

## 2024 Alüminyum Alaşımının Dövülmesinde Ortaya Çıkan Katlanma Hatasının İyileştirilmesi İçin Tasarım Geliştirilmesi ve Simülasyonu

*Design Development and Simulation to Improve the Folding Defect in the Forging of 2024 Aluminum Alloy*

Ali SAMANCI<sup>1\*</sup>, Hakan COŞKUN<sup>1,2</sup>, Gökhan ATAY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Torun Metal A.Ş., GOSB, İhsan Dede St. Gebze, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Öz

Al 2024 alaşımları hafif malzemeler oldukları için çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Sıcak dövme işlemi, bu malzemeleri oluşturmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada Al 2024 alaşımlarının sıcak dövme işlemiyle elde edilen spesifik bileşenlerinde meydana gelen dövme kusurları incelenmiştir. Ayrıca, dövme kusurlarının üstesinden gelmek için alternatif bir tasarım önerisinde bulunmaktadır. Bununla birlikte, Al 2024 alaşımının sıcak dövme işleminin sonlu elemanlar modellemesi ve simülasyonunu içermektedir. Al 2024'ün belirlenen sıcaklıktaki malzeme tepkisini modellemek için çekme numunesi hazırlanmış ve dövme sıcaklığında test edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar simülasyonu, dövme bileşenlerde gerilme konsantrasyonu nedeniyle yüzey kusurunun meydana geldiğini göstermiştir. Bu kusur, deneysel çalışmalarda da gözlemlenmiş ve doğrulanmıştır. Bu çalışmada önerilen kusurun olduğu bölgeye destek eklenmesini içeren alternatif tasarım, yüzey kusurunun azaltılmasında etkili olmuştur. Solidworks ve Simufact Forming yazılımları kullanılarak geliştirilen ve simüle edilen alternatif tasarım çalışması, bu destek yapısının bindirme kusurunun gözlemlendiği alandaki gerilim konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 2024 Alüminyum, Sıcak Dövme, Tasarım, Sonlu Elemanlar Analizi, Katlanma Hatası

### Abstract

Al 2024 alloys are used in various industries due to their lightweight properties. Hot forging process is one of the commonly used methods to fabricate these materials. This study investigates the forging defects occurring in specific components produced by hot forging of Al 2024 alloys. Additionally, it proposes an alternative design to overcome these forging defects. Furthermore, it encompasses the finite element modeling and simulation of the hot forging process of Al 2024 alloy. Tensile specimens were prepared to model the material response of Al 2024 at the determined temperature and tested at forging temperature. The finite element simulation revealed that surface defects occur in forged components due to stress concentration. This defect was observed and verified in experimental studies as well. The alternative design proposed in this study, involving the addition of support to the region where the defect occurs, proved to be effective in reducing surface defects. The alternative design, developed and simulated using Solidworks and Simufact Forming software, demonstrated a significant reduction in stress concentration in the area where the defect was observed.

**Keywords:** 2024 Aluminum, Hot forging, Design, Finite Element Analysis, Overlap defect

### 1. GİRİŞ

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde, dövme parçaların kullanımı yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu parçalar yüksek verimlilik, düşük maliyet ve iyi performans avantajları sağlamaktadır. Alüminyum alaşımları, özellikle yüksek mukavemetli yapısal uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Dövme yöntemiyle şekillendirilen alüminyum alaşımları, havacılık, otomotiv ve savunma endüstrileri gibi birçok

sektörde hafifliği sebebiyle öne çıkan ve tercih edilen alaşımlardır. Ancak, dövme işlemi sırasında hatasız ve yüksek geometrik doğruluk, iyi bir yüzey kalitesi ve hedeflenen mikroyapı özelliklerinin sağlanması gerekmektedir, çünkü iyi montaj ve servis performansı bu faktörlere bağlıdır. Alüminyum alaşımları arasında, 2xxx serisi alaşımlar özellikle dikkat çekmektedir. Bu alaşımlar, bakırın ana alaşım katkısı olarak bulunduğu yüksek mukavemetli alaşımlardır ve genellikle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, 2024 alaşımı, en yüksek mukavemetli 2xxx alaşımlarından biridir. 2xxx serisi alaşımlar, genellikle iyi işlenebilirlik sağlarlar ancak diğer ısıl işlem görebilen alüminyum alaşımlarına göre daha az şekillendirilebilir özelliklerine sahiptirler. Ayrıca, diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla korozyon direnci biraz daha düşüktür. Bununla birlikte, birçok 2xxx alaşımı yüksek sıcaklık mukavemetine sahiptir, bu da yüksek sıcaklıkta uygulamalarda avantaj sağlar. Bu özellikler, dövme işlemi için seçim yaparken dikkate alınmalıdır[1]. Dövme süreci, bir malzeme parçasının sabit bir alt kalıp üzerine yerleştirilip, hareketli üst kalıp tarafından baskı uygulanarak şekil verildiği bir işlemdir. Ancak, karmaşık deformasyonlar nedeniyle dövme işleminde bazı şekillendirme kusurları ortaya çıkabilir. Bu kusurlardan biri olan katlanma, malzeme akışındaki bozulmalardan kaynaklanır ve parçanın yüzey kalitesi, mekanik özellikleri ve işlevselliği üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Dövme işlemi sırasında malzeme akışının homojen olmaması, deformasyon sıcaklığının düşük olması ve dövme parametrelerinin uygun şekilde ayarlanmaması gibi faktörler, katlanma kusurunun ortaya çıkmasına katkıda bulunabilir. Bu kusur, ürünün geometrisine, hammadde şekline, sürtünmeye ve dövme sıcaklığına bağlıdır [2], [3], [4]. Dövülebilirlik, hammaddelerin sıcaklığındaki değişikliklere karşı çok hassastır. Deformasyon sıcaklığının düşük olması durumunda, yeniden kristalleşme tamamen gerçekleşmez ve istenmeyen mikroyapısal dağılım meydana gelebilir. Ek olarak, homojen olmayan yapıdaki büyük taneler, dövme parçada zayıf mekanik özelliklere yol açabilir. Özellikle dövme sırasında deformasyon hızındaki değişim, dövme parçanın mukavemetini de arttırmaktadır[5]. Çeşitli araştırmacılar, dövme işlemi sırasında ortaya çıkan katlanma kusurunu önlemek için çeşitli çalışmalar geliştirmişlerdir. Ancak, katlanma kusurunun önlenmesi ve dövme operasyonlarının iyileştirilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Hawryluk ve Jakubik, çalışmalarında sonlu elemanlar analiz programı kullanarak hammadde konumunun dövme kusurları üzerindeki etkisini araştırmış ve farklı pozisyonlarla deneyler yaparak dövme kusurlarını önlemiştir[6]. Prasad ve Panigrahi de benzer şekilde sıcak dövme işlemi sırasında ortaya çıkan kusurları incelemek için bir araştırma yürütmüşlerdir. Çalışmada, özellikle deneysel çalışmalar ve sayısal modelleme kullanılmışlardır. Ayrıca, dövme işlemlerinde biletin

