

**SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE
GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Sezer ÇELİK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE GERİ YAYLANMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Sezer ÇELİK
0000-0001-5069-7246

Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Sezer ÇELİK tarafından hazırlanan “SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE, GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Başkan : Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK
ORCID ID: 0000-0001-5767-8312
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Necmettin KAYA
ORCID ID: 0000-0002-8297-0777
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
ORCID ID: 0000-0003-3350-1509
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

...../...../.....

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/07/2020

Sezer ÇELİK

ÖZET

Yüksek Lisans

SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Sezer ÇELİK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

Bu çalışmada, sac metal malzemelerin şekil verme operasyonları sonucunda meydana gelen geri yaylanma davranışları incelenmiş ve nihai parça geometrisinin istenen tolerans değerlerinde çıkmasını sağlamak için gerekli simülasyon parametreleri oluşturularak sonlu eleman analizi yapılmıştır. Malzeme cinsi olarak 0,65 mm kalınlığında DC04 sac malzeme seçilmiştir. Orijinal modele ait kalıp yüzeyleri CATIA yazılımında oluşturulmuş ve ilgili kalıp yüzeyleri AUTOFORM yazılımına aktarılarak doğru tayin edilmiş parametreler ile simülasyon çözümleri elde edilmiştir. Yapılan analizde simülasyon parametrelerinin doğru seçilmesi, zaman ve maliyet açısından tekrar işçiliklerinin (CNC, Kalıp Alıştırma, Pres Altı Çalışmaları gibi) önüne geçilmesinde önemli bir unsurdur. Simülasyon sonuçlarına göre telafi verilecek operasyon, derin çekme operasyonu olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi ise malzemeye uygulanan kuvvetin etkisiyle plastik deformasyon oluşmasıdır. Simülasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra form verme operasyonuna ait dişi (üst kalıp), erkek (alt kalıp) ve pot kalıbı telafi verilmiş yüzeyler ile CNC’ de talaşlı imalat sürecinden geçirilmiştir. Daha sonra kalıbın ön montajı, tesviye-parlatma işlemleri ve son olarak final montajı tamamlandıktan sonra pres altı kalıp alıştırma ve ölçüsellik çalışması yapılmıştır. Kalıp alıştırmada amaç kalıbın dinamik olarak sorunsuz çalışması ve kalıbın sac ile uyumunu sağlamaktır. Alıştırma sonucunda form kalıbından çıkmış parçanın, lazer de kesilmesi ile fikstür üzerinde ilk kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise 3D-ATOS ölçüm cihazında orijinal model ile karşılaştırılarak sapma miktarları incelenmiştir.

Yapılan iterasyonlar sonucunda, Autoform analiz programından elde edilmiş telafi sonuçları ile eksiksiz ve doğru bir kalıp alıştırma süreci sonucunda mamüle çevrilmiş nihai parçanın geri yaylanma davranışı karşılaştırılmış ve büyük oranda benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geri Yaylanma, Sac Şekillendirme, Kalıp Alıştırma, Sonlu Elemanlar Metodu, Yüzey Telafisi, Form Verme Kalıpları
2020, x + 86 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF SPRINGBACK BEHAVIOUR IN SHEET METAL FORMING

Sezer ÇELİK

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK

In this study, springback behaviour of sheet metal materials has been analysed end of forming operations and FEA studies are made to get final part in defined tolerances range. Material type is DC04 with thickness 0,65 mm. Simulation solutions are obtained from Autoform Software, with accurate parameters using die surfaces which are created via Catia software based on original model. Deciding correct parameters is leading factor to prevent rework related with time and cost. Drawing operation has been determined to be compensated according to simulation result. Formation of plastic deformation induced by force, is the reason of choosing drawing operation. Compensated surface of forming operation, which is included upper die, punch and blank holder, have been used for machining after simulations studies. After pre-assembly, grading-polishing and final assembly stages are performed. Die try-out and dimensional accuracy being provided. The purpose of die try-out is to ensure the die compatibility with the sheet metal. After the die try-out, the part is laser cutting. The part is first checked and measured on fixture. Subsequently amount of deviation is examined being coincided with original model by 3D-ATOS scanner.

As a result of the studies, the compensation results obtained in Autoform were compared with the experimental part were similar to each other.

Key words: Springback, Sheet Metal Forming, Spotting, Finite Element Method, Springback Compensation, Drawing Die
2020, x + 86 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen kıymetli hocam ve danışmanım sayın Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK' e sonsuz saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen ve en zor anlarımda yanımda olan babama, anneme ve kardeşime teőekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca her koşulda yanımda olan, sabrını ve desteğini esirgemeyen nişanlıma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Beyçelik-Gestamp A.Ő.' ye tez çalışmam boyunca fabrika olanaklarının kullanılmasına izin verdiği ve tez çalışmasını desteklediği için derin teőekkürlerimi sunarım. Tüm mesai arkadaşlarıma ve çalışmalarım boyunca yardımını hiç esirgemeyen değerli arkadaşım Onur DEMİR' e desteklerinden dolayı teőekkürü bir borç bilirim.

Sezer ÇELİK
20/07/2020

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | v |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI | 3 |
| 2.1. Literatür Çalışması | 3 |
| 2.2. Çelik Malzemeler | 6 |
| 2.3. Gerilme Şekil Değişirme İlişkileri | 12 |
| 2.4. Sac Metal Şekillendirme İşlemleri | 16 |
| 2.4.1. Derin Çekme (Form Verme) | 16 |
| 2.4.2. Kesme Kalıpları | 20 |
| 2.4.3. Bükme Kalıpları | 24 |
| 2.5. Geri Yaylanma | 28 |
| 2.5.1. Geri Yaylanmanın Telafisi | 29 |
| 2.5.2. Geri Yaylanma Davranışını Etkileyen Parametreler | 31 |
| 2.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi | 32 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM | 36 |
| 3.1. Fizibilite Analizleri | 36 |
| 3.2. Proses Çalışması | 45 |
| 3.3. Kalıp Tasarımları | 47 |
| 3.4. Kalıp İmalat Süreci ve Pres Altı Çalışmaları | 56 |
| 3.4.1. Kalıbın Ön ve Final Montajı (MAP0) | 56 |
| 3.4.2. Kalıp Alistırma (MAP1) | 60 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA | 69 |
| 5. SONUÇ | 76 |
| KAYNAKLAR | 82 |
| ÖZGEÇMİŞ | 86 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|-----------------------------|----------------------------------|
| mm | Milimetre |
| K | Kelvin |
| Rm | Çekme Dayanımı |
| MPa | Megapascal |
| σ | Gerilme |
| τ | Kayma |
| ε | Birim şekil değiştirme |
| $\sigma\text{-}\varepsilon$ | Birim Uzama |
| E | Elastisite (Young) Modülü |
| σ_a | Akma Noktası |
| $\sigma_{\bar{u}}$ | Üst Akma Noktası |
| σ_a | Alt Akma Noktası |
| A_0 | Başlangıç Kesit Alanı |
| σ_{ζ} | Çekme Noktası |
| F_{ζ} | Uygulanan Çekme Kuvveti |
| σ_k | Kopma Noktası |
| Rp | Zımba Yarıçapı |
| Rd | Kalıp Yarıçapı |
| C | Zımba ve Kalıp Arasındaki Boşluk |
| t | Sac Kalınlığı |
| BA | Açınım Uzunluğu |
| R | Bükme Yarıçapı |
| K_{ba} | Uzama Faktörü |
| K | Geri Esneme Faktörü |
| θ | Bükme Açısı |
| σ_{ak} | Akma Mukavemeti |
| C | Karbon |
| Si | Silisyum |
| P | Fosfor |
| Mn | Mangan |
| S | Kükürt |
| N | Azot |
| Ni | Nikel |
| Cr | Krom |
| Mo | Molibden |
| H | Hidrojen |
| O | Oksijen |
| V | Vanadyum |
| FeO | Demir Oksit |
| FeS | Demir Sülfür |

Kısaltmalar Açıklama

| | |
|-------|---|
| 2D | Two Dimensional |
| 3D | Three Dimensional |
| AHSS | Advanced High Strength Steel |
| BH | Bake Hardenable |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| DEV | Deviation |
| CMn | Carbon Manganese Steels |
| CMM | Coordinate-measuring Machine |
| CNC | Computer Numerical Control |
| CP | Complex Phase Steels |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DP | Dual Phase Steels |
| FLD | Forming Limit Diyagram |
| HPDB | Heterojen Plastik Deformasyon Bölgesi |
| HSLA | High Strength Low Alloy Steels |
| HSS | High Strength Steel |
| IF | Intersitial – Free Steels |
| IF-HS | High Strength Intersitial – Free Steels |
| IGS | Image-Guided Surgery |
| IS | İzotropik Steel |
| LSS | Low Strength Steel |
| MAP | Messa A Punto |
| MART | Martensitic Steels |
| MILD | Mild Steels |
| SEY | Sonlu Elemanlar Yöntemi |
| ŞSD | Şekillendirme Sınır Diyagramı |
| TRIP | Tranformation Induced Plasticity Steels |
| TXT | Text |
| UHSS | Ultra High Strength Steels |
| ÜPDB | Üniform Plastik Deformasyon Bölgesi |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2.1. Sac Olarak Kullanılan Çeliklerin Uzama (%) ve Çekme Dayanımlarına Göre Sınıflandırılmaları..... | 10 |
| Şekil 2.2. Malzeme üzerinde oluşan değişik tipteki gerilme türleri | 13 |
| Şekil 2.3. Deformasyon ölçüm sistemi | 13 |
| Şekil 2.4. Çekme esnasında deney numunesinin almış olduğu şekiller..... | 14 |
| Şekil 2.5. Mühendislik gerilmesi – mühendislik gerinimi eğrisinin temel nitelikleri | 14 |
| Şekil 2.6. Gerilme birim şekil değiştirme grafiğinde tokluğun bulunması..... | 16 |
| Şekil 2.7. Sıvama işleminin gösterimi | 17 |
| Şekil 2.8. Dişi kalıp ile pot çemberinin kapanmasına ait kesit görünümü..... | 18 |
| Şekil 2.9. Süzme kanalı tipleri..... | 18 |
| Şekil 2.10. Derin çekme işleminin başlangıcına ait kesit görünümü..... | 19 |
| Şekil 2.11. Çekme kalıbı | 19 |
| Şekil 2.12. İki kesme kenarı arasında sac metalin kesilmesi | 21 |
| Şekil 2.13. Kesme boşluğunun alt (dişi) kalıba verilmesi..... | 22 |
| Şekil 2.14. Kesme boşluğunun erkeğe verilmesi..... | 22 |
| Şekil 2.15. Kesme operasyonuna ait alt-üst kalıp ve baskı plakası | 23 |
| Şekil 2.16. Rulo sac malzemeden parça elde etmek için hazırlanan açınım kesme çeşitleri | 24 |
| Şekil 2.17. Bükme kalıbına ait alt-üst tabla ve baskı plakası..... | 25 |
| Şekil 2.18. En yaygın bükme işlemleri | 25 |
| Şekil 2.19. V bükme işleminin aşamaları..... | 26 |
| Şekil 2.20. Kenar bükme işlemi..... | 26 |
| Şekil 2.21. U bükme kalıbındaki aşamalar..... | 27 |
| Şekil 2.22. Örnek bükme açınımı | 28 |
| Şekil 2.23. Bükme işlemi operasyon sırası ve geri yaylanma | 28 |
| Şekil 2.24. Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki plastik uzama bölgesinin dış yüzeyden iç yüzeye doğru $s(1-\eta)$ derinliğinde dağılımı..... | 29 |
| Şekil 2.25. Bükmenin sebep olduğu molekül hareketleri | 29 |
| Şekil 2.26. A kesitine sahip bir geometrinin B kesitine geri yaylanmasının ardından C kesiti şeklinde geri yaylanma telafisi içeren geometrinin gösterimi | 30 |
| Şekil 2.27. Sac şekillendirme sonlu elemanlar modeli | 33 |
| Şekil 2.28. Daireyi elemanlara bölmek..... | 33 |
| Şekil 2.29. Simülasyonların üretim sürecindeki rolleri | 35 |
| Şekil 3.1. Derin çekme ve bükme operasyonlarına ait kalıp yüzeyleri..... | 36 |
| Şekil 3.2. Autoform yazılımında kullanılan DC04 malzemesine ait mekanik özellikler | 38 |
| Şekil 3.3. Haddeme yönü ve bükme işlemi | 38 |
| Şekil 3.4. Autoform programında operasyonların tanımlanması | 39 |
| Şekil 3.5. Sac Malzemelerdeki Uzama Miktarlarının ŞSD Üzerinde Temsil Edilen Bölgeleri..... | 39 |
| Şekil 3.6. İlk yapılan denemeler sonucu form verilmiş sıvama parçası..... | 40 |
| Şekil 3.7. Yırtık riski giderilmiş sıvama parçası | 40 |
| Şekil 3.8. Derin çekme sonucunda meydana gelen kırışma sonuçları..... | 41 |
| Şekil 3.9. Derin çekme sonucunda meydana gelen incelleme sonuçları | 41 |
| Şekil 3.10. Derin çekme sonucunda meydana gelen plastik şekil değiştirme sonuçları. 42 | 42 |
| Şekil 3.11. Derin çekme sonucunda meydana gelen iz kayması sonuçları..... | 42 |
| Şekil 3.12. Form verilmiş final parçada meydana gelen geri yaylanma sonuçları..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.13. Geri yaylanma telafi verme yöntemi | 44 |
| Şekil 3.14. Yüzey kalitesini ve sapma miktarını etkileyen parametreler | 44 |
| Şekil 3.15. Telafisi verilmiş final parçada meydana gelen geri yaylanma değerleri | 45 |
| Şekil 3.16. 3D-Proses dizilimi | 47 |
| Şekil 3.17. Pres, transfer barları ve taşıma klemplerinin gösterimi | 47 |
| Şekil 3.18. Derin çekme operasyonuna ait kalıp tasarımı | 48 |
| Şekil 3.19. İlk kesme operasyonuna ait kalıp tasarımı | 48 |
| Şekil 3.20. İkinci kesme ve delme operasyonuna ait kalıp tasarımı | 49 |
| Şekil 3.21. Bükme ve ayırma (kesme) operasyonuna ait kalıp tasarımı | 49 |
| Şekil 3.22. Kalıp tasarımlarında kullanılan yardımcı elemanlar | 50 |
| Şekil 3.23. Strafor model imalatı tamamlanmış örnek kalıp elemanları | 54 |
| Şekil 3.24. Döküm imalatı tamamlanmış örnek kalıp elemanları | 55 |
| Şekil 3.25. 2D ve 3D işlemleri tamamlanmış örnek kalıp elemanları | 56 |
| Şekil 3.26. Döküm göbeğinin, alıştırma boyası ile taban kontrolü | 57 |
| Şekil 3.27. Taban gönyelemesi tamamlanmış erkek göbek | 58 |
| Şekil 3.28. Taban gönyelemesi tamamlanmış kesme çelikleri | 58 |
| Şekil 3.29. Parlatma işlemi tamamlanmış erkek göbek ve dişi pot çelikleri | 59 |
| Şekil 3.30. Pot kopyası tamamlanmış parçanın, alıştırma boyası ile kontrolü | 61 |
| Şekil 3.31. Alıştırması tamamlanmamış derin çekme parçası | 62 |
| Şekil 3.32. Dişi kopyası tamamlanmış parçanın, alıştırma boyası ile kontrolü | 62 |
| Şekil 3.33. Pot dengeleyici ve kalıp stoperinin alıştırma boyası ile kontrolü | 63 |
| Şekil 3.34. Alıştırması tamamlanmış, analiz verileri ile uyumlu derin çekme parçası ... | 63 |
| Şekil 3.35. Sonraki operasyonlarda kullanılmak üzere basılmış operasyon numuneleri | 64 |
| Şekil 3.36. Alt kesme çeliklerinde, markalama boyası ile kesme boşluğu kontrolü | 65 |
| Şekil 3.37. Kesme kalıbında, alıştırması tamamlanmış operasyon numuneleri | 66 |
| Şekil 3.38. Kesme boşluğu sebebiyle oluşan çapak problemi | 66 |
| Şekil 3.39. Hurdanın alt kesme çeliğinde takılması durumu | 67 |
| Şekil 3.40. İlk kesmeden çıkmış operasyon numunesi (Operasyon 30) | 67 |
| Şekil 3.41. Bükme kalıbından çıkmış sağ-sol final parçaları | 68 |
| Şekil 4.1. Tüm operasyonlardan geçirilip kontrolleri yapılmış, deneysel parçalar | 69 |
| Şekil 4.2. Final parça üzerinde meydana gelen gerilmelere ait simülasyon sonuçları ... | 70 |
| Şekil 4.3. Final parça üzerinde meydana gelen incelme değerlerine ait simülasyon sonuçları | 70 |
| Şekil 4.4. Final parça üzerinde meydana gelen kırılma değerlerine ait simülasyon sonuçları | 71 |
| Şekil 4.5. Final parça üzerinde meydana gelen iz kayması değerlerine ait simülasyon sonuçları | 71 |
| Şekil 4.6. Parçaların kontrol fikstürleri üzerinde sabitlenmesi | 72 |
| Şekil 4.7. Fikstür üzerinde yardımcı aparatlar kullanılarak yapılan kontroller | 73 |
| Şekil 4.8. CMM' de ölçülen parçanın geri yaylanma sonuçları | 74 |
| Şekil 4.9. Deneysel parçaların Atos ölçüm cihazında çakıştırılması ile yüzeylerde meydana gelen sapma miktarları | 75 |
| Şekil 5.1. Geri yaylanma değerleri A) Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma B) Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma | 76 |
| Şekil 5.2. Eteklerdeki geri yaylanma değerleri A) Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma B) Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma | 77 |
| Şekil 5.3. Üst ve yan yüzeylerdeki geri yaylanma değerleri A) Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma B) Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma | 78 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.4. Öpüşme yüzeyindeki geri yaylanma değerleri A) Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma B) Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma | 79 |
| Şekil 5.5. Bükülen eteklerdeki geri yaylanma değerleri A) Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma B) Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma | 80 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 2.1. HSS ve AHSS' lerin bazı mekanik özellikleri | 11 |
| Çizelge 2.2. Gerilme çeşitleri | 12 |
| Çizelge 3.1. DC04 malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi (Ağırlık %) | 37 |

1. GİRİŞ

Dünya’da otomotiv sektörü, gün geçtikçe gelişen ve ülke ekonomileri için önemi artan bir sektördür. Bu sektörde firmalar arası rekabet hızla yükselmekte ve buna bağlı olarak verimlilik artışı, kaynakların etkin kullanımı gibi unsurlar büyük önem kazanmaktadır. Günümüzde sac malzemelerin şekillendirme işlemi, başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Otomobillerde ağırlık ve dayanım avantajlarından dolayı yüzlerce sac metal parça kullanıldığından, sac şekillendirme işlemleri otomotiv sektörünün vazgeçilmez bir parçasıdır. Teknolojik gelişmelerin artmasıyla birlikte, sac metal şekillendirme sektöründen talep edilen ihtiyaçlar artmış ve sektörün gelişmesine yol açmıştır.

Otomotiv sektöründe kullanılan sac metal malzemelerin gelişimi de hızlı bir ilerleyiş göstermektedir. Zaman içerisinde birçok yeni malzeme tasarımı yapılmakta ve çeşitlilik artmaktadır. Bu anlamda, araç tasarımları için geliştirilen malzemelerin, mekanik ve kimyasal özellikleri farklı olduğu için, şekillendirilebilme özellikleri de farklılık gösterir. Otomotiv sektöründe kullanılan malzemeler, oldukça kompleks geometrilere sahiptirler dolayısı ile kalıp yüzeyleri de karmaşıktır. Bu durum prosesin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini de zorlaştırmaktadır. Bu nedenle de proseste birçok problemle karşılaşmaktadır (Esener ve ark. 2018).

Sac şekillendirmede geliştirilen pek çok yöntem vardır. Bunlar genel olarak, bir sac malzemesinin, istenen forma sahip daha rijit nesnelere (kalıp elemanları) yardımıyla şekillendirilmesini esas alırlar. Bunlardan en yaygını ise, erkek (alt), dişi (üst) kalıp ve pot çemberi olarak adlandırılan formlu dökme demir veya çelik malzemeden imal edilmiş parçalar arasına sacın konulup, orta kısımda bir çekme kuvveti ve kenarlarda yüksek bir basma kuvveti uygulanması ile yapılan şekillendirmedir. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde ürünü ortaya çıkarmanın yanı sıra düşük maliyet, zaman ve doğruluk (ölçüsellik) sektörde öne çıkmak için önemli etkenlerdendir.

Şekil verme yöntemi ile parçaya istenilen form verilirken, parçada deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu meydana gelen deformasyonların en önemlilerinden birisi de

geri yaylanmadır. Sac malzeme üzerine uygulanan yük ortadan kaldırıldığında, parçanın eski haline geri dönmesini geri yaylanma olarak tanımlayabiliriz. Geri yaylanma telafisi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak her önlem için geri yaylanma değerlerinin önceden bilinmesi gerekir. Geri yaylanmanın önceden tahmini hem zaman hem de maliyet açısından önemli kazançlar sağlamaktadır. Değişen teknoloji ile sürekli gelişim gösteren sonlu elemanlar analiz programları sayesinde, şekil verme esnasında meydana gelen geri yaylanma değerleri bulunabilir. Yapılan analiz ve simülasyonlar, hata oranını azaltmak ve seri üretimde çıkabilecek problemleri en aza indirmede büyük önem kazanmıştır. Bu sebeple sonlu elemanlar analizlerinde, simülasyon parametrelerinin doğru tayin edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, geri yaylanma telafisi yapılmıştır. Analiz programından elde edilmiş veriler ile deneysel çalışmalar sonucunda parçada meydana gelen geri yaylanma değerleri karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçların, analiz sonuçları ile örtüşmesi için süreçlerin nasıl olması gerektiği açıklanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Çalışması

Bu bölümde, şekillendirme sonrasında sac parçalar üzerinde meydana gelen geri yaylanma davranışlarının incelendiği çalışmalar ele alınarak özetlenmiştir.

Asgari ve ark. (2008), iki farklı çeliğe ait geri yaylanma davranışlarını, Dynaform ve Autoform sonlu elamanlar analiz programında incelemiş ve elde edilen deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Ayrıca yapılan analizde, farklı elastisite modülü ve sürtünme katsayısı kullanarak bu özelliklerin geri yaylanma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmaların sonucunda Autoform analiz programından elde edilen geri yaylanma verilerinin, deneysel sonuçlara daha yakın çıktığı görülmüştür. Ancak, kullanılan farklı elastisite modülü ve sürtünme katsayılarının sonuçlara çok fazla etki ettiği gözlemlenmemiştir.

Gan ve ark. (2004), geri yaylanmayı düzeltme yöntemi, ismini verdikleri bu çalışmada geri yaylanma değerini en aza indirecek kalıp geometrisinin elde edilmesi üzerinde durmuşlardır. Yapılan çalışmada, geri yaylanmış parçanın ve orijinal geometrinin yüzeyleri arasındaki fark ölçülerek, aradaki fark doğrudan dikkate alınarak kalıp yüzeylerinde yapılan değişiklikler ile hedef geometriye ulaşılabilmektedir.

Yıldız ve ark. (2004), yaptıkları çalışmada şekillendirme metodlarından biri olan sıvama (derin çekme) yöntemi kullanarak, şekillendirme sonrasında parça üzerinde oluşabilecek problemleri belirlemiş ve sonlu elemanlar analizi ile çözümler geliştirmişlerdir. Soğuk şekillendirme yöntemi için deneysel ve sayısal verilerin tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Gomes ve ark. (2005) geliştirilmiş yüksek mukavemetli (UHSS) çeliklerde anizotropinin ve akma dayanımının geri yaylanma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı hadde yönlerindeki (0°, 45°, 90°) sac malzemeleri ile simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Hadde açısındaki artış ile akma dayanımının arttığını ve bu durumun hadde açısına bağlı geri yaylanmayı arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Demirci ve ark. (2005), Sonlu elemanlar yönteminde malzeme özellikleri ve sürtünme katsayısını kullanarak, yapmış oldukları simülasyon çözümleri ile baskı plakasının duvar kalınlığına etkisi üzerinde durmuşlardır. Bu çözümlerden elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırdıklarında %90 uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Sıvama işleminde kalıp üretilmeden önce karşılaşılabilecek problemleri belirleyip çözüm önerileri sunmuşlardır.

Yenice (2006), 2 mm kalınlığında üç değişik özellikte sac malzeme (DC04, HSLA350, DP600) kullanarak, değişik hadde yönlerinde (0° , 45° , 90°), değişik açılı (80° , 90° , 100°) ve bükme yarıçaplarında (R2, R4, R6) yapılan şekillendirmeler sonucunda bu değişkenlerin geri yaylanmaya olan etkileri üzerinde durmuştur. Bükülen sac parçalarının kenar ve orta bölgelerinde farklı davranışlar sergilediğini gözlemlemiştir. Bükme yarıçaplarına bağlı olarak geri yaylanma miktarlarının malzemelerde farklı sonuçlar oluşturduğunu gözlemlemiş ve en çok farklılığın ise çift fazlı sac malzemelerde görüldüğü sonucuna varmıştır.

Sönmez (2015), 0,7 mm kalınlığındaki DC04 sac malzemesi için açılı kanal sonucu oluşan geri yaylanma davranışını incelemiştir. Malzeme özelliklerini esas alarak yaptığı bu çalışmada izotropik ve anizotropik malzeme modellerinin geri yaylanma üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Esat ve ark. (2002), farklı sac kalınlığına ve mekanik özelliklere sahip alüminyum malzemelerinin geri yaylanma değerlerini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Akma dayanımı arttıkça geri yaylanmanın da arttığı gözlemlenmiştir.

Meinders ve ark. (2008), sonlu elemanlar analiz programı uygulama aşamalarında kullanılan kavramların (ağ boyutlarının ve miktarının) geri yaylanmanın tahmini ve telafisi üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Sonuç olarak sonlu elemanlar yönteminde iş parçası üzerindeki ağ miktarının artırılmasıyla elde edilen sonuçların daha hassas olduğu tespit edilmiştir.

Tekaslan ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada değişik kalıplarda, farklı eğme metotları kullanarak, farklı kalınlıktaki bakır malzemelerinin geri yaylanmasını incelemişlerdir. Literatürde kullanılan bazı metotların kullanılamayacağını, zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesinin geri esnemeyi azalttığını, artan malzeme kalınlığı ve eğme açısının da geri esneme miktarını arttırdıklarını tespit etmişlerdir.

Tekiner (2004), farklı kalınlık, farklı malzeme ve kalıp açılarındaki, geri yaylanma miktarlarını değişik yöntemler kullanarak incelemiştir. Kullandığı malzemeler için eğme açısı arttıkça geri yaylanmanın arttığını tespit etmiştir.

Shu ve ark. (1996), yaptıkları çalışmada çift eğme tekniğinin geri yaylanma miktarlarına olan etkilerini, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Kalıp boşluğundaki değişimin geri yaylanma değerlerine etkileri incelenmiş ve çalışmanın deneysel sonuçlara yakınlığı oldukça benzer çıkmıştır. Kalıp boşluğunun artmasıyla geri yaylanmanın azaldığını ispatlamışlardır.

Yuan (1996), yaptığı bu çalışmada, sac parçanın plastik deformasyona maruz kalmasından sonra, üzerine uygulanan yükün kaldırılmasıyla birlikte malzeme içindeki gerilmelerin yeniden elastiki dağılımıyla, geri yaylanmayı azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Mühendislikte kompozit sac malzemelerin kullanımının artmasıyla, bu malzemeler üzerindeki geri yaylanmayı tespit etmek için bir matematiksel model ile çözümü araştırılmıştır.

Yanagimoto ve ark. (2005), geliştirilmiş yüksek mukavemetli saclar üzerinde bir dizi sıcak ve ılık sac şekillendirme deneyleri gerçekleştirmiş ve geri yaylanma miktarı üzerinde şekillendirme sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Şekillendirme sıcaklığı 750 K'den daha yüksek olduğunda geri yaylanma miktarının önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir.

Andersson (2005) yaptığı çalışmada, değişik malzemelerin geri yaylanma davranışlarını incelemiş ve yapılan deneysel çalışmaları sonlu elemanlar analizi ile mukayese etmiştir.

Sac levhaların şekillendirilmesinde meydana gelen geri yaylanmanın, tahmini ve telafisine yönelik pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, geri yaylanmaya etki eden parametreler sac kalınlığı, kullanılan malzeme, hadde yönü olduğu şeklinde görüş birliği olduğu görülmüştür. Bazı araştırmacılar ise, uygun zımba bükme yarıçapı ve açısı bularak geri yaylanmanın önüne geçebilecek çeşitli modeller geliştirerek literatüre kazandırmışlardır. Bu çalışmaların ortak hedefi geri yaylanma miktarlarını göz ardı edebilecek bir seviyeye indirmektir.

2.2. Çelik Malzemeler

Çelik; demir elementi ile genellikle %0.2 ile %2.1 oranlarında değişen Karbon (C) miktarının bileşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Çeliğin sınıflandırılmasını, alaşımın içerisindeki karbon miktarı belirler. Karbon ve diğer elementler demir atomundaki kristal kafeslerin kayarak birbirini geçmesini engeller ve sertleşme aracı rolü üstlenirler.

Demir elementini alaşımlamak için, C' dan başka, Magnezyum, Krom, Vanadyum ve Volfram gibi alaşım elementleri de kullanılabilir. Çeliğe farklı özellikler kazandıran, içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Çeliğe farklı oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler ile içyapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelikler elde edilmektedir. Alaşım elementlerinin çeliklere kazandırdığı genel özellikler şunlardır;

- Dayanımı ve sertliği artırır
- Sertleştirmeyi kolaylaştırır ve çekirdeğe kadar sertleştirmeyi sağlar
- Korozyona karşı direnci artırır
- Mıknatıslanma özelliğini geliştirir
- Yüksek sıcaklıklarda dayanımı artırır
- Elektrik direncini artırır
- Isı etkisi altında genleşmeyi kontrol eder
- Kristal yapıyı inceltir

Çeliklere farklı özellikler kazandıran alaşım elementleri aşağıda görülmektedir.

Karbon (C): Çeliklerin özelliklerini etkileyen en önemli alaşım elementidir. Mikro yapıya martenzit formunda sertlik kazandırmaktadır. İçerisindeki C oranı arttıkça çeliğin sertliği de artmaktadır. Bununla birlikte tokluğu ve aşınma direnci de artmaktadır. Bunun dışında yüzde uzamayı, esnekliği, dövülme, şekillendirme, kaynak edilme ve kesilme özelliğini azaltır (Özdemir 2010).

Silisyum (Si): Çelik üzerinde oksit temizleyici özelliğine sahiptir. Si, çeliğin tane büyüklüğünü ve dayanımını artırır. Yüksek oranda Si (%14-15) içeren çeliklerin korozyon direnci yüksek ve dövülemeyecek kadar gevrek olur.

Fosfor (P): Tokluğu en fazla azaltan elementlerden bir tanesidir. %0,6 P geçiş sıcaklığını 300°C'ye yükseltir. Otomat çeliklerinde %0,2'ye kadar P kullanılarak parça dayanımı artar ve talaş kaldırma sonucundaki yüzey kalitesi iyileşir.

Mangan (Mn): %1,6'nın üzerinde Mn içeren çelikler alaşım, altındakiler de alaşımsız olarak isimlendirilir. Mn çeliğin dayanımını artırır, sünekliğini düşürür. Az miktarda eklenmesi bile karbon çeliklerinin sertleşme derinliği üzerinde önemli etkiler yapmaktadır. Tavlanmış ve normalleştirilmiş çeliklerde Mn tokluğu artırır. Çeliğin dövülebilirliğini ve sertleşebilirliğini olumlu yönde etkiler.

