



## **Ön Deformasyona Uğratılmış Hammadde Kullanılarak Paslanmaz Çelik Bağlantı Elemanının Simülasyon Destekli Soğuk Dövme Üretimi**

### **Simulation-Assisted Production of Stainless Steel Fasteners Using Pre-Deformed Raw Material by Cold Forging Method**

**Alper Baygut<sup>1\*</sup>**, **Osman Çulha<sup>2</sup>**, **Tuğçe Yağcı<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> BOLT Bağlantı Elemanları San.Tic. A.Ş. (BOLT Ar-Ge), Bursa, TÜRKİYE

<sup>2,3</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [alper.baygut@bolt.com.tr](mailto:alper.baygut@bolt.com.tr)

Geliş Tarihi / Received: 06.07.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 29.03.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247201

*Atıf şekli/ How to cite: BAYGUT, A., ÇULHA, O., YAĞCI, T., (2022). Ön Deformasyona Uğratılmış Hammadde Kullanılarak Paslanmaz Çelik Bağlantı Elemanının Simülasyon Destekli Soğuk Dövme Üretimi. DEÜFMD, 24(72), 689-702.*

#### **Öz**

Soğuk dövme ile üretim gerçekleştirirken kullanılan hammaddenin başlangıç özellikleri, deformasyon sonucunda ortaya çıkan nihai ürün mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Deformasyon miktarı ve hızına bağlı olarak malzemenin gerçek gerilme - şekil değişimi eğrisi esasında soğuk dövme sonrası mukavemette artış ve şekil alabilirlikte azalma söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada A2-70 sınıfında bağlantı elemanı üretmek için kullanılan 304Cu (1.4567) kalite hammaddenin dövme öncesi tel çekme ile ön deformasyona uğratılması ve hammaddenin mekanik özelliklerinin değişimi, bu değişim esasında bağlantı elemanı kalıp ve prosesin simülasyon destekli tasarımı gerçekleştirilmiştir. Soğuk dövme simülasyon çalışmalarında simufact.forming yazılımı kullanılmıştır. Simülasyon verilerine göre hammaddenin Ø7,80 mm 'den Ø6,95 mm 'ye tel çekme operasyonu ile inceltmesi sonucunda akma mukavemeti değeri 215 MPa 'dan 620 MPa 'ya yükselmiştir. Bu durumda yüzde deformasyon miktarına göre soğuk dövmeye giren hammadde özellikleri değişmiş olup sonlu elemanlar simülasyonu destekli üretimde kullanılan malzeme özellikleri ve kalıp tasarım bu veriye göre yapılmıştır. Bu hammaddenin soğuk dövme simülasyonunda kullanılması sonucunda ise kalıp geometrisi esasında deformasyonun yoğun gerçekleştiği civata kafa bölgesinde HV10 sertlik değeri 320 ile 340 HV seviyelerine gelmiştir. Deformasyon sırasında oluşan malzeme akış çizgileri, ürün ölçü toleransları, ovalama ile dış açma işlemi sayısal ortamda gerçekleştirilmiş ve tasarım bilgisayar ortamında doğrulanarak, fiziksel ürün üretimi yapılmıştır. Sertlik, mukavemet ve yapısal kontroller gerçekleştirilmiş ve sayısal model değerleri ile karşılaştırılmıştır. Özellikle başlangıç hammaddesine uygulanan tel çekme işlemi sonucunda değişen malzeme özellikleri ve soğuk dövmeye etkisi mekanik ve metalografik olarak araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Plastik Şekil Verme, Ön Deformasyon, Bağlantı Elemanı, Paslanmaz Çelik.

## Abstract

The initial properties of the raw material used while producing by cold forging change the mechanical properties of the final product resulting from deformation. Depending on the amount and speed of deformation, there is an increase in strength and a decrease in formability after cold forging on the basis of the true stress - strain curve of the material. In this study, pre-deformation of 304Cu (1.4567) quality raw material used to produce fasteners in A2-70 class by wire drawing before forging and the change of the mechanical properties of the raw material, on the basis of this change, the simulation supported design of the fastener mold and process was carried out. Simufact.forming software was used in cold forging simulation studies. According to the simulation data, the yield strength value increased from 215 MPa to 620 MPa as a result of thinning the raw material from Ø7.80 mm to Ø6.95 mm with wire drawing operation. In this case, the properties of the raw materials entering the cold forging have changed according to the deformation percentage amount, and the material properties and mold design used in the finite element simulation supported production were made according to this data. As a result of the use of this raw material in the cold forging simulation, the HV10 hardness value in the fastener head region, where deformation is intense on the basis of the die geometry, has reached the levels of 320 to 340 HV. Material flow lines, product dimensional tolerances, rolling and thread cutting processes during deformation were verified in the computer environment and physical product production was made. Hardness, strength and structural checks were performed and compared with numerical model values. Especially, the changing material properties as a result of the wire drawing process applied to the starting raw material and its effect on cold forging were investigated mechanically and metallographically.

**Keywords:** Plastic Forming, Pre-Deformation, Fastener, Stainless Steel

## 1. Giriş

Paslanmaz çelikler, üstün korozyon direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olması, plastik olarak şekillendirilebilmesi ve estetik görünüşleri göz önüne alındığında geniş bir kullanım alanına sahip olan malzeme grubu olarak karşımıza çıkmaktadır. 304L Paslanmaz çeliklerin sahip olduğu korozyon dayanımı, bu malzemelerin yüzeyinde oluşan kalınlığı yaklaşık 1-3 nm seviyelerinde olan, oksit pasif film tabakasının varlığından kaynaklanmaktadır [1]. Bu malzemeden soğuk dövme yöntemi ile üretilen bağlantı elemanları ise dayanıklı tüketim malları olmak üzere birçok atmosfer değişikliğine sahip alanda kullanılmaktadır.

Malzemelerde yırtılma, katlanma gibi istenmeyen olumsuz etkiler olmaksızın akış sürekliliğini bozmadan şekil verebilmek için, şekil alabilme kabiliyetinin iyi olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, prosesi doğrudan etkileyen presin kuvveti, basıncı ve gücü gibi parametrelerin bilinmesi de oldukça önemlidir. Gerçekleştirilen dövme ile şekillendirme uygulamalarında optimum sonuçları alabilmek ve işlem verimliliğini artırmak için, proses parametreleri ve malzeme

özellikleri bir bütün olarak ele alınmalı ve bu ölçütler birbirlerine uygun olmalıdır [2].