doğru konumlandırılmasının ve malzemenin düzgün akışının kritik önemde olduğunu vurgulamışlardır[7]. Petrov, yaptığı bir çalışmada, katlama kusurunun ürünün geometrisine ve incelediği alüminyum ürünlerdeki dövme parametrelerine bağlı değişimi incelemiştir[8]. Wang, dövme işlemindeki katlama kusurunu sonlu elemanlar analizi ile inceleyip, homojen olmayan malzeme akışını yorumlamıştır[9], [10]. Dövme işlemin sırasında yaygın şekilde meydana gelen katlanma, ürün kalitesini ve mukavemetini olumsuz etkileyip, dövme parçaların kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle dövme operasyonlarında katlanma problemi kapsamlı şekilde anlamak ve etkili bir şekilde önlemek için sürekli olarak araştırma ve iyileştirme çalışmalarına katkı sunma zorunluluğu kaçınılmazdır. Bu çalışmada kullanılan yöntemler, dövme işlemlerinde ortaya çıkan katlanma kusurunu anlamak ve önlemek için belirli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Literatürde benzer çalışmaların varlığı, ancak dövme işleminde katlanma kusurunun önlenmesi konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışma, dövme işlemlerinde katlanma kusurunu önleme konusunda daha derinlemesine bir anlayış geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, dövme işlemi sırasında ortaya çıkan katlanmayı önlemek için sonlu elemanlar analizi kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarına dayanarak, katlanma bölgesinde homojen olmayan malzeme akışı ve yüksek dövme gerilmeleri tespit edilmiştir. Malzeme akışının katlama bölgesindeki keskin geometriden kaynaklandığı görülmüştür. Homojen malzeme akışını sağlamak için kalıp tasarımı değiştirilip, keskin köşeye destek (feder) eklenmiştir. Tasarım değişikliğinin etkilerinin incelenmesi için farklı parametrelerde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilip, elde edilen sonuçlar gerçek koşullarda yapılan denemeler ile karşılaştırılıp analiz edilmiştir. Ayrıca eklenen desteğin parça üzerindeki etkisi Von-mises gerilme analizi ile incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırıldığında destek bölgesindeki gerilmelerin önemli oranda azaldığı görülmüştür.

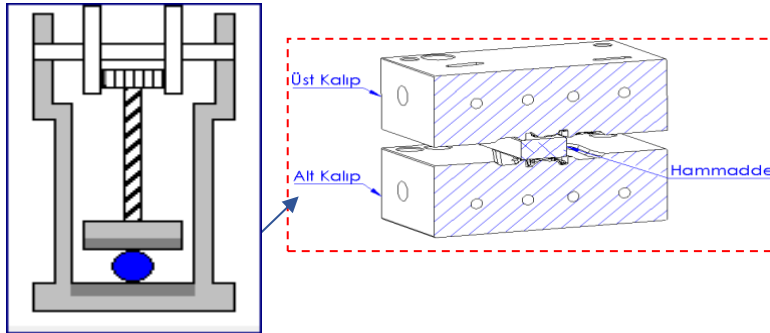
## II. MATERYAL VE METOD

Simülasyon için kullanılan deneysel değişkenler Tablo 1'de sunulmuştur. İlk olarak kalıbın doldurma durumuna yani parçanın dövülebilirlik durumunu ve şekillendirme için en uygun dövme sıcaklığını belirlemek için üç farklı dövme sıcaklığı seçilmiştir. Literatürde Al 2024 alaşımlarına yakın malzemeler için ortalama 370-430 °C dövme sıcaklıkları önerildiğinden bu sıcaklık aralığında parametreler seçilmiştir[11]. Analizlerdeki kurs (strok) durumuna göre katlanmayı kapsamlı bir şekilde gösterebilmek için üç farklı kurs mesafesinde sonuçlar paylaşılmıştır. Destekli ve desteksiz tasarıma uygun kalıplar üretilerek, dövme sürecinde denenmiştir ve bu iki farklı tasarımın simülasyonları gerçekleştirilip, aralarındaki farklılıklar ortaya konulmuştur.

**Tablo 1.** Deneysel Parametreler

| Dövme Sıcaklığı(°C) | Tasarım           | Kurs(strok) mesafesi (mm) |
|---------------------|-------------------|---------------------------|
| 375                 | Destekli Tasarım  | 15                        |
| 400                 | Desteksiz Tasarım | 20                        |
| 425                 | -                 | 28                        |

Simülasyondan alınacak verilerle seri imalat koşullarında yapılacak deneylerde öncelikle hammadde ve kalıp ısıtılmıştır. Alüminyumun ergime noktası düşük olduğu için sıcaklık daha hassas ısıtma sağlayan indüksiyonlu bobin fırınlarında yapılmıştır. Kalıp sıcaklığının kontrolü için kalıbın bağlandığı plakalara termoregülatör düzeneği kurulmuştur. Numune üretiminde kullanılan Al 2024 alaşımı hammadde indüksiyonlu fırında sırasıyla deney planındaki 375-425°C arasındaki farklı sıcaklıklara ısıtılmış, hammadde sıcaklık aralığını sabit tutmak için fırın çıkışındaki sensörler yardımıyla otomatik olarak ölçülmüştür. Hammaddeler robot ile kalıba yerleştirildikten sonra DELLAVIA-Tarvisio marka 1250 Ton Vidalı (Friksiyon) preste dövülmüştür. Vidalı presin şematik gösterimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Temel sıcak dövme adımları, istenilen şeklin elde edilmesi için fırında ısıtılan hammaddenin (yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde) kalıba yerleştirilip presin ezmesi ile oluşur. Metal yapıyı şekillendirmek için yüksek basınç uygulanır. Şekil

