



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEDE KALIP
ALİŞTIRMASI İÇİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE TELAFİ ÇALIŞMASI**

SÜLEYMAN COŞKUN

Yüksek Lisans Tezi

**SAC METAL ŐEKILLENDİRMEDE KALIP
ALİŞTIRMASI İÇİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE TELAFİ ÇALIŞMASI**

SÜLEYMAN COŞKUN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEDE KALIP ALIŞTIRMASI İÇİN SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TELAFİ ÇALIŞMASI**

Süleyman COŞKUN
0000-0002-7703-4431

Prof. Dr. Rukiye ERTAN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Süleyman COŞKUN tarafından hazırlanan “SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEDE KALIP ALIŞTIRMASI İÇİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE TELAFİ ÇALIŞMASI” 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. Rukiye Ertan

- Başkan** : Prof. Dr. Rukiye Ertan İmza
0000-0002-9631-4607
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Hande Güler Özgül İmza
GWU-9651-2022
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Emre Demirci İmza
0000-0002-1968-0291
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.U.Ü. 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.

12/01/2023

Süleyman COŞKUN

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Rukiye ERTAN
12.01.2023

Süleyman COŞKUN
12.01.2023

ÖZET

Yüksek Lisans

SAC METAL ŞEKİLLENDİRMEDE KALIP ALIŞTIRMASI İÇİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE TELAFİ ÇALIŞMASI

Süleyman COŞKUN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. RUKİYE ERTAN

Otomobil modellerinde yapılan değişiklikler ve ürün geliştirme süreçlerinin kısaltmasının yanı sıra otomobil sac gövde bileşenlerinin kalitesine yönelik artan talepler doğrultusunda şirketlerin ürün geliştirme döngülerini kısaltmalarını zorunlu kılmıştır. Sac şekillendirme kalıplarının üretiminde en çok zaman alan süreç ise kalıp alıştırmasıdır. Belirli bir kaliteye ulaşmak için kalıp yüzeylerinin sac parçalar için zaman kaybı yaşanmadan hazırlanması ve deneme sürelerinin azaltılması hedeflenmelidir. Bu nedenle, sac metal şekillendirme süreçlerinde sayısal simülasyon analizi son yıllarda önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda, bu makale, kullanıcının bir simülasyon sonucunun incelme dağılımına dayalı olarak bir geometriyi tespit etmesine olanak tanıyan kalıp yüzeyi telafi yöntemini açıklamaktadır. Böylece, incelme sonuçlarına göre işleme yüzeyleri sayısal olarak tanımlanabilir ve manuel taşlama işlemlerini azaltarak daha kısa ve daha verimli alıştırma süreci hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac Şekillendirme, Kalıp Alıştırma, Sonlu Elemanlar Metodu, Yüzey Telafisi, Sac Deformasyonu
2023, vii + 38 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

CASE STUDY ON FINETE ELEMENT METHOD-BASED DIE SPOTTING
COMPENSATION FOR DIE TRY-OUT OF SHEET METAL FORMING

Süleyman COŞKUN

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

Supervisor: Prof. Dr. RUKİYE ERTAN

Shortened product development processes of automobile models modifications and increasing demands for the quality of automobile sheet body component necessitates companies to shorten product development cycles. The most time-consuming step during the production of stamping dies is manual spotting during the try-out of the tools. To achieve this quality, it should be aimed to quickly prepare the die surfaces for sheet metal parts and reduce try-out times. Therefore, numerical simulation analysis in sheet metal forming processes has become essential in recent years. In this context, this article describes a method for die spotting that allows the user to spot a geometry based on the thinning distribution of a simulation result. Thus, according to thinning results, machining surfaces can be numerically defined and leading to a shorter and more efficient try-out by reducing manual grinding processes.

Key words: Sheet Metal Forming, Die Spotting, Finite Element Method, Compensation of Tool Surfaces, Sheet Metal Deformation
2023, vii + 38 pages.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım süresince her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. RUKİYE ERTAN'e sonsuz saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam boyunca her koőulda yanımda olan, sabrını ve desteğini esirgemeyen eőime sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Beyçelik-Gestamp A.Ő. ' ye tez çalıőmam boyunca fabrika olanaklarının kullanılmasına izin verdiği ve tez çalıőmasını desteklediği için derin teőekkürlerimi sunarım. Tüm mesai arkadaşlarıma desteklerinden dolayı teőekkürü bir borç bilirim.

Süleyman COŞKUN
12/01/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Literatür Çalışması.....	3
2.2. Otomotivde Sac Metal Malzemeler	6
2.3. Malzeme Modelleri ve Malzeme Davranışları.....	7
2.4. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri.....	13
2.4.1. Kalıpta şekillendirme yöntemleri.....	14
2.5. Şekillendirme Sınır Diyagramı	16
2.6. Şekillendirme Oluşan Hatalar	17
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	19
3.1. Parça ve Kalıp Malzeme Özellikleri	19
3.2. Sayısal Analiz ve Kalıp Yüzeyi İşleme Verilerinin Hazırlanması.....	22
3.3. Kalıp İşleme Metodu.....	27
3.4. Pres Altı Kalıp Denemesi ve Kopya Yüzey Kontrolü	27
4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....	30
5.SONUÇ.....	35
KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	38

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

R _m	Çekme Dayanımı
MPa	Megapascal
σ	Gerilme
τ	Kayma
ϵ	Birim şekil değiştirme
$\sigma\text{-}\epsilon$	Birim Uzama
E	Elastisite (Young) Modülü
σ_a	Akma Noktası
$\sigma_{\ddot{u}}$	Üst Akma Noktası
σ_a	Alt Akma Noktası
A ₀	Başlangıç Kesit Alanı
σ_{ζ}	Çekme Noktası
F _ç	Uygulanan Çekme Kuvveti
σ_k	Kopma Noktası
t	Sac Kalınlığı
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

Kısaltmalar

Açıklama

FE	Finite Element
EPS	Elesto-Plastik Kabuk
CNC	Computer numerical control (bilgisayarlı sayısal kontrol)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Yüksek fırın ürünlerine uygulanan haddeleme işlemleri (Amerikan demir çelik ens.).....	6
Şekil 2.2. (a) Sac rulodan alınan ölçüm numune açısı değerleri, (b) Açısı değişkenliğinin gerçek gerilme diyagramına etkisi.....	8
Şekil 2.3. Şişkinlik testinin prensibi.....	9
Şekil 2.4. İzotropik pekleşme (a), kinematik pekleşme (b) ve hem izotropik hem kinematik pekleşme.....	10
Şekil 2.5. Form esnasında malzeme iç yapısındaki gerilim dağılımı.....	11
Şekil 2.6. a) İzotropik pekleşme ile, yük tersine çevrildiğinde ve sıkıştırma meydana geldiğinde, sertleşme eğrisi b) Bauschinger etkisinin gerilmeye etkisi	11
Şekil 2.7. Çekme kalıbı (Schuler 1998)	14
Şekil 2.8. İki kesme kenarı arasında sac metalin kesilmesi (Demirkol 2010) .	15
Şekil 2.9. Bükme kalıbına ait alt-üst tabla ve baskı plakası.....	16
Şekil 2.10. Ölçüm değerlerinin sınır eğrilerine çevrilmesi	17
Şekil 2.11. FLD eğrisinin yorumlanması (Paul, 2013).	18
Şekil 3.1. Parçanın ve sınırlayıcı kutunun izometrik görünümü.....	19
Şekil 3.2. Kalıp tasarımı.....	20
Şekil 3.3. a) Montajlı üst kalıp, b) Üst dişi yüzeye sahip döküm, c) Üst döküm.....	21
Şekil 3.4. a) Montajlı alt kalıp, b) Alt erkek, c) Pot, d) Alt döküm	21
Şekil 3.5. Tata Steel Ltd. firmasının oluşturduğu Vegter modeline sahip DC04 malzeme kartı (Tata Steel, 2023)	22
Şekil 3.6. Parçanın sıvama sonunda sonlu eleman modeli.....	23
Şekil 3.7. Elaman uzunluğu minimum 0.16 mm , maksimum 40 mm ve arasındaki açı 22.5 derece olan eleman yapısı (a), Adaptif mesh yapısı (b)	23
Şekil 3.8. Sonlu elemanlar yazılımına aktarılan kalıp yüzeyleri.....	24
Şekil 3.9. Pres hareketi.....	24
Şekil 3.10. OP20 pot parametreleri	25
Şekil 3.11. Doğrudan telafi verilen (sarı bölge), Geçiş bölgesi (Yeşil Bölge), Sabit bölge (Mavi Bölge).....	26
Şekil 3.12. İncelme vektörlerinin oluşumunda kullanılan parametreler	26
Şekil 3.13. Süzme kanallarının formları oluşana kadar sacın mavi boya ile kontrolü	28
Şekil 3.14. Kalıp kapanana kadar alt ve üst yüzeylerin mavi boya ile kopya desenleri	29
Şekil 3.15. Atos 5 3D Optik ölçüm cihazının sistem konfigürasyonu	29
Şekil 4.1. Sıvama sonrası parçanın FLD diyagramı (a) ve parça üzerindeki fizibilite durumu (b)	30
Şekil 4.2. Parçadaki plastik gerilim oranı ve parça üzerindeki % miktarı	30
Şekil 4.3. Sıvama sonrası sac parça üzerinde oluşan incelmeler (İncelme = (mevcut kalınlık - başlangıç kalınlığı) / başlangıç kalınlığı)	31

Şekil 4.4.	İncelme deformasyonu için telafi vektörlerinin gösterimi.....	31
Şekil 4.5.	Telafi verile yüzey ile mevcut nominal yüzey arasındaki sapma	32
Şekil 4.6.	Pres altı ilk deneme sonrası mavi boya deseni.....	32
Şekil 4.7.	Nihai parçanın simülasyon sonucu	33
Şekil 4.8.	Gerçekte nihai parçanın Atos 3D ölçüm sonucu.....	33

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. DC04'ün kimyasal bileşimleri (Ağırlıkça %)	20
Tablo 3.2. DC04'ün mekanik özellikleri	20
Tablo 3.3. Kalıp malzemeleri.....	21
Tablo 4.1. Çalışma Süreleri.....	34

1. GİRİŞ

Sac üreticileri düşük maliyetle büyük miktarlarda ince sac üretmektedir. Tüm metallerin önemli bir kısmı ince sıcak haddelenmiş rulo veya soğuk haddelenmiş levha olarak üretilir; bunlar daha sonra çeşitli proses süreçlerinden geçerek otomobillere, ev aletlerine, inşaat ürünlerine, uçaklara, yiyecek ve içecek kutularına ve diğer nihai ürüne dönüştürülür. Sac metal parçalar, malzemenin yüksek elastik modüle ve yüksek akma dayanımına sahip olması avantajına sahiptir. Böylece üretilen parçalar sert olmasının yanı sıra iyi bir mukavemet-ağırlık oranına sahiptirler.

Otomotiv endüstrisi üretim verimliliği ve seri üretim konularında lider konumdadır. Bir binek otomobil yaklaşık otuz bin farklı parçadan oluşur ve parçaların çoğu sac metalden oluşmaktadır. Araç üretiminin yıllık üretim adetleri düşünüldüğünde sac metal soğuk veya sıcak şekillendirme işlemi olan derin çekme, sıvama, bükme ve kesme prosesi BIW bileşenleri için en yaygın üretim yöntemidir. Başka bir deyişle, düşük üretim ve bakım maliyeti nedeniyle bu teknoloji seri üretilen ürünler için idealdir. Kalıp imalatının maliyeti nihai ürün maliyeti üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu nedenle, son yıllarda otomotiv kalıp imalatının maliyetini ve teslim süresini en aza indirmek için büyük bir çaba sarf edilmektedir.

Kalıp imalatı düşünüldüğünde, en çok zaman alan ve pres altında denenmesi gereken süreçlerden biri kalıp alıştırma döngüsüdür. Bu aşamada, pres altında, operatör veya usta kalıp yüzeyleri ile sac temas alanlarını tespit etmek için mavi boya ile aşırı çarpan veya boşlukları tespit ederek ideal kopya miktarı kadar manuel taşlama yapılır.

Kopya kontrolü ve müdahale aşamasının süresi uzmanın bilgisine, el işçiliğine, kalıp boyutuna ve parça geometrisine bağlıdır. Sürecin standartlaştırması için, kalıp kopya işlemi ve kalıp temas analizi belirli kabuller ve müdahalenin tek bir yüzeyde (dişi veya erkek) yapılması önemlidir.

Sac metal şekillendirme fizibilite analizi, kalıp tasarımı-üretimi ve pres altında kalıp denemesi, şekillendirme kalıplarının imalatında en kritik süreçlerdir. Pres altında kalıp denemesi, şekillendirme kalıp imalat sürecinde maliyetlerin ortalama yüzde yirmi beşini ve zamanın ise ortalama yüzde otuzunu tüketir. Zaman kaybının ana nedeni hala manuel

kalıp yüzey kopya kontrolü yaklaşımlarının kullanılmasıdır. Kalıp yüzeyinin CNC tezgahında işlemeden önce sac ve yüzeyler arasındaki boşluğu önlemek için mevcuttaki kalıp yüzeyler paylı olarak hazırlanır. Aksi takdirde, kalıp elastik davranışı, sac incilmesi veya kalınlaşması nedeniyle parça kalitesi etkilenir. Verilen paylı yüzeyler ise sonrasında pres altında yapılacak deneme ve kontrollerde manuel taşlama işlem sürecini uzatacaktır.

Mevcut kalıbın yapısal simülasyonu, kuvvetler altındaki kalıbın gerçek geometrisini ve işlenmemiş parça üzerindeki temas basınçlarının gerçek dağılımını tahmin etmek için bir yöntemdir.