Kükürt (S): Akma ve çekme mukavemetine etkisi yok denecek kadar azdır. Fakat malzemenin yüzde uzamasına ve tokluğuna etkisi çok fazladır. Kükürt malzemenin tokluğunu ve sünekliğini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca kaynaklanabilirliği kötü yönde etkiler. Kükürt demirle birleşerek FeS fazını oluşturur. Bu faz düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için haddeleme sıcaklığında ergiyerek sıcak kırılma sebebine sebep olur. Bu olumsuz etki kükürdün manganla birleşmesi sağlanarak önlenir.

Azot (N): Akma ve çekme mukavemetini çok az artırır, ancak tokluğu önemli oranda düşürür. Düşük C'lu çeliklerde, soğuma hızından bağımsız sadece soğuk şekil değiştirmiş çeliklerde, yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip bölgelere N'un yayılarak dislokasyon

hareketini engellemesi ile gevrekliğin artması ve tokluğun düşmesine sebep olur. Sıcaklık arttırılırsa tokluk düşüşü çok kısa sürede gerçekleşir.

Nikel (Ni): Çekme mukavemetini ve çentik darbe mukavemetini artırır. Kritik soğuma hızını düşürür. Sertleşebilirliği az da olsa artırır. Isıl genleşme katsayısını düşürür. Elektrik direncini artırır. Isı iletimini zorlaştırır. Isıtma kaynatma kaplarının saplarının imalatında kullanılır. Cr ile beraber yüksek korozyon direnci, tokluk ve yorulma dayanımı sağlar.

Krom (Cr): C'nun östenit içerisindeki erime derecesini düşürür. Kritik soğuma hızını düşürür. Sertleşebilme kabiliyetini artırır. Yüksek karbonlu çeliklerde aşınma direncini yükseltir. Çekme mukavemetini ve korozyon direncini artırır.

Molibden (Mo): Ni ve Cr ile birlikte çeliklerin sertleşebilirliklerini ve dayanımlarını artırır. Bir karbür oluşturuçu olduğundan aşınma direncini arttırmak amacıyla yüksek oranlarda (% 5-6) takım çeliklerinde kullanılır. En önemli özelliği yüksek hız çeliklerinde ikincil sertleşme yaratarak sıcak sertliği sağlamasıdır. Bunu karbon ile birlikte yaptığı karbürlerin oluşumuna borçludur.

Hidrojen (H): Atom çapı en küçük olan elementtir. Azot gibi dayanımı çok değiştirmeden yapıyı gevrekleştirir. Malzemenin elastikiyetini azaltır.

Oksijen (O): Fe içinde hemen hemen hiç çözünmez. H ve N gibi çok az miktarı gevrekleşmeye neden olur. Düşük C'lu çeliklerde FeO, FeS gibi kızıl sıcaklıkta çeliği kırılgan yapar.

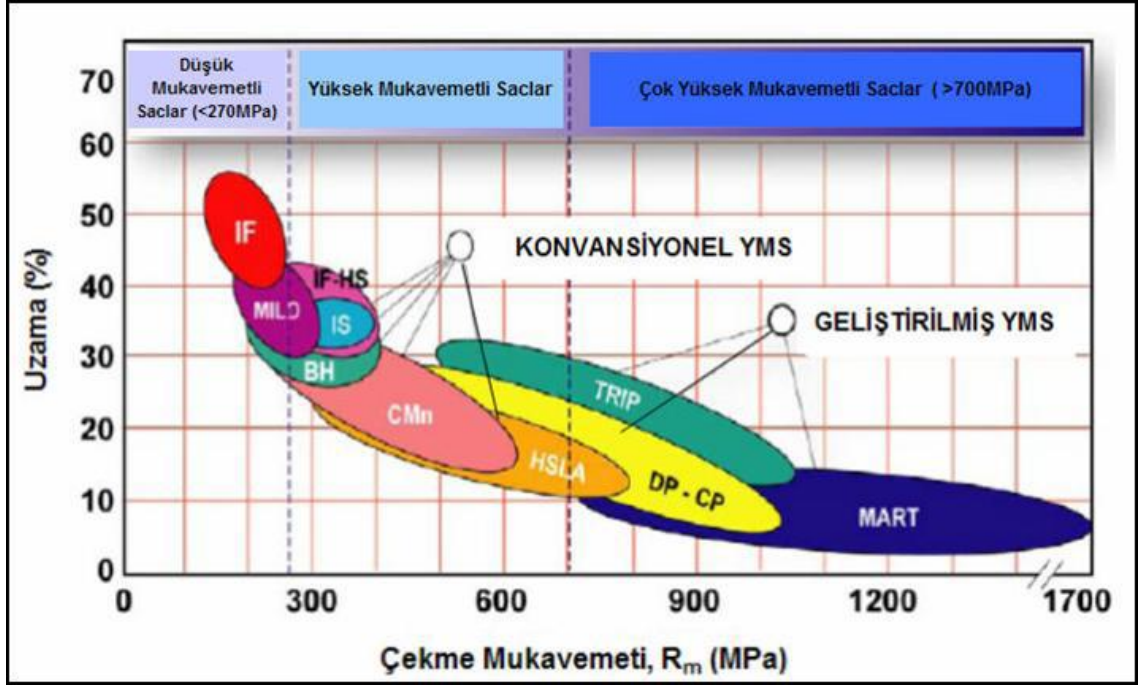
Vanadyum (V): Güçlü karbür formu çeliklerin aşınma direncini arttırıcı etki göstermektedir. Ayrıca sıcak sertliği ve temperleme direncini iyileştirmektedir. Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Alaşımli takım çeliklerinde kullanım yeri olan bir alaşım elementidir.

Çelikler yapılarında bulunan alaşım elementlerinin miktarına göre şu şekilde sınıflandırılırlar;

- Sade karbonlu çelikler
 - Düşük karbonlu çelikler ($\%C < 0,25$)
 - Orta karbonlu çelikler ($0,25 < \% C < 0,6$)
 - Yüksek karbonlu çelikler ($0,6 < \%C < 1,4$)
- Düşük alaşımlı çelikler
- Yüksek alaşımlı çelikler

Fe-C alaşımlarının gerilme şekil değiştirme özellikleri de C oranıyla değişim gösterir. Düşük karbonlu çeliklerde belirgin bir akma basamağı gözlenir ve bu alaşımlar büyük ölçüde plastik şekil değiştirdikten sonra kırılırlar, yüksek tokluğa sahiptirler. Orta karbonlu çeliklerde akma basamağı görülmez ve yine oldukça sünektirler. Yüksek karbonlu çeliklerde ise mukavemet yüksektir. Buna karşın süneklik az, tokluk düşüktür. Gevrek bir davranış gösterirler. Alaşım içerisindeki karbon oranı arttıkça sementit oranı da artar ve buna bağlı olarak sertlik ve mukavemet de artar. Ancak bu durumda ferrit oranı azaldığından süneklik de azalır.

Sac olarak kullanılan çelikler genelde metalurjik özelliklerine göre adlandırılırlar ve sınıflandırılırlar. Günümüz çalışmalarında, kesit kalınlığında azaltmaya giderek, aynı anda dayanımı yüksek ve kolay şekillendirilebilir malzemeler hedeflenmektedir. Sac olarak kullanılan çelikleri, uzama (%) ve çekme dayanımlarına göre üç ana başlık altında inceleyebiliriz; düşük dayanımlı çelikler (LSS), yüksek dayanımlı çelikler (HSS), geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) (Şekil 2.1) (Şen 2015).



Şekil 2.1. Sac Olarak Kullanılan Çeliklerin Uzama (%) ve Çekme Dayanımlarına Göre Sınıflandırılmaları (Keeler ve ark. 2014)

LSS, düşük dayanımlı çelikler (Low Strength Steels) olarak bilinen; IF arayer atomsuz çelikler (Intersititial – Free Steels) ve MILD yumuşak çeliklerin (Mild Steels) çekme dayanımları yaklaşık olarak 150 – 300 MPa arasındadır (Şen 2015). Çoğunlukla ferritik yapıya sahip olup düşük karbon ve alaşım elementi ihtiva ederler. Yumuşak ve kolay şekil alabilen malzemelerdir. Ucuzdurlar ve geniş kullanım alanına sahiptirler.

HSS, (High Strength Steel) yüksek dayanımlı çelikler, genellikle karbon-mangan, fırında sertleştirilebilen izotropik, yüksek mukavemetli IF ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerdir.

BH fırında sertleşebilen çelikler, IS izotropik çelikler, IF-HS yüksek dayanımlı arayer atomsuz çelikler (High Strength Intersititial – Free Steels), CMn karbon manganez çelikleri (Carbon Manganese Steels) ve HSLA yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerin (High Strength Low Alloy Steels) çekme dayanımları yaklaşık olarak 250 – 800 MPa arasındadır (Şen 2015).

Bunun yanında AHSS, geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler (Advanced High-Strength Steels) olarak bilinen; TRIP dönüşümle oluşturulan plastisite çelikleri (Transformation Induced Plasticity Steels), DP çift fazlı çelikler (Dual Phase Steels), CP kompleks fazlı çelikler (Complex Phase Steels) ve MART martensitik çeliklerin (Martensitic Steels) çekme dayanımları yaklaşık olarak 450 – 1700 MPa arasındadır (Şen 2015). AHSS'ler çok yüksek mukavemet, deformasyon sırasında mükemmel enerji absorbe etmesi ve gerinim sertleştirilmesi özellikleri sebebiyle tercih edilirler.

Çizelge 2.1' de çelik tiplerine göre bazı mekanik özellikler listelenmiştir. Yüksek dayanımlı çelikler (HSS) mavi ile geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) yeşil ile gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. HSS ve AHSS' lerin bazı mekanik özellikleri (Kılıç 2009)

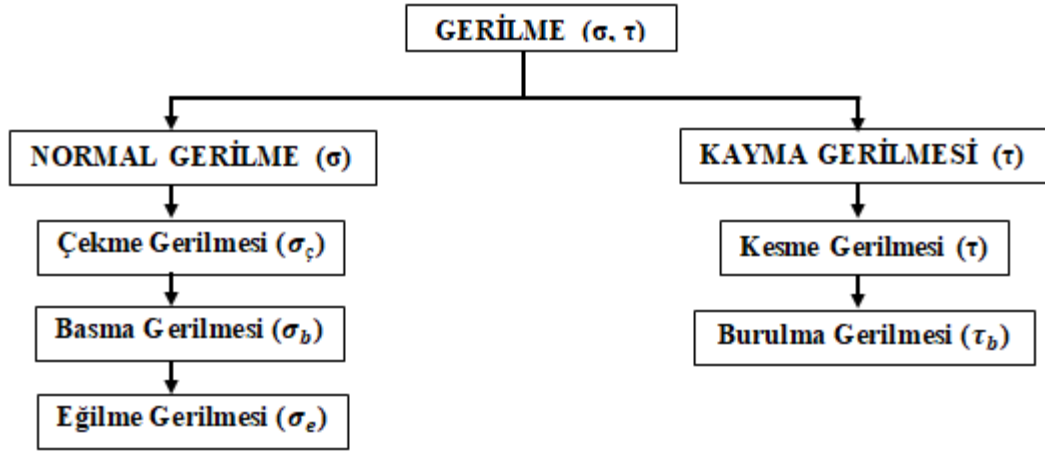
| Sac Malzeme | Mühendislik Akma Dayanımı (MPa) | Mühendislik Çekme Dayanımı (MPa) | Akma Dayanımı / Çekme Dayanımı | Uzama (%) | n-değeri (5-15%) | R-değeri |
|----------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------|------------------|----------|
| BH 210/340 | 210 | 340 | 0.618 | 34-39 | 0.18 | 1.8 |
| BH 260/370 | 260 | 370 | 0.703 | 29-34 | 0.13 | 1.6 |
| DP 280/600 | 280 | 600 | 0.467 | 30-34 | 0.21 | 1 |
| IF 300/420 | 300 | 420 | 0.714 | 29-36 | 0.2 | 1.6 |
| DP 300/500 | 300 | 500 | 0.600 | 30-34 | 0.16 | 1 |
| HSLA 350/450 | 350 | 450 | 0.778 | 23-27 | 0.14 | 1.1 |
| DP 350/600 | 350 | 600 | 0.583 | 24-30 | 0.14 | 1 |
| DP 400/700 | 400 | 700 | 0.571 | 19-25 | 0.14 | 1 |
| TRIP 450/800 | 450 | 800 | 0.563 | 26-32 | 0.24 | 0.9 |
| DP 500/800 | 500 | 800 | 0.625 | 14-20 | 0.14 | 1 |
| CP 700/800 | 700 | 800 | 0.875 | 10-15 | 0.13 | 1 |
| DP 700/1000 | 700 | 1000 | 0.700 | 12-17 | 0.09 | 0.9 |
| MART 950/1200 | 950 | 1200 | 0.792 | 5-7 | 0.07 | 0.9 |
| MART 1250/1520 | 1250 | 1520 | 0.822 | 4-6 | 0.065 | 0.9 |

2.3. Gerilme Şekil Değişirme İlişkileri

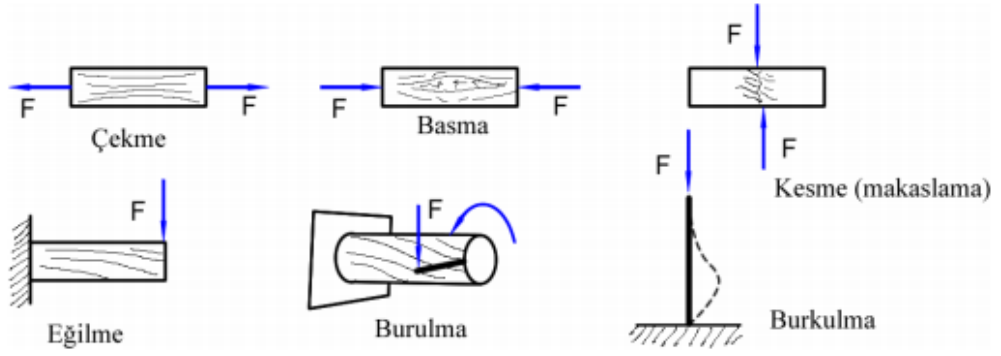
Dış kuvvetlerin ve momentlerin etkisi altındaki malzemenin herhangi bir kesitinde, tepki olarak iç kuvvetler meydana gelir. Birim alana gelen iç kuvvetlere gerilme adı verilir. Bu oluşan gerilmeler sadece iç kuvvetlere ve cismin kesit alanına bağlıdır. Gerilme, malzemenin içinde bulunan zorlanmayı gösteren bir büyüklüktür ve kuvvetin alana bölünmesi ile bulunur. Birimi ise N/mm^2 'dir. Yani basınç birimi ile aynıdır. Basınç katı malzemenin dışında oluşan bir zorlanma iken, gerilme ise malzemenin içinde oluşmaktadır (Çayıroğlu 2019).

Temelde gerilmeler ikiye ayrılırlar. Bunlar “Normal Gerilme” ve “Kayma Gerilmesi” olarak adlandırılır. Zorlanma çeşitlerine ve malzeme içindeki moleküllerin hareketlerine göre de ifade edilebilir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Gerilme çeşitleri (Gök ve ark. 2018)



Parça çekme, basma, eğilme gibi yüklenme durumlarına maruz kalıyorsa üzerinde oluşan gerilme normal gerilme (σ) olarak tanımlanır. Parça üzerindeki kesit düzlemleri birbirinden uzaklaşmaya veya yakınlaşmaya çalışır. Parça, kesmeye veya burulmaya maruz kalıyorsa üzerinde oluşan gerilme kayma gerilmesi (τ) olarak tanımlanır. Parça üzerindeki kesit yüzeyleri birbiri üzerinde kaymaya çalışır.

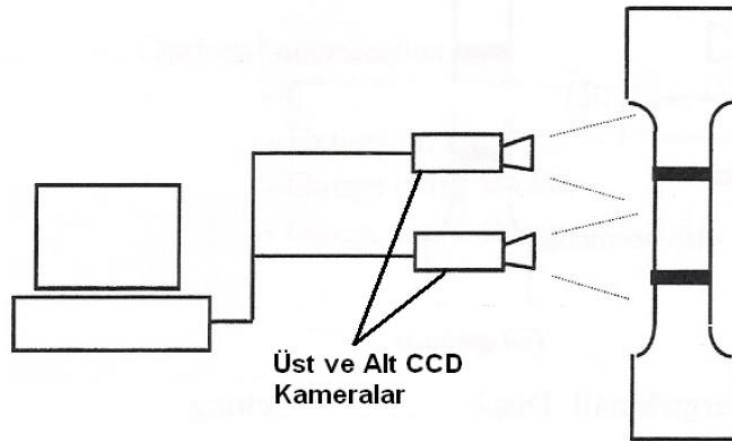


Şekil 2.2. Malzeme üzerinde oluşan değişik tipteki gerilme türleri

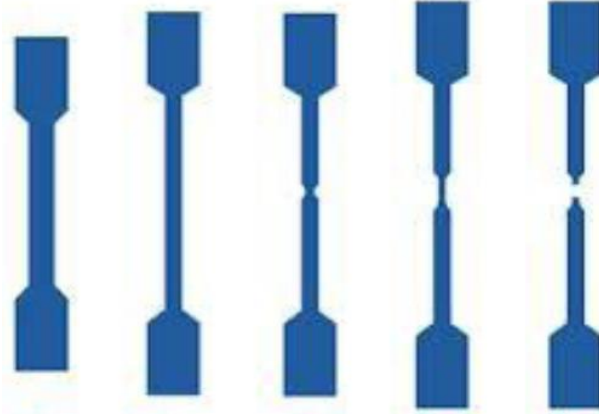
Çekme Deneyi:

Çekme deneyi, parçaya ait mekanik özelliklerin statik yük altında tespit edilmesi ve davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılır. Deney sonucunda elde edilmiş veriler mühendislik açısından çok önemlidir ve tüm analizler bu sonuçlara göre yapılır.

Öncelikle standartlara uygun çekme numunesi hazırlanır. Daha sonra bu numune çekme cihazının çenelerine bağlanarak artan bir kuvvetle kopuncaya kadar çekilir. Kuvvet değişimi kuvvetölçer (load cell) ile boy değişimi de Şekil 2.3’de şematik olarak gösterilen bir video ekstensometre ile temassız olarak ölçülmektedir (Anonim 2009).

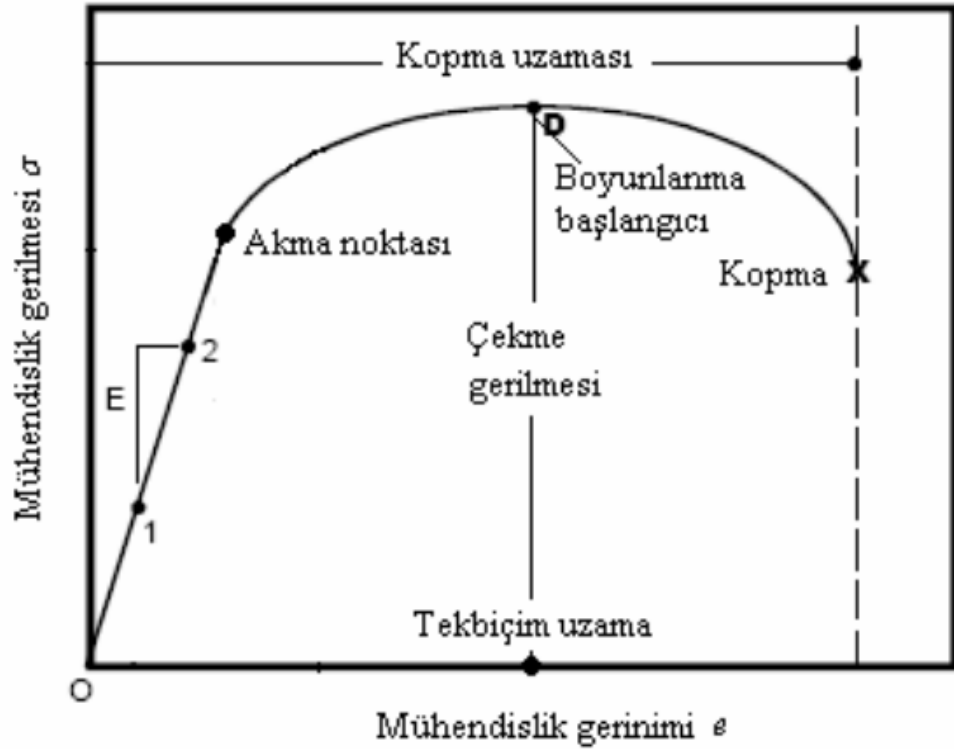


Şekil 2.3. Deformasyon ölçüm sistemi (Anonim 2009)



Şekil 2.4. Çekme esnasında deney numunesinin almış olduğu şekiller

Yapılan çekme deneyleri ile gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma noktası, % uzama, elastiklik modülü, pekleşme üsteli gibi malzemeye ait mekanik özellikler belirlenebilmektedir. Şekil 2.5’ de tek eksenli çekme testinden elde edilen basit mühendislik gerilmesi - mühendislik gerinimi eğrisinin niteliklerini örnelemektedir.



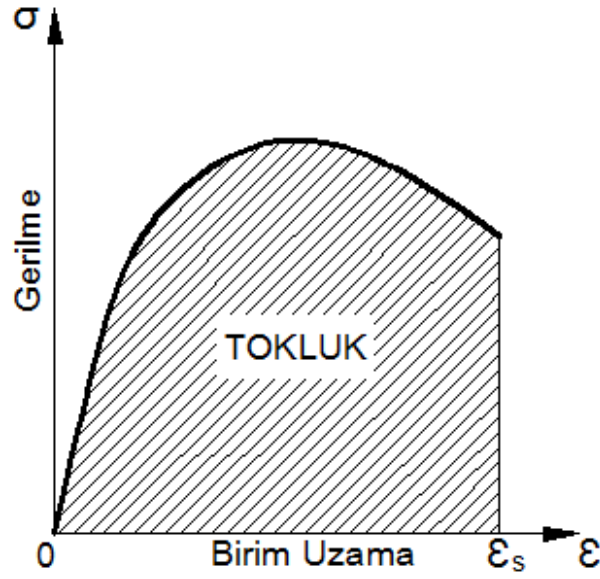
Şekil 2.5. Mühendislik gerilmesi – mühendislik gerinimi eğrisinin temel nitelikleri

Akma Dayanımı (σ_a): Malzemenin gerilme-gerinim grafiğinde, başlangıç elastik eğimin saptmaya başladığı noktada ölçülen gerilme değeri akma dayanımıdır. Belirgin veya belirgin olmayan akma olmak üzere iki şekilde oluşabilmektedir. Akmanın belirgin olmadığı durumlarda, % 0,2 uzama değerinden elastik eğriye paralel çizilip bu çizginin gerilme-gerinim grafiğini kestiği noktadaki gerilme değeri genellikle akma dayanımı olarak kabul edilir. Belirgin akmanın olduğu durumlarda ise malzemenin çekme testi eğrisinde, uzamanın sürekli artmasıyla beraber, gerilmeye ani bir düşüş ve hemen ardından bir miktar yükselmeye beraber sık aralıklarla yukarı aşağı dalgalanmalar meydana gelir (Değirmenci 2009).

Çekme Dayanımı (σ_c): Çekme testi süresince malzemenin mühendislik grafiğinde gözlemlenen en yüksek gerilme, çekme dayanımı (S_U , S_C) olarak adlandırılmaktadır. Çelik saca uygulanan bir şekillendirme işleminde azami yükün üst sınırıdır. Bu gerilmeden sonraki deformasyonla beraber malzemede boyun oluşmaya başlar.

Kopma noktası (σ_k): Çekme malzemesi üzerinde oluşan gerilme en üst noktaya çıkışında, kesitte büzülme görülür ve gerilme azalır. Malzemenin, kuvveti karşılayamaması sonucunda kopma gerçekleşir ve bu nokta kopma mukavemeti olarak tanımlanır.

Tokluk: Malzemenin kopana kadar absorbe ettiği toplam enerjiyi ifade eder. $\sigma - \epsilon$ eğrisinin altında kalan alana eşittir. Sünek malzemelerin tokluğu gevrek malzemelere göre daha yüksektir.



Şekil 2.6. Gerilme birim şekil değiştirme grafiğinde tokluğun bulunması (Gök ve ark 2018)

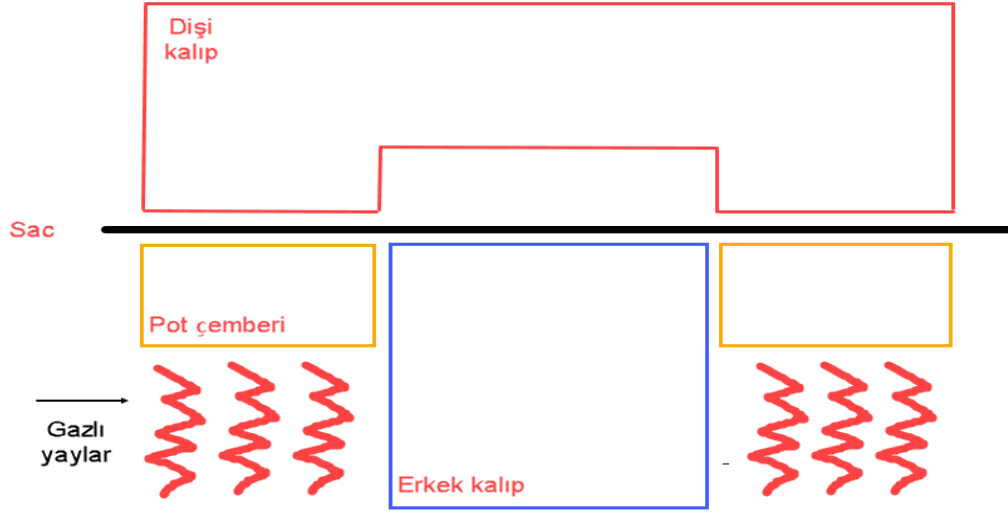
2.4. Sac Metal Şekillendirme İşlemleri

Çelik sac malzemeler istenen nihai parçalara ulaşmak için mekanik ve hidrolik presler kullanılarak farklı biçimlerdeki geometrilere şekillendirilirler. Sac malzemelerin form verme (derin çekme), bükme, kesme, delme gibi operasyonlardan geçirilmesi sonucu şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Şekillendirme işlemi sonucunda nihai parçada ondülasyon, yırtık, aşırı incelme, geri yaylanma gibi kusurların olması istenmemektedir. Bu sebeple şekillendirme sonucu sac malzeme üzerinde oluşan gerilmelerin her malzeme için istenen tolerans değerlerinin içinde olması gerekmektedir (Değirmenci 2009).

2.4.1. Derin Çekme (Form Verme)

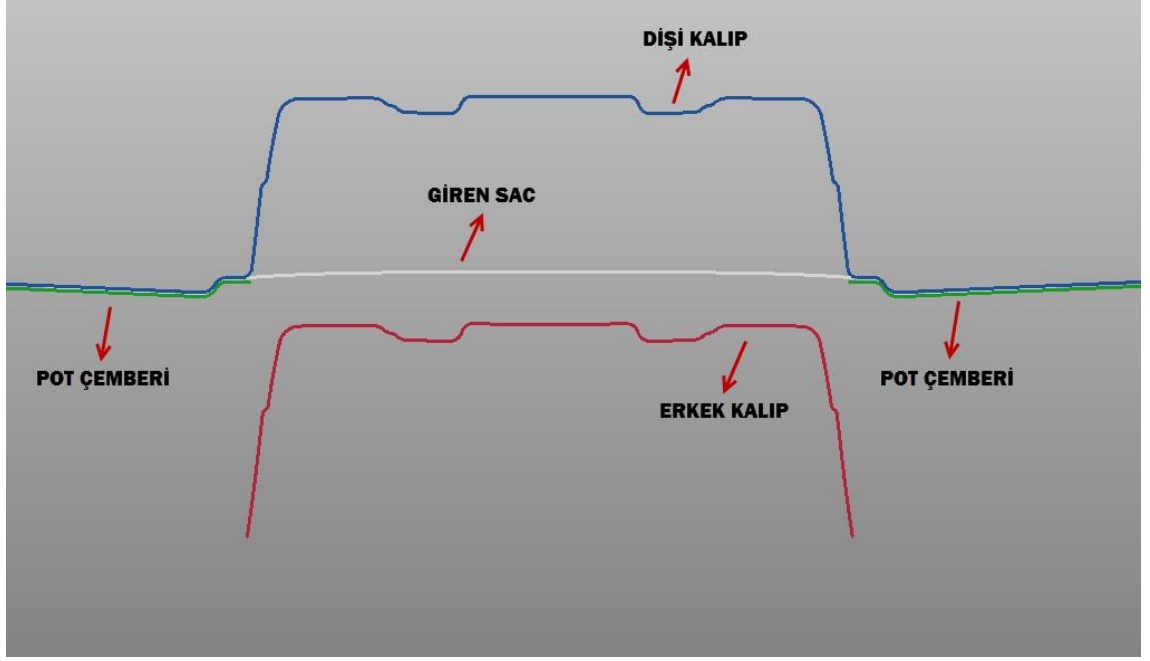
Form kalıpları, düz levha halindeki sac malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan ana yöntemlerdendir. Otomotiv endüstrisinden beyaz eşya ve mutfak gereçlerine kadar kullanım alanları oldukça geniştir.

Form kalıpları yapı itibari ile Şekil 2.7’ de gösterildiği gibi erkek, dişi ve pot çemberi olmak üzere 3 ayrı kalıp setinden oluşur.

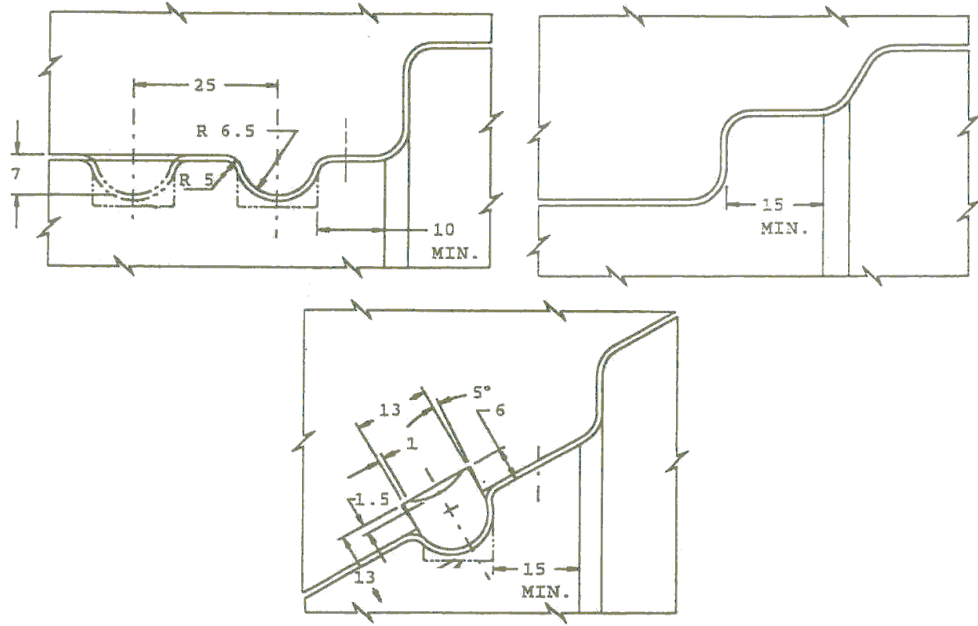


Şekil 2.7. Sıvama işleminin gösterimi (Tunalı 2019)

1. aşamada, öncelikli olarak düz levha halindeki sac malzeme pot çemberi üzerinde konumlandırılır. Pres kuvvetinin etkisiyle üst kalıp aşağıya inerek sac ile ilk temas gerçekleştirilir ve pot çemberi üzerinde bulunan süzme kanallarının formu verilmiş olur (Şekil 2.8). Şekillendirme esnasında malzeme pot çemberi ile dişi arasında tutularak sıkışma ve gerilmelere maruz kalır. Pot çemberinin amacı, derin çekme işlemine başlamadan önce sac malzemeyi sabit tutmak ve malzemenin kalıp boşluğuna akabileceği kadar bir baskı kuvveti uygulamasıdır. Bu sayede erkek kalıp üzerinden sac akarken kırışma engellenmiş olur. Bazı durumlarda nihai parçanın geometrisi sebebiyle veya malzeme seçiminden kaynaklı olarak form verme sonucunda sac malzeme kırışmaya eğilimlidir. Buna istinaden kırışan bölgeleri iyileştirmek için pot çemberi üzerinde süzme kanalları açılarak gerekli iyileştirmeler gerçekleştirilir. Şekil 2.9’ de pot çemberi üzerine atılan süzme kanalı tipleri gösterilmiştir. Sac malzeme çekme radyüsünden geçerek şekillendirilir.