**Şekil 1.** Vidalı (Friksiyon) pres ve dövme kalıpları

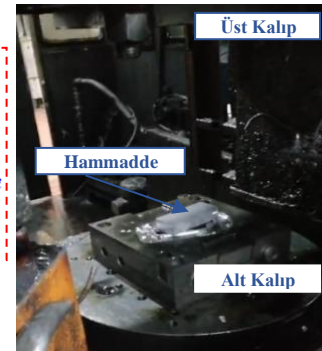
2024 Alüminyum alaşımı, yüksek mukavemeti ve yorulmaya karşı direnci nedeniyle en iyi bilinen yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından biridir [1]. Tablo 2'de Al 2024 alüminyum alaşımı için kimyasal bileşim değerleri verilmiştir.

**Tablo 2.** EN AW 2024 alaşım profilinin kimyasal bileşimi [14]

|           | Cu      | Al    | Fe  | Mg      | Mn      | Cr  | Zn   | Ti-Zr | Diğer | Si  |
|-----------|---------|-------|-----|---------|---------|-----|------|-------|-------|-----|
| Değer (%) | 3,8-4,9 | Kalan | 0,5 | 1,2-1,8 | 0,3-0,9 | 0,1 | 0,25 | 0,15  | 0,15  | 0,5 |

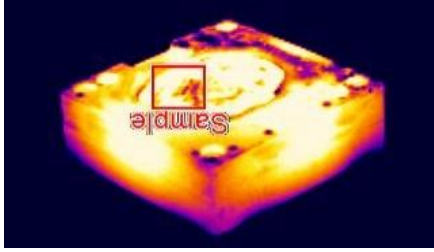
Alüminyum alaşımlarının dövülmesinde kullanılan kalıp malzemeleri dövmede uygulanan kuvvetler ve üretilen parçaların karmaşıklığı dışında; kalıpların

verilen parçalar sıcak kalıp setinden iticiler yardımı ile çıkarılır. Bu işlem adımları, kalıpların sıcaklığını yükseltir ve kalıpların sıcaklığını düşürmek için yağlayıcılar kullanılır bu işlemde kalıpta termal yüklemeye neden olur. Aşırı yağlama, kalıp ve hammadde sıcaklığının fazla olması ürünlerde dövme hatasına yol açmaktadır. Dövme prosesinde yağlamanın doğru yapılması gerekmektedir. Yağlama sürecinin dövme operasyonunda metal akışını kontrol edebilmesi, kalıp sürtünmesini azaltması ve kalıbın dolmasına yardımcı olması, dövülen parçanın kalıptan çıkarılması ve dövme yüklerini azaltmak gibi avantajları bulunmaktadır[12]. Dolayısıyla yağlama sürecinin istenen şekilde ayarlanmaması çok değişken dövme problemlerine sebebiyet verebilmektedir. Dövme işlemlerinde su bazlı akışkanlar, yağ bazlı akışkanlar ve katılar üç ana yağlayıcı gruptur [13]. Su bazlı grafit, alüminyum dövmede yağlayıcı olarak en yaygın yağlayıcıdır. Numune üretiminde su bazlı grafit yağlayıcı (SUMIDERA® W 50) kullanılmıştır. Ancak grafit siyah bir renge sahip olduğu için dövmeden kolayca temizlenemez. Yağlayıcı uygulaması kalıplar preste monte edilirken ve dövmeden hemen önce kalıplara yağlayıcı püskürtülerek yapılmıştır. Kalıpların yağlanmasında genellikle basınçlı hava veya havasız püskürtme sistemi kullanılmaktadır[12].



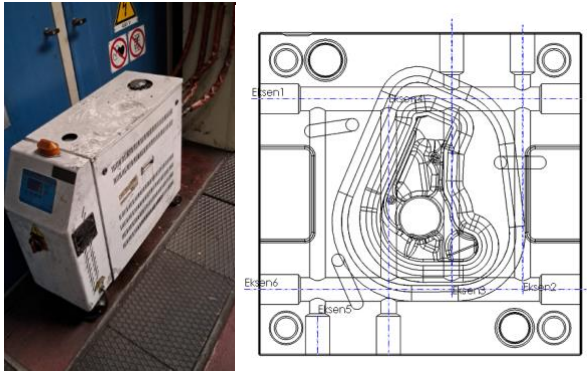
tokluklarını geliştirmek için daha düşük sertlik seviyeleri tercih edilir. Sıcak iş takım çelik serilerinden olan DIN 1.2343 ve 1.2344, DIN 1.2606 veya bu takım çeliklerinin tescilli varyantları, alüminyum dövme sürecinde genellikle 44 ile 50 HRC sertlik değerleri aralığında yaygın olarak kullanılır [15]. Numune üretiminde 47 HRC sertlik değerinde 1.2344 çelik malzemeden üretilmiş dövme kalıbı kullanılmıştır. Dövme işleminde kalıpların ısıtılması çok önemlidir. Şekil 1'de gösterildiği üzere, hammadde kalıba konumlandırılır kalıp ve hammadde arasındaki ısı iletimi nedeniyle kalıplar ısıtılmazsa, enerjinin korunumu kuralından dolayı dövme hammaddesi çok hızlı soğur. Kalıpların ısıtılması, metal plastisite seviyesini ve akış özelliklerini başarıyla yükseltebilir, metal akışının homojenliğini iyileştirebilir, kalıbın soğumasını ve malzeme

üzerindeki dövme basıncını azaltır [12]. Kalıp sıcaklığı termoregülatör sistemi ile yaklaşık 200°C sıcaklığa ısıtılıp, sabit bırakılmıştır. Kalıp sıcaklıkları, termal kamera ile Şekil 2’de gösterildiği üzere kontrol edilmiştir.