Sac metal şekillendirme simülasyonundaki inceleme, simülasyon sırasında sacın kalınlığındaki değişimi temsil eder. Simülasyon sonuçları, başlangıç ve mevcut kalınlık arasındaki farkı tanımlayan inceleme deformasyonundan bir vektör alanı oluşturmak için kullanılabilir. Bu vektör alanı ayrıca herhangi bir geometriyi değiştirmek için de kullanılabilir. Mevcut koşullar simüle edilerek şekillenme sonrasında oluşan mamule ait geometri dışı aktararak kalıp alıştırması ve CNC’de kullanılmak üzere işleme yüzeyin hazırlanmasında kullanılabilir. Bu da paylı yüzeylerin verilmesine gerek kalmadan pres altı kopya kontrol sürecine başlanarak süreci hızlandıracaktır.

Bu tez tez çalışmasında binek araçlarda kullanılmak üzere kullanılan bir sac metal parçanın sonlu eleman yöntemi kullanılarak nihai parçadaki inceleme dağılımına dayalı olarak kalıp yüzeyleri oluşturulmuş, pres altı denemesi ve yüzeyler arası kopyasının değerlendirilmesi yapılarak geleneksel yöntemlere göre karşılaştırması yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Çalışması

Soğuk sac şekillendirme kalıplarının pres altı deneme ve beklenen kaliteye ulaşması için yapılan kalıp alıştırma sürelerini azaltılması için sonlu elemanlar yöntemi ile sac üzerindeki deformasyonların tahmin edilebilir ve bu doğrultuda kalıp yüzeylerine yapılan telafiler ile sac parça kalıplarının alıştırması üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir.

Kaydedilen tüm ilerlemeye rağmen, fiziksel kalıp alıştırma ve denemeleri hala toplam kalıp maliyetinin yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır (Stalman A, 2009). Kalıp alıştırması, yani kalıp boşluğunda malzeme akışını kontrol etmek için kalıp yüzeyinin taşlanması, neredeyse tamamen kalıp imalatçısının deneyimine bağlıdır. Ne kalıp tasarımının ne de FE simülasyonunun bir parçasıdır. Kalıptaki yüzeylerinin öpüşmesi tasarımı aşamasında doğru tahmin edilmesi, kalp ve parça üreticileri için önemli ölçüde zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.

Zgoll ve ark. (Zgoll, Götze, & Volk, 2021) yapmış oldukları çalışmalarında sonlu elemanlar metodu kullanarak kalıp yapımı sürecinde presin elastik deformasyonlarının dikkate alarak mevcuttaki oluşabilecek yüzeylerdeki sapmayı tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Gerçek presin sapma davranışının doğru temsili için, pres ölçüm verilerine dayanan hareketli destek ve koçun modelleri kullanılmışlardır. Bu çalışma ile presin yük altındaki deformasyonu simülasyon sonuçları gerçekte ölçülen değerler ile tutarlılık göstermiştir. Bu da kalıbın yük altında deformasyonun yanı sıra pres esnemesinin de mevcut kalıp yüzeylerindeki deformasyonunda önemli bir parametre olduğu göstermiştir.

K. Großmann ve ark. (Großmann, Wiemer, & Hardtmann, 2009) kalıp ve pres elastik özelliklerinin parçanın nihai şekli üzerindeki etkilerini telafi eden bir metodolojiyi üzerine çalışma yapmış ve yeni yöntem, kalıpta konvensiyonel bir sapmaya neden olan ve geleneksel kalıp kullanımının çekme üzerinde büyük bir etkiye yol açtığını gösteren bir deneyle test etmişlerdir. Oluşan deformasyon yönüne ters telafi çalışması yapılarak istenilen kalitede nihai mamul parçayı elde etmişlerdir. Nihai parça şeklini önemli ölçüde

etkilemeden pres ve kalıp deformasyonlarına izin verilerek sürecin kısaltılabileceğini belirtmişlerdir.

A. Zabala ve ark. (Zabala, Llavori, Argan, & Mendiguren, 2020) çalışmasında, kalıp kopya otomasyonuna yönelik ilk adım, mavi temas desen yapısının yorumlanmasında standartlaştırılmış kabuller kazandırmışlardır. Mavi macun deseni ile temas basıncı ve arayüzdeki boşluk görünümü arasındaki ilişkinin şifresini çözmek için farklı test prosedürleri izlenmiş ve ayrıca, mavi desene dayalı otomatik temas basıncı tespiti için sayısal bir yöntem geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Bu çalışmanın sonucu, deneme döngülerini azaltmaya ve böylece üretim süresini ve maliyetlerini düşürmeye odaklanan kalıp tespit sürecinin ve kalıp temas analizinin otomasyonuna yönelik objektif karar verme için potansiyel bir araç olarak sunmuşlardır.

C. Schöne ve ark. (Schöne, Stelzer, Schmidt, & Süße, 2010) kalıptan çıkan mamul parçanın 3D ölçüm yöntemleri ile geometrisinin bilgisayar ortamında aktarılması sonrası mevcuttaki kalıp yüzeyler ile karşılaştırarak tersine mühendislik yöntemi ile kalıp yüzeylerinin telafisini yapmış ve tekrardan kalıp yüzeylerini işleyerek beklenen kalitede mamul parça üretimini gerçekleştirmişlerdir.

W. Kubi ve ark. (Kubli & Reissner, 1995) çalışmasında Autoform programının artık otomotiv ve diğer sac şekillendirme endüstrilerinde karmaşık sac şekillendirme işlemlerinin tasarımında bir planlama aracı olarak önemli ölçüde kullanılabilirliğini test etmiştir. Yüksek bilgi işlem verimliliği, istikrarlı çalışma ve uygulamanın basitliği sayesinde, ürünü ve süreci optimize etmek için farklı parametrelere sahip çok sayıda değişken kolayca test etmiş ve gerçekte üretilen parçaların karşılaştırmasını yapmıştır.

A. Torstensson (Torstensson, 2022) çalışmasında Volvo Cars tarafından kullanılan simülasyon yazılımı Autoform'un yeni ve mevcut sürümünün tutarlılık farklılıklarına ilişkin genel bir genel bakış elde edilmesinin yanı sıra Autoform Forming R10'un Autoform Forming R8'den daha doğru bir sonuç tahmin edip etmediğini görmek için dört parametre incelenmiştir. Testlerin hiçbiri, Autoform Forming R10'un herhangi bir parametrenin tahmininde daha kötü olduğunu göstermemesi ve bazı açılardan daha iyi

olduğunu kanıtladığından, Autoform Forming R10'un önceki sürümün bir iyileştirmesi olduğu sonucuna varmıştır.

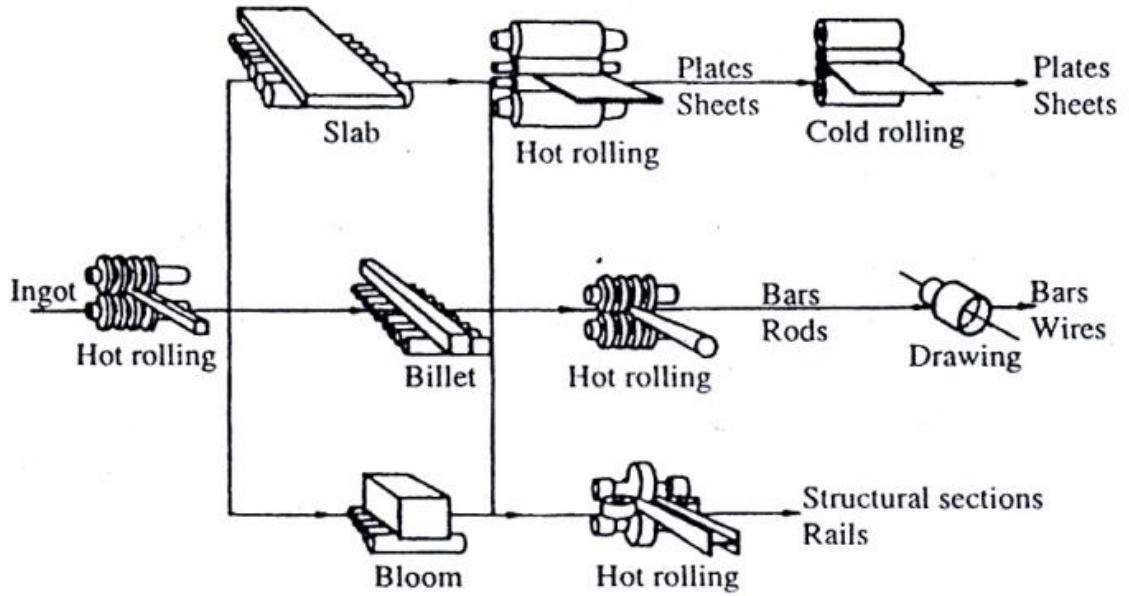
R. Tehel ve ark. (Tehel, ve diğerleri, 2022) kalıp üretiminden önceki tasarım aşamasında ve kalıp yüzeylerinin oluşturma sırasında, kalıp geliştirme sürecini dijitalleştirerek döngülerden tasarruf etmeği mümkün olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca şekillendirme simülasyonunda şekillendirme kalıp yüzeylerinin elastik özelliklerinin dikkate alınması için yeni bir yaklaşım sunulmuşlardır. Kalıp alıştırma işlemi sırasında basınç dağılımının sanallaştırılması ve sanal kalıp basınç dağılımına dayalı olarak yeniden işleme için yeniden oluşturulan yüzeyler üzerine bir vaka çalışması yapılmışlardır. Sonuçlar, sac metal şekillendirmede deneme süreci sırasında zaman, maliyet ve işçilikten tasarruf etme potansiyelini elde ettikleri veriler ile göstermişlerdir.

P Essig ve ark. (Essig, Liewald, & Bolay, 2020) optik ölçüm teknolojisi ve görüntü işleme kullanarak kalıp kopya görüntülerini değerlendirmek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Yöntem, kalıpların denenmesi ve değerlendirme sırasında ölçülebilir bir niceliksel boyuta yol açmıştır. Bunun için önce kalıp bileşenlerinin aktif temas alanları ölçülerek mevcut kalıp ile şekillendirme simülasyonu ile karşılaştırmışlardır. Böylece, pres altında deneme sonrası durumu sayısal olarak tanımlanmış ve manuel taşlama işlemlerini azaltarak daha kısa ve daha verimli bir denemeye yol açan yöntemi sunmuşlardır.

2.2. Otomotivde Sac Metal Malzemeler

Otomotiv endüstrisinde artan rekabet koşulları nedeniyle üretimde ekonomikliğin ve pratikliğin ön planda tutulduğu günümüz teknolojisinde sac metaller döküm, dövme ve talaşlı imalatın yerini almaktadır. Bunun nedeni kalıplama ile üretilen parçaların maliyet açısından uygunluğu, imalat sürecinde parametrelerin kolay kontrol edilebilmesidir. Kütlesel ağır ve kompleks ürünlerin üretiminden ziyade fonksiyonel, basit ve seri imalata uygun parçaların tercih edilmesi üreticileri sac malzeme kullanımını arttırmıştır.

Sac ve kalıp yapımında kullanılan çelik malzemelerin tamamı yüksek sıcaklıklara sahip fırınlarda döküm yöntemi ile elde edilir. Sonrasında istenilen ürünleri elde etmek için kütük demir haline getirilirler. Yüksek fırının ana ürünleri ingot, slab, kütük, blum olarak elde edilir.



Şekil 2.1. Yüksek fırın ürünlerine uygulanan haddeleme işlemleri (Amerikan demir çelik ens.).

Dikdörtgen kesitli slabın soğuk ve sıcak haddeleme yöntemi ile elde edilen levhalara kısaca sac olarak adlandırılırlar.

Sac elik kalınlıkları günümüzde 0,4 mm kalınlıktan başlayıp 7 mm'ye kadar üretimi gerçekleştirilebilmektedir. 7 mm üzerindeki ebatlar için kütük elik (karkas) tercih edilmektedir. Boyu ve eni kalınlığına oranla oldukça büyük olan, kalınlığı belirli toleranslar dahilinde levhanın her yerinde aynı üretilen yassı haddelenmiş metallerdir. Üretim prosesine göre saclar sıcak ve soğuk haddelenmiş saclar olarak iki grupta değerlendirilir. Standart uygulamada kalın saclar (>3mm) sıcak haddelenmiş, ince saclar ise soğuk haddelenmiştir. Ancak orta kalınlıktaki saclar (1,5-3mm) her iki yöntemle de üretilmektedir.

2.3. Malzeme Modelleri ve Malzeme Davranışları

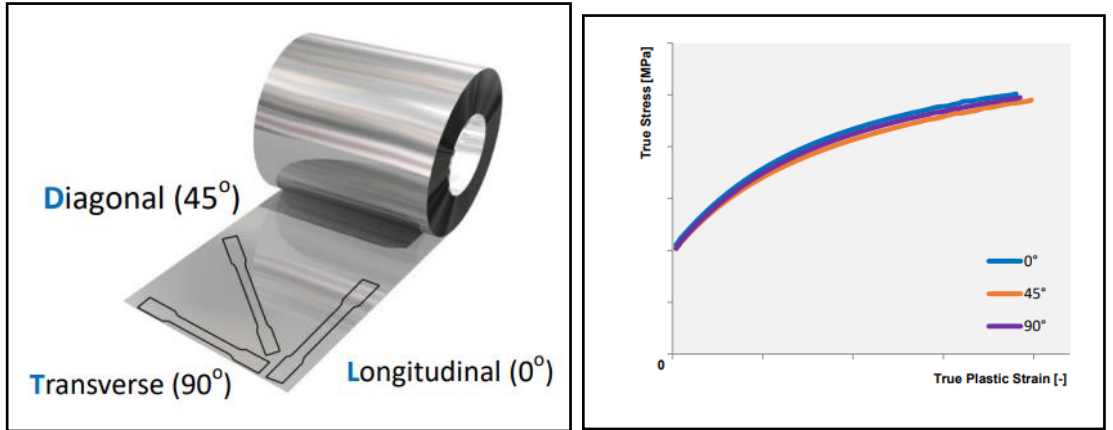
Malzeme modelleri, malzemelerin çeşitli koşullar altındaki davranışını temsil eden matematiksel ifadelerdir. Her bir malzeme özelliğini en iyi şekilde yansıtacak farklı malzeme modelleri mevcuttur. Kauçuk ve elastomerik malzemeler için hiperelastik malzeme modelleri kullanılırken, snme gibi zamana bağlı değerimler için viskoelastik malzeme modelleri kullanılmaktadır.

