

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEL ÇEKME İŞLEMLERİNDE HADDEDEN GEÇİRİLEN
TELİN TERMAL DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ**

**Hazırlayan
Furkan KORKMAZ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA**

Yüksek Lisans Tezi

**Ocak 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEL ÇEKME İŞLEMLERİNDE HADDEDEN GEÇİRİLEN
TELİN TERMAL DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Furkan KORKMAZ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA**

**Bu çalışma, FYL-2021-11043 kodlu Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma
Projeleri Birimi (BAP) projeleri ve Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş. tarafından
desteklenmiştir.**

**Ocak 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Furkan KORKMAZ



“Tel Çekme İşlemlerinde Haddeden Geçirilen Telin Termal Davranışının Sayısal Analizi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Furkan KORKMAZ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA

Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Nesrin KAYATAŞ DEMİR

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmem için ve çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı HASÇELİK KABLO SAN. TİC. A.Ş. ve Ar-Ge Merkezi çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına katkı sağlayan FYL-2021-11043 kodlu proje ile maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen annem Melike KORKMAZ, babam Ali Cengiz KORKMAZ, kardeşim Duhan Melih KORKMAZ, sevgili nişanlım Sevinç GÜLDOĞAN ve dostlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Furkan KORKMAZ

Ocak 2023, KAYSERİ

TEL ÇEKME İŞLEMLERİNDE HADDEDEDEN GEÇİRİLEN TELİN TERMAL DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ

Furkan KORKMAZ

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2023
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih KAYA**

ÖZET

Sanayileşmenin ve teknolojinin artması ile günümüzde imalat yöntemleri çeşitlilik kazanmaktadır. Sanayide ürün imalatı için birçok imalat yöntemi tercih edilirken metal sanayinde ise talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Tel çekme yöntemi de metal endüstrisinde sıklıkla kullanılan ve seri imalat için oldukça hızlı ve verimli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Cıvata, zincir, perçin, çivi, kablo, halat ve yay gibi ürünlerin üretiminde tel çekme yöntemi bir kalıp ya da hadde kullanılarak malzemeye istenilen geometri kesitinin verilmesi için sıklıkla tercih edilmektedir. Tel çekme yöntemi mühendislik eğrisi düşünüldüğünde malzemenin akma dayanımından sonraki plastik şekil değiştirme bölgesinde gerçekleşen bir olaydır. Yapılan çalışmada çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri kullanılarak dairesel kesite sahip tellere tel çekme işlemi uygulanmış olup, deneysel ve sayısal olarak tel çekme yöntemi incelenmiştir. Tel çekme prosesi sonu çelik, bakır ve alüminyum telleri üzerinde oluşan gerilmeler, açığa çıkan enerjiler ve sıcaklık dağılımları incelenerek yorumlar yapılmıştır. Çalışmada deneysel yöntemler ile edilen tel sıcaklık sonuçlarına göre sayısal model doğrulanmıştır. Çözümlerde tel çekme hızının 0,05 m/s'den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %262, bakır telde %246 ve alüminyum telde %255 oranında tel üzerinde oluşan gerilmelerin arttığı görülmüştür. Aynı hız artış durumunda tel üzerinde oluşan sıcaklığın ise çelik telde %113, bakır telde %109 ve alüminyum telde %109 oranında arttığı görülmüştür. Bu sayede tel çekme sanayi uygulamalarında optimum proses parametrelerinin belirlenmesine ve verimli bir üretimin gerçekleştirilmesine deneysel veriler ile doğrulanmış sayısal model ile katkı sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tel, Tel Çekme, Plastik Şekil Değiştirme, Hadde, Sayısal Modelleme, Kablo, Halat, Yay.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE THERMAL BEHAVIOR OF ROLLED WIRE IN WIRE DRAWING PROCESSES

Furkan KORKMAZ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, January 2023

