



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FIRIN KATALİTİK YAN PANEL SACLARINDA EMAYE KAPLAMA
İŞLEMİ SONRASI MEYDANA GELEN ÇARPILMALARIN ANALİZ
EDİLMESİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SAMET DURMUŞ

OCAK

SAMET DURMUŞ	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI	OCAK 2023
---------------------	--	------------------

**FIRIN KATALİTİK YAN PANEL SACLARINDA EMAYE KAPLAMA
İŞLEMİ SONRASI MEYDANA GELEN ÇARPILMALARIN ANALİZ
EDİLMESİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Samet DURMUŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

Yüksek Lisans Tezi kabul ve onay sayfası

Samet DURMUŞ tarafından hazırlanan “Fırın Katalitik Yan Panel Saclarında Emaye Kaplama İşlemi Sonrası Meydana Gelen Çarpımların Analiz Edilmesi ve İyileştirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA

Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

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

Başkan: Doç. Dr. Harun AKKUŞ

Otomotiv Teknolojisi Programı, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

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

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Halil Burak KAYBAL

Mekanik Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 13/01/2023

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

.....
Doç. Dr. Ümit Yıldırım
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Samet DURMUŞ

13/01/2023

FIRIN KATALİTİK YAN PANEL SACLARINDA EMAYE KAPLAMA İŞLEMİ
SONRASI MEYDANA GELEN ÇARPILMALARIN ANALİZ EDİLMESİ VE
İYİLEŞTİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Samet DURMUŞ

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Sac metal malzemeler, mekanik özelliklerinin ve ağırlık/dayanım oranlarının iyi olması kaynaklı, birçok sektörde kullanılmaktadır. Başta otomotiv sanayi olmak üzere beyaz eşya ve ankastre üreticisi firmalarda da sac metal malzeme kullanımı yaygındır. Genellikle kompleks ürün formları elde edilmek için kullanılan sac malzemelerin şekillendirme prosesleri karmaşık prosesler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu malzemelerin seri üretim ürünü olarak kullanılabilmesi için, sac metal kalıplarının yapılması gerekmektedir. Kalıp çıktısı olan nihai ürünün de istenilen tolerans değerleri aralığında olması beklenmektedir. Bu değer aralığının yakalanabilmesinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri de malzemedeki geri yaylanma ve çarpılma davranışlarıdır. Bu çalışmada, fırın katalitik yan panel sac malzemelerinin emaye operasyonları sonucunda meydana gelen malzemedeki çarpılma davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, fırın katalitik yan panel sacı olarak 300x278 mm ebatlarında 0,6 mm kalınlığında DC04EK soğuk haddelenmiş sac malzeme kullanılmıştır. Elde edilmek istenen nihai ürün için hazırlanan proses adımları çıktısında sac parçada ısıtılma işlemi kaynaklı çarpılmalar meydana gelmiştir ve parça teknik resme göre tolerans değerlerinin çok uzağında kalmıştır. Tolerans değerleri dışında kalan parçanın montaj deliklerinde kaymalar meydana gelmiştir. Bu kaymalar montaj prosesinde, parçanın düzgün bir şekilde montajlanmasını engellemiştir. Malzemedeki bu problemi çözebilmek için malzemeye geometrik form verme işlemi yapılmıştır. Bu işlem için de yeni bir kalıp tasarlanmıştır. Yapılan bu iyileştirmenin çarpılmayı azaltıcı, olumlu yöndeki etkisi deneysel ve sayısal olarak ortaya koyulmuştur. Geometrik formlu sacdaki çarpılma (4,68 mm) düz sacdaki çarpılmaya (6,35 mm) göre yaklaşık %35 daha küçük çıkmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile de kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde geometrik formlu ve düz sacdaki çarpılmalar (5,3328-7,4612 mm) deneysel sonuçtan yaklaşık %15 fazla çıkmıştır.

Sayfa Adeti : 67
Anahtar Kelimeler : Çarpılma, Sac Şekillendirme, Kalıp Telafisi, Sonlu Elemanlar Analizi,
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF DISTORTIONS OCCURRING AFTER ENAMEL COATING ON OVEN CATALYTIC SIDE PANEL SHEETS

(M. Sc. Thesis)

Samet DURMUŞ

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Sheet metal materials are used in many industries due to their good mechanical properties and weight/strength ratios. The use of sheet metal materials is common in household appliances and catalytic furnace manufacturers, especially in the automotive industry. The forming processes of sheet materials, which are generally used to obtain complex product forms, appear as complex processes. In order for these materials to be used as mass production products, sheet metal molds must be made. It is expected that the final product, which is the output of the mold, will be within the desired tolerance values. One of the biggest problems encountered in obtaining these value ranges is the springback and distortion behavior of the material. In this study, the distortion behavior of the furnace catalytic side panel sheet materials in the material resulting from the enamel coating was investigated experimentally and numerically. In the study, DC04EK cold rolled sheet material with 300x278 mm dimensions and 0,6 mm thickness was used as the furnace catalytic side panel sheet. In the output of the process steps prepared for the final product to be obtained, heat treatment-induced distortions occurred in the sheet metal part and the part remained far from the tolerance values according to the technical drawing. Slippages have occurred in the mounting holes of the part outside the tolerance values. During the assembly process, shifts in the mounting holes prevented the part from being properly assembled. In order to solve this problem in the material, the geometric form process was applied to the material. A new mold was designed for this process. The positive effect of this improvement in reducing distortion has been demonstrated experimentally and numerically. The distortion (4,68 mm) in the geometric formed sheet is approximately 35% smaller than the distortion (6,35 mm) in the flat sheet. The experimental results obtained were also compared with the finite element analysis (FEM). In the finite element analysis, the distortions (5,3328-7,4612 mm) in the geometric formed sheet and flat sheet were approximately 15% more than the experimental result.

Page Number : 67
Key Words : Distortion, Sheet Metal Forming, Recompense Mold, Finite Element Method
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Harun YAKA

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince sürekli desteğini hissettiğim, bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen saygı değer hocam ve danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA' ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam boyunca her koşulda yanımda olan sabrını ve desteğini esirgemeyen sevgili aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Çelik Sac Malzemeler	5
2.1.1. Çelik sac malzemelerin sınıflandırılması ve kullanılan standartlar	7
2.1.2. Çelik sac malzemelerin metalurjik özelliklerine göre sınıflandırılması ...	11
2.1.3. Çelik sac malzemelerin üretim yöntemlerine göre sınıflandırılması	13
2.2. Çelik Sacların Şekillendirilmesi.....	14
2.2.1. Kesme işlemi.....	14
2.2.2. Bükme işlemi	16
2.2.3. Çekme işlemi.....	20
2.2.4. Sıvama işlemi	22
2.2.5. Gererek şekillendirme işlemi	23
2.3. Çelik Saclara Uygulanan Şekillendirilebilirlik Deneyleri.....	23
2.3.1. Tek eksenli çekme deneyi	24

	Sayfa
2.3.2. İki eksenli germe deneyi	25
2.4. Çelikler Sacların Mekanik Özelliklerinin Şekillendirilebilirliklerine Etkileri	26
2.4.1. Elastiklik modülünün etkisi	26
2.4.2. Akma dayanımının etkisi	26
2.4.3. Çekme dayanımının etkisi.....	27
2.4.4. Uzamanın etkisi.....	27
2.4.5. Pekleşme üstelinin etkisi	28
2.4.6. Plastik anizotropi değerinin etkisi	30
2.4.7. Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin etkisi	30
2.5. Çelik Saclarda Geri Yaylanma.....	31
2.5.1. Geri yaylanma davranışını etkileyen parametreler	32
2.5.2. Geri yaylanmanın telafisi	33
3. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ	34
3.1. Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametreleri.....	34
3.1.1. Element boyutu	35
3.1.2. Adaptiv ağ yapısı derecesi	36
3.1.3. Eleman formülasyonu	36
3.1.4. Zaman adımı.....	38
3.1.5. Simetri durumu	38
3.1.6. Hız etkisi	38
3.1.7. Plastisite modeli	38
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
4.1. Deneysel Çalışma.....	40
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi ile Sayısal Çalışma.....	50

	Sayfa
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	61
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	67



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çelik standartları tablosu	7
Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi	9
Çizelge 2.3. Çelik türleri ve içerdği element değerleri	10
Çizelge 2.4. Çelik sac malzemelerin metalürjik özelliklerine göre sınıflandırılması	11
Çizelge 2.5. Tek eksenli çekme deneyi numunelerinin çeşitleri ve boyutları	24
Çizelge 2.6. Çelik sacların şekillendirilebilirliklerine etki eden faktörler	26
Çizelge 4.1. Malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri	40
Çizelge 4.2. Deneyde kullanılan parçaların işlem prosesleri	42
Çizelge 4.3. Orthogonal kalite aralığının renk spektrumu ile gösterimi	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çelik malzemelerin üretim akış prosesleri	5
Şekil 2.2. Sac malzemelerin üretim akış prosesleri	6
Şekil 2.3. Sac malzemelerin işlem adımları ve nihai ürün değerleri	6
Şekil 2.4. Sac malzemenin üretim prosesleri çıktısı	6
Şekil 2.5. Çelik sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması.....	12
Şekil 2.6. Zimba ve kalıp ile basit sac kesme (tek taraftan zımbalama).....	14
Şekil 2.7. Pres ve zımbalama ile elde edilen bir geometri (deformasyona uğramış).....	15
Şekil 2.8. Zimba ve kalıp ile basit sac kesme	15
Şekil 2.9. Pres ve zımbalama ile elde edilen bir geometri (düzgün çapaksız yüzeye) ...	15
Şekil 2.10. Sac metal bükümünde çekme, basma tarafı ve oluşan kenar incelmesi	17
Şekil 2.11. Preslerin çok çeşitli açılarda ve biçimlerde şekil verebilirliği	17
Şekil 2.12. Caka makinesinin parçaları.....	18
Şekil 2.13. CNC pres (abkant pres) – abkant pres kalıbı	18
Şekil 2.14. Min. bükme radyüsü ve bükülen malzemenin sünekliği arasındaki ilişki....	19
Şekil 2.15. Kenar bükme prosesi	19
Şekil 2.16. V Bükme	20
Şekil 2.17. Değişik bükme işlemleri	20
Şekil 2.18. Derin çekme işlemi	21
Şekil 2.19. Derin çekme işleminin farklı bir uygulaması ters derin çekme	21
Şekil 2.20. Derin çekme işleminin sac tutucu kullanmadan gerçekleştirilen uygulamaları.....	21
Şekil 2.21. Derin çekme işleminde oluşan gerilme bölgeleri	22

Şekil	Sayfa
Şekil 2.22. Geleneksel sıvama işlemi	22
Şekil 2.23. Gererek şekillendirme işlemi	23
Şekil 2.24. Tek eksenli çekme deneyi numunesi ve boyutları	24
Şekil 2.25. Malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtan hidrolik şişirme deneyi	25
Şekil 2.26. Malzemedeki gerçek gerilme-gerinim grafiği	28
Şekil 2.27. Pekleşme üstelinin artımı ile gerilme-gerinim eğrisinin değişimi	29
Şekil 2.28. Pekleşme üstelinin şekillendirme sınır diyagramına etkisi	29
Şekil 2.29. Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi	31
Şekil 2.30. Bükme işleminden sonra elastik toparlanma	32
Şekil 2.31. Üretimlerde geri esneme olgusu	32
Şekil 2.32. Sac metal şekillendirme işlemi	32
Şekil 3.1. Geometrideki eleman ve düğüm noktası	35
Şekil 3.2. Ağ adaptasyonu şematik gösterimi	36
Şekil 3.3. Ağ adaptasyonu durumuna bir örnek	36
Şekil 3.4. Katman sayısı ve gerilme durumunun şematik ifadesi	37
Şekil 3.5. Kabuk eleman için (a) 5 katmanda (b) 7 katmanda çözüm hesaplama noktaları	37
Şekil 4.1. Düz sac metal parça (a), geometrik formlu sac metal parça (b)	41
Şekil 4.2. Ağ elemanın ideal geometriden sapması (a), çarpıklık kalite renk çizelgesi (b)	51
Şekil 4.3. En/boy oranı (a) şekilsel gösterimi (b) aralık değer	51
Şekil 4.4. Düz sac metal parçanın geometrisi	52
Şekil 4.5. Düz sac metal parçaya uygulanan mesh işlemi ve ağ yapısı	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Düz sac metal parçanın mesh metrik kriterine göre en/boy dağılımı	53
Şekil 4.7. Düz sac metal parçanın AR değerleri	53
Şekil 4.8. Düz sac metal parçanın termal analizin yapılması	54
Şekil 4.9. Düz sac metal parçanın üzerindeki toplam ısı akışı.....	54
Şekil 4.10. Düz sac metal parçanın Von Mises gerilmesi.....	55
Şekil 4.11. Düz sac metal parçanın x eksenindeki yapısal değişimi.....	55
Şekil 4.12. Geometrik formlu sac metal parçanın geometrisi.....	56
Şekil 4.13. Geometrik formlu sac metal parçaya uygulanan mesh işlemi ve ağ yapısı..	56
Şekil 4.14. Geometrik formlu sac metal parçanın en/boy dağılımı	57
Şekil 4.15. Geometrik formlu sac metal parça için mesh detayları	57
Şekil 4.16. Tanımlı sınır koşulu.....	58
Şekil 4.17. Geometrik formlu sac metal parça yüzeyindeki toplam ısı akışı dağılımı ...	58
Şekil 4.18. Geometrik formlu sac metal parçanın Von Mises gerilmesi	59
Şekil 4.19. Geometrik formlu sac metal parçanın “x” eksenindeki deformasyonu	60
Şekil 5.1. Emaye kaplamalı sacların X eksenindeki maksimum yapısal değişimleri.....	61
Şekil 5.2. Emaye kaplı deneysel numunelerin FEM sonuçları ile karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.3. Emaye kaplı parçalarda meydana gerilme ve deformasyonlar	63
Şekil 5.4. Kaplamalı ve kaplamasız sacların X eksenindeki maksimum deformasyonu	63

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Hidrolik pres makinesinde parça yüzeyine form verme işlemi	41
Resim 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan sac malzemeler (emaye proses öncesi)	41
Resim 4.3. Yıkamadan çıkan, kurutma fırınına giren deney parçaları	43
Resim 4.4. Lacivert emaye kaplama işlemine giren deney parçaları.....	44
Resim 4.5. Lacivert emaye kaplama sonrası fırınlama işlemi	44
Resim 4.6. Lacivert emaye kaplamanın kalınlığı (μm).....	44
Resim 4.7. Katalitik emaye kaplama işlemi.....	45
Resim 4.8. Katalitik emaye kaplama sonrası fırınlama işlemi.....	45
Resim 4.9. Katalitik emaye kaplamanın kalınlığı (μm).....	46
Resim 4.10. Düz parça emaye prosesi öncesi (a, b) ve sonrası (c) yüzey sıcaklığı	46
Resim 4.11. Formlu parçanın emaye prosesi öncesi (a, b), sonrası (c) yüzey sıcaklığı .	47
Resim 4.12. Emaye prosesi sonrası (A) Geometrik formlu (B) Düz sac metal parça	47
Resim 4.13. Emaye kaplama sonrasında parçalar üzerinde oluşan çarpılmalar	47
Resim 4.14. Düz formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (emaye kaplı)...	48
Resim 4.15. Formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (emaye kaplı)	48
Resim 4.16. Düz formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (kaplamasız)	49
Resim 4.17. Formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (kaplamasız).....	49
Resim 4.18. Katalitik yan panel sacların fırına montajı.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

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

Simgeler	Açıklama
C	Karbon
Mn	Mangan
Si	Silisyum
S	Kükürt
P	Fosfor
T_B	Kesme dayanımı
s	Malzeme kalınlığı
c	Katsayı değeri
x	Kesme boşluğu
P	Kesme kuvveti
L	Çevre uzunluğu
K	Malzeme dayanım sabiti
n	Pekleşme üsteli
m	Gerinim hız duyarlılığı üsteli
ϵ	Şekil değişimi
σ	Mukavemet
t	Sac kalınlığı
α_1	Kalıp açısı
α_2	İş parçası açısı
r_1	Kalıp iç çapı

r_2	İş parçasındaki iç yarıçap
K_R	Geri yaylanma faktörü
ΔT	Zaman adım büyüklüğü
L	FE ağ yapısındaki en küçük eleman kenar uzunluğu
C	Ses hızı
E	Elastisite modülü
ρ_0	Malzeme yoğunluğu
ν	Poisson oranı

Kısaltmalar

Açıklama

AHSS	Geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler
AC	Alternatif akım
BHF	Boşluk tutucu kuvvet
BT	Belytschko-Tsay
EPU	Uniform uzama ve boyunlanma
FEM	Sonlu elemanlar analizi
HL	Hughes-Liu
LLS	Düşük dayanımlı çelikler
ŞSD ₀	Pekleşme üstelinin şekillendirme sınır diyagramı
YMS	Yüksek dayanımlı çelikler

1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme işlemi, ince malzemelerin plastik şekil değiştirme mantığı ile kalıp takımları kullanılarak malzemelere form verme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu malzemeler düşük ağırlıklı ve yüksek mukavemetli malzemeler oldukları için birçok sektörün ana hammaddesi konumuna gelmiştir. Havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere otomotiv, beyaz eşya sektörü gibi birçok alandaki uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır (Süzen, 2019).

Teknolojinin gelişmesi ve taleplerin artması sonucunda diğer sektörlerde olduğu gibi sac metal şekillendirme sektöründe de süreç iyileştirmelerine ihtiyaç duyulmuştur. Seri üretim akışının fazla olduğu endüstrilerde üretim hızı oldukça önemlidir. Üretim öncesinde tercih edilecek olan malzemelerin seçimi gibi kullanılacak kalıp takımlarının ve proses tasarımı adımlarının da hızlı bir şekilde bu değişime uygun hale getirilebilmesi gerekmektedir. Bu değişime cevap verebilmek için deneme/yanılma yöntemini kullanmak hem zaman hem de maliyet açısından uygulanabilir ve sürdürülebilir bir yöntem değildir. Bu sebepten dolayı da günümüzde bilgisayar destekli mühendislik araçları kullanılmaktadır. Bu araçlar arasında en sık kullanılan yöntem ise sonlu elemanlar analiz yöntemidir (Süzen, 2019).

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1970'li yılların sonlarında büyük otomotiv firmaları tarafından sac metal şekillendirme proseslerinde yırtılma ve marullaşmanın ortaya çıkıp çıkmadığını incelemek amacıyla kullanılmıştır (Süzen, 2019). Günümüzde ise yapılan simülasyonların asıl amacı; şekillendirilecek olan sac malzemenin mukavemetini ve davranışsal özelliklerini stres, titreşim, sapma gibi farklı koşullarda gözlemlemek ve yorumlamak içindir. Bu konuda başarılı bir sonuç elde etmek için de sonlu elemanlar ağının iyi oluşturulması, sınır şartlarının iyi belirlenmesi, iş parçası malzemesinin doğru seçilmesi ve doğru modellenmesi gerekmektedir.

Sac metal şekillendirme işlemleri esnasında veya sonrasında sac malzemelerde ince ve karmaşık geometriye sahip olmalarından kaynaklı, birden fazla hata ile karşılaşılması yüksek ihtimaldir. Bu hatalar, şekil bozukluğu olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle de sac parçanın yüzeyinde yırtılmalar, kırışmalar, kulaklanmalar gözlemlenmektedir. Bunların yanı sıra malzeme şekillendirme sonrasında geri yaylanmaya uğrayarak istenilen tolerans değerlerinden ve yapısal geometrisinden uzaklaşabilir. Bu tür hatalar ile karşılaşılması ve

hatasız yüzeylere sahip ürünler elde edilebilmesi için; şekillendirme esnasında kullanılan kalıp takımlarının istenilen ürün formunu yakalayabilecek şekilde tasarlanması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda malzemenin şekillendirilebilirliği proses parametreleri açısından analiz edilebilmeli ve bu işlemler de interaktif bir şekilde yapılmalıdır (Süzen, 2019).

1.1. Literatür Araştırması

Sac malzemelerde şekil verme operasyonlarında meydana gelen en büyük problemlerden biri olan geri yaylanma problemi birçok araştırmacı tarafından mercek altına alınmıştır. Üretim süreçlerinde hem zaman hem de maliyet kayıplarına neden olan bu problemin belirlenmesine ve telafi edilmesine yönelik birçok alanda çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar aşağıdaki bölümde sunulmuştur.

Esener ve arkadaşları, 0,8 mm kalınlığında çift taraflı galvaniz kaplı DP600 çelik malzemesinden imal edilmiş, endüstride kullanılan tavan destek sacı parçasının geri esnemesi üzerine telafi kalıp çalışması yaparak malzeme üzerindeki geri esnemeyi incelemişlerdir. Kalıp takımı elde edildikten sonra orijinal parça geometrisi ile ilk simülasyonu gerçekleştirmişler, sonrasında da telafi kalıp yüzeyi ile simülasyon gerçekleştirmişler. Telafi kalıpla yapılan simülasyon sonucunda geri esnemenin ilk duruma göre daha az olduğunu gözlemlemişlerdir (Esener ve diğerleri, 2014).

Yenice, kalıp ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak V-bükme operasyonunda geri yaylanma davranışlarını incelemiştir. Kalıp parametresi olarak V kalıp açısını ve erkek kalıp uç yarıçapını değiştirmiş, malzeme parametresi olarak da hadde yönünü değişken kılarak deneyler yapmıştır (Yenice, 2006).

Baki, farklı kalınlıklara, geometrilere ve farklı çekme mukavemet değerlerine sahip beş adet araç gövde parçasının, çekme ve form verme operasyonlarının sonucunda meydana gelen geri yaylanma davranışlarını incelemiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak telafi algoritması sonucuna göre kalıp tasarım verisi oluşturmuştur. Bu yapılan çalışmaya ek olarak da malzeme kalınlığının ve elastisite modülünün geri yaylanmaya etkisini incelemiştir (Baki, 2019).

Işıktaş ve Ay, DKP sac malzemesi kullanarak 60, 90, 120 açılara sahip V-bükme kalıplarında, farklı zımba radyüs değerlerinde (2 mm, 6 mm) gerçekleştirdikleri bükme işleminin sonucunda malzemede meydana gelen geri esnemeyi deneysel olarak tespit etmişlerdir (Işıktaş ve Ay, 2015).

