**T.C.**
**MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS**
**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**
**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

# SAC METAL KALIBI TASARIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU

**Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ**

**Danışman**
**Doç. Dr. Hülya DURMUŞ**

**MANİSA–2020**

| | | |
|---|---|---|
| **Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ** | **SAC METAL KALIBI TASARIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU** | **2020** |

**TEZ ONAYI**

**Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ** tarafından hazırlanan **"SAC METAL KALIBI TASARIMINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU"**adlı tez çalışması 21/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

| | | |
|---|---|---|
| **Danışman** | **Doç. Dr. Hülya DURMUŞ**<br>Manisa Celal Bayar Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyesi** | **Prof. Dr. İbrahim Etem SAKLAKOĞLU**<br>Ege Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyesi** | **Doç. Dr. Osman CULHA**<br>Manisa Celal Bayar Üniversitesi | ..... |

**TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ**

## İÇİNDEKİLER


| | Sayfa |
|---|---|
| İÇİNDEKİLER | I |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | II |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | III |
| TABLO DİZİNİ | VI |
| TEŞEKKÜR | VII |
| ÖZET | VIII |
| ABSTRACT | IX |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME | 3 |
| 2.1. Sac Metallerin Şekillendirilebilirliği | 4 |
| 2.2. Anizotropi | 5 |
| 2.3. Şekillendirme Limit Diyagramı | 6 |
| 2.4. Sac Metal Kalıbının Tanımı ve Önemi | 8 |
| 2.5. Sac Metal Şekillendirme Prosesleri | 9 |
| 2.5.1. Kesme ve Delme Prosesi | 9 |
| 2.5.2. Bükme Prosesi | 12 |
| 2.5.3. Derin Çekme Prosesi | 17 |
| 3. SAC ŞEKİLLENDİRME SİMÜLASYONUN TARİHSEL GELİŞİMİ | 22 |
| 3.1. Bauschinger Etkisi | 25 |
| 3.2. AutoForm Modeli | 26 |
| 4. MALZEME VE METOD | 28 |
| 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA | 41 |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER | 64 |
| KAYNAKLAR | 66 |
| ÖZGEÇMİŞ | 69 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| **2B** | İki boyutlu |
| **3B** | Üç boyutlu |
| **CNC** | Bilgisayar sayımlı yönetim |
| **CAE** | Bilgisayar destekli mühendislik |
| **CAD** | Bilgisayar destekli tasarım |
| **DLED** | Direkt Led |
| **E** | Elastikiyet Modülü (kg/mm2) |
| **EKS** | Pres emniyet katsayısı |
| **FEM** | Sonlu eleman metodu |
| **FLD** | Şekillendirme limit diyagramı |
| **HRC** | Rockwell sertliği |
| **HV** | Vickers sertliği |
| **I** | Atalet Momenti (mm4) |
| **LDR** | Şekillenebilirlik sınırlayıcı çekme oranı |
| **$T_b$** | Kesme mukavemeti (kg/mm²) |
| **TS** | Sac malzemenin çekme mukavemeti (MPa) |

## ŞEKİLLER DİZİNİ


**Sayfa**

Şekil 1.1. Sac şekillendirme sırasında en çok karşılaşılan sorunlar- Yırtılma, Kırışma, Geri yaylanma ..... 2

Şekil 2.1. Tek eksenli gerilme altında sac numunelerin boyun vermesi..... 4

Şekil 2.2. Çekme numunesi alımı (RD) Haddeleme yönü, (TD) Enlemesine yönü, (ND) Normal yönü..... 5

Şekil 2.3. Sac üzerüne basılmış küçük daire ızgaraları..... 7

Şekil 2.4. Düzlem gerilmeleri için şekillendirme limit diyagramı ..... 8

Şekil 2.5. Kesme işleminin bir erkek ve dişi kalıp ile şematik gösterimi ..... 10

Şekil 2.6. Bükme prosesi gösterimi ..... 12

Şekil 2.7. Bükme prosesi adımları ve geri yaylanma ..... 13

Şekil 2.8. Açınım boyu bulma işleminde kullanılan elemanlar ..... 14

Şekil 2.9. a)V-Kalıp Bükme ve b)Kenar Bükme..... 15

Şekil 2.10. a) Haddeleme yönüne paralel büküm yapılmış parça b) Haddeleme yönüne dik büküm yapılmış parça görselidir ..... 16

Şekil 2.11. Derin çekme prosesi gösterimi..... 17

Şekil 2.12. Derin çekme prosesi adımları ..... 18

Şekil 2.13. Derin çekme sırasında gerilme durumunun şematik gösterimi..... 19

Şekil 2.14. Derin çekme sırasında oluşabilecek çeşitli hatalar..... 19

Şekil 2.15. Süzdürme çubuğu üzerinden akan sac üzerine etkiyen kuvvetler.... 21

Şekil 2.16. Süzdürme çubuğu gösterimi ..... 21

Şekil 3.1. Tersine gerilim-sıkıştırma yükü gösterimi ..... 25

Şekil 3.2. a) Bauschinger etkisinin şematik gösterimi ve b) malzemenin bir dişi yarıçapı üzerinden geçerken stresin oluşumu üzerindeki etkisi ..... 25

Şekil 3.3. Gerilme-sıkıştırma eğrisinin tersine gerilme ve gerinim ile şematik gösterimi..... 27

Şekil 4.1. DLED TV arka panelin katı model görseli..... 28

Şekil 4.2. Operasyon 1 - Derin Çekme Prosesi ..... 29

Şekil 4.3. (a) Eski tasarım DLED, (b) Yeni tasarım DLED TV paneli ..... 30

Şekil 4.4. Mekanik birleştirme görseli..... 31

Şekil 4.5. AutoForm HX220YD+Z malzeme datası ..... 33

Şekil 4.6. AutoForm DX52D+Z malzeme datası ..... 33

Şekil 4.7. AutoForm DX53D+Z malzeme datası ..... 34

Şekil 4.8. AutoForm DX54D+Z malzeme datası ..... 34

Şekil 4.9. AutoForm DX56D+Z malzeme datası ..... 35

Şekil 4.10. Çeliklerin testerede kesilmiş hali ..... 37

Şekil 4.11. (a) Isıl işlem aşamaları, (b) Isıl işlem prosesi uygulanmış çelik görseli ..... 38

Şekil 4.12. Taşlama tezgahında parça işleme ..... 38

Şekil 4.13. Tel erezyon ile parça işleme ..... 39

Şekil 4.14. CNC dik işlem ile parça işleme..... 40

Şekil 5.1. (a) Autoform FLD, (b) Ls-Dyna FLD ..... 41

Şekil 5.2. Farklı yay sertliği değerleriyle oluşturulan parçalar ..... 42

Şekil 5.3. DC04 için DBRF'nin deneysel sonuçları..... 43

Şekil 5.4. 80 mm çaplı hammadde için kırışıklık oluşumları..... 44

Şekil 5.5. Parça üzerindeki kritik kalite bölgeleri ..... 45

Şekil 5.6. Parça üzerindeki kritik kalite bölgeleri ..... 47

Şekil 5.7. a) Otomotiv parçası geometrisi b) DX54D malzemenin ve c) S500MC şekillendirilebilirlik analizlerinin gösterimi ..... 48

Şekil 5.8. AutoForm süzdürme çubuksuz şekillendirilebilirlik analizi..... 49

Şekil 5.9. AutoForm süzdürme çubuksuz şekillendirilebilirlik analizi..... 49

Şekil 5.10. Süzdürme çubuksuz derin çekme kalıp çıktısında karşılaşılan sorunlar ..... 50

Şekil 5.11. Farklı pot çemberi kuvveti değerleriyle oluşturulan FLD ..... 51

Şekil 5.12. AutoForm kırışıklık analizi..... 51

Şekil 5.13. Uygulanan süzdürme çubuğu datası..... 52

Şekil 5.14. AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX54D+Z).. ..... 54

Şekil 5.15. AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX56D+Z)..... 54

Şekil 5.16. Süzdürme çubuklu derin çekme kalıp çıktısındaki yırtılmalar. (DX54D+Z).. ..... 55

Şekil 5.17. Derin çekme prosesi hatasız kalıp çıktısı (DX56D+Z). ..... 55

Şekil 5.18. AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (HX220YD+Z). ..... 56

Şekil 5.19. AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX52D+Z).. ..... 56

Şekil 5.20. AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX53D+Z)..... 57

Şekil 5.21. Süzdürme Çubuğu Konumuna Göre Şekillendirilebilirlik Verileri (a) Kesme hattından 15 mm (b) 20 mm (c) 25 mm ötelenmiş FLD. ..... 58

Şekil 5.22. Kesme Hattı Çizgisinin ve Diğer Parametreleri Gösterimi ..... 59

Şekil 5.23. Z ekseninde yer değiştirme. (DX56D+Z).. ..... 61

Şekil 5.24. Z ekseninde yer değiştirme. (DX56D+Z)..... 61

Şekil 5.25. AutoForm çekme çizgisi analizi..... 62

Şekil 5.26. (a) Kalıp çıktısı üzerinde çekme çizgisi (b) 2B kesme hattı görseli... 62

Şekil 5.27. (a) Çekme çubuğunun gergi kuvveti ve (b) Prosesin gerçekleştirilmesi için gereken kuvvetler..... 63

## TABLO DİZİNİ

**Sayfa**

Tablo 2.1. Türkiye'de kalıpçılık sektörünün güncel hali ve 2025 hedefleri ..... 9

Tablo 4.1. Soğuk Şekillendirmeye Uygun Sac Metallerin Kimyasal Bileşimleri (%) ..... 32

Tablo 4.2. Soğuk Şekillendirmeye Uygun Sac Metallerin Mekanik Özellikleri.. 32

Tablo 4.3. DIN 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliği Kimyasal Bileşimi (%)……..... 36

Tablo 5.1. Malzeme Çeşidine Göre Şekillendirilebilirlik Verilerinin Karşılaştırılması…… 53

Tablo 5.2. Süzdürme Çubuğu Geometrisi Parametrelerine Göre Şekillendirilebilirlik Verilerinin Karşılaştırması ..... 60

**TEŞEKKÜR**

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bana destek olan , deneyim ve bilgileri ile yol gösteren, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hülya DURMUŞ' a, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında manevi desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan onur duyduğum sevgili hocam Sayın Doç. Dr. Osman ÇULHA' ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca 2019-001 numaralı projemizdeki desteklerinden dolayı MCBÜ Bilimsel Araştırmaları Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim sırasında her türlü destek ve imkanı veren başta Metalsan Ar-Ge Müdürü Sayın Soner HANOĞLU, Metalsan Ar-Ge Şefi Sayın Özay FALAK, tecrübesi ve manevi desteği ile beni aydılatan Sayın Metin BOZ olmak üzere tüm Metalsan Ar-Ge ekibine çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında manevi desteğini her daim hissettiğim çok değerli eşim Endüstri Mühendisi Ebru GÜNEŞGÖRMEZ' e, bize şans getiren inşallah Mart 2020' de hayatımıza neşe katacak olan biricik kızımız Bilge GÜNEŞGÖRMEZ' e ve öğrenim hayatımın tüm aşamalarında beni maddi ve manevi olarak destekleyen, bana inanıp hep yanımda olan annem Nurcan ELMAS'a yürekten teşekkür ederim.

Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ
Manisa, 2020

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

## SİMÜLASYON DESTEKLİ SAC METAL KALIBI TASARIMI VE MALZEME SEÇİMİ

**Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ**

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi**
**Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Hülya DURMUŞ**

Günümüzde sac şekillendirme sektörünün en önemli sorunu sacı hızlı, düşük maliyetli ve yüksek verimli bir şekilde istenilen forma sokmaktır. Bu sorun sac şekillendirme işlemi yaparken sadece form vermekle kalmayıp, bunu kolaylaştırıcı bir kalıp tasarımı yapılması ve hızlı bir şekilde ürün üretilmesi gibi kritik süreçler izlemektedir.

Geleneksel olarak, kalıplar tecrübeli mühendisler ve teknik elemanların deneyimlerine, deneme tekniklerine ve benzer kalıpların belgelerine dayanarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Kalıbın çalışma sisteminin ayarlanması ve yapısal parametrelerinin seçilmesi bir dereceye kadar rastgele olup, bu da presleme etkilerini tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır. Kalıbın uygun yapısal parametreleri kalıp ayarlama sırasında deneme yanılma ile belirlenir ve birçok denemenin yürütülmesi ve kalıbın değiştirilmesinde çok fazla zaman ve masraf gereklidir.

Bu tez çalışmasında, sac metal şekillendirme prosesleri araştırılmış, günümüzde bu yöntemler de teorik analiz gerekliliği kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman tabanlı CAE programı AutoForm Plus R7 ve kalıp tasarımı sırasında kullanılan CAD programı ise Solidworks'dür. AutoForm, sac metal şekillendirme kalıp endüstrisine özellikle otomotiv sektörüne özel olarak geliştirilen yüksek doğruluklu ve güvenilir sonuçlar veren verimliliği yüksek bir yazılım çözümüdür. AutoForm ile bilgisayar ortamında, daha kalıp üretimine başlamadan, birden çok analizler yapılmakta ve bu analizler yardımıyla mükemmele en yakın kalıp çıktıları elde edilebilmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasının simülasyon raporları, literatürde ki bir çok sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuç olarak bu çalışma için tasarlanmış olan kalıbın istenilen teknik özelliklere uygun şekilde yırtılma, kırışma ve çekme izleri gibi olumsuz sonuçlar olmaksızın parça verebileceğine dair bir fikrin ortaya çıkmasına yardımcı olmuştur.

**Anahtar Kelimeler :**
**Sac, Metal, Şekillendirme, AutoForm, Simülasyon, Tasarım, Yırtılma**

**2020, 69 sayfa**

## ABSTRACT

**Master's Thesis**

**SIMULATION SUPPORTED SHEET METAL MOLD DESIGN AND MATERIALS SELECTION**

**Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ**

**Manisa Celal Bayar University**
**Graduate School of Applied and Natural Sciences**
**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Supervisor: Assoc. Dr. Hülya DURMUŞ**

Today, the most important problem of sheet metal forming sector is to transform the sheet into the desired form in a fast, low cost and highly efficient way. This problem not only forms during the sheet forming process, but also it is followed by critical processes such as designing a mould and facilitating the production of products quickly.

Conventionally, the mould is designed and manufactured by practiced engineers, depending on their know-how and on trial techniques. Adjusting and selecting the structural parameters of the mould is random to a certain degree, which makes it challenging to forecast the stamping effects. The convenient structural parameters of the mould and those of the important process are determined by trial and error during die adjustment, and much time and cost are required while carrying out many trials and in modifying the mould.

In this thesis, sheet metal forming processes have been researched and nowadays the necessity of theoretical analysis has become inevitable. The finite element-based CAE program is used AutoForm Plus R7 and the CAD program during mold design is used Solidworks in this study. AutoForm is a highly efficient software solution that provides high accuracy and reliable results developed specifically for the sheet metal forming and molding industry, especially for the automotive industry. With the help of AutoForm, multiple analyzes are performed before the mold production is started on the computer, and with the help of these analyzes, the mold outputs that are closest to the perfect can be obtained.

Simulation reports have been compared with many results in the literature, and as a result, it has helped to create an idea that the mold which designed for this study can provide parts without adverse consequences such as tearing, wrinkling and drawing marks in accordance with the desired technical specifications.



**Keywords: Sheet, Metal, Forming, AutoForm, Simulation, Design, Tearing**

**2020, 69 pages**

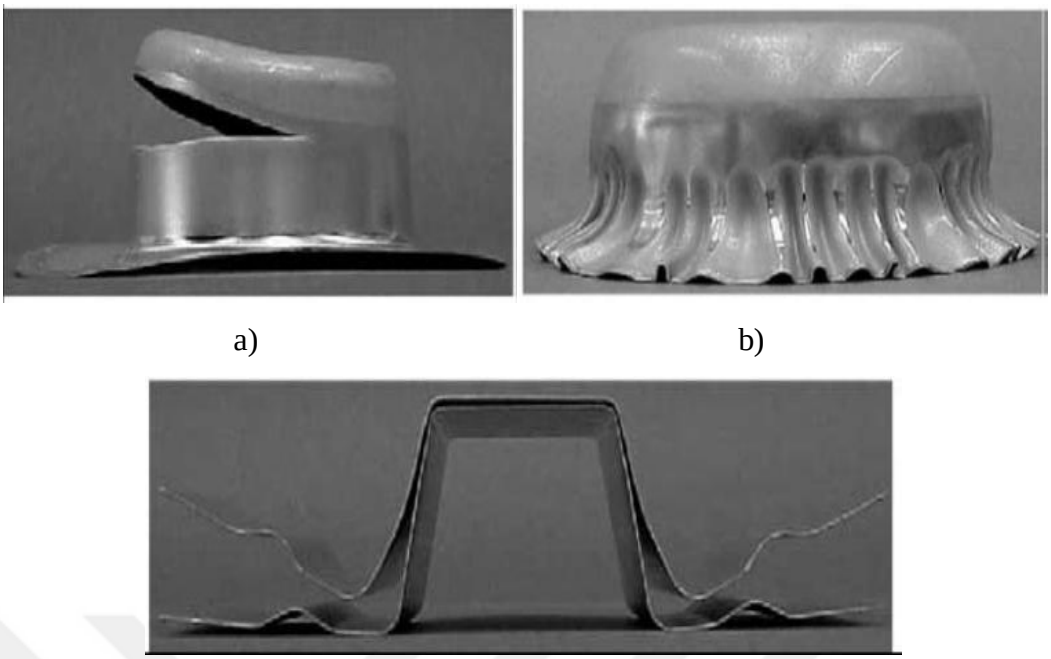
# 1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme seri üretim için oldukça gelişmiş ve etkili bir tekniktir. Bununla birlikte sac metal şekillendirme prosesi, işlenen malzemelerin fiziksel özelliklerinin çeşitliliğinden kaynaklanan bazı olumsuzluklara sahiptir ve bu sorunlar üretim süresi ve ürün kalitesi gibi elle tutulur problemlere neden olmaktadır [1, 2].

Günlük hayatımızın vazgeçilmezi olan ve her alanda kullanılan pekçok metal ve metal alaşımı parçaların düşük maliyette üretimini gerçekleştirebilmek için malzeme kullanımını minumuma düşürmek, üretim verimliliğini optimize edebilmek ve işçilik maliyetini asgari düzeyde tutarken kaliteyi istenen düzeyde stabilize etmek kalıpçılığın başlıca amaçlarındandır.

Temel anlamda sac şekillendirme, bir zımba ve bir kalıp arasındaki levha boşluğunun talaş kaldırmadan gerilmesi anlamına gelir. Sac metal kalıpçılığı bir soğuk şekillendirme prosesidir. Bilindiği üzere, yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki metallerin plastik deformasyonuna soğuk şekillendirme denir. Metali kalıcı olarak deforme etmek için, gerilim elastik sınırı aşmalıdır. Bu proses genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Bazı durumlarda arttırılmış süneklik ve düşük mukavemet sağlamak için biraz yüksek sıcaklıklar kullanılabilir.

Pres operasyonları için aranan mekanik özellikleri sağlayan uygun sac malzemeler seçilmiş olsa bile, sac metal şekillendirme esnasında sorunlarla karşılaşılmaya devam edilmektedir. Buruşma, yırtılma ve geri esneme gibi kusurlar sac şekillendirme sırasında oluşan en bilindik kusurlardır. Bu gibi kusurlara genellikle sacın kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen bir oranda akışı neden olmaktadır. Sac plakada şekillendirme sırasında oluşabilecek istenmeyen olumsuzlukları engellemek veya minimize edebilmek için malzeme akışını düzenleyen pot çemberi kuvveti ve süzdürme çubuğu gibi kontrol mekanizmaları kullanılmaktadır [3].



a) b)

c)

**Şekil 1.1.** Sac şekillendirme sırasında en çok karşılaşılan sorunlar – a)Yırtılma, b)Kırışma, c)Geri yaylanma [3].

Değişken pot çemberi kuvveti uygulaması ve kalıp ile sac yüzey arasındaki sürtünmenin azaltılması gibi bir dizi yöntem sac malzemenin kalıp boşluğuna akışını kontrol etmede kullanılabilir. Ancak günümüz imalat sanayinde kullanılan preslerin bu tür uygulamalarda kullanılabilmeleri için büyük maliyet gerektiren modernizasyon ihtiyaçları bulunmaktadır. Günümüz rekabetçi ortamında üreticiler, bu tür büyük maliyetli yatırımlar yerine daha düşük maliyetli ve modüler çözümler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu ihtiyaçlar ışığında kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla süzdürme çubuğu gibi kontrol mekanizmalarının kullanılması fikri ortaya çıkmıştır [3].

Bu çalışmada üretilmek istenen sac malzemenin üzerinde Şekil 1.1'de görseli verilen sorunlarla karşılaşmamak için pot çemberi üzerine yerleştirilecek olan süzdürme çubuklarının geometrisi, konumu ve gergi kuvvetleri ticari AutoForm simülasyon programı kullanılarak belirlenecektir. Üretilecek parça beyaz eşya sektörünün lokomotifi olan DLED TV 'lerin arka paneli olduğundan ve parça son kullanıcı tarafından görünür durumda olmasından dolayı kaçınılması gereken bir diğer problem ise kesme hattı içerisinde kalabilecek çekme izleridir.

## 2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME

Sac metal şekillendirme, çeşitli uygulama alanlarında, örneğin karmaşık üç boyutlu parçalar, iyi yüzey kalitesi ve hafif yapılar üretmek için önemli bir rol oynar [4]. Bununla birlikte şekillendirme sırasında kırışıklık, girinti, geri yaylanma, yırtılma ve incelme gibi arzu edilmeyen kusurlar meydana gelebilir.

Sac metal işlemleri nispeten ince sacların kesme ve şekillendirme işlemlerini kapsar. Tipik sac metal kalınlıkları 0.4 mm ile 6 mm arasındadır. Kalınlık 6mm'yi geçtiği durumlarda sac yerine plaka terimi kullanılır. Sac metal işlemlerinde kullanılan sac ve plaka stokları düz hadde yöntemi ile üretilir. En genel olarak kullanılan sac metal, düşük karbonlu çeliktir.

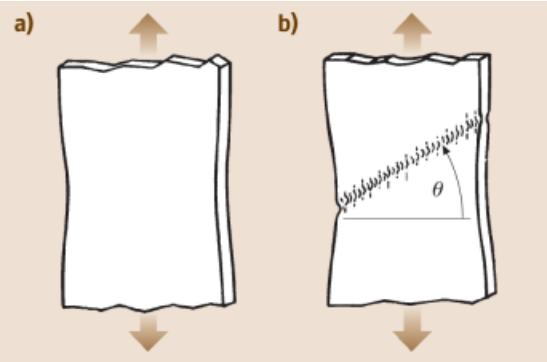
Sac şekillendirmenin araştırılmasında temel olarak iki yöntem vardır; deneme-yanılma yöntemi ve sayısal yöntem. Deneme-yanılma yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar gerçek değerler olmasının yanı sıra bu yöntem pahalı ve zaman alıcıdır. Konu hakkındaki tecrübe ışığında kalıba yapılacak olan modifikasyonlar hem bütçeyi aşmaya hem de projenin zaman planını yakalayamamaya neden olabilmektedir. Diğer taraftan sayısal yöntemler daha ekonomiktir ve daha kısa zamanda sonuç alınmaktadır. Sac şekillendirmede ortaya çıkan diferansiyel denklemin bir fonksiyonla ifade edilen bir çözümünün bulunması çoğu durum için imkânsızdır. Bu imkânsızlık bu denklemlerin çözümlerinde bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır. Sayısal yöntemlerin dezavantajı ise yatırım maliyetleridir. Bu yatırımın büyük bir kısmı da piyasalarda bulunan sonlu eleman tabanlı çalışan yazılımlar kapsamaktadır.

Sonuç olarak simülasyon tabanlı üretim son yıllarda giderek artmaktadır ve zaman-maliyet faktörlerini olumlu yönde etkilemektedir. Bu faktörler son yıllarda kalıp geliştirme proses ve üretim zamanı simülasyonları ile yaklaşık %50 oranda azaltmıştır. Önümüzde ki yıllarda ise %30 gibi bir azalma da gerçekçi verilere dayandırılarak olması beklenmektedir [5].

## 2.1. Sac Metallerin Şekillendirilebilirliği

Sac şekillendirme işlemlerinde, hammadde büyük plastik deformasyonlara tabi tutulur. Sac şekillendirmedeki önemli bir endişe, arzu edilen deformasyonun, sac hammadde üzerinde herhangi bir arıza olmadan elde edilip edilemeyeceğidir. Metalin belirtilen şartlar altında kırılma veya incelme olmadan arzu edilen plastik olarak şekillendirilebilme kabiliyetine şekillendirilebilirlik kabiliyeti denir. Malzemelerin şekillendirilebilirliği, şekillendirme işlemine katılan tüm faktörlerden, yani sac metal özelliklerinden, proses parametrelerinden ve gerilme sınırlandırma kriterlerinden etkilenir.

Kırılma genellikle bir boyun vermeyi izler. Bu nedenle, sac şekillendirme limitleri olarak adlandırılan kritik deformasyon seviyeleri, Şekil 2.1'de görseli verilen, hem yaygın boyunlanma hem de yerel boyunlanma durumları ile karakterize edilebilir. Malzeme maksimum mukavemetine ulaşırken, düzgün deformasyon durduğunda dağınık boyun verme oluşur. Lokal boyun verme, yaygın boyun vermeden sonra ve lokal boyun verme sırasında numunenin daha fazla genişlik daralması olmadan incelmesiyle meydana gelir [6].



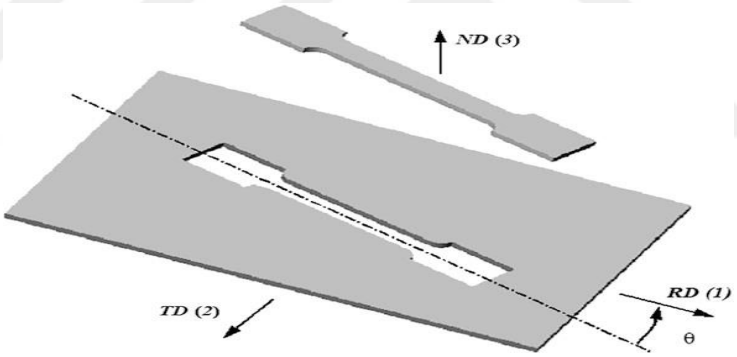

**Şekil 2.1.** Tek eksenli gerilme altında sac numunelerin boyun vermesi (a)Yaygın boyun verme, (b)Lokal boyun verme [6].

Sac metallerin şekillenebilirliğini değerlendirmek için geliştirilen çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler dört ana sınıfa ayrılabilir: simülasyon testleri, mekanik testler, sınırlayıcı kubbe yüksekliğini bulma ve derin çekme şekillendirme limit diyagramları [6].

