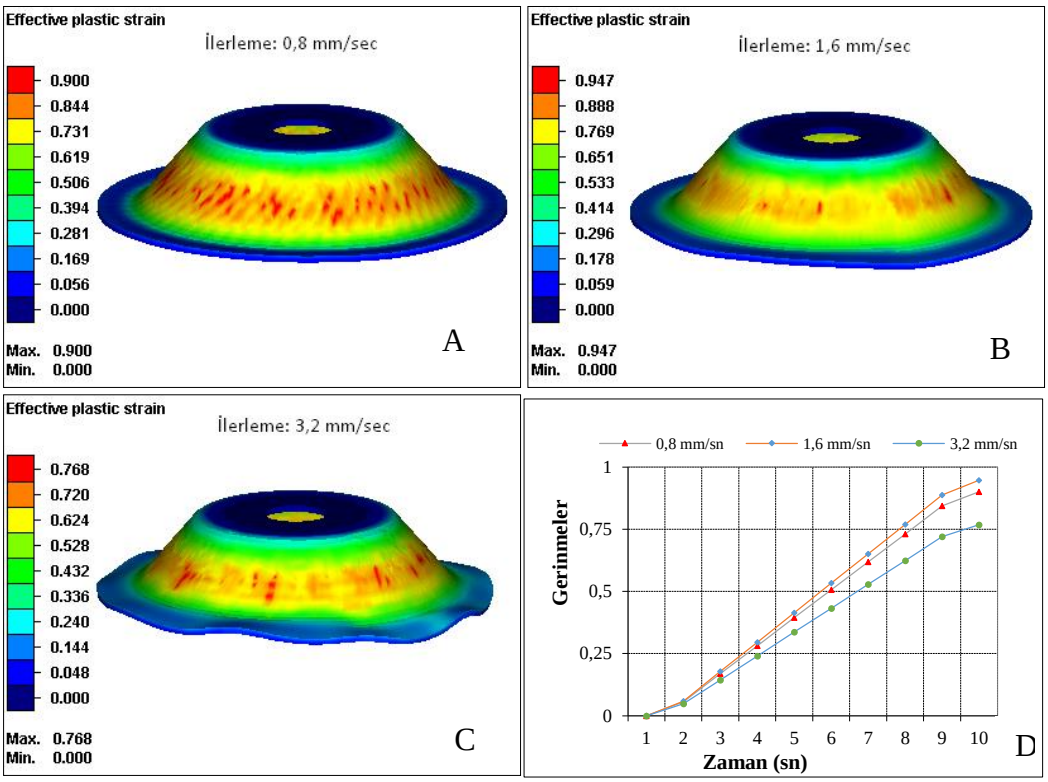
Bir kuvvetin etki ettiği kesitte birim alana düşen kuvvete gerilme adı verilir. Kuvvet kesite dik ise ve boy değişimlerine (uzama veya kısalma) yol açıyorsa “normal gerilme” ζ adı verilir. Kuvvet kesit içinde ise ve açı değişimine neden oluyorsa, “kayma gerilmesi” ζ adı verilir. Bir parçaya etki eden kuvvet ve momentler, parçada hem normal hem de kayma gerilmesi oluşturabilir. Gerilmelerin birimi MN/m^2, N/mm^2 veya MPa’dır.

Dış kuvvetler altında malzemeler şekil değiştirir. Kuvvetlerin kaldırılması halinde malzeme başlangıç boyut ve şekline dönerse şekil değişimi “elastik (tersinir)” şekline dönmezse şekil değişimi “plastik (kalıcı)” olur. Gerilme altındaki parçalarda boy ve açı değişimleri meydana gelir.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde sıvama sonrası iş parçasında oluşan en büyük ve en küçük değerler gösterilmiştir Böylece iş parçasında oluşan en büyük gerilme ve gerinim bölgeleri rahatlıkla ayırt edilebilmektedir. Bunun sağladığı önemli avantajlardan birisi de iş parçası üzerinde gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerin rahatlıkla tespit edilebilmesidir.



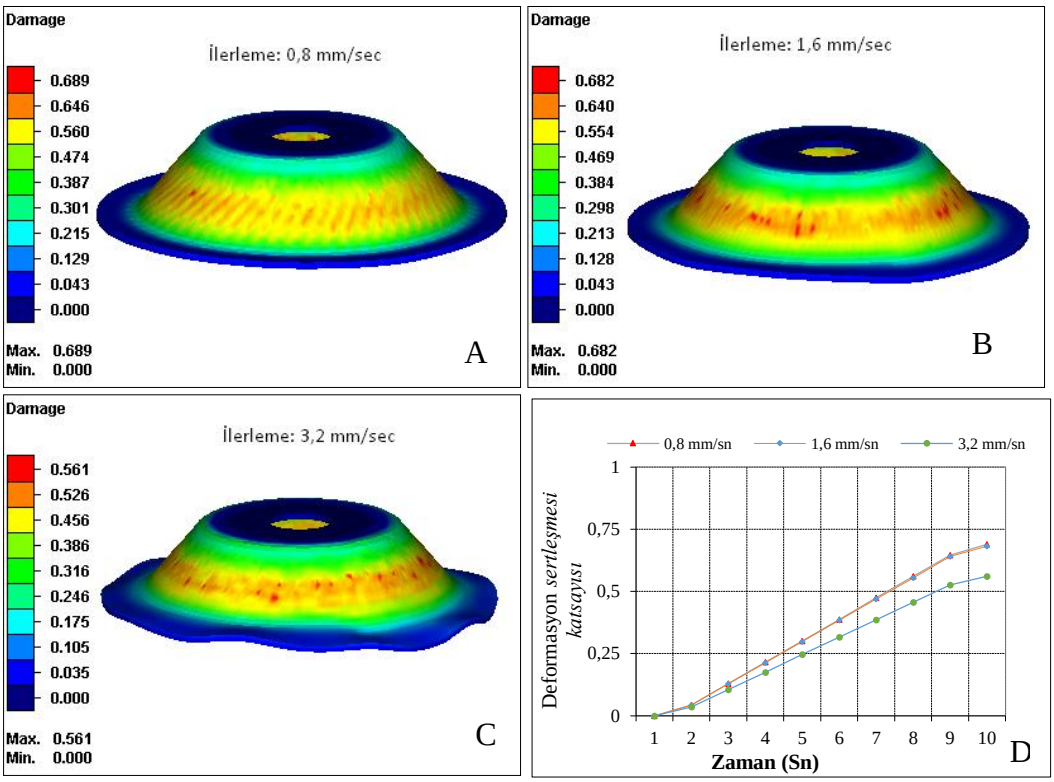
Şekil 5.2. SUS304 Malzemesi için değişik ilerleme hızındaki gerilmeler



Şekil 5.3. SUS304 Malzemesi için değişik ilerleme hızındaki gerinmeler

Şekil 5.2. incelendiğinde; yüzey gerilmeleri parça yüzeyine hâkim olan yeşil bölgelerde 0,8 mm/sn. ilerleme hızında 663 Mpa (Şekil 5.2A), 1,6 mm/sn. ilerleme hızında 656 Mpa (Şekil 5.2B) ve 3,2 mm/sn. ilerleme hızında 629 Mpa (Şekil 5.2C) olarak görülmektedir. Bu durumda ilerleme hızı arttıkça yüzey gerilmelerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Oluşan en büyük gerilme ise sıvama diskinin parça yüzeyine temas bölgesinde meydana gelmektedir. Şekil 5.3'deki yüzey gerinim değerleri incelendiğinde birim alandaki en büyük uzamanın en fazla 0,8 mm ilerleme hızında, parça yüzeyindeki kırmızı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.3A). İlerleme hızındaki artışın iş parçası kenarında kırışıklıklara sebep olduğu da açıkça görülmektedir. Bu bakımdan sonuçlar Zhan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmayla paralellik göstermektedir.

Şekil 5.4'de değişik ilerleme hızlarında sac malzeme üzerindeki deformasyon sertleşmesi oranları görülmektedir.

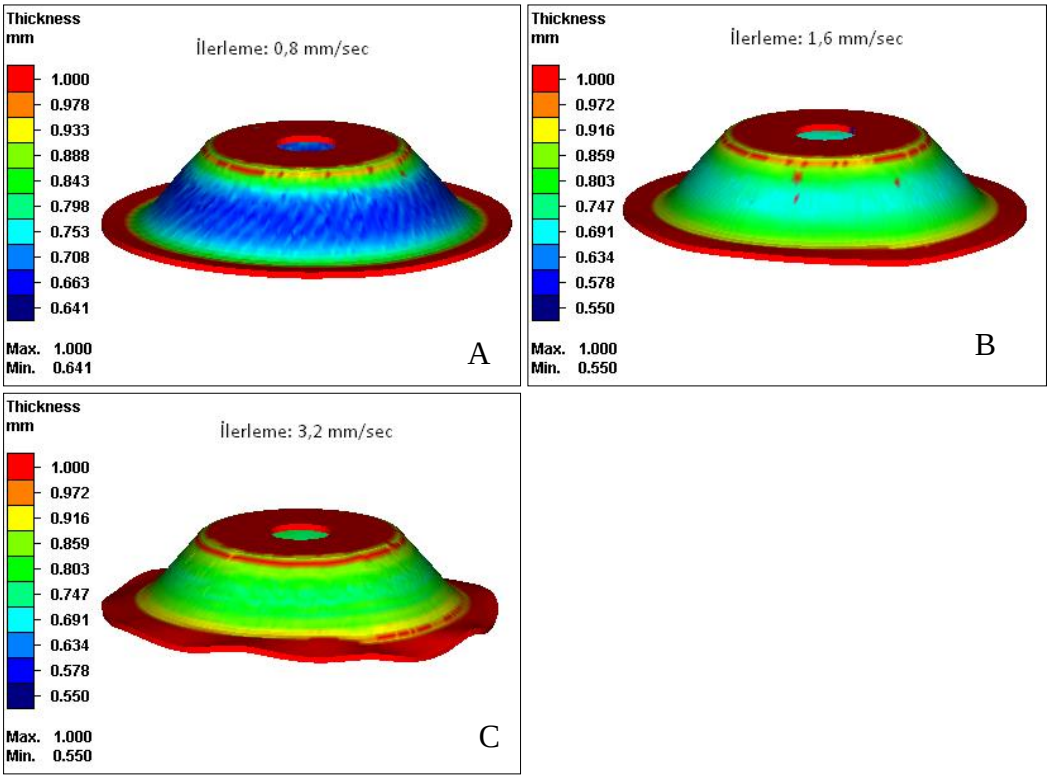


Şekil 5.4. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızlarındaki deformasyon sertleşmesi katsayısı

Soğuk şekillendirme sonucunda malzemelerin sertlik ve mukavemeti artarken, süneklik ve elektriksel iletkenliği azalır, tane büyüklüğü ise pek değişmez. Soğuk şekillendirme işlemlerinde deformasyon oranı arttıkça malzemenin kafes ve tane yapılarında meydana gelen çarpılma oranı ve dislokasyon yoğunluğu artar. Gerek çarpılma oranı gerekse dislokasyon yoğunluğunun artması hem dislokasyon, hem de elektron hareketlerini zorlaştırır. Dislokasyon hareketlerinin zorlaşması malzemelerin sertlik ve mukavemetinin artmasına neden olur. Soğuk deformasyon sonucunda malzemelerin sertlik ve mukavemetinin artması deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılır. Malzemelerin plastik deformasyon oranı arttıkça akma ve çekme mukavemetleri arasındaki fark azalır.