Gülen, derin çekme işlemine uygun iki ayrı alüminyum parça belirleyerek, kalıptaki tutucu kuvveti ve zımbanın hız değerlerini değiştirerek parçalara derin çekme analizleri yapmıştır. Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için şekillendirme sınır diyagramı tekniğini kullanmıştır. Değerlendirme sonucuna göre uygun parçalara (yırılma olmayan) geri yaylanma analizi uygulamıştır. Elde ettiği yer değiştirme değerlerine göre de malzemedeki geri yaylanma oranlarını hesaplamıştır. Yer değiştirme değerinin düşük olduğu parçalarda geri yaylanma miktarının da düşük olduğunu gözlemlemiştir (Gülen, 2019).

Taşdemir ve arkadaşları, 1 mm kalınlığında Erdemir 7136 sacını artırımlı şekillendirme yöntemi ile şekillendirmişlerdir. Şekillendirme işleminde; klemp basıncı, takım çapı, artım miktarı, ilerleme hızı gibi parametrelerin geri esneme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda geri esneme açısının takım çapı ile doğru orantılı, ilerleme hızı ve artım miktarıyla ise ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir (Taşdemir ve diğerleri, 2021).

Karagöz, otomotiv sektöründe en çok kullanılan 3 farklı alüminyum sacın (AA6016, AA5182, AA5754) geri yaylanma değişkenlerini inceleyerek, geri yaylanma tahmin doğruluğunu arttıracak yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında Yoshida-Uemori modelini kullanmıştır. Modelin malzeme parametrelerini belirlemek için farklı hadde yönlerinde çekme, basma, üç nokta eğme, bükme testleri gerçekleştirmiştir (Karagöz, 2017).

Gök ve arkadaşları, sonlu elemanlar analiz metodunu, gerçek bir sanayi parçasında derin çekme işlemi uygulayarak, analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasını yapmışlardır. Yapılan karşılaştırma neticesinde; deneysel malzeme üzerinde oluşan deformasyonlar ile analiz sonuçlarındaki çıktılar arasında yakınsak bir ilişki olduğu sonucuna varmışlardır (Gök ve diğerleri, 2019).

Süzen, traktör emniyet çerçevesi üretiminde kullanılan yapısal sac malzemelerin şekillendirilmesinin sonlu elemanlar yöntemi ile (farklı malzemeler kullanarak) analizini

gerçekleştirmiştir. Traktör emniyet kabininde kullanılan kaynaklı bir sac parçanın, kalıp yatırımı yapılarak, derin çekme yöntemi ile imal edildiğinde kalite olarak uygunsuzlukların önüne geçileceğini ve hedef fiyata ulaşılabilceği sonucuna varmıştır. Aynı şartlar altında DC03 malzeme ve DC05 malzeme yapısında olan sac parçanın derin çekme sonuçları Autoform analiz programını kullanarak analiz etmiştir (Süzen, 2019).

Yıldız ve Kırılı, hafif ticari araçlarda kullanılan süspansiyon destek parçasının soğuk şekillendirme yöntem ile (derin çekme) imal edilmesi sırasında ortaya çıkabilecek problemlerin önceden tespiti ve gerekli tasarım değişikliğinin kalıpların imalatından önce yapılması amaçlı bir dizi analiz çalışması yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonunda soğuk şekillendirme işlemi için sonlu elemanlar yöntemi ile eksplisit analizin tutarlı sonuçlar verdiği ve tasarımı yönlendirmek için kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Yıldız ve Kırılı, 2013).

Vatansever ve Esener, sac metal şekillendirme proseslerinden (kare kutu çekme prosesini) sonlu elemanlar analizlerinde hesaplama parametrelerinin simülasyon hassasiyeti ve çözüm süresine etkilerini analiz etmişlerdir. Malzeme olarak da gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerden TRIP600 çeliği kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin hassasiyete ve çözüm süresi üzerinde çok fazla etkisi olduğu sonucuna varmışlardır (Vatansever ve Esener, 2019).

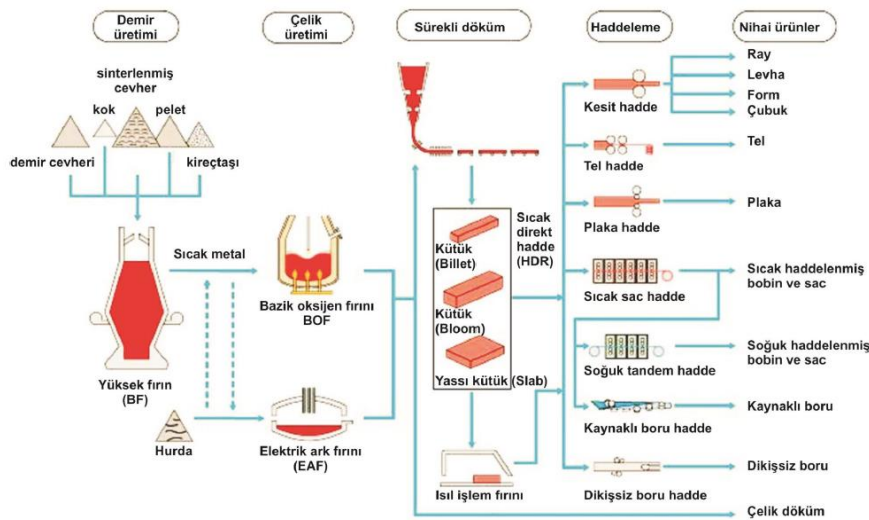
Esener ve arkadaşları, endüstriyel bir uygulama olan tavan destek sacının şekillendirme prosesi sonrasında meydana gelen geri esnemeyi, referans yüzey ile karşılaştırarak esneme miktarını elde etmişlerdir. Bu sonuçların karşılaştırılmasını da sonlu elemanlar analizi ile yapmışlardır (Esener ve diğerleri, 2014).

Uysal, çalışmasında örnek seçilmiş bir parça üzerinde farklı malzemeler kullanarak, soğuk şekillendirme ve geri yaylanma simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Simülasyonlarda farklı tür çelik sac malzeme kullanılarak yüzey basınçları, form verilebilirlik, geri yaylanma davranışlarını karşılaştırmıştır (Uysal, 2006).

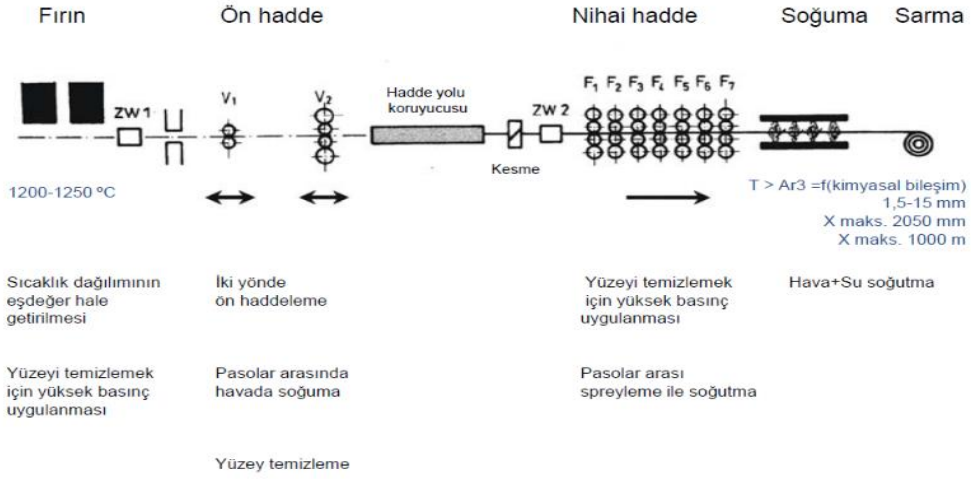
2. GENEL BİLGİLER

2.1. Çelik Sac Malzemeler

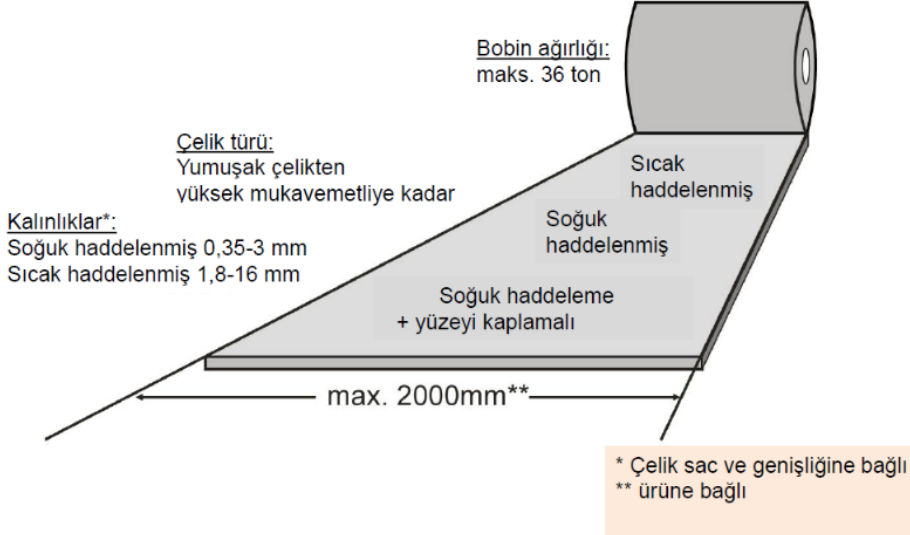
Çelik sac malzemeler, ingot dökümü veya daha üstün teknolojiye sahip, döküm tesislerinden elde edilen dikdörtgen kesite sahip, slab adı verilen ara mamul çeliğin haddelenmesi ile üretilirler (Uslu, 2014). Çelik sac malzemeler; teknolojinin ilerlemesine paralel olarak her geçen gün gelişim gösteren endüstriyel kuruluşların ihtiyaçlarını karşılama noktasında büyük öneme sahiptirler. Bu malzemeler kara, hava ve deniz taşıtları, endüstriyel araç gereçler, çeşitli ev eşyaları ve daha birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Birçok alanda kullanılmasının nedenleri arasında dikkat çeken en önemli özelliği; alternatif malzemelere kıyasla daha dayanıklı ve daha ucuz olmalarıdır. Ayrıca kolay şekillendirilebilmeleri, işlenebilmeleri ve kolay birleştirilebilmeleri de önemli özelliklerinin başında gelmektedir. Çok çeşitliliğe sahip olan bu malzemelerin seçimi yapılırken malzemenin kullanım alanlarına göre seçim yapılması gerekmektedir. Soğuk haddelenmiş çelik sac ile sıcak haddelenmiş çelik sac malzemelerinin akma ve çekme dayanımları birbirinden farklıdır. Soğuk şekillendirmeye uygun sacın ortalama akma dayanımı 150 N/mm^2 , çekme dayanımı 310 N/mm^2 ve uzama değeri %36 iken, sıcak haddelenmiş sacın değerleri sırası ile 350 N/mm^2 , 800 N/mm^2 ve %8'dir. Yapılan bu çalışmada sac malzemelerin çelik türünden olanların üzerinde çalışılmıştır. Çelik sac malzemenin üretim prosesleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Çelik malzemelerin üretim akış prosesleri



Şekil 2.2. Sac malzemelerin üretim akış prosesleri



Şekil 2.3. Sac malzemelerin işlem adımları ve nihai ürün değerleri



Şekil 2.4. Sac malzemenin üretim prosesleri çıktısı

2.1.1. Çelik sac malzemelerin sınıflandırılması ve kullanılan standartlar

Çelik sacların, endüstrinin artan ihtiyaçlarını karşılamak amacı ile çeşitliliği günden güne artmaktadır. Bu malzemelerin kullanım alanları değiştikçe malzemeden beklenen özellikler de farklılık göstermektedir. Oluşan bu çeşitliliğin tanım karmaşasına yol açmaması için çelik sac malzemeler için de standartlar oluşturulmuştur (Uslu, 20014).

Çizelge 2.1. Çelik standartları tablosu

KISALTMA	AÇILIMI
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
ASTM	Amerikan Malzeme Test Birliği Standartları
AFNOR	Fransız Standartları Enstitüsü
JIS	Japonya Standartları
BS	İngiliz Standartları
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
EURONORM	Avrupa Standartları
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
GOST	Rusya Standartları Enstitüsü

Çelik, demir elementi ile karbon (C) elementinin (%0,02 ile %2,1 oranlarında) birleşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Alaşımın içerisindeki karbon miktarı, çeliklerin sınıflandırılmasında etkin rol oynamaktadır. Çeliklerin bileşimlerinde sadece karbonun bulunması malzemenin bazı özelliklerini yetersiz kılar (Çelik, 2020).

- Yüksek dayanımlarda toklukları düşük olur.
- Sertleşme kabiliyetleri yetersiz kalır.
- Korozyon dirençleri zayıftır.
- Gevrek-sünek geçiş sıcaklıkları yüksek olur.

Üretimi yapılan çeliklerin kimyasal analizlerine bakıldığında yapısında mutlaka C elementi dahil Mn, Si, S ve P (veya en az) elementleri olmak üzere 5 element bulunur.

Karbon

- Çeliğin mukavemetini ve sertliğini arttıran en önemli elementtir.
- % C arttıkça çeliğin iç yapısındaki perlit oranı artar. Bu da çeliğin çekme ve akma mukavemetini arttırır. %0,8 C değerinden sonra mukavemet artışı fazla olmaz.
- Su verilmiş çeliklerde en yüksek sertlik değerine karbonun %0,6 olduğu seviyelerde ulaşılır.
- Çelikteki % C miktarı artışı çeliğin sünekliği ve kaynaklanabilirliğini azaltır. Su verme işleminde çatlamaya yatkınlık artar.

Mangan

- Çeliğin dayanıklılığını arttırır, sünekliğini biraz azaltır.
- Tavlanmış ve normallenmiş çeliklerde tokluğu arttırır.
- Çeliğin dövülebilirliğini ve sertleşebilirliğini olumlu yönde etiler.
- %13 seviyelerinde mangan ve yüksek karbonlu çelikler, yüksek aşınma direnci ve tokluk özelliği gösterir.

Silisyum

- Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılan temel elementtir.
- Yay çelikleri ve düşük alaşımlı çelikler %2 ye kadar silisyum içerirler.
- %14-15 gibi yüksek oranlarda silisyum içeren yüksek alaşımlı çelikler çok yüksek korozyon direnci gösterirler. Dövülemez ve gevrektiler.
- Silisyum miktarı arttıkça çeliğin tane boyutu da artar.

Kükürt

- Çeliklerin bileşiminde istenmeyen bir elementtir. Bu nedenle düşük seviyelerde tutulur.

- Kükürt oranının artması; enine sünekliğin ve çentikli darbe tokluğu değerinin düşmesine neden olur.
- Kükürt, mangan ile dengelenmediği takdirde malzemede sıcak kırılmalık yaratır.
- Çelik yapısında kükürt genellikle sülfür ve oksisülfür kalıntıları olarak bulunur.

Fosfor

- Ferrit' in dayancını en fazla arttıran elementtir. Düşük oranlarda fosfor bile çeliğin dayanıklılığını ve sertliğini artırırken, haddeleme yönündeki süneklik ve çentik tokluğunu azaltıcı yönde etkiler.
- Karbon ve kükürdüne göre fosforun segregasyon yatkınlığı daha azdır.
- Fosforun %0,10'dan fazla olması çelikte gevrekliği artırır. Fakat karbon oranından etkilenen fosforun bu etkisi, C miktarının %1,5'den az olan çeliklerde fosforun yarattığı gevreklik çok önemsenmez.

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin çeliğe etkisi

ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ															
ALAŞIM	SERTLİK	DAYANIM	AKMA NOKTASI	UZAMA	KESİT DARALMASI	DARBE DİRENCİ	ELASTİKİYET	YÜKSEK SICAKLIK DAYANIM	SOĞUMA HIZI	KARBÜR OLUŞUMU	ASINMA DİRENCİ	DÖVÜLEBİLİRLİK	İŞLENEBİLİRLİK	OKSİTLENME	KOROZYON DİRENCİ
Si	↑	↑	↑↑	↓	≈	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	—
Mn ⁺	↑	↑	↑	≈	≈	≈	↑	≈	↓	≈	↓↓	↑	↓	≈	—
Mn ⁺⁺	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	≈	—	—	—	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	—
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	—	↓↓↓	↑↑↑
Ni ⁺	↑	↑	↑	≈	≈	≈	—	↑	↓↓	—	↓↓	↓	↓	↓	—
Ni ⁺⁺	—	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	—	↑↑↑	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
Al	—	—	—	—	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓	—	↓↓	—
W	↑	↑	↑	↓	↓	≈	—	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	—
V	↑	↑	↑	≈	≈	↑	↑	↑↑	↓↓	↑↑↑↑	↑↑	↑	—	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	—	↑↑	↑↑	—	↑↑↑	↓	≈	↓	—
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↑	—	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	—
S	—	—	—	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↑↑↑	—	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑

+	Perlitik çeliklerde
++	Östenitik çeliklerde

↑
Arttırır

↓
Azaltır

≈
Değiştirmez

—
Önemsiz

Çizelge 2.3. Çelik türleri ve içerdiği element değerleri

Çelik Türü	Malzeme No	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Al	Ti
Armco demir		0,011	0,002	0,036	0,01	0,004		0,004	0,016	0,004	-
Derin Çekme Çeliği	1,0338 DC04	0,03	0,01	0,2	0,01	0,01	0,004	-	-	0,04	-
IF Çeliği	1,0873 DC06	0,003	0,01	0,1	0,01		0,003	-	-	0,04	0,02
Ray Çeliği		0,07	0,3	1			0,006			0,04	-
İslah Çeliği	1,0503 C45	0,45	0,25	0,7	0,045	0,045	0,006	0,03	-	0,04	-
HSLA Çeliği	1,0980 FeE420TM	0,07	0,2	0,9	0,02	0,01	0,006	-	-	0,04	0,04
Yapı Çeliği	1,0553 S355J0	0,17	0,4	1,2	-	-	0,006	-	-	0,04	0,02
Paslanmaz Çelik, Östenit	1,4301 X4CrNi18-10	0,03	0,92	1,23	0,045	0,03	0,042	18	10	-	-
Paslanmaz Çelik, Ferritik	1,4512 X2CTi12	0,02	1	1	0,04	0,015	-	12	-	-	0,3
Invar Çeliği	1,3912 FeNi36	0,002	0,01	0,3	<0,01	0,01	-	-	36	<0,01	-

Soğuk şekillendirmeye uygun derin çekme işlemi uygulanabilir çelikler; otomotiv, dayanıklı ev aletleri, mutfak eşyaları gibi mukavemetin, tokluğun ve süneklik özelliklerinin talep edildiği uygulamalarda tercih edilir. Beyaz eşya ve otomotiv gibi özel beklentileri olan sektörlerin taleplerini karşılamaya yönelik uygulamalarda ekstra derin çekme işlemine uygun kalitedeki çelikler kullanılır. Bu kalitedeki malzemeler, yaşlanmaya dayanıklılığı, üstün şekillendirilebilirliği ve iyi kaynaklanabilirliği ile ön plana çıkarlar. Derin çekilebilir özelliğe sahip emaye kaplamaya uygun çelikler mutfak eşyaları imalatında kullanılmaktadır (Değirmenci, 2006).

Çeliğe farklı oranlarda alaşımlayıcı elementlerin katılabileceği gibi, çeşitli işlemler uygulayarak malzemenin iç yapısı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelikler elde edilebilmektedir (Çelik, 2020). Günümüzde 2000'in üzerinde standart çelik vardır ve bunlar farklı şekillerde sınıflandırılırlar.

- Kimyasal bileşimlerine göre (Karbonlu, yüksek alaşımlı, düşük alaşımlı)
- Çeliğin üretim şekline göre (Siemens Martin, Konverter, Ark ocağı, Pota)
- Kalite sınıfına göre (Kütle çeliği, Kaliteli çelik, Asil çelik)
- Oksijen giderme yöntemine göre (Kaynar, Sakin, Yarı Sakin)

- Üretim yöntemine göre (Sıcak hadde, Soğuk hadde, Soğuk Çekme)
- Kullanım yerlerine göre

Temelde ise çelik sac malzemeler, metalürjik özelliklerine ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırılırlar.

2.1.2. Çelik sac malzemelerin metalürjik özelliklerine göre sınıflandırılması

Son dönemlerde yapılan çalışmalar; sac malzemenin kesit kalınlığının azaltılarak, yüksek dayanımlı ve şekillendirilebilirliği kolay malzemeler elde etmeye yöneliktir. Uzama (%) ve çekme dayanımlarına göre sac olarak kullanılan çelik malzemeleri üç ana başlık altında inceleyebiliriz;

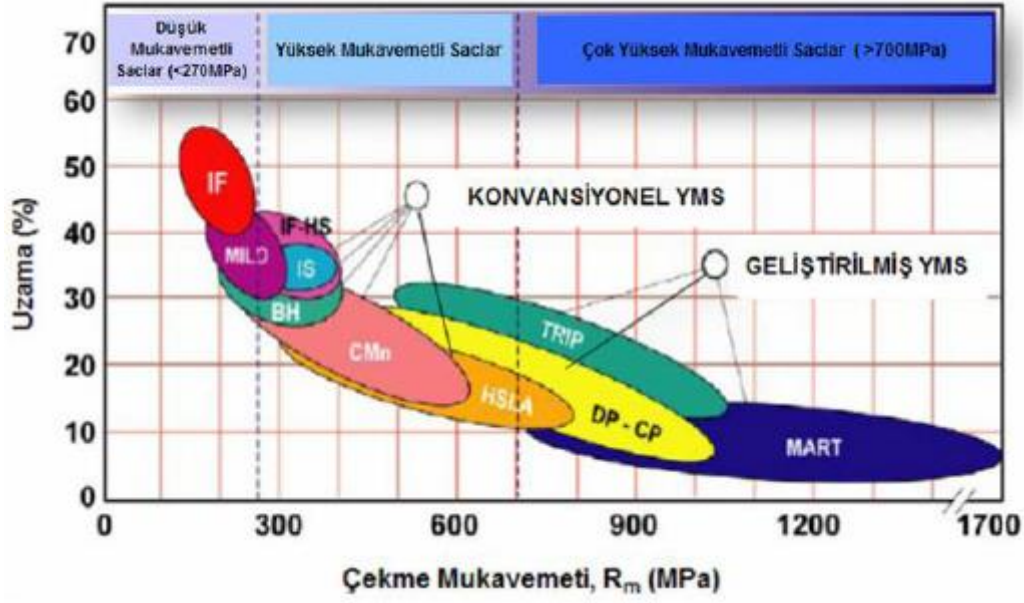
- LLS (Düşük dayanımlı çelikler)
- YMS (Yüksek dayanımlı çelikler)
- AHSS (Geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler)

Metalürjik özelliklerine bağlı olarak çelik sac malzemelerin sınıflandırılması Çizelge 2.4'te verilmiştir (Uslu, 2014).

