

**İKİ FARKLI METODLA ÜRETİLEN YAPISAL ÇELİK
PROFİLLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

MURAT DÖKMECİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERKAN APAY**

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ BAŞLIĞI BURAYA YAZILMALIDIR

Murat Dökmeci tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Gürcan SAMTAŞ

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Volkan ONAR

Pamukkale Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 25/07/2024

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

25.07.2024

(İmza)

Murat DÖKMECİ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Serkan APAY'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

25 Temmuz 2024

Murat DÖKMECİ



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
BEYAN.....	III
TEŞEKKÜR.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİL LİSTESİ.....	VIII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER	XII
ÖZET	XIII
ABSTRACT	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. TÜRKİYE ÇELİK BORU PROFİL PİYASASI.....	3
2.1. MEVCUT DURUM	3
2.2. TÜRKİYE ÇELİK BORU ÜRETİMİ	4
3. YAPI ÇELİKLERİ VE ÇELİK MALZEMELER	6
3.1. DEMİR-ÇELİK TARİHÇESİ	7
3.2. DEMİR CEVHERİNİN TANIMI VE SINIFLANDIRMASI	9
3.3. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	10
3.3.1. Önemli Çelik Grupları	13
3.3.1.1. Karbon Çelikleri	13
3.3.1.2. Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelikler (HSLA)	14
3.3.1.3. Düşük Alaşımli Çelikler	15
3.3.1.4. Yapı Çelikleri	16
4. METALLERİN PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİ VE ÇELİKLERİN SOĞUK ŞEKİLLENDİRMESİ.....	21
4.1. PLASTİK (ŞEKİL VERME) DEFORMASYON	21
4.1.1. Plastik Deformasyonun (Şekil Değiştirmenin) Esasları	21

4.2. MEKANİK ESASLAR	23
4.3. PLASTİK ŞEKİL VERMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	25
4.3.1. Sıcaklığın Etkisi	25
4.3.1.1. Soğuk Şekillendirme.....	26
4.3.1.2. Ilık Şekillendirme	26
4.3.1.3. Sıcak Şekillendirme.....	27
4.3.2. Deformasyon Hızının Etkisi.....	28
4.3.3. Heterojen Şekil Değişiminin Etkisi	28
4.3.4. Sürtünme ve Yağlamanın Etkisi.....	29
5. ÇELİK PROFİLLERİN ÜRETİMİ	30
5.1. YÜKSEK FREKANS KAYNAK TEKNİĞİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	30
5.1.1. Yüksek Frekans Kaynağı Metotları.....	31
5.1.1.1. Kontaklı Yüksek Frekans Kaynağı.....	31
5.1.1.2. İndüksiyon Boinilyle Yüksek Frekans Kaynağı.....	31
5.1.2. Yüksek Frekans Kaynağında Empeder Özellikleri.....	32
5.2. KLASİK YÖNTEMLE BORUDAN PROFİL ÜRETİMİ	33
5.2.1. Hammadde Girişi ve Dilme Hattı.....	33
5.2.2. Besleyici ve Akümüilasyon	34
5.2.3. Form Grubu (Sacının Şekillendirilmesi)	35
5.2.4. Kaynak Grubu	36
5.2.4.1. Kılavuz Makaraları (Merdanesi).....	36
5.2.4.2. Kaynak İşlemi	37
5.2.4.3. Çapak Kazıyıcı.....	37
5.2.5. Soğutma Grubu.....	38
5.2.6. Kalibre Grubu.....	38
5.2.7. Türk Kafası Makara Grubu (Türkankof).....	39
5.2.8. Kesim İşlemi	39
5.2.9. Paketleme.....	40
5.3. ESNEK SOĞUK ŞEKİLLENDİRME İLE DİREKT PROFİL ÜRETİMİ .	40
5.3.1. Nasıl Çalışır	40
5.3.2. Form Verme	42
5.3.3. Zaman Hesaplanması	45
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	47

6.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ.....	47
6.2. YÜKSEK FREKANS İNDÜKSİYON KAYNAĞI İLE KARE PROFİL ÜRETİMİ	47
6.2.1. Kaynak Parametreleri ve Hat Hızları.....	48
6.3. ÇEKME DENEYİ (TS 138 EN 10002-1)	49
6.4. AĞIZ GENİŞLETME DENEYİ.....	49
6.5. SERTLİK DENEYİ	50
6.5.1. Sertlik Deneylerinin Amacı.....	50
6.5.2. Sertlik Ölçme Yöntemleri	50
6.5.2.1. Rockwell Sertlik Deneyi.....	50
6.5.2.2. Brinell Sertlik Deneyi.....	53
6.5.2.3. Vickers Sertlik Deneyi.....	54
6.5.2.4. Knoop Sertlik Deneyi.....	55
6.6. METALOGRAFİK İNCELEME.....	56
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
7.1. ÇEKME TESTİ.....	59
7.2. SERTLİK TESTLERİ.....	61
7.3. AĞIZ GENİŞLETME TESTİ SONUÇLARI.....	62
7.3.1. Hat Hızının Etkisi	63
7.3.2. Kaynak Gücünün Etkisi.....	64
7.4. MİKRO KESİT İNCELEMESİ (TS EN ISO 17639:2014).....	67
8. SONUÇLAR	72
9. KAYNAKLAR.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Türkiye dikişli çelik boru/profil üretimi (1000 ton) (Vurdu, 2022).	4
Şekil 2.2. Türkiye dikişli çelik boru üretiminin ürün çeşitlerine göre dağılımı (Vurdu, 2022).	5
Şekil 3.1. Demir cevherleri (a) Magnetit (b)Hematit (c) Geotit (d) Limonit (e) Siderit.	10
Şekil 4.1. Plastik deformasyonda meydana gelen gerilmeler ve şekil değişimleri (Çapan, 2020).	22
Şekil 4.2. Çekme, basma, kayma, eğme, burma kuvvetlerinden biri veya birkaçının aynı zamanlı uygulanma örnekleri (Çapan, 2020).	22
Şekil 4.3. Birim şekil değişimi (Groover, 2010).	24
Şekil 4.4. Gerçek şekil değişimi (Groover, 2010).	24
Şekil 5.1. Yüksek frekans kaynak ünitesi.	31
Şekil 5.2. İndüksiyon bobini (Orhan, 2008).	32
Şekil 5.3. Empeder (Orhan, 2008).	32
Şekil 5.4. Bant besleyici (Makina, 2024).	34
Şekil 5.5. Akümülayon (Makina, 2024).	35
Şekil 5.6. Form grubu (Pearce, 1991).	36
Şekil 5.7. Kılavuz merdanesi (Pearce, 1991).	36
Şekil 5.8. Üçlü kaynak grubu (Pearce, 1991).	37
Şekil 5.9. Çapak sıyrıcı (Pearce, 1991).	37
Şekil 5.10. Soğutma grubu (Pearce, 1991).	38
Şekil 5.11. Kalibre grubu (Pearce, 1991).	38
Şekil 5.12. Türk kafaları makara grubu (Pearce, 1991).	39
Şekil 5.13. Testere grubu (Pearce, 1991).	39
Şekil 5.14. Paketleme (Pearce, 1991).	40
Şekil 5.15. Hat akış yönü (Halmos, 2005).	41
Şekil 5.16. Sac büküm ve şekillenme yönleri (Halmos, 2005).	41
Şekil 5.17. Şekillenme aşamaları (Li vd., 2018).	42
Şekil 5.18. Blok 1 (Li vd., 2018).	43
Şekil 5.19. Blok 2 (Li vd., 2018).	43
Şekil 5.20. Blok 3 (Li vd., 2018).	44
Şekil 5.21. FCF genel görünüm (Li vd., 2018).	45
Şekil 6.1. Konik ve bilye uçlu batıcı uç.	51
Şekil 6.2. Sertlik ölçüm cihazı.	51
Şekil 6.3. Rockvell sertlik ölçümünün şematik gösterimi.	51
Şekil 6.4. Her 0,002 mm batışta sertlik değeri değişiminin şematik gösterimi	52
Şekil 6.5. Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi.	53
Şekil 6.6. Vickers sertlik deneyinin şematik gösterimi	55
Şekil 6.7. Knoop sertlik deneyinin şematik gösterimi	56
Şekil 7.1. Hat hızı ve kaynak parametre ekranı.	59
Şekil 7.2. Çekme test numuneleri (kaynaklı bölge).	60
Şekil 7.3. Çekme test numuneleri (kaynaksız bölge).	60
Şekil 7.4. Numunelerin kaynaksız yüzey çekme testi değerleri.	61
Şekil 7.5. Ağız genişletme testi sonucu 40 m/dak (120kW).	65
Şekil 7.6. Ağız genişletme testi sonucu 60 m/dak (150kW).	65

Şekil 7.7. Ağız genişletme testi sonucu 80 m/dak (180kW).....	66
Şekil 7.8. Ağız genişletme testi sonuçları.....	66
Şekil 7.9. Ağız genişletilip, yırtma testi sonuçları.....	67
Şekil 7.10. B40 x 1000 büyütme.....	68
Şekil 7.11. B60 x 1000 büyütme.....	68
Şekil 7.12. B80 x 1000 büyütme.....	69
Şekil 7.13. F40 x 1000 büyütme.....	69
Şekil 7.14. F60 x 1000 büyütme.....	70
Şekil 7.15. F80 x 1000 büyütme.....	70
Şekil 7.16. B40/60/80 x1000 büyütme mikroyapı.....	71
Şekil 7.17. F40/60/80 x1000 büyütme mikroyapı.....	71



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Sektörel bazda çelik kullanımı.	6
Çizelge 3.2. Yapısal çelik kimyasal özellikleri (Şanal, 2020).	19
Çizelge 3.3. Yapısal çelik mekanik özellikleri (Şanal, 2020).	20
Çizelge 6.1. Malzeme mekanik özellikleri.	47
Çizelge 6.2. Kaynak parametreleri hat hızları.	48
Çizelge 6.3. Rockwell sertlik skalaları.	53
Çizelge 7.1. Bant genişlik tablosu.	58
Çizelge 7.2. Kaynaksız yüzey numunelerin çekme testi sonuçları.	61
Çizelge 7.3. Numunelerin düz yüzey sertlik ölçümleri.	62
Çizelge 7.4. Numunelerin köşe radyüs sertlik ölçümleri.	62



KISALTMALAR

TS	Türk Standartları
FCF	Flexible Cold Forming
EN	Euro Norm
ISO	International Standardization Organization
DIN	Deutsches Institut für Normung
B406080	Klasik Yöntemle 40, 60 ve 80 mt/dakika hızla imalat
F406080	Yeni metodla (FCF) ile 40, 60 ve 80 mt/dakika hızla imalat
M.Ö	Milattan Önce
ERW	Elektrik direnç kaynağı
HF	Yüksek frekans
SAE	Society of Automotive Engineers
AISI	American Iron and Steel Institute
HSLA	High Strength Low Alloy Steel
MS	Milattan Sonra
RR	Tam deokside olmuş
U	Deokside edilmemiş
+N	Normalizasyon tavı
+AR	Haddelendiği gibi
R	Yarı deokside edilmiş
BDT	Bağımsız Devletler Topluluğu
RSD-C	Rockwell Sertlik Değeri C
HRB	Rockwell B Sertlik Değeri

SİMGELER

R _m	Çekme Dayanımı
R _e	Akma Dayanımı
A ₈₀	Uzama (L ₀ : 80 mm)
Fe	Demir
C	Karbon
Mn	Mangan
Cr	Krom
Mo	Molibden
MPa	Megapaskal
kW	Kilowatt
St	Stahl
S	Structure
%	Yüzde
Cu	Bakır
Si	Silisyum
N	Azot
P	Fosfor
J	Joule
T _ç	Çalışma sıcaklığı
T _b	Benzeş sıcaklık
T _e	Malzemenin ergime sıcaklığı
F	Uygulanan yük
ε	Brim şekil değişimi
σ	Asal gerilme
°C	Santigrat derece

ÖZET

İKİ FARKLI METODLA ÜRETİLEN YAPISAL ÇELİK PROFİLLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Murat DÖKMECİ

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Serkan APAY

Temmuz 2024, 74 sayfa

Çelik boru ve profiller ekonomik yöntemlerle seri üretime uygunluğuyla kullanımı çok fazla yaygın olan malzemelerdir. Bu çalışmada sıcak haddelenmiş yapısal çelik saclardan iki farklı üretim metodu ve yüksek frekans indüksiyon kaynak yöntemiyle üretilen boyuna kaynaklı yapısal çelik profiller incelenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen çelik profillere tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanarak mekanik özelliklerin incelenmesi yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespitinde, ağız genişletme (TS EN ISO 8493), sertlik testi ve çekme deneyi (TS 138 EN 10002-1) teknikleri kullanılmıştır. Ayrıca farklı üretim metotları ile üretilen yapısal çelik profillerin mikroyapı incelemeleri de yapılmıştır.

Üretimi yapılan profillerin kaynaklı ve kaynaklı olmayan yerlerden çekme testi sonuçları değerlendirilmiş olup farklılık olup olmadığına bakılmıştır. İki farklı metodla farklı proses ayarlarıyla üretilen numunelerin kaynaklı olmayan yerlerinden yapılan çekme testi sonuçlarının hangilerinin hammadde değerine yakın olduğu saptanmıştır.

Çalışmada iki farklı metodun profil büküm yerlerine etkisini görebilmek için sertlik ölçümleri yapılarak ağız genişletme testi ile standardın istediği kriteri sağlayıp sağlamadığına bakılmıştır. Aynı profilin iki farklı metotla üretimlerde kullanılan hammadde miktarları ve kalıp ayar zamanları da incelenmiştir.

Bu çalışmaların sonucunda iki farklı üretim metodun karşılaştırılması yapılarak yapısal çelik profil üretiminde kullanılan en iyi üretim metodunun yeni yöntem olan esnek soğuk şekillendirme ile direkt profil üretimi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: FCF, Soğuk Şekillendirme, Profil, Mikro Yapı, Mekanik Özellikler

ABSTRACT

EXAMINATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEEL PROFILES PRODUCED BY TWO DIFFERENT METHODS

Murat DÖKMECİ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing
Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan APAY

July 2024, 74 pages

Steel pipes and profiles are materials that are widely used due to their suitability for mass production with economical methods. In this study, longitudinally welded structural steel profiles produced from hot-rolled structural steel sheets using two different production methods and high frequency induction welding method were examined. Mechanical properties of manufactured structural tubes are examined by conducting destructive and nondestructive test methods. Tube expanding test (TS EN ISO 8493), hardness test and tensile test (TS 138 EN 10002-1) methods are applied to determine mechanical properties. On the other hand, microstructural properties of tubes manufactured by two different methods.

The tensile test results of the produced profiles from welded and unwelded areas were evaluated and it was checked whether there were any differences. It was determined which of the tensile test results from unwelded areas of the samples produced with different process settings with two different methods were close to the raw material value. In the study, hardness measurements were made to see the effect of the two different methods on the profile bending areas and it was checked whether the criteria required by the standard were met with the mouth expansion test. The raw material amounts and mold setting times used in the production of the same profile with two different methods were also examined.

As a result of these studies, two different production methods were compared and it was determined that the best production method used in the production of structural steel profiles was the new method of direct profile production with flexible cold forming.

Keywords: FCF, Cold Roll Forming, Tube, Micro Structure, Mechanical Properties

1. GİRİŞ

Yapısal çelik boru/profiller konstrüksiyon, inşaat, tarım makineleri, otomotiv, mobilya ve diğer makine sanayilerinde yaygın kullanımları olan malzemelerdir. Dolayısıyla farklı sanayilerdeki tercihlik çelik boru ve profil üretiminin önemini daha da artırmıştır. Çelik, elementlerden öncelikle demir ve karbonun bir araya gelerek oluşturduğu önemli bir alaşım grubudur. Hammaddelerine kolay ulaşılması ve ucuzluğu, bilinen ve uygulanabilir üretim teknolojileri ile düşük üretim maliyeti diğer alaşım malzemelere göre büyük kullanım üstünlüğü kazandırmaktadır. Günümüzde binlerce çelik kalitesi bulunmaktadır. Bu çelik kalitelerinin her biri kullanım amacına göre, üstün mekanik özellikleri, korozyon dayanımı ve yüksek enerji tasarrufu sağlamaları nedeniyle üretilmektedir. Bu çeşitlilik sayesinde çelik endüstrisi tüketicilerin istediği özelliklere göre istenen bir etkiyi göz önüne alarak üretim yapabilmektedirler. Modern çeliklerde malzemenin uzun ömürlü kullanıma sahip olması da başka önemli bir etkidir. Çelikler iyi kaynaklanabilirlik, geri dönüşebilirlik, ve uygun kullanım maliyeti itibarı ile avantajlıdır. Bu özellikleri içeren en önemli çelik grubu ise yapı çelikleridir.

Çelik kare kutu profiller, seri üretime yatkın farklı kalınlık ve kalitelerde sıcak haddeli yapısal çeliklerden kaynaklı olarak yüksek frekans kaynağı ile direkt profil ve borudan profil metotlarıyla üretilmektedir (Buckholt & Chen, 2018). Çelik profillerin farklı üretim metotları ile üretilmesi ile mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve sertlik deneyleri (EN 10002-1), ağız genişletme (EN ISO 8493), yassılma (EN ISO 8492) testleri ile birlikte mikroyapı incelemeleri yapılmaktadır.

Çelikten üretilen boru ve profiller; üretim metodlarına, ebatlarına ve kullanım yerlerine göre farklı şekillerde tasnif edilmektedirler.

Kullanım Yerlerine Göre Sınıflandırma:

- a) Sondaj boruları
- b) Su boruları
- c) Doğal gaz boruları
- d) Petrol boruları

e) Isıya ve yüksek basınca dayanıklı borular

f) Mekanik profil ve borular

g) Yapısal profiller

Ebatlarına Göre Sınıflandırma:

a) Küçük çapta borular (dış çap $\leq 168,3$ mm)

b) Orta büyüklükte çapta borular (dış çapı 168,3 mm ile 406,4 mm arası)

c) Büyük çapta borular (dış çap $\geq 406,4$ mm)

Üretim Yöntemine Göre Sınıflandırma:

a) Dikişli/kaynaklı boru ve profiller

a1. Boyuna kaynaklı/dikişli boru ve profiller

a2. Spiral kaynaklı borular

b) Kaynaksız borular

Dünyada çelik boru üretimlerinin yaklaşık %70'i dikişli borulardan, geri kalan kısmı ise dikişsiz borulardan oluşmaktadır. 2015 yılı verilerine göre, dünya boru ve boru parçaları üretiminin yaklaşık %75'i Asya ülkelerinde gerçekleştirilmektedir. Buna ek olarak, BDT ülkeleri ve Kuzey Amerika da boru ve boru bağlantı parçaları üretimi açısından önemli bölgelerdir. Çelik boru sektöründe talep genellikle genel ekonomik koşullara bağlı olarak değişmektedir. Altyapı çalışmalarının devam ettiği, az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde talebin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Ayrıca, inşaat, otomotiv, enerji, mobilya ve makine sanayilerindeki gelişmeler de çelik boru talebini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almaktadır (Vurdu, 2022).

Bu çalışmada, yüksek frekans indüksiyon kaynağı ile iki farklı üretim metodu kullanılarak, boyuna dikişli/kaynaklı kare çelik profillerin üretimi yapılmıştır. Üretilen çelik profillere muayene yöntemlerinden tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanmış olup aynı zamanda mekanik özelliklerin incelenmesi yapılmıştır. Çalışmanın neticesinde yapısal kare çelik profillerin imalatında tercih edilen ve mekanik özellikleri daha üstün olan üretim metodu belirlenmiştir.

2. TÜRKİYE ÇELİK BORU PROFİL PİYASASI

2.1. Mevcut Durum

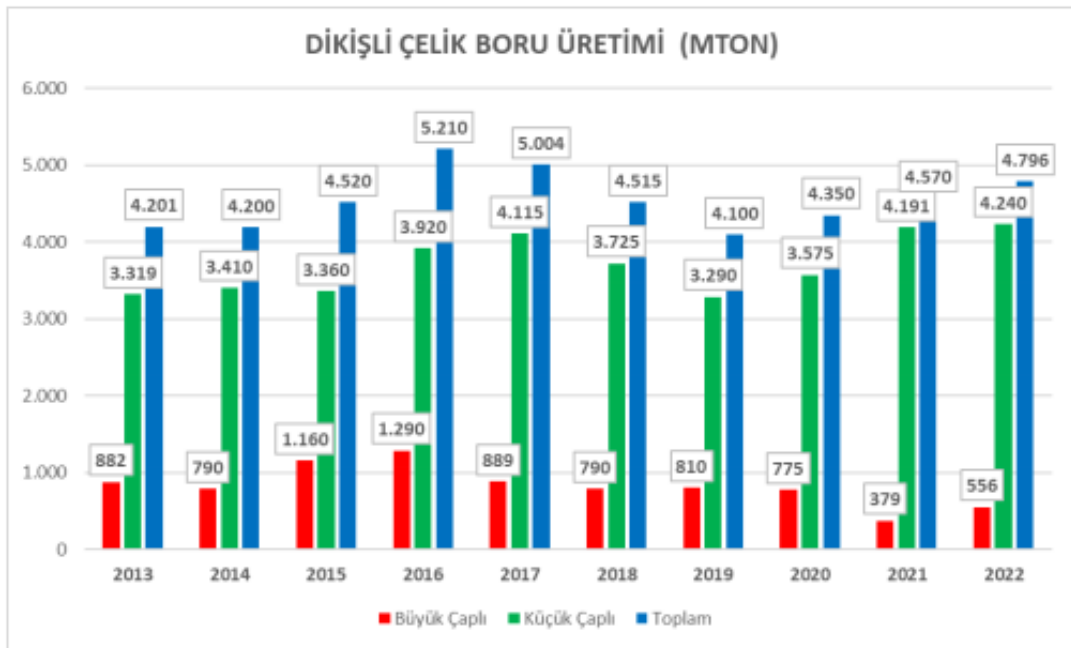
Türkiye'de çelik boru/profil üretimi, Sümerbank'ın Alman Mannesmann ortaklığıyla 1957 yılında İzmit'te kurduğu fabrikayla başladı. Diğer Türk yatırımcılar da 1958 yılından itibaren bu adımı takip etti. Sektör, ilk büyük atılımını 1980'li yılların ilk yarısında gerçekleştirdi. Türk ekonomisinin dış ticarete açılması, çelik boru ihracatındaki önemli artışlarla sektöre büyük bir ivme kazandırdı. 2000'li yılların başında yapılan yatırımlar ve yabancı sermaye girişleriyle sektör, ikinci büyük büyüme atılımını gerçekleştirdi. Günümüzde Türkiye çelik boru sektörü, doğrudan ve dolaylı olarak 50.000 kişiyi istihdam eden ve düzenli üretim gerçekleştiren 35 firma tarafından yönetilen önemli bir sanayi kolu konumundadır. Üretim kapasitesi, ürün kalitesi ve maliyet yapısı itibarıyla sektör, yüksek ihracat potansiyeline sahiptir. Küresel ekonomik koşullar ve talep durumuna bağlı olarak, sektörde üretilen ürünlerin yaklaşık %40'ı ihraç edilmektedir. (Vurdu, 2022).

Çelik boru üretiminde kullanılan düz çelik ürünlerinin yaklaşık %70'i yerli üreticilerden temin edilirken, geri kalan kısım özellikle Rusya, Ukrayna ve Avrupa Birliği ülkelerinden ithal edilmektedir. Sektörün iç piyasa ve dış pazarlarda rekabet gücünü koruyabilmesi, maliyetin önemli bir bileşeni olan hammadde temininin uygun koşullarda sağlanmasına bağlıdır. Türkiye'deki çelik boru üretim tesislerinin tamamı özel sektöre aittir ve üreticiler genellikle Marmara, Karadeniz ve Akdeniz bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Sektörde çalışanların yaklaşık %78'i mavi yakalı işçilerden oluşurken, geri kalan %22'si beyaz yakalıdır. Türkiye çelik boru sektörünün yıllık 7,5 milyon ton üretim kapasitesi, ülke içindeki talebi oldukça aşmaktadır ancak kapasite kullanım oranları son yıllarda %64 düzeyinde seyretmektedir. Türkiye çelik boru/profil sektörü, üretim kapasitesi, bilgi birikimi, teknolojik altyapı ve iş gücüyle her türlü çelik boru üretimini gerçekleştirebilecek konumdadır. Otomotiv endüstrisinde kullanılan hassas soğuk çekme borulardan petrol sanayinde kullanılan kuyu borularına ve doğal gaz, petrol, enerji nakil hatlarında kullanılan büyük çaplı, yüksek özellikli borulara kadar geniş bir yelpazede üretim yapmakta ve bu ürünleri ihraç etmektedir. 2021 yılı üretim verilerine göre, Türkiye'de üretilen çelik boruların yaklaşık %91'i küçük ve orta çaplı borulardan oluşmakta, %9'u ise büyük çaplı borulardan meydana gelmektedir.

