

**İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**8.8 KALİTE SINIFINDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ MİKRO  
ALAŞIMLI ÇELİKLER KULLANILARAK İŞİL İŞLEMSİZ ÜRETİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tayfur YAVUZBARUT**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Makine Mühendisliği Ortak Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fatih Cemal CAN**

**OCAK 2018**



**İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**8.8 KALİTE SINIFINDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ MİKRO  
ALAŞIMLI ÇELİKLER KULLANILARAK ISIL İŞLEMSİZ ÜRETİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tayfur YAVUZBARUT  
(60091202)**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Makine Mühendisliği Ortak Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fatih Cemal CAN**

**OCAK 2018**



İKÇÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 60091202 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tayfur YAVUZBARUT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “8.8 KALİTE SINIFINDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ MİKRO ALAŞIMLI ÇELİKLER KULLANILARAK ISIL İŞLEMSİZ ÜRETİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmudur.

**Tez Danışmanı :** **Yrd. Doç. Dr. Fatih Cemal CAN** .....

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Ahmet TÜRK** .....

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Levent AYDIN** .....

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 18 Aralık 2017  
**Savunma Tarihi** : 10 Ocak 2018





*Eşime ve Dostlarıma,*





## ÖNSÖZ

Çalışmalarında her türlü bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Fatih Cemal CAN'a teşekkür ederim.

Çalışmama her türlü ekipman, yer ve kaynak temininde yardımlarını gördüğüm ve hala bünyesinde çalışmakta olduğum Norm Grup ailesine ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez konusu olan çalışmanın gerçekleştirilmesi boyunca projenin çeşitli bölümlerinde katkısı olan Niyazi Emrah KILINÇDEMİR'e teşekkür ederim.

Yapılan testlerin gerçekleşmesinde katkıda bulunan Barış TANRIKULU'na teşekkür ederim.

Bu çalışma TÜBİTAK 3130748 proje numaralı 1501-Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı tarafından dolaylı olarak sağlanan destekler vasıtasıyla tamamlanmıştır. Bu vesileyle TÜBİTAK kurumuna teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2017

Tayfur Yavuzbarut  
Makine Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	x
KISALTMALAR.....	xii
SEMBOLLER.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ .....	xviii
ÖZET .....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Genel Bilgiler.....	3
1.2.1 Soğuk Şekillendirme .....	3
1.2.2 Soğuk şekillendirmenin avantaj ve dezavantajları .....	3
1.3 Literatür Taraması.....	4
<b>2. BAĞLANTI ELEMANLARI ÜRETİMİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Bağlantı Elemanları İçin Malzeme Seçimi.....	5
2.2 Küreselleştirme Tavlaması .....	5
2.3 Yüzey İşlem .....	7
2.4 Haddeleme .....	8
2.5 Makas Makas Karşılığı.....	10
2.6 Soğuk Dövme Presleri.....	11
2.7 Diş çekme işlemi .....	13
2.8 Isıl işlem .....	14
<b>3. SOĞUK DÖVME İŞLEMİNDE SONLU ELEMAN UYGULAMALARI ...</b>	<b>17</b>
3.1 Simülasyon Uygulamalarında Teori ve Formülasyon .....	17
3.1.1 Gerilme.....	17
3.1.2 Genleme (Strain).....	17
3.1.3 Elastik Limit.....	20
3.1.4 Gerilme-Genleme Eğrisi (True Stress-True Strain Curve).....	20
3.1.5 Sürtünme.....	22
3.2 Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi .....	24
3.2.1 Ring basma testi.....	24
3.2.2 Çift geriye bardak akıtma testi.....	26
3.3 Sonlu Eleman Yönteminin Adımları.....	26
3.4 Sonlu Elemanlar Yönteminde Lineerlik Ve Nonlineerlik.....	27
3.5 Metal Şekillendirmede Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Akış Formülasyonu....	28
3.6 Simufact Forming Programı.....	29
3.7 Soğuk Dövme İşlemi ve Uygulamaları.....	29
3.7.1 Ekstrüzyon.....	30
3.7.2 Redüksiyon.....	32

3.7.3 Armudi.....	33
3.7.4 Soğuk şekillendirmede akma gerilmesi ile vickers sertlik arasındaki ilişki...	33
<b>4. TASARIM VE SİMÜLASYON .....</b>	<b>35</b>
4.1 Materyal.....	35
4.2 Tasarım ve Modelleme Çalışmaları.....	35
4.3 Simülasyon Çalışmaları.....	37
4.4 Simülasyon Sonuçları.....	43
4.4.1 M8x30 DIN933 Simülasyon sonuçları.....	43
4.4.2 M6x30 DIN933 Simülasyon sonuçları.....	43
4.4.3 Ø10.9x297 mm uzunluğundaki rotmili simülasyon sonuçları.....	48
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>53</b>
5.1 Basma Testleri.....	53
5.2 Mikroyapı Görüntüleme.....	56
5.3 Sertlik Deneyi.....	58
5.3.1 Vickers sertlik deneyi.....	59
5.3.2 M8x30 DIN933 vickers sertlik sonuçları.....	60
5.3.3 M6x30 DIN933 vickers sertlik sonuç.....	61
5.3.4 Ø10.9x297 rotmili vickers sertlik sonuçları.....	62
5.4 Çekme Deneyi.....	64
5.4.1 M8 DIN933 çekme test sonuçları.....	66
5.4.2 M6 DIN933 çekme test sonuçları.....	66
5.4.3 Ø10.9x297 rotmili çekme test sonuçları.....	67
5.5 Yorulma Deneyi.....	68
5.5.1 M8 DIN933 yorulma test sonuçları.....	70
<b>6. SONUÇ VE TARTIŞMA .....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>79</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>82</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>83</b>

## **KISALTMALAR**

<b>rpm</b>	: Return per minute
<b>SEM</b>	: Scanning electron microscope
<b>FEM</b>	: Finite element method
<b>WC</b>	: Tungsten carbide
<b>OEM</b>	: Original Equipment Manufacturer
<b>ISO</b>	: International Organization for Standardization
<b>CAD</b>	: Computer Aided Design
<b>CAE</b>	: Computer Aided Engineering









## SEMBOLLER

<b>HV</b>	: Vickers sertlik
<b>Y</b>	: Flow stress
<b>A<sub>0</sub></b>	: Tel ilk kesit alanı
<b>A<sub>1</sub></b>	: Tel son kesit alanı
<b><math>\phi</math></b>	: Genleme (strain)
<b>A<sub>s</sub></b>	: Gerilme kesit alanı
<b>F<sub>ön</sub></b>	: Ön yük





## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Bağlantı elemanlarının üretiminde kullanılan malzemeler .....	5
Çizelge 4.1 : 35V1 ve S550MC kompozisyon tablosu.....	39
Çizelge 5.1 : Karşılaştırmalı kompozisyon tablosu .....	77



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1	: Demir karbon faz diyagramı.....	6
Şekil 2.2	: Tavlama fırınından çıkan malzemelerin iç yapısı.....	7
Şekil 2.3	: İşlenmeye hazır malzemeler.....	8
Şekil 2.4	: Hadde kalıbı.....	9
Şekil 2.5	: Makas makas karşılığı.....	10
Şekil 2.6	: Makas makas karşılığında çıkan iş parçası.....	11
Şekil 2.7	: Bağlantı elemanları makinesi.....	12
Şekil 2.8	: Ayar civataları.....	12
Şekil 2.9	: Diş çekme işlemi.....	13
Şekil 2.10	: a) Düz tarak b) Top tarak c) Plenary tarak.....	13
Şekil 2.11	: Demir karbon faz diyagramı.....	14
Şekil 3.1	: a) Çekme gerilmesi, b) Basma gerilmesi, c) Kayma gerilmesi .....	18
Şekil 3.2	: Açılma distorsiyon .....	18
Şekil 3.3	: Mühendislik akma eğrisi.....	21
Şekil 3.4	: Gerçek akma eğrisi.....	22
Şekil 3.5	: Silindirik iş parçasına uygulanan yığıma işlemi. a) Sürtünmesiz. b) Sürtümlü.....	23
Şekil 3.6	: Ring basma testinde deformasyon modları a) düşük sürtünme b)yüksek sürtünme .....	25
Şekil 3.7	: Ring basma testinde deformasyon modları grafiği .....	25
Şekil 3.8	: Geriye bardak akıtma test düzeneği.....	26
Şekil 3.9	: Simufact.forming kullanıcı arayüzü.....	29
Şekil 3.10	: Ekstrüzyon kalıbı ve iş parçası pozisyonu.....	30
Şekil 3.11	: Ekstrüzyon işleminde eşdeğer plastik genlemeye bir örnek.....	31
Şekil 3.12	: Zımba kuvveti – yer değiştirme eğrisi.....	32
Şekil 3.13	: Redüksiyon işlemi.....	32
Şekil 3.14	: Armudi işlemi .....	33
Şekil 3.15	: Malzeme akış eğrisi .....	34
Şekil 4.1	: Ürünlerin CAD Modeli.....	35

Şekil 4.2	: Rotmili tasarım modellemesi.....	36
Şekil 4.3	: M8 DIN933 tasarım modellemesi.....	36
Şekil 4.4	: M6 DIN933 tasarım modellemesi.....	36
Şekil 4.5	: Ön kalıplar.....	37
Şekil 4.6	: Simülasyon giriş ekranı.....	38
Şekil 4.7	: CAD import.....	38
Şekil 4.8	: Malzeme atama ekranı.....	39
Şekil 4.9	: Pres atama ekranı.....	40
Şekil 4.10	: Sürtünme modeli atama ekranı.....	40
Şekil 4.11	: Symmetry plane .....	41
Şekil 4.12	: Constraint plane .....	42
Şekil 4.13	: Sonuç ekranı.....	42
Şekil 4.14	: Çekme test sonuçları.....	41
Şekil 4.15	: M8 DIN933 (35V1) istasyonlara göre eşdeğer plastik genleme dağılımı.....	43
Şekil 4.16	: Simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.17	: İkinci istasyon kalıplarının gerilme dağılımları.....	44
Şekil 4.18	: M6x30 DIN 933 montaj resmi.....	45
Şekil 4.19	: M6DIN933(22MnB5Ti) istasyonlara göre eşdeğer plastik genleme dağılımı.....	46
Şekil 4.20	: M6x30 DIN 933 22MnB5Ti malzemesi ürün sertlik tahmini.....	46
Şekil 4.21	: M6x30 DIN 933 2.istasyon kalıplarının gerilme dağılımı.....	47
Şekil 4.22	: İstasyon tasarımı.....	48
Şekil 4.23	: İstasyonlara göre eşdeğer plastik genleme dağılımı.....	48
Şekil 4.24	: Simülasyon sonucunda elde edilen sertlik tahminleri.....	49
Şekil 4.25	: İstasyonlara göre dövme yükleri .....	49
Şekil 4.26	: Birinci istasyon kalıpları.....	50
Şekil 4.27	: Birinci istasyon elmas ön kalıp gerilme dağılımı .....	50
Şekil 5.1	: Basma test numunesi.....	54
Şekil 5.2	: Basma test düzeneği.....	54
Şekil 5.3	: 35V1 akış eğrisi .....	55
Şekil 5.4	: S550MC akış eğrisi.....	55
Şekil 5.5	: 22MnB5Ti akış eğri tablosu.....	56
Şekil 5.6	: 27MnSiVS6 akış eğrisi.....	56
Şekil 5.7	: S550MC.....	57
Şekil 5.8	: 35V1.....	57
Şekil 5.9	: 22MnB5Ti.....	58
Şekil 5.10	: 27MnSiVS6 .....	58
Şekil 5.11	: Şematik vickers ölçme yöntemi.....	59
Şekil 5.12	: İstasyonlara ait sertlik değerleri.....	60
Şekil 5.13	: Simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	60
Şekil 5.14	: Test numunesi.....	61
Şekil 5.15	: M6x30 DIN 933 istasyonlardaki sertlik dağılımı.....	61
Şekil 5.16	: M6x30 DIN 933 22MnB5Ti malzemesi ürün sertlik tahmini.....	62
Şekil 5.17	: Rotmili sertlik numuneleri.....	63
Şekil 5.18	: Simülasyon ile üretim numunelerinin sertlik ve gerilme açısından sonuçlarının karşılaştırılması.....	63
Şekil 5.19	: Rotmili sertlik numuneleri.....	64
Şekil 5.20	: Çekme test numuneleri.....	65
Şekil 5.21	: Çekme test sonuçları.....	66

Şekil 5.22 : Çekme test sonucu.....	67
Şekil 5.23 : Rotmili çekme test numunesi.....	67
Şekil 5.24 : Rotmili şaft bölgesi çekme test numunesi.....	67
Şekil 5.25 : Değişken zorlam şekilleri.....	69
Şekil 5.26 : Wöhler eğrisi.....	70
Şekil 5.27 : Metrik dış profili.....	70
Şekil 5.28 : Metrik profiller.....	71
Şekil 5.29 : 35V1 wöhler eğrisi.....	72
Şekil 5.30 : S550MC wöhler eğrisi.....	72
Şekil 5.31 : 35V1 wöhler eğrisi.....	73
Şekil 5.32 : Yorulma test sonuçları.....	73
Şekil 5.33 : Üretim aşamaları.....	74



## 8.8 KALİTE SINIFINDAKİ BAĞLANTI ELEMANLARININ MİKRO-ALAŞIMLI ÇELİKLER KULLANILARAK ISIL İŞLEMSİZ ÜRETİLMESİ

### ÖZET

Soğuk şekillendirme, endüstride yaygın olarak kullanılan bir üretim şeklidir. Bu üretim şekli, iş parçasının yatay halde bulunan hareketli ve sabit kalıplar arasında dövülerek şekillendirilmesini sağlamaktadır.

Otomotiv sektöründe kullanılan bağlantı elemanlarının kullanıldıkları kritik yerler itibariyle yüksek dayanıma sahip olmaları istenmektedir. Bu nedenle bağlantı elemanlarının tasarımında kritik öneme sahip faktörlerden en önemlisi, bağlantı elemanının yüksek mukavemet değerlerine sahip kalite standartıdır.

Günümüz teknolojisiyle yapılan bağlantı elemanları üretiminde klasik olarak kullanılan hammaddeler soğuk dövme işleminden sonra, içyapılarında değişiklik yapmak ve istenen mekanik özellikleri elde edebilmek için ısıl işleme tabi tutulması gerekmektedir. Ancak ısıl işlem oldukça maliyetli, ürünlerin yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyen, üretim basamaklarını ve zamanını uzatan bir işlemdir.

Hızla gelişen malzeme teknolojisinde, yeni nesil malzemeler üretilmektedir. Mikroalaşımli çelik malzemeler bu kapsamda yüksek mukavemet özelliklerine sahip, soğuk deformasyonla çeşitli dayanım özellikleri elde edilebilen malzemelerdir.

Bu çalışmada, malzeme yapıları geliştirilmiş 27MnSiVS6, S550MC, 35V1 ve 22MnB5Ti mikro-alaşımli çeliklerin kullanımı ile ISO 898-1“Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel —Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread” standartında belirtilen 8.8 kalite sınıfına uygun bağlantı elemanları herhangi bir ısıl işlem uygulanmaksızın özel istasyon tasarımları geliştirilerek soğuk dövme yöntemi ile üretimi incelenmiştir. Bu çalışmada kalıplarda oluşabilecek kusurların yakalanması, dövme yüklerinin ve kalıpta oluşan gerilmelerin tespit edilmesinin yanı sıra kalıp ömür tahminlerinin yapılması, kalıntı gerilmelerin ve malzeme akışının tespit edilmesi ve soğuk dövme sonucunda elde edilecek mekanik özelliklerin proje başlangıcında tahmin edilmesi için sayısal simülasyon kullanımı ile üretim benzetimleri yapılmıştır.

297 mm uzunluğa sahip rot mili parçası, M6 DIN 933 ve M8 DIN 933 bağlantı elemanlarının soğuk şekillendirme ile üretilebilirliği için yenilikçi istasyon tasarımları ve dövme kalıpları tasarlanmıştır. Üretilen bağlantı elemanları üzerinde yapılan testler, ISO 898-1’’de yer alan ve her biri gereklilik kabul edilen çekme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerin karşılandığını göstermiştir.

Sayısal simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçlarının büyük ölçüde benzeştiği görülmüştür.

Sonuç olarak, mikro-alaşımli çeliklerin soğuk dövme prosesinde kullanımı, ısıl işlem sürecini ortadan kaldırarak ekonomik ve ekolojik önemli avantajlar sağladığı gösterilmiştir.





## **COLD FORGING OF NON-HEAT TREATED FASTENERS PARTS WITH GRADE 8.8 USING MICRO-ALLOYED STEEL**

### **SUMMARY**

Cold forming process is a type of production that commonly used in industry. This type of production provides forming material by pressing between moving and stationary dies at ambient temperature. Before cold forging operation, conventional materials for wire rod (raw material) is applied spheroid annealing for becoming a homogeneous and softer microstructure. Annealing process consist of heating and holding temperature and the cooling sections. Annealing temperatures from 700 to 750 ° C is in the range of temperature. The total duration of this operation 26 hours.

The raw materials, which are obtained from supplier companies, are annealed and applied surface treatment. The purpose of surface treatment is to decrease friction coefficient between the workpiece and the toolings by covering with fosfat layer to wire rod.

The dies are used in the production of fasteners are composed of carbide insert materials being pressed-fitted into air steel (H13). There are many factors that affect tool life. Die geometry, the surface quality of billet, forging forces, tools production, design and human effects are direct effects of die life.

The fasteners used in the automotive industry are required to have high stability due to their critical locations they use. Therefore, one of the most important factors in the part design is having the high strength feature.

Conventional raw materials used in the production of fasteners have to be applied heat treatment for changing microstructure and improving their mechanical features that is required by OEM after cold forging process.

However, heat treatment is a process that is huge costly, extending process steps and has adversely affects on the surface of workpiece.

Hence, rapidly improving material technologies, new generation materials are produced.

It is available to obtain different strength values with microalloyed steel materials with high strength properties by forging.

By the use of mechanically improved micro-alloy steel 27MnSiVS6, 35V1, S550MC and 22MnB5Ti the ball stud, M6 DIN933 and M8 DIN933 with grade 8.8 which is in accordance with the properties mentioned in ISO 898-1“Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel —Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread” is manufactured by cold forging with no subsequent heat treatment procedure and by developing unique station designs. In this study, manufacturing simulations are carried out by using numerical simulation techniques in order for capturing the probable die defects, deterimining the process parameters such as press forces, die stresses as well as

predicting the tool life, residual stresses, material flow and forecasting the mechanical properties occurred after forging previous to project initiation.

Furthermore, newly station designs and forging dies are implemented for a ball stud with 297 mm in length due to its further manufacturability by cold forging and the tests that are performed on the final products show that the absolute necessities in ISO 898-1 such as tensile strength and hardness (mechanical properties) are met.

In conclusion, it is seen that the results exported from the numerical analysis and the experimental results are vastly consistent with each other. Hence, the use of micro-alloyed steels on cold forging process has ability to eliminate the subsequent heat treatment process that results to significant advantages both economically and ecologically.







## 1. GİRİŞ

Günümüzde birçok ülkenin ekonomik kalkınmasında ve istihdam sağlamasında otomotiv, inşaat ve havacılık sektörleri başı çekmektedir. Bu sektörlerde metal şekillendirme yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Soğuk şekillendirme ise barındırdığı bir çok avantaj ile gün geçtikçe bu sektörlerde önemini arttırmaktadır. Her sektör kendi yan sanayisini oluşturmakta ve geliştirmektedir. Sektör geliştikçe bu alanda üretim yapan kuruluş sayısı artmaktadır. Bu da beraberinde rekabeti getirmektedir. Bu firmalar pazarda yer alabilmek ve diğer kuruluşların önüne geçebilmek için katma değerli işler üretmesi ve bunu düşük maliyetlerde yapabilmesi gerekmektedir. Bununla beraber ana sanayinin yan sanayi kuruluşları üzerinde ciddi derecede maliyetlerin düşürülmesi konusunda baskıları olmaktadır. Bu durumlar şirketleri Ar-Ge çalışmalarını yapmaya itmektedir.

Düşük maliyetli yüksek kalitede ürün üretebilmek için kullanılacak en önemli enstrümanlar Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarıdır. Üretim maliyetlerini düşürmenin en önemli yollarından biride mümkün olduğunca hatasız üretim yapabilmektir. Çünkü üretimde yaşanabilecek bir hata uzun duruş süreleri, kalıp sarfiyatı, ayıklama işçiliği, tashih ve tamir işlemleri gibi oldukça maliyetli sonuçlar doğurmaktadır.

Günümüzde bilgisayar yazılımları sanayide özellikle soğuk şekillendirme sektöründe oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Yeni ürün devreye alma sürecinde parça tasarımları yapılırken CAD-CAE yazılımları kullanılarak bilgisayar ortamında birebir modellemeler yapılabilmekte ve sanal ortamda üretim gerçekleştirilebilmektedir. Böylece malzeme akışı, kalıplarda oluşan gerilmeler, üretim sonrası malzeme sertlikleri ve oluşabilecek kusurlar simülasyon programları ile üretim öncesinde görülebilmektedir. Gerekli revizyonlar bu aşamada yapılarak zamandan ve beklenmedik masraflardan önemli kazançlar sağlanmış olur. Bu sebeplerle, simülasyon programlarının kullanımı rekabet etmek ve öne çıkmak için çok önemlidir.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada yoğun bir şekilde sonlu elemanlar yöntemi olarak simufact simülasyon programı kullanılmış ve gerçek sonuçlar ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir. Literatürde birçok simülasyon çalışması vardır ancak birçoğunda gerçek sonuçlar ile doğrulama yapılmadan çıkan sonuçlar üzerinden bulgular yazılmaktadır. Doğrulaması yapılmayan simülasyon sonuçlarına göre makale yazmak o çalışmanın teorik kalmasına neden olmaktadır.

Bu tezin amaçlarından biride simülasyon çıktılarının gerçek sonuçlar ile karşılaştırmasını yaparak doğruluğunu göstermektir. Ayrıca sanayi üretiminde simülasyon programlarının kullanımının ne denli önemli olduğunu gösteren iyi bir örnek olması amaçlanmıştır.

Otomotiv sektöründe kullanılan bağlantı elemanlarının kullanıldıkları kritik yerler itibariyle yüksek dayanıma sahip olmaları istenmektedir. Bu nedenle bağlantı elemanlarının tasarımında kritik öneme sahip faktörlerden en önemlisi, bağlantı elemanının yüksek mukavemet değerlerine sahip kalite sınıfıdır. Günümüz teknolojisiyle yapılan bağlantı elemanları üretiminde klasik olarak kullanılan hammaddeler soğuk dövme işleminden sonra, içyapılarında değişiklik yapmak ve istenen mekanik özellikleri elde edebilmek için ısı işleme tabi tutulması gerekmektedir. Ancak ısı işlem oldukça maliyetli, ürünlerin yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyen, üretim basamaklarını ve zamanını uzatan bir işlemdir.

Hızla gelişen malzeme teknolojisinde, yeni nesil malzemeler üretilmektedir. Mikroalaşımli çelik malzemeler bu kapsamda yüksek mukavemet özelliklerine sahip, soğuk deformasyonla çeşitli dayanım özellikleri elde edilebilen malzemelerdir. Bu projede, mikro alaşımli çelik malzemeleri, bağlantı elemanlarında hammadde olarak kullanılarak, 8.8 kalite sınıfındaki ürünlerin ısı işlemsiz olarak üretilmesi amaçlanmıştır.

## **1.2 Genel Bilgiler**

Metal şekillendirme çelik tel durumundaki iş parçasının hacmini ve kütlesini koruyarak basma kuvvetlerinin etkisi altında plastik deformasyon ile form verme işlemidir. Metal şekillendirme işlemi dövme mekanizmasına (çekme, basma, burulma etkisi ve kesme), dövme parçasına (tel, sac), kullanılan makinaya (hidrolik, mekanik), dövme doğrultusuna(yatay, dikey pres) ve dövme sıcaklığına (soğuk, ılık, sıcak) göre kategorize edilebilir.

Bu çalışmada işparçası olarak çelik tel, makine olarak mekanik presler kullanılarak soğuk dövme işlemi uygulanmıştır.

### **1.2.1 Soğuk Şekillendirme**

Metal şekillendirme çelik tel durumundaki iş parçasının hacmini ve kütlesini koruyarak basma kuvvetlerinin etkisi altında plastik deformasyon ile form verme işlemidir [1]. Metal şekillendirme işlemi dövme mekanizmasına (çekme, basma, burulma etkisi ve kesme), dövme parçasına (tel, sac), kullanılan makinaya (hidrolik, mekanik), dövme doğrultusuna(yatay, dikey pres) ve dövme sıcaklığına (soğuk, ılık, sıcak) göre kategorize edilebilir.

### **1.2.2 Soğuk şekillendirmenin avantaj ve dezavantajları**

Avantajlar [2]:

- Bazı talaşlı imalat gerektiren parçalarıda soğuk şekillendirme ile üretilebilmekte veya final parçaya yakın taslak parçalar üretilebilmektedir.
- Yüksek derecede boyutsal kararlılık elde edilir.
- Hammadde kullanımı çok verimlidir.
- İleri düzey yüzey kalitesi sağlanabilmektedir.
- Akış çizgilerinde kopmalar olmadığı için ve pekleşme sebebiyle parçada yüksek mukavemet değerleri sağlanabilmektedir.
- Seri üretime elverişlidir.

- Ortaya çıkan talaş miktarı diğer üretim yöntemlerine göre çok azdır.

Dezavantajlar:

- Ilık ve sıcak dövme işlemlerine nazaran daha basit parçalar üretilebilmektedir.
- Kompleks parça üretimi diğer yöntemlere göre daha zordur.
- Ilık ve sıcak dövme işlemlerine göre kalıp sarfiyatları daha fazladır.

Bütün bu avantaj ve dezavantajlar göz önüne alındığında soğuk şekillendirme üretim yöntemi tarih boyunca en yaygın şekilde kullanılmakta olan imalat yöntemidir. Günümüzde ise artan enerji, işçilik ve hammadde fiyatları bu verimli üretim yönteminin daha da yaygın şekilde kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Endüstriyel olarak inşaat sektörü, havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan ürünlerin veya bu sektörlerde kullanılan araçların komponentlerinin üretiminde soğuk şekillendirme kullanılmaktadır [3].

### **1.3 Literatür Taraması**

Bu bölümde, tezin alt başlıklarıyla ilişkili olarak soğuk şekillendirme işlemi, mikro alaşımlı çeliklerin soğuk şekillendirmede kullanımı, sonlu elemanlar yönteminin bağlantı elemanları üretiminde kullanımı ve ısılsız üretim konuları ele alınmıştır. Ayrıca malzeme karakterizasyonu ve Vickers sertlik ile genleme arasındaki ilişki konularında birçok kaynağa atıf yapılmıştır.

Bazı çalışmalar, soğuk dövme yöntemi ile malzemenin mukavemet özelliklerinde ki değişimleri konu almıştır ve tez kapsamında bu kaynaklardan yararlanılmıştır [4].

En çok mikro-alaşımlı çeliklerin özelliklerinden bahseden ve soğuk şekillendirme yöntemindeki davranışlarını konu alan çalışmalardan yararlanılmıştır [5]. Bu çalışmalar aynı zamanda ısılsız üretim yöntemleri üzerinede ışık tutmuştur [6].

Ve sonlu elemanlar yöntemlerinin soğuk şekillendirme ve bağlantı elemanlarının üretiminde kullanılması ile ilgili makaleler taranmıştır [7,8].





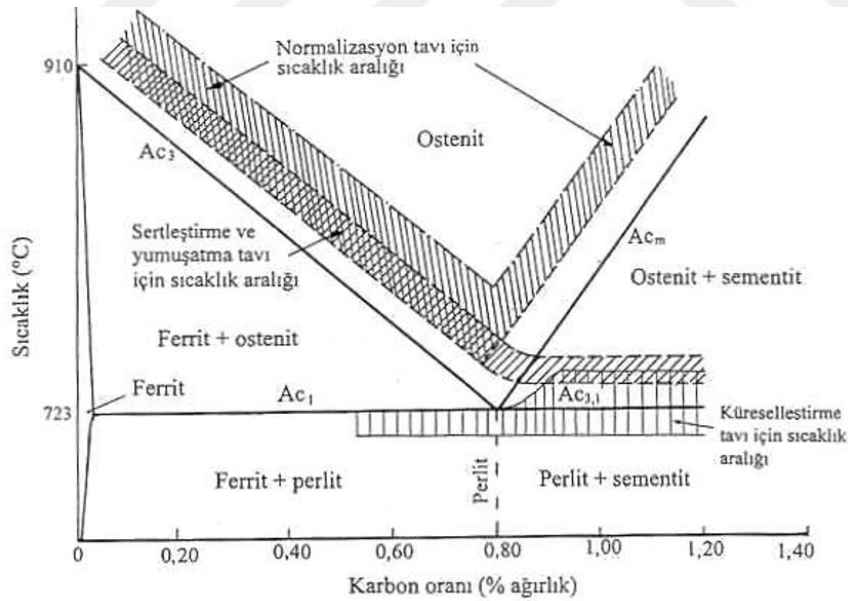
ötektoid üstü çelikler iç yapılarında sert ve gevrek sementit tanelerinin bulunması nedeniyle işlenmeye elverişli değildir. Bu tür çeliklerin işlenmesini kolaylaştırmak ve sünekliğini artırmak amacıyla da küreselleştirme tavı yapılır. Küreselleştirme tavı aşağıdaki yöntemlerden biri ile gerçekleştirilir.

a) Çelik malzeme  $Ac_1$  çizgisinin hemen altındaki bir sıcaklığa (örneğin  $700^{\circ}C$ ) uzun süre (15-25 saat) tavlınır.

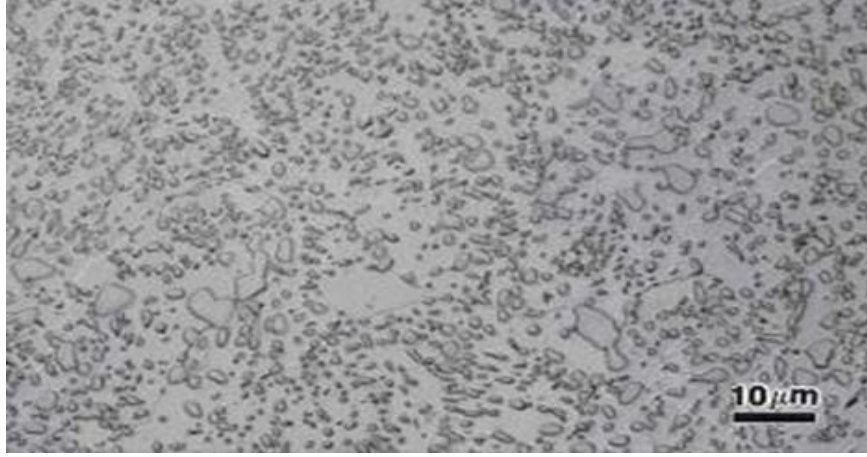
b) Çelik malzeme, düşük kritik sıcaklık çizgisinin ( $Ac_1$ ) hemen altında ve üstündeki sıcaklıklar arasında ısıtılıp soğutulur, yani salınımlı olarak tavlınır.

c) Malzeme  $Ac_1$  kritik sıcaklık çizgisinin üzerindeki bir sıcaklıkta tavlandıktan sonra ya fırında çok yavaş soğutulur, ya da  $Ac_1$  çizgisinin hemen altındaki bir sıcaklıkta uzunca bir süre tutulur.