Elastisite, malzemenin şekil değerikliğinden sonra eski haline dönebilme yeteneğini, plastisite ise malzeme yapısındaki geri dönüşü olmayan deformatsyonları ifade eder. Elastik model genellikle malzemenin akma noktasına kadar olan kuvvetler için, plastik model ise malzemenin akma noktasından sonraki davranışını temsil etmek için kullanılır. Akma gerilimi aşıldıktan sonra malzemenin kalıcı deformatsyonu elastoplastik malzeme modeli ile temsil edilir. Sac metal şekillendirilmede hem elastik bölgeyi hem de plastik bölgeyi temsil etmek için elastoplastik modeller kullanılır. Bir malzeme modeli, o malzemenin gerçek davranışını ne kadar yakından temsil ederse, simülasyonlar o kadar doğru olacaktır. Bu nedenle malzeme modelleri ile ilgili çalışmalar sürekli olarak devam etmekte ve malzeme modelleri gelişen teknoloji ile temsil edilebilirliğini artıracak şekilde gelişmektedir.

Gerilme şekil değiştirme eğrisi ve elastisite modülleri malzemenin şekil değiştirmesi ve gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlar. Malzemeye özgüdür ve farklı zaman aralıklarında uygulanan çekme veya basma gerilmelerinin yarattığı deformasyon miktarı ölçüm sonrası kayıtları ile bulunur. Bu eğriden elastisite modülü gibi malzemeye ait birçok özellik ortaya çıkarılabilir. Eğri, elastik ve plastik bölge olmak üzere iki bölgeyi tanımlar. Elastik bölgenin başlangıcına kadar devam eden doğrunun eğimi, Young modülü olarak da bilinen elastisite modülünü ifade eder. Buna göre, elastisite modülü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

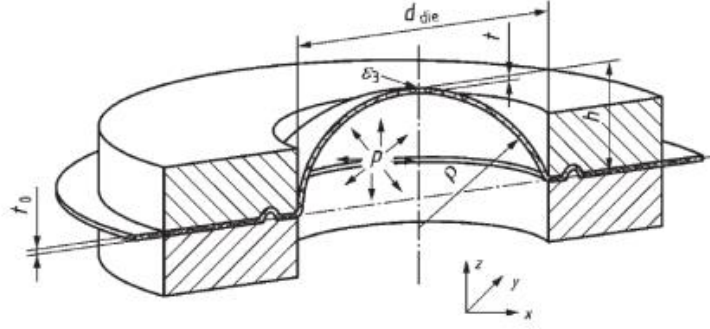
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_e} \text{ (Hook Kanunu)} \quad (2.1.)$$

Verilerin çoğu tek eksenli çekme testinden elde edilmiştir. Sac rulodan alınan numune sonucunda elde edile değerler numunenin sac yönüne göre Şekil 2.2.'de de görüleceği üzere farklılık göstermektedir.



Şekil 2.2. (a) Sac rulodan alınan ölçüm numune açı değerleri, (b) Açı değişkenliğinin gerçek gerilme diyagramına etkisi

Bu farklılıklar sac şekillendirmeyi etkilediğinde matematik modellere yansıtılmaktadır. Yapılan testin gerçekte tek yönlü değil çoğu zaman çift eksenli testlerdir. Ayrıca çekme eğrisi oldukça kısa olabileceğinden, deneysel veri elde etmek için bir başka seçenek de çift eksenli test (şişkinlik) verilerini kullanmaktır. ISO 16808:2014 standartına göre dairesel bir işlenmemiş parça, dişi kalıp ile pot arasında tamamen sıkıştırılır. Nihai kırılma meydana gelene kadar parçaya karşı sıvı ile basınç uygulanarak şişkinlik oluşturulur (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Şişkinlik testinin prensibi

h = Şekillendirilmiş parça yüksekliği

p = Sac parçaya uygulanan basınç

ϵ_E = Tepe noktasındaki eşdeğer gerilme

d_{die} = kalıp çapı (iç)

ρ = Eğrilik yarıçapı

t_0 = Sac parçanın ilk kalınlığı

t = Şekillenme sonrası sacın kalınlığı

Test sırasında, sıvının basıncı ölçülür ve parçanın deformasyonunun gelişimi bir optik ölçüm sistemi tarafından kaydedilir. Parçanın kaydedilen deformasyonuna dayanarak, parçanın merkezine yakın büyüklükler belirlenir. Çift eksenli gerilme eğrisi aşağıdaki gibi hesaplanıp ifade edilebilir.

$$\sigma_b = \frac{\rho \cdot p}{2t} \quad (2.2.)$$

$$t = t_0 \cdot e^{(-\epsilon_1 - \epsilon_2)} \quad (2.3.)$$

Tepe noktasındaki eşdeğer gerilme ise;

$$\epsilon_E = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot (\epsilon_1^2 + \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 + \epsilon_2^2)} \quad (2.4.)$$

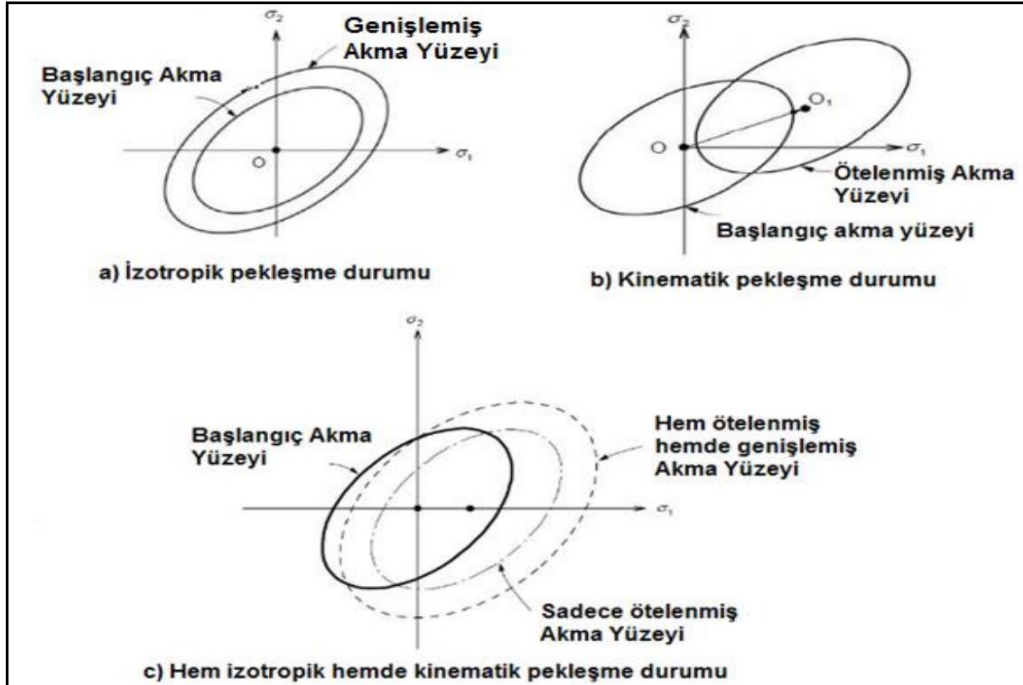
Bu testin yapılması ve sonuçların doğru bir şekilde yorumlanması son derece zordur. Çok az sayıda kuruluş bu testi gerçekleştirebilir. Bu veriler daha sonra tek eksenli çekme

verileri ile birleştirilebilir. Bu eklemeyi yapmak için bir yöntem çift eksenli test standardında (ISO16808) açıklanmıştır.

Malzemelerin mekanik özelliklerinde elastik sınıra kadar herhangi değişim görülmezken plastik bölgeye geçtikten sonra plastik deformasyon göstererek malzemenin mukavemet ve şekillendirilebilirlik gibi mekanik özellikleri değişmesine yol açmaktadır. Malzemedeki bu değişikliğe pekleşme denir. Genel olarak malzemelerde 3 tip pekleşme görülür. Bunlar izotropik, kinematik ve hem izotropik hem de kinematiktir pekleşmedir.

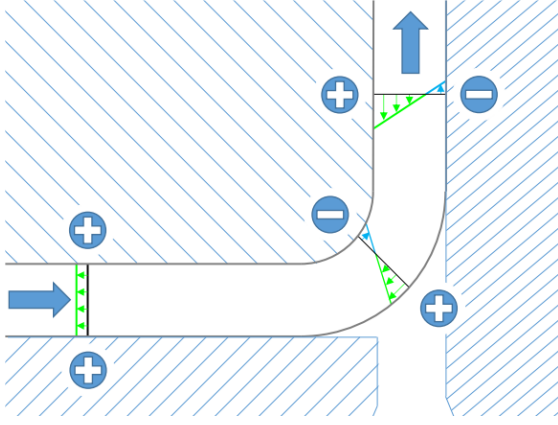
İzotropik pekleşme durumunda, ilk akma yüzeyinin sabit kaldığı ve yüzeyin genişleyerek büyüdüğü varsayılır. Bu varsayıma göre malzemenin çekme ve basınç akma dayanımları eşittir.

Hem de kinematik pekleşme hem izotropik pekleşme yalnız başına modellendiğinde gerçek durumu temsil edemeyeceğinden, iki varsayım birleştirilerek birleşik pekleşme modeli kullanılmaktadır. Bu model varsayımında, ilk akma yüzeyi hem genişler hem de ötelenir.



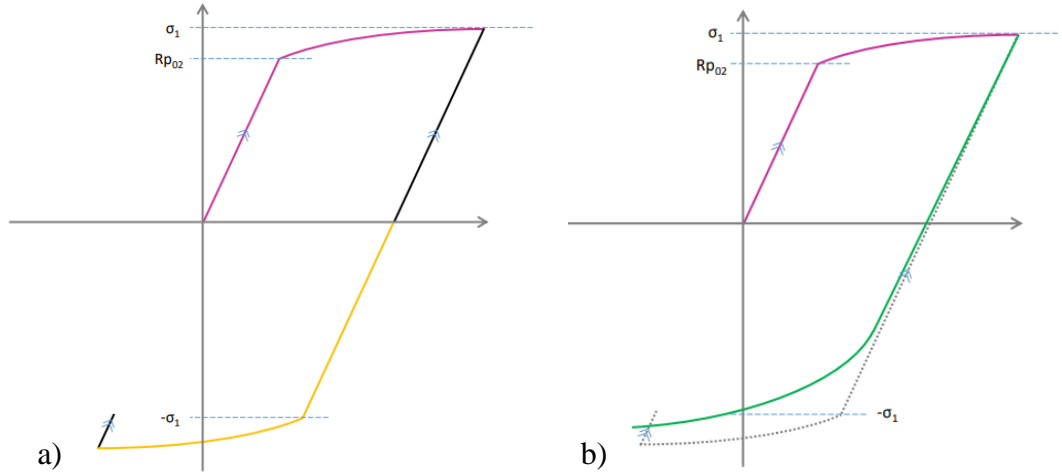
Şekil 2.4. İzotropik pekleşme (a), kinematik pekleşme (b) ve hem izotropik hem kinematik pekleşme

Soğuk şekillendirme sırasında bir yöndeki plastik deformasyona zıt (veya neredeyse zıt) yöndeki plastik deformasyon izlediğinde, malzeme içindeki iç gerilme dağılımı değişir ve bunun sonucunda malzeme özellikleri de değişir.



Şekil 2.5. Form esnasında malzeme iç yapısındaki gerilim dağılımı

Yönlü şekil değiştirme sertleşmesi, uygulanan kuvvet yönünde akma mukavemetinde bir artışa ve ters yönde akma mukavemetinde bir düşüşe neden olur. Akma dayanımındaki bu düşüş Bauschinger etkisi olarak bilinir. İzotropik pekleşme ile, yük tersine çevrildiğinde ve sıkıştırma meydana geldiğinde, pekleşme eğrisi aynıdır.



Şekil 2.6. a) İzotropik pekleşme ile, yük tersine çevrildiğinde ve sıkıştırma meydana geldiğinde, sertleşme eğrisi b) Bauschinger etkisinin gerilmeye etkisi

Hem gerilme hem de sıkıştırma gibi çeşitli gerilme durumları için elastik ve plastik alan arasındaki sınırı tanımlar. Bir akma yüzeyi, altı boyutlu gerilme uzayında beş boyutlu bir

yüzezdur. Akma yüzeyi genellikle dışbükeydir ve akma yüzeyinin içindeki gerilme durumu elastiktir. Gerilme durumu yüzey üzerinde olduğunda, malzemenin akma noktasına ulaştığı ve malzemenin plastik hale gelmesi olarak tanımlanır. Malzemenin daha fazla deformasyonu, plastik deformasyon geliştikçe yüzeyin şekli ve boyutu değişebilse bile, gerilme durumunun akma yüzeyinde kalmasına neden olur. Bunun nedeni, akma yüzeyinin dışında kalan gerilme durumlarının, bazı viskoplastisite modellerinde olmasa da hızdan bağımsız plastisitede izin verilmemesidir (Simo & Hughes, 1998).