Türkiye'de çelik boru üretiminin neredeyse tamamı dikişli borulardan oluşmaktadır. Dikişli çelik boru üretim teknolojisi, özellikle gelişmiş ülke pazarlarına yapılan satışlarla birlikte önemli bir noktaya gelmiştir. Ancak dikişsiz çelik boru üretim teknolojisi, yüksek yatırım maliyetleri ve iç piyasada ve ihracatta rekabet etme zorluğu sebebiyle gelişme gösterememiştir. Dolayısıyla, Türkiye'de dikişsiz çelik boru üretimi için büyük ölçekli bir yatırımın kısa vadede beklenmediği bilinmektedir. Dikişli çelik borularda ise makine ekipman modernizasyonu, ürün çeşitliliği, kalite ve kapasite artırımı amacıyla yapılan yatırımlar devam etmektedir. (Vurdu, 2022).

2.2. Türkiye Çelik Boru Üretimi

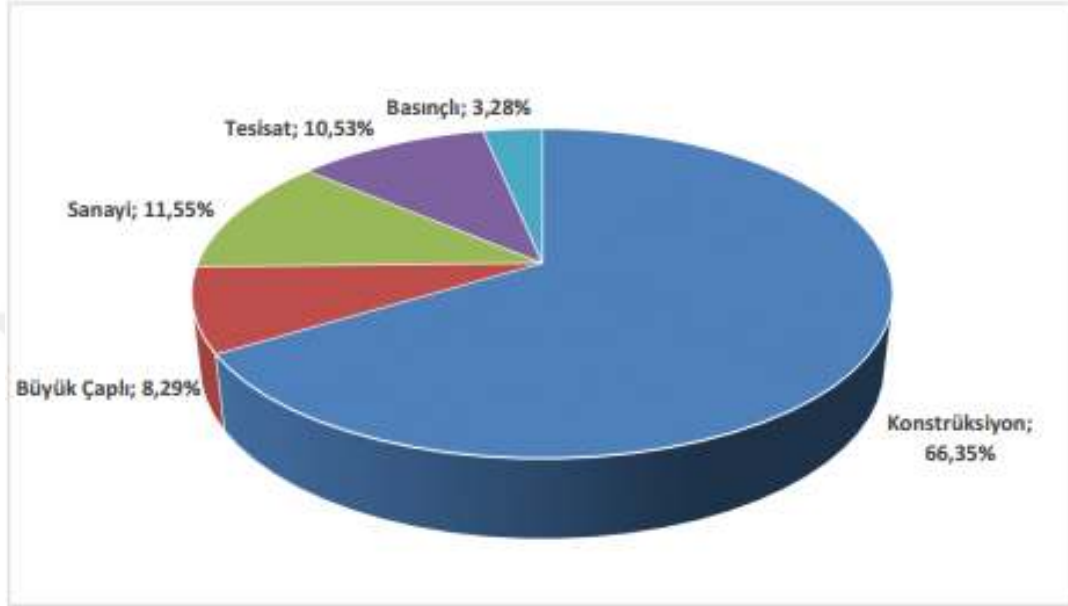
Türkiye'de çelik boru/profil üretimi, 2000'li yılların başından itibaren sektöre yapılan yoğun yatırımlarla büyük bir ivme kazanmıştır. 2000-2007 yılları arasında sürekli olarak artan çelik boru üretimi, 2008 ve 2009 yıllarında küresel ekonomik krizin etkisiyle gerilemiş olsa da sonraki dönemlerde ekonominin toparlanmasıyla yeniden yükselişe geçmiştir (Vurdu, 2022).



Şekil 2.1. Türkiye dikişli çelik boru/profil üretimi (1000 ton) (Vurdu, 2022).

2010 yılında Türkiye, Avrupa'nın en büyük dikişli çelik boru üreticisi konumuna yükselerek yaklaşık 3,5 milyon ton üretim gerçekleştirmiştir. İtalya ve Almanya'nın ardından Türkiye, Avrupa'da en fazla çelik boru üreten ülkeler arasında yer almaktadır. 2022 yılında ise çelik boru sektörü, 4,8 milyon ton üretimle Avrupa'da liderliğini

sürdürmektedir. Dünya çelik boru üretimi sıralamasında Türkiye, Çin, Rusya ve Güney Kore'nin ardından dünyanın dördüncü büyük dikişli çelik boru üreticisi olarak yer almaktadır. Türkiye'nin Avrupa ve dünya çelik boru sektöründeki bu önemli konumu göz önüne alındığında, ülkenin bu alanda güçlü bir oyuncu olduğu açıkça görülmektedir. (Vurdu, 2022).



Şekil 2.2. Türkiye dikişli çelik boru üretiminin ürün çeşitlerine göre dağılımı (Vurdu, 2022).

Türkiye'de çoğunlukla küçük ve orta ölçekli borular üretilmektedir. Büyük çaplı çelik borular ise genellikle su, petrol ve doğal gaz iletim hatlarında kullanılır ve toplam üretimin %8,29'unu oluşturur. Çelik boru sektöründe yurt içi talep ve tüketim, genel ekonomik koşullara bağlı olarak şekillenmektedir. İnşaat, otomotiv ve dayanıklı tüketim malzemeleri sanayilerindeki ilerlemeler ile altyapı yatırımları, çelik boru/profil talebini belirlemektedir. 2000'li yılların başında 1,3 milyon ton olan yurt içi tüketim, 2010 yılına gelindiğinde %47 oranında artarak 1,9 milyon tona kadar yükselmiştir. 2022 yılında ise yurt içi çelik boru profil tüketimi yaklaşık 2,82 milyon ton seviyesinde gerçekleşmiştir. (Vurdu, 2022).

3. YAPI ÇELİKLERİ VE ÇELİK MALZEMELER

Demir ve çelik, günlük yaşamın her alanında karşımıza çıkan en yaygın metal ve alaşımlardır. Tarihte, insanlar demiri altın, bakır ve tunç gibi metallerden sonra kullanmaya başlamışlardır. Günümüzde demir, sanayinin temel hammaddesi olarak kabul edilmekte ve ülkelerin ekonomik kalkınmasında önemli bir rol üstlenmektedir. Ülkelerin ekonomik gelişmişlik göstergeleri arasında kişi başına düşen gayri safi milli hasıla ile birlikte kişi başına düşen demir-çelik tüketimi de önem taşımaktadır. Çelik, demir ve karbonun oluşturduğu en önemli alaşım grubudur. Bol ve ekonomik hammadde kaynakları ile yaygın ve bilinen üretim teknolojileri, düşük malzeme maliyeti sunarak diğer metaller ve alaşımlara göre büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca çelik, geri dönüşebilirlik ve üstün kaynak kabiliyeti gibi özelliklerle de ön plana çıkmaktadır. Çelik aynı zamanda geri dönüşebilirlik, üstün kaynak kabiliyeti ile çok büyük fiyat avantajına sahiptir. Çelik teknolojik öneme sahip çok önemli bir malzemedir. Kullanım alanları oldukça geniş ve çeşitlidir (Aytaç vd., 2018). Çizelge 3.1’ de çeliğin kullanım alanlarına göre sektörel bazdaki dağılımı verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sektörel bazda çelik kullanımı.

Sektörler	Çelik Kullanımı %
Boru/Profiller	13
Diğer	5
Gemicilik	1
İç Uygulamalar	4
İnşaat	24
Makine Mühendisliği	13
Metal Eşyalar	13
Otomotiv	18
Yapısal Uygulamalar	9
TOPLAM	100

Görüleceği üzere en büyük kullanım alanını inşaatır ve bunu da otomotiv sektörünü takip ettiği etmektedir.

3.1. DEMİR-ÇELİK TARİHÇESİ

Demir-çelik endüstrisi, dünyadaki en temel ve en köklü üretim sektörlerinden biridir. İnsanlık tarihinin en eski sanayi faaliyetlerinden biri olan demir ve çelik üretimi, ilk çağlardan bu yana varlığını sürdürmektedir. Çelik üretiminin gelişimi, demirin insanlar tarafından keşfedilip kullanılmaya başlandığı dönemlerden çok öncesine dayanmaktadır ve bu dönem genellikle Demir Çağı olarak adlandırılmaktadır (M.Ö. 1000'lerden itibaren). Yaklaşık 4000 yıl önce, demir insan kültürü ve medeniyetinde temel bir rol oynamış ve o zamandan beri demir cevherini ekonomik olarak işlenebilir hale getirme çabaları süregelmiştir. (Duman, 2008).

Demirin dünyanın çeşitli yerlerinde (Afrika, Güneydoğu Avrupa, Güney Hindistan, Çin) milattan önce yaklaşık 1000 yıl kadar önce keşfedilmiş olması muhtemeldir. Tarihsel önem kazanmadan önce bile, uygarlıkların demirin nasıl elde edileceğini bildikleri ve bu metali işleyerek silahlar, aletler ve eşyalar haline getirebildikleri bilinmektedir.

Tarihsel olarak ise çelik ilk defa, M.Ö. 1400'lü yıllarda doğu Afrika'da bulunmuştur. Çeliğin kullanımına dair ilk belirtiler, mızrak uçları, bıçaklar ve süs eşyaları olarak gözlemlenmiştir ve bu kullanımlar Sümerler ve eski Mısırlılar gibi kültürlerle (yaklaşık M.Ö. 4000 yıllara) kadar uzanmaktadır. Mezopotamya, Anadolu ve Mısır çevresinde ise M.Ö. 3500 ila M.Ö. 2000 yılları arasında ergitilmiş demirden yapılmış nesnelere rastlanmıştır. O tarihlerde demirin altından daha pahalı olması kullanımını töresel eşyalara kaydırmıştır. Örnek olarak İlyada gibi eski eserlerde savaş silahlarının bronzdan yapıldığı görülmesine rağmen ticarete demirden ingotların kullanıldığı kaydedilmiştir. Bazı kaynaklara göre ise o dönemlerde demir, bakır'ın saflaştırılması sırasında bir yan ürün olarak ortaya çıktığı kabul edilir. O dönemlerde yetersiz metalurji bilgisiyle demiri cevher halinden üretmek imkansız gibidir (Yılmaz & Kurnaz, 2001).

Ortaçağ'da çelik üflemleri ocaklarda kontrol edilerek üretilmiştir. Bu nedenle çelik karbon içermektedir. M.Ö.1600-1200 aralığında demir Ortadoğu'da daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Buna rağmen bronz bu tarihlerde yine de en çok kullanılan metaldir. M.Ö 1200-1000 yılları arasında Ortadoğu bölgesinde silah ve araç-gereç üretiminde demir bronzun yerini almaya başlamıştır. Bronz alaşımında bulunan kalay

metalinin bulunmasıyla yaşanan sorunlar bu gelişmeye sebep olmuştur. Dünyanın birçok yerlerinde bu geçiş süreci gözlenmiş ve böylece “Demir Çağı” dediğimiz dönem başlamıştır. Milattan sonraki ilk asırda Çin’deki Han Dynasty (MS 220) işlenmiş demiri dökme demirle beraber ergiterek, orta karbonlu çelik ürünü elde etmeyi başarmıştır. Kendilerine özgü dövme metotlarıyla Çinliler “Wootz Çeliği” üretmişlerdir. Wootz çeliği MS300’lü yıllarda Hindistan ve Sri Lanka’da da üretilmiştir. Bu zamanlarda çelik üretme tekniği muson rüzgarlarıyla çalışan rüzgar fırınlarında yapılmıştır (Fathalizade, 2011). Aynı zamanda Damascus çeliği olarak da adlandırılmaktadır ve dayanıklılığı ile meşhurdur. İlk olarak çok az miktarlarda birçok farklı element içeren malzemelerden yapılmaktaydı. Karışık bir demir alaşımıydı. 11.yy’da Song Çin’de çeliğin iki farklı yöntemle üretildiğine dair kanıtları vardır. Birincisi Berganesque metodur. Bu metod ile homojen olmayan ikincil çelik üretilmiştir. Bu yöntem modern Bessemer prosesinin temelini oluşturmakta ve soğuk blast altında tekrarlı dövme ile kısmi dekarburizasyon elde edilmesini kapsamaktadır. Sementasyon prosesi ile üretilen Blister (Kabartı) çeliği ilk olarak 17.yy’ın başlarında İtalya’da üretilmiştir ve hemen ardından İngiltere de. 17.yy süresince, en iyi çelik İsveç’te Stokholm’un kuzeyinde, oresgrounds demirinden gelmektedir (Schachinger vd., 2015). Bu hammadde 19.yy’da da bu proses boyunca kullanılmıştır. Pota çelikleri dövülmek yerine potada ergitilmek suretiyle üretilmiştir ve dolayısıyla da daha homojendir. İlk modern pota 1740’larda Benjamin Huntsman’ın keşfiyle çelik sanayinde kullanılmaya başlanmıştır. Blister çeliği aynı zamanda pota çeliği olarak da bilinmektedir. Bu çelik potada ergitildikten sonra ingotlara dökülmek suretiyle üretilmiştir (Çetinkaya, 2020). Çelik üretiminde modern çağ dediğimiz 1850’lerin sonlarında Henry Bessemer’in Bessemer prosesini geliştirmesi ile başlamıştır (Gale, 1973). Bu proses çeliğin daha fazla miktarlarda ve daha ucuza üretilebilmesini sağlamıştır. Bu şekilde ileri zamanlarda işlenmiş çeliğin kullanılacağı birçok uygulama için yumuşak çelik elde edilmiştir. Bunlar yalnızca ilk birkaç çelik üretim yöntemidir. Gilchrist-Thomas prosesi ya da temel Bessemer prosesinde konvertörün astarlanması ile fosforun uzaklaştırılması için önemli bir katkı sağlamıştır. Bir başkası ise açık Hearth çelik üretim yöntemi olan Siemens-Martin prosesidir ve bu proses Bessemer prosesini tamamlayıcı özelliktedir (Mohai vd., 2000).

1950’lerde bazik oksijen çelik üretimi ile ilgili Linz-Donawitz prosesi diğer prosesleri kullanılmaz hale getirmiştir. Demir çağının başlamasıyla birlikte demir-çelik metalurjisi ile ilgili yeni keşifler gerçekleşmeye başlamıştır (Singh vd., 2020). Karbürizasyon da

bunlardan biridir. Sünger demir olarak kazanılan demir, katlanarak dövülmesiyle cüruftan ayrılmış ve bu sayede karbonun oksitlenmesi gerçekleşmiştir. (Chand vd., 2015). Ancak, düşük karbon içeriğine sahip dövülmüş dökme demirin su verme yöntemiyle sertleştirilmesi zordur. O dönemlerde Ortadoğu'daki insanlar, dökme demiri odun kömürü üzerinde uzun süre ısıtarak ve sonra su veya yağda soğutarak daha sert bir ürün elde etmeyi başarmışlardır. Elde edilen ürün, çeliğin yüzeyine benzer niteliklere sahipti ve bronzdan daha sert ve dayanıklıydı. Çin'de Zhou Hanedanı'nın son dönemlerinde (M.Ö. 550 civarı), gelişmiş ocak teknolojisi sayesinde yeni bir demir üretim yöntemi ortaya çıkmıştır. Çinliler, 1300 Kelvin kadar çıkabilen yüksek fırınlar kullanarak dökme demir üretebilmişlerdir.

Hindistan'da ise demir M.Ö 250 yıllarından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Delhi'de Kutup kompleksindeki meşhur demir direk, saf demirden (%98) imal edilmiş olup bugüne kadar paslanma ve bozulma geçirmeden günümüze kadar ulaşmıştır. Avrupa ise dökme demir üretimine daha geç başlamıştır. Bunun nedeni 1000K sıcaklığın üzerinde ergitme yapabilecek ünitelerin olmamasıdır. Ortaçağın büyük bir kısmında Batı Avrupa demiri sünger demirden elde etmeye devam etmiştir (Karahan, 2019). İsveç'in Lapphyttan ve Vinarhyttan bölgelerinde 1150 ve 1350 yılları arasında ilk dökme demir üretimine başlanmıştır. Ondördüncü yüzyılın sonlarına doğru, top güllerinin üretimine olan taleple birlikte dökme demir pazarı gelişmeye başlamıştır. Demir ergitilirken odun kömürü hem ısı kaynağı hem de redüksiyon aracı olarak kullanılmıştır. (Roveller, 2024). 18.yy'da İngiltere'de alternatif enerji kaynağı olarak kok kömürü de kullanılmaktadır. Bu buluşla birlikte gereken enerji kaynağı sağlanmış olup endüstri devrimine de büyük katkı vermiştir.

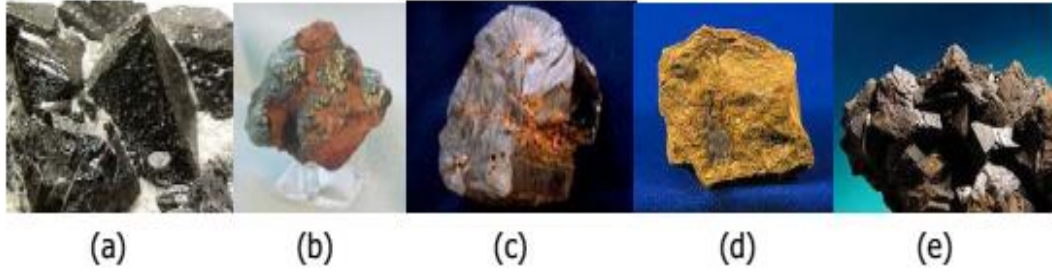
3.2. DEMİR CEVHERİNİN TANIMI VE SINIFLANDIRMASI

Demir çelik endüstrisinin temel hammaddesi demir cevheridir. Doğada saf halde bulunmayan demir cevheri çeşitli formlarda bulunabilir. Demir cevheri;

- oksitler [hematit (Fe_2O_3) ve magnetit (Fe_3O_4)],
- hidroksitler [limonit [$\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$] ve geotit ($\text{FeO}(\text{OH})$)],
- karbonatlar [siderit(Fe_2CO_3)]

şeklinde bulunur (Şekil 3.1). Bu cevher türleri genellikle Silisyum Oksit (Si_2O)

içermektedir. Ayrıca pek çok cevher türü küçük miktarda Fosfor, Alüminyum, Kükürt gibi elementler içermektedir (Keskin & Ünlü, 2016).



Şekil 3.1. Demir cevherleri (a) Magnetit (b)Hematit (c) Geotit (d) Limonit (e) Siderit.

Bir madenin cevher olarak değerlendirilip kullanılmasının ekonomik olması önem arz etmektedir. Çelik endüstrisinde kullanılan demir cevherlerinin içerik bileşiminin asgari %57 Fe olması gerekmektedir (Keskin & Ünlü, 2016).

3.3. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Çelikler farklı farklı çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadırlar (Carvill, 1993; Yuan vd., 2021).

Alaşım Durumlarına Göre Çelikler

Çeliklerde ana element olarak demirle karbon bulunur. Bunların dışında herhangi bir element yapıya girerse alaşımlı çeliklerden söz edilir.

Alaşım durumuna göre ise çelikler üç'e ayrılır.

- a) Sade karbonlu çelikler
- b) Düşük ve orta alaşımlı çelikler
- c) Yüksek alaşımlı çelikler

Çeliklerin Üretim Yöntemlerine Göre Gruplandırılması

- a) Thomas-Bessemer çelik yöntemi.
- b) Siemens-Martin çelik üretim yöntemi.
- c) Elektrik ark ve elektrik indüksiyon çelik üretim yöntemi.
- d) Pota içerisinde çelik üretim yöntemi.

e) Oksijenli konvertör çelik üretim yöntemi.

f) Vakum çelik üretim yöntemi.

Kullanım Durumlarına Göre Çelikler

Metalleri sanayinde üretilen çelikler belirli bir gaye için kullanılmakla birlikte birçok fayda için üretilirler. Burada daha yaygın kullanımı olanlar belirtilecektir (Carvill, 1993).

a : Yapısal çelikler

b : Takım çelikleri

c: Soğuk ve sıcak iş çelikleri

d: Hızlı kesme işlerinde kullanılan çelikler

e: Yay yapımında kullanılan çelikler

f: Yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılacak çelikler

g: Dış etkilere ve özellikle deniz ortamında kullanılacak çelikler

Ana Katkı Maddesine Göre Çelikler

a) Karbonlu çelikler

b) Manganlı çelikler

c) Kromlu çelikler

d) Nikel çelikler

e) Krom Nikel çelikleri

f) Volframli çelikler

g) Vanadyumlu çelikler

Metalografik Yapılarına Göre Çelikler

a) Ferritik çelikler

b) Ferritik ve Perlitik çelikler

c) Perlitik çelikler

d) Östenit çelikler

e) Martenzitik çelikler

f) Ledeburitik çelikler

g) Beynitik çelikler

Kalite Durumlarına Göre Çelikler

a) Kütle çelikleri

b) Kalite çelikler

c) Soy çelikler

Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine Göre Çelikler

a) Isıya dayanıklı olan çelikler

b) Manyetik çelikleri

c) Korozyona dayanımlı çelikler

d) Paslanmaz çelikler

Sertleştirme Ortamlarına Göre Çelikler

a) Hava çelikleri

b) Su çelikleri

c) Yağ çelikleri

Yine farklı bir gruptandırma aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

Bileşimlerine göre: karbon, düşük alaşımlı ya da paslanmaz çelikler

Üretim koşulları göre: bazik oksijen prosesi ya da elektrik fırını prosesleri

Bitirme metotlarına göre: sıcak hadde ya da soğuk hadde

Ürün şekline göre: plaka, levha, şerit ya da yapısal şekil

Deoksidasyon pratiğine göre: söndürülmüş, yarı-söndürülmüş

İç yapıya göre: ferritik, perlitik ya da martensitik

Isıl işleme göre: tavlama, su verme ve temperleme, termo-mekanik işlemler

Kalite tanımlamalarına göre: dövme kalitesi ya da ticari kalite.

3.3.1. Önemli Çelik Grupları

3.3.1.1. Karbon Çelikleri

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü karbon çeliklerini şu biçimde tanımlamaktadır: Çelik; kobalt, krom, niyobyum, nikel, molibden, vanadyum, titanyum, zirkonyum veya herhangi bir alaşım elementinin minimum bir değer belirtilmediği ya da istenmediği takdirde karbon çeliği olarak tanımlanmaktadır. Minimum bir miktar belirtilmesi gerektiğinde ise bakır miktarı %0,40'ı geçmemelidir ya da mangan miktarı %1,65'i, silisyum miktarı %0,60'ı, bakır miktarı %0,60'ı aşmamalıdır (Somers, 1993).

Karbon çelikleri değişik deoksidasyon pratiklerine göre sınıflandırılmaktadırlar: söndürülmüş, ya da yarı-söndürülmüş çelik. Deoksidasyon pratiği ve çelik üretim prosesleri çeliğin özellikleri üzerinde etkilidir. Ancak, karbon miktarındaki değişiklikler de mekanik özellikleri etkilemektedir, artan karbon miktarının sertliğin ve mukavemetin artmasına sebep olduğu bilinmektedir. Karbon çelikleri çoğunlukla içerdikleri karbon miktarlarına bağlı olarak isimlendirilirler. Karbon çelikleri genellikle toplamda %2 civarında alaşım elementleri içerir ve düşük C'lu çelikler, orta C'lu çelikler, yüksek C'lu çelikler ve ultra yüksek C'lu çelikler olarak sınıflandırılırlar (Somers, 1993). Grup olarak, karbon çelikleri en sık kullanılan çeliklerdendir.

3.3.1.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

%0,30'a kadar karbon içeren düşük C'lu çeliklerde bu çelik sınıfının en geniş kategorisini yassı-haddelenmiş ürünler (levha ya da şerit) oluşturmaktadır. Genellikle soğuk haddelenmiş ya da tavlanmış durumda kullanılırlar. Bu yüksek şekillendirilebilirliğe sahip çeliklerin karbon miktarı çok düşüktür (%0,1 civarında) ve %0,4'e kadar Mn içermektedir. Genellikle otomotiv gövde panellerinde, teneke levhalarda ve tel ürünlerde kullanılmaktadırlar. Haddelenmiş yapısal parçalarda ve kesitlerde, karbon miktarı %0,3'e kadar ve Mn miktarı %1,5'a kadar çıkabilmektedir. Bu malzemeler zımba, dövme ve dikişsiz borularda kullanılmaktadırlar (Somers, 1993).