Şekil 2.8. Dişi kalıp ile pot çemberinin kapanmasına ait kesit görünümü



Şekil 2.9. Süzme kanalı tipleri

2. aşamada, dişi kalıp pres kuvvetinin etkisiyle pot çemberinin altında bulunan gazlı yayların kuvvetini yenerek aşağı yönde harekete başlar. Çekilmekte olan sac malzeme erkek kalıbın şeklini almaya başlayarak deformasyon başlar (Şekil 2.10).

Derin çekme operasyonu sırasında form verilen sac malzeme yüzeyinde aşağıda belirtilen gerilmeler meydana gelmektedir (Esener 2006).

- Dişi kalıp ile pot çemberi arasında oluşan radyal çekme
- Dişi kalıp ile erkek kalıp arasında oluşan sürtünme ve malzemede meydana gelen çekme gerilmesi
- Erkek kalıp ağız çevresi boyunca malzemede çekme, basma ve kayma gerilmesi
- Erkek kalıbında en derin form boyunca malzemede eğilme, kayma, basma ve çekme gerilmesi
- Erkek kalıbın yüzeyinde uzama ve kayma gerilmesi

2.4.2. Kesme Kalıpları

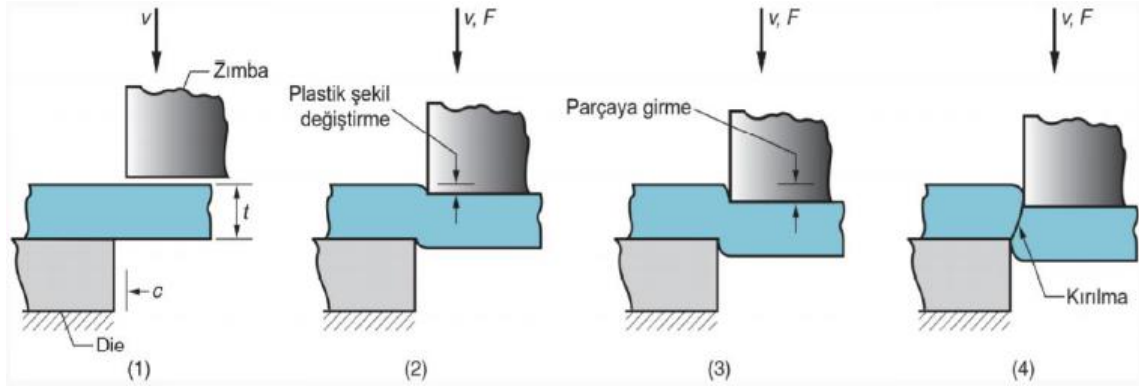
Saclar genel itibari ile rulo ya da plakalar halinde gelerek istenen ölçülere getirilmesi için kesme işleminden geçer. Bu kesme işlemi bir makas veya bir kesme aleti ile talaş kaldırmadan, malzemenin bir hat boyunca tamamen ayrılmasıdır. Kesme ve delme kalıplarında kuvvetlerin malzemeye etkisiyle kesme işlemi meydana gelir.

Alt erkek kalıp ve üst baskı plakası arasında sıkıştırılan sac malzemesi basınç altında aşağıdaki kesme işlemlerine tabi tutulur (Demirkol 2010, Groover ve ark. 2010, Marciniak ve ark. 2002).

Şekil 2.12’de sac malzemesinin kesilmesi esnasındaki aşamaları gösterilmiştir. Yapılan bu kesme işlemi 4 aşamada inceleyebiliriz.

- Birinci safhada kesme zımbası sac malzemeye temas ederek basınç etkisi yapar. Böylece sac malzemenin elastikiyet sınırı aşılarak malzemede plastik deformasyon başlamış olur
- İkinci safhada basınç etkisinde olan sac malzemesinin, kesme zımbasının aşağı yöndeki hareketi ile ezilmesi devam eder
- Üçüncü safhada kesme zımbası malzeme kalınlığının 0,3 katı kadar malzemeye dalar ve malzeme alt kalıp boşluğuna doğru akmaya başlar

- Dördüncü safhada ise kesme zımbası aşağı yöndeki hareketine devam edip, sac kalınlığının 0,6 katı kadar malzemeyi geçtiğinde kesme işlemi tamamlanmış olur ve bu aşamada kesme zımbası malzemeyi kalıp boşluğundan iterek düşürmektedir



Şekil 2.12. İki kesme kenarı arasında sac metalin kesilmesi (Demirkol 2010)

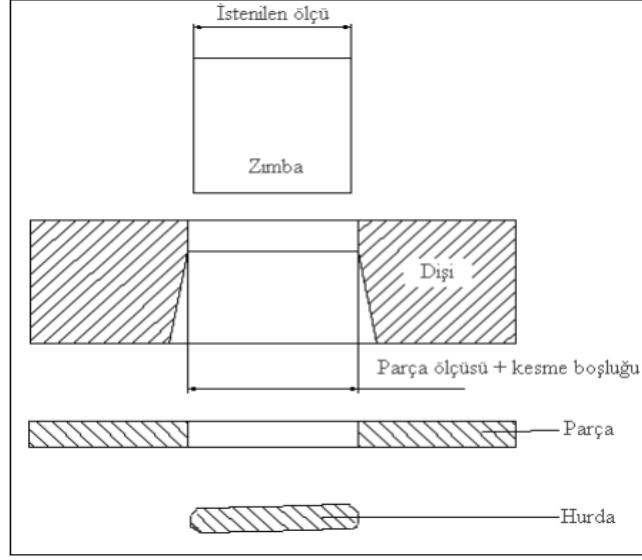
Kesme kalıplarında dikkat edilmesi gereken parametreler; alt kalıp ile zımba arasındaki kesme boşluğu, kesme işlemin yapılacağı malzemeye ait mukavemet değeri, sac malzemesinin kalınlığı ve kesme konturunun uzunluğudur.

Kesme boşluğu: Erkek kalıp ile zımba arasında verilen boşluk kesme boşluğu olarak adlandırılır. Eğer iki kalıp arasında boşluk verilmez ise kesmeyi yapan zımbada zorlanma meydana gelir. Bu durumda da kalıp elemanlarında aşınma ve maruz kalınmasını istemediğimiz gerilmeler görülür. Kesme boşluğu verilirken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, verilen boşluğun kesme ağzı boyunca eşit olmasıdır. Eğer kesim esnasında kesme boşluğu fazla olursa, kesme işleminde malzeme bükülerek uzayacağı için nihai parçada çapak yapmış olur. Ayrıca kesme boşluğunun az olması zımbayı daha fazla zorlanmaya maruz bırakacağı için kalıbın ömrünü de azaltır (Ataşimşek 1977).

Kesme boşluğunun bağlı olduğu parametreler şunlardır:

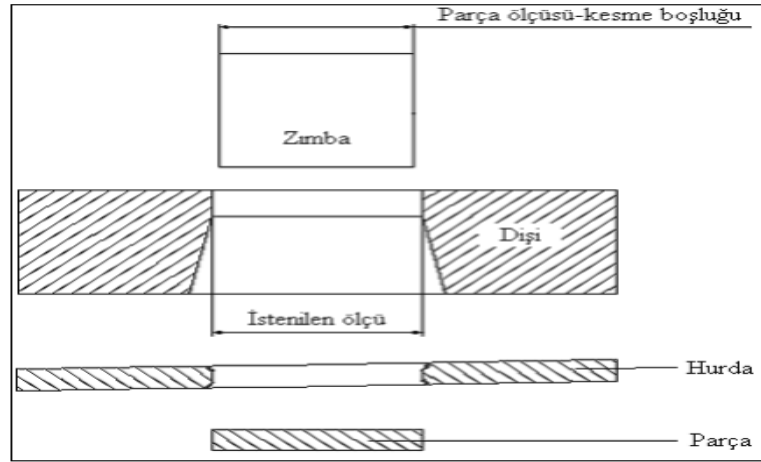
- Kesilecek olan sac malzemesinin mukavemetine
- Kesilecek olan sac malzemesinin kalınlığına
- Kesmeyi yapan zımbanın ölçülerine ve geometrisine
- Kalıbın hassasiyetine

Parça üzerinde delik açılmak isteniyorsa kesme boşluğunu alt kalıba vermemiz gerekir. Böylece nihai parçada istediğimiz deliklerin çaplarını zımbanın çapları belirlemiş olur (Şekil 2.13) (Ataşımşek 1977).



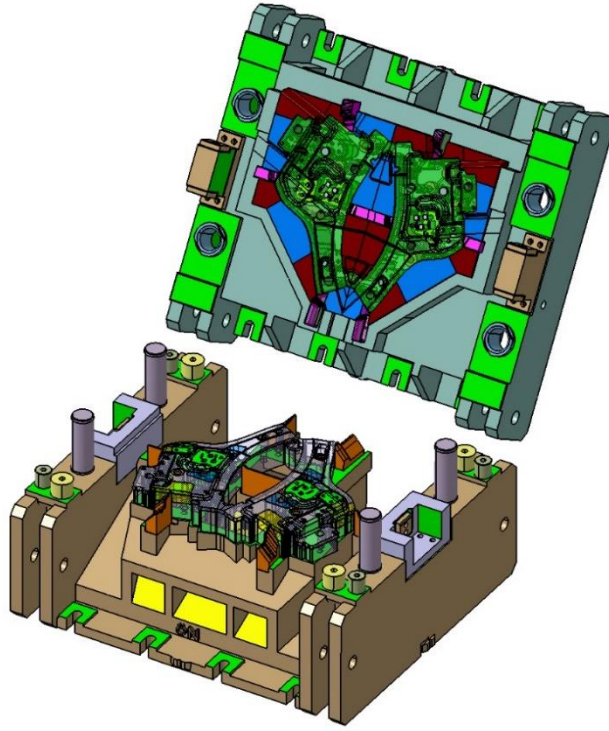
Şekil 2.13. Kesme boşluğunun alt (dişi) kalıba verilmesi

Şayet, final parçasının son şeklini alması için malzemedен belirli ölçülerde parçalar üretilecek ise kesme boşluğu zımbaya verilir ve kesme zımbasının boyutu kesme boşluğu kadar azaltılır. Burada kesme işlemini gerçekleştiren alt kalıptır. Böylece alt kalıbın ölçüsü parçanın ölçüsünü belirler (Şekil 2.14) (Ataşımşek 1977).



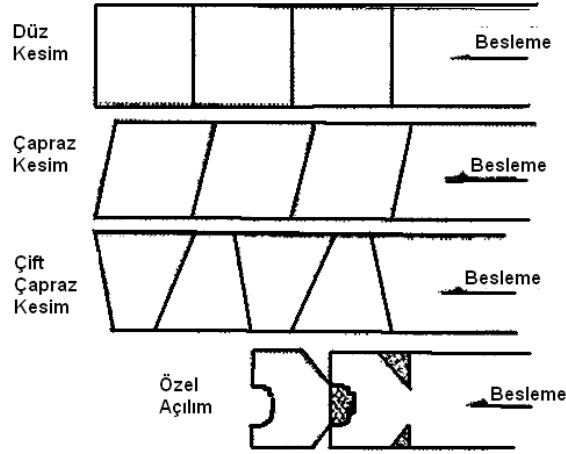
Şekil 2.14. Kesme boşluğunun erkeğe verilmesi

Çevre Kesme Kalıpları: Çevre kesme kalıbının yapısı genel itibari ile alt, üst kalıplar ve baskıdan meydana gelir (Şekil 2.15.) Baskı plakası sac malzemeyi kesme işlemi başlamadan önce alt kalıba bastırarak sabitlemesinde görev yapar. Kuvvet, baskı ile üst kalıp arasına yerleştirilmiş yaylar ile sağlanır. Yataklanması sürtünme plakası veya merkezleme milleri ile yapılır. Kenar kesme, bir defada tüm çevre olabildiği gibi operasyon planında uygun görülmesi halinde birden fazla kalıp ile de parçalı kesim yapılabilir.



Şekil 2.15. Kesme operasyonuna ait alt-üst kalıp ve baskı plakası

Açınım Kesme Kalıpları: Açınım kalıpları, plaka veya rulo sac malzemeden parça elde edilebilecek asgari malzeme boyutlarında kesim yapar. Ayrıca, parçanın son şeklini başka bir kesim gereği olmadan verebilecek şekilde olabileceği gibi, basit dikdörtgen bir kesim de olabilir (Şekil 2.16).

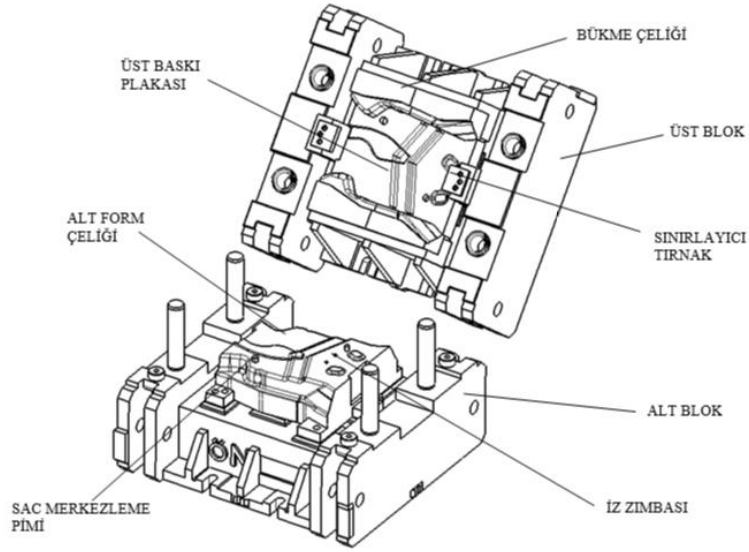


Şekil 2.16. Rulo sac malzemenen parça elde etmek için hazırlanan açınım kesme çeşitleri

2.4.3. Bükme Kalıpları

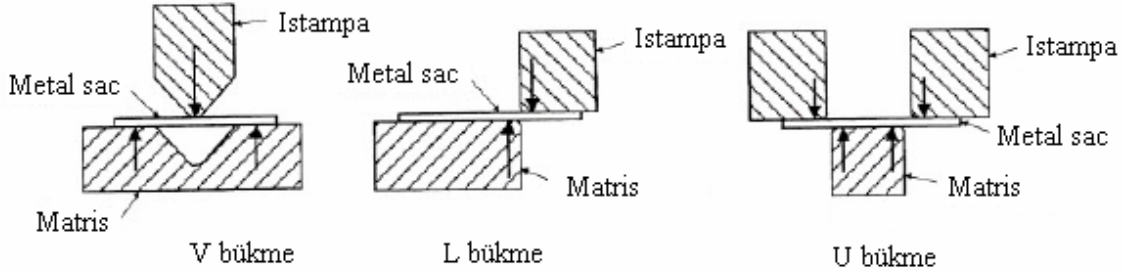
Bükme, uygulanan kuvvet sonucu sac malzemenen talaş kaldırmadan tarafsız eksen doğrultusunda döndürülerek şekillendirme işlemidir. Basma gerilmesinin aşılmasıyla birlikte meydana gelen akma gerilmesi bükülen sac malzemede plastik deformasyon oluşturur ve uygulanan kuvvet ortadan kaldırıldığında parça kalıcı şeklini korur (Işıktaş 2009). Bükme işleminde uygulanan kuvvetin, malzemenin esnekliğini yenebilmesi ve yön değiştirme yapabilmesi için yeterli olması gerekir.

Bükme kalıplarında, açınım olarak kesilmiş sac malzemenin veya önceki operasyonlar sonucu form almış parçaların bükülmesi gerçekleştirilir. Bükmenin amacı, konstrüksiyon şartlarına göre, istenen parçayı meydana getirmektir. Bükme kalıbı esas olarak alt, üst ve parçanın konumunu bükme süresince sabitleyen baskı plakasından meydana gelir. Baskı kuvvetleri genellikle gazlı yaylar ile sağlanır.



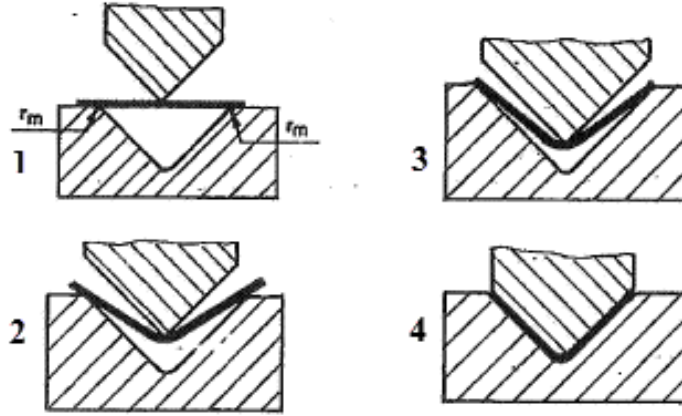
Şekil 2.17. Bükme kalıbına ait alt-üst tabla ve baskı plakası

Bükme işleminde Şekil 2.18’de gösterildiği gibi en çok kullanılan yöntemler V bükme, kenar bükme (L bükme) ve U bükmedir.



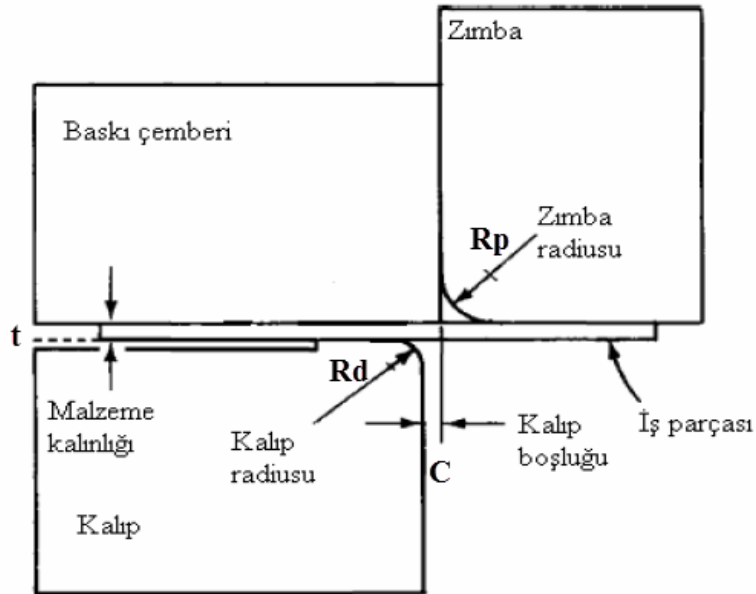
Şekil 2.18. En yaygın bükme işlemleri (Mielnik 1991)

V Bükme: V bükme kalıbında öncelikli olarak zımbanın, iş parçasına doğru kalıp merkezi doğrultusunda pres kuvveti ile inerek sac ile teması gerçekleşir. Daha sonra dışi zımba erkek zımbaya sac kalınlığı kadar girerek, malzemenin iç yüzeyinde kısılma dış yüzeyinde ise uzama gerçekleştirir. Son aşamada ise sac levha, kalıbın tamamen kapanmasıyla birlikte yalnızca zımba ucunun değil, dışi ve erkek zımba formunun şeklini tamamen almış olur (Işıktaş 2011).



Şekil 2.19. V bükme işleminin aşamaları

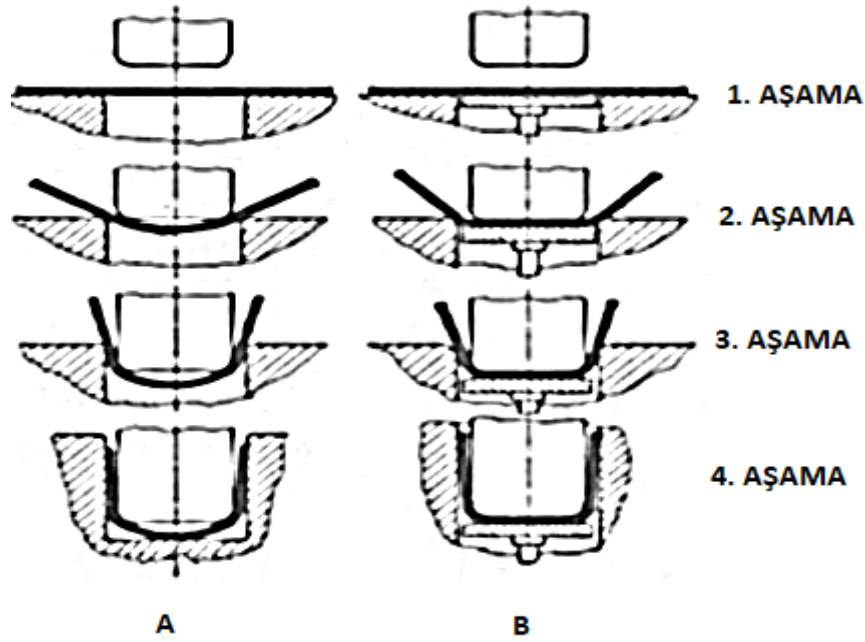
Kenar Bükme (L Bükme): Kenar bükme (L bükme) yönteminde, sac malzeme üstten baskı plakasının kuvvetiyle alt kalıp üzerinde sabitlenir. Daha sonra sabitlenmiş sac malzeme, bükme çeliğinin aşağı yönde hareketi ile sac kenarını şekillendirir. Şekil 2.20'de kenar bükme kalıbına ait kesit görünümü gösterilmektedir. (Ling ve ark. 2005).



Şekil 2.20. Kenar bükme işlemi (Ling ve ark. 2005)

U Bükme: Kalıbın sahip olduğu şekilden dolayı bu tip kalıplar U bükme kalıpları olarak adlandırılır. U bükme kalıplarında nihai parçanın istenen sonuca ulaşabilmek ve bükülecek parçanın üst yüzeyinin düzgün çıkmasını sağlamak için alt kalıpta hareketli

baskı plakası kullanılır. Kullanılan hareketli parça aynı zamanda bükme işlemi gerçekleşmeden önce üzerinde bulunan dayamalar yardımıyla sacın sabitlenmesini ve bükülmüş sac parçasının kalıptan alınmasını sağlar. Baskı plakalarının hareketi genellikle gazlı yaylar ile sağlanır. Şekil 2.21’de A sırasında hareketli baskı plakası kullanılmamış kalıp, B sırasında ise hareketli baskı plakası kullanılmış U bükme kalıbı görülmektedir. (Ataşımşek 1977).



Şekil 2.21. U bükme kalıbındaki aşamalar (Ataşımşek 1977)

Bükme açınım uzunluğu hesabı: Sac malzemesinin, bükme işlemi esnasında parçanın iç kısımdaki radyüslerinin küçük olması sebebiyle bükülen etek kısmında plastik uzama meydana gelir ve işlem tamamlanana kadar parça uzar. Açınım uzunluğu hesabı yaparken, final parçaya ait ölçülerin tam olması için meydana gelen uzama miktarı dikkate alınmalıdır. (Demirkol 2010, Groover ve ark. 2010, Marciniak ve ark. 2002).

(2.1)

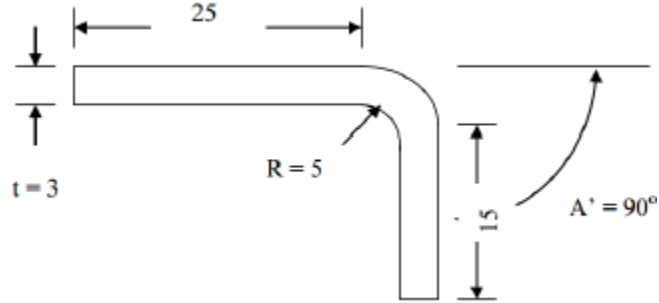
$$BA = 2\pi \frac{A}{360} (R + K_{ba} \cdot t)$$

Bu denklemde “BA” Açınım uzunluğu (Bükme işlemi yapmadan önce olması gereken kenar uzunluğu), “A” Bükme açısı (°), “R” Bükme yarıçapı (mm), “ K_{ba} ” Uzama faktörü ve “t” sac malzemesinin kalınlığını temsil etmektedir.

(2.2)

$$R < 2t, \quad K_{ba} = 0,33$$

$$R \geq 2t, \quad K_{ba} = 0,50$$



Şekil 2.22. Örnek bükme açılımı (İlhan 2018)

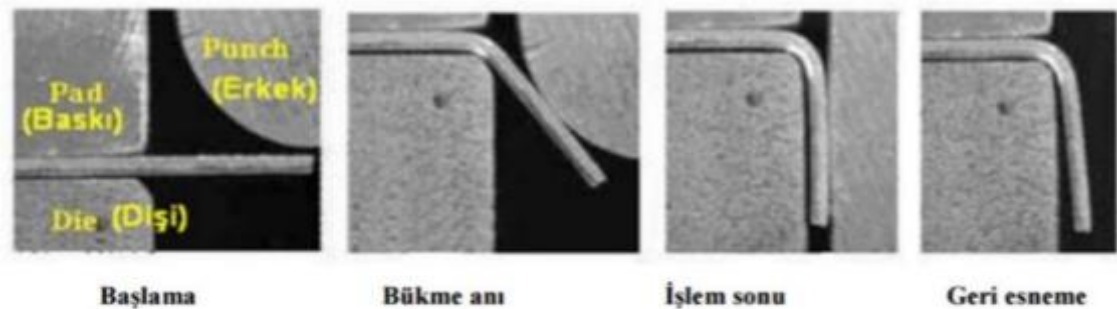
(2.3)

$$BA = 2\pi \frac{90}{360} (5 + 0,35 \times 3) = 9,5 \text{ mm}$$

Parçanın Başlangıç Boyu = 25 + 9.5 + 15 = 49.5 mm olarak kesilmelidir.

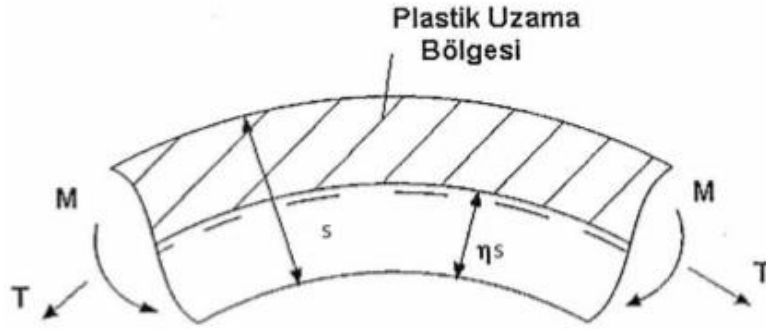
2.5. Geri Yaylanma

Sac malzeme, yüksek kuvvetler altında derin çekme, germe ve bükme gibi operasyonlardan geçirildiğinde plastik şekil değişikliğine maruz kalır. Malzemenin üzerine uygulanan yük kaldırıldığında ise elastik deformasyon bölgesinde kalan kısımlar eski haline geri döner. Malzemenin bu durumu geri yaylanma olarak tanımlanır.



Şekil 2.23. Bükme işlemi operasyon sırası ve geri yaylanma (İlhan 2018)

Sac malzemesinin bükme işlemi sırasında elastik bölgeyi geçmesiyle birlikte sacın dış yüzeyinden içe doğru plastik deformasyon başlar (Şekil 2.24). Plastik deformasyona maruz kalan bölge malzeme kalınlığının belli bölümünü oluşturur. Plastik deformasyon oluşan bu kısım η oransal çarpanla $s(1 - \eta)$ olarak tanımlanır (Demirkoç 2010).



Şekil 2.24. Bükme ve çekme etkisindeki bir sac kesitindeki plastik uzama bölgesinin dış yüzeyden iç yüzeye doğru $s(1 - \eta)$ derinliğinde dağılımı (Ergeldi 2002)

Şekil 2.25’de 90° derece ile bükülmüş formsuz düz sac malzemesinin, iç kısımlarında basma, dış kısımlarında ise çekmenin gerçekleştiği görülmektedir. Parça büküldüğünde, iç yüzeyi basma dış yüzeyi ise çekme gerilmesine maruz kalır. Genellikle parçada oluşan basma gerilmesinin büyüklüğü çekme gerilmesinden büyüktür (Işıқтаş 2009).



Şekil 2.25. Bükmenin sebep olduğu molekül hareketleri (Işıқтаş 2009)

2.5.1. Geri Yaylanmanın Telafisi

Sac malzemenin şekillendirilmesinden sonra, arzu edilen final parçasının geometrisi etkilendiği için geri yaylanma telafisi gerekmektedir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak

geri yaylanma miktarı ne kadar yüksek olursa olsun, uygun kalıp tasarımları ile geri yaylanma sonuçlarına müdahale etmek mümkün olmaktadır. Ancak, tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir (Gan ve ark. 2004, Tekiner 2004).

Geri yaylanma telafisi yapılırken sonlu elemanlar analiz programlarından faydalanılabilir. Şekillendirme sonrasında nihai parçanın tolerans değerleri içerisinde çıkmasını sağlamak amacıyla telafi yöntemi kullanılır. Bu yöntem, analiz programlarından elde edilen geri yaylanma miktarlarının, simülasyon çözümleri ile kalıp yüzeylerinin ters yönde aynı miktar kapatılmasıyla yapılan kırma işlemidir. Yapılan iterasyonlarda her zaman aynı miktarda telafi vermek yetmeyebilir, böyle durumlarda parçayı daha fazla kapatmak gerekmektedir. Analiz programlarında yapılan telafi çalışması tamamlandıktan sonra gerekli olan tüm veriler CAD ortamına alınarak CAM için gerekli olan kalıp yüzeyleri tekrar düzenlenir. Burada kalıptan çıkan parçanın ölçüm taraması ile karşılaştırıp verilen telafinin ne oranda doğru olduğu kontrol edilebilir. 90° olan dik duvarlarda telafi işlemi zordur. Çünkü geri esneyen parçalarda parçayı kapatmak için ters açı oluşma olasılığı vardır. Yani kalıp eksenine doğrultusunda bakıldığında, kalıp üzerinde görülemeyen noktalardır. Ayrıca ters açıda kalan parçanın kalıptan çıkarılması da zor olacaktır. Böyle bir geometri üzerinden devam edilemez. Bu nedenle geri yaylanma telafisi içeren datanın tekrar kontrol edilmesi gerekir.



Şekil 2.26. A kesitine sahip bir geometrinin B kesitine geri yaylanmasının ardından C kesiti şeklinde geri yaylanma telafisi içeren geometrinin gösterimi (Ergeldi 2002)

2.5.2. Geri Yaylanma Davranışını Etkileyen Parametreler

Parçaların, istenen tolerans sınırlarında kalabilmesi ve final geometrinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için geri yaylanma davranışının önceden bilinmesi gerekmektedir (Tekiner, 2004).