## 2.2. Anizotropi

Kristallografik yapıları ve haddeleme işleminin özellikleri nedeniyle, sac metaller genel olarak mekanik özelliklerin önemli bir anizotropisi sergiler. Aslında, haddeleme işlemi, üç ortogonal düzleme göre mekanik özelliklerin simetrisi ile karakterize edilen belirli bir anizotropiye neden olur. Böyle bir mekanik davranışa ortotropi denir [6]. Plastik davranışlarının yön ile değişimi, Lankford parametresi veya anizotropi katsayısı adı verilen bir miktar ile değerlendirilir. Bu katsayı genellikle, şerit şeklindeki sac numuneler üzerinde yapılan tek eksenli çekme testleri ile elde edilir. Çekme testi numunesi alımı Şekil 2.2' de gösterilöiştir. Anizotropi katsayısı r ile tanımlanır:

$$r = \frac{\varphi w}{\varphi t} \tag{2.1}$$




**Şekil 2.2.** Çekme numunesi alımı (RD) Haddeleme yönü, (TD) Enlemesine yönü, (ND) Normal yönü [6].

Anizotropi katsayısı, numunenin haddeleme yönüne göre konumlandırılmasıyla değişir. Bu varyasyon, yuvarlanma ($0^o$), diyagonal ($45^o$) ve enine ($90^o$) yönlerde örneklerden elde edilen üç r-değeri ile belirlenir. Sac metal düzleminde farklı yönlerden elde edilen r-değerlerinin ortalaması, normal anizotropi $r_n$ katsayısını temsil eder. Normal anizotropi katsayısı şu şekilde belirlenir:

$$r_n = \frac{r_{0^o} + 2r_{45^o} + r_{90^o}}{4} \tag{2.2}$$

Yüksek bir normal anizotropi katsayısına sahip bir malzeme, derin çekme işlemi sırasında, akış özelliklerinin aynı olması şartıyla daha küçük bir normal anizotropi katsayısına sahip olan bir malzemeden daha az incelme yaşayacaktır. Genel olarak, normal anizotropi katsayısı ne kadar yüksek olursa, elde edilebilecek olan derinlik o kadar derin olur [6].

Normal anizotropinin haddeleme yönüne açılı değişiminin bir ölçüsü, düzlemsel anizotropi olarak bilinir.

$$\Delta r = \frac{r_{0^o} + r_{90^o} - 2r_{45^o}}{2} \tag{2.3}$$

Düzlemsel anizotropi, derin-çekilmiş kapların çekme çizgileri genliği ile doğrudan ilgilidir. $\Delta r$ değerinin büyüklüğü arttıkça, çekme çizgileri yüksekliği artar [6]. Bu nedenle, derin çekme işlemleri için, uygun malzemelerin daha küçük düzlemsel anizotropi değerlerine sahip olması gerekir.

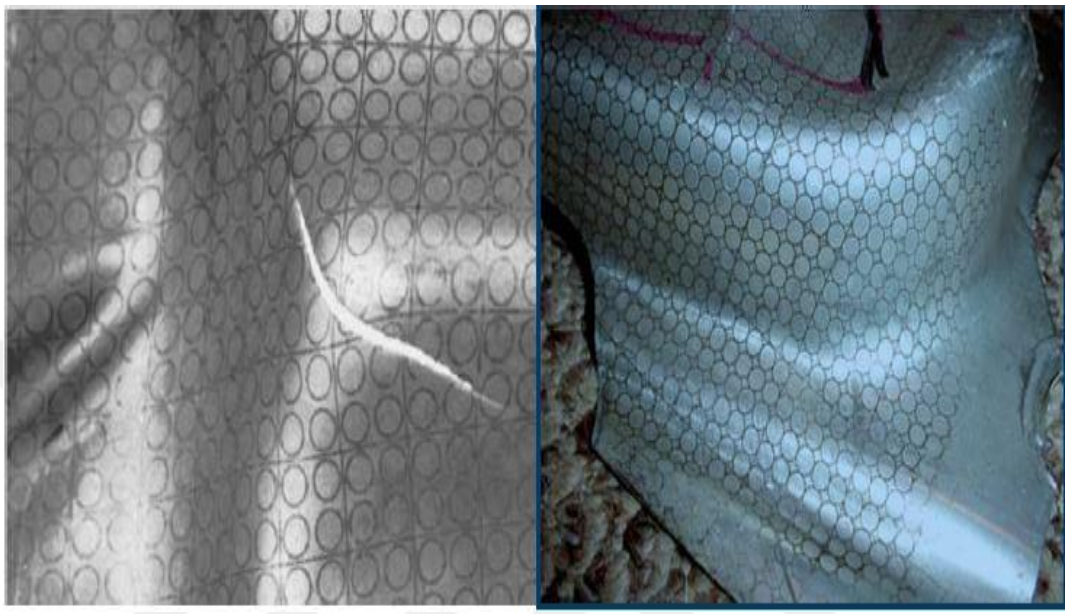
### 2.3. Şekillendirme Limit Diyagramı

Şekillendirme limit diyagramı (FLD) (şekillendirme limit eğrisi, FLC olarak da bilinir), sac metallerin şekillendirilebilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan çok önemli bir kavramdır. Temel olarak bir malzeme özelliğidir, böylece her sac malzeme kendi şekillendirme limit diyagramına sahiptir [7].

Şekillendirme limit diyagramının çizilmesi tekniği, form vermeden önce sac levha üzerine sabit çaplı küçük bir ızgarayı (Şekil 2.3) basılmayı veya oymayı içerir. Form verme sırasında ızgaranın ilk halkaları deforme olur ve elips olur. Bu elipslerin küçük ve büyük eksenlerinden, sac numunelerin üzerindeki asal deformasyonlar belirlenebilir.

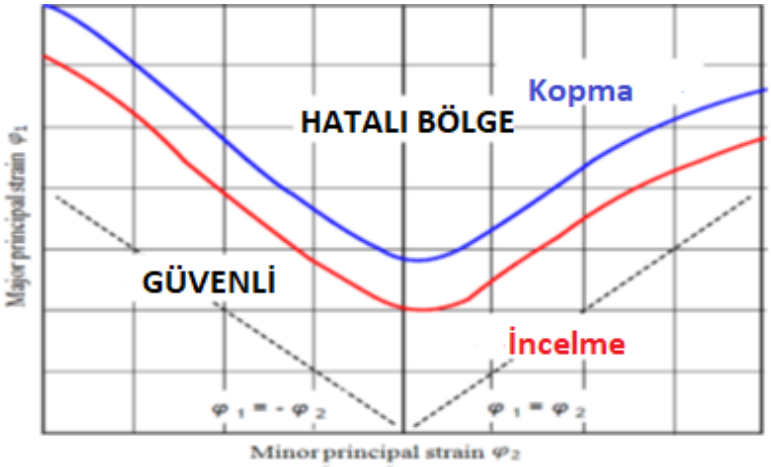
Bu alandaki araştırmaya Keeler öncülük etmiştir. Keeler, iki eksenli germeden sonra parça kırılmasında bu tür elipslerden elde edilen minimum asal deformasyonlara karşı maksimum asal deformasyon grafiğini çizmiştir. Bu şekilde, tolere edilebilir

aralığı sınırlayan bir eğri elde edilir. Daha sonra Goodwin, farklı mekanik testler kullanarak gerilim-sıkıştırma alanı eğrisini çizmiştir. Bu durumda, enine sıkıştırma, haddeleme veya tel çekme gibi yüksek çekme gerilimi değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.



**Şekil 2.3.** Sac üzerine basılmış küçük daire ızgaraları [8].

Keeler ve Goodwin'in diyagramları, kırılma sırasında $\boldsymbol{\varepsilon_1}$ve $\boldsymbol{\varepsilon_2}$ değerlerini birlikte verir. Bu gerilme değerleri, şekillendirme limit diyagramını (FLD) belirlemek için kullanılabilir. FLD' yi deneysel olarak belirlemek için çeşitli testler vardır. Çekme testi, hidrolik şişirme testi, Keeler testi, Hecker testi, Marciniak testi, Nakazima testi ve Hasek testi. Marciniak testi veya hidrolik şişkinlik testi sürtünme etkilerini ortadan kaldırmak için kullanılır; basitliği için tek eksenli test tercih edilir. Çok çeşitli zorlanma yollarını kaplayabildiğinden Nakazima testi daha uygundur. Numunelerin kırışmasını önlemek için Hasek testi kullanılmıştır. Ancak, farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırma amacıyla kullanılamayacağına dikkat edilmelidir [8].




**Şekil 2.4.** Düzlem gerilmeleri için şekillendirme limit diyagramı [7].

FLD üzerindeki eğri (Şekil 2.4), güvenli ve başarısız şekillendirme bölgeleri arasındaki bir sınırı temsil eder. Güvenli bölge, malzemenin görünür bir incelme göstermediği eğrinin altındaki alanla temsil edilir. Arızalı bölge, malzemenin görünür (yerel) bir incelmeye başladığı eğri üzerindeki alanı ifade eder. Bu bölgede, malzeme mukavemetini kaybetmeye başlar [7].

## 2.4. Sac Metal Kalıbının Tanımı ve Önemi

Tamamiyle aynı parçaları, teknik resimde belirtilen ölçü ve toleransları içerisinde ve en kısa sürede talaş kaldırmadan üreten, malzeme sarfiyatı ve insan gücünün asgari düzeyde tutulmasına yardımcı olan, hidrolik, eksantrik vb. preslerin yardımıyla çalışan araca sac kalıbı denir.

Sac metal endüstrisi geçen yüzyıldan bu yana diğer üretim yöntemlerine göre daha fazla teknolojik gelişme kaydetmiştir. Gelişen teknoloji sayesinde elle oluşumdan bilgisayar ortamında yapılan tasarımlara ve deneme-yanılma metodundan sonlu eleman tabanlı simülasyona dönüşüm oldukça önemlidir [5]. Sac metal kalıpçılığı başta otomotiv, beyaz eşya, elektrik-elektronik ve havacılık sektörlerin de olmak üzere sanayinin birçok alanındaki ihtiyaçları karşılamaktadır.

Son yıllarda otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinde bir üretim üssü haline gelen ülkemizin Tablo 2.1'de verilen ihracat rakamlarında büyük bir paya sahip olması sac metal kalıpçılığının öneminin bir başka göstergesidir.

**Tablo 2.1.** Türkiye'de kalıpçılık sektörünün güncel hali ve 2025 hedefleri [9].

| | 2016 | 2025 Hedefi |
|---|---|---|
| Dünya Pazar Büyüklüğü | 84 Milyar avro | 120 Milyar avro |
| Pazar Payımız | % 4,5 | % 15 |
| Ciromuz | 3,5 Milyar avro | 18 Milyar avro |
| İstihdamımız | 120,000 | 550,000 |

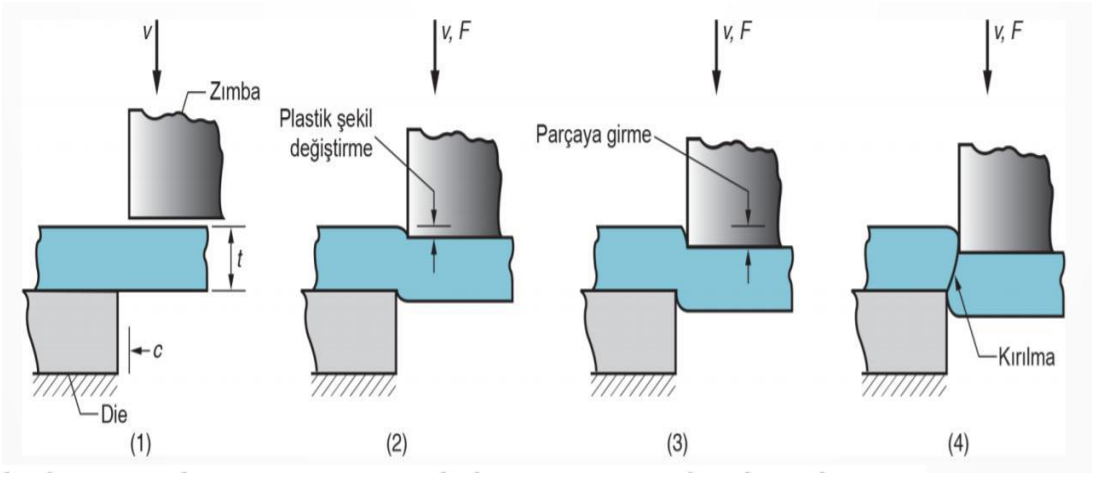
## 2.5. Sac Metal Şekillendirme Prosesleri

Sac metal kalıpları ile delme-kesme, bükme, derin çekme ve diğer yöntemler gibi çeşitli prosesler kullanılarak bir milyonuncu baskıda dahi teknik resimde belirtilen toleranslar içerisinde ve müşteri tarafından talep edilen hem mekanik özellikler hem de görselde estetik parça almak mümkündür. Her proses elde edilen işin kalitesini tanımlayan bazı parametrelere sahiptir [5].

### 2.5.1. Kesme ve Delme Prosesi

Kesme, hammaddenin istenilen ölçü ve geometriye uygun olarak yapılan ayırma işlemidir. Kesme işlemi zımbanın malzemeye teması ile başlar. İlk başta hem üst hem de alt noktalarda kırılmalar oluşur. Zımbanın daha da ilerlemesi ile malzemenin elastiklik sınırı aşılır ve malzeme plastik deformasyona uğrar. Bu olaylar kesmenin birinci safhasında gerçekleşir [10].

Kesmenin ikinci safhasında zımbanın kuvveti artar ve sac kalınlığının 0.3 katı kadar malzemeye daldığı zaman, malzeme kalıp boşluğuna akmaya başlar. Bu işlem zımba malzemenin 0.5 katı ilerleyene kadar devam eder. Esas kesme bu safhada meydana gelmektedir. Kesmenin son safhasında malzeme kopar ve hurdanın kalıp boşluğundan atılması sağlanır [10]. Kesme işleminin adımları Şekil 2.5' de adım adım gösterilmektedir.




**Şekil 2.5.** Kesme işleminin bir erkek ve dişi kalıp ile şematik gösterimi [11].

Kesme işlemi yakından incelendiğinde pürüzlü ve parlak renk cümbüşüyle karşılaşırız. Yüzeylerin bu karakteristik görünüşü bize kesme boşluğu ve kalıbın durumu hakkında bazı özel bilgiler verir.

**Proses Parametreleri:**

i. Kesme boşluğu,
ii. Sac kalınlığı,
iii. Sürtünme,
iv. Zımba radyüsü,
v. Zımba hızı,
vi. Sac malzeme özellikleri ve
vii. Kalıp aşınması'dır [5].

**Kesme Boşluğu Hesabı:**

Kesme işlemindeki boşluk c; Şekil 2.5' de gösterildiği üzere zımba ile kalıp arasındaki mesafedir. Kesme boşluğu, kesilen kenarın şeklinin ve kalitesinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. En iyi sonuç için sac kalınlığının %2-10 arası gibi optimum bir aralık belirlenmiştir. Kesme boşluğunun bu aralığı geçmesi hurdanın kalıp içine çekilmesi ve çıkacak üründe istenmeyen seviyelerde çapak oluşması gibi problemleri meydana getirir. Kalınlığı 3 mm'ye kadar olan saclar için, tek taraflı kesme boşluğu şu formülle hesaplanır [12].

$$c = x.t.\sqrt{\mathbf{T_b}} \quad (2.4)$$

x katsayısı 0,005 ila 0,035 arasında seçilmektedir, (c) nin 0,005 değeri çok temiz bir kesme yüzeyi elde etmemizi sağlamaktadır. 0,005' den 0,035' e kadar olan daha büyük değerleri ise düşük kesme kuvveti anlamına gelmektedir [12].

t- Sac Kalınlığı (mm) / $\mathbf{T_b}$- Kesme mukavemeti (kg/mm²)

Kalınlığı 3 mm'den büyük saclar için tek taraflı kesme boşluğu şu formülle hesaplanır.

$$2c = (0{,}015.t - 0{,}015).\sqrt{\mathbf{T_b}} \quad (2.5)$$

Kesme boşluğu yukarıda ki formüllerle bulunabileceği gibi aynı zamanda tablo yardımı ile de bulunabilir.

**Kesme Kuvveti Hesabı:**

Sac parçanın istenilen ölçülerde, toleransta ve yüzey kalitesinde oluşabilmesi için bir kuvvete ihtiyaç duyulur ve bu kuvvete, kesme kuvveti adı verilir. Kesme kuvvetinin hesaplanması kullanılacak olan presin tonajını belirlemek için önemlidir. Yanlış pres seçimi öngörülemeyen masraflar çıkarabilir. Pres emniyet katsayısı EKS 'de göz önüne alınmalıdır. Genellikle EKS 1.5 ile 4 arasında tavsiye edilir [12].

$$\mathbf{P = L_t . t . T_b} \text{ (kg)} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{P_{(em)} = P . EKS} \text{ (kg)} \quad (2.7)$$

$\mathbf{L_t}$ – Kesilecek kenarların toplam uzunluğu (mm)

Kesme kuvvetini azaltmak için uygulanan iki yaygın yöntem mevcuttur. Bunlardan birinci kesme çakılarını açılı bir şekilde bilemektir. Ikincisi ise kesme zımbalarını ve çakılarını kademeli bir şekilde tasarlayıp farklı zamanlarda kesme olayının gerçekleşmesini sağlamaktır.

Kesme işleminin istenilen kalite de gerçekleşmesi için kesme hızı da önemli bir parametredir. Kesme hızı parametresi de eksantrik presler yardımı ile sağlanabilir. Hidrolik presler de kesme prosesinin gerçekleştirilmesi uygun değildir. Hem kalıba hem de kesme işleminin yapılmasında kullanılan prese ciddi hasarlar verebilir.

**Flambaj Hesabı:**

Kesme ve delme kalıplarında kullanılan zımbalar flambaja uğrarlar, bu yüzden zımbaların flambaj boyunun kalıp tasarım aşamasında kalıp plaka boyutları belirkenirken, Euler denklemine yardımıyla hesaplanması gerekir. Bu hesaplama yapılırken kesit alanı en küçük olan zımba hesaba katılır ve flambaj boyu ona göre hesaplanır [12].

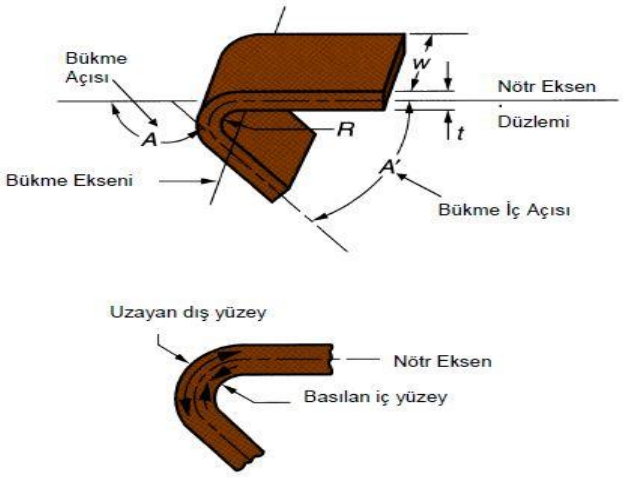
$$\mathbf{L} = \sqrt{\frac{\pi^2 . \mathbf{E} . \mathbf{I}}{\mathbf{P}}} \tag{2.8}$$

L- Zımba Flambaj Boyu / E- Elastikiyet Modülü ($kg/mm^2$)

I- Atalet Momenti ($mm^4$)

### 2.5.2. Bükme Prosesi

Bükme, metali malzemenin tamamında uzanan düz veya düz olmayan bir bükme ekseni etrafında şekillendirme olarak tanımlanır. Bükme, sadece şekiller oluşturmak için değil aynı zamanda parçaya rijitlik sağlamak için de kullanılan bir prosesdir.

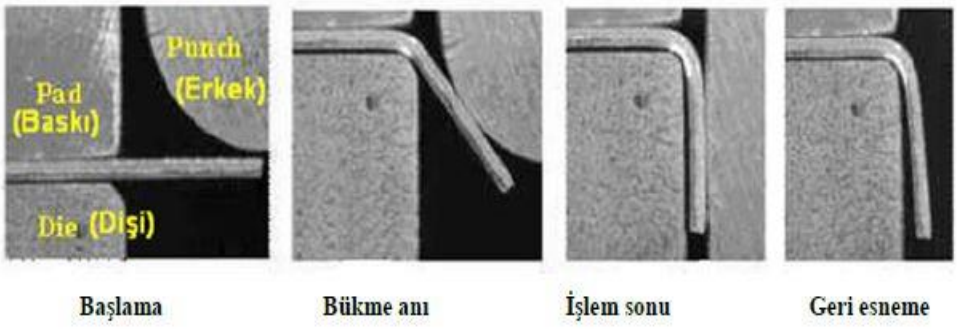



**Şekil 2.6.** Bükme prosesi gösterimi [11].

Bükme, prosesi esnasında sac malzeme plastik şekil değişimine maruz kalır. Bir sac metal bükülürken Şekil 2.6' da görüldüğü üzere malzemenin dışbükey yüzeyi çekme gerilmesine iç yüzeyi ise basma gerilmesine zorlanır. Çekme gerilimlerinin bulunduğu yüzeyde uzama ve basma gerilimlerinin bulunduğu yüzeyde kısalma meydana gelir.

Bükme prosesinde, plastik sekil değişiminin kalıcı olabilmesini sağlayabilmek için malzeme yüzeyindeki çekme ve basma gerilmeleri giderilmelidir. Ancak parça üzerindeki toplam gerilme yüklerinin kaldırılması sonucunda, elastik toparlanma yüzünden tasarlanan parça ile kalıp çıktısı arasında şekil uyuşmazlığı oluşur. Bu olay literatür de geri yaylanma (Şekil 2.7) olarak tanımlanır.

Geri yaylanma bükme üzerine yapılan çalışmalarda en çok karşılaşılan problemlerin başında gelir. Bu çalışmada da tasarlanacak olan kalıbın çıktısı üzerinde yaratacağı geri yaylanma etkisini simülasyon ile gerçekleştirerek tespit etmek ve bu problemin çözümüne yönelik çalışmalar yapmaktır.



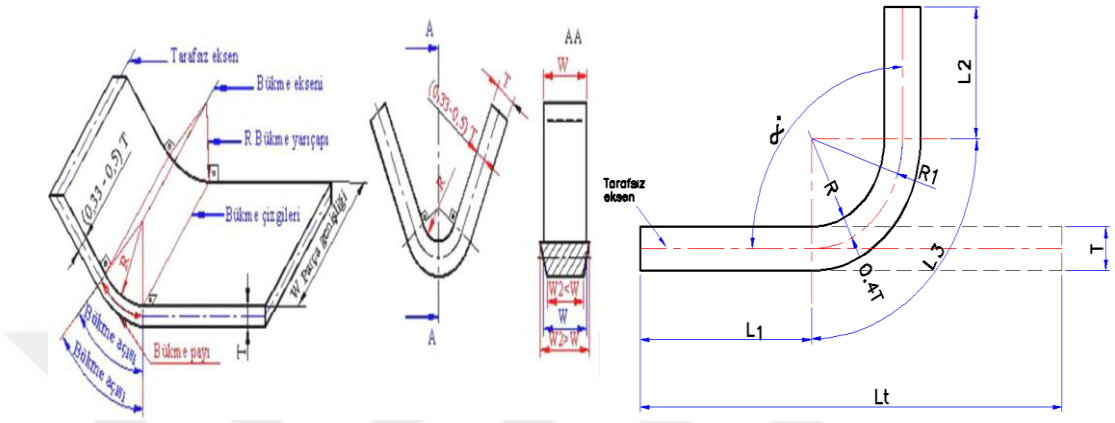

**Şekil 2.7.** Bükme prosesi adımları ve geri yaylanma [13].

Geri yaylanma miktarının azaltılmasında birkaç farklı yöntem uygulanır.

- Bükme açısı, istenilen açıda bükülmüş parça alabilmek için geri esneme açısı kadar arttırılır.

- Lif kırma ya da batma diye adlandırılan uygulamalar ile parçanın bükülen bölgesi şekil değiştirmeyecek biçimde erkek ve dişi kalıp arasında ezilir.

**Açınım Boyu Hesabı:** Tasarımında bükümler bulunan parçaların, bükme prosesi uygulanmamış boyuna sac açınım boyu (ilkel boyu) denir. Açınımı hesaplamak kullanılacak olan malzemenin boyutlarını ve malzeme giderini hesaplamamıza yardımcı olmaktadır.




**Şekil 2.8.** Açınım boyu bulma işleminde kullanılan elemanlar [13].

Bükülen parçanın açınım boyunu bulabilmek (Şekil 2.8) için önce bükme payını bulmamız gerekmektedir.

$$L_b = \mathbf{a(R + k.t)} \quad (2.9)$$

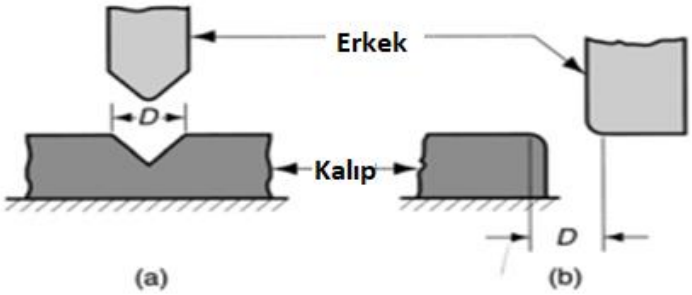
$$a = 2.\pi.\alpha/360 \quad (2.10)$$

R=t ise k=0,33 / R= (2…4)t ise k=0,42 / R > 4T ise k=0,5 alınır.

$$L_t = L_1+L_2+L_b+\ldots\ldots+L_n \quad (2.11)$$

$L_b$ = bükme payı (mm) / a = bükme açısı (radian) / R = bükme radyusu (mm)
t = sac metalin kalınlığı (mm) , ve k = sabit ‘dir.

Şekil 2.9 ‘de gösterildiği gibi iki genel bükme kalıbı tipi vardır.




**Şekil 2.9.** a)V-Kalıp Bükme ve b)Kenar Bükme [13].

V Kalıpta bükme, sac metal malzeme “V” şeklindeki kalıp ve zımba arasında basınç uygulanması sonucunda kalıbın şeklini alarak eğilir. Kenar bükmeye nazaran daha düşük adetli üretimler için kullanılmaktadır.

Kenar bükme, baskı plakası ve kalıp arasında sıkıştırılan sac malzeme üzerine zımba vasıtası ile basınç uygulanarak tarafsız eksen boyunca bükülür ve kalıbın 90° olan formunu alır. Yüksek adetli seri üretimler için uygundur ve yaygın olarak kullanılmaktadır.

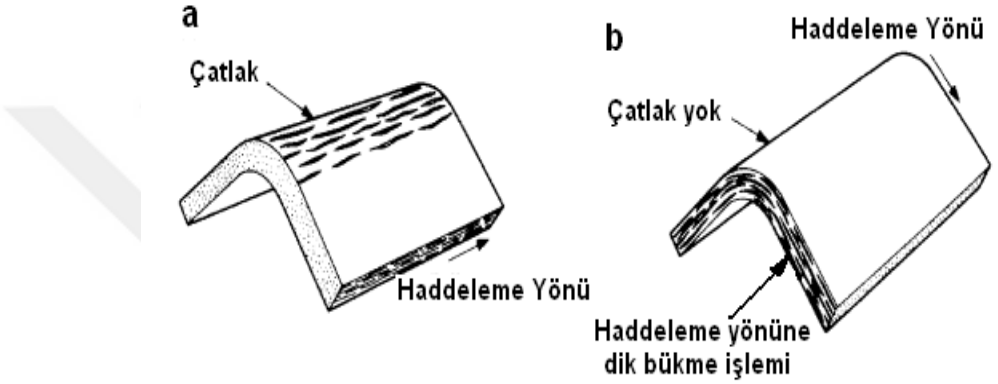
**Bükme Kuvveti Hesabı:**

Zımba ve kalıbın geometrisi, sacın mukavemeti, kalınlığı ve boyuna bağlı olarak, bükme işlemi için gereken kuvvet belirlenir. “t” kalınlığındaki sac malzemenin bükme işlemi “w” genişliğince yapılmaktadır. Bükme işlemi için gereken kuvvete de bükme kuvveti denir [13].

$$F = K_{bf}.(TS).w.t^2 / D \qquad (2.12)$$

F = Bükme kuvveti (N) / TS = Sac malzemenin çekme mukavemeti (MPa)
w = Bükme ekseni yönünde parça genişliği (mm) / t = Sac malzeme kalınlığı (mm)
D = Kalıp – Zımba arası açıklığı değeri (mm)
$K_{bf}$ = Sabiti V- bükme için 1.33, kenar bükme için 0.33 alınır.