Şekil 2. Termal kamera ile kalıpların sıcaklıklarının ölçülmesi

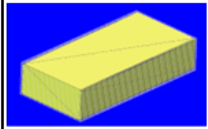
Dövme kalıplarında sıcaklık kontrolü, yağ kanalları aracılığıyla gerçekleştirilen termoregülatör sistemleri ile sağlanmaktadır. Bu sistemler, büyük ölçekli dövme işlemlerinde kullanılmakta olup malzeme akışını kolaylaştırmak ve istenilen dövme şeklini elde etmek için kritik öneme sahiptir. Yağ kanalları, dövme kalıbının içine entegre edilerek bir serpantin veya labirent yapısıyla düzenlenir, bu sayede ısı homojen bir şekilde dağıtılır. Isıtma sistemi, yağ kanallarına bağlanarak kalıbın iç yüzeyini ısıtarak sıcaklık kontrolünü sağlar. Sistemi uygun sıcaklıkta tutmak için bir ısıtma veya soğutma sistemindeki soğutucu akışı gibi bir kontrol sinyalinin değiştirilerek çalışır. Kontrol birimi aracılığıyla işlem sırasında sıcaklık değişimleri sensörler aracılığıyla izlenir. Şekil 3’de deneylerde kullanılan termoregülatör sistemi sunulmuştur.



Şekil 3. Termoregülatör sistemi ve yağlama kanalları

Dövme işlemi sonrası destekli ve desteksiz tasarım için X-Ray analizleri YXLON marka CT cihazında

gerçekleştirilmiştir. ASTM E8/E8M–09 standardına uygun olarak hazırlanmış çekme numunelerinin Instron 5569 cihazında testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri üç kere tekrarlanmak üzere gerçekleştirilmiştir. Dövme işleminin modellenmesi ve simülasyonu, sonlu elemanlar analizi yazılımı olan Simufact Forming’de gerçekleştirilmiştir. Katlanma görülen bölgenin incelenmesi için destekli ve desteksiz tasarımlara örgü (mesh) tanımlaması yapılmıştır ve her iki simülasyon modeli için aynı mesh değerleri kullanılmıştır. Hexahedral örgü modeli, Simufact Forming gibi 3D işlemler için kullanılan bir örgüleme yöntemidir. Genel olarak, hexahedral öğeler, en iyi doğruluğa ve tetrahedral öğelere kıyasla daha az sayıda öğeye sahiptir. Ancak, her geometri hexahedral öğeler kullanılarak örgülenemez. Analizlerde parçaların hassasiyetini artırmak için Hexahedral tipi örgü model elemanı tercih edilmiştir. Bu tipte kullanılan elemanlarla, daha az eleman kullanılarak aynı sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır. Eleman sayısındaki bu azalma ile analiz süresini ve sonrasındaki işlem süresi de belirgin bir şekilde azaltılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan dövme kalıbı, ısı iletkenliği olan rijit malzeme olarak tanımlanmıştır. Sürtünme geriliminin büyüklüğü, deformasyon modelini, sıcaklık artışını ve metal şekillendirmede oluşan toplam kuvveti etkilemektedir [12]. Hammade malzemesi ve dövme kalıbı arasındaki sürtünme modeli olarak Coulomb sürtünme modeli tanımlanmıştır. Programın malzeme veri tabanından kalıplara ait ısıl iletkenlik ve sürtünme gibi özellikleri alınmıştır. Sabit sürtünme modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan iş parçası 40x20x80 mm ve mesh değerleri Şekil 4’de gösterilmiştir. Element boyutu 1 mm, toplamda 76 element kullanılarak simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan alüminyum alaşım malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4’de sunulmuştur.

|  |                     |    |
|--|---------------------|----|
|  | Element boyutu (mm) | 1  |
|  | Element sayısı      | 76 |

Şekil 4. Simülasyon hammadde özellikleri

**Tablo 3.** EN AW 2024 Fiziksel Özellikler [14]

| Fiziksel Özellikler | Değer                       |
|---------------------|-----------------------------|
| Yoğunluk            | 2.78 (g/cm <sup>3</sup> )   |
| Erime Sıcaklığı     | 502 (°C)                    |
| Isıl Genleşme       | 23 x (10 <sup>-6</sup> /°K) |
| Elastiklik Modülü   | 72.4 (GPa)                  |
| Termal Kapasite     | 151 (W/m.k)                 |

**Tablo 4.** EN AW 2024 Mekanik Özellikler [10]

| Mekanik Özellikler | Değer          |
|--------------------|----------------|
| Akma Mukavemeti    | 315- 390 (MPa) |
| Çekme Mukavemeti   | 415- 480 (MPa) |
| Uzama              | %5 - %10       |

### III. BULGULAR

#### 3.1 Simülasyon Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi

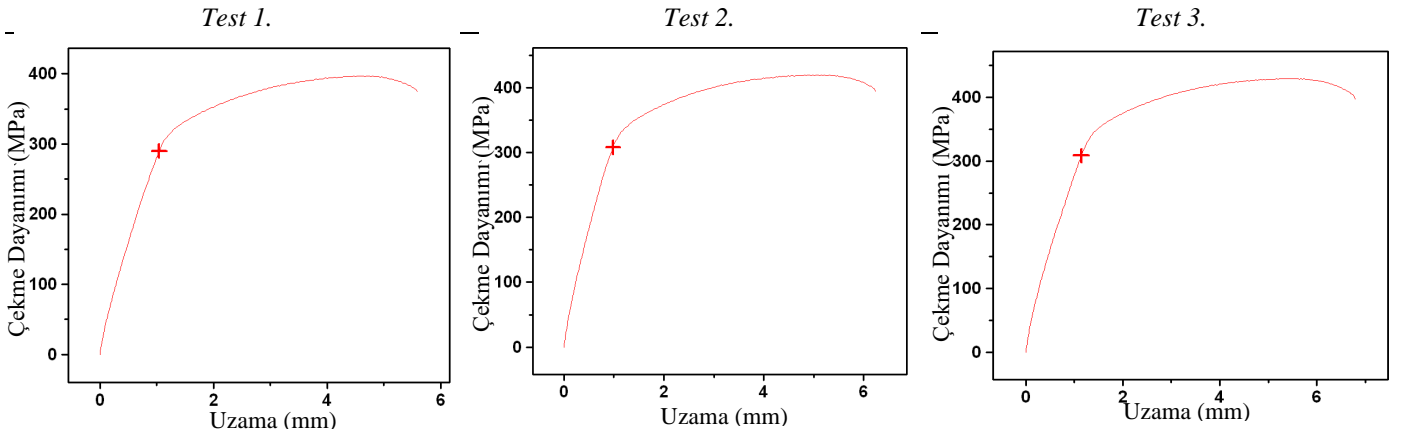
Dövülen numunelere proses parametrelerinin tutarlılığı ve simülasyon çalışmalarında kullanılan parametrelerin kontrolü için çekme testi yapılmıştır. Test sonuçları Şekil 5 ve Tablo 5'de gösterilmiştir. Al 2024 alaşımının dövülmüş haldeki akma dayanımı ortalama 315,3 MPa iken, çekme dayanımı ortalama 406 MPa civarındadır. Ortalama 125 HB sertlik değerine sahip olan bu malzemenin yüzde uzama değerleri ortalama 6 mm olarak ölçülmüştür.