3.3.1.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Düşük karbonlu çeliklere benzemekle birlikte karbon miktarları %0,30-0,60 aralığındadır ve Mn miktarı %0,60-1,65 arasında değişmektedir. Mangan miktarı ile birlikte karbon miktarını yaklaşık %1,5 seviyelerine arttırarak orta karbonlu çelikler su verilmiş ve temperlenmiş durumda kullanılabilirler. Orta karbonlu çeliklerin kullanıldığı yerler miller, dişliler, akslar ve dövme parçalarıdır. % 0,40-0,60 karbon içeren çelikler

demiryollarında ve akslarda kullanılmaktadırlar (Somers, 1993).

3.3.1.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

%0,60-1,00 C ile %0,30-0,90 aralığında Mn içerirler. Yüksek karbonlu çelikler yay malzemesi ve yüksek mukavemetli tellerde kullanılmaktadır (Somers, 1993).

3.3.1.1.4. Ultra Yüksek Karbonlu Çelikler

%1,25-2,00 karbon içeren deneysel kullanımlı alaşımlardır. Ultra yüksek karbonlu çelikler termomekanik işlem uygulanarak ultra ince, eşeksenli, süreksiz proötektik karbür içeren mikroyapı elde etmede kullanılırlar (Somers, 1993).

3.3.1.2. Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelikler (HSLA)

Bu çelikler mikroalaşımlı olarak da adlandırılırlar ve karbon çeliklerinden daha iyi mekanik özellikler ile daha iyi atmosferik korozyon dayanımı göstermek üzere tasarlanmışlardır. Çünkü bu çelikler kimyasal kompozisyondan ziyade iyi mekanik özellikleri elde etmek için üretilmişlerdir. HSLA çeliklerinin karbon miktarı istenilen şekillendirilebilmeyi ve kaynaklanabilirliği sağlamak için (%0,05-0,25) aralığında tutulmuştur ve mangan miktarı da %2,0'ı geçmemektedir. Düşük miktarlarda krom, nikel, molibden, bakır, azot, vanadyum, niyobyum, titanyum ve zirkonyum elementleri değişik kombinasyonlarla kullanılmaktadırlar. HSLA çeliklerini genel olarak sınıflandırmak gerekirse; Weathering çelikleri, üstün atmosferik korozyonu sağlamak üzere tasarlanmışlardır. Kontrollü haddelenmiş çelikler, önceden belirlenmiş hadde miktarına göre sıcak haddelenmiş, soğutma ile çok ince taneli eşeksenli ferrit yapısına dönüşebilecek şekilde yüksek miktarda deforme edilmiş östenit yapısını geliştirmek üzere tasarlanmışlardır. Perliti azaltılmış çelikler, çok ince ferrit tane yapısı ve çökelti sertleşmesi ile sertleştirilmiş fakat düşük miktarda karbon içeren dolayısıyla mikroyapıda az miktarda ya da hiç perlit içermeyen çeliklerdir. Mikroalaşımlı çelikler, çok az miktarlarda niyobyum, vanadyum ve/veya titanyum ilavesi tane küçültme ve/veya çökelti sertleşmesi etkisi yaratmaktadır. Asiküler ferrit çeliği, çok düşük karbonlu çeliktir. Soğutma ile birlikte polygonal ferrit yapısından ince taneli yüksek mukavemetli asiküler ferrit yapısına dönüşebilen yeterli sertleşebilmeye sahiptirler. Çift fazlı çelikler, ferrit tane sınırlarında homojen dağılmış yüksek karbonlu martensitten oluşan bir mikroyapı elde etmek üzere üretilmişlerdir ve düşük akma mukavemetli, yüksek oranda işlem sertleşmesine sahip ürünlerin elde edilmesinde kullanılırlar. Aynı zamanda üstün şekillendirilebilme ile birlikte yüksek mukavemet de sağlamaktadırlar.

Çeşitli HSLA çelikleri aynı zamanda düşük miktarlarda sülfat kalıntılarının şeklini kontrol etmek için kalsiyum, toprak alkali elementler ve zirkonyum da içerebilir (Taş, 2012).

3.3.1.3. Düşük Alaşımli Çelikler

Krom, nikel, ve molibden gibi alaşım elementlerinin etkisiyle düşük alaşımli çelikler adi karbonlu çelikten daha üstün mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Toplam alaşım miktarı %2,07'nin üzerinde ancak %10 Cr içeren paslanmaz çeliğin altındadır.

Bir çok düşük alaşımli çelik için, alaşım elementlerinin en önemli fonksiyonu mekanik özellikleri iyileştirmek için sertleşebilirliği ve tokluğu arttırmasıdır. Bazen, alaşım elementleri servis koşullarında çevresel bozunmayı indirmek amacıyla da kullanılabilirler. Düşük alaşımli çelikler aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadırlar: Kimyasal bileşime göre, örneğin nikel çelikler, nikel-krom çelikler, molibden çelikler, krom-molibden çelikler. Isıl işleme göre de; örneğin su verilmiş temperlenmiş, normalize edilmiş ve temperlenmiş, tavllanmış.

Çok çeşitli kimyasal bileşime sahip çelikler olabileceğinden dolayı bazı çelikler hem bileşime hem de ısıl işlemlerine göre de isimlendirilebilirler. Bu durumda üç ana çelik grubu vardır. (1) düşük karbonlu su verilmiş ve temperlenmiş çelikler (2) orta karbonlu ultra yüksek mukavemetli çelikler (3) ısıya dayanıklı krom-molibden çelikleri.

3.3.1.3.1. Düşük Karbonlu Su Verilmiş ve Temperlenmiş Çelikler

Yüksek akma mukavemeti (350-1035 MPa) ve yüksek çekme mukavemetini süneklik, iyi çentik-darbe tokluğu, korozyon direnci ya da iyi kaynaklanabilirlikle birleştirirler. İstenilen uygulamaya bağlı olarak değişik çelikler bu özelliklerin kombinasyonlarını içermektedirler.

3.3.1.3.2. Orta Karbonlu Ultra Yüksek Mukavemetli Çelikler

Akma mukavemetleri 1380 Mpa'ı aşan yapısal çeliklerdir. Bu çeliklerin büyük bir kısmı SAE/AISI isimleriyle tanımlanmıştır. Ürünler genellikle biyet, çubuk, dövme, boru ya da kaynak teli şeklindedir. Bearing çelikleri top ve silindirlerde kullanılır. Bearing uygulamaları, düşük karbonlu (%0,10-0,20) yüzey sertleştirilmiş çelikler ile yüksek karbonlu (%1,00) tamamen sertleştirilmiş çelikleri içermektedir. Bu tür çeliklerin büyük bir kısmı AISI yada SAE tanımlamalarıyla belirlenmiştir.

3.3.1.3.3. Krom-Molibdenli Isıya Dayanıklı Çelikler

% 0,50-9 Cr ve % 0,50-1,00 Mo içermektedirler. Genellikle karbon oranları %0,20'nin altındadır. Krom içeriği korozyon ve oksidasyon dayanımını iyileştirir. Molibden içeriği ise yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti artırır. Bunlar çoğu zaman normalize edilmiş, temperlenmiş ve su verilmiş temperlenmiş ya da tavlanmış durumda bulunurlar. Krom-molibdenli çelikler gaz, yağ endüstrisinde ve fosil yakıtlarında kullanılır.

3.3.1.4. Yapı Çelikleri

Yapı çelikleri, dünya genelinde en yaygın kullanılan çelik türlerinden biridir ve çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeylerini belirlemede, yapı çeliklerinin üretim ve tüketim miktarları önemli bir faktördür. Bu çelikler, kullanıldıkları alana göre özel olarak seçilirler. Yüksek mukavemet, akma dayanımı gibi özellikler aranıyorsa, farklı yapı çelikleri tercih edilir. Darbe direnci, tokluk ve süneklik gibi malzeme özellikleri arandığında ise, normalleştirilmiş yapı çelikleri tercih edilir. Normalizasyon işlemi, malzemenin tane yapısını düzenleyerek daha homojen ve sağlam bir ince taneli yapı elde etmek için kullanılır. (Durmaz, 2002).

Yapı çelikleri, kaynak, talaşlı imalat, plastik şekillendirme, çekme ve zımbalama gibi çeşitli üretim yöntemleriyle birleştirilip kullanılabilirler. Kaynak işlemi yapılacaksa, malzemelerin sünek yapıları ve tokluk özellikleri dikkate alınır. Zira kaynak işlemi sırasında malzeme yapısının bozulması, çok sert malzemelerde çatlak oluşumuna sebep olabilir.

Yapı çelikleri, kullanılacakları alana göre üretilirler. Örneğin, sıcak haddeleme sonrasında doğrudan kullanılabilirler gibi, soğuk haddeleme işlemi görmüş bir yapı çeliği daha sonra normalizasyon işlemine tabi tutularak müşteriye sunulabilir. Temel kriter burada müşteri ihtiyaçları ve kullanım alanlarıdır (Durmaz, 2002).

Yapı çelikleri, genellikle düşük karbon içeriğine sahip olup alaşım elementleri (fosfor, azot) yerine mangan, silisyum, bakır ve kükürt gibi üretim sürecinden kaynaklanan elementleri içeren çelik türleridir. Bu çelikler genellikle sıcak şekillendirilmiş, normalize edilmiş veya bazen soğuk çekilmiş olarak üretilir ve özellikle çekme dayanımı ile akma sınırları gibi mekanik özellikler göz önünde bulundurularak endüstriyel ve yapısal uygulamalarda kullanılır (Durmaz, 2002).

Yapı çelikleri, çeşitli işlemlerden geçirilmiş ve farklı özelliklere sahip alt gruplara ayrılabilir. Bu gruplar arasında sıcak şekillendirilmiş, soğuk çekilmiş, normalize

edilmiş, termomekanik işlem görmüş, ince taneli yapıda olanlar; kaynak edilebilir özellikte olanlar ve korozyon direnci artırılmış, su verilmiş ve temperlenerek yüksek akma dayanımlı çelikler bulunmaktadır.

Yapı çelikleri, düşük karbon içeriğine sahip, alaşımsız, haddelenmiş ve normalize edilmiş plakalar olarak yapı sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çelikler, mikro alaşımlama veya tane boyutunun kontrolü ile akma çekme mukavemetlerini değiştirilmesiyle düşük sıcaklıkta daha dayanıklı hale getirebilirler. Kesim, talaşlı imalat, soğuk ve sıcak şekillendirme, kaynak gibi önemli imalat yöntemleriyle üretilirler ve kullanılırlar. Düşük karbon içeriği bu çeliklerin iyi bir şekilde kaynaklanabilir olmasını sağlar. Bu çeliklerde belirtilen dayanım değerleri, yerine getirilmesi gereken temel özelliktir. Ancak çeliklerin kaynak uygunluğu genel bir garanti verilmesini gerektirmez. Çünkü konstrüksiyonun kaynak sırasındaki ve sonrasındaki davranışları, kullanılan malzemenin özelliklerinin yanı sıra boyutları, üretim ve işletme koşullarıyla birlikte kaynağın yapılış şeklide son derece önemlidir. (Durmaz, 2002).

Yapı çeliklerinin genel özellikleri aşağıda gibidir.

Uygun akma ve çekme dayanımı

Uygun darbe dayanımı

Gevrek kırılmalar karşısında dayanım

İyi şekillenebilirlik

İyi kaynaklanma

İyi işlenebilme

Yapı çelikleri, belirli bir uygulama için çelik malzemenin dayanabileceği maksimum gerilimi göz önünde bulundurarak seçilir ve mühendislik hesapları yapılır. Bu hesaplamalar, gerekli emniyet faktörleriyle çarpılarak uygun yapı çelikleri belirlenir. Ayrıca, yapı çelikleri taşıtlarda, makinelerde, köprülerde, otoyollarda, tünellerde, yüksek binalarda, kulelerde vb. geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

3.3.1.4.1. Standart Gösterimleri

Genel amaçlı kullanılan yapı çelikleri, yaygın olarak bilinen DIN 17100 standardındaki St simgesi ve kg/mm² cinsinden minimum çekme dayanımları ile tanımlanmış çeliklerdir. Bugünlerde ise bu gösterimde "St" yerine "S" simgesi kullanılmaktadır. Bu gösterim standardı artık DIN 17100 yerine EN 10025 olarak güncellenmiştir. Dünya

genelinde DIN standartları yerine EN standartlarının yaygınlaştığını, yapı çelikleri gösterimlerinde de sıkça karşılaşılan bir durum olduğunu belirtmiştik. EN standart gösteriminde malzemelerin akma dayanımlarının belirtilmesi, pratiklik açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Mühendislik açısından, emniyet katsayılarının akma dayanımı üzerinden hesaplanması güvenlik açısından daha uygun olacaktır. Örneğin, eskiden St-37 gibi çekme dayanım değerleri yerine yapı çeliklerini göstermek için "Akma Dayanımı" terimi kullanılmaktadır. Örneğin, "S235" ifadesi kullanılarak 235 Mpa akma dayanımı belirtilir. Yapı çeliklerinde "Akma Dayanımı" teriminin kullanılmasının nedeni, malzemenin plastik şekil değiştirmeden önce dayanabileceği maksimum gerilmeyi kullanıcıya bildirmektir. EN 10025 standardında çeliklerin deokside edilme durumunu göstermek için şu gösterimler kullanılmaktadır: U (deokside edilmemiş), R (yarı deokside edilmiş), RR (tam deokside edilmiş). Örneğin, S275'deki "S" harfi İngilizce "Structure" yani "Yapı" kelimesinden gelmektedir. Bu tür gösterimlerin sonunda bazen S275JR, J0, J2 gibi ek gösterimler de yer almaktadır. (Şanal, 2020). Burada da;

JR : 20°C de yani oda sıcaklığında çentik darbe testini geçtiği,

J0 : 0°C'de çentik darbe testini geçtiği,

J2 : -20°C'de çentik darbe testini geçtiği

anlamlarına gelmektedir.

Ayrıca bu tür gösterimlerde S355 +N ya da +AR şeklinde ifadeler de göze çarpmaktadır. Bunlar da;

+N : Normalizasyon tavı yapıldığı,

+AR: "As-Rolled" yani haddelendiği gibi ekstra işlem görmemiş anlamlarına gelmektedir.

Şekil değiştirmiş bir çelik, normalizasyon tavına geçtiğinde, haddeme veya şekil verme yönünde uzamış tane yapıları yeniden tane oluşumuyla incelik ve bu süreçte malzemenin tokluk değeri artar. Bununla birlikte, sertlik değeri azalır.

Normalizasyon tavına geçmemiş bir çelik ise, yani "As Rolled" (haddelenmiş hal) olarak kullanılacaksa, haddelendiği yönde malzeme dayanımı ve sertliği daha yüksek olacaktır. Ancak, hadde yönüne 90° açıyla yapılan çekme testi durumunda dayanım önemli ölçüde düşecektir.

Çizelge 3.2. Yapısal çelik kimyasal özellikleri (Şanal, 2020).

Çelik Kalite Sembolleri		Kimyasal Bileşim (%)								
		C			Mn	P	S	Si	Cu	N
		≤16	>16 ≤40	>40						
EN	EN	max	max.	max.	max.	max.	max.	max.	-	max.
10027-1	10027-2	.								
S235JR	1,0038	0,17	0,17	0,20	1,40	0,035	0,045	-	0,55	0,012
S235J0	1,0114	0,17	0,17	0,17	1,40	0,035	0,045	-	0,55	0,012
S235J2	1,0117	0,17	0,17	0,17	1,40	0,035	0,045	-	0,55	-
S275JR	1,0044	0,21	0,21	0,22	1,50	0,035	0,035	-	0,55	0,012
S275J0	1,0143	0,18	0,18	0,18	1,50	0,035	0,045	-	0,55	0,012
S275J2	1,0145	0,18	0,18	0,18	1,50	0,035	0,045	-	0,55	-
S355JR	1,0045	0,24	0,24	0,24	1,60	0,035	0,035	0,55	0,55	0,012
S355J0	1,0553	0,20	0,20	0,22	1,60	0,035	0,030	0,55	0,55	0,012
S355J2	1,0577	0,20	0,20	0,22	1,60	0,035	0,025	0,55	0,55	-

Çizelge 3.3. Yapısal çelik mekanik özellikleri (Şanal, 2020).

Çelik Kalite Sembolü		Mekanik Özellikler													
		Akma Mukavemeti- dayanımı N/mm ²			Çekme Mukavemeti- -dayanımı N/mm ²		(%) Uzama min.							Darbe Dayanım	
		d (mm)			d (mm)		A80				A5				
EN 10027-1 / CR 10260	EN 10027-2	≤16	>16 6 ≤4 0	>40 0 ≤6 3	<3	>3 ≤100	>1	>1 ≤1.5	>1 .5 ≤2	>2 ≤2.5	>2.5 5 <3	≥3 ≤40	°C	J min	
S235JR	1,0038	235	225	215	360-510	360-510	17	18	19	20	21	26	+ 20	27	
S235J0	1,0114	235	225	215	360-510	360-510	-	-	-	-	-	-	0	27	
S235J2	1,0117	235	225	215	360-510	360-510	15	16	17	18	19	24	- 20	27	
S275JR	1,0044	275	265	255	430-580	410-560	15	16	17	18	19	23	+ 20	27	
S275J0	1,0143	275	265	255	430-580	410-560	-	-	-	-	-	-	0	27	
S275J2	1,0145	275	265	255	430-580	410-560	13	14	15	16	17	21	- 20	27	
S355JR	1,0045	355	345	335	510-680	470-630	14	15	16	17	18	22	+ 20	27	
S355J0	1,0553	355	345	335	510-680	470-630	-	-	-	-	-	-	0	27	
S355J2	1,0577	355	345	335	510-680	470-630	-	-	-	-	-	-	- 20	27	

4. METALLERİN PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİ VE ÇELİKLERİN SOĞUK ŞEKİLLENDİRMESİ

Bir malzemenin kuvvetin etkisiyle başlangıçtaki boyutlarını ve şeklini değiştirmesine deformasyon denir. Deformasyon:

-Elastik deformasyon

-Plastik deformasyon

olmak üzere ikiye ayrılır.

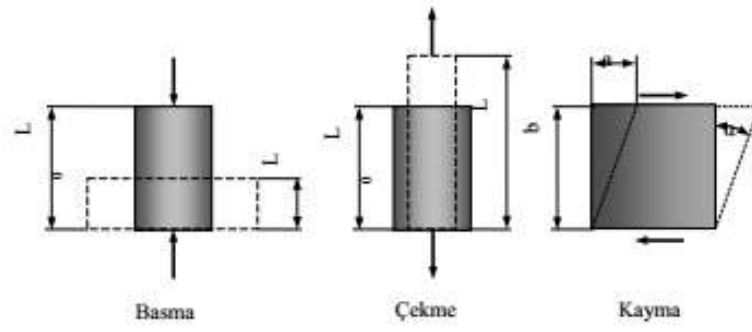
4.1. PLASTİK (ŞEKİL VERME) DEFORMASYON

Uygulanan kuvvetin malzemelerde kalıcı olarak şekil değiştirdiği işlemlere, 'plastik şekil verme' veya 'plastik deformasyon' denir. Bu yöntemle malzemeler istenilen faydalı şekle dönüştürülebilir. Bazı parçalar talaşlı işçilik gerektirirken, bu işlemi azaltan yarı mamul parçalar üretilebildiği gibi, talaşlı işçilik gerektirmeyen doğrudan kullanıma hazır parçaların da üretimi yapılabilir.

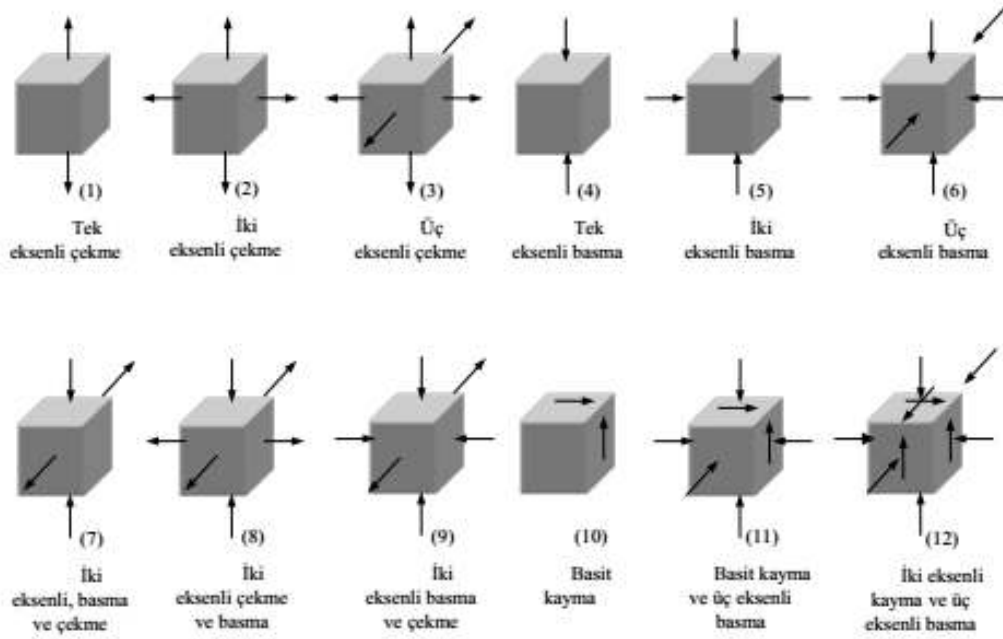
Plastik şekillendirme sürecinde, malzeme katı durumda, hacmi değişmeden uğramadan, kristal yapıdaki özelliklerini muhafaza ederek ve herhangi bir kırılma veya süreksizlik oluşturmada kalıcı bir şekilde değişebilir. Şekillendirme işlemleri genellikle kalıplar kullanılarak gerçekleştirilir. Malzemenin kalıpla doldurulması, katı halde özelliğinden yüksek gerilimlere ve buna bağlı olarak kuvvetlere ihtiyaç duyar. Bu nedenle, plastik şekillendirmede malzemenin süreksizlik oluşturmada şekillendirilebilmesi, gerekli kuvvet ve enerjinin tedariki ve bu parametrelerin öncesinde belirlenmesi son derece önem arz etmektedir (Aifantis, 1987).

4.1.1. Plastik Deformasyonun (Şekil Değiştirmenin) Esasları

Plastik şekillendirme işlemi, genellikle "çekme, basma, burma, kayma, eğme" gibi kuvvetlerden biri veya birkaçının aynı anda uygulanması ile gerçekleştirilir.



Şekil 4.1. Plastik deformasyonda meydana gelen gerilmeler ve şekil değişimleri (Çapan, 2020).



Şekil 4.2. Çekme, basma, kayma, eğme, burma kuvvetlerinden biri veya birkaçının aynı zamanlı uygulanma örnekleri (Çapan, 2020).