Haddehanelerde merdaneler arasında ezilerek üretilen sac malzemede, hadde yönünde liflere benzer yapıda mukavemeti yükselten malzeme yapısı oluşmaktadır. Bu malzeme yapısı itibari ile hadde yönünde dik açıda oluşturulan tarafsız büküm ekseni ile yapılan işlemlerde daha düzgün ve mukavemetli bükümler elde edilmektedir. Aksi durumda Şekil 2.10' da görüldüğü üzere hadde yönüne paralel eksende yapılan büküm işlemlerinde, malzeme doku yapısında çatlaklar oluşmakta ve işlem olumsuz etkilemektedir [13].




**Şekil 2.10.** a) Haddeleme yönüne paralel büküm yapılmış parça b) Haddeleme yönüne dik büküm yapılmış parça görselidir [13].

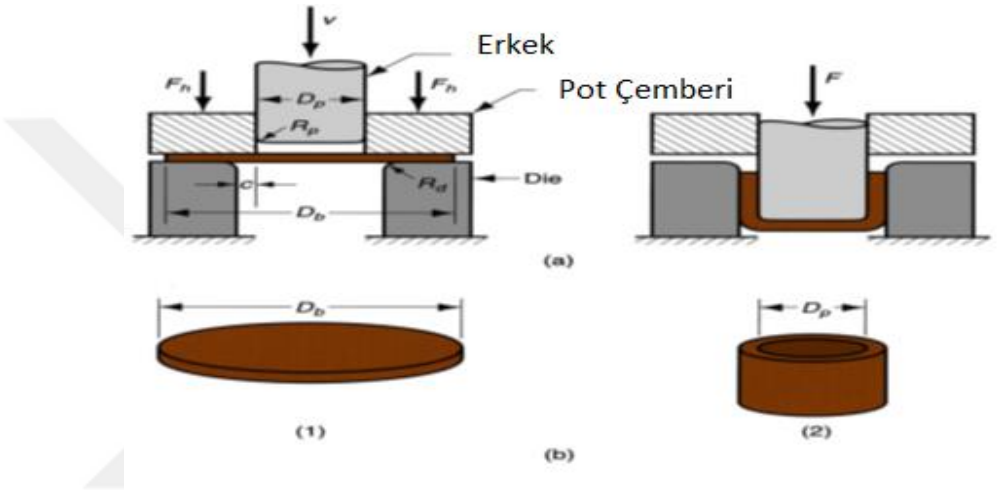
**Proses Parametreleri:**

Bir parçanın bükme işlemi ile üretilebilirliğini etkileyen çeşitli parametreler aşağıdaki gibidir.

i. Erkek uç radyüsü,
ii. Dişi radyüsü,
iii. Erkek hızı,
iv. Kalıp açılması,
v. Sac kalınlığı ve
vi. Malzeme özellikleri [5].

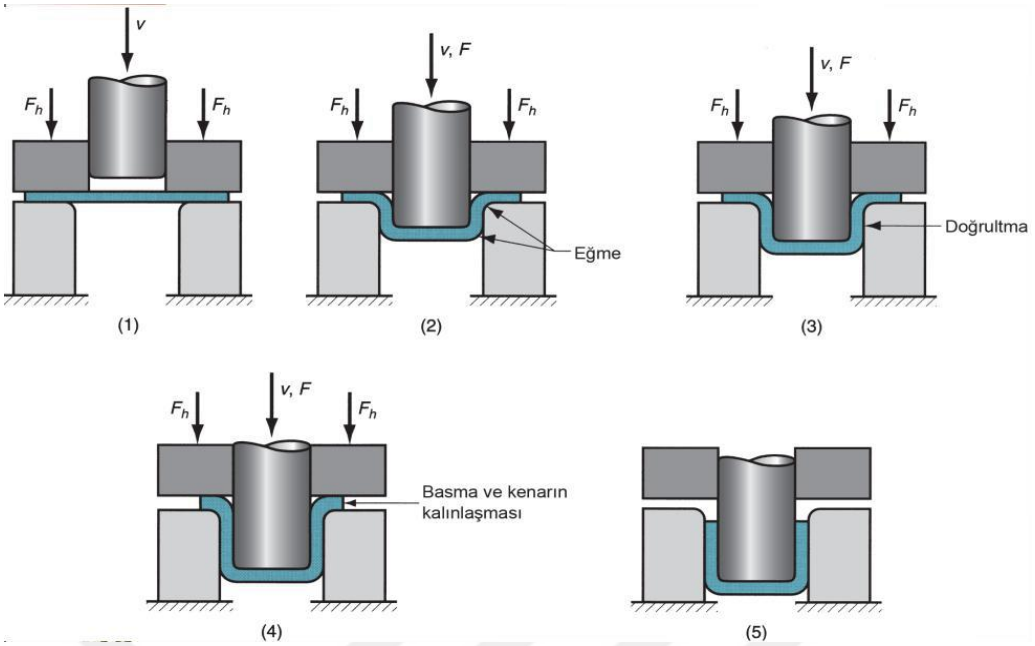
### 2.5.3. Derin Çekme Prosesi

Düz plaka saclardan basit veya karmaşık geometrili kap, kutu ve diğer şekillerde parçaların seri üretiminde kullanılan bir yöntemdir. İşlem genellikle soğuk olarak gerçekleştirilir. Mermi kovanları, içecek kutuları, otomotiv ve beyaz eşya sac parçaları üretiminde kullanılmaktadır [11]. Artan teknoloji doğrultusunda daha zorlu parçalarla sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı analiz programları sayesinde derin çekme prosesi daha meydan okunabilir hale gelmiştir.




**Şekil 2.11.** Derin çekme prosesi gösterimi [11].

Sac metal levhası, Şekil 2.11'de görüldüğü üzere bir pot çemberi kullanılarak kalıp yüzeyinde düz olarak tutulur. Proses sac metalin önceden belirlenmiş bir kuvvet ve strok ile erkeğin kalıp boşluğuna doğru ilerlemesini içerir. Uygulanan kuvvetin malzemeyi plastik bölgeye transfer edecek kadar yeterli büyüklükte olması gerekmektedir. Ayrıca dış kuvvetin yerini değiştirdikten sonra final metal parçanın geri esnemeye uğramamasını ya da elastik deforme olmamasını sağlamalıdır.



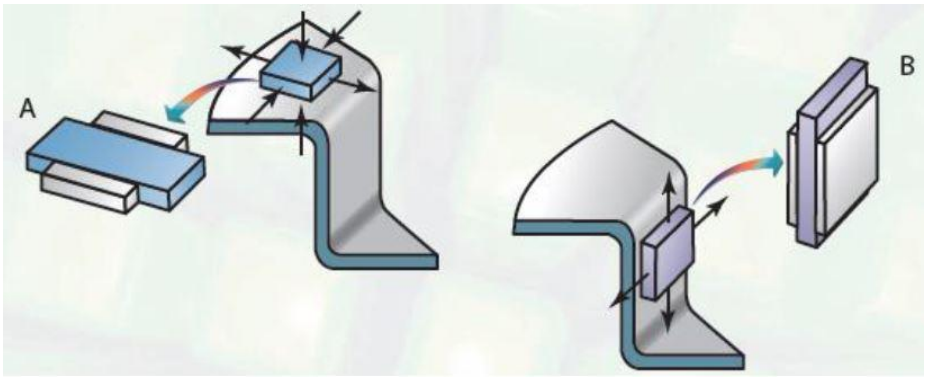

**Şekil 2.12.** Derin çekme proses adımları [14].

Gerçek sac şekillendirme prosesleri genellikle temel derin çekme ve gerdirme proseslerinin birleşimidir. Derin çekme seri üretimde kullanılan en yaygın şekillendirme proseslerinden biridir. Derin çekme proses adımları Şekil 2.12' de resimlendirilmiştir.

Derin çekme prosesi ile yüksek mukavemetli, hafif ve uygun maliyetli parçalar üretilebilir. Prosesin avantajlarından bazıları şunlardır :

i. Hızlı pres çevrim süreleri
ii. Bir parçayı bitirmek için gereken işlem daha az
iii. Diğer prosesler yoluyla elde edilemeyen karmaşık geometrileri oluşturma yeteneğidir [6].

Derin çekme işlemlerinde, şekillenebilirlik sınırlayıcı bir çekme oranıyla (LDR) ifade edilir. Sınırlayıcı çekme oranı, hammaddenin başlangıç çapı ile hatasız oluşturulabilen kabın son çapı arasındaki orandır. Membran teorisi ile hesaplanan ideal sınırlı çekme oranı 2.72'dir [6].

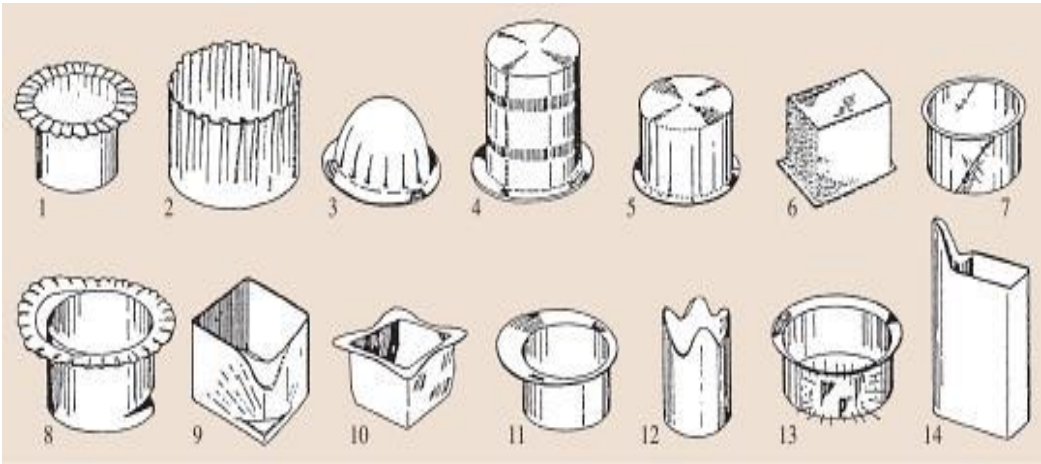



**Şekil 2.13.** Derin çekme sırasında gerilme durumunun şematik gösterimi [6].

Derin çekme işlemi sırasında, pot çemberi altındaki hammadde radyal çekme gerilmesine ve teğetsel basma gerilmesine maruz kalır. Yukarıdaki şematik gösterimden (Şekil 2.13) anlaşılayacağı üzere parça çekildikten sonra flanş bölgesinde kalınlaşma, bununla birlikte dibinde ve duvarında incelme vardır [6].

**Derin Çekme Prosesi Sırasında Oluşabilecek Hatalar:**

Derin çekme kalıplarının yanlış tasarımı, hammadde yerleşiminin hatalı olması, proses parametrelerinin yanlış şeçimi, veya yanlış hammadde seçimi istenmeyen kalitede bir ürün elde edilmesine neden olacaktır. En yaygın olarak bilinen hatalardan en çok karşılaşılanlar yırtılma, boyun verme, kırışıklık, marullanma, incelme ve Lüder's çizgileridir. Şekil 2.14' de bu hataların görselleri mevcuttur.




**Şekil 2.14.** Derin çekme sırasında oluşabilecek çeşitli hatalar [6].

**Proses Parametreleri:**

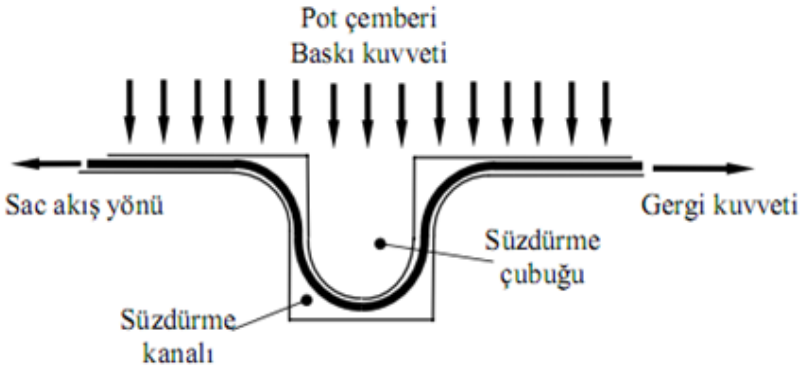
Her sac metal prosesi çeşitli parametreler tarafından yönetilmektedir. Aşağıdaki parametrelerde derin çekme prosesinde çok önemli bir rol oynar.

i. Erkek uç radyüsü
ii. Hammadde kalınlığı,
iii. Dişi radyüsü,
iv. Pot çemberi kuvveti,
v. Sürtünme,
vi. Erkek hızı,
vii. Çekme derinliği ,
viii. Malzeme özellikleridir [5].

**Süzdürme Çubukları:**

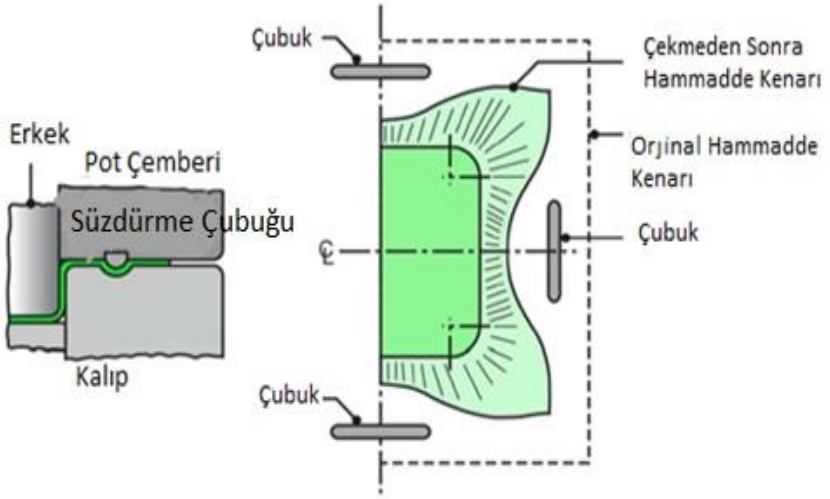
Sac metal şekillendirmede, daha iyi kalite de hatasız ürün elde etmek için malzeme akış hızının kalıp boşluğu içerisine kontrollü bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Genellikle malzeme akışı pot çemberi kuvveti tarafından kontrol edilir (Şekil 2.15). Kalıp ve hammadde arasındaki sürtünme ile malzemenin akışı kontrol altına alınmış olur. Ancak, düzensiz ve karmaşık parçaların çekilmesi sırasında malzeme akışının pot çemberi tarafından kontrol edilmesi çok zorlaşır. Yüksek bir baskı kuvveti gerektiğinde, sürtünme direnç kuvvetini arttırmak için daha yüksek bir pot çemberi basıncı uygulanmalıdır. Bu da proses için kullanılan kalıplarda aşırı yıpranmaya ve hammadde de sürtünme yapışmasına neden olacaktır. Bu nedenle düzensiz karmaşık parçaların şekillendirilmesinde, malzeme akışını daha düşük pot çemberi kuvvetlerinde yeterince kısıtlayan bir lokal mekanizma gerekmektedir. Bu istekler süzdürme çubukları ile karşılanabilir.

Sac malzemenin süzdürme çubuğundan geçişi sırasında malzeme üzerine, sac akış yönüne dik yönlü pot çemberi baskı kuvveti ile sac akışına zıt yönlü sürtünme kuvveti ve süzdürme çubuğundan kaynaklı gergi kuvveti (Şekil 2.15) etki etmektedir [3,6]. Bu kuvvetler, süzdürme çubuğu geometrisi , sac malzeme kalınlık ve mekanik özelliklerine ve prose parametreleri ile ilişkilidir.




**Şekil 2.15.** Süzdürme çubuğu üzerinden akan sac üzerine etkiyen kuvvetler [3].

Süzdürme çubukları Şekil 2.15' de gösterildiği gibi pot çemberi üzerindeki bir çıkıntıdan ve dişi kalıp üzerindeki bir oyuk geometriden oluşur. Süzdürme çubuklarının, bu tez çalışması sırasında ortaya çıkacak olan derin çekme proses çıktısı üzerinde yaratacağı etkiyi süzdürme çubuklarının geometrisi ve konumu değiştirilerek optimize edilecektir.




**Şekil 2.16.** Süzdürme çubuğu gösterimi [6].

# 3. SAC ŞEKİLLENDİRME SİMÜLASYONUNUN TARİHSEL GELİŞİMİ

Sac şekillendirme işlemlerinin simülasyonlarını gerçekleştirme olasılığı, uzun süre boyunca sac şekillendirme endüstrisinde ulaşılamaz bir arzu olmuştur. Proses mühendisleri, olası herhangi bir biçimlendirme kusurunu erken bir aşamada ortaya çıkarabilmeyi ve deneme-yanılma sürecinde kalıpların pahalı modifikasyonlarına duyulan ihtiyacı en aza indirmeyi istemişlerdir. Teorik açıdan bakıldığında, şekillendirme problemi, 1960'larda ve 1970'lerin başında FEM'in ilk günlerinde çok karmaşık bir problem olarak kabul edilmiştir. Sac şekillendirme problemlerinin modellenmesi, doğrusal olmayan malzeme davranışı, büyük deformasyonlar ve kalıplar ile hammadde arasındaki karmaşık temas koşulları gibi etkilerin doğru şekilde karakterizasyonunu gerekmektedir. Gerçek bir üretim işleminin simülasyonu, zamanın işlem gücü göz önünde bulundurularak sayısal olarak oldukça emek isteyen bir görev olarak kabul edilmiştir [7].

1970 yılına kadar, büyük deformasyon probleminin ilk teorik olarak doğru FE-formülasyonu Hibbitt ve ark. tarafından sunulmuştur [15]. Bu dönemde şekillendirme problemlerini çözme girişimleri, genellikle düzlem gerilimi veya eksen-simetrik formülasyonlara dayanıyordu. Teorik açıdan bakıldığında, çoğu zaman tam olarak tutarlı değildi.

İlk teorik olarak doğru olan sac şekillendirme probleminin 3B formülasyonu, Wang ve Budiansky tarafından 1978'de sunulmuştur. Sunulan yöntem bir toplam Langrange formülasyonuydu ve üçgen, sabit gerinim membran elemanları içeriyordu. Malzeme modeli elastik-plastikti. Çözüm, basit bir Euler denklemi ile geliştirildi. Böyle bir çözüm şemasına dayanan yöntemler bazen statik-açık yöntemler olarak ifade edilmektedir [7].

Takip eden on yıl, alanda yüksek bir aktivite görülmüştür. Geliştirme birkaç farklı yol boyunca gerçekleşti. 2B ve 3B formülasyonlarını temel alan yöntemler geliştirilmiştir. Hareket tanımına, yapısal bağlantıların türüne ve çözüm prosedürlerinin seçimine bağlı olarak, yöntemler katı yaklaşım, statik-kapalı yaklaşım, statik-açık yaklaşım, sert-plastik yaklaşım ve akış yaklaşımı olarak tanımlanmıştır [7].

Katı yaklaşım ve statik-kapalı yaklaşım, aynı prosedürün iki farklı adıdır. Bu yöntem, Lagrangian hareket tanımını ve elastik-plastik yapısal bir ilişkiyi temel alır. Çözüm kademeli olarak geliştirilir ve her artışta denge denklemleri Newton-Raphson benzeri prosedürlerle yinelenerek çözülür. Bununla birlikte bazı araştırmacılar, hiçbir yinelemenin gerçekleştirilmediği statik-açık yaklaşım adı verilen alternatif bir teknik kullanmışlardır. Geometrinin güncellenmesi sadece önceki adımdaki teğet modüllerine dayanmaktadır. Bu, dengenin hiçbir zaman tatmin olmadığı anlamına gelmektedir. İlgili hataları azaltmak için çok küçük adımlar atılmalıdır. Sıradan bir simülasyon için birkaç bin adım gerçekleştirilir. Bu yaklaşımın avantajı, oldukça sağlam olmasıdır, çünkü yakınsamak zorunda olduğu yinelemeli süreçler yoktur. Kırışıklık gibi kararsızlık olayları bile bu prosedürle simüle edilmiştir [7].

Akış yaklaşımı bir çeşit güncellenmiş Eulerian formülasyonu ve sert plastik bir malzeme kanunu kullanır. Düğümsel hızlar birincil bilinmeyenlerdir. Denge yinelemeli olarak çözülürken geometri her zaman adımında sabittir. Geometri daha sonra hesaplanan hızlara göre güncellenir. Akış yaklaşımının en önemli avantajlarından biri, yönetici denklemlerinin çok basit bir görünüm kazanmasıdır. Açık bir dezavantaj elbette yaylanma gibi esneklikle ilgili hiçbir olayın simüle edilememesidir [7].

Sert plastik yaklaşımı, akış yaklaşımı ile aynı sert plastik yapısal bağlantılara dayanmaktadır (iki yöntem bazen karıştırılmaktadır). Ancak, bazı araştırmacılar bu ilişkileri gerilme artımına göre yeniden yazmayı tercih etmişlerdir. Böyle bir yaklaşımın dezavantajları elbette akış yaklaşımınınkilerle aynıdır [7].

1980'ler de akış ve sert plastik yaklaşımlar statik-kapalı olandan daha popülerdi. Daha kararlı oldukları ve önemli ölçüde daha büyük zaman adımlarının kullanılabilmesinden dolayıdır. Pek çok umut verici gelişmeye rağmen, sac şekillendirme simülasyonunun pratik uygulaması, uzun yıllar boyunca çok küçük problemler için bile çok dengesiz sayısal prosedürler ve aşırı hesaplama süreleriyle zorluk çıkarmıştır. O zamandaki en son teknolojiye örnek olarak, Tang ve ark., Ford'da geliştirilen bir kodun pratik uygulamalarından gerçek 3B otomotiv parçalarının damgalanmasının simülasyonuna kadar sonuçlar yayınlanmıştır [16]. Bu kod 3B kabuk teorisine ve statik-kapalı bir yaklaşıma dayanıyordu. 400'e kadar daha yüksek

dereceli kabuk elemanına sahip modeller analiz edilmiştir. Bildirilen hesaplama süresi bir süper bilgisayarda yaklaşık 20 saat idi.

1989'da Honecker ve Mattiasson, dinamik-açık yaklaşımın sac metal presleme uygulanmasında değerlendirildiği bir çalışmanın sonuçlarını sundu. Bu çalışmanın sonuçları çok umut vericiydi. Süper bir bilgisayarda 10.000'e kadar kabuk elemanıyla ilgili sorunlar 1.5 saat içinde çözülebiliyordu. Ayrıca, bu yaklaşımın sağlamlığının diğer yöntemlerden çok daha üstün olduğu tespit edildi [7].

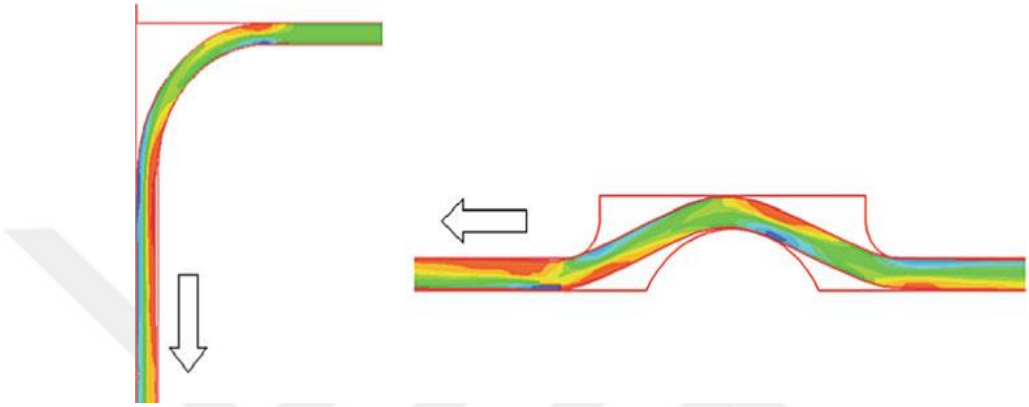
1990'ların başından bu yana, endüstride sac şekillendirme simülasyonlarının pratik kullanımında bir artış olmuştur ve bu on yılın ortasında otomotiv endüstrisindeki çoğu şirket düzenli olarak sac damgalama simülasyonları gerçekleştiriyordu ve dinamik, açık kodlar, yazılım piyasasına hükmediyorlardı. LS-DYNA ve ABAQUS / Explicit gibi genel amaçlı kodlar ve PAM-STAMP ve OPTRIS gibi özel kodlar kullanılan kodlara örnektir. Japonya'da ayrıca statik-açık yaklaşıma dayanan bir kaç kod bazı endüstriyel kullanımlar da bulundu. Alman otomotiv endüstrisinde INDEED ve Ford Motor Company'de MTLFORM gibi birkaç statik kapalı kod halen kullanılıyordu. Statik-kapalı yöntem o zamanlarda ve bugün hala akademik çevrelerde sıkça kullanılmaktadır [7].

Simülasyonları gerçekleştirmek için oldukça özel bir kod olan AutoForm, 1990'ların başında Zürih'teki ETH'deki bir araştırma projesinden ortaya çıktı. Kod statik kapalı yaklaşıma dayanmaktadır, ancak kararlılığı ve hesaplama verimliliğini artırmak için bazı yenilikçi algoritmalar kullanılmaktadır. Kodun orjinal haliyle karakteristik, bükülmeyi güçlendiren zar elemanlarının ve bir yinelemeli doğrusal denklem çözücünün kullanılmasıydı. Zamanla, kod geliştirilmiş ve şimdiki geleneksel kabuk elemanlarını da içermekteydi. Presleme uygulamaları için, kod, verimlilik ve sağlamlık bakımından dinamik açık kodlar ile rekabet edebilir ve hatta daha üstün olduğu bilinmektedir [7].

Günümüzde otomotiv sanayinin desteği ile birlikte AutoForm kendini en çok geliştiren ve sac presleme simülasyonları için endüstrideki en yaygın kullanılan kod olmuştur.

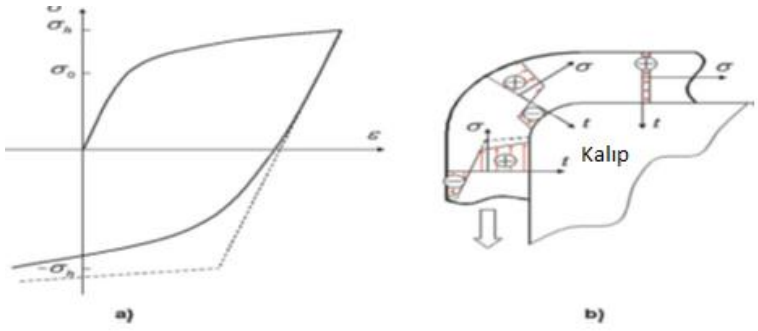
### 3.1. Bauschinger Etkisi

Tipik bir sac şekillendirme işleminde, kayda değer miktarda malzeme orantısız yüklemeye maruz kalır. Bir kalıp dişisinin yarıçapı veya bir süzdürme çubuğu üzerinden geçerken olduğu gibi malzeme çoklu bükülmeye maruz kalır, bu da sac kalınlığı üzerinde tersine gerilim-sıkıştırma yükü (Şekil 3.1) anlamına gelir.



**Şekil 3.1.** Tersine gerilim-sıkıştırma yükü gösterimi (kırmızı renk çekme gerilmesi için). Oklar çekme yönünü göstermektedir [13].

Metallerin mekanik tepkisinin sadece mevcut duruma değil, aynı zamanda önceki deformasyon geçmişine de bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Orantısız bir yükleme sırasında mekanik özelliklerin değişmesi ile ilgili olaylardan biri Bauschinger etkisidir. Genellikle, gerilme yönü değiştiğinde bir metalin akma dayanımının düştüğü koşullar ile ilişkilidir (Şekil 3.2).