Çizelge 2.4. Çelik sac malzemelerin metalürjik özelliklerine göre sınıflandırılması

Düşük Mukavemetli Saclar (DMS) Low Strength Steels (LSS)	Arayer Atomsuz Saclar / Intersitital - Free Steels (IF)
	Yumuşak Saclar / Mild Steels (MILD)
Yüksek Mukavemetli Saclar (YMS) High Strength Steels (HSS)	Fırında Sertleşebilen Saclar / Bake Hardenable Steels (BH)
	İzotropik Çelikler / Isotropic Steels (IS)
	Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar / High Strength Intersitital - Free Steels (IF-HS)
	Karbon Manganezli Saclar / Carbon Manganese Steels (CMn)
	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Saclar / High Strength Low Alloy Steels (HSLA)
Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler (GYMÇ) Advanced High Strength Steels (AHSS)	Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar / Transformation Induced Plasticity Steels (TRIP)
	Çift Fazlı Saclar / Dual Phase Steels (DP)
	Kompleks Fazlı Saclar / Complex Phase Steels (CP)
	Martenzitik Saclar / Martenzitic Steels (MART)

Çelik sac malzemelerin uzama ve çekme dayanımlarına göre sınıflandırılması Şekil 2.5'te verilmiştir (Çelik 2020).



Şekil 2.5. Çelik sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması
Düşük Dayanımlı Çelikler (LSS)

Çekme dayanımları 150-300 MPa aralığında olan IF arayer atomsuz çelikler (Intersitital – Free Steels) ve MILD yumuşak çelikleri; düşük dayanımlı çelikler olarak bilinir. Genellikle ferritik yapıya sahiptirler. Yapılarında düşük karbon ve alaşım elementleri bulundurmalarından kaynaklı yumuşaktır ve şekillendirilebilmeleri kolaydır. Ucuzdur, kullanım alanı da oldukça geniştir (Çelik, 2020).

Yüksek dayanımlı çelikler (YMS)

Yüksek dayanımlı çelikler grubunda; fırında sertleşebilen çelikler (BH), yüksek dayanımlı arayer atomsuz çelikler (HSI-FS), izotropik çelikler (IS), karbon manganez çelikler (Cmn) ve yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler yer almaktadır. Bu çeliklerin çekme dayanımları da yaklaşık olarak 250-800 MPa aralığındadır (Çelik, 2020).

Geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS)

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin başında çift (DP) ve üç (TRIP) fazlı çelikler gelmektedir. Çift fazlı çelikler yumuşak ferrit ve sert martenzit yapıdan oluşan düşük karbonlu çeliklerdir. Üç fazlı çelikler ise ferrit matrisleri boyunca tutulmuş ostenit ve küçük miktarda beynit bulunduran çeliklerdir. Bunların dışında kompleks fazlı çelikler (CP) ve

martensitik (MS) çelikler de AHSS grubuna girmektedir. Bu çeliklerin çekme dayanımları 700 – 1700 MPa arasındadır. Mukavemetleri çok yüksektir. Deformasyon sırasında enerjiyi çok iyi derece absorbe ederler. Ayrıca şekillendirilebilme kabiliyetleri de yüksektir (Çelik, 2020).

2.1.3. Çelik sac malzemelerin üretim yöntemlerine göre sınıflandırılması

Saclar, kalın metal kütüklerin çeşitli haddelerden geçirilmesi ile elde edilen ince ve düz metal parçalara denilmektedir. Hadde; iki tane makaraya benzer silindirin arasından sac levhaları geçirmek sureti ile sac malzemelerin kalınlıklarının adım adım azaltılması işlemidir. Üretim yönetime göre çelik sacların sınıflandırılmasında iki yöntem kullanılır; sıcak haddelenmiş çelik sac malzemeler ve soğuk haddelenmiş çelik sac malzemelerdir.

Sıcak haddeleme

Sıcak haddeleme, metal ve alaşımlara daha kolay şekil verebilmek amacı ile yapılan bir deformasyon işlemidir. Bu işlemde, malzemelerin daha kolay şekil değişikliğine uğrayabildiği, sünekliğin de yüksek olduğu kristalleşme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa tabii tutulurlar. Sıcak haddelemede slablara verilen deformasyon miktarı oldukça yüksektir. Sıcak haddeleme işlemi ile 20-25 cm kalınlığa sahip metal kütüklerden 2,5 mm kalınlığındaki sac malzemeler elde edilebilir. Sıcak haddeleme hattının verimli çalışabilmesi ve çıkan ürünlerin belirli kalite standartlarını yakalayabilmesi için, ürün kalınlığı en kısa sürede azaltılmalıdır. Haddeleme işlemi hızlı bir şekilde gerçekleşmelidir. Sıcak haddelenmiş çelik malzemelerin soğuması sırasında farklı gerilmelerden dolayı malzeme yüzeylerinde şekil bozuklukları meydana gelebilmektedir. Malzemede oluşan bu şekil bozukluklarının giderilmesi ve daha düz bir yüzey elde edilebilmesi için sıcak haddelemeden sonra soğuk haddelemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Soğuk Haddeleme

Basit bir şekilde soğuk haddeleme; çeliğe ısı işlem uygulamadan şeklini değiştirerek güçlendirme işlemidir. Soğuk haddeleme yalnızca bir metal veya metal alaşımlarına yeniden kristalleşme sıcaklığının altında olduğunda meydana gelebilir. Malzemenin yapısını değiştirmek için mekanik stres kullanılır. Gerilim sertleşmesi metalin mukavemetini %20'ye

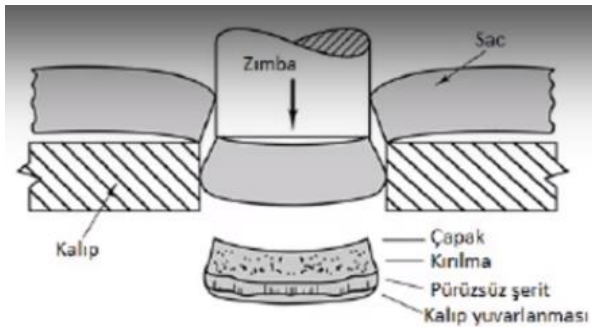
kadar arttırabilir. Bu işlem malzemeye daha yüksek yüzey kalitesi, daha iyi mekanik özellikler ve belirgin fiziksel özellikler kazandırarak, 1,5 mm'den daha düşük kalınlıklara sahip malzemeler elde etmeye olanak sağlar (Değirmenci, 2006).

2.2. Çelik Sacların Şekillendirilmesi

Sac malzemeler kolay şekillendirilebilir malzemelerdir ancak kolay şekillendirilebilir olmaları onların çok kolay uygulanabilir olacağı anlamına gelmemektedir. Bu malzemelerin kolay şekillendirilebilir olması, kolay da yırtılabilmeyi beraberinde getirmektedir. Sac malzemelere şekil verirken özellikle dikkat edilmesi gereken şey; uygun formda ve uygun dayanım özelliklerini kaybetmeyecek şekilde malzemeye şekil verilmesidir. Sac metallerde şekillendirme işlemleri, malzemenin kullanılacağı yere göre çok farklı metotlarla yapılabilir.

2.2.1. Kesme işlemi

Temel prensip, talaş oluşturmada malzemenin mekanik olarak kesilmesidir. Eritme veya yakma (lazer kesim ve su jeti) işlemleri de kullanılabilir. Her iki durumda da kullanılan kesme bıçakları düzdür. Farklı şekiller elde etmek için (sac kesme, delme, kertileme, traşlama) kıvrımlı bıçaklar kullanılabilir. Kırılma ve yırtılma genellikle sac malzeme üzerindeki en zayıf noktadan başlar ve devam eder. Zımba ve kalıp düzgün hizaya ve açlığa sahip olmalıdır. Eksen farklılığı veya kaçıklık söz konusu olur ise yine kenarlar boyunca yırtılmalar, bölgesel farklı gerilmeler meydana gelebilir. Kesme işleminin ardından kenarlar için yüzey işlemlerine gerek duyulmaz.



Şekil 2.6. Zımba ve kalıp ile basit sac kesme (tek taraftan zımbalama)

Sac metal kesmede boşluk

Zımba kesim kenarı ile kalıp kesim kenarı arasındaki mesafeye denilmektedir. Eğer bu boşluk çok küçük olursa, çift kıvrılmaya ve malzemenin kesilebilmesi için daha büyük kuvvet uygulanmasına neden olur. Eğer çok büyük olursa da metal kesme kenarları arasında bükülerek fazlaca çapak oluşur. Yüzeylerde metali kesmeden bile birtakım yırtılmalar görülebilir. Genellikle kullanılacak sac malzeme kalınlığının %4 ile %8'i arasına boşluk vermek yeterli olur. Bu aralıktaki toleransı malzemenin cinsine ve uygulanan kuvvete göre optimize etmek gerekmektedir. Bakır levhayı keserken farkı bir boşluk, demir esaslı bir malzemeyi keserken farklı bir boşluk vermek gerekebilir.

Tavsiye edilen boşluk hesabı denklem 1'de verilen bileşenler ile analitik olarak hesaplanır.

$$x = c. s. \sqrt{\tau_B} \quad (1)$$

x kesme boşluğu (mm), c katsayı değeri, s kesilecek malzeme kalınlığı (mm), T_B ise kesme dayanımını (N/mm^2) göstermektedir. Kesme boşluklarına örnek verirse; 1100S ve 5052S alüminyum alaşımları, tüm ısıt işlemleri 0,045 mm. 2024ST ve 6061ST alüminyum alaşımları; pirinç, yumuşak haddelenmiş çelik, yumuşak paslanmaz çelikler için 0,060 mm. Yarı sert soğuk haddelenmiş çelik; yarı sert ve tam paslanmaz çelikler için de 0,075 mm.

Sac metal kesme kuvvetleri

Kesme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan bağıntı denklem 2'de verilmiştir.

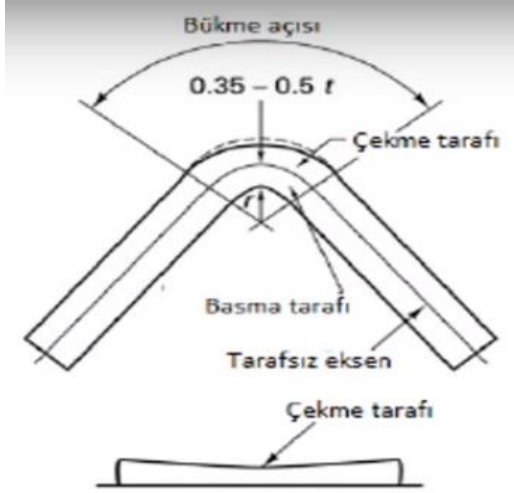
$$P = L. s. \tau_B \quad (2)$$

P kesme kuvvetini (N), L kesilen çevre uzunluğunu (mm), s kesilecek malzeme kalınlığını (mm), T_B ise kesme dayanımını (N/mm^2) ifade etmektedir.

2.2.2. Bükme işlemi

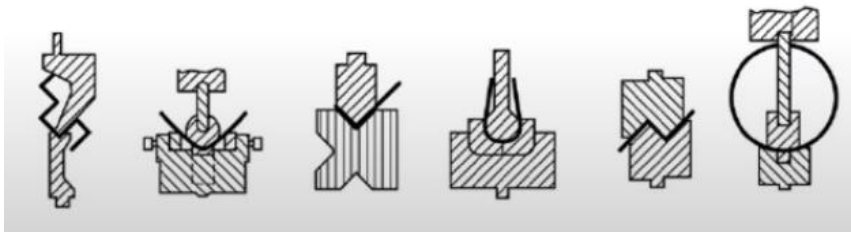
Yüzey alanında değişimin çok az ya da hiç olmadığı, tarafsız eksen etrafında çekme ve basma gerilmeleri altında gerçekleşen metalin plastik şekil değişimi işlemine denilmektedir.

Sac metalin bükümünde dış kısımlarda çekme, iç kısımlarda basma gerilmeleri oluşur. Şekil 2.10'da da görüldüğü üzere büküm bölgesinin üst bölgelerinde yandan bakıldığında orta kısımlar kenarlara göre daha incedir. Bir kalıp ile çok sayıda bükme işlemi yapılarak da malzemeye şekillendirme işlemi uygulanabilir.

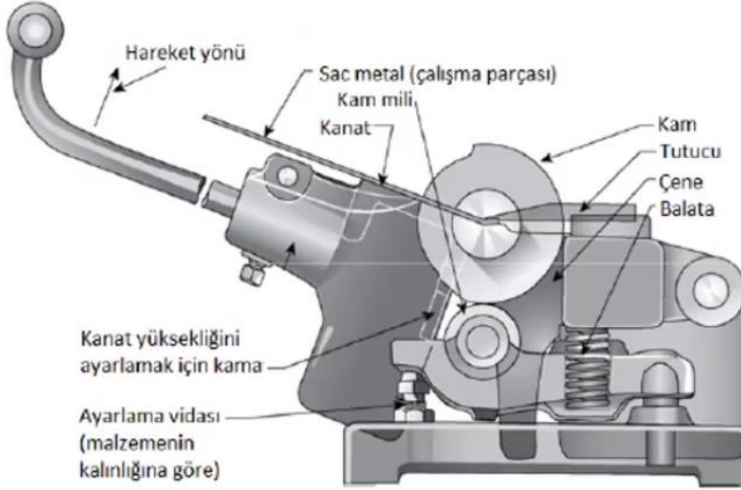


Şekil 2.10. Sac metal bükümünde çekme, basma tarafı ve oluşan kenar incelmesi

Bükme işlemleri, preslerde ve caka makinelerinde yapılabilir. Caka makinelerinde bükme işlemi en fazla 150°'lik açıya kadar uygulanabilir. Caka makinesinde kullanılan uç kısmın geometrisi saca vermek istenilen geometrinin belirlenmesinde ve uygulanmasında temel prensiptir. Pres makinelerinde de daha kalın sac parçalara bükme işlemi kullanılabileceği gibi, daha ince malzemelerde, daha karmaşık büküm işlemleri uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.11. Preslerin çok çeşitli açılarda ve biçimlerde şekil verebilirliği

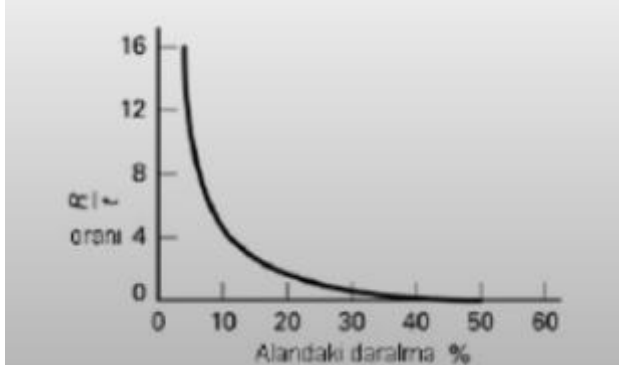


Şekil 2.12. Caka makinesinin parçaları



Şekil 2.13. CNC pres (abkant pres) – abkant pres kalıbı

Bükme işlemini tanımlamak için birtakım faktörlere bakılması gerekmektedir; metalin yumuşaklığı, malzemenin kalınlığı ve metali kırmadan verilebilecek en küçük bükme çapının belirlenmesi gibi. Minimum bükme radyüsü (kalınlığa göre) ve bükülen malzemenin sünekliği (tek eksenli çekme testinde meydana gelen alandaki daralma) arasındaki ilişki aşağıdaki grafikte verilmiştir.

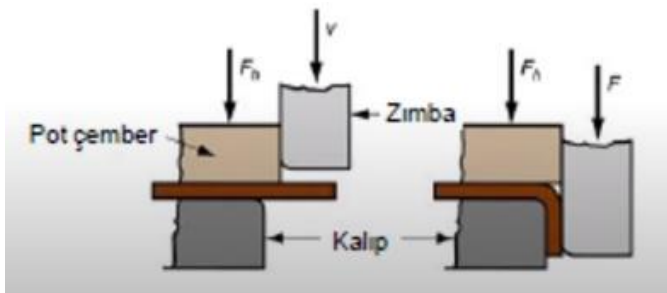


Şekil 2.14. Min. bükme radyüsü ve bükülen malzemenin sünekliği arasındaki ilişki

İstenilen parçanın, istenilen hassasiyette bir büküm elde edilmesi için parçanın boyutlarına karar verilmelidir.

Kenar bükme işlemi

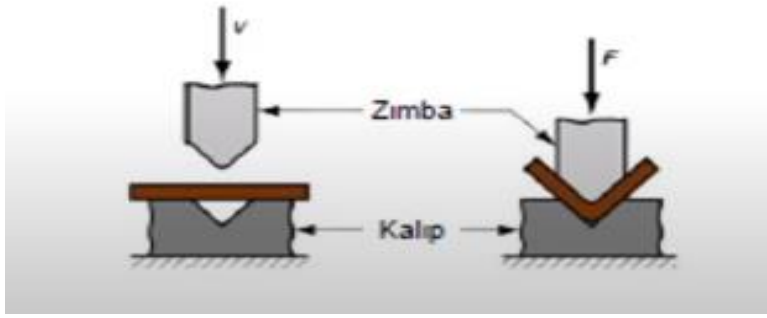
Malzemenin iki kalıp arasına alınarak, basınçlı bir sac tutucunun (pot çemberi) iş parçasını kalıba bastırması ile zımbanın parçayı kalıp üzerine eğmesi işlemine denilmektedir. Maksimum kıvrırma açısı 90° 'dir. Bu yöntemde kullanılan kalıplar biraz daha pahalıdır. Genellikle malzemenin kenarlarına uygulanabilen yöntemdir.



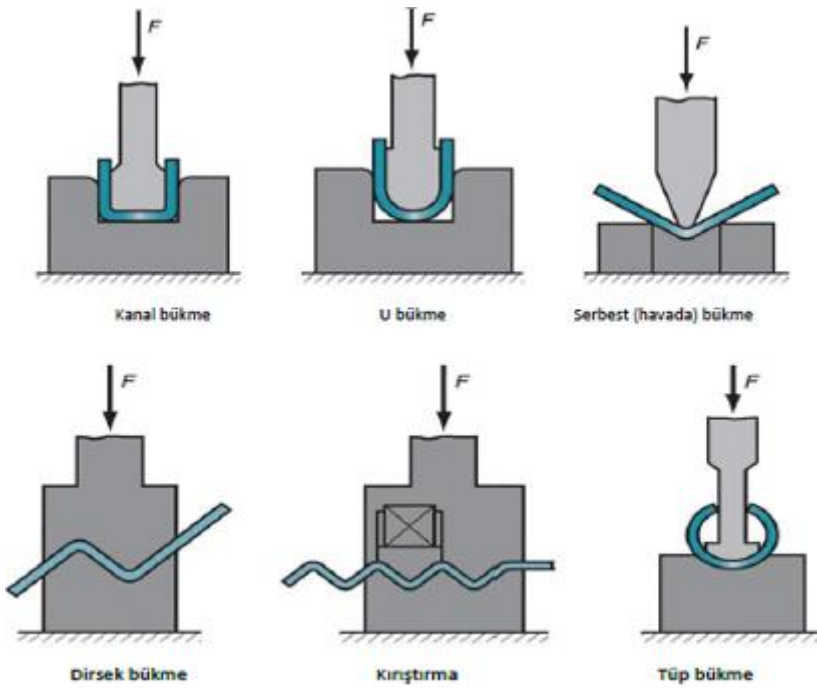
Şekil 2.15. Kenar bükme prosesi

V Bükme

Levhanın, v yatağı gibi tasarlanmış bir kalıbın üzerine alınması ile yukarıdan bir zımbanın basması sonucunda levhaya v şeklinde bir geometri verilmesi işlemidir. V bükme kalıpları basit, yüksek maliyetleri olmayan kalıplardır ve bükme işlemleri abkant preslerde gerçekleşir.



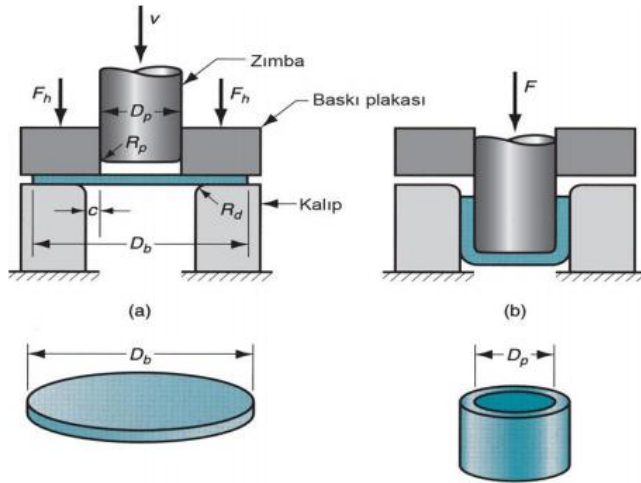
Şekil 2.16. V Bükme



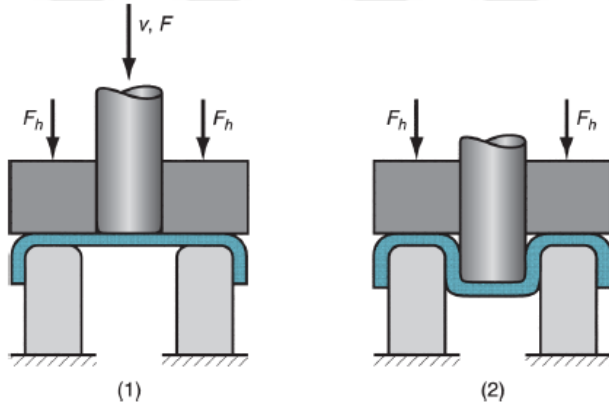
Şekil 2.17. Değişik bükme işlemleri

2.2.3. Çekme işlemi

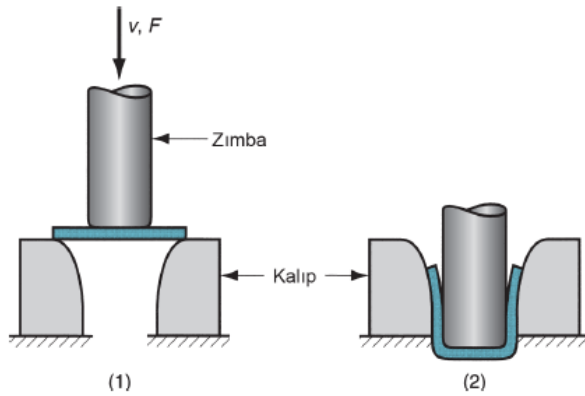
Çekme işlemi, plastik şekil değiştirmenin düz olmayan bir eksen boyunca gerçekleştiği, yassı bir metal sacdan silindirik şekilde üç boyutlu derin bir parça elde etme yöntemi olarak tanımlanabilir. Çekme işlemi bir parçaya bir ya da birden fazla uygulanabilir. Tek bir işlem yapılmış parçaya sığ çekilmiş parça, birden fazla çekme işlemine tabii tutulmuş parçaya ise derin çekilmiş parça denilmektedir.