Şekil 5.4' incelendiğinde görülmektedir ki ilerleme hızı 0,8 mm/sn olan numunede deformasyon sertleşme oranı 0,68 (Şekil 5.4A) iken, 3,6 mm/sn ilerleme hızında deformasyon sertleşme oranı 0,56'dir (Şekil 5.4C). Bu durum, ilerleme hızı azaldıkça malzemenin deformasyon sertleşmesi oranının arttığını, dolayısıyla dislokasyon oranının arttığını ve dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasıyla malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasına sebep olduğunu göstermektedir. Yani düşük hızlarda iş parçası üzerinde yırtılmalar olma ihtimalinin yüksek hızlara göre daha az olacağı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.5'de değişik ilerleme hızlarında sac malzeme üzerindeki et kalınlığı değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.5. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızlarındaki kalınlık değişimleri

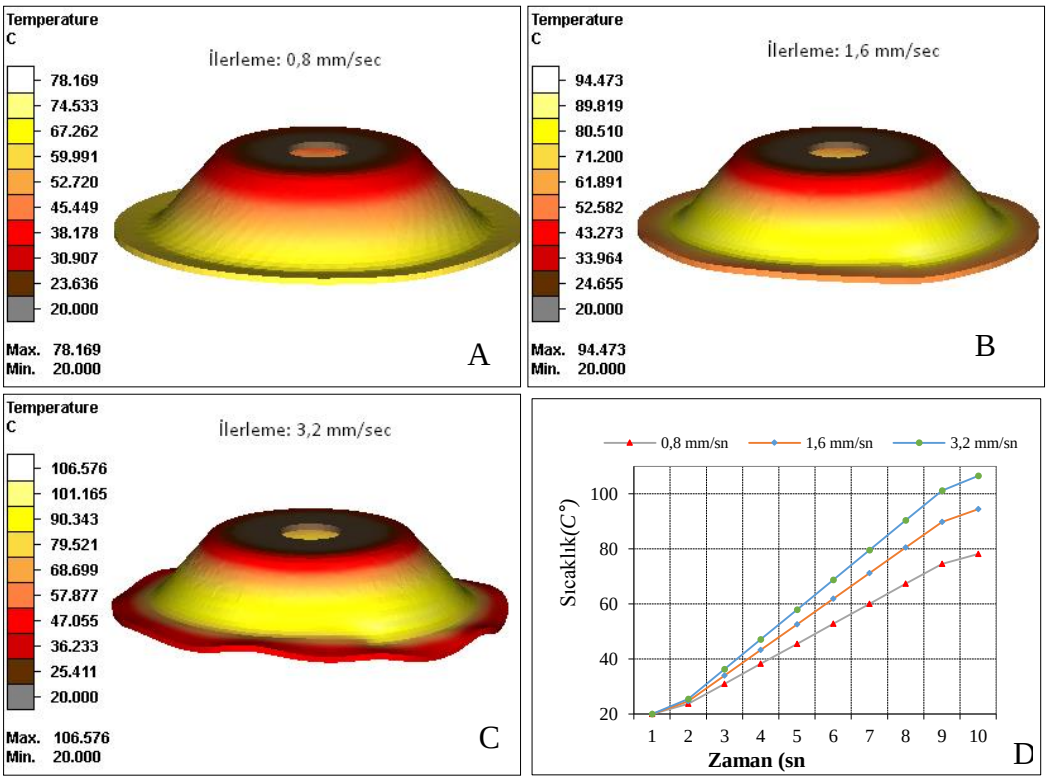
Şekil 5.5 incelendiğinde; ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak malzemelerdeki incelme farkının azaldığı görülmektedir. Bir sıvama işleminde sıvama parçasının et kalınlığına göre akma sınırına erişip erişmediği iş parçasının sıvanmadan önceki et kalınlığının sıvama açısının sinüsü ile çarpılarak pratik olarak hesaplanabilir [6].

$$T=T0 * \text{Sin}\ \alpha = 1 * \sin 60° = 0{,}86 \text{ mm [6]} \tag{5.1}$$

Yapılan hesaba göre analiz sürecinde iş parçasının plastik deformasyon sonrası kalınlığı 0,86 mm'dir. Bu değer akma sınırının başladığı en büyük noktayı ifade etmektedir Sac malzemeleri sıvama işleminde et kalınlığındaki azalmanın %60'oranını aşması durumunda ürün kalitesi ve parçanın cidar kalınlığının nihai kullanımdaki kuvvetleri karşılaması açısından tehlike sınırına yaklaştığını belirtir. Yani 1 mm kalınlığında bir parça için güvenli bölge olarak düşünülebilecek yerler 0,60 mm kalınlığının üzerindeki bölgelerdir. Şekil 5.5. incelendiğinde 0,8 mm/sn. ilerleme hızında parçanın büyük bir bölümünde mavi renk olarak görülen kısımlardaki et kalınlığı 0,64 mm (Şekil 5.5A), 1,6 mm/sn. ilerleme hızında parçanın

büyük bir kısmına hâkim olan yeşil bölgelerde et kalınlığı 0,69-0,74mm aralığında (Şekil 5.5B) ve 3,2 mm/sn. hızlarda parçanın büyük bir bölümüne hâkim olan yeşil bölgelerde et kalınlığı 0,74-0,85mm (Şekil 5.5C) aralığındadır. Bu da göstermektedir ki ilerleme hızı arttıkça malzemenin et kalınlığındaki değişim azalmaktadır. Düşük hızlardaki renk skalasında mavi bölgelerde yer yer yırtılmalar ve çatlamalar olma olasılığı görülmektedir.

Şekil 5.6'da değişik ilerleme hızlarında sac malzeme üzerindeki sıcaklık değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.6. SUS304 malzemesi için değişik ilerleme hızlarındaki sıcaklık değişimleri

Plastik Şekil değiştirmede sıcaklık seviyelerine bağlı olarak farklı şekil değiştirme mekanizmaları mevcuttur. Bunlar; Soğuk plastik şekil değiştirme, sıcak plastik şekil değiştirme ve ılık plastik şekil değiştirme olarak sınıflandırılır. Bu sıcaklık seviyeleri benzeş sıcaklık ile belirlenir. Benzeş sıcaklık (T_B) aşağıdaki formülle ifade edilir [2].

$$T_B = \frac{T_Ç\left(^oK\right)}{T_E\left(^oK\right)}$$

- T_E = Malzemenin erime sıcaklığı
- $T_Ç$ = Çalışma sıcaklığı

(5.2)

Eş. 5.2'ye göre;

$0 < \boldsymbol{T_B} < 0{,}25$: Soğuk şekil değişimi

$0{,}25 < \boldsymbol{T_B} < 0{,}5$: Ilık şekil değişimi

$0{,}5 < \boldsymbol{T_B} < 1$: Sıcak şekil değişim aralıkları olarak tanımlanmıştır [2].

SUS304 malzemesinin sıvama işlemi anındaki sıcaklık değerleri incelendiğinde, yüksek ilerleme hızındaki (3,2 mm/sn) malzeme sıvanırken oluşan sıcaklık değerlerinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. 0,8 mm/sn ilerleme hızında en büyük sıcaklık değeri 78 C° olarak görülürken (Şekil 5.6A) bu değer 1,6 mm/sn ilerleme hızında 94 C° (Şekil 5.6B), 3,2 mm/sn ilerleme hızında ise 106 C° (Şekil 5.6C) olarak görülmektedir. Bu durum ilerleme hızı arttıkça artan sürtünme kuvvetiyle açıklanabilir.

SUS304 malzemesinin ergime noktası (melting point) 1300-1450C° arasındadır. Bu değerlere göre benzeş sıcaklık değeri hesaplandığında soğuk şekil değişimi bölgesine olduğu görülür. Tüm değerlerin soğuk şekil değişimi bölgesinde ve birbirine yakın değerlerde olması, bir soğuk şekillendirme yöntemi olan sıvama işleminde oluşan ısının malzeme üzerinde kalıcı deformasyonun oluştuğu sıcaklık bölgelerine ulaşmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak tüm grafikler birlikte değerlendirilecek olursa ilerleme hızı arttıkça iş parçası üzerindeki yüzey gerilmelerinin azaldığı, buna bağlı olarak malzeme deformasyon oranının azaldığı ve sürtünmenin artması sonucu malzemenin sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde düşük ilerleme hızlarında malzemenin et kalınlığı değişim fazla olmasına rağmen güvenli sınırlar içerisinde olması durumunda iş parçası üzerinde yırtılmalar olma ihtimalinin yüksek hızlara göre daha az olacağı anlaşılmaktadır. Bu yüzden hassas şekilli ve boyutlu parçaların sıvanması işleminde düşük ilerlemeler seçilmelidir. Çünkü deformasyon miktarı arttığı için malzemenin geri esnemesi azalarak ölçüsel tamlık sağlamak daha kolay olmaktadır. Fakat düşük hızlarda ilerleme değeri belirlenmesi parçanın et kalınlığını azaltacaktır. Bununla birlikte istenmeyen bir durum olarak parça üzerinde dairesel izler meydana gelecek ve geri esneme daha fazla olacaktır. Bu geri esneme ve dairesel izlerin önüne geçmek için ilerleme hızı azaltılıp sıvama diskinin uyguladığı baskı kuvveti artırılabilir.