Akma yüzeyi genellikle üç boyutlu bir asal gerilme uzayı ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), gerilme değişmezleri (I_1, J_2, J_3) ile iki veya üç boyutlu bir uzay veya üç boyutlu Haigh-Westergaard gerilme uzayının bir versiyonu cinsinden ifade edilir (ve görselleştirilir).

Mühendislikte bilinen birkaç farklı akma yüzeyi kullanılmakta olup bazıları aşağıdaki gibidir.

Tresca akma kriteri Henri Tresca'nın çalışması olarak kabul edilir (Tresca, 1864). Maksimum kayma gerilmesi teorisi (MSST) ve Tresca-Guest (TG) kriteri olarak da bilinir. Tresca kriteri, bir malzemenin maksimum kayma gerilmesinin tek eksenli bir çekme numunesindeki maksimum kayma gerilmesine ulaştığını belirtir. Asal gerilmeler açısından Tresca kriteri şu şekilde ifade edilir.

$$\frac{1}{2} \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) = S_{sy} = \frac{1}{2} S_y \quad (2.5.)$$

Burada S_{sy} kesme akma dayanımı ve S_y çekme akma dayanımıdır.

Von mises akma kriteri, maksimum bozulma enerjisi hipotezine dayanmaktadır. Bu hipoteze göre sünek bir malzemede çok eksenli yükleme altındaki darbe enerjisi yoğunluğu malzeme için kritik bir değere ulaştığında akma davranışı sergileyecektir. Matematiksel olarak von Mises verim kriteri şu şekilde ifade edilir;

$$\sigma_{e\text{ş}} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_1 + \sigma_1^2} \quad (2.6.)$$

Akma başlangıcında, kaymadaki kayma akma geriliminin büyüklüğü, basit çekme durumundaki çekme akma geriliminden $\sqrt{3}$ kat daha düşüktür. $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{max}$ eşitliğinden kayma cinsinden ifadesi ise

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}} = 0.577\sigma_y \quad (2.7.)$$

Görüleceği üzere akma başlangıcında, kaymadaki kayma akma geriliminin büyüklüğü, basit çekme durumundaki çekme akma geriliminden $\sqrt{3}$ kat daha düşüktür.

2.4. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri

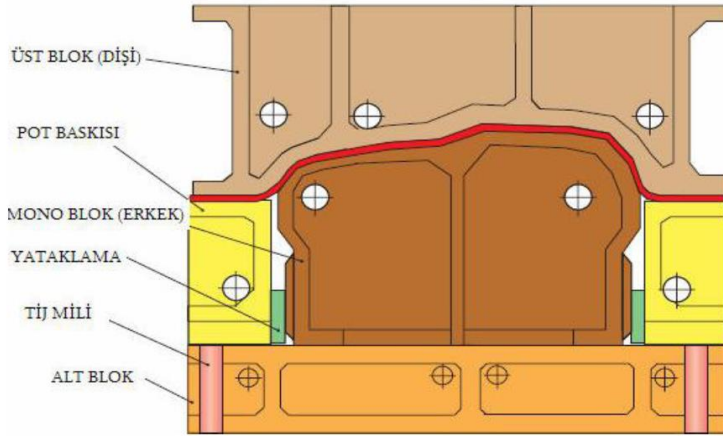
Metalik malzemelerin plastik deformasyonu için belirli düzlemlerde ve yönlerde atomları konum değiştirmesi ile tanımlanabilir. Metalik malzemelerin deformasyon mekanizmaları; tane sınırlarının kayması, difüzyon sürünmesi, kayma, ikizlenmedir. Metalik malzemelerin elastik veya plastik deformasyon direnci atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır (Kayalı & Ensari, 1986).

Çeşitli şekillendirme yöntemlerine sahip olmanın büyük avantajı ile hemen her sektörde önemli bir yer tutan sac malzemelerin üretim yöntemleri; haddeleyerek şekillendirme, gererek şekillendirme, derin çekme, presleme, sıvama, süper plastik şekillendirme, yüzey çekiçleyerek şekillendirme, patlama ile şekillendirme, elektromanyetik şekillendirme gibi özel proseslerle üretim mevcuttur (Gavas, 2020).

Sac şekillendirmedeki amaç üretilen sıcak veya soğuk haddelenmiş rulo veya levha, hidrolik ve eksantrik presler kullanılarak farklı karmaşık geometrilerdeki parçalar beklenen kalite ve seri imalata uygun şekilde üretilmesidir. Yaygın olarak kalıp şekillendirme işlemi pres altında baskı kuvveti uygulanarak yapılan işlem olarak bilinmektedir. Sac şekillendirme kalıp çeşitlerinde progresif, tandem ve transfer kalıp imalat yöntemi olarak tercih edilir. Sacın şekillendirme sırasında oluşan gerilmeler doğru ve planlı bir şekilde sac kalitesine uygun olarak uygulanmadığında gerinim dağılımlarından dolayı malzemede yırtılma, incelme, boyun verme, çapaklanma, kırışıklık (buruşma) ve çatlama gibi deformasyon ve sorunlar yaşanabilmekte.

2.4.1. Kalıpta şekillendirme yöntemleri

Derin çekme, basınç ve çekme altında şekillendirme yöntemidir. Derin çekme kalıplar Şekil 2.7’de gösterildiği üzere erkek, dişi ve pot çemberi olmak üzere 3 ayrı kalıp parçasından oluşur. Derin çekme işleminde geometrinin üretilebilirlik hesapları dikkate alınır. Alınmadığı takdirde yırtılma, aşırı incelme, boyun verme, buruşma (kırışma) sorunları ile karşılaşılır.

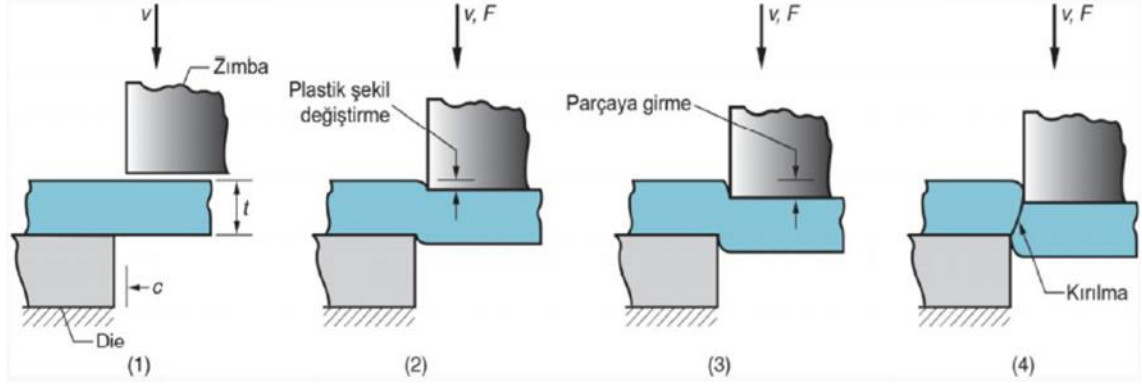


Şekil 2.7. Çekme kalıbı (Schuler 1998)

Sac kalınlığının sac çapına oranı da önemli bir derin çekme parametresidir ve %1'den büyük olması beklenir. Bu oran azaldıkça sacın buruşma eğilimi artar (Gülmez, 2011).

Levhalar genellikle rulo veya plaka halinde gelir ve istenilen boyutlara getirmek için bir kesme işleminden geçer. Bu kesme işlemi, bir makas veya kesme aleti ile talaş kaldırmadan malzemenin bir hat boyunca tamamen ayrılmasıdır. Kesme işlemi malzemeye gelen kuvvetlerin etkisiyle kesme ve delme kalıpları ile gerçekleştirilmektedir.

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

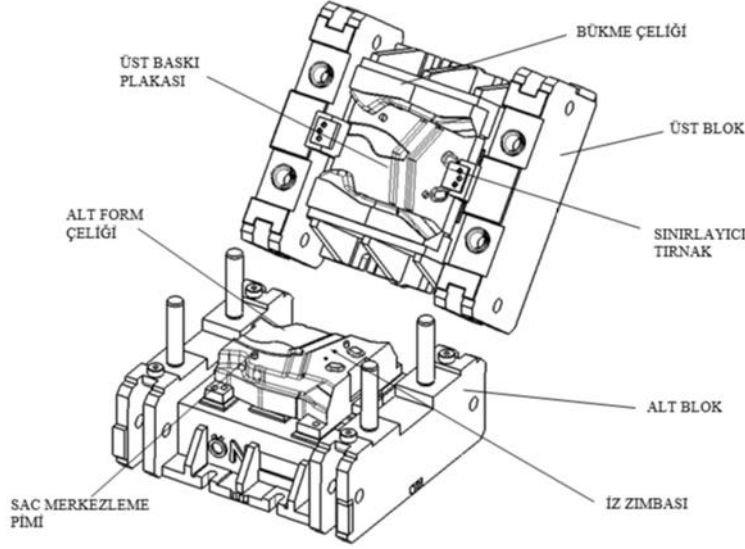


Şekil 2.8. İki kesme kenarı arasında sac metalin kesilmesi (Demirkol 2010)

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.

Bükme, uygulanan kuvvet sonucu sac malzemedan talaş kaldırmadan tarafsız eksen doğrultusunda döndürülerek şekillendirme işlemidir. Basma gerilmesinin aşılmasıyla birlikte meydana gelen akma gerilmesi bükülen sac malzemedede plastik deformasyon oluşturur ve uygulanan kuvvet ortadan kaldırıldığında parça kalıcı şeklini korur. (Işıktaş, 2009).

Bükme kalıplarında öncesinde kesilen sac malzemenin veya daha önceki işlemler sonucu oluşan parçaların bükülmesini gerçekleştirilir. Bükme alt, üst ve bükme sırasında parçanın konumunu sabitleyen baskıdan oluşur.



Şekil 2.9. Bükme kalıbına ait alt-üst tabla ve baskı plakası

2.5. Şekillendirme Sınır Diyagramı

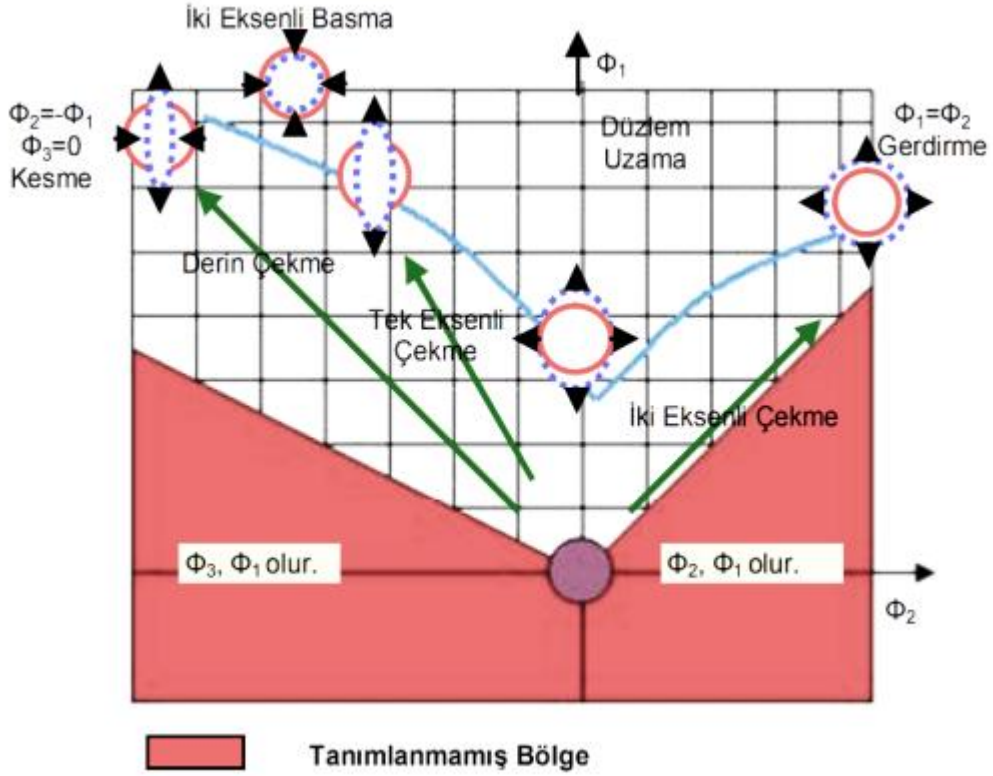
Sac malzemelerin en önemli özellikleri sağlamlıkları ve şekillendirilebilirlikleridir. Şekillendirilebilirlik kavramı, sac malzemenin plastik deformasyon sırasında yük altında herhangi bir hasar görmeden gerçekleştirebileceği maksimum deformasyon miktarıdır.

Malzeme ve proses parametrelerinin bir fonksiyonudur ve proses parametreleri malzemeye uygulanacak yükü belirlerken, malzeme parametreleri uygulanan yüke karşı direncin davranışını belirler.

Şekillendirilebilirliği etkileyen başlıca faktörler; çekme mukavemeti, akma mukavemeti, kopmada uzama ve anizotropi olmasına rağmen tamamını parametreler tek başına yeterli değildir. Sac üzerindeki birim şekil değişimlerinin tespiti ile şekillendirme sınırlarının elde edilmesi ve malzeme girdilerinin sonlu elemanlar modülüne işlenmesi üretimde karşılaşılabilecek hataların erken tespit edilmesini sağlar. Şekillendirme sınır eğrileri ilk olarak Keeler ve Backofen tarafından oluşturulmuştur. (Keeler & Backofen, 1963).

Şekillendirme sınır diyagramının sayısal tahminine yönelik çalışmalar Marciniak ve Kuezynski tarafından yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır (Campos, Butuc, Gráciob, Rochab, & Duarte, 2006).

Şekillendirme sınır eğrileri ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) ve ISO 12004-2 (Ekim 2008) standartlarına göre değerlendirme yapılarak elde edilebilmektedir.