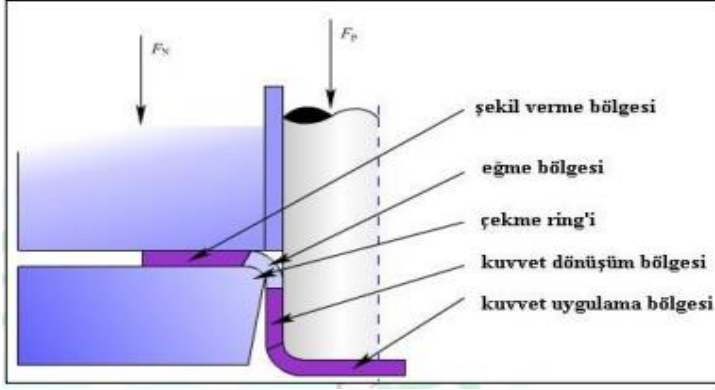
Şekil 2.18. Derin çekme işlemi



Şekil 2.19. Derin çekme işleminin farklı bir uygulaması ters derin çekme



Şekil 2.20. Derin çekme işleminin sac tutucu kullanmadan gerçekleştirilen uygulamaları

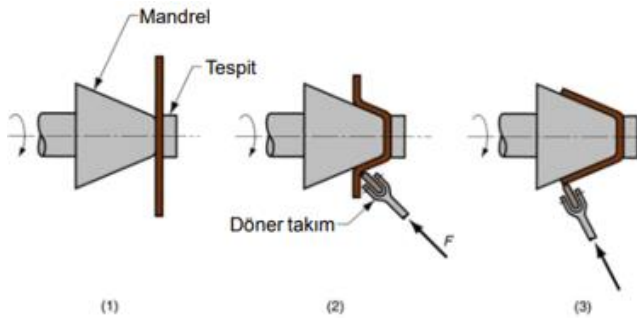


Şekil 2.21. Derin çekme işleminde oluşan gerilme bölgeleri

- Şekil verme bölgesi, pot çemberinin parçaya bastığı kısımdır. Pot çemberi kuvveti ilk oluşacak buruşmayı önler.
- Eğme bölgesi, parça, çekme ring radyüsü üzerinden eğmeye zorlanır.
- Kuvvet taşıma bölgesi, bu bölgede parçanın cidarları şekil alır.
- Kuvvet uygulama bölgesi, şekil vermeye basma kuvveti ile bu bölgede başlanır.

2.2.4. Sıvama işlemi

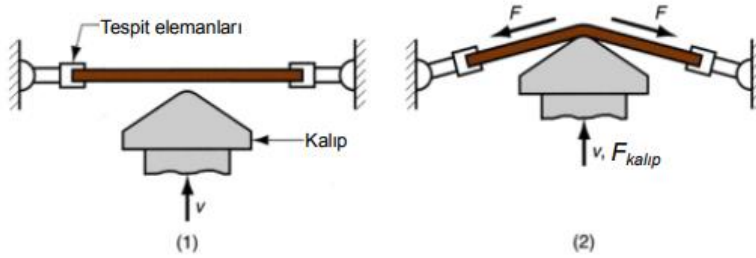
Sac veya boru biçimli malzemelerin, yüksek hızda döndürüldüğü ve eksenel olarak simetrik bir parçaya dönüştürüldüğü bir metal işleme prosesidir. Bu işlem çeşitli takımlar yardımıyla manuel olarak yapılabileceği gibi CNC torna tezgahlarında da yapılabilir. Sıvama işlemi birden fazla yöntemi kapsar. Sıvama şekline göre, malzeme belirli bir kalıbın üzerine sıvanarak şekillendirilebilir veya kalıp geometrisi olmadan, boşlukta da şekillendirilebilir. Bu üretim yöntemini cazip kılan, talaş kaldırılmadan imalat hızının yüksek seviyelerde olmasıdır.



Şekil 2.22. Geleneksel sıvama işlemi

2.2.5. Gererek şekillendirme işlemi

Gererek şekillendirmede, iki taraftan tutturularak asılan sac parça, bir blok tarafından şekillendirilir. Sac metal aynı anda hem bükülür hem de gerilir. Germe işlemi hassas hesap gerektiren bir işlemdir. Germe işlemi yapılacak olan malzemenin dayanım özellikleri, akma mukavemeti önemlidir çünkü germe işlemi yapıldıktan sonra zımba oradan ayrılınca sac parça geriye doğru esneme özelliği gösterir. Bu esnemenin miktarı da önemlidir malzeme yapısı homojen değilse her seferinde farklı bir geometri elde edilmesine neden olacaktır.



Şekil 2.23. Gererek şekillendirme işlemi

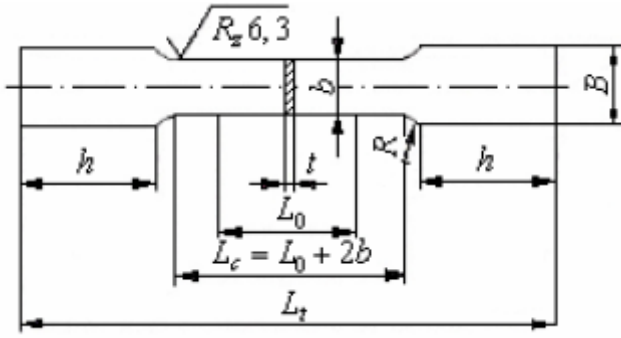
(1) işlemin başlangıcı (2) form kalıbı, kalıp üzerinde gerilmesi ve bükülmesi için F kalıp kuvveti ile parçanın içine bastırılır. F germe kuvvetini ifade etmektedir.

2.3. Çelik Saclara Uygulanan Şekillendirilebilirlik Deneyleri

Çelik sacların şekillendirilebilirliklerini saptamak için, temel özgül nitelik deneyleri ve benzeşim deneyleri yapılmaktadır. Temel özgül nitelik deneyleri; malzemenin kalınlık değerlerinden, yüzey koşullarından ve belirli işlem şartlarının değişiminden bağımsız olarak sonuçlar verir. Bu deneyler; tek eksenli çekme deneyi, iki eksenli germe deneyi, kayma deneyi ve sertlik deneyleri gibi deneylerdir. Benzeşim deneyleri ise; bükme, germe, derin çekme ve geri yaylanma gibi deneylerdir. Sac malzemenin kalınlığı, yüzey durumu, takım geometrisi ve boyutları gibi parametreler bu deneylerin sonuçlarını etkileyen parametrelerdir (Değirmenci, 2006).

2.3.1. Tek eksenli çekme deneyi

Yaygın olarak kullanılan tek eksenli çekme deneyinde, çelik sac malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmektedir. Bu özellikler; malzemedeki uzama, yük dağılımı, gerilme, kesit daralması, elastiklik modülü gibi temel mekanik özelliklerdir. Çekme testi, sac malzemenin her iki ucundan test cihazının mengeneleri vasıtasıyla belirli hızlarda malzemenin kopanadək çekilmesi işlemine denilmektedir. Parçaya uygulanan yükün ve uzamanın değerleri, uzama-ölçerler sayesinde ölçülür (Değirmenci 2006).



Şekil 2.24. Tek eksenli çekme deneyi numunesi ve boyutları

Çizelge 2.5. Tek eksenli çekme deneyi numunelerinin çeşitleri ve boyutları

Boyutlar	Orantısız çekme numuneleri		Orantılı çekme numuneleri	
	1.Çeşit	2.Çeşit	1.Çeşit	2.Çeşit
b	20 ± 1	$12,5 \pm 1$	Bağımsız	Bağımsız
L_0	50	80	$5,65\sqrt{A_0}$	$11,3\sqrt{A_0}$
L_c	$L_0 + 2b$ (min $L_0 + b/2$)			
R	min.12			
B^*	20 – 40			
h^*	Yeter büyüklükte			
* EN 10002-1 standardında herhangi bir sembolle verilmemiş olduğundan bu büyüklükler, DIN 50114 standardından alınmıştır.				

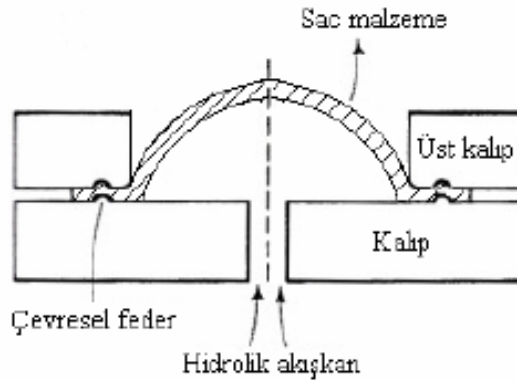
Tek eksenli çekme deneyindeki sonuçların doğru ve güvenilir olması için; numune malzemenin yüzeyinde çizik veya farklı bir hasar olmamalıdır. Bu tarz kusurlu malzemeler gerilmeyi arttırabileceği gibi erken kırılmayı da tetikler. Ölçü bölgesindeki kenarların birbirine paralel olması ve yuvarlatma bölgelerindeki geçişlerin düzensiz olmaması

gereklidir. Bu bölgelerin soğuk şekillendirilmeye uğratılmadan temizlenmesi gerekir (Demircioğlu, 2006).

Deneyde uygulanan yük; test makinesinin üst çenesine bağlanan yük hücresi vasıtası ile ölçülür. Uzama ise; klipslere bağlanan gerinim ölçer vasıtası ile ölçülür. Toplam uzamanın tespit edilmesi için de numuneden sıklıkla ölçü alınır.

2.3.2. İki eksenli germe deneyi

Malzemelerin çift eksenli gerinim davranışlarını tanımlamada genellikle kullanılan yöntem hidrolik şişirme deneyidir. Bu deneyde hidrolik basınç kullanılarak metal sac parça Şekil 2.25’de görüldüğü gibi üst kalıp (federli) parçası ile sıkıştırılarak tek taraftan şişirilmektedir. Deney düzeneğinde kullanılan kubbe biçimini almış numune parçanın gerilme-gerinim durumu, uzama ve akışkan basıncı eğrisinden bulunmaktadır. Deney düzeneğinde ıstampa yerine hidrolik akışkan kullanılmasının amacı, sürtünmenin sıfıra yaklaşmasını ve şekillendirmenin dengeli gerçekleşmesini sağlamaktır.



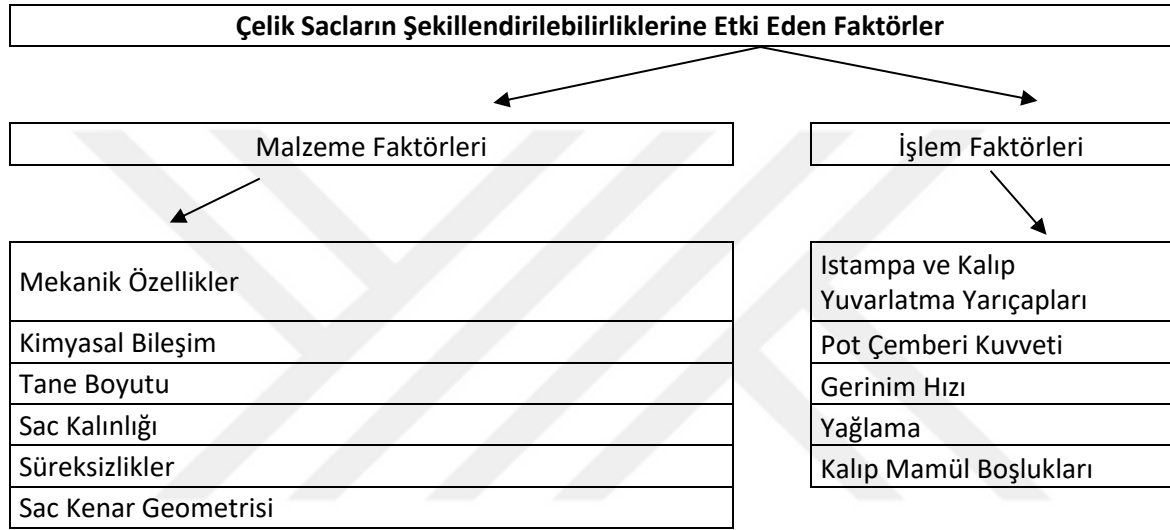
Şekil 2.25. Malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtan hidrolik şişirme deneyi

Hidrolik şişirme deneyi, malzemelerin temel özgül niteliklerini ve daha yüksek düzeylerdeki malzeme davranışlarını belirlemektedir. Aynı zamanda, malzemenin plastisite teorilerini doğrulamada ve teorik akma davranışını incelemeye sıkça başvurulmuş yöntemdir (Değirmenci, 2006).

2.4. Çelikler Sacların Mekanik Özelliklerinin Şekillendirilebilirliklerine Etkileri

Çelik sacların şekillendirilebilirliklerine etki eden iki temel faktör vardır. Bunlardan birisi malzeme faktörü ikincisi de işlem faktörüdür. İşlem faktörleri saca uygulanan işlemin cinsini belirlerken malzeme faktörü de bu zorlamaya karşı dayanabilecek malzemenin cinsini belirler.

Çizelge 2.6. Çelik sacların şekillendirilebilirliklerine etki eden faktörler



2.4.1. Elastiklik modülünün etkisi

Düşük gerinimlerdeki sac malzemelerin şekillendirilmesinde, çarpılmaya ve geri yaylanmaya etki eden bir faktördür. Özellikle bükme işleminde meydana gelen geri yaylanma büyük oranda elastik bölgedeki gerinimler ile ilgilidir. Bazı parametrelerin sabit kalması koşulu ile (sac kalınlığı ve şekil verilen parçanın açısı) elastiklik modülünün artması geri yaylanma miktarını azaltmaktadır.

2.4.2. Akma dayanımının etkisi

Malzemenin elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başlangıcı olan, kalıcı şekil değişikliğinin meydana geldiği noktaya akma noktası denilmektedir. Malzemelerin şekillendirilebilirliği açısından akma dayanımı oldukça önemlidir. Örneğin, akma dayanımı 240 MPa'ın üzerinde olduğu düşük karbonlu sac malzemenin düşük elastik modülleriyle şekillendirilmesinde yüksek oranda çatlama ve geri yaylanma eğilimleri gözlemlenmektedir.

Akma dayanımı 140 MPa'ın altında olan düşük karbonlu çelik sacların geri yaylanması az olsa da şekillendirme esnasında gerilmelere karşı koyamayacağından kullanım açısından pek uygun görülmemektedir (Granzow, 1990).

2.4.3. Çekme dayanımının etkisi

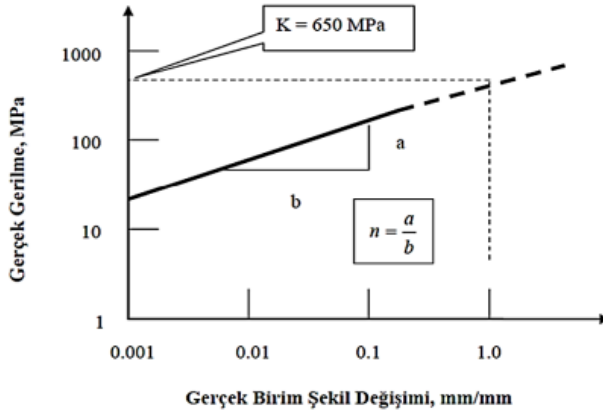
Şekillendirilebilirlik açısından çekme dayanımının etkisi diğer parametreler kadar önem arz etmemektedir. Fakat çekme dayanımının süneklik ve sertlik değerleri gibi iki parametreyle yakından ilişkili olduğu söylenebilir. Çekme dayanımının artması ile sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Sertlik değeri ile olan ilişkisi de ($S_u \text{ [MPa]} = 3,5BS$) şeklindedir. Bazı araştırmacılar, çekme dayanımı/akma dayanımı oranı ile şekillendirilebilirliğin değişimini incelemişlerdir. Bu oranın, malzemenin pekleşme üsteliyle paralellik gösterdiği saptanmış ve artan değerlerin, sac malzemelerin şekillendirilme kabiliyetini olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir (Granzow, 1990).

2.4.4. Uzamanın etkisi

Malzemeye çekme işleminde uygulanan kuvvet artışı, malzemenin boyunu da uzatmaktadır. Belirli bir noktadan sonra kuvvet artışı olmasa bile malzemenin boyunda uzamalar devam eder. Bu noktaya akma noktası, meydana gelen uzamaya ise akma uzaması denilmektedir. Çekme deneyinde meydana gelen akma uzaması parçada deformasyonlara (düzensiz yüzey izleri; lüders veya damarlanma olarak isimlendirilir) neden olabilmektedir.

Kopma uzaması veya toplam uzama; kopma noktasındaki mühendislik eğrisinden okunan değerdir. Bu değer sac malzemenin şekillendirilebilirliğinin yaklaşık bir göstergesidir. Diğer özelliklerde de olduğu gibi kopma uzaması da tek başına şekillendirilebilirliğe etki edecek kadar kuvvetli bir etken değildir.

Kopmadaki uzama yüzdesi, uniform uzama ve boyunlanmadan (ϵ_u) sonra oluşan uzamanın toplamına eşittir. Matematiksel ifadesi “Holloman Bağıntısı” olarak bilinen $\sigma = K \cdot \epsilon^n \text{ [MPa]}$ eşitliği malzemedeki gerçek gerilme-gerinimi tanımlamaktadır.

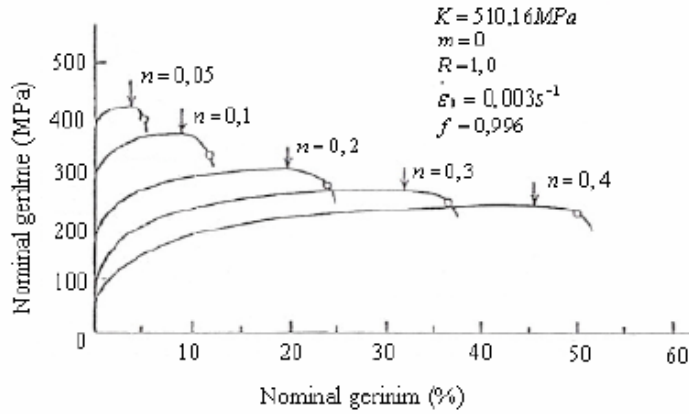


Şekil 2.26. Malzemedeki gerçek gerilme-gerinim grafiği

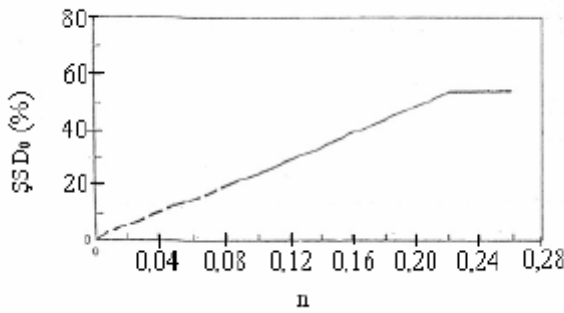
Burada K malzemenin dayanım sabiti, n ise pekleşme üsteli olarak tanımlanmaktadır. K malzemenin dayanımını, n ise deformasyon sertleşmesinin o malzemedeki etkinliğinin ne kadar olduğu hakkında bilgi verir. σ değeri ne kadar büyük olur ise deformasyon sırasında malzemede meydana gelen boyunlanmanın oluşum süresi de o kadar uzar. Malzemenin n değeri ise boyunlanma sonrasındaki uzamayı etkileyen parametredir. Malzemenin gerinim hızına karşı hassasiyeti arttıkça, boyunlanma sonrası gösterdiği uzama da artmaktadır. Malzemedeki sünekliğin ve şekillendirilebilirliğin artmasına sebep olan etken her iki alandaki (boyunlanma ve sonrası) uzamadır. Çelik saclarda yerel boyunlanma hataya sebebiyet verebilmektedir bu da şekillendirilebilirlikte uniform uzamanın doğru sonuç verememesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle toplam uzamanın ölçüt olarak anılması daha doğru ve güvenilir sonuçlar verecektir.

2.4.5. Pekleşme üstelinin etkisi

Pekleşme üsteli, sac malzemelerin çekme testlerinden hesaplanır. Bu veri malzemenin pekleşme kapasitesini ifade eder ve sac malzemelerin şekillendirilebilirliği açısından önemli bir etkidir. Pekleşme üstelinin artması malzemedeki iki eksenli gerilebilirliği ve sünekliği artırır. Holloman denkleminde pekleşme üsteli uniform uzamaya eşittir. Pekleşme üstelinin yüksek olması, boyunlanmanın geç başlaması anlamına gelmektedir. Bunun sebebi; plastik değişime uğrayan bölgede pekleşmeden dolayı dayanım artmaktadır. Bu bölgede plastik şekil değişimi durup, komşu bölgelerde plastik şekil değişimi meydana gelmeye başlar ve tek biçim uzama elde edilmiş olur. Sonuç olarak da sac malzemeler daha geç deformasyona uğramış olurlar (Mielnik, 1991).



Şekil 2.27. Pekleşme üstelinin artımı ile gerilme-gerinim eğrisinin değişimi



Şekil 2.28. Pekleşme üstelinin şekillendirme sınır diyagramına etkisi

Şekil 2.28’de görüldüğü üzere pekleşme üstelinin artmasıyla SSD_0 , yani düzlemsel gerinim durumunda büyük gerinim değeri artmakta, dolayısıyla şekillendirme sınır eğrisinin düzeyi yükselmekte ve şekillendirilebilirlik artmaktadır. Fakat pekleşme üstelinin 0,23 değerinden daha yüksek olduğu durumlarda SSD_0 ’a etkisi olmamaktadır (Llewellyn, 1998).

Pekleşme üstelinin artması gerilebilirliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu sabitin (n) germe ile şekillendirmeye etkisi çekme işlemine olan etkisinden daha fazladır. Hosford (1983), derin çekme konusunda yapmış olduğu araştırmada, deformasyon verimliliğini $\eta = 0,75$ altında tutarak farklı gerilme oranlarında pekleşme üsteli n değerinin sınır derin çekme oranına etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda n değerinin derin çekmeye etkisinin çok olmadığını fakat $0,2 < n \leq 0,5$ aralığında belirginleştiği gözlemlenmiştir (Banabic, 2000).