**Tablo 5.** Çekme numunesi sonuçları

| Değer   | Uzama (mm) | Akma Dayanımı(MPa) | Çekme Dayanımı(MPa) | Sertlik (HB) |
|---------|------------|--------------------|---------------------|--------------|
| Test 1. | 5.6        | 312                | 397                 | 120          |
| Test 2. | 6.23       | 324                | 420                 | 125          |
| Test 3. | 6.6        | 310                | 402                 | 130          |
| Ort.    | 6.1        | 315.3              | 406.3               | 125.0        |

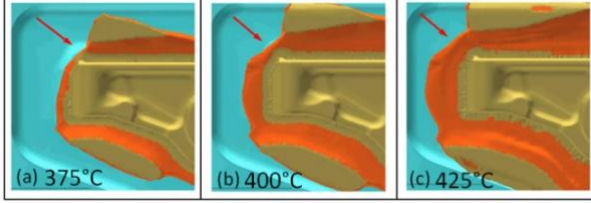
Kapalı kalıp dövme için alüminyum dövme işlemi sırasında kalıpların sıcaklığı 150 °C ila 260 °C olarak önerilmektedir [1]. Bu nedenle, analiz sırasında kalıpların başlangıç sıcaklığı 200 °C olarak kabul edilmiştir. Hammadde sıcaklıkları 375°C, 400°C, 425°C olarak alınmış ve bu sıcaklık değerleri ile simülasyon deneyleri yapılmıştır. Farklı sıcaklık aralıkları ile yapılan deneme sonucunda Şekil 6'da görüldüğü üzere 425°C ile yapılan denemede malzeme kalıba daha iyi yayılmıştır. Dövme sıcaklığının artmasıyla malzemenin akışı kolaylaşarak deformasyon direnci azalmıştır. Dövülebilirlik açısından elde edilen bu sonuca göre simülasyon denemelerinde hammadde sıcaklığı 425°C olarak ayarlanmıştır. Proses parametrelerinin nihai ürünün mukavemeti üzerinde büyük etkisi vardır, bu nedenle yüksek mukavemetli dövme ürünlerinde mekanik özelliklerin hassasiyetle sağlanması için proses parametreleri belirlenmiş olan aralıklarda sabitlenmelidir [8]. Özellikle dövme sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının bu durumu etkileyen önemli parametreler olduğunu söylemek mümkündür.

Kapalı kalıp dövme için alüminyum dövme işlemi sırasında kalıpların sıcaklığı 150 °C ila 260 °C olarak önerilmektedir [1]. Bu nedenle, analiz sırasında kalıpların başlangıç sıcaklığı 200 °C olarak kabul edilmiştir. Hammadde sıcaklıkları 375°C, 400°C, 425°C olarak alınmış ve bu sıcaklık değerleri ile simülasyon deneyleri yapılmıştır. Farklı sıcaklık aralıkları ile yapılan deneme sonucunda Şekil 6'da görüldüğü üzere 425°C ile yapılan denemede malzeme kalıba daha iyi yayılmıştır. Dövme sıcaklığının artmasıyla malzemenin akışı kolaylaşarak deformasyon direnci azalmıştır.

**Şekil 5.** Çekme numunesi sonuç grafikleri



Dövülebilirlik açısından elde edilen bu sonuca göre simülasyon denemelerinde hammadde sıcaklığı 425°C olarak ayarlanmıştır. Proses parametrelerinin nihai ürünün mukavemeti üzerinde büyük etkisi vardır, bu nedenle yüksek mukavemetli dövme ürünlerinde mekanik özelliklerin hassasiyetle sağlanması için proses parametreleri belirlenmiş olan aralıklarda sabitlenmelidir [8]. Özellikle dövme sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının bu durumu etkileyen önemli parametreler olduğunu söylemek mümkündür.