Malzemelerde plastik deformasyon, çoğunlukla dört farklı mekanizma ile meydana gelir. Bu mekanizmalar:

- İkizlenme
- Kayma
- Tane sınırlarının kayması.
- Yayınma sürünmesi

4.2. MEKANİK ESASLAR

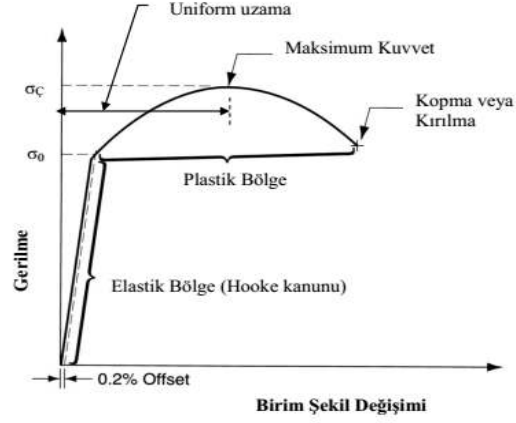
Malzemeye plastik şekil verme işlemi, kalıplar aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu işlemde, uygulanan gerilmeler kalıplar aracılığıyla parçaya iletilir; çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri ise negatif işaret alır. Malzemenin akma dayanımını aşan gerilimlerin etkisiyle plastik şekil değişimi başlar ve gerilim devam ettiği sürece malzeme kalıbın şeklini alır. Bu ders çerçevesinde yapılan gerilme ve kuvvet analizleri, $\pm\%20$ hassasiyet aralığında sonuçlar vermektedir, bu da hassas olmayan bir doğruluk düzeyidir. Kalıp imalatında ve işlem yapacak makinenin seçiminde belirli oranlarda "Emniyet Katsayısı" kullanılması, yeterli doğrulukta sonuçlara ulaşmayı sağlayabilir. Plastik şekil verme işleminde, malzemeye çok eksenli gerilimler etki eder. Bu sebeple, tek eksenli basit zorlama analizleri burada geçerli değildir. Çok eksenli gerilimler için yapılan analizlerde, sadece asal gerilmelerin (σ_1 , σ_2 ve σ_3 olarak sıralanan ve kayma gerilmelerini içermeyen en büyükten en küçüğe doğru gerilmeler) etkisi dikkate alınarak basitleştirme yapılır. Bu durumda malzemenin akma başlatması için gerilmelerde belirli şartların "Akma Kriterleri" olarak adlandırılan kriterleri sağlamasıdır. Metallerde bu tür durumlar için önemli olan iki akma kriteri bulunmaktadır (Groover, 2010).

Plastik şekillendirme sürecinde, hacim sabitliği korunur. Bu durumun mekanik açıklaması;

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

üç yöndeki birim şekil değişimi miktarlarının aritmetik toplamının sıfır olması şeklindedir.

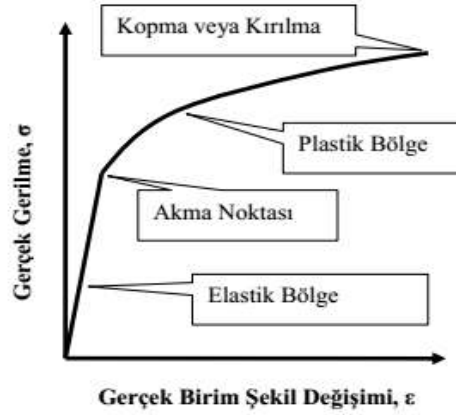
Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için genellikle çekme deneyinden yararlanılır. Bu deneyler yapılırken elde edilen gerilme-birim şekil değişimi diyagramına ait bir örnek aşağıda verilmiştir. Burada gösterilen gerilme ve birim şekil değişimi değerleri, deney parçasının başlangıçtaki değerlerine göre hesaplanmış mühendislik değerleridir.



Şekil 4.3. Birim şekil değişimi (Groover, 2010).

Mühendislik Gerilmesi :

Fakat büyük plastik şekil değişimlerini gerçekleştirdiği hallerde malzemenin başlangıç değerlerine dayanarak hesap yapmak anlamsız olmaktadır. Bu sebeple, plastik şekil verme analizlerinde gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi verileri tercih edilmektedir.



Şekil 4.4. Gerçek şekil değişimi (Groover, 2010).

Gerçek Gerilme :

Bu diyagram aynı zamanda malzemelerin 'akma eğrisi' olarak bilinir ve esas olarak tek eksenli veriler içerse de, çok eksenli zorlanma durumları için yapılacak analizlerde (efektif gerilme ve birim şekil değişimi değerlerinin kullanıldığı durumlar) de kullanışlı olabilir.

4.3. PLASTİK ŞEKİL VERMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

- Malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri
- Malzemenin geometrisi
- Makine/kalıp/takım özellikleri
- Sürtünme/yağlama durumları
- İşlem sıcaklıkları
- İşlemin hızı
- Deformasyon oranı
- Metalürjik özellikler
- Yüzey kalitesi ile boyut hassasiyetleri

4.3.1. Sıcaklığın Etkisi

Malzemelerin mekanik davranışları sıcaklıkla önemli ölçüde değişebilir. Özellikle metal şekillendirme işlemlerinde istenilen düşük akma gerilmesi ve yüksek süneklik sıcaklıktan etkilenir. Sıcaklık etkisi, malzemenin veya şekillendirme ortamının sıcaklığının ergime sıcaklığına yaklaşmasıyla daha da belirgin hale gelir. Metalik veya kristal yapıya sahip malzemelerin ergime sıcaklıkları büyük farklılıklar gösterir, bu nedenle sıcaklık/soğuk ayrımı için malzemelerin ergime sıcaklığı gibi bir göstergeye ihtiyaç duyulur. Bu parametre "Benzeş Sıcaklık" olarak adlandırılır ve gerçekte birimsizdir, değerleri 0 ile 1'dir. Benzeş Sıcaklık ($T_b; \beta$), çalışma sıcaklığının (T_c) mutlak sıcaklık cinsinden malzemenin ergime sıcaklığına (T_e) oranı olarak tanımlanır. Sıcaklık mutlak sifra yaklaştıkça, benzeş sıcaklık da sifra yaklaşır; malzemenin ergime sıcaklığına yaklaştıkça ise benzeş sıcaklık bir değere yaklaşır (Groover, 2010).

Çalışma sıcaklık aralıkları, benzeş sıcaklığına göre

- Soğuk ($0 < T_b < 0.3$)
- Ilık ($0.3 < T_b < 0.5$)
- Sıcak ($0.5 < T_b < 0.8$)

şeklinde gruplandırılmaktadır.

4.3.1.1. Soğuk Şekillendirme

Çelik, alüminyum, bakır gibi metal ve alaşımlar oda sıcaklığı ve daha düşük sıcaklıklar da soğuk şekillendirme aralığına girer. Malzeme soğuk şekillendirildiğinde pekleşir, yani şekil değişimiyle birlikte dayanımı artar. Bu durum, yeni dislokasyonların oluşması ve bunların hareketinin zamanla engellenmesiyle açıklanabilir. Önceki bölümde gösterilen çekme diyagramı, soğukta gözlenen bu davranışı özetler. Bu nedenle, soğukta elde edilebilecek gerilme (dayanım) seviyesini belirlemede Holloman bağıntısı kullanılır. Soğuk şekil değişimi sırasında oluşan pekleşme etkisini ortadan kaldırmak için malzemeye yeniden kristalleşme tavı uygulanabilir (Azizian, 2015).

Soğuk Şekillendirmenin Avantajları:

1. Yüksek hassasiyetle daha dar toleranslar,
2. Çok daha iyi yüzey kalitesi,
3. Malzeme dayanımında artış,
4. Tane yönlenmeleriyle elde edilen daha iyi mekanik performanslar,
5. Parça ısıtılmasına gerek kalmaması,

Soğuk Şekillendirmenin Dezavantajları:

1. Daha da yüksek kuvvet ve enerjiye ihtiyaç olması,
2. İşlemi yapmadan evvel parçanın yüzeyinin temiz olması ve oksit gibi tabakaları barındırmaması,
3. Düşük süneklik nedeniyle şekillendirmelerin sınırlı olarak yapılabilmesi.

4.3.1.2. Ilık Şekillendirme

Benzeş sıcaklığın 0.3 ile 0.5 arasındaki çalışma sıcaklıklarında yapılan şekillendirme işlemleri ılık şekillendirme olarak adlandırılır. Bu işlemlerde pekleşme etkisi soğuktaki kadar belirgin olmayıp, malzemenin sünekliği soğuktaki işlemlerden daha yüksektir. Ilık şekillendirme işlemleri genellikle yaygın olarak kullanılmaz, daha çok özel durumlarda tercih edilir.

Ilık Şekillendirmenin Avantajları:

1. Soğuk şekillendirmelerden daha düşük değerlerde kuvvet ve enerjiye ihtiyaç duyulur,
2. Soğuk şekillendirme aşamasında yeniden kristalleştirme tavına olan ihtiyacı

azaltması,

3. Hadfield Çeliği gibi çok hızlı pekleşen malzemelerin şekillendirilmesi ve talaşlı imalatında kolaylık sağlaması,

4. Karmaşık olan parçaların şekillendirilmesinde yine kolaylık sağlaması.

4.3.1.3. Sıcak Şekillendirme

Sıcak şekillendirme, benzeş sıcaklığın 0.5 ile 0.8 aralıklarında yapılan çalışmalarla gerçekleşen işlemlerdir. Benzeş sıcaklığın 0.5 ve/veya üzerindeki sıcaklıklarda yeniden kristalleşme gerçekleşmektedir. Yeniden kristalleşme yayınma kontrollü bir süreçtir; burada yayılma, dislokasyon yoğunluğunu azaltarak dayanımı düşürürken sünekliği artırır ve yapı yeniden kristalleşir. Böylece, kristalleşme sıcaklığının üzerindeki şekillendirme işlemlerinde malzeme pekleşmez ve süneklik önemli ölçüde artar. Aynı zamanda, sıcaklık malzemenin akma dayanımını azaltır ve şekillendirme için daha düşük kuvvetler gerektirir. Sıcak şekil değişimi sırasında oluşan dislokasyonlar, etkin bir yayılma mekanizmasıyla hızla ortadan kaldırılır ve deformasyonla birlikte dislokasyon sayısı artmaz. Sonuç olarak, malzeme pekleşmez ve şekillendirme kabiliyeti artar.

Sıcak Şekillendirmenin Avantajları:

1. Tek seferde parçaya büyük şekil değişimi yapılabilmesi,
2. Daha düşük kuvvet ve enerjiyle çalışılabilmesi,
3. Malzemelerin yüksek şekillendirilebilirliklere sahip olabilmesi,
4. Uygulanan malzemenin dayanımının artmadan daha sonraki işlemlere uygun hale gelebiliyor olması.

Sıcak Şekillendirmenin Dezavantajları:

1. Düşük boyut hassasiyetleri,
2. Parçanın ısıtılmasından dolayı toplamda daha fazla enerjiye ihtiyaç olması,
3. Yüzey kalitesinin kötü olması,
4. Kalıp ömürlerinin kısılması.

Bazı malzemeler şekillendirilirken, sıcaklık ve ani sıcaklık değişimlerinden son derece etkilenebilir. Örnek olarak yüksek hız çelikleri ve ferritik paslanmaz çelikler sıcak

şekillendirme esnasında soğuk kalıplarla temas ettiklerinde yüzeyleri hızla soğur ve bu bölgelerde şekillendirilebilirliklerini kaybederler. Sonuç olarak, kırılmalara neden olabilecek hasarlar meydana gelebilir. Bu tür sorunları önlemek için, kalıpların parça sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta tutulduğu "İzotermal şekillendirme" yöntemi tercih edilir, ancak bu uygulama kalıp ömrünü ciddi şekilde kısaltabilir. Sıcak şekillendirme esnasında, polikristal yapıdaki metal ve alaşımlarda belirli koşullar sağlandığında, olağanüstü süneklik veya şekillendirilebilme özellikleri gözlemlenebilir. Bu durum "Süper plastiklik" olarak bilinir. Malzemenin çok ince tane yapısına sahip olması ve şekillendirme sırasında deformasyon hızının son derece yavaş olması gerekmektedir. Böylece, şekil değişimi esnasında kayma mekanizmasının yanı sıra tane sınırı kayma mekanizmasıyla dislokasyon sürünmesi (tırmanma-kayma mekanizması) aktif hale gelir ve parçanın hasara uğramadan alabileceği şekil değişimi miktarı, başlangıç boyutunun 10 katı kadar (%1000) yüksek değerlere ulaşabilir.

4.3.2. Deformasyon Hızının Etkisi

Şekillendirme işlemlerinde deformasyon hızı önemli bir rol oynar. Sıcak şekillendirmede malzeme pekleşmediği için pekleşme üsteliği neredeyse sıfırdır. Bu işlem sırasında, akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra şekillendirme başlar ve işlem süresince akma gerilmesi değişmez (malzeme ideal plastik davranış gösterir). Yinede sıcak şekillendirmede, malzemenin akma gerilmesini etkileyen bir başka faktör vardır: "Birim şekil değişimi hızı" veya kısaca "Deformasyon Hızı". Deformasyon hızı, birim zamandaki malzemede meydana gelen birim şekil değişimi miktarındaki değişikliği tanımlar ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Groover, 2010):

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

sabit bir deformasyon hızıyla şekillendirme yapmak oldukça zordur. Sıcak şekillendirmede malzemenin akma dayanımı deformasyon hızına bağlı olarak değişmektedir ve deformasyon hızı arttıkça akma dayanımı da artmaktadır.

4.3.3. Heterojen Şekil Değişiminin Etkisi

Şekillendirme işlemi esnasında uygulanan gerilme ve kuvveti etkileyen önemli bir faktör, homojen olmayan şekil değişimleridir. Bu tür şekil değişimleri, parçada

deformasyonun yerel olarak birikmesine ve artık iç gerilmelerin oluşmasına yol açabilir. Bu iç gerilmeler, zamanla çok büyük değerlere ulaşabilir ve parçada yerel çatlama veya kırılmaların meydana gelmesine neden olabilir. İstenmeyen iç gerilmeler ve etkilerini azaltmak için malzemeye genellikle "gerilme giderme işlemi" (veya parçaya göre "normalleştirme işlemi") uygulanır.

4.3.4. Sürtünme ve Yağlamanın Etkisi

Şekillendirme işlemlerinde kalıplar, malzemeye baskı uygulayarak onu deformasyona uğratmak için öncelikle temas ederler. Bu süreçte, malzemenin yayılmasını engellemeye çalışan sürtünme kuvveti ve gerilmesi artmaktadır. Şekillendirme esnasında sürtünme nedeniyle olması gerekenden daha büyük kuvvetler gerekebilir. Bu sürtünmeden kaynaklı ikincil gerilmeler, malzemede yırtılmalar ve hatta kırılmalar meydana getirebilir. Şekillendirmelerde yüksek kayma ve normal gerilmeler, kalıpların erken hasara uğramasına neden olabilir. Bu sebeplerdendir ki, şekillendirme işlem aşamalarında çoğunlukla yağlama yapılması tercih edilir. Yağlama, sürtünmenin etkisini azaltmasının yanı sıra, şekillendirme kuvvetini azaltır, kalıp aşınmasını azaltır, malzemelerdeki yüzey kalitesini artırır, sıcak şekillendirme aşamalarında kalıpların soğutulmasını sağlar ve çalışılan iş parçasının kalıba yapışmasını önler.

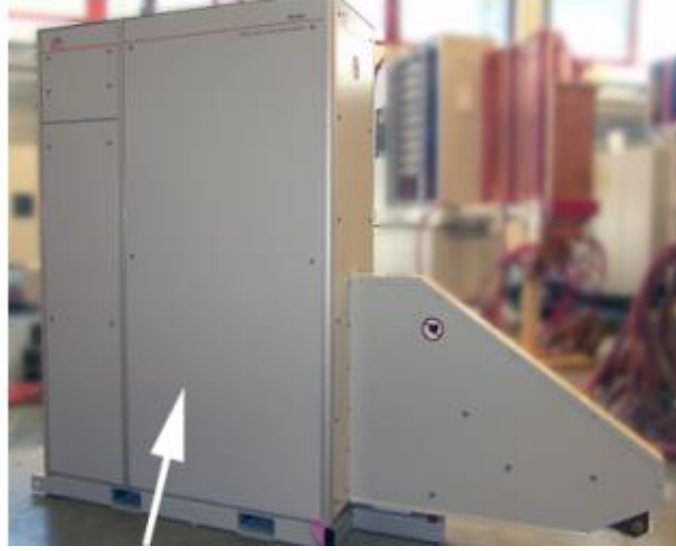
Yağlayıcıları seçerken:

1. Şekillendirme işleminin şekli,
2. İşlem sıcaklıkları,
3. Şekillendirilen malzemenin türü,
4. Kimyasal özellikleri,
5. Uygulama kolaylıkları,
6. Maliyet gibi değişkenler dikkate alınarak seçilmelidir.

5. ÇELİK PROFİLLERİN ÜRETİMİ

5.1. YÜKSEK FREKANS KAYNAK TEKNİĞİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

İndüksiyon ısıtması prensibi, bir bobin vasıtasıyla akan ve bu nedenle büyüklük açısından akımdan değişiklik gösteren bir manyetik alan üreten bir alternatif akıma dayanmaktadır. Bobinin içine elektriği ileten bir materyal yerleştirilirse, endüksiyon akımları materyalin içine geçeceklerdir. Materyalin direnci nedeniyle, endüksiyon akımlarının içinden aktığı materyal bölgesinde ısı oluşacaktır. Endüksiyon ısıtma ekipmanı, elektriği ileten materyalleri kısa bir sürede çok yüksek sıcaklıklarda ısıtabilir. Bu teknik, Lenz Kanunu ve Joule etkisi prensiplerine dayalı olarak geliştirilmiş bir yüksek frekans kaynak yöntemidir ve malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Yüksek frekans kaynak makineleri genellikle 50 kW ile 2000 kW arasında güç sağlarlar. Çalışma sistemi, hem indüksiyon hem de kontak kaynak yöntemleri için ayarlanabilir özelliktedir. Yüksek frekans kaynağı, bant kenarlarını ısı ve basıncın etkisiyle birleştirir ve ek bir tel veya elektrot kullanılmasına gerek kalmaz. Şekil 5.2 yüksek frekans kaynak metodunun profil imalatında nasıl uygulandığını gösterir. Şekilde, borunun yüksek frekans kaynağı ile birleştirilmesi sırasında oluşan "V" şeklindeki kaynak üçgeni bölgesi açıkça görülmektedir. Yüzeylerin yaklaştırmanın etkisiyle, yüksek frekans akımı sac levhanın kenarlarında yoğunlaşır ve bu sayede kenar yüzeyler eriyerek makaraların baskısıyla kaynaklanır (Orhan, 2008).



Şekil 5.1. Yüksek frekans kaynak ünitesi.

Yüksek frekans ünitesi, genellikle üç ana bölümden oluşur: (1) güç üretme ünitesi, (2) vakum tüp osilatör ve (3) katı hal dönüştürücüler. Uygulamalara bağlı olarak istenen frekans aralığı genellikle 100 kHz ile 700 kHz arasında değişebilir. Bu frekans aralığında çalışabilmesi için 30 kW ile 1000 kW arasında bir güce ihtiyaç duyulabilir (Orhan, 2008).

5.1.1. Yüksek Frekans Kaynağı Metotları

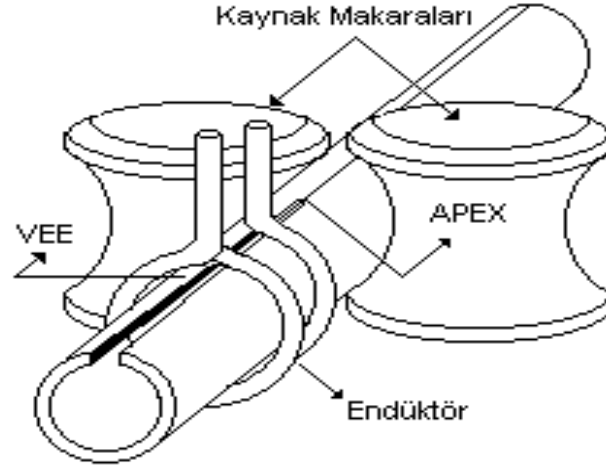
Yüksek frekans kaynağı, akımın iki farklı şekilde iletilmesi nedeniyle iki farklı uygulama tekniğine sahiptir: (1) Kontaklı Yüksek Frekans Kaynağı ile (2) İndüksiyon Bobiniyle Yüksek Frekans Kaynağı.

5.1.1.1. Kontaklı Yüksek Frekans Kaynağı

Bu yöntemde, genellikle bakırdan yapılan metal kontaklar, boruya doğrudan temas ederek yüksek frekanslı akımı ileterek profilin birleştirilmesini sağlar.

5.1.1.2. İndüksiyon Bobiniyle Yüksek Frekans Kaynağı

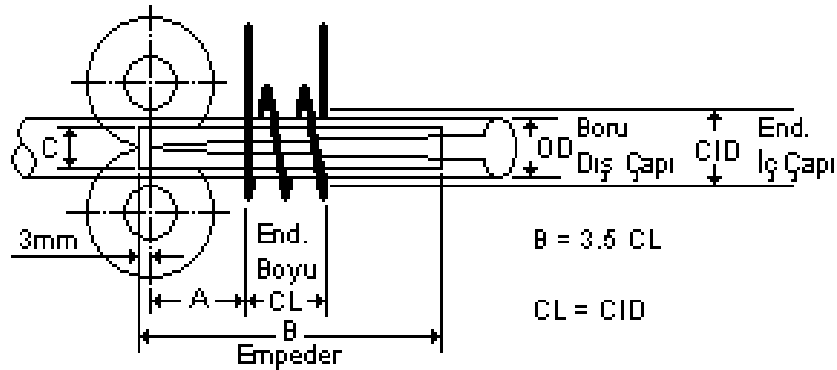
Bu teknikte ise, dairesel bakır bobin, bandın kenarlarına doğru akan akımı indükleyerek bu akımın kaynağı birleştirmesini sağlar.



Şekil 5.2. İndüksiyon bobini (Orhan, 2008).

5.1.2. Yüksek Frekans Kaynağında Empeder Özellikleri

Empederin amacı, boru veya profilin arka kısmına akan yüksek frekanslı akımı azaltarak akımı ve ısıyı Vee içine doğru yoğunlaştırmaktır. Ancak empeder yeterince soğutulmadığında ferrit çok fazla ısınabilir ve foksionunu kaybedebilir. Empeder, akımı ve ısıyı borunun kaynak rolesine doğru yoğunlaştırarak kaynağın minimal güçle gerçekleştirilmesini ve borunun gövdesinin serin kalmasını sağlar. Empeder kullanılmadığında ise akım ve ısı borunun etrafına yayılır, bu da kaynağın çok fazla güç gerektirmesine ve borunun tamamının ısınmasına neden olabilir. Yüksek frekansla kaynak işlemlerinde genellikle iki farklı empeder türü kullanılır. İlk tür, bakır çubuk üzerine yerleştirilen ferrit içerir. Diğer tür ise bağlantı çubuğuna takılan tek ferrit üzerine cam elyaf kaplanmış bir düzeneği içerir.



Şekil 5.3. Empeder (Orhan, 2008).

5.2. KLASİK YÖNTEMLE BORUDAN PROFİL ÜRETİMİ

Dilimlenen çelik rulo saclar, form makaraları arasından geçerek soğuk şekillendirme ile yuvarlak hale gelirler. Yuvarlatılmış sac, yüksek frekans yöntemiyle ısıtıldıktan sonra kaynak makaralarında uygulanan basınçla kaynatılırlar. Borunun kaynaklanma süreci genellikle yüksek frekans indüksiyon yöntemi (ERW, HF) olarak bilinir. Kaynaklanma sonrasında borunun iç ve dış çapakları temizlenir. Devamında boru, kalibre rollerine ilerleyerek mamulde istenene göre daire, kare veya dikdörtgen şekillerine dönüşmeye başlar. Nihai ürünler, uçar hareketli testere ünitesiyle talep edilen boylarda kesilerek konveyörler aracılığıyla kaynak bölgeden çıkarılırlar. Bu yöntem, kare, dikdörtgen ve yuvarlak kutu boru ve profillerin imalatında dokuz farklı üretim kademesini kapsar: (1) Hammaddenin girişi ve dilme işlemleri, (2) Dilinen bant besleyicisi ve akümülyasyon, (3) Form işlemi, (4) Kaynak işlemi, (5) Soğutma grubu, (6) Kalibre, (7) Türk kafası, (8) Kesme işlemleri, (9) Paketleme

5.2.1. Hammadde Girişi ve Dilme Hattı

Boru ve profil imalatında kullanılacak çelik sac rulonun teslimi alınır. Çelik sac rulonun kalite, kalınlık, genişlik bilgileri sistemde kayıt altına alınarak dilme yapılacak üretim hattına gönderimi yapılır. Sonrasında dilme ölçüsüne göre kesimi yapacak olan dilme bıçakların iki adet olan millere dizilmesiyle birlikte daha önceden hesaplanıp bilinen bant ölçülerine göre dilinmeleri başlar. Çelik sac rulo kenarlarında dilimlenen bantların düzgün ebatlı olması için çapak payı denilen fire kısımları verilir ve bu hurda çapaklar sarıcı ünitesine sarılır. Dilme işlemi esnasında oluşan bant gerilimlerini almak için derin çukur bölgesinden geçirme işlemi yapılır. Sonrasında ayırıcı olarak adlandırılan seperatörler yardımıyla hat çıkış kısmında sarılır. Dilme işlemi sonrası tavan vinçleri yardımıyla dilinmiş olan bantlar ilgili stok alanlarına alınırlar. Boru profil üretimi için gerekli olan yarımamul niteliğindeki bu bantlar artık hazırdır.