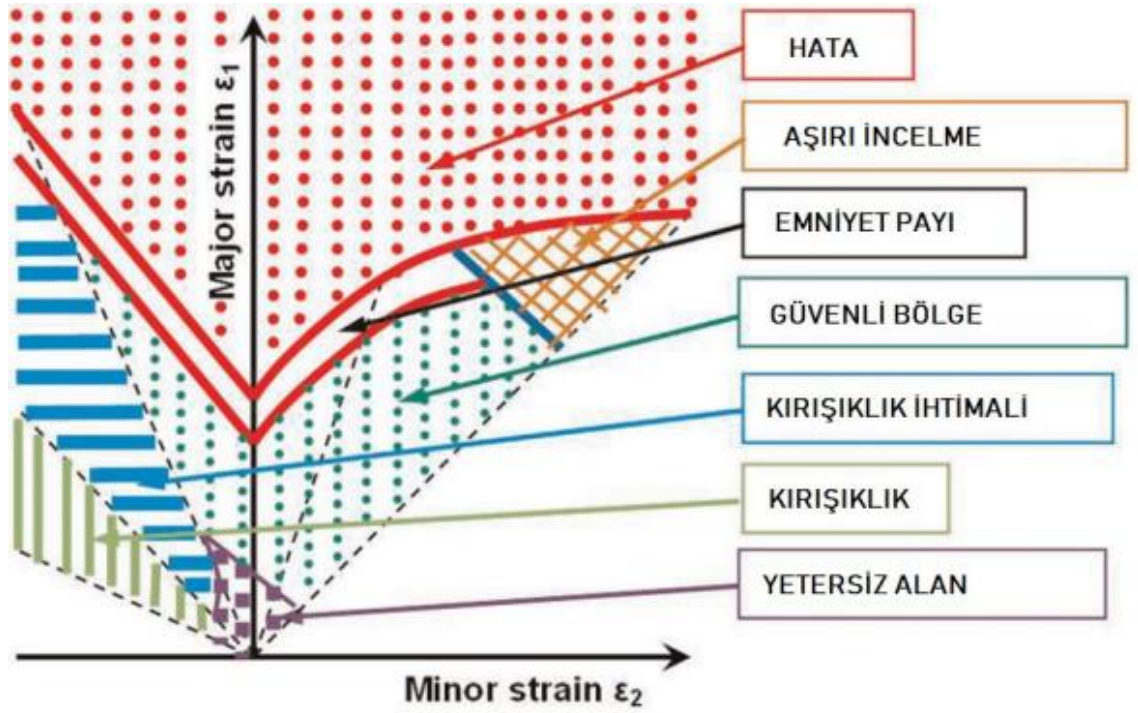
Şekil 2.10. Ölçüm değerlerinin sınır eğrilerine çevrilmesi

2.6. Şekillendirme Oluşan Hatalar

Sac metal üretiminde karşılaşılan hatalar genellikle; çapaklanma, yırtılma-çatlama, buruşma-kırışma, aşırı incelme ve geri yaylanmadır. Bu hatalar genellikle şekillendirilebilirlik kabiliyeti tercihinin aşılmasından veya göz ardı edilmesinden kaynaklanır. Çapak dışındaki diğer kusurların temelinde şekillendirilebilirlik kabiliyetinin aşılması yatmaktadır. Geçmiş yıllarda sac metal kalıpcılığında deneme yanılma yoluyla üretim yapılırken, günümüzde sonlu elemanlar analizi (SEA) ile kalıp tasarımı bilimsel temellere dayandırılarak deneme ve hata sayısı azaltılmakta kalmayıp işçilik, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlanmaktadır. Bu bilimsel temellerin

deneysel çalışmalarında gerekli kriterler tam ve eksiksiz olarak yerine getirilmelidir. Aksi takdirde SEA girdisinin yanlış yapılmasına ve analiz sonuçlarının hatalı olmasına neden olacak birçok sorunu beraberinde getirecektir.

Temel şekillendirme sırasında şekillendirme sınır eğrilerinin aşılması durumunda boyun verme, ardından çatlak oluşumu ve sonunda kopmalar gözlenir. Levhaya uygulanan kuvvetler sonucunda (Şekil 2.11), bu seviyenin üzerine çıkması durumunda yırtılma meydana geldiği görülebilir.



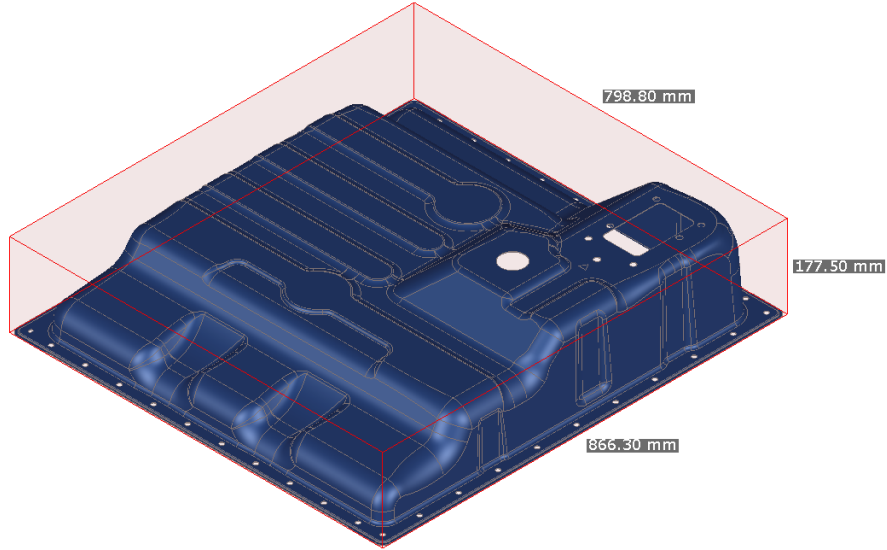
Şekil 2.11. FLD eğrisinin yorumlanması (Paul, 2013).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Pres altında deneme sırasında en çok zaman alan sac metal şekillendirme kalıbı türü tandem kalıp setleridir. Durumu daha iyi analiz edebilmek için şekillendirmenin neredeyse tamamı ilk operasyonda yapılmış ve bu çalışma için mümkün olan en geniş yüzeye sahip parça seçilmiştir. Öte yandan hemen hemen her araçta tecrübe edilen bir parçanın seçilmesi sonuçların değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bölümde, incelenen parça tasarımının özellikleri, sacın malzeme özellikleri, kalıp özellikleri, kalıpta alıştırma süreci ve simülasyon sonucunda elde edilen değerlerin kalıp yüzeylerini aktarım süreci sunulmuştur.

3.1. Parça ve Kalıp Malzeme Özellikleri

Parça üzerindeki incelme alanını tespit etmek için büyük boyutlu geometriler kullanılmıştır. Parçanın kalınlığı 0,8 mm ve ağırlığı 5,985 kg'dır. Parçalar araç üzerindeki batarya kutusu bileşenlerinin bir parçası olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Parçanın ve sınırlayıcı kutunun izometrik görünümü

Parçanın sac malzemesi DC04'dir. Sacın kimyasal bileşimleri ve genel mekanik özellikleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de verilmiştir. Sac malzemeye ait simülasyonda kullanılacak ayrıntılı mekanik özellikleri simülasyon ve analiz bölümünde değinilecektir.

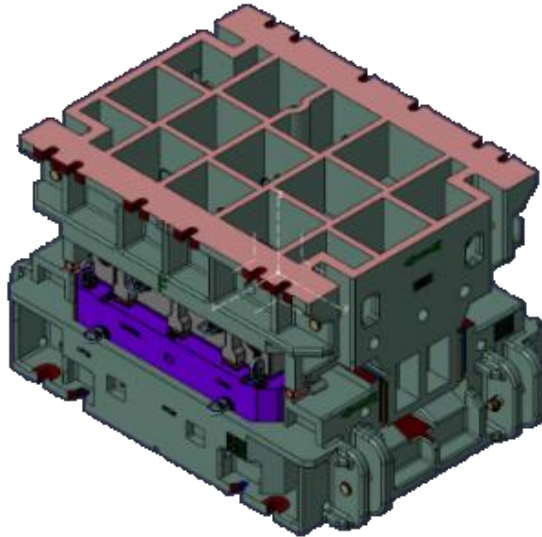
Tablo 3.1. DC04'ün kimyasal bileşimleri (Ağırlıkça %)

Material	C	Mn	P	S
DC04	0.08	0.4	0.03	0.03

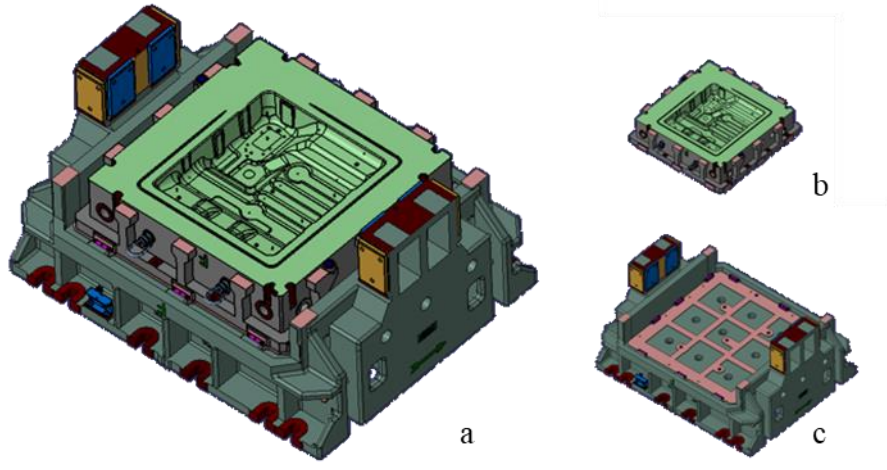
Tablo 3.2. DC04'ün mekanik özellikleri

Material	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength Rm (MPa)	Elongation (%)
DC04	2.06e+05	270-350	38

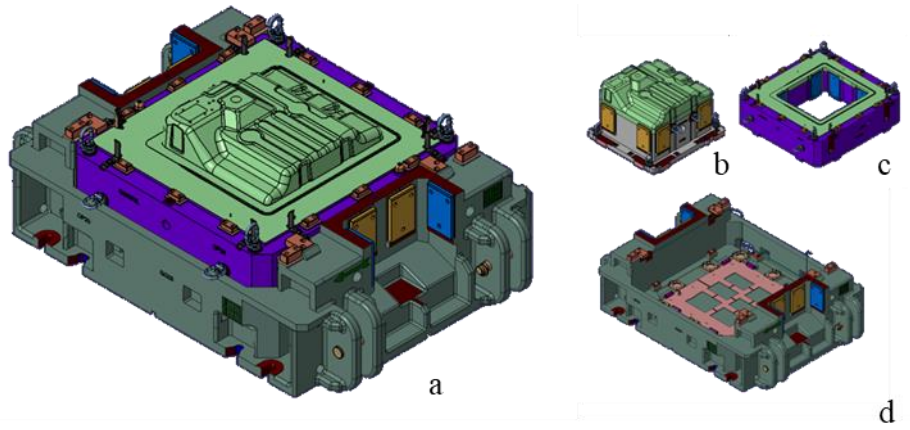
Parça üretim süreci, sıvama (OP20), kesme & delme (OP30), kesme (OP40), bükme (OP50), delme (OP60) işlemlerini içerir. Parçadaki incelmenin çoğu sıvama operasyonunda gerçekleştiğinden sıvama operasyonuna telafi çalışması verilmiştir. Şekil 3.3. ve Şekil 3.4. kalıp tasarımını ve bileşenlerini göstermektedir. Kalıbın mekanik özellikleri ise Tablo 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Kalıp tasarımı



Şekil 3.3. a) Montajlı üst kalıp, b) Üst dişi yüzeye sahip döküm, c) Üst döküm



Şekil 3.4. a) Montajlı alt kalıp, b) Alt erkek, c) Pot, d) Alt döküm

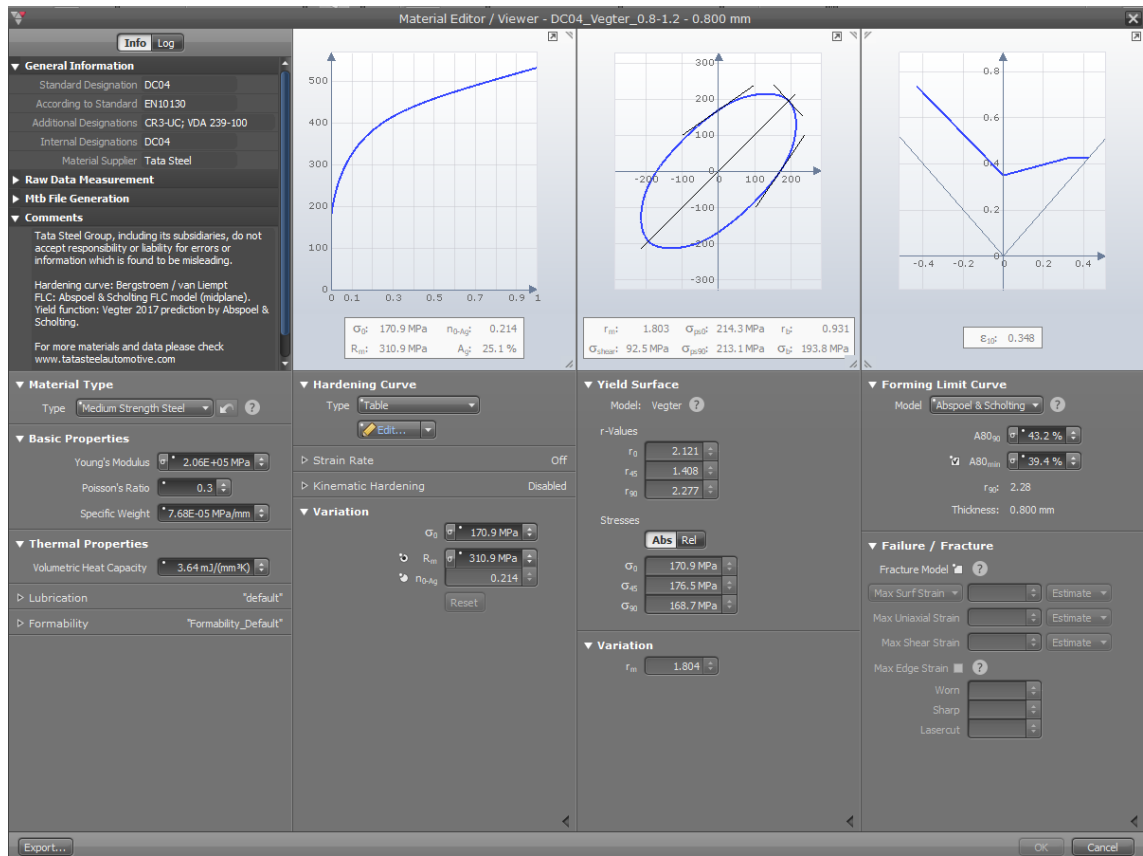
Tablo 3.3. Kalıp malzemeleri

Kalıp Parçaları	Malzeme	Kalıp Parçaları	Malzeme
Üst Döküm	GGG25	Alt Döküm	GGG25
Üst Dişi	GGG70L	Alt Erkek	GGG70L
		Pot	GGG70L