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Fatih KAYA

ABSTRACT

Today, with the increase in industrialization and technology, manufacturing methods are gaining variety. While many manufacturing methods are preferred for product manufacturing in industry, machining and chipless manufacturing methods are often used in the metal industry. Wire drawing method is also frequently used in the metal industry and is a very fast and efficient method for mass production. In the production of products such as bolts, chains, rivets, nails, cables, ropes and springs, the wire drawing method is often preferred to give the desired geometric section to the material by using a die or a rolling mill. When the engineering curve of the wire drawing method is considered the plastic deformation region takes place after the yield strength of the material. In this study, wire drawing process is applied to wires with circular cross section using steel, copper and aluminum materials, and wire drawing method is examined experimentally and numerically. The stresses formed on the steel, copper, and aluminum wires at the end of the wire drawing process, the released energies and the temperature distributions are examined, and they are discussed comprehensively. At the same time, numerical model is validated with the wire temperature results obtained by the experimental methods. It is observed that the stresses on the wire increased by 262% in steel wire, 246% in copper wire and 255% in aluminum wire by increasing the wire drawing speed from 0.05 m/s to 0.3 m/s in the solutions. In the same speed change, it is observed that the temperature on the wire is increased by 113% in steel wire, 109% in copper wire and 109% in aluminum wire. In this thesis, the optimum process parameters in wire drawing industry applications are determined and an efficient production strategies are discussed with the help of numerical model which is verified with experimental data.

Keywords: Wire, Wire Drawing, Plastic Deformation, Die, Numerical Modeling, Cable, Rope, Spring.

İÇİNDEKİLER

TEL ÇEKME İŞLEMLERİNDE HADDEDEN GEÇİRİLEN TELİN TERMAL DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ve ONAY SAYFASI.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
KISALTMALAR.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tel Çekme Endüstrisi ve Tarihçesi.....	3
1.1.1. Filmaşın ve Tel	4
1.1.2. Tel Çekme Makinası	6
1.1.3. Tel Çekme Haddesi	7
1.1.4. Tel Çekme ile Üretilen Malzemeler	9
1.2. Tel Çekme Prosesini Etkileyen Parametreler.....	11
1.2.1. Yağlayıcılar	12
1.2.2. Hadde Geometrisi	14
1.2.3. Tel Çekme Hızı	18
1.2.4. Redüksiyon Oranı	19
1.3. Literatür Çalışması	20
1.4. Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	26

2. BÖLÜM

YÖNTEM ve MATERİYAL

2.1. Deneysel Ölçümlerin Gerçekleştirilmesi	28
2.2. Sayısal Modelin Oluşturulması.....	30

2.2.1. Matematiksel Model.....	31
2.2.2. Sayısal Çözüm Parametreleri ve Sınır Şartları	35

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Deneysel Sonuçlar	39
3.2. Sayısal Sonuçlar	41
3.2.1. Çözümlerin Meshten Bağımsız Hale Getirilmesi	41
3.2.2. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Modelin Karşılaştırılması	43
3.2.3. Farklı Parametreler için Zamana Bağlı Çözümler	44

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma ve Sonuç.....	86
4.2. Öneriler	91
KAYNAKÇA	93
ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
%	Yüzde	-
mm	Milimetre	-
cm	Santimetre	-
m	Metre	-
s	Saniye	-
g	Gram	-
°	Derece	-
°C	Santigrat derece	-
MPa	Megapaskal	-
N	Newton	-
δ	Yoğunluk	g/cm ³
D1	Hadde delik çapı	mm
D2	Hadde çekirdek çapı	mm
D3	Zarf çapı	mm
D4	Hadde çekirdek giriş çapı	mm
D5	Hadde çekirdek çıkış çapı	mm
2α	Çekme açısı	°
2β	Giriş açısı	°
2γ	Çıkış açısı	°
H1	Zarf yüksekliği	mm
H2	Hadde çekirdek yüksekliği	mm
I3	Hadde silindir boyu	mm
C	Karbon	-
Fe	Demir	-
St	Çelik	-
Cu	Bakır	-
Al	Alüminyum	-
d_1	Giren çel çapı	mm
d_2	Çıkan tel çapı	mm
V_1	Giren tel hızı	mm