Dilme yapılacak sac ebatının belirlenmesinde belirli kriterlere dikkat etmek gerekir. Bu kriterler: (1) Üretim standardı içeriğine bağlı köşe radyüs değerleri (2) Sacın çelik kalitesi (3) Sac kalınlığı (4) Üretim yapılacak hattın özelliklerine göre şekillendirme katsayısı (5) İndüksiyon kaynağı (6), Kaynak frekansı (7) Türkankof kalıpları

İmal edilecek borunun veya profilin ebadına göre dilinmesi gereken bant genişliği formülü kullanılarak hesaplanır: Kullanılacak rulonun kalınlığı, kalitesi ve üretim standardına bağlı olarak hesaplanan bant genişliği artırılıp azaltılabilir.

Bant genişlik formülü: $(\text{Boru çapı} - \text{sacın et kalınlığı}) \times 3,14 + \text{sacın et kalınlığı}$

Kutu boru ve profillerin birim ağırlıkları için iki adet hesaplama formülü vardır.

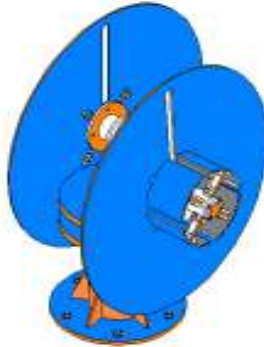
(1) Boru ağırlık hesabı (1m için): $(\text{Boru çapı} - \text{sac et kalınlığı}) \times \text{et kalınlığı} \times 0,0246615$

(2) Boru ağırlık hesabı (1m için): $(\text{Bant genişliği} \times \text{sac et kalınlığı} \times 7,85)/1000$

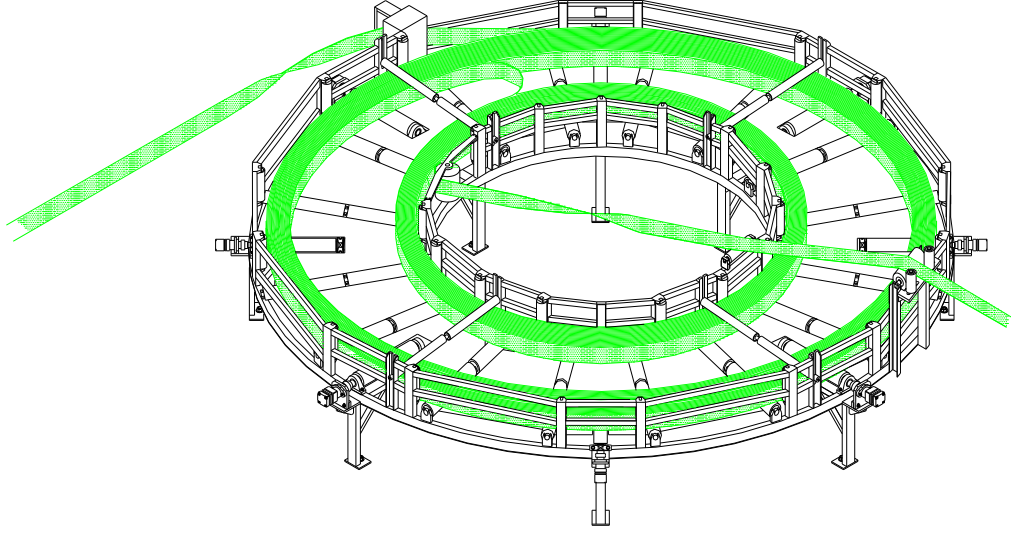
5.2.2. Besleyici ve Akümülayon

Besleyici Tambur boru makinesinin bant beslemesini sağlar. Üretilecek malzemenin (boru veya profil) ölçüsüne göre dilinmiş bantların açılmasında kullanılır. Sistem kolay kullanılabilirlik ve çok işlevli olması açısından hidrolik olarak tasarlanmıştır. Bant takılırken sıkıştırma (Pens şişirme), kilit açma kapama, döndürme ve frenleme işlemleri hidrolik olarak yapılmaktadır.

Akümlasyon : Boru makinesinin sürekli çalışabilmesi için bant stoklanmasını sağlar. 1 Adet dik ve 8 Adet yatay tahrikli merdane vasıtası ile bant; besleyici tamburdan akümülayon'a sarılır. Tahrikli merdaneler besleyici tamburdan çekilen bant'ı dış cepheye sararken diğer yandan bandı avare merdaneler üzerinde iç tarafa sarar. İç tarafta tahrik yoktur. Göbekten çıkarılan bant a boru makinesinin çekme gücü hareket kazandırır. Dış tarafta sarma işlemi sürekli yapıldıkça iç tarafta da sarma olacağından, dış kısımda sarma işlemi durdurulsa bile iç kısımda sarılmış olan malzeme boru makinesinin devamlı çalışmasını sağlayacaktır. Bantın biten uç kısmı ile besleyiciden gelen bandın ucu, gazaltı, elektrot veya oksi-gaz kaynağı yöntemlerinden biriyle birleştirilir ve bandın sarılma işlemine devam edilir.



Şekil 5.4. Bant besleyici (Makina, 2024).

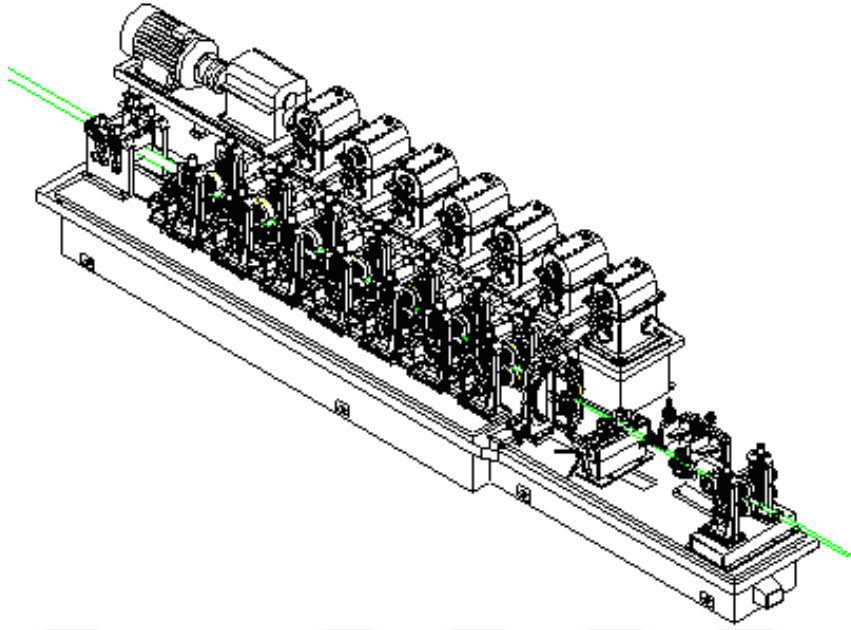


Şekil 5.5. Akümülayon (Makina, 2024)

5.2.3. Form Grubu (Sacının Şekillendirilmesi)

7 istasyondan oluşan form ünitesi dilinmiş bant'a şekil vermek için kullanılır. Makinelerde Kılavuz-Kaynak grubuyla birlikte dizayn edilmiştir. Giriş doğrultucusu arkasından yan ve dik stantlardan oluşan ünite yedi adımda malzemeyi şekil vererek kaynağa hazırlarken bu işlemler iki aşamada gerçekleşir.

Birinci aşama şekillendirmede açısı geniş kalıplar kullanılır. Burada akümülayondan bant dikkatli bir şekilde çekilirken aynı zamanda sacın yuvarlanıp daireselleşmesi içinde ilk şekillendirme işlemleri başlamıştır. İkinci aşama şekillendirme işleminde ise uç uca eklenecek bant uçlarını karşılıklı, gönyeli hale getirilmesi amacıyla gittikçe küçülen radyüs açıları olan kalıplar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Kalıplar arasında bulunan ara bıçaklar kaynaklanacak uçların karşılıklı gönyeli şekilde gelmesini bant uçlarına yaptığı baskı ile hareketin doğrusallığını sağlar ve malzemenin üretimi yapılacak borunun ebadına uygun olacak çapa getirir.

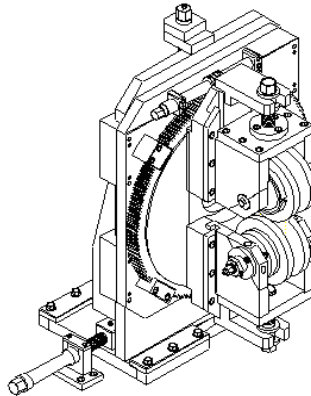


Şekil 5.6. Form grubu (Pearce, 1991).

5.2.4. Kaynak Grubu

5.2.4.1. Kılavuz Makaraları (Merdanesi)

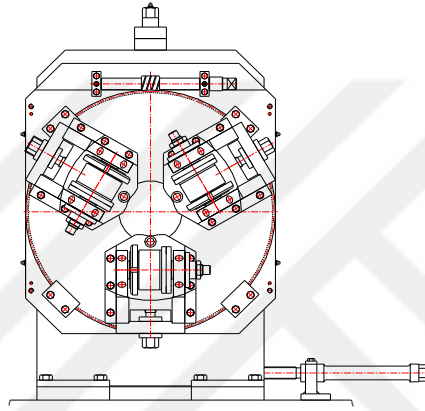
Kılavuz makaralarının temel işlevi, açık borunun kaynak bölgesine düzgün bir şekilde girmesini temin etmektir. Bu, borunun açık ağzlarının tam merkezinde, bant uçlarının karşılıklı ve eşit aralıklı olarak kaynak bölgesine yerleştirilmesini sağlar. Böylece kaynak düzgün ve sağlam olacak, hem de üretim hızımızda kayıplar yaşanmayacaktır. Üst kalıp iki adet yarım kalıp ile bir adet ara bıçaktan oluşur. Ara bıçak genişliği kaynağa girecek ağız açıklığına uygun olarak işlenmektedir.



Şekil 5.7. Kılavuz merdanesi (Pearce, 1991).

5.2.4.2. Kaynak İşlemi

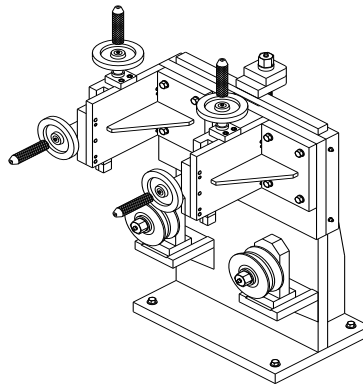
Yüksek frekansla kaynağının gerçekleştiği kısımdır. Kaynak ağzı açılmış olan kaynaksız boruyu kademeli olarak şekillendiren makara gruplarıdır. Bu seviyedeki yüksek frekanslı boruların termal genişmesini önlemek için düzenlenmiş makara gruplarıdır. Kapasite çap ve kalınlığa göre ikili üçlü veya dördütlü kaynak roleleri kullanılmaktadır. Genellikle kullanılan üçlü gruptur. Üçlü kaynak makaralarında üst kalıbın ortasında bir kanal bulunur; bu curuf ve diğer atıkların kalıba zarar vermesini önler. Kaynak makaralarında malzemenin iki yüzeyinin düzgün bir şekilde birleştirilebilmesi için doğru bir şekilde ayarlanmış olması önemlidir.



Şekil 5.8. Üçlü kaynak grubu (Pearce, 1991).

5.2.4.3. Çapak Kazıyıcı

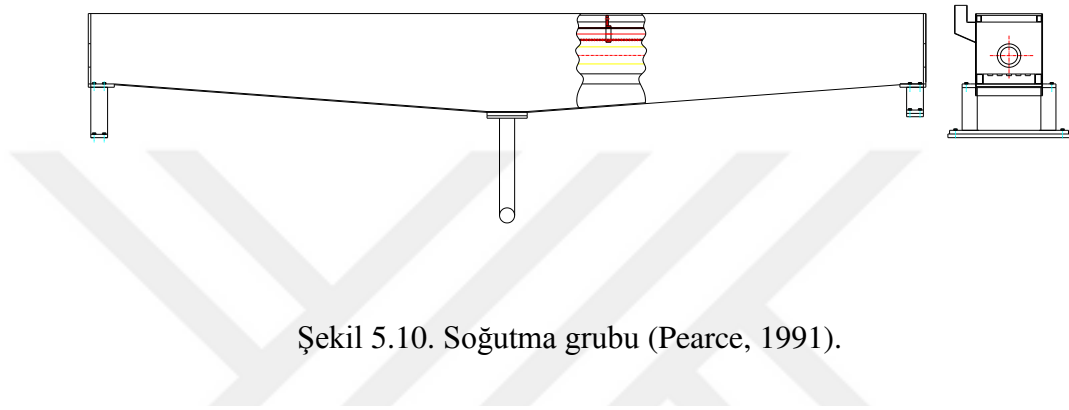
Kaynaklanan borunun sıralı bir şekilde olmak üzere ve boru dış çapına oranlı değişik radyüslerde olan iki adet çapak kazıyıcıdan (sıyırıcı) ilerleyerek hassas bir temizleme ile temiz yüzeyin elde edildiği kısımdır. Bir sonraki aşamaya boru kaynak yüzeyi temiz bir şekilde geçer.



Şekil 5.9. Çapak sıyırıcı (Pearce, 1991).

5.2.5. Soğutma Grubu

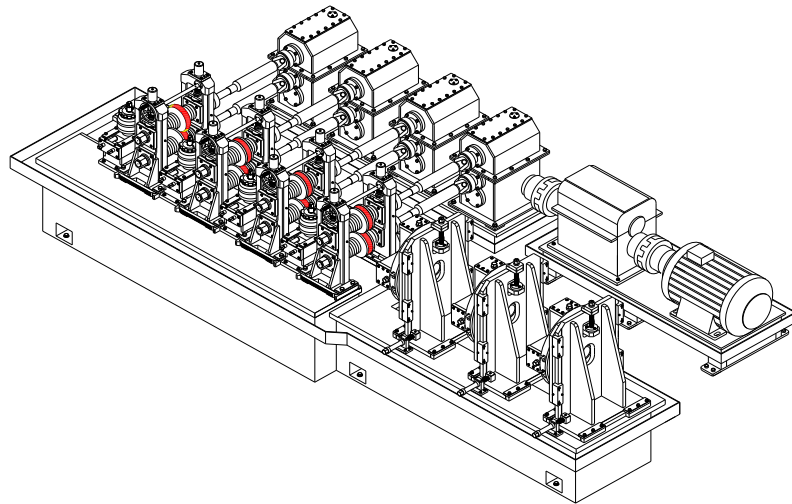
Kaynak esnasında bant uçlarının ısınması amaçlansa da, bu süreçte kaynak bölgesinden boru yüzeyine doğru bir ısı transferi gerçekleşir. Özellikle düşük kalınlık ve soğuk malzemelerde, bu etki daha belirgin olabilir. Kaynak bölgesi etrafında farklı bir renk oluşur ve bu da borunun görünümünü olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle ısı yayılımını engellemek için boru soğutma tüneline geçirilir.



Şekil 5.10. Soğutma grubu (Pearce, 1991).

5.2.6. Kalibre Grubu

Kaynaklama ve dış çapak alma işlemleri tamamlandıktan sonra, borunun istenilen boyut toleranslarına ulaşabilmesi için kullanılan makaralardır. Kalibre grubu dört istasyondan oluşan, boruyu son ölçüye hazırlamak için 4 adet dik ve 4 adet yan kalıp bulunur. Kalibre grubundan sonra boruya profil şekli vermek, nihai boyutu sağlamak üzere "Türk kafaları" adı verilen son aşamaya geçilir.



Şekil 5.11. Kalibre grubu (Pearce, 1991).

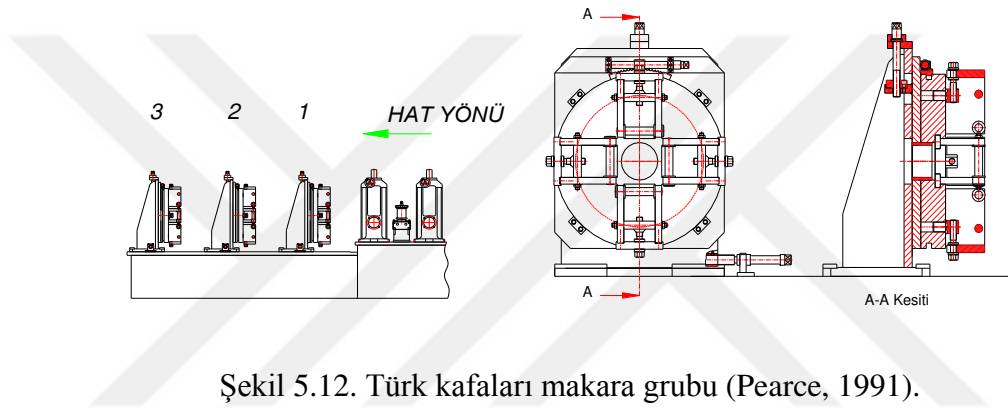
5.2.7. Türk Kafası Makara Grubu (Türkankof)

Türkankof malzeme şekillendirmenin son ünitesidir. İki temel görevi vardır.

1-Boruyu doğrultmak

2-Boruyu kutu profil haline getirmek.

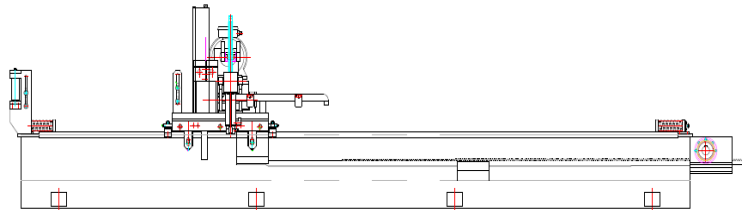
Boru kademeli olarak profil haline gelirken Türkankof makaraları, eğriliği, burkulmayı ve gönye kaçıklığını düzelterek borunun düzgün ve doğrusal bir şekilde profil almasını sağlar.



Şekil 5.12. Türk kafaları makara grubu (Pearce, 1991).

5.2.8. Kesim İşlemi

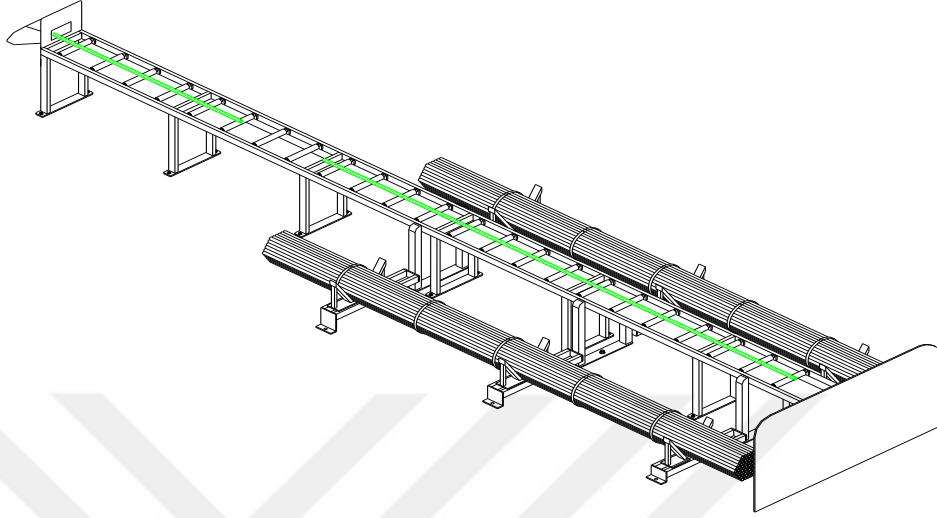
İstenilen üretim boyları için yapılan kesme işlemidir. Boy kesme ürüne senkron dönen bir encoder aracılığı yapılır. Kesme grubu, testere arabası ile testereyi taşıyan transdüserdan oluşmaktadır. Kesme talimatını alan testere arabası ürün hızına senkronize olur ve boru veya profil, sabit tutucu mengenelerle tutulup birlikte üretim hızında ilerlerler. Testere, ürün hızına ulaştığında hidrolik bir transdüser aracılığıyla aşağı doğru hareket ederek kesim işlemini gerçekleştirir.



Şekil 5.13. Testere grubu (Pearce, 1991).

5.2.9. Paketleme

Kesim işlemi sonrasında, hareketli rollerin bulunduğu konveyörle boru veya profiller paketleyici makinesine gönderilir ve istiflenip paketlenirler.



Şekil 5.14. Paketleme (Pearce, 1991).

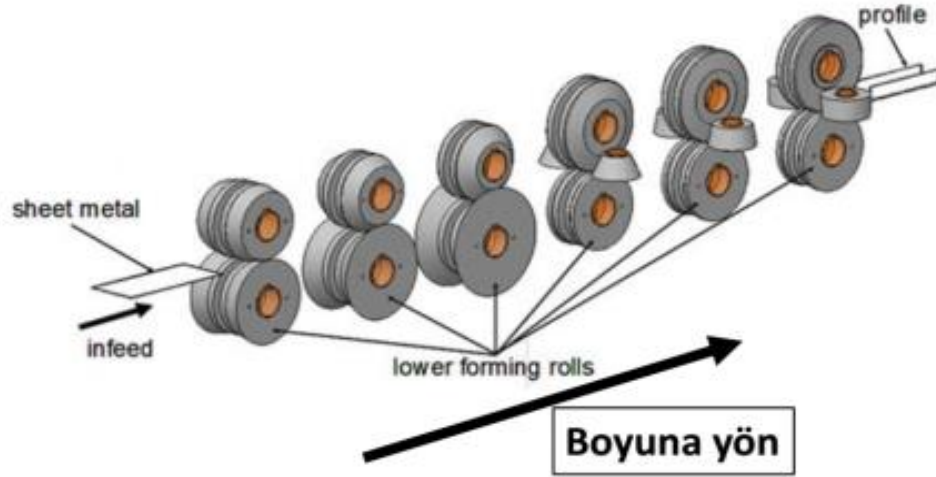
5.3. ESNEK SOĞUK ŞEKLİLENDİRME İLE DİREKT PROFİL ÜRETİMİ

Roll Forming (Makaralı Bükme), sac malzemelerin düz, paralel ve boyuna bükme çizgileri boyunca birçok makaradan oluşan bir sistem içerisinde, sac kalınlığını değiştirmeden oda sıcaklığında şekillendirildiği prosestir. Buda çelik profil üretiminde esnek soğuk şekillendirme dediğimiz (FCF : flexible cold forming) tekniğe ilham kaynağı olmuştur. Esnek Soğuk Şekillendirme (FCF), geleneksel şekillendirme işlemine bir alternatif sağlayan kafes şekillendirme işlemidir. Hattın duruş süresini kısaltır ve hızlı ölçü değişimleri sayesinde üreticiye esneklik sağlamaktadır (Halmos, 2005).

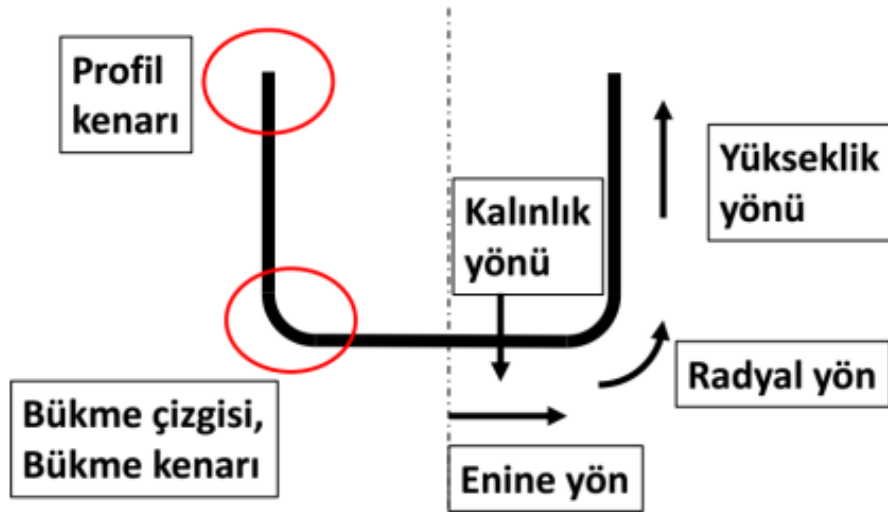
5.3.1. Nasıl Çalışır

Geleneksel şekillendirme gibi, kafes şekillendirme şeklini değiştirmek için takım merdaneleri boyunca sürekli bir malzeme şeridi çeker. Ana fark, takımın nasıl çalıştığıyla ilgilidir. Geleneksel işlem, değirmende üretilen her çap için bir takım merdane takımı kullanır. Kafes şekillendirme, değirmende üretilen her çap için bir takım seti kullanır. Başka bir deyişle, evrensel bir araç seti kullanır. Bu, operatör bir çaptan diğerine geçtiğinde, uzun bir takım değiştirme işleminden geçmesi gerekmeyeceği anlamına gelir. Birkaç dakika içinde bir operatör bir sonraki üretim çalışması için takımı

yeni pozisyonlara ayarlayabilir.