Şekillendirme amaçlı üretilen çelik sacların n değerleri (pekleşme üsteli) 0,18'den başlar. Düşük karbonlu çeliklerde bu değer 0,22 civarındadır. Bu amaç dışında üretilmiş bazı çelik saclarda ise n değeri 0,10'a kadar düşebilir. Çeliğin yaşlanmasıyla ve soğuk deformasyonla pekleşme üsteli düşerken, bu değer tavlama ile artar. Tane boyutunun artması n değerini arttırır, fakat portakal görünümlü yüzey oluşturmaya neden olduğu için önerilmez.

2.4.6. Plastik anizotropi değerinin etkisi

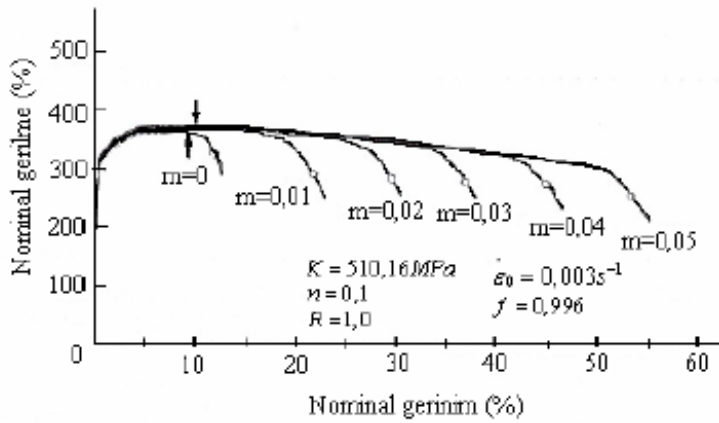
Anizotropi değeri, malzemenin incelmeye karşı göstermiş olduğu direnci ifade eder. Aynı zamanda bu değer sacların derin çekilmesinde önemli bir rol üstlendiği için de derin çekilebilirlik ölçütü olarak da tanımlanmaktadır.

Çelik sacların kalınlık yönündeki gerinim direncinin, genişlik yönündeki gerinim direncinden büyük olması beklenmektedir. Sebebi ise malzemenin şekillendirilmesi sırasında malzemenin kalınlığında çok fazla incelme olmadan gerilmenin yüzeyde dağılmasını sağlamaktır. Böylelikle başarılı bir şekillendirme işlemi gerçekleşmiş olur (Granzow, 1990).

Anizotropi değeri r ile ifade edilmektedir. Bu değer tekrardan derin çekme işlemine de olumlu etki etmektedir. Yüksek r değerleri ile, kesitte kalınlaşma ve ütülemedeki redüksiyon oranı azalmaktadır (Lange, 1985).

2.4.7. Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin etkisi

Gerinim hız duyarlılığı üsteli sac malzemelerin şekillendirilmesi sırasında meydana gelen gerinim dağılımına yardımcı olan önemli bir parametredir. Bu değer (m) ne kadar büyük olursa boyunlanma sonrasındaki malzemede meydana gelen şekil değiştirme miktarı da o kadar fazla olur. Bu da malzemedeki toplam uzama miktarını arttırmış olur. m değerleri yüksek olan malzemelerin boyun içindeki plastik akış hızı fazladır ve plastik şekil değiştirmeye karşı yüksek direnç gösterirler. Dolayısı ile plastik gerilme değerleri de yüksektir. Böylece boyunlanma olayı tek bir bölgede gerçekleşmeyip, tüm malzemedeki tekbiçim olarak gerçekleşmesine neden olmaktadır (Mielnik, 1991).



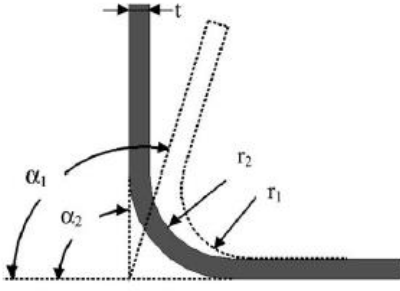
Şekil 2.29. Gerinim hızı duyarlılığı üstelinin gerilme-gerinim eğrisine etkisi

2.5. Çelik Saclarda Geri Yaylanma

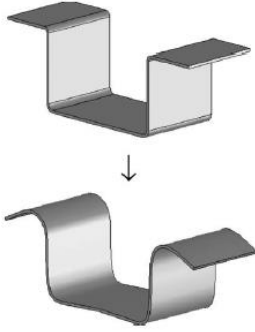
Tüm malzemeler sonlu bir elastisite modülüne sahip olduğundan, yük kaldırıldığında plastik deformasyonu bir miktar elastik toparlanma izler. Yükleme ve boşaltma işlemi sırasında, elastik gerinim serbest bırakılır ve artık gerilimler, geri yaylanma üreterek sac kalınlığı boyunca yeniden dağıtılır. Geri yaylanma, preslerde bükme, katlama, rulo şekillendirme ve rulo bükme gibi her türlü bükme ile şekillendirme işlemlerinde meydana gelir. Geri yaylanmanın bir sonucu olarak, bükme kalıbı açısı α_1 , iş parçası α_2 'de istenen açıya tam olarak karşılık gelmez (Şekil 2.30). Geri yaylanma faktörü K_R , açı oranı (α_1/α_2), malzeme özellikleri, bükme yarıçap ve sac kalınlığı ile ilişkilidir. Geri yaylanma faktörünün hesaplandığı eşitlik denklem 3'te verilmiştir.

$$K_R = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{r_1 + 0.5t}{r_2 + 0.5t} \quad (3)$$

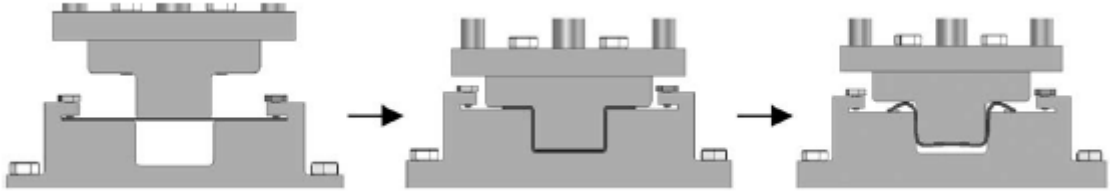
Burada α_1 kalıptaki açıdır (gerekli bükme açısı) [°], α_2 iş parçası (geri tepme sonrası) [°], r_1 kalıptaki iç yarıçap [mm], r_2 iş parçasındaki iç yarıçap [mm] ve t sac kalınlığıdır [mm].



Şekil 2.30. Bükme işleminden sonra elastik toparlanma



Şekil 2.31. Üretimlerde geri esneme olgusu



Şekil 2.32. Sac metal şekillendirme işlemi

2.5.1. Geri yaylanma davranışını etkileyen parametreler

Geri yaylanmayı etkileyen faktörler; malzeme özellikleri, sac kalınlığı, sürtünme koşulu, bağlayıcı kuvveti, takım geometrisi ve yağlayıcı durumu gibi hem malzeme hem de işlem parametrelerindeki değişiklikleri içerir. Ek olarak, FEM simülasyonundaki eleman tipi, ağ yoğunluğu ve malzeme modelinin geri esneme tahmini üzerinde önemli bir etkisi olabilir. Analizler, sac metal şekillendirmedeki geri esnemenin, bağlama koşulları ve malzeme özellikleri değiştirilerek azaltılabileceğini, ancak şekillendirmede oluşan artık gerilmelerin varlığından dolayı tamamen ortadan kaldırılamayacağını göstermiştir. Şekillendirilen iş

parçalarının geri esnemesini ne kadar doğru hesaplamak, kontrol etmek ve göstermek, sac şekillendirme alanındaki tasarımcıların ve üreticilerin odak sorunlarından biri haline gelmiştir.

2.5.2. Geri yaylanmanın telafisi

Her sac şekillendirme işlemi, elastik şekillendirmeyi ardında da kalıcı plastik deformasyonu getirir. Metallerin elastik özellikleri nedeni ile boşaltma işleminden sonra, elastik geri esneme olayı her zaman hedef dışı şekillendirilmiş bir geometri ile sonuçlanır. Geri yaylanma boşaltma sırasında ve şekillendirme sonrasında bir metal levhanın esnekliğinden kaynaklanan boyutsal bir sapmadır. Geri esneme olgusunu tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da geri esnemeyi en aza indirmek için farklı yöntemler uygulanabilmektedir. İlki boşluk tutucu kuvvetin (BHF) in kontrol edilmesine dayanmaktadır. Bu kuvvet sabit değildir. Kontrollü bir değişken olarak (VBHF) geri esnemenin en aza indirgenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. İkincisi sıcak bir şekillendirme işlemi kullanmaktır. Üçüncüsü ise geri yaylanmaya uyum sağlamak için kalıp yüzeylerini optimize etmek, kalıp telafisi yöntemi uygulamaktır.

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerle tanımlanan veya fonksiyonel minimizasyon olarak formüle edilebilen, problemlerin çözümünde kullanılan bir sayısal tekniktir. Geri yaylanmanın deneysel tahmini ve nihai geometrinin makul bir tolerans dahilinde belirlenmesi zaman alıcı ve pahalıdır. Son yıllarda, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), şekil verme sürecini simüle etmek ve geri esnemeyi tahmin etmek için etkili bir araç olarak kabul edilmektedir. FEA kullanarak geri yaylanma tahmini geçmişte birçok kişi tarafından kullanılmıştır. Sac metal şekillendirme, gerilmenin yanı sıra büyük malzeme rotasyonu içerdiğinden, FEA da uygun algoritma kullanılmalıdır. Sonlu elemanlar analizi yapılırken ağ yapısı, eleman tipi, eleman boyutu, sınır şartları ve malzeme özellikleri gibi parametreleri girdi parametreleri olarak tanımlayabiliriz. Yapılan simülasyon çalışmasında, daha güvenilir ve doğru sonuçlar elde etmek için seçilen bütün parametrelerin dikkatlice seçilmesi oldukça önemlidir.

3.1. Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametreleri

Çözüm aşamalarının doğruluğunu ve hassasiyetini etkileyen hesaplama parametreleri aşağıdaki gibidir;

- Eleman boyutu
- Adaptiv ağ yapısı derecesi
- Eleman Formülasyonu
- Zaman adımı
- Simetri durumu
- Hız etkisi
- Plastisite modeli

Bir sonlu elemanlar analizinin oluşturulmasındaki ilk işlem; analizi yapılacak olan parçanın modellenmesinin ardından bu geometriye ait uygun bir ağ yapısının oluşturulmasıdır. Ağ yapısı eleman ve düğüm noktalarından meydana gelmektedir. Eleman; analizi yapılacak olan geometrinin küçük parçalara ayrılmış hali, düğüm noktası ise bu küçük parçaların birbirine

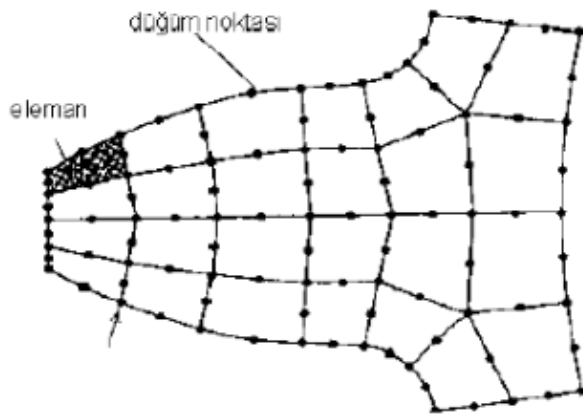
bağlandığı noktalar olarak tanımlanabilir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan 3 farklı eleman tipi vardır (Vatansever, 2019).

- Boyut kiriş elemanlar
- Boyutlu kabuk ya da membran elemanlar
- Boyutlu kübik elemanlar

Sac metal şekillendirme işlemleri bir düzlem gerilme problemi olduğundan ve kalıp takımlarının yalnızca form verme yüzeylerinin kritik olmasından ötürü geometriler yüzey olarak modellenir. Bu nedenle, sac metal şekillendirme işlemlerinde eleman tipi olarak çoğunlukla kabuk eleman kullanılmaktadır.

3.1.1. Element boyutu

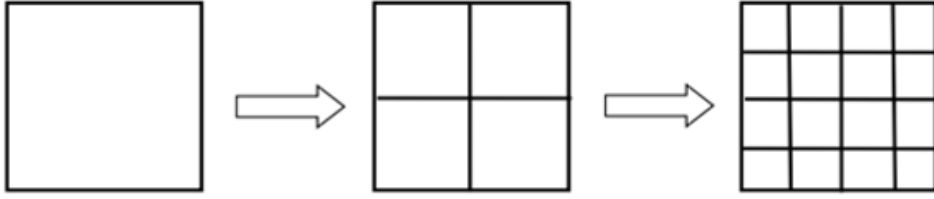
Analizi yapılacak olan geometrinin içerisinde küçük hücre gibi ayrılmış parçalara eleman denilmektedir. Sistemin tamamını oluşturan eleman sayılarının artması, çözülecek olan diferansiyel denklem sayısının da artması anlamına gelmektedir. Bu durum çözüm hassasiyeti açısından olumlu bir etki yaratırken, çözüm süresinin artması ile de olumsuz etki yaratır.



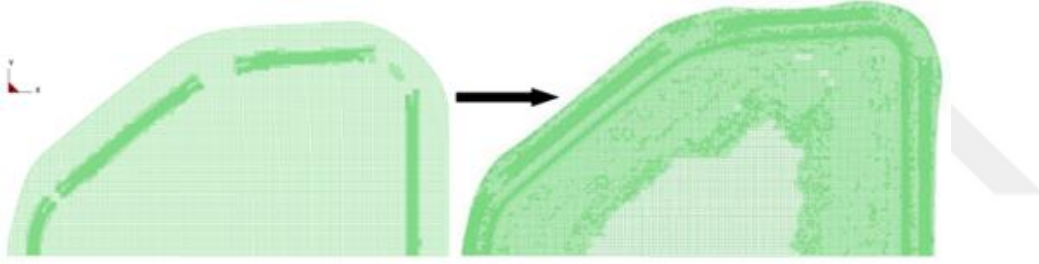
Şekil 3.1. Geometrideki eleman ve düğüm noktası

3.1.2. Adaptiv ağ yapısı derecesi

Analizi yapılacak olan geometrinin eleman boyutu etkisinin bir diğer değerlendirme şekli ise ağ adaptasyonudur. Ağ adaptasyonunda temel mantık, özellikle eğilme deformasyonuna uğrayan bölgelerde (radyüs, süzdürme çubuğu vb.) çözüm sırasında başlangıç ağ yapısının küçültülerek daha hassas sonuçların alınmasıdır.



Şekil 3.2. Ağ adaptasyonu şematik gösterimi



Şekil 3.3. Ağ adaptasyonu durumuna bir örnek

3.1.3. Eleman formülasyonu

Sonlu elemanlar analizinde kabuk elemanlar genellikle üç farklı eleman formülasyonu ile modellenmektedirler.

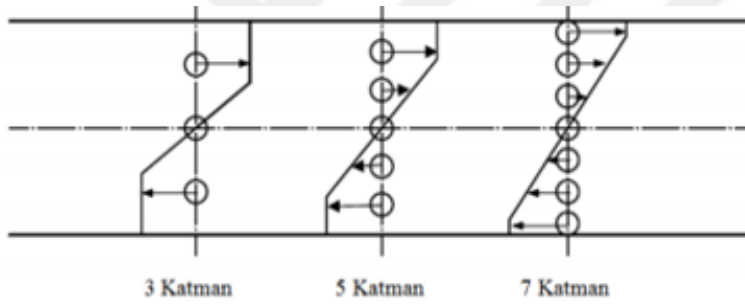
Hughes-Liu (HL): HL kabuk elemanlarda, eleman yapısı rijit hareketlerde gerinim üretmediği için birçok uygulamada sonlu gerinim hesaplaması rahatlıkla yapılabilmektedir. Ayrıca basit yapısından dolayı hesaplanma kolaylığı sağlamaktadır ve sonlu enine kayma gerinimlerini üzerinde barındırmaktadır.

Belytschko-Tsay (BT): BT kabuk eleman, HL kabuk elemana göre daha az sayıda matematiksel operasyona ihtiyaç duyar. Çözüm süresinin kısa olması ve buna bağlı olarak

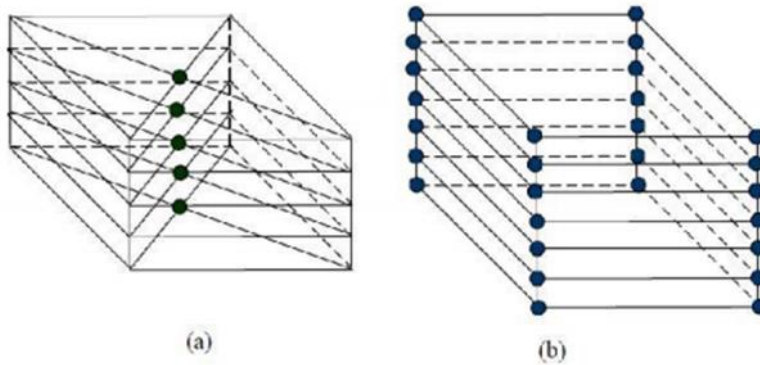
da hesaplama maliyetlerinin düşük olması sebebi ile daha avantajlı konumdadır. Dönel bir koordinat sistemine sahiptir ve hız-gerinim formülasyonunu kullanır.

Tam integrasyonlu eleman formülasyonları: Bu kabuk elemanı gerinim interpolasyonu kabulü yapar. Böyle bir davranış sergilemesi, düzlemsel eğme davranışlarını arttırmak ve kilitlenme sorunlarını azaltmak içindir. Lokal koordinat sistemine sahiptir ve BT elamanalar gibi hızlı çözüm yapabilirler.

İntegrasyon nokta sayısı: Sac metal şekillendirme işlemlerinde en sık karşılaşılan problemlerden biri de incelmedir. İncelmenin analiz edilebilmesinde, kalınlık yönündeki gerilme dağılımına ihtiyaç vardır. Kabuk eleman formülasyonları kalınlık yönündeki bu gerilme dağılımlarını integrasyon nokta sayısı ile hesaplamaktadır. Bu da kabuk eleman formülasyonunun incelendiği katman sayısı ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 3.4. Katman sayısı ve gerilme durumunun şematik ifadesi



Şekil 3.5. Kabuk eleman için (a) 5 katmanda (b) 7 katmanda çözüm hesaplama noktaları

3.1.4. Zaman adımı

Sonlu elemanlar analizlerinin çözüm süresini etkileyen önemli parametrelerden biri de zaman adım büyüklüğüdür. Hesaplama formülü ise denklem 3'deki gibidir;

$$\Delta T = L/C \quad (4)$$

L sonlu elemanlar ağ yapısındaki en küçük elemanın kenar uzunluğunu, C ise ses hızını ifade etmektedir. C ifadesinin eşitliği denklem 5'de verilmiştir.

$$C = \sqrt{E/(\rho_0(1 - \nu^2))} \quad (5)$$

E elastisite modülünü, ρ_0 malzeme yoğunluğunu, ν poisson oranını ifade etmektedir.

3.1.5. Simetri durumu

Geometrisinde simetri bulunan kalıp takımlarının yarım model ya da çeyrek model olarak tasarlanması analiz süresini kısaltır. Simetrinin sağlandığı eksen üzerindeki düğüm noktalarının uzaydaki serbestlik derecelerinin kısıtlanması ile simetri davranışı modellenenbilmektedir.

3.1.6. Hız etkisi

Kalıp ilerleme hızı hem simülasyon hesaplama süresine hem de simülasyon tahmin hassasiyetine doğrudan etki eden bir parametredir.

3.1.7. Plastisite modeli

Malzemenin plastik davranışını modelleyen parametredir ve hesaplama hassasiyetini doğrudan etkilemektedir. Elastik malzeme davranışına göre daha karmaşık bir kavramdır. Elastik malzeme davranışında, gerilme ve gerinim değerleri arasında Hooke kanunu vasıtası ile doğrudan lineer bir ilişki kurulabilirken plastik malzeme davranışında böyle bir durum söz konusu değildir çünkü plastik gerinim malzemenin tüm yükleme geçmişine bağlıdır. Plastik davranışın modellenenbilmesi için malzemenin akma kriterine (akmanın meydana

geldiği andaki gerilme bileşenleri), akma kuralına (gerilme ve gerinim oranı bileşenleri arasındaki ilişki) ve pekleşme kuralına ihtiyaç vardır. Şekil değişimi süresince başlangıç akma gerilmesi pekleşme kuralları vasıtası ile tanımlanmaktadır. Çeşitli kabüllere göre plastisite modelleri farklılıklar gösterebilir. Temelde izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme kabullerini yapan iki temel grup ortaya çıkmaktadır. Bazı plastisite modelleri izotropik pekleşme kabulü, bazıları ise kinematik pekleşme kabulü yaparken her iki durumu modelleyebilen birleşik pekleşme durumu kabulü yapan plastisite modelleri de geliştirilmiştir.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, pişirici fırınlarında kullanılan katalitik yan panel sac parçasının emaye kaplama sonrasındaki çarpımları deneysel ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Yapılan deneylerde iki adet iş parçası kullanılmıştır. Bu parçaların sac kalitesi, malzeme kalınlığı, hadde yönü aynıdır. Değişken işlem parametresi, parçanın kalıplama prosesindeki farklılıktır.