Küreselleştirme tavı sonunda çeliğin sertliği azalır, buna karşılık sünekliği artar. Bu işlem sonucunda, ötektoid üstü çelikler işlenmeye elverişli hale gelir [9]. Demir karbon faz diyagramı şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Demir karbon faz diyagramı.



**Şekil 2.2 :** Tavlama fırınından çıkan malzemelerin iç yapısı

Yüksek sıcaklıktaki tavlama işlemi, çeliğin içerisindeki perlitik yapı ile sementit ağının parçalanarak dağılmasına neden olur. Küreselleştirme tavlama sonucunda, ferritik bir matris ile bunun içerisinde dağılmış durumda bulunan küre biçimindeki karbürlerden oluşan bir iç yapı elde edilir. İyileşim yapı ve daha fazla yumuşama sayesinde, soğuk şekillendirme makinelerinde sarf malzeme kullanımını ciddi anlamda azaltmakta ve basılması zor kompleks ürünlerde soğuk şekillendirme işlemine büyük kolaylık sağlamaktadır.

### 2.3 Yüzey İşlem

En çok kullanılan yüzey işlem “fosfatlama” olarak bilinir. Fosfat kaplama, bir metal ile bir kimyasal çözeltinin reaksiyonu sonucunda oluşur. Fosfat, kaplanacak yüzeydeki demir, çinko ve mangan kristallerinin oluşturduğu tabaka şeklindeki formdur [10].

Yüzey işlemin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Yüzey her türlü yağ, pas ve kirden temizlenir.
- Yapılan kaplama sayesinde yüzeyde pürüzlülük oluşmuş, yüzey alanı arttırılmış ve kaplamanın iyi bir şekilde yapışması için gereken şartlar sağlanır.
- Kaplama filminde çeşitli nedenlerle oluşabilecek küçük çizilme ve bozulmalar sonucu bu zayıf noktadan başlayan, kaplama altında devam edebilecek paslanma büyük ölçüde yavaşlayacaktır.
- Metal daha rahat şekillenmeye uygun hale gelir.

- Vaks ve pas önleyici yağlarla korozyon direnci artar.
- Hareketli parçalar için koruma direnci ve kaydırıcılık artar.
- Metal ile kaplama arasında ısıl genişmeden dolayı oluşan ani değişiklikler minimuma indirilmiş olur.

Yüzey işlem aşamalarının görseli Şekil 2.3'te verilmiştir.



**Şekil 2.3 : İşlenmeye hazır malzemeler**

Kimyasal içeren 14 adet havuzdan oluşan işlem sırasıyla soğuk su banyosu, sıcak su banyosu, asit banyosu, aktivasyon banyosu, çinko fosfat banyosu, nötralizasyon banyosu ve sabun banyosundan oluşmaktadır.

Bu işlemlerin amacı, iş parçası yüzeyinde çinko-fosfat tabakası oluşturarak üretim esnasında kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını düşürmektir [11].

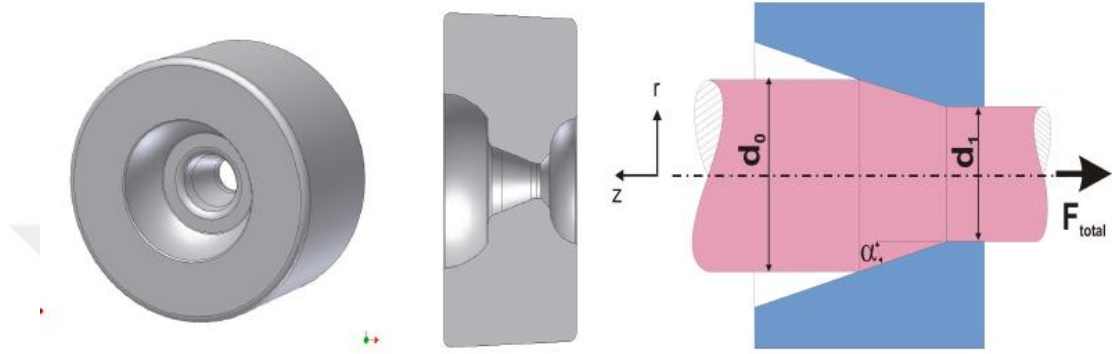
## **2.4 Haddeleme**

Uluslararası çelik üreticileri genel olarak belirli çaplarda filmaşın üretimi yapmaktadırlar (Ø8 mm, Ø10 mm, Ø12 mm vb.).

Ürün tasarımlarında makine girişlerinde kullanılmak istenen malzeme çapları çoğu kez ara çaplardan oluşmaktadır. Ayrıca malzeme üreticilerinden gelen tel çapları geniş bir tolerans aralığına sahip ve tel çapında yer yer ovallikler olabilmektedir. Bunların önüne geçebilmek ve çapları kontrol edilebilir dar toleranslara çekebilmek için malzemeler haddelenmektedir. Tel çapını ürün istasyon tasarımlarına uygun

olacak şekilde çapta yaklaşık 0.3 mm ile 0.5 mm arasında küçültme sağlanır. Böylece ilk istasyona girecek olan iş parçasında ovallık sorunu giderilmiş olmaktadır.

Hadde kalıpları göbek ve zarf olmak üzere 2 parçadan oluşmaktadır. Göbek malzemesi olarak elmas denen tungsten carbide (WC) malzemesi ve zarf malzemesi olarakta 1.2344 takım çeliği kullanılmaktadır. Hadde kalıbının yapısı şekil 2.4'te gösterilmektedir.



**Şekil 2.4 : Hadde kalıbı**

Haddeleme işleminde kesit alanındaki azalma ve eşdeğer plastik genleme denklem (2.1) ve (2.2)'deki gibi hesaplanmaktadır [12]:

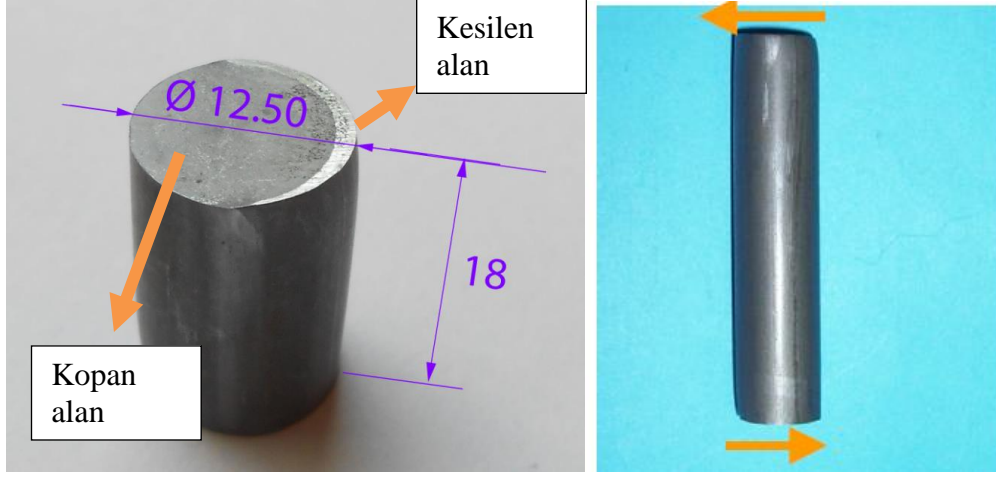
$$e = d_0^2 - d_1^2 \quad (2.1)$$

$$\theta = \ln \left( \frac{A_0}{A_1} \right) = \ln \left( \frac{d_0^2}{d_1^2} \right) \quad (2.2)$$

Haddeleme işleminde tavsiye edilen maksimum bağıl kesit alan değişimi 0.30 ve 0.35 değerlerindedir [13]. Eğer sürtünme katsayısı biliniyorsa hadde çekme işleminde ortaya çıkan kuvvet denklem (2.3) kullanılarak hesaplanabilir [14].

$$F_{hadde} = A_0 \cdot \delta_{fm} \left[ \frac{2}{3} \alpha + \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin \alpha} \right) \varphi \right] + \pi \cdot d_0 \cdot \mu \cdot \delta_{f0} \quad (2.3)$$





**Şekil 2.6 :** Makas makas karşılığında çıkan iş parçası

Kesilen yüzeyde oluşan hilal şeklindeki kesme alanı ne kadar küçük olursa kesme yüzeyi o kadar temiz olmaktadır.

Makas makas karşılığı arasındaki ideal açıklığın hesaplaması kesilecek olan tel çapının %2'si kadardır [13].

İdeal makas karşılığı çapı, tel çapı x 1.01 olarak hesaplanmakta ve makas çapı ise makas karşılığı çapının 0.1 mm fazlasıdır [13].

## **2.6 Soğuk Dövme Presleri**

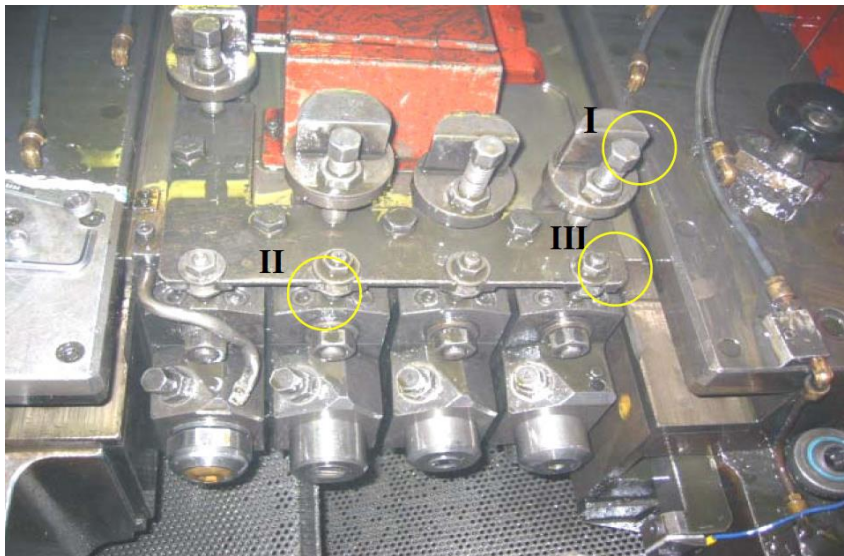
Tüm makineler sabit ve hareketli bloktan oluşmakta ve yatay hareket vasıtasıyla kalıplar arasında iş parçası dövme prensibine dayanmaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılan soğuk şekillendirme presleri HBPF-660S şekil 2.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7 : Bağlantı elemanları makinesi**

Hareket motordan V kayış ve kasnak yardımı ile tüm noktalara iletilmektedir. Kuşkusuz enerjinin büyük bir kısmı bu aşamada harcanmaktadır. Ayrıca makinelerde pömatik mekanizmalar ve yağ pompalarının çalışabilmesi için gerekli olan hava kompresörleri bulunmaktadır.

Operatör hareketli blokta yer alan kalıpların sabit bloktaki kalıplarla birbirlerine göre merkezleme ayarlarını Şekil 2.8’da gösterilen ayar civatalarını (I, II ve III) sıkıp gevşeterek ayarlamaktadır.



**Şekil 2.8 : Ayar civataları**



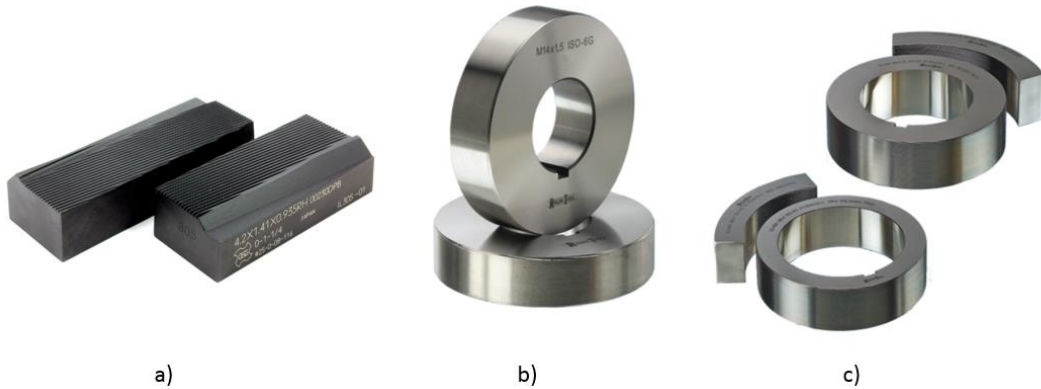
## 2.7 Diş çekme işlemi

Diş çekme mekanizmaları bazı makinelerde akuple bazı makinelerde ise ayrı olarak bulunmaktadır. Bu işlem genel olarak bölüm daire çapı uygun bir biçimde üretilmiş cıvata veya parçanın iki diş tarağı arasında döndürülerek ezilmesiyle olmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Diş çekme işlemi

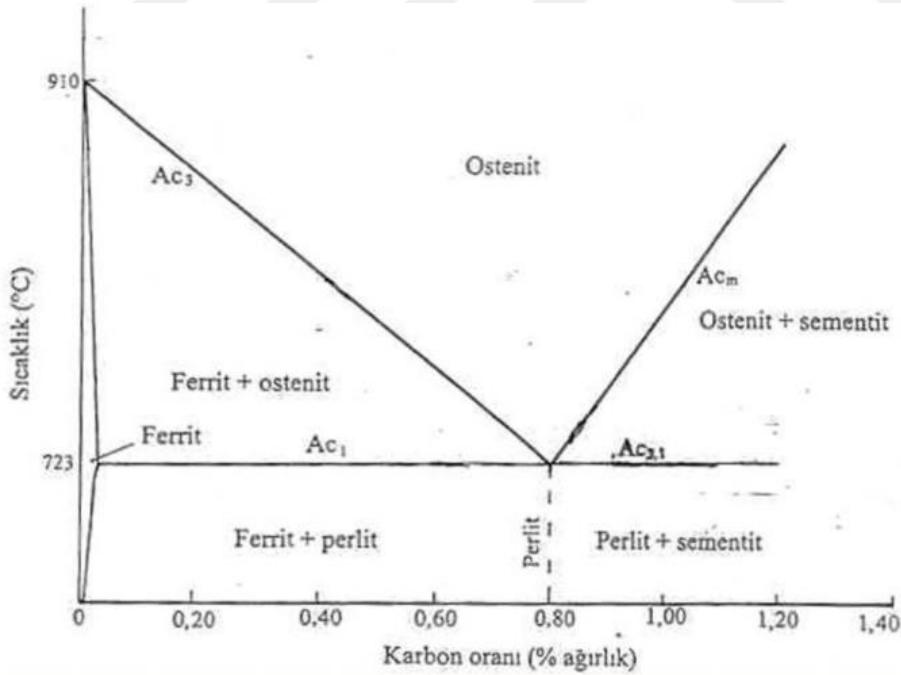
Diş çekme taraqları kütük haldeki M42 veya M2 malzemelerin özel makinelerde taşlanmasıyla üretilmektedir. Üç çeşit tarak vardır. Bunlar düz (flat dies) tarak, top (roller) tarak ve plenary taraqlardır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : a) Düz tarak b) Top tarak c) Plenary tarak

## 2.8 Isıl işlem

Tavlama işleminden sonra çelikler yavaş ya da orta seviyedeki bir hızla soğutulduklarında, ostenit içerisinde çözülmüş durumda bulunan karbon atomları difüzyon ile ostenit yapıdan ayrılırlar. Bundan hemen sonra, demir atomları konumlarını biraz değiştirerek yeni bir hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısı oluştururlar [14]. Söz konusu ostenit dönüşümü, zamana bağlı bir çekirdeklenme ve büyüme olayı şeklinde meydana gelir. Soğuma hızı artırılıp belirli bir değerin üzerine çıkarıldığında, karbon atomları difüzyon ile katı çözültiden ayrılmak için yeterli zaman bulamazlar. Demir atomları bir miktar hareket etseler bile, karbon atomlarının çözülti içerisinde hapsedilmeleri nedeniyle kafes yapısı HMK yapıya dönüşemez ve farklı bir yapı oluşur. Hızlı soğuma sonucunda oluşan bu yapıya "martenzit" adı verilir. Martenzit, karbon ile aşırı doymuş hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya sahip bir katı çözültidir. Ötektoit altı çelikler A3, ötektoit üstü çelikler A1 sıcaklığının 30-50 °C üzerine ısıtıldıktan sonra hızla soğutularak, yapıda bulunan ostenitin, perlit yerine martenzite dönüştürülmesiyle su verme gerçekleştirilir. Pratik olarak % 0.2'den az C içeren çeliklere su verilemez.



Şekil 2.11 : Demir karbon faz diyagramı.

Su verme ostenitleme bölgesinde belirli bir süre bekletilerek yapısı tamamen ostenitleştirilmiş bir çeliğin soğutulması olayıdır. Su verme sözü her ne kadar çeliğin su içerisine daldırılarak soğutulması gibi bir anlam içeriyorsa da, çeliğin soğutulmasını ifade eden genel bir terimdir. Buna göre çelik ostenitleştirme sıcaklığında tutulduktan sonra, su içerisine daldırılarak, yağ banyosu içerisine daldırılarak, havada bırakılarak sertleştirilebilir.

Çeliklerde su verme sonrası oluşan martensit yapısı oldukça sert ve gevrektrir. Dolayısıyla çalışma koşullarında kolayca çatlayabilir ve hasara yol açar. Bu yüzden çeliklere su verme sonrası temperleme adı verilen bir ısıl işlemle çeliğin tokluğu ve sünekliği arttırılabilir. Bu sırada sertlikte de bir miktar düşme meydana gelir. Temperleme sıcaklığı çeliğin türü ve parçanın kullanılacağı yere bağlı olarak 150 - 600 °C arasında değişir. Tutma süresi parça kalınlığına bağlı olarak 1 – 2,5 saat arasında değişir [15].

Bu işlem oldukça maliyetli bir işlemdir. Isıl işlem maliyet hesabında işçi maliyeti, elektrik, su, doğalgaz, sulama yağı, havuz kimyasalları, diğer sarf malzemeleri, sulama bandı, fırın yedek parçaları ve bakım masrafları göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm bu giderlerin toplamı yıllık tonaja bölünmesiyle ısıl işlem ton maliyeti ortaya çıkmaktadır. Çalışmaların yapıldığı zamanda (2017) ısıl işlem maliyeti 110 €/ton olarak hesaplanmıştır.



### **3. SOĞUK ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE SONLU ELEMAN UYGULAMALARI**

#### **3.1 Simülasyon Uygulamalarında Teori Ve Formülasyon**

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile alakalı tanımlamalardan bahsedilecektir.

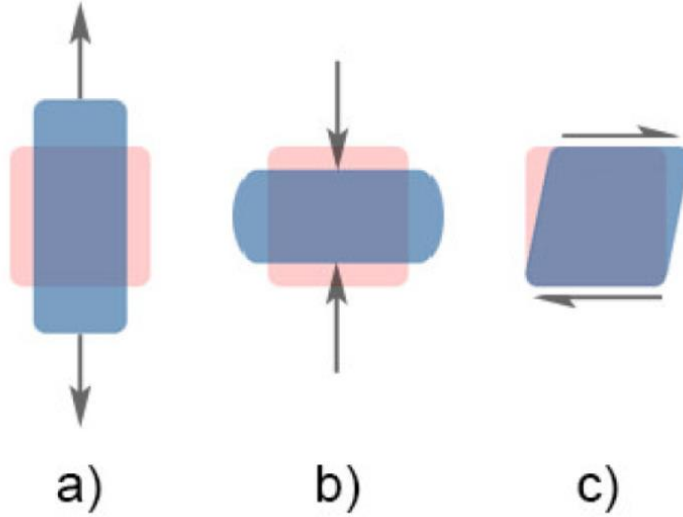
##### **3.1.1 Gerilme (Stress)**

Katı mekaniği kapsamında kullanılan anlamıyla gerilme (ya da gerilim) (stress), birim alana etki eden kuvvet miktarını temsil etmektedir. Bir cisim üzerine etki eden kuvvetler, üç farklı türde gerilme ortaya çıkartmaktadır: çekme gerilmesi, basma gerilmesi ve kayma gerilmesi.

Çekme gerilmesi (tensile stress), malzemeyi kuvvet yönünde uzatacak şekilde, yüzey alanına dik yönde kuvvet uygulanmasıyla ortaya çıkmaktadır (şekil 3.1(a)). Uygulanan kuvvet miktarı sabit kalsa da, kuvvetin uygulandığı alanın büyüklüğüne bağlı olarak gerilme değeri değişim gösterebilmektedir. Dolayısıyla, malzemenin kesit alanındaki çok ufak değişimler bile malzeme boyunca gerilmenin farklılık göstermesine yol açabilmektedir. Her ne kadar sünek malzemeler bu gerilme dalgalanmalarını bir dereceye kadar tolere edebilseler de, bu dalgalanmalar kırılma malzemelerin beklenenden daha erken kırılmasına yol açmaktadır.

Basma gerilmesi (compressive stress) yaratmak için yine yüzey alanına dik yönde, fakat malzemeyi sıkıştırarak şekilde kuvvet uygulanması gerekmektedir (şekil 3.1(b)). Çekme ve basma gerilmeleri uygulandıkları yüzeylere dik etki ettikleri için, bu iki gerilmenin türü normal gerilme olarak adlandırılmaktadır.

Kayma gerilmesi (shear stress) ise, malzemenin iki zıt yüzeyinin birbirine paralel ve ters yönde kaymalarını sağlayacak şekilde kuvvet uygulanmasıyla ortaya çıkmaktadır (şekil 3.1(c)) [16].

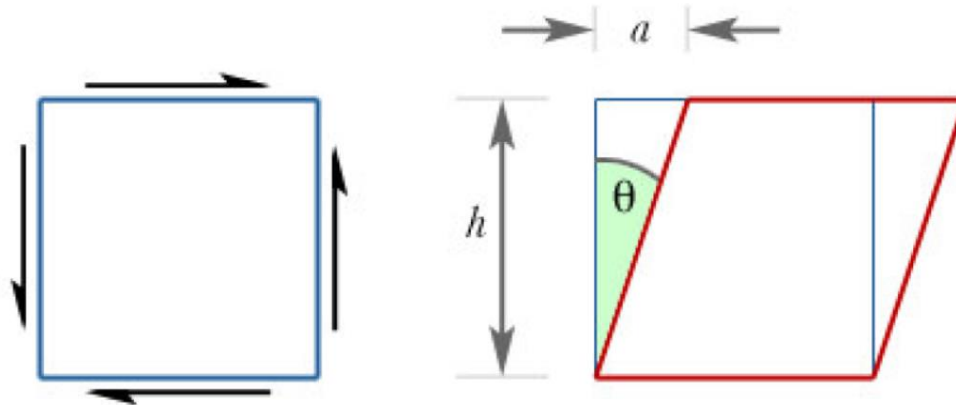


Şekil 3.1 : a) Çekme gerilmesi, b) Basma gerilmesi, c) Kayma gerilmesi [16]

### 3.1.2 Genleme (Strain)

Strain (genleme), yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki durumuna kıyasla şeklini ne oranda değiştirdiğini ifade etmektedir. Burada kullanılan anlamıyla şekil değişimi biçimsel bir değişimi değil, daha ziyade şekildeki niceliksel bir değişimi ifade etmektedir. Dolayısıyla strain, bir malzemedeki şekil değişiminin matematiksel olarak ifade edilebilmesini sağlamaktadır.

Strain, uygulanan kuvvet ile aynı yönde oluşuyorsa, bu durum da aynı gerilmedeki gibi, normal strain olarak adlandırılmaktadır. Normal strainden farklı olarak, eğer malzeme üzerine bir kayma kuvveti etki ediyorsa, şekil 3.2’de gösterildiği gibi malzemede bir açısız şekil değişimi, ya da bir açısız distorsiyon (angular distortion) oluştuğu gözlemlenebilir.



Şekil 3.2 : Açısız distorsiyon [16]

Bu durumda oluşan şekil değişimine shear strain (kayma gerinimi) adı verilir ve düzlemler arası yer değişimini (şekil 3.2’de a), düzlemler arası mesafeye (şekil 3.2’de h) bölerek ifade edilebilir.

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan\theta \quad (3.1)$$

Şekil 3.2’ye dikkat edildiğinde, a/h ile gösterilen strain, malzemede oluşan şekil değişim açısının tanjantı ile de hesaplanabilmektedir. Bu nedenle shear strain çoğu zaman, denklem 3.1’de olduğu gibi, malzemede oluşan distorsiyonun açısıyla ifade edilir [16].

Sünek bir çubuk iki ucundan tutulup çekildiğinde oluşan, çubuktaki toplam uzama miktarını çubuğun ilk uzunluğuna oranlanarak engineering strain (mühendislik gerinimi) hesaplanabilir. Çubuğun uzunluğundaki değişim  $\Delta l$  ile, ilk uzunluk da  $l_0$  ile gösterilirse, engineering strain denklem 3.2’deki gibi ifade edilebilir.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

Mühendislik değerinden farklı olarak, çubuğun uzunluğundaki anlık değişimler göz önüne alınarak da strain ifade edilebilir. Bu şekilde hesaplanan straine, malzemeye etki eden gerçek değerleri ifade etmesi nedeniyle true strain (gerçek gerinim) denir. Çubuğun ulaştığı son uzunluk  $l_f$  ile gösterilirse, true strain denklem 3.3’teki gibi ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \ln(l_f/l_0) \quad (3.3)$$

True strain değerlerini hesaplamak için ihtiyaç duyulan anlık değerlerin bir test sırasında takip edilmesi pek de kolay değildir. Fakat denklem 3.4 ile engineering strain, true straine çevrilebilmektedir [17].

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.4)$$

### 3.1.3 Elastik Limit

Yük altındaki bir cisim, yük kaldırıldıktan sonra, eğer yüklenmeden önceki şeklini tamamıyla geri kazanıyorsa, bu şekil değişimi elastik olarak tanımlanır. Yük kaldırıldıktan sonra cisim yüklenmeden önceki şekline geri dönemiyorsa, oluşan şekil değişimine kalıcı ya da plastik şekil değişimi adı verilir.

Elastik şekil değişiminde gerilme ve strain arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Örnek olarak, bir çubuk bir ucundan tavana sabitlenip diğer ucuna artan miktarlarda yük asıldığında, belli bir yüke kadar çubuğun yük miktarıyla doğru orantılı olarak esnediği görülür. Yük miktarı belli bir değerin üzerine çıktığında ise bu doğrusal ilişkinin geçerliliğini kaybettiği gözlemlenir. Doğrusallığın sona erdiği bu gerilme değerine elastik limit ya da akma mukavemeti (yield strength) denir.

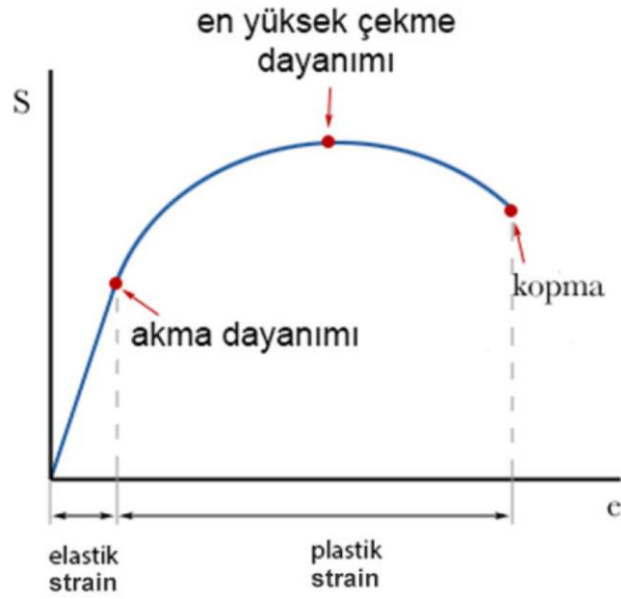
Elastik limit, doğrusallığın sona erdiği noktayı gösterdiği gibi, elastik ve plastik şekil değişimleri arasındaki geçişe de işaret etmektedir [18].

### 3.1.4 Gerilme-Genleme Eğrisi (True Stress-True Strain Curve)

Gerilme - strain eğrisi, ya da daha sık kullanılan tabiriyle akma eğrisi, tek yönlü çekme ya da basma testlerinde uygulanan gerilme miktarına bağlı olarak malzemede oluşan ortalama strainin nasıl değiştiğini göstermektedir. Bir malzemenin gerilme altındaki davranışı tek yönlü çekme testiyle (uniaxial tensile test) incelenebilmektedir. Tek yönlü çekme testinde, silindir ya da plaka geometrisinde sahip bir çekme numunesi bir ucundan sabitlenip, diğer ucundan, sadece uzunluğu doğrultusunda yük uygulanarak gerilir. Test sonrasında elde edilen verilerin sağlıklı olması için numuneye uygulanan kuvvetin tek eksen doğrultusunda etki etmesinin kesin bir şekilde sağlanması gerekmektedir.

Bu testte, yük miktarı kontrollü bir şekilde artırılarak numunede oluşan uzama miktarı ölçülür. Dolayısıyla, test sonunda elde edilen veri, kuvvet ve kuvvete bağlı olarak numunede oluşan uzama değerlerinden oluşmaktadır. Elde edilen değerler kullanılarak, mühendislik akma eğrisi çizilebilir. Şekil 3.3'te mühendislik akma eğrisinin genel yapısı gösterilmektedir.





**Şekil 3.3 :** Mühendislik akma eğrisi [19]

Akma dayanımına kadar gerilme ve strainin doğrusal bir ilişki içinde olduklarını görülebilir. Atomların konumlarında bir değişme olmadan, sadece atomlar arası bağların esnemesi ile ortaya çıkan bu straine elastik strain denir. Elastik strain bir numune üzerindeki yük kaldırıldığında, numune yük uygulanmadan önceki şekline geri dönmektedir.