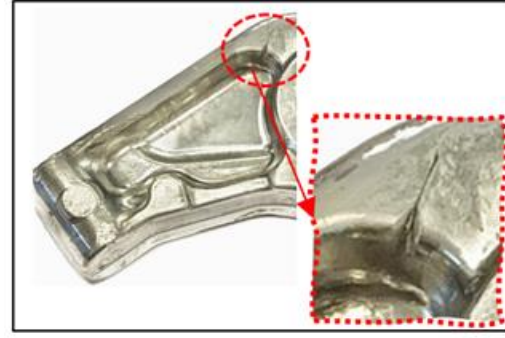


Şekil 6. Dövme sıcaklığının dövülebilirliğe etkisinin simülasyon sonuçları

### 3.2 Tasarımda Desteğin (Feder) Parçada Oluşan Gerilmeye ve Dövülebilirliğe Etkisinin Simülasyonu

Çalışmanın bu bölümünde dövme işleminde katlanma hatasının simülasyon sonuçları analiz edilmiş ve katlanmanın giderilmesi için yapılan tasarımın sonucu değerlendirilmiştir. Numune parçada katlanma problemi görülmüştür. Sıcak dövme sürecinde karşılaşılan önemli bir problem olan katlanma, dövme işlemi esnasında dövülen malzemenin istenmeyen şekilde ikiye ayrılması veya kırılması anlamına gelir. Dövülen malzemenin belirli bölgelerinin fazla deformasyona veya gerilme birikmesine maruz kalması sonucunda oluşur. Dövme sürecinde sıkça karşılaşılan katlanma kusurunun temel nedenleri çeşitli faktörlere dayanmaktadır. Bu faktörlerden ilki, hammadde profilinin etkisidir. Dövme sürecinde kullanılan hammadde, deformasyon oranını minimumda tutacak şekilde seçilmelidir; zira yüksek deformasyon, dövme esnasında kusurlara yol açabilir. Hammadde profili, dövme için belirlenen geometriye uygun olarak seçilmeli ve aşırı deformasyonun meydana geldiği bölgelere özel dikkat gösterilmelidir. İkinci etken ürün tasarımıdır; keskin köşelerin kullanılması, homojen malzeme akışını engelleyebileceğinden tasarımda bu tür unsurlardan kaçınılmalıdır. Bununla birlikte, kalıp ve elemanlarının seçimi de tasarımın başarısını etkileyen önemli unsurlardır. Üçüncü olarak, proses parametrelerinin etkisi göz ardı edilmemelidir. Dövme işlemi için uygun parametrelerin belirlenmesi, malzemenin alaşımı ve ürün geometrisine bağlıdır. Uygun olmayan proses parametreleri, çeşitli süreç problemlerine sebep olabilir; bu nedenle dövme

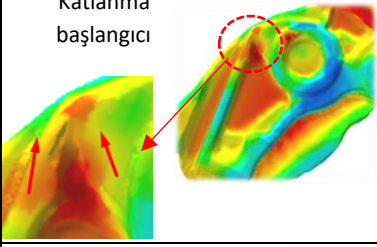
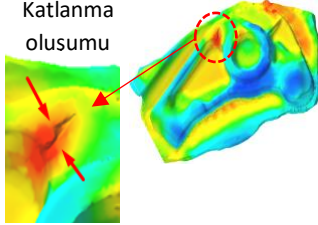
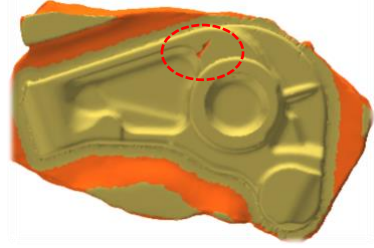

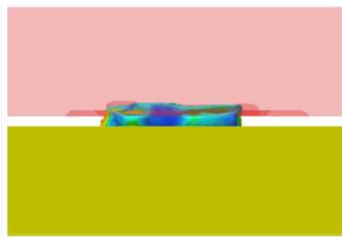

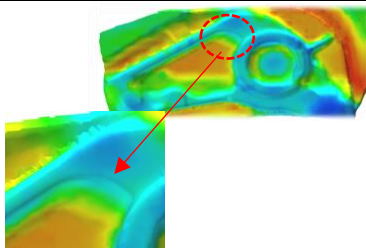
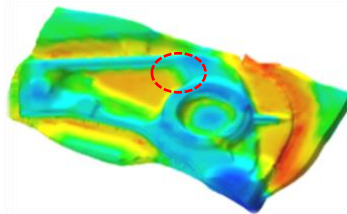
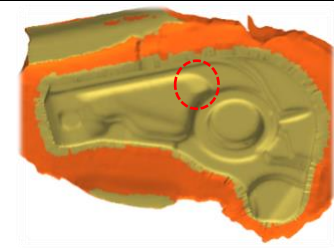
sürecinde metalin uygun sıcaklığa erişmesi ve homojen bir şekilde ısınması son derece önemlidir[1]. Dövmede keskin köşeleri düzgün bir şekilde bağlamak için genellikle radyus kullanılır, radyus veya yuvarlatılmış köşeler ani açılı bağlantı yerine düzgün kademeli bağlantıya yardımcı olur. Oluşabilecek stres konsantrasyonları sonucu meydana gelebilecek çatlak ve kırılma riskini minimize eder. Köşe ve iç köşe yarıçaplarının seçimi aynı zamanda tane akışını, kalıp aşınmasını ve işlemede çıkarılacak malzeme miktarını etkiler [1]. Bu yüzden kalıplarının işlenmesi esnasında keskin köşelerin dikkatlice işlenmesi gerekebilir. Dövme sürecinde kalıpların bakım ihtiyacını artırabilir. Desteksiz tasarımda ve yuvarlatılmış köşelerin normale nazaran daha keskin olduğu durumda üretim sürecinde incelenen dövme örneğinde oluşan katlanma Şekil 7'de sunulmuştur. Üretilen parçanın kusurlu olduğu net bir şekilde görülmektedir. Karşılaşılan bu durumu farklı bir malzeme/alaşım veya yöntem kullanmaksızın iyileştirebilmek için tasarımda değişikliğe gidilmesi zorunlu olmaktadır.



Şekil 7. Katlanma Kusuru (Desteksiz Tasarım)

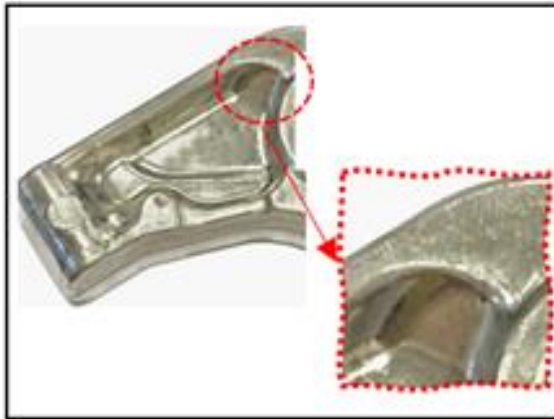
Dövme örneğinde, katlanmanın görüldüğü alandaki iki köşeyi birleştirmek için yarıçap kullanılmıştır. Köşe yarıçapları, plastik deformasyon sırasında malzeme akışını rahatlatmak ve yüksek dövme gerilmelerini azaltmak için mümkün olduğunca büyük seçilir. Küçük yarıçap kullanımında, gerilmeler yüksek olacağından katlanmanın meydana gelmesi daha olasıdır[16]. İncelenen örnekte parçanın fonksiyonunu etkilemeden kullanılabilir maksimum yarıçap değerleri kullanılmıştır. Simufact sonlu analiz programı ile yapılan simülasyon sonuçlarında Şekil 8'de farklı kurs mesafesi seviyelerinde katlanma oluşumu görülmektedir. Analiz edilen numunenin gerilme değerlerinde beklendiği gibi, kırmızı renk malzemede oluşan en yüksek gerilme değerini, mavi renk ise en düşük değeri temsil etmektedir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde katlanma bölgesinde gerilme değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Uygun olmayan kalıp tasarımı, malzemenin istenmeyen akışına ve dolayısıyla geometrik kusurlara yol açmaktadır. Şekil 8