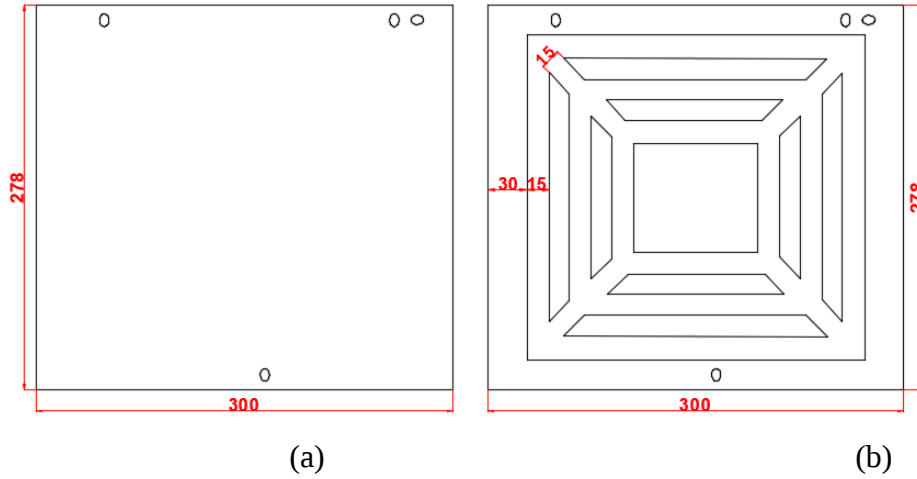
Deneysel çalışmalarda, çekme işlemine uygun, yaşlanmaya dayanıklı, ekstra derin çekmeye ve emaye kaplamaya daha yatkın 0,6 mm kalınlığında DC04EK kalite, Avrupa standartlarında EN 10209 olan imalat çeliği sac malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme genellikle otomotiv sektöründe, beyaz eşya, dayanıklı ev aletleri imalatı yapan, yüksek mukavemet, dayanıklılık ve şekillendirilebilirlik isteyen hemen hemen bütün sektörlerde kullanılmaktadır. Kullanılan sac malzemenin kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1’ de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

DC04EK (0,6 mm)								
Kimyasal Bileşim [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
0,08	0,50	-	0,030	0,050	-	-	-	-
Mekanik Özellikler								
R _m (MPa)	R _{eH} (MPa)	A (%)	Young’s Modulus (GPa)	Tr	Yoğunluk (g/cm ³)	Isıl İletkenlik (W/mk)	Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m°C)	Elektriksel Direnç (µΩcm)
270-350	220	36	200	0,287	7,8	25,1	10,4	61

4.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada, pişirici fırınlarının katalitik yan panel sacı olarak kullanılan 0,6 mm kalınlığında DC04EK kalitesinde 300x278x0,6 mm ebatlarında iki farklı işlem proseslerinden geçmiş sac metal parçalar kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Düz sac metal parça (a), geometrik formlu sac metal parça (b)

Deneyde kullanılan iki sac parça arasında tek bir işlem prosesi farklılığı vardır. Bu farklılıkta hidrolik pres makinesi ile parçaya geometrik form verme işlemidir. Bu işlem, malzemedeki çarpılma problemini minimize etmek için yapılan bir çalışmanın çıktısı niteliğindedir.



Resim 4.1. Hidrolik pres makinesinde parça yüzeyine form verme işlemi



Resim 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan sac malzemeler (emaye proses öncesi)

Çizelge 4.2. Deneyde kullanılan parçaların işlem prosesleri

PARÇANIN ADI	1. PROSES	2. PROSES	3. PROSES	4. PROSES	FIRINLAMA	5. PROSES	FIRINLAMA
Düz Formlu Sac Metal	Kesme + Delme	Kenar Bükme	X	Lacivert Emaye		Katalitik Emaye	
Geometrik Formlu Sac Metal	Kesme + Delme	Kenar Bükme	Form verme	Lacivert Emaye		Katalitik Emaye	

Malzemeler üzerindeki çarpımları deneysel olarak gözlemleyebilmek ve karşılaştırma yapabilmek için her bir parçadan 20'şer adet numune parça kesilip, Çizelge 4.2'de belirtilen işlem proseslerine tabi tutulmuştur. Her iki parçada da 4. proses evresi olan lacivert emaye kaplama prosesine kadar olan kısımda parçalar üzerinde meydana gelen çarpımlar ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu gözlemlenmiştir. Malzemelere lacivert emaye atılması işleminin ardından kaplamanın kurumması için 20-25 dakika boyunca maksimum sıcaklığın 830°C'lere ulaştığı fırında kurutulmuştur. Katalitik emaye kaplamanın parça yüzeyine tutunabilmesi için lacivert emaye kaplamanın yapılması gerekmektedir. Fırından çıkan sac malzemelere oda sıcaklığında katalitik emaye kaplama işlemi uygulanır. Bu işlem hem maliyetten hem de zamandan tasarruf sağlaması açısından parçanın tek yüzeyine uygulanmaktadır. Katalitik emaye işleminin ardından yeniden kurutma fırınına girerek nihai ürün elde edilmiş olur. Yapılan bu çalışmada farklı geometriye (düz ve geometrik formu sac) sahip katalitik emaye kaplı sac parçalarda meydana gelen çarpımların analiz edilmesinin yanı sıra, aynı geometrik yapıya sahip (düz ve geometrik formu sac) emaye kaplamasız (emaye prosesine girmemiş) sac parçalarının malzeme üzerindeki çarpımları da analiz edilmiştir. Böylelikle emaye kaplamanın çarpılmaya etkisi de incelenmiştir. Lacivert emaye işleminin malzeme üzerinde 75-80 µm kalınlık yarattığı, katalitik emaye kaplama işleminin ardından da malzeme kalınlığının toplamda 150-160 µm aralığında arttığı gözlemlenmiştir.

Parçaların emaye hattındaki operasyonu altı adımda gerçekleşmektedir;

1. Adım

- Parça şebeke suyu ve iki adet kimyasal ile 50°C'de yıkanıyor
- Parça sadece şebeke suyu ile 50°C'de yıkanıyor
- Parça sadece şebeke suyu ile 50°C'de yıkanıyor
- Parça sadece şebeke suyu ile ortam sıcaklığında yıkanıyor

2. Adım

- Parça 145°C’de kurutma fırınına giriyor

3. Adım

- Parçaya ortam sıcaklığında lacivert emaye atılıyor

4. Adım

- Parça 830°C’de pişirme fırınına giriyor

5. Adım

- Ortam sıcaklığında katalitik emaye atılıyor

6. Adım

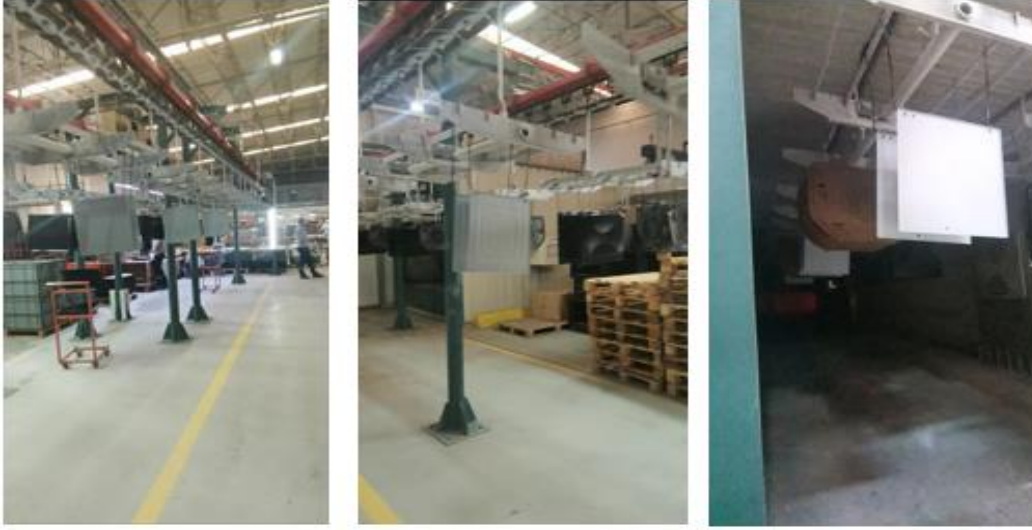
- 830°C’de tekrardan pişirme fırınında pişiriliyor



Resim 4.3. Yıkamadan çıkan, kurutma fırınına giren deney parçaları



Resim 4.4. Lacivert emaye kaplama işlemine giren deney parçaları



Resim 4.5. Lacivert emaye kaplama sonrası fırınlama işlemi



Resim 4.6. Lacivert emaye kaplamanın kalınlığı (μm)



Resim 4.7. Katalitik emaye kaplama işlemi



Resim 4.8. Katalitik emaye kaplama sonrası fırınlama işlemi

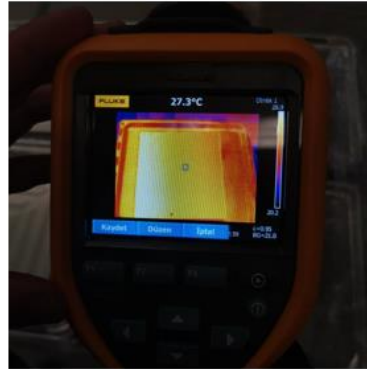


Resim 4.9. Katalitik emaye kaplamanın kalınlığı (μm)

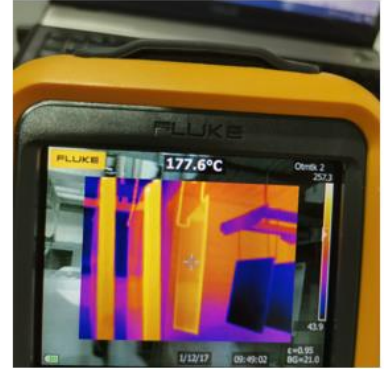
Parçalar üretim prosesi gereği iki farklı işlem basamağında sıcaklığın maksimum 830°C 'lere çıktığı kurutma fırınına girmektedir. 22°C ortam sıcaklığından fırına giren deneysel parçaların sıcaklık değerleri, fırınının çıkışında Fluke marka endüstriyel ticari termal kamera ile ölçülmüştür. Fırın içerisinde maksimum sıcaklığa ulaşan parçaların sıcaklık değerleri fırın çıkışına doğru yavaş yavaş düşmektedir. Fırın çıkışında parçaların üzerinden termal kamera ile alınabilen sıcaklık değerleri Resim 4.10 ve Resim 4.11'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

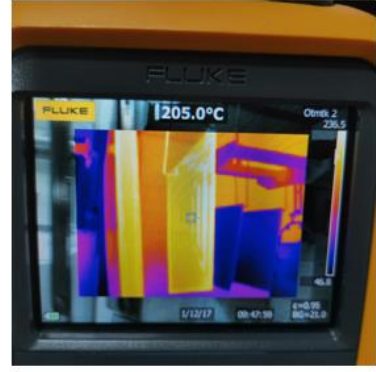
Resim 4.10. Düz parça emaye prosesi öncesi (a, b) ve sonrası (c) yüzey sıcaklığı



(a)

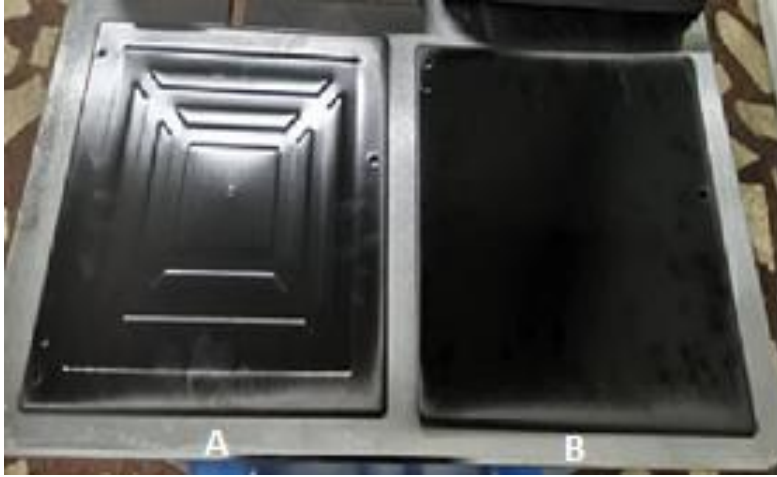


(b)

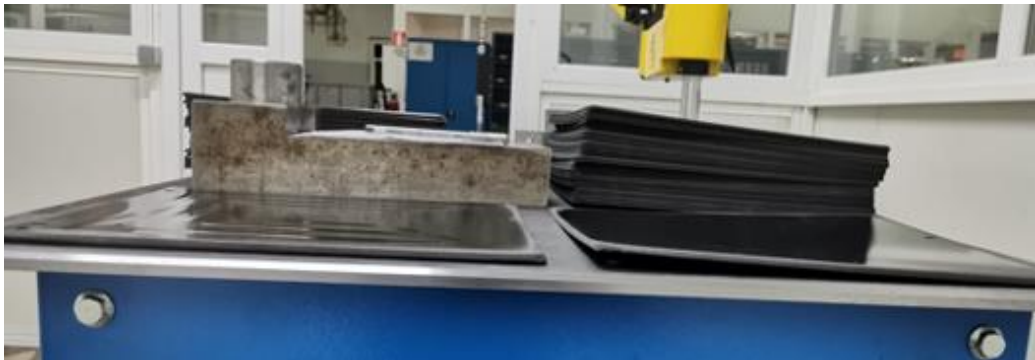


(c)

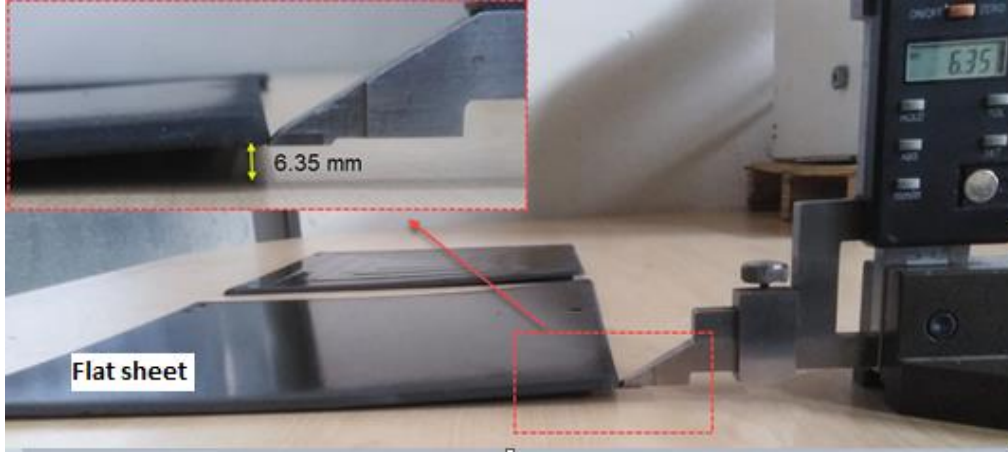
Resim 4.11. Formlu parçanın emaye prosesi öncesi (a, b), sonrası (c) yüzey sıcaklığı



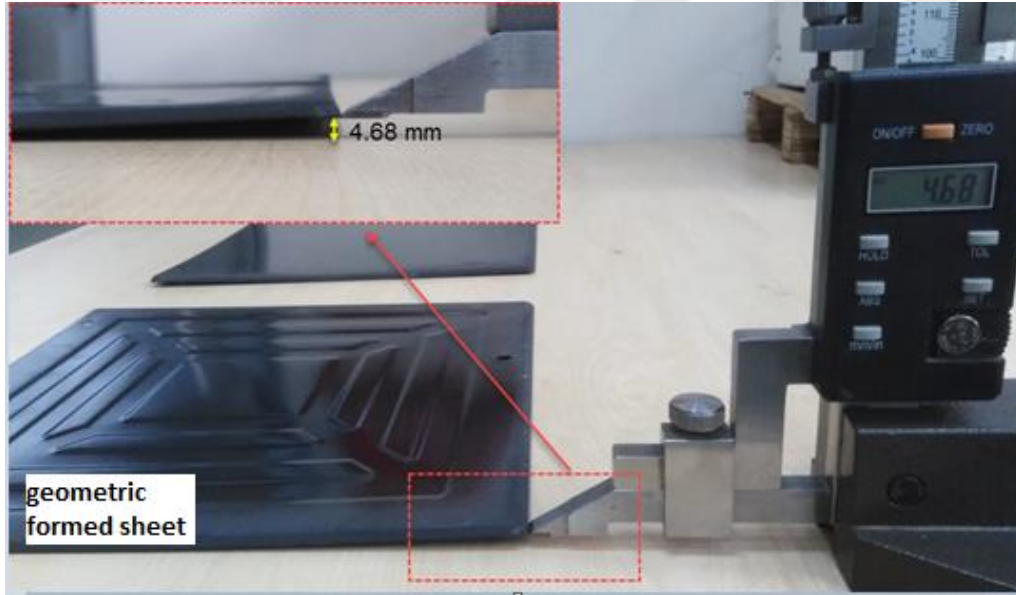
Resim 4.12. Emaye prosesi sonrası (A) Geometrik formlu (B) Düz sac metal parça



Resim 4.13. Emaye kaplama sonrasında parçalar üzerinde oluşan çarpılmalar



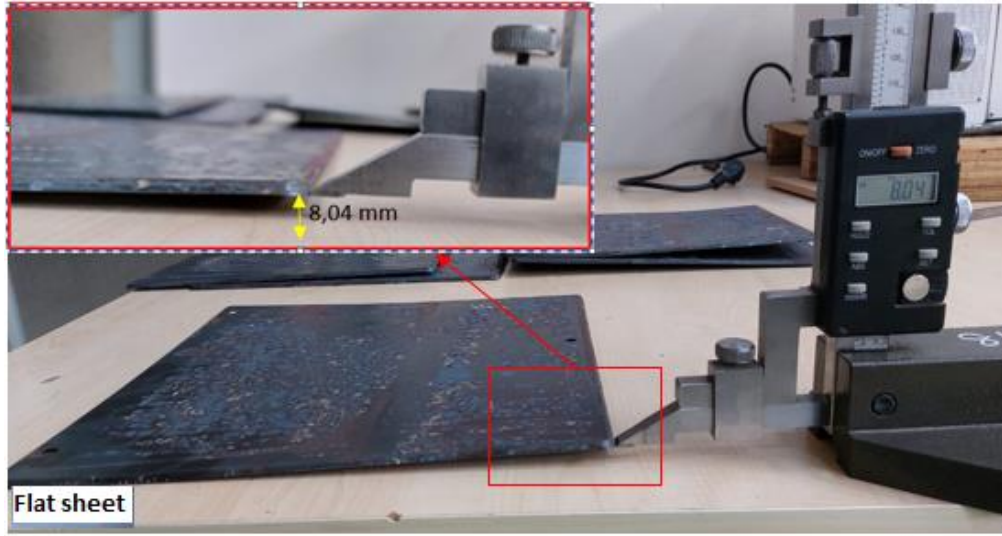
Resim 4.14. Düz formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (emaye kaplı)



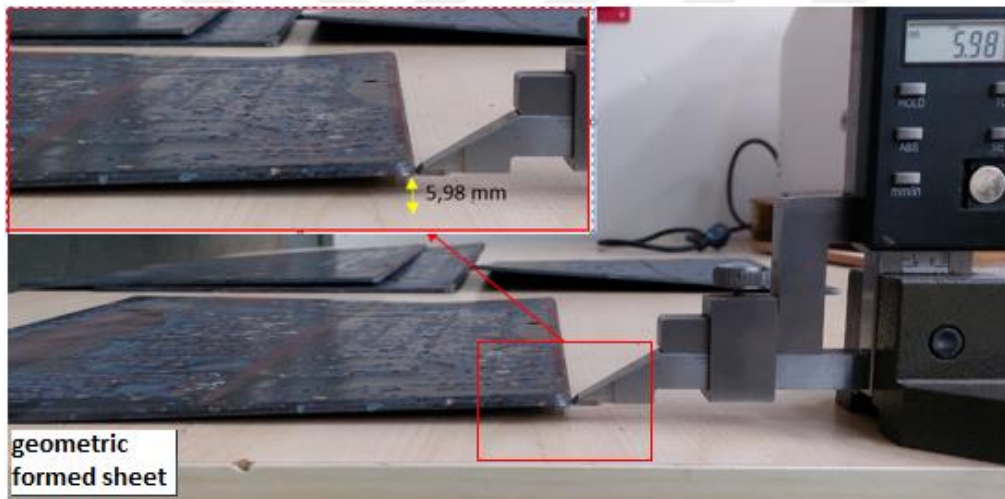
Resim 4.15. Formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (emaye kaplı)

Emaye kaplama prosesinden çıkan deney numuneleri incelendiğinde; düz sacdaki çarpılma (X eksenindeki yapısal değişim) 6,35 mm ölçülürken, geometrik formlu sacdaki çarpılma 4,68 mm olarak ölçülmüştür.

Emaye kaplama prosesine girmeyen deney numuneleri çıktılarını incelendiğinde ise; X eksenindeki yapısal değişim düz sacda 8,04 mm ölçülürken geometrik formlu sacdaki değişim 5,98 mm olarak ölçülmüştür.



Resim 4.16. Düz formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (kaplamasız)



Resim 4.17. Formlu sac levhanın X eksenindeki yapısal değişimi (kaplamasız)



Resim 4.18. Katalitik yan panel sacların fırına montajı

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi ile Sayısal Çalışma

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan sayısal çalışmada öncelikli olarak sac malzemelerin katı modelleri CAD programlarından biri olan Solidworks programında oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan iki farklı geometriye sahip sac parçaların analizleri ise mühendislik alanında çok sık kullanılan simülasyon programlarından biri olan Ansys programı ile simüle edilmiştir. Analizler her bir parça için ayrı ayrı yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, malzeme üzerindeki çarpılmaların emaye prosesinden sonra meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık değerlerine maruz kalan sac parçalarda yapısal deformasyonlar meydana gelmiştir. Farklı geometriye sahip aynı özellikteki bu iki parça arasındaki yapısal değişimler (çarpılmalar), FEA uygulamasının Static Structural (statik yapısal analiz) yöntemi ile simüle edilmiştir. Malzemelerin emaye hattında yüksek sıcaklık değişimlerine maruz kalması kaynaklı, parça üzerinde oluşan yapısal şekil değişikliğinin analiz edilebilmesi için öncelikli olarak parçanın 22°C ve 830°C sıcaklık değerleri arasındaki sınır koşullar altında Steady-State Thermal (Termal Analiz) analiz yapılmıştır ve sıcaklığın malzeme üzerindeki etkisi Static Structural analizi ile değerlendirilmiştir.

Parçalara analizlerin yapılabilmesi için yüzeylerine mesh atma (eleman ağı oluşturma) işlemi uygulanmıştır. Bunun için de mesh metrik kriterleri kullanılmıştır. Ağ kalitesi açısından bütün kriterlerin tamamının değerlendirilmesine gerek duyulmamaktadır. Önem sıralamasına göre 3 adet kriterin değerlendirilmesi ağ kalitesinin belirlenmesinde yeterlidir. Skewness-çarpıklık, Ortogonal quality-ortogonal kalite, Aspect ratio-en/boy (Korkmaz, 2021).

- Çarpıklık (Skewness)

Ağ elemanı boyutu ile gerçek boyut arasındaki farka bakılarak değerlendirilir. Değer aralığı [0,1] arasındadır. Maksimum çarpıklık $<0,9 \sim 0,94$ olması gerekir. Bu değer sıfıra ne kadar yakın ise ağ kalitesi o kadar iyidir. Kalite aralığı, ideal ağ elemanı geometrisinden sapma ölçüsü olarak değerlendirilir (Korkmaz, 2021).