Geri yaylanmanın önceden tahmini ve kontrolü, şekil verilen parçanın kalitesini arttırmak ve düşük maliyetli nihai ürünler ortaya çıkarmak açısından çok önemlidir. Geri yaylanmanın doğru bir şekilde tahmin edilmesi için geri yaylanma üzerinde etkili parametrelerin ve bunların varyasyonlarının bilinmesi gerekir. Malzeme özellikleri ve işlem parametrelerine bağlı olan geri yaylanma miktarı, doğru olmayan bir telafi yöntemi ile tahmin edilirse, yapılan tekrar işçiliklerini arttırarak kalıp maliyetine ve zaman kaybına yol açmış olur (Gündü, 2000).

Geri yaylanma;

- Sac malzemesinin kalınlığına
- Malzemenin kimyasal yapısı ve işlem parametrelerine (sıcaklık vb.)
- Malzemenin mekanik özelliklerine (elastikiyet modülü, akma dayanımı, pekleşme üsteli, vb.)
- Şekillendirme esnasında sac malzemesinin alt ve üst kalıp arasında kalma süresine
- Kalıbın ölçülerine
- Sac malzeme üzerine etki eden kuvvete

bağlı olarak değişmektedir.

Bunun yanı sıra,

- Bükme yarıçapı / malzeme kalınlığı (R/S) oranı büyükse, geri yaylanma miktarının buna bağlı olarak daha büyük olduğu
- Alt ve üst kalıp kapandığında oluşan boşlukların fazla olması sebebiyle daha büyük bir geri yaylanmaya neden olduğu
- Geri yaylanmanın bükme yarıçapıyla doğru orantılı olarak değiştiği
- Bükme yarıçapı büyüdükçe geri yaylanma miktarının arttığı

bilinmektedir (Ataşimşek 1979, Uzun 1983).

2.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), belirli yük ve sınır koşullarında kompleks geometriye sahip tasarım problemlerini, daha basit alt problemlere indirgeyerek her birinin farklı iterasyonlar sonucunda simüle edilip çözülmesiyle elde edilen yöntem şeklidir. Bu yöntem ile kalıp yüzeylerine ait geometri bilgisini oldukça başarılı bir şekilde matematiğe dönüştürebiliriz.

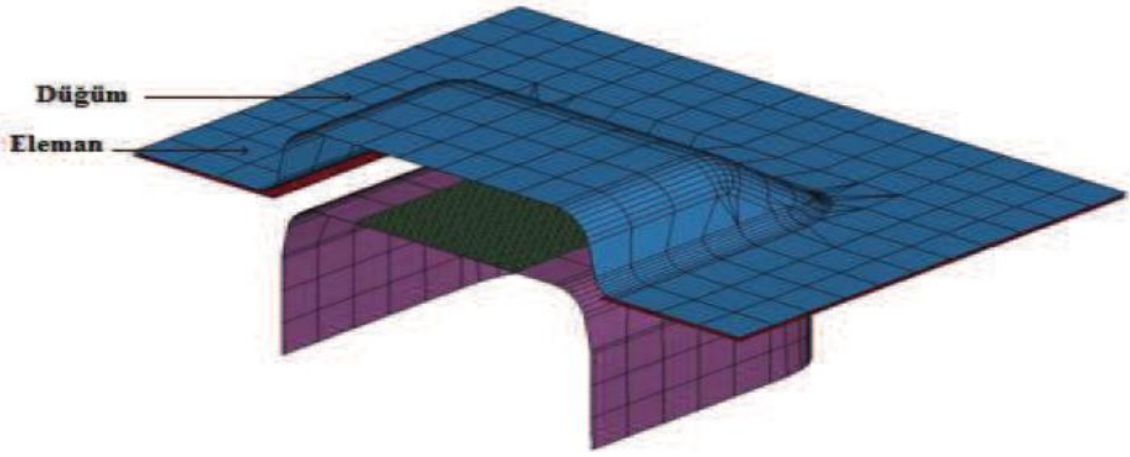
Sonlu elemanlar analizi yapılırken girdi parametrelerini, ağ yapısı ve eleman tipi, eleman boyutu, sınır şartları ve malzeme özellikleri olarak tanımlayabiliriz. Yapılan simülasyon çalışmasında, istenilen doğru sonuca ulaşmak için giren tüm parametrelerin dikkatlice seçilmesi oldukça önemlidir.

Sonlu elemanlar yönteminin uygulama aşamalarında “Düğüm”, “Eleman” ve “Mesh” kavramları yapılan çalışmaların sonuçlarını doğru tespit etmekte büyük önem taşır.

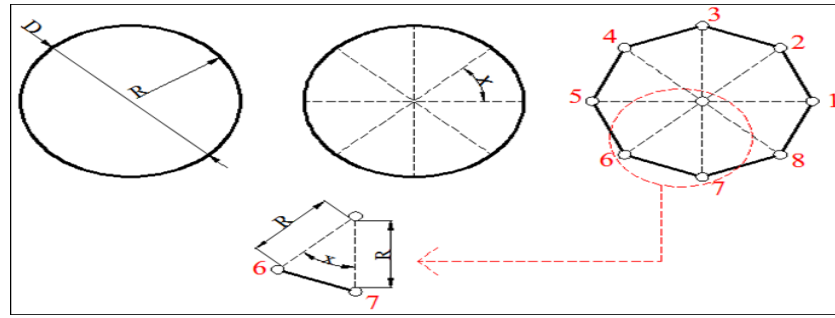
Düğüm (node): Bu yöntemde modeller, sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bölünen elemanlar belli noktalardan birbirleri ile bağlanır ve bu noktalara düğüm (node) adı verilir. Katı modellerde, düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elemanların gerilmeleriyle ilişkili iken, her bir elemandaki yer değiştirmeler ise doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilidir. Bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri sonlu elemanlar yöntemi çözmeye çalışır. Böylelikle gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur. Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir (Topçu 1998, Kaya 2013).

Eleman (element): Sistemi tanımlayan bölge, sonlu elemanlar yönteminde eleman (element) olarak adlandırılan basit geometrik şekillere parçalanır. Ardından bu elemanlar, "düğüm" adı verilen özel noktalardaki bilinmeyen değerler cinsinden ifade edilir. Elemanların birleştirilmesi sonucu lineer veya lineer olmayan cebirsel denklem seti sınır koşullarını da içerecek şekilde elde edilir. Denklemlerin çözümü, sistemin yaklaşık davranışını verir. Sonlu elemanlar yönteminde elemanlar geometrisine göre, üçgen, dörtgen, paralel kenar elemanlar olarak sınıflandırılırken, boyutlarına göre tek boyutlu,

iki boyutlu, dönel elemanlar, üç boyutlu ve izoparametrik elemanlar olarak sınıflandırılırlar. Yöntem düğüm noktaları için tanımlanmış Şartları, cebirsel lineer denklemlere çevirir, önce bu denklemler çözülür ve bütün elemanlardaki gerçek gerilmeleri bulmaya çalışır. Eleman sayısı optimize edilmelidir. Fazla sayıda elemana bölünmesi sonlu elemanlar analizinde yanlıŐ sonuç çıkmasına neden olur (Topçu 1998, Kaya 2013).



Şekil 2.27. Sac Şekillendirme sonlu elemanlar modeli (Sönmez 2015)



Şekil 2.28. Daireyi elemanlara bölmek (Gök ve ark. 2018)

Mesh oluŐturma: Mesh (ağ) oluŐturma işlemi, düğüm noktalarının ve elemanların koordinatlarını oluşturur. Ayrıca, kullanıcı tarafından girilen minimum bilgiye karşılıklı uygun değer sürede otomatik olarak düğüm noktalarını ve elemanları sıralar, numaralanmasını sağlar. Mesh retme konusunda kullanıcının ayrıca üzerinde mesh üretilen alanda, hangi bölgelerin eleman yoğunluğunun daha az olacağına, hangi bölgelerin eleman yoğunluğunun fazla olacağına karar vermesi gerekebilir (Topçu 1998, Kaya 2013).

Sonlu elemanlar yöntemini diğer nümerik yöntemlerden ayıran bazı özellikler şunlardır (Kılıç 2009);

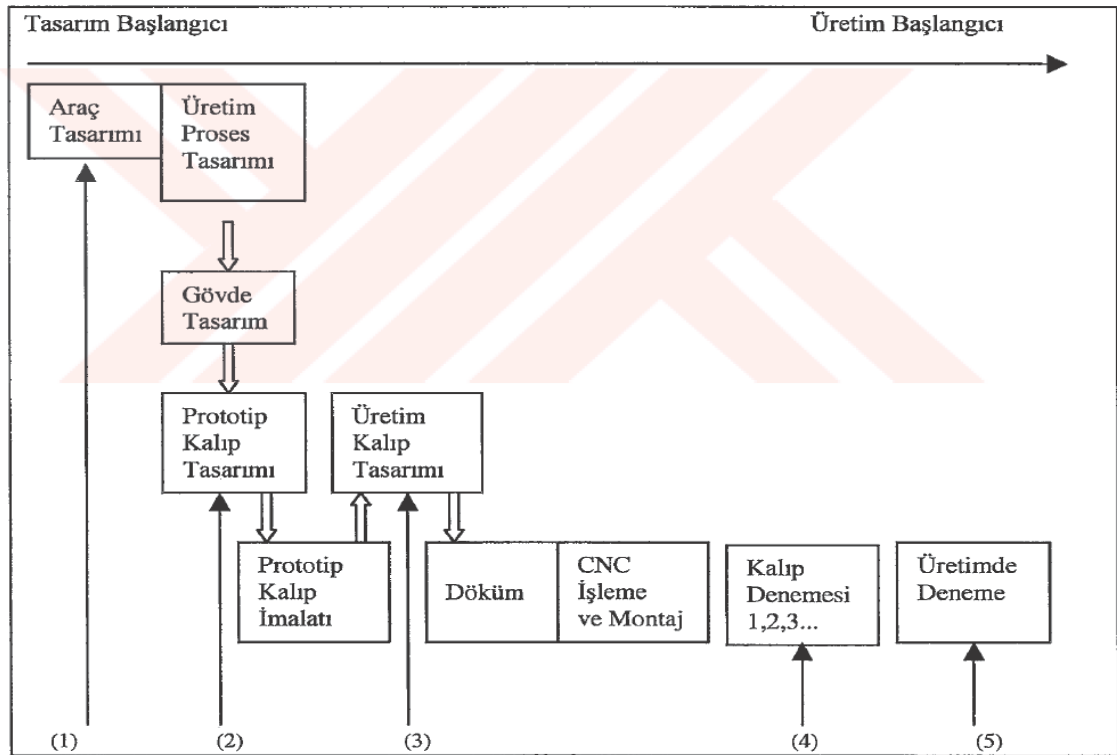
- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir parçanın geometrisi tam olarak temsil edilebilir
- Birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir
- Farklı malzeme ve geometrik özellikleri bulunan parçalar analiz edilebilir
- Sebep-sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar yönteminin bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir
- Sınır şartlarının uygulanabilirliği kolaydır

Sonlu elemanlar yönteminde bazı dezavantajlarda vardır. Örnek olarak çatlama, kırılma davranışı ve temas problemleri gibi bazı karmaşık olaylara uygulanmasında zorluklarla karşılaşmaktadır. Gerçeğe yakın sonuçlar alınması için malzeme parametreleri gibi giriş verilerinin hatasız tanımlanması gerekir. Yani yapılan analizlerin doğruluğu için verilerin hatasız ve kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinden doğru sonuçlar alabilmek için özellikle sürekli ortamın çok sayıda elemana bölünmesi gereklidir. Bu yöntem ile yapılan çözümlerin sonuçları dikkatli bir şekilde yorumlanmalı ve değerlendirilmelidir. Ayrıca bu metodun kullanılmasında, genellikle büyük bilgisayar belleğine ve yapılan analizler için zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Sac malzeme endüstrisinde, sonlu elemanlar metoduyla yapılan simülasyon işlemi, çok gerçekçi avantajlar sunmaktadır. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür (Uslu, 2014);

- Önemli ölçüde tasarım ve geliştirme işlemlerinde sürelerin kısaltılması
- Geliştirme işlemlerinde kullanılan malzeme miktarındaki azalma
- Tasarım esnasında geçiş zaman aralarının azaltılması
- En önemlisi olan ürün kalitesindeki artıştır

Şekil 2.29’da sonlu elemanlar yardımıyla yapılan simülasyonların, sac imalat proseslerinin belirlenmesinde ne şekilde kullanılabileceğini göstermiştir (Makinouchi 1996). İlk aşamada yapılan simülasyonlar, araç tasarımlarına başlamadan önce orijinal modelin fizibilite olup olmadığını ve kalıplanabilirliğini kontrol etmek amacıyla yapılır. Eğer parçada fizibilite problemleri tespit edilirse, orijinal modelin geometrisinde değişikliğe gidilerek tekrardan simülasyon çalışması yapılır. Ayrıca bu aşamada imalat planlama bilgisinin az olması sebebiyle tam anlamıyla doğru bir simülasyon yapılamaz. İkinci aşamada ise orijinal modele ait bilgilerin daha çok detay içerdiği ve prototip kalıplarının yapımının mümkün olduğu aşamadır. Üçüncü aşamada, simülasyon sonuçlarından elde edilmiş yüzey ve konturler ile ihtiyaç duyulan operasyon sayısı kadar katı kalıp tasarımı yapımına başlanır. Sonrasında sırasıyla döküm, CNC işleme, montaj, kalıp alıştırma ve pres altı işlemlerinden sonra nihai parçanın üretimi gerçekleştirilmiş olur.

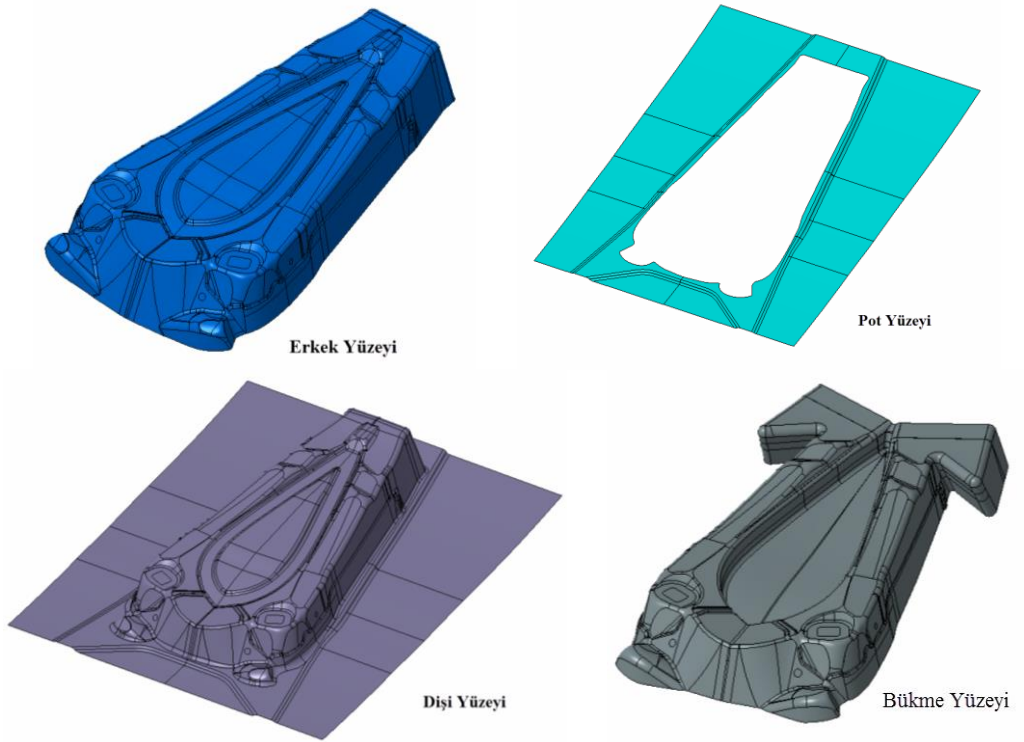


Şekil 2.29. Simülasyonların üretim sürecindeki rolleri (Makinouchi 1996)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Fizibilite Analizleri

Fizibilite çalışmalarına başlamadan önce ihtiyaç duyulan operasyon sayıları, malzeme özellikleri ve parça geometrisi göz önünde bulundurularak belirlendi. Buna göre yapılan çalışma; derin çekme, çevre kesme, delme ve bükme olmak üzere 4 operasyondan oluşmaktadır. Ayrıca, sağ ve sol simetrik parçalar tek kalıptan çıkacak şekilde tasarlanarak, kalıp maliyeti, ham madde, işçilik ve zamandan tasarruf edilmiştir. Simülasyon için gerekli olan tüm kalıp yüzeyleri Catia programında hazırlanmıştır.



Şekil 3.1. Derin çekme ve bükme operasyonlarına ait kalıp yüzeyleri

Oluşturulan kalıp yüzeyleri IGS formatında ayrı ayrı kaydedilerek, Autoform yazılım programına aktarılmıştır. İçeri aktarılan yüzeylerde, sacın kalınlığını belirleyen parlak ve mat yönlerin aynı yönde olması, yapılacak fizibilite sonuçlarının doğruluğu için önemlidir. Yapılan çalışmada erkek (alt) yüzeyi sıfır olarak kabul edilmiş ve parlak yönler yüzeyin alt tarafında kalacak şekilde düzenlenmiştir. Daha sonra uygun bir kalıp eksenini tanımlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, kalıp eksenine çalışma yönünde dik

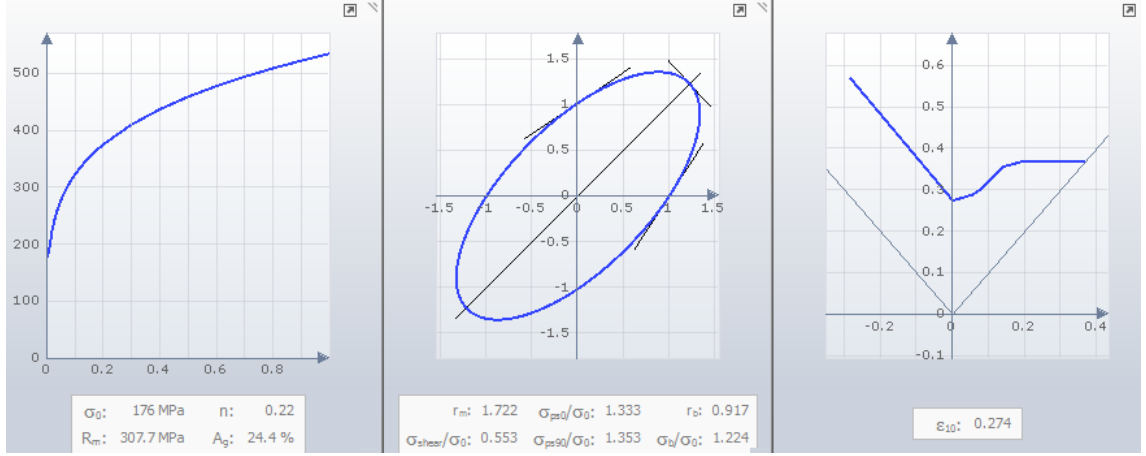
bakıldığında, yüzeylerin ters açıda olmaması (tüm yüzeylerin görünüyor olması) gerekmektedir. Ayrıca parçada bükülen flanşların veya yan duvar açılarının geri yaylanma telafisi için yeterli olup olmadığının kontrolü mutlaka yapılmalıdır.

SE yönteminin uygulama aşamalarında kullanılan, mesh yapısı, eleman sayısı, düğüm noktaları ve sürtünme katsayısı gibi parametreler için önceden tanımlanmış olan (default) ayarlar kullanılmıştır.

Şekillendirme işlemlerine başlamadan önce şekillendirilmenin gerçekleştirilmesi veya sac malzemenin araç pozisyonunda kullanılacağı yerde beklenen özellikleri karşılayabilmesi için malzemeye ait mekanik özelliklerin önceden bilinmesinin önemi büyüktür. Yapılan çalışmada; 0.65 mm kalınlığında, 750 mm x 615 mm ölçülerinde trapez, DC04 sac malzeme kullanılmıştır. Parça geometrisi kadar sac malzemesinin, mekanik ve kimyasal özellikleri de yapılacak fizibilite çalışmaları açısından büyük önem taşır. Çizelge 3.1 'de DC04 malzemesine ait mekanik ve kimyasal özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. DC04 malzemesinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi (Ağırlık %)

| Çelik Kalitesi | Akma Mukavemeti | Çekme Mukavemeti | Kopma Uzaması | C | P | S | Mn |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------|----------|----------|-----------|
| DC04 | 210 Mpa | 270-350 Mpa | % 25-38 | 0,08 | 0,030 | 0,030 | 0,40 |



Şekil 3.2. Autoform yazılımında kullanılan DC04 malzemesine ait mekanik özellikler

Malzemenin anizotropisi, haddeleme gibi operasyonlar sonucunda ortaya çıkmakta ve malzemenin akma karakteristiğini etkilemektedir. Bu nedenle sac malzemesinin hadde yönünün belirlenmesi, geri yaylanma üzerinde etkili bir parametredir. Hadde yönüne dik açıda oluşturulan çekme ve bükme işlemleri ile daha düzgün ve mukavemetli sonuçlar elde edilirken, hadde yönüne paralel ekseninde yapılan işlemlerde, malzeme üzerinde çatlaklar oluşmaktadır (Şekil 3.3). Hadde yönü bu bilgiler doğrultusunda tanımlanmıştır.



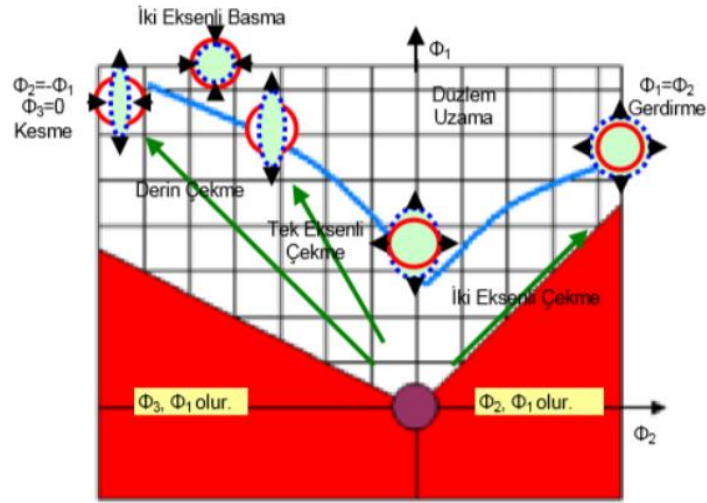
Şekil 3.3. Haddelenme yönü ve bükme işlemi (Çapan 2003)

Belirlemiş olduğumuz operasyonların (derin çekme, kesme, bükme), Autoform programında tanımlanmasıyla, simülasyon kurulumu için gerekli olan tüm girdiler sağlanmıştır (Şekil 3.4). Burada “D-20” derin çekme operasyonunu, “T-30 ve T-40” kesme ve delme operasyonlarını, “F-50” bükme operasyonunu, “M-25, M-35, M-45 ve M-55” free Springback olarak tanımlanan ve tüm ara operasyonlar için gerekli olan geri yaylanma sonuçlarını temsil etmektedir.



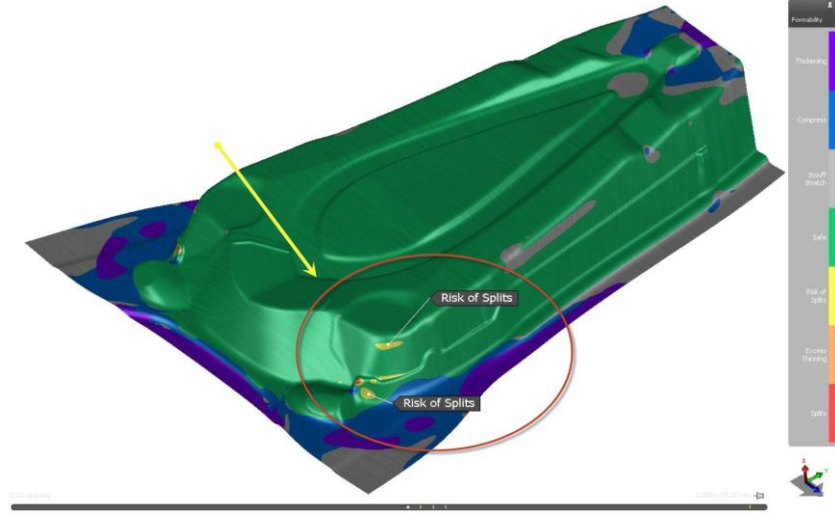
Şekil 3.4. Autoform programında operasyonların tanımlanması

Tüm girdiler tamamlandıktan sonra, parçanın simülasyonu hazırlanarak plastik ve elastik şekil değiştirme, yırtık, incelleme, kırışma, iz kayması ve geri yaylanma gibi sonuçlar incelenmiştir. Sac malzemelerin şekillendirme sonuçlarını değerlendirmek için “Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)” (Forming Limit Diyagram, FLD) kullanılır. ŞSD çok yaygın olarak metallerin şekillendirilebilirliğini yorumlamada ve şekil verme esnasında ortaya çıkan problemlerin analizi ve çözümlerinde kullanılır. Bu diyagramlar sayesinde, parçaların kalıpları hazırlanırken ön simülasyonlarda sacın ilgili şekli alıp almayacağı, yırtılıp yırtılmayacağı gibi sorulara önceden yanıt verilebilmektedir.



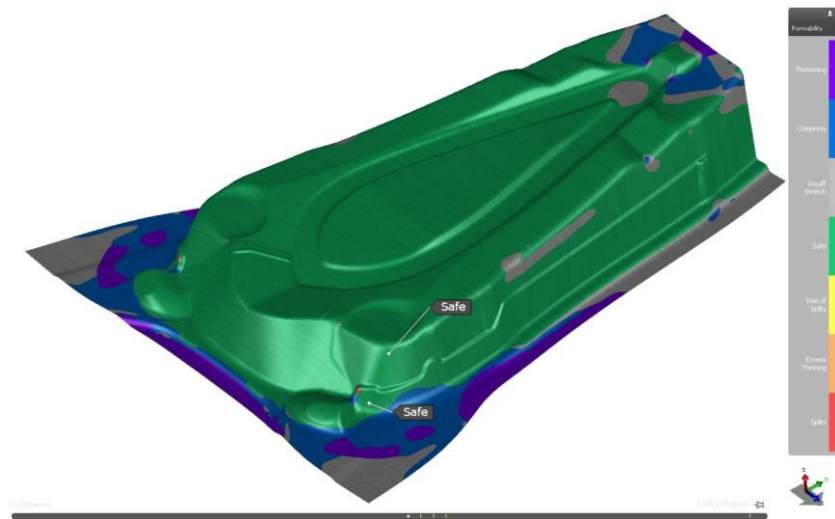
Şekil 3.5. Sac Malzemelerdeki Uzama Miktarlarının ŞSD Üzerinde Temsil Edilen Bölgeleri (Duddeck)

Simülasyon sonuçları incelendiğinde Şekil 3.6’da yuvarlak içinde gösterilen bölgede yırtık riski oluşmuştur. ŞSD’ nin tehlikeli bölge olarak tabir ettiğimiz üst bölgesinde oluşan bu gerilme, seri üretimde parça üzerinde yırtık ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Bu gibi durumlarda, şekillendirme işlemini emniyetli bölgeye çekecek önlemler alınmalıdır.