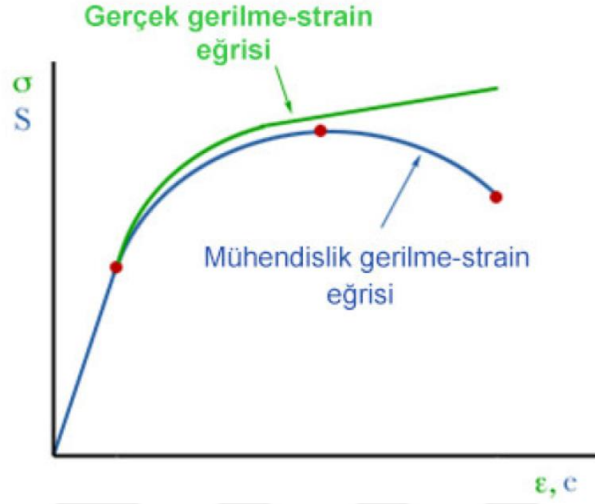
Gerilme, akma dayanımı üzerine çıktığında, gerilme ve strain arasındaki doğrusal ilişki ortadan kalkmaktadır. Bu noktadan sonra, malzeme içindeki kristal blokları birbirleri üzerinde kaymaya başlayarak kalıcı şekil değişimi oluşturmaktadırlar. Elastik şekil değişiminden farklı olarak, plastik olarak adlandırılan bu kalıcı şekil değişiminde atomların konumları kayma hareketi nedeniyle değişmeye başlamaktadır.

Kristal bloklarının kaymaya başlaması için akma dayanımı miktarında gerilme uygulanması yeterli olmaktadır. Fakat numunedeki straini daha da arttırabilmek için uygulanması gereken gerilme, akma dayanımı sonrasında da artış göstermektedir. Plastik şekil değişimi esnasında karşılaşılan bu “güçlenme” etkisine strain hardening (gerinim sertleşmesi) denir.

Numune üzerindeki yük arttırıldıkça bir noktadan sonra numuneyi daha da uzatabilmek için uygulanması gereken yükün düşmeye başladığı görülmektedir. Akma eğrisi üzerinde görülen bu tepe noktasına en yüksek çekme dayanımı (ultimate

tensile strength, UTS) denir. Bu yük düşüşünün ardından numunenin bir miktar daha uzadıktan sonra kopmasıyla testin sonuna gelinir.

Gerçek gerilmeyi hesaplarken numunenin test öncesindeki kesit alanı değil, anlık kesit alanı dikkate alınır. True stress ve true strain değerleri kullanılarak akma eğrisi çizildiğinde, eğrinin şeklinin değiştiği gözlemlenir (şekil 3.4).



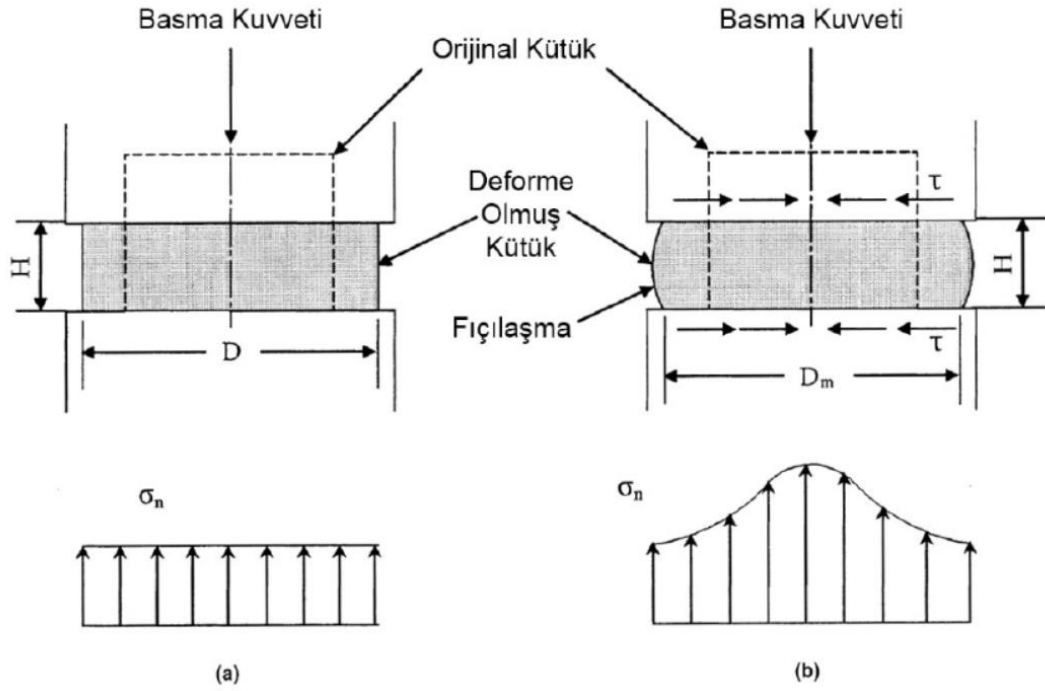
Şekil 3.4 : Gerçek akma eğrisi [19]

Şekil 3.4.'te yeşil renkle gösterilen gerçek akma eğrisinin verdiği gerilme değerlerinin, mühendislik akma eğrisine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. İki eğri arasındaki bu fark, gerçek akma eğrisi çizilirken kesit alanındaki anlık daralmaların dikkate alınmaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, hesaplanan gerçek gerilme değerlerinin, mühendislik değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır [19].

### 3.1.5 Sürtünme

Dövmede, metalin akışı kalıplardan deforme olan iş parçasına aktarılan basınçtan kaynaklanır. Bu nedenle, kalıp/iş parçası ara yüzündeki sürtünme koşulları, metal akışını, yüzey oluşumu ve iç kusurları, kalıplardaki gerilmelerin davranışını, yük ve enerji gerekliliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Şekil 3.5, bu önemli olayı, silindirik bir iş parçasının yığma işleminde uygulanırken göstermektedir. Şekil 3.5(a)'da, sürtünmesiz koşullar altında, iş parçası üniform biçimde deforme olmakta ve elde edilen normal gerilme,  $\sigma_n$ , çap boyunca sabit olmaktadır. Şekil 3.5(b)'de, belli bir düzeyde sürtünme gerilmesinin,  $\tau$ , olduğu gerçek koşullarda, iş parçasının deformasyonunun üniform olmadığı görülmektedir (yani fiçilaşma). Sonuç olarak,

normal gerilme,  $\sigma_n$ , dış çaptan iş parçasının merkezine doğru artmakta ve toplam basma kuvveti sürtünmesiz koşullardan daha çok olmaktadır.



**Şekil 3.5 :** Silindirik iş parçasına uygulanan yığıma işlemi. a) Sürtünmesiz. b) Sürtümlü. [20]

Dövme işleminde sürtünme olayını anlatmak için yaygın olarak iki yasa kullanılır. Bu yasaların her ikisi de ara yüz olaylarının tümünü boyutsuz bir katsayı veya çarpana toplayarak, ara yüz sürtünmesini ölçer. Coulomb sürtünme yasası, ara yüz sürtünmesini ölçmek için bir sürtünme katsayısı,  $\mu$ , kullanır. Denklem 3.5, basit bir şekilde  $\mu$ 'nun, sürtünme kayma gerilmesinin  $\tau$ , ve normal gerilmenin (basınç),  $\sigma_n$ , oranı olduğunu göstermektedir [20].

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (3.5)$$

Kullanılan diğer bir yaygın yasa olan ara yüz kayma sürtünme yasası da, ara yüz sürtünmesini ölçmek için bir sürtünme katsayısı, f, ya da bir kayma katsayısı, m, kullanır. Denklem 3.6, sürtünme kayma gerilmesinin,  $\tau$ , deforme olan malzemenin akış gerilmesine  $\bar{\sigma}$ , ve sürtünme katsayısı, f, ya da kayma katsayısına, m, bağlı olduğunu göstermektedir.

$$\tau = f\bar{\sigma} = \frac{m}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} = mk \quad (3.6)$$

Çeşitli şekillendirme durumları için, kayma katsayısı değerleri aşağıdaki gibidir:

- $m = 0,05 - 0,15$  arası: Çeliklerin, alüminyum alaşımlarının ve bakırların geleneksel fosfat-sabun yağlama veya yağ kullanılarak soğuk şekillendirilmesinde [20].

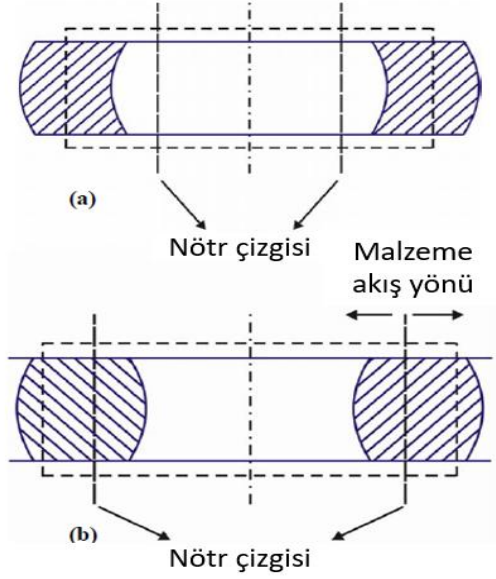
Sürtünme, diğer birçok parametre üzerinde direkt etkisi olduğu için kurulan simülasyon analizlerinde doğru bir sürtünme modeli kullanmak doğru sonuçlar elde edebilmek için elzemdir. Çünkü metal şekillendirmede sürtünme katsayısı beraberinde sıcaklığı, oluşan yükleri ve malzeme akışına etki etmektedir. Tüm proses boyunca sabit bir sürtünme katsayısı kullanmak doğru sonuca gitmek için yeterli olmamaktadır. Sıcaklığa bağlı değişkenlik gösteren bu katsayının gerçek koşullarda testler yapılarak elde edilmesi ve analizlerde bu elde edilen değer kullanılması önemlidir [21].

### 3.2 Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Analizlerde metal şekillendirme işleminin mekaniklerinde gerçek sürtünme koşulunun doğru sonuçlar için belirlenmesi gerekmektedir. Temas alanı üzerindeki tribolojik özellikleri hesaplamak için farklı ölçüm yöntemleri mevcuttur. İki farklı test yöntemi bu amaç için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan biri ring basma testi ve çift geriye bardak akıtma methodudur [22].

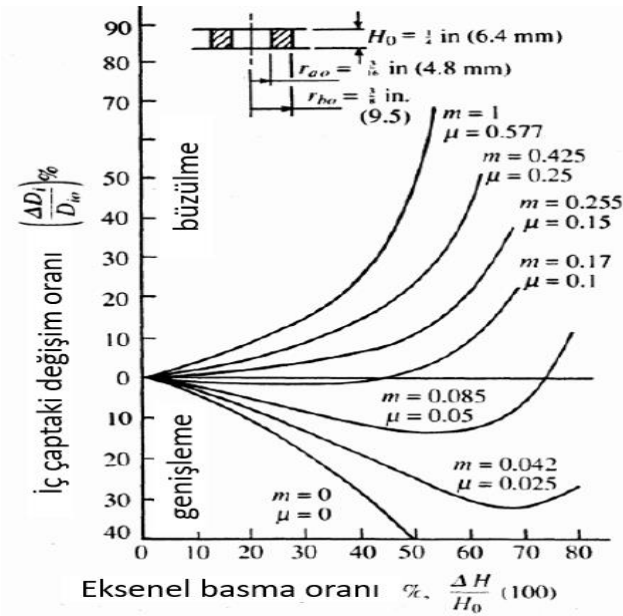
#### 3.2.1 Ring basma testi

Ring basma testi genellikle basit ve işlevsel olduğu için ve ayrıca basma yüklerini hesaplamaya gerek kalmadığı için tercih edilmektedir. Bu test ortası delinmiş silindirik halka şeklindeki numunenin iki düz zemin arasında basılmasıyla yapılmaktadır. Ring boyu kısaldıkça iç delik çapı ara yüzeylerdeki sürtünme koşullarına bağlı olarak artar veya azalır (şekil 3.6) [23].



Şekil 3.6 : Ring basma testinde deformasyon modları a) düşük sürtünme b)yüksek sürtünme [23]

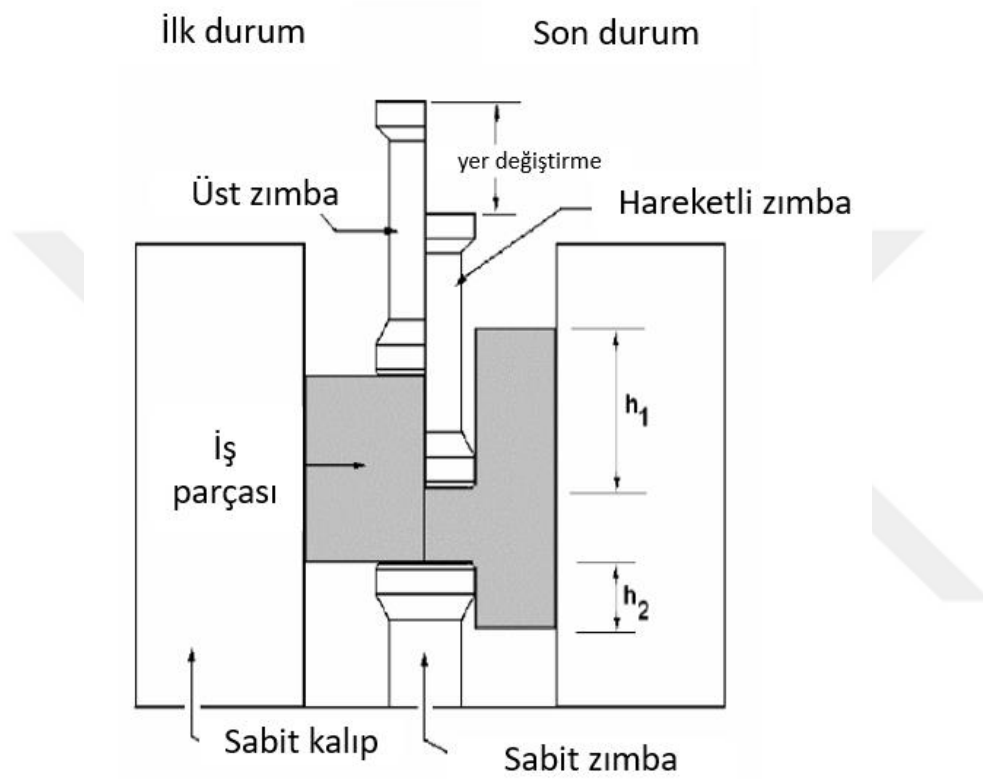
Test numunesinin yüksekliğindeki belli bir miktarda azalmaya karşılık gelen iç çaptaki değişim oranı bize sürtünme katsayısının büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. Genellikle teorik ve deneysel çalışmaların sonuçları ile elde edilen kalibrasyon eğrisinin formu, test numunesinin iç çapındaki azalmanın boydaki azalmaya oranı çeşitli büyüklüklerdeki sürtünme katsayılarına karşılık geldiğini göstermektedir (Şekil 3.7) [24].



Şekil 3.7 : Ring basma testinde deformasyon modları grafiği [25]

### 3.2.2 Çift geriye bardak akıtma testi

Çift geriye bardak akıtma test yönteminin ring basma testine göre bazı avantajları mevcuttur. Özellikle bu test yöntemi soğuk şekillendirme işlemine daha yakın bir deformasyon içermektedir. Test kolayca uygulanabilmekte ve sürtünme katsayısı hakkında, çıkan numune üzerinde iki taraftaki delik yükseklikleri arasındaki farklılıklar ile bir yargıya varmak mümkündür [26].



Şekil 3.8 : Geriye bardak akıtma test düzeneği

Deformasyondan sonra oluşan  $h_1$  ve  $h_2$  yüksekliklerinin birbirine oranı  $h_1/h_2$  iş parçası ile kalıp arasındaki sürtünme için bir göstergedir. Sürtünme unsuru bu oran arttıkça artar (Şekil 3.8).

### 3.3 Sonlu Eleman Yönteminin Adımları

Soğuk şekillendirmede işleminde başarılı sonuçların elde edilebilmesi için aşağıdaki gerekliliklerin yerine getirilmesi gerekmektedir [27]:

1. Simülasyon uygulaması için karşılaşılan fiziksel problem olabildiğince gerçeğe yakın olarak tanımlanmalıdır.

2. Problemi ideal hale getirmek için basitleştirmeler ve kabuller yapılmalıdır. Bu kabuller mantıklı olmalıdır ve gereksiz detaylar göz ardı edilmelidir.
3. İdeal hale getirilmiş problemde doğru boyutsal ayrıştırmalar olmalıdır: kullanılan eleman tipleri, eleman ağının topolojisi ve eleman ağ yoğunluğu gerçek koşulları yansıtmalıdır.
4. İş parçası – kalıp arasındaki sürtünme katsayısı, ısı transferi etkileri, makinaların özellikleri ve kalıplar gibi fiziksel modelin sınır koşulları araştırılmalı ve gerçek değerler yazılıma aktarılmalıdır.
5. Malzemelerin girdi olarak kullanılacak tüm özellikleri doğru olarak tespit edilmelidir.
6. Simülasyonda kullanılan sayısal parametreler hata faktörlerine, yakınsama limitlerine, stroke artış aralıklarına uyumlu olarak seçilmelidir.
7. Yapılacak simülasyonda hesaplama zamanı ve öncesinde yapılan modelleme için harcanan zaman ekonomik ve makul olmalıdır.
8. Elde edilen sonuçların doğruluğu gerçek deneyler veya denemeler yapılarak kontrol edilmelidir.

### **3.4 Sonlu Elemanlar Yönteminde Lineerlik Ve Nonlineerlik**

Aşağıdaki hususlar yerine getirilirse, bir problem lineer olarak kabul edilir [28].

1. Yerdeğiştirmeler oldukça küçükse
2. Yerdeğiştirmedeki değişim miktarları oldukça küçükse
3. Gerilmeler lineer genlemelere bağlıysa
4. Sınır koşulları yükler karşısında değişmiyorsa

Buna karşılık eğer kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi anlık duruma (anlık yerdeğiştirmeye, kuvvete ve gerilme-genleme ilişkisine) bağlıysa problem nonlineerdir. Üç tür nonlineerite vardır:

1. Malzeme nonlineerite (fiziksel)
2. Geometrik nonlineerite (kinematik)
3. Değişken sınır koşulları

Malzeme nonlinearitesi gerilme-genleme arasındaki elastik-plastik (elastoplastik), elasto-viskoplastik ve kompozit yapılar gibi doğrusal olmayan ilişkiden kaynaklanmaktadır.

Geometrik nonlinearite, gerilmeler ve yer değiştirmeler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiden ve gerilmeler ile kuvvetler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiden kaynaklanır. Üretim, çarpma ve darbe gibi büyük şekil değiştirme problemleri bu tür nonlinear problemlere örnek olarak verilebilir.

Değişen sınır koşullarında nonlineariteye yol açar. Eğer yapı üzerindeki yükler yerdeğiştirmenin bir fonksiyonuysa bu nonlinearite yaratır. Ve son olarak metal şekillendirmenin geneli nonlineariteye örnek gösterilebilir [29].

### **3.5 Metal Şekillendirmede Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Akış Formülasyonu**

Sonlu elemanlar yöntemi bilgisayar kodlarının geliştirilmesindeki önemli sorunlar arasında; deformasyon tanımı ve çözüm prosedürü tercihi, akış formülasyonunun tipinin seçimi, malzeme modellerinin uygulanması ve remeshing bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, Lagrangian ve Euler olmak üzere deformasyonun tanımının iki yöntemi vardır. Lagrangian tanımı, bağımsız değişkenlerde olduğu gibi deforme olmamış haldeki bir malzeme noktasının koordinatlarından yararlanır. Katıların mekaniğinde, Lagrangian ağı yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü karmaşık sınırları işlemek ve malzeme noktalarını takip etmek mümkündür, böylece malzemeye bağlı tarihçe hassas şekilde işlenebilmektedir [30].

Euler tanımı deforme haldeki bir malzeme noktasının koordinatlarından yararlanır. Bundan dolayı, Euler sistemindeki sonlu eleman meshinin uzaysal olarak sabit olduğu yerde, Lagrangian sistemindeki mesh malzeme ile hareket eder.

Malzeme modeli, sonlu elemanlar yöntemi algoritmasının önemli bir parçasıdır. Gerçek malzemenin yapısal davranışını tanımlayan uygun fonksiyonlar kullanılmalıdır. Metal şekillendirme analizinde, plastik strain genellikle elastik strainden daha ağır basar ve rijit plastik veya rijit viskoplastik malzemenin idealleştirilmesi yaygın olarak kabul edilir.

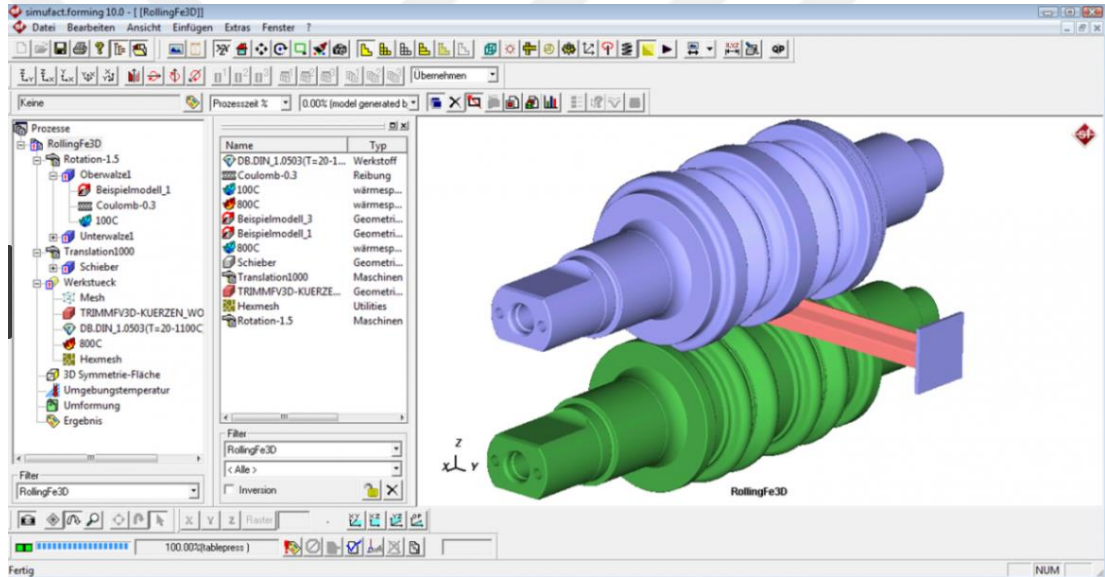
Sonlu eleman analizinin metal şekillendirmeye uygulanmasındaki bir zorluk da meshin değişimi nedeniyle olur. Sonlu elemanlar bazen öyle çarpılır ki hesaplama sırasında büyük hatalar oluşur. Bu tarz zorlukların üstesinden gelmek için, mesh



periyodik olarak yeniden yapılandırılmalı yani remeshing yapılmalıdır. Modern sonlu elemanlar yöntemi kodları otomatik remeshing yani yeni meshin oluşumu ve interpolasyon yoluyla bilginin eski meshten yenisine aktarımı için imkan sağlarlar [31].

### 3.6 Simufact Forming Programı

Simufact, Simufact Engineering GmbH tarafından özellikle şekillendirme endüstrisi için geliştirilmiş bir simülasyon programıdır. Simufact programları ile soğuk, ılık ve sıcak; hacimsel ve saç metal şekillendirme simülasyonlarının, ısıl işlem analizleri ve kaynak proseslerinin gerçeğe en uygun şekilde simüle edilmesi mümkündür. Programın arayüzü şekil 3.9'da gösterilmiştir.



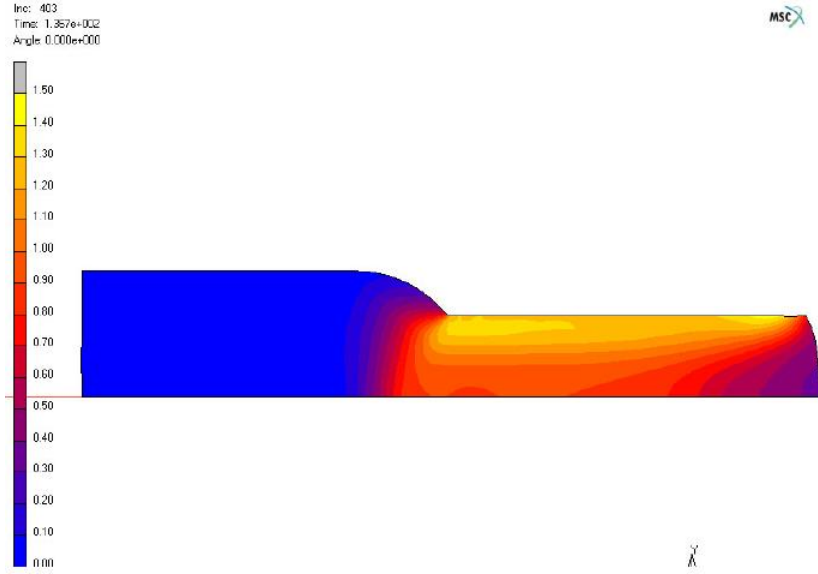
Şekil 3.9 : Simufact.forming kullanıcı arayüzü

Simufact.forming ile yapılan simülasyonlarda, malzeme akışı, katlanma, akış çizgileri, şekillendirme kuvvetleri, kalıplarda oluşan gerilmelerin tespiti, sertlik gibi parametreleri incelemek mümkündür [32].

### 3.7 Soğuk Dövme İşlemi ve Uygulamaları

Bu bölümde soğuk şekillendirmede kullanılan form verme işlemlerinden bahsedilecektir.





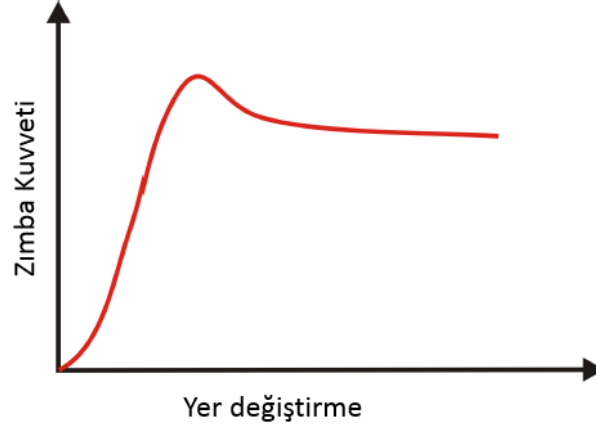
**Şekil 3.11** : Ekstrüzyon işleminde eşdeğer plastik genlemeye bir örnek

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında ekstrüzyon kalıbının içerisinde malzeme akışının, iş parçası kalıbın omuz kısımlarına temas ettikten sonra kalıbın duvarlarına doğru şişmeye sonrasında akmaya başlamaktadır. Bu aşamada oluşan iki farklı plastik genleme değeri mevcuttur. Denklem (3.5)'te iş parçası akma işlemini gerçekleştirirken oluşan kararlı halde meydana gelen plastik genleme hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{ex} + \varepsilon_{df} = \ln\left(\frac{D_d^2}{D_e^2}\right) + \ln\left(\frac{D_d^2}{D_i^2}\right) \quad (3.5)$$

Formülde yer alan  $D_d$  ve  $D_e$  ifadeleri sırasıyla ekstrüzyon kalıp ağız çapını ve ekstrüzyon boğaz çapını göstermektedir.  $D_i$ , iş parçası çapını göstermektedir [35].

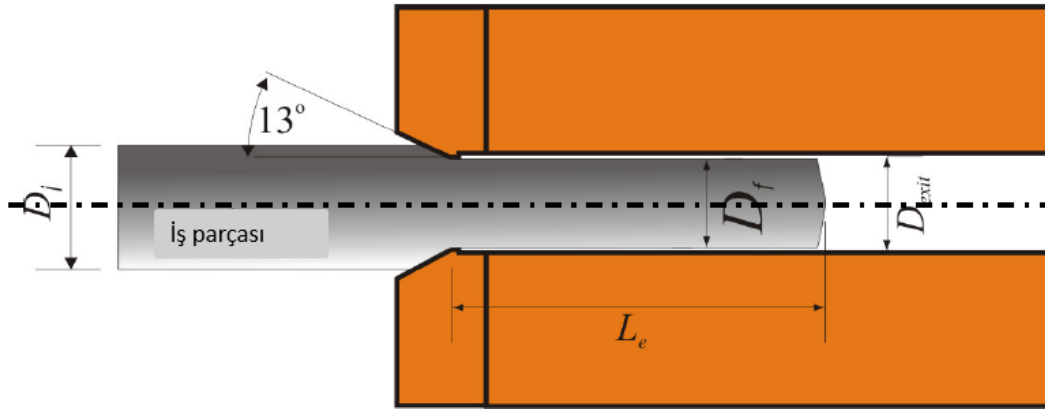
Ekstrüzyon kuvveti ve stroke eğrisi genel olarak Şekil 3.12'te gösterildiği gibidir. Bunun sebebi ilk pozisyonda iş parçası ile kalıp arasındaki sürtünme maksimum noktasındadır. Buda kuvvetin yükselmesine sebep olmaktadır. Malzeme akmaya başladığı zaman ekstrüzyon boğazı arkasındaki rahatlama boşluğu sebebiyle kontak yüzeyler azaldığı için sürtünmeden kaynaklı kuvvette de gittikçe azalmaktadır.



Şekil 3.12 : Zımba kuvveti – yer değiştirme eğrisi

### 3.7.2 Redüksiyon

Redüksiyon işlemi üretimde sıklıkla kullanılan bir uygulamadır. Bu uygulama mevcut iş parçasının kesit alanında düşüş yaratmak için kullanılmaktadır. 0.3 bağlı kesit alan değişimi oranına kadar serbest şekilde uygulanabilmektedir. Redüksiyon ağız açısı ideal ölçüsü  $13^{\circ}$ - $22.5^{\circ}$  derecedir [36]. Redüksiyon ve iş parçası gösterimi Şekil 3.13'te mevcuttur.