V_2	Çıkan tel hızı	mm
σ_d	Tel çekme gerilmesi	MPa - (N/mm ²)
F	Tel çekme kuvveti	N
A_i	Giren tel kesit alanı	mm ²
A_0	Çıkan tel kesit alanı	mm ²
ε	Birim şekil değiştirme (Gerinim)	-
γ_f	Ortalama akma dayanımı	MPa - (N/mm ²)
μ	Sürtünme katsayısı	-
α	Kalıp yarım açısı	°
ϕ	Artık iş faktörü	-
K	Dayanım katsayısı	-
n	Gerinim pekleştirme üssü	-
D	Ortalama tel çapı	mm
D_i	Giren tel çapı	mm
D_0	Çıkan tel çapı	mm
L_c	Tel ile haddenin temas uzunluğu	mm
V	Tel çekme hızı	m/s
q	Isı akısı	W – (J/s)
q_i	İletim ile gerçekleşen ısı akısı	W – (J/s)
k	İletim katsayısı	W/m °C
T	Sıcaklık	°C
A_x	Isı iletiminin gerçekleştiği yüzey alanı	mm ²
q_t	Taşınım ile gerçekleşen ısı akısı	W – (J/s)
h	Taşınım katsayısı	W/m ² °C
T_s	Yüzey ile ortam arasındaki sıcaklık	°C
T_∞	Akışkanın (ortamın) Sıcaklığı	°C
A_s	Isı taşınımının gerçekleştiği yüzey alanı	mm ²

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1	Tel çekme haddesi parametrelerinin tanımı.	8
Tablo 1.2	Örnek bir tel çekme işlemi için tel çekme makinasının hadde serisi.	20
Tablo 2.1	Flir i5 termal kamera teknik özellikleri.	30
Tablo 2.2	Tel çekme işleminin sayısal modelinde kullanılan malzemelerin özellikleri.	35
Tablo 3.1	ANSYS mesh özellikleri.	41



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Orta çağda tel çekme işlemi	3
Şekil 1.2	Tel çekme işleminin şematik gösterimi.....	4
Şekil 1.3	Filmaşın tel örneği.....	5
Şekil 1.4	Tel çekme makinası ve kafası (bloğu).....	6
Şekil 1.5	Tel çekme haddesi: (a) Hadde geometrisi, (b) WC-Co hadde.	7
Şekil 1.6	Çelik tellerden üretilmiş ürünler: (a) halat, (b) yay, (c) perçin.	10
Şekil 1.7	Bakır tellerden üretilmiş ürünler: (a) bakır telli kablo, (b) emaye kaplı bakır telli bobin, (c) bakır yüzük.	10
Şekil 1.8	Alüminyum tellerden üretilmiş ürünler: (a) alüminyum iletken, (b) alüminyum kablo, (c) alüminyum mil.	11
Şekil 1.9	Kuru tel çekme işlemi ve yağlayıcı olarak kullanılan sabunun görüntüsü...	13
Şekil 1.10	Sulu tel çekme işlemi ve yağlayıcı solüsyonun görüntüsü.....	13
Şekil 1.11	Doğru seçilmiş bir hadde giriş açısında temas noktası örneği.	16
Şekil 1.12	Geniş seçilmiş bir hadde giriş açısında temas noktası örneği.	16
Şekil 1.13	Dar seçilmiş bir hadde giriş açısında temas noktası örneği.	17
Şekil 2.1	Çelik tel üretimi için kullanılan tel çekme makinası.....	28
Şekil 2.2	Termal kamera: (a) Önden görünümü, (b) Sağdan görünümü.	29
Şekil 2.3	Gerilme-Birim Şekil Değiştirme (σ - ϵ) eğrisi.	31
Şekil 2.4	Tel çekme işlemi için seçilen sayısal modelin gösterimi.	36
Şekil 2.5	Tel çekme işlemi sonu ısı taşınım katsayılarının ve ısı akısının tanımlanması.	37
Şekil 2.6	Tel çekme işleminin üç boyutlu modeli.	37
Şekil 2.7	Sayısal model için hazırlanan mesh görüntüsü: (a) Dış yapı görünümü, (b) İç yapı görünümü.	38
Şekil 3.1	Termal kamera ile alınan sıcaklık ölçümleri: (a) 99,8 °C, (b) 94,0 °C, (c) 107,0 °C, (d) 90,7 °C, (e) 88,9 °C.	40
Şekil 3.2	Tel çekme işleminin sayısal çözümler ile meshten bağımsız hale getirilmesi.....	42
Şekil 3.3	Deneysel ve sayısal olarak ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.	43
Şekil 3.4	0,1 m/s’de çeliğin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	46