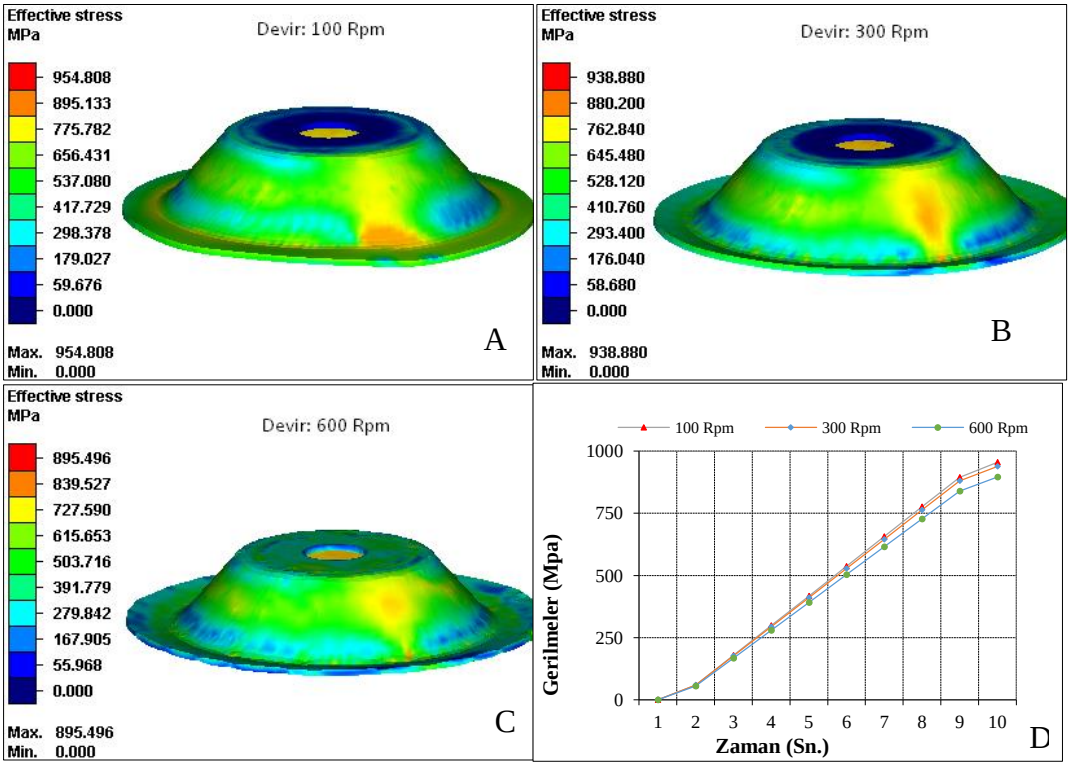
5.2. Devir Sayısının Etkilerinin Değerlendirilmesi

Devir sayısının etkilerini belirlemek amacıyla 100, 300 ve 600 dev/dk olmak üzere üç farklı devirde analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda sac malzeme üzerindeki gerilmeler, gerinmeler, yüzey deformasyonu, et kalınlığı değişimi ve parça üzerindeki sıcaklık dağılımı gibi değerler incelenmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak seçilen parametrelerin sıvama işlemi üzerindeki etkisi yorumlanmıştır. Analiz süresince sabit tutulan değerler Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

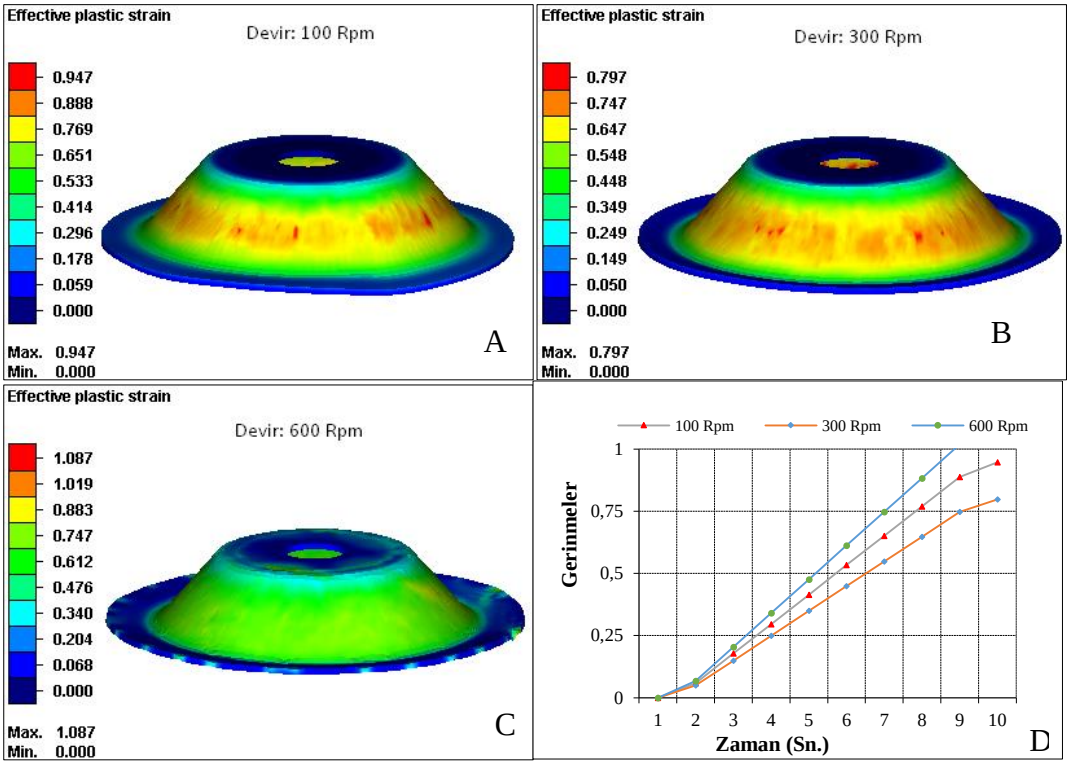
Çizelge 5.3. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu

Sac malzeme başlangıç çapı	60 mm
Saç kalınlığı	1 mm
İlerleme hızı	1,6 mm/sn.
Ortam sıcaklığı	25 °C
Devir sayısı	-
Kullanılan malzeme	SUS304 (paslanmaz Çelik)
Mesh aralığı	0,8 mm

Şekil 5.7. ve Şekil 5.8'de değişik devir sayılarında sac malzeme üzerinde yüzey gerilme ve yüzey gerinim değerlerindeki değişimler görülmektedir.



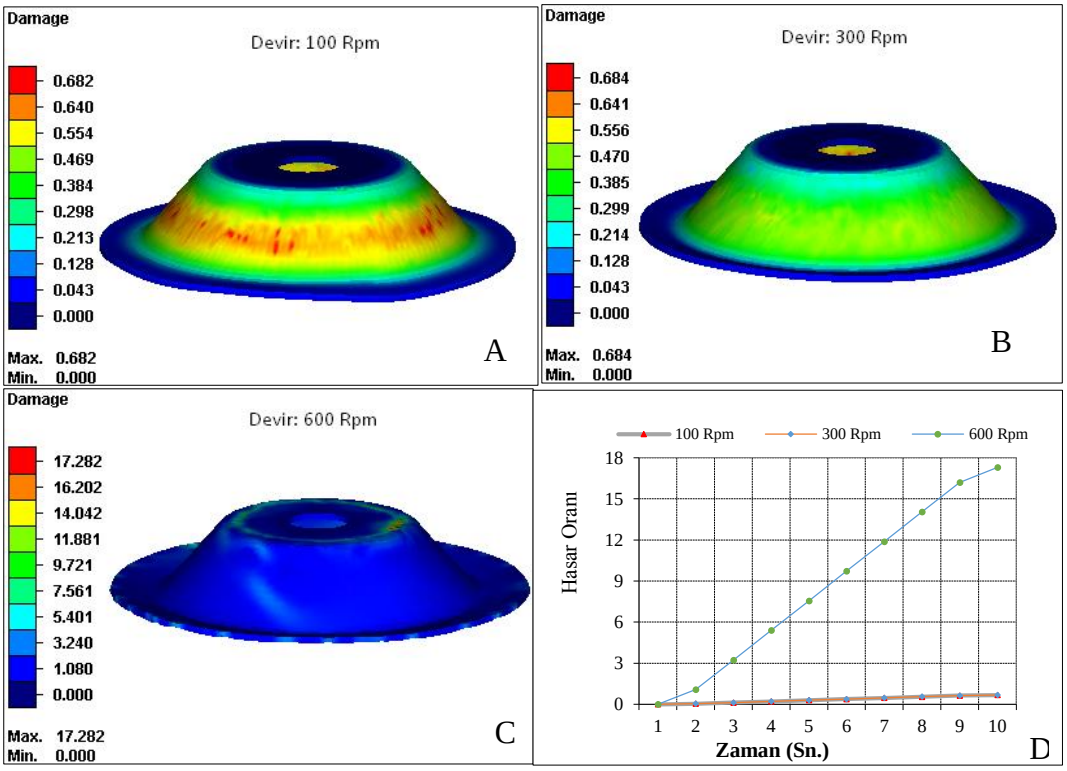
Şekil 5.7. SUS304 malzemesi için değişik devir sayılarındaki gerilmeler



Şekil 5.8. SUS304 malzemesi için değişik devir sayılarındaki gerinimler

Şekil 5.7. incelendiğinde sıvama sonrası iş parçasında oluşan gerilme değerleri görülmektedir. Devir sayısı 100 dev/dk olması durumunda parça yüzeyine hâkim olan yeşil bölgelerde gerilmeler 537-656 Mpa (Şekil 5.7A), 300 dev/dk olması durumunda 526-645 Mpa (Şekil 5.7B), 600 dev/dk olması durumunda 503-615 Mpa (Şekil 5.7C) olarak görülmektedir. Şekil 5.8'de yüzey gerinim değerleri incelendiğinde birim alandaki en büyük uzamanın yüzeydeki hâkim olan renk dağılımına göre en fazla devir sayısı 100 dev/dk olan parçada meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.8A).

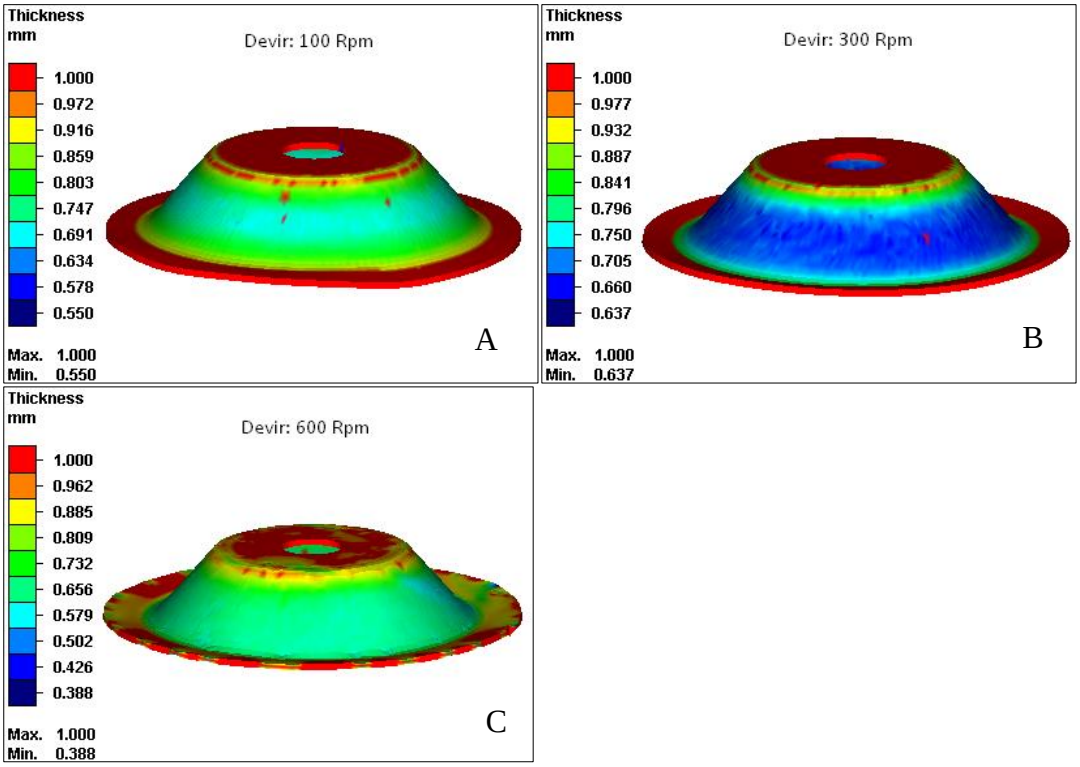
Şekil 5.9'da değişik devir sayılarında sac malzeme üzerindeki yüzey deformasyon oranları görülmektedir.