Şekil 5.15. Hat akış yönü (Halmos, 2005).



Şekil 5.16. Sac büküm ve şekillenme yönleri (Halmos, 2005).

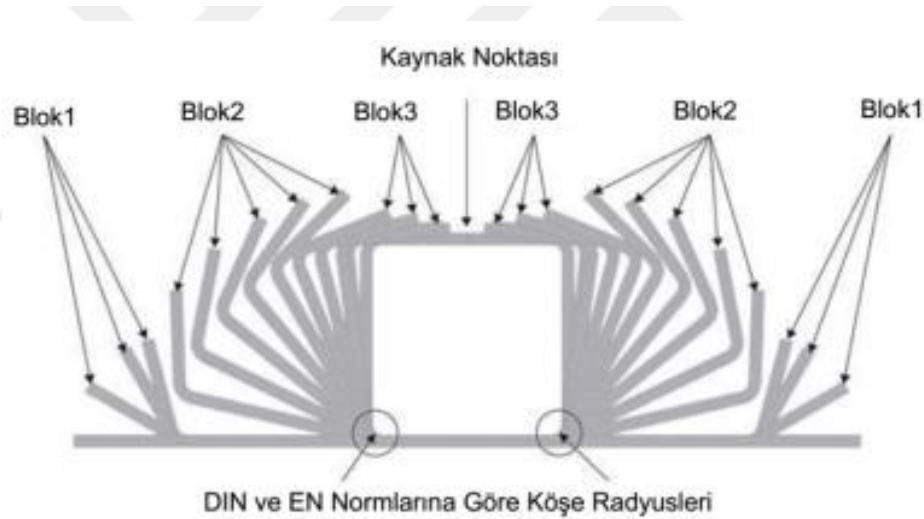
Eşleştirilmiş merdane standlarına monte edilmiş alet kullanan geleneksel işlemlerin aksine, kafes şekillendirme blokları oluşturur. Takım bu bloklara monte edilir ve takım konumu tahrik motorları tarafından ayarlanır. Bir ürün boyutundan diğerine geçmek bir yazılım işlevidir; Operatör takımı değiştirmez, ancak değirmenin kontrol panelindeki ayarları çağırarak yeni takım konumlarını çağırır. Yazılım ve tahrik motorları gerisini halleder (Halmos, 2005).

Takımın kendisi sürülmedi. Kafes oluşturmada, şekillendirme blokları şeridi ileri iten sıkıştırma silindiri dayanaklarına sahiptir. Biçimlendirme blokları gibi, sıkıştırma

silindirleri, tüm ürün yelpazesi için tek bir silindir seti kullanır. Birinci ve üçüncü şekillendirme blokları, önlerinde böyle bir sıkıştırma silindir sehpasına sahiptir. Kıştırma silindirleri ve alt silindirler, AC servo motorlar ve bir dağıtım dişli kutusu tarafından kesin hızlarda tahrik edilir.

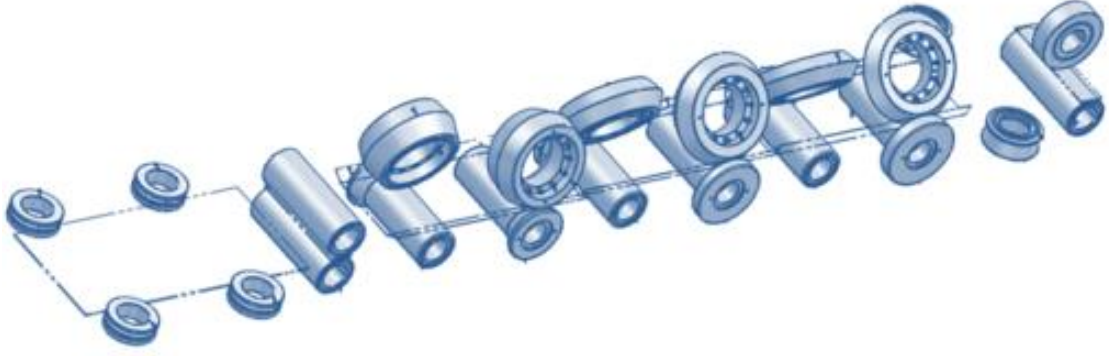
5.3.2. Form Verme

Klasik şekilli profiller tipik olarak yuvarlak bir boru yapılarak ve daha sonra onu kare, dikdörtgen veya başka bir şekilde şekillendirerek üretilir. FCF’te ise kafes oluşturma işlemi önce yuvarlak, sonra son şekillendirme ile yapılmaz; bunun yerine malzeme doğrudan düz formdan istenen şekle doğru ilerler. Her ne kadar bu işlem temel olarak geleneksel biçimlendirmeden farklı olsa da, toleranslar, boyutlar ve kalite ile ilgili yaygın olarak kabul edilen gereklilikleri karşılar. Kare ve dikdörtgen şekiller oluşturmak için, şekillendirme işlemi, üç işlem adımı için üç şekillendirme bloğu kullanır.



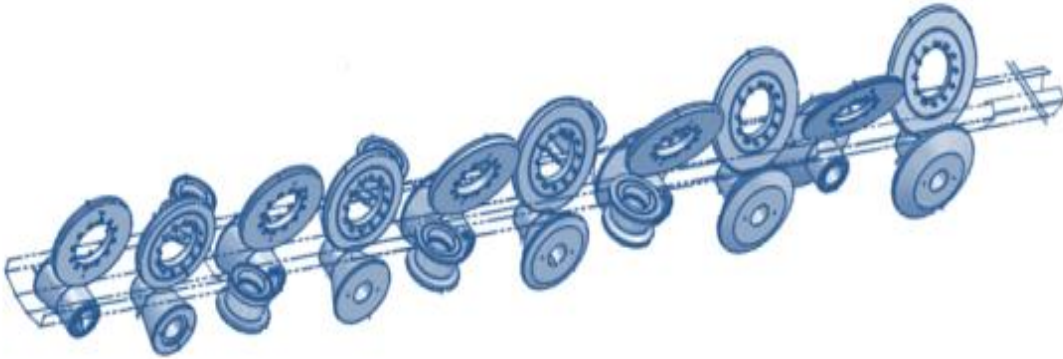
Şekil 5.17. Şekillenme aşamaları (Li vd., 2018).

FCF - Blok 1: Birkaç aşamada, şerit kenarları bir U profili üretmek için 75 ° 'lik bir açıya önceden bükülür.



Şekil 5.18. Blok 1 (Li vd., 2018).

FCF - Blok 2: Aşağıdaki adımlarda, şeridin kenarları kaba bir C profili elde etmek için 60° 'lik bir açığa önceden bükülmüştür.



Şekil 5.19. Blok 2 (Li vd., 2018).

FCF - Blok 3: C-profil, kaynak işleminden önceki son adım olan neredeyse kare veya dikdörtgen bir bölüm halinde oluşturulmuştur.



Şekil 5.20. Blok 3 (Li vd., 2018).

FCF – Profil Son Boyutlandırma: Son boyutlandırma ve doğrultma işleminin gerçekleştiği yer FCF türk kafası grubudur.

FCF-Türk Kafaları şunlardan oluşur:

3 Adet tahrikli boyutlandırma/Kalibre makaraları

2 adet son boyutlandırma ve doğrultma makaraları

Yukarıdaki her bir makara grubu 4'er adet kalıptan oluşmaktadır. Tüm profil ölçülerinde aynı makara grupları kullanılmaktadır ilave bir kalıp değişimi gerektirmemektedir. Farklı boyutlara ayar yapmak için PLC kontrollü servo motorlar kullanılmaktadır. Tüm ayarlamalar tamamlandıktan sonra parametreler bilgisayara kaydedilebilmektedir. Bu sayede daha sonra aynı boyuta geçmek için sadece programı seçmek yeterlidir, tekrar ayar yapmak gerektirmez.

Çoğu FCF hattı için belirli ölçü aralıkları için yalnızca bir set şekillendirme blokları/makara grupları kullanılır. Eğer bu ölçü aralığının dışında bir profil üretimi isteniyorsa makara gruplarının değiştirilmesi gerekmektedir.

Fakat bu değişimin de bir sınırı vardır. Birincisi makinenin motor donanımları yeni kalıplar için yeterli güce sahip olmalıdır. Ayrıca profil uzun kenarının kısa kenara oranı 2,5'e 1'i geçmemelidir. Oran bundan daha fazla büyürse, kafes oluşturma işlemi daha yüksek maliyetlidir çünkü takımlama çok daha pahalı hale gelir.

Avantajları;



Şekil 5.21. FCF genel görünüm (Li vd., 2018).

- Kısa sürede boyutsal değişim sağlar
- Doğrudan şerit/bant oluşturma ile şerit malzemesinin ideal kullanımı, % 3 - 8 oranında tasarruf mümkündür
- Aynı şekli elde edebilmek için daha küçük bant kullanılmaktadır.
- Özellikle küçük ürün grupları için esnek üretim planlaması
- Standart ebatların dışında ara ölçülerin de rahatlıkla yapılabilmesi
- Ürün değişikliğinde kalıp değişimi gerektirmez.
- Merkezi takım ayarıyla kolay kullanım
- Otomatik mil konumlandırma ile ayar değerlerinin tekrar kullanılabilmesi

5.3.3. Zaman Hesaplanması

FCF'in en büyük fark avantajı çalışma zamanındadır. Yılda 48 hafta çalışan ve her hafta yedi takım değiştirme gerçekleştiren geleneksel bir üretim tesisi düşünün. Takım değişikliklerinden beşi 1,5 saat (kısmi değişiklik) ve kalan iki tanesi 3 saat (tam değişiklik) gerektirir.

Saat / yıl sayısı: $48 \text{ hafta} \times 45 \text{ saat / hafta} = 2160 \text{ saat}$

Takım değişiklikleri için kapalı kalma süresi: $(48 \times 5 \times 1,5) + (48 \times 2 \times 3) = 648 \text{ saat}$

Çalışma süresi: $2160 \text{ saat} - 648 \text{ saat} = 1.512 \text{ saat}$

Çalışma süresi yüzdesi: $(2160-648) / 2160 = \% 70$

Yılda 48 hafta çalışan bir vardiya işleten bir FCF hattı için, her hafta otomatik geçişlerin beşi 0.25 saat gerektirmektedir (et kalınlık ayarı); diğer ikisi 0.5 saat gerektirir (boyutsal

değişim).

Saat / yıl sayısı: 2160

Takım ayarı için kapalı kalma süresi: $(48 \times 5 \times 0,25) + (48 \times 2 \times 0,5) = 108$ saat

Çalışma süresi: 2160 saat - 108 saat = 2052 saat

Çalışma süresi yüzdesi: $(2160-108) / 2160 =$ yüzde 95

Bu nedenle, FCF yılda 540 saat daha verimli üretim yapmaktadır. (duruş süresindeki farka göre: 648 saat-108 saat = 540 saat). Yani verimliliğe olumlu etkisi %25'tir.



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. DENEYDE KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

Yapılan deney ve çalışmalarda, Çolakoğlu S235JR kalite (TS EN 10025-2) 2,00 mm kalınlığında yapısal çelik saclar kullanılarak, yüksek frekans indüksiyon kaynak metoduyla 40x40x2,00 mm ölçüsünde kutu profillerin imalatı yapılmıştır. Çizelge 6.1’de çalışılan sacın EN standardındaki mekanik özelliklerin teorik değerleri verilmiştir. Aynı tabloda yine kullanılan sacın çekme deneyi sonucundaki mekanik değerleri de paylaşılmıştır. Standart ve yapılan mekanik deney sonuçları birbirleriyle uyumludur.

Çizelge 6.1. Malzeme mekanik özellikleri.

Standart Karşılığı Özellikleri		Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A (%)
Standart		Kalite		A ₈₀ min
EN 10025-2	S235JR	235	360-510	17
Çolakoğlu	54235	314	430	35

6.2. YÜKSEK FREKANS İNDÜKSİYON KAYNAĞI İLE KARE PROFİL ÜRETİMİ

Bu çalışmada yüksek frekans indüksiyon kaynağı ile iki farklı metodla kare profiller (40x40x2,00 mm) farklı kaynak parametreleri ve hat hızları kullanılarak Ağır Haddecilik A.Ş. firmasında üretilmişlerdir. Kutu profil imalatının yapıldığı üretim hatlarından birisi klasik metod diye bilinen borudan profil imal eden hat olmakla birlikte diğer üretim hattı ise yeni metod diye tanımladığımız esnek soğuk şekillendirme ile direk profil imalatını yapan hattır.

Klasik metodla üretim yapan hatta kullanılan bant genişliği 156 mm olmakla birlikte yeni metodla direk profil üretimini yapan hatta kullanılan bant genişliği ise 149 mm’dir.

İmal edilebilecek 40x40 profillerin karşılık geldiği boru çapı Ø 51 mm. İmalat boyu ise standart 6000 mm'dir. Hat hızları ise minimum 40 m/dak ile maksimumda 80 m/dak'dır.

6.2.1. Kaynak Parametreleri ve Hat Hızları

Kare profil imalatında kullanılan kaynak unsurları şunlardır: (a) Kaynak güç değeri, (b) Hat hızı, (c) Kaynak kalıp konumu, (d) Kaynak kalıp baskısı, (e) Empederin yeri, (f) Empeder çapı, (g) İndüksiyon bobin çapı, (h) İndüksiyon bobininin konumu. Birleşme kalitesine bu parametrelerden yalnızca kaynak güç değerleri ve hat hızlarının etkileri araştırılmıştır. Kaynak işlemlerinde kullanılan değişken olan bu parametrelere aşağıda açıklık getirilmiştir. Kutu kare profilin mekanik özelliklerine farklı kaynak akım değerlerinin etkisini belirlemek için, kaynak hızı 40 m/dakika olarak sabit tutulmuş ve kaynak akımı gücü 120 kW'a ayarlanmıştır. Farklı kaynak hızında (hat hızı) 60 m/dak. da kaynak güç değeri 150 kW'a sabitlenmiş olup nihai olarak 80 m/dak. hat hızında 180 kW'lık kaynak güç değeri sabitlenerek üretimler yapılmıştır.

Farklı parametrelerde üretilen kare profillere çekme, köşe genişletme ve sertlik testleri yapılmıştır. Profil imalatında kullanılan farklı parametre ve değerleri Çizelge 6.2'de gösterilmektedir. Numune kodlaması, farklı parametrelerle üretilen numuneleri ayırt etmek ve tanımlamada kolaylık sağlaması amacıyla yapılmıştır.

Çizelge 6.2. Kaynak parametreleri hat hızları.

	Numune Kodu	Hat Hızı (m/dak)	Kaynak Güç Değeri (kW)
Klasik Metotla(borudan profil) Üretim	B40	40	120
Klasik Metotla(borudan profil) Üretim	B60	60	150
Klasik Metotla(borudan profil) Üretim	B80	80	180
Yeni Metotla (direk profil) Üretimi	F40	40	120
Yeni Metotla (direk profil) Üretimi	F60	60	150
Yeni Metotla (direk profil) Üretimi	F80	80	180

6.3. ÇEKME DENEYİ (TS 138 EN 10002-1)

Tasarımda en önemli özellikler, malzemelerin dayanıklılığı ve şekil değiştirme kabiliyetidir. Bu özelliklerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan test ise "çekme deneyi"dir. Bu deneyde, çekme test numunesi makineye bağlanarak çekme kuvvetleri uygulanır ve uygulana yük- kuvvet numune kopasıya kadar arttırılmaya devam eder. Bu süreçte, yüklenen kuvvet ve numunede oluşan uzama devamlı kaydedilir. Çekme deneyi sonucunda numunenin dayanabildiği maksimum yük, akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama gibi özellikler belirlenir. Bu deney, birleştirilen profillerin farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklerine etkilerini incelemek için yapılmıştır. Numuneler, TS 138 EN 10002-1 standardında belirtilen çekme deneyi numune ölçülerine uygun olarak hazırlanmıştır. Çekme deneyi, hem ham malzemeye hem de değişik kaynak parametreleriyle üretilen kare profillere uygulanmıştır. Çekme numuneleri, 40x40x2,00 mm profillerin kaynaksız ve kaynaklı yüzeylerden iki farklı noktadan alınarak hazırlanmıştır ve kaynaklı numunelerde kaynak dikişinin numunenin tam ortasına gelecek şekilde olmasına dikkat edilmiştir. Deneyler, 40 tonluk Alşa marka cihazla yapılmıştır. Şekil 7.3. de çekme deneyinde kullanılan profilin yüzey sac numunelerin fotoğrafları vardır.

6.4. AĞIZ GENİŞLETME DENEYİ

Ağız genişletme muayenesi, metal boruların ve profillerin şekillendirilmesi neticesinde bu işlemin borularda oluşabilecek hataları belirlemek için belirli açılardaki koniler aracılığıyla boru veya profillerin ağızlarının genişletilmesi yoluyla yapılır. Kaynak işlemi sırasında oluşabilecek açılmaları tespit etmek amaçlanır. Muayene sonucunda, başlangıç dış çapının konik bir mandrel etkisiyle değişmesiyle elde edilen son çap ile ilk çap arasındaki fark hesaplanır. Bu çalışmada, TS EN 8493 standardına uygun hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Numuneler, standart ebatlarına sahip mandrel ile köşe genişletme deneylerine tabi tutulmuştur. Kutu profiller, dik konumda mandrel ile aynı eksen doğrultusunda hidrolik pres yardımıyla basma kuvvetine maruz bırakılarak test edilmiştir. Kutu profilin yırtılmasına kadar uygulanan yük devam ettirilmiştir. Örneğin, 40x40x2,00mm boyutlarında ve 75 mm uzunluğundaki kutu kare profil, mandrel içerisine yerleştirilerek 50 tonluk hidrolik pres kullanılarak basınç uygulanmıştır.

6.5. SERTLİK DENEYİ

6.5.1. Sertlik Deneylerinin Amacı

Çelik malzemelere yapılan yaygın deneylerden birisi, sertlik ölçümüdür. Bu deneyin tercih edilmesinin başlıca nedeni, basit olması ve diğer deney yöntemlerine göre numunenin daha az tahrip edilmesidir. Öte yandan, malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında bir ilişki olmasıdır. Örnek olarak, çeliklerde çekme dayanımı genellikle sertlikle doğru orantılıdır; bu nedenle, sertlik ölçümü yaparak malzemenin mukavemeti hakkında bir fikir edinilebilir. Sertlik, malzemenin aşınmaya, çizilmeye, kesilmeye ve delinmeye karşı gösterdiği direnci ifade eder. Laboratuvarlarda özel cihazlar kullanılarak yapılan sertlik ölçümleri, malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnci yansıtır.

6.5.2. Sertlik Ölçme Yöntemleri

Sertlik ölçümü genel itibarıyla malzemeye konik veya küresel bir standart uç batırılarak malzemenin gösterdiği direncin ölçülmesini içerir. Seçilen sert uçla malzemeye belirli yükleme yapıldığında parçada iz bırakır. Bu izin büyüklüğüyle malzemenin sertliği arasında ters bir orantı vardır. Sertlik deneyleri, bizi malzemelerin kökenine götürebilir ve diğer mekanik özellikler hakkında da bilgi edinmemizi sağlar. Örnek olarak, sertlik malzemelerin işlenebilme kabiliyetini gösterebilir; genellikle sertlik ile işlenebilme özelliği arasında ters bir ilişki vardır, yani sert malzemeler genellikle daha zor işlenir.

Sertlik deneyleri basit ve tahribatsız olduğu için, malzemenin diğer özellikleri hakkında bilgi edinmek için numuneyi elden çıkarmadan önce kullanılabilir bir metottur. Daha sonra numune üzerinde diğer deneyler yapılabilir. Cisimlerin sertliğini ölçmekte genellikle dört yöntem vardır.

6.5.2.1. Rockwell Sertlik Deneyi

Rockwell sertlik deneyi (RSD), metallerin sertlik ölçümünde en yaygın kullanılan metot olup, yapımı oldukça kolaydır ve özel bir uzmanlık gerektirmez. Rockwell sertliği, batma derinliğine bağlı birimsiz bir sayı olarak ifade edilir. Parçaya batan uç, bile yada konik uç şeklinde olabilir (Şekil 6.1). Sert olmayan malzemeler genellikle batıcı olarak ile ölçülürken, sert malzemeler içinse elmas konik uç kullanılır. Rockwell sertlik ölçüm cihazı Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



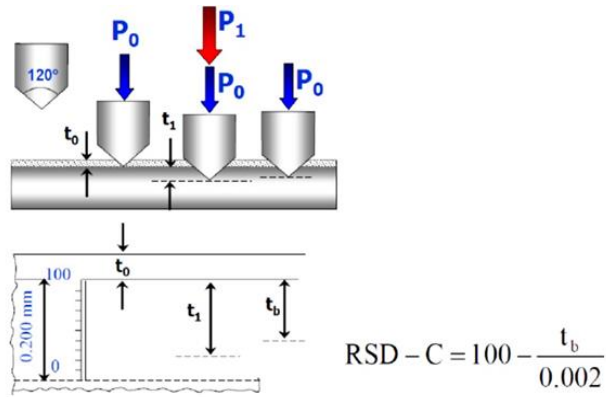
Şekil 6.1. Konik ve bilye uçlu batıcı uç.

Rockwelle yapılan sertlik ölçümlerinde, batıcı uç önce malzemeye 10 kg (100 N) ön yük ile batırılır. Ardından ana yük yüklenerek elde edilen batma derinliği ölçülür. Ana yük değeri Rockwell B (RB) de 100 kg, Rockwell C (RC) de ise 150 kg olarak belirlenmiştir.



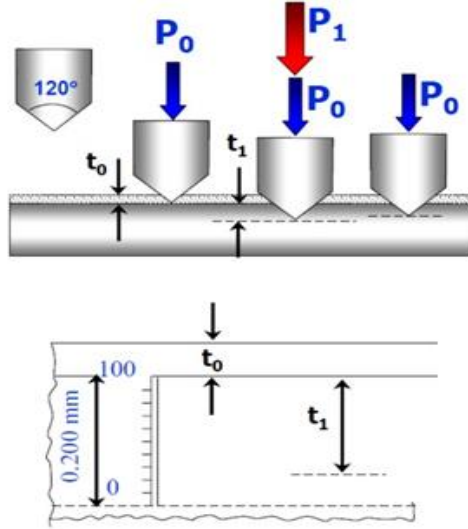
Şekil 6.2. Sertlik ölçüm cihazı.

Bu yöntemde, batma derinliği ölçüldüğü için yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde etkisi olabilir. Bu sorunu gidermek için önce batıcı uç küçük bir yük (P_0 =ön yük) ile malzemeye batırılarak cihaz sıfır düzeyine ayarlanır. Sonra toplam yüke ulaşacak şekilde ana yük (P_1) uygulanır. Nihai ana yük (P_1) kaldırılır (Şekil 6.3). Oluşan kalıcı izdeki derinlik artışı ölçülerek, göstergedan Rockwell sertlik değeri okunur.



Şekil 6.3. Rockvell sertlik ölçümünün şematik gösterimi.

Rockwell sertlik değeri boyutsuzdur. Malzeme içine 0,002 mm'lik her batışın bir sertlik değerinin 1 sayı düşmesiyle hesaplanır (Şekil 6.4). Ön yük uygulandıktan sonra ucun konumu ile ana yükün kaldırılmasından sonra ucun konumu arasındaki batma derinliği t_b olarak adlandırılır ve Rockwell Sertlik Değeri-C (RSD-C) aşağıdaki formülle hesaplanabilir.