Şekil 3.5	0,1 m/s’de bakırın tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	47
Şekil 3.6	0,1 m/s’de alüminyumun tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	48
Şekil 3.7	Farklı hızlardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için hız-gerilme grafiği.....	49
Şekil 3.8	0,1 m/s’de çeliğin tel çekme işlemi sonrası açığa çıkan enerji değerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	50
Şekil 3.9	0,1 m/s’de bakırın tel çekme işlemi sonrası açığa çıkan enerji değerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	51
Şekil 3.10	0,1 m/s’de alüminyumum tel çekme işlemi sonrası açığa çıkan enerji değerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	52
Şekil 3.11	Farklı hızlardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için enerji-zaman grafikleri: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.	53
Şekil 3.12	Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı hızlardaki hız-enerji grafiği.....	54
Şekil 3.13	Çelik için farklı hızlardaki tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.	55
Şekil 3.14	Bakır için farklı hızlardaki tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.	56
Şekil 3.15	Alüminyum için farklı hızlardaki tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.	57
Şekil 3.16	Çelik, bakır, alüminyum tel malzemeleri için farklı hızlardaki hız-sıcaklık grafiği.....	58
Şekil 3.17	%30 redüksiyon oranında çelik malzemesi tel çekme işlemi için Von-Misses gerilmelerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	59
Şekil 3.18	%30 redüksiyon oranında bakır malzemesi tel çekme işlemi için Von-Misses gerilmelerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	60
Şekil 3.19	%30 redüksiyon oranında alüminyum malzemesi tel çekme işlemi için Von-Misses gerilmelerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	61

Şekil 3.20	Farklı redüksiyon oranlarındaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için redüksiyon oranı-gerilme grafiği.	62
Şekil 3.21	%30 redüksiyon oranında çelik tel çekme işlemi için açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	63
Şekil 3.22	%30 redüksiyon oranında bakır tel çekme işlemi için açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	64
Şekil 3.23	%30 redüksiyon oranında alüminyum tel çekme işlemi için açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.....	65
Şekil 3.24	Farklı redüksiyon oranlarındaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için enerji-zaman grafikleri: (a) %30, (b) %20, (c) %10.	66
Şekil 3.25	Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı redüksiyon oranlarındaki redüksiyon oranı-enerji grafiği.....	67
Şekil 3.26	Farklı redüksiyon oranlarında çelik malzemesi için tel çekme işlemi sonunda sıcaklığın değişimi: (a) %30, (b) %20, (c) %10.....	68
Şekil 3.27	Farklı redüksiyon oranlarında bakır malzemesi için tel çekme işlemi sonunda sıcaklığın değişimi: (a) %30, (b) %20, (c) %10.....	69
Şekil 3.28	Farklı redüksiyon oranlarında alüminyum malzemesi için tel çekme işlemi sonunda sıcaklığın değişimi: (a) %30, (b) %20, (c) %10.....	70
Şekil 3.29	Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı redüksiyon oranlarındaki redüksiyon oranı-sıcaklık grafiği.	71
Şekil 3.30	Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için çelik malzemenin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.	72
Şekil 3.31	Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için bakır malzemenin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.	73
Şekil 3.32	Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için alüminyum malzemenin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.	74
Şekil 3.33	Farklı çaplardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için çap azalma miktarı-gerilme grafiği.....	75

Şekil 3.34	Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için çelik malzemesinde tel çekme işlemi sonrasında açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.	77
Şekil 3.35	Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için bakır malzemesinde tel çekme işlemi sonrasında açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.	78
Şekil 3.36	Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için alüminyum malzemesinde tel çekme işlemi sonrasında açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.	79
Şekil 3.37	Farklı çaplardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için enerji-zaman grafikleri: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.	80
Şekil 3.38	Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı çaplardaki çap azalma miktarı-enerji grafiği.	81
Şekil 3.39	Farklı çaplardaki çelik için tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.	82
Şekil 3.40	Farklı çaplardaki bakır için tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.	83
Şekil 3.41	Farklı çaplardaki alüminyum için tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.	84
Şekil 3.42	Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı çaplardaki çap azalma miktarı-sıcaklık grafiği.	85