3.2. Sayısal Analiz ve Kalıp Yüzeyi İşleme Verilerinin Hazırlanması

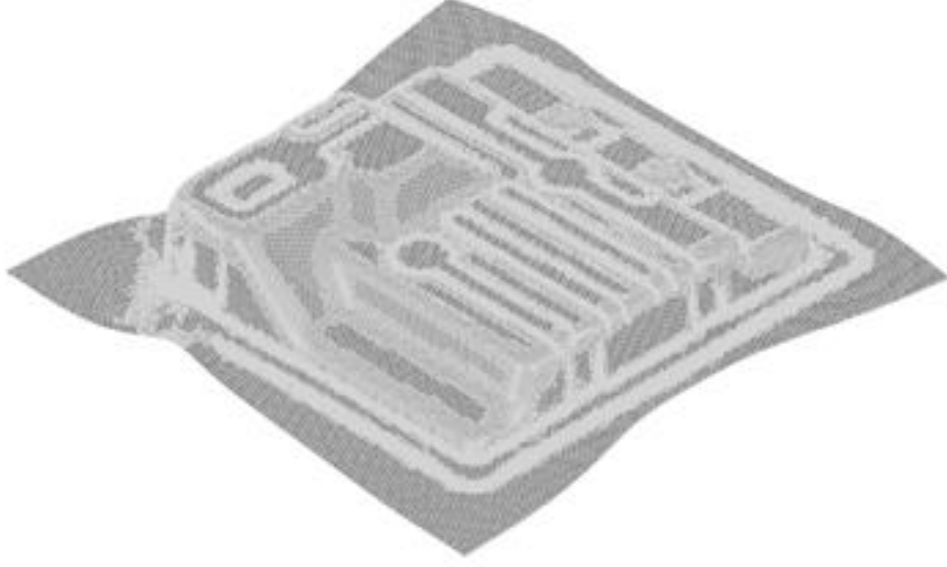
İncelmenin derin çekme işlemi üzerindeki etkisi sayısal analiz yoluyla değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımı olarak ise Autoform Forming R10 yazılımı kullanılmış olup, inceleme dağılımından sacın ilk kalınlığı ile mevcut kalınlığı arasındaki farkı gösteren bir vektör alanı elde etmek için aynı yazılımın Die Spotting modülü kullanılmıştır.

Autoform Forming R10 simülasyon programında kullanılmak üzere sacın malzeme bilgileri sac tedarikçisi olan Tata Steel Ltd. firmasının oluşturduğu Vegter modele sahip malzeme kartı kullanılmıştır (Şekil 3.5.).



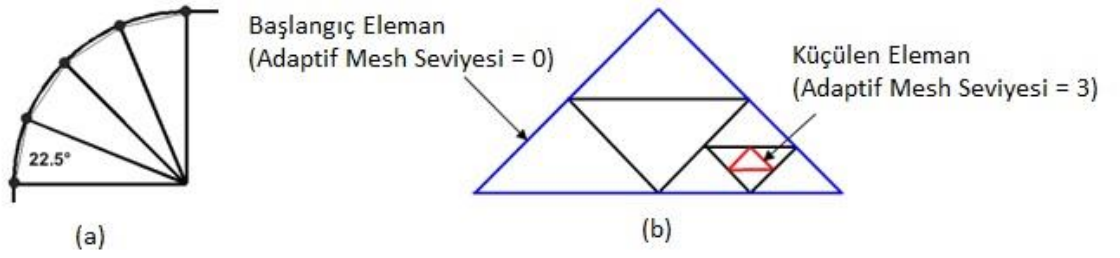
Şekil 3.5. Tata Steel Ltd. firmasının oluşturduğu Vegter modele sahip DC04 malzeme kartı (Tata Steel, 2023)

Sac parçanın mesh yapısı simülasyon süresince oluşan gerilmeler ve diğer parametrelere göre adaptif olup finalinde parça 226671 adet elemana sahip olup yapısı Quarter EPS-11 kabuk elemanıdır (Şekil 3.6.).



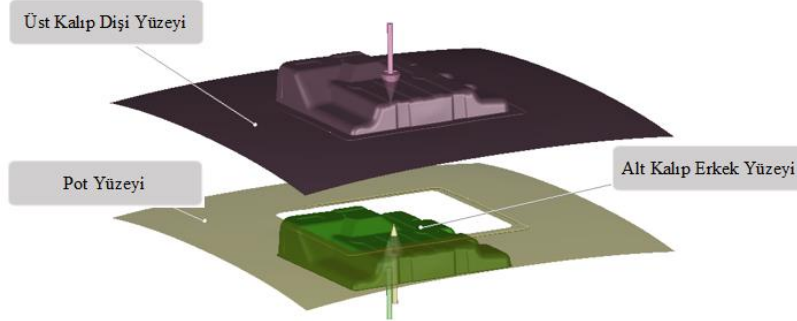
Şekil 3.6. Parçanın sıvama sonunda sonlu eleman modeli

Adaptif mesh yapısı Şekil 3.7.'da gösterilmiş olup maksimum elemanlar arası açısı (a) ve maksimum seviyesi 6 (b) olarak seçilmiştir.



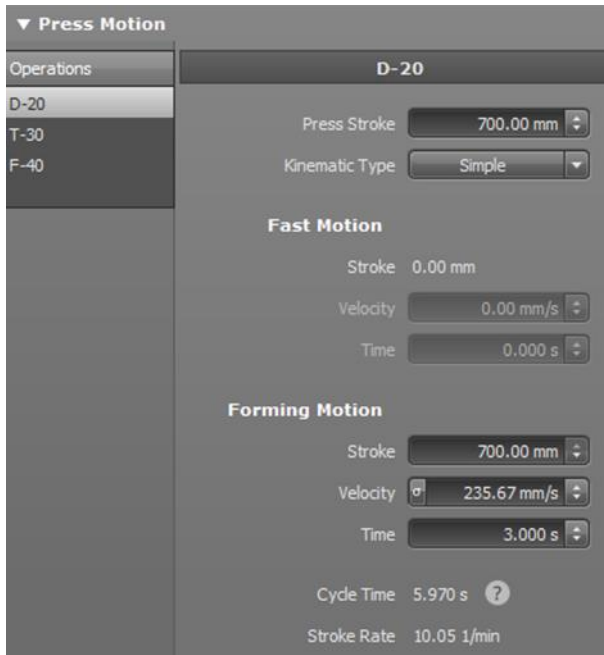
Şekil 3.7 Eleman uzunluğu minimum 0.16 mm , maksimum 40 mm ve arasındaki açı 22.5 derece olan eleman yapısı (a), Adaptif mesh yapısı (b)

Sıvama kalıbının sonlu elman yazılımı Şekil 3.7’da belirtildiği şekilde üst kalıp dişi yüzeyi, alt kalıp erkek yüzeyi ve pot tanımlanmıştır.



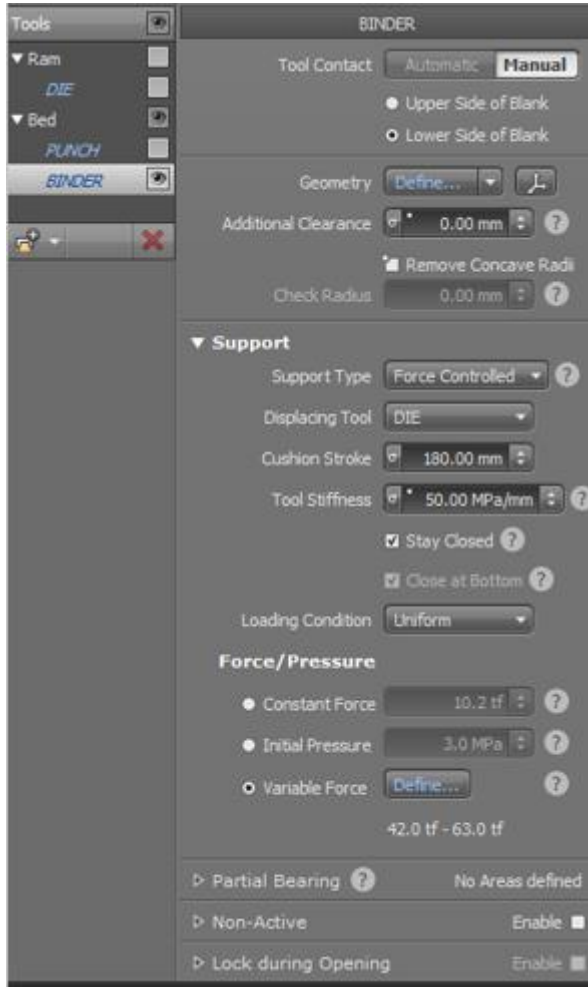
Şekil 3.8. Sonlu elmanlar yazılımına aktarılan kalıp yüzeyleri

Pres stroğu 700 mm olup dakikada 10 parça basılacak şekilde kalıp kapanma hızı 235mm/s olarak belirlenmiştir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Pres hareketi

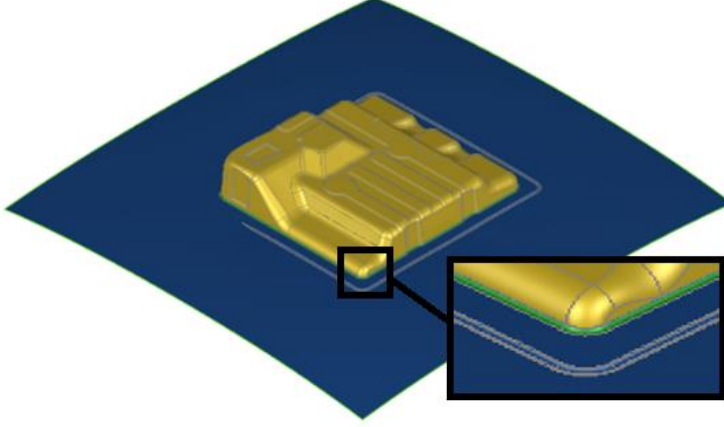
Alt (erkek) ve üst (dişi) sabit olup hareketini prestan alacak şekilde rijit olarak tanımlanmıştır. Pot ise stroğu 180 mm, baskı kuvveti 42 ton kuvvet olup ölü noktada (kalıbın tamamen kapanması) 63 ton kuvvet uygulayacak şekilde tanımlanmasının yanı sıra diğer parametreler Şekil 3.10.'daki gibidir. Kalıp yüzeyleri ile sac arasındaki sürtünme kat sayısı ise sabit olup 0.15 olarak alınmıştır.



Şekil 3.10. OP20 pot parametreleri

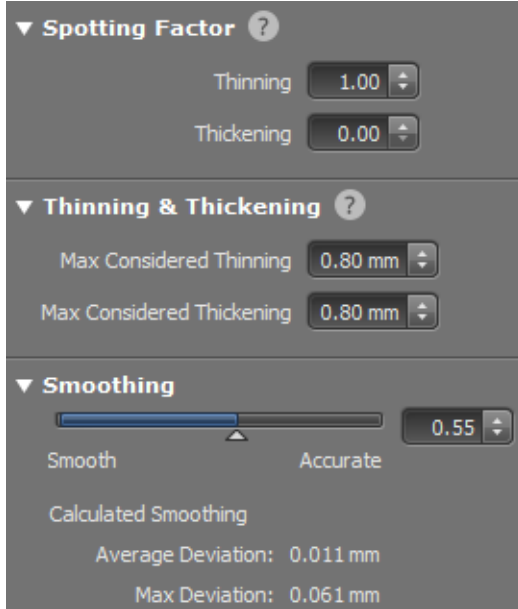
Parçaya göre bir yüzeyin referanslaması gerekliliğinden sadece üst kalıp dişi yüzeyine telafi çalışması yapılmış olup diğer alt kalıp erkek yüzeyi ve pot yüzeyi sabit tutulmuştur. Üst kalp dişi yüzeyi telafi verilirken pot ile öpüşen bölge sacın akış alanı oluşunun yanı sıra pot yüzeyine müdahale edilmediğinden dişi yüzeyinde sabit ve geçiş bölgeleri oluşturulmuştur. Sabit olarak kabul edilen bölgeler herhangi telafiye maruz kalmazken geçiş bölgeleri ise aynı yüzey üzerinde telafi verilen ve sabit kalan yüzeyler arasında

kopmaların ve yüzey farklılıklarının olmaması için geçiş bölgesi olarak tanımlanmış ve yüzeyler arası yumuşak bir geçiş sağlanmıştır. (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Doğrudan telafi verilen (sarı bölge), Geçiş bölgesi (Yeşil Bölge), Sabit bölge (Mavi Bölge)

İncelme vektörleri ile oluşacak yüzeydeki yumuşatmaların belirli bir tolerans aralığında olması için incelme kat sayıları simülasyon programına Şekil 3.12'deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.12. İncelme vektörlerinin oluşumunda kullanılan parametreler

Çalışma sırasında sac üzerindeki kalınlaşma göz ardı edilmiştir. Telafi sonrası oluşturulan kalıp yüzeyleri CNC tezgahlarında işlenmek üzere hazırlanmıştır.