Plastik şekil verme yöntemlerinden biri olan soğuk dövme prosesinin bir sonucu olarak, malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinde değişimler meydana gelir. Bu durum, nihai üründe istenilen fiziksel ve mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Özelliklerde meydana gelen değişimler, deformasyon sertleşmesine bağlı sertlik ve mukavemet artışı, sünekliğin azalması, mikroyapıda tane yönlenmesinin değişmesi olarak sıralanabilir. Operasyon veya istasyon olarak ifade edilen şekillendirme adım sayısının azaltılması ve proses dizaynında yapılan değişiklikler, istasyon başına gerekli olan dövme kuvvetini, kalıp basıncını, malzeme akışını, gerinim dağılımını ve sertlik değerlerini doğrudan etkilemektedir. Paslanmaz çeliklerin deformasyon sertleşmesi özelliği ise diğer düşük alaşımlı çeliklere göre farklı olduğu için bu proses verileri daha önemli hale gelmektedir [3-4].

Soğuk dövme prosesinde ürün ve kalıp tasarımı yaparken hammadde çapı, ürün operasyon geçişleri, ekstrüzyon-redüksiyon oranı, parçanın boyu, yağlayıcı yapısı ve kullanımı vb.

özellikler kritiktir. Bu parametreler kalıp ömürlerine etkiyerek, kalıp hasarlarına ve kırılmalarına sebebiyet vermektedir. Bu ve bunun gibi ölçütler dikkate alındığında söz konusu prosesi optimum ekonomik fayda elde edecek şekilde tasarlanmanın gerekliliği büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle, maksimum faydayı sağlamak amacıyla endüstriyel ve akademik alanda birçok çalışma yapılmakta olup, bu çalışmalar sırasında sayısal simülasyon destekli yazılımlardan faydalanılmaktadır.

Güden ve arkadaşları [5], soğuk dövme prosesinde metal şekillendirme endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan sonlu elemanlar yönteminin önemini konu aldıkları çalışmalarında, maliyet azaltma, zaman tasarrufu ve ürün kalitesinde iyileşme gibi parametreler üzerinde araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon yazılımlarının kullanıldığı çalışmaların önemini anlatan Erbil ve arkadaşlarının [6] gerçekleştirmiş oldukları bir diğer çalışmada ise, sonlu eleman analizleri kullanılarak soğuk dövme işleminde malzeme akışı, kalıp doldurma, katlanma problemi, dövme kuvvetleri, sünek hasarlar ve kalıp kırılmaları gibi problemlerin, üretim gerçekleşmeden önce tahmin edilebilmesi üzerine odaklanmışlardır. Tekkaya ve arkadaşları [7] ise çalışmalarında, sonlu elemanlar yönteminden yararlanarak soğuk ekstrüzyon kalıplarının (Tungsten Karbür Kobalt / WC-Co) yorulma davranışlarını incelemişlerdir. İnce ve arkadaşları [8] Simufact.forming sonlu elemanlar analizini kullanarak, soğuk şekillendirme uygulamalarında kalıplarda oluşan hasarları incelemişler ve tasarımlarda istasyon geçişlerinde yaptıkları değişimler ile kalıplarda oluşan gerilim kuvvetlerinin düşürülmesini sağlamışlardır. Bağlantı elemanının simülasyon destekli üretimi ile ilgili çalışma yapan Kılıçaslan ve arkadaşları [9], otomobil bijonuna ait tasarımda operasyon geçişlerindeki zımba problemi üzerine çalışmışlardır. Hsu ve arkadaşları [10], çok istasyonlu dövme işlemlerinde dövme preslerinin ürün üzerindeki etkisini dövme yükü, operasyon tasarımı ve şekil değişikliği gibi parametreler bakımından takip edildiği akış kontrollü dövme (FCF - Flow Control Forming) süreçlerini tartışmışlar ve son şekil ölçülerine uygun yeni tasarımlar geliştirmişlerdir. Wagner ve arkadaşları [11],

2006 yılında yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar analiz yönteminden faydalanarak, kalıp deformasyonlarının en yoğun olduğu bölgeleri tespit ederek, kalıp ömürlerinin artırılması amacıyla üç farklı kalıp yüzey işleme yönteminin değerlendirilmesi üzerine odaklanmışlardır. 1992 yılında Geiger ve arkadaşları [12] yaptıkları çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak soğuk dövme prosesinde kullanılan bir ekstrüzyon kalıbının giriş kısmında oluşan yorulma direncini hesaplamışlardır. Hyunkee ve arkadaşları [13] çalışmalarında, dövme sanayi sektörü ve literatürde yer alan soğuk şekillendirilmiş ürünler hakkında bilgiler vermişlerdir. İnceledikleri soğuk dövülmüş iş parçasının her istasyonda oluşan parça boyutları ve operasyon dizilimleri hakkında sonlu elemanlar prensibine dayalı olarak çalışan simülasyon uygulamaları kullanarak analizler gerçekleştirmişler ve elde ettikleri sonuçları kullandıkları yazılımın kütüphanesine veri olarak eklemişlerdir.

Bu çalışmada ise, DIN EN ISO 3506 standardına uygun östenitik paslanmaz çelik hammadde verileri kullanılarak A2-70 mukavemet sınıfında bağlantı elemanı üretimi için proses ve operasyon tasarım simülasyonu ile, uygun hammadde kullanılarak prototip ürün imali sağlanmıştır. Çalışma ile ilgili DIN EN ISO 3506-1 ve EN ISO 10263-5 standartları değerlendirildiğinde, bulunabilirliği yüksek olan 304Cu (1.4567) hammadde ile simülasyon destekli analizler ve prototip üretim faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Daha çok düşük karbonlu çelik ve mikroalaşımli olarak bulunan tasarım ve yayın çalışmalarına rastlanırken, hammadde olarak östenitik paslanmaz çelik kullanılması ve ön deformasyon etkisinin araştırılması bu çalışmanın ana hedefi olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Paslanmaz çelik malzeme kullanılarak sanal-simüle ortamda ürün ve proses tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ürün prosesinde, prototip üretim için en az redüksiyon oranına sahip hammadde seçiminin yapılmış olması prosesi hızlandırmıştır. Yapılan ön proses tasarım çalışmalarında araştırma konusu bağlantı elemanı üretimi için yaklaşık Ø6,95 mm çapta hammadde gerekliliği ortaya çıkmıştır. Fakat bu çapta tedarik edilecek bir hammadde kullanıldığında, soğuk dövme sonucunda elde

edilmek istenen mekanik değerlere ulaşılamayacağı ortaya çıkmıştır. Soğuk dövmeden kaynaklı yüzde deformasyon oranına bağlı olarak malzeme çekme mukavemetinde 520 MPa seviyelerinde artış gözlemlenmiştir. Bu mukavemet değerleri DIN EN ISO 3506-1 kapsamındaki mekanik gereklilikleri (en az 700 MPa) sağlayamamaktadır. Dolayısı ile Ø6,95 mm değerinden daha yüksek çapta hammadde kullanılarak mekanik özelliklerin ön deformasyon işlemi ile artırılması ve sonrasında soğuk dövme yapılarak standart için gerekli olan 700 MPa üstü mekanik değerlerin elde edilmesi planlanmıştır. Tedarik edilen hammadde mukavemetini üretim faaliyetleri öncesinde arttırmak amacıyla mukavemet artırıcı mekanizmalardan biri olan deformasyon sertleşmesi yöntemi kullanılmıştır. Filmaşın hammadde 7,80 mm çapında ve çekme mukavemeti 520 MPa olarak tedarik edilmiş ve ortalama %20 ön deformasyon şeklinde tel çekme (haddeleme) işlemine tabi tutulmuştur. Bu ön tasarım faaliyetleri sonucunda deformasyon sertleşmesi mekanizması ile mukavemeti artırılan hammadde kullanıldığında soğuk dövme sonrası 710 MPa değerine ulaşabilecek bir ürün olacağı belirlenmiştir. Sayısal simülasyon