GİRİŞ

Sanayileşmenin artması ve teknolojinin de ilerlemesi ile günümüzde üretime olan önem hızla artmaktadır. Günümüz toplumunda tüketimin artması üretimin de artmasına sebep olmaktadır. Üretim sektörü ise ihtiyaçlar doğrultusunda metal, gıda, enerji, ulaşım gibi birçok alandan oluşmaktadır. Üretim teknolojilerinin gelişmesi ile daha hızlı ve seri bir şekilde ürünlerin imalatı gerçekleştirilebilmektedir. Metal sanayinde ise talaşlı ve talaşsız imalat olmak üzere iki imalat yöntemi sıklıkla karşımıza çıkmaktadır [1, 2]. Talaşlı imalat yönteminde bütün bir parçaya delme, frezeleme ve tornalama gibi işlemler uygulanarak parça üzerinden talaş kaldırma ile nihai ürün elde edilirken, talaşsız imalat yönteminde ise bir hammaddeye belirli işlemler uygulanarak herhangi bir fire verilmeden nihai ürün elde edilmektedir [3, 4]. Plastik şekil değiştirme yöntemi de talaşsız imalat yöntemlerinden biridir ve metal sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır. Metallerde plastik şekil değiştirme prosesi malzemeye uygulanan bir kuvvet sebebiyle malzeme şeklinde değişme olmasına sebep olmaktadır. Plastik şekil değiştirme işlemi metal sanayisinde kalıp, sac ve tel endüstrileri gibi birçok endüstride nihai ürünü elde etmek için kullanılmaktadır. Tellerin üretiminde ise tel çekme işlemi kullanılır ve bu proses yüksek ürün kalitesine, dayanımı ve üretim kapasitesine sahip bir üretim yöntemidir. Tel çekme işlemi cıvata, zincir, perçin, çivi, kablo, halat ve yay gibi ürünlerin üretimi yapılan sektörlerde sıklıkla kullanılan bir prosestir. Üretim gerçekleştirilirken ise belirli bir enerji ve zaman harcanmakta olup bu enerji ve zamanın verimli bir şekilde kullanılması ise büyük önem arz etmektedir [5].

Bu tez çalışmasında plastik şekillendirme yöntemi olan tel çekme prosesi üzerine çalışılmıştır. Tel çekme prosesi bilgisayar ortamında sayısal olarak modellenerek sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmaları, saha uygulamalarından elde edilen veriler ve ölçümler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri farklı hız, farklı redüksiyon oranı ve farklı çaplarda olacak şekilde tel çekme işlemine tabi tutularak tel üzerinde

oluşan gerilme, enerji ve sıcaklık değerleri incelenmiştir. Sayısal çözümler ANSYS-Workbench arayüzünde Transient-Static Structural ve Transient-Thermal Structural modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan sayısal modelin hata payı %0,33 olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarında tel malzemeleri ve hadde geometrilerinden meydana gelen gerilme, enerji ve sıcaklık verileri kıyaslanmıştır.

Farklı hızlar için sonuçlar incelendiğinde hızın 0,05 m/s'den 0,3 m/s'ye artırılması ile çelik telde %262, bakır telde %246 ve alüminyum telde %255 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin arttığı görülmüştür. Aynı hız artış oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın ise çelik telde %113, bakır telde %109 ve alüminyum telde %109 oranında arttığı görülmüştür. Farklı redüksiyon oranları için yapılan analizlerde redüksiyon oranının %10'dan %30'a artırılması ile çelik telde %151, bakır telde %157 ve alüminyum telde %165 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin arttığı görülmüştür. Aynı redüksiyon oranı artışın ise tel üzerinde oluşan sıcaklığın ise çelik telde %227, bakır telde %197 ve alüminyum telde %189 oranında arttığı görülmüştür. Farklı çaplar için yapılan analizlerde ise tel giriş çapının 8,54 mm'den 7,24mm'ye indirgenerek 1,30 mm küçültmesi yerine 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenerek 0,93 mm küçültmesi durumunda çelik telde %93, bakır telde %93 ve alüminyum telde %91 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin daha az olduğu görülmüştür. Aynı çapların indirgenme işlemlerinde ise tel üzerinde oluşan sıcaklığın çelik telde %91, bakır telde %90 ve alüminyum telde %91 oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın daha az olduğu görülmüştür.