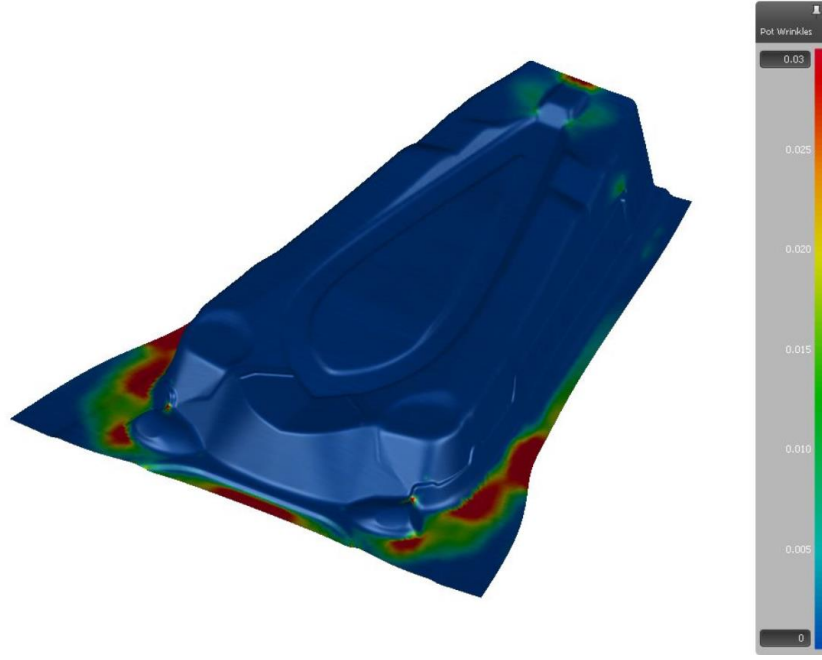


Şekil 3.6. İlk yapılan denemeler sonucu form verilmiş sıvama parçası

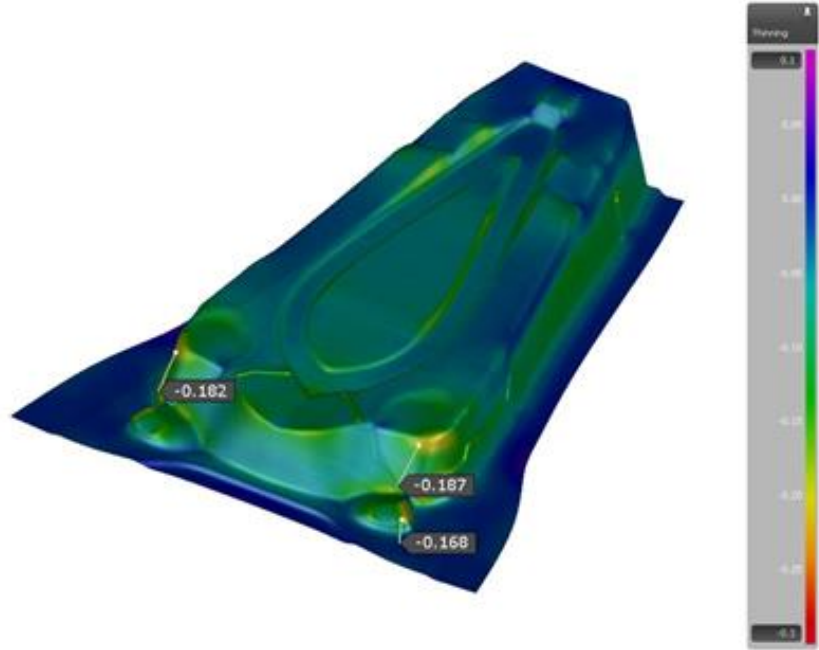
Geri yaylanma telafi çalışmalarına başlanmadan önce, parça üzerinde hiçbir deformasyon olmamalıdır. Bu sebeple, pot çemberi ve süzme kanallarındaki derinliğin azaltılması, orijinal model dışında kalan yerlerdeki erkek radyüs büyütme, pot tonajının düşürülmesi gibi müdahalelerde bulunularak ilgili bölgedeki yırtık riski giderilmiştir. Ayrıca çalışılan parça görünür parçası olması sebebiyle, nihai parçada kırışma, incelme ve iz kayması gibi problemler olmaması gerekmektedir. Bundan dolayı, yapılan analizler Autoform yazılımında ayrı ayrı incelenerek, risk görülen tüm bölgeler için gerekli iyileştirmeler yapılmıştır. (Şekil 3.7 - Şekil 3.11)



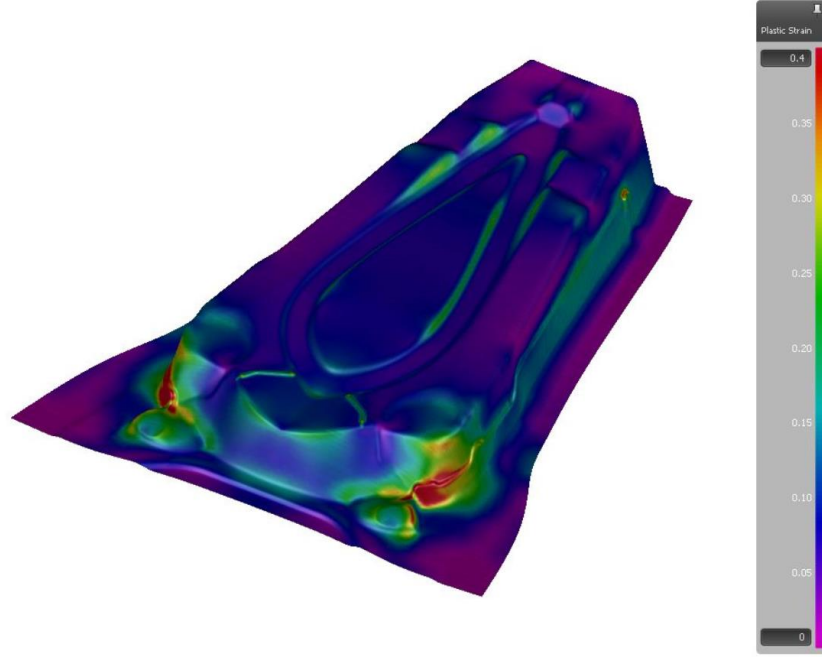
Şekil 3.7. Yırtık riski giderilmiş sıvama parçası



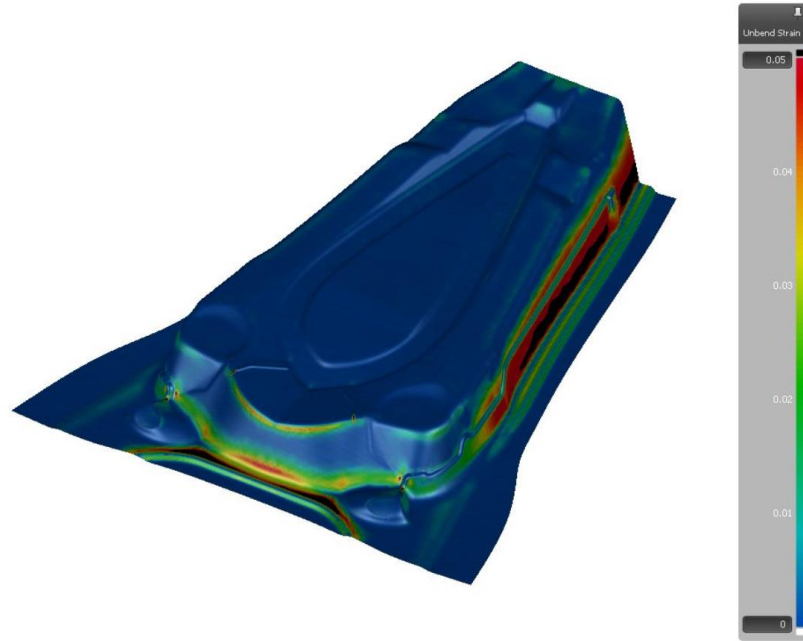
Şekil 3.8. Derin çekme sonucunda meydana gelen kırışma sonuçları



Şekil 3.9. Derin çekme sonucunda meydana gelen incelme sonuçları

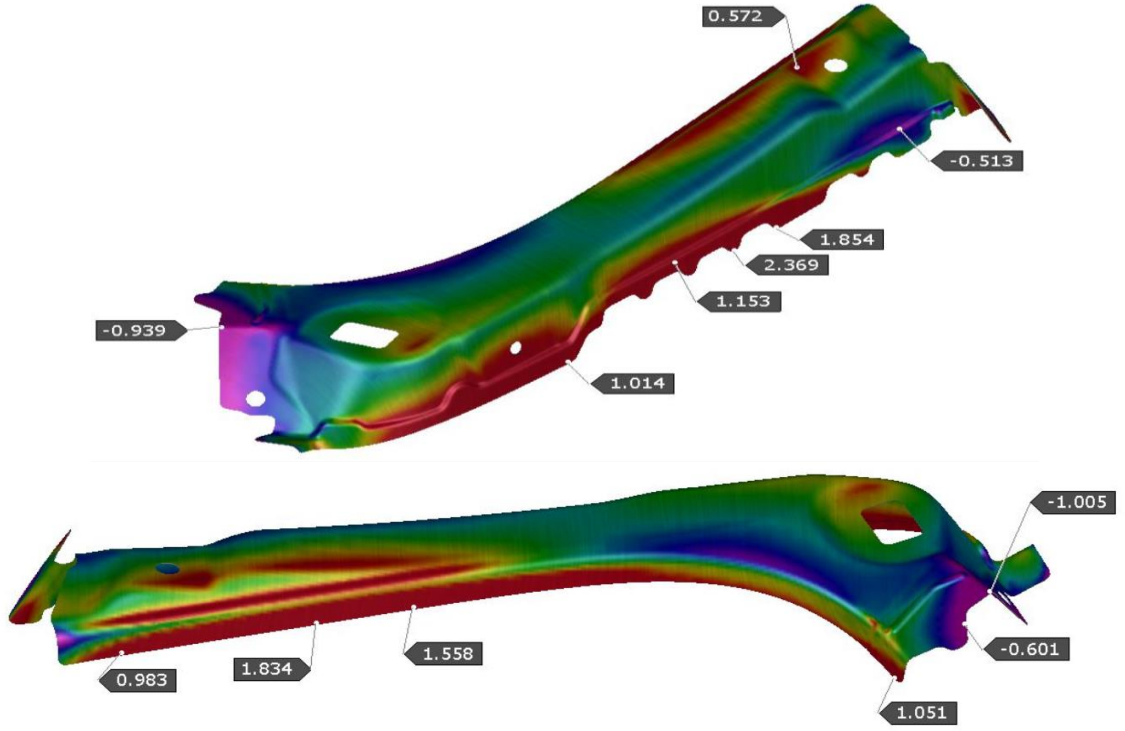


Şekil 3.10. Derin çekme sonucunda meydana gelen plastik şekil değiştirme sonuçları



Şekil 3.11. Derin çekme sonucunda meydana gelen iz kayması sonuçları

Derin çekme, kesme ve bükme operasyonlarından geçirilen parça üzerinde oluşan geri yaylanma değerleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Bu parçadan beklediğimiz yüzey toleransı $\pm 0,75\text{mm}$ ’ dir. Şekilde görüldüğü üzere çıkan değerler, tolerans dışıdır.



Şekil 3.12. Form verilmiş final parçada meydana gelen geri yaylanma sonuçları

Simülasyon çözümlerinde, telafisi yapılacak yüzey için telafi oranları ve diğer değişken değerlerinin, hem iterasyon sayılarını arttırmamak hem de işlenecek olan kalıp yüzeylerini bozmamak için doğru seçilmesi gerekir. Bu sebeple simülasyon parametrelerinin doğru belirlenip, çözümlerinin doğru yorumlanması parçanın ölçüselliğine direkt etkindir. Yapılan telafi çalışmasındaki aşamalar kısaca şöyle özetlenebilir:

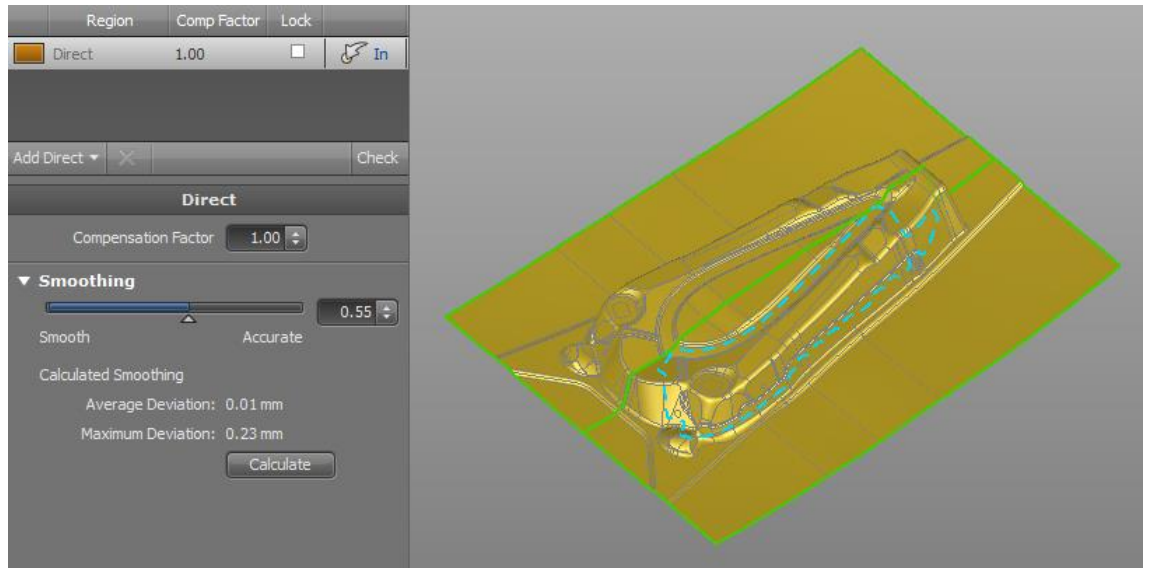
Öncelikle, telafi verilecek operasyon form verme ve bükme operasyonu olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi ise malzemeye uygulanan kuvvetin etkisiyle plastik deformasyon oluşmasıdır.

Daha sonra, geri yaylanma telafi stratejisi belirlenir. Yapılacak telafi için Şekil 3.13’de gösterilen yöntem seçilmiştir. İlk aşamada sıvama operasyonu kesme sonuna göre, ikinci aşamada ise bükme operasyonu finale göre kırılmıştır. Sıvama operasyonunda tüm yüzeyler deforme edilirken, bükme operasyonunda üst yüzey sabit tutularak, sadece bükülecek flanş bölgeleri deforme edilmiştir.



Şekil 3.13. Geri yaylanma telafi verme yöntemi

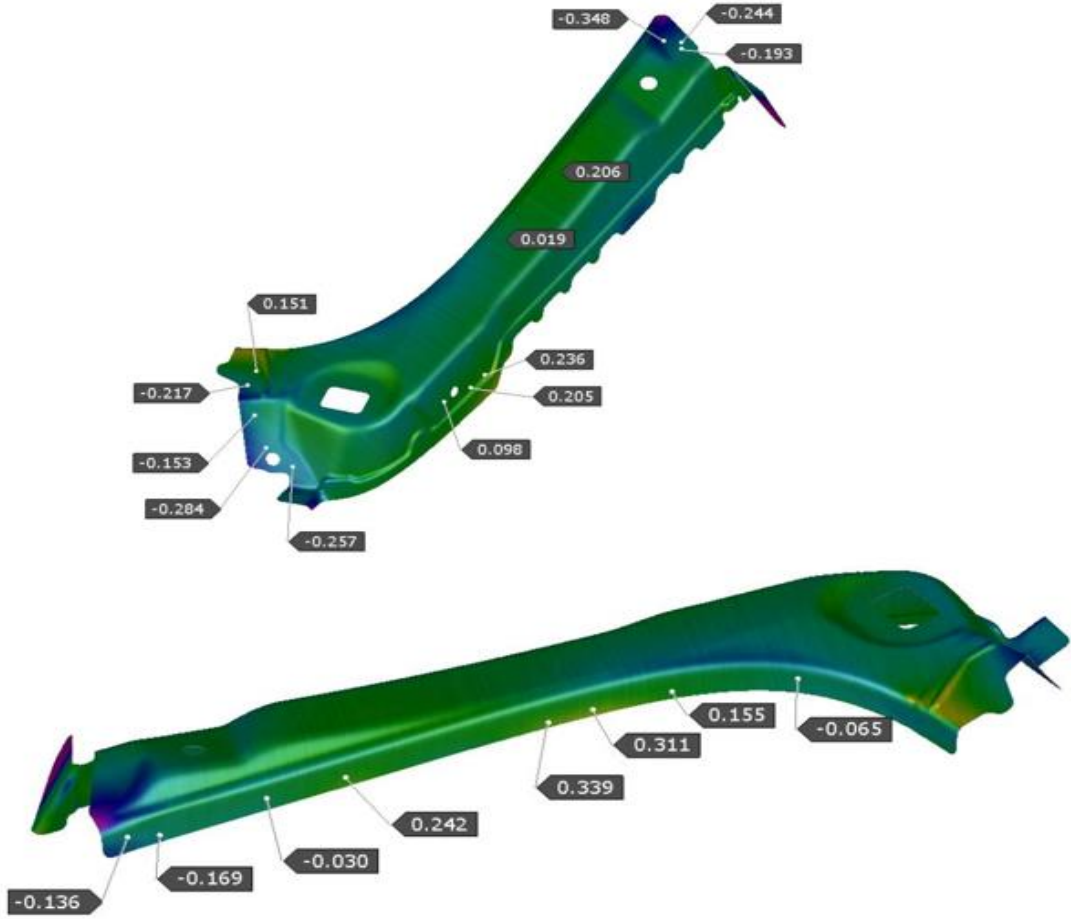
Son olarak, compensation factor (telafi katsayısı) ve smooting factor (telafi verilen yüzeyin kalitesi ve sapma miktarı) değerleri belirlenmiştir. Compensation factor değeri için 1 seçilmiştir (oluşan geri yaylanma değerlerinin aynı oranda ters kırılması, 1'e1). Smooting factor değeri için de 0,55 seçilmiştir. Smooting factor katsayısının düşük olması, yüzey kalitesinin iyi çıkmasını, katsayının yüksek olması ise maksimum sapma miktarlarının düşük çıkmasını belirler. Bu iki parametreye ait katsayı değerlerinin belirlenmesi sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Yüzey kalitesini ve sapma miktarını etkileyen parametreler

Tüm bu girdiler doğru bir şekilde tamamlandıktan sonra, yeni kalıp yüzeylerinde meydana gelebilecek, ters açı ve yüzeyin kalitesi mutlaka kontrol edilmelidir. Bu aşamadan sonra, oluşturulan telafisi verilmiş yüzeyler ile simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan iterasyonlar sonucunda parça üzerinde meydana gelen geri yaylanma

değerleri Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Buna göre, Autoform analiz programı ile yapılan telafi çalışmalarında geri yaylanma değerlerinin tolerans değerleri içinde çıktığı görülmüştür. Daha sonra Autoform programından alınan TXT dosyası ile Catia'da nominal olan yüzeyler kırılarak (telafi edilerek), reel kalıp yüzeyleri hazırlanmıştır.



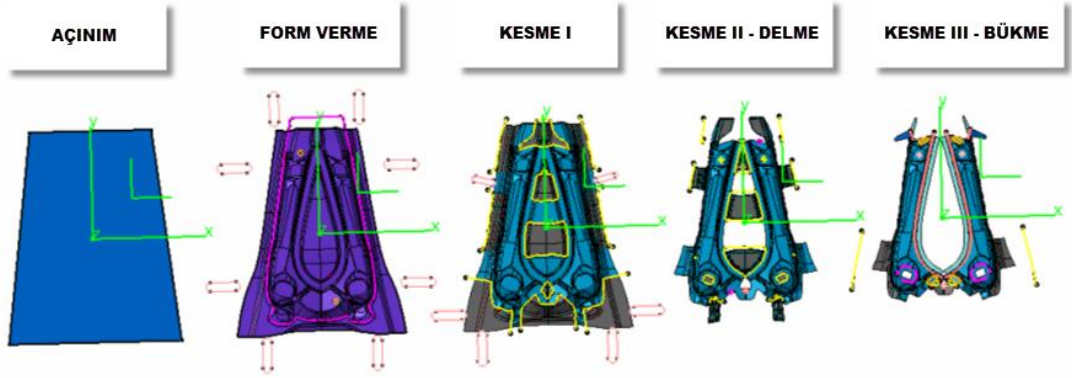
Şekil 3.15. Telafisi verilmiş final parçada meydana gelen geri yaylanma değerleri

3.2. Proses Çalışması

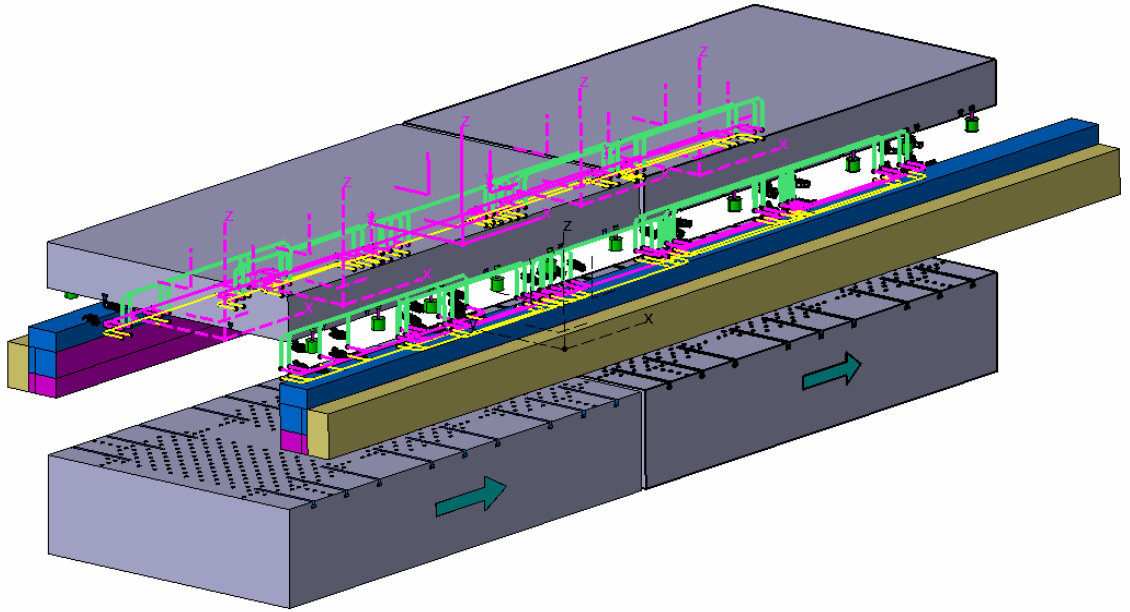
Fizibilite çalışmaları tamamlandıktan sonra, kalıp tasarımlarının yapılabilmesi için 3D-Proses hazırlanmıştır. Burada, fizibilite çalışmalarında belirlediğimiz operasyonların, Catia ortamında düzenlenmesi yapılarak, her operasyon için ihtiyaç duyulan yüzey ve kontürler hazırlanır. Ayrıca, pres kuvveti, pot basıncı bilgileri, kullanılacak kalıp elemanı malzemeleri, kullanılan zımba/kovan malzemesi tipleri ve her operasyon için ihtiyaç duyulan baskı kuvvetleri gibi girdilerde tasarıma başlamadan belirlenmelidir. Pres

kuvveti ve pot basınç kuvveti Autoform yazılım programından alınmıştır. Kalıp elemanlarının malzemeleri seçilirken, parçanın yıllık adedi, sac malzemesinin kalınlığı ve mukavemeti göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Proses bilgilerinin doğruluğu, hem kalıp tasarımlarının, hem de üretimde meydana gelebilecek hatalarının önüne geçmektedir. Proses hazırlanırken dikkat edilmesi gereken maddeler aşağıda belirtilmiştir.

- Her operasyonda, operasyon numuneleri mevcut olmalıdır. Aynı zamanda, alt hareketli, pot ve lifter kullanılan operasyonlarda da transfer pozisyonu gösterilmelidir. Bu sayede, bir sonraki operasyona ait kalıp ekseninin konumu kolaylıkla ayarlanmış olur
- Pres bilgileri, transfer bar pozisyonları, operasyon numunelerinin taşınmasını sağlayan klemp pozisyonları mutlaka proseste belirtilmeli ve operasyonların homojen yük dağılımı için hesaplamalar yapılmalıdır. Ayrıca, proses hazırlanırken kalıbın konumu, (sıvama veya alt hareketli kullanılan kalıplar için) pres çukuruna denk getirilmemelidir
- Markalama bilgisi olmalı ve parça üzerinde formlu bölgelere denk gelmemelidir.
- Bükme kontürü hazırlanırken, bükme hatlarındaki radyüs çeliğe dahil edilmelidir. Ancak, radyüs daha öncesinde verildiyse bükme hattı duvarların kesişimi olmalıdır
- Sacın yükleme pozisyonu ve yerçekimi dikkate alınarak, sac dayama yerleri belirtilmelidir
- Kalıplar arası mesafe ve besleme yüksekliği belirtilmelidir
- Gereksinim olan her operasyon için iz zımbası yerleri gösterilmelidir
- Kesme operasyonlarında aynı yerden iki kez kesme yapmamak için kesme geçişleri uygun olmalı ve hurdanın rahat düşmesi için geniş açılar oluşturulmalıdır. Ayrıca hurda boyları, kullanılan presler dikkate alınarak kontrol edilmelidir
- Transfer pozisyonunda parça taşınırken, klemp tutma yerleri ve miktarı, sağlıklı taşıma için uygun olmalıdır. Eğer, klemp için kalıpta boşaltma yapılacaksa simülsayonda da boşaltma öngörülmelidir



Şekil 3.16. 3D-Proses dizilimi

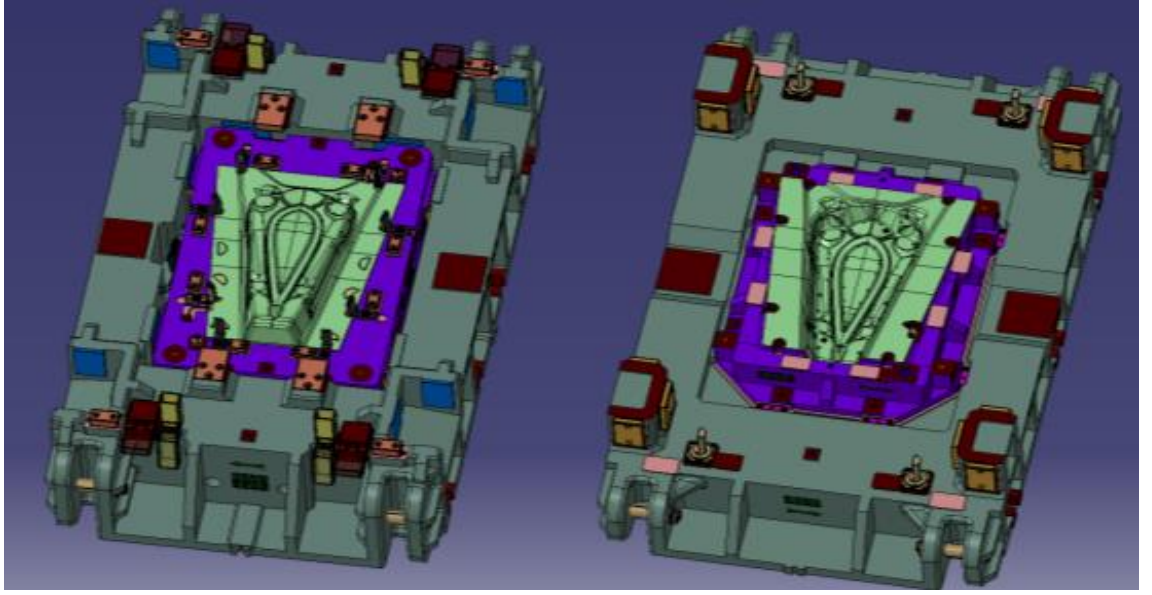


Şekil 3.17. Pres, transfer barları ve taşıma klemplerinin gösterimi

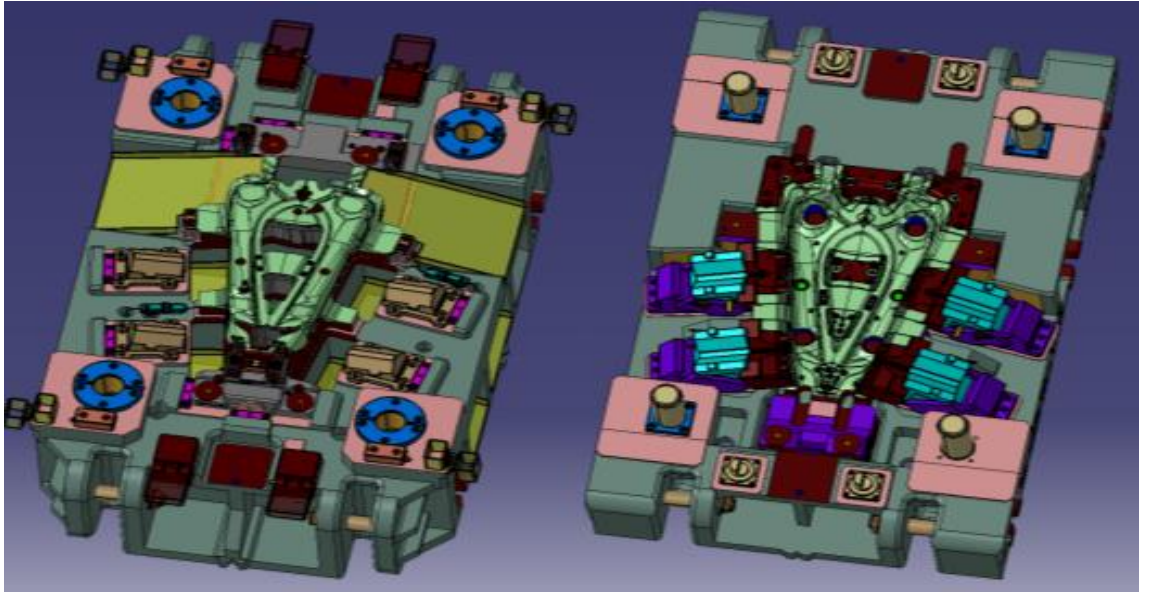
3.3. Kalıp Tasarımları

Proses girdilerinin iyi analiz edilmesi, istenen kalitede kalıp tasarımlarının gerçekleştirilmesi açısından çok önemlidir. Tasarımlar, proses bilgileri doğrultusunda, tasarım şartnamesine uygun olarak Catia V5 programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarım şartnamesi; feder kalınlıkları, federler arası mesafeler, kalıp taşıma bölgesindeki uzunluklar, pres bağlantı kanalı ölçüleri ve miktarları gibi temel bilgiler içermektedir. Tasarımı yapılan kalıplar, rijit kabul edilerek herhangi bir analize tabi tutulmamaktadır. Bu çalışmada 4 ayrı kalıp seti tasarlanmıştır. Bunlar; derin çekme, kesme, delme ve

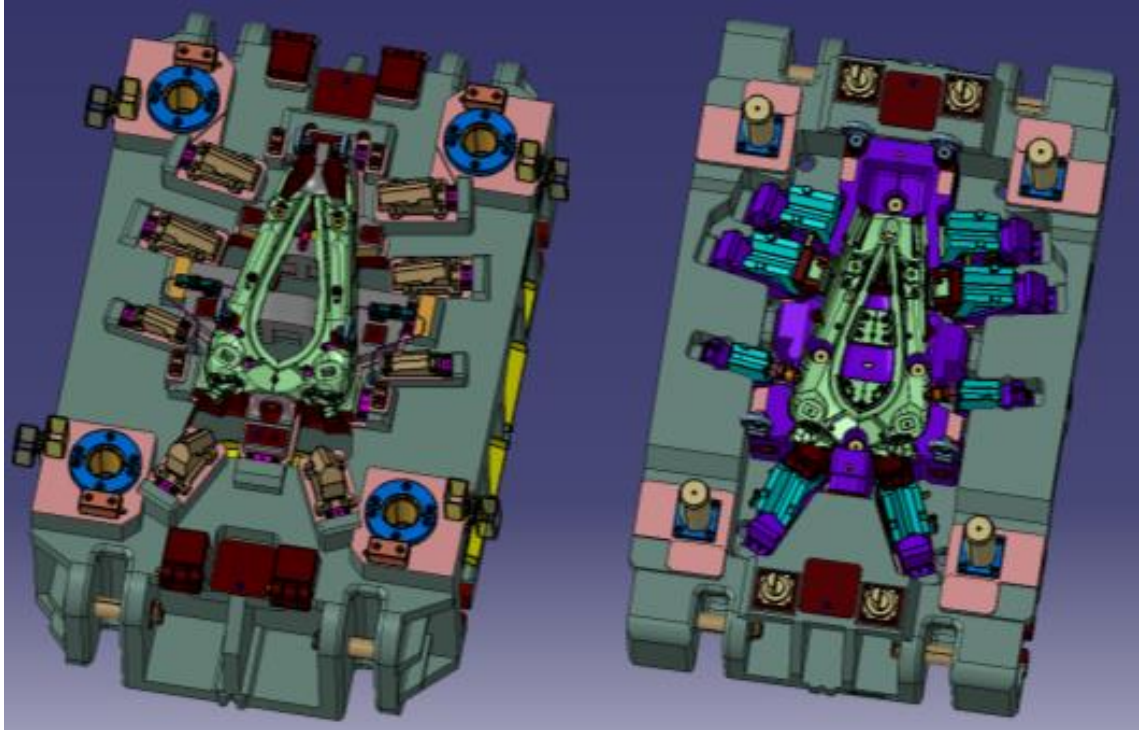
bükme kalıplarıdır. Kalıplar genel olarak, alt tabla, pot, üst tabla, alt-üst kesme çelikleri, bükme çelikleri ve baskı plakası gibi temel parçalardan oluşmaktadır. Daha sonra çeşitli kalıp elemanlarının bu temel parçalar üzerine monte edilmesiyle karmaşık bir yapı ortaya çıkmaktadır. Çekme operasyonu sac metale ilk formunun verildiği operasyon olup, daha sonra parça, diğer operasyonlardan geçerek orijinal halini alır. Aşağıdaki resimlerde çalışmada kullanılan kalıp tasarımlarına yer verilmiştir (Şekil 3.18 – Şekil 3.21).