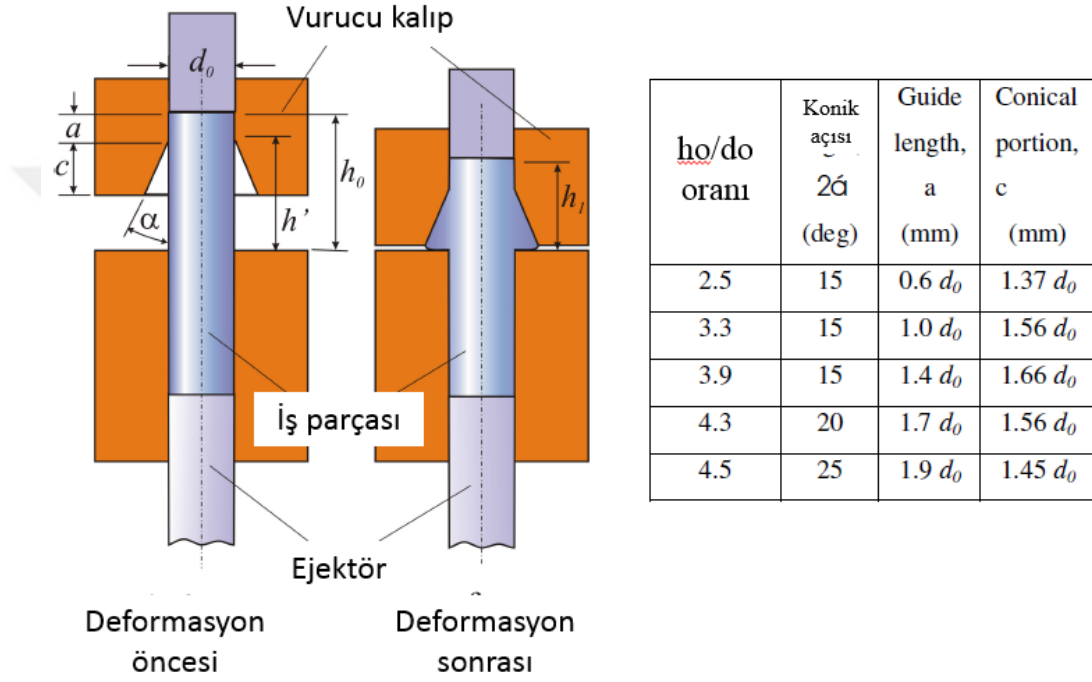


Şekil 3.13 : Redüksiyon işlemi

Redüksiyon işleminde önemli husus, bağlı kesit alan değişiminin soğuk Şekillendirme sınırları içerisinde kalmasıdır. Yani %30 oranını geçmemelidir.

### 3.7.3 Armudi

Armudi olarak isimlendirilen bu işlem aslında kafa hazırlık oluşturmaktır. Bu uygulama final parçasında oluşturulan kafa formu hacminin toplanmasını sağlamaktadır. Tek vuruşta final parçanın kafa şeklini vermek çoğu zaman imkansızdır. Bu imkansızlığın en büyük sebebi iş parçasının çap boy oranının 2.5 üzerinde olması sebebiyle flambaj oluşma durumudur [37]. Örnek armudi işlemi gösterimi verilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 : Armudi işlemi

Armudi işleminde önemli husus, malzemede burkulmayı engelleyerek bir sonraki istasyondaki işleme uygun kafa formunu elde etmektir.

### 3.7.4 Soğuk şekillendirmede akma gerilmesi ile vickers sertlik arasındaki ilişki

Günümüzde soğuk şekillendirilmiş parçalar daha kompleks bir yapıya bürünmekle birlikte daha kritik noktalarda kullanılmaktadır. Durum böyle olunca bu parçaların üretim aşamasından geçerken mekanik ve fiziksel özelliklerinin ne yönde değiştiğini daha kesin olarak bilme ihtiyacı doğmuştur. Akış gerilmesi günümüz teknolojisinde sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilebilmektedir. Vickers sertlik ölçümü soğuk şekillendirilmiş iş parçaları için ucuz ve kolay bir tahmin yöntemi sağlamaktadır. Bu

teorik hesaplama yöntemi deneysel sonuçlar ile arasında %10'dan daha az bir hata payı barındırmaktadır ve bu değer göze alınabilecek düzeydedir [38].

Hesaplama, belli bir genleme değerinde iş parçası üzerinde seçilen lokal bölgelerdeki akma gerilmelerine karşılık gelen değerlerin elde edilmesiyle gerçekleşmektedir.

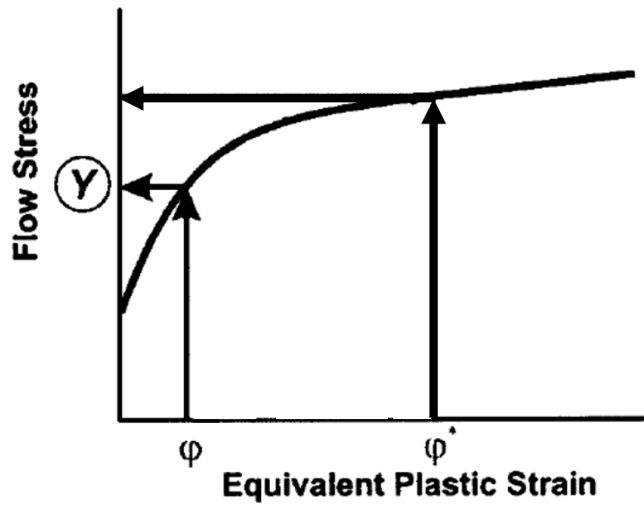
Sertlik tahminlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla Tabor, Tekkaya ve Tekkaya-Yavuz'un sertlik denklemleri (Denklem 1, 2, 3) kullanılarak HV (Vickers) cinsinden sertlikler elde edilmiştir [39].

$$\text{Tabor } HV \times 9.81 = 2.9 \times Y \quad (1)$$

$$\text{Tekkaya } HV \times 9.81 = 2.475 \times Y \quad (2)$$

$$\text{Tekkaya \& Yavuz } HV \times 9.81 = 2.527 \times Y \quad (3)$$

Formülde yer alan Y (belirli bir genleme değerine karşılık gelen akma gerilmesi), akış gerilmesini ifade etmektedir [39]. İlerleyen süreçte yapılacak sertlik tahmin hesaplamaları bu formüllere dayanarak çıkartılacaktır.



Şekil 3.15 : Malzeme akış eğrisi

## 4. TASARIM VE SİMÜLASYON

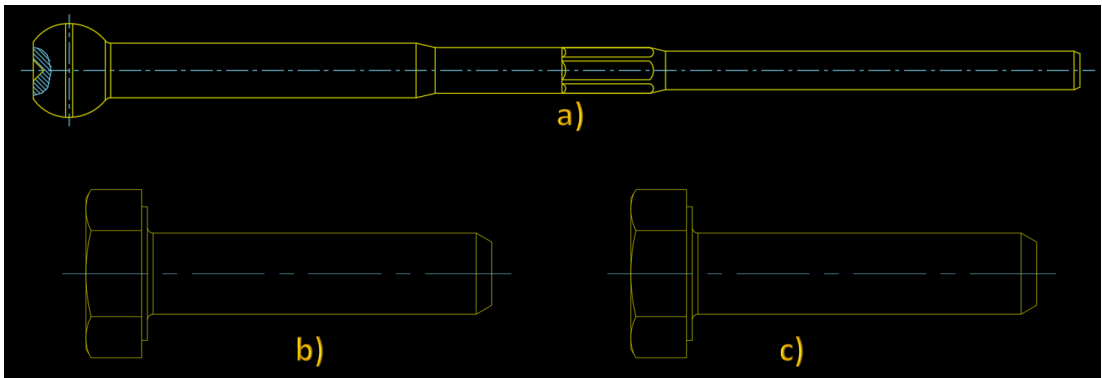
### 4.1 Materyal

Bu tez çalışmasında yapılan soğuk dövme işlemi simülasyonlarının tamamı, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir simülasyon yazılımı olan simufact.forming ile yapıldı. Simülasyon ve tasarımları oluşturmak için gerekli kalıp, zımba ve zarf çizimlerinde ise CAD yazılımları olan AutoCAD 2012 ve Inventor 2012 kullanıldı.

### 4.2 Tasarım ve Modelleme Çalışmaları

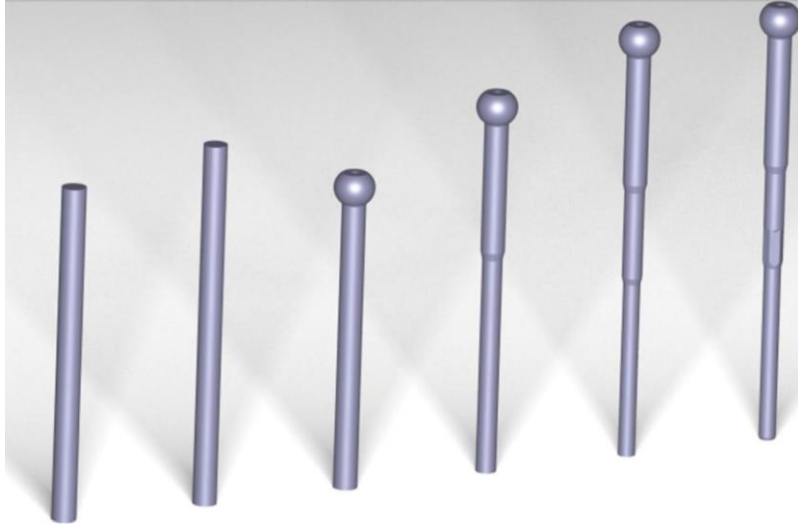
Tezde yapılan simülasyonların, soğuk dövme ile üretim işleminin gerçekteki haline en yakın şekilde oluşturulması amaçlanmıştır. Bu nedenle ürün, kalıp, zarf ve zımba çizimleri, gerçek parçaların üretildiği Norm Civatanın teknik resimleri ile birebir uygun ölçülerde çizilmiştir. Ancak teknik resimler ticari değer taşıdığı için tez çalışmasında sadece ölçüsüz 2D ve 3D çizimler verilmiştir.

Öncelikle ürünler tek tek çizilip hacim hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 4.1(a)'da rotmili parçası, (b)'de M6 D<sub>1</sub>n933, (c)'de M8D<sub>1</sub>n933 parçaları gösterilmiştir.

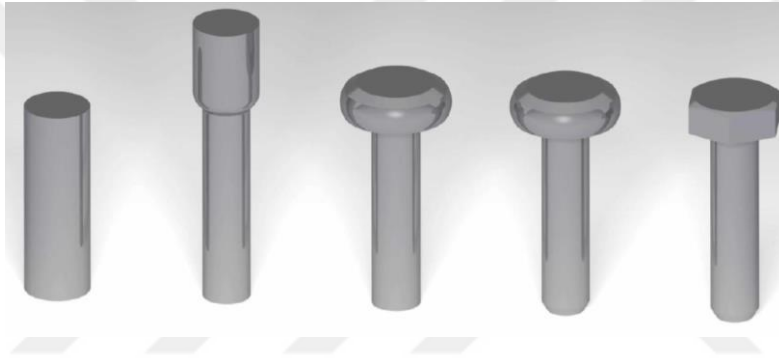


Şekil 4.1 : Ürünlerin CAD Modeli

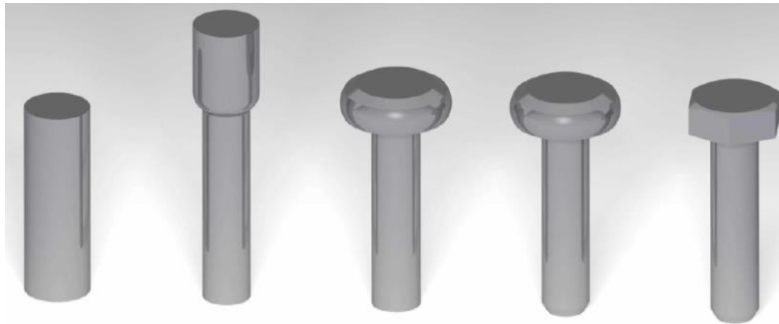
Bu aşamada elde edilen final parçalarına ait hacim değerleri korunarak geriye doğru istasyon tasarımları 3D olarak modellenmiştir.



**Şekil 4.2 : Rotmili tasarım modellemesi**



**Şekil 4.3 : M8 DIN933 tasarım modellemesi**

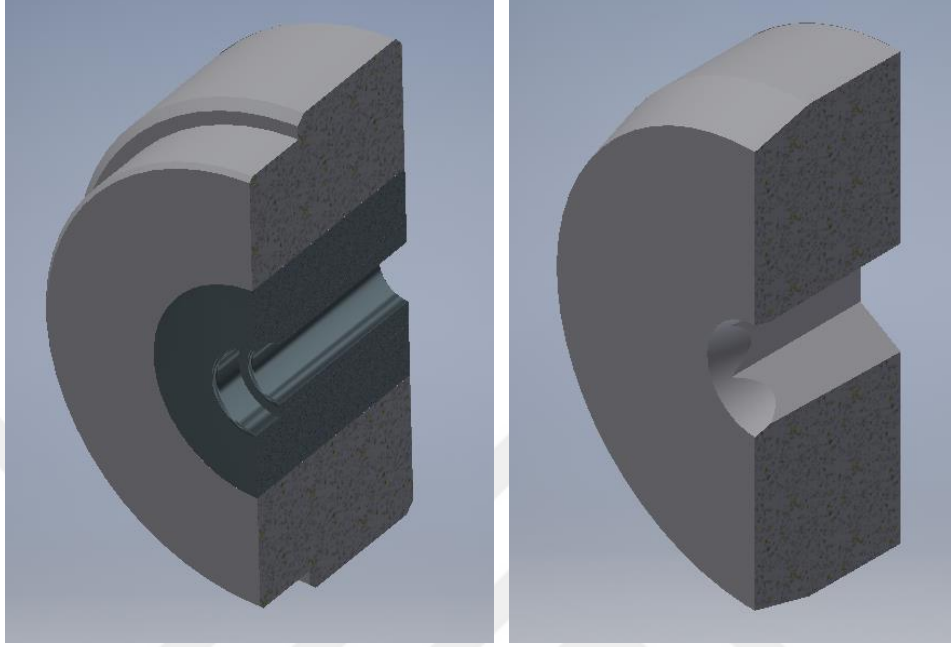


**Şekil 4.4 : M6 DIN933 tasarım modellemesi**

Şekil 4.2’ de rotmili parçasına ait istasyon tasarımı, şekil 4.3’te M8 DIN933 parçasına ait istasyon tasarımı, şekil 4.4’te ise M6 DIN933 parçasına ait istasyon tasarımları gösterilmiştir. Bu tasarımların 3D olarak modellenmesinin sebebi simülasyon programına bu şekilde aktarılabilmesidir. 2D çizimler bu yazılıma model olarak aktarılamamaktadır. Ayrıca program bu modelleri kendi bünyesine import ederken mesh oluşturabilmek için katı modellerin yüzeylerini ağ dokusuyla



örmektedir. Bunlarla birlikte kullanılacak olan kalıplarında 3D modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Her kalıp ayrı bir part olarak çizilip ayrı ayrı kaydedilmiştir. Kullanılan ön kalıplar şekil 4.5'te gösterilmiştir.



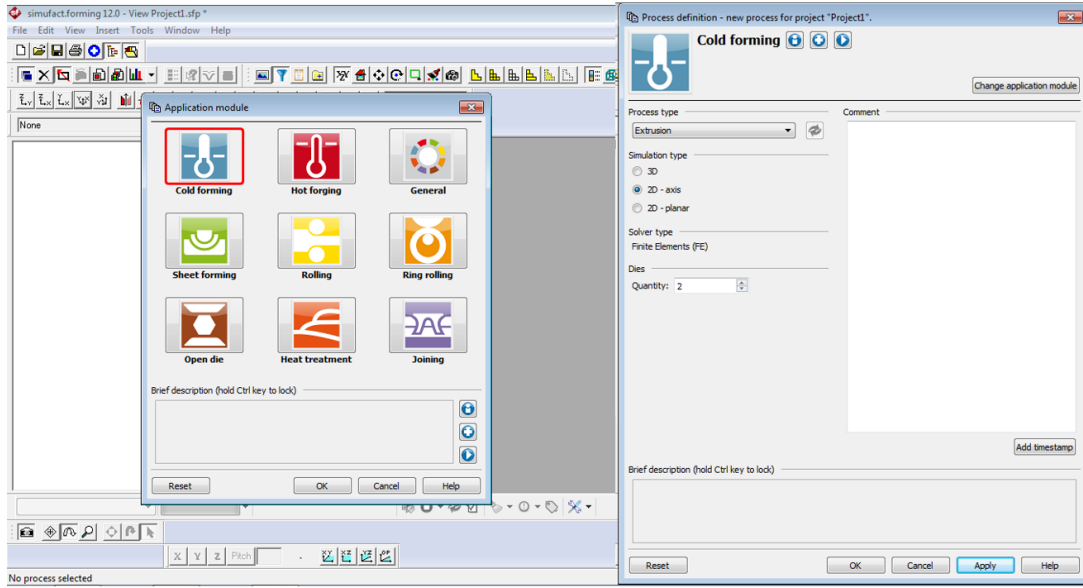
Şekil 4.5 : Ön kalıplar

Ürünler aksenal simetrik olduğu için kalıplar 180 derecelik katı modeller olarak çizilmiştir. Kesit düzlemine daha sonra simülasyon oluşturulurken symmetry plane atanacaktır.

### 4.3 Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde simülasyon oluşturma basamakları anlatılacaktır. Genel anlamda simülasyon kurgusunun nasıl yaratıldığından bahsedilecektir.

Öncelikle new project butonuna tıklanarak ana ekrana giriş yapılır. Karşımıza gelen ekranda cold forming seçildikten sonra yapılacak olan simülasyon kurgusuna göre proses tipi seçilir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Simülasyon giriş ekranı

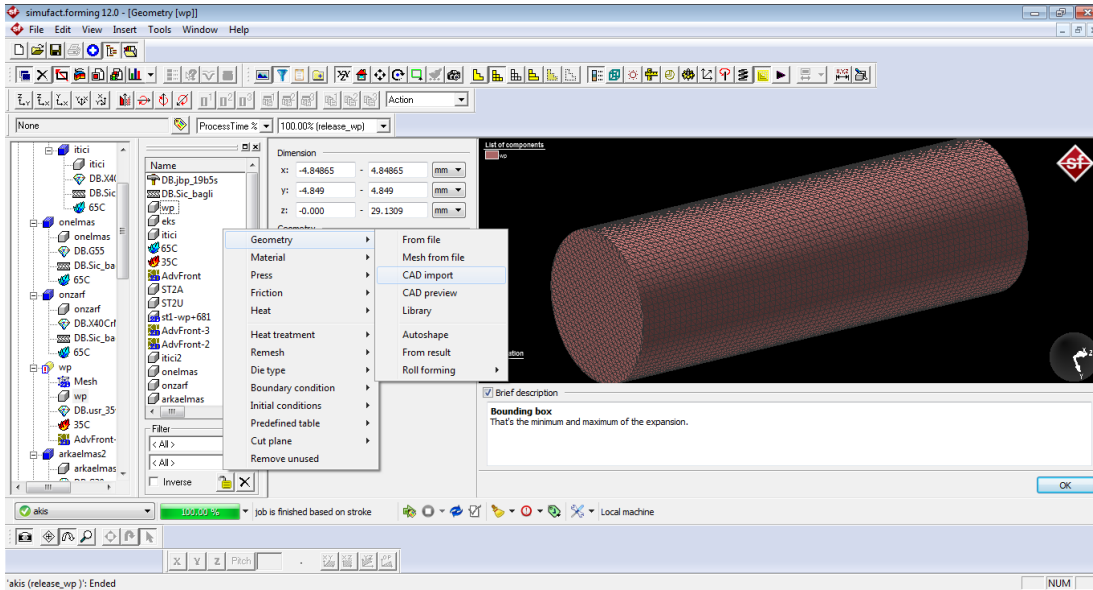
Dışarıda oluşturulan iş parçası ve kalıp modelleri simülasyon programına aktarılır ve yüzeyler üzerinde ağ yapısı (mesh) oluşturulur (Şekil 4.7). Bu simülasyonlarda kullanılan mesh özellikleri şu şekilde sıralanmıştır;

Remesher: Overlay Hex

Element type: Hexahedral

Element size: 0.4

Element count: ort. 30.000



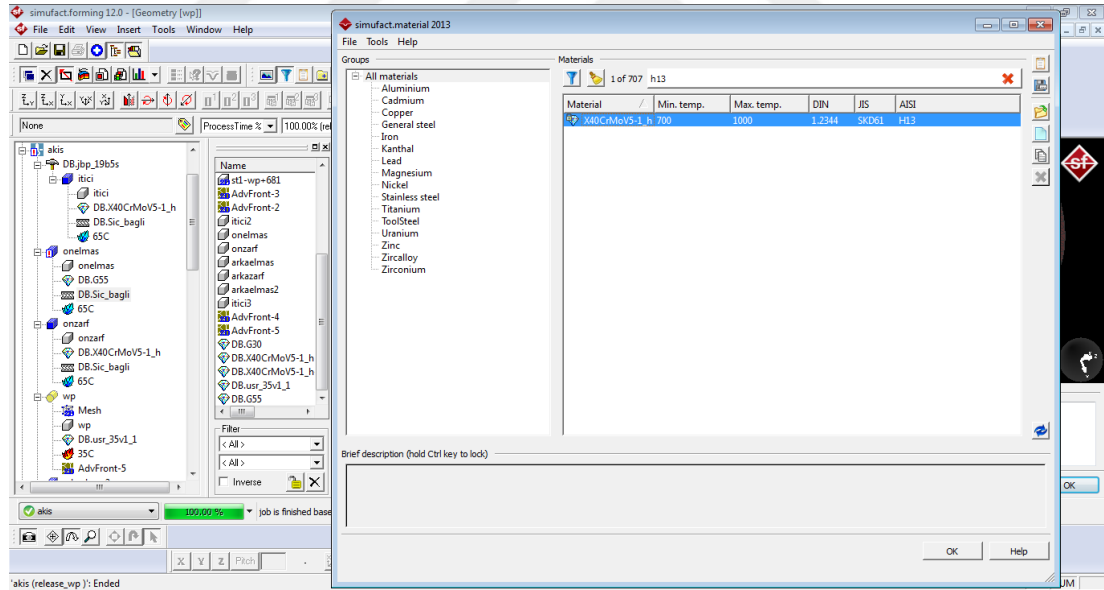
Şekil 4.7 : CAD import

Bu işlemlerden sonra kalıp ve iş parçasına malzeme atamaları yapılır (Şekil 4.8). Kalıplar için kütüphanedeki malzemelerden yararlanılabilir ancak iş parçası için kesinlikle deneysel şekilde elde edilmiş akış eğrileri kullanılmalıdır. Bu konunun detayları ilerki bölümlerde bahsedilecektir. İş parçası olarak kullanılacak 35V1 ve S550Mc malzemelerinin kimyasal kompozisyonları çizelge 4.1’te verilmektedir.

**Çizelge 4.1:** 35V1 ve S550MC kompozisyon tablosu

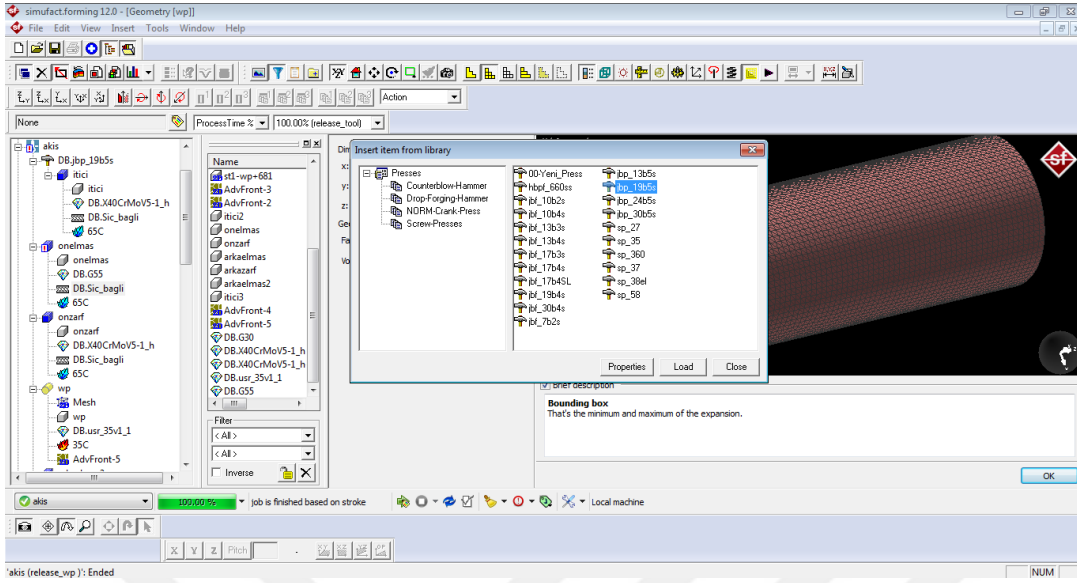
Malzeme	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Cu %	Al %	Ti %	V %
35V1	0.105	<b>0.340</b>	1.452	0.010	0.008	0.051	0.013	0.025	0.013	0.032	0.017	0.037
S550MC	0.337	<b>0.264</b>	0.622	0.009	0.002	0.048	0.002	0.003	0.005	0.033	0.002	0.041

Bu çalışmada kullanılan çelik kalıplar için 1.2344 malzemesi seçilmiştir. Bu malzemenin mekanik özellikleri Young’s modülü 210 GPa, poisson’s ratio 0.3 olarak oluşmaktadır. Kullanılan elmas kalıplar için G55 tungsten carbide malzemesi seçilmiştir. Bu malzemenin mekanik özellikleri Young’s modulus 450 GPa, poisson’s ratio ise 0.29’dir.



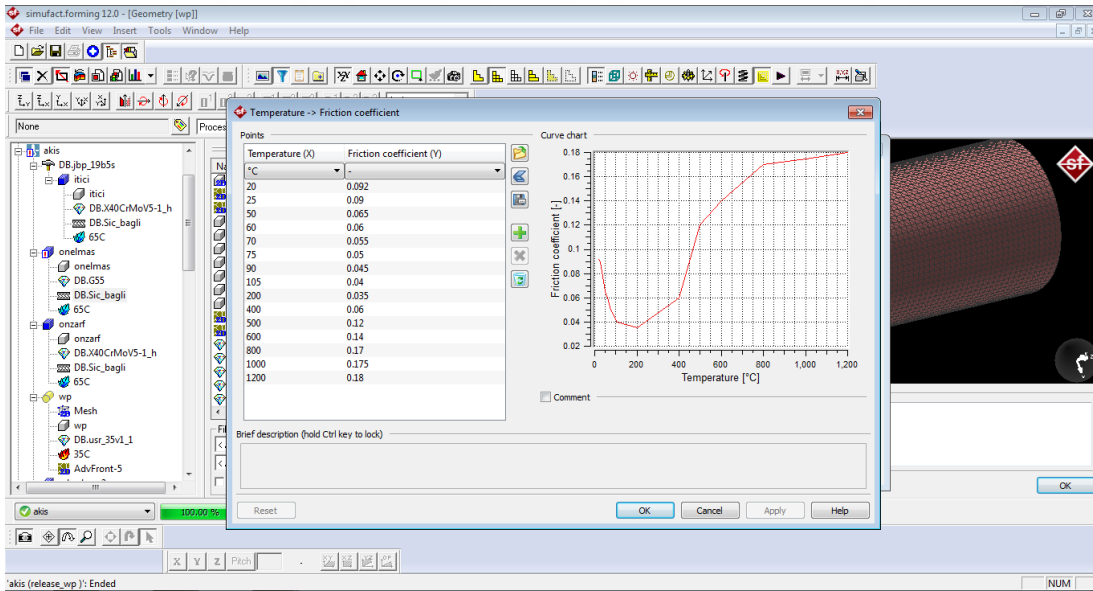
**Şekil 4.8 :** Malzeme atama ekranı

Kullanılacak olan dövme presi seçilir (Şekil 4.9).



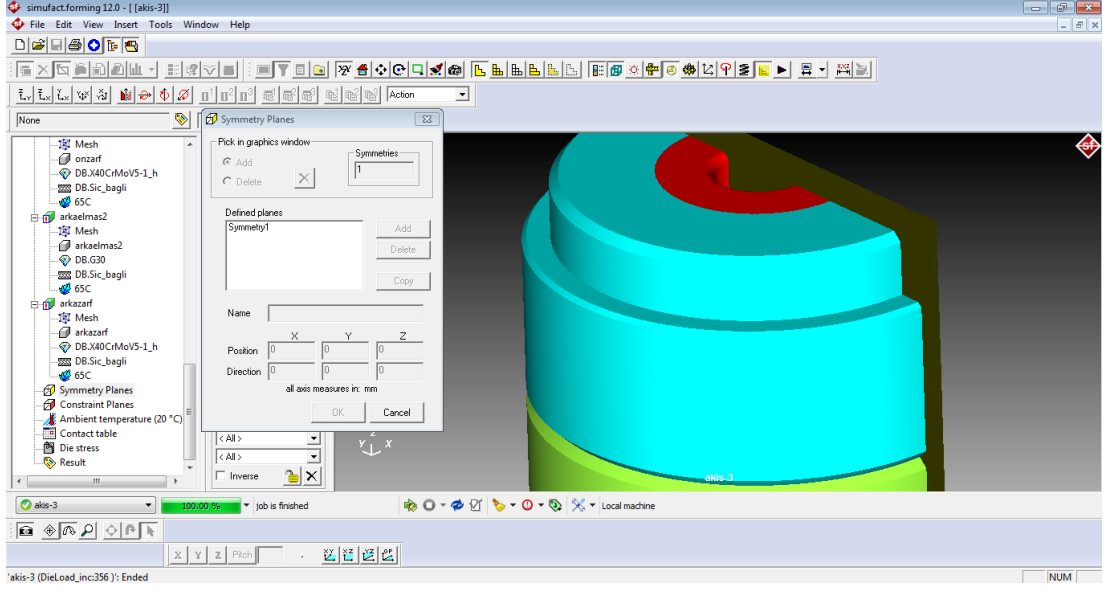
Şekil 4.9 : Pres atama ekranı

İşlem boyunca etki edecek olan sürtünme modeli seçilir. Program kütüphanesinde sabit ve değişken sürtünme modelleri yer almaktadır. Bu çalışmalarda firma bünyesinde daha önce Ar&Ge projesi yapılarak elde edilmiş sıcaklığa bağlı sürtünme modeli kullanılmıştır (Şekil 4.10).