Bu çalışma ile en çok gerilme ve en yüksek sıcaklık değerinin çelik telde 0,3 m/s tel çekme hızı ile 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında sırasıyla 220,92 MPa ve 100,68°C olarak ölçülmüştür. Yapılan bu sayısal çalışma sayesinde sanayi uygulamalarında tel çekme prosesi için optimum proses parametrelerinin belirlenmesinde mühendislik hesaplarının etkisi de ortaya koyulmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Tel Çekme Endüstrisi ve Tarihçesi

Tel günümüzde sıklıkla kullanılan ve genellikle dairesel kesite sahip bir üründür. Teller çoğunlukla cıvata, zincir, perçin, çivi, kablo, halat ve yay gibi ürünlerin üretiminde yarı mamul olarak kullanılmaktadır. Tel olmadan bu ürünlerin üretimleri de oldukça zordur [6].

Tel çekme işleminin tarihi antik çağlara kadar dayanmaktadır. Milattan önce 3000’li yıllarda mısırlılar tarafından kullanıldığı öngörülmektedir. Bilinenlere göre ilk tel çekme işlemleri dövme metodu ile elde edilen saclar ince şeritler halinde kesilerek, delikli taşların içerisinden geçirilmiş ve dairesel kesitli tel biçimi elde edilmiştir. Fakat bu taşlar aşınma dayanımı yüksek olmadığından dolayı çok sık deforme olmaktadır [7, 8].

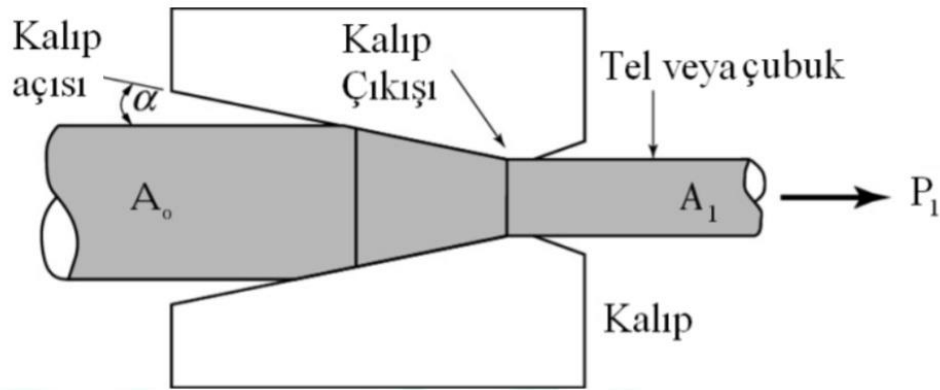
Orta çağlarda, apoletlerin, örgülerin, savunma ekipmanlarının ve mücevherlerin yapımında kullanılmıştır. İlk zamanlarda basit delikli plakalar kullanılarak yumuşak teller küçültülürken, sonraki zamanlarda farklı özelliklere sahip tellerin çekim işlemi için Şekil 1.1’de görülen tezgâhlar tasarlanmıştır [9].



Şekil 1.1 Orta çağda tel çekme işlemi [9].

18. yüzyılın sonunda sanayi devriminin ardından tüm proseslerde olduğu gibi tel çekme işleminde de ilerlemeler görülmüştür. Sanayileşme ve makineleşmenin ardından sahaya ilk çıkan ürünler; çelik teller, telgraf telleri, yay ve çelik halatlar olmuştur. 20. yüzyılda ise farklı ısı işlemleri ile tel çekme işleminin daha kolay olduğu görülmüş ve yeni nesil hızlı, otomatik tel çekme sistemleri geliştirilmiştir [10, 11]. Fakat 20. yüzyılda asıl önemli gelişme, tel çekme sistemlerinin yanında tel çekme haddelerinin üzerine olmuştur.

Tel çekme işlemi günümüz için incelendiği zaman kangal (filmaşının makaraya sarılmamış hali) halinde sarılı dairesel kesite sahip yaklaşık 8-9 mm çaplarındaki filmaşının ismindeki mamul ürünlere gerçekleştirilerek daha küçük çaptaki tellerin elde edilmesi işlemi olarak adlandırılabilir [12, 13]. Tel çekme işleminin çalışma prensibi Şekil 1.2’de verilmiştir.