**Şekil 3.2.** a) Bauschinger etkisinin şematik gösterimi ve b) malzemenin bir dişi yarıçapı üzerinden geçerken stresin oluşumu üzerindeki etkisi [7].

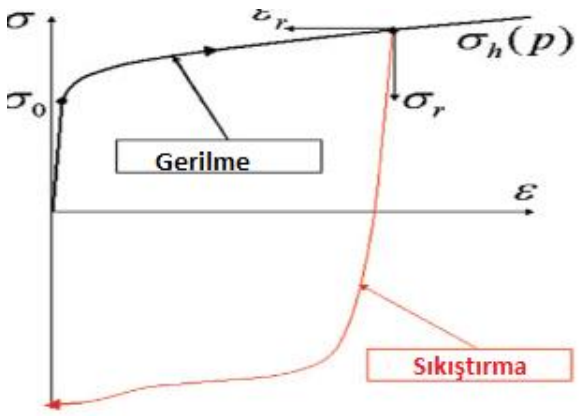
İlk önce malzeme $\boldsymbol{\sigma_h}$ çekme gerilimine göre sertleşir ve daha sonra basma yüküne maruz kalır. Plastik deformasyon negatif akma dayanımından önce meydana gelir (kesikli çizgi Bauschinger etkisi olmadan malzeme davranışını gösterir). Benzer bir ters gerilme-uzama öyküsü, malzeme bir dişi yarıçapından geçtiğinde meydana gelir (Şekil 2.26b). İlk bükme sırasında, bir sacın dış tarafında bir gerginlik ve içinde bir sıkıştırma vardır. İkinci bükülme sırasında gerilme durumu sac kalınlığı boyunca tersine çevrilir ve doğrudan Bauschinger etkisinden etkilenir.

Özellikle geri yaylanma tahmini için, ters yükleme sırasında malzeme davranışının doğru bir şekilde tanımlanması esastır: bir yandan boşaltma başlamadan önce biçimlendirme işleminin sonunda gerilme dağılımının tam olarak bilinmesi önemlidir, diğer yandan uygun gerilme şekil değiştirme tepkisi ile boşaltma modeli gereklidir. Bir geri yaylanmanın büyüklüğü akma dayanımına ve Young modülüne bağlı olduğundan, Bauschinger etkisi dahil olmak üzere daha uygun malzeme modellemesi özellikle yüksek dayanımlı çelikler ve alüminyum alaşımları gibi yeni malzemeler için gerekli hale gelmiştir [7].

### 3.2. AutoForm Modeli

Geri yaylanma tahminini iyileştirmek için Bauschinger etkisini modellemeye yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmiş ve AutoForm ticari kodunda sunulmuştur. Modelin ana fikri, geleneksel modellerde elastik olarak ele alınan alan da dahil olmak üzere, tüm boşaltma ve ters yükleme yolu için aynı evrim denklemini kullanmaktır. Model açıklanmayan bir araştırmanın parçası olduğu için, burada temel prensibi hayali ters gerilim $\boldsymbol{\sigma_r}$ ve ters deformasyon $\boldsymbol{\varepsilon_r}$ yükün tersine dönme noktasında koordinat merkezi ile kullanarak $\boldsymbol{\sigma_h}$ $(p)$ çekme eğrisini tanımlamak için gerinim sertleşmesi olarak kullanılan ve yükün geri çekildiği andaki ilk Young modülü olarak $\mathbf{E_t}$ kullanılarak tek eksenli çekme-basma durumu için sunulacaktır.

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_t(p)} + K \arctan h^2 \left( \frac{\sigma_r}{2\sigma_h(p)} \right)^2 \tag{3.1}$$

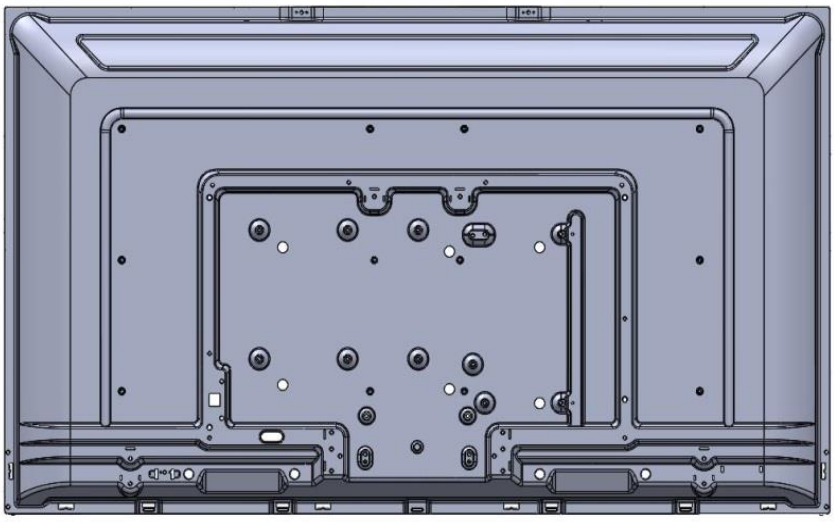



**Şekil 3.3.** Gerilme-sıkıştırma eğrisinin tersine gerilme ve gerinim ile şematik gösterimi [7].

# 4. MALZEME VE METOD

Bu tez çalışması sonucunda üretilecek olan parça, bölgemizde bulunan dayanıklı tüketim malları üreten Vestel firmasının yeni nesil 43 inç DLED TV' lerin de kullanılacaktır. Söz konusu bu parça, Direkt Led teknoloji kullanılan televizyonların arka panelini koruyan, üzerine ana kartların, ledlerin ve diğer gerekli bileşenlerin montajlandığı ve televizyonun arka kasasını oluşturan ana parçalarından biridir.

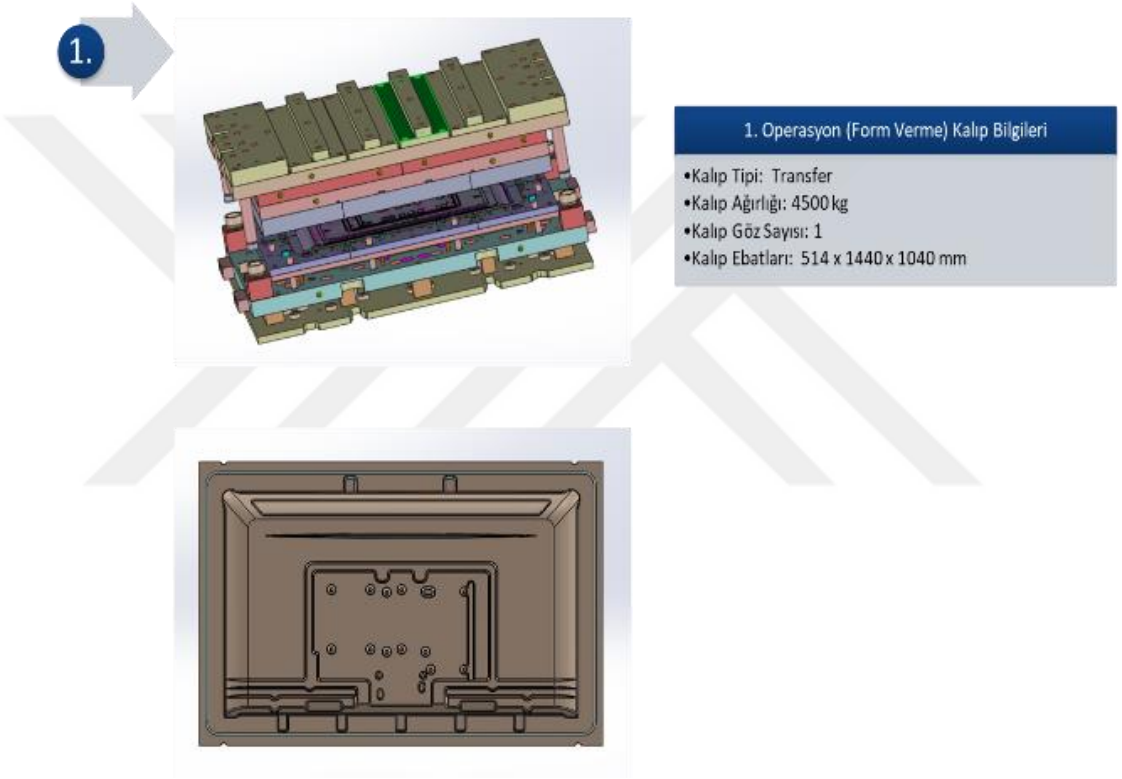
Direct LED kısaca DLED teknolojisinde ışık paneli doğrudan LCD ekranın altından verilir. D-LED TVler de hem üretim maliyeti yüksektir hem de E-LED ve LED TVlere göre biraz daha kalındır. Fakat diğer aydınlatma teknolojilerine göre avantajı, ekran konstrastının çok daha yüksek olması ve bölgesel olarak parlaklığın kontrol edilebilmesidir.



**Şekil 4.1.** DLED TV arka panelin katı model görseli.

Şekil 4.1'de katı model görseli bulunan DLED TV arka panelin kalıpları genellikle uzak doğu firmaları tarafından üretilmekte ve ülkemize ithal edilmektedir. Bu proje ile Metalsan Ar-Ge Merkezi ve Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü bir arada çalışarak, bölgemizdeki ithalatı engelleyip, ikame sağlayıcı yönde Ar-Ge ve simülasyon çalışmaları sonucu ortaya çıkan veriler doğrultusunda doğru kalıp tasarımı ve malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1'de tasarımı yenilenen DLED TV arka panelinin seri üretimi Vestel bünyesindeki 600 ton preslerden oluşan üretim hattında üretilmesi planlanmaktadır. Tasarlanan yeni parçanın seri üretiminde kullanılması için 6 operasyonlu, her operasyonun kendine has zorlukları bulunan 6 adet sac metal kalıplarının üretimi Metalsan Ar-Ge Merkezi tarafından geleneksel talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2'deki görsellerde 3B programlarda tasarlanan kalıp görselleri, operasyon bilgileri ve operasyon çıktılarının sanal görüntüleri sunulmaktadır.

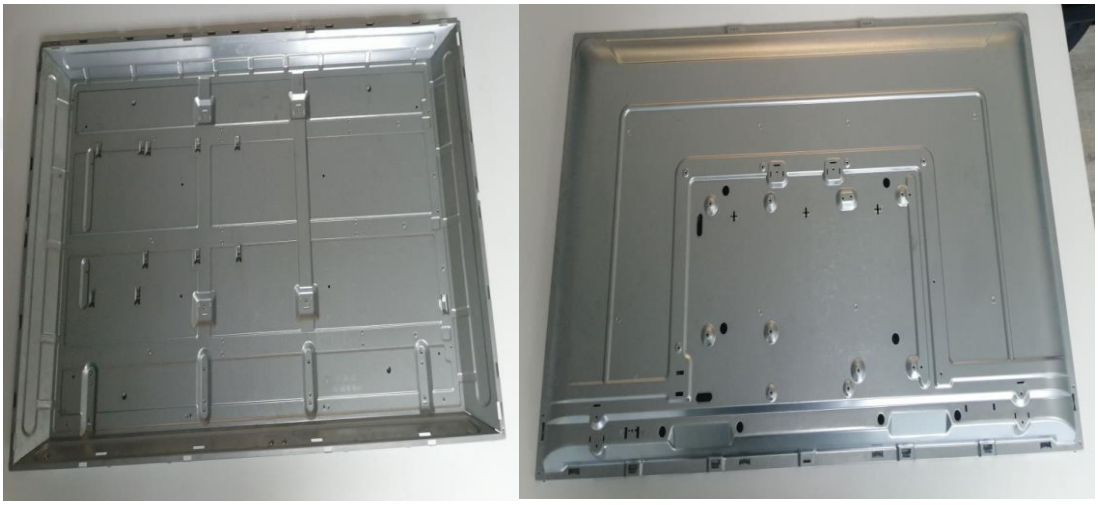



**Şekil 4.2.** Operasyon 1 - Derin Çekme Prosesi.

Eski tasarım DLED TV'lerin arka panel 1.operasyonu form kalıbından oluşmaktaydı. Yalnız eski tasarım arka panelin form prosesi kütükleme diye adlandırdılan pot çemberine gerek duyulmadan sac plakaya tasarım doğrultusunda en fazla 10 mm derinliğe kadar ulaşan formların oluşturulmasıyla meydana gelmekteydi. Halbuki yenilenen tasarımda form derinliği 47 mm 'dir. Bu sebepten dolayı yenilenen parça tezde incelenen konu olmaktadır. Kalıp üretimi öncesi maliyetleri ve zaman

kayıplarını minimize etmek amacıyla AutoForm analiz programına ihtiyaç duyulmuştur.

Eski tasarım ve yeni tasarım arasındaki farklar 4.3' den de anlaşılacağı üzere bükme prosesi sayısı azaltılmış derin çekme prosesi uygulanmış yeni nesil bir tasarımdır. Bunun sonucunda her ne kadar aynı kalite malzeme sipariş ediliyor olsa da seri imalat sırasında malzemenin özelliklerinde oluşan sapmalar sonucunda istenmeyen ve beklenmeyen sorunlarla karşılaşılabiliyordu.



(a) (b)

**Şekil 4.3**. (a) Eski tasarım DLED, (b) Yeni tasarım DLED TV paneli.

Geri yaylanma bu sorunların başında geliyordu. Hem geri yaylanma etkisini azaltmak hem de eski tasarımın 6.operasyonunda malzemeyi 4 köşeden birleştirmek amaçlı kullanılan tox-clinching (mekanik birleştirme) diye adlandırılan prosesin devre dışı bırakılması için DLED TV arka panelinin tasarımı yenilenmiştir. Mekanik birleştirme prosesin de yaşanan zımba kırılmaları seri imalat sırasında önemli derecede üretimin durmasına sebep olmaktaydı. Şekil 4.4' de görseli verilen ve 4 köşeden mekanik birleştirilen malzemenin bazen yeterince güçlü olmamasıda seri imalat sonucunda oluşan parçaların hurdaya ayrılmasıyla sonuçlanıyordu. Bu gibi aksaklıklar parça tasarımda yeniliğe gidilmesinin kaçınılmaz bir son olduğunun göstergesiydi.

**Şekil 4.4.** Mekanik birleştirme görseli.

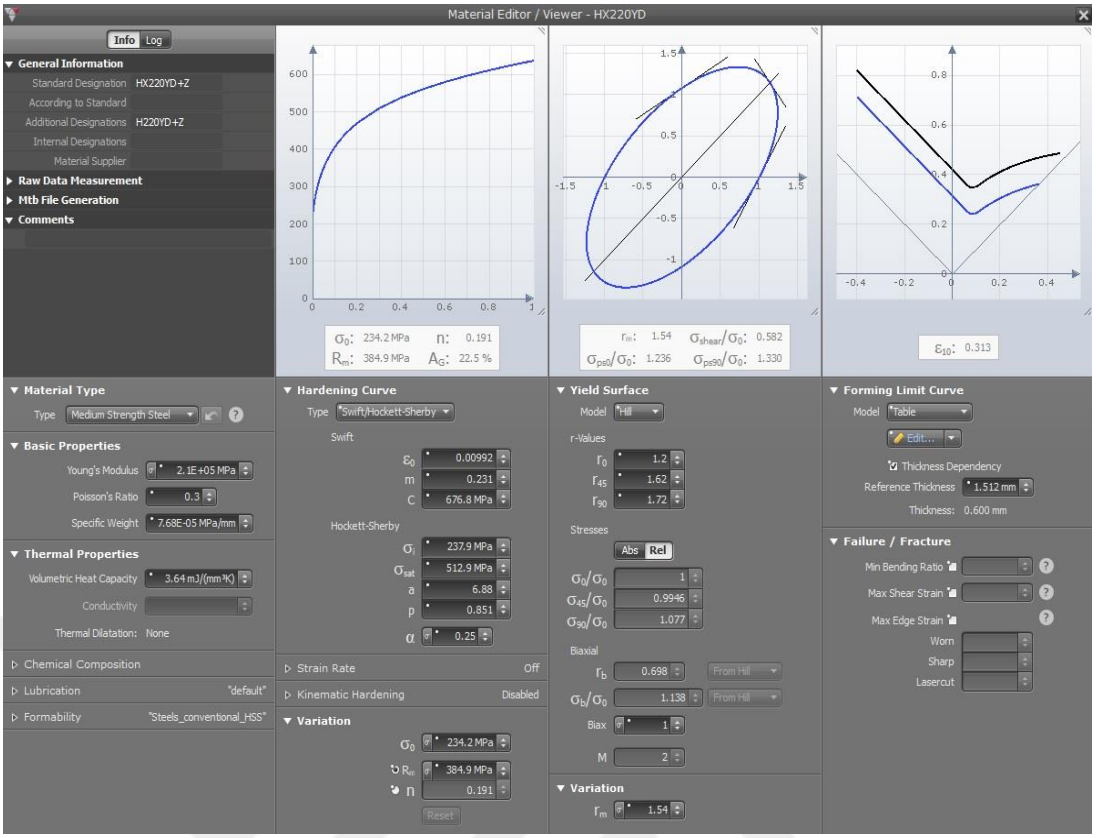
Bu tez çalışmasının en önemli amacı kullanılacak olan sac kalitesinin yapılan analizler doğrultusunda ön çalışma olarak belirlenmesidir. Bu nedenle soğuk plastik şekillendirmeye uygun düşük karbonlu, çinko ile kaplanmış galvanizli çeliklerden DX54D+Z ve DX56D+Z kullanılarak hem analiz, hem de kalıp denemesi sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca DX52D+Z, DX53D+Z ve HX220YD+Z malzemeleri için de analiz çalışmaları yapılmış yeni tasarlanmış DLED TV arka paneli parçası için seri imalatta kullanılacak en uygun malzemeye karar verilmiştir. Aşağıdaki Tablo 4.1 ve 4.2' de analiz edilen bu malzemelerin sırası ile kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri görülmektedir. Şekil 4.5 Autoform kütüphanesinden elde edinilen HX220YD+Z, Şekil 4.6 DX52D+Z, Şekil 4.7 DX53D+Z, Şekil 4.8 DX54D+Z ve Şekil 4.9 ise DX56D+Z malzeme datalarını içermektedir.

**Tablo 4.1.** Soğuk Şekillendirmeye Uygun Sac Metallerin Kimyasal Bileşimleri (%) [17].

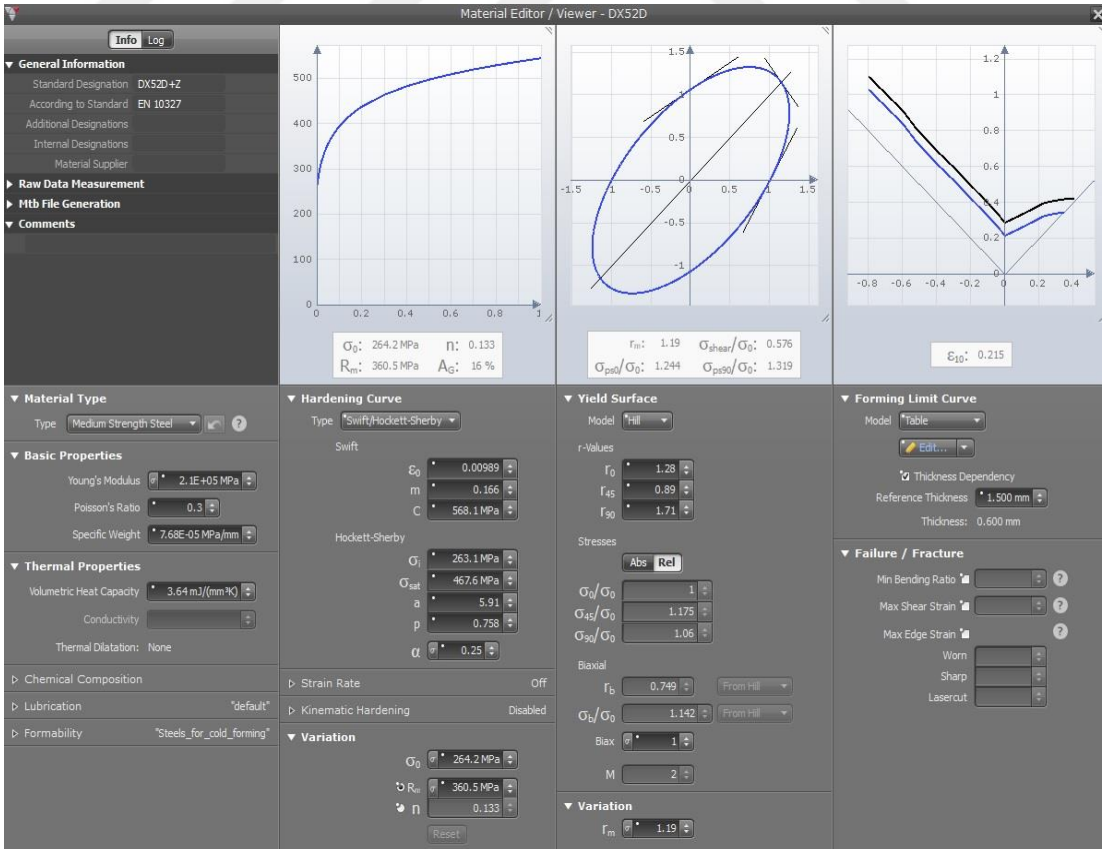
| **Standart** | **Kalite** | **$C_{max.}$** | **$Si_{max.}$** | **$Mn_{max.}$** | **$P_{max.}$** | **$S_{max.}$** | **$Ti_{max.}$** | **$Nb_{max.}$** | **$Al_{min.}$** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EN10346 | HX220YD+Z | 0,01 | 0,30 | 0,90 | 0,08 | 0,025 | 0,12 | 0,09 | 0,01 |
| EN10346 | DX52D+Z | 0,12 | 0,50 | 0,60 | 0,10 | 0,045 | 0,30 | - | - |
| EN10346 | DX53D+Z | 0,12 | 0,50 | 0,60 | 0,10 | 0,045 | 0,30 | - | - |
| EN10346 | DX54D+Z | 0,12 | 0,50 | 0,60 | 0,10 | 0,045 | 0,30 | - | - |
| EN10346 | DX56D+Z | 0,12 | 0,50 | 0,60 | 0,10 | 0,045 | 0,30 | - | - |

**Tablo 4.2.** Soğuk Şekillendirmeye Uygun Sac Metallerin Mekanik Özellikleri [17].

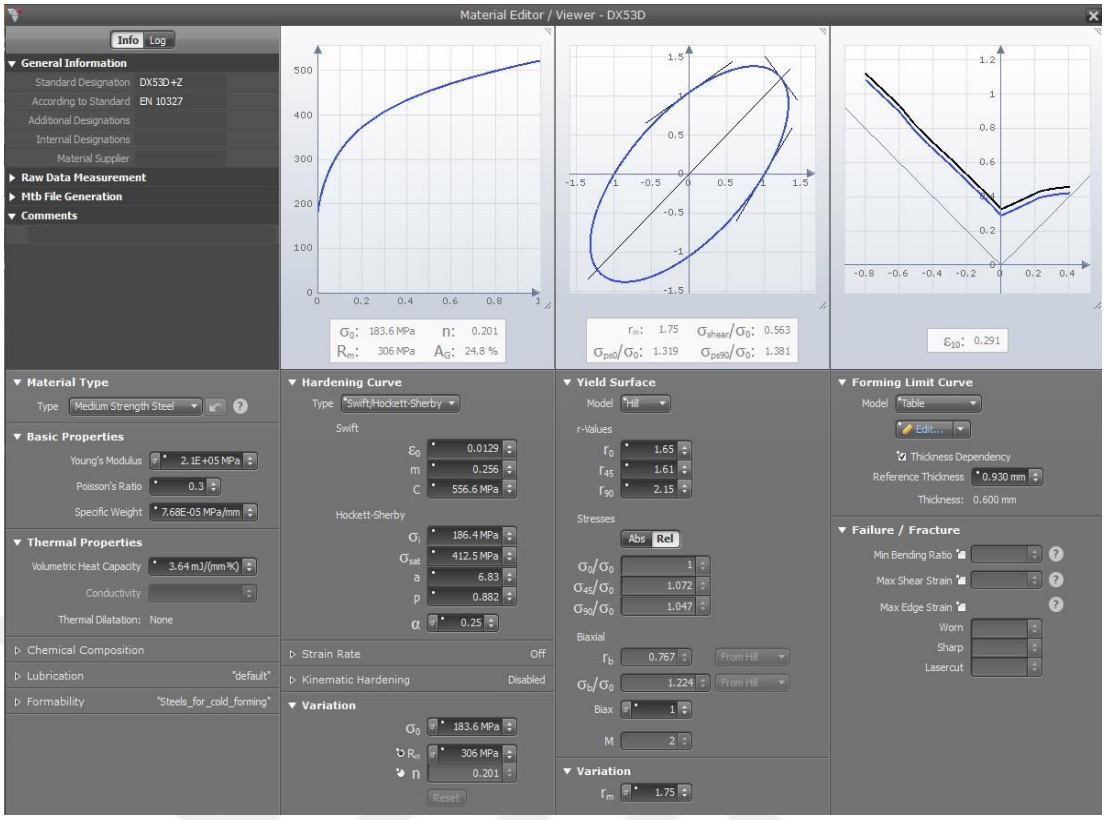
| **Standart** | **Kalite** | **Mekanik Değerler (Garanti Süreleri)** | **Akmaİzi Oluşmaması (Garanti Süreleri )** | **$R_e$ $R_{p0.2}$ $N/mm^2$** | **$R_m$ $N/mm^2$** | **$A_{80}$ (%) min.** | **$r_{90}$ min.** | **$n_{90}$ min.** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EN10346 | HX220YD+Z | 6 ay | 6 ay | 220-280 | 340-420 | 32 | 1,5 | 0,17 |
| EN10346 | DX52D+Z | 1 ay | 6 ay | 140-300 | 270-420 | 26 | - | - |
| EN10346 | DX53D+Z | 1 ay | 6 ay | 140-260 | 270-380 | 30 | - | - |
| EN10346 | DX54D+Z | 1 ay | 6 ay | 120-220 | 260-350 | 36 | 1,6 | 0,18 |
| EN10346 | DX56D+Z | 1 ay | 6 ay | 120-180 | 260-350 | 39 | 1,9 | 0,21 |