Şekil 6.4. Her 0,002 mm batışta sertlik değeri değişiminin şematik gösterimi

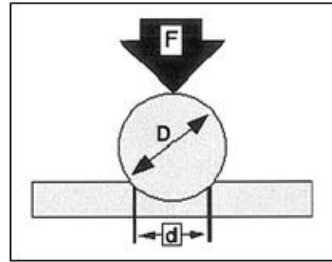
Sertlik ölçümünde kullanılan batıcı uç tipi ve uygulanan yük değeri genellikle sembollerle gösterilir. Bu nedenle, farklı deney koşullarında ölçülen sertlik değerleri çeşitli simgelerle tanımlanır; örneğin RSD-A, RSD-B, RSD-C, RSD-D gibi (Çizelge 6.3). Çok sert malzemelerin genellikle 150 kg'lık yük altında koni biçimindeki elmas uç kullanılarak ölçüldüğü ve sonuçların RSD-C simgesiyle sunulduğu bilinmektedir. Yumuşak malzemelerde ise çelik bilye batıcı uç ve 100 kg'lık yük altında ölçüm yapıldığı ve sonuçların RSD-B simgesiyle gösterildiği belirtilmiştir. Bir malzemenin Rockwell sertlik değeri 100'ü aştığında genellikle bilye batıcı uç kullanılması tercih edilmez. Çünkü bu durum, bilyenin şekil değiştirmesine ve ölçüm hassasiyetinin azalmasına yol açabilir. Öte yandan, herhangi bir skalada ölçülen Rockwell sertliği 20'den düşükse, koni biçimindeki elmas uç kullanılarak ölçüm yapılması genellikle önerilmez.

Çizelge 6.3. Rockwell sertlik skalaları.

Sembolü	Batıcı Uç	Büyük Yük Kgf.	Tipik Kullanma Yerleri
B	1.6 mm (1/16 inç) bilya	100	Bakır alaşımları, yumuşak çelikler, alüminyum alaşımları, temper döküm vs.
C	Elmas konik uç	150	Çelik, sert dökme demirler, perlitik temper döküm, titan, derin olarak yüzeyi sertleştirilmiş çelik ve Rockwell B değeri 100'den daha fazla olan diğer malzeme
A	Elmas konik uç	60	Sert metaller, ince çelik ve yüzeyi ince tabaka halinde sertleştirilmiş çelik
D	Elmas konik uç	100	İnce çelik ve orta kalınlıkta yüzeyi sertleştirilmiş çelik ve temper döküm
E	3.2 mm (1/8 inç) bilya	100	Dökme demir, alüminyum ve magnezyum alaşımları, yumuşak ince sac metaller
F	1.6 mm (1/16 inç) bilya	60	Tavllanmış bakır alaşımları, yumuşak ince sac metaller
G	1.6 mm (1/16 inç) bilya	150	Fosforlu bronz berilliyumlu bakır temper dökümler

6.5.2.2. Brinell Sertlik Deneyi

Brinell sertlik deneyi, malzeme yüzeylerine sert bir malzemeden yapılmış bir bilya ile belirli bir yük (F') ve belirli bir çapta (D) belirli bir süre uygulama esasına dayanır. Bu süreç sonunda malzeme yüzeyinde kalıcı bir iz (d) oluşur. Sonrasında, kuvvetin oluşturduğu izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri meydana gelir (Şekil 6.5).



Brinell sertlik değeri;

$$BSD = \frac{F}{y} = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Şekil 6.5. Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi

Brinell sertlik değeri (BSD), F, D ve d sembolleri ile gösterilen bir bağıntı ile hesaplanır. Bu bağıntıda, F uygulanan yükü (kg), D bilya çapını (mm) ve d iz çapını

(mm) ifade eder. Standart deney koşullarında genellikle 10 mm çapında bir bilye kullanılır. Yük, malzemenin özelliklerine bağlı olarak seçilir ve genellikle 10-15 saniye arasında bir süre uygulanır. Ancak bazı durumlarda, 10 mm'den daha küçük bilye çapları (1,25 mm, 2,5 mm ve 5,0 mm gibi) uçlar da kullanılabilir. Malzeme üzerine uygulanacak yük değeri, sertliği ölçülecek malzemenin türüne ve bilya çapına bağlı olarak belirlenir. İz çapının bilya çapına oranı $d/D = 0,20 - 0,70$ arasında olduğu durumlarda uygulanan yük değeri genellikle kabul edilir. Deney yükünün belirlenmesinde genellikle $F = CD^2$ formülü kullanılır. Burada F deney yükü, C malzeme türüne bağlı olarak değişen bir katsayıdır.

Demir içerikli malzeme (Çelik, DD) (C=30)

Cu ve Al alaşımlı malzemeler (C=10)

Yumuşak malzemeler (C=5)

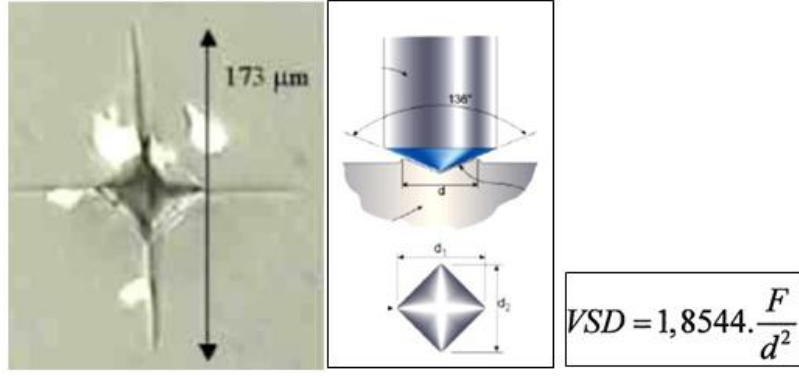
Metalik malzemelerde sertliğin artması ile çekme dayanımları da artar. Çeliklerde Brinell sertlik değeri ile çekme mukavemetleri arasındaki ilişki;

$$\sigma_c (kg/mm^2) = 0,35 \times BSD (kg/mm^2) \quad (6.1.)$$

bağıntısı ile bulunur. Bu bağıntı ile çeliklerin çekme dayanımını yaklaşık olarak tayin etmek mümkündür.

6.5.2.3. Vickers Sertlik Deneyi

Bu deney çeşidinde, 136° tepe açısına sahip elmas kare piramit şeklindeki baskı ekipmanı kullanılır (Şekil 7). F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucu, bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu formülde kullanılarak sertlik değerleri elde edilir. Vickers sertliği, uygulanan yüke bağlı değildir. Ölçüm hatalarını azaltmak ve heterojen yapıları değerlendirmek için iz ve yük büyütülebilir; ancak köşegen uzunluğu, ölçülen parça veya tabaka kalınlığının en fazla üçte ikisi kadar olmalıdır. Yük genellikle 1-120 kgf arasında değişebilir, normal olarak 30 kgf'lik yük seçilebilir. Vickers metodunda, büyük piramit açısına bağlı az derinliğin rağmen geniş diyagonaller elde edilir. Yüklü numunede baskı ucu yaklaşık 20 saniye kalır ve bu süre sonunda uygulama sona erdirilir.



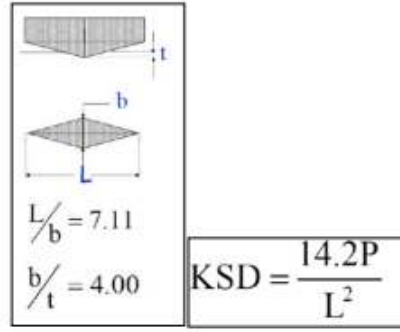
Şekil 6.6. Vickers sertlik deneyinin şematik gösterimi

Burada F uygulanan yükü (kg), d iz köşegenlerinin ortalaması (mm) olup $d=(d_1+d_2)/2$ formülü ile hesaplanır. d_1 ve d_2 sırasıyla ölçümü alınan köşegen uzunluklarıdır (Şekil 6.6).

Vickers sertlik deneyi, hem çok yumuşak hem de çok sert malzemeler için uygun bir yöntemdir. Deneyde uygulanan yük düşük olduğundan genellikle ince parçalarda ve sadece yüzeyi sert olan özel işlenmiş malzemelerde tercih edilir. Vickers sertliğinin önemli avantajlarından biri, son derece doğru ölçümler yapabilmesi ve tüm metal ve işlenmiş yüzeyler için tek bir tip batıcı uç kullanılabilmesidir. Bu yöntem, metallerin yanı sıra seramik malzemelerin sertliğini ölçmek için de güvenilir bir sertlik ölçüm metodudur.

6.5.2.4. Knoop Sertlik Deneyi

Bir malzemenin subjektif mikrosertliği Knoop batma deneyi ile belirlenebilir. Bu deney metodunda, tepe açısı 130° ve 173° olan piramit şeklindeki elmas bir uç malzeme üzerine bastırılır. Bir boyutu diğerinin yaklaşık 7 katı olan bir iz oluşur (Şekil 6.7). Malzemenin sertliği, izin derinliği ölçülerek hesaplanır. Knoop deneyinde, Vickers sertlik deneyine göre daha düşük kuvvetler uygulanır. Bu deney özellikle cam ve seramik gibi kırılğan malzemelerin sertliğini test etmek için kullanılır. Malzeme üzerine uygulanan yük çoğunlukla 1 kgf'den azdır. Batıcı uç, parçaya yaklaşık olarak 0,01 ile 0,1 mm aralığında dört yanlı bir iz bırakır.



Şekil 6.7. Knoop sertlik deneyinin şematik gösterimi

6.6. METALOGRAFİK İNCELEME

Mikro kesit incelemesi malzeme kesitin 50x den daha fazla büyütme ile incelenmesini içerir. Bu test yöntemiyle tane boyut analizi, tane yapısı ve makro kesit incelemelerinden farklı olarak, numunenin metalografik olarak hazırlanması daha özenli bir şekilde yapılmalıdır. Bu süreçte numunenin parlatılması ve dağlama süresine özellikle dikkat edilmelidir. Üretimi farklı kaynak parametreleriyle yapılan kare profillerin kaynaksız yüzeylerinin mikroyapısı optik mikroskop altında incelenmiştir. İnceleme öncesinde kabul gören metalografik hazırlama teknikleri kullanılarak numuneler parlatılmış ve %5 nitalle dağlanmışlardır. Metalografik işlemler, Azak Takım Teknolojileri Kalite Kontrol Laboratuvarlarında Nikon Eclipse LV150NL model mikroskopla gerçekleştirilmiştir.

Parlatma öncesi 80-120-350-600 kum zımparalama işlemi uygulandı. Ardından Metkon Eloprep 102 marka elektro polişing cihazı ile parlatma ve dağlama işlemleri uygulandı. İşlem zamanları: Parlatma voltajı 17, parlatma zamanı 21 sn, dağlama voltajı 15, dağlama zamanı 20 sn. Elektropolişing işleminden sonra %5 nital çözeltisiyle dağlama yapılmıştır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çelik sacdan boru ve profiller, yüksek frekans kaynak yöntemini kullanarak boyuna dikişli şeklinde üretilmekte olup, borudan profil ve yeni bir yöntem olan direkt profil metoduyla imal edilmektedir. İki farklı üretim yönteminin incelendiği çalışmada, üretilen çelik profillerin mikroyapı incelemeleri ve mekanik özellikleri (çekme, sertlik) ilgili test standartları kullanılarak araştırılmıştır. Tahribatlı testlerle çelik profillerin kaynak bölgelerinin davranışlarında farklılıklar var mı yok mu incelenmiştir. Numunelere ağız genişletme (TS EN ISO 8493) ve çekme testleri (TS 138 EN 10002-1) uygulanmıştır. Test ve deneylerde değerlendirilecek veriler ve bant genişlik tablosu Çizelge 7.1'de sunulmuştur. Kaynaklı kenar için kullanılan çekme deneyi numuneleri Şekil 7.2'de, kaynaklı kenar için kullanılan çekme deneyi numuneleri ise Şekil 7.3'te gösterilmiştir. 40x40x2,00 mm profillerin klasik ve direkt üretim metotlarıyla üretilen sac numunelerine ait çekme deneyi sonuçları Çizelge 7.2'dedir. Ayrıca, çelik kare profillerin üretiminde kullanılan kaynak ünitesi ve üretim tezgahı parametreleri Şekil 7.1'de ayrıca verilmiştir.

Çizelge 7.1. Bant genişlik tablosu.

Cinsi	Kalıp Çapı (mm)	Ebat (mm)	Sac Et Kalınlığı (mm)	Klasik Metodun Bant Genişlikleri (mm)	Yeni Metodun Bant Genişlikleri (mm)
Profil	51	40x40	1,5	157	152
Profil	51	40x40	2	156	149
Profil	51	40x40	2,5	155	146
Profil	51	40x40	3	153	144
Profil	51	40x40	4	151	141
Profil	63,5	50x50	1,5	197	192
Profil	63,5	50x50	2	196	190
Profil	63,5	50x50	2,5	195	186
Profil	63,5	50x50	3	193	184
Profil	63,5	50x50	4	191	178
Profil	76	60x60	1,5	237	232
Profil	76	60x60	2	236	229
Profil	76	60x60	2,5	235	226
Profil	76	60x60	3	233	224
Profil	76	60x60	4	231	218
Profil	76	60x60	5	229	212

Malzemelerde mekanik yükler altındaki davranışları genellikle "mekanik özellikler" olarak adlandırılır. Bu özellikler, temel olarak atomlar arası bağ kuvvetlerinden kaynaklanır. Aynı zamanda malzemenin iç yapısı veya mikroyapısı da bu özellikleri etkileyebilir. Bu nedenle, iç yapının değiştirilmesiyle aynı malzemede farklı mekanik özellikler elde etmek mümkün olabilir.

Metallerin mekanik özellikleri ise çeşitli yükleme koşullarında ve farklı deney parçalarıyla incelenir. Başlıca mekanik özellikler:

- Çekme ve basma dayanımı
- Sertlik özelliği
- Darbe dayancı
- Kırılma
- Yorulma
- Sürünme

7.1. ÇEKME TESTİ

Farklı üretim hızları ve kaynak değişkenlerine bağlı olarak üretimden çekme test numuneleri alındı. Kaynak bölgesinden yapılan çekme testi verilerine göre, akma ve çekme dayanımlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, çekme testlerinin tekrarı için numuneler profilin kaynaksız kenarından alındı ve değerler karşılaştırıldı. Yapılan test sonucu elde edilen mekanik özellik değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Çelik sacdan yapılan kare profillerin kaynaksız bölgelerinin tahribatlı testlerindeki performansı araştırılmıştır.



Şekil 7.1. Hat hızı ve kaynak parametre ekranı.



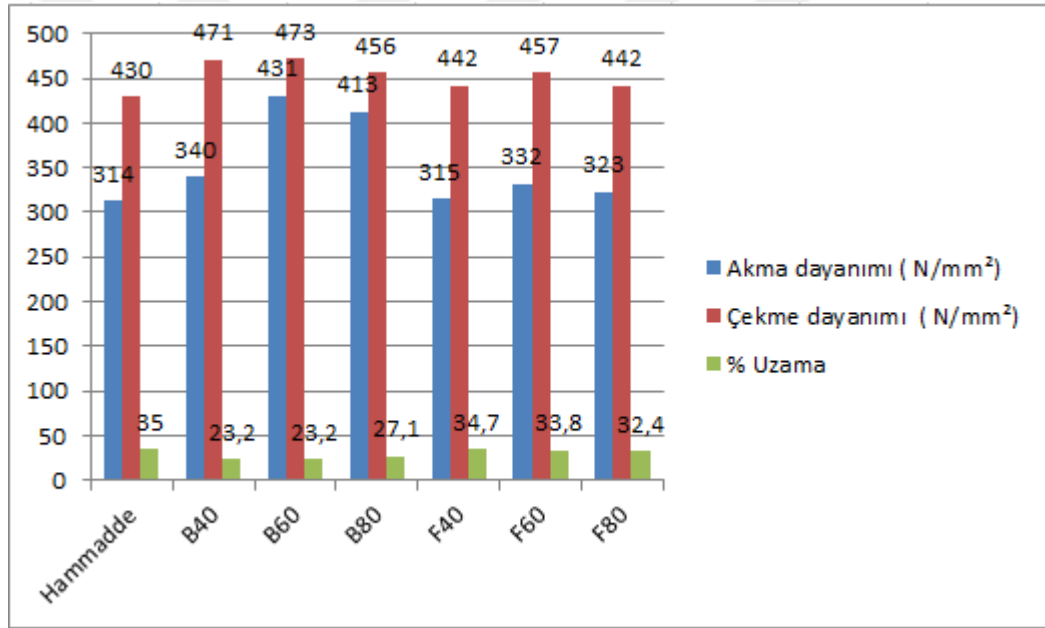
Şekil 7.2. Çekme test numuneleri (kaynaklı bölge).



Şekil 7.3. Çekme test numuneleri (kaynaklı bölge).

Çizelge 7.2. Kaynaksız yüzey numunelerin çekme testi sonuçları.

Malzeme	Malzeme Kodu	Metot	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	% Uzama
Ham Sac hali			314	430	35
40x40x2,00	B40	Klasik Metot	340	471	23,2
40x40x2,00	B60	Klasik Metot	431	473	23,2
40x40x2,00	B80	Klasik Metot	413	456	27,1
40x40x2,00	F40	Yeni Metot	315	442	34,7
40x40x2,00	F60	Yeni Metot	332	457	33,8
40x40x2,00	F80	Yeni Metot	323	442	32,4



Şekil 7.4. Numunelerin kaynaksız yüzey çekme testi değerleri.

7.2. SERTLİK TESTLERİ

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bu değerler malzemenin dayanıklılığı ile doğrudan ilişkilidir ve önemli ölçüde bilgi sağlar. Sertlik testi, malzemelerin dayanıklılığı hakkında bağlı değerler sunan tahribatsız bir test yöntemidir. Sertlik ölçüm yöntemleri, kullanılan batıcı ucun geometrisine ve uygulanan kuvvet büyüklüğüne göre çeşitlenir. Bu yöntemler arasında Vickers, Rockwell, Brinell ve Knoop sertlik ölçekleri bulunmaktadır. Bu ölçekler

arasında dönüşüm tabloları mevcuttur, ancak değerlerin dönüşümü sırasında bazı kayıplar olabilir. Rockwell yöntemi, sertleştirilmiş çelik bilye veya elmas koni batıcı uçları kullanır. Uçun malzeme yüzeyine batma derinliği ölçülür. Malzemeye göre uygun uç ve yük değişkeni seçilmelidir. C skalası, genellikle sert metaller için kullanılır ve 150 kgf yük ile 120° tepe açısına sahip elmas koni uç kullanılır. B skalası ise, daha yumuşak malzemeler için uygundur ve 100 kgf yük ile 1/16 inç çapında sert bilya kullanılır.

Çizelge 7.3. Numunelerin düz yüzey sertlik ölçümleri.

Malzeme	Malzeme Kodu	Metot	Sertlik Değeri HRB
40x40x2,00	B40	Klasik Metot	74,7
40x40x2,00	B60	Klasik Metot	74,7
40x40x2,00	B80	Klasik Metot	72,7
40x40x2,00	F40	Yeni Metot	54,6
40x40x2,00	F60	Yeni Metot	51,2
40x40x2,00	F80	Yeni Metot	53,1

Çizelge 7.4. Numunelerin köşe radyüs sertlik ölçümleri.

Malzeme	Malzeme Kodu	Metot	Sertlik Değeri HRB
40x40x2,00	B40	Klasik Metot	77,2
40x40x2,00	B60	Klasik Metot	76,6
40x40x2,00	B80	Klasik Metot	75,8
40x40x2,00	F40	Yeni Metot	77,5
40x40x2,00	F60	Yeni Metot	78,2
40x40x2,00	F80	Yeni Metot	79,4

7.3. AĞIZ GENİŞLETME TESTİ SONUÇLARI

Üretimi yüksek frekans indüksiyon kaynak metodu ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak yapılan kare profillerin köşelerden mi yoksa kaynak dikiş yerinden mi çatlağın yada hasarın başlayıp ilerlediğini saptamak amacıyla ağız (köşe) genişletme deneyi uygulanmıştır. Deney esnasında çatlağın başlangıcının nereden başladığı gözle

takip edilmiştir. Köşe genişletme deneyleri kaynak güç değeri, hat üretim hızı, empedor çapı ve konumu, indüksiyon bobin konumu gibi değişkenler dikkate alınarak üretilen kare profillere uygulanmıştır.

7.3.1. Hat Hızının Etkisi

Genişletme deneyi iki farklı metodla, farklı üretim hızlarında üretilen B40, B60, B80, F40, F60, F80 kodlu numunelere uygulanmıştır. Tüm deney numuneleri için kutu boru başlangıç çapının 18%'i kadar ağız genişletilmesi yapılmıştır.

B40: Klasik metodla (borudan profil ile) 40 mt/dk hat hızında üretilen deney profilidir.

B60: Klasik metodla (borudan profil ile) 60 mt/dk hat hızında üretilen deney profilidir.

B80: Klasik metodla (borudan profil ile) 80 mt/dk hat hızında üretilen deney profilidir.

F40: Yeni metodla (esnek soğuk şekillendirme ile) 40 mt/dk hat hızında üretilen deney profilidir.

F60: Klasik metodla (esnek soğuk şekillendirme ile) 60 mt/dk hat hızında üretilen deney profilidir.

F80: Klasik metodla (esnek soğuk şekillendirme ile) 80 mt/dk hat hızında üretilen deney profilidir.

Şekil 7.5'da iki farklı metodla aynı (40 mt/dk) hat hızlarında üretilen numunede ağız genişletme deney sonrası ortaya çıkan şekil değişimini gösteren fotoğraf yer almaktadır. Standardın istediği 18%'lik genişletmede ağızlarda herhangi bir açılma olmamıştır.

Şekil 7.6'da iki farklı metodla aynı (60 mt/dk) hat hızlarında üretilen numunede ağız genişletme deneyi sonrası şekil değişimini gösteren fotoğraf vardır. Standardın istediği 18%'lik genişletmede ağızlarda herhangi bir açılma olmamıştır.

Şekil 7.7'da iki farklı metodla aynı (80 mt/dk) hat hızlarında üretilen numunede ağız genişletme deneyi sonrası şekil değişimini gösteren fotoğraf vardır. Standardın istediği 18%'lik genişletmede ağızlarda herhangi bir açılma olmamıştır

Kaynak dikişi istenilen nitelikte olduğunda profil kaynak dikişinden değil, köşelerden yırtılarak hasara uğramaktadır. (Şekil 7.9) Standartta da istenilen budur. Farklı hat hızlarında ağız (köşe) genişletme deneyinin uygulandığı B40, B60, B80, F40, F60, F80 kodlu numunelerin hiç birisinde de kaynak dikişinde yırtılma olmamıştır. (Şekil 7.8) Dolayısıyla ağız (köşe) genişletme testleriyle elde edilen sonuçlarda hat kaynak hızının

kaynak dikişini ve farklı metodla profil üretimini nasıl etkilediği hususunda net bir sonuç çıkmamaktadır. Daha doğrusu olumsuz bir sonuç çıkmamıştır.

7.3.2. Kaynak Gücünün Etkisi

Genişletme deneyi iki farklı metodla, kaynak güç değerlerinin değiştirilmesiyle farklılaşan kaynak parametreleriyle üretilen B40, B60, B80, F40, F60, F80 kodlu numunelere uygulanmıştır. Tüm deney numuneleri için kutu boru başlangıç çapının 18%'i kadar ağız genişletilmesi yapılmıştır.

B40: Klasik metodla (borudan profil ile) 120 kw frekans gücüyle üretilen deney profilidir.

B60: Klasik metodla (borudan profil ile) 150 kw frekans gücüyle üretilen deney profilidir.

B80: Klasik metodla (borudan profil ile) 180 kw frekans gücüyle üretilen deney profilidir.

F40: Yeni metodla (esnek soğuk şekillendirme ile) 120 kw frekans gücüyle üretilen deney profilidir.

F60: Klasik metodla (esnek soğuk şekillendirme ile) 150 kw frekans gücüyle üretilen deney profilidir.

F80: Klasik metodla (esnek soğuk şekillendirme ile) 180 kw frekans gücüyle üretilen deney profilidir.

Şekil 7.5'da iki farklı metodla aynı (120 kw) kaynak güç değerinde üretilen numunede ağız genişletme deneyi sonrası şekil değişimini gösteren fotoğraf vardır. Standardın istediği 18%'lik genişletmede ağızlarda herhangi bir açılma olmamıştır.