uygulamaları, fiziksel ürün üretimine geçmeden önce malzeme şekil değişimlerini, malzeme üzerindeki yük-sıcaklık-gerilme dağılımlarını, operasyonlar arası boyutsal değişimleri ve bunlara benzer mekanik ve metalurjik özelliklerin farklı parametrelere bağlı olarak değişimlerini ortaya koyabilmektedir. Çalışmada malzeme verileri oluşturulurken, paslanmaz çelik bağlantı elemanı genel şartnamesi olan ve kimyasal kompozisyon aralığı Tablo 1 'de verilen DIN EN ISO 3506-1 standardını kapsayacak şekilde dövülebilir paslanmaz çelik bağlantı elemanları, hammadde standardı EN ISO 10263 - 5 kapsamına uygun olacak şekilde X3CrNiCu18-9-4 kalite (1.4567) filmaşın hammadde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan hammadde, sayısal simülasyon çalışmalarından elde edilen proses çıktılarına uygun olacak şekilde tel çekme operasyonu uygulanmıştır. Alaşım elementi olarak malzeme kompozisyonu içerisinde bulunan bakır, deformasyon sertleşmesi oranını düşürmekte ve bu durum plastik deformasyon sırasında şekillendirilebilirlik bakımından kolaylık sağlamaktadır [14]. A2-70 mukavemeti sınıfına sahip bağlantı elemanının çekme mukavemetinin en az 700 MPa seviyesinde olması gerekmektedir.

**Tablo 1.** Hammaddenin Kimyasal Kompozisyonu (%ağ.)

Çelik Grubu	Mukavemet Sınıfı	%C maks	%Si maks	%Mn maks	%P maks	%S maks	%Cr	%Ni	%Cu maks	Standart
Östenitik	A2	0,1	1	2	0,05	0,03	15-20	8-19	4	DIN EN 3506-1
	A2	0,04	1	2	0,045	0,03	17-19	8-10,5	3-4	EN ISO 10263-5
		0,015	0,24	0,75	0,037	0,001	18,23	8,6	3,61	KULLANILAN

## 2.1 Proses Tasarımı-Bilgisayar Destekli Çizim ve Mühendislik

Spesifik konular üzerinde geliştirilmiş bilgisayar destekli mühendislik çözümlerinde, sac şekillendirme, sıcak-soğuk haddeleme, dövme ve ekstrüzyon uygulamaları yanı sıra kaynaklı üretim sonucu ortaya çıkan yeni kesitlerdeki fiziksel ve mekanik özelliklerin öngörülmesinde kullanılan bir çok yazılım bulunmaktadır. Soğuk dövme prosesi sonucunda üretilmesi planlanan son ürün

geometrisinin, kalıp tasarımına bağlı olarak doğruluğunun deneme üretimleri yerine bilgisayar ortamında yapılıp, gerekli görüldüğü taktirde revizyona gidilmesi, kalıp maliyetlerinde ve iş planında önemli avantajlar sağlamaktadır. Kalıp performansı soğuk şekillendirme proseslerinde doğrudan iş parçası şeklini etkilemekte ve kalıptaki herhangi bir sorun veya tasarım hatası doğrudan iş parçası üzerinde karşımıza çıkmaktadır. Kalıptan ve üretim prosesi tasarımından kaynaklı olası muhtemel hataların önüne geçilmesi, daha ekonomik ve verimli proses dizaynı, yeni ürün

geliştirme ve özgün ürünlerin tasarlanması için CAD (Bilgisayar destekli dizayn) yazılımlarına ilave olarak CAE (bilgisayar destekli mühendislik) 'lere ihtiyaç duyulmaktadır [15]. Bu çalışmada CATIA ve Simufact.forming programları kullanılarak hem tel çekme hemde soğuk dövme ile üretim proseslerinin tasarım ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kalıp - proses tasarımlarının gerçekleştirilmesinin ardından sanal ortamda dövme benzetiminin yapılabilmesi için simufact forming yazılımı girdisi hazırlanmıştır. Üretim parametrelerinin değiştirilip sonuçlarının benzetim yönteminde incelenmesi sebebiyle, karşılaştırma yapmak amacıyla gerçek üretimin parametre değerlerinin birebir aynısı olan bir adet benzetim yapılmıştır. Bu benzetim temel benzetim olarak tanımlanmıştır. Temel benzetimde, iş parçası için malzeme 304Cu, mekanik pres basma hızı 10 mm/s, sürtünme katsayısı 0,06 Coulomb, kalıp ve iş parçası başlangıç sıcaklığı ile çevre sıcaklığı da 20°C seçilmiştir. Bu süreçte kullanılan hem iş parçası hemde kalıp malzemesine ait özellikler simülasyon verileri olarak girilmiştir.

## 2.2 Tel Çekme ve Soğuk Dövme ile Şekillendirme

Tel çekme kalın kesitli olan bir telin, bir matris (kalıbı) içerisinden geçirilerek kesitini küçültme işlemidir. Tel kesitleri genellikle daireseldir. Dairesel kesitli çubuklar çekilerek cıvata, saplama gibi elemanların üretiminde kullanılırlar. Bu çalışmada ise tel çekme ön deformasyon işlemi için kullanılacak bir yöntemdir.

Soğuk dövme prosesi ile şekillendirmede, diğer plastik şekillendirme yöntemlerine göre daha hassas ürün geometrisi elde edilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca işlemin oda sıcaklığında gerçekleşmesi, üretim sırasında tufal formasyonunun meydana gelmemesi, son ürün ölçü hassasiyet toleranslarının oldukça düşük değerlerde olması, hızlı üretim akışına sahip olması, son ürün yüzey ve mekanik özelliklerinin alternatif üretim yöntemlerine göre daha gelişmiş olması gibi avantajlarından dolayı karmaşık şekilli iş parçalarının şekillendirmesi için üretim yöntemi olarak benimsenmiştir. Bu çalışmada tel çekme ön deformasyona sahip malzemenin ürün haline dönüştürülmesi için kullanılacak olan yöntemdir.