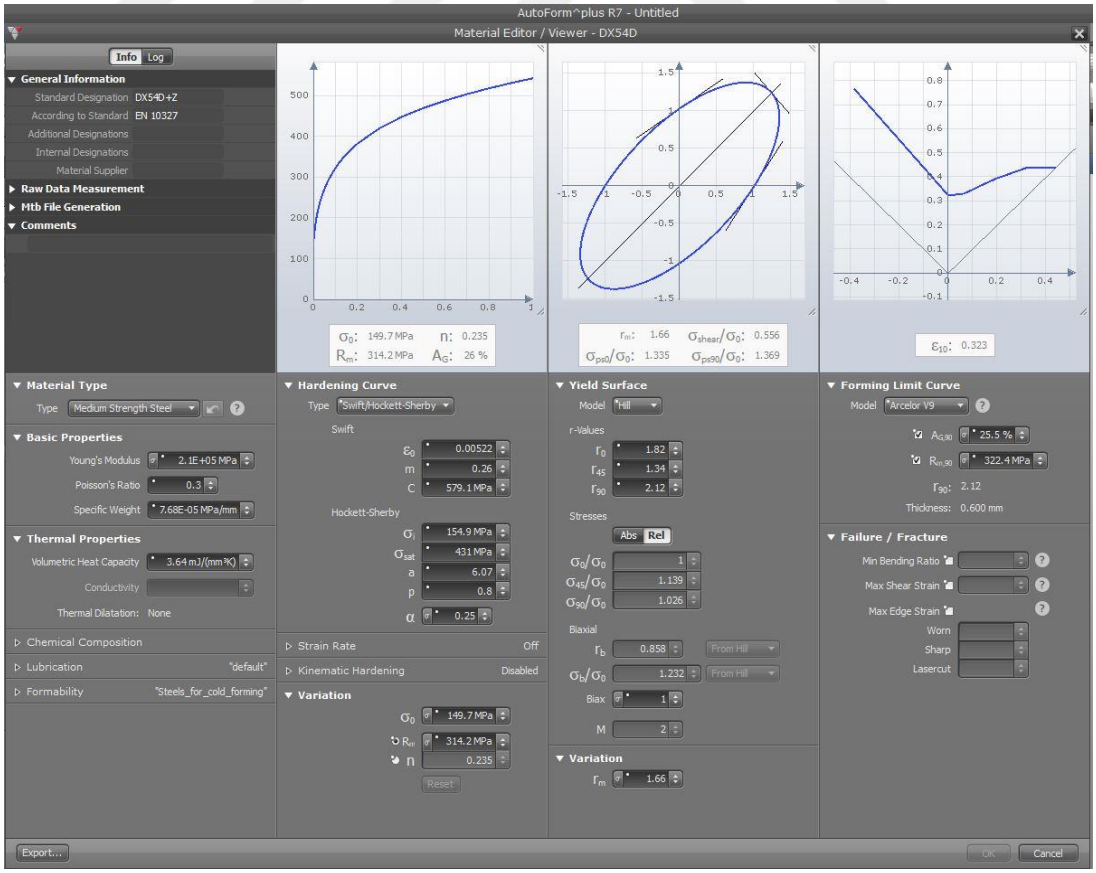

**Şekil 4.5.** AutoForm HX220YD+Z malzeme datası.



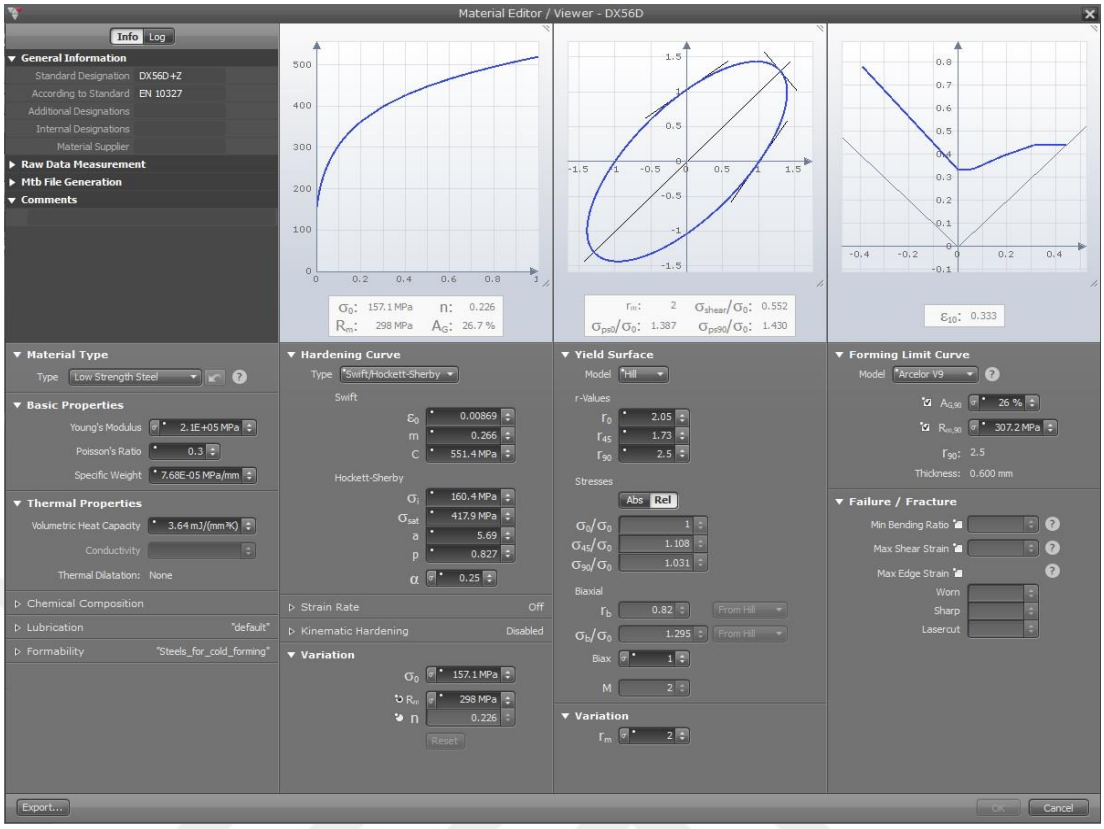

**Şekil 4.6.** AutoForm DX52D+Z malzeme datası.




**Şekil 4.7.** AutoForm DX53D+Z malzeme datası.




**Şekil 4.8.** AutoForm DX54D+Z malzeme datası.




**Şekil 4.9.** AutoForm DX56D+Z malzeme datası.

**Sac metal kalıbı imalat süreci :**

Sac kalıbı tasarımı ve sac metal komponent üretimi beyaz eşya, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde üretim iyileştirme sürecinde zaman ve maliyet yönünden çok önemli konulardır. Sac metal komponentlerin yüzey kaliteleri geri yaylanma değerlerine, alıştırma işlemlerine, kalıp aşınma değerlerine ve tabi ki sac metal parçanın üretimin de kullanılan malzeme kalitesine gibi değerlerle doğrudan bağlıdır. Bu gibi değerlerin kalıp daha tasarım aşamasında iken tahmin edilebilmesi, üretilecek olan sac parçaların kalitesine büyük katkı sağlayacaktır. Kalıp tasarım ve üretim süreci aşağıda verilen beş temel aşamadan oluşmaktadır:

1. Üretilmesi planlanan parçanın üretilebilirlik analizi ve operasyonların belirlenmesi
2. Bilgisayar destekli kalıp tasarım aşaması (2B ve 3B modelleme çalışmaları)
3. Tasarlanan kalıbın doğrulaması çalışmaları (sanal ortam analiz ve testleri)
4. Talaşlı imalat yöntemlerini verimli kullanarak kalıp imalatı
5. Üretim koşulları altında kalıp deneme çalışmaları ve ürün onay alma süreci

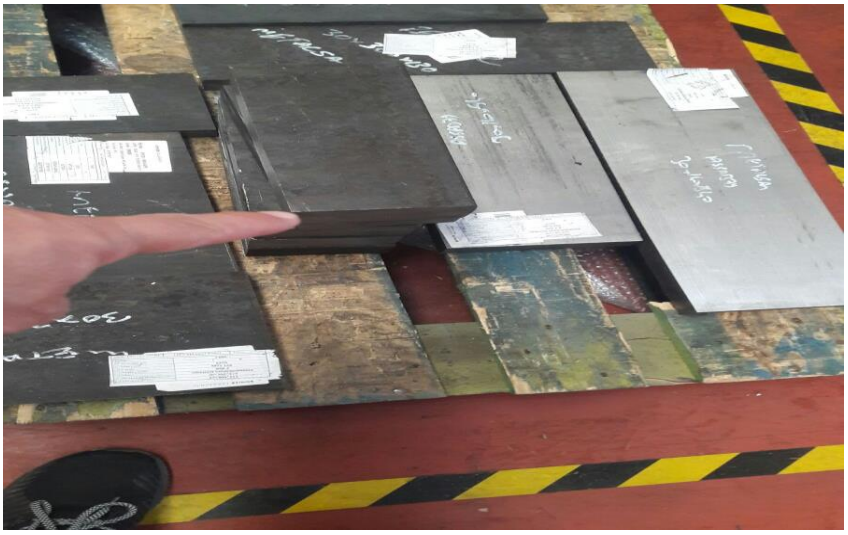
Sac kalıbı imalatının en önemli noktası olan operasyonların belirlenmesi ve simülasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra tasarımcının görevi her firmanın kendine özgü sahip olduğu kalıp şartnamelerine uyarak kendisine verilen 3 boyutlu parça datasına uygun tasarlanacak kalıbın üretim yapacağı koşulların bilgileride ( pres tablası boyutları, kalıp kapalı yüksekliği, bağlama kanalı ölçüleri, sac sürücü yüksekliği, hattın robotlu veya transfer presi olup olmaması vb.) hesaba katılarak istenen rijitlikte, bakımı kolay ve en önemlisi üretimi aksatmadan sorunsuz çalışabilen kalıplar tasarlamaktır. Sac metal kalıplarıyla, talaş kaldırma işlemi olmadan, sac malzemelerden istenilen ölçü ve tasarımda parçalar üretilebilmekte olsa da sac metal kalıplarının imalatı gelişen teknolojik talaşlı imalat yöntemleri ile yapılmaktadır.

Tasarımı ve tasarım doğrulama adımları başarıyla geçilmiş bir kalıbın üretimi yapılacak çelikleri, kalıp seti, standart malzemeleri siparişi verildikten sonra kalıp imalatına başlanabilir. Sac metal kalıplarında kullanılan çelikler soğuk iş takım çelikleridir. Bu projede kullanılan kalıp çelikleri sanayide en çok tercih edilen 1.2379 soğuk iş takım çeliğidir. Şekil 4.10’ da görseli verilen çelikler testerede, sipariş edilen boyutlara uygun olarak kesilmiştir.

DIN 1.2379 (X155CrVMo12-1): Tablo 4.3 ‘de verilen kimyasal bileşiminde ki %0.70 Mo alaşımın varlığı tokluğunu arttırırken, %1 V’ un varlığı da aşınma direncini arttırır. Ayrıca içerisinde ki yüksek Cr elementi sertleşebilirliğini ve ısıl işlem kabiliyetini olumlu yönde arttırmaktadır. Isıl işlem sonrası 63-65 HRC sertliğine ulaşabilmektedir. Nitrasyon sonrası 1200 HV yüzey sertliği elde edilebilir [18].

**Tablo 4.3.** DIN 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliği Kimyasal Bileşimi (%) [18].

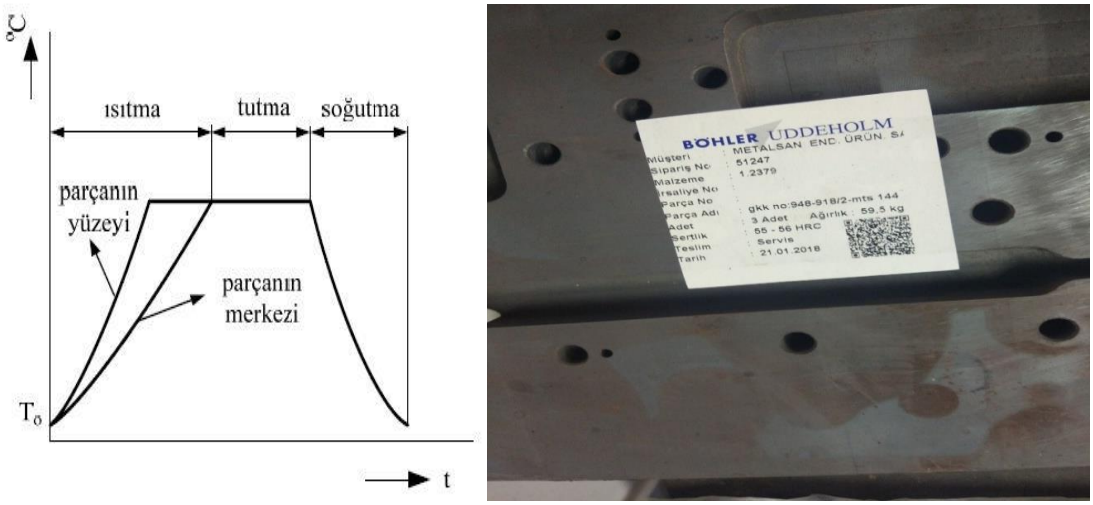
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,45-1,6 | 0,1-0,6 | 0,2-0,6 | max 0,03 | max 0,03 | 11-13 | 0,7-1 | 0,7-1 |



**Şekil 4.10.** Çeliklerin testerede kesilmiş hali.

Atölyeye gelen çeliklerden ilk proses olarak borverk tezgahlarında hem tasarımın gerektiği boyutlar hem de daha sonraki prosesler düşünerek pay verilerek talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilir. Borverkte taranan çelikler artık CNC dik işlem tezgahlarda kaba işlemeye hazır olurlar. Kaba işleme bilgisayarda yapılan programlar yardımı ile parçanın tasarımında bulunan kolon yerlerinin ön delikleri, pim yerlerinin ön delikleri, bağlantı elemanlarının yerleri, formların paylı işlemeleri ve tel erezyon delikleri gibi kısımların ısıl işlem öncesi işlemelerini kapsar.

Kaba işlemesi biten çeliklerin mekanik özellikleri arzu edilen düzeye ulaşması için ısıl işlem yapan firmalar tarafından metalürjik işlemler uygulanır. Genel anlamda, metalleri belirli bir sıcaklıkta tavlayarak yapılarını istenilen faza getirmek suretiyle yapılır. Çelikler üzerinde uygulanan tüm ısıl işlemler, ısıtma, tutma ve soğutma olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilebilir (Şekil 4.11). Bu tez çalışması için yapılan kalıp çelikleride istenen sertliğe (56-58 HRC) ulaşması için ısıl işlem uygulamaları gerçekleştirilmiştir.




(a) (b)

**Şekil 4.11.** (a) Isıl işlem aşamaları, (b) Isıl işlem prosesi uygulanmış çelik görseli.

Isıl işlem prosesinden sonra yapılması gereken işlem taşlama (Şekil 4.12) işlemidir. Taşlama prosesinin yapılmasının başlıca amaçları aşağıdaki gibidir:

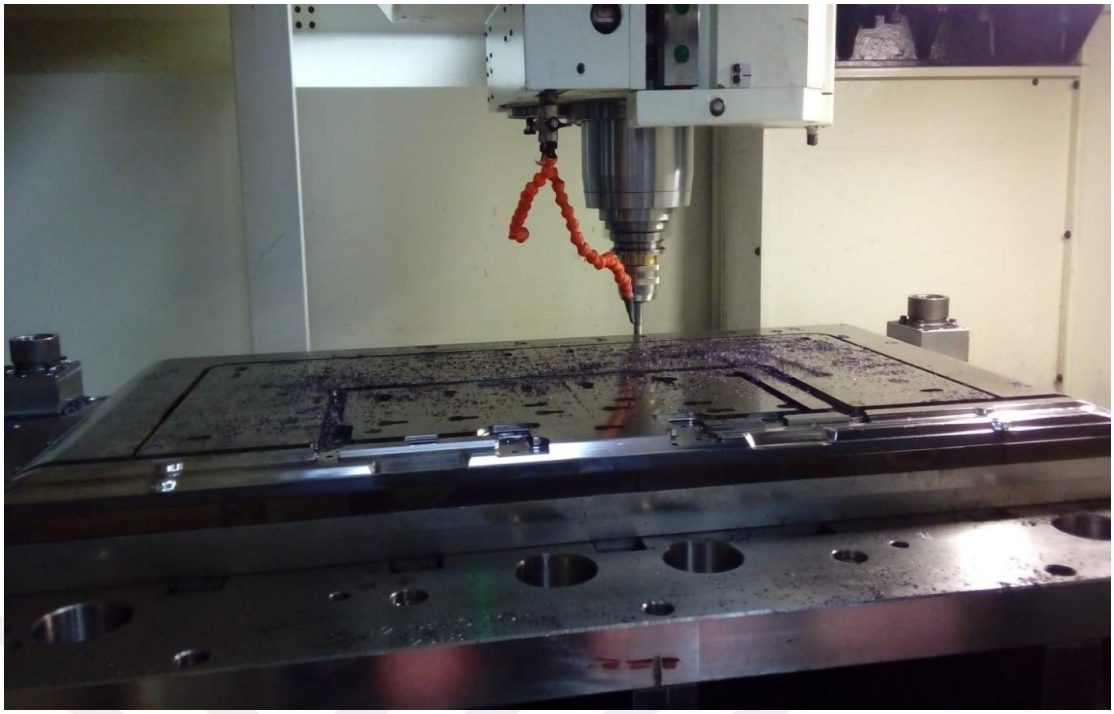
1. Parçanın belirlenen hassas ölçü aralığında işlenmesi.
2. Isıl işlem uygulanırken oluşan çarpılmaların giderilmesi.
3. Sertleştirilmiş parçanın yüzeylerinden talaş kaldırılması. Taşlama tezgahları ile, tornalama ve frezeleme tezgahlarına göre pürüzlülük bakımından çok daha kaliteli yüzeyler elde edilir.
4. Genellikle imalatta en son aşama olan taşlama parlak ve pürüzsüz yüzeyler elde etme amaçları için tercih edilir.

**Şekil 4.12.** Taşlama tezgahında parça işleme.

Taşlama prosesinden sonra sac metal kalıpların tel erezyon ile işlenmesi prosesine geçilmektedir. Tel erozyon tezgahında işleme; bobin şeklinde makaraya sarılan iletken telin, daimi olarak yukarıdan aşağıya doğru ilerletilmesi ve iş parçasının tasarımında oluşturulan kesme yolları boyunca elektot telin ilerletilmesi ile metalin kesilmesi sağlanır. Tel erozyonda talaş kaldırma işlemi, doğru akım bir güç kaynağı sayesinde oluşan elektrik kıvılcımlarının erozyonu ile kesme hattı boyunca kaldırılır. Tel erozyon ile işleme tekniğinin üstünlüğü, sertlik değeri ne olursa olsun elektrik iletkenlik özelliğine sahip her türlü malzemenin kolaylıkla işlenebilmesidir (Şekil 4.13).

**Şekil 4.13.** Tel erezyon ile parça işleme

Tel erezyondan çıkan parçalar montaj ekipleri tarafından lokmalar ve hamiller birbirlerine alıştırılarak kalıp toplama işlemi tamamlanır. Form ve derin çekme kalıplarında, montajı yapılan kalıplar kalıp deneme aşamasından önce tekrardan CNC dik işleme tezgahlarında talaş kaldırmaya maruz kalır. Bu aşamaya son talaşlı işleme denir. Son talaşlı işleme prosesi de 3 boyutlu parça tasarımının yüzeyine uygun dişi ve erkek yüzeyleri oluşturulur. Finish işleme bir yüzey talaş kaldırma işlemidir (Şekil 4.14).



**Şekil 4.14.** CNC dik işlem ile parça işleme.

Yüzey işleme prosesinden sonra kalıp denemeleri öncesi yapılacak bir diğer önemli proses ise yüzey parlatma işlemidir. Yüzey parlatma işleminin alınacak kalıp çıktısına etkisi göz ardı edilemeyecek derecededir. Kalıp parlatma işlemi, yüzey tesviye aşaması ve yüzey parlatma (polishing) aşaması olarak 2 ana gruba ayrılır.

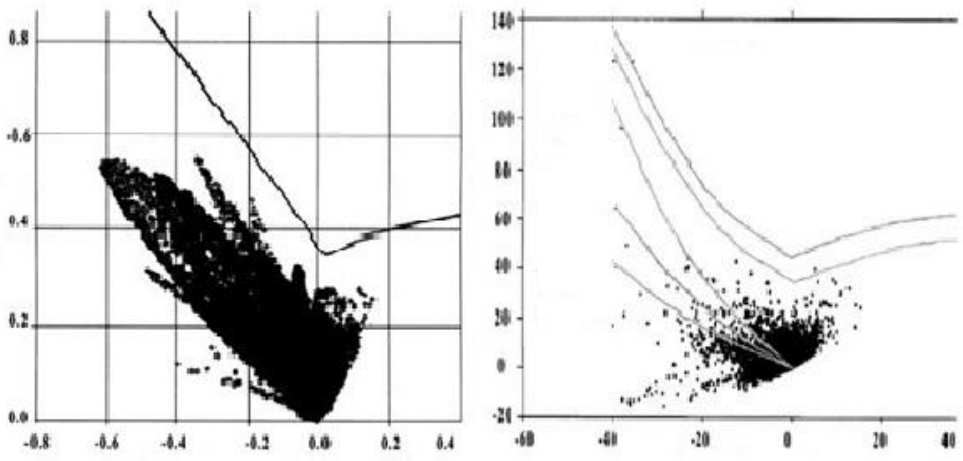
Kalıp tesviye aşamasında, yüzey işleme kaynaklı meydana gelen takım çizgileri yok edilir. Düzeltilmesi gereken alanlar, oluşturulacak radyüsler veya yüzey işlemesinde yapılan hataların düzeltilmesi işlemleri kalıp tesviye aşamasında yapılır.

Kalıp parlatma aşamasında, amaç kaplama prosesi öncesi dişi ve erkeklerde ayna yüzeyi elde etmektir. Parlatma işlemi özel üretim elmas pastalar ve dokumaya el verişli hayvan kıllarından imal edilen parlatma keçeleri vasıtasıyla yapılmaktadır. Kalıp parlatma proseside bittikten sonra kalıp imalatı aşaması tamamlanmış olur. Kalıplar kalıp deneme aşamasına hazırlanmış.

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Proje kapsamında taranan literatür çalışmalarında sac metal kalıpçılığı üzerine her geçen yıl ciddi oranda artış olduğu gözlemlenebilmektedir. Bunun başlıca sebepleri artan rekabet ve üretim maliyetlerinin yanı sıra endüstri ihtiyaçlarının her yeni günde değişen doğası nedeniyle, şekillendirilebilirliğin tahmin süreci zorlaşmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte ve sonlu eleman tabanlı yazılım programları sayesinde sac metal kalıpçılığında kompleks ve zorlu komponentlerin şekillendirilebilirliğin tahmin süreci olumlu yönde etkilenmektedir. Bu sayede deneme-yanılma prosesi maliyetleri ve süreleri azalmaktadır.

Hongzhi ve Zhongqin (2000), Autoform ve Ls-dyna 3B sonlu elemanlar analiz programını kullanarak, Santana 2000'in dış panelini oluşturan bir yan çerçeve için simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasını yapmıştır. Makalelerinde simülasyon hesaplaması ile, şekillendirme sırasındaki mühendislik gerilmesi ve hammaddenin kalınlık değişimi karşılaştırılmış ve gerinme durumu ile FLD arasındaki karşılaştırmaya yer vermişlerdir (Şekil 5.1). Yapılan bu çalışmada, baskı sırasında olası kırışma ve bozulma alanları belirleyip, ortaya çıkan sonuçları karşılaştırarak, iki sistemin problemlerle başa çıkmadaki farkı tartışılmakta, mevcut farklılığın nedeni analiz edilmekte ve farkın azaltılması için yöntemler sunulmaktadır. Son olarak, iki sistemin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır [1].



(a) (b)

**Şekil 5.1.** (a) Autoform FLD, (b) Ls-Dyna FLD [1]

İriç (2012) yüksek lisans tezinde, sac şekillendirme prosesi esnasında oluşan şekillendirme kusurlarını ortadan kaldırmak veya en aza indirmek amacıyla, kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla pot çemberi ile birlikte kullanılan süzdürme çubuğunun sac malzeme üzerinde oluşturduğu frenleme kuvvetini incelenmiştir [3].

Yang ve arkadaşları (2018) çalışmalarında, farklı değişken koşullar altında ki etkileri, yani eğriliklerin derinliği çeşitliliğini, sac malzeme seçimi, tutma kuvveti, yüzey yağlaması ve kauçuğun minder olarak kullanılması gibi etkenleri incelemek için basit bir değişken yöntemi kullanmışlardır. Bu çalışma için çok noktalı bir derin çekme takım test makinesi geliştirilmiştir. Hem sac kırışıklıkları hem de girintiler gözlenmiş ve proses değişkenleri ile bir ilişki kurulmuştur. Tutma kuvvetinin etkisi, farklı sertlik değerlerine sahip destek yayları üzerindeki reaksiyon kuvvetiyle incelenmiştir.

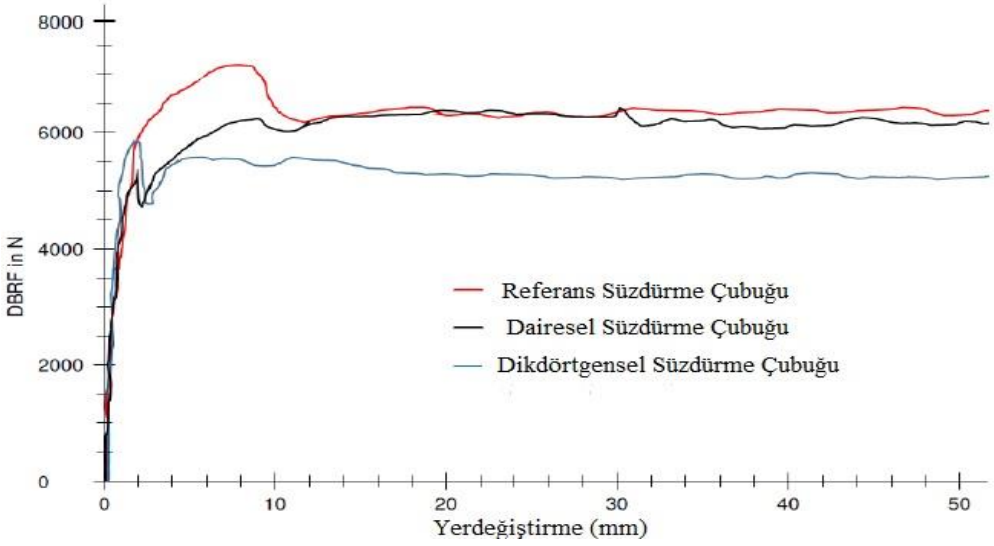
Şekil 5.2.' de gösterilen fotoğraflar, işlenen parçanın flanşları boyunca kırışıklıkların oluşumunu azaltmak veya ortadan kaldırmak için doğru tutma kuvvetinin kullanılmasının önemini gösterirken, şekillendirlen parçanın yüzey kalitesi de iyileştirilebiliceğini gözlemlenişlerdir. Ayrıca hammadde ve kalıp plakası arasında yağlama yapmak için çok amaçlı bir kesme yağı kullanılmıştır. Yağlayıcı kullanımı nedeniyle kırışıklıkların kenarda hafifçe azaltılabileceği görülmektedir [4].

(a) (b)

**Şekil 5.2.** Farklı yay sertliği değerleriyle oluşturulan parçalar: (a) 8,79 daN/mm ve (b) 3,8 daN/mm [4].

Hattalli ve Srivatsa (2018) çalışmalarında, sac şekillendirme işlemini etkileyen; geometrik ve malzeme parametrelerine yer vermişlerdir. Delme ucu radyusu, kalıp omuz yarıçapı, hammadde sıcaklığı, hammadde tutma kuvveti, kalıp boyutları, hammadde kalınlığı ve delme derinliği gibi geometrik parametrelerin etkisinin önemini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, elastik mukavemet, akma mukavemeti, plastisite ve anizotropi gibi malzeme özelliklerine dayanan parametrelerin de, geometri esaslı parametreler kadar etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu parametreler, yanlış tanımlandıkları takdirde, sıkıştırıcı gerilme bölgelerinde kırışma, yırtılma, geri yaylanma, lokal boyunlanma ve burkulma gibi kusurlarla sonuçlanacağı sonucuna varmışlardır [5].

Mutlu (2012) yüksek lisans tezinde, derin çekme işlemlerinde metal kullanımını artırmak için iki farklı geliştirilmiş süzdürme çubuğu tasarlamıştır. Bu çalışmada Mutlu, iyileştirilmiş süzdürme çubuklarından oluşturulan süzdürme çubuğu tutma kuvvetine odaklanmaktadır. Analizler için 2B ve 3B simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda ABAQUS/Standard ve AutoForm ticari yazılım programları kullanılmıştır. Simülasyonların doğrulanması için deney düzeneği oluşturulmuş ve sayısal simülasyonlarla elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [6]. Şekil 5.3'de gösterilen grafikte DC04 şeriti üzerine uygulanan süzdürme çubuğu sınırlama kuvvetinin ortalama değerinin deneysel sonuçları çizilmiştir.