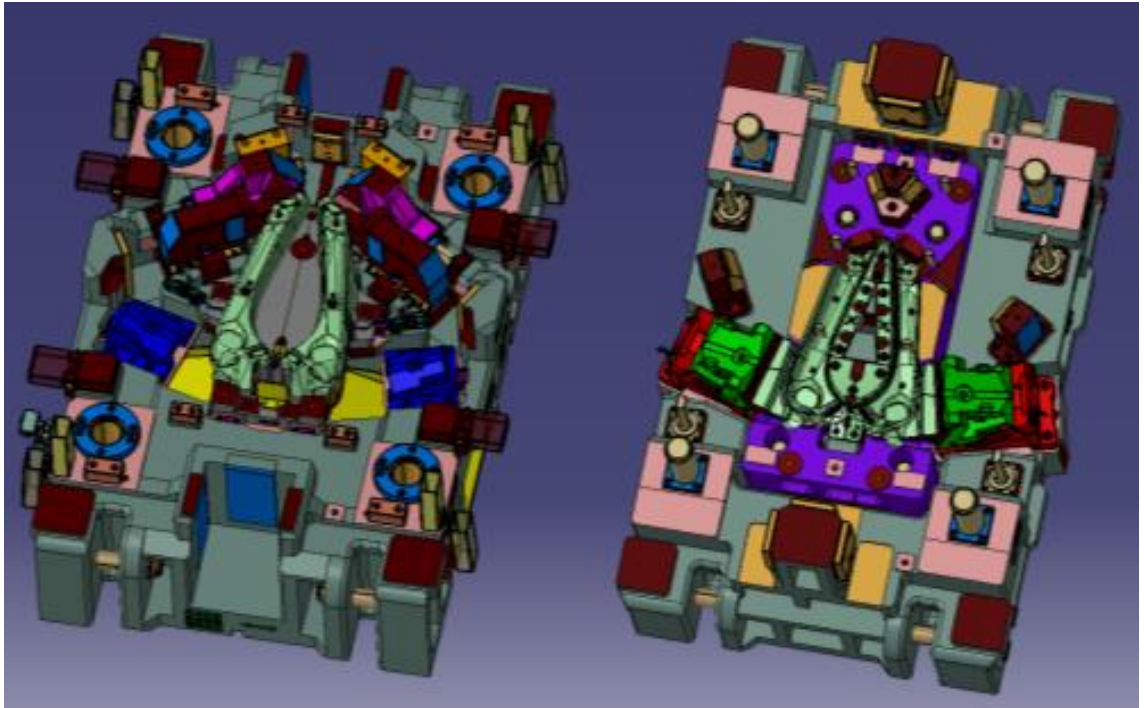
Şekil 3.18. Derin çekme operasyonuna ait kalıp tasarımı



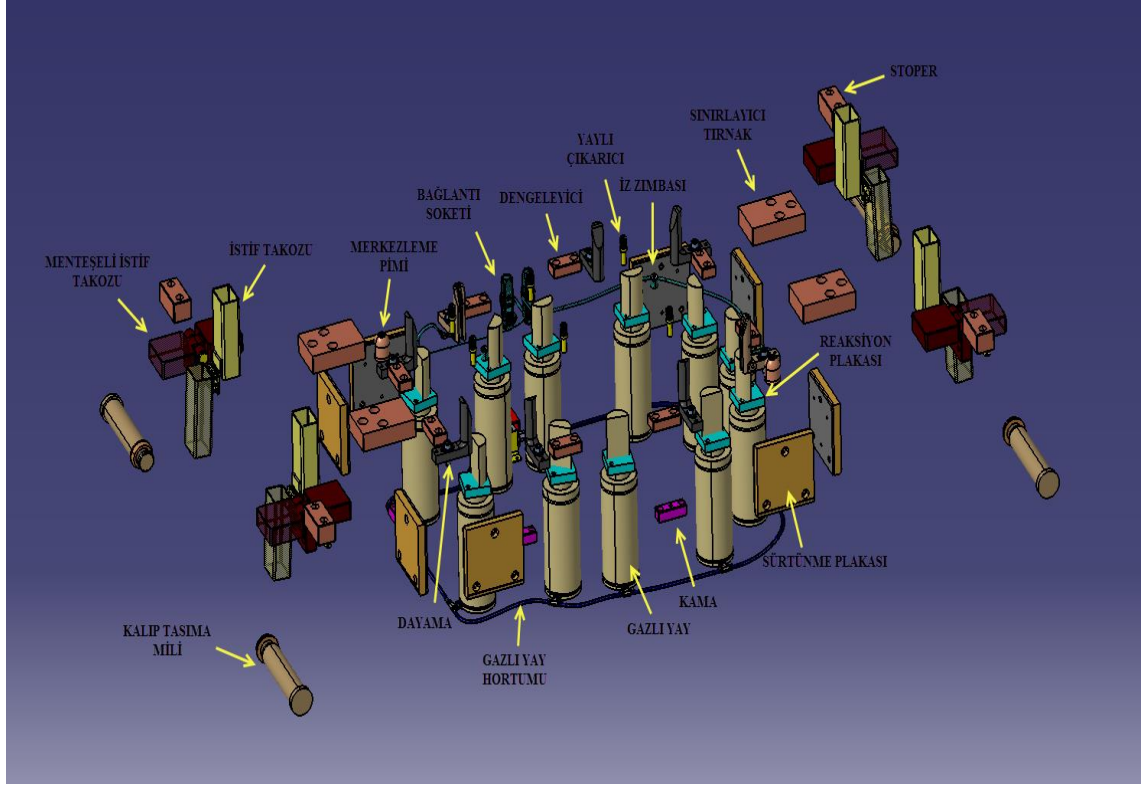
Şekil 3.19. İlk kesme operasyonuna ait kalıp tasarımı



Şekil 3.20. İkinci kesme ve delme operasyonuna ait kalıp tasarımı



Şekil 3.21. Bükme ve ayırma (kesme) operasyonuna ait kalıp tasarımı



Şekil 3.22. Kalıp tasarımlarında kullanılan yardımcı elemanlar

Kalıp tasarımlarında kullanılan elemanların kullanım amaçları kısaca şöyle özetlenebilir:

- Pot çemberi, sacı tutmaya yarayan elemandır. Sac malzemesinin kalıp boşluğu içerisinde akması pot çemberi tarafından kontrol edilir. Kuvvet gazlı yaylar tarafından sağlanır ve merkezlenmesi için miller kullanılır. Ayrıca hareketini sınırlamak için sınırlayıcı elemanlar kullanılır.
- Baskı plakası-sıyırıcı, kesme işleminde saca baskı yaparak, kesme esnasında sac metalin kesme hattı boyunca düzgün bir şekilde kesilmesini sağlar. Bu işlem delme işlemi için de geçerlidir. Baskı plakası tasarımı yapılırken, zımba ve çelikler işlem yapmadan önce sıyırıcının yeterli miktarda baskı yapması istenir. Kuvvet gazlı yaylar tarafından sağlanır. Baskı plakasının doğru çalışması için merkezlenmesi son derece önemlidir. Kesme yapacak parçaların zarar görmemesi için sıyırıcının işlem sırasında kayma yapmaması gerekir. Genellikle merkezleme milleri veya sürtünme plakaları ile merkezleme yapılır. Kalıbın işlemi tamamlayıp açılması sırasında sıyırıcının, yayların geri itme kuvveti veya kendi ağırlığından

dolayı kalıptan çıkmasını önlemek için hareket sınırlayıcı elemanlar kullanılmaktadır. Baskının sınırlanması genellikle sınırlayıcı tırnaklar ve askı cıvataları ile sağlanır.

- Gazlı yaylar, genellikle yüksek baskı kuvveti gerektiren yerlerde kullanılırlar. İçerisinde nitrojen gazı bulunduran gazlı yaylar, helezonik yaylara göre daha dengeli çalışır ve kontrol edilebilirdir. Gazlı yay seçimi yaparken dikkate alınması gereken en önemli konu; gazlı yayların kuvvetlerinin toplamı, operasyon baskı kuvvetinden düşük olmayacak şekilde seçilmesidir. Örneğin, gerekli baskı kuvvetinin 3,8 ton olduğu bir kalıpta, 1'er tonluk 4 adet gazlı yay dengeli bir şekilde dağıtılarak, baskı kuvveti sağlanabilir. Bu hesap dikkatlice yapılmalıdır. Aksi takdirde gazlı yaylar baskı kuvvetini karşılamayabilir. Böyle bir durumda, sac operasyon esnasında hareket edeceği için; parçada potluklar, konumsal kaymalar, ölçü hataları gibi birçok sorun meydana gelebilir.
- Mil-burç, alt ve üst tabla arasındaki merkezlemeyi sağlar. Burçlar, merkezleme milleriyle birlikte kullanılırlar. Görevleri merkezleme millerine yataklık yapmaktır.
- Taşıma milleri, kalıbın bir yerden başka bir yere taşınmasını sağlamak için kullanılan yardımcı elemanlardır. Tablanın dört köşesine birer adet yerleştirilirler. Kalıp kaldırma milinin çapı, kalıbın tonajına göre seçilir.
- Stoper, kalıbın belirlenmiş hareket mesafesinden fazla hareket etmesini engelleyerek kalıbın ve presin zarar görmemesini sağlar.
- Dengeleyiciler, çekme kalıplarında kalıbın kapanması sırasında yükün pot üzerinde eşit miktarda dağıtılması için kullanılır. Ayrıca, sac malzemedeki meydana gelen yırtılma, kırılma ve incelme gibi problemlerin ayarlanması için de kullanılmaktadır.
- İz zımbaları, çekme kalıplarında kalıp yüzeylerinin tam temas edip etmediğinin belirlenmesi için kullanılır ve yarısı orijinal parçada yarısı da hurda üzerinde kalacak şekilde montajı yapılır. Böylece, çekme işleminden sonra parça üzerinde iz zımbasının bıraktığı iz bakılarak, gözle kontrolünün yapılabilmesi sağlanır. Genellikle sac üzerinde 0,2 mm derinlikte iz oluşturacak şekilde montaj edilirler.
- Hava boruları, çekme kalıplarında çekme işlemi sırasında dişi ile erkek arasında sıkışan havanın dışarı çıkartılmasını sağlar. Havanın sıkışması sacın düzgün form

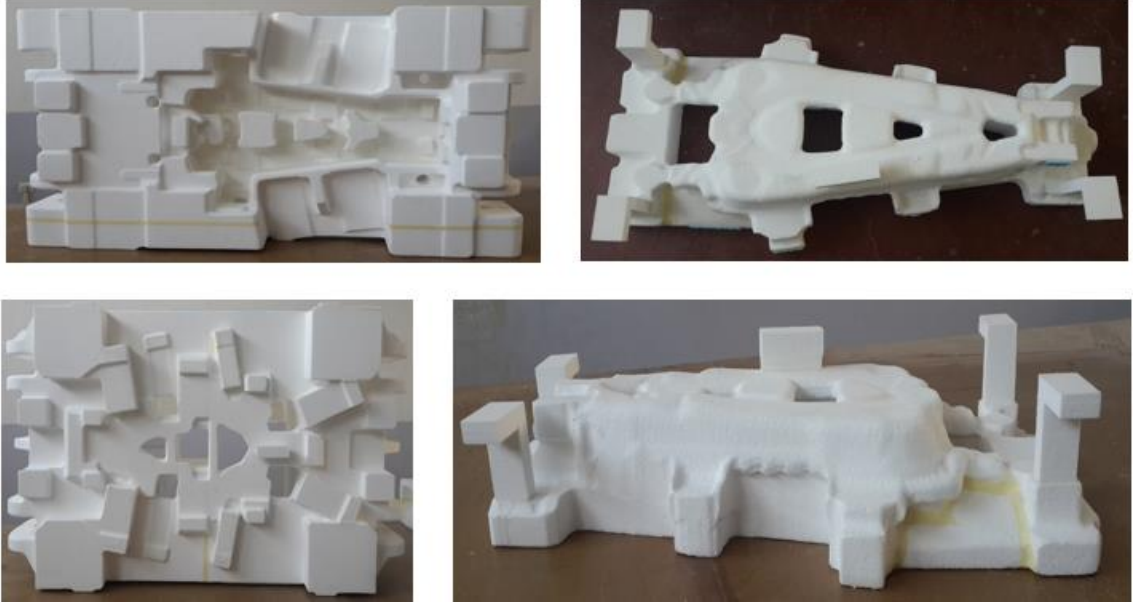
almasını engeller. Bunu önlemek için dişi üzerinde hava delikleri açılarak buralara hava boruları yerleştirilir.

- Dayama, sac parçayı kalıp üzerine yerleştirmek ve sacın sabitlenmesini sağlamak için kullanılır. Sac dayamalarının nihai yerleri denemeler sonunda belirlenir. Her operasyonda dayama yerleri belirtilmelidir. Kalıba yerleştirilecek dayamaların sayısı, parçayı operasyon esnasında sabit tutmaya yetecek kadar olmalıdır. Daha az dayama kullanıldığı durumlarda, parça operasyon esnasında hareket edebileceği için, konum kaçıklıkları, ölçülerin tolerans dışına çıkması veya çapak oluşumu gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilir. Kaç adet dayama kullanılacağına tasarım aşamasında parçanın geometrisine göre karar verilmelidir. Formlu parçalar erkek yüzeyi ile tamamen öpüştüklerinde, operasyon sırasında hareket etmeyeceği düşüncesi yanlıştır. Her ne kadar formlu bir parça erkekteki forma otursa bile, dayama yok ise, operasyon sırasında hareket edebilir. Parçanın kalıp içerisinde hareket etmeyeceği, eklenen dayamalar ile garanti altına alınmalıdır. Dayamaların yeterli olmadığı durumlarda, sacın kaymasını engellemek için gerekiyorsa mknatıs gibi ek parçalar kullanılabilir.
- Sürtünme plakaları, kalıbın merkezlenmesi için kullanılır ve yağlama özelliği olduğundan aşınma dirençleri yüksektir. Sürtünme plakalarının görevi sıyrıcının merkezlenmesi olduğu için sıyrıcının X-Y düzleminde dönmesini engellemesi gerekmektedir. Bu sebeple plakaların, kalıba yerleştirilme şekilleri ve hangi sayıda yerleştirileceği çok önemlidir. Ayrıca, pot, sıyrıcı ve baskı plakalarında kalıp açık konumda iken sürtünme plakalarının en az 2/3'ü içeride yani temas halinde olacak şekilde sürtünme plakalarının boyu belirlenmelidir.
- Yaylı çıkarıcılar, kalıp kapandıktan sonra sacın sıkışmasını engellemek için kullanılır. Kalıplarda sacın sıkıştığı bölgelere yerleştirilen çıkarıcılar, genellikle hareketli olmayan sabit parçalara yerleştirilir. Özellikle derin form verilen saclarda, mutlaka çıkarıcı kullanılmalıdır. Derin form verildiğinde, sacın kalıptan çıkması zorlaşmaktadır. Sac kalıptan çıkmadığı bazı durumlarda, operatör parçayı çıkartmadan ikinci bir sac koyup iki sac üst üste basmaya çalışmakta, bu da kalıp elemanlarına ciddi hasar vererek kalıbı kullanım dışı bırakabilmektedir. Çıkarıcı kullanımı, çift sac basma kaynaklı problemleri gidereceği gibi, manuel hatlarda

ergonomik bir iyileşme de sağlayacaktır. Bazı durumlarda, yaylı çıkarıcılar hurdayı düşürmek için de kullanılabilir.

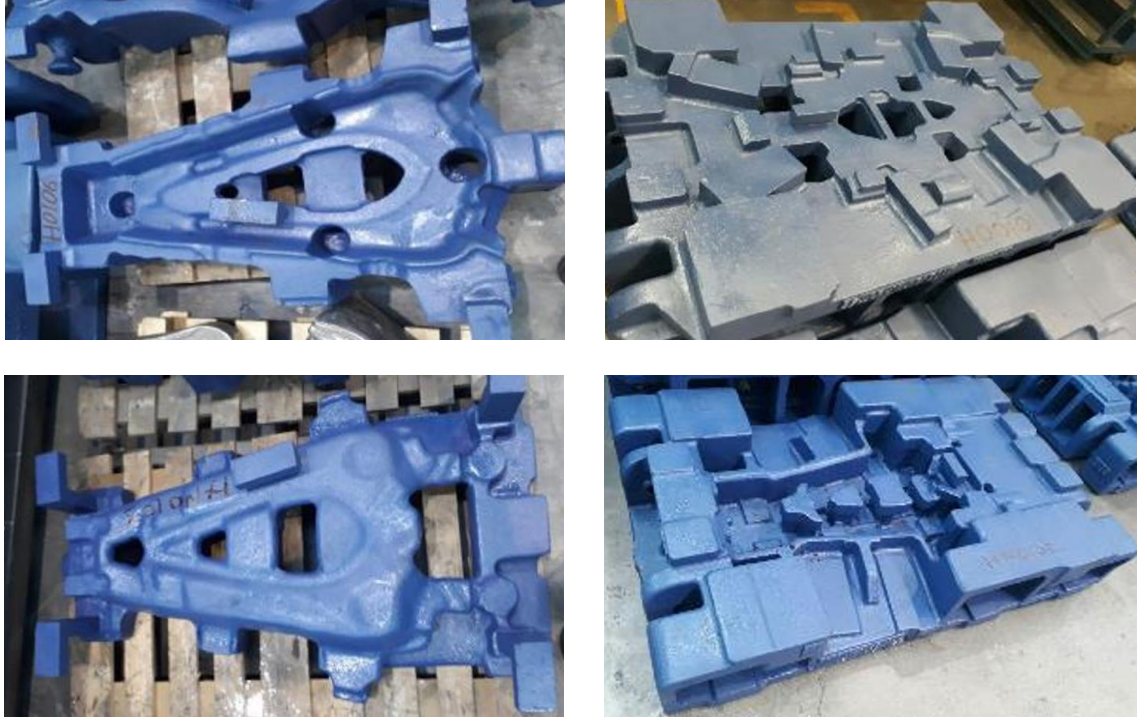
- Markalama zımbaları, üretilen parçayı tanımlama ve takip edebilme amacı ile kullanılır. Markalama zımbası üzerinde; marka, parça numarası, üretim tarihi ve üretici kodu gibi bilgiler yer almaktadır. Kullanılma amacına göre markalama zımbası üzerindeki bilgiler azaltılabilir veya çoğaltılabilir. Tek kalıptan birden fazla parça çıktığı durumlarda, farklı markalama zımbalarının birbiri ile karıştırılması ve yanlışlıkla birbirinin yerine montajı söz konusu olabilmektedir. Bunu engellemek için, kalıp eğer simetrik parçalar için tasarlanıyorsa, markalama zımbalarının cıvata deliklerinin konumları birbirinden farklı olacak şekilde tasarım yapılmalıdır (poka-yoke).

Strafor Model ve Döküm İmalatı: Kalıp tasarımları tamamlandıktan sonra, strafor model imalatı ve döküm süreci başlar. Strafor modeller; döküm aşamasında kum kalıp içerisinden çıkarılmadan ergiyik malzemenin üzerine dökülmesiyle eriyerek gaz haline dönüşen ve bulunduğu hacmi ergiyik malzemeye bırakan köpük yapılarıdır. Strafor modelin tasarımı yapılırken, döküm aşamasında, metalin kalıp içindeki katılaşması bittikten sonra, soğuma sırasındaki boyut değişimleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca, eğer dökümden sonra parçanın bazı yüzeyleri işlenecekse, bu yüzeylerde yeterli bir işleme payının bırakılması gerekir. Bu sebeple model tasarımı yapılırken çekme ve işleme paylarının model tasarımlarına yansıtılmasının önemi büyüktür. Strafor model imalatının en önemli özellikleri, şekillendirilmesi kolay, yapım süresi kısa, model maliyeti düşük ve kalıp imalatı için oldukça müsaittir. Ayrıca, küçük kapalı gözeneklerden oluşan yapısı nedeniyle üretilen modeldeki yüzey kalitesi pürüzlüdür. Bu yüzden kaba parçaların yapımında kullanılır.



Şekil 3.23. Strafor model imalatı tamamlanmış örnek kalıp elemanları

Daha sonra modellerin döküm süreci başlar. Döküm işlemine başlamadan önce metal eritilerek döküm sıcaklığına çıkarılır. Kalıba dolan metal, soğumaya başlar, sıcaklık belli bir değere düştüğü zaman katılaşma başlar ve katılaşma tamamlandığında hala sıcak olan parça oda sıcaklığına kadar soğur. Bu sırada önemli miktarda ısı uzaklaşır ve faz dönüşümleri olabilir. Bütün bu süreç boyunca parçanın boyut ve biçimi yanında malzemenin içyapısı ve dolayısıyla özellikleri belirlenir. Döküm sonrasında parça kalıptan çıkarılır, parçaya ait olmayan kısımlar uzaklaştırılır, yüzey temizlenir ve gerekli kontrollerden sonra imalat tamamlanmış olur (Aran 2007).



Şekil 3.24. Döküm imalatı tamamlanmış örnek kalıp elemanları

Talaşlı İmalat Süreci: Talaşlı imalat, metallerden kesici takımlar ile talaş kaldırma yöntemidir. Talaşlı imalat sürecinde, döküm halindeki kalıplar, CNC tezgahlarında kaba ve finish işlemlerinden geçirilmiştir. Ayrıca, ham haldeki çelikler (kesme ve bükme çelikleri), tornalama, frezeleme, taşlama, delik açma gibi işlemlerden geçirilerek kalıp montajı için hazır hale getirilmiştir. CNC tezgâhlarının en büyük avantajı, CAD ortamında tasarımı hazırlanan (üretilmek istenen) modelin uygun bilgisayar kodları kullanılarak direkt olarak üretilebilmesidir. Klasik yöntemlerle birden fazla talaşlı imalat yöntemi kullanılarak üretilebilecek parçalar, CNC tezgâhında tek seferde üretilebilmektedir. Ayrıca operatör hatası faktörü olmadığından dolayı, işlenen parçaların boyut ve yüzey hassasiyeti oldukça yüksektir. Ayrıca, CNC ile birden fazla işlemi sırası ile yapmak mümkündür. Örnek olarak, bir parçaya delik delinmesi, kademeli olarak işlenmesi, kanal açılması vs. verilebilir.

CNC tezgâhlarında kalıbın doğru işlenmesi, bir sonraki aşama olan kalıp alıştırma sürelerinin kısaltılmasında büyük önem taşır. İşlenen kalıplardaki yüzey kalitesinin yüksek olması için, hazırlanan işleme yüzeylerinde herhangi bir çatlak (kırıklık) ve yüzey hassasiyetini bozacak deformasyonların olmaması gerekir. Ayrıca, yüksek devir, yüksek

ilerleme hızları, kalıbın tezgâha bağlanması, tezgâh hareketlerinin kesintisiz olması (çok küçük süreli de olsa meydana gelebilecek olan hareket kesintilerinde yüzey üzerinde pürüzler oluşur), kullanılan takımın kalitesi gibi parametreler yüzey hassasiyetinde oldukça etkilidir.



Şekil 3.25. 2D ve 3D işlemleri tamamlanmış örnek kalıp elemanları

3.4. Kalıp İmalat Süreci ve Pres Altı Çalışmaları

3.4.1. Kalıbın Ön ve Final Montajı (MAP0)

Pres altı çalışmalarında, şekillendirilmiş nihai parça üzerindeki geri yaylanma, kırışma, yırtık, incelme gibi sonuçların, analiz sonuçları ile örtüşmesi için kalıpların montajı ve alıştıurma süreçleri çok önemlidir. Deneme alıştıurma işlemleri, sonu gelmeyen tesviye döngüleri ile değil, analiz programlarından elde edilmiş veriler üzerine düşünülerek yapılan müdahalelerden oluşmalıdır. Ayrıca, kalıplar operasyon sırasına göre incelenmeli ve onaylanmalıdır. Ancak, bükme ve ütöleme kalıplarında kullanılmak üzere, kesme ve delme kalıplarının hazır olmadığı durumlarda, sac parça CAD verilerine uygun olarak lazerde kesilerek, bir sonraki operasyon için hazır hale getirilebilir.

Kalıp imalat sürecinde ilk olarak CNC' de işlenecek olan döküm göbek ve çelik montajı yapılır. Montajı yapılan tüm kalıp elemanları için, dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, tüm öpüşme duvarları için taban gönyelemesinin yapılmasıdır. Şekil 3.26'da gösterildiği gibi, ilk olarak döküm göbeğin oturacağı düzlem alıştırma boyası ile boyanır. Daha sonra erkek göbek, kreyn yardımıyla boyanan düzleme oturtturulur ve temas eden yüzeylerin kontrolü yapılır. Boyanın çok vurduğu bölgelerden elektrikli veya havalı el aletleri ile talaş kaldırılarak, oturma düzleminde tüm boyanın eşit olarak yayılması sağlanır. Böylece öpüşme düzlemlerinde %100 temas sağlanarak, kalıpta sac şekillendirme esnasında döküm esnemesinin önüne geçilmiş olunur (Şekil 3.27). Döküm göbeğin, yaslanacağı duvar düzlemlerinin de diklikleri, gönye ve boya ile kontrol edilmelidir.



Şekil 3.26. Döküm göbeğinin, alıştırma boyası ile taban kontrolü



Şekil 3.27. Taban gönyeemesi tamamlanmış erkek göbek

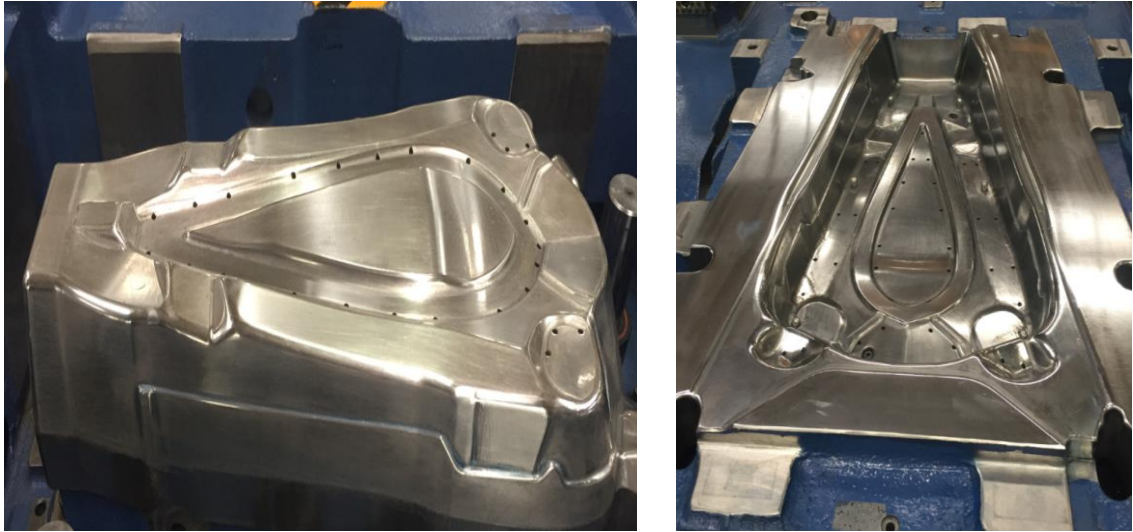
Çelik montajı yapılırken de aynı işlem adımları uygulanır (Şekil 3.28). Ayrıca, çelik ve döküm birleşim noktaları arasında, basılacak olan sacda istenmeyen izlerin oluşmaması için maksimum 0,03 boşluk olmalıdır. Bunun kontrolü de sentil çakısı yardımıyla yapılır.



Şekil 3.28. Taban gönyeemesi tamamlanmış kesme çelikleri

Ön montajı tamamlanmış çeliklerin kontrolü yapıldıktan sonra, yüzey işleme için CNC tezgâhına gönderilir. Kaba işlemeden sonra, kalıpta sertleşmesi gereken bölgeler (erkek radyüsleri, pot döküm çelikleri, kesme ağızları) ısıl işleme tabi tutulur. Bu ısıl işlemin hangi aşamada yapılacağı tercih meselesidir. Genelde frezede finish komutu verilmeden önce ısıl işlem uygulanıp sonra finish komutu verilir. Bu şekilde kalıp daha alıştırma işlemine başlamadan ısıl işleme tabi tutulmuş olur.

Isıl işlem sonrası, kalıbın finish işlemesine başlanır. Finish sonrasında kalıpların ölçümü ve değerlendirmesi yapılarak, final montaj, tesfiye ve parlatma işlemlerine geçilir. Alıştırma öncesi referans olarak kabul edilecek yüzeylerde gerekli parlaklığın sağlanması önemlidir. Bunun nedeni, CNC işleme sonrasında kalıp yüzeyleri üzerinde oluşan takım izlerinin giderilmesidir. Yüzey parlatma işleminde, erkek yüzeyleri ve sıvama kalıbındaki dişi pot yüzeyi her zaman referans olarak kabul edilir. Form kalıplarında parlatma işlemi mutlaka sac akış yönünde olmalıdır. Parlatma işleminde, ilk olarak sırasıyla 80'lik - 220'lik sabun taşı atılır ve 100'lük zımbara ile başlanıp 1000'lik zımparaya kadar işlem devam eder (Şekil 3.29). Ayrıca parlatmaya geçmeden önce mutlaka köşe çıkarma işlemi yapılmalıdır. Köşe çıkarma, dişi radyüslerin CNC tezgâhında boşaltılması işlemidir.



Şekil 3.29. Parlatma işlemi tamamlanmış erkek göbek ve dişi pot çelikleri

Finish işleme sonrası, mil-burç, dengeleyici, kalıp stoperleri, dayama, gazlı yay, hurda olukları, sensör ve sürtünme plakaları gibi kalıp elemanlarının final montajı yapılır. Montaj tamamlandıktan sonra, alt ve üst kalıp kapatılarak, kalıbın kinematik kontrolleri gerçekleştirilir. Bu aşamada, tüm standart ve imalat kalıp elemanlarının çarpma ve binme kontrolü, baskı kursu ve yüzey uyumsuzlukları tespit edilerek, pres altı çalışmalarına başlamadan önce, girişim yapan yerler varsa müdahale edilir. Yapılan kontroller sonrası kalıpların ön ve final montaj süreçleri tamamlanmış olur.

3.4.2. Kalıp Alıştırma (MAP1)

Kalıpların montajı tamamlandıktan sonra, tüm kontrolleri yapıldıktan sonra, pres altı kalıp alıştırma süreci başlar. Alıştırma işlemi, alt kalıp ile üst kalıp arasında sac uyumunu sağlamak ve kalıba sacın hacmini kazandırmaktır.

CNC' de kalıpların istenen tolerans değerlerinde işlenememesinden, ilgili operasyona giren sac ile operasyona işlenen yüzey arasında ölçüsel farklılıklar olduğundan ve kalıplarda, pres üst koçunun kalıp tabanına uyguladığı kuvvet doğrultusunda oluşan esneme hareketinden dolayı kalıp alıştırmaya ihtiyaç duyulur.

Kalıp alıştırması yapılırken, ilk olarak referans kabul edilecek ve alıştırma yapılacak kalıp elemanı belirlenir. Daha sonra alıştırma boyası ile boyanan operasyon numunesi, analiz verilerinden elde edilen çalışma tonajının %80'i ile preste basılır ve karşılıklı temas eden yerler boya yardımıyla ortaya çıkarılır. Karşılıklı boya teması olan yerlerden, işleme uygun elektrikli veya havalı el aletleri kullanılarak alıştırmanın ilerlemesi sağlanır. Alıştırma sacı en fazla 4 ya da 5 defa basılır ve sonra alıştırmaya yeni saca devam edilir. Alıştırma sonrası, sacın akışının sağlanması ve yüzey pürüzlülüğünün istenilen seviyeye getirilmesi için alıştırılan kalıp elemanı sabun taşı ve zımpara ile parlatılır. Alıştırma işlemi sonu gelmeyen talaş kaldırma işlemi değil, üzerinde düşünülerek akıllıca hesaplanmış müdahalelerden oluşmaktadır.

Form verme kalıbında yapılan, kalıp alıştırma işlem adımları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

Sac boşluğu kontrolü: Sac boşluğu kontrolü yaparken, düz yüzeylere sac kalınlığı kadar malzeme koyulup, açılı duvarlara, dik duvarlara veya kontrol etmek istediğimiz bölgelere lehimler koyularak presin minimum tonajında stopere inilir. Presin kalkmasıyla birlikte lehimler ölçülür ve kalıbın tüm yüzeyinde sac boşluğu eşit olana kadar alıştırma işlemine devam edilir. Sac boşluğu, kalıp merkezleme elemanlarına göre kontrol edilmelidir.