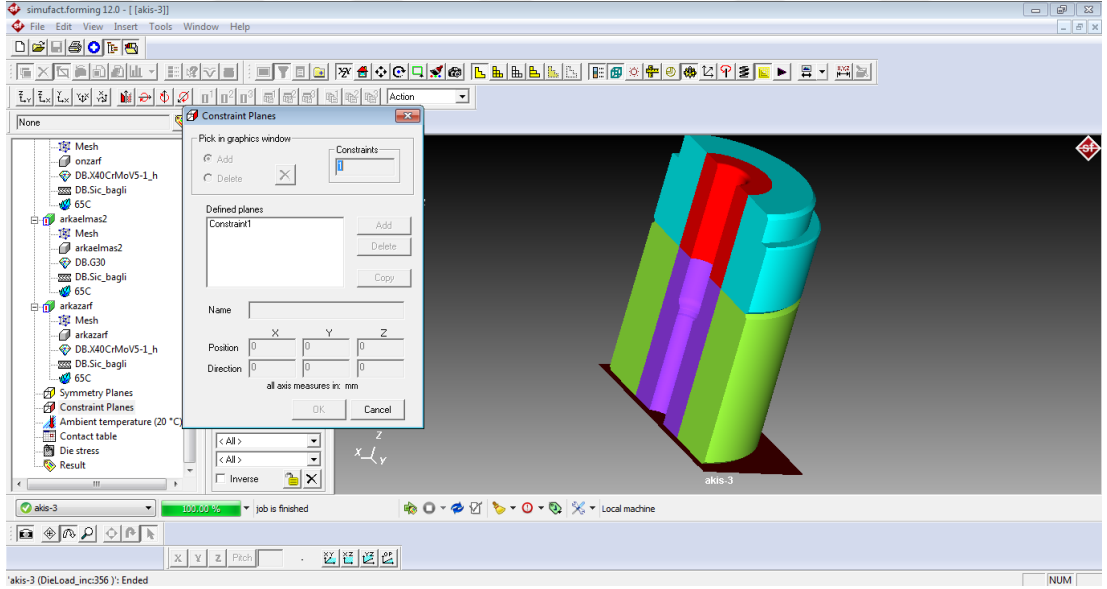
Şekil 4.10 : Sürtünme modeli atama ekranı

180 derece olarak çizilmiş kalıpların kesit alınmış yüzeylerine “symmetry plane” atanır. Böylece daha az eleman sayısı ve daha az hesaplama sayısı ile daha hızlı işlem yapılabilmektedir (Şekil 4.11).



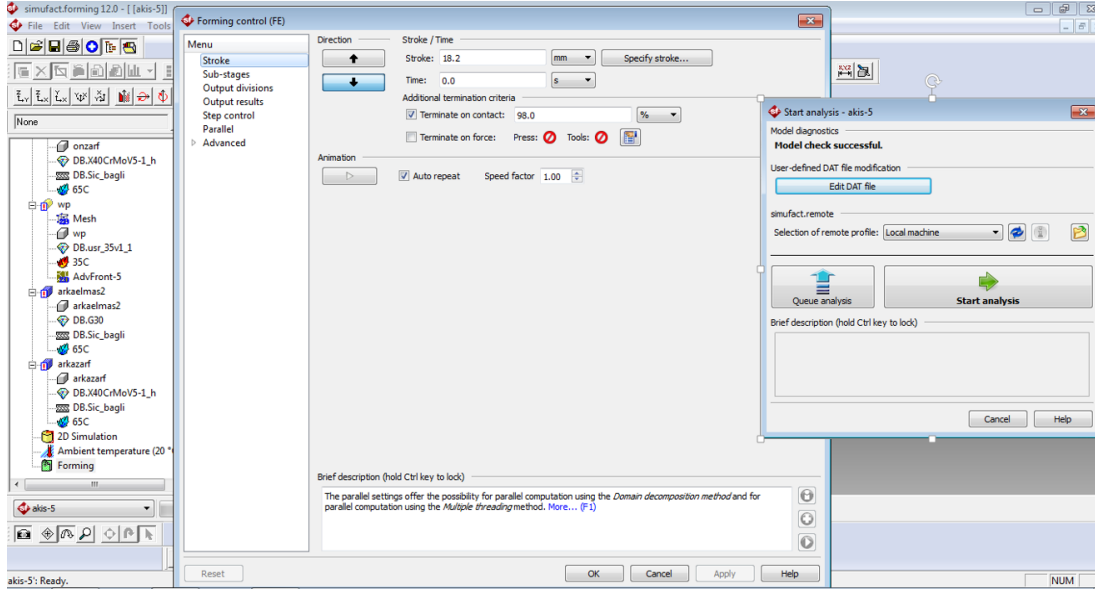
Şekil 4.11 : Symmetry plane

Kalıpların yük karşısında geriye gitmesini engellemek için taban yüzeyine “constraint plane” atanır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Constraint plane

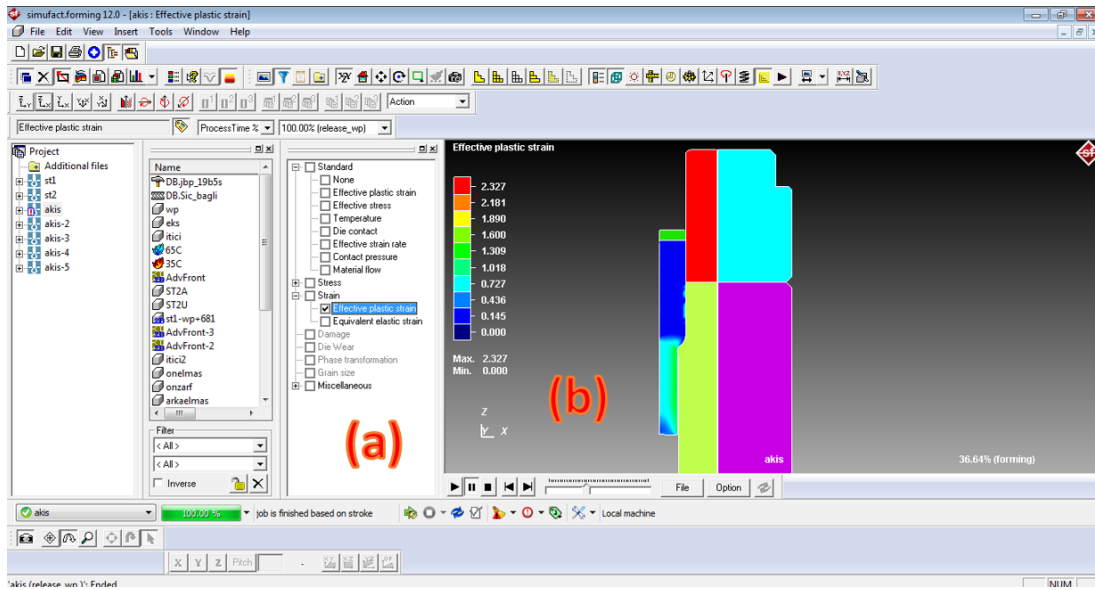
Son olarak istenilen stroke değerleri girilerek simülasyon hazır hale getirilir (Şekil 4.13).



**Şekil 4.13 : Forming control**

Simufact.forming yazılımı, simülasyon çözme işlemini bitirdikten sonra, otomatik olarak sonuç basamak çubuğu ve sonuç eylem çubuğunu aktif etmektedir.

Simülasyon sonuçlarını görüntülemek için, sonuç basamak çubuğundan sonuç seçim penceresi açılır (şekil 4.14(a)). Bu pencerede, yapılan simülasyon işlemine dair strain, gerilme, sıcaklık, malzeme akışı, kalıp teması vb. gibi sonuçlara ulaşılabilir. İstenilen sonuç türünün üzerine farelin sol tuşu ile iki kere tıklandığında sonuç animasyon penceresi açılmaktadır (şekil 4.14 (b)).

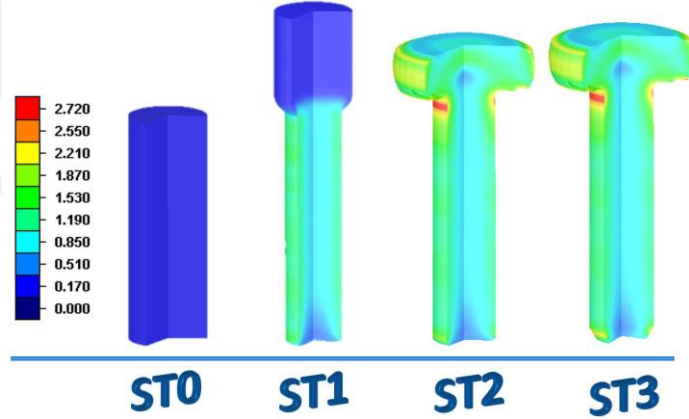


**Şekil 4.14 : Sonuç ekranı**

## 4.4 Simülasyon Sonuçları

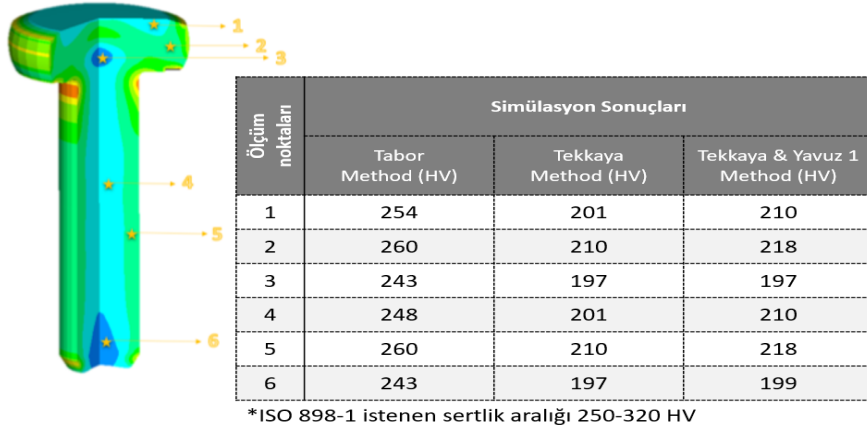
### 4.4.1 M8x30 DIN933 Simülasyon sonuçları

M8 ürün denemesi için kullanılan 35V1 ve S550MC malzemeleri için yapılan analizlerde malzeme akışı, oluşan genleme değerleri ve strain hardening gibi pek çok noktada sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. İki malzeme statik yük gerektiren yerlerde birbirlerinin yerine kullanılabilirdiği düşünülebilir. Elde edilen sonuçların iki malzeme için birbirine yakın olması ve bu sonuçların çıktılarını tekrarlamamak için sadece 35V1 malzemesinin sonuçlarına tezde yer verilmiştir. Analizler 3. İstasyona kadar gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesi olarak 35V1 ve S550MC malzemelerine yapılan basma testleri sonucunda elde edilmiş olan akış eğrileri kullanılmıştır. Mesh sayısı yaklaşık olarak 25.000 civarında olup eleman tipi hexedral kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında istasyonlara ait eşdeğer plastik genleme dağılımı şekil 4.15’de verilmiştir.



**Şekil 4.15 :** M8 DIN933 (35V1) istasyonlara göre eşdeğer plastik genleme dağılımı

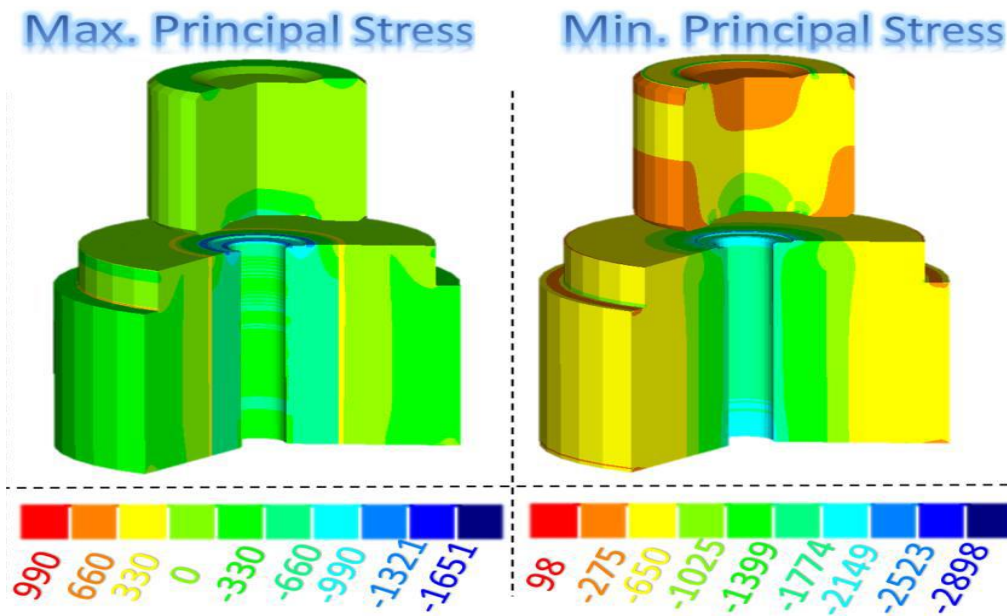
Eşdeğer plastik genleme dağılımlarının elde edilmesiyle parça üzerindeki herhangi bir noktanın lokal olarak genleme değerini görebiliyoruz. Bu değerlerden yola çıkarak hesaplanan sertlik tahmin sonuçları vickers cinsinden şekil 4.16’da gösterilmektedir.



**Şekil 4.16 :** Simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Görüldüğü üzere ‘Tabor’ tahmin metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sadece lokal bölgelerde sertlik değerlerinin istenenden az bir miktar düşük kaldığı görülmekle birlikte, diğer sertlik tahmin metotlarından (Tekkaya, Tekkaya&Yavuz1) elde edilen sonuçlar ise ‘ISO 898-1’ standardında istenen ‘250-320 HV’ aralığından oldukça uzak olduğu gözlemlenmektedir.

Mikro-alaşım malzemelerin soğuk dövme operasyonlarında kullanılmasının en büyük handikaplarından biride kalıp ömürlerini olumsuz etkilemesidir. En çok risk teşkil eden ikinci istasyon sabit (altta) ve hareketli kafa dövme kalıbının (üstte) gerilme analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde elde edilen ikinci istasyon sabit kalıbı (altta) ve hareketli kafa dövme kalıbın (üstte) maksimum ve minimum asal gerilme dağılımları şekil 4.17’de görülmektedir.



**Şekil 4.17 :** İkinci istasyon kalıplarının gerilme dağılımları

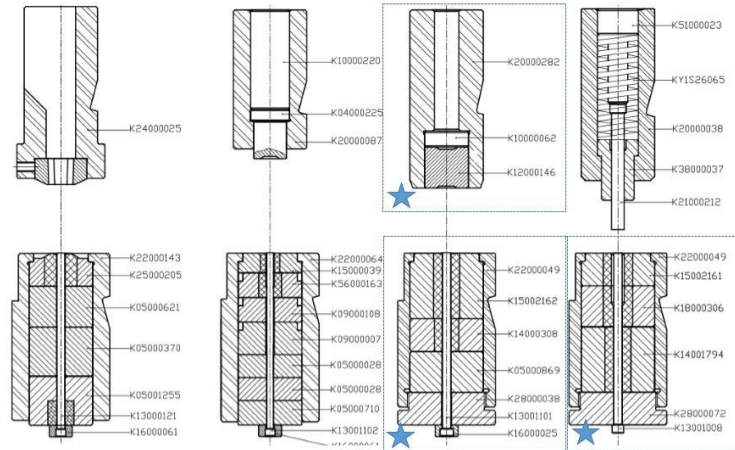


Burada vurucu tarafta yer alan kafa dövme kalıbına etki eden min. asal gerilme yaklaşık olarak 1000MPa max. asal gerilme ise yaklaşık 600MPa'dır. 1.2344 malzemesinden yapılmış vurucu kafa dövme kalıbının sertliği 50-52 HRC akma dayanım sınırında yaklaşık 1300MPa civarındadır.

Sabit tarafta yer alan elmas ön kalıba etki eden max. asal gerilme yaklaşık 700MPa, min. asal gerilme ise yaklaşık 2000MPa'dır. Ön elmas kalıpta çekirdek malzemesi olarak kullanılan G55'in basma dayanımı 3000MPa civarında iken çekme dayanım sınırında yaklaşık olarak 850MPa'dır. Bu sonuçlar çerçevesinde kalıplarda oluşan gerilmeler kalıpların statik dayanım limitleri altında kalmaktadır. Bu sebeple, kalıpların düşük çevrimlerde kırılması beklenmemektedir.

#### 4.4.2 M6x30 DIN933 Simülasyon sonuçları

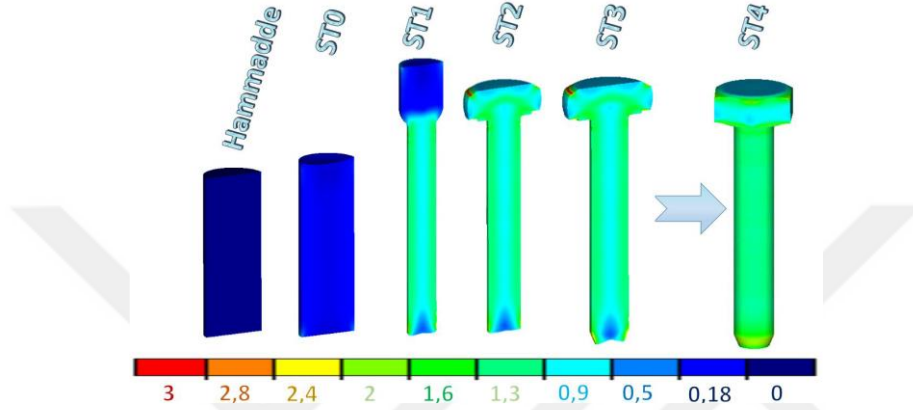
Bu ürünün tasarımı konvansiyonel DIN933 ürünlerden farklı olarak yapılmıştır. Bu sebeple bölgesel sertlik dağılımlarında dengesizlik olmaması amacıyla ve homojen bir sertlik dağılımı için ürünün tüm bölgelerinde genleme değerlerinin yakın tutulması gözetilerek özgün tasarımlar yapılmıştır. Ayrıca 2. istasyon sabit ve hareketli kalıplarına etkiyen yüklere bakılmıştır. Etkiyen yükler bakımından kritik sayılabilecek kalıplar şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18 : M6x30 DIN 933 montaj resmi

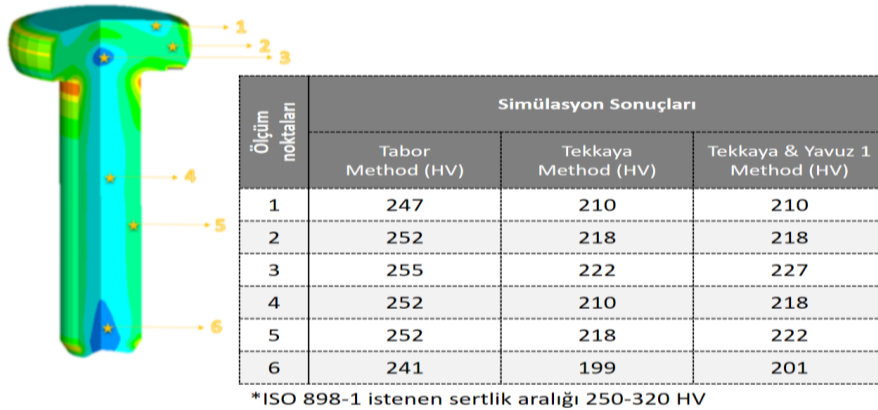
Dört istasyonda gerçekleştirilen ürünün kalıp montaj resmi şekil 4.18'de gösterilmiştir. Birinci istasyonda 0.56 oranında ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. İkinci istasyonda kafa hazırlık yapılmış olup üçüncü istasyonda sivrilme ve son istasyonda kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.

M8 DIN 933'ün üretimi için tasarlanan istasyon tasarımına uygun bir şekilde üretim benzetimi çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışması 3. istasyona kadar gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında istasyonlara ait eşdeğer plastik genleme dağılımı şekil 4.19'te verilmiştir. Burada iş parçası malzemesi olarak 22MnB5Ti malzemesinin basma deney yöntemiyle elde edilen akış eğrileri kullanılmıştır. Kalıplar ise rijit olarak modellenmiştir. Mesh sayısı yaklaşık olarak 25.000 civarında olup eleman tipi hexhedral kullanılmıştır.



**Şekil 4.19 :** M6DIN933(22MnB5Ti) istasyonlara göre eşdeğer plastik genleme dağılımı

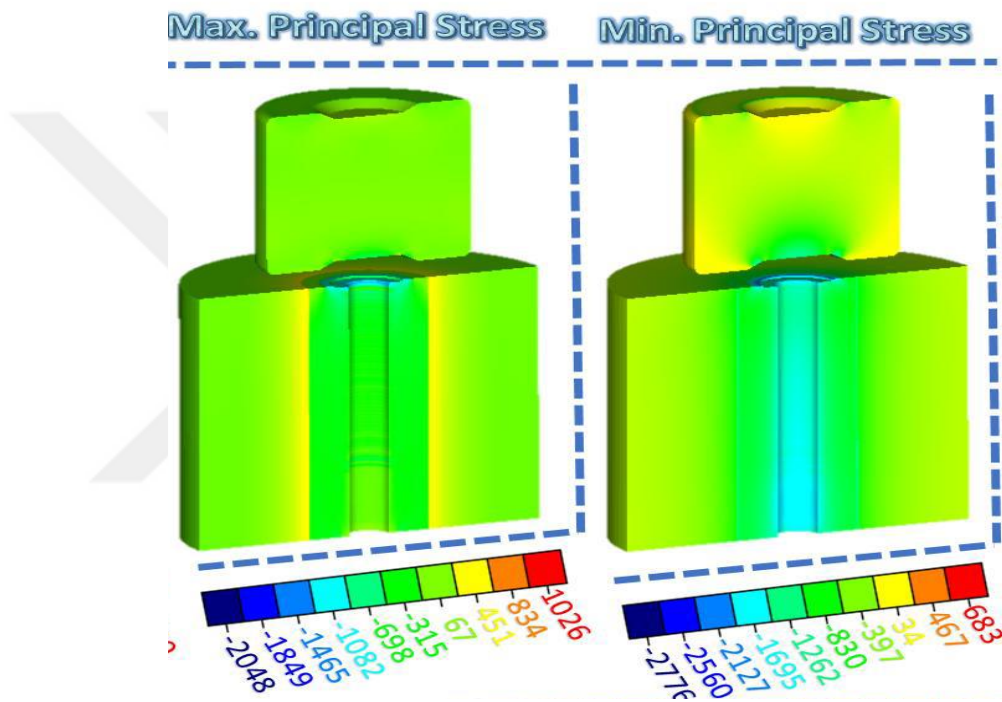
Simülasyon sonucunda renk skalasından anlaşılacağı üzere parçada homojen bir genleme dağılımı elde edilmiştir. Genel olarak her bölgede strain değerleri birbirine yakın 1.28-1.80 aralığında elde edilmiştir. 22MnB5Ti malzemesi için de ayrı ayrı sertlik tahmini yapılmış olup 3. istasyon plastik genleme dağılımlarına göre sertlik tahminleri yapılmıştır. Sertlik tahmini için, Tabor, Tekkaya ve Tekkaya & Yavuz yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında simülasyon sonuçları tek bir görselde Şekil 4.20'de karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.20 :** M6x30 DIN 933 22MnB5Ti malzemesi ürün sertlik tahmini

Görüldüğü üzere ‘Tabor’ tahmin metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sadece lokal bölgelerde sertlik değerlerinin istenenden az bir miktar düşük kaldığı görülmekle birlikte, diğer sertlik tahmin metotlarından (Tekkaya, Tekkaya&Yavuz1) elde edilen sonuçlar ise ‘ISO 898-1’ standardında istenen ‘250-320 HV’ aralığından oldukça uzak olduğu gözlemlenmektedir.

22MnB5Ti malzemesi için yapılan analizlerde elde edilen 2. istasyon sabit kalıbı (altta) ve hareketli kafa dövme kalıbının (üstte) max. ve min. asal gerilme dağılımları şekil 4.21’de görülmektedir.



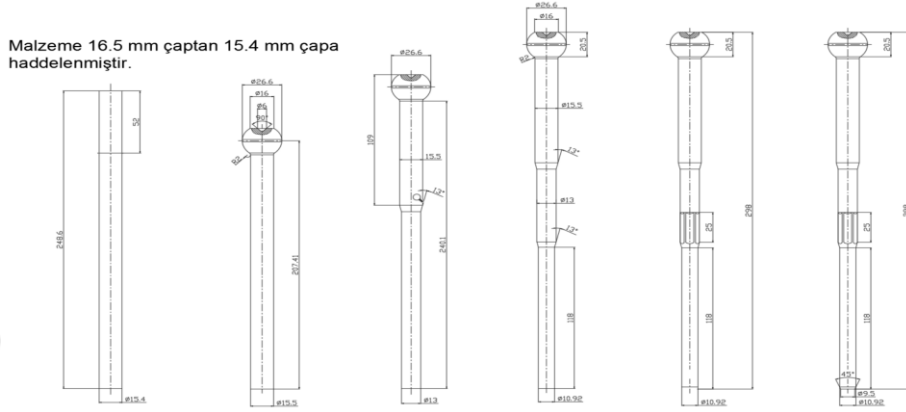
Şekil 4.21 : M6x30 DIN 933 2.istasyon kalıplarının gerilme dağılımı

Burada vurucu tarafta yer alan kafa dövme kalıbına etki eden min. asal gerilme yaklaşık olarak 850MPa max. asal gerilme ise yaklaşık 500MPa'dır. 1.2344 malzemesinden yapılmış vurucu kafa dövme kalıbının sertliği 50-52 HRC akma dayanım sınırında yaklaşık 1300MPa civarındadır.

Sabit tarafta yer alan elmas ön kalıba etki eden max. asal gerilme yaklaşık 650MPa, min. asal gerilme ise yaklaşık 1700MPa'dır. Ön elmas kalıpta çekirdek malzemesi olarak kullanılan G55'in basma dayanımı 3000MPa civarında iken çekme dayanım sınırında yaklaşık olarak 850MPa'dır. Bu sonuçlar çerçevesinde kalıplarda oluşan gerilmeler kalıpların statik dayanım limitleri altında kalmaktadır. Bu sebeple, kalıpların düşük çevrimlerde kırılması beklenmemektedir.

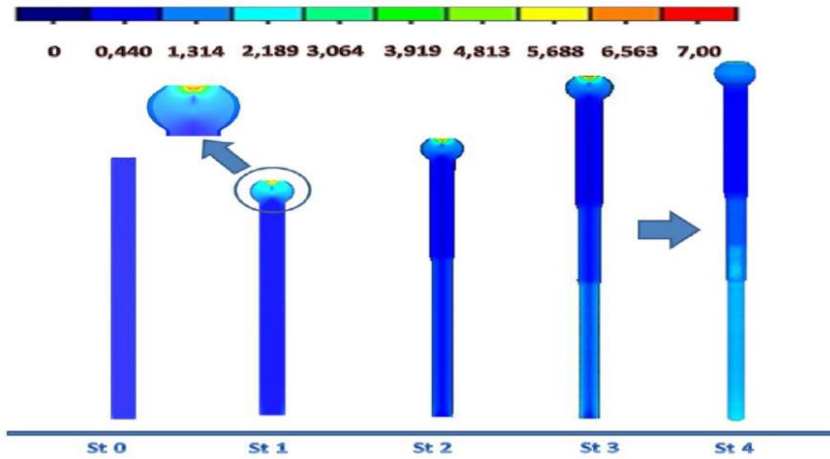
#### 4.4.3 Ø10.9x297 mm uzunluğundaki rotmili simülasyon sonuçları

Üretilmesi planlanan rotilin istasyon tasarımı şekil 4.22’de verilmiştir. 27MnSiVS6 malzemesinden ve HBPF 660 presinde üretilecek ürünün, şekillenme analizi, dövme kuvveti hesabı ve sertlik tahmini çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 4.22 : İstasyon tasarımı

Rotilin üretimi için tasarlanan istasyon tasarımına uygun bir şekilde üretim benzetimi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan üretim benzetimlerinde rijit kalıplar ve malzeme tedarikçisi firmadan temin edilen malzeme akış eğrileri kullanılmıştır. Mesh sayısı yaklaşık olarak 30.000 mertebelerindedir ve eleman tipi olarakta hexedral kullanılmıştır. Şekil 4.23’te rotmiline ait eşdeğer plastik genleme dağılımı verilmiştir.

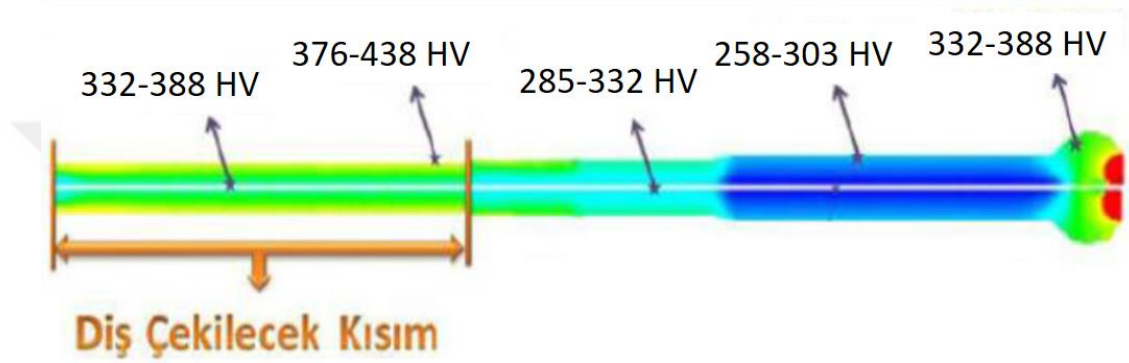


Şekil 4.23 : İstasyonlara göre eşdeğer plastik genleme dağılımı

Simülasyon sonucunda üründe herhangi bir şekillenme kusuru gözlemlenmemiştir. Elde edilen strain değerleri diş çekilecek shaft bölgesinde 2.20 civarlarındayken kafa

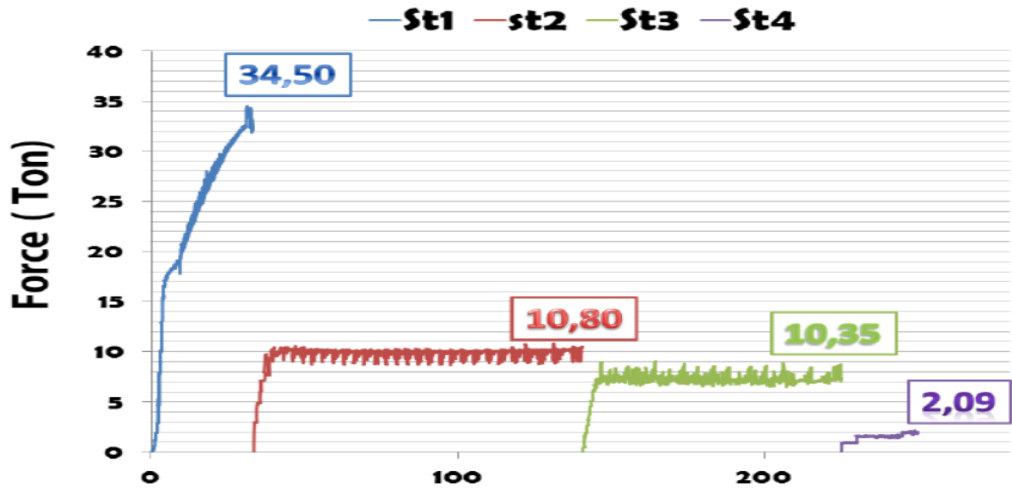
altı şaft bölgesinde ise 1.00 civarlarında elde edilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere parça boyunca sertlik dağılımı diğer ürünlerde elde edilenler kadar homojen olmayacaktır.