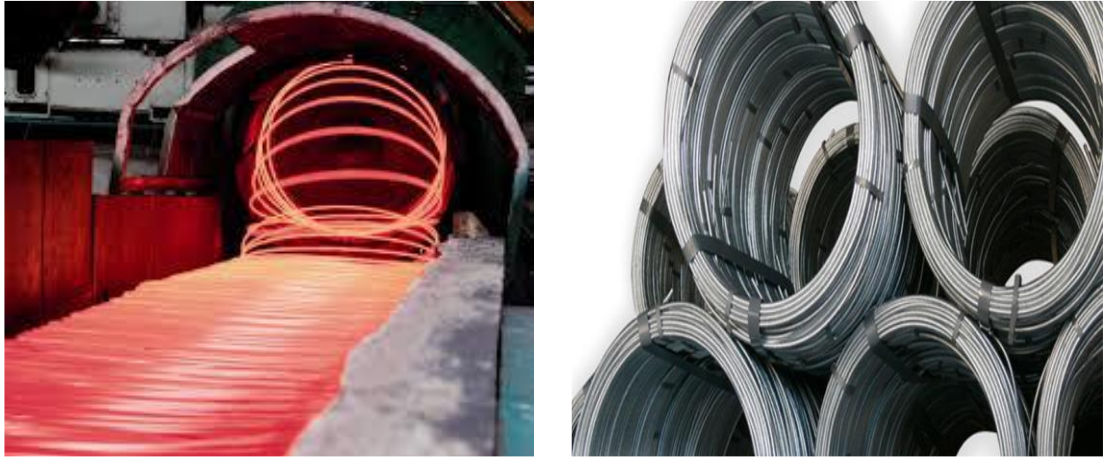


Şekil 1.2 Tel çekme işleminin şematik gösterimi.

Tel çekme prosesinin genel tanımı şu şekilde yapılabilir. Tel çekme işlemi kalın kesite sahip bir telin hadde (matris ya da tel çekme kalıbı) adı verilen konik yapıya sahip bir kalıptan çıkışına doğru uygulanan bir kuvvet aracılığı ile geçirilerek istenilen kesite indirgenmesi işlemidir [14]. Bu işlem gerçekleşirken tel çekme işlemi gerçekleştirilen malzemenin akma dayanımı geçilerek plastik şekil değişiminin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Böylece kalıcı deformasyon gerçekleştirilmiş olur [15].

1.1.1. Filmaşın ve Tel

Tel çekme prosesi filmaşın telin belirli hadde kafaları ya da bloklarından geçerek istenilen nihai çapa indirgenmesi ile gerçekleşir. Filmaşın tellerin örnek gösterimi Şekil 1.3’te yapılmıştır.



Şekil 1.3 Filmaşın tel örneği [16].

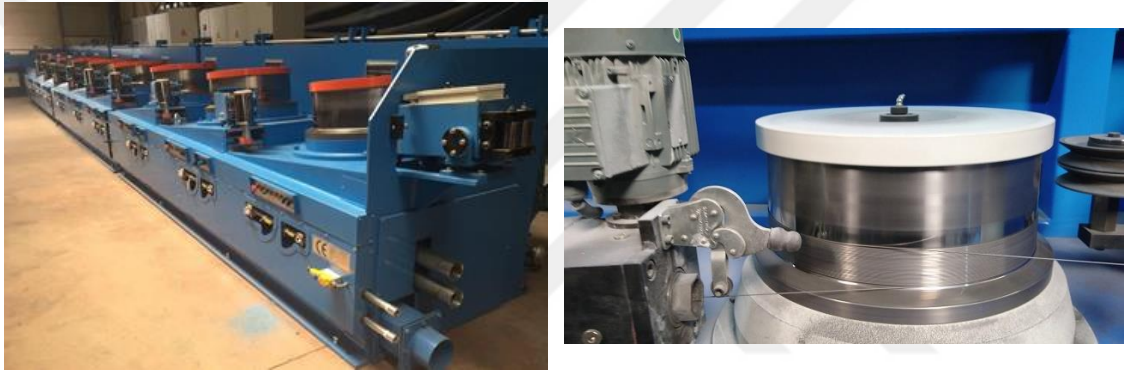
Filmaşın sıcak haddeleme yöntemi ile üretilen dairesel kesit alanına sahip bir üründür. Filmaşınlar tel çekme prosesinde istenilen boyut ve şekillerdeki nihai ürünün elde edilmesi için kullanılan yarı mamul ürünlerdir. Filmaşınlar yassı, yuvarlak, kare, dikdörtgen gibi şekillerde üretilebilmektedirler. Sıcak şekillendirme sonrası 4.5 mm ile 25 mm arasında çaplara sahip filmaşınlar üretilebilmektedir. Filmaşınlar çelik, bakır ve alüminyum gibi hammaddelerden döküm ve haddeleme prosesleri aracılığıyla üretilmektedir [16].