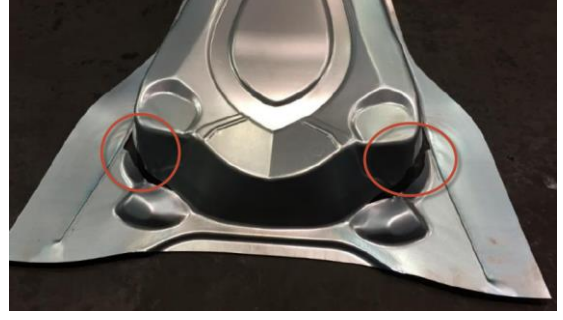
Alıştırma için kullanılacak parça basımı: Sac boşluğu kontrolü yapıldıktan sonra alıştırma işlemi için deneme parça basımı yapılır. Kalıp, alışmadığı ve istenilen parlaklık seviyesinde olmadığı için yağlanarak ya da naylon koyularak sürtünme direnci azaltılır. Bu sayede parça basım işlemi yapılabilir. Alıştırma %60 seviyesine gelene kadar alıştırma için bu parçalar kullanılabilir.

Pot kopya: Form verme kalıplarında öncelikli olarak pot alıştırması yapılır. Açınım sacının her iki yüzeyi boyanarak pot çemberi yüzey alıştırma işlemine başlanır. Presle baskı uygulanır. Elektrikli veya havalı el aletleri (kalıpçı taşı) ile taşlanarak yüzey öpüşmesi, istenilen seviyeye getirilir. Pot alıştırmasında genel beklenti fitil (süzme kanalı) içi %100 fitil dışı ise minimum %80 olacak şekilde yapılmalıdır. Pot alıştırması, yapılan en önemli alıştırma işçiliğidir. Pot kopya tamamlanmadan simülasyon şartlarının yakalanması mümkün değildir. Dayama ayarı yapılırken sacı kaydırma ihtimaline karşı, pot alıştırması +20 mm ofsetli sac ile yapılmalıdır.



Şekil 3.30. Pot kopyası tamamlanmış parçanın, alıştırma boyası ile kontrolü

Dişi kopya: Form verme kalıplarındaki dişi kopya alıştırması, pot alıştırması %100 tamamlandıktan sonra çekilen parça ile yapılmalıdır. İstenilen sonuç elde edilene kadar dişi kalıp üzerindeki boyalı olan yüzeyler kalıpçı taşı ile taşlanır. Referans olarak erkek parçayı kabul ettiğimizden, erkek kalıp üstünde kesinlikle bir işlem yapılmaz. Burada istenilen sonuç dişi ve erkek kalıbın %80 - %90'lık kısmının boyalı hale gelmesidir. Alıştırma sonrası, gelinen son seviye bozulmayacak şekilde final tesviye ve parlatma yapılarak sac basımı işlemine geçilir.



Şekil 3.31. Alıştırması tamamlanmamış derin çekme parçası



Şekil 3.32. Dişi kopyası tamamlanmış parçanın, alıştırma boyası ile kontrolü

Stoper ayarı: Alıştırması tamamlanmış kalıpta, stoperler ve alt-üst kalıp sacı olarak aynı anda temas etmelidir. Stoperler değmez, sadece alt-üst kalıp değerse, presin bütün kuvvetleri kalıp elemanlarına gelir. Eğer sadece pres kuvveti stoperlerde olursa kopya çıkmaz, parça gerekli formu alamaz ve ölçüsel anlamda problem yaratır.

Dengeleyici ayarı: Pot alıştırması %100 tamamlanmış olan kalıplarda, dengeleyici ayarı yapılırken pot kopyasının muhafaza edilmesi önemli bir husustur. Dengeleyiciler değer-değmez ayarında olmalıdır.

İz zımbası ayarı: Dişi alıştırması tamamlanmış olan kalıpta yüzeyden 0,1-0,2 mm çıkacak şekilde ayarlanmalıdır. Amaç, seri üretimde pres reglajının değişmesine bağlı ya da pres tonajı yetersizliğine bağlı olarak yaşanacak form almama gibi sıkıntıları gözlemlemektir.

Dayama ayarı: Nihai parçaya ulaşıldıktan sonra çekme miktarları eşit olacak şekilde dayama pozisyonları belirlenir. Dayamaların pozisyonu belirlendikten sonra L şeklinde kalıba pimlenmesi gerekmektedir. Amaç her seferinde aynı pozisyonlanmış parça üretebilmektir.

Numune parça basımı: Pot-dişi kopyası, stoper, dengeleyici, iz zımbası ve dayama ayarı tamamlanmış kalıplarda sonraki operasyonlarda kullanılmak üzere basılan parçalardır.



Şekil 3.35. Sonraki operasyonlarda kullanılmak üzere basılmış operasyon numuneleri

Kesme ve delme kalıplarında yapılan, kalıp alıştırma işlem adımları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

Sacı oturturma: Form kalıbından çıkmış parçanın, kesme kalıbına tam oturması için yapılan tesviye işlemidir. Kesme kalıpları, alıştırılmış bir derin çekme kalıbından çıkan sac parçayla aynı forma sahip olmalıdır ve bu forma göre alıştırılmalıdır. Alıştırma işleminden önce montajdan gelen kesme kalıbının erkek-dişi göbeği ve baskı plakası temizlenerek tesviye işlemine başlanır. Tesviye işlemleri; gerekli bölgelerde köşe

çıkarma, sabun taşı ve zımpara gibi işlemlerdir. Bu işlemler bittikten sonra ölçme ve kontrol işlemi yapıp sac kullanarak yapılan alıştırmaya işlemine geçilir.

Derin çekmeden gelen parça erkek göbeğe oturtulmadan önce boyanır. Boyanan sac parça erkek göbeğe oturtulup el ile hafifçe vurularak, boyanın iz bırakması sağlanır. Boyalı bölgelere bakılarak gerekli tesviye işlemleri gerçekleştirilir. Bu işlemler sacın oturmasına engel olan bölge kalmayana kadar devam eder.

Stoper ve dengeleyici kontrolü: Kalıp prese bağlandığında kontrollü şekilde stopere inilmelidir. Kesme kalıplarında stoperler kuvveti absorbe etmek için değil çalışma stroğunu belirlemek içindir. Stoperler olmadan strok arttırılsa, çalışan parçalar arasında girişim olur ve kalıp zarar görebilir. Dengeleyiciler ise hassas olarak ayarlanmalıdır. Sac varken temas olmayıp (ya da değer değmez olup) sac yokken erkek ile baskı arasında sac boşluğunu sağlamalıdır.

Kesme boşluğu kontrolü: Kesme boşluğu, sac malzemesinin mukavemetine ve kalınlığına bağlı olarak hesaplanır. Teorik olarak hesaplanan kesme boşluğu, CNC' de sıfıra sıfır işlenemediğinden dolayı (bozucu etkenlerden dolayı), gerekli boşluk pres altında yapılan müdahalelerle sağlanmaya çalışılır. Kırmızı markalama boyası alt kesme ağızlarına sürülerek prese kurs yaptırılır ve temas eden yerlerden alınarak işlem temas kesilene kadar devam eder. Boya ile kontrol tamamlandıktan sonra kalıp stoperde tutulup raynel ile boşluk ölçülür.



Şekil 3.36. Alt kesme çeliklerinde, markalama boyası ile kesme boşluğu kontrolü

Alıştırma: Daha önceden saclı oturtması yapılan kalıp elemanı (erkek) referans olarak kabul edilerek, hareketli parça (üst baskı) alıştırmaları yapılır. Alıştırmada ilk olarak kesme çeliklerinin devreye girmeden önceki kontrolü gerçekleştirilir. Daha sonra ise kalıba tam strok yaptırılarak alıştırma kontrol edilir. Kesme kalıplarındaki kopya seviyesi, kesme ağızlarından minimum 15 mm sonrası değecek şekilde olmalıdır.



Şekil 3.37. Kesme kalıbında, alıştırmaları tamamlanmış operasyon numuneleri

Çapak giderme: Kesme kalıplarında en çok karşılaşılan problemdir. Çapağı gidermek için üst çeliklerin dikliği, kesme boşluğu ve hurda deformasyonu kontrol edilmelidir.



Şekil 3.38. Kesme boşluğu sebebiyle oluşan çapak problemi

Hurda düşmesi: Kesme kalıplarında istenilen her basımda hurdanın kalıptan uzaklaşmasıdır. Bu problemle karşılaşılmaması için, dikkat edilmesi gereken 2 uygulama vardır. İlk olarak, kesme ağız alt boşaltmasının uygun olması (açık kesmede 12 mm, kapalı kesmede 7 mm) diğeri ise, üst kesme çeliği ile alt kesme çeliği arasındaki girişim mesafesidir. Hurda takılması durumu, özellikle robotlu otomasyonlarda seri imalat verimliliğini etkileyen faktörlerden biridir. Ayrıca, hurda birikmesi sonucunda kalıpta ciddi hasarlar meydana gelebilir.



Şekil 3.39. Hurdanın alt kesme çeliğinde takılması durumu

Numune parça basımı: Kesme kalıplarından sonraki operasyonlarda kullanılmak üzere, baskı kopyası tamamlanmış, kesme kalitesi, hurda düşmesi, hurda deformasyonu kontrolleri yapılmış parçalardır.



Şekil 3.40. İlk kesmeden çıkmış operasyon numunesi (Operasyon 30)

Bükme ve ütölüme kalıplarında yapılan alıştırma işlemlerinde, çekme ve kesme kalıplarından farklı olarak 2 işlem adımı vardır. İlk adım, hareketli (baskı) alıştırmasıdır. Burada, kesme kalıbındaki gibi çelikler devreye girmeden hareketlinin kopyası sağlanır ve ilave olarak parçadaki diğer öpüşme yüzeylerinin de %100 alıştırılması yapılır. Bükme hattından sonraki 15 mm mesafe gazlı yaylar üzerinde, öpüşme yüzeyleri ise tabanda yapılır. İlgili operasyonda yapılan bükme işlemi için gerekli olan erkek radyüsleri haricinde hiçbir dişi ve erkek radyüsün teması istenilmez. İkinci adım ise bükme çeliklerinin alıştırılmasıdır. Çelik alıştırması yapılmadan önce sac boşluğu kontrolü yapılmalıdır. Sac boşluğu kontrolü yaparken alıştırması tamamlanan hareketlide, düz olan yüzeylere sac kalınlığı kadar malzeme koyulup, alıştırma yapılacak çeliklere de lehimler koyularak presin minimum tonajında stopere inilir ve lehim kalınlıkları kontrol edilir. Bütün çeliklerde %100 alıştırma sağlandıktan sonra sac boşluğu tekrar kontrol edilerek alıştırma tamamlanır. Yapılan pres altı çalışmaları sonucunda, sacın son şeklini aldığı bükme kalıbından çıkan sağ-sol nihai parçalar Şekil 3.41’de gösterilmiştir.



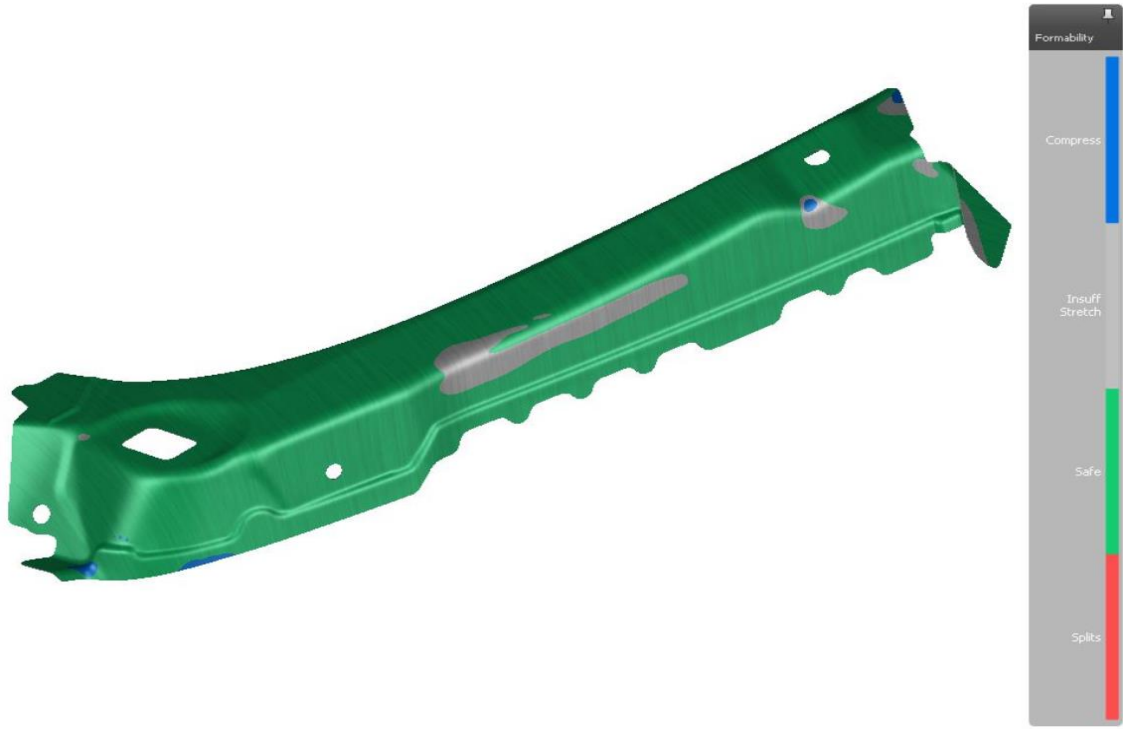
Şekil 3.41. Bükme kalıbından çıkmış sağ-sol final parçaları

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

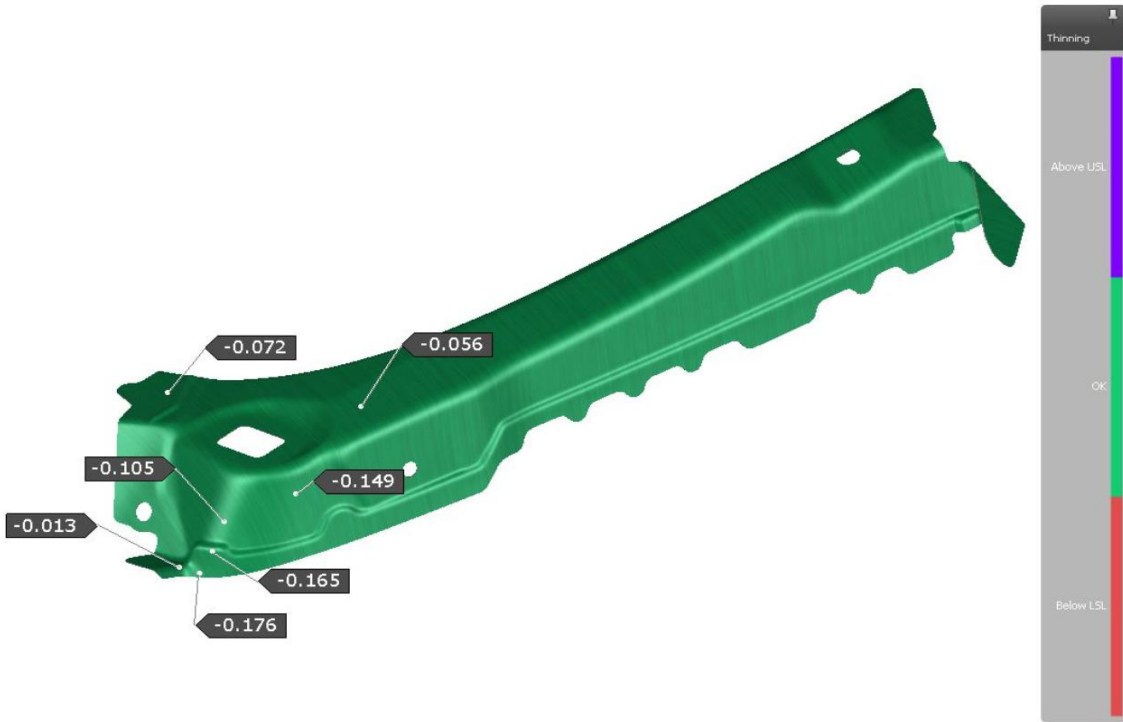
Kalıp alıştırma tamamlandıktan sonra, tüm operasyonlardan geçirilmiş final parça üzerinde ilk olarak yırtık, incelme, kırışma, iz kayması gibi problemlerin olup olmadığını incelenmiş ve Autoform analiz programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, deneysel ve analiz sonuçlarının farklılık göstermediği görülmüştür. Şekil 4.1’de simülasyon şartlarının sağlandığı sağ-sol tam simetrik deneysel parçaları, Şekil 4.2 – 4.5’ de ise simülasyon çözümlerinden elde edilmiş final parça üzerinde oluşan yırtılma, incelme, kırışma, ve iz kayması sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tüm operasyonlardan geçirilip kontrolleri yapılmış, deneysel parçalar



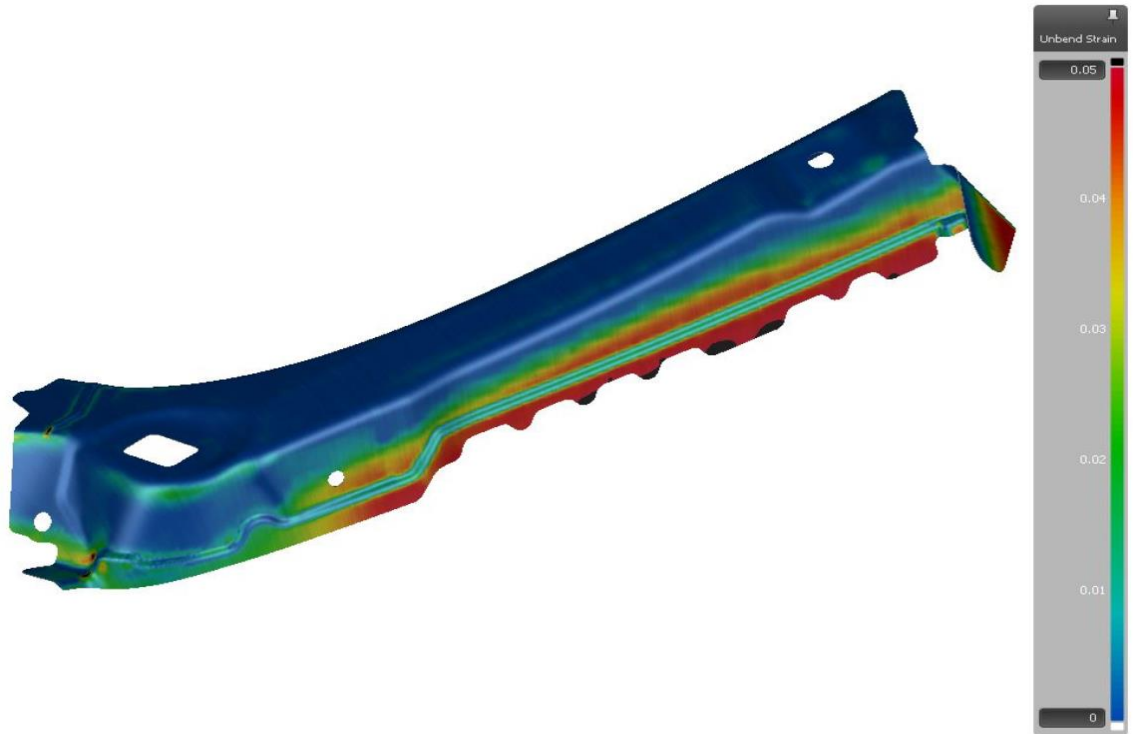
Şekil 4.2. Final parça üzerinde meydana gelen gerilmelere ait simülasyon sonuçları



Şekil 4.3. Final parça üzerinde meydana gelen incelmeye değerlerine ait simülasyon sonuçları



Şekil 4.4. Final parça üzerinde meydana gelen kırışma değerlerine ait simülasyon sonuçları



Şekil 4.5. Final parça üzerinde meydana gelen iz kayması değerlerine ait simülasyon sonuçları

Deneysel sonuçların ölçüsellik kontrolleri ilk olarak fikstür üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kontrol fikstürleri, karmaşık olan ölçme yöntemlerinden ziyade daha basit ve hızlı bir şekilde yüzeyleri, kesim hatlarını, büküm hatlarını ve delikleri ölçmeye yarayan aparattır. Final parçası ilk olarak, Şekil 4.6’da gösterildiği gibi referans deliklerine ait masterlar yardımıyla konumlandırılır. Daha sonra klempler tarafından sabitlenir ve geçer geçmez aparatı kullanılarak tüm yüzey-kontür kontrolleri gerçekleştirilir.



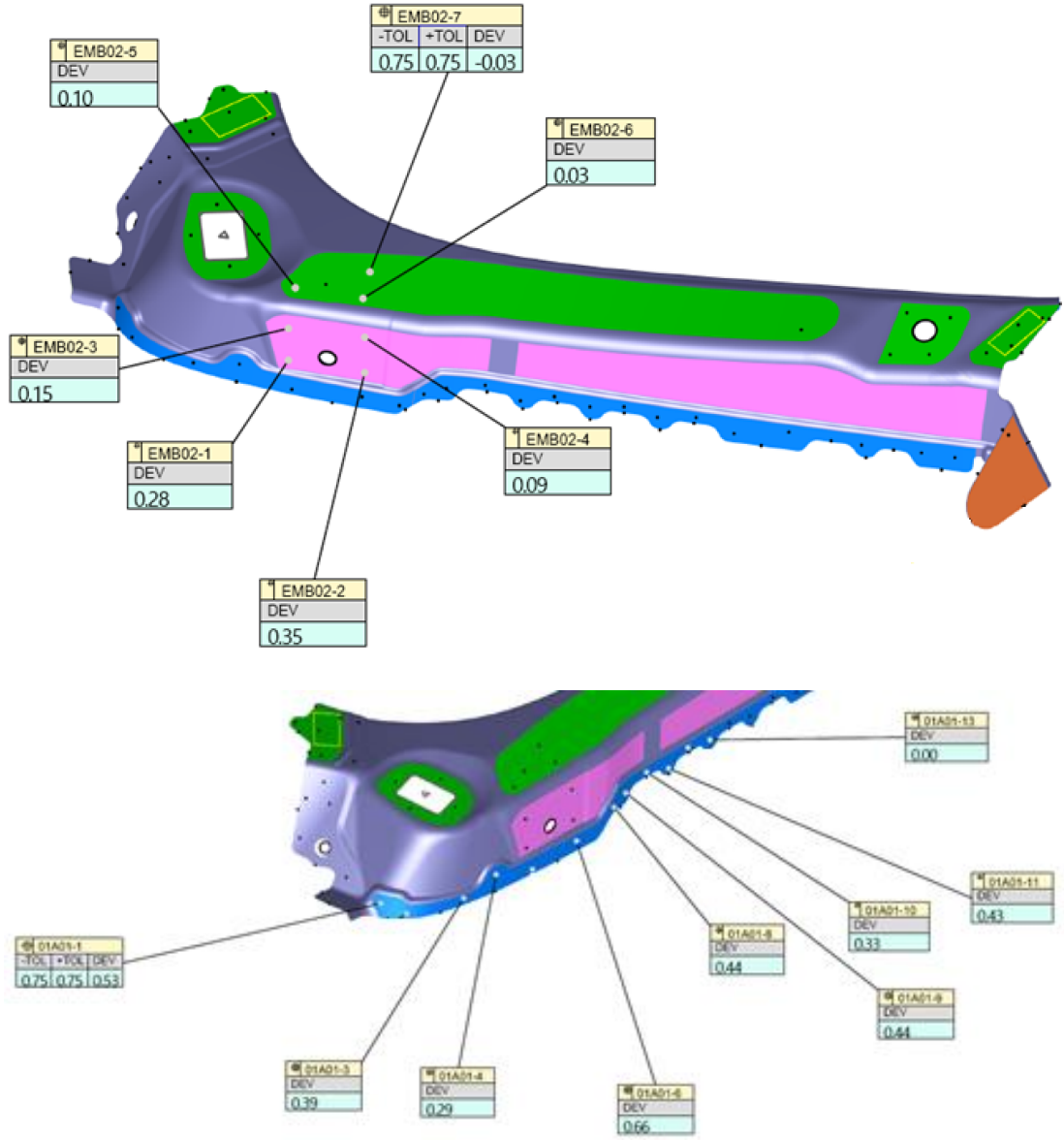
Şekil 4.6. Parçaların kontrol fikstürleri üzerinde sabitlenmesi

Şekil 4.7’ de gösterildiği gibi geçer geçmez ve yardımcı masterlar kullanılarak, deneysel parça üzerindeki tüm yüzey ve trim kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan kontroller sonrasında yüzey, delik, bükme ve trim hatlarının tolerans değerleri içerisinde çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.7. Fikstür üzerinde yardımcı aparatlar kullanılarak yapılan kontroller

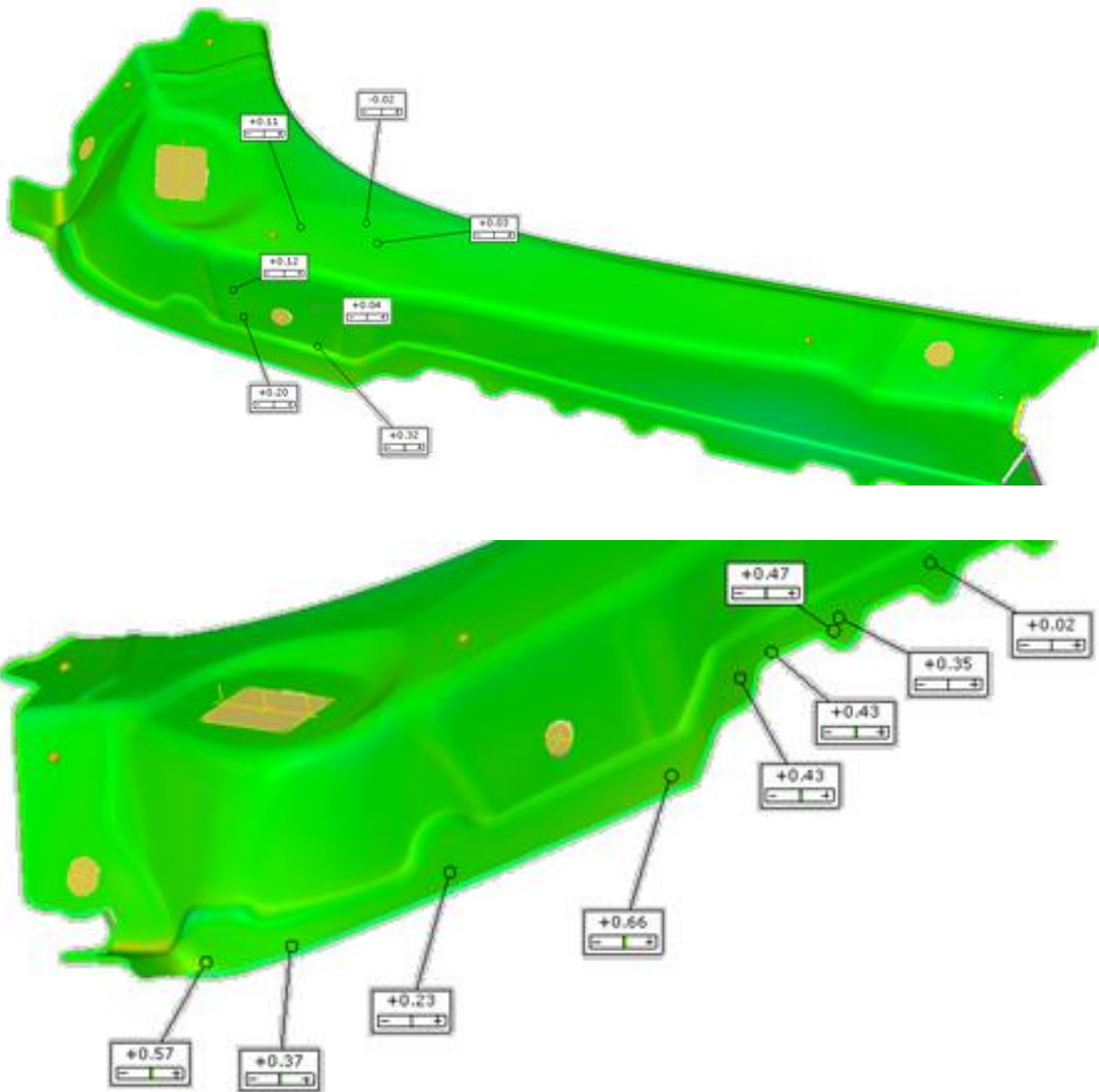
Şekil 4.8’ de parçanın fikstür üzerinde ölçüldüğü sonuçlara yer verilmiştir. Yapılan ölçümler, CMM (DEA) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada gösterilen değerler, deneysel sonuçlar sonucunda elde edilen final parça ile orijinal arasındaki sapma miktarlarıdır. CMM cihazları, X, Y, Z koordinat eksenlerinde çalışır ve parça boyutlarını bu koordinatlar ile eşleştirerek ölçümü gerçekleştirir. Genel olarak dokunmalı bir prob sistemiyle parça yüzeyinde çeşitli noktalara değdirilerek temas ettirilir. Daha sonra bu noktaların koordinatlarını hafızada toplar ve aldığı verileri orijinal model ile kıyaslama yaparak sonuçları raporlar. Elde edilen raporlar incelendiğinde, geri yaylanma değerlerinin simülasyon sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 4.8. CMM’ de ölçülen parçanın geri yaylanma sonuçları

Şekil 4.9’ da ise Atos 3D Optik Sayısallaştırma cihazı kullanılarak deneysel sac parçasının ölçülüp, orijinal model ile karşılaştırılması sonucunda geri yaylanma değerlerinin saptanması gösterilmiştir. Parçanın ölçümü yapılırken ilk olarak parça, ölçüm cihazına oynamayacak şekilde sabitlenir. Daha sonra referans için üzerine manyetik markalamalar yapıştırılır ve cihaz belli aralıklarla fotoğraf çeker. Bu sayede yazılım her bir fotoğrafı birleştirerek tarama datası oluşturur. Taranan data ile orijinal modele ait CAD data yazılım içerisine aktarılarak uygun metodlar ile karşılaştırılır. Yapılan çalışmada, best-fit

yöntemi ile kullanılmıştır. Bu yöntem, ölçülen parçanın dataya göre en uygun noktalarını karşılaştırarak diğer bölgelerin ölçümünü sağlayan sistemdir. İki data arasındaki yüzeyel sapma miktarları, renklendirilmiş şekilde oluşturulur. Bu renklendirilmiş değerler üzerinden geri yaylanmanın nerelerde ve ne miktarlarda olduğu saptanır. Elde edilen raporlar incelendiğinde, geri yaylanma değerlerinin simülasyon sonuçları ile uyum içinde çıktığı görülmüştür. Ayrıca, Atos ölçüm cihazı ile saptanan geri yaylanma değerleri CATIA ortamına alınarak, kalıp yüzeyleri geri yaylanma miktarı kadar ters yönde revize edilip çok kısa sürede kalıp iyileştirilmesi yapılabilmektedir (tersine mühendislik).