## 2.3 Mekanik ve Metalurjik Karakterizasyon

Tasarımı, model üretimler ile doğrulanan prototip ürünlerin, gerçek üretiminin başlangıcını hammadde kimyasal kompozisyonu ve mikroyapı analizi oluşturmaktadır. Kimyasal kompozisyon için spektral analiz yöntemi uygulaması ve yüzde element oranları belirlenmesinin ardından standart sınırları içinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Mikroyapı değişimleri, akış çizgileri, faz dağılımı gibi özellikler metalografik inceleme ile belirlenmektedir. Prototip ürünlerin geometrileri incelendiğinde farklı kesite sahip bölgeler çoğunlukta olup bu bölgelerin soğuk deformasyonla şekillendirmesi sırasında farklı sertlik bölgeleri oluşması muhtemeldir. Numunelerden kesit alınarak sertlik taraması yapılması yanı sıra ürünün farklı kesitli bölgelerinden de sertlik ölçümü (DIN EN ISO 898-1) yapılarak bölgesel analizler elde edilmektedir. Tork testi (DIN EN ISO 898-7) ve boyutsal ölçümlerde yapılarak ürün ticarileşmesi konusundaki tüm testler gerçekleştirilmiştir.

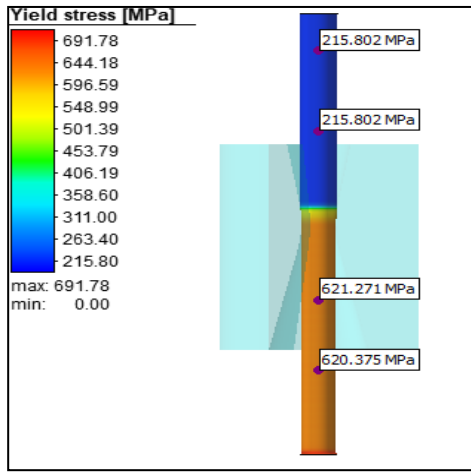
Mikroyapı analizi için % 25 HNO<sub>3</sub> ve % 75 HCl kullanılarak hazırlanmış olan dağlama reaktifleri ile parçalara kimyasal dağlama işlemi uygulanmıştır. Prototip parçanın operasyon numuneleri bakalite alınarak, gerekli yüzey hazırlama işlemlerinin ardından (zımparalama, parlatma, dağlama), şaft ve deformasyon bölgeleri üzerinde Vickers Sertlik (HV10) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Akma ve çekme mukavemet bilgilerinin elde edilebilmesi için çekme testi gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple prototip ürünün üretimi gerçekleştirildikten sonra mekanik özelliklerin doğrulanabilmesi için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyi yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı parametreler bulunmaktadır. Bunlardan biri çekme hızı bir diğeri ise dişli parçalar için değişik anma çaplarına göre kullanılması gereken kesit alanı (S<sub>0</sub>) değeridir. DIN 3506-1 ve EN ISO 898-1 standardı kullanılarak bağlantı elemanın ilgili değerleri belirlenmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Tel Çekme Simülasyonu

Operasyon tasarımında belirlenen ilk operasyon, tel çekme ile çap küçültme operasyonudur. Bu operasyonda hammaddenin çapı 7,80 mm 'den 6,95 mm 'ye düşürülmüştür. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen tel çekme işlemi sonuçlarına Şekil 1'de yer verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, hammaddenin henüz deformasyona uğramamış bölgesinin akma dayanımı yaklaşık olarak 215 MPa iken tel çekme kalıbından geçmesi ile deformasyon sonucunda 620 MPa değerlerine ulaşmaktadır.

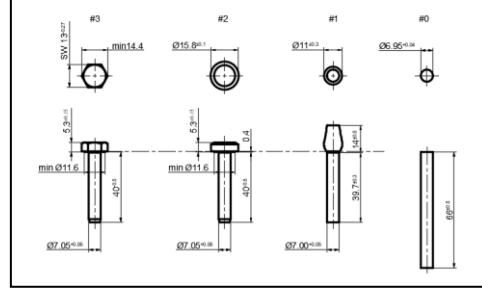


Şekil 1. Ön Deformasyon Simülasyonu

#### 3.2. Soğuk Dövme Simülasyonu

İş parçasının, prototip ve seri üretimi öncesinde uygulama yerine göre tasarımının yapılması gerekmektedir. Sinoptik içinde öncelikle parça çizimi ve analizi (mekanik, metalurjik, ölçüsel) olarak iki kriter söz konusudur.

İlk kriter olan tasarım aşaması, Şekil 2 'de gösterildiği gibi ürüne özel hacim sabitliği esasına dayalı olarak yapılmaktadır.

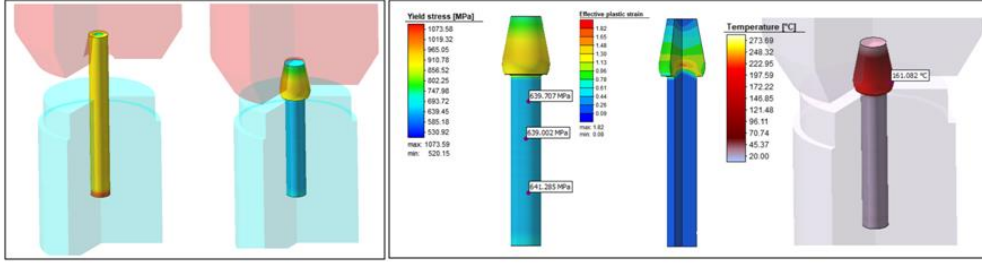


Şekil 2. Operasyon Numuneleri Tasarımı

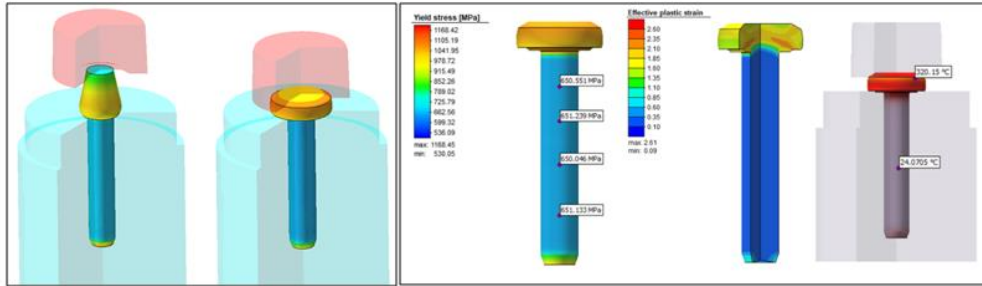
İkinci kriter ise simülasyon parametreleri ve adımlarıdır. Bu kapsamda, şekil 2'de görülen operasyon tasarımı, kalıp tasarımına aktarılmış ve sonrasında istasyonların simülasyonu eşlenik olarak Şekil 3-6 'da sunulmuştur.

Tel çekme operasyonu sonucunda elde edilen hammadde soğuk dövme simülasyonu için proses girdisi olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda birinci istasyona ait, soğuk dövme sonucunda operasyon numunesi üzerinde oluşan akma gerilmesi ve operasyon sıcaklığı Şekil 3 'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere ilk istasyon çıkışında malzeme ortalama 640 MPa akma mukavemet değerine ulaşmıştır.