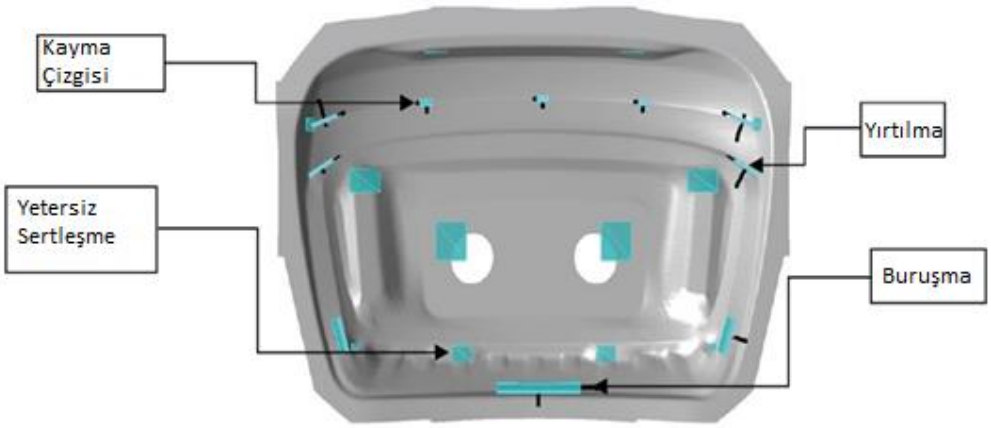



**Şekil 5.3.** DC04 için DBRF'nin deneysel sonuçları [6].

Yalçın (2010) yüksek lisans tezinde sac metal parça üzerinde oluşan plastik kırışmayı gözlemlemek için pot çemberi plakası kuvvetinin kırışmaya olan etkisi araştırmıştır. Değişik pot çemberi plakası kuvvetleri için simetrik kap modellemesini incelemiştir. Pot çemberi modellemesi, eş ve fiziksel olarak, probleme eklenmiş ve sonuçları tartısılmıstır. Sayısal analizlere ilaveten, hidrolik pres kullanılarak klasik derin çekme işleminin deneysel doğrulama çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalısma sayesinde, sayısal ve deneysel analizler ile parça kalınlığının kırışmaya olan etkisi anlaşılmıştır [8]. Şekil 5.4' de verilen görsel sayesinde, hammaddenin kalınlığı arttıkça dalga sayısının azaldığı açıkça görülebilmektedir.

**Şekil 5.4.** 80 mm çaplı hammadde için kırışıklık oluşumları [8].

Parçanın kalitesi, parçanın çeşitli konumlarında yırtılma, kırışıklık, yetersiz sertleşme ve kayma çizgileri riskini tanımlayan sayısal değerlerle değerlendirilir. Yırtılmalar, belirli bir elemandaki ana gerilimin, aynı küçük gerilimdeki ilgili şekillendirme limitinin ana gerilimine bölümü olarak tanımlanan "maksimum başarısızlık" değeri ile karakterize edilir. En az bir simülasyonda kritik değerine ulaşırsa, Şekil 5.5 'de çeşitli kalite kriterleri için gösterildiği gibi elemanın etrafına bir sınırlayıcı kutu çizilir. Neuhauser ve arkadaşları (2019) çalışmaları kapsamında, lazer sensör içeri çekme ölçümlerine dayalı olarak yırtılma ve buruşma tipi arızaların gözlenebilirliğini ciddi olarak değerlendirmek için stokastik bir sonlu eleman yöntemi temelli yaklaşım geliştirilmişlerdir. Simülasyonlar Autoform kullanılarak AUDI A4 modeli bagaj kapağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. AUDI A4 bagaj kapısında, Şekil 2'de görüldüğü gibi toplam 22 QC ortaya çıkmıştır [19].




**Şekil 5.5.** Parça üzerindeki kritik kalite bölgeleri [17].

Şekillendirme limit diyagramı (FLD), öncelikle Keeler tarafından önerilen ve tanıtılan malzemelerin soğuk şekillendirme özelliklerinin araştırılması için sac metal şekillendirilebilirliğinin bir ölçüsüdür [20]. Djavanroodi ve arkadaşları (2019), çalışmalarında şekillendirme limit diyagramını incelemek için endüstriyel uygulamalarda kullanılan ve iyi bilinen alüminyum ve titanyum alaşımının şekillendirilebilirliği deneysel, sayısal ve teorik yaklaşımlar kullanılarak araştırılmışlardır. Bu bağlamda, 0.78 mm kalınlığında AA7075 ve 1.08 mm kalınlığında Ti-6Al-4V iki farklı malzeme şekillendirme limit diyagramı konsepti ile incelenmişler. Hem AA7075-T6 hem de Ti-6Al-4V materyalleri üzerinde, çekme ve şişirme testlerinin uygulanmışlardır. Çekme testleri, tabakanın haddeleme yönüne göre 0°, 45° ve 90° 'de gerçekleştirilmiştir. Çeşitli sayısal yaklaşımlar arasında sonlu eleman modellemesi hem alüminyum hem de titanyum levhaların şekillendirme limit diyagramını simüle etmek için yarı statik sac metal şekillendirme işlemleri için açık bir zaman-entegrasyon dinamik çözücü özelliğine sahip ticari AUTOFORM 4.4 ™ yazılımı kullanmışlardır. Djavanroodi ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmalar sonrasında aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir [21].

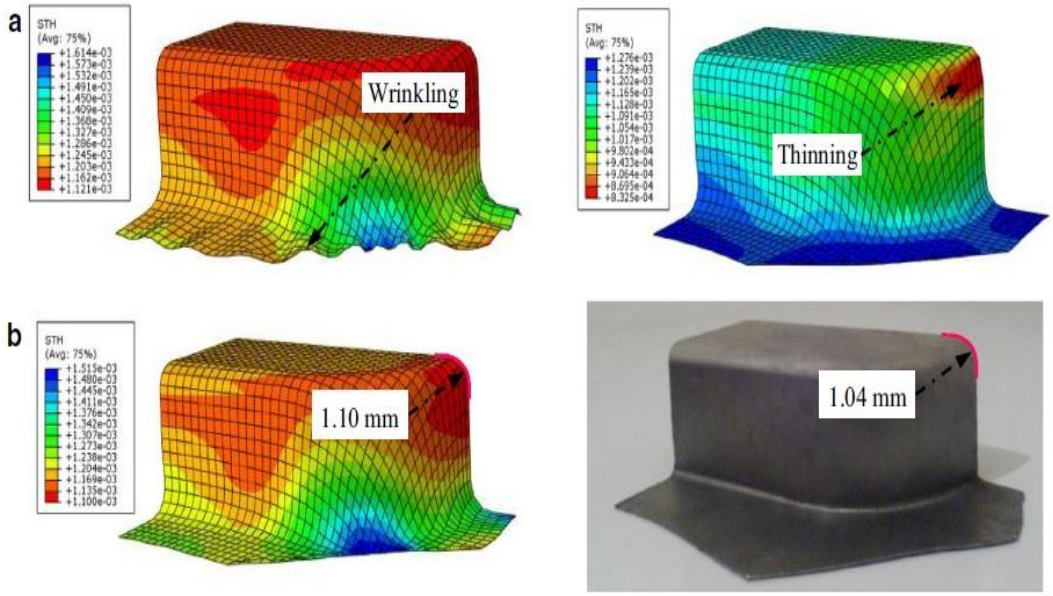
- Titanyum alaşımının ortalama pekleşme üsteli alüminyumunkinden daha yüksektir. Bu nedenle, titanyum alaşımı germe potansiyeli alüminyum muadilinden çok daha fazladır.
- AA7075'in ortalama anizotropi faktörü, Ti-6Al 4V'den yaklaşık beş kat daha düşüktür, bu da sac metal şekillendirme işlemleri sırasında incelme direncinin

azalmasına neden olur. Bu nedenle, alüminyum alaşımına kıyasla titanyum alaşımı inceltmeye karşı daha iyi direnç gösterir.

- Düzlem zorlanma bölgesindeki önemli gerilimin büyüklükleri, AA7075 ve Ti-6Al-4V için sırasıyla 0.104 ve 0.145'e eşittir. Ayrıca, titanyum ile karşılaştırıldığında alüminyum alaşımının şekillendirme limit diyagramı, daha düşük bir önemli gerilim değerine sahiptir. Bu nedenle, daha düşük pekleşme üsteli büyüklüğü, daha düşük sınır gerilme seviyesine yol açar [21].

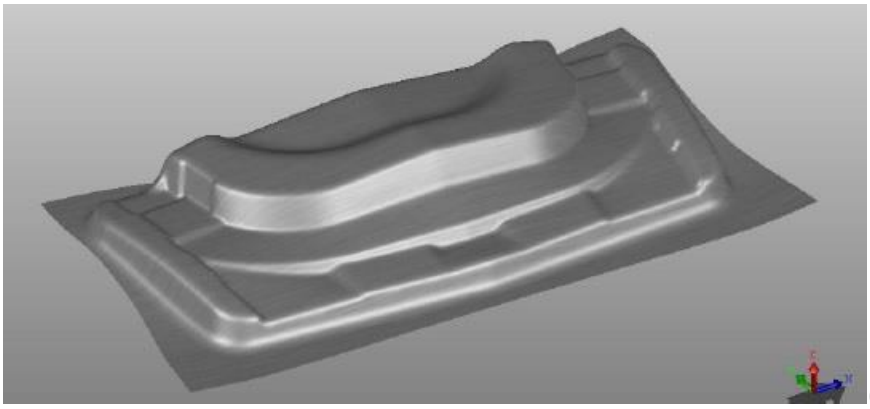
Derin çekme işleminde, hammadde malzemesi ve ölçüleri, pot çemberi kuvveti, sürtünme ve kalıbın geometrisi gibi çeşitli parametreler dikkatlice seçilmelidir. Bu parametrelerin deneysel, teorik veya sayısal yaklaşımlarda uygunsuz kullanımı, proses parçasında kararsızlıklara neden olabilir. Ghennai ve arkadaşları (2019), çalışmalarında DC04 sac metalin deformasyon davranışının tanımlanması ve modellenmesi ile ilgilenmişlerdir. DC04 sacının düzlem içi plastik anizotropisini ortaya çıkarmak için üç yönde tek eksenli çekme testleri yapmışlardır. Plastik anizotropinin, soğuk haddeleme ile elde edilen sac levha şekillendirmesinin mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bir DC04 sacının plastik davranışını analiz etmek için, tek eksenli çekme testleri ve derin çekme testi yapılır. DC04 sacının deformasyon davranışının FE modellemesi elde edilen deneysel verilere dayanılarak doğrulanmıştır. Testlerin doğrulaması, tanımlanan anizotropi parametrelerini Abaqus FE koduna entegre ederek gerçekleştirilmişlerdir. Elde edilen sonuçlar her yönde aynıdır. İncelme gibi plastik dengesizliklerden kaçınmak için, güvenli aralıkta yani buruşma olmadan, derin çekme parçasının optimum kalınlığı belirlenmelidir. Böyle bir arıza durumundan kaçınmak için FE simülasyonlarında, minimum kalınlığa karşılık gelen bir maksimum deformasyona ulaşmak amacı ile flanş bölgesinde pot çemberi kuvvetinin değişimi uygulanmıştır. 5 kN'lik bir sıkıştırma kuvveti uygulandığında ve basınç 74.7 kN'lik bir kuvvetle maksimuma yükseltildiğinde, su geçirmez muhafaza kabının flanş bölgelerinde kırışıklığa ratlanmış ve plastik kararsızlık inceltme görünümü dişi çevresinde gözlemlenmiştir (Şekil 5.6 a). Zayıf bölgedeki yüksüz eleman yüzdesinin hızla artması sonucunda, uygulanan tüm deformasyon nispeten küçük bir alanda lokalize olur. Kırışma veya incelme olmadan en düşük ve en yüksek sıkıştırma kuvveti arasında, bir güvenlik aralığı tespit edilmiştir.

Bu nedenle, pot çemberi kuvvetin seçilen değeri, arttırılmış deformasyon bölgesinde 15 kN'dir ve karşılık gelen istenen optimum kalınlık 1.10 mm'dir (Şekil 5.6 b) [22].

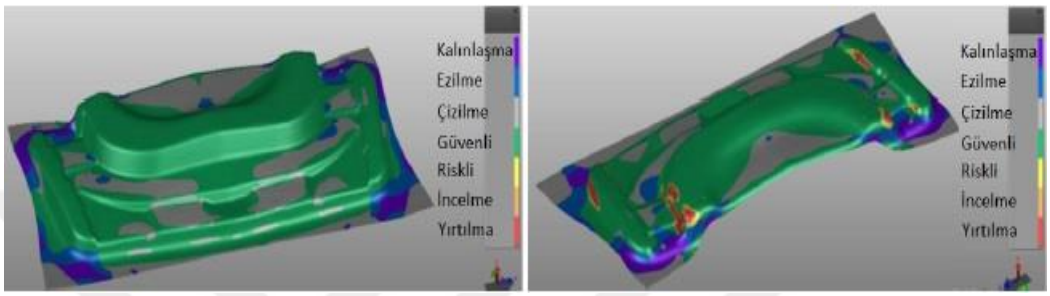



**Şekil 5.6.** a) Hatalı analiz verileri (kırışıklık ve incelme) b) Güvenli durumda (optimize edilmiş ve gerçek uygulama) gösterimi [22].

Özdemir ve arkadaşları (2017), çalışmalarında otomotiv endüstrisinde kullanılan altı farklı malzemenin şekilldendirilebilirliğini incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak derin çekme prosesin de analizler yapmışlardır. Her bir malzeme için ayrı ayrı elde edilen şekillendirme limit diyagramları aracılığıyla her malzemenin şekillendirilebilirliklerini mukayese edilmiş ve deformasyon hataları değerlendirilmiştir. Analizi yapılan malzemeler : HX220YD, DX54D, DX52D, S500MC, HCT600X, HX340LAD 1,5 mm kalınlığında ve zorlayıcı bir geometride (Şekil 5.7) olan otomotiv parçalarıdır. Sonuç olarak Titanyum, Niyobyum, Vanadyumun varlığı ortalama tane boyutuna küçültücü etkisinden dolayı malzemenin akma ve çekme mukavemetlerini arttırtığı ve şekillenebilirliğini olumsuz yönde etkiledikleri gözlemlenmiştir. Birim uzamanın şekil vermeye olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Alüminyumun varlığı, esnekliği artırdığından dolayı şekillendirmeye olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir [23].



(a)




(b) (c)

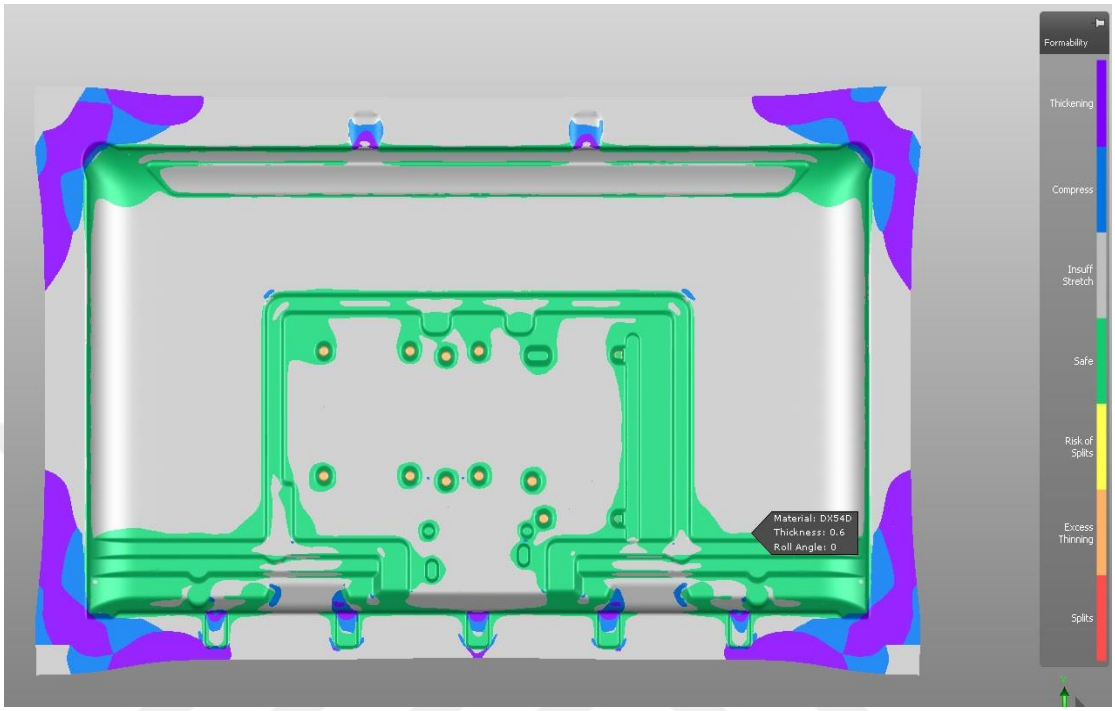
**Şekil 5.7.** a) Otomotiv parçası geometrisi b) DX54D malzemenin ve c) S500MC şekillendirilebirlik analizlerinin gösterimi [23].

Bu tez çalışmasının nihai ürünü olacak Vestel DLED televizyonların arka paneli tasarımı Vestel Mekanik Ar-Ge grubu tarafından tasarlanmıştır. Tasarlanan parçanın kalıplarının yapılması için Metalsan firmasıyla anlaşılmıştır. Yeni tasarlanan parçanın 3 boyutlu datasının fizibilite çalışmaları literatürde taranan bilgiler ışığında gerçekleştirilmiştir.

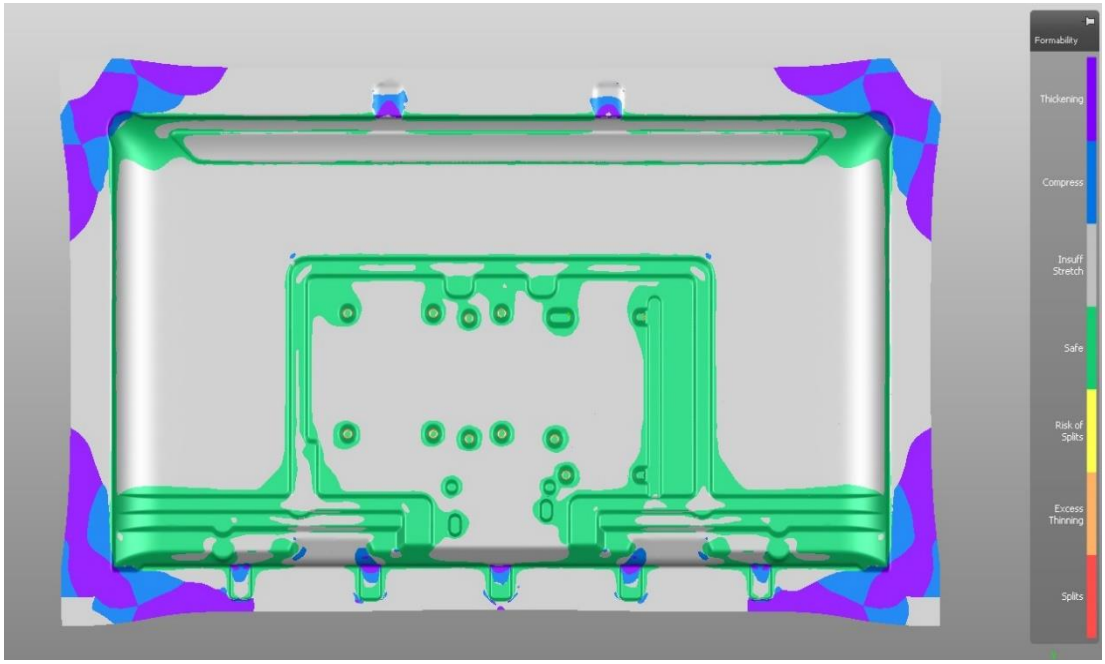
Tahmin oranı %99' larda olduğu kabul edilen Autoform R7 ticari kodlu sonlu eleman yazılımıyla yapılan ilk fizibilite çalışmalarında daha önce belirtildiği üzere Şekil 4.10. ve 4.11.' de verilen malzeme özelliklerine göre analiz çalışmaları yapılmıştır. Malzeme dataları, Autoform içerisinde bulunan daha önceki araştırmalar sonucunda ortaya çıkan Avrupa standartlarına göre hazırlanmış soğuk şekillendirmeye uygun kütüphaneden alınmıştır.

Yapılan ilk analiz çalışmaları, süzdürme çubuğu olmadan gerçekleştirilmiştir. DX54D+Z ve DX56D+Z malzemeler için sırasıyla Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.' da gösterilen şekillendirilebilirlik verileri toplanmıştır. Aşağıdaki veriler ve bu tez

çalışması sırasında edinilen literatür bilgileri göz önünde bulundurulduğun da, süzdürme çubuğu olmadan yapılacak bir derin çekme prosesinin çıktısında yetersiz gerilmeden kaynaklı kalitesiz yüzeyler oluşacağı tecrübe edilmiştir [3, 5, 6, 7].

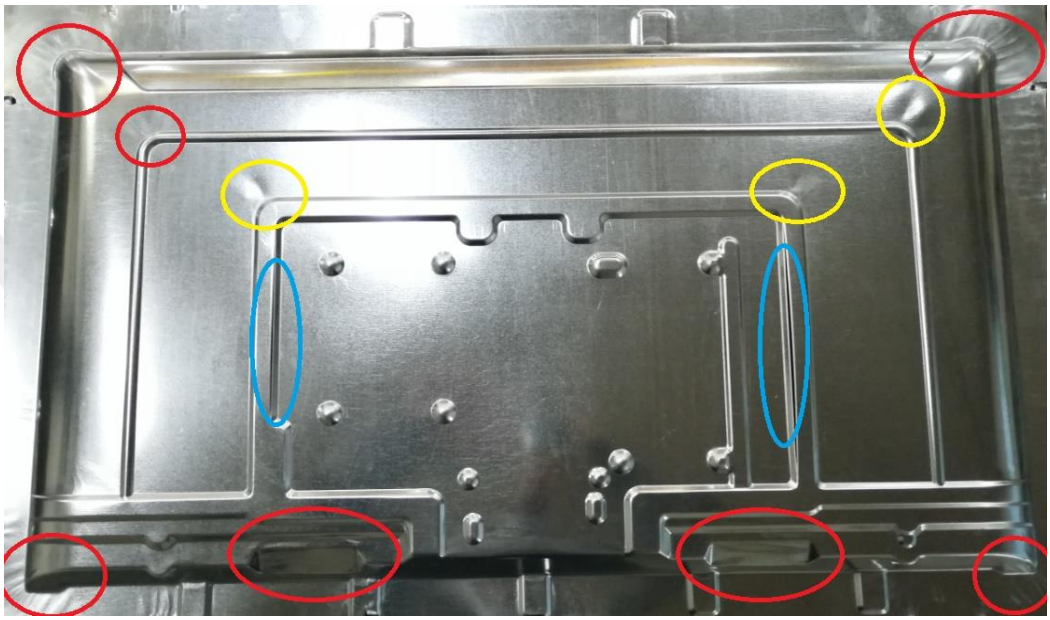



**Şekil 5.8**. AutoForm süzdürme çubuksuz şekillendirilebilirlik analizi. (DX54D+Z).



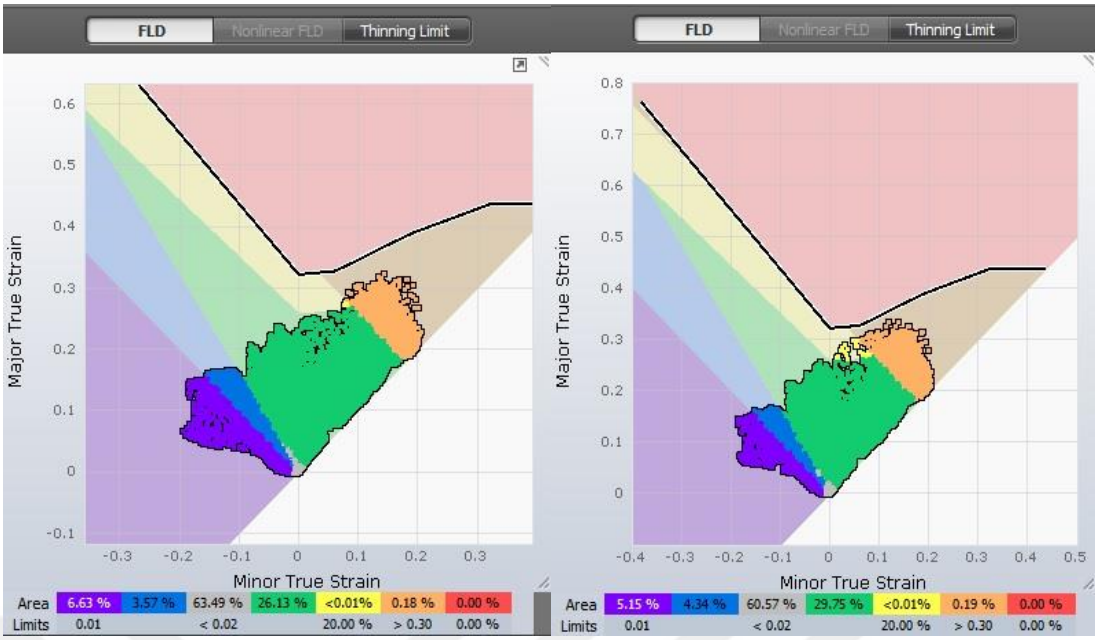

**Şekil 5.9**. AutoForm süzdürme çubuksuz şekillendirilebilirlik analizi. (DX56D+Z).

Süzdürme çubuğu olmadan yapılan kalıp denemelerinde Şekil 5.10' da görseli verilen DX54D+Z malzeme için sac şekillendirme sırasında en çok karşılaşılan sorunlar gözlemlenmiş ve analiz sonuçları gerçek veriler ile desteklenmiştir. Şekil 5.10' da kırmızı ile belirtilen bölgelerde kırışıklıklar ve katlanmalar meydana gelmiştir. Sarı ile belirtilen bölgelerde çöküntüler meydana gelmiştir. Hatta mavi ile belirtilen bölgede yırtılmalar görülmüştür.



**Şekil 5.10**. Süzdürme çubuksuz derin çekme kalıp çıktısında karşılaşılan sorunlar. (DX54D+Z).

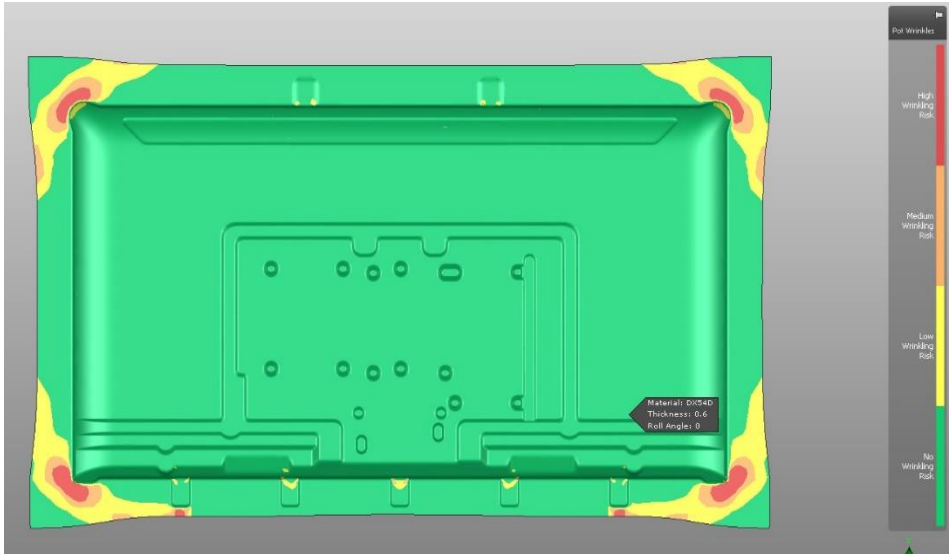
Literatür' den edinilen bilgilerden, pot çemberi kuvveti şekillendirilebilirliği arttırdığı bilinmektedir. Bu bilgi ışığında iki ayrı pot çemberi kuvveti uygulayarak analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.11 FLD' de DX54D+Z malzeme için sırasıyla (a) 630 kN ve (b) 800 kN' luk pot çemberi etkileri karşılaştırılmış ve sadece yaklaşık %3 kadarlık bölge güvenli alana geçmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere pot çemberi kuvveti etkisinin, büyük parçaların derin çekme prosesinde tek başına çok fazla bir etkisi olmadığını göstemektedir [3-6,8]. Bu analizler ışığında derin çekme kalıplarında süzdürme çubuğu kullanımının kaçınılmazlığı desteklenmiştir.