Şekil 5.9. SUS304 Malzemesi için değişik devir sayılarındaki yüzey deformasyon oranı

Şekil 5.9 incelendiğinde devir sayısı 100 ve 300 dev/dk olan numunelerde en büyük yüzey deformasyon oranı 0,68 civarlarında olduğu görülerek birbirine çok yakın değerler tespit edilmiştir (Şekil 5.9AB). Devir sayısı 600 dev/dk olması durumunda yüzey deformasyon oranı 17,282 (Şekil 5.9A) gibi aşırı yüksek değerlere çıktığı ve en büyük noktasının da sıvama diski ile sac malzeme arasında değil de sac malzeme ile mandrelin birbirine sıkıştırıldığı ara baskı parçasının temas noktası üzerinde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum çok yüksek devir sayılarının tercih edilmesi durumunda sıvama işlemine başlamadan mandrel ve dayama noktasında iş parçasının yırtılması sonucunu doğurmaktadır.

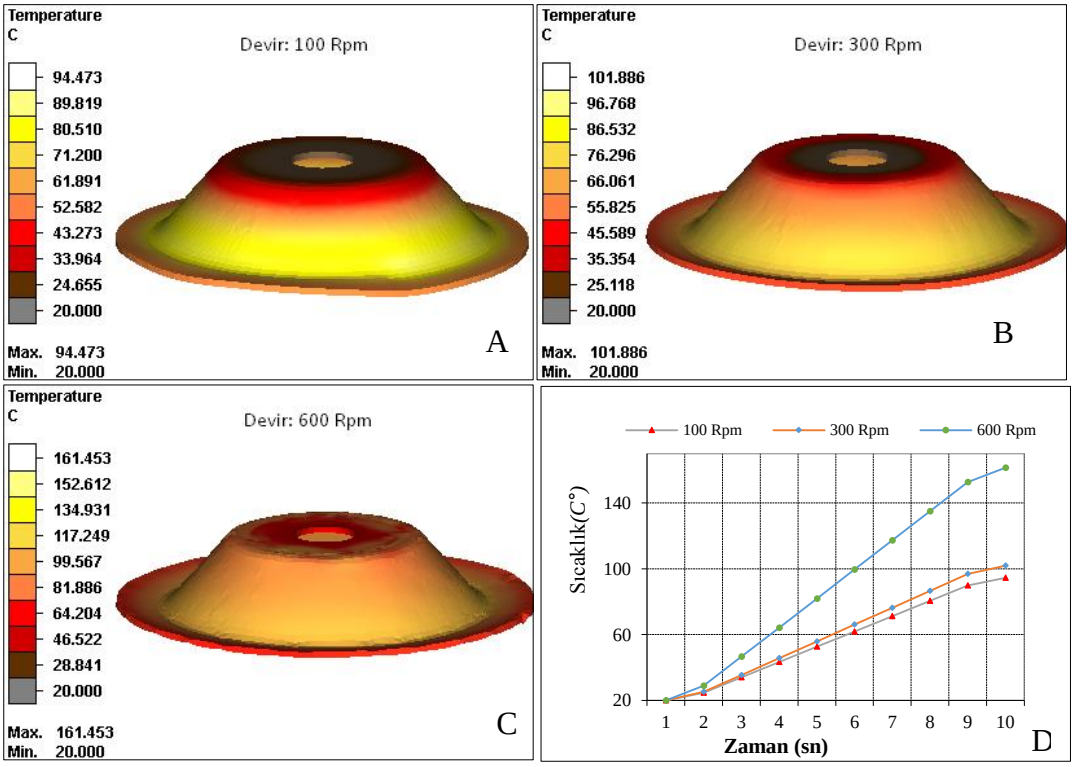
Şekil 5.10'da değişik devir sayılarında sac malzeme üzerindeki et kalınlığı değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.10. SUS304 Malzemesi için değişik devir sayılarındaki kalınlık değişimleri

Şekil 5.10. incelendiğinde devir sayısındaki artışa bağlı olarak sac malzeme et kalınlığındaki incelme farkının azaldığı görülmektedir. 100 dev/dk ve 300 dev/dk hızlarda parça yüzeyindeki hâkim renkte olan bölgelerde en büyük et kalınlığı 0,7-0,8 mm olarak görülmektedir (Şekil 5.10AB). Sac malzemeleri sıvama işleminde et kalınlığındaki azalmanın %60'oranını aşması durumunda tehlike sınırı aşılmış olmaktadır [2]. Bu değerler 0,75-0,80 mm arasında olduğundan tam sınırda olup güvenilir bölgededir. 600 dev/dk hızda (Şekil 5.10C) görülen 0,368 mm'lik et kalınlığı değeri sıvama bölgesinde olmayıp, mandrelin sac malzeme ile temas noktasındaki kesmeden meydana gelmektedir. Bu değerden de o bölgede bir yırtılma olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Bu da göstermektedir ki devir sayısı malzemenin et kalınlığındaki değişimi çok fazla etkilememektedir. Devir sayısının fazla olmasındaki en büyük etki, mandrelin iş parçasına temas noktasında meydana gelerek bu bölgede kesmeye sebep olmaktadır.

Şekil 5.11'de değişik devir sayılarında sac malzeme üzerindeki sıcaklık değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.11. SUS304 malzemesi için değişik devir sayılarındaki sıcaklık değişimleri

Şekil 5.11. incelendiğinde yüksek devir sayılarındaki (600 dev/dk) sıvama işleminde oluşan sıcaklık değerlerinin diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. 100 dev/dk devirde en büyük sıcaklık değeri 94 C° olarak görülürken (Şekil 5.11A), bu değer 300 dev/dk devirde 101 C° (Şekil 5.11B), 600 dev/dk devirde ise 161 C° (Şekil 5.11C) olarak görülmektedir. Bu durum devir sayısı arttıkça artan sürtünme kuvvetiyle açıklanabilir [1].

Sonuç olarak, tüm grafikler birlikte değerlendirilecek olursa devir sayısı arttıkça iş parçasındaki yüzey gerilmelerinin azaldığı, malzeme yüzeyinin deformasyon oranları arasındaki farkın azaldığı ve sürtünmenin artması sonucu malzemenin sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Devir sayısının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda iş parçası, mandrel ve baskı plakası temas noktasında akma sınırının aşılarak o bölgede kesme ve yırtılma meydana geldiği, belirli bir seviyeye kadar devir sayısının artırılmasının yüzey deformasyonu ve et kalınlığındaki değişim açısından önemli bir etkisinin bulunmadığı anlaşılmıştır.

5.3. Kullanılan Malzemenin Etkilerinin Değerlendirilmesi

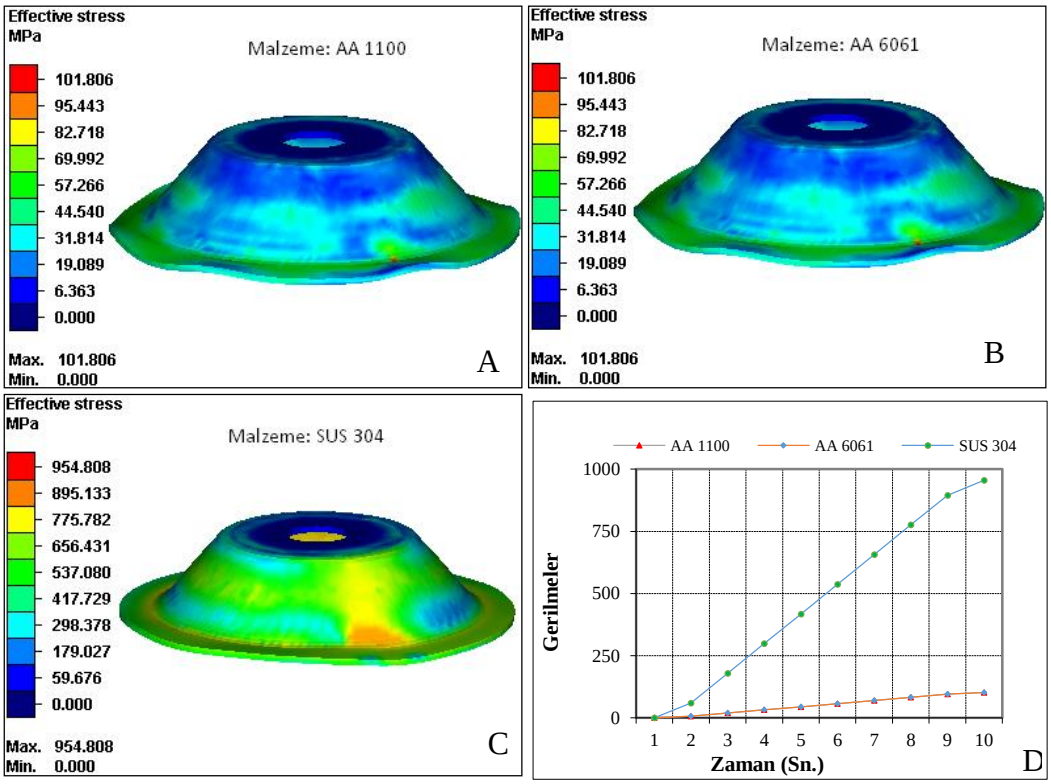
Sıvama işleminde iş parçası olarak tercih edilen malzeme çeşidinin etkilerini belirlemek amacıyla AA1100, AA6061 alüminyum ve SUS304 paslanmaz çelik olmak üzere sektörde sıvama işlemlerinde sıklıkla tercih edilen üç farklı malzeme tipi seçilerek analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda sac parça üzerindeki gerilmeler, gerinmeler, yüzey deformasyon oranı, et kalınlığı değişimi, parça üzerindeki sıcaklık dağılımı gibi değerler incelenmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak seçilen parametrelerin sıvama işlemi üzerindeki etkisi yorumlanmıştır. Analiz süresince sabit tutulan değerler Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu

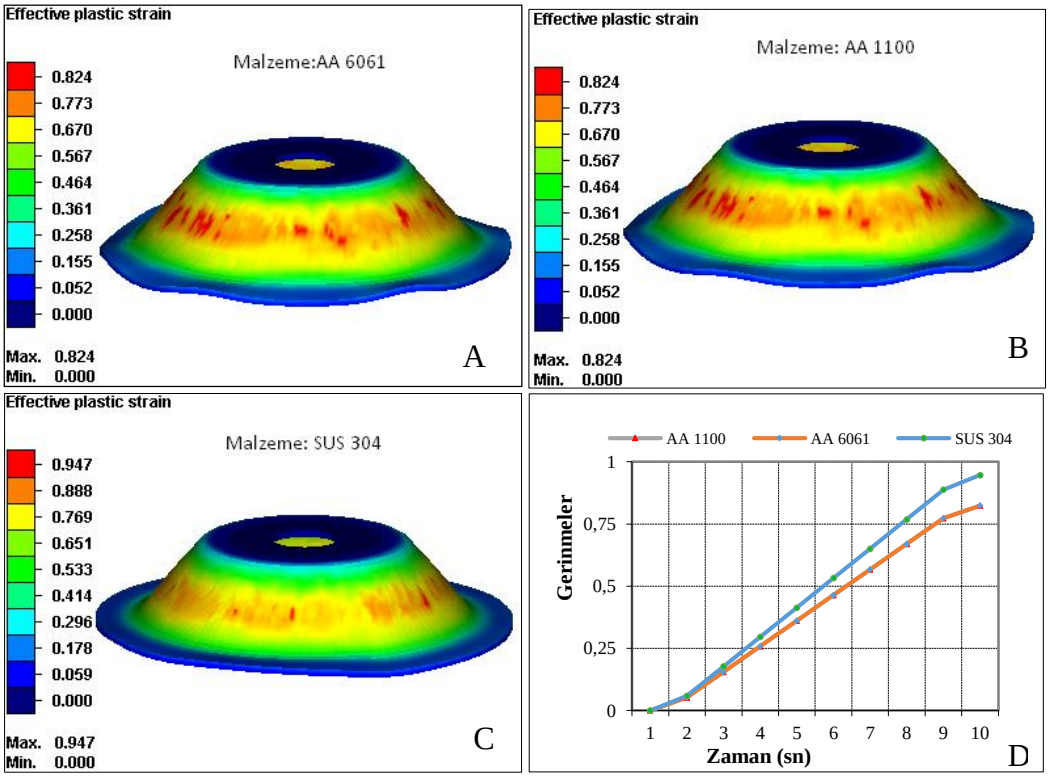
Sac malzeme başlangıç çapı	60 mm
Sac kalınlığı	1 mm
İlerleme hızı	1,6 mm/sn.
Ortam sıcaklığı	25 °C
Devir sayısı	100 dev/dk
Kullanılan malzeme	-
Mesh aralığı	0,8 mm

Alüminyum ile karşılaştırıldığında, paslanmaz çelik malzemelerin geleneksel sıvama işlemlerinde çarpılma ve kırışıklık hatalarına karşı dayanımı açısından daha fazla yeteneği vardır. Çelik alüminyuma göre daha rijit bir malzemedir. Belirli bir gerilim için alüminyum çelikten üç kez fazla elastik olarak deforme olur. Plastik deformasyon bölgesi geniş olan malzemeler dövülebilir ve/veya sünek (çekilebilir) malzemelerdir.

Şekil 5.12. ve Şekil 5.13'de sıvama sonrası iş parçasında oluşan en büyük ve en küçük gerilme ve gerinim değerleri gösterilmiştir. Böylece iş parçasında oluşan en büyük gerilme ve gerinim bölgeleri rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.



Şekil 5.12. Farklı malzeme türleri için aynı ilerleme hızındaki yüzey gerilmeleri

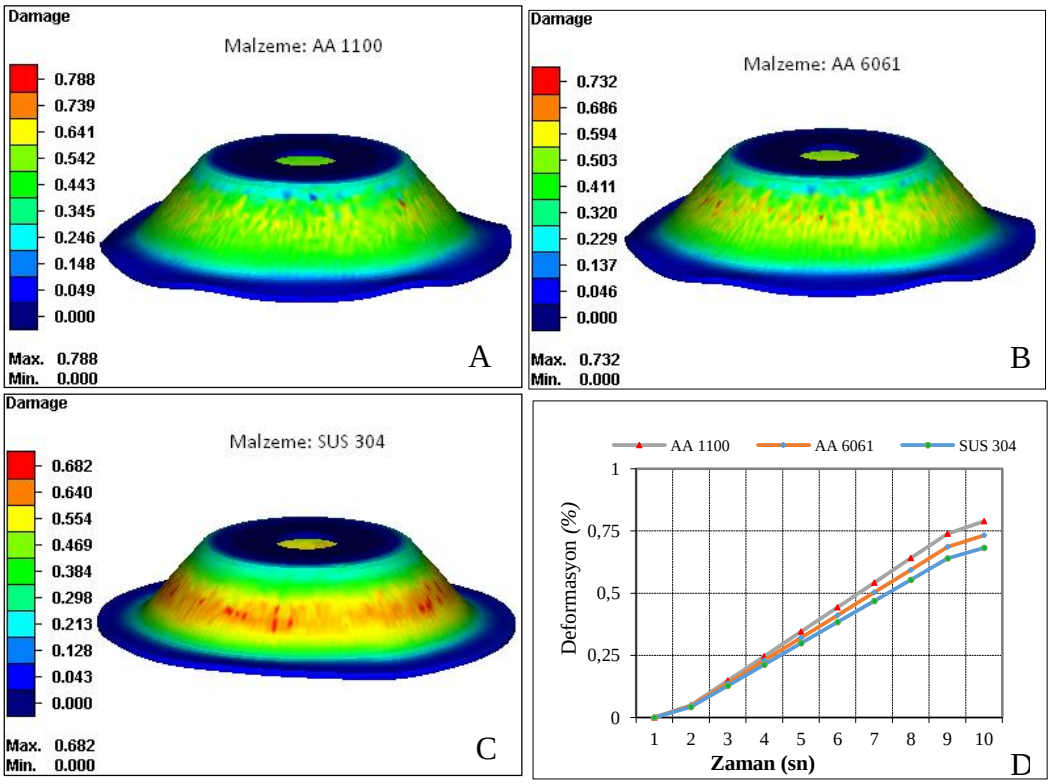


Şekil 5.13. Farklı malzeme türleri için aynı devir sayısındaki yüzey gerinimleri

Şekil 5.12. incelendiğinde; AA1100 ve A6060 alüminyum malzemelerde yüzey gerilmeleri parça yüzeyine hâkim olan mavi bölgelerde 19-32 Mpa aralığında olduğu görülmektedir

(Şekil 5.13AB). İki farklı alüminyum malzemesinde sonuçların hemen hemen aynı olması malzemelerinin mekanik özelliklerinin aynı olmasından kaynaklanmaktadır. İki malzeme arasında sadece termal özelliklerinde fark vardır. Bu termal özelliklerdeki fark da sıvama işlemindeki parametreleri etkilememektedir. SUS304 malzemesindeki yüzey gerilmeleri parça yüzeyine hâkim olan yeşil bölgelerde 537-656 MPa arasında olduğu görülmektedir (Şekil 5.13C). Bu durumda malzemenin sertliği arttıkça yüzey gerilmelerinin de arttığı anlaşılmaktadır. Oluşan en büyük gerilme ise sıvama diskinin parça yüzeyine temas bölgesinde meydana gelmektedir. Şekil 5.13'deki yüzey gerinim değerleri incelendiğinde; birim alandaki en büyük uzamanın SUS304 paslanmaz çelik malzemesinde parça yüzeyindeki kırmızı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.13C).

Şekil 5.14'de değişik malzeme tiplerinde sac malzeme üzerindeki yüzey deformasyon oranları görülmektedir.

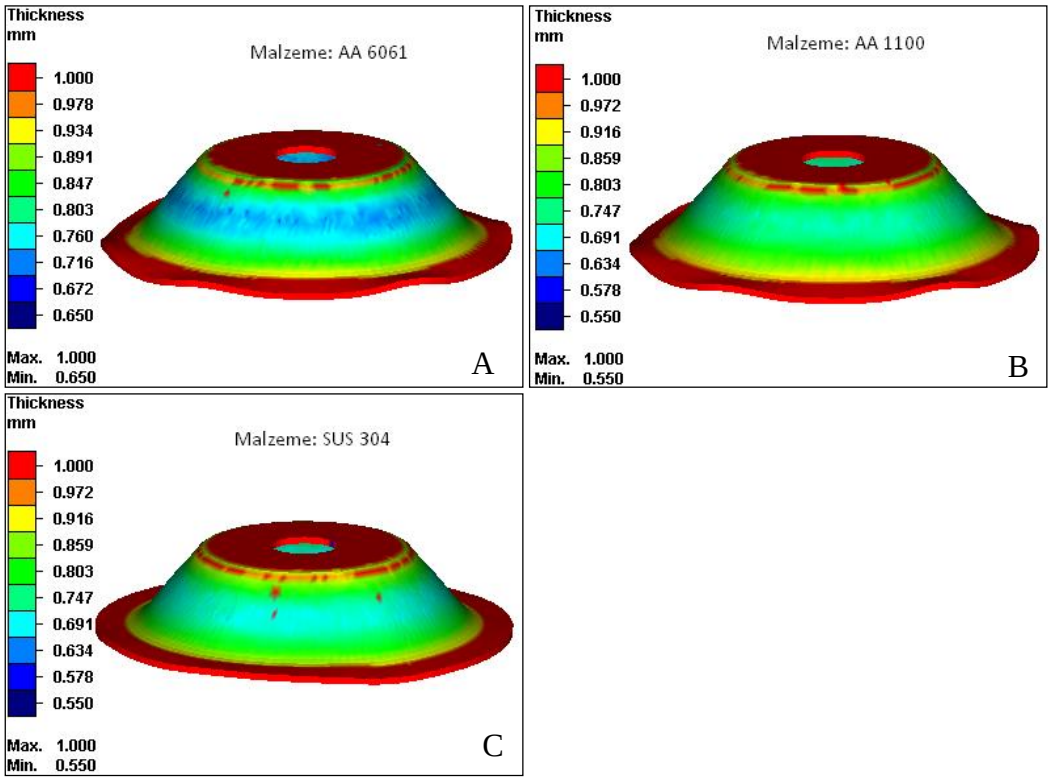


Şekil 5.14. Farklı malzeme türleri için yüzey deformasyon oranı

Şekil 5.14. incelendiğinde görülmektedir ki alüminyum malzemelerde deformasyon sertleşme oranı parça yüzeyine hâkim olan yeşil bölgelerde 0,34-0,54 arasında değişmektedir (Şekil 5.14AB). Paslanmaz çelik malzemede ise deformasyon sertleşme oranının parçanın kırmızı ve sarı bölgelerinde 0,55-0,68 arasında olduğu gözlenmektedir

(Şekil 5.14C). Bu durum, malzemenin sertliği arttıkça deformasyon sertleşmesi oranının arttığını, dolayısıyla dislokasyon oranının arttığını ve dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasıyla malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasına sebep olduğunu göstermektedir. Yani sert malzemelerde iş parçası üzerinde yırtılmalar olma ihtimalinin yumuşak malzemelere göre göre daha az olacağı anlaşılmaktadır.