3.3. Kalıp İşleme Metodu

Kalıp setinin işlenmesinde, dökümde referans düzlemlerin oluşturmak üzere kalıp tabanları, mil-burç yuvalarının ve diğer kalıp referansları bölgeleri işleme alınmıştır. Referans bölgeleri işlendikten sonra dökümdeki pürüzlü yüzeyler frezelenmiştir. Kalıp bileşenlerinin montajı öncesi sac ile öpüşen nihai yüzeyler paylı olarak işlenerek nihai yüzey işleme montaj sonrası yapılacak şekilde planlanmıştır.

Bazı kalıp bileşenleri, nihai işleme öncesi parça basımında rijitlik kazanması için ısıtma işlemi uygulanır. Isıtma işlemi yöntemi ve süresi parçaların türüne bağlı olarak farklılık gösterir. Bu çalışmada, üst ve alt kalıp yüzeylerindeki içbükey ve dışbükey için lazer indüksiyonu kullanılmıştır. Lazer indüksiyonun kalıp yüzeylerindeki geometri olarak deformasyonu etkisi çok az olduğu için göz ardı edilmiştir.

Nihai işleme için alt bileşenler (alt erkek kalıp ve pot) frezeleme hatasını önlemek için birlikte CNC tezgahında işlenmiştir.

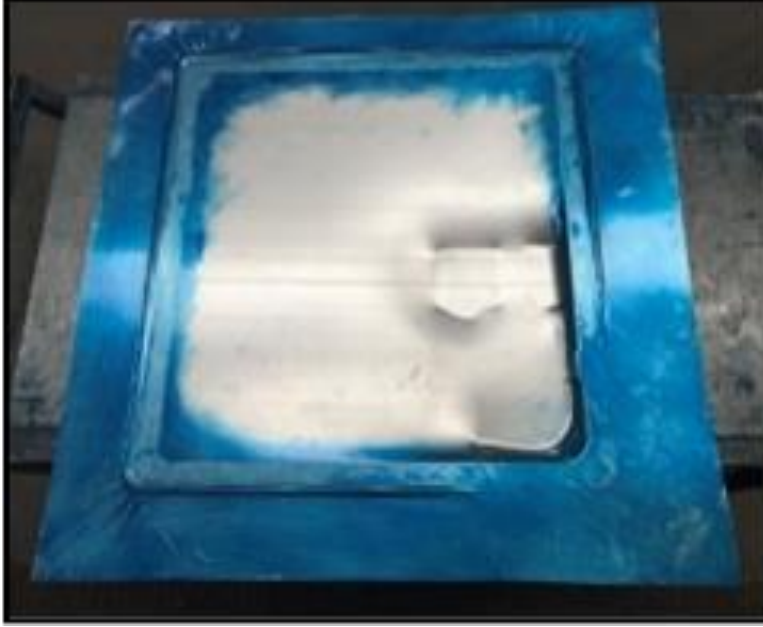
3.4. Pres Altı Kalıp Denemesi ve Kopya Yüzey Kontrolü

Kalıp denemeleri ve kopya yüzeyi kontrolünde hidrolik pres kullanılmıştır. Pres altında yapılan denemelerin temel amacı öpüşmeyen yüzeylerin, sac üzerinde kırışan veya dalgalanmalara sebep veren yüzeylerin belirlenmesidir. Yapılan bu pres altı müdahaleler istenilen nihai sonuçlar görülene kadar devam eder.

Pres altı denemeleri temel olarak üç bölüme ayrılmıştır. Pres altındaki ilk denemede üst diş kalıp, alt erkek kalıp ve pot arasındaki boşlukların tespiti gerçekleştirilmesinin yanı sıra durdurucular, merkezleyici elemanların kalıp kapanmasına kadar sağlıklı çalışmaları kontrol edilmiş ve gerekli müdahaleler yapılmıştır.

Pres altında yapılan ikinci deneme kalıp yüzeyleri ve sac arasındaki temas yüzeyleri kontrol edilip değerlendirilmiştir. Kalıp kopya kontrolü olarak da bilinen bu süreçte mavi boya ile kontroller gerçekleştirilmiş olup mamul sac parçasında ve kalıp yüzeyinde oluşan

mavi boya desenleri değerlendirilmiştir. Çalışmada yer alan parçanın sıvama operasyonunda istenilen gerilmeleri karşılamak için kalıp yüzeylerinde süzme kanalları yer aldığından ilk olarak kalp kopya kontrolü potta yapılmıştır.



şekil 3.13. Süzme kanallarının formaları oluşana kadar sacın mavi boya ile kontrolü

Kalıp yzerindeki öpüşen yüzeyleri kontrol ettikten sonra, mavi macunun oluşturduğu kopya deseni göz önünde bulundurarak operatör, kopyanın homojen olarak dağıtılması için manuel olarak el ile pot yüzeyini taşlamıştır.

Pot yüzeyinin kalıp kopyası tamamlandıktan sonra, aynı prosedür st dişi yüzeyi için de yapılmıştır.



Şekil 3.14. Kalıp kapanana kadar alt ve üst yüzeylerin mavi boya ile kopya desenleri

Denemler süresince parçaya göre bir yüzeyin referanslaması nedeniyle, alt erkek kalıp yüzeyine herhangi bir taşlama yapılmamıştır.

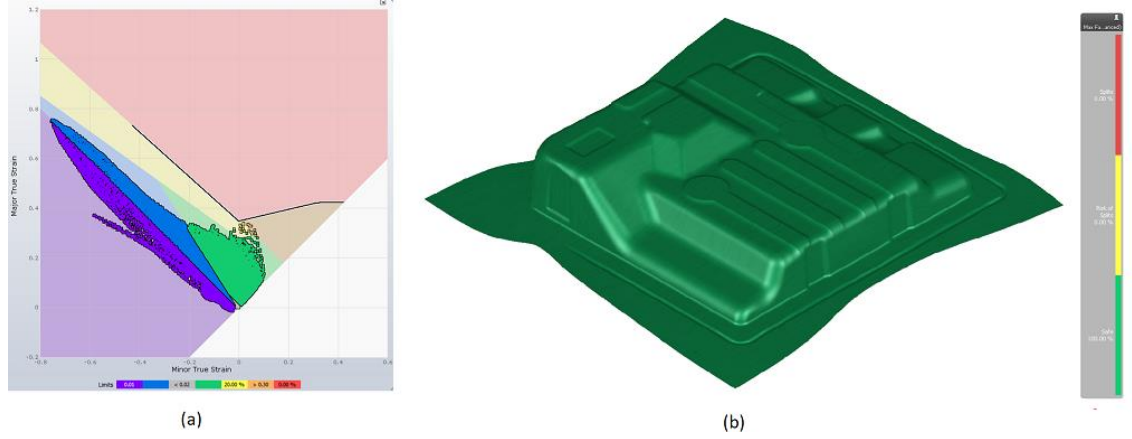
Daha sonrasında parça Atos 5 -3D Optik ölçüm cihazı ile taraması yapılarak mevcut ölçüsel değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Atos 5 sistem konfigürasyonu aşağıdaki gibi olup 2 x 12-megapixel CMOS kamera (çözünürlük 4112 x 3008 pixel) ve ölçüm alan kapasitesi 1.000 x 750 mm²'dir.



Şekil 3.15. Atos 5 3D Optik ölçüm cihazının sistem konfigürasyonu

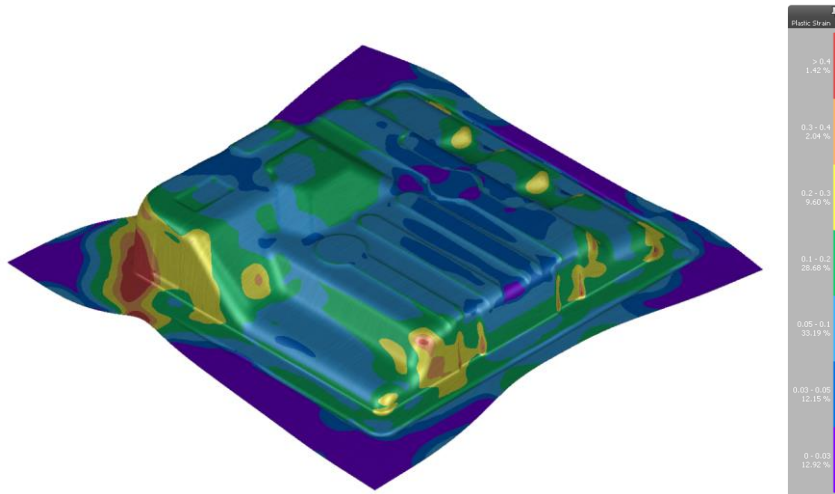
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Sıvama sonrası parçanın FLD diyagramı ve parça üzerindeki fizibilite durumu Şekil 4.1'deki gibidir. Simülasyon sonuçlarında parçada incelmeler olmasına rağmen herhangi bir yırtılma görülmemiştir. Kırışmalar ise limit diyagramının altında kaldığında kabul edilebilir seviyededir.



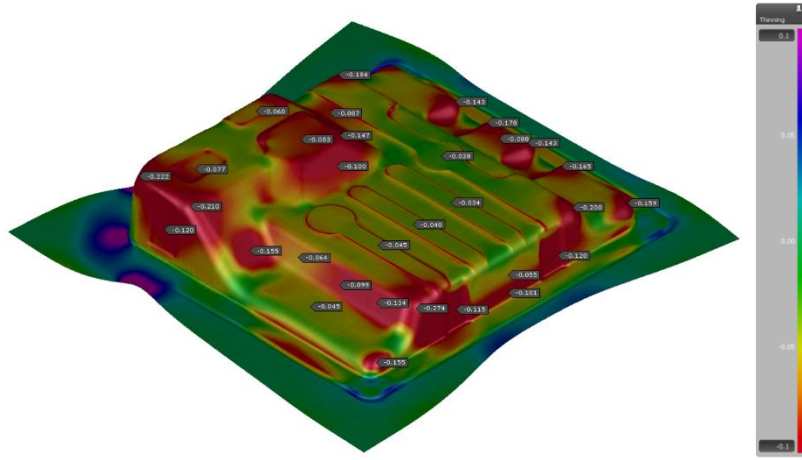
Şekil 4.1. Sıvama sonrası parçanın FLD diyagramı (a) ve parça üzerindeki fizibilite durumu (b)

Parçadaki plastik gerinim oranı ve parça üzerindeki % miktarı ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

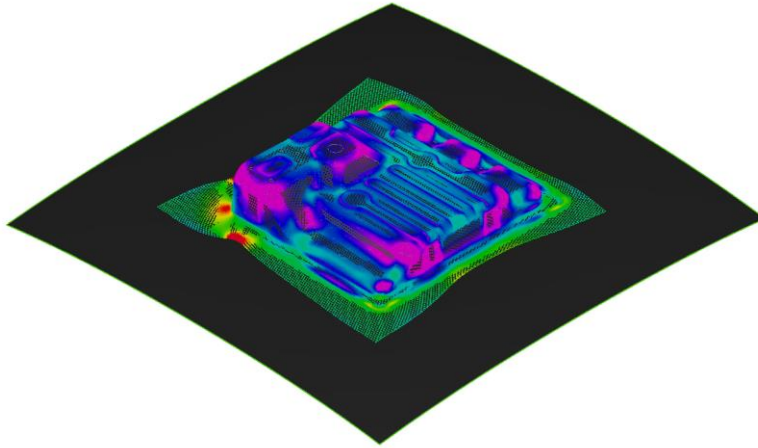


Şekil 4.2. Parçadaki plastik gerinim oranı ve parça üzerindeki % miktarı

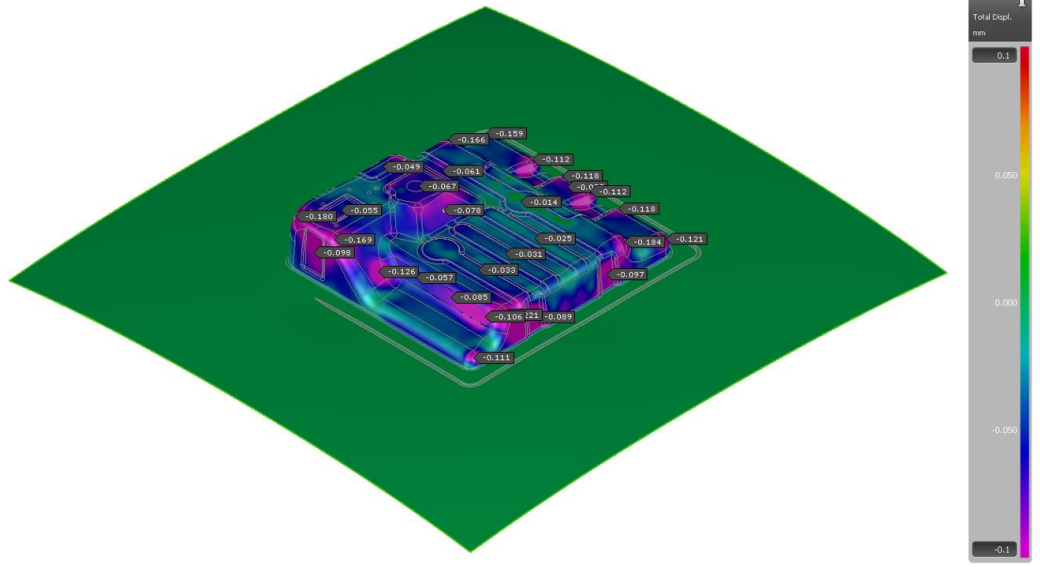
Sıvama operasyonu sonundaki incelmenin başlangıçtaki sacın kalınlığına oranı Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Tahmin edildiği gibi, incelleme bölgelerinin sac üzerindeki heterojen dağılımını sağlamak için deneme sırasında manuel taşlama işlemleri artmaktadır. Kalıp yüzeylerinde paylı bölgeleri ile işleme yüzeyi hazırlayan geleneksel yöntem yerine, simülasyon sonuçlarına göre, ilk ve mevcut kalınlık arasındaki farkı tanımlayan incelleme deformasyonundan bir vektör alanı oluşturulmuş olup (Şekil 4.4) mevcut nominal yüzey telafi edilerek kalıp yüzeyi işlenecek şekilde hazırlandı.