Şekil 4.2. Ağ elemanın ideal geometriden sapması (a), çarpıklık kalite renk çizelgesi (b)

- Ortogonal kalite

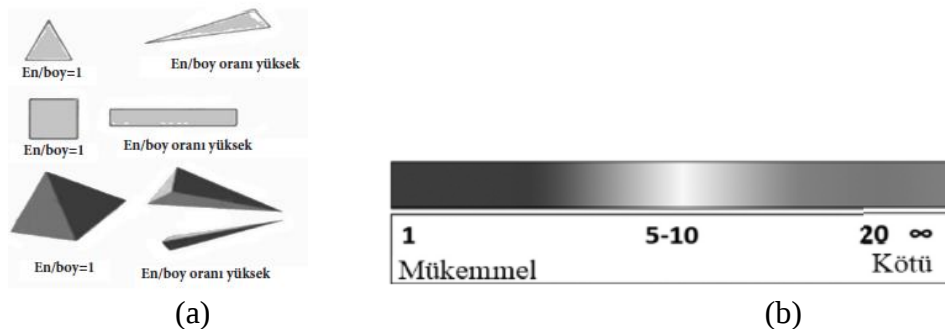
Ağ elemanı yüzeylerinin orta noktasının merkezine olan uzaklığının, komşu mesh eleman yüzeylerinin orta noktalarında birbirine olan uzaklığa oranıdır. Minimum değerlerine bakılarak değerlendirilir. Minimum Orthogonal quality > 0,1 ile 0,15 arasında olması istenir. Kalite değerini renk spektrumu ile gösteren belirli bir kalite aralığı vardır. (Korkmaz, 2021).

Çizelge 4.3. Orthogonal kalite aralığının renk spektrumu ile gösterimi

KABUL EDİLEMEZ	KÖTÜ	KABUL EDİLEBİLİR	İYİ	ÇOK İYİ	MÜKEMMEL
0-0,001	0,001-0,14	0,15-0,20	0,20-0,69	0,70-0,95	0,95-1,00

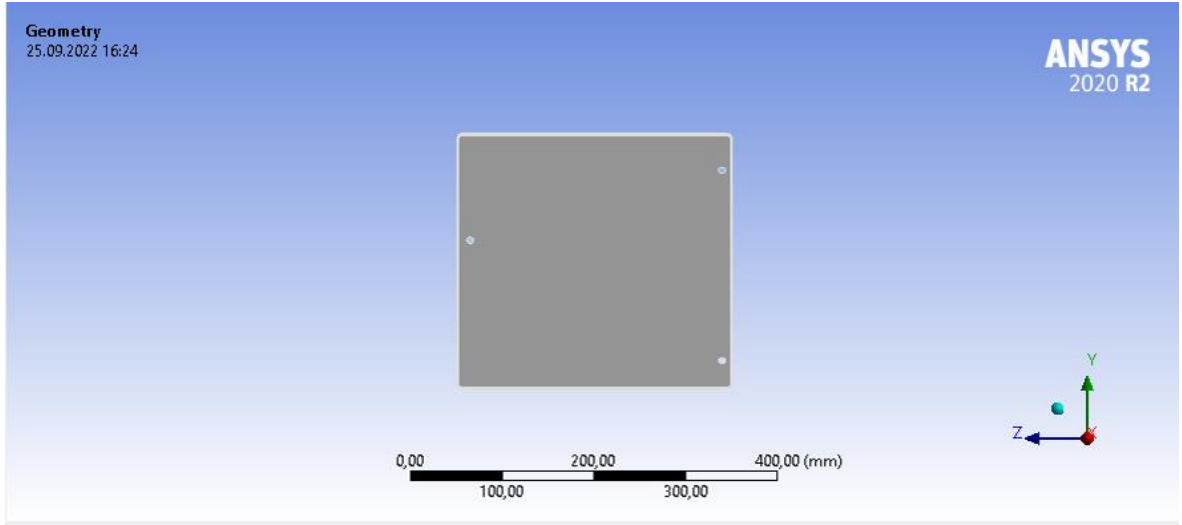
- En/boy oranı (Aspect ratio)

Ağ elemanı uzun kenar uzunluğunun kısa kenar uzunluğuna oranı olarak ifade edilir. İdeal olan ağ elemanındaki bu oran 1 dir. Bu orandan ne kadar çok uzaklaşırsa ağ kalitesi o kadar düşer. Kalite değerlendirmesi makisimum değere göre yapılır. Bu değerin 20’den büyük olması istenmez. Maksimum Aspect Ratio (AR) < 20 olması istenir (Korkmaz, 2021).

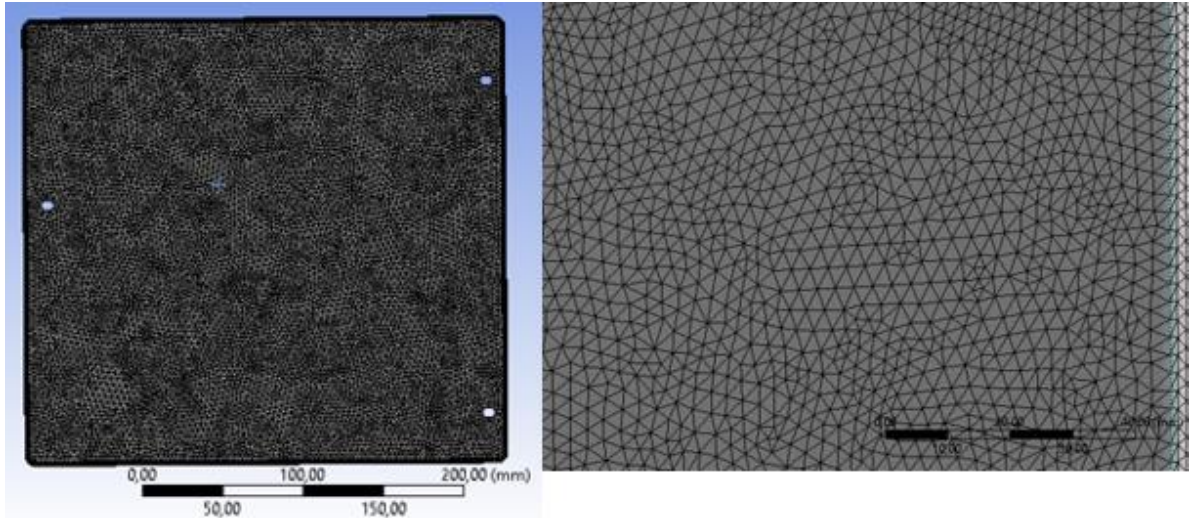


Şekil 4.3. En/boy oranı (a) şekilsel gösterimi (b) aralık değer

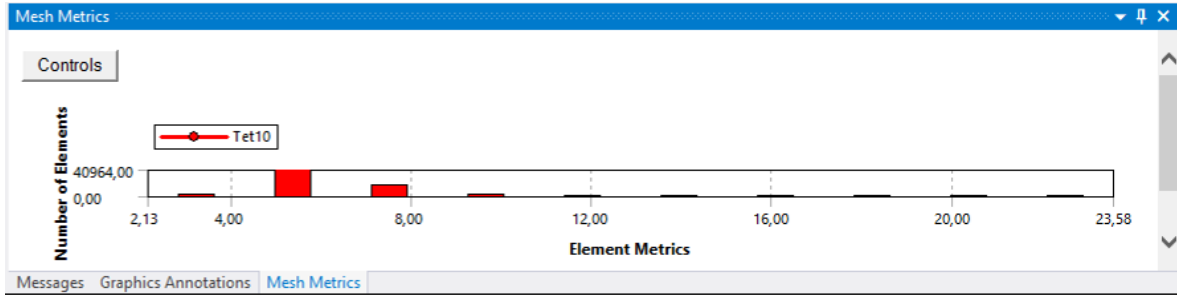
Yapılan sayısal çalışmalarda, eleman kalitesi açısından en ideali olarak kabul edilen kare/küp elemanlarından oluşan Hekzagonal ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan bu ağ yapısının kalite seviyesini arttırıp daha doğru ve hassas çözümler elde etmek için de mesh metrik kalite kriterlerinden olan “Aspect Ratio” (en/boy oranı) kriteri kullanılmıştır. Elemanların boyutunu 20 mm’den 2 mm’ye kadar düşürerek, kabul edilebilir aralıkta ve kullanılan bilgisayarın çözüm yapabileceği seviyede optimum kalite değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Düz sac metal parçanın geometrisi



Şekil 4.5. Düz sac metal parçaya uygulanan mesh işlemi ve ağ yapısı



Şekil 4.6. Düz sac metal parçanın mesh metrik kriterine göre en/boy dağılımı

Details of "Mesh"	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
☐ Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Aspect Ratio
☐ Min	2,1346
☐ Max	23,58
☐ Average	6,0553
☐ Standard Deviation	1,1799
+ Inflation	
+ Advanced	

Şekil 4.7. Düz sac metal parçanın AR değerleri

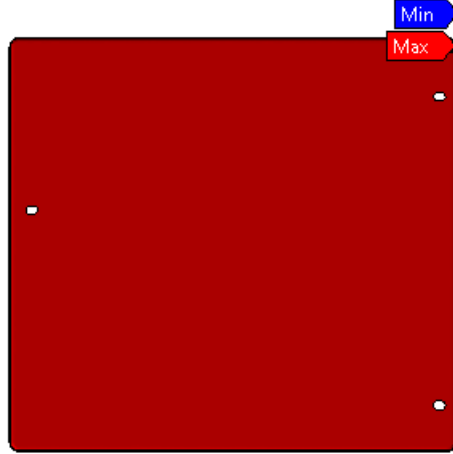
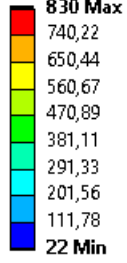
Şekil 4.7’de görüldüğü üzere mesh metrik kriterlerinden Aspect ratio (en/boy oranı) oranına göre değerlendirme yapılmıştır. İdeal ağ elemanında bu oran 1 olması istenirken, Max<20 olması istenmektedir. Şekil 4.6’da oluşturulan mesh metrik grafiğinde en/boy dağılım yoğunluğu $4 < AR < 8$ aralığında olup, ortalama 6,05 değerindedir. Bu veriler de kabul edilen değerler arasında kalmaktadır (Korkmaz, 2021).

Oluşturulan mesh işleminin detaylarına bakıldığında ağ yapısı 62.371 adet elementten ve 125.969 adet düğüm noktasından oluşmuştur.

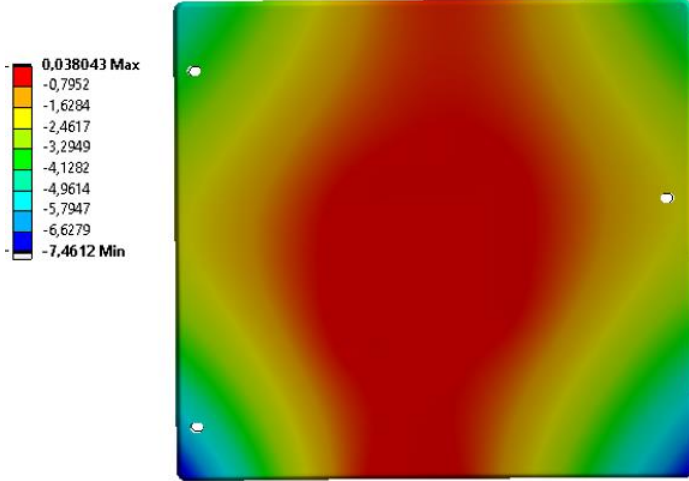
Mesh işlemi tamamlandıktan sonra emaye hattının pişirme fırınında parçanın maruz kaldığı 830°C sıcaklığı simüle etmek için termal analiz (Steady-State Thermal) yöntemi uygulanmıştır. İlk sıcaklık, ortam sıcaklığı olarak 22°C olarak kabul edilmiştir.

C: Steady-State Thermal

Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1
 24.11.2022 22:31

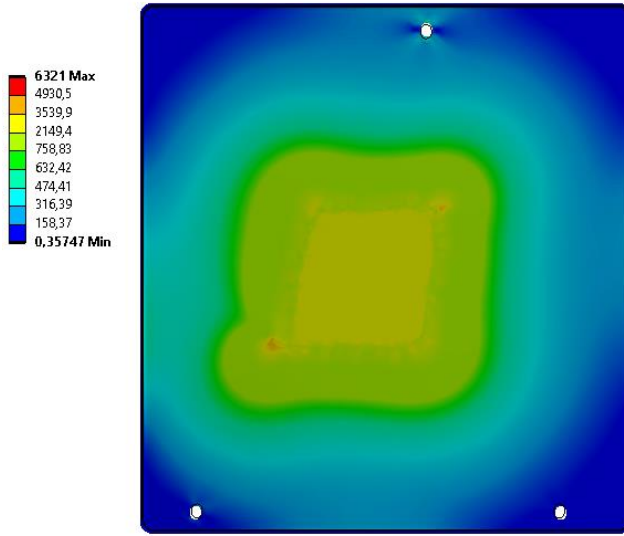


Şekil 4.8. Düz sac metal parçanın termal analizinin yapılması



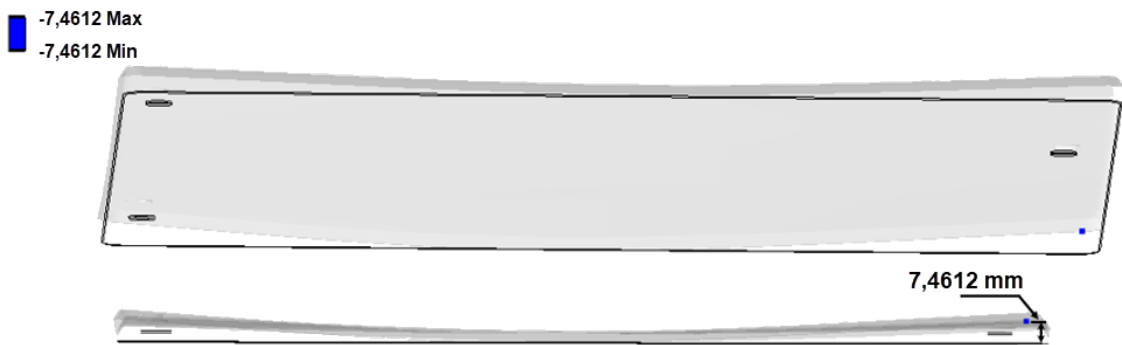
Şekil 4.9. Düz sac metal parçanın üzerindeki toplam ısı akışı

22°C oda sıcaklığından 830°C emaye hattındaki fırına giren parçanın üzerindeki ısı akışı dağılımı Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Düz sac metal parçanın analiz sonuçlarına bakıldığında birim alandaki ısı geçiş miktarının, merkez ve çevresine yakın bölgelerde fazla olduğu, merkezden uzaklaşıp köşelere doğru gidildikçe de azaldığı gözlemlenmiştir. Parça yüzeyindeki, farklı alanlardaki farklı ısı akış değerleri, farklı oranlardaki ısıl gerilmelere neden olmaktadır. Düzensiz bir şekilde oluşan bu gerilmeler parçanın çarpılmaya uğramasına neden olmaktadır. Düz sac metal parça üzerindeki oluşan bu gerilmeler Şekil 4.10'da ki Von mises gerilme analizinden de gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.10. Düz sac metal parçanın Von Mises gerilmesi

Von Mises gerilmesi yapının herhangi bir yükleme durumunda plastik şekil değişimine uğramış olup olmadığını belirlemek için hesaplanan bir değerdir. Parça emaye hattına girerken yüzeyinde yer alan iki adet delikten askı aparatları ile asılarak hatta girmektedir. Aynı koşulları sağlamak için analizde de o bölgeler sabitlenmiştir. Sabitlenen bu bölgedeki gerilmeler Şekil 4.10'daki mavi bölgede gösterildiği gibi minimum 0,35747 MPa seviyesindedir.

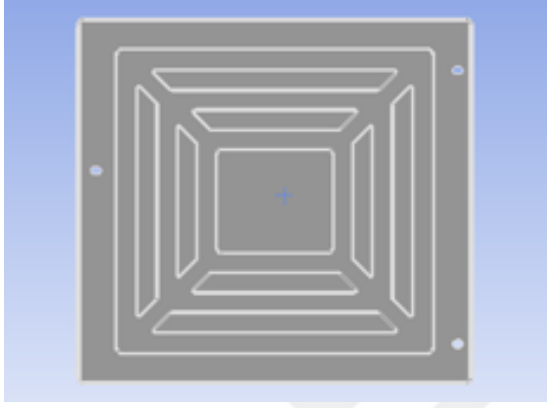


Şekil 4.11. Düz sac metal parçanın x eksenindeki yapısal değişimi

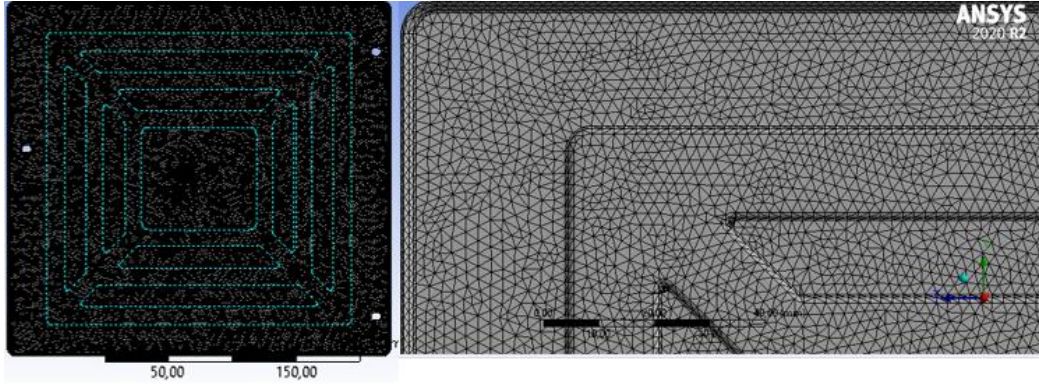
İyileştirilmeden önceki ilk parçada (düz sac parça) emaye prosesinde maruz kaldığı 830°C sıcaklığın etkisi ile parça üzerinde farklı bölgelerde farklı gerilmeler meydana gelmiştir. Bu gerilmeler parça üzerinde yapısal bozukluklar meydana getirmiştir. Yapılan analizler de bu sonucu destekler niteliktedir. Parçanın “x” eksenindeki meydana gelen minimum değişim

eksi yönde 7,4612 mm iken, maksimum artı yönde 7,4612 mm'dir. Farklı eksenlerde meydana gelen bu değişim de parçadaki çarpılmayı ifade etmektedir.

Düz sac metal parça için yapılan analizlerin hepsi, geometrik formlu sac metal parça için de yapılmıştır. Yapılan bu analizler ile her iki parçada da meydana gelen yapısal değişimler değerlendirilerek, parçalar arasındaki çarpılma farkları ortaya koyulmuştur.

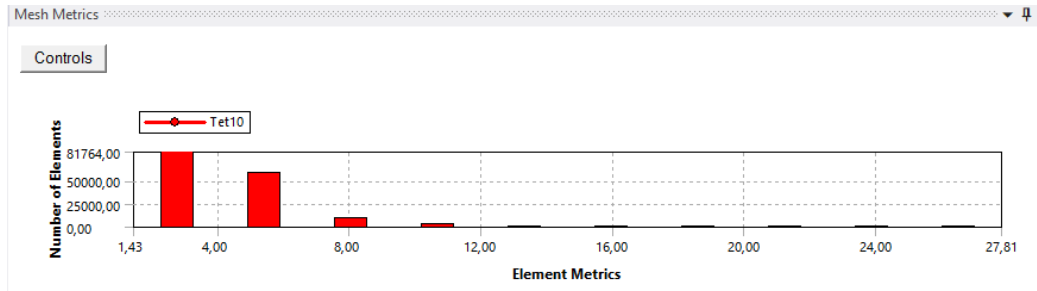


Şekil 4.12. Geometrik formlu sac metal parçanın geometrisi



Şekil 4.13. Geometrik formlu sac metal parçaya uygulanan mesh işlemi ve ağ yapısı

Oluşturulan mesh işleminin ardından meydana gelen parçanın ağ yapısı 152.096 adet element ve 305.860 adet düğüm noktasından oluşmuştur. Ağ yapısının kalite seviyesini arttırıp daha doğru ve hassas çözümler etmek için mesh metrik kalite kriterlerinden Aspect Ratio (en/boy oranı) kriteri ikinci parça için de uygulanmıştır.



Şekil 4.14. Geometrik formlu sac metal parçanın en/boy dağılımı

“Element Metrics” elemanın en/boy oranını ifade ederken, “Number of Elements” en/boy oranındaki eleman sayısını ifade etmektedir. AR değerleri de minimum 1,4342 maksimum 27,814 mm’dir. En fazla eleman sayısı Şekil 4.14’de görüldüğü gibi $1,43 < AR < 4,0$ aralığında olup, dağılımın genel ortalaması da 4,3214 mm’dir.

Details of "Mesh"	
Mesh Metric	Aspect Ratio
☐ Min	1,4342
☐ Max	27,814
☐ Average	4,3214
☐ Standard Deviation	1,2216

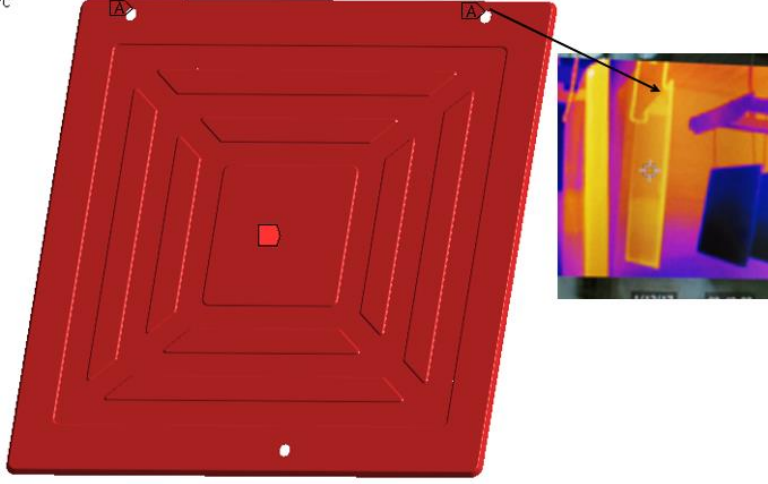
Şekil 4.15. Geometrik formlu sac metal parça için mesh detayları

Mesh işlemi tamamlandıktan sonra parçanın oda sıcaklığından çıkıp emaye hattında maruz kaldığı 830°C sıcaklığı simüle etmek için termal analiz (Steady-State Thermal) yapılmıştır. Deneysel çalışmada sac levhalar parça üzerindeki iki delikten kancalar ile asılmıştır. Deneysel çalışmadaki koşulların aynısını sağlamak için sac levhalar Şekil 4.16’da gösterildiği gibi sonlu elemanlar analizinde de iki delikten sabitlenmiştir.