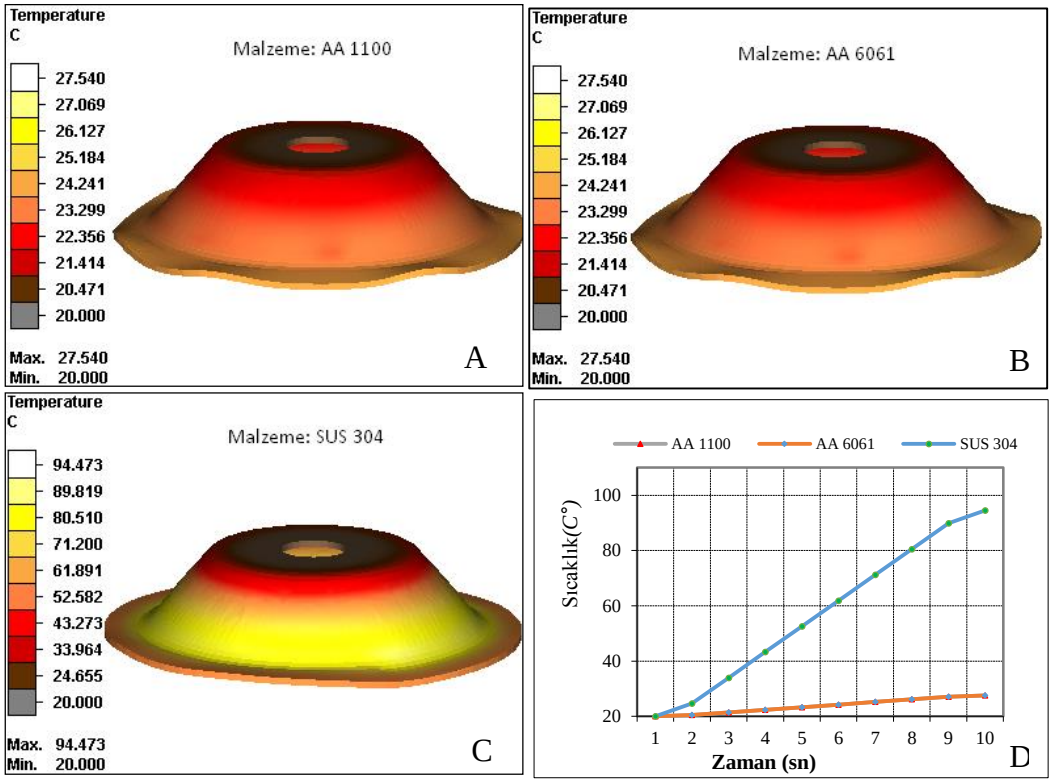
Şekil 5.15'de değişik malzeme tiplerinde sac malzemenin et kalınlığı değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Farklı malzeme türleri için et kalınlığı değişimleri

Şekil 5.15. incelendiğinde AA6061 malzemesinde mavi bölgelerde et kalınlığının 0,65-0,76 mm arasında (Şekil 5.15A), AA1100 malzemesinde yeşil bölgelerde 0,69-0,74 mm arasında (Şekil 5.15B) birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. SUS304 malzemesinde yüzeye hâkim olan yeşil bölgelerde 0,74-0,85 mm arsıdadır (Şelik5.15C). Bu da göstermektedir ki sertlik arttıkça malzemenin et kalınlığındaki değişim azalmaktadır. Dolayısıyla SUS304 malzemesi ölçüsel tamlık ve şekil hassasiyeti bakımından alüminyum malzemelere göre daha fazla hassasiyet göstermektedir. Yumuşak malzemelerde et kalınlığı azalması sert malzemelere göre daha fazla olsa da 0,6 mm üzerindeki güvenli bölgelerde olduğu için yırtılma oluşması gözlenmemektedir.

Şekil 5.16'da değişik malzeme tiplerinde sac malzeme üzerindeki sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Farklı malzeme türleri için yüzey sıcaklık dağılımları

Şekil 5.16. incelendiğinde sıvama işlemi anındaki sıcaklık değerleri alüminyum malzemelerde aynı olduğu görülmektedir. Bu parçalarda gözlenen en büyük sıcaklık değeri 27C°'dir (Şekil 5.16B). SUS304 paslanmaz çelik malzemesinde görülen en büyük sıcaklık değeri ise 94 C°'dir (Şekil5.16C). Bu durum sertlik arttıkça artan sürtünme kuvvetiyle açıklanabilir. Bu değerlere göre benzeş sıcaklık değeri hesaplandığında parçaların soğuk şekil değişimi bölgesine olduğu görülür. Tüm değerlerin soğuk şekil değişimi bölgesinde olması, bir soğuk şekillendirme yöntemi olan sıvama işleminde oluşan ısının malzeme üzerinde çok fazla etkisinin olmadığının bir göstergesidir.

5.4. Sac Malzeme Et Kalınlığının Etkilerinin Değerlendirilmesi

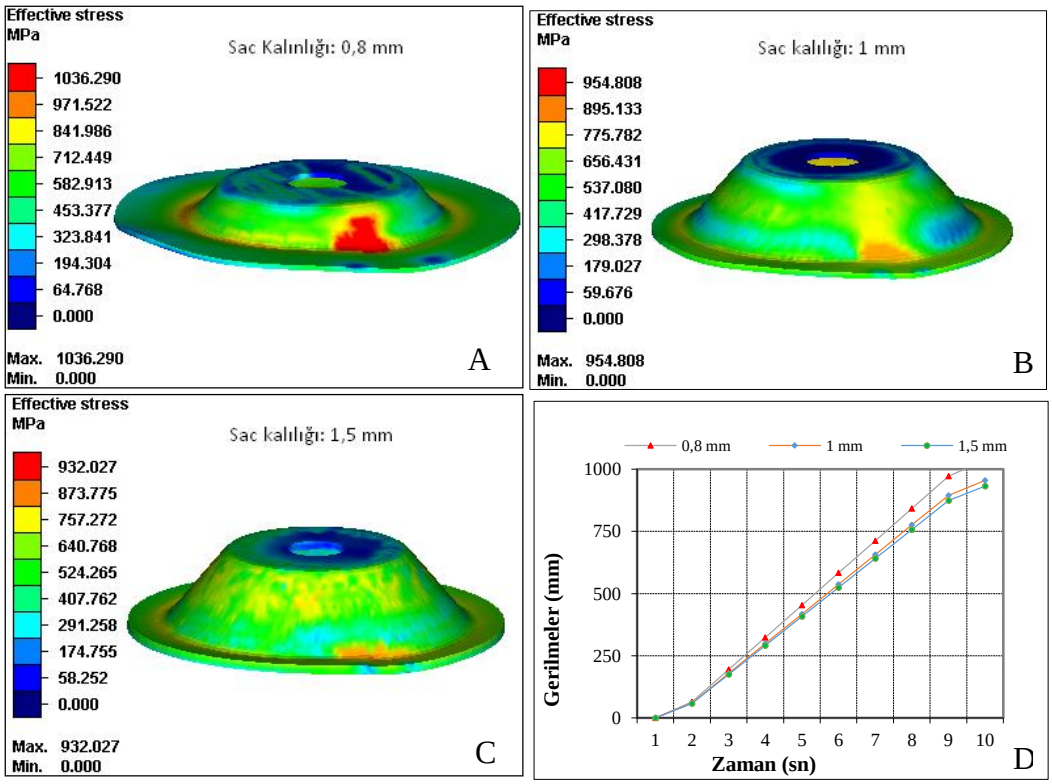
Sıvama işleminde iş parçası olarak tercih edilen malzemenin et kalınlığının etkilerini belirlemek amacıyla 0,8 mm, 1,0 mm ve 1,5 mm olmak üzere üç farklı et kalınlığı değerleri belirlenerek analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda sac parça üzerindeki gerilmeler, gerinmeler, yüzey deformasyon oranı, et kalınlığı değişimi, parça üzerindeki sıcaklık

dağılımı gibi değerler incelenmiştir. Bu grafiklerden yola çıkarak seçilen parametrelerin sıvama işlemi üzerindeki etkisi yorumlanmıştır. Analiz süresince sabit tutulan değerler Çizelge 5.5'de gösterilmiştir.

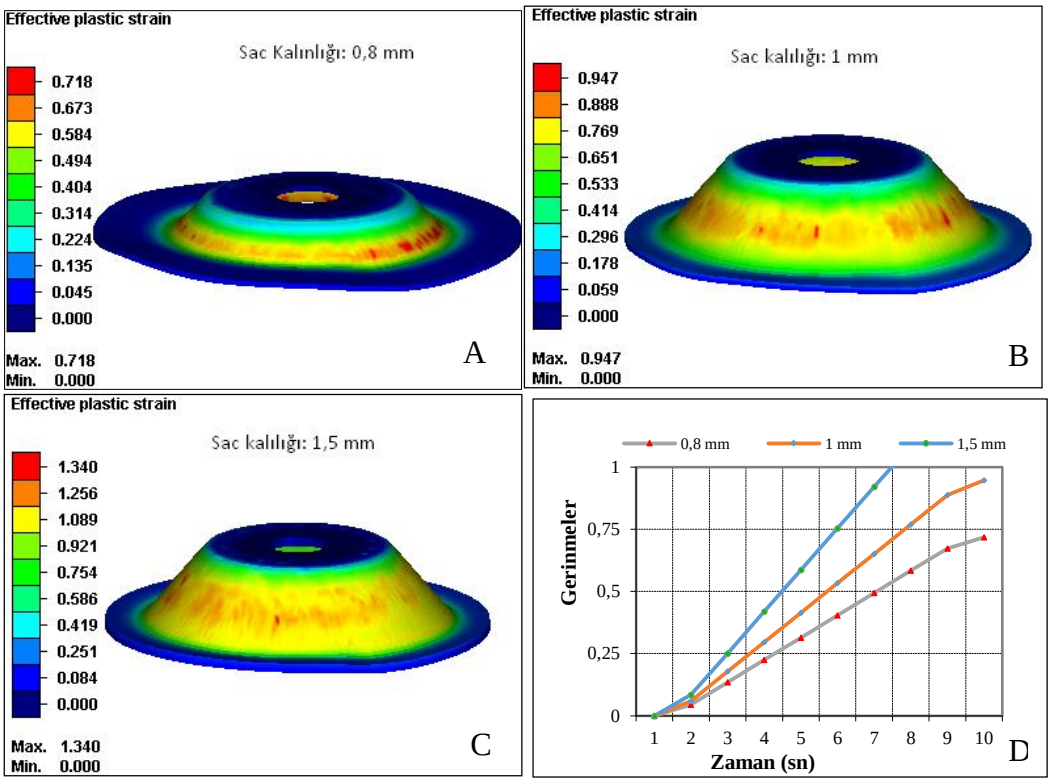
Çizelge 5.5. Sıvama işlemine etki eden parametrelere ait analiz veri tablosu.