(a) (b)

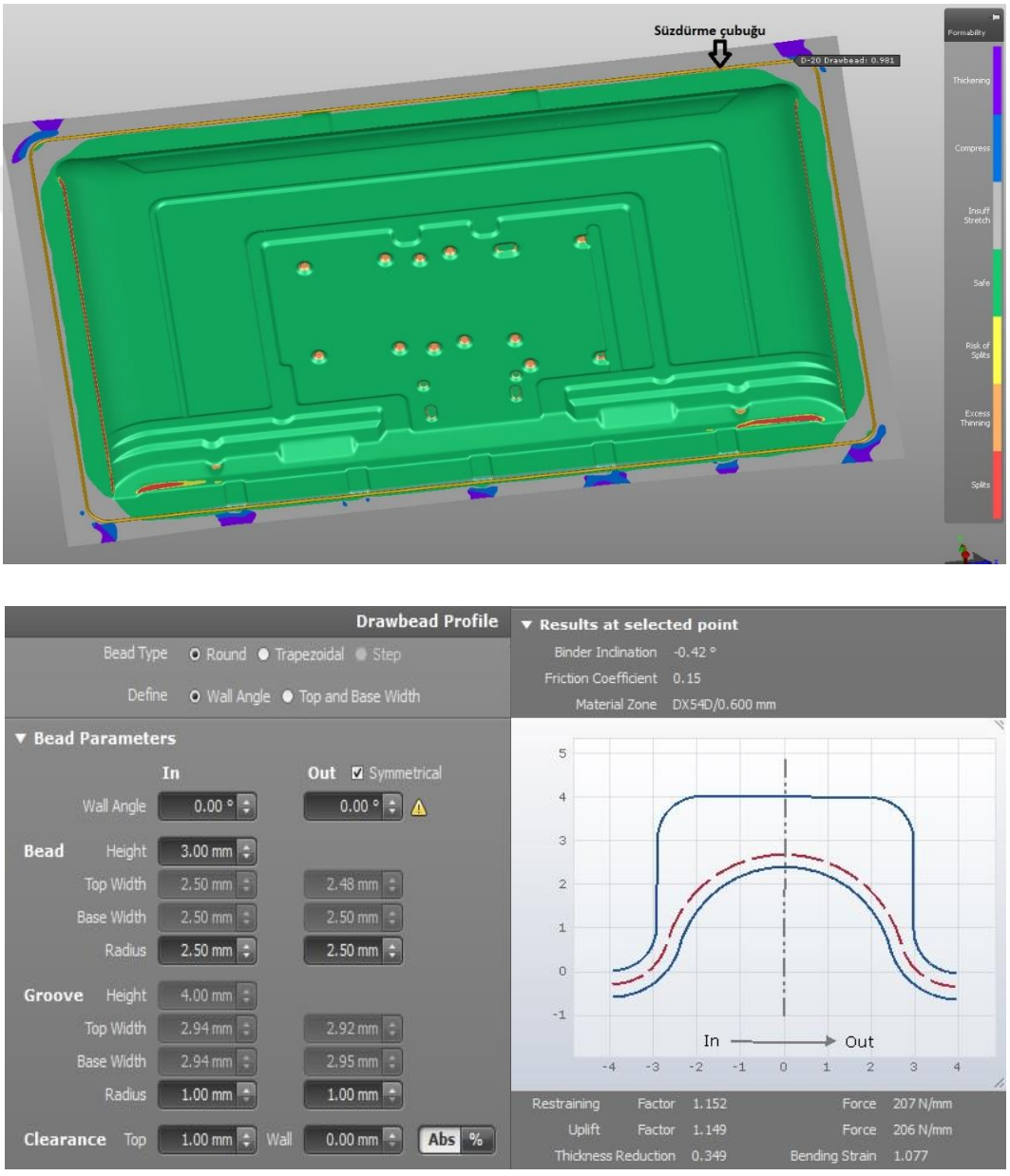
**Şekil 5.11.** Farklı pot çemberi kuvveti değerleriyle oluşturulan FLD: (a) 630 kN ve (b) 800 kN.

Süzdürme çubuğu olmadan gerçekleştirilen bir derin çekme prosesinin yetersiz kalite de kalıp çıktısı alınacağının bir diğer göstergesi de kırışıklık analizidir. DX54D+Z ve DX56D+Z malzemeler için ayrı ayrı kırışıklık analizi yapılmıştır ama çekme çubuğunun gergi kuvveti etkisi olmadığı için ikiside birbirine çok yakın veriler vermiştir. DX54D+Z için alınan kırışıklık verileri Şekil 5.12'de paylaşılmıştır.



**Şekil 5.12**. AutoForm kırışıklık analizi.

Süzdürme çubuğu olmadan yapılan analiz sonrası elde edilen olumsuz verilerden dolayı çalışmamıza Autoform içerisinde kolayca modelleyebileceğimiz süzdürme çubuğu sekmesinden kalıp dişi ve pot çemberi yüzeylerine süzdürme çubuğu datası eklenmiştir. Süzdürme çubuğu tipi olarak dairesel yuvarlak süzdürme çubukları kullanılmıştır (Şekil 5.13). Bu tip süzdürme çubuğu derin çekme kalıplarında en çok tercih edilen ve literatürde de gözlemlendiği üzere optimum sonuçlar alınan süzdürme çubuğu tipidir [3,6].




**Şekil 5.13.** Uygulanan süzdürme çubuğu datası.

Şekil 5.13‘ de gösterilen süzdürme çubuğu datası kalıp yüzeylerine işlendikten sonra soğuk şekillendirme de çok sık kullanılan 5 farklı malzeme kalitesinde şekilldendirilebilirliğini incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak derin çekme prosesin de analizler yapmışlardır. Yapılan bu simülasyon çalışmalarından elde edilen şekillendirilebilirlik limit diyagramları aracılığıyla her malzemenin şekillendirilebilirlikleri mukayese edilmiş ve deformasyon hataları değerlendirilmiştir.

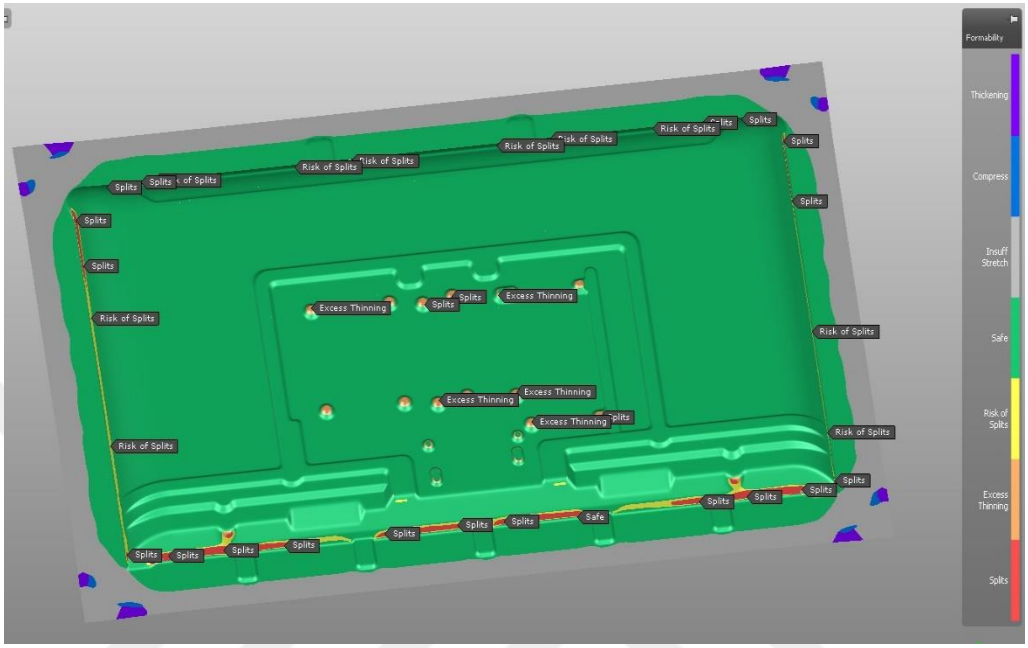
Analizler sonrası elde edilen şekillendirilebilirlik verileri Tablo 5.1 ‘de her bir malzeme kalitesi için verilmiştir. Bu verilere dayanarak, tez çalışmasında amaçlanan malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 5.1.** Malzeme Çeşidine Göre Şekillendirilebilirlik Verilerinin Karşılaştırması

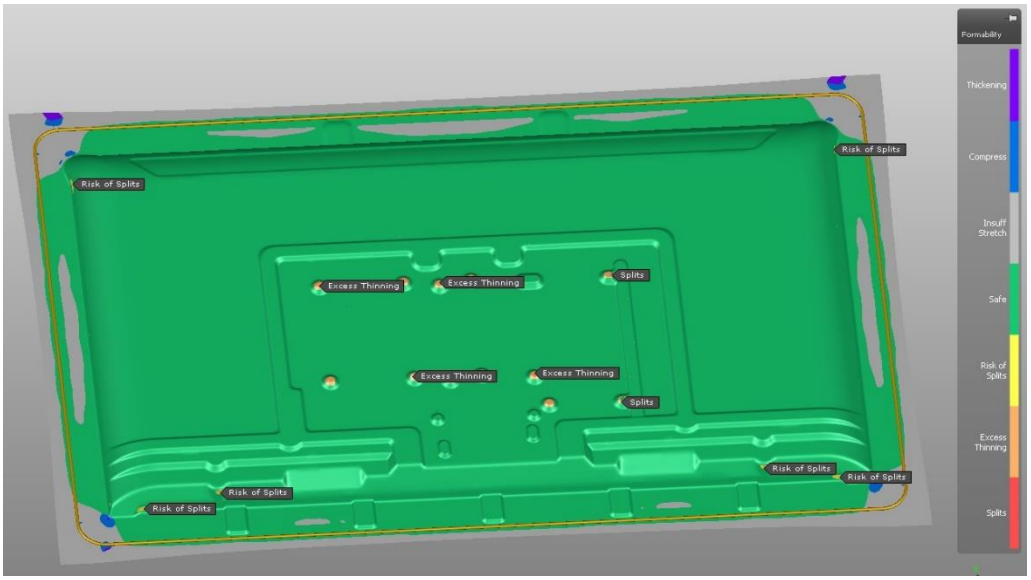
| Malzeme Çeşidi | Şekillendirme Limit diyagramı (FLD)’na göre (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kalınlaşma | Ezilme | Yetersiz Gerilme | Güvenli | Riskli | Aşırı İncelme | Yırtılma |
| HX220YD+Z | 0,57 | 0,34 | 15,57 | 78,68 | 0 | 2,39 | 2,45 |
| DX52D+Z | 0,69 | 0,31 | 20,04 | 74,13 | 1,26 | 0,31 | 3,26 |
| DX53D+Z | 0,60 | 0,35 | 14,62 | 80,44 | 1,18 | 0,35 | 2,47 |
| DX54D+Z | 0,37 | 0,24 | 14,30 | 81,94 | 1,53 | 0,37 | 1,23 |
| DX56D+Z | 0,07 | 0,19 | 10,55 | 88,84 | 0,08 | 0,27 | 0,01 |

Tablo 5.1’ de ki verilere dayanarak DX56D+Z malzemenin %88,84 alanı forma tam uyumlu olarak şekillenirken, sadece %0,07 alanında kalınlaşma, %0,19 alanın da ezilme ve %0,01 alanın da yırtılma meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra sadece %0,08 alanın da yırtılma riski tespit edilmiştir. DX56D+Z malzemeye en yakın olumlu sonuçlar, DX54D+Z malzemenin simülayon çalışmalarında elde edilmiştir. Buna rağmen tespit edilen %1,23 alanın da ki yırtılma problemi yapılan simülasyon çalışmalarında parçanın dişi radyüsü hattı boyunca (Şekil 5.14) görülmüştür. Analizi yapılan malzemeler içerisinde şekillendirme kabiliyeti açısından parça geometrisine en uygun malzeme olarak DX56D+Z malzemesi (Şekil 5.15) belirlenmiştir. Yapılan analiz çalışmaları sonucunda ortaya çıkan Tablo 5.1 ve Tablo 4.2 malzemelerin mekanik özellikleri ile bir ilişki kurulduğu zaman, akma ve çekme dayanımlarını

yüksek olan malzemelerin, soğuk şekillendirilebilirliğinin düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca normal anizotropi katsayısı yüksek olan malzemenin daha az incelmeye maruz kaldığıda kanıtlanmıştır.




**Şekil 5.14.** AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX54D+Z).

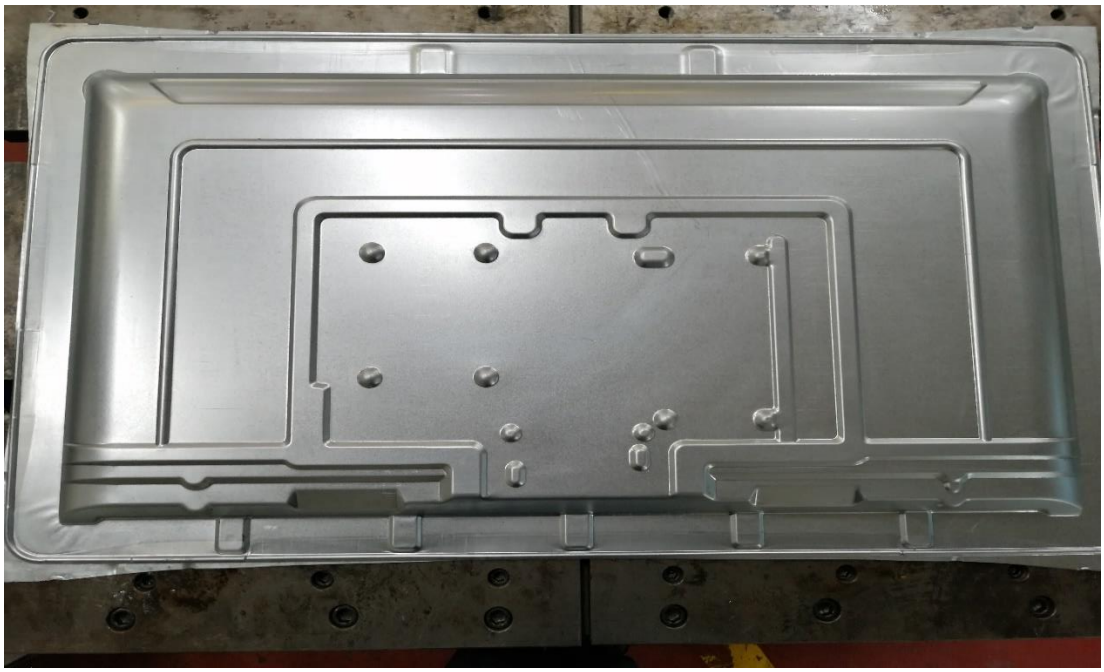



**Şekil 5.15.** AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX56D+Z).

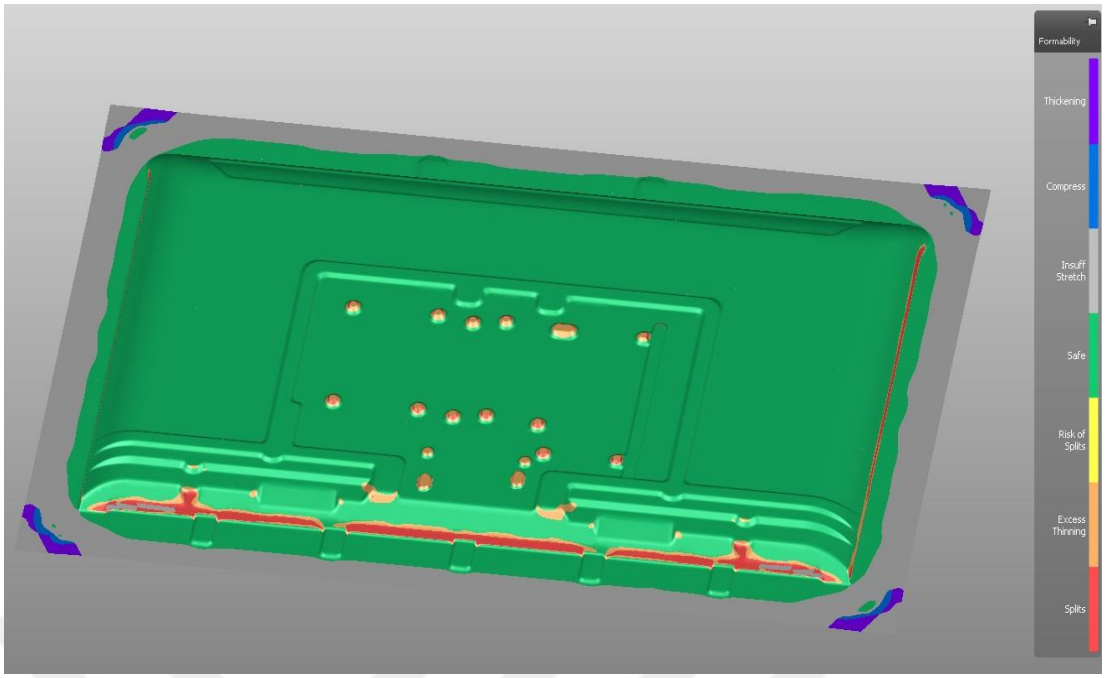
DX54D+Z kalite sac malzeme, gerçek kalıp çalışma ortamı analiz edildiğinde Şekil 5.16’ da gösterilen bölgelerinde yırtılma problemi meydana gelmiş ve analiz

sonuçlarını kalıp çıktısı verileriyle doğrulanmıştır. Ayrıca Şekil 5.17' de de olumlu sonuç alınan DX56D+Z malzemeye ait gerçek kalıp çıktısı görülebilir.

**Şekil 5.16.** Süzdürme çubuklu derin çekme kalıp çıktısında karşılaşılan yırtılmalar. (DX54D+Z).

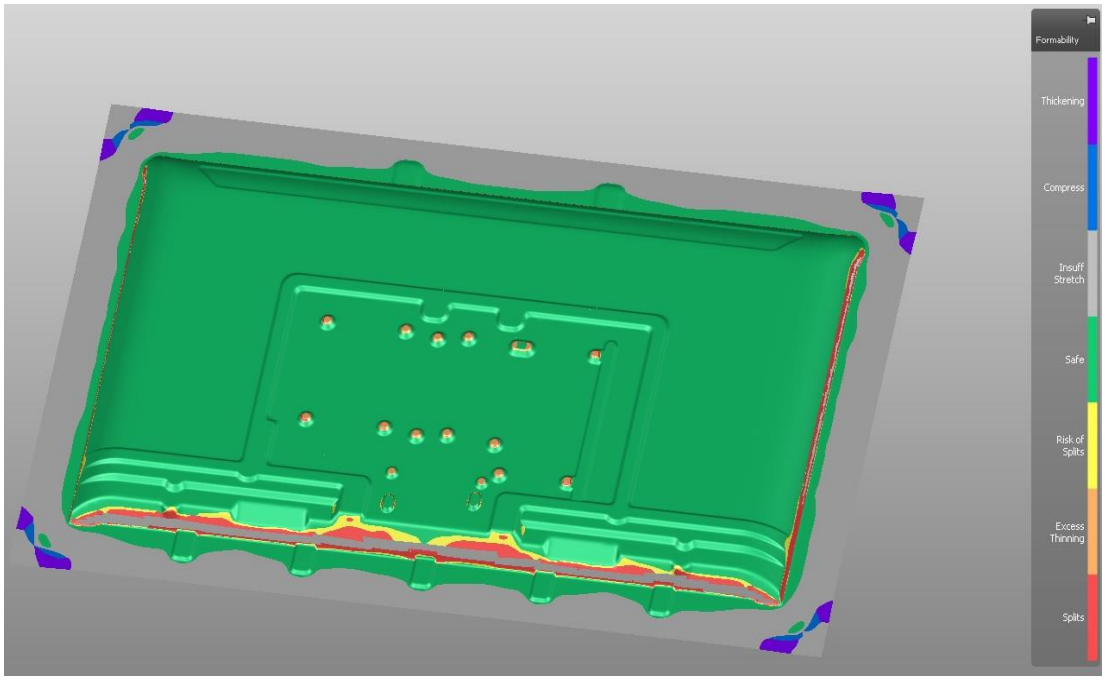


**Şekil 5.17.** Derin çekme prosesi hatasız kalıp çıktısı (DX56D+Z).



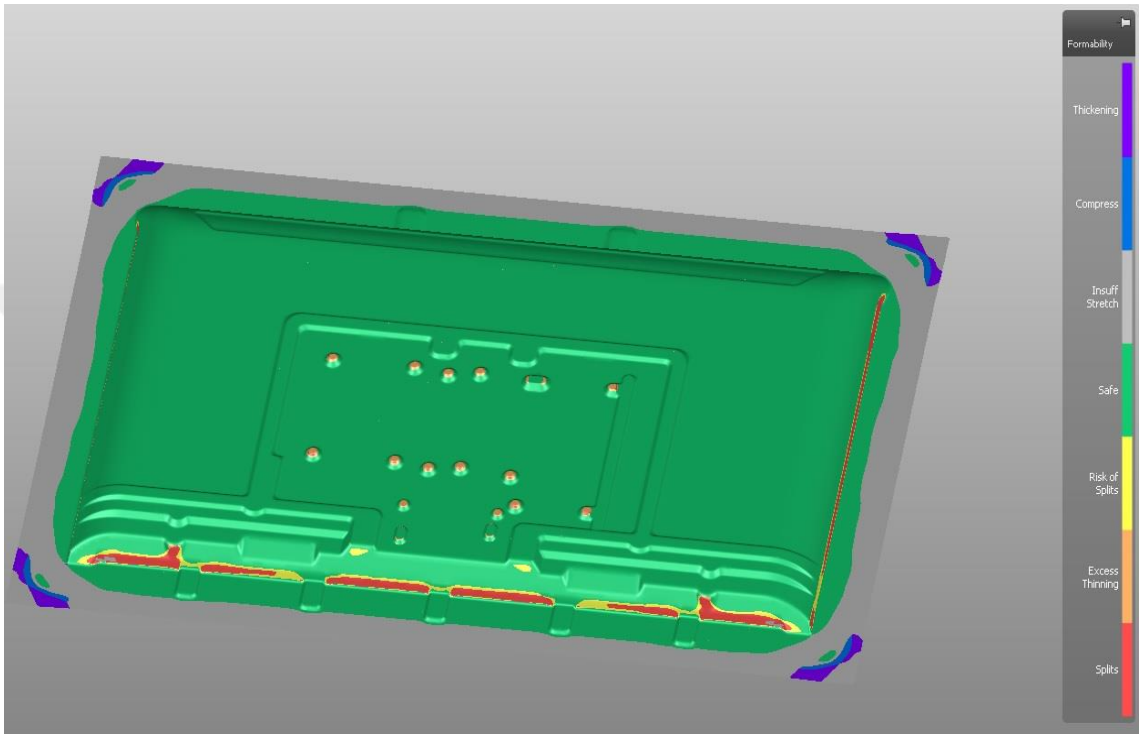

**Şekil 5.18.** AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (HX220YD+Z).

HX220YD+Z malzemesinin şekillendirilebilirlik analizi sonuçlarının (Şekil 5.18) %15,57 alanın da yetersiz gerilme, %2,39 alanın da aşırı incelme ve %2,45 alanın da ise yırtılma gibi istenmeyen şekillendirme kusurları gözlemlendiği için HX220YD+Z malzeme simülasyon testinden başarısız sonuç almıştır.




**Şekil 5.19.** AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX52D+Z).

DX52D+Z malzemesinin şekillendirilebilirlik analizi sonuçlarının (Şekil 5.19) %20,04 alanın da yetersiz gerilme, %0,31 alanın da aşırı incelme ve %3,26 alanın da ise yırtılma gibi istenmeyen şekillendirme kusurları gözlemlendiği için DX52D+Z malzeme simülasyon testinden başarısız sonuç almıştır. Ayrıca %1,26 alanın da yırtılma riski tespit edilmiştir.

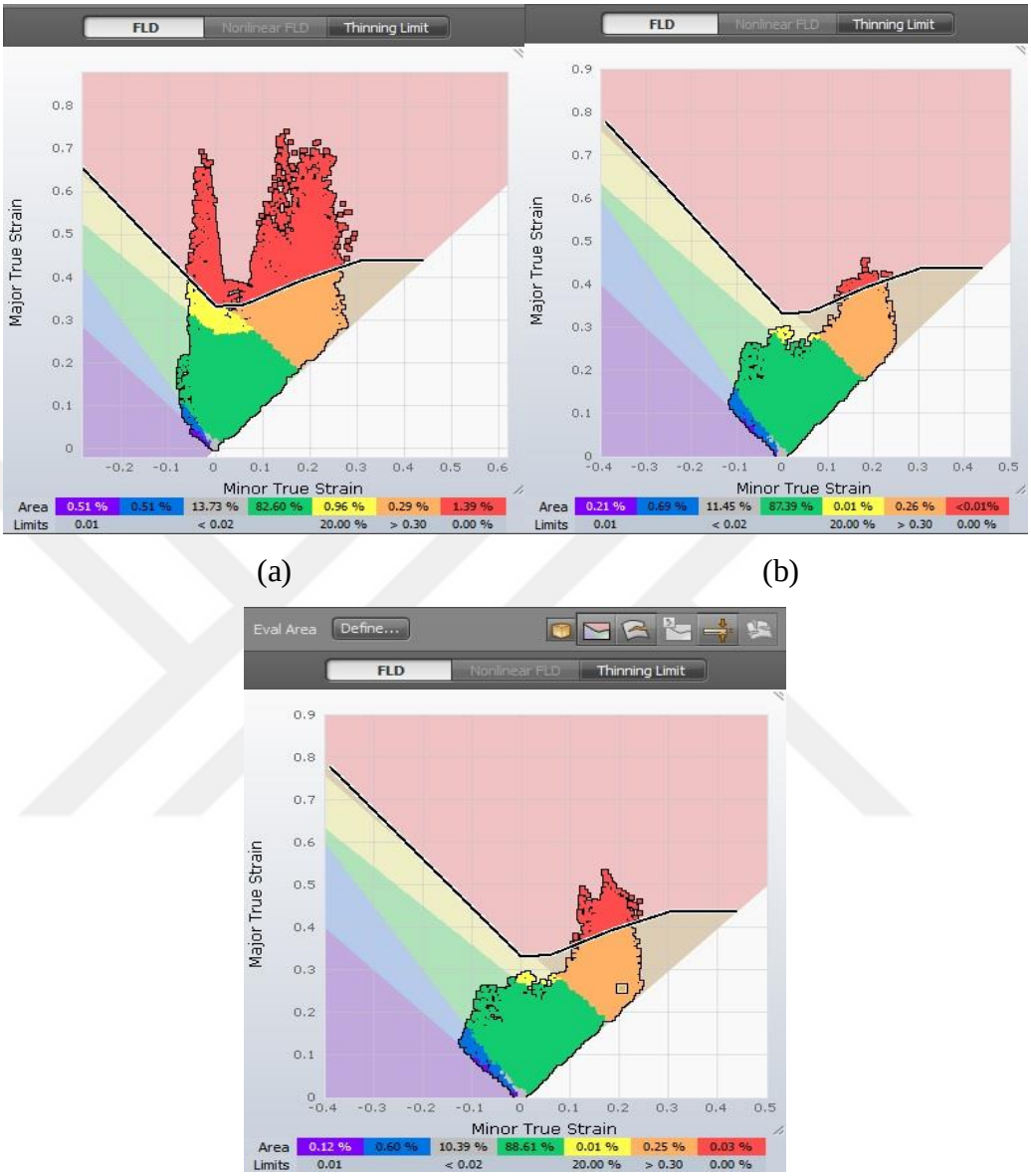



**Şekil 5.20.** AutoForm şekillendirilebilirlik analizi. (DX53D+Z).

DX53D+Z malzemesinin şekillendirilebilirlik analizi sonuçlarının (Şekil 5.20) %14,62 alanın da yetersiz gerilme, %0,35 alanın da aşırı incelme ve %2,47 alanın da ise yırtılma gibi istenmeyen şekillendirme kusurları gözlemlendiği için DX53D+Z malzeme simülasyon testinden başarısız sonuç almıştır. Ayrıca %1,18 alanın da yırtılma riski tespit edilmiştir.