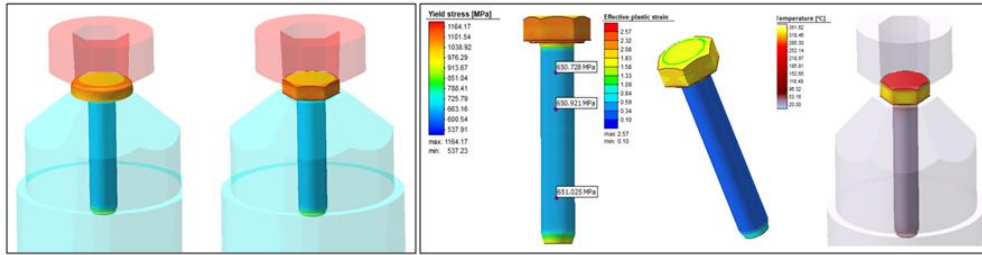
İkinci operasyon adımında, kafa şişirme işlemi uygulanmıştır. Şekil 4 'te gösterilen bu operasyon sonrası malzeme shaft bölgesinde üzerinde oluşan akma mukavemet değeri ortalama 650 MPa olarak gözlemlenmiştir. Kafa şişirme operasyonunda deformasyonun yoğunlaştığı kafa bölgesinde ise bu değer yaklaşık 1.100 MPa seviyesine ulaşmaktadır. Üç istasyon olarak tasarlanmış ürünün son istasyonunda çapaklama-kesme operasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, kesme kalıbında kesme kuvveti etkisi ile herhangi bir mukavemetsel artış gözükmemekte ve ortalama akma mukavemeti 650 MPa olarak belirlenmektedir. Son operasyonun ardından diş çekme işlemi gerçekleştirilmiş olup simülasyon sonucu Şekil 6 'da verilmiştir. Simülasyon sonrasında parçaların ortalama 675 MPa akma mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Mukavemetsel özelliklerle birlikte, soğuk dövme ile parça üretildiğinde malzemenin lif yönlenmeleri de önem taşımaktadır. Operasyonların simüle edilen lif yönlenmeleri Şekil 7 'de gösterilmiştir.



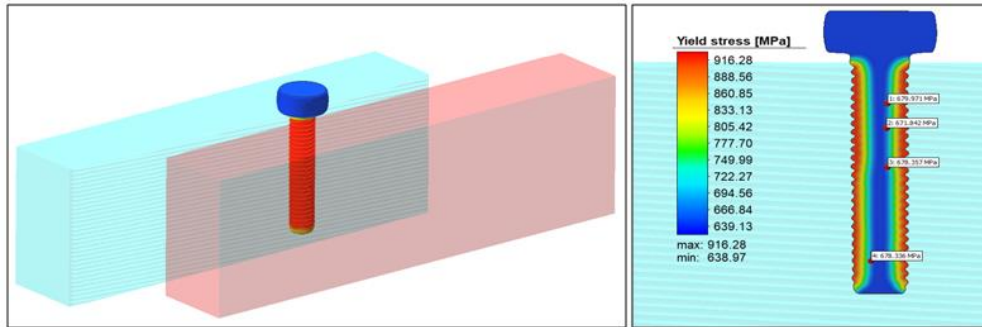
Şekil 3. Birinci İstasyon Simülasyonu



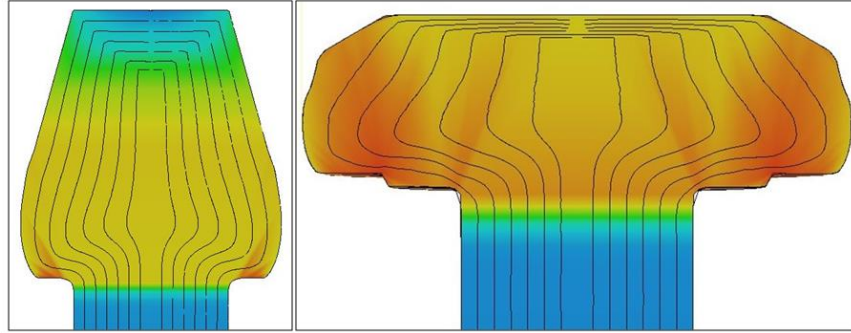
Şekil 4. İkinci İstasyon Simülasyonu



Şekil 5. Üçüncü İstasyon Simülasyonu



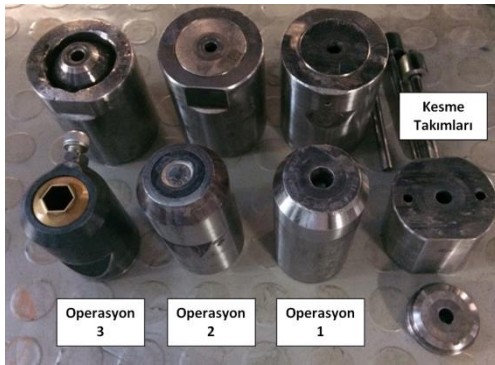
Şekil 6. Ovalama (Diş Açma) Simülasyonu



Şekil 7. Lif Yönlenmesi Simülasyon

### 3.3. Fiziksel Numune Üretimi

Simülasyon sonuçlarına göre değerlendirilen ölçü toleransları ve akma mukavemeti değerleri, kalite ve standartlarda istenilen değerlere uygun olduğundan dolayı fiziksel numune üretimi safhasına geçilmiştir. Tasarım aşamasında teknik resimleri çizilen kalıpların gerçek imalatı yapılmış ve Şekil 8 'de gösterildiği gibi prototip üretim için kullanıma hazırlanmıştır.



Şekil 8. Prototip Kalıpları

Üç istasyon adımıyla hacim sabitliği ilkesine dayalı olarak geleneksel yöntemlerle tasarlanan prosesin, simülasyon destekli analizi ile şekillendirilen istasyon numuneleri Şekil 9 'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Prototip Operasyon Numuneleri

### 3.4 Simülasyon ve Fiziksel Üretim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tasarım, simülasyon ve pilot üretim sonucu elde edilen numunelere ait görsellere Şekil 10 'da yer verilmiştir.

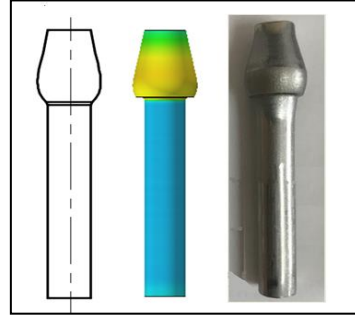
Operasyonların kritik bölgelerinin ölçümleri yapılmış ve bu ölçüm değerlerine Tablo 2 'de yer verilmiştir. Bazı ölçüm değerlerinde yüzde olarak tolere edilebilir sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapmalar genel ölçülerde bir değişikliğe sebebiyet vermeyeceği ve özellikle makine ayar sırasında istenilen değerde ölçü elde edilebilecek şekilde düzenlenebileceğinden dolayı göz ardı edilmiştir.