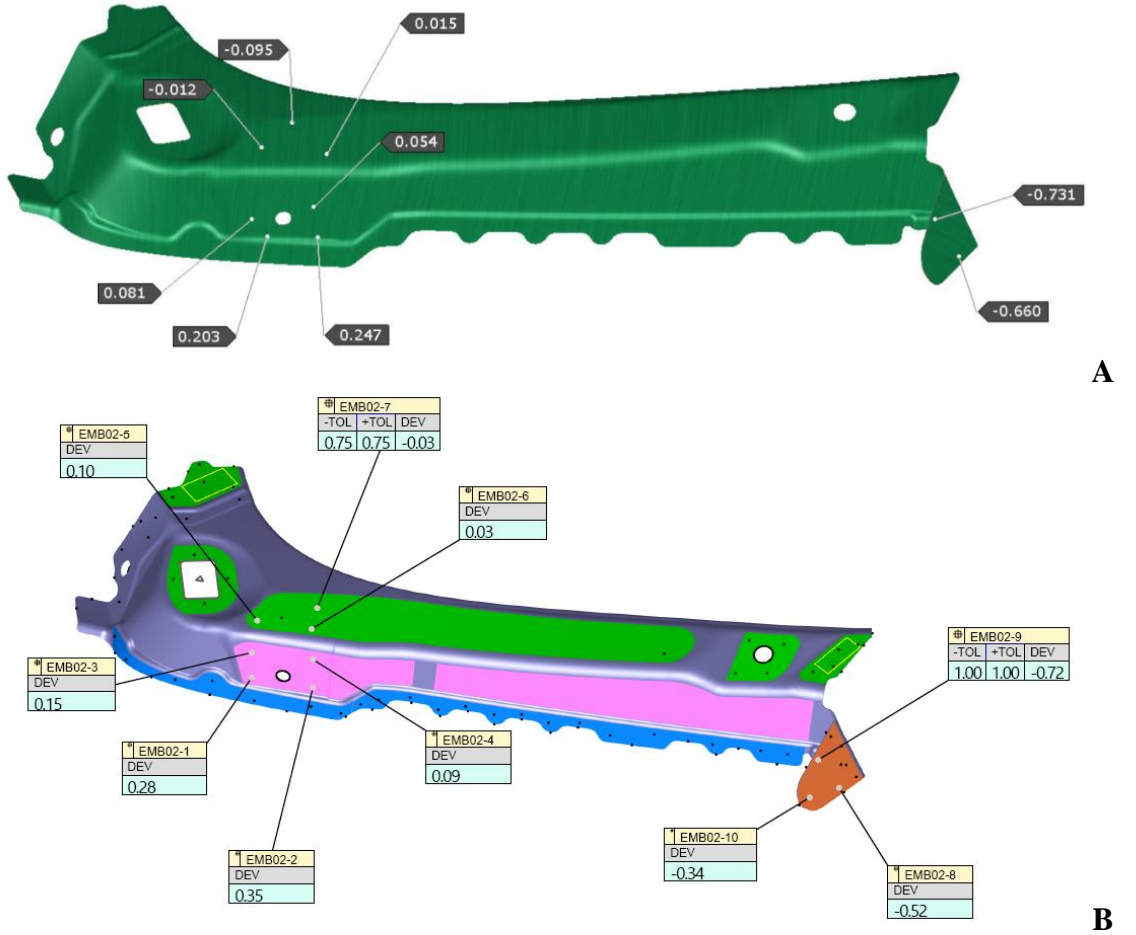


Şekil 4.9. Deneysel parçaların Atos ölçüm cihazında karşılaştırılması ile yüzeylerde meydana gelen sapma miktarları

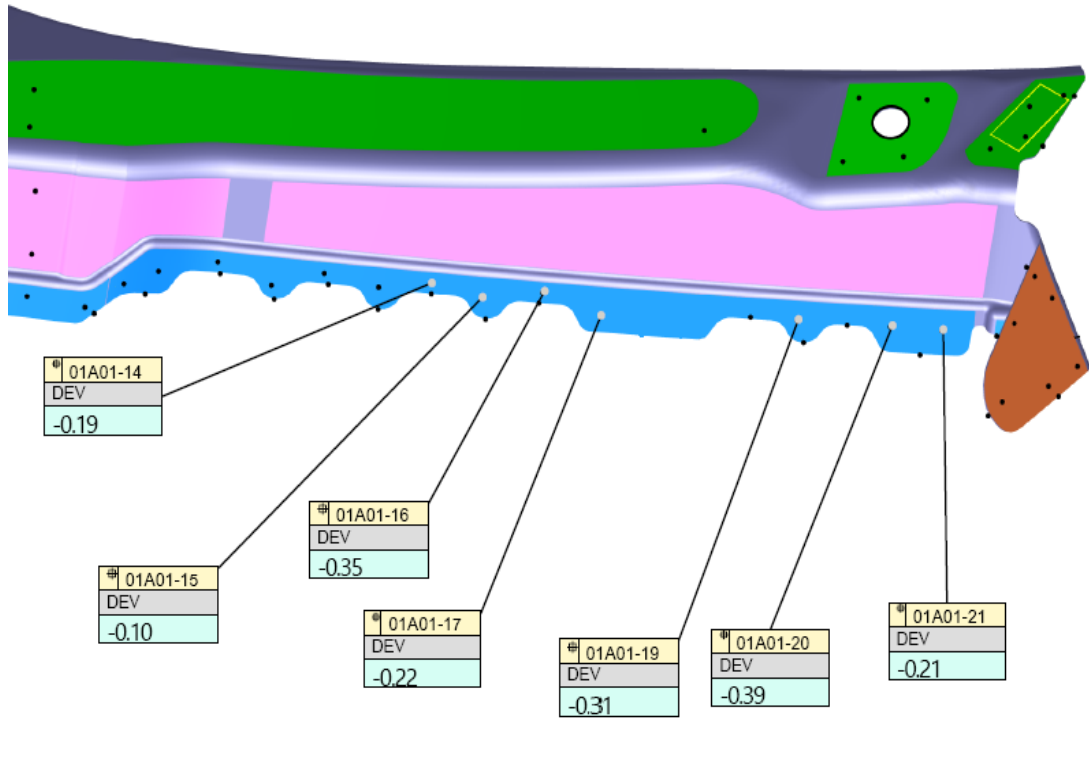
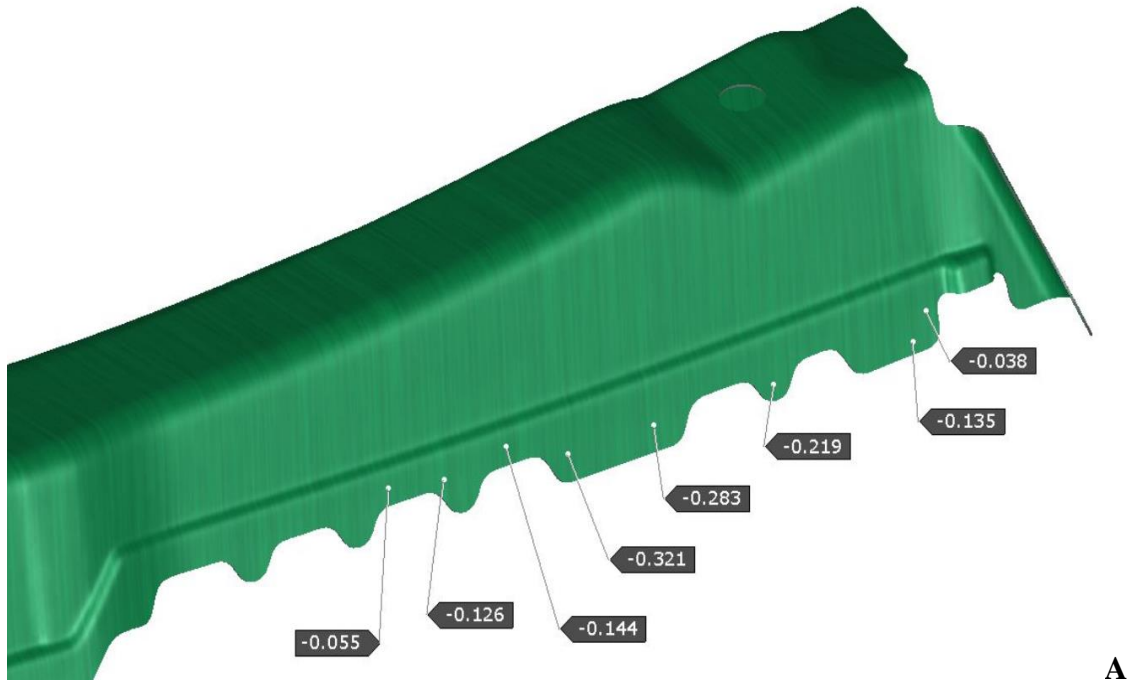
5. SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geri yaylanma telafisi yapılmış ve analiz programından elde edilmiş veriler ile deneysel çalışmalar sonucunda parçada meydana gelen geri yaylanma değerleri karşılaştırılarak sonuçlar incelenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarının, kalıp tasarımlarının, ön montaj, final montaj ve kalıp alıştırmaya süreçlerinin geri yaylanmaya etkileri üzerinde durulmuştur.

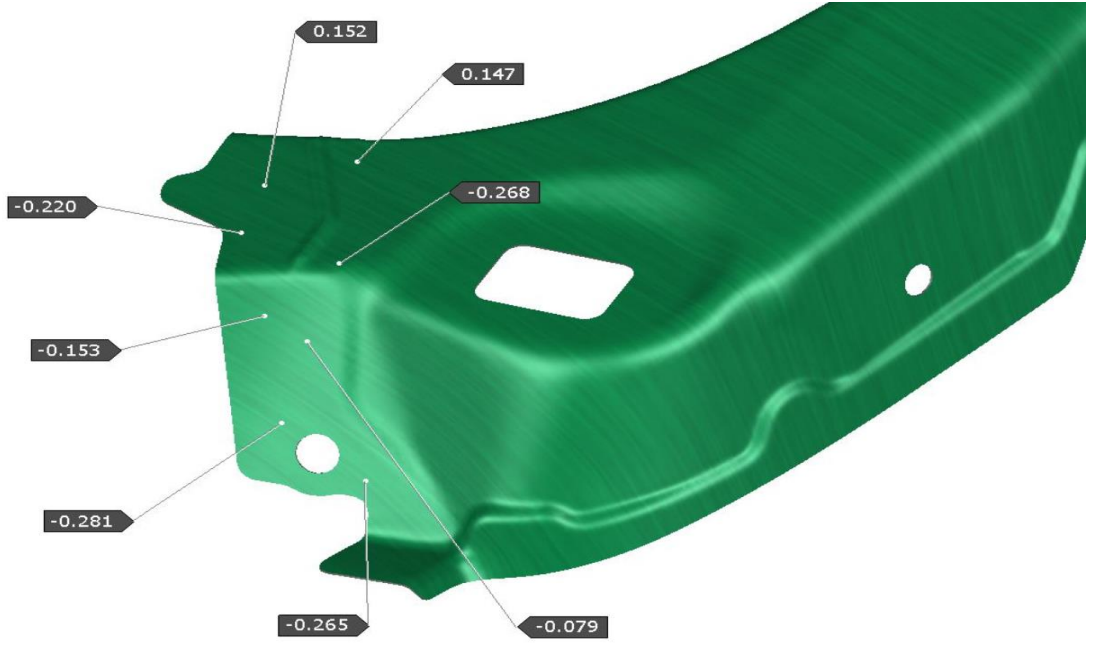
Şekil 5.1 – 5.5’de Autoform programında yapılan telafi çalışmaları sonucunda parça üzerinde meydana gelen geri yaylanma değerleri ile deneysel parçaların, CMM cihazında ölçülmesiyle yüzeylerde meydana gelen sapmalar gösterilmektedir.



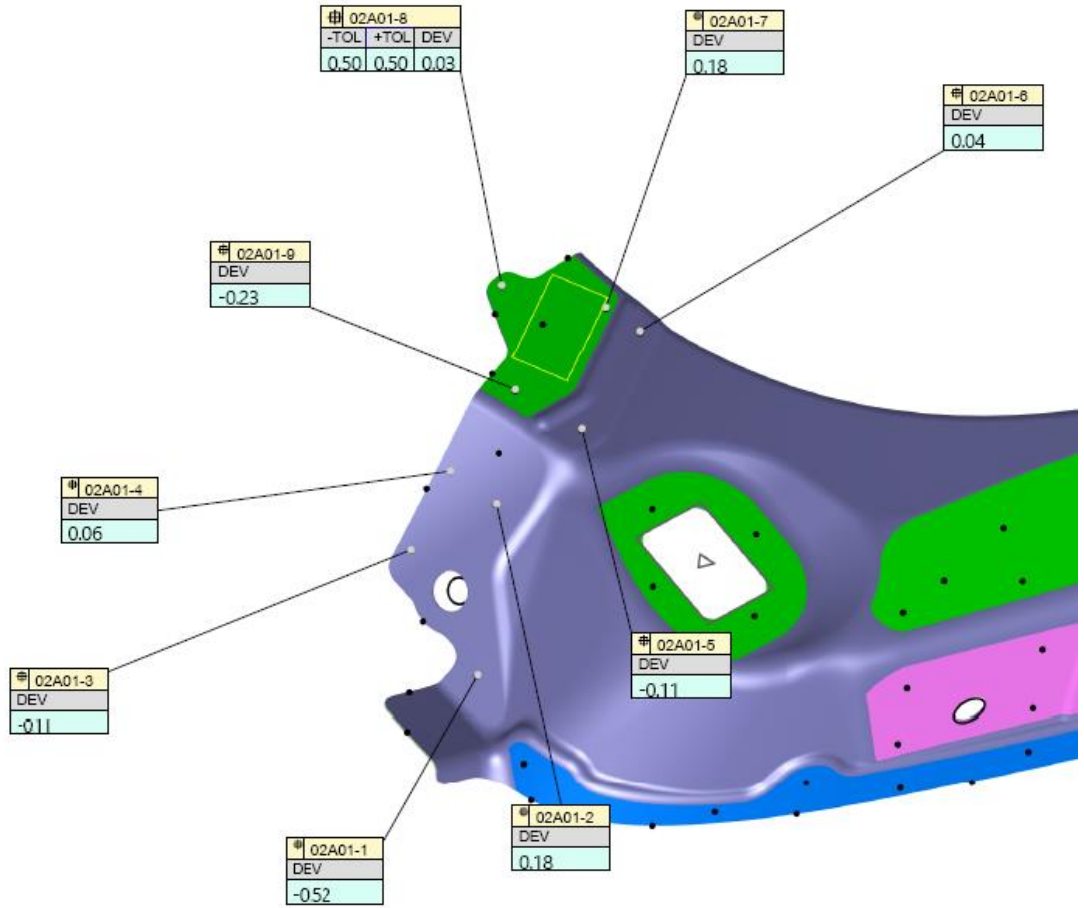
Şekil 5.1. Geri yaylanma değerleri A) Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma B) Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma



Şekil 5.2. Eteklerdeki geri yaylanma değerleri **A)** Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma **B)** Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma

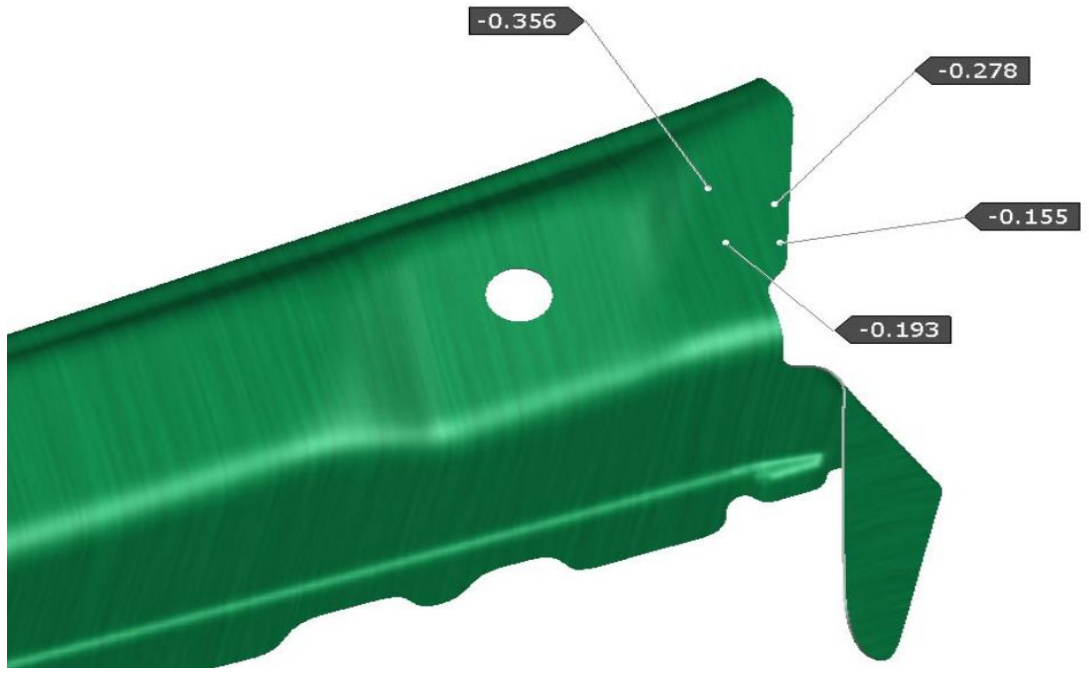


A

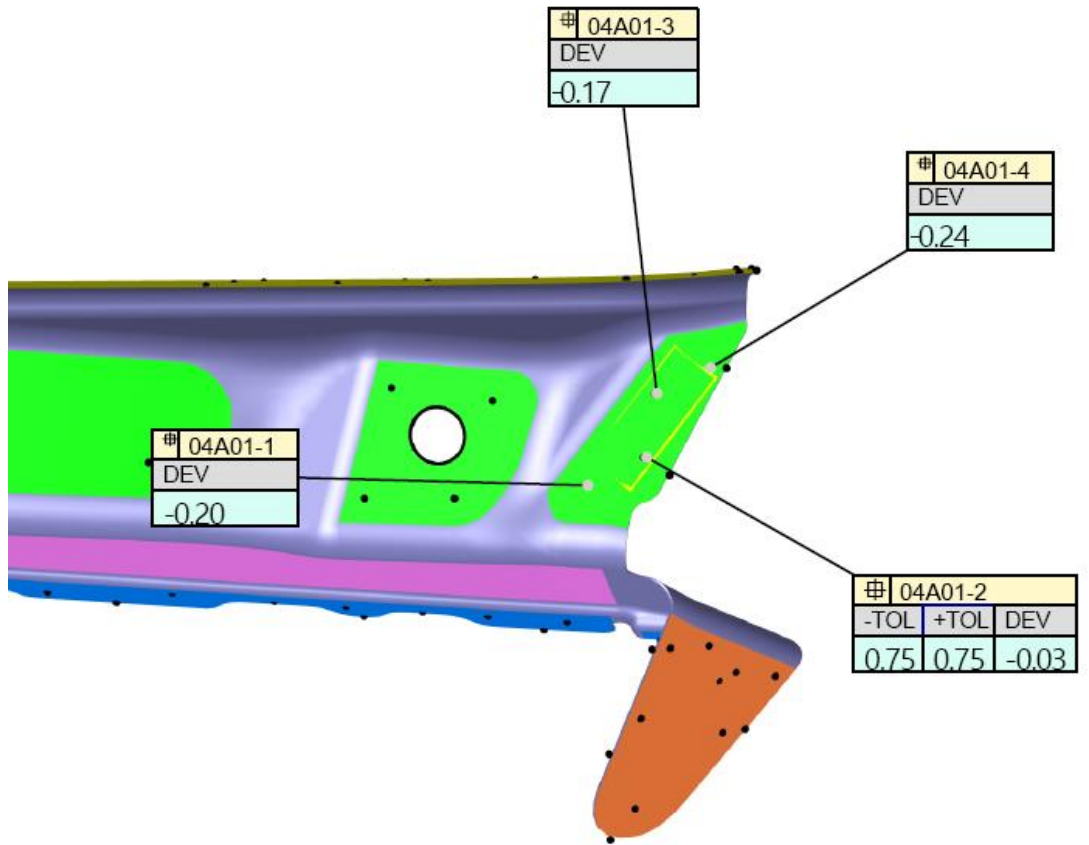


B

Şekil 5.3. Üst ve yan yüzlerdeki geri yaylanma değerleri **A)** Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma **B)** Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma

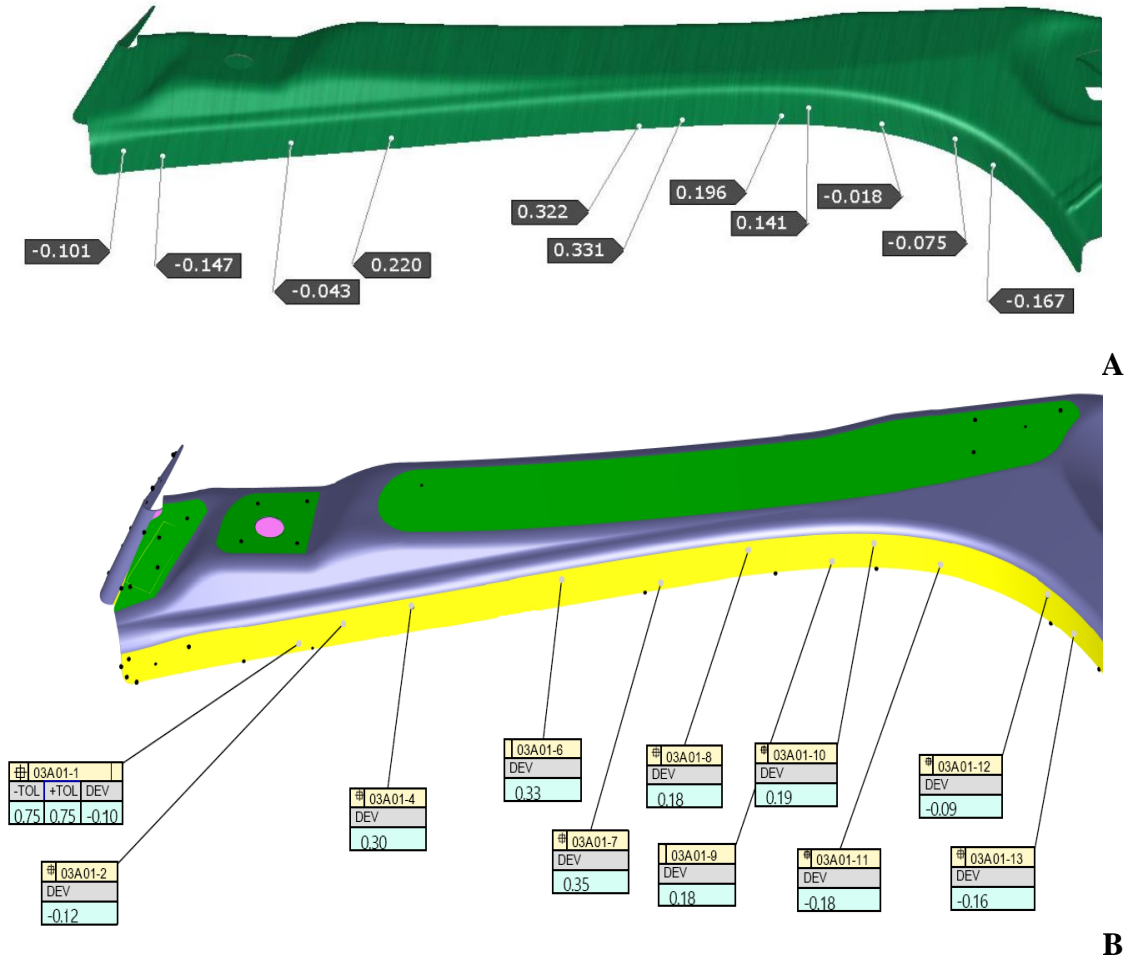


A



B

Şekil 5.4. Öpüşme yüzeyindeki geri yaylanma değerleri **A)** Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma **B)** Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma



Şekil 5.5. Bükülen eteklerdeki geri yaylanma değerleri **A)** Simülasyon sonuçlarına ait geri yaylanma **B)** Deneysel sonuçlara ait geri yaylanma

Çalışmanın genel sonuçları şöyle sıralanabilir;

- Autoform yazılım programı ile yapılan geri yaylanma davranışına ait sayısal sonuçların, deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu tespit edilmiştir
- Deneysel çalışmalara başlamadan önce yapılmış telafi çalışmaları ile hem maliyet hem de zamandan kazanç sağlanmıştır
- Autoform programının sac şekillendirme simülasyonunda, gerçeğe yakın sonuçlar vermede güvenilir olduğunu söylemek mümkündür
- Deneysel parçalardaki geri yaylanma davranışının simülasyon verileri ile uyum içinde çıkması parametrelerin doğru tayin edilmesine, yapılan telafi yöntemine ve kalıp alıştırma süreçlerine bağlıdır

- Pres altı çalışmaları, parçanın ölçüselliğine etki eden en önemli süreçtir. Parçanın, simülasyon sonuçları ile benzerliği her aşamada kontrol edilmelidir. Kontrolsüz yapılan çalışmalar, simülasyon verilerinden uzaklaştıracağı için deneysel sonuçlar üzerindeki sapma miktarları değişkenlik gösterir
- Simülasyon analizlerinde kullanılan malzeme kartı ile deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme özelliklerinin farklı olması sonuçları etkilemektedir. Bu sebeple parça çıkarma işlemine geçmeden önce kullanılan ham maddenin mekanik ve kimyasal özellikleri yapılan testler ile mutlaka doğrulanmalıdır
- Değişken olmayan parçaların basılması, proses ve kalıp tasarımlarının uygunluğuna bağlıdır. Örnek olarak, her operasyona ait dayama pozisyonlarının belirlenmesiyle, parçanın operasyon esnasında aynı konumunda kalması sağlanır. Aksi durumda ise konum kaçıklıkları, ölçülerin tolerans dışına çıkması veya çapak oluşumu gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilir

Gelecekteki araştırmacılar için bu çalışmanın ardından önerilebilecek çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

- Farklı analiz programları kullanılarak yazılımların güvenilirliklerini karşılaştırmak amaçlı deneyler yapılabilir
- Farklı şekillendirme yöntemlerinde geri esneme davranışlarının analizi yapılabilir
- Yağlama oranının geri esneme üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Aynı şartlarda, kalınlık sabit tutularak yalnızca sac malzemenin mukavemet değerinin azaltılıp arttırılması ile ortaya çıkacak sonuçların değerlendirilmesi yapılabilir
- Ham madde miktarının arttırılması ya da azaltılması yönünde çalışmalar yapılabilir

KAYNAKLAR

- Andersson, A. 2005.** Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member. *Journal of Material Processing Technology*, 169: 352- 356.
- Anonim, 2009.** Metal şekillendirme laboratuvar deneyleri. Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü, <http://ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi>, Niğde.
- Aran, A. 2007.** Döküm teknolojisi imal usülleri ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Asgari, S.A., Pereira, M., Rolfe, B.F., Dingle, M. and Hodgson, P.D., 2008.** Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 203: 129-136.
- Ataşımşek, S. 1977.** Delme kesme ve sac kalıpları. Bursa.
- Ataşımşek, S. 1979.** Sac kalıpları, M.E.B., Bursa, 232-337.
- Çapan, L. 2003.** Metallere plastik şekil verme. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Çayıroğlu, İ. 2019.** Makine elemanları ders notları. Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/MakineElemanlari/Makine_Elemanlari_Ders_Notlari-1.Hafta.pdf-(Erişim tarihi: 27.12.2019).
- Değirmenci, H. 2009.** Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve nedenleri ile bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirci, H.İ., Yaşar, M., Demiray, K. ve Karalı, M. 2005.** Derin çekme işlemlerinde baskı plakasının cidar kalınlığı üzerindeki etkisinin Ansys Ls-Dyna ile incelenmesi. 4th International Advanced Technologies Symposium, Eylül 28-30, Konya.
- Demirkol, M. 2010.** Plastik şekil verme teknolojisi. İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Ders Notları, İstanbul.
- Duddeck F.** 9-material models, department of engineering. Queen Mary College, London University, Mile End Road, London E1 4ENS, UK.
- Ergeldi, M.M. 2002.** Saç şekillendirme kalıbı çekme yüzeylerinin tasarımında sonlu elemanlar yönteminin kullanılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Esat, V., Darendeliler, H., Gokler, M.I. 2002.** Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets. *Materials and Design*, 23: 223-229.

Esener, C. 2006. AA5754 malzemesinin derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi FBE, 13-65, Karabük.

Esener, E., Sönmez, E., Fırat, M. 2018. Metal şekillendirme proseslerinde sac açınım geometrisinin sonlu elemanlar yöntemi ile geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1): 89-79.

Gan, W., Wagoner, R.H. 2004. Die design method for sheet springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46: 1097-1113.

Gomes, C., Onipede, O., Lovell, M. 2005. Investigation of springback in high strength anisotropic steels. *Journal of Material Processing Technology*, 159: 91-98.

Gök, K., Gök, A. ve Neşeli, S., 2018. Ansys workbench-bilgisayar destekli yapısal analiz uygulamaları. Abaküs Kitap.

Groover, M. P. 2010. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed., Lehigh University, 978-0470-467002.

Gündü, T. 2000. Derin çekme saclarında derin çekilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Güneş, A.T. 1989. Pres işleri tekniği. Erk Yayıncılık, 1: 184-241, Ankara.

Işıқтаş, A. 2009. Farklı kalınlıklardaki DKP ve paslanmaz sacların farklı açılarda yapılan v-bükme işlemindeki geri esnemelerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

İlhan, A. 2018. Saç metal şekillendirmede mukavemet artırıcı parametrelerin optimizasyonu. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kaya, N.N. 2013. İnsan kolu humerus kemiği için sonlu elemanlar modeli ve analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Eğitimi, Ankara.

Keeler, S., Kimchi, M. 2014. Advanced high-strength steels application guidelines v5.0, World Auto Steel Publications a Member of World Steel Association (<http://www.worldautosteel.org/>).

Kılıç, S. 2009. DP600 çeliğinin geri esneme davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

Lange, K. 1985. Handbook of metal forming. McGraw Hill, New York.

Ling, Y.E., Lee, H.P., Cheok, B.T. 2005. Finite element analysis of springback in l-bending of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 168: 296-302.

Makinouchi, A. 1996. Sheet metal simulation in Industry. *Journal of Materials Processing Technology*, vol, 60: 19-26.

Marciniak, Z., Duncan J.L., Hu, S.J. 2002. Mechanics of sheet metal forming. Butterworth-Heinemann, Oxford, 82-107.

Meinders, T., Burchitz, I.A., Bonte, M.H., Lingbeek, R.A. 2008. Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 499-514.

Mielnik, E.M. 1991. Metalworking science and engineering, *McGraw Hill Inc.*, New York.

Özdemir, C. 2010. Paslanmaz çelikler ve üretim yöntemlerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Üretim Anabilim Dalı, İstanbul.

Schuller, 1998. Metal forming handbook. Stuttgart.

Shu, J.S., Hung C. 1996. Finite element analysis and optimization of springback reduction. The Double-Bend Technique, *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 36: 423- 434.

Sönmez, E. 2015. Metal şekillendirme işleminde geri esneme tahmininin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Şen, H. 2015. Levhaların bükülmesinde geri esneme davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. 2008. V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23: 231-238.

Tekiner, Z. 2004. An experimental study on the examination of springback of sheet metal with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 109-117.

Tekiner, Z. 2004. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 109-117.

Topçu, M., Taşgetiren, S. 1998. Mühendisler için sonlu elemanlar metodu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayın 007, Mühendislik Fakültesi Matbaası, 33-40, Denizli.

Tunali, B. 2019. Otomotiv endüstrisinde kullanılan U formlu DP sacların geri esneme davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında, Kütahya.

Uslu, E. 2014. Sac malzemelerin bükülmesinde geri esneme davranışının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Uzun, İ., Erişkin, Y. 1983. Sac metal kalıpcılığı. M.E.B., Ankara, 253-286.

Yanagimoto, J., Oyamada, K., Nakagawa, T. 2005. Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54: 213-216.

Yenice, M.M. 2006. Bükme ile şekillendirilen saclarda geri esneme davranışının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Yıldız, H., Kırılı, O. 2004. Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3): 317-326.

Yuan, W.Y.D. 1996. Generalized solution for the prediction of Springback in laminated strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(3): 254-264.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sezer ÇELİK
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 12.08.1991
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Hasan Ali Yücel Anadolu Lisesi, 2009
Lisans : Gediz Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, 2015
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2020

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Beyçelik Gestamp Teknoloji ve Kalıp Merkezi
2015-Devam

İletişim (e-posta) : sezer-celik@outlook.com