Şekil 4.3. Sıvama sonrası sac parça üzerinde oluşan incelmeler (İncelleme = (mevcut kalınlık - başlangıç kalınlığı) / başlangıç kalınlığı)



Şekil 4.4. İncelleme deformasyonu için telafi vektörlerinin gösterimi



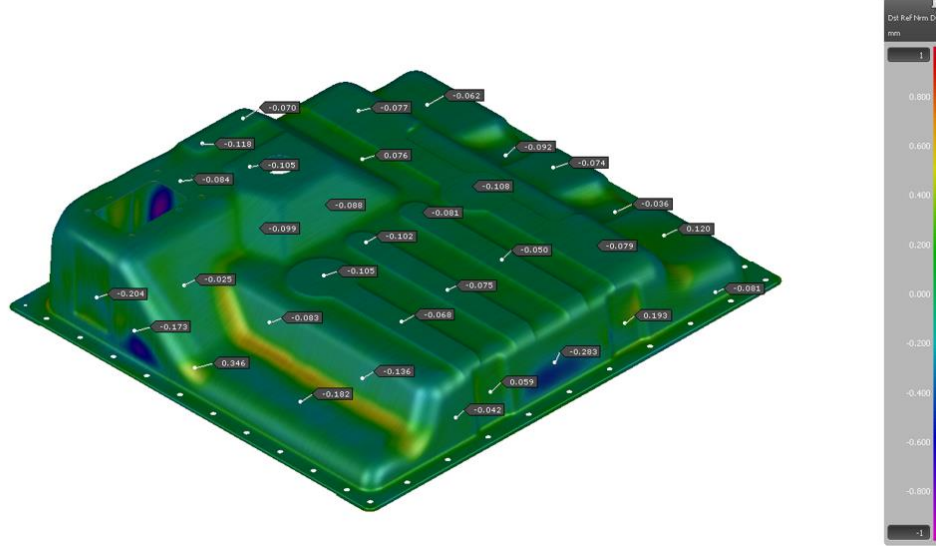
Şekil 4.5. Telifi verile yüzey ile mevcut nominal yüzey arasındaki sapma

Telifi verilmiş yüzeyler ile hazırlanan kalıp pres altında manuel olarak taşlama yapılmaya başlandığında ilk denemede beklenenden daha homojen mavi boya kopya bölgeleri elde edilmiştir (Şekil 4.6).

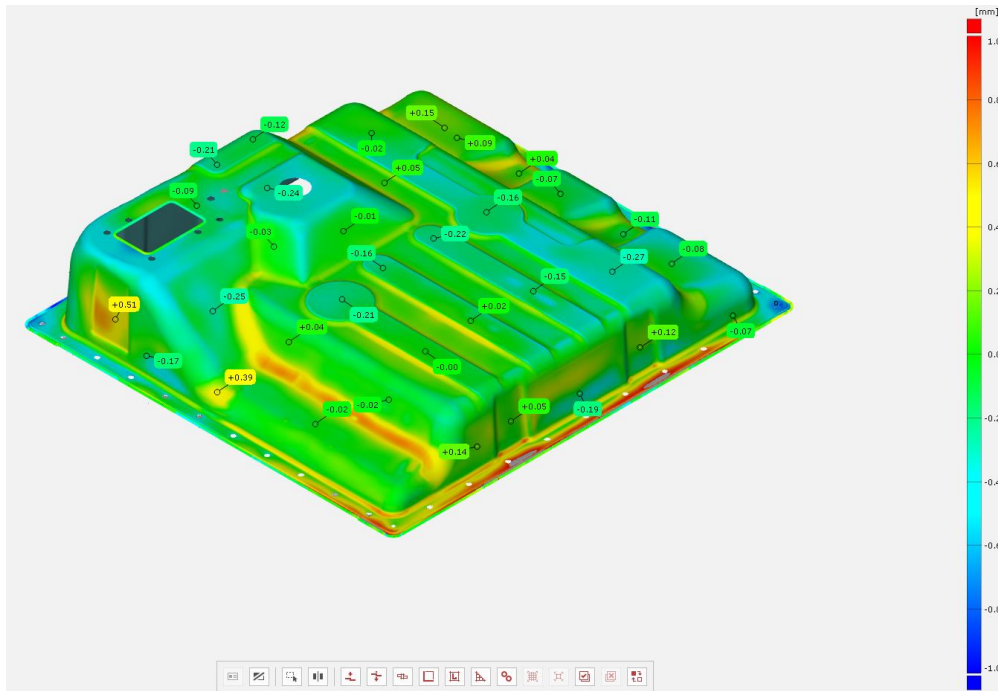


Şekil 4.6. Pres altı ilk deneme sonrası mavi boya deseni

Pres altı final parça daha sonrasında kesme operasyonlarında geçilerek nihai ürün haline getirilmiş olup Atos 3D ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 4.8). Ölçüm değerleri ile simülasyon ortamında elde edilen veriler (Şekil 4.7) tutarlılık göstermiş olup kalıp seri üretim için hazır hale getirilmiştir.

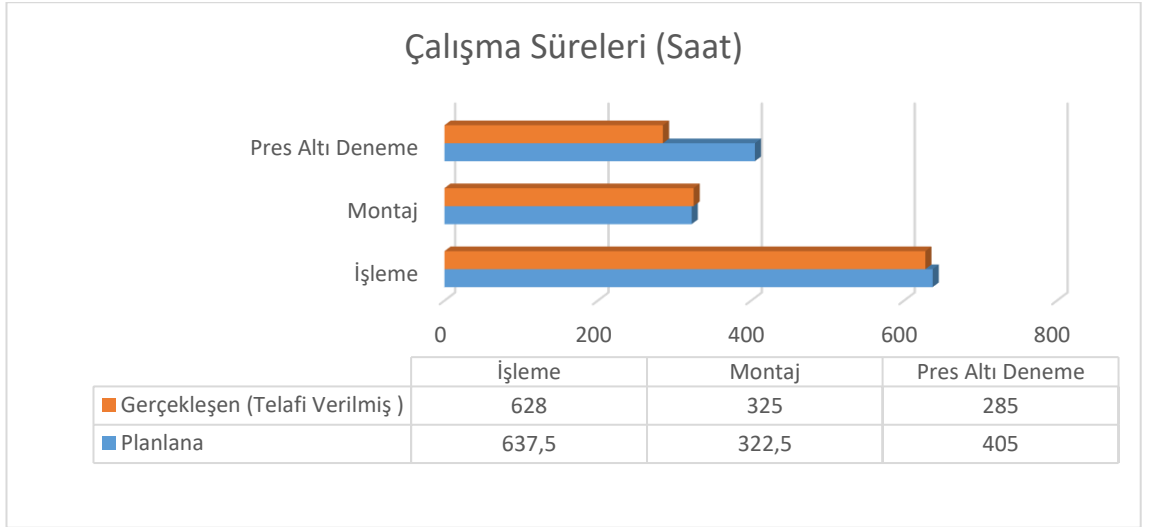


Şekil 4.7. Nihai parçanın simülasyon sonucu



Şekil 4.8. Gerçekte nihai parçanın Atos 3D ölçüm sonucu

Aşağıdaki Tablo 4.1’de planlanan ve gerçekleşen çalışma saatlerindeki değişikliklerin hesaplanmasını göstermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile tespit edile incelemeler doğrultusunda oluşturulan kalıp yüzey işlenmesi ve deneme süresi, planlanan geleneksel yöntemle göre zaman açısından yüzde 30 azalmıştır. Montaj ve işleme sürelerindeki farklılık çok az olması nedeniyle değerlendirmesi göz ardı edilmiştir.



Tablo 4.1. Çalışma Süreleri

5. SONUÇ

Bu çalışmada, sac şekillendirme kalıp deneme sürecinde, paylı yüzeylerle işleme verilerini hazırlayan geleneksel yöntem yerine sonlu elemanlar analiz yöntemi ile sac üzerinde meydana gelen incelmelerin miktarı kadar mevcut kalıp yüzeylerine telafi çalışması yapılmıştır.

Geleneksel paylı yüzeylerin kalıplara uygulanmasının aksine incelen bölgelerin önceden tespiti ve sayısal olarak kalıp yüzeylerine aktarılması pres altında yapılan manuel taşlama uygulama zamanı azaltılmıştır.

Bu çalışmadaki diğer bir kazanım ise, pres altında yapılan taşlama sırasında operatör tarafından daha az yanlış müdahaleye neden olarak zaman kayıplarının önlenmesi nedeniyle, operatörün yetkinliğine geleneksel yöntemle göre daha az ihtiyaç duyulmasıdır.

Pres altı sac şekillendirmede sıvama yöntemi diğer yöntemlere göre daha kompleks bir yapıya sahip olmasının yanı sıra birçok parametre ve değişkenin etkisi altındadır. Bundan dolayı yapılacak pres altı deneme çalışmalarının sonlu elemanlar yöntemi ile öngörülmesi için yük altında pres ve kalıpların deformasyonu gibi denemelerde kalıp yüzeylerinin geometrik olarak değişmesine sebep olan faktörlerin belirlenmesi, kalıp deneme sürülerini daha fazla düşürecektir. Bunun gibi pres altında oluşan parametrelerin belirlenmesi ilerleyen çalışmalar için açık alan oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Campos, H., Butuc, M., Gráciob, J., Rochab, J., & Duarte, J. (2006, Ekim 20). Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 179, pp. 56-60.
- Demirkol, M. (2010). Plastik şekil verme teknolojisi. İstanbul.
- Essig, P., Liewald, M., & Bolay, C. (2020). Contact Area Evaluation of Digitalized Spotting Images as a Criterion for Die Tryout. *23rd International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020)* (pp. 855–860). Sindelfingen: Elsevier Ltd.
- Gavas, M. (2020). *Sac Metallerin Şekillendirilmesi: Kesme-Bükme - Derin Çekme* (2. Baskı ed.). Seçkin Yayıncılık.
- Großmann, K., Wiemer, H., & Hardtmann, A. (2009, July 27). Static compensation for elastic tool and press deformations during deep drawing. *Production Engineering*, pp. 157-164.
- Gülmez, T. (2011). *İmal Usulleri*. Retrieved from <http://web.itu.edu.tr/gulmezt>
- İşıktaş, 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*.
- Kayalı, S., & Ensari, C. (1986). Metallerde plastik şekil verme ilke ve uygulamaları. *İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları*.
- Keeler, S., & Backofen, W. (1963). Plastic Instability and Fracture in Sheets. *ASM Transactions Quarterly*, pp. 25-48.
- Kubli, W., & Reissner, J. (1995, March). Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program AUTOFORM. *Journal of Materials Processing Technology*, 50, pp. 292-305.
- Paul, S. K. (2013, Nisan). Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, pp. 177-188.
- Schöne, C., Stelzer, R., Schmidt, U., & Süße, D. (2010). Reverse Engineering for Spotting of Sheet Metal Forming Parts. *Conference: ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Montreal: ASME.
- Simo, J., & Hughes, T. (1998). *Computational Inelasticity*. Springer.
- Stalman, A. W. P. (2009). Werkzeugtechnik der Zukunft Anforderungen und Möglichkeiten. In *EFB Servopressen und Werkzeugsysteme zur Blechverarbeitung* (pp. 93-106).
- Tata Steel*. (2023, 02 12). Retrieved from <https://www.tatasteeleurope.com/>
- Tehel, R., Päßler, T., Kurth, R., Nagel, M., Reichert, W., & Ihlenfeldt, S. (2022, November 9). Virtual Tryout: Case Study on Simulation-Based Design and Die Spotting of Forming Tools. *Engineering Proceedings*, 26(9).
- Torstensson, A. (2022, 02). Comparison of Accuracy in Sheet Metal Forming Simulation Software. 46. Karlskrona, Sweden: Blekinge Institute of Technology.
- Tresca, H. (1864). Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. *C. R. Acad. Sci.*, 59, p. 754.
- Zabala, A., Llavori, I., Argan, E., & Mendiguren, J. (2020, Octobre). Towards the automation of the die spotting process: Contact blue pattern decryption. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 1285-1296.

Zgoll, F., Götze, T., & Volk, W. (2021). Virtual die spotting: Advanced setup for coupling of forming and structure simulation. *40th International Deep-Drawing Research Group Conference (IDDRG 2021)*, (p. 1157). Stuttgart, Germany.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Süleyman COŞKUN
Doğum Yeri ve Tarihi : Aksaray 10.08.1989
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Aksaray Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı,

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Beyçelik Gestamp Teknoloji ve Kalıp Merkezi (2019-
Devam)

İletişim (e-posta) : s.coskun@outlook.com