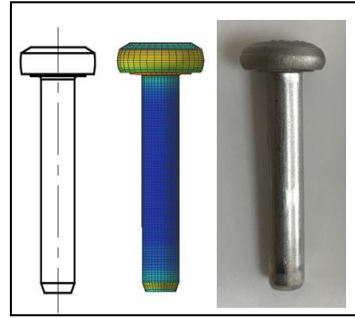
**Tablo 2.** Tasarım, Simülasyon ve Gerçek Ölçüler

İSTASYONLAR	ÖLÇÜLER	Tasarımda İstenen Ölçüler (mm)	Simülasyon Sonucu (mm)	Prototip Ölçüsü (mm)
Saplama (İş Parçası)	Çap	6,95 +0,04	6,96	6,97
	Boy	66 ±0,5	65,8	65,6
1. İstasyon (1.Operasyon)	Şaft Çapı	7 +0,05	7,01	7,03
	Şaft Boyu	39,7 ±0,3	39,67	39,84
	Kafa Çapı	11 ±0,3	10,99	11,21
	Kafa Boyu	14 ±0,5	13,5	13,9
2. İstasyon (2.Operasyon)	Şaft Çapı	7,05 +0,05	7,06	7,07
	Şaft Boyu	40 - 0,5	39,75	39,92
	Kafa Çapı	15,8 ±0,1	15,94	15,98
	Kafa Boyu	5,3 ±0,15	5,3	5,22
3. İstasyon (3.Operasyon)	AK Kafa SW Ölçüsü	SW 13 - 0,27	12,89	12,86
	AK Kafa Köşegen Ölçüsü	En az 14,4	14,57	14,57

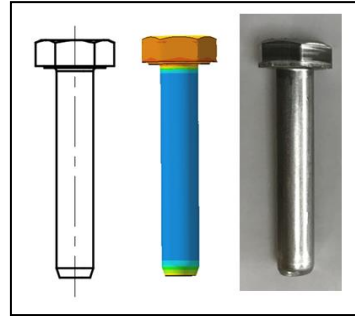
Plastik şekil vermenin yöntemlerinden biri olan ve bir çok avantaja sahip olan soğuk dövme prosesi kullanılarak imal edilen iş parçalarında mukavemet özellikleri için lif yapısının korunması, liflerde katlanma ve yığılma olmaması oldukça önemlidir. Bu amaçla parçalara, makro ve mikro incelemeler yapılmaktadır. Operasyonlar sonucunda elde edilen numuneler mikroyapısal olarak incelenmiş olup, simülasyon verileri, reel üretim sonuçları ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



a)



b)



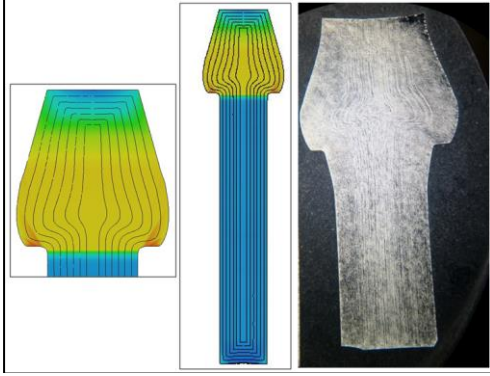
c)

**Şekil 10.** Proses Karşılaştırma, a) 1., b) 2. ve c) 3. Operasyon tasarım - simülasyon-fiziksel numune karşılaştırılması

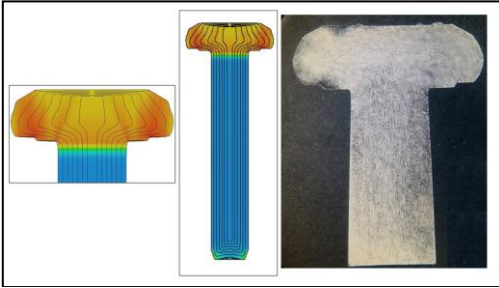
Şekil 11 'de istasyonlar bazında makro dağlaması yapılan bağlantı elemanına ait numune ve simülasyon çıktısı, özellikle kafa bölgesi dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

3. istasyonun kafa bölgesinde çapaklama işlemi yapıldığı için simülasyon ve prototip üretim numunelerinde liflerde kesilme meydana gelmektedir. Bu işlem proses gereği olmak zorundadır. Kafa bölgesinde meydana gelen lif kesilmesi herhangi bir mukavemet düşüklüğüne

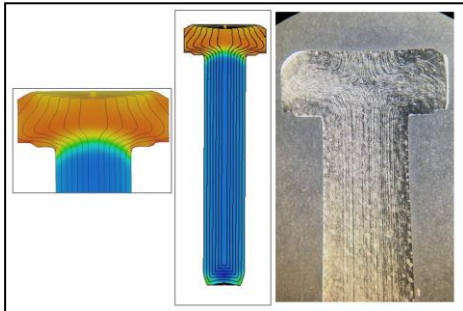
sebebiyet vermemektedir. Ovalama prosesine ait lif yapılarının makro dağılım sonuçları incelendiğinde liflerde kopma, yırtılma, katlanma vb. istenmeyen yapıların oluşmadığı, kafa altı bölgesinde yığılma gibi istenmeyen yapıların meydana gelmediği görülmüştür.



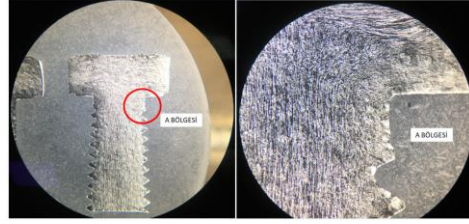
a)



b)



c)

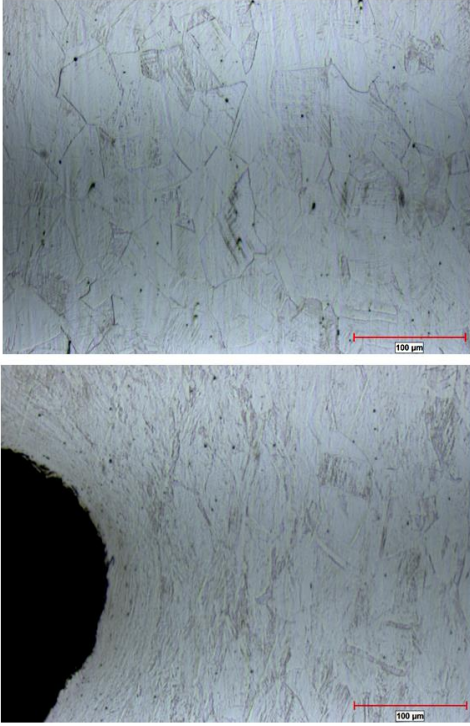


d)