Sac malzeme başlangıç çapı	60 mm
Saç kalınlığı	1 mm
İlerleme hızı	1,6 mm/sn.
Ortam sıcaklığı	25 °C
Devir sayısı	100 dev/dk.
Kullanılan malzeme	-
Mesh aralığı	0,8 mm

Şekil 5.17. ve Şekil 5.18'de sac malzeme üzerindeki yüzey gerilmeleri ve birim alandaki en büyük uzama bölgeleri gösterilmektedir.



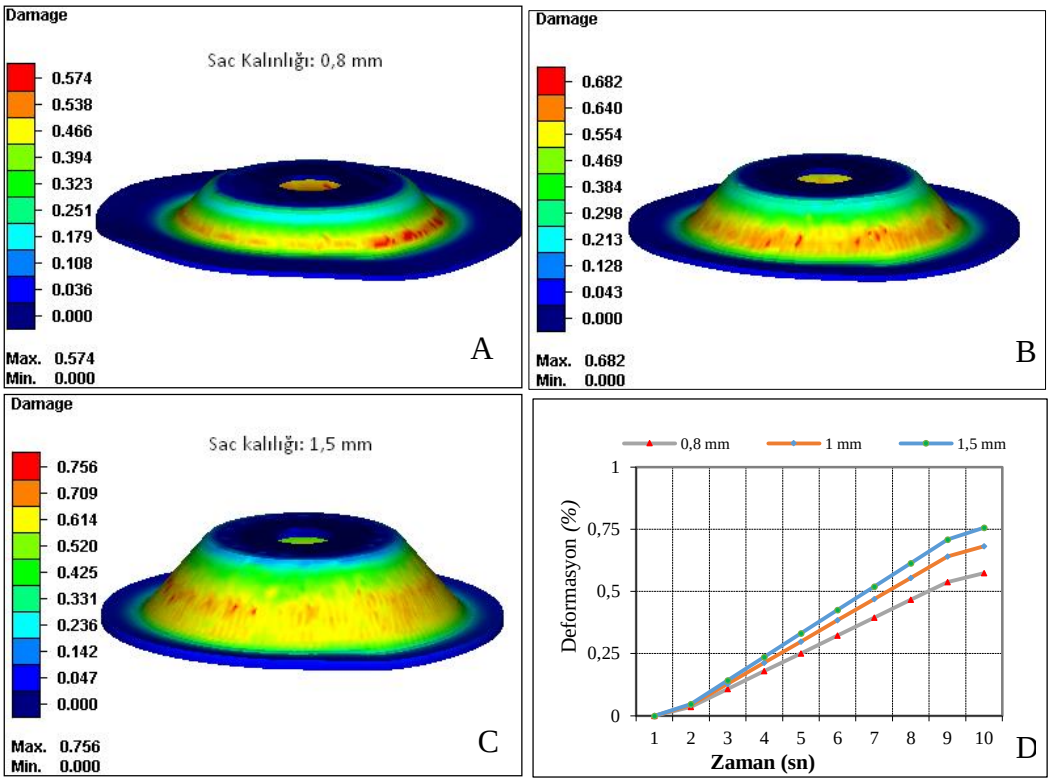
Şekil 5.17. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki yüzey gerilmeleri



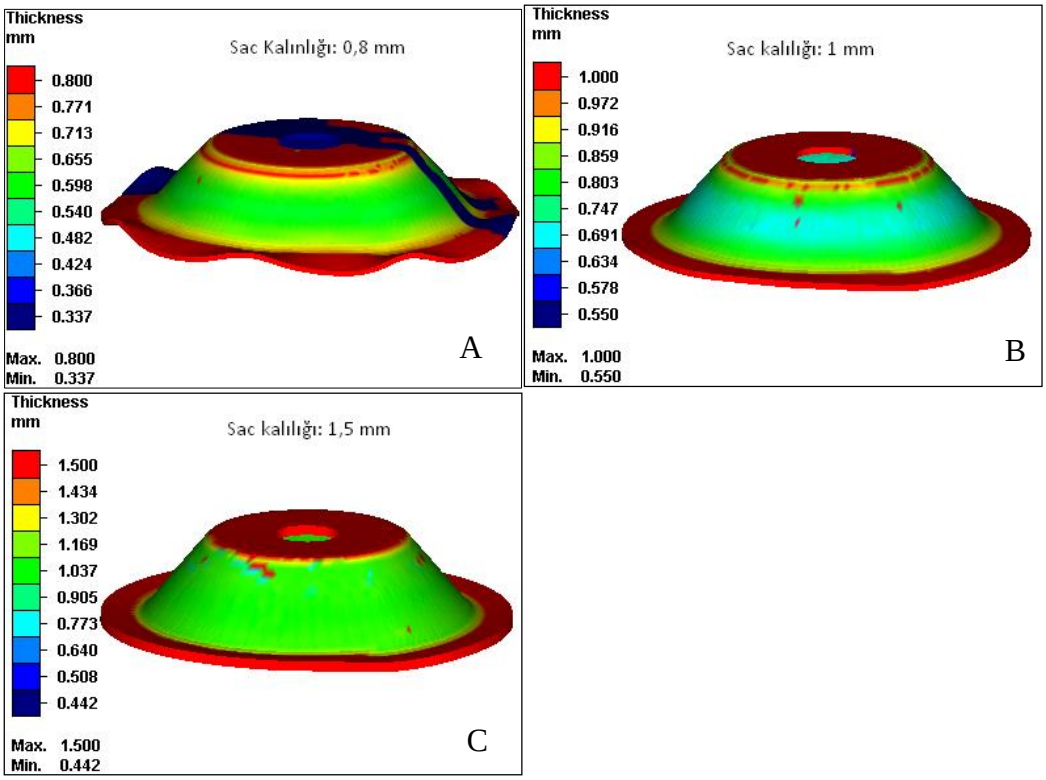
Şekil 5.18. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki yüzey gerinmeleri

Şekil 5.17. incelendiğinde sıvama diski temas noktasına oluşan en büyük yüzey gerilmeleri 0,8 mm sac kalınlığında 1036 Mpa (Şekil 5.18A), sac kalınlığı 1 mm olması durumunda 895 Mpa (Şekil 5.18B), sac kalınlığı 1,5 mm olan parçada ise 873 Mpa (Şekil 5.18C) olduğu görülmektedir. Bu durumda et kalınlığı arttıkça yüzey gerilmelerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Oluşan en büyük gerilme ise sıvama diskinin parça yüzeyine temas bölgesinde meydana gelmektedir. Şekil 5.18'deki yüzey gerinim değerleri incelendiğinde birim alandaki en büyük uzamanın en fazla 1,5 mm et kalınlığında (Şekil 5.18C), parça yüzeyindeki kırmızı bölgelerde meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 5.19'da değişik et kalınlıklarında sac malzeme üzerindeki yüzey deformasyon oranları ve Şekil 5.20'de et kalınlıklarındaki değişimler gösterilmiştir.



Şekil 5.19. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki deformasyon oranı.

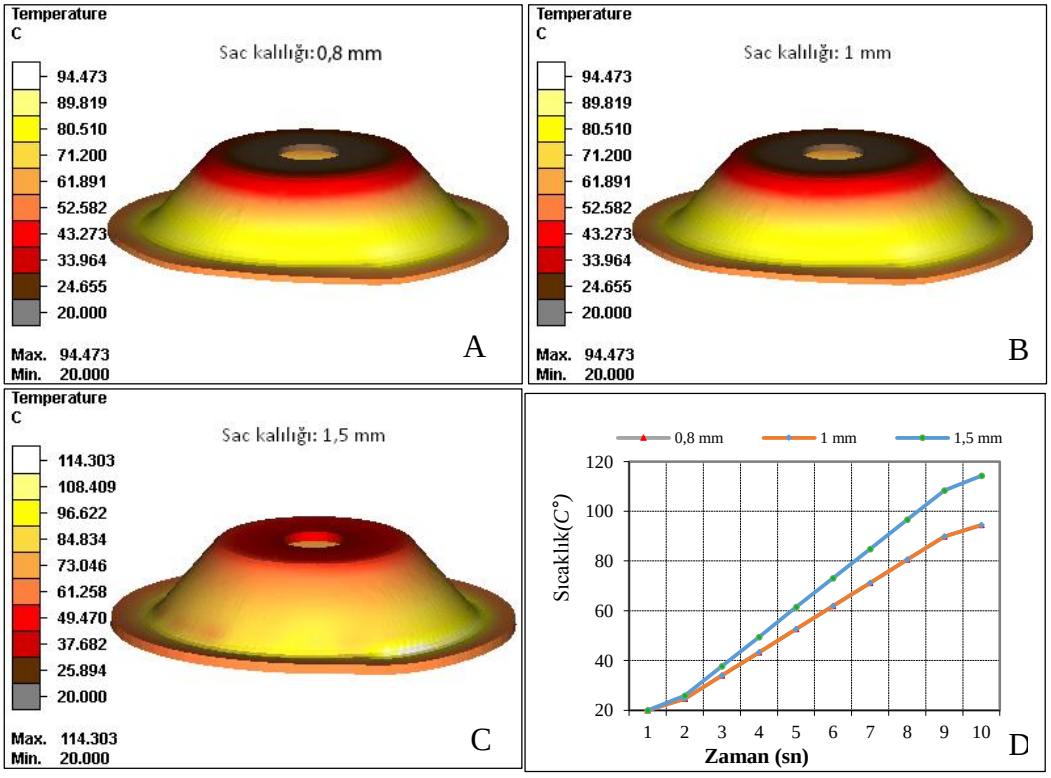


Şekil 5.20. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki incelmeler

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 birlikte incelendiğinde, et kalınlığı 0,8 mm olan numunede deformasyon sertleşme oranı 0,57 iken (Şekil 5.20A), 1,0 mm et kalınlığında deformasyon

sertleşme oranı 0,68 (Şekil 5.20B) ve 1,5 mm et kalınlığında ise deformasyon sertleşme oranının 0,75 (Şekil 5.20C) olduğu görülmektedir. Bu durum, et kalınlığı arttıkça malzemenin deformasyon sertleşmesi oranının arttığını, dolayısıyla dislokasyon oranının arttığını ve dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasıyla malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasına sebep olduğunu göstermektedir. Şekil 5.20A'da 0,8 mm'lik numunenin et kalınlığının 0,33 mm'ye kadar düştüğü görülmektedir ve sıvama bölgelerinde et kalınlığı değişimi homojen değildir. Bu durum sac malzemenin bazı bölgelerinde güvenli et kalınlığı sınırının aşıldığını ve özellikle disk temas noktalarında yırtılma meydana gelme ihtimalinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.21'de değişik et kalınlıklarında sac malzeme üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 5.21. SUS304 malzemesi için değişik et kalınlıklarındaki sıcaklık dağılımları