ISO 898-1 standardına ve müşteri taleplerine göre üzerinde çalışılan rot mili parçasının çekme gerilmesi değeri tüm bölgede 850MPa-1095MPa, sertlik değerlerinin ise bölgesel olarak farklılık gösterebileceği parça dış yüzeyinden çekirdeğe kadar tüm bölgede 250HV-320HV aralığında olması gerektiği belirlenmiştir. Ürünün, simülasyon sonucundaki bölgesel sertlik tahminleri şekil 4.24'da verilmiştir.



Şekil 4.24 : Simülasyon sonucunda elde edilen sertlik tahminleri

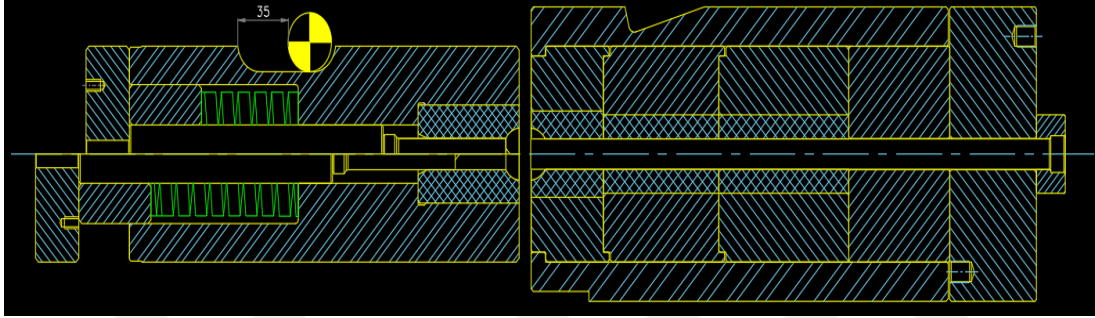
Yapılan şekillenme simülasyonları ile istasyonlara ait dövme kuvvetleri şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.25 : İstasyonlara göre dövme yükleri

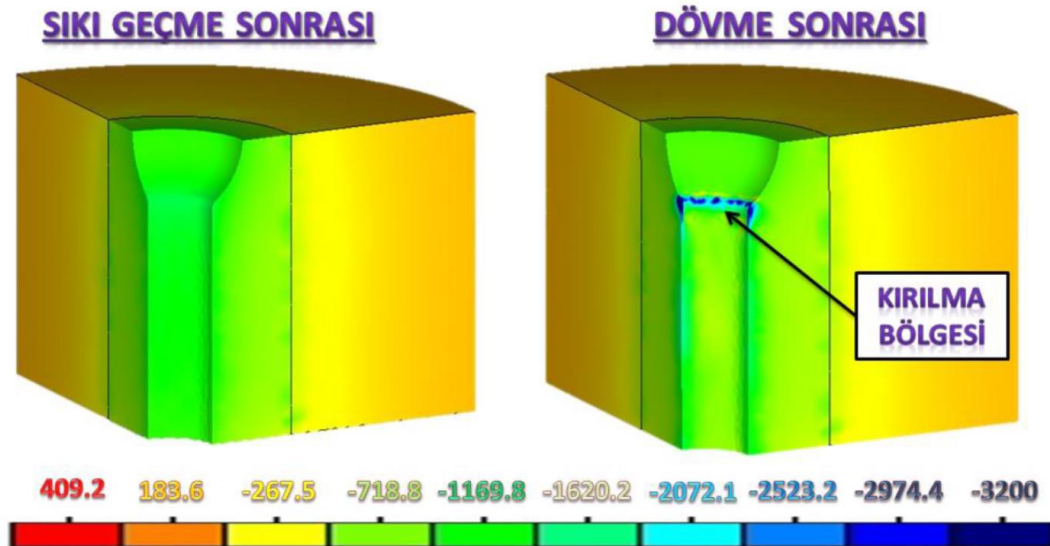
Toplam dövme kuvveti 57,74 ton olarak belirlenmiştir. HBPF-660 makinesinin dövme kapasitesinin maksimum 500 ton olduğu düşünüldüğünde ürün bu makinada rahatlıkla üretilmektedir.

Rotilin gerilme yönünden incelenecek kritik istasyona ait kalıpların CAD çizimleri şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : Birinci istasyon kalıpları

Yapılan simülasyonlarda sabit kalıp insert malzemesi olarak G55 tungsten carbide malzemesi seçilmiştir. Bu malzemenin mekanik özellikleri Young’s modulus 450GPa, poisson’s ratio ise 0.29’dur. Kalıpların modellemeleri yapılırken sıkı geçme oranı %0.5 olarak kabul edilmiştir. Yapılan analizlerde G55 malzemesi için şekil 4.27’de sıkı geçme ve dövme işlemi sonrasında kalıplarda meydana gelen minimum asal gerilmelerin dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.27 : Birinci istasyon elmas ön kalıp gerilme dağılımı

Elde edilen veriler neticesinde sabit tarafta yer alan elmas 6n kalıba etki eden min. asal gerilme Şaft boyunca yaklaşık 1200MPa'dır. Kalıbın boĒaz kısımlarında 1950MPa min. asal gerilme deĒerleri gözlemlenmiŐtir. Ancak 6n elmas kalıpta çekirdek malzemesi olarak kullanılan G55'in basma dayanım sınırı 3000MPa mertebelerindedir. Bu sonuçlar çerçevesinde kalıplarda oluşan gerilmeler kalıpların statik dayanım limitleri altında kalmaktadır. Bu sebeple, kalıpların düşük çevrimlerde kırılması beklenmemektedir.







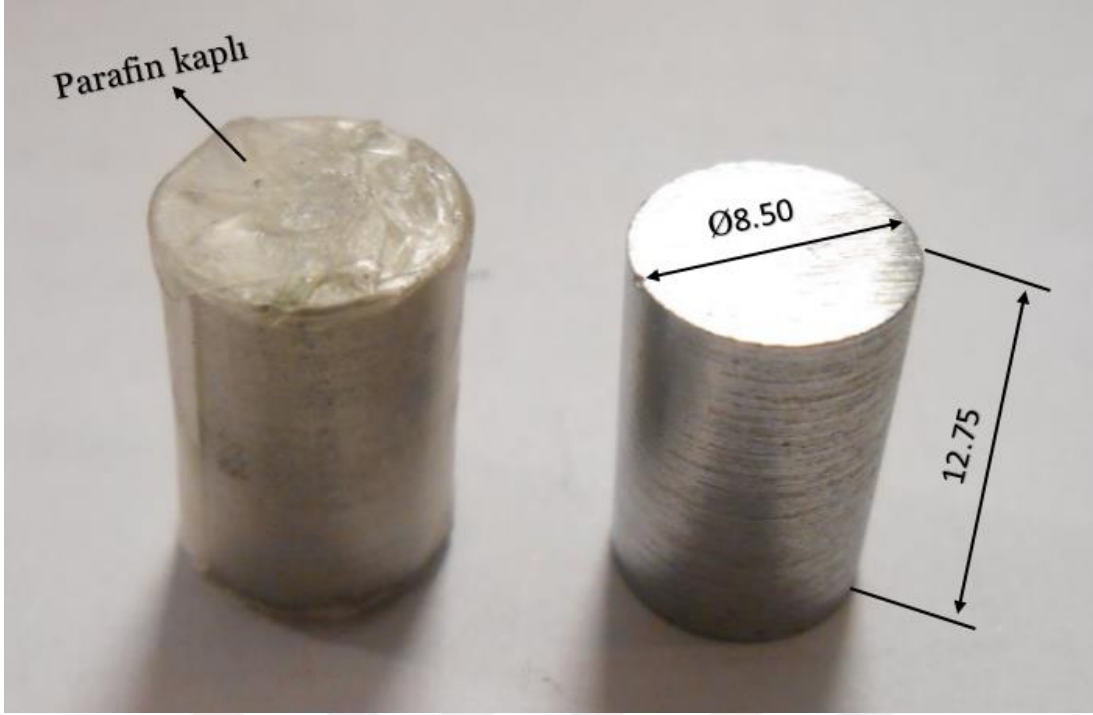
## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, çalışma boyunca yapılan tüm deneylerden ve bunlara ait test metodolojilerinden ve dahi testlere ait standartlardan bahsedilecektir. Bu kapsam doğrultusunda basma testleri, çekme testleri, sertlik ölçme işlemleri ve yorulma deneyleri konu alınacaktır.

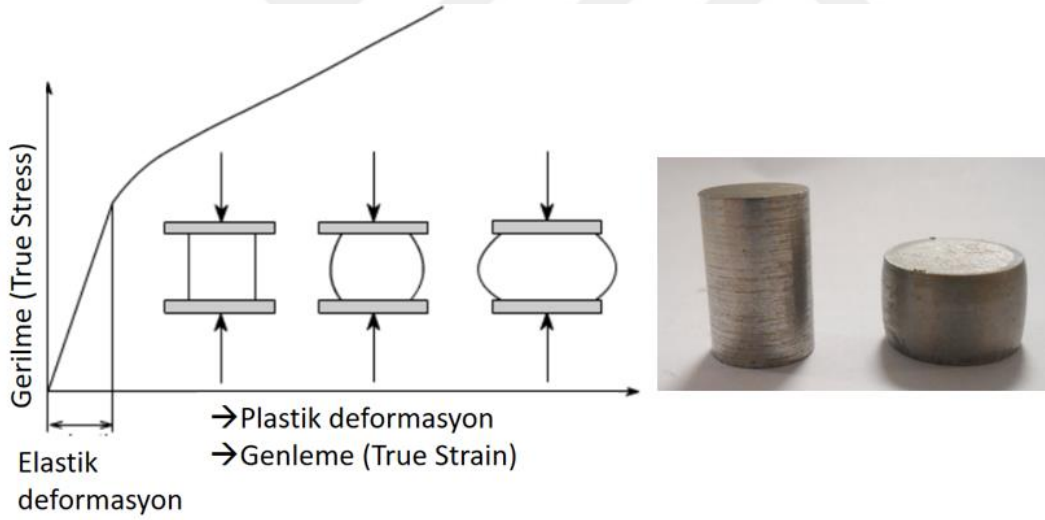
### 5.1 Basma Testleri

Simülasyon sonuçlarının kesin ve çok küçük bir hata payı ile elde edilebilmesi için, sınır koşullarının gerçek üretim koşullarına en yakın şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Malzeme açısından bakıldığında ise en önemli parametre akış eğrileridir. Akış eğrisi olarakta bilinen gerçek gerilme-genleme eğrisi, eksenel yönde uygulanan kuvvetlere bağlı olarak oluşan gerilme sonucunda malzemede meydana gelen ortalama genlemeyi ve arasındaki ilişkiyi göstermektedir [40].

Basma testleri, 35V1, S550MC, 22MnB5Ti malzemelerinden elde edilen Rastegaev test numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de görülen test numunelerinden her malzeme için 12 adet numune hazırlanmıştır. Testler 20 C°’de 0.001 1/s, 0.01 1/s, 0.1 1/s, 0.3 1/s genleme hızlarında yapılmıştır. Her genleme hızı için 3 adet numune kullanılmıştır. Yani bir malzeme için 4 farklı genleme hızında 3’er adet test gerçekleştirilmiştir. Numunelerinin geometrileri, boy çap oranı 1.5 kuralı dikkate alınarak hazırlanmıştır [41]. Sürtünme etkisini azaltmak için basma numuneleri parafin kâğıdı ile kaplanmıştır. Bütün basma testleri Norm Cıvata Ar-Ge merkezi bünyesinde bulunan dinamik test ve modelleme laboratuvarında ki 40 ton kapasiteli “Zwick Roell Z400RED” mekanik test cihazında yapılmıştır. Alınacak verilerin doğruluğu için cihazın önce uyarlık sınaması (compliance test) yapılmış ve böylece cihazın basma kuvveti altında elastik genlemesi ve yataklarında ki boşluklar gibi etkenlerden kaynaklı hatalar bertaraf edilmiştir. Basma test düzeneği şekil 5.2’de gösterilmiştir.

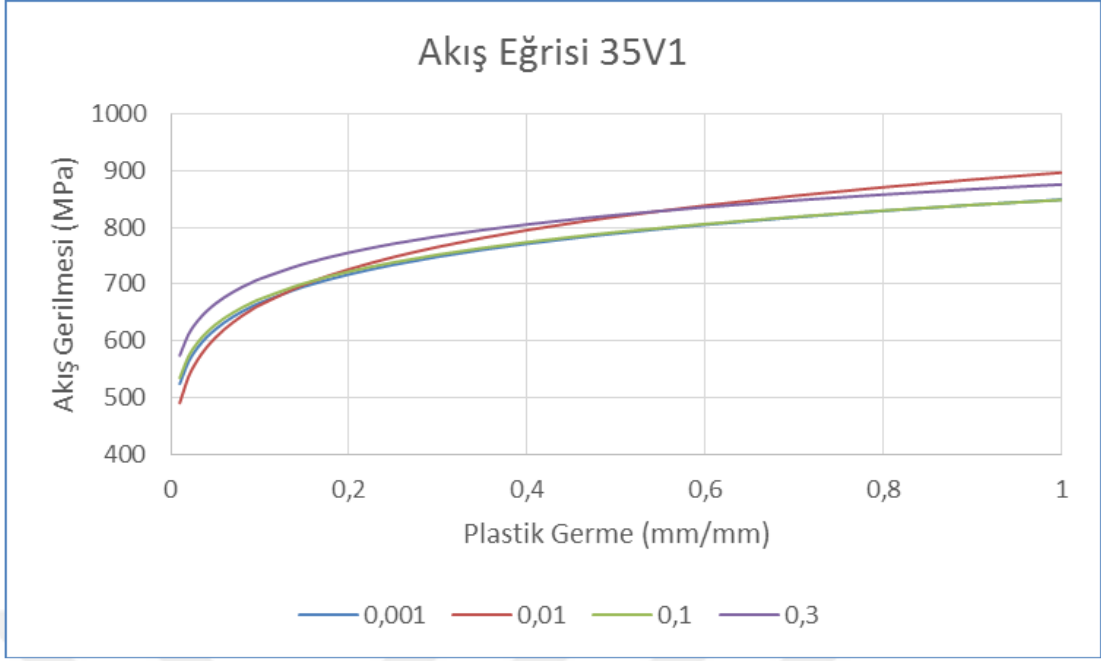


Şekil 5.1 : Basma test numunesi

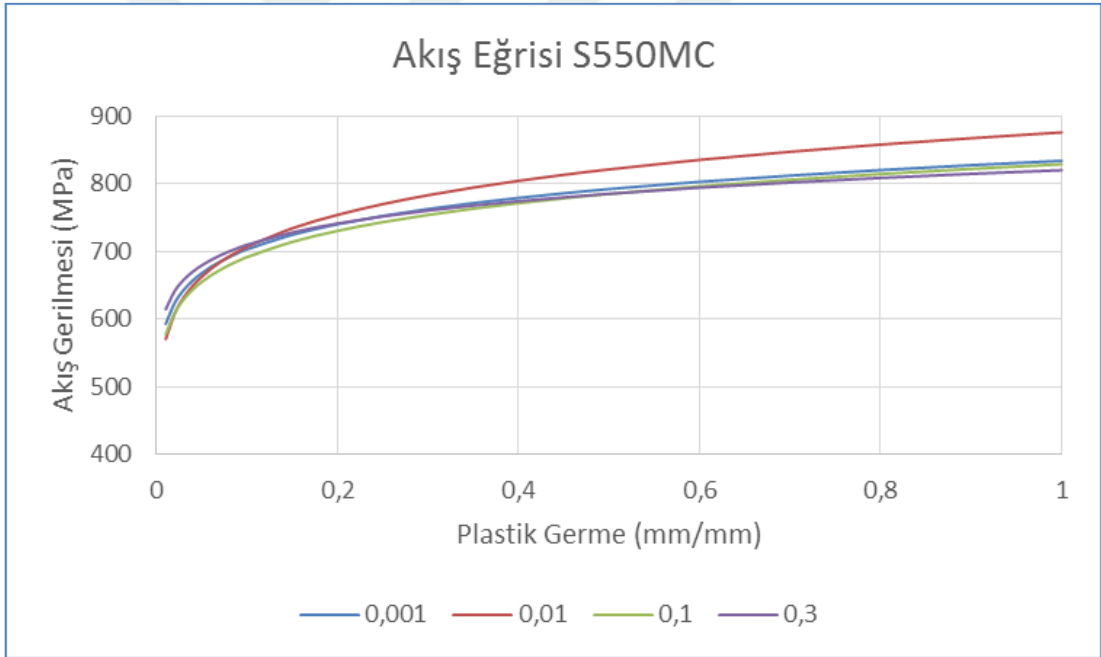


Şekil 5.2 : Basma test düzeneği

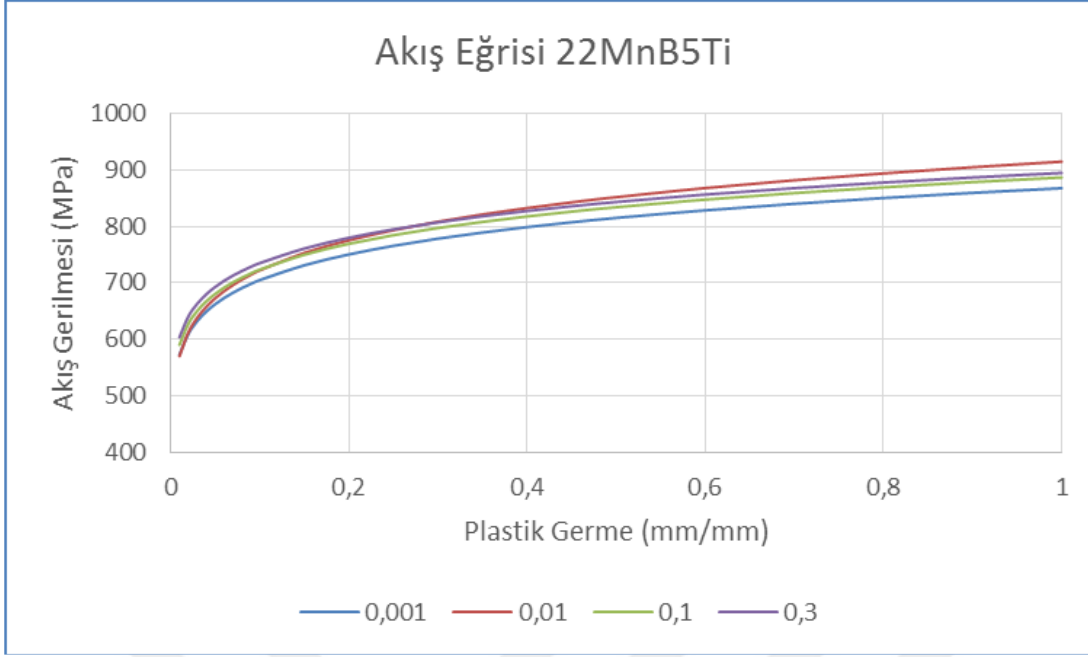
Daha sonra deneylerin ortalama sonuçları alınarak, malzemelerin akma noktaları tespit edilmiş ve akış eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla 35V1, S550MC, 22MnB5Ti ve 27MnSiVS6 malzemesine ait akış eğrileri yer almaktadır.



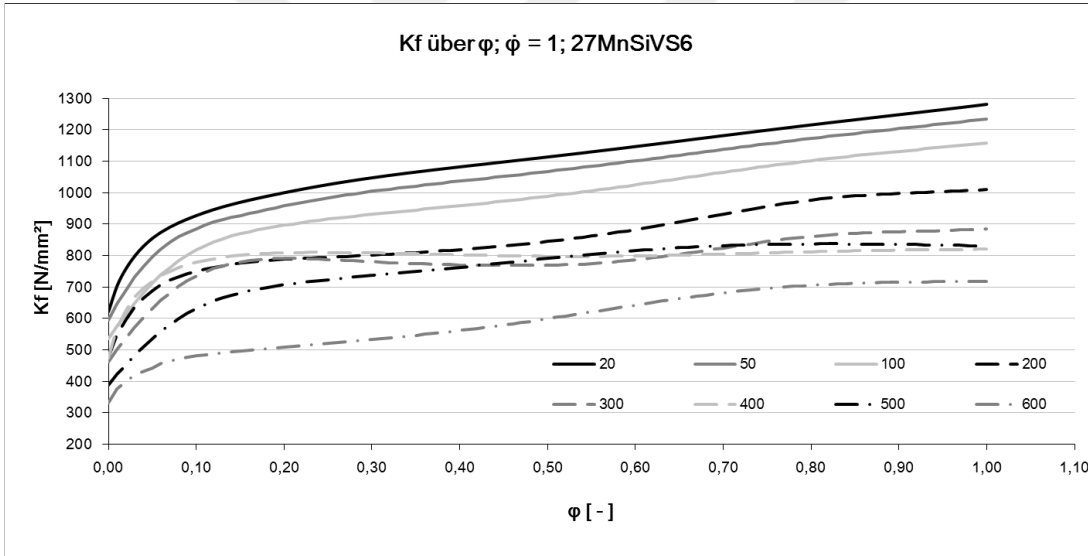
**Şekil 5.3 : 35V1 akış eğrisi**



**Şekil 5.4 : S550MC akış eğrisi**



Şekil 5.5 : 22MnB5Ti akış eğri tablosu



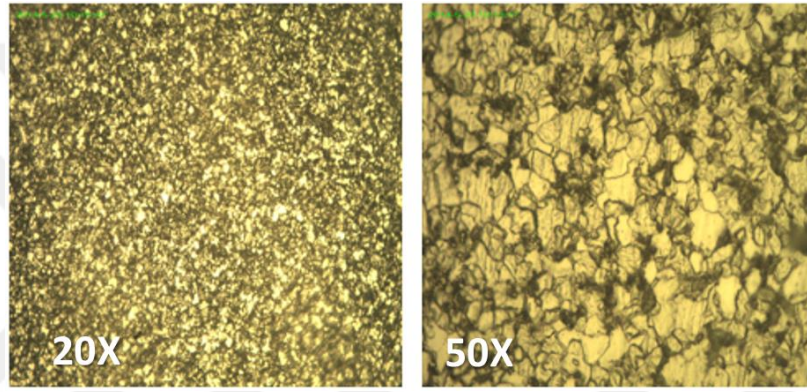
Şekil 5.6 : 27MnSiVS6 akış eğrisi

27MnSiVS6 malzemesine ait akış eğrisi tedarikçi firmadan temin edilmiştir.

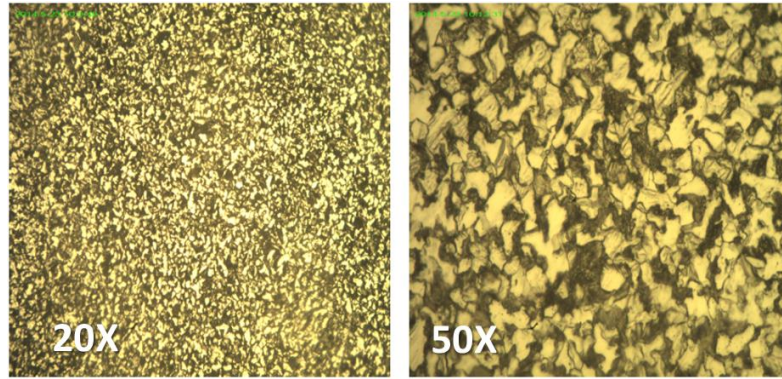
## 5.2 Mikroyapı Görüntüleme

Malzemelerin iç yapılarını incelemek için tüm çelik tel malzemelerden 1cm uzunluğunda parçalar kesilmiştir. Numunelerin taşlanarak çapakları alındıktan sonra bakalite alma yöntemiyle kalıplanmıştır. Sıra ile 80, 150, 320, 400, 800 ve 1200 nolu zımpara kağıtlarıyla zımparalama işlemi yapılmıştır. Bu aşamadan sonra numuneler

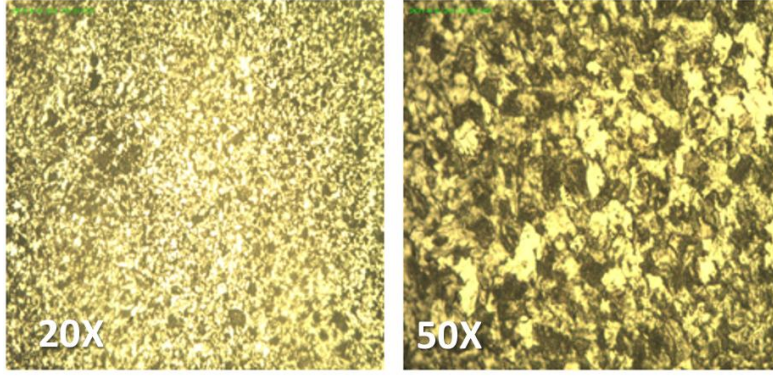
parlatılmıştır. Parlatılmış numunelerin mikroskopta incelenmesiyle yapı detayları nadiren ortaya çıkabilir. Parlatmadan sonra, metalik olmayan kalıntılar ve porozite, çatlak gibi yüzey kusurları görülebilir. Gerçek iç yapı özelliklerini ortaya çıkarmak için numunenin uygun bir kimyasal reaktifle dağlanması gereklidir. Dağlama sonrası yapıdaki bazı fazlar dağlayıcıdan etkilenerek parlaklığı bozulur (çukurlaşır), böylece optik metalurji mikroskobunda daha koyu renkli görülürler. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler Olympus BX60M mikroskopi ile iç yapıları görüntülenmiştir. Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da sırasıyla S550MC, 35V1, 22MnB5Ti ve 27MnSiVS6 malzemesine ait mikroyapı görüntüleri yer almaktadır.



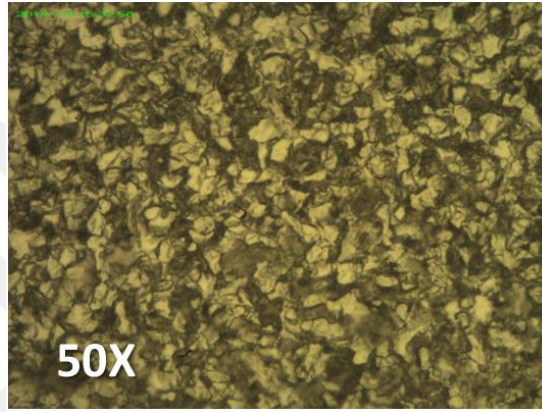
Şekil 5.7: S550MC



Şekil 5.8: 35V1



**Şekil 5.9:** 22MnB5Ti



**Şekil 5.10:** 27MnSiVS6

Malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde ince taneli ferritik ve perlitik bir yapıda olduğu görülmektedir. Filmaşın kesit alanı içerisinde beynit ve martenzit yapıya rastlanmamıştır. Hall-Petch ilişkisine göre, ince taneli yapı çeliğin dayanım ve tokluk özellikleri üzerine olumlu bir etkisi vardır. Bunlara ek olarak bu iç yapı, çeliğin dövülebilirlik kabiliyetini ve yorulma direncini arttırmaktadır.

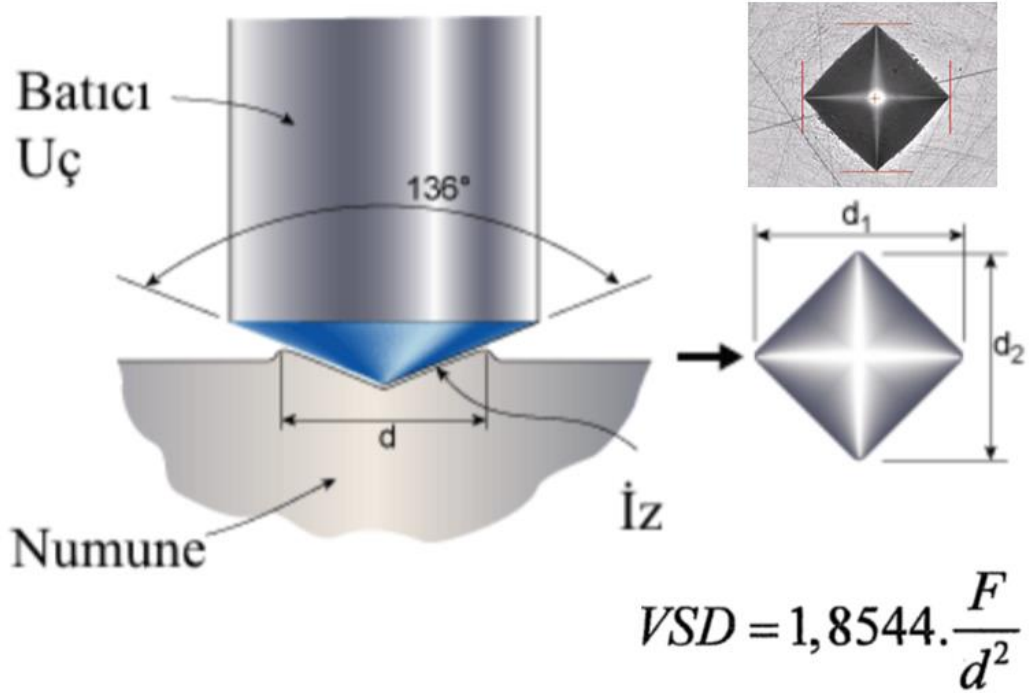
### **5.3 Sertlik Deneyi**

Malzemeler üzerinde yapılan en genel deney, sertliğinin ölçülmesidir. Bunun başlıca sebebi, deneyin basit oluşu ve diğerlerine oranla numuneyi daha az tahrip etmesidir. Diğer avantajı ise, bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişkinin bulunmasıdır. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik ile doğru orantılıdır; dolayısıyla, yapılan basit sertlik ölçmesi neticesinde malzemenin mukavemeti hakkında bir fikir edinmek mümkündür.

Sertlik izafi bir ölçü olup malzemelerin çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye karşı gösterdiği dirence denir [42].

### 5.3.1 Vickers sertlik deneyi

Bu deney yönteminde baskı elemanı olarak tepe açısı  $136^\circ$  olan elmas kare piramit kullanılır (Şekil 5.11). F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde yerine konarak sertlik değerleri bulunur. Vickers sertliği yüke bağlı değildir. Ölçme hatalarını azaltmak ve heterojen yapılarda ortalama değer elde edebilmek için yükü ve dolayısıyla izi büyütmek faydalıdır. Ancak köşegen uzunluğu sertliği ölçülen parça veya tabaka kalınlığının en çok üçte ikisi kadar olmalıdır. Yük 1-120 kgf arasında değişebilir. Normal yük olarak 30 kgf seçilebilir. Vickers yönteminde büyük piramit açısından dolayı az derinliklere rağmen geniş diyagoneller elde edilir. Yüklü numune üzerinde kalma süresi yaklaşık 20 saniyedir. Bu süre sonunda baskı ucu numune üzerinden kaldırılır ve deney bitirilir [42].