incelendiğinde katlanma oluşumu net şekilde görülmektedir. Katlama bölgesinde yarıçap geometrisi oluşmadan malzeme kalıp dışına akıp, yarıçap geometrisi homojen malzeme akışını bozmakta ve katlanmaya neden olmaktadır. Şekil 8'de yapılan analiz sonuçlarında keskin köşede kullanılan yarıçap değerinin malzemenin akışını bozduğu ve katlanmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Katlama bölgesindeki malzeme akışını rahatlatmak ve gerilmeleri azaltmak için katlama bölgesine destek eklenmiştir. Simülasyon sonuçlarında destekli bölgedeki gerilmelerin azaldığı ve katlanmanın giderildiği görülmüştür.

|                   | Kurs (Strok) Mesafesi (mm)   |  |  |
|-------------------|--|--|--|
|                   | 15 mm  | 20 mm  | 28 mm  |
| DESTEKSİZ TASARIM |   |    |   |
| Kurs Görüntümü    |   |    |   |
| DESTEKLİ TASARIM  |  |  |  |

Şekil 8. Tasarımdaki Destek durumuna bağlı katlanma oluşumunu gösteren simülasyon görüntüleri

Simülasyon parametreleri ile gerçek ortamda yapılan deneme aynı sonucu vermiş ve üretilen numune parçanın görsel kontrolünde katlanmanın giderildiği görülmüştür. (Şekil 9)

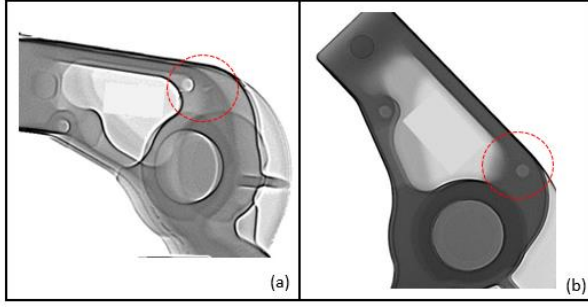


Şekil 9. Destekli Tasarım (Destek Bölgesi)

### 3.3 Numune parçalarının muayenesi

Ürünlerin üretimi sırasında oluşabilecek katlanma, çatlama, eksik doldurma gibi dövme kusurları ürünün kullanılacağı yere göre büyük maddi kayıplara neden olabilir. Bu kaybı önlemek için belirli zaman aralıklarında tahribatsız test yöntemleri veya tahribatlı test yöntemleri kullanılarak arızalı alanlar önceden tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada örnekler X-ray inceleme yöntemi ile kontrol edilmiştir.

X-ray muayenesi yöntemi tahribatsız inceleme yöntemlerinden biri olup, parçaların hacimsel olarak incelendiği, kusurların tipinin, yerinin ve boyutunun belirlenebildiği bir yöntemdir. X-ray cihazı ile yapılan kontrollerin sonuçlarının görüntülerinde katlanma problemi olan numune Şekil 10.(a)'da, tasarım değişikliği sonrası problem giderilerek katlanma kusurunun olmadığı numune ise Şekil 10.(b) görselinde kırmızı halkalar içerisinde görülmektedir.



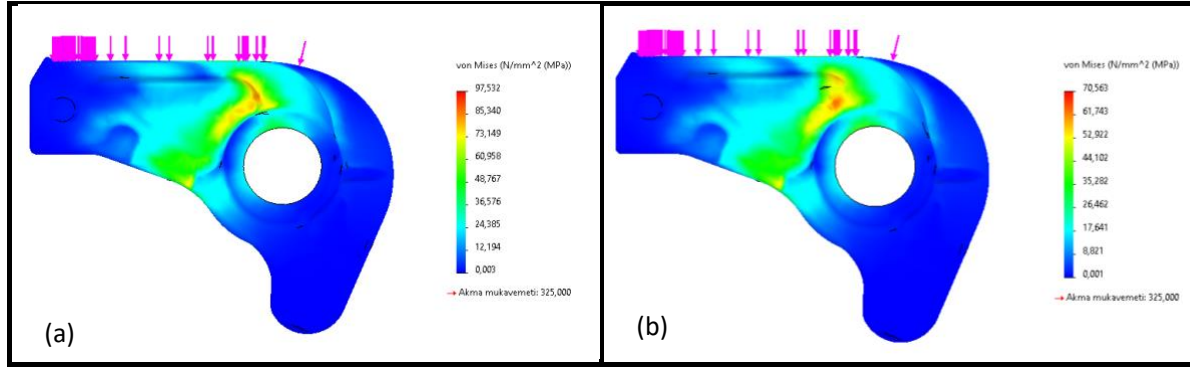
Şekil 10. X-RAY görseli, (a) Desteksiz tasarım, (b) Destekli tasarım

### 3.4 Desteğin Tasarım Üzerindeki Mekanik Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada kullanılan numune bir otomotiv bileşenidir. Bu nedenle ilgili şartnamelerde yer alan mekanik ve fiziksel testlere tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada, numunenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Von-Mises gerilme analizi kullanılmıştır. Von-Mises gerilme değeri, belirli bir kuvvetin uygulandığı malzemedeki gerilme direncini

belirlemek için kullanılan, malzemenin deformasyon prensiplerine dayanarak elde edilen bir değerdir. Bu analiz, numunenin mekanik dayanıklılığını belirlemek ve tasarım değişikliklerinin etkisini incelemek için gerçekleştirilmiştir[17]. Analizde, numunenin fiziksel çalışma yönüne paralel olarak 20N kuvvet uygulanmıştır.