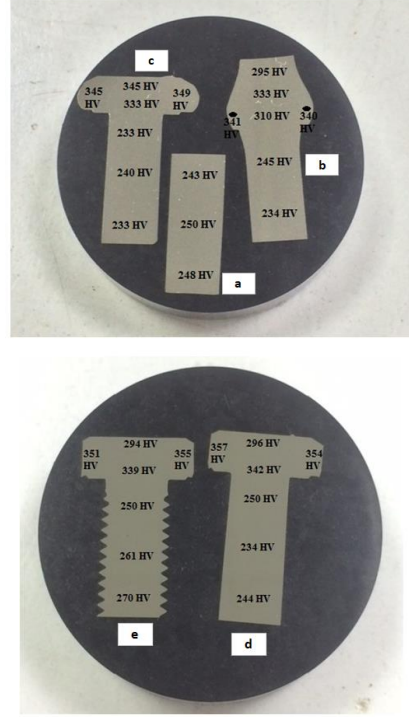
**Şekil 11.** Lif Yönlenmelerinin Karşılaştırılması, a) 1., b) 2. ve c) 3. Operasyon tasarım - simülasyon-fiziksel numune karşılaştırılması d) Kafa ve diş bölgesi

Diş oluşumu sırasında liflerde yönlenmeler gözlenmiş ve plastik şekil verme sırasında katlanma, yırtılma vb. istenmeyen oluşumlar gözlenmemiştir. Mikroyapı, literatürde belirtilen standart östenitik paslanmaz çelik olan 304Cu ile aynı özellikleri taşımaktadır (Şekil 12).

Şekil 13'te gösterildiği üzere ovalama prosesi haricinde tüm operasyonlarda shaft bölgesinde sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi saplamanın (iş parçasının) tel çekme operasyonu ile sertleştirilmesi ve diğer operasyonlarda redüksiyonsuz tasarım yapılmaması neticesinde saplama sertliğinin diğer operasyonlara taşınmasından kaynaklanmaktadır. Tedarik edilen hammadde sertliği ortalama 110 HV iken, tel çekme operasyonu sonrası ortalama 245 HV değerlerine çıkmış ve operasyon geçişlerinde ortalama değer yaklaşık 250 HV olduğu görülmüştür. Deformasyonun yoğun olduğu birinci istasyon olan kafa hazırlama bölgesinde sertlik değeri ortalama 320 HV iken ikinci istasyon kafa bölgesinde ise ortalama 340HV olarak ölçülmüştür. Ovalama prosesinde plastik şekillendirme uygulaması ile diş oluştuğundan malzemede pekleşmeden (deformasyon sertleşmesi) dolayı sertlik artışı gözlemlenmiş ve shaft bölgesinde sertliğin ortalama 265 HV olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 12. Mikroyapı Görseli



Şekil 13. Mikro Sertlik İncelemesi a)Tel çekme operasyonu b)1.Operasyon c)2.Operasyon d)3.Operasyon e)Diş Açma (Ovalama) Operasyonu

Tablo 3. Çekme Testi Sonuçları

Parça Numarası	Akma Mukavemeti (En az 450 MPa)	Çekme Mukavemeti (En az 700 MPa)
1	685	730
2	685	726
3	691	731
4	689	734
5	687	732
6	699	739
7	691	728
8	694	729
9	697	731
10	694	731

A2-70 sınıfında paslanmaz çelik bağlantı elemanı için DIN 3506-1 standardına göre sahip olunması gereken minimum akma-çekme dayanımları tespit edilmiş ve Akma Mukavemeti en az 450 MPa, Çekme Mukavemeti en az 700 MPa olarak belirlenmiştir. Sağlanması gereken ve test sonucunda elde edilen akma ve çekme mukavemetlerine ilişkin bu değerler Tablo 3 'te gösterilmektedir. Tablo 3 'teki değerler incelendiğinde ortalama akma mukavemetinin 690 MPa ve ortalama çekme mukavemetinin ise 731 MPa olduğu görülmüştür.

İncelenmesi gereken bir diğer mukavemetsel özellik ise uzama miktarıdır. DIN 3560-1 de A2-70 sınıfına göre uzama en az 0,4d mm değerine sahip olmalıdır. Buradaki "d" parçanın anma çapıdır. Anma çapı 8 (M8 civata) olduğundan yüzde uzama değeri en az 3,2 mm olmalıdır.

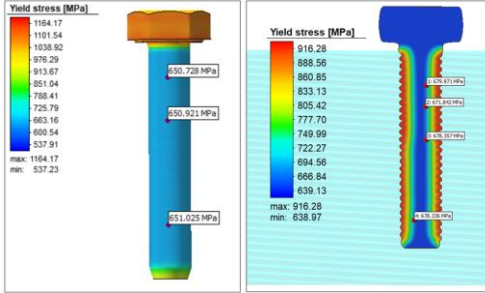
Tablo 4 'te prototip ürüne ait yüzde uzama değerleri görünmektedir.

Şekil 14 'te çekme testi öncesi ve sonrasında prototip numuneye ait görseller yer almaktadır.



Şekil 14. Çekme Testi Numunesi

Yapılan simülasyon çalışmasında operasyon numunelerinin akma mukavemetleri, simülasyon görüntülerinde görülebilmektedir. Tablo 3 'te fiziksel ortamda imal edilen prototip ürünlere ait çekme testi sonucu değerleri verilmiştir. Simülasyon sırasında ovalama öncesi ve ovalama sonrası görülen akma mukavemet değerleri Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 14. Son İstasyon ve Ovalama Prosesi Sonrası Akma Mukavemeti

Tablo 4. Gerçek Ürünün Çekme Testi Öncesi ve Sonrası Boy Ölçümleri (mm)

Parça No	Test Öncesi (mm)	Test Sonrası (mm)	Uzama Miktarı (mm)	% Uzama (en az 3,2 mm)
1	40,07	44,46	4,39	10,96
2	40,07	44,48	4,40	10,98
3	40,08	44,46	4,39	10,95
4	40,08	44,48	4,40	10,98
5	40,07	44,47	4,40	10,98
6	40,07	44,48	4,41	11,04
7	40,07	44,47	4,39	10,96
8	40,07	44,47	4,40	10,98
9	40,07	44,47	4,40	10,98
10	40,08	44,48	4,40	10,98

Simülasyon sonucunda son istasyon akma mukavemet değeri ortalama 650 MPa iken ovalama süreci sonrası akma mukavemeti ortalama 675 MPa 'a yükselmektedir. Bu yükselmenin sebebi plastik şekil verme ile dış oluşturma uygulamasıdır. Prototip ürün üzerinde gerçekleştirilen çekme testi sonrası akma mukavemeti değerleri Tablo 3 'te görüldüğü üzere ortalama 690 MPa dır. Sonuçlar değerlendirildiğinde yaklaşık %2 değerinde bir sapma görülmektedir.