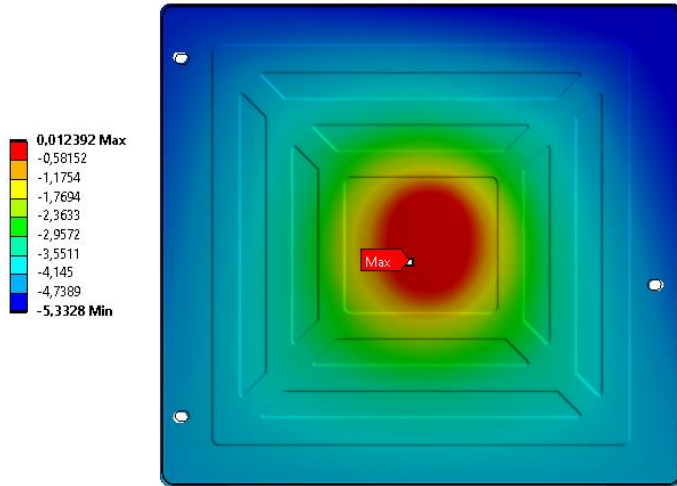
B: Steady-State Thermal
Temperature 2
Time: 1, s
9.12.2022 15:55

Temperature 2: 830, °C

Fixed Support

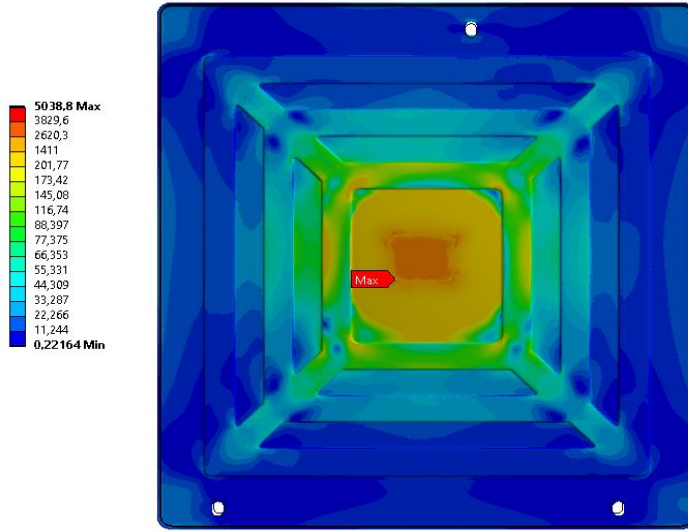


Şekil 4.16. Tanımlı sınır koşulu



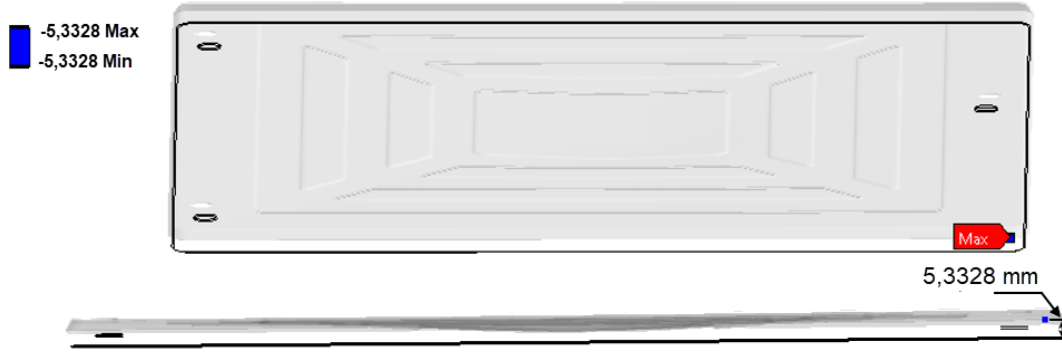
Şekil 4.17. Geometrik formlu sac metal parça yüzeyindeki toplam ısı akışı dağılımı

Geometrik formlu sac parça için yapılan termal analiz incelendiğinde, ısı bir bölgede (merkez) hapsolmuş olarak görülmektedir. Burada ısıнын taşınımı ile ilgili bir çıkarım söz konusudur. Parça yüzeyindeki formlar ısı taşınımının homojen bir şekilde ilerlemesini minimize etmektedir. Yani ısıнын kat ettiği yolu arttırmaktadır. ısıнын ilerlediği yolun artması demek, ısı kaybının daha fazla olması anlamına gelmektedir. Malzeme üzerindeki meydana gelen bu ısı değişimindeki farklar da malzemedeki yapısal değişim oranını önemli derecede etkilemektedir.



Şekil 4.18. Geometrik formlu sac metal parçanın Von Mises gerilmesi

Yapılan termal analiz sonrası parçada meydana gelen Von mises gerilmesi Şekil 4.18’de görülmektedir. Parçaya geometrik form verme işlemi, yüzeydeki alan sayısını arttırmıştır. Tek yüzey alanına sahip düz sac malzemeye uygulanan form verme işlemi ile dört farklı yüzey alanı daha meydana gelmiştir. Sıcaklıktan kaynaklı her bir yüzeyde gerilmeler meydana gelmektedir. Geometrik form üzerinde her bir yüzeyde farklı gerilme yüzeyleri olduğundan dolayı gerilme analizlerinde daha küçük yerlerde sıkışmalar meydana gelmektedir. Yani bunu artık bir gerilme olarak da düşünebiliriz. Farklı eksenlerde, farklı yüzeylerde, birbirinden farklı gerilme yüzeylerinin oluşması neticesinde birbirini tamamlayıcı veya absorbe edici gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler yüzeye ve yöne bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin x-y doğrultusunda bir gerilme var ise simetrik tarafındaki geometrik form o x-y doğrultusundaki ters yöne bir gerilme daha oluşturarak ortadaki gerilmeyi minimize eder ya da ortadan kaldırabilir. Parça üzerindeki meydana gelen farklı yüzey alanlarının gerilmeyi azaltıcı yönde etkisi olduğunu ve buna bağlı olarak da çarpılma miktarının düz sac metal parçaya göre daha az olması beklenmektedir.

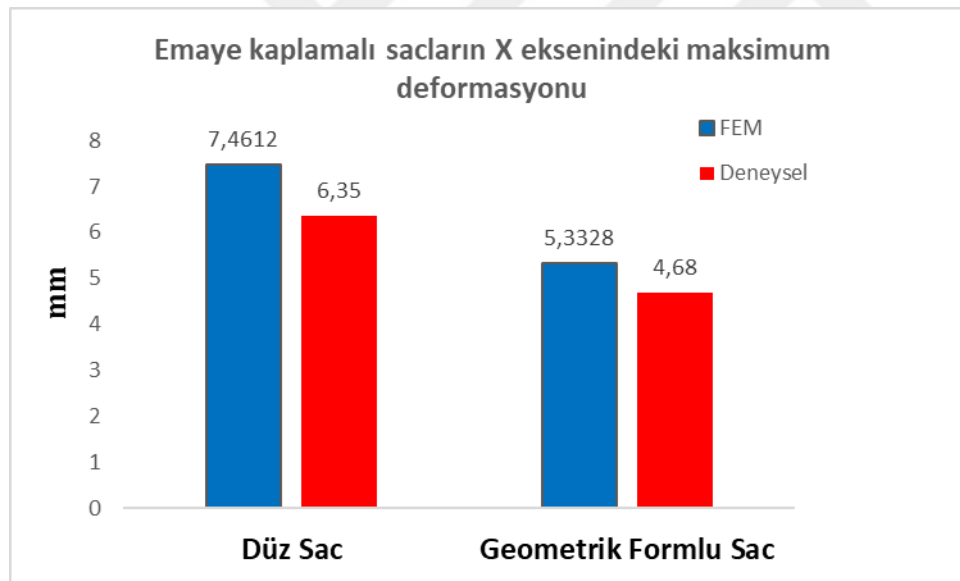


Şekil 4.19. Geometrik formlu sac metal parçanın “x” eksenindeki deformasyonu

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, pişirici fırınlarında kullanılan 0,6 mm kalınlığında DC04EK kalitesinde yan panel sac malzemesi kullanılmıştır. İki farklı değişkenlik üzerine malzeme meydana gelme çarpılmalar analiz edilmiştir. Bunlardan ilki, malzeme geometrisindeki değişkenliğin çarpılmaya etkisi, ikincisi ise emaye kaplamanın çarpılmaya etkisidir.

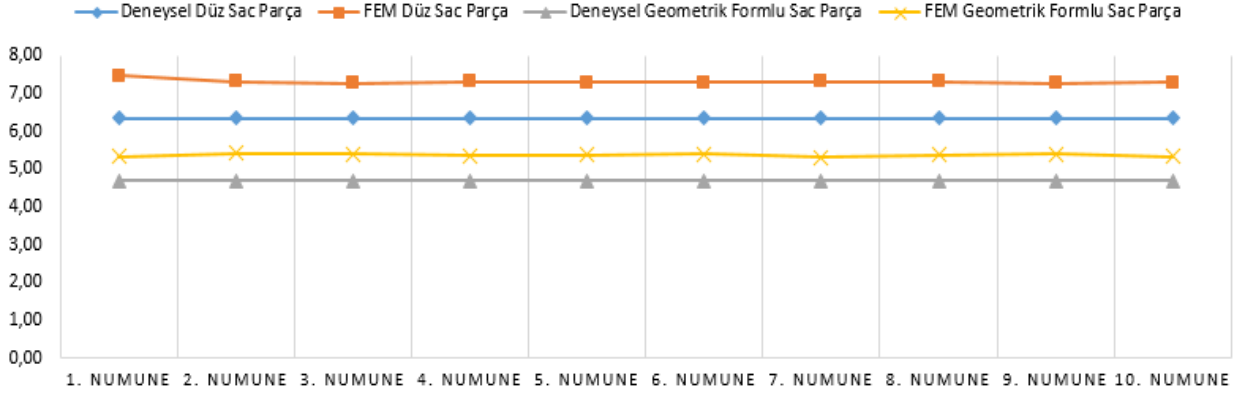
Emaye kaplama prosesinden çıkan, farklı geometrik yapılara sahip aynı malzeme kalitesindeki iki farklı sac parça için yapılan deneysel çalışma sonucunda geometrik formlu sacdaki çarpılma (4,68 mm) düz sacdaki çarpılmaya (6,35mm) göre yaklaşık %35 daha küçük çıkmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen verilerde ise; geometrik formlu parça için çarpılma miktarı 5,3328 mm iken düz sacdaki çarpılma miktarı 7,4612 mm olmuştur.



Şekil 5.1. Emaye kaplamalı sacların X eksenindeki maksimum yapısal değişimleri

Her bir deney parçası için 10'ar adet ölçüm yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde geometrik ve düz sacdaki çarpılmalar deneysel sonuçtan yaklaşık %15 fazla çıkmıştır.

X EKSENİNDEKİ ÇARPILMA DEĞERLERİ

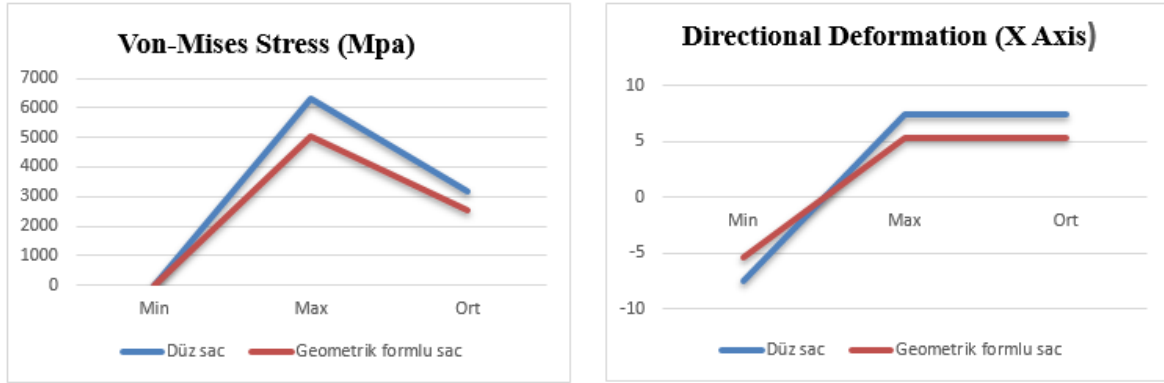


Şekil 5.2. Emaye kaplı deneysel numunelerin FEM sonuçları ile karşılaştırılması

Yüksek sıcaklık değerlerine maruz kalan parçadaki çarpılmayı minimum seviyelere indirebilmek için ikinci tasarım olarak adlandırılan parçaya (geometrik formlu) hidrolik pres makinesi ile iç form verme işlemi yapılmıştır. Buradaki amaç: formlu yüzeyler ile parça üzerindeki ısı taşınımının ilerlemesini minimize etmek, ısının kat ettiği yolun mesafesini uzatmak ve daha fazla ısı kaybının yaşanmasına olanak sağlamaktır. Böylelikle minimum seviyede gerçekleşen ısı değişiminin sonucunda da parçadaki değişim miktarı da minimum seviyede olması sağlanmıştır.

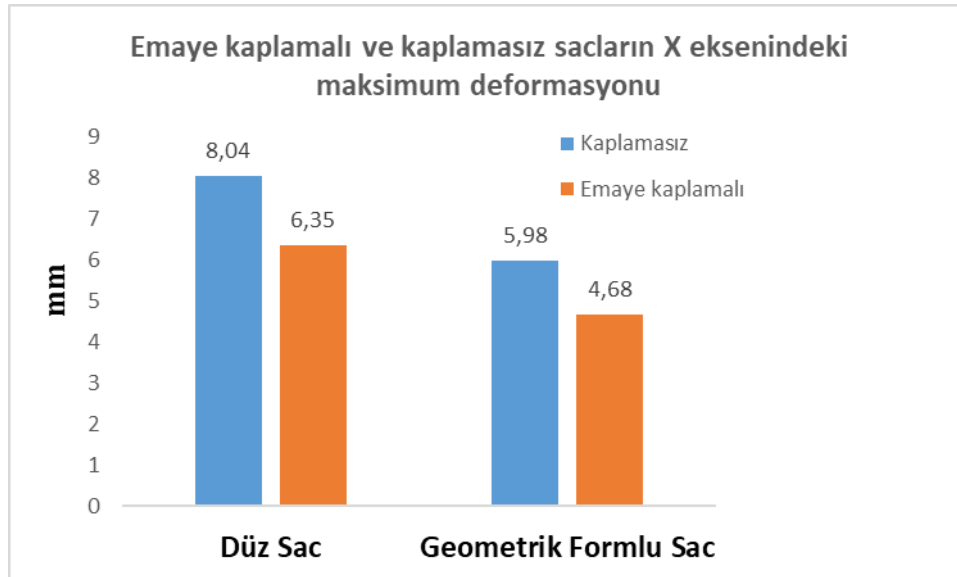
Diğer bir yandan, verilen bu form işlemi ile malzeme yüzeyinde birden fazla yüzey alanının oluşumu sağlanmıştır. Farklı yüzey alanlarında oluşan farklı gerilmeler, birbirlerinin tamamlayıcısı veya sönmüleyicisi rolünü üstlenmiştir. Meydana gelen bu farklı gerilmeler de ortadaki gerilmeleri kaldırarak malzemedeki çarpılmanın daha az miktarda oluşmasına neden olmuştur.

Şekil 5.3’de emaye kaplı düz ve geometrik formlu sac parçaların yüksek sıcaklığın etkisi ile oluşan Von mises gerilmeleri ve buna bağlı olarak da x eksenindeki yapısal deformasyonlarını gösteren grafikler yer almaktadır.



Şekil 5.3. Emaye kaplı parçalarda meydana gerilme ve deformasyonlar

Emaye kaplamasız sac malzemelerin çarpılma miktarlarına bakıldığında, yapılan deneysel çalışmanın sonucunda düz sac parçada 8,04 mm iken geometrik formlu parçada 5,98 mm olarak ölçülmüştür. Emaye kaplama (lacivert + katalitik) malzemeyi 150-160 μm aralığında kalınlaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı da kaplamalı malzemelerdeki çarpılma miktarı kaplamasız malzemelerdekine göre göre daha az olması beklenir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları da bu durumu kanıtlar niteliktedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde hem düz hem de geometrik parçalar için kaplamalı parçaların, kaplamasız parçalara göre çarpılması %25 daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5.4. Kaplamalı ve kaplamasız sacların X eksenindeki maksimum deformasyonu

KAYNAKLAR

- Baki, A. (2019). *Sac Parçaların Tasarımında Geri Yaylanma Parametrelerinin Etkisi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chan, W.M., Chew, H.I., Lee, H.P., and Cheok, B.T. (2004). Finite Element Analysis Of Spring-Back Of V-Bending Sheet Metal Forming Processes. *Journal of Materials Processing Technology*. (148), 15-24.
- Cho, J.R., Moon, S.J., Moon, Y.H., and Kang, S.S. (2003). Finite Element Investigation On Spring-Back Characteristics In Sheet Metal U-Bending Process. *Journal of Materials Processing Technology*, (141), 109-116.
- Çelik, S. (2020). *Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Değirmenci, H. (2006). *Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimler ve Nedenleri ile Bunların Şekillendirme Prosesi Üzerindeki Etkileri*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Esener, E. (2020). Plastisite Modellerinde Pekleşme Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi ile Tespiti. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. 11(1), 171-181.
- Esener, E., Fırat, M., Yenice, M. (2014, 26 – 27 Mayıs). *Sac Metal Şekillendirme Proseslerinde Geri Esneme Telafisi*. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi. Bursa.
- Esener, E., Ercan, S., Yenice, M., Kaya, M., Fırat, M. (2013, 06-07 Aralık). *Sac Metal Şekillendirme Prosesinde Deneysel Tasarım Yöntemi ile Parametre Hassasiyet Analizi*. Makina İmalat Teknolojileri Kongresi. Bilecek.
- Galbraith, P.C., Hallquist, J.O. (1995). Shell-Element Formulations In Ls-Dyna3d: Their Use In The Modelling Of Sheet-Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technolog.* (50), 158-167.
- Granzow, W.G., (Armco Inc.), (1990), “Sheet Formability of Steels”, Metals Handbook–Vol.1 (Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloy), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- Gülen, M. (2019). *Derin Çekmede Geri Yaylanmanın Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Gök, A., Demirci, İ., Gök, K. (2019, 13-15 Mayıs). *Sonlu Elemanlar Metodunun Gerçek Bir Sanayi Parçası Üzerinde Uygulanması*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu. Karabük.

- Işıktaş, A., Ay, İ. (2015). Farklı Kalınlıklardaki Dkp Sacın Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Esnemelerinin İncelenmesi. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 17(1), 59-69.
- Karagöz, T. (2017). *Otomotivde Kullanılan Alüminyum Esaslı Saclarda Geri Yaylanma Tahmin Doğruluğunun Arttırılması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kırlı, O., (2003). *Derin Çekme ile Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Non-Linear Analizi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Korkmaz, C. (2021). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları İçin Optimum Ağ Elemanı Yapısının Belirlenmesi. *Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar*. (8), 115-117.
- Lange, K., (1985), “Handbook of Metal Forming”, McGraw Hill, New York.
- Llewellyn, D.T., ve Hudd, R.C., (1998), “<Steels> Metallurgy & Applications – 3th Edition”, Butterworth – Heinemann, Oxford.
- Mielnik, E.M., (1991), “Metalworking Science and Engineering”, McGraw Hill Inc., New York.
- Ötü, R. Ve Demirci H.İ. (2012, 02-04 Nisan). 60°'lik V bükme Kalıbında AA 5754 ve Al 1050 Sac Malzemelerin Farklı Bükme Metotları Kullanılarak Geri Esneme Miktarlarının Tespiti. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu. Karabük.
- Özer, F. (2011). *Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucu Oluşan Geri Yaylanmanın Doğru Tahmini ve Telafisi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Özlem ve Emre. (2019). Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*. 6 (1), 1-11.
- Panthi, S.K., Ramakrishnan, N., Pathak, K.K., and Chouhan, J.S. (2007). An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM). *Journal of Materials Processing Technology*. (186). 120-124.
- Papeleux, L., Philippe Ponthot, J. (2002). Finite Element Simulation Of Springback İn Sheet Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, (125-126), 785–791.
- Siswanto, W.A., Anggono, A.D., Omar, B., and Jusoff, K. (2014). An Alternate Method to Springback Compensation for Sheet Metal Forming. *The Scientific World Journal*. (301271). 1-13.
- Sönmez E. (2015). *Metal Şekillendirme İşleminde Geri Esneme Tahmininin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Süzen, M. (2019). *Traktör Emniyet Çerçevesi Üretiminde Kullanılan Yapısal Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversite, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Türköz, M. (2009). *AL 2024 ve AL 5754 Alaşımlı Alüminyum Sacların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin Araştırılması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya.
- Uslu, E. (2014). *Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Araştırılması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Vatansever H., Esener E. (2019). Sonlu Elemanlar Hesaplama Parametrelerinin Sac Metal Şekillendirme Simülasyon Süresi ve Hassasiyetine Etkisinin Tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. (16), 92-96.
- Yıldız, H., Kırılı O. (2013). Derin Çekme İşleminin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (10), 317-326.
- İnternet: Çeliklerin Sınıflandırılması. URL: https://avesis.ktu.edu.tr/celiklerin_siniflandirilmesi. Son Erişim Tarihi: 30.09.2022.
- İnternet: Çelik Üretimi. URL: <https://www.metaluzmani.com/malzeme-menu/celik/>. Son Erişim Tarihi: 30.10.2022.
- İnternet: Sıcak Haddeme Yöntemi ile Çelik Sac Üretimi. URL: <https://www.uslularhadde.com/sicak-haddeme-yontemi-ile-celik-sac-uretimi>. Son Erişim Tarihi: 30.10.2022.
- İnternet: Çelik Saclarda Mekanik Özelliklerin Şekillendirmeye Etkisi. URL: <http://www.demircelik.com.tr/mobil/haber.asp?id=3213>. Son Erişim Tarihi: 30.10.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Samet DURMUŞ

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

1-) Durmuş, S., Yaka, H. “Springback Analysis in the Forming of Oven Panels”. *5th International Conference on Advances in Natural & Applied Science Engineering (ICANAS 2021)*, pp:86, 21-23 September 2021, Ağrı, Turkey.