Tel çekme işleminde en önemli olan şeylerden birisi ise proses başlangıcındaki tercih edilen filmaşının iç yapısının durumudur. Filmaşın iç yapısı direk olarak proses sonu çıkan ürünün kalitesini etkilemektedir. Filmaşınların yüzeyi üretim esnasındaki sıcak şekillendirmeden kaynaklı olarak oksitlerle kaplıdır. Bu oksit matris aşınmasına ve çekilen ürünün yüzeyinde kusurlar olmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca ısıl işlemde kaynaklı yüzeyde çatlaklar, yüzeye yapışan yabancı maddeler, sert noktalar, çizikler gibi son ürünü etkileyecek birçok olumsuz etken vardır. Kuru tel çekme prosesinde sabun gibi yağlayıcılar kullanılarak proses gerçekleştirilir. Tel çekme işlemi aynı zamanda nihai son ürünün sertlik, mukavemet, tokluk gibi özelliklerini düşürebilmektedir. Bu sebeple nihai ürünün standartla uygun bir şekilde üretilmesi ve proses parametrelerinin ayarlanması son derece önemli bir durumdur. Fakat günümüzde tamamen kusursuz tel üretimi yapmak mümkün değildir, budan kaynaklı olarak üretim esnasında yapılacak belirli yöntemler ile tel en az hasarlı duruma getirilebilirler [17].

1.1.2. Tel Çekme Makinası

1350'li yıllarda ilk tel çekme prosesi Alman Rudolf tarafından yapılmıştır. 1862 yılında ise George Bedson ilk kez birçok matris kullanarak seri bir şekilde tel çekme işlemini gerçekleştirmiştir. Bu proses ile piyasaya sürülen ilk ürünler; çelik teller, telefon telleri, telgraf telleri, çelik yaylar ve örülmüş çelik teller olmuştur. Daha sonrasında Bedson'ın matrisleri tel çekme işlemi için dayanıklı sert malzemelerden imal edilmiş ve günümüz tel çekme makinalarının temelleri bu yıllarda atılmıştır [18].

Tel çekme işleminde kullanılan tel çekme makinasının ve her bir hadde bloğunun gösterimi Şekil 1.4'te yapılmıştır.



Şekil 1.4 Tel çekme makinası ve kafası (bloğu) [19].

Tel çekme işleminde filmaşın tel istenilen nihai çapa tek seferde getirilemez. Belirli redüksiyon oranlarında aşamalı olacak şekilde tel çekme işlemi gerçekleştirilir. Tek seferde bir çaptan çok düşük bir çapa geçme işlemi gerçekleştirilir ise tel çekme işlemi sırasında kopmalar meydana gelecektir. Bu sebeple tel çekme işlemi tel çekme makinalarında birçok kafa ya da blok aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Tel çekme işleminde filmaşının her bir blokta bulunan belirli bir redüksiyon oranına sahip haddeden geçerek bir miktar çapı küçültülür ve bu işlem sıralı bir şekilde ilerleyerek istenen çaptaki tel elde edilmiş olur. Tel çapı indirgeme işlemi gerçekleşirken ise tel ve hadde arasında yağlayıcı bir tabaka görevi görmesi için solüsyonlar ya da sabunlar kullanılmaktadır. Fakat haddeden geçen tel yağlayıcı ve solüsyonlara rağmen sürtünme ve kalıbı uyguladığı basınçtan kaynaklı ısınır. Bu sebeple her hadde çıkışında bir adet su soğutma tamburu bulunur. Su tambur içerisinde devir daim ederek tamburun her zaman soğuk kalmasını sağlar. Bu sayede tel haddeden çıktıktan sonra bu tamburda belirli bir miktar dönerek tambura temas eder ve bir sonraki haddeye geçmeden önce soğutulmuş olur. Tel çekme

prosesinde kullanılan makinalar günümüzde çok bloklu makinalar kullanılmaktadır. 9 ila 14 bloğa sahip tel çekme makinalarının kullanımı yaygın bir şekilde görülmektedir.

1.1.3. Tel Çekme Haddesi