Tork değeri, parçanın kullanılacağı yere montajı/sıkılması esnasında dikkat edilmesi gereken kritik bir değerdir. DIN 3506-1 standardı ve deney tasarımına göre, imalatçılar için sağlaması gereken en az kırılma torku değerini belirtmiştir. Kırılma-kopma torku testi Şekil 15 'te gösterildiği üzere, test edilmek istenen civatanın mengeneye bağlanarak tork metre yardımı ile koparılmaya çalışmasıdır.



Şekil 15. Tork Testi Numunesi

Çalışması yapılan bağlantı elemanı için ISO 898-7 'ye göre sağlanması gereken kırılma - kopma torku en az 32 Nm 'dir. Yapılan tork testleri Tablo 5 'te gösterilmiştir. Ortalama kırılma tork değeri 37,2 Nm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Tork Değerleri

Parça Numarası	Kırılma Tork Değeri (Nm) - En az 32 Nm
1	37
2	38
3	36
4	36
5	37
6	37
7	38
8	38
9	38
10	37

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada paslanmaz çelik bağlantı elemanı üretiminde kullanılan hammaddenin mekanik özelliklerinin soğuk dövme sonrası ürün meknik özelliklerine etkisi araştırılmış ve ön deformasyon uygulanarak hammaddenin soğuk dövme öncesi mukavemeti artırılıp son üründe daha yüksek mukavemetlere ulaşılması için proses tasarlanmıştır. Araştırma konusu seçilen ürünü doğrudan soğuk deformasyon ile üretmek için kullanılması gereken hammadde Ø6,95 mm seçildiğinde soğuk dövme sonrası mekanik özellik artışı standartları yakalayamamaktadır. Soğuk dövme öncesi tel

çekme ile üretim aşaması prosese eklenerek Ø7,80 mm 'den Ø6,95 mm 'ye deformasyon ile mukavemet artışı sağlanmıştır. Bu mukavemet artışını soğuk dövme öncesi elde etmek için gerekli olan tel çekmedeki kesit değişimi ve deformasyon oranı simülasyon sonuçları ile elde edilmiştir. Plastik şekil verme uygulamalarında elde edilen mukavemet artışı Baygut ve arkadaşları [16], Shivpuri ve arkadaşlarının [17] çalışmaları ile örtüşmektedir. Bununla birlikte uygulamadaki lif yönlenmeleri de önemlidir. Plastik şekil verme uygulamalarında, malzeme lifleri kesilmez ve dolayısı ile yapıda zayıflık oluşmaz. Yük taşıma kabiliyeti ve yorulma direnci diğer üretim yöntemlerine göre üstünlük göstermektedir. 300 serisi paslanmaz çelikler için mukavemette önemli artışlara neden olmaktadır [14].

Bu aşamada sağlanması gereken kritik özelliklerin karşılaştırılması incelendiğinde sanal ortam ve fiziksel ürün üretimi sonrasında malzeme lif yönlenmeleri (akış çizgileri), mikroyapı özellikleri, sertlik incelemeleri ve mukavemet gibi özelliklerin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen testler aracılığıyla ulaşılan sonuçların, sanal ve fiziksel ortamda elde edilen numuneler için birbiriyle örtüştüğü ve elde edilen numunenin gerekli standartları ve şartnameleri sağladığı sonucunda varılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen en önemli sonuç ise, bilgisayar destekli tasarım ve simülasyon sonuçları ile üretim faaliyetleri ile gerçek üretim sonuçlarının en doğru veriler kullanıldığında, gerçek değerlere en yakın veriler ürettiği olmasıdır. Dolayısıyla tasarım çalışmalarında, simülasyon destekli mühendislik uygulamaları imalat sanayinde önemli bir yere sahiptir.

#### Kaynakça

- [1] Olsson, C-OA., Landolt, D. 2003. Passive Films on Stainless Steels, Chemistry, Structure and Growth. *Electrochimica Acta.*, 48, 1093-1104.
- [2] Aran, A., Demirkol, 1995, M. İTÜ Makine Mühendisliği İmal Usulleri Ders Notları. İstanbul, 156.
- [3] Çapan, L. Giriş, 1991. Dövülebilirlik, Açık Kalıpta Dövme. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Seminer Notları, İstanbul, Türkiye, , 5-7.
- [4] Sönmez, F.O., Demir, A. 2006. Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts. *Journal of Materials Processing Technology.* 186, 163-173

- [5] İnce, U., Güden, M. 2008. Simulation Of The Cold Forging Process In Fastener Manufacture. III. International Scientific Technical Conference,
- [6] Erbil, E., İnce, U. 2010. Sayısal Benzetim Yöntemiyle Soğuk Dövme Uygulamaları. Mühendis ve Makina. 51(611), 9-22.
- [7] Tekkaya, A.E., Sonsöz, A. 1995. Life Estimation of Extrusion Dies. CIRP Annals., 44, 231-234.
- [8] Kılıçaslan, C., İnce, U. 2017. Civata Soğuk Dövme İşleminde Kalip Ömrünün Arttırılması: Dövme Kademe Tasarımının Etkisi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 21(5), 961-967.
- [9] İnce, U., Yavuzbarut, T. 2017. Impact of Simulations on Cold-Forging Designs. Forge. August, 16-19.
- [10] Hsu, Q.C., Lee, R.S. 1997. Cold Forging Process Design Based on the Induction of Analytical Knowledge. Journal of Materials Processing Technology. 69(1-3), 264-272.
- [11] Wagner, K., Putz, A., Engel, U. 2006. Improvement of Tool Life in Cold Forging by Locally Optimized Surfaces. Journal of Materials Processing Technology. 177, 206-209.
- [12] Geiger, M., Hansel, M., Rebhan, T. 1992. Improving the Fatigue Resistance of Cold Forging Tools by FE Simulation and Computer Aided Die Shape Optimization. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 143-150.
- [13] Hyunkee K., Altan T. 1996. Cold Forging of Steel - Practical Examples of Computerized Part and Process Design. Journal of Materials Processing Technology. 59(1-2), 122-131.
- [14] [http://www.ssina.com/download\\_a\\_file/fasteners.pdf](http://www.ssina.com/download_a_file/fasteners.pdf), (Erişim:12.09.2018)
- [15] Başdemir, V., Baygut, A., Çulha, O., 2018. Soğuk Dövme Tekniği İle Bağlantı Elemanı Üretiminde Kullanılan Plastik Şekil Verme Teknolojileri. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 7-3.
- [16] Baygut, A., Sakin, A., Yazıcı, S. Bağcı, T., Çulha, O., 2018. Ovalama Prosesi ve Talaş Kaldırma Prosesi Kullanılarak Oluşturulan M8x1,25 Vida Dişlerinin Mekanik Ve Metalurjik Özelliklerinin İncelenmesi. Poster Sunumu, OTEKON 2018.
- [17] Shivpuri, R., Sailesh, B., Kini, S., Pauskar, P., Deshpande, A. 1994. Recent advances in cold and warm forging process modeling techniques: selected examples. Journal of Materials Processing Technology. 46 ,253-274.