Analiz, SOLIDWORKS programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en yüksek gerilme değerlerinin desteksiz keskin köşelerde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 11'de görülen analiz sonuçlarına göre, desteksiz keskin köşelerde yaklaşık olarak 97,5 MPa bir gerilme oluşmuştur. Bu analizde destek eklenmesi durumunda, oluşan gerilmenin yaklaşık %30 oranında azalarak ilgili bölgede 70,5 MPa civarında bir gerilme meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, numunenin seri imalat koşullarındaki gerçek performansını desteklemekte ve tasarım sürecini doğrulamaktadır. Von-Mises gerilme analizi, numunenin mekanik dayanıklılığını değerlendirmek ve tasarım değişikliklerinin etkisini incelemek için önemli bir araç olarak kullanılmıştır.



Şekil 11. Von Mises simülasyon sonucu, (a) Desteksiz tasarım, (b) Destekli tasarım

## IV. SONUÇ

Normal şartlarda alüminyum alaşımları arasında Al 2024 malzeme yüksek mukavemeti nedeniyle plastik deformasyonu zor olan malzemelerin arasındadır. Deneyle gerçekleştirildiği parça normal şartlarda döküm yöntemiyle üretilmektedir. Ancak döküm sonrası malzemenin mukavemeti yeterli seviyelere ulaşamamaktadır. Döküm yöntemi yerine dövme operasyonu kullanılması ekstra mukavemet kazandırmaktadır. Bu araştırma dövme sürecinde oluşan katlanma kusurunun analizini ve giderilmesini amaçlamıştır. Çalışma, öncelikle simülasyon girdi parametrelerinin belirlenmesi üzerine odaklanmış ve dövme işlemi için uygun proses parametrelerinin belirlenmesine yönelik önemli bulgular ortaya koymuştur. Hammaddede sıcaklığının artmasıyla malzemenin akışının kolaylaşması ve deformasyon direncinin azalması gibi faktörler, dövme işlemi için

optimum sıcaklık aralığının belirlenmesine katkı sağlamıştır. Daha sonra, destek kullanımının tasarım üzerindeki mekanik etkisinin incelenmesiyle katlanma kusurunun giderilmesi amacıyla yapılan çalışmalar sunulmuştur. Destek eklenmesinin, keskin köşelerde oluşan gerilmeleri azalttığı ve katlanma kusurunu önlediği gözlemlenmiştir. Bu tasarım değişikliği, dövme sürecindeki keskin köşelerin yarattığı gerilme konsantrasyonlarını azaltarak ürün kalitesini artırmıştır.

Son olarak, numunelerin muayenesi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizlerle ilgili bulgular sunulmuştur. X-ray muayenesi ile belirlenen katlanma kusurlarının, destek eklenmesiyle giderildiği gözlemlenmiştir. Von-Mises gerilme analizi ise desteksiz keskin köşelerdeki gerilme değerlerini azaltarak numunenin mekanik dayanıklılığını artırmıştır. Bu çalışmanın literatüre



önemli bir katkı sağladığı düşünülmektedir. Özellikle dövme sürecinde katlanma kusurunun analizi ve giderilmesi üzerine yapılan detaylı çalışmalar, endüstrideki üretim süreçlerinin iyileştirilmesine ve kalitenin artırılmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, destek kullanımının dövme tasarımında önemli bir rol oynadığı ve mekanik analizlerin tasarım sürecindeki kararları destekleyici bir araç olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, dövme süreci ve benzeri üretim süreçlerinde tasarım ve üretim kalitesinin artırılması için değerli bir rehber sağlayabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] J. R. Davis, *Aluminum and aluminum alloys*. *ASM international*, 1993.
- [2] M. W. Fu and M. W. Fu, “Flow-Induced Defects in Multiscaled Plastic Deformation,” *Des. Dev. Met.-Form. Process. Prod. Aided Finite Elem. Simul.*, pp. 131–180, 2017.
- [3] M. Sedighi and S. Tokmechi, “A new approach to preform design in forging process of complex parts,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 197, no. 1–3, pp. 314–324, 2008.
- [4] X. Ge, Y. Yu, H. Yu, and G. Wang, “Study on Folding Defect Elimination Method of Track Link Forging Based on Preforming Design,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 24, no. 1, pp. 61–71, 2023.
- [5] D. B. Shan, W. C. Xu, and Y. Lu, “Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 151, no. 1–3, pp. 289–293, 2004.
- [6] M. Hawryluk and J. Jakubik, “Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 59, pp. 396–409, 2016.
- [7] S. G. Prasad and N. Panigrahi, “Review of the Study of Hot Forging Process Defects,” *Stainl. Steel*, vol. 1300, p. 920.
- [8] P. Petrov, V. Perfilov, and S. Stebunov, “Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, no. 1–3, pp. 218–223, 2006.
- [9] J. L. Wang, M. W. Fu, and J. Q. Ran, “Analysis and avoidance of flow-induced defects in meso-forming process: simulation and experiment,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, pp. 1551–1564, 2013.
- [10] J. L. Wang, M. W. Fu, and J. Q. Ran, “Analysis of size effect on flow-induced defect in micro-scaled forming process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, pp. 1475–1484, 2014.
- [11] A. M. Handbook, “Forging of Aluminum Alloys,” in *Volume 14: Forming and forging*, Company of America, 1996, p. 533.
- [12] H. Öztürk, “Analysis and Design for Aluminum Forging Process,” *Degree Master Science Mechanical Engineering METU*, p. 189, 2008.
- [13] Y. Birol, “The effect of processing and Mn content on the T5 and T6 properties of AA6082 profiles,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 173, no. 1, pp. 84–91, 2006.
- [14] “Aluminium and aluminium Alloys-Sheet, Strip and Plate, Part 2: Mechanical properties,,” *BS EN 485-2, British Standard.*, 2007.
- [15] C. R. Keeton, “ASM Metals handbook: forming and forging,” *Met. Park OH ASM Int.*, pp. 108–127, 1988.
- [16] C.-Y. Wu and Y.-C. Hsu, “The influence of die shape on the flow deformation of extrusion forging,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 124, no. 1–2, pp. 67–76, 2002.
- [17] E. Eyere, O. Larry, and O. Peter, “Development of a Mechanical Puller,” *Int J Innov Sci Res Technol*, vol. 3, no. 7, pp. 284–289, 2018.