Şekil 5.21. incelendiğinde sıvama işlemi anındaki sıcaklık değerlerinin 0,8 mm ve 1,0 mm et kalınlığındaki malzemelerde aynı değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 5.21AB). Parçalarda gözlenen en büyük sıcaklık değeri 1,5 mm et kalınlığında 114,373 C°'dir (Şekil 5.21C). Bu durum sac malzeme et kalınlığı arttıkça artan sürtünme kuvveti ve sıvama diski temas kesiti ile açıklanabilir. Bu değerlere göre benzeş sıcaklık değeri hesaplandığında

parçaların soğuk şekil değişimi bölgesinde olduğu görülür. Tüm değerlerin soğuk şekil değişimi bölgesinde olması, bir soğuk şekillendirme yöntemi olan sıvama işleminde oluşan ısının malzeme üzerinde ölçü tamlığı ve yüzey kalitesine etkisinin olmadığının bir göstergesidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sıvama işlemine etki eden ilerleme hızı, devir sayısı, malzeme türü, sac malzeme et kalınlığı gibi parametreler sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş, bu parametrelerin sıvama kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel yollarla elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında sıvama işlemlerindeki problemlerin çözümünde sonlu elemanlar yönteminin kullanılabileceği görülmüştür.
- Yapılan analizler süresince en uygun değerleri belirlemeye çalışırken ortaya çıkan değerlerin karşılaştırılmasıyla sonlu elemanlar yönteminde örgü sayısı, örgü tipi ve ölçüsünün analiz sonuçlarını önemli oranda etkilediği söylenebilir.
- İlerleme hızının arttırılması ile elde edilen analiz sonuçlarına göre iş parçası üzerindeki eksenel kuvvetler ve momentlerin arttığı görülmüştür. Ayrıca ilerleme hızının arttırılması durumunda sıvama kuvvetlerinde artış meydana geldiği ve bu artışa bağlı olarak da sıvama sonrası iş parçası üzerindeki silindirik izlerde ve dönüş sırasında iş parçası kenarındaki kırışıklıklarda artış olduğu ve geri esnemenin daha fazla olduğu görülmektedir.
- İlerleme hızının arttırılması ile elde edilen analiz sonuçlarına göre grafiklerde ilerleme hızı azaldıkça malzemenin deformasyon sertleşmesi oranının arttığı görülmüştür. Dislokasyon oranının artması dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasına bu yüzden de malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasına sebep olduğu söylenebilir [1].
- İlerleme hızındaki artışa bağlı olarak malzemelerdeki et kalınlığının azaldığı görülmüştür. Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde düşük ilerleme hızlarında malzemenin et kalınlığı değişiminin fazla olmasına rağmen güvenli sınırlar içerisinde kalması iş parçası üzerinde yırtılma meydana gelme ihtimalinin yüksek hızlara göre daha az olacağını göstermektedir. Bu yüzden hassas şekilli ve boyutlu parçaların sıvanması işleminde düşük ilerlemeler seçilmelidir.
- Tüm parametrelerdeki sıcaklık değişimlerinin soğuk şekillendirme bölgesinde olduğu ve bu yüzden tüm analizlerde sıcaklığın sıvama işlemini etkileyecek şekilde artmadığı tespit edilmiştir.
- Devir sayısındaki artışa bağlı olarak elde edilen analiz sonuçlarına göre devir sayısının artması durumunda iş parçasındaki yüzey gerilmelerinin azaldığı, malzeme yüzeyinin

deformasyon oranları arasındaki farkın azaldığı ve sürtünmenin artması sonucu malzemenin sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir.

- Devir sayısının 600 dev/dk olması durumunda iş parçası, mandrel ve baskı plakası temas noktasında akma sınırının aşılarak o bölgede kesme ve yırtılma meydana geldiği tespit edilmiştir. Devir sayısının 600 dev/dk'ya kadar kademeli olarak arttırılması durumunda sıvama bölgelerinde yüzey deformasyonu çok fazla etkilenmemektedir.
- Sac malzeme et kalınlığının artması ile analiz sonucundaki deformasyon sertleşme oranlarındaki değişime ve gerilme deformasyon eğrilerine bakarak geri esneme değerinin azaldığı tespit edilmiştir.
- Alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin analiz sonuçları incelenip değerlendirildiğinde sıvama işlemlerinde malzemenin sertliği arttıkça et kalınlığındaki değişimin azaldığı görülmektedir. Bu durum sert malzemelerin şekil hassasiyeti bakımından alüminyum malzemelere göre daha hassas olduğunu göstermektedir.
- Yumuşak malzemelerde et kalınlığı azalması sert malzemelere göre daha fazla olsa da 0,6 mm üzerindeki güvenli bölgelerde olduğu için yırtılma oluşması gözlenmemiştir.
- Farklı malzeme türleri kullanılarak yapılan analizler değerlendirildiğinde SUS304 çelik malzemesinin alüminyum malzemelere göre daha fazla geri esneme yaptığı görülmüştür. Sertliği fazla olan sac malzemelerde elastik metal bant büyük olduğu için geri esnemeyi artırır [1]. SUS304 paslanmaz çelik malzemesinin akma değeri yüksek olduğundan daha fazla geri esneme yaptığı söylenebilir.
- Bulunan sonuçlar daha önce yapılan çalışmalar ile paralellik göstermiştir.

Yapılan bu çalışma sonucunda, bundan sonraki çalışmalara ışık tutması açısından aşağıdaki tavsiyelerde bulunulabilir;

Yapılacak yeni çalışmalar ile farklı malzemeler için de bu analizler yapılarak matematiksel modeller çıkarılabilir. Bu değerler sıvama işlemlerinde geri esneme telafisi ve ölçüsel tamlık için kullanılarak maliyet ve zamandan tasarruf sağlanabilir. Değişik yazılımlar kullanılarak sonlu elemanlar yöntemlerinin kıyaslanması yapılabilir.

Bu çalışmada sabit bir sıvama diski ele alınarak farklı ilerleme hızları ve farklı devir sayıları incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda değişik sıvama diski profilleri kullanılarak sadece sıvama diskinin etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Packham, C. (1976). *Metal spinning and shear forming*, First Edition, Leifeld Co., Ahlen, 10-50.

2. Gün, B. (2007). *Sıvama Yöntemleri Ve Sıvama Makinesi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 15-60.

3. Dean, T., Wong, C., Lin, J. (2005). Effects of roller path and geometry on the flow forming of solid cylindrical components., *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 344-353.

4. Bewlay, B. (2006). Spinning. *ASM Handbook*, Volume 14B: 368-374.

5. Biro, C.D. (2011). *Cidar Ezmeli, Sıvama Yönteminde Şekillendirici Makara Sayısının Altı Adede Çıkarılmasının İşlem Karakteristikleri İle Parça Kalitesi Üzerindeki Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-50.

6. Runge, M. (1994). *Spinning and Flow Forming*, First Edition, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 10-80.

7. Zhan, M., Yang, H., Zhang, J.H.,Xu, Y.L.,Ma, F. (2007). 3D FEM analysis of influence of roller feed rate on forming force and quality of cone spinning. *Journal of Materials Processing Technology, (187-188)* ,486-491.

8. Quigley, E., Monaghan, J. (2002). The finite element modelling of conventional spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 124(2002), 360-365.

9. Quigley, E., Monaghan, J. (2000). Metal forming: an analysis of spinning processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(2000), 114-119.

10. Hua, F.A.,Yang, Y.S., Zhang, Y.N., Guo, M.H., Tong, W.H., Hu, Z.Q. (2005). Three-dimensional finite element analysis of tube spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(2005), 68-74.

11. Sebastiani, G., Brosius, A., Ewers, R., Kleiner, M., Klimmek, C. (2006). Numerical investigation on dynamic effects during sheet metal spinning by explicit finite-element-analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(2006), 401-403.

12. Qian, B., He, Y., Mei, Z. (2008). Finite element modeling of power spinning of thin-walled shell with hoop inner rib. *Trans.Nonferrus Met. Soc. 18*(2008), 6-13.

13. Jianguo, Y., Makato, M. (2002). An experimental study on paraxial spinning of one tube end. *Journal of Materials Processing Technology*, 128(2002), 324-329.

14. Music, O. Allwood,J.M.,Kawai, K. (2008). A Review of the Mechanics of Metal Spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, ( ), 2-71.

15. Wang. L., Long H. (2011). A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2011), 2140-2151.

16. Wang, L., Long, H. (2002). A study of the stress and strain distributions of first-pass conventional spinning under different roller-traces. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(2002), 326-329.

17. Watson, M., Long, H. (2014). Wrinkling failure mechanics in metal spinning. *Procedia Engineering*, 81(2014), 2391-2396.

18. Kaplan, M. (2011). *İki boyutlu nötron difüzyon hesabında multifrontal yöntemin kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-10.

19. Özdemir, A. (2010). *Sac Metal Ürünlerde Geri Esneme Miktarının Deneysel Ve Sonlu Elemanlarla Tespiti, Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-60.

20. Arıkan, M.A.S. (2007). Sonlu Elamanlar Metodunun Mühendislikte uygulamaları. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi CAD/CAM Merkezi*

21. Wong, C.C., Dean, T.A., Lin, J. (2003). A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(1), 1419-1435.

22. Kang, D.C., Gao, X.C., Meng, X.F.,Wang, Z.H. (1999). Study on the deformation mode of conventional spinning of plates. *Journal of Materials Processing Technology*, 91(1999), 226-230.

23. Kleiner, M., Gönel, R., Kants, H., Klimmek, Ch., Homberg, W. (Baskıda). Combined methods fort he prediction of Dynamic instabilities in sheet metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 1-6.

24. Sekiguchia, A., Araib, H. (2012). Control of wall thickness distribution by oblique shear spinning methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2012), 786-793.

25. Lossen, B. Homberg, W. (2014). Friction-spinning interesting approach to manufacture of complex sheet metal parts and tubes. *Procedia Engineering*, 81(2014), 2379-2384.

26. Wang, L., Long, H. (2013). Investigation of material deformation in multi-pass conventional metal spinning. *Materials and Design*, 46(2013), 645-653

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: ÖZCAN, Murat
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 04.12.1984, Düzce
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (537) 0343912
E-Posta	: murat_ozcan@gazi.edu.tr

Eğitim

Lisans	Hitit Üniversitesi/Makine Mühendisliği	Devam
Lisans	Gazi Üniversitesi/Kalıpçılık Öğretmenliği	2007
Lise	Düzce Teknik Lisesi/ Makine Bölümü	2003

İş Deneyimi

Yıl	**Çalıştığı Yer**	**Görev**
2014-2015	Özel Akıllı Okul İvedik O.S.B Mesleki Ve Teknik Anadolu Lisesi	Öğretmen
2008-2013	Çetin Makine	Teknik Danışman

Yabancı Dil

İngilizce

İlgi Alanları

Cad/Cam uygulamaları, Deformasyon Analizi, Hacim Kalıpları, Plastik malzemeler, Endüstriyel Tasarım, Bilgisayar Donanım, Bilgisayar Yazılım

Hobiler

Yüzmek, Yer tenisi oynamak, DVD Film izlemek, Kitap okumak, Basketbol ve Futbol oynamak, Atıcılık, İnternet sayfa tasarımı yapmak.

GAZİ GELECEKTİR…