Şekil 7.6'da iki farklı metodla aynı (150 kw) kaynak güç değerinde üretilen numunede ağız genişletme deneyi sonrası şekil değişimini gösteren fotoğraf vardır. Standardın istediği 18%'lik genişletmede ağızlarda herhangi bir açılma olmamıştır.

Şekil 7.7'da iki farklı metodla aynı (180 kw) kaynak güç değerinde üretilen numunede ağız genişletme deneyi sonrası şekil değişimini gösteren fotoğraf vardır. Standardın istediği 18%'lik genişletmede ağızlarda herhangi bir açılma olmamıştır

Kaynak dikişi sağlam olduğunda profile yapılan testlerde açma yada hasar kaynak dikişinden değil köşelerinden yırtılarak olmaktadır (Şekil 7.9). Standartta da istenilen

budur. Farklı kaynak güç değerlerinde ağız (köşe) genişletme deneyinin uygulandığı B40, B60, B80, F40, F60, F80 kodlu numunelerin hepsinde de kaynak dikişinde yırtılma olmamıştır (Şekil 7.8). Netice itibarı ile ağız/köşe genişletme testleriyle elde edilen sonuçlar, farklı kaynak parametrelerinin (güç değerlerinin) kaynak dikişini ve farklı metodla profil üretimini hangi şekilde etki ettiği hususunda olumsuz bir sonuç çıkmamaktadır.



Şekil 7.5. Ağız genişletme testi sonucu 40 m/dak (120kW).



Şekil 7.6. Ağız genişletme testi sonucu 60 m/dak (150kW).



Şekil 7.7. Ağız genişletme testi sonucu 80 m/dak (180kW).



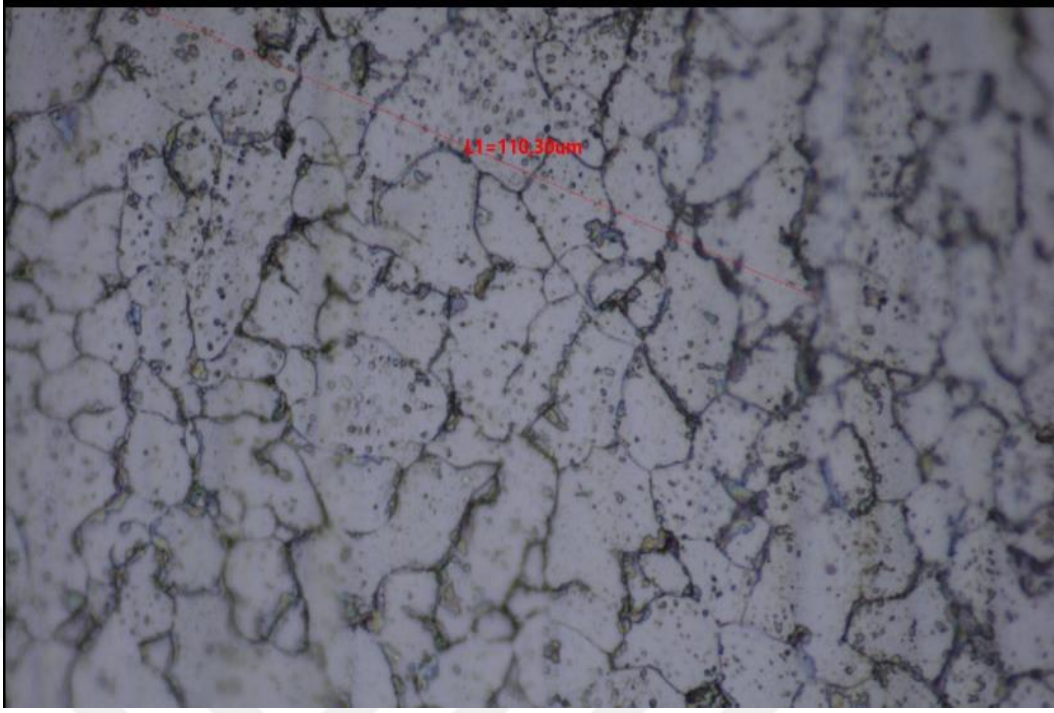
Şekil 7.8. Ağız genişletme testi sonuçları.



Şekil 7.9. Ağız genişletilip, yırtma testi sonuçları.

7.4. MİKRO KESİT İNCELEMESİ (TS EN ISO 17639:2014)

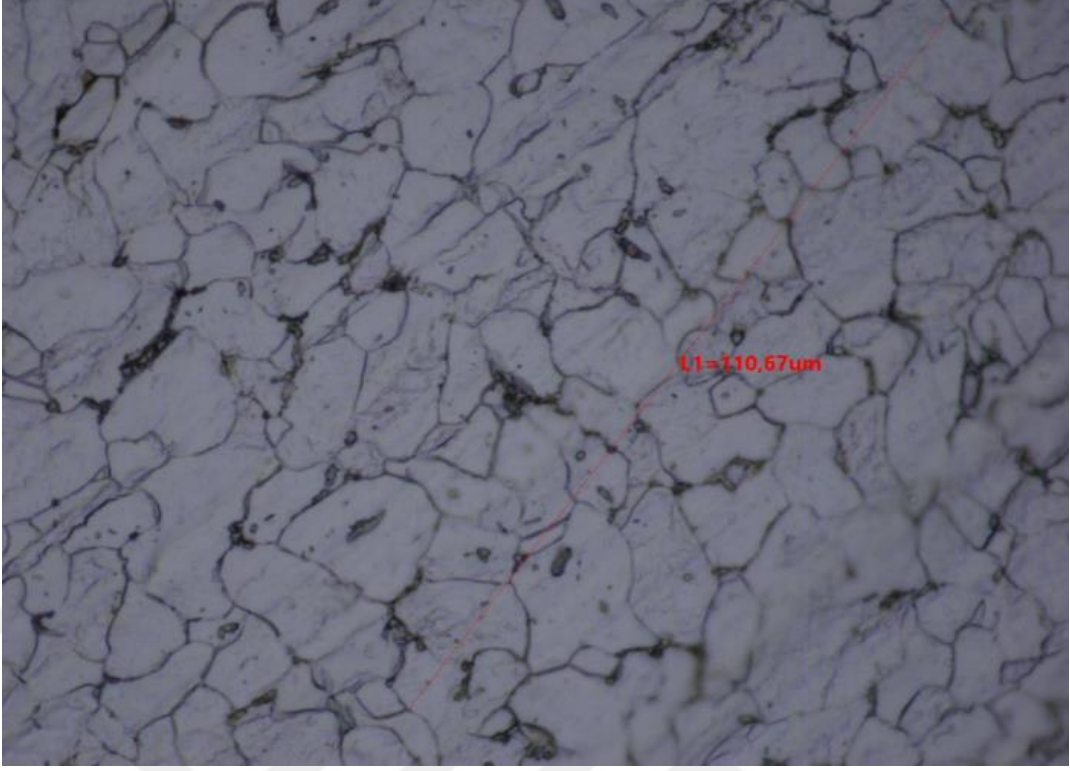
İki farklı metodla yüksek frekans indüksiyon kaynağıyla üretilen kare profillerin kaynaklı bölgelerinin mikroyapısı optik mikroskopla incelenmiştir. Bu metalografik çalışmalar Azak Takım Teknolojileri laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olup numuneler standart yöntemlerle % 5'lik Nital çözeltisiyle parlatılarak 3-6 sn dağlanıp 1000X büyütme ile mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Çekilen mikroyapı fotoğrafları nokta sayma metalografi yöntemiyle değerlendirilerek dört adet (bu çalışmada x1000 büyütme mikroyapı) görüntü üzerinden yaklaşık ferrit hacim oranları: B40 numune için Şekil 7.10, B60 numune için Şekil 7.11, B80 numune için Şekil 7.12, F40 numune için Şekil 7.13, F60 numune için Şekil 7.14, F80 numune için Şekil 7.15' de belirlenmiştir. 110 μm 'lik taranmış yüzeyde birbirine yakın boyutta taneler mevcuttur. Şekil 7.16'de B40, B60, B80 kodlu profil numunelerine, Şekil 7.17'de ise F40, F60, F80 kodlu profil numunelerine ait büyütülmüş mikroyapılar birlikte gösterilmektedir.



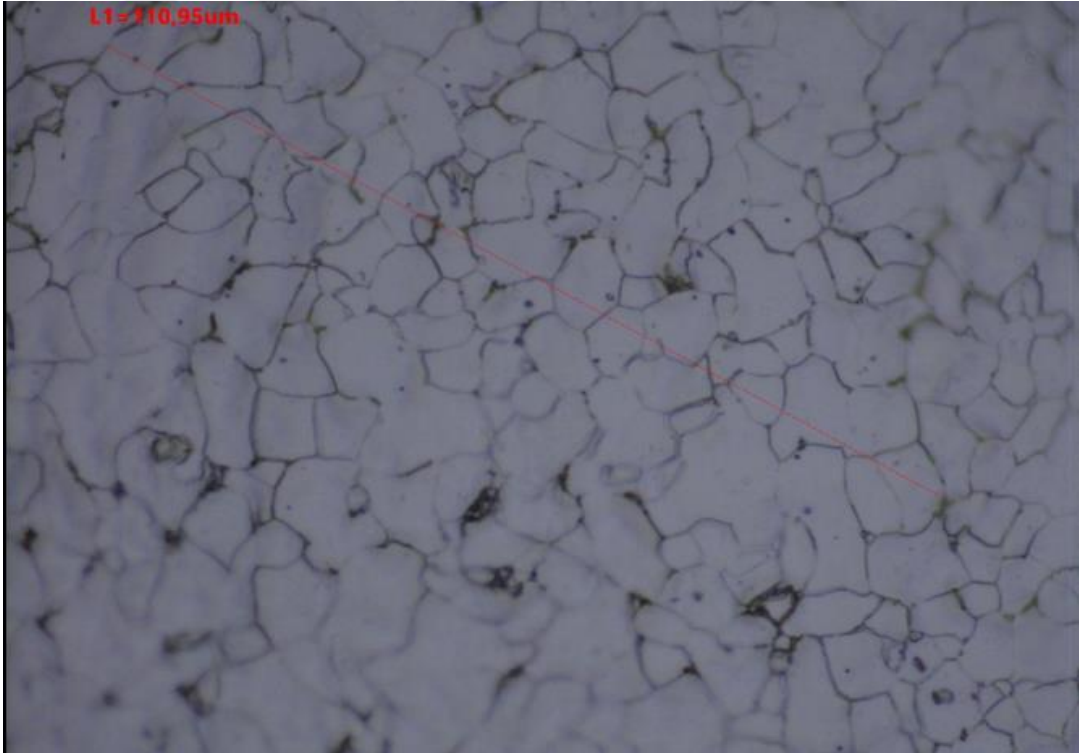
Şekil 7.10. B40 x 1000 büyütme.



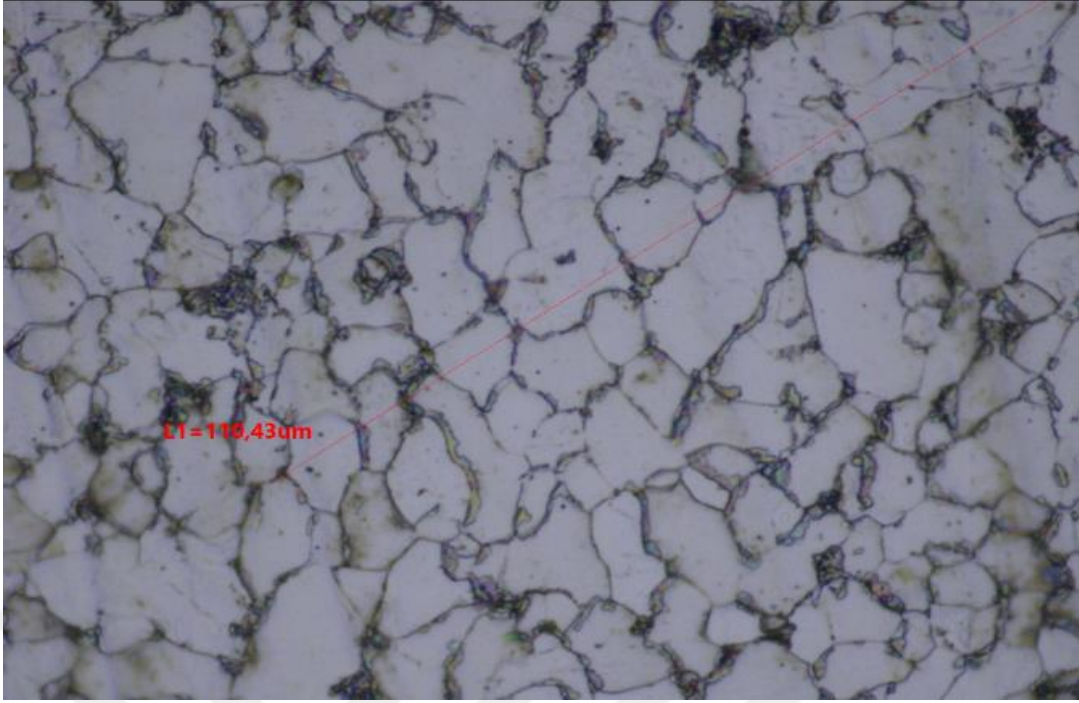
Şekil 7.11. B60 x 1000 büyütme.



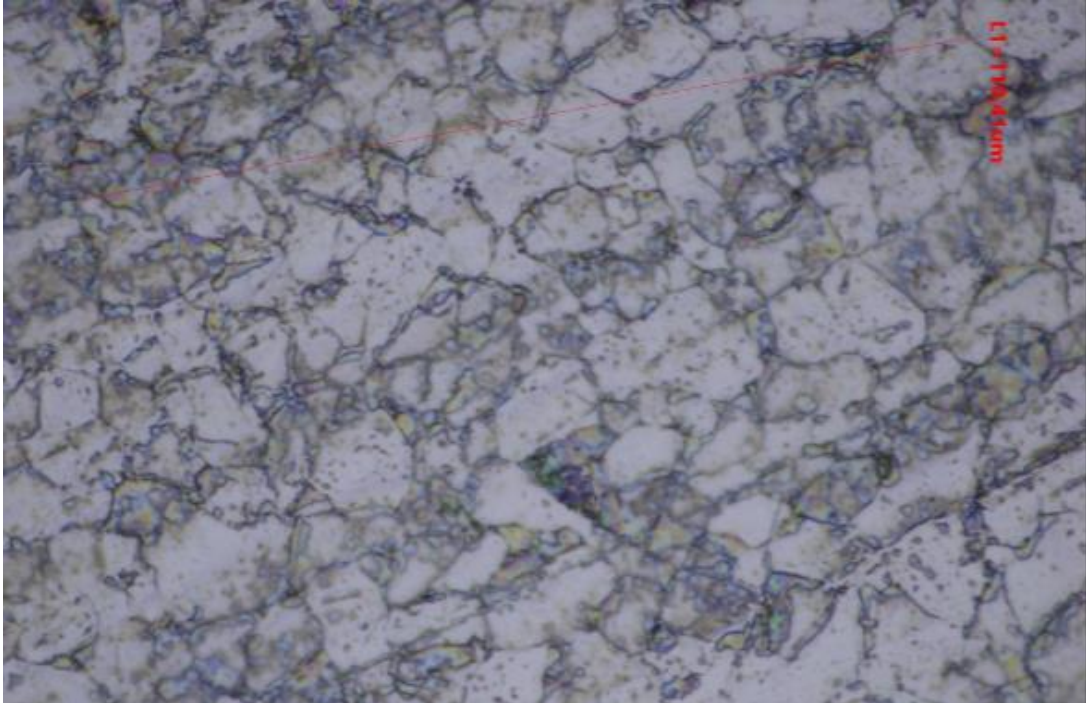
Şekil 7.12. B80 x 1000 büyütme.



Şekil 7.13. F40 x 1000 büyütme.



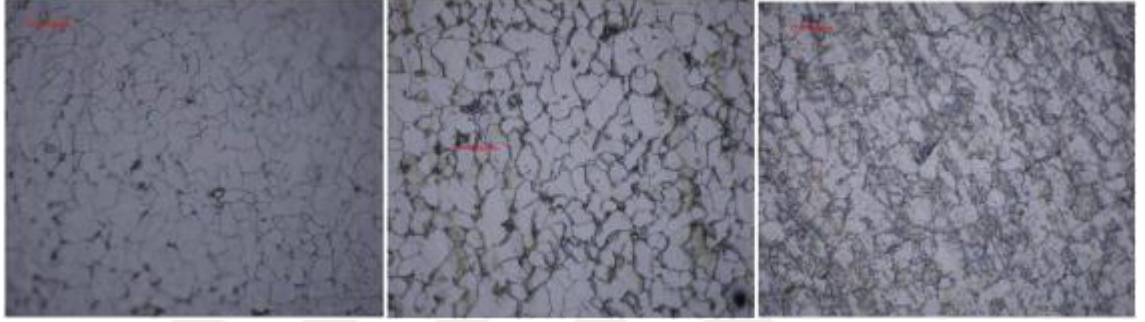
Şekil 7.14. F60 x 1000 büyütme.



Şekil 7.15. F80 x 1000 büyütme.



Şekil 7.16. B40/60/80 x1000 büyütme mikroyapı.



Şekil 7.17. F40/60/80 x1000 büyütme mikroyapı.

8. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca verilmiştir.

- Kare profillerin iki farklı üretim metoduyla imal edilmesi sonucunda yapılan çekme testlerinde, sacın orijinal özelliklerine en yakın sonuçların yeni metotla alınan numunelerden elde edildiği görülmektedir. Özellikle işlendikten sonra sacın mekanik özelliklerinin orijinal değerlerinden çok fazla değişikliğe uğramaması hedeflenmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, borudan profil metoduyla üretilen malzemelerin mekanik değerlerinin yeni metotla doğrudan profil üretimlerine göre daha fazla değişikliğe uğradığını ortaya koymuştur. Bu durum, çelik boru profil üretim endüstrisinde mamul üründen istenenlerle uyumlu değildir.
- Profil köşelerinde iç gerilmeler ve dislokasyon hareketlerinin yoğunluğunun malzemeye etkisi, yapılan tahribatlı testlerden biri olan ağız genişletme testi ile belirlenmektedir. Yeni üretim metoduyla kenardan bükerek şekillendirme işleminin, klasik borudan profil üretimine göre profilin köşelerinde olası bir dezavantaj yaratıp yaratmadığı da bu test ile değerlendirilmiştir. Test sonuçları, standardın izin verdiği ölçüde (%18 kadar) ağız genişletme ile her iki metot arasında önemli bir farklılık olmadığını göstermiştir. Bu test sonuçları, her iki üretim metodunun da başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.
- Aynı zamanda iki farklı üretim metoduyla imal edilen profillerin düz yüzey ve köşe radyüslerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Klasik metotla üretilen ürünler ile yeni metotla üretilen ürünlerin köşe radyüs sertlik değerlerinde farklılık gözlenmemiştir. Dolayısıyla yapılan tahribatlı testlerden ağız genişletme testi bu farklılığın mekanik zorlamalarda olumsuz bir durum oluşturmadığı saptanmıştır.
- Mikroyapı incelemeleriyle de iki farklı üretim metodu ile üretilen çelik profillerin tane yapısı ve boyutlarında belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir.

9. KAYNAKLAR

- Aifantis, E. C. (1987). The physics of plastic deformation. *International journal of plasticity*, 3(3), 211–247.
- Aytaç, A., Işık, M. S., Çanakçı, B., Özdemir, T., Aztekin, K., & İpek, H. (2018). AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(2), 139–165. <https://doi.org/10.17134/khosbd.477252>
- Azizian, H. (2015). Constructional System of Cold Formed Light Steel Framing (LSF). *Cumhuriyet Science Journal*, 36(3), 2135–2142. <http://dergi.cumhuriyet.edu.tr/cumusci/article/view/5000119564>
- Buckholt, J., & Chen, H. (2018). The 2017 AISI Cold-Formed Steel Design Manual. *Wei-Wen Yu International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures 2018*. <https://doi.org/LK> - <https://worldcat.org/title/1104684366>
- Çapan, L. (2020). Metallere plastik şekil verme. İçinde *Çağlayan Kitabevi* (5.baskı). Çağlayan Kitabevi. <https://doi.org/LK> - <https://worldcat.org/title/794501525>
- Carvill, J. (1993). Engineering materials. *Mechanical Engineer's Data Handbook*, 218–266. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051135-1.50011-X>
- Çetinkaya, G. (2020). *Dördüncü Sanayi Devriminin Kamu Harcamaları Üzerine Etkisi*. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Maliye Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi.
- Chand, S., Paul, B., & Kumar, M. (2015). An overview of use of Linz-Donawitz (LD) steel slag in agriculture. *Current World Environment*, 10(3), 975.
- Duman, A. (2008). *Cumhuriyet döneminde Türkiye’de Demir çelik Sanayii*. Marmara Üniversitesi (Turkey).

- Durmaz, H. (2002). *Radyasyon zırhlaması amacıyla karbonlu yapı çeliklerinin değerlendirilmesi*. Enerji Enstitüsü.
- Fathalizade, A. (2011). Ortaçağda, Yakındoğuda Demir. İçinde *Metalurji* (ss. 34–43). Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası.
- Gale, W. K. V. (1973). The Bessemer steelmaking process. *Transactions of the Newcomen Society*, 46(1), 17–26.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing* (NV-1 onl). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/LK> - <https://worldcat.org/title/1289816940>
- Halmos, G. T. (2005). *Roll forming handbook*. Crc Press.
- Karahan, D. S. (2019). *Dünya’da ve Türkiye’de Demir, Krom ve Baz Metaller*. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/DEMİR-KROM.pdf>
- Keskin, S., & Ünlü, T. (2016). Attepe Bölgesindeki Siderit Oluşumlarının Mineralojik Özellikleri ve Jeotektonik Ortamı (Kayseri-Adana Havzası, Türkiye). *Yerbilimleri*, 37(2), 93–120.
- Li, Y., Li, M., Liu, K., & Li, Z. (2018). Effect of differential speed rotation technology on the forming uniformity in flexible rolling process. *Materials*, 11(10), 1906.
- Makina, B. (2024). *Açık Profil Hatları*. Birlik Makina. <https://birlikmakina.eu/acik-profil-hatlari>
- Mohai, I., Szépvölgyi, J., & Tóth, M. (2000). RF Thermal Plasma Treatment of a Flue Dust From The Siemens-Martin Process. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 25–29.
- Orhan, S. (2008). *Yüksek Frekans Kaynağı İle Birleştirilen Çelik Profillerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*.
- Pearce, R. (1991). *Sheet metal forming*. Springer Science & Business Media.
- Roveller, H. T. (2024). *Demir*. Hastorna Web Sayfası. <http://www.hastorna.com/kategori/demir>

- Şanal, İ. (2020). *Profil Boru Üretiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Schachinger, E. D., Braidt, R., Strauß, B., & Hassel, A. W. (2015). EIS study of blister formation on coated galvanised steel in oxidising alkaline solutions. *Corrosion science*, 96, 6–13.
- Singh, S. K., Rekha, P., & Surya, M. (2020). Utilization of Linz–Donawitz slag from steel industry for waste minimization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 611–627.
- Somers, B. R. (1993). Introduction to the selection of carbon and low-alloy steels. İçinde *ASM Handbook* (ss. 405–407).
- Taş, Z. (2012). Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde metalürjik mukavemet artırma mekanizmaları. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2), 97–101.
- Vurdu, S. A. (2022). *Çelik İhracatçıları Birliği Faaliyet Raporu*. Çelik İhracatçıları Birliği. [https://www.cib.org.tr/files/Doc/files/2022 Çalışma Raporu.pdf](https://www.cib.org.tr/files/Doc/files/2022%20Çalışma%20Raporu.pdf)
- Yılmaz, Ş., & Kurnaz, C. (2001). Arkeomealurj of Metallurgical Processes. *Sakarya University Journal of Science*, 5(1), 45–50.
- Yuan, Q., Liu, Z., Zheng, K., & Ma, C. (2021). Metal. *Civil Engineering Materials*, 205–238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822865-4.00004-0>

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat Dökmeci

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İmalat Müh.	Düzce Üniversitesi	
Lisans	Metalurji Müh.	İstanbul Teknik Üniversitesi	2000
Lise		Kozlu Lisesi	1992