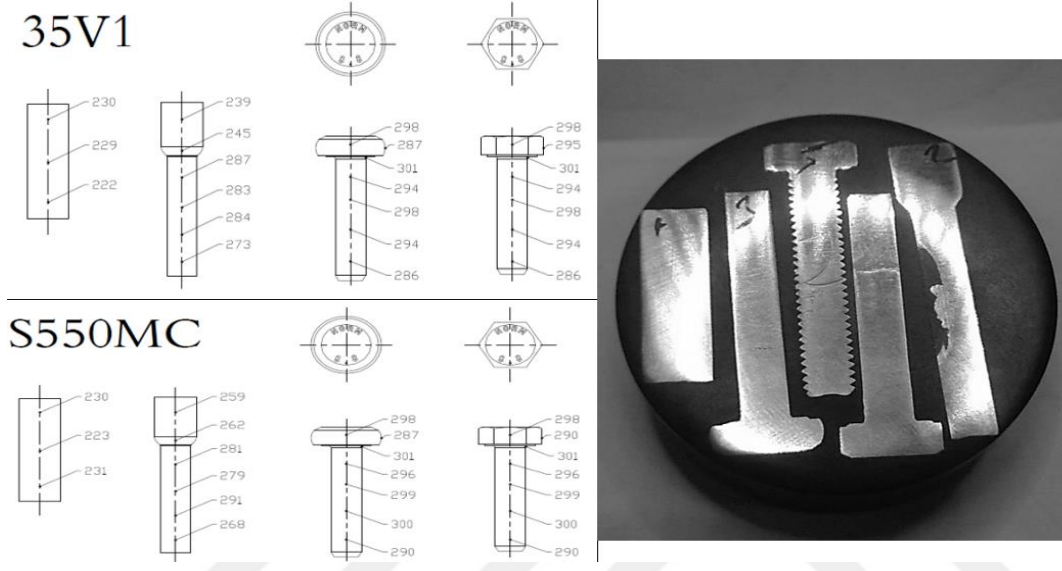


Şekil 5.11: Şematik vickers ölçme yöntemi

Burada F uygulanan yükü (kg), d iz köşegenlerinin ortalaması (mm) olup  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$  formülü ile hesaplanır. d1 ve d2 sırasıyla ölçülen köşegen uzunluklarıdır (Şekil 5.11).

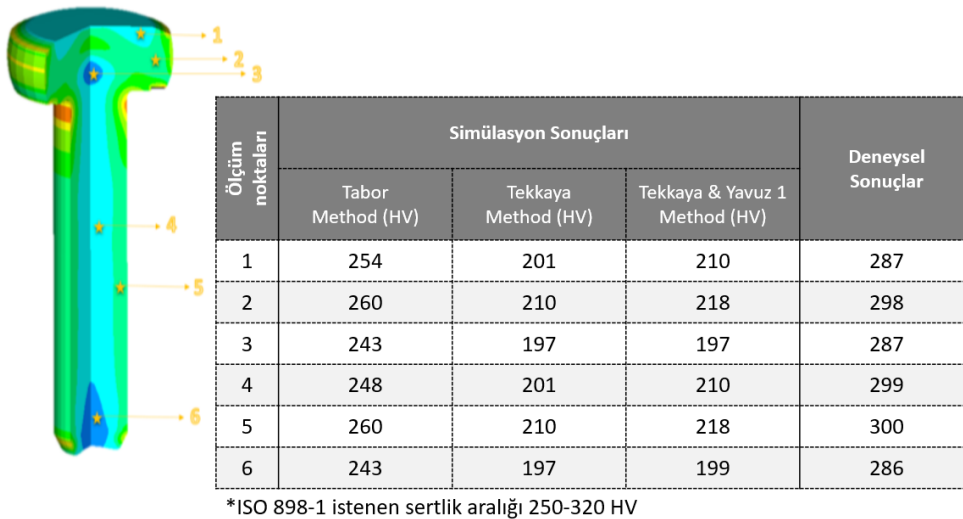
### 5.3.2 M8x30 DIN933 vickers sertlik sonuçları

35V1 ve S550MC malzemelerinden üretilmiş olan ürünlerden hazırlanan numuneler üzerinde yapılan testler ile istasyonlarda ki sertlik değişimleri Vickers cinsinden incelenmiştir. Her istasyondan çıkan iş parçası boylamsal olarak kesilmiş ve bakalite alınarak sertlik tesleri yapılmıştır. Şekil 5.12’de istasyonlara ait sertlik değerleri ve bakalite alınmış numune görselleri yer almaktadır.



Şekil 5.12 : İstasyonlara ait sertlik değerleri

Elde edilen veriler ışığında simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar tek bir görselde Şekil 5.13’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.13 : Simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması



Görüldüğü üzere ‘Tabor’ tahmin metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sadece lokal bölgelerde sertlik değerlerinin istenenden az bir miktar düşük kaldığı görülmekle birlikte, diğer sertlik tahmin metotlarından (Tekkaya, Tekkaya&Yavuz1) elde edilen sonuçlar ise ‘ISO 898-1’ standardında istenen ‘250-320 HV’ aralığından oldukça uzak olduğu gözlemlenmektedir. Üretimden elde edilen ürünlerde ki sertlik değerleri istenilen aralık içerisinde kalmıştır ve tabor bu sonuçlara en yakın değerleri tahmin etmiştir.

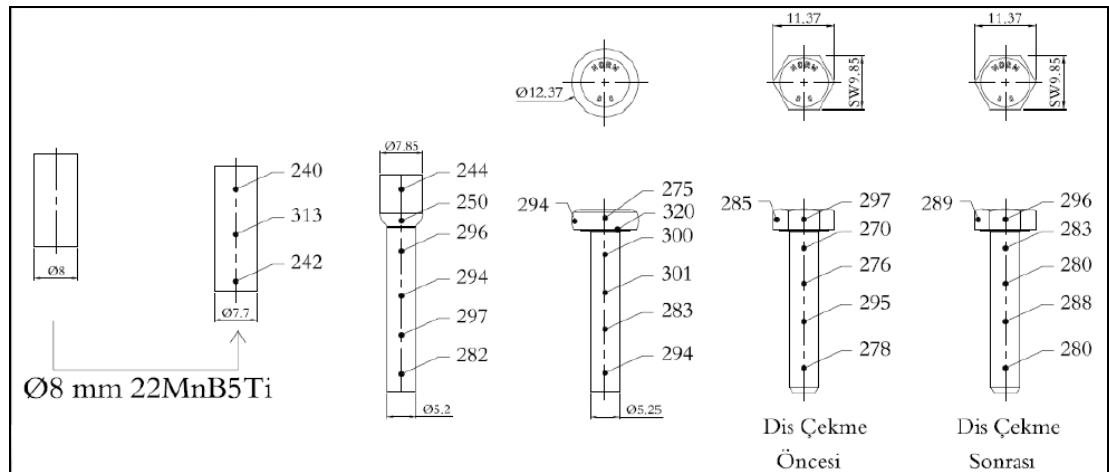
### 5.3.3 M6x30 DIN933 vickers sertlik sonuçları

Üretimden alınan numuneler üzerinde yapılan testler ile istasyonlarda ki sertlik değişimleri Vikers cinsinden incelenmiştir. Hazırlanan test numunesi şekil 5.14’da gösterilmektedir.



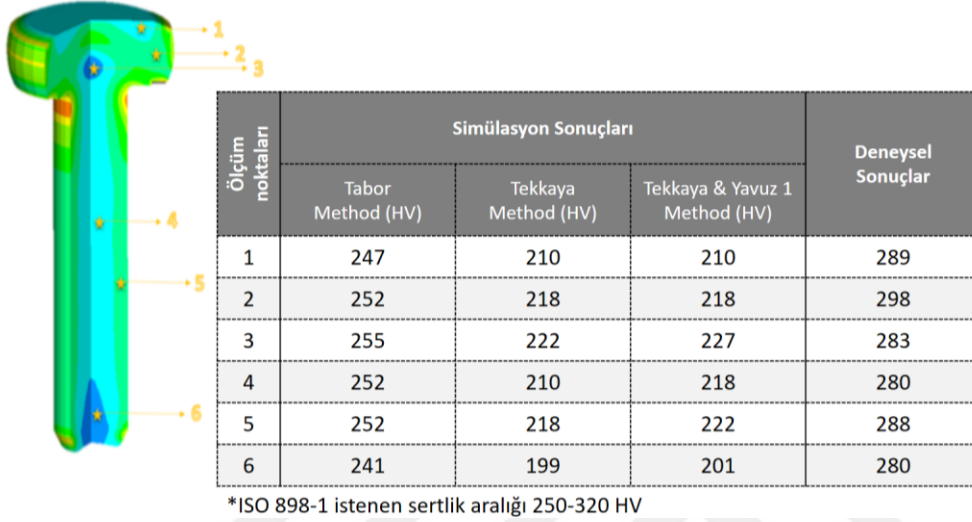
Şekil 5.14 : Test numunesi

Her istasyondan çıkan parçalar bakalite alınarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. İstasyonlardaki sertlik dağılımları şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : M6x30 DIN 933 istasyonlardaki sertlik dağılımı

Ortaya çıkan son üründe yapılan bölgesel sertlik ölçümleri sonucunda homojen bir sertlik dağılımının olduğu görülmüştür. Parametreleri değiştirilmiş özel istasyon tasarımı sonucunda ortaya çıkan sertlik aralığı 280-296 HV olarak ölçülmüştür. Standartta istenen sertlik aralığı olan 250-320 HV değerlerinin arasında kalınmıştır. Elde edilen veriler ışığında simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar tek bir görselde Şekil 5.16’da karşılaştırılmıştır.



**Şekil 5.16 :** M6x30 DIN 933 22MnB5Ti malzemesi ürün sertlik tahmini

Görüldüğü üzere ‘Tabor’ tahmin metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sadece lokal bölgelerde sertlik değerlerinin istenenden az bir miktar düşük kaldığı görülmekle birlikte, diğer sertlik tahmin metodlarından (Tekkaya, Tekkaya&Yavuz1) elde edilen sonuçlar ise ‘ISO 898-1’ standardında istenen ‘250-320 HV’ aralığından oldukça uzak olduğu gözlemlenmektedir. Üretimden elde edilen ürünlerde ki sertlik değerleri istenilen aralık içerisinde kalmıştır ve tabor bu sonuçlara en yakın değerleri tahmin etmiştir.

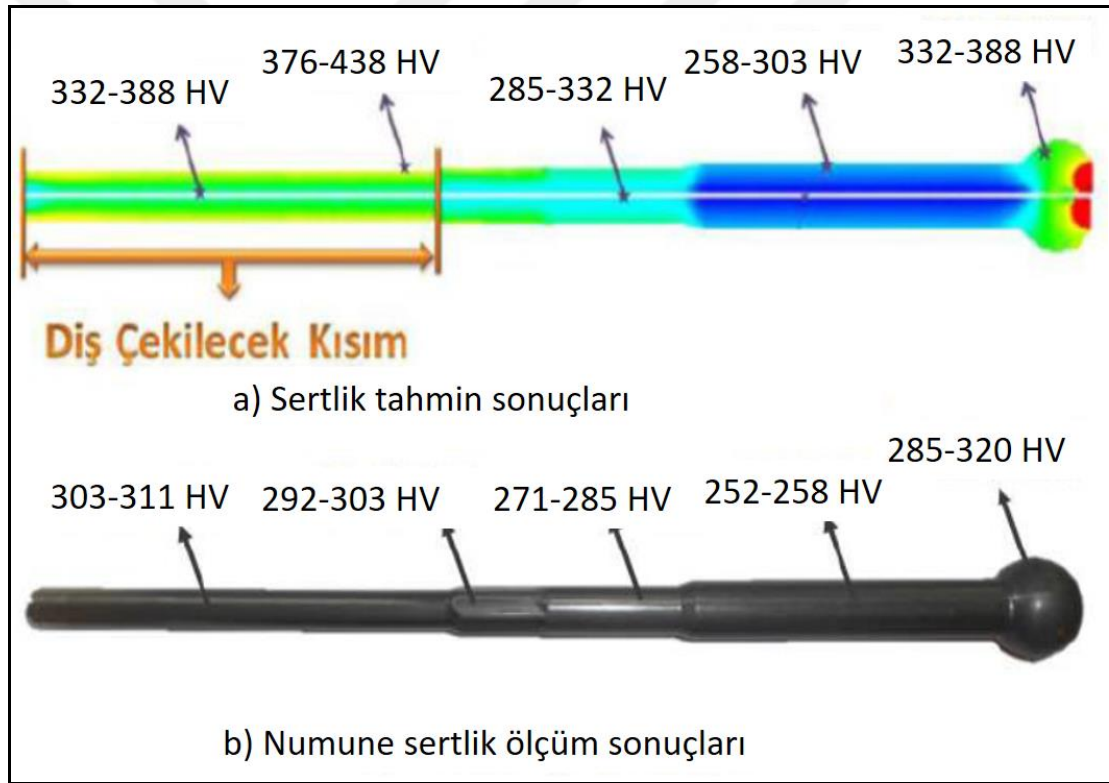
### 5.3.4 Ø10.9x297 rotmili vickers sertlik sonuçları

ISO 898-1 standardına ve müşteri taleplerine göre üzerinde çalışılan rot mili parçasının sertlik değerlerinin bölgesel olarak farklılık göstereceği parça dış yüzeyinden çekirdeğe kadar tüm bölgede sertlik değeri 250HV-320HV aralığında olması gerektiği belirlenmiştir. Bu gerekliliklerin doğrulanması için üretilen final parçası birçok noktadan incelenmiştir (şekil 5.17).



Şekil 5.17 : Rotmili sertlik numuneleri

Ürünün, simülasyon sonucundaki bölgesel sertlik tahminleri, üretilen numune üzerinde yapılan sertlik testleri sonucunda elde edilen gerçek değerlerin görselleri karşılaştırmalı olarak şekil 5.18’de verilmiştir.



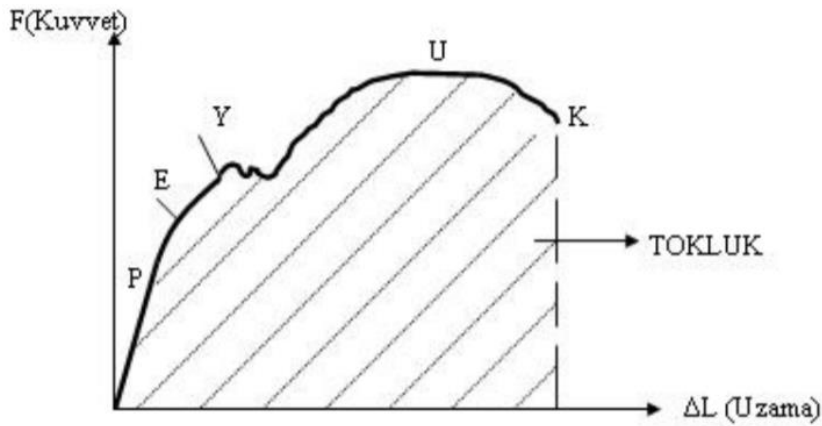
Şekil 5.18 : Simülasyon ile üretim numunelerinin sertlik ve gerilme açısından sonuçlarının karşılaştırılması

27MnSiVS6 malzemesinden üretilen  $\text{Ø}10.9 \times 297$  mm uzunluğundaki rotmilinde elde edilen simülasyon sonuçlarına göre sertlik dağılımı 258-388 HV aralığındadır. Üretim denemeleri sonucunda elde edilen numunelerdeki sertlik aralığı 252-320HV’dir. Testler sonucunda elde edilen sertlik değerleri yukarıda belirtilen standartın gerekliliklerini ve müşteri taleplerini karşılamaktadır. Elde edilen bu

sonuçlar gösteriyorki soğuk Şekillendirme prosesinin çalışma koşullarını sonlu elemanlar uygulamalarına düzgün aktarımı ile yakın sertlik tahminleri yapılabilabilmektedir.

#### 5.4 Çekme Deneyi

Çekme deneyinin amacı; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemektir. Bunun için boyutları standartlara uygun daire veya dikdörtgen kesitli deney parçası; çekme cihazına bağlanarak, eksenel ve değişken kuvvetler uygulanır. Çekme cihazı esas olarak; birbirine göre aŐaėı ve yukarı hareket edebilen, deney parçasının bağlandığı iki çene ve bunlara hareket veya kuvvet veren, bu iki büyüklüğü ölçen ünitelerden oluşur. enelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney parçasına değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvete karşılık gelen uzama kaydedilir.



Şekil 5.19 : Rotmili sertlik numuneleri [43]

Küçük kuvvet seviyelerinde uzama miktarı kuvvet ile doğru orantılıdır. Malzeme elastik davranıŐ içindedir; yani kuvvet kaldırılınca uzama sıfırlanır. Bu karakter P noktasına kadar devam eder (Şekil 5.19). Orantı limiti P den sonra lineer fonksiyon eğimini deėiŐtirir. Ancak elastik davranıŐ devam eder. Elastik davranıŐ E “Elastik Limiti” noktasında sona erer. E den sonra kalıcı; yani plastik deformasyonlar başlar. Kuvvet azaltıldığında lineer fonksiyona paralel bir yol izler. Ancak kuvvetin sıfır olduğu yerde deformasyon artık sıfır olmaz, belirli bir plastik deformasyon kalır.

Malzeme yüklenmeye devam edilirse Y noktasında akar. Akma noktasında kuvvet aynı iken büyük miktarda plastik deformasyon oluşur. Akan malzeme “alıŐma

sertleşmesi”ne uğrar ve daha mukavim hale gelerek daha fazla kuvvet alabilir hale gelir.

Bu malzeme üzerindeki kuvvet daha da artırılarak U noktasına ulaşılır. U noktası “maksimum gerilme” noktası olup, burada malzeme kesitinde lokal daralmalar başlar. Buna malzemenin “ boyun vermesi ” denir. Boyun verme de malzemenin çalışma sertleşmesine uğramasına sebep olur ve malzeme daha fazla gerilmeler alabilir; ancak boyun bölgesinde kesit alanı daraldığından taşıdığı net kuvvet azalır. Numune genellikle kontrolsüz bir şekilde K noktasına ilerler ve orada kopar.

Kuvvet-uzama eğrisinin altında kalan alan o numuneyi bozunuma uğratmak için gereken enerjiyi eşit olup; tokluk adı verilir [43].

Deneyin yapılışında, önce test edilecek malzemeden standartlara uygun bir çekme numunesi hazırlanır. Tez kapsamında üretilen parçalar dış çekildikten sonra numune olarak kullanılmıştır (Şekil 5.20).

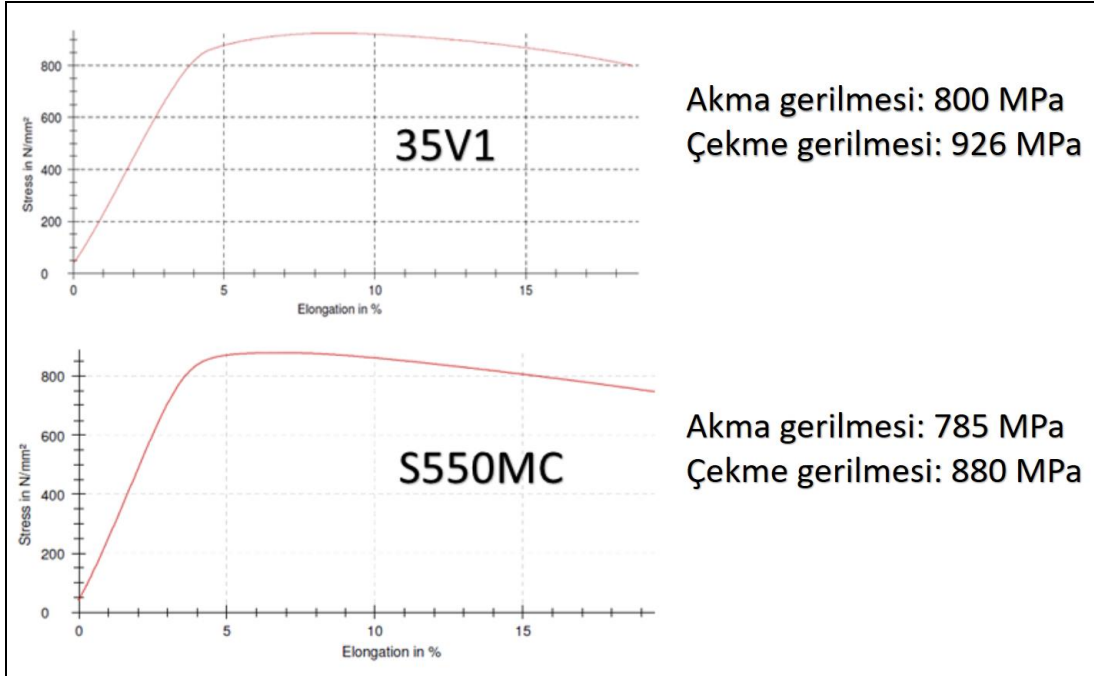


**Şekil 5.20 : Çekme test numuneleri**

Çekme deney makinesinin çeneleri arasına düzgün ve ortalayacak bir şekilde sıkıştırılan bu numuneler gittikçe artan bir yükü kopuncaya kadar çekilir. Bu esnada uygulanan  $F$  yükü ile buna karşı malzemenin gösterdiği uzamalar ( $\Delta L$ ) cihaz ile ölçülür. Deney sonucu elde edilen yük ( $F$ ) ve uzama ( $\Delta L$ ) değerlerinden yararlanılarak ( $F - \Delta L$ ) diyagramı elde edilir. Bu diyagrama çekme diyagramı da denir.

#### 5.4.1 M8 DIN933 çekme test sonuçları

35V1 ve S550MC malzemelerinden üretilmiş olan 5'er adet numuneye yapılan çekme test sonuçları şekil 5.21'da verilmektedir.

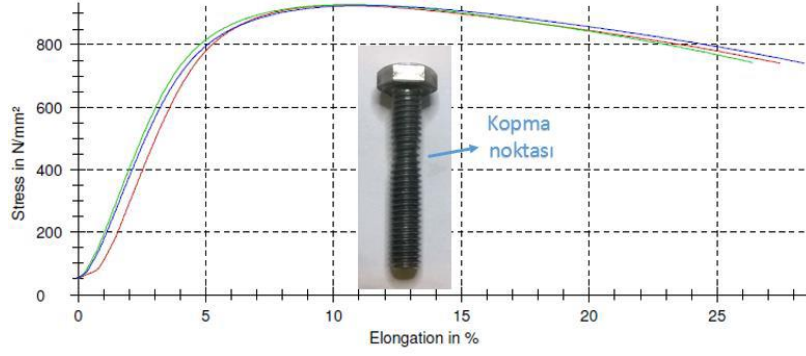


Şekil 5.21 : Çekme test sonuçları

Elde edilen sonuçlara göre 35V1 malzemesinden üretilmiş cıvataların akma gerilmesi 800 MPa, çekme gerilmesi 926 MPa ve kopma uzama oranı %14.9 olarak ölçülmüştür. S550MC malzemesinden üretilmiş cıvataların akma gerilmesi 785 MPa, çekme gerilmesi 880 MPa ve kopma uzama oranı %19.2 olarak ölçülmüştür. ISO 898-1 standardına göre gerekli olan minimum akma gerilmesi 640 Mpa ve minimum çekme gerilmesi 800 Mpa değerlerini sağladığı görülmüştür.

#### 5.4.2 M6 DIN933 çekme test sonuçları

22MnB5Ti malzemesinden üretilen M6x30 DIN 933 numunesine Zwick çekme test cihazında standartlara uygun şekilde çekme testi uygulanmıştır. Test sonuçları şekil 5.22'da gösterilmektedir.



**Şekil 5.22 : Çekme test sonucu**

5 adet numune üzerinde yapılan çekme testleri neticesinde numunelerin akma gerilmesi 715 MPa, çekme gerilmesi 927 MPa ve kopma uzama oranı %22.6 olarak ölçülmüştür. ISO 898-1 standardına göre gerekli olan minimum akma gerilmesi 640 MPa ve minimum çekme gerilmesi 800 MPa değerlerini sağladığı görülmüştür.

#### 5.4.3 Ø10.9x297 rotmili çekme test sonuçları

Üretilen rot mili numunesine Zwick çekme test cihazında standartlara uygun şekilde çekme testi uygulanmış ve diş kısmında oluşan kopma sonucunda 1067 MPa çekme gerilmesi değeri ölçülmüştür (şekil 5.23). akma gerilmesi 685 MPa ve kopma uzama oranı %23 olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.23 : Rotmili çekme test numunesi**

Kafa altı şaft bölgesi gerilme değerlerinin doğruluğundan emin olmak için şekil 5.24'de görüldüğü gibi ürün kafa altı şaft bölgesinden kesilerek özel çekme test numuneleri hazırlanmıştır.



**Şekil 5.24 : Rotmili şaft bölgesi çekme test numunesi**

Isıl işlemsiz olarak üretilen Ø10.9x297 rotmili parçasında kafa altı şaft bölgesinde elde edilen gerilme değerleri, akma gerilmesi 675 MPa, çekme gerilmesi 850-880 MPa ve kopma uzama oranı %23 olarak elde edilmiştir. Bu değerler istenen değerlerin alt sınırına yakın ancak istenen değerler aralığında kalmıştır. Bunun temel sebebi şaft bölgesinde deformasyon miktarının diğer bölgelere göre daha az olmasıdır.

## 5.5 Yorulma Deneyi

Makine parçaları ve yapı elemanları kullanılmaya başlanırken tekrarlanan gerilme ile çalışır. Yineleyen gerilme altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrarlama sayısı sonunda metal yüzeyinde bir çatlama ve bu çatlama sonucunda metalde kopma olayına neden olur. Bu olaya yorulma adı verilir. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların büyük bir kısmı yorulma olayının etkisi sonucudur.

Genelde yorulma olayında çatlama yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Yorulma gerilmesi gevrek bir kırılmadır, nerede ve ne zaman olacağını önceden tahmin etmek mümkün değildir. Yorulma kırılmalarını gevrek kırılmadan ayırt etmemizi sağlayan kırılma yüzeyindeki durak çizgileridir. Yorulma bütün malzemelerde gevrek türden kırılma meydana getirir. Tekrarlanan zorlamalar altında belirgin plastik şekil değiştirmeden çatlaklar ve bu çatlak zamanla yayılır, ani kırılma ile son bulur.

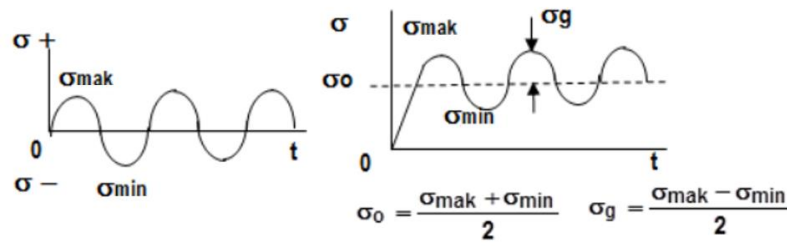
Yorulmaya genellikle içyapıda mevcut kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılımları neden olur. Bunun için yorulma olayının içyapıya ilgisi fazladır. İçyapıda mevcut kusurlar (çatlak, çentik, boşluk gibi) civarında gerilmeler ortalama gerilmeden daha büyüktür. Gerilmeden dolayı yerel plastik şekil değiştirmeler oluşur. Diğer taraftan dislokasyonlar hareket ederek kayma bantlarını oluştururlar ve bu bantlarda yüzeyde çıkıntılar ve çöküntülerin oluşmasında gerilme yığılımlarının nedenidir. Bu olaylar sonucunda malzeme pekleşir, gevrekleşir ve neticede mikro çatlaklar oluşur. Bu mikro çatlaklar zamanla ilerler ve ani yorulma kırılmasına neden olur.



Son zamanlarda özellikle önemli parçaların yorulma özelliklerini elde edebilmek için standart bir deney çubuğu yerine parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma şartlarına benzer şartlarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir [44].

Deneyin yapılışı:

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle saptanır. Bu yöntemde, deney numuneleri farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde aynı özellikte çoğunlukla 5...8 adet, numuneler kullanılır. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için ortalama gerilme ( $\sigma_{ort}$ ) veya alt gerilme ( $\sigma_{alt}$ ) sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği ( $\sigma_g$ ) seçilir (şekil 5.25).



Şekil 5.25 : Değişken zorlam şekilleri

İlk deney numunesi üst gerilme, genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney numunelerine ise azalan şekilde zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile Wöhler eğrisi (S-N, Gerilme-Ömür eğrisi) elde edilir. Diğer yandan belirli bir çevrim sayısından sonra ( $N_s$ : sınır çevrim sayısı) eğri sonsuz çevrim sayısına yaklaşıyor kabul edilebilir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için  $10 \times 10^6$  alınabilir. Deney numunesi, yorulma deney makinasının çenelerine salgısız dönecek şekilde bağlanır.

Deney numunesi, akma gerilmesinin altında farklı gerilmelere tabi tutulmakta ve gerilme değeri deney süresince sabit kalmaktadır. Periyodik yükleme sonucunda kırılmanın oluştuğu,  $N$  tekrar sayısı ölçülür. Bu şekilde  $P$ , yükü dolayısıyla  $\sigma_g$



M8 gerilme kesit alanı denklem (5.1)'de olduğu gibi hesaplanmaktadır (şekil 5.28).