Şekillendirme kabiliyeti açısından parça geometrisine en uygun malzeme belirlendikten sonra yapılması gereken bir diğer çalışma ise süzdürme çubuklarının konumu ve geometrisi değiştirilerek, proses çıktısı üzerinde ki gergi kuvveti ve pot çemberi baskı kuvvetinin etkilerini optimize etmektir. Bu doğrultuda DX56D+Z malzemesi için iki farklı analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.21' de süzdürme çubuğu konumuna göre, üç farklı konumda şekillendirilebilirlik verileri, Tablo 5.2' de

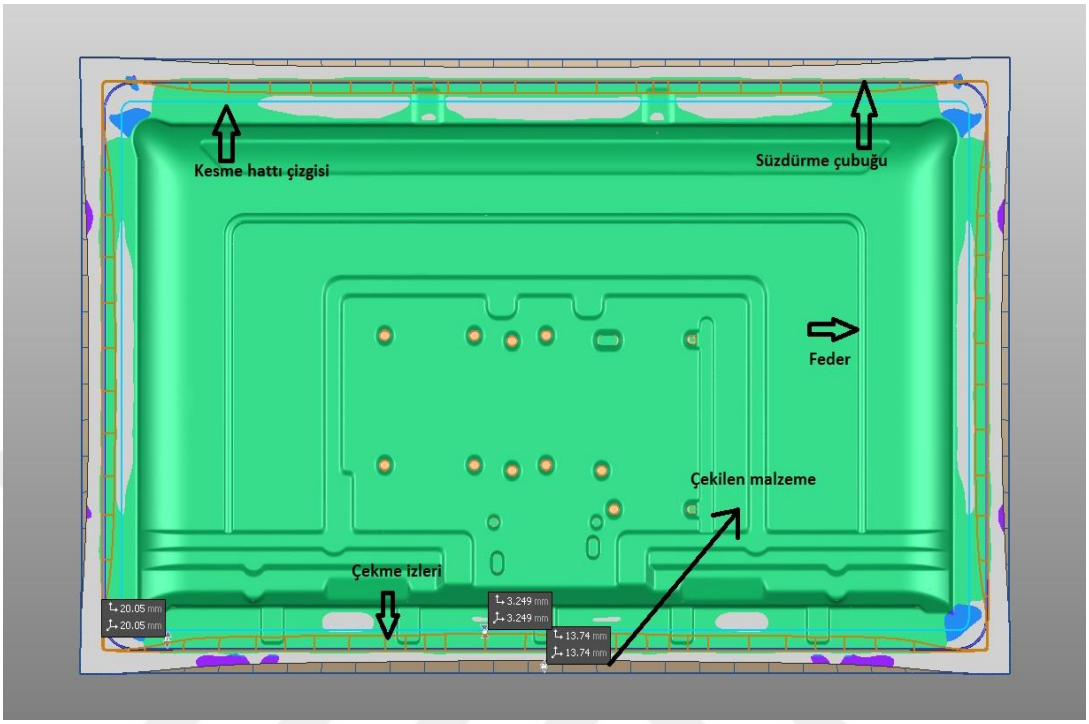
süzdürme çubuğu geometrisine göre, beş farklı parametreler de şekillendirilebilirlik verileri paylaşılmıştır.




**Şekil 5.21.** Süzdürme Çubuğu Konumuna Göre Şekillendirilebilirlik Verileri (a) Kesme hattından 15 mm (b) 20 mm (c) 25 mm ötelenmiş FLD.

Şekil 5.21' de ki verilere dayanarak DX56D+Z malzemenin kesme hattından 15 mm ötelenmiş halinde %82,60 alanı forma tam uyumlu olarak şekillenmesine rağmen %1,39 alanın da şekillendirme sınır eğrisinin üzerinde yırtılma, %0,29 alanın da incelme ve %0,96 alanın da ise yırtılma riski meydana gelmiştir. DX56D+Z malzemenin kesme hattı çizgisinden (Şekil 5.21) 20 mm ve 25 mm ötelenmiş

hallerinde ise birbirine çok yakın değerler elde edilmiş ve süzdürme çubuğunun optimum bu aralıklarda olması gerektiği tespit edilmiştir.




**Şekil 5.22.** Kesme Hattı Çizgisinin ve Diğer Parametrelerin Gösterimi

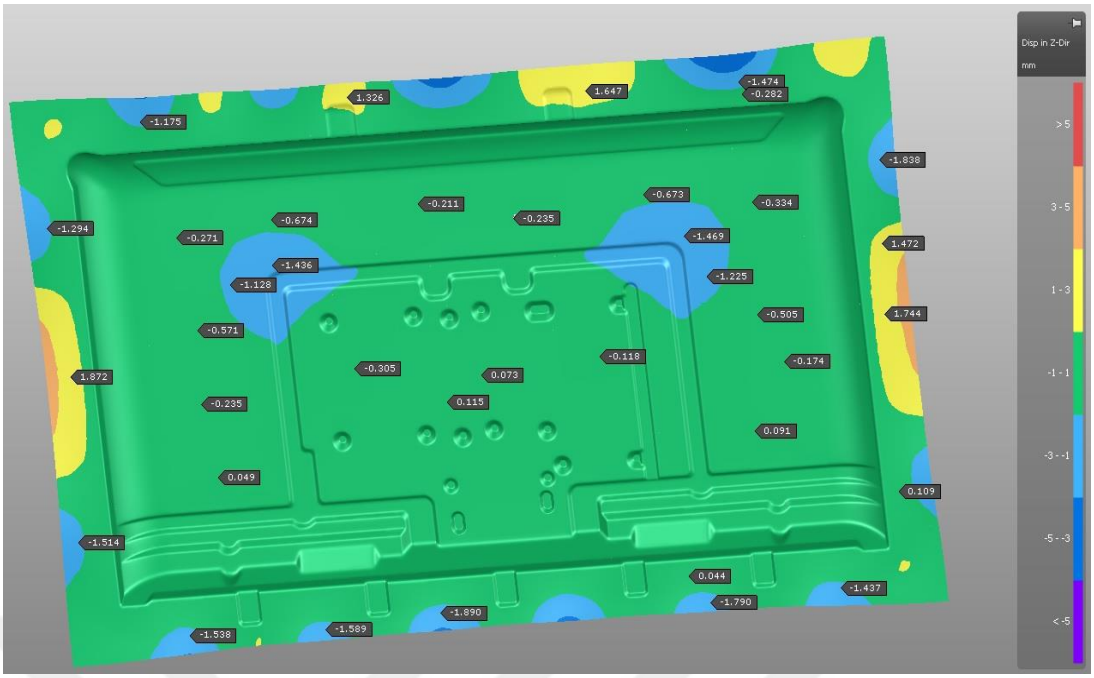
Şekil 5.22' da kesme hattı çizgisi, süzdürme çubuğu konumu, süzdürme çubuğu gergi kuvveti ve sürtünme kuvveti nedeniyle oluşan çekme izleri, çekilen malzeme miktarı ve kesme hattı çizgisi ile çekme izlerinin bitiş noktası arasında ki mesafe belirtilmektedir. Ayrıca parça ortasında oluşan sehimi optimize etmek için uygulanan feder form yapısıda gösterilmektedir.

**Tablo 5.2.** Süzdürme Çubuğu Geometrisi Parametrelerine Göre Şekillendirilebilirlik Verilerinin Karşılaştırması

| Süzdürme Çubuğu Geometrisi | Şekillendirme Limit diyagramı (FLD)'na göre (%) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Kalınlaşma | Ezilme | Yetersiz Gerilme | Güvenli | Riskli | Aşırı İncelme | Yırtılma |
| R2,5/Y3 mm | 0,12 | 0,19 | 10,55 | 88,79 | 0,08 | 0,27 | 0,01 |
| R2,5/Y4 mm | 0,87 | 0,40 | 8,91 | 88,70 | 0,44 | 0,32 | 0,35 |
| R2,5/Y5 mm | 1,38 | 0,36 | 11,04 | 83,83 | 1,38 | 0,34 | 1,68 |
| R3/Y4 mm | 0,62 | 0,47 | 8,52 | 89,61 | 0,32 | 0,31 | 0,13 |
| R3/Y5 mm | 1,29 | 0,37 | 8,43 | 87,69 | 0,99 | 0,28 | 0,96 |

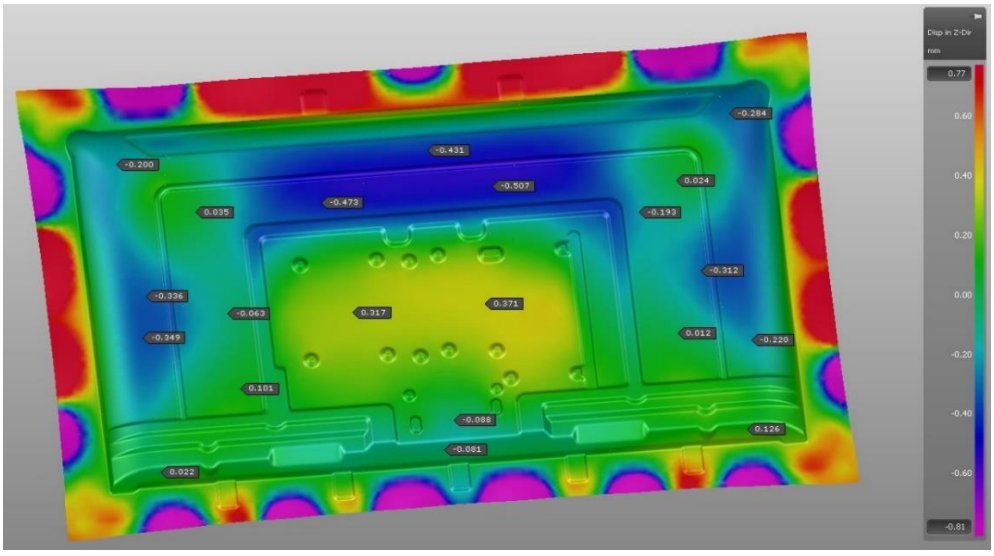
Tablo 5.2' de verilen şekillendirilebilirlik verilerinden anlaşılacağı üzere süzdürme çubuğunu geometrisinde yükseklik parametresinin etkisi radyus parametresinin etkisinden daha fazladır. Süzdürme çubuğu yüksekliği arttıkça süzdürme çubuğunun gergi kuvvetinin artmasından dolayı yırtılma, incelme ve riskli alanların arttığı gözlenmenmiştir [6]. Sonuç olarak analizi yapılan süzdürme çubuğu parametreleri arasında optimum sonuç radyus 2,5 mm ve yükseklik 3 mm iken alınmıştır.

Yapılan simülasyon çalışmaları sonrası yırtılma, incelme, kırışıklık gibi parametlerinin analiz sonuçlarından olumlu sonuç alan DX56D+Z sac metal malzeme için optimum süzdürme çubuğu konumu ve geometriside bulunduktan sonra yapılması gereken bir diğer analiz çalışması ise geri yaylanma parametresi üzerine olmuştur. Geri yaylanma üzerine yapılan simülasyon çalışmalarının analiz sonuçları Şekil 5.23'de verilmiştir.



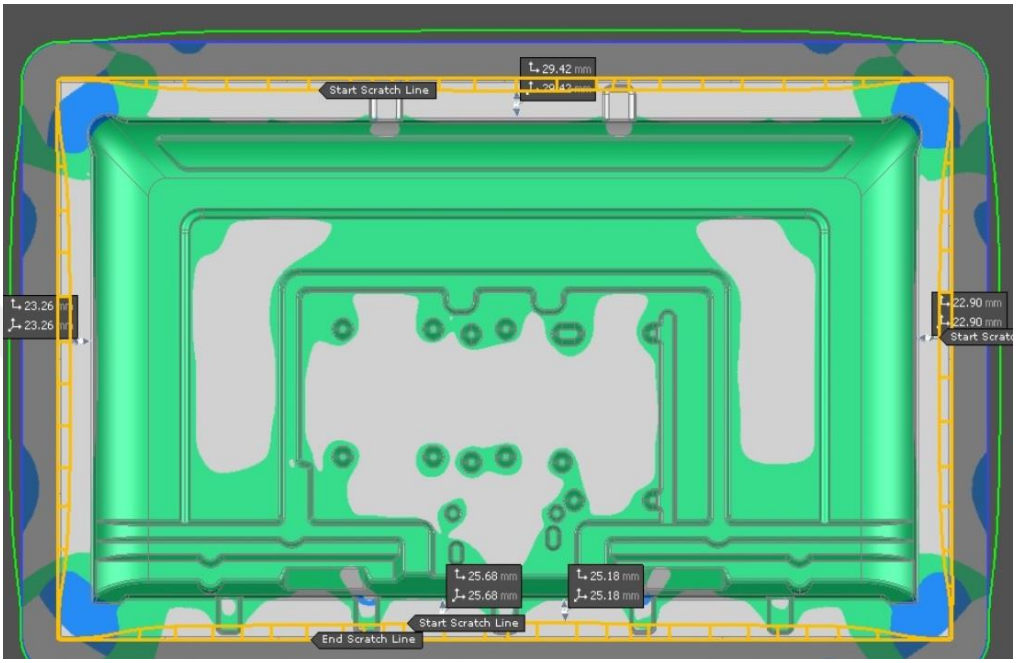

**Şekil 5.23.** Z ekseninde yer değiştirme. (DX56D+Z).

Şekil 5.23’ de ki analiz verilerinden parçanın ortasında teknik resimde belirtilen düzlemselliği aşan ve Z ekseninde -1,5 mm’ ye kadar çıkan deplasman miktarı saptanmıştır. Bu olumsuz durumu düzeltmek için parçanın ortasında sehim oluşan düz kısıma oradaki gerdirmeyi arttırması ve parçanın orta kısmını mukavemetlendirmesi için feder (Şekil 5.19) diye tabir edilen form yapısı eklemesine karar verilmiştir. Parça üzerinde yapılan bu modifikasyon sayesinde Z ekseni yönünde ki deplasman miktarı -1,5 mm’ den - 0.567 mm’ ye düşürmüştür (Şekil 5.24).




**Şekil 5.24.** Z ekseninde yer değiştirme (DX56D+Z).

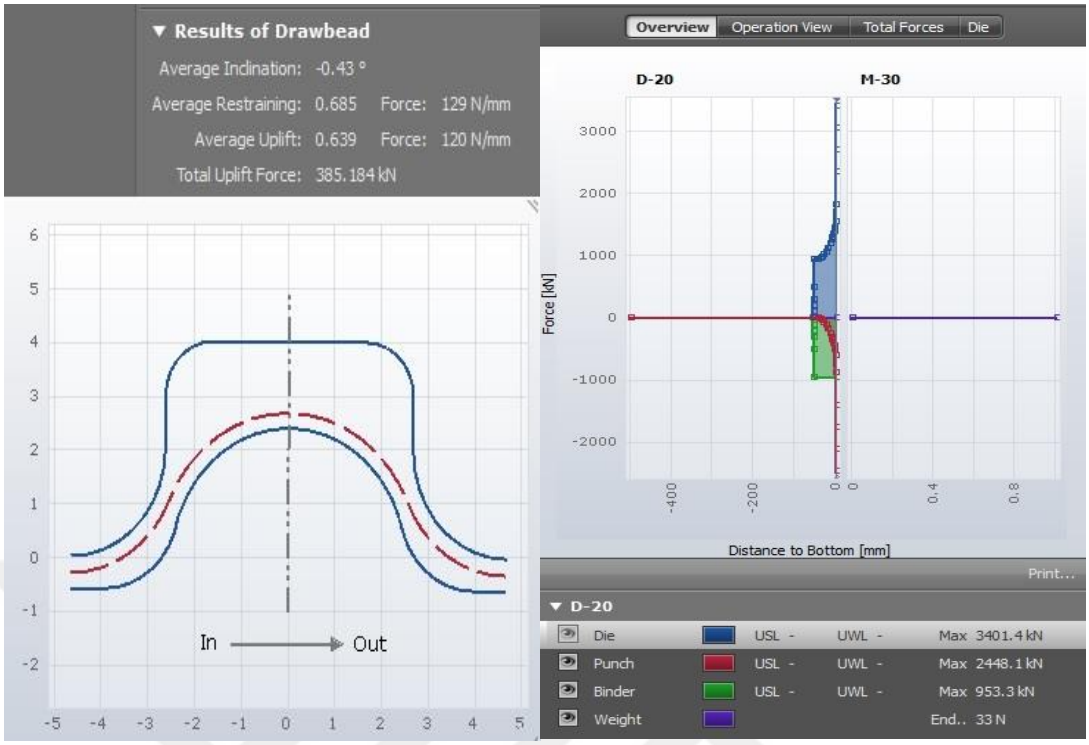
Televizyon arka paneli gibi estetik ve görsel olan parçaların derin çekme kalıplarında aşılması gereken bir başka zorluk ise çekme çizgileridir (Şekil 5.25). Yapılan analiz sonuçları ve kalıp denemesi çıktıları karşılaştırdığında 2-3 mm'lik farklar olduğu gözlemlenmesine rağmen (Şekil 5.26), çekme çizgilerinin kesme hattının dışında kaldığı doğrulanmıştır.




**Şekil 5.25.** AutoForm çekme çizgisi analizi.

(a) (b)

**Şekil 5.26.** (a) Kalıp çıktısı üzerinde çekme çizgisi (b) 2B kesme hattı görseli.




(a) (b)

**Şekil 5.27.** (a) Çekme çubuğunun gergi kuvveti ve (b) Prosesin gerçekleştirilmesi için gereken kuvvetler.

Şekil 5.27' da verilen verilere göre 346 tonluk bir prese ihtiyaç vardır. Pres kayıplarını ve emniyet katsayısını hesaba kattığımız zaman bu kalıba atanmış olan 600 tonluk presin uygunluğu yapılan analizlerin verileriyle doğrulanmıştır.

Pot çemberi kuvveti : 953,3 kN (Binder) – 385,184 kN (Total Uplift Force) = 586,116 kN olarak bulunabilir.

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Plastik şekillendirme yöntemlerinden olan sac metal şekillendirme ile üretilen ürünler sanayinin bir çok alanında tüketici taleplerini karşılamak için kullanılmaktadır. Mevcut sac şekillendirme kalıpları, sıkı çalışma, deneyim ve teknolojinin proje bütçesine uygun şekilde kullanılmasını gerektirmektedir.

Teknolojinin çok hızlı bir şekilde gelişmesi ile bilgisayar destekli tasarım ve analiz programlarının kullanımı üretim süreçlerine dâhil olmuştur. Bilgisayar ortamında katı modeli oluşturulan ürünlerin sonlu elemanlar analiz yöntemleri ile matematiksel modeli oluşturularak, gerçek fiziki şartlarındaki karakteristik davranışları incelenebilmektedir. Ürün geliştirme aşamalarında deneysel-yanılma metodu maliyeti arttırmakta ve proje süreçlerini uzatmaktadır.

Sonlu elemanlar analizleri sayesinde; tasarım aşamasında bu tez çalışması için incelenen ürünün, derin çekme prosesi ile üretimi sırasında karşılaşılabilecek kusurların tahmini kolaylaşmakta ve projeye herhangi bir eksta maliyet eklenmesini engellemektedir.

Bu tezde derin çekme prosesi esnasında oluşan şekillendirme hatalarını ortadan kaldırmak veya en aza indirmek amacıyla, kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla pot çemberi ile birlikte kullanılan çekme çubuğunun sac malzeme üzerinde oluşturduğu etkileri incelenmiş ve 43 inç DLED televizyonlar için üretilmek istenen arka panel komponentinin hangi kalitede sac malzeme ile üretilmesi gerektiğine karar verilmiştir.

Bu çalışma sırasında gerçekleştirilen simülasyonlar ve denemeler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Çekme çubuğu olmadan gerçekleştirilen derin çekme prosesinde yetersiz gergi kuvvetinden kaynaklı, sac şekillendirme yüzey kalitesinde istenmeyen kırışma, katlanma, çüküntü vb. kusurların meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- Pot çemberi kuvveti derin çekme prosesinde çok etkili bir parametre olmasına rağmen, tek başına hacimsel olarak büyük ve karmaşık yapıdaki parçaların şekillendirilmesinde çok fazla etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

- Sırasıyla HX22YD+Z, DX52D+Z, DX53D+Z, DX54D+Z, DX56D+Z kalitede olan beş farklı malzeme için analiz çalışmaları yapılmış ve şekillendirilebilirlik verileri Tablo 5.1'de verilmiştir. Sonuç olarak analizi yapılan malzemeler içerisinde şekillendirme kabiliyeti açısından parça geometrisine en uygun malzeme olarak DX56D+Z sac metal malzemesi belirlenmiştir.
- Şekillendirme kabiliyeti açısından parça geometrisine en uygun malzeme belirlendikten süzdürme çubuğu konumu için üç farklı (Şekil 5.21) ve süzdürme çubuğu geometrisi için beş farklı (Tablo 5.2) analiz çalışmaları yapılmış ve optimum parametreler belirlenmiştir.
- Geri yaylanma analizleri sayesinde, ürün tasarımı üzerinde yapılan modifikasyon sayesinde optimize edilmiş ve rijitliği sağlanmış ürün çıktısının alınması sağlanmıştır.
- Parçanın üretimi sırasında gerekli olan kuvvetlerin analizi hem pres seçiminde hem de gerekli pot çemberi kuvvetinin sağlanmasına yardımcı olmuştur.
- Süzme çubukları ile yapılan analizler sayesinde, hem kullanılacak hammadde ebatlarının belirlenmesine hem de çekme izlerinin kesme hattı içerisinde kalıp kalmayacağı belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

[1] Honghzi, D., Zhongqin, L. Investigation of sheet metal forming by numerical simulation and experiment. Journal of Materials Processing Technology. 2000, 103, 404-410.

[2] Dilan, R.. Balkan, T.. Platin, B. An online intelligent algorithm pipeline for the elimination of springback effect during sheet metal bending. Procedia Engineering. 2017, 207, 1576–1581.

[3] İriç, D. Sac Şekillendirme Prosesinde Kullanılan Süzdürme Çubuğu Modellenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2012, 64 s. (Yüksek Lisans Tezi).

[4] Yanf, S., McPhillimy, M., Supri, T., Qin, Y. Influences of process and material parameters on quality of small-sized thin sheet-metal parts drawn with multipoint tooling. Procedia Manufacturing. 2018, 15, 992-999.

[5] Hattalli, V., Srivatsa, S. Sheet Metal Forming Processes – Recent Technological Advances. Materials Today: Proceedings. 2018, 5, 2564–2574.

[6] Mutlu, B. Increasing Metal Utilization by Improved Drawbead Design in Deep Drawing Operations. Türk Alman Üniversitesi, Umformtechnik ve Leichtbau Enstitüsü, İmalat Teknolojileri Anabilim Dalı, Dortmund, 2013, 77 s. (Yüksek Lisans Tezi).

[7] Banabic, D. Sheet Metal Forming Processes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Almanya, 2010, 297 s.

[8] Yalçın, S. Analysıs And Modeling Of Plastic Wrinkling In Deep Drawing. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Ankara, 2010, 116 s. (Yüksek Lisans Tezi).

[9] Özoğul, Ş. Dünya'da ve Türkiye'de Kalıpçılık. www.kalipdunyasi.com.tr. 2017.
[10] Ataşimşek, S. Sac Kalıpları. Bursa, 1977, 748 s.

[11] Demirkol, M. Plastik Şekil Verme Teknolojisi Ders Notları. İstanbul, 2010, 150 s.

[12] Karabıyık, Ö. Sac-Metal Kesme Kalıplarının Parametrik Tasarımına Yönelik Bir Yaklaşım. SDU International Teknologic Science. 2011, 3, 61-69.

[13] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. Bükme Kalıpları-1. Ankara, 2013, 69 s.

[14] İlhan, A. Sac Metal Şekillendirmede Mukavemet Arttırıcı Parametrelerin Optimizasyonu. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 2018, 70 s. (Yüksek Lisans Tezi).

[15] Hibbit, H., Marcal, P., Rice, A Finite Element Formulation For Problems Of Large Strain and Large Displacement. J. International Journal Solids Structures. 1970, 6, 1069-1086.

[16] Tang, S., Ilankamban, R., Ling, P. A Finite Element Modelling Of The Strecth-Draw Forming Process. International Congress and Exposition. 1988, 4, 101-108.

[17] Erdemir Grubu, Ürün Kataloğu, 2017.

[18] Steelnumber.com

[19] Neuhauser, F., Struck, R., Mautz, H., Manopulo, N., Hora, P, Sensor Placement Design Strategy and Quality Estimation in Modern Car Body Using Stochastic Finite Element Methods. Procedia Manufacturing. 2019, 27, 104-111.

[20] Keeler, S. Determination of forming limits in automotive stampings. SAE Tech 1965.

[21] Djavanroodi, F., Ebrahimi, M., Janbakhsh, M. A study on the stretching potential, anisotropy behavior and mechanical properties of AA7075 and Ti-6Al-4V alloys using

forming limit diagram: An experimental, numerical and theoretical approaches. Results in Physics. 2019, 14, 102496.

[22] Ghennai, W., Boussaid, O., Bendjama, H., Haddag, B., Nouari, M. Experimental and numerical study of DC04 sheet metal behaviour—plastic anisotropy identification and application to deep drawing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, 100, 361–371.

[23] Özdemir, O,. Şirin, H,. Karataş, Ç. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelik Saclardaki Alaşım Elementlerinin Şekillendirmeye Etkisinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2017, 5, 109-119.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gökhan GÜNEŞGÖRMEZ

Doğum Yeri ve Yılı : Seyhan, 1988

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : gokhangunesgormez@gmail.com.tr

**Eğitim Durumu**

Lise : Mersin Şevket Pozcu Lisesi, 2003-2006

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü, 2007-2011

Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh.Bölümü, 2017 - 2020

**Mesleki Deneyim**

| | |
|---|---|
| Sart Yapı Denetim Ltd.Şti. | 2011-2012 |
| Teknika Plast A.Ş | 2013-2015 |
| Teleset Group Ltd.Şti. | 2015-2020 (halen) |