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (5.1)$$

<i>Metrik ISO profiller (DIN 13 e göre)</i>						
<i>Anma çapı</i>	<i>Hatve (adım)</i>	<i>Dişdibi çapı</i>		<i>Ortalama vida çapı</i>	<i>Gerilme kesit alanı</i>	<i>Diş yüksekliği</i>
<i>d</i>	<i>P</i>	<i>d<sub>3</sub></i>	<i>D<sub>1</sub></i>	<i>d<sub>2</sub> = D<sub>2</sub></i>	<i>A<sub>s</sub> [mm<sup>2</sup>]</i>	<i>H<sub>1</sub></i>
3	0,5	2,387	2,459	2,675	5,03	0,271
4	0,7	3,141	3,242	3,545	8,78	0,379
5	0,8	4,019	4,134	4,480	14,2	0,433
6	1	4,773	4,917	5,350	20,1	0,541
8	1,25	6,466	6,647	7,188	36,6	0,677
10	1,5	8,160	8,376	9,026	58,0	0,812
12	1,75	9,853	10,106	10,863	84,3	0,947
14	2	11,546	11,835	12,701	115	1,083
16	2	13,546	13,835	14,701	157	1,083
20	2,5	16,933	17,294	18,376	245	1,353
24	3	20,319	20,752	22,051	353	1,624

Şekil 5.28 : Metrik profiller [45]

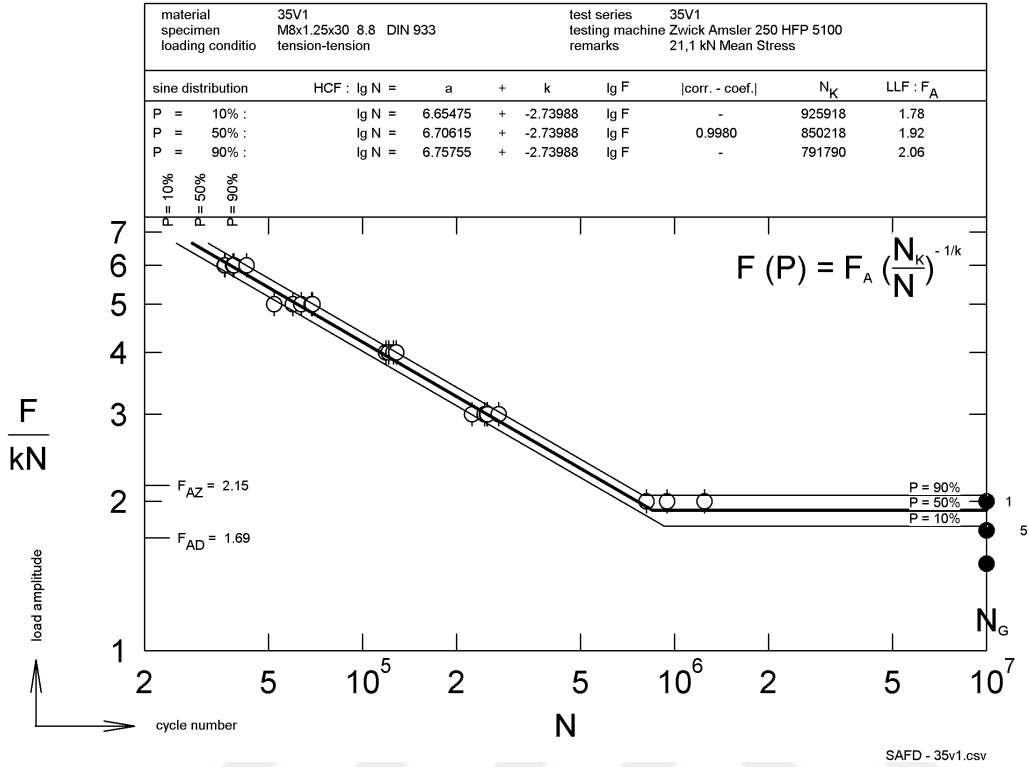
Gerilme kesit alanı hesaplandıktan sonra yorulma testinde kullanılacak olan ön yük belirlenir. Ön yük civatanın sahip olduğu akma gerilmesinin %75'i kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 5.2 ve denklem 5.3'te gösterilmektedir.

$$\sigma_{Ak} \%75 = \frac{F_{\text{ön}}}{A_s} \quad (5.2)$$

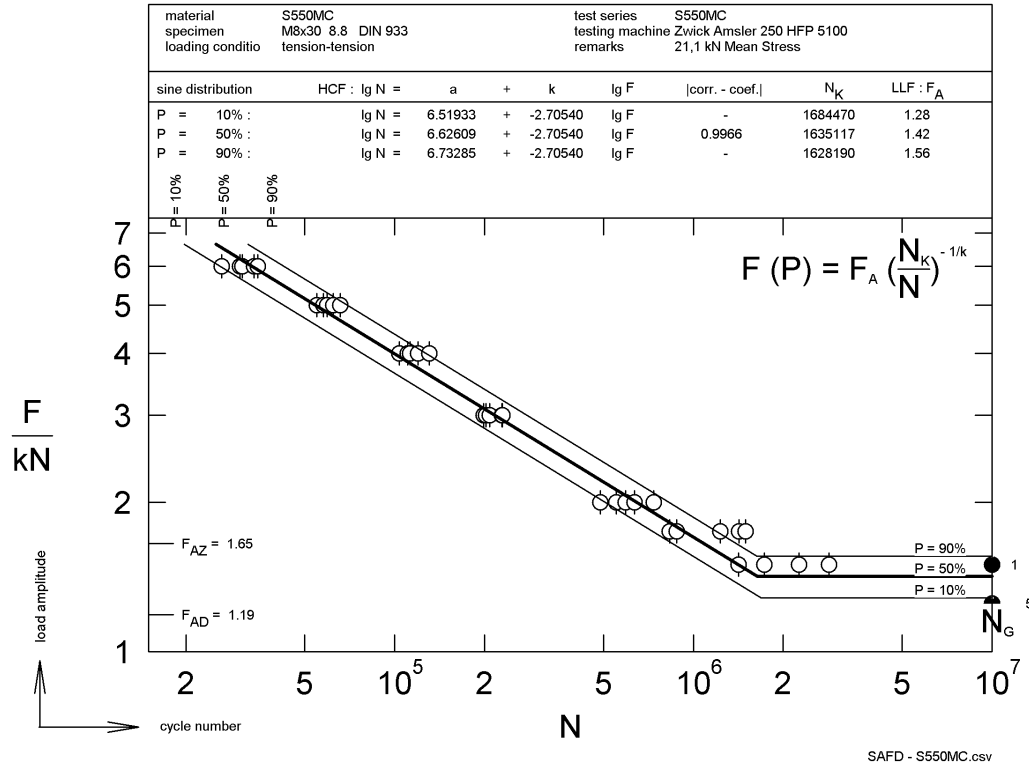
$$768 \text{MPa} * 0.75 = \frac{F_{\text{ön}}}{36.6 \text{ mm}^2} \implies F_{\text{ön}} = 21.1 \text{ kN} \quad (5.3)$$

Yapılan hesaplamalar sonucu 21.1 kN ön yük kullanılmıştır. Bu yük üzerine sırasıyla 6 kN, 5 kN, 4 kN, 3kN, 2kN dinamik yükler verilerek parçaların bu dinamik yükler altındaki çevrim sayıları hesaplanarak wöhler eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 5.29,

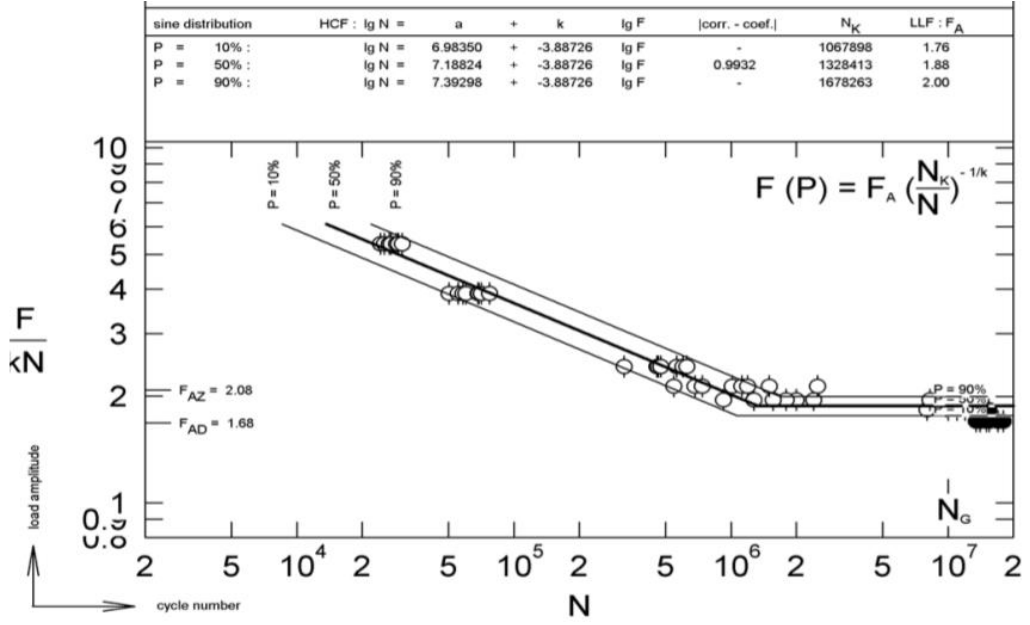
şekil 5.30 ve şekil 5.31’de sırasıyla 35V1, S550MC ve 23MnB4 konvansiyonel malzemelerden üretilmiş cıvataların wöhler eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 5.29 : 35V1 wöhler eğrisi

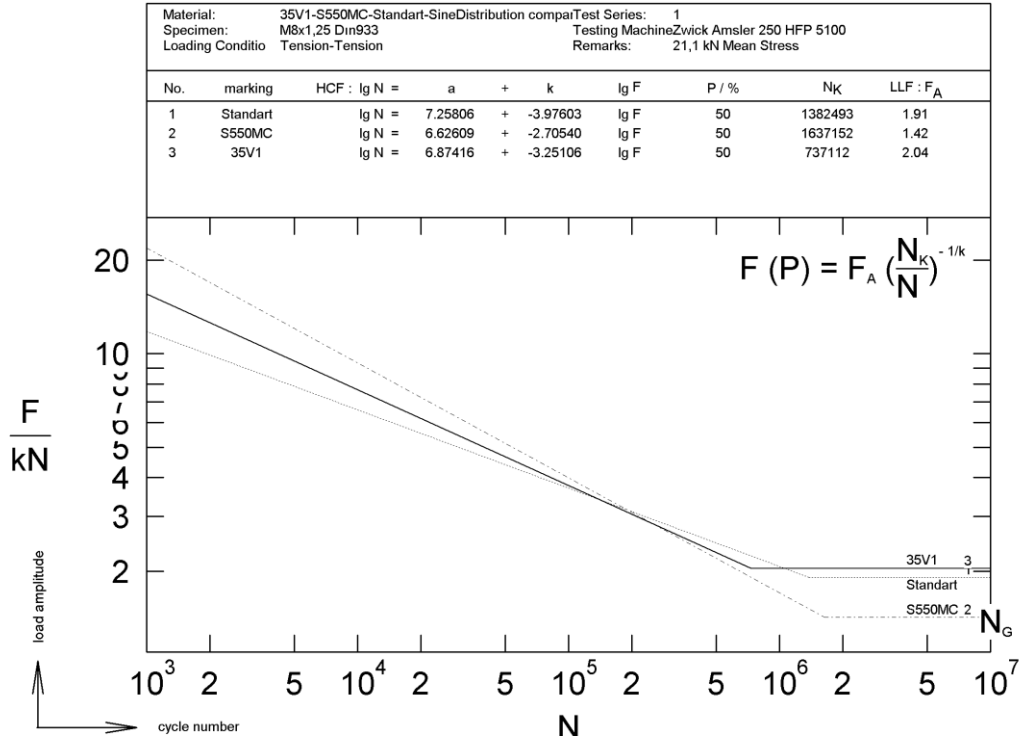


Şekil 5.30 : S550MC wöhler eğrisi



Şekil 5.31 : 35V1 wöhler eğrisi

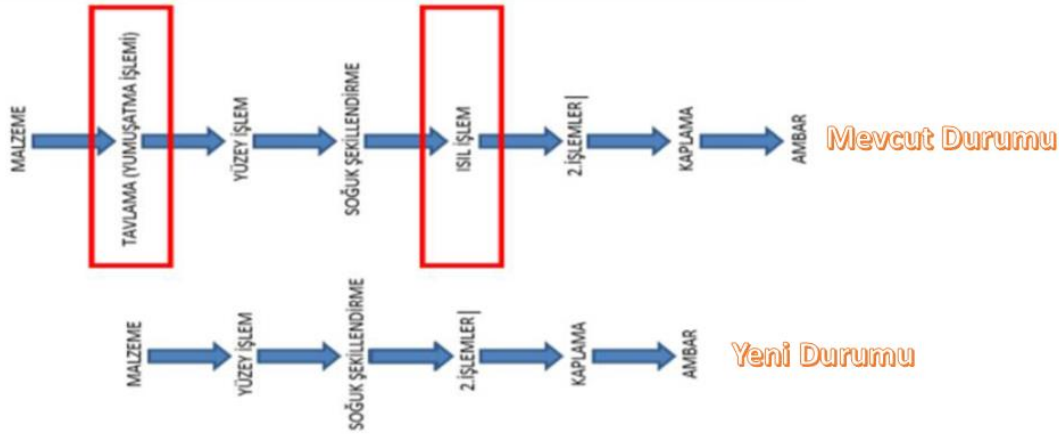
Yukarıda tek tek yorulma grafikleri gösterilmiş malzemelerin elde edilen yorulma ömürleri tek bir grafikte birleşik halde şekil 5.32’de gösterilmiştir. Böylece yorulma ömürlerinin karşılaştırması daha anlaşılır şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 5.32 : Yorulma test sonuçları

Buna göre sonsuz ömür bölgesinde %50 kopma ihtimali olarak en yüksek dayanım 2.04 kN dinamik yük ile 35V1 malzemesinden üretilen civataya aittir, bunu takiben 1.91 kN dinamik yük ile konvansiyonel malzemedan üretilen civata gelmektedir. En düşük dayanım ise 1.42 kN dinamik yük ile S550MC malzemesinden üretilen civatalara aittir.

Elde edilen test sonuçları; Firmamızda standart olarak izlenen üretim aşamaları şekil 5.33 (üstte) ve mikro alaşımlı malzemeler ile yapılan alternatif üretim basamakları şekil 5.33 (altta) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yeni üretim yöntemi ile tavlama ve ısıl işlem gibi üretim maliyetlerini önemli derecede arttıran proseslere bağımlılık ortadan kalkmıştır. Üretim basamakları önemli derecede azaldığı için üretilen parçaların firma içerisinde daha az dolaşması ve transfer esnasında doğacak hataların önlenmesini sağlamakla birlikte daha yalın üretim yapılması sağlanmaktadır.



Şekil 5.33 : Üretim aşamaları

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, rekabetteki en önemli unsur olan üretim maliyetlerini düşürmek için günümüz teknolojilerinden yararlanmak ve gelecekte potansiyel üretim şekli olabilecek metotları incelemeye alarak araştırmaktadır. Bunun için üretim prosesini olabildiğince yalın hale getirme gayretinde olup bu amaç doğrultusunda özel hammaddeler kullanarak 8.8 kalite sınıfındaki ürünlerin ısıl işleme girme zorunluluğunu ortadan kaldırmak amaçlanmıştır.

Bununla birlikte, bağlantı elemanları üretiminde gelişen teknoloji ürünü olan yeni nesil malzemeleri kullanarak gelecek yılların üretim yönteminin temellerini şimdiden atıp, yeni nesil üretim yöntemiyle imalatı gerçekleştirmek ve bu çalışmalar kapsamında üretimde yenilikçi bir proje olması sağlanmıştır.

Proje başlangıcının ardından malzeme tedariki için yurtiçi ve yurtdışı kaynaklı malzeme üreticileriyle görüşülmüş ve yapılan görüşmeler, fiyat teklifleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Daha sonra deneylerin ortalama sonuçları alınarak, malzemelerin akma noktaları tespit edilmiş ve akış eğrileri çıkarılmıştır. Sürtünmeyi azaltmak için basma numuneleri parafin kâğıdı ile kaplanmıştır. Proses tasarımları taslak çalışmaları da bu dönemde başlamıştır. Ayrıca denenecek olan malzemeler 0.001 1/s, 0.01 1/s, 0.1 1/s, 0.3 1/s genleme hızlarında akış eğrileri çıkarılmış ve sonlu elemanlar yazılımına (Simufact) adaptasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bütün basma testleri Norm Cıvata Ar-Ge merkezi bünyesinde bulunan dinamik test ve modelleme laboratuvarında ki 40 ton kapasiteli “Zwick Roell Z400RED” mekanik test cihazında yapılmıştır. Alınacak verilerin doğruluğu için cihazın önce uyarlık sınaması (compliance test) yapılmış ve böylece makinanın basma altında elastik genlemesi ve yataklarında ki boşluklar gibi etkenlerden kaynaklı hatalar bertaraf edilmiştir. Testler oda sıcaklığında yapılmıştır.

Bu projede üretilmesi düşünülen ürünler ile ilgili mevcut tasarımlardan farklı olarak inovatif tasarım çalışmaları yapılmıştır. Bu tasarımlar yapılırken final parçasında

elde etmeyi düşündüğümüz sertlik ve gerilme dağılımının homojen olması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve üretim denemelerinden elde edilen sonuçlar:

- 1) Soğuk şekillendirmeye üretilen 8.8 kalite sınıfındaki bağlantı elemanlarının mikro alaşımlı hammaddeler kullanılarak ısıl işlem operasyonu olmadan üretilebilirliği kanıtlanmıştır. Elde edilen test sonuçları üretilen numunelerin herbirinin ISO 898-1 standartındaki fiziksel ve mekanik özellikleri sağladığı ispatlanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır.
  - a) 35V1 ve S550MC malzemelerinden üretilen M8x30 DIN 933 ürününde elde edilen simülasyon sonuçlarına göre sertlik dağılımı 243-260 HV aralığındadır. Üretim denemeleri sonucunda elde edilen numunelerdeki sertlik aralığı 287-300 HV'dir.
  - b) 22MnB5Ti malzemesinden üretilen M6x30 DIN 933 ürününde elde edilen simülasyon sonuçlarına göre sertlik dağılımı 241-255 HV aralığındadır. Üretim denemeleri sonucunda elde edilen numunelerdeki sertlik aralığı 280-298 HV'dir.
  - c) 27MnSiVS6 malzemesinden üretilen Ø10.9x297 mm uzunluğundaki rotmili ürününde elde edilen simülasyon sonuçlarına göre sertlik dağılımı 258-388 HV aralığındadır. Üretim denemeleri sonucunda elde edilen numunelerdeki sertlik aralığı 252-320 HV'dir.
  - d) Bu sonuçlar soğuk şekillendirme prosesinin çalışma koşullarını sonlu elemanlar uygulamalarına düzgün aktarımı ile çok yakın sertlik tahmini yapılabildiğini kanıtlamaktadır.
  - e) Malzeme akış analizleri çerçevesinde simülasyon modelleriyle üretim numunelerinin birbirleri ile tam örtüştüğü görülmüştür.
- 2) Bu standarta göre 8.8 kalite sınıfına ait bir bağlantı elemanı en az 640 MPa akma ve 800 MPa çekme dayanımına sahip olması gerekmektedir.
  - i) 35V1 malzemesinden üretilen M8x30 DIN 933 ürününün, üretim numunelerinde akma gerilmesi 800 Mpa ve çekme gerilmesi 926 Mpa olarak ölçülmüştür.



- ii) S550MC malzemesinden üretilen M8x30 DIN 933 ürününün, üretim numunelerinde akma gerilmesi 785 MPa ve çekme gerilmesi 880 MPa olarak ölçülmüştür.
- iii) 22MnB5Ti malzemesinden üretilen M6x30 DIN 933 ürününün, üretim numunelerinde akma gerilmesi 715 MPa ve çekme gerilmesi 927 MPa olarak ölçülmüştür.
- iv) 27MnSiVS6 malzemesinden üretilen Ø10.9x297 mm uzunluğundaki rotmili ürününün, üretim numunelerinde çekme gerilmesi diş bölgesinde 1067 Mpa, kafa altı bölgesinde ise 850 Mpa olarak ölçülmüştür.
- 3) M8 DIN 933 numunelerinde yapılan yorulma testlerinde kullanılmak üzere her bir hammadde tipi için ortalama 30 test yapılmıştır. Tüm numuneler Delta Protect KL100+VH301(2kat) ile kaplanmıştır. Elde edilen Wohler eğrileri sinüs dağılımı kullanılarak çizdirilmiştir ve 21.1 kN ortalama kuvvet kullanılmıştır. Buna göre sonsuz ömür bölgesinde %50 kopma ihtimali olarak en yüksek dayanım, 2.04 kN dinamik yük ile 35V1 malzemesinden üretilen civataya aittir, bunu takiben 1.91 kN dinamik yük ile konvansiyonel malzemedan üretilen civata gelmektedir. En düşük dayanım ise 1.42 kN dinamik yük ile S550MC malzemesinden üretilen civatalara aittir.

Burada akla gelen ilk soru S550MC ve 35V1 malzemelerinden üretilen parçalarda sertlik, akma ve çekme gerilmeleri gibi bir çok mekanik özellik birbirine bu kadar yakın çıkmışken neden en düşük yorulma ömrü S550MC malzemesinden üretilen parçalarda elde edilmiştir?

**Çizelge 5.1:** Karşılaştırmalı kompozisyon tablosu

Malzeme	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Cu %	Al %	Ti %	V %
35V1	0.105	<b>0.340</b>	1.452	0.010	0.008	0.051	0.013	0.025	0.013	0.032	0.017	0.037
23MnB4	0.230	<b>0.300</b>	1.200	0.025	0.025	0.300	-	-	0.200	-	-	-
S550MC	0.337	<b>0.264</b>	0.622	0.009	0.002	0.048	0.002	0.003	0.005	0.033	0.002	0.041

Tüm tasarım, üretim şekli ve test koşulları aynı iken malzeme içerikleri incelendiğinde farkın malzemelerin ihtiva ettikleri alaşım elementlerinden kaynaklanmış olabileceği üzerine düşünülebilir. Malzemelerin kompozisyonları

incelendiğinde Si elementinin oranları ortaya çıkan yorulma ömrü tablosundaki sıralamada etkili olabileceğinden şüphelenilmektedir (çizelge5.1). Ancak kesin bir yargıda bulunmak için detaylı incelemeler yapılması tavsiye edilmektedir. Bu konuyla ilgili olarak literatürde bazı çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Ve Si elementinin yorulma ömrü üzerine olumlu etkileri olduğunu ileri süren çalışmalar ile karşılaşılmıştır [46].

Bu çalışmadan elde edilen kazanımlar, kullanılan paket programlar ile birlikte en uygun tasarım ve ürünün ortaya çıkartılabilmesi için gerekli etütler üzerine durulmuştur. Mevcut üretimde kullanılan tasarımlar modifiye edilerek proses iyileştirme çalışmaları ve yeni tasarımlar araştırılmış, ulusal ve uluslararası pazarda ticari anlamda katma değer kazandırabilecek modellemeler ve analizler üzerine çalışılmıştır. Çalışma tamamlandığında ısıl işlem prosesinin zorunluluğunu ortadan kaldırarak üretim maliyetlerini ciddi ölçüde düşürmüştür. Bunun geri dönüşümü enerji verimliliği alanında olup, CO<sub>2</sub> salınımının azaltılmasını da sağlayıp dünya kaynaklarını daha tasarruflu, çevreci ve temiz kullanarak üretim yapmaya imkan verecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Çapan, L.**, (1991). Giriş, Dövülebilirlik, Açık Kalıpta Dövme. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Plastik Şekillendirme-III Kalıp Teknolojisi Seminer Notları. İstanbul.
- [2] **Altan, T., Ngaile, G., Shen, G.**, (2005). Cold and Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 2. ASM International.
- [3] **Karadagli, Ö.** (2014). “Simulation Applications In Cold Forging Production”, Yüksek Lisans Tezi. Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye.
- [4] **R. Gaydos**, (1965). “Making and Selecting Steel for Cold Forging”; Metal Progress 06, pp104-12
- [5] **Urlau U., Hasler S., Kruse J.**, (2005). “Micro-alloyed steels for non heat treated ball studs and pins”; International Conference on Steels in Cars and Trucks, Wiesbaden, p.374/83
- [6] **Janicek L., Petruska J., Maros B., Ruzs S.**, (2002). “Cold forming of bolts without thermal treatment”; Journal of Materials Processing Technology 125-126 (2002) 341-346
- [7] **A.S. Wifi.**, (1998). On the finite element analysis of workability limits in metal forming processes, in: Proceedings of the AMPT’98, Vol.2, Kuala-Lumpur, Malaysia
- [8] **Rao, S., S.**, (2011). The Finite Element Method in Engineering, Fifth Edition, Chapter 1. Elsevier Inc.
- [9] **Url-1** <<http://makine2.kocaeli.edu.tr/malzeme/isilislemler.pdf>>
- [10] **Dubar L., Bricout J.P., Wierre C., Meignan P.**, (1998). “New surface processes for cold forging of steels”; Surface and Coatings Technology 102 (1998) 159-167
- [11] **Bricout J.P., Hivart P., Oudin J., Ravalard Y.**, (1990). “New testing procedure of zinc phosphate coatings involved in cold forging of cylindrical steel billets”; Journal of Materials Processing Technology Vol.24 Issue C, p.3-12
- [12] **Brethenoux G., Bourgain E., Pierson G., Jallon M., Secordel P.**, (1996). “Cold forming processes: some examples of predictions and design optimization using numerical simulations”; Journal of Materials Processing Technology 60 (1996) 555-562
- [13] **Nedform Academy Metal Forming Technology From Theory To Practice Conference**, (2014). Nedschroef, Herentals p.200-201
- [14] **Sang-Kon L., Dae-Woon K., Myeong-Sik J., Byung-Min K.**, (2012). “Evaluation of axial surface residual stress in 0.82-wt% carbon steel wire during multi-pass drawing process considering heat generation”; Materials and Design 34 (2012) 363-371
- [15] **Url-2** <[http://malzememuh.cbu.edu.tr/db\\_images/site\\_117/file/su%20vermepdf](http://malzememuh.cbu.edu.tr/db_images/site_117/file/su%20vermepdf)>

- [16] **Url-3** <<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-vegerinim/>>
- [17] **Url-4** <<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-vegerinimin-matematiksel-gosterimleri/>>
- [18] **Url-5** <<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/elastik-limit/>>
- [19] **Url-6** <<http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi/gerilim-gerinimegrisi/>>
- [20] **Altan, T., Ngaile, G., Shen, G.,** (2005). Cold And Hot Forging: Fundamentals And Applications, Chapter 7. ASM International
- [21] **Edward M. Mielenik** (1991). Metal Working Science and Engineering”; McGraw- Hill.
- [22] **A.E. Tekkaya** “A Guide for Validation of FE – Simulations in Bulk Metal Forming”, The Arabian Journal of Science, vol:30, Number:1C, pp:113-136.
- [23] **X. Tan** (2002). “Comparisons of Friction Models in Bulk Metal Forming”; Tribology International, vol:35, pp: 385 - 393
- [24] **T. Wanheim, N. Bay, A. S. Petersen** (1974). “A Theoretically Determined Model for Friction in Metal Working Processes”, Wear, vol:28, pp: 251-258.
- [25] **J.B. Hawkyard, W. Johnson** (1967). “An Analyses of the Changes in Geometry of Short Hollow Cylinders During Axial Compression”; International Journal of Mechanical Sciences, vol:9 No: 163, p:163-182.
- [26] **T. Schrader, M. Shirgaokar, T. Altan** (2006). “Analyses of the Double Cup Extrusion Test for Evaluation of Lubricants”; Proceedings of the 4th JSTP International Seminar on Precision Forging, pp: 77 – 82.
- [27] **İsbir, S. Ş.,** (2002). “Finite Element Analysis of Trimming”, M.S. Thesis, p.24, Middle East Technical University, Ankara.
- [28] **MSC.Marc User’s Guide Volume B** (2003). Element Library, Marc Analysis Research Corporation.
- [29] **Rao, S., S.,** (2011). The Finite Element Method in Engineering, Fifth Edition, Chapter 1. Elsevier Inc.
- [30] **Valberg, S., H.,** (2010). Applied Metal Forming – Including FEM Analysis, Chapter 14. Cambridge University Press.
- [31] **Valberg, S., H.,** (2010). Applied Metal Forming – Including FEM Analysis, Chapter 14. Cambridge University Press
- [32] **Url-7** <[http://www.netformmetal.com/simufact\\_forming.asp](http://www.netformmetal.com/simufact_forming.asp)>  
**NETFORM Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. ti., 2014.**
- [33] **Blickwede, J. Donald** (1975). “Cold Extruding Steel”, Source Book on Cold Forming; American Society for Metals, pp1-6.

- [34] **Weymueller, R., Carl** (1962). “Cold Extrusion of Steels: Its Promises and Problems”; Source Book on Cold Forming; American Society for Metals.
- [35] **T. Murota, T. Jimma, K. Kato** (1970). “Analysis of Axisymmetric Extrusion”; JSME 13 pp 76-86.
- [36] **K. Lange** (1985). “Hanbook of Metal Forming”, Society of Manufacturing Engineers, McGraw Hill.
- [37] **Beer F., Johnston, E.** (1998). “Mechanics of Materials”; McGraw Hill.
- [38] **Tekkaya, A.E.** (2000). “An Improved Relationship between Vickers Hardness and Yield Stress for Cold Formed Materials and its Experimental Verifications”, Annals of the CIRP, Vol.49.
- [39] **Yavuz B., Tekkaya A.E.** (2000). “Correlations Between Vickers Hardness Number and Yield Stress of Cold-Formed Products, 9th International Conference on Machine Design and Production - UMTIK 2000, 13-15.
- [40] **C. Önder** (2004). “Analysis of Bolt Production by Metal Forming”, M.S. Thesis, METU, Ankara.
- [41] **International Cold Forging Group** (2001). “Steels for Cold Forging – Their Behaviour and selection”, ICFG Document no: 11/01.
- [42] **Url-8** <[http://malzememuh.cbu.edu.tr/db\\_images/site\\_117/file/sertlik.pdf](http://malzememuh.cbu.edu.tr/db_images/site_117/file/sertlik.pdf)>  
**Manisa Celal Bayar Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü**
- [43] **Url-9** <[http://web.harran.edu.tr/assets/uploads/other/files/MekanikDeneyFoyu\\_1.pdf](http://web.harran.edu.tr/assets/uploads/other/files/MekanikDeneyFoyu_1.pdf)>
- [44] **Url-10** <[http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/89610\\_20471920831.pdf](http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/89610_20471920831.pdf)>
- [45] **Url-11** <<http://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Civata.pdf>>
- [46] **Osamu U.**, (2017). “Effect of Si content on fatigue fracture behavior of hot-rolled high-silicon steels” Journal of Physics: Conference Series

**EKLER**



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Tayfur YAVUZBARUT  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 19.11.1988 / İzmir  
**E-posta** : tayfur.yavuzbarut@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Tasarım Uzmanı – Norm Grup (2016 – halen)
- Tasarım Mühendisi – Norm Grup (2012 – 2016)

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yavuzbarut T., Kılınçdemir N. E., İnce U.** (2014). “Isıl İşlemsiz Yüksek Mukavemetli Rot Millerinin Mikro Alaşımli Çeliklerden Soğuk Dövülmesi”. *İkinci Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IISS)*, Nisan 1-3, Karabük, Türkiye.
- **Yavuzbarut T., Kılınçdemir N. E., Tanrıkulu B., Can C. F.** (2017) “Manufacturing with Micro-Alloyed Steels: Economically & Ecologically” *Fastener Technology International Magazine* December 2017/ January 2018

### DiĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Tübitak Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı (2014). Proje No: 3130748  
Proje Adı: 8.8 Kalite Standartındaki Bağlantı Elemanlarının Mikro Alaşımli Çelikler Kullanılarak Isıl İşlemsiz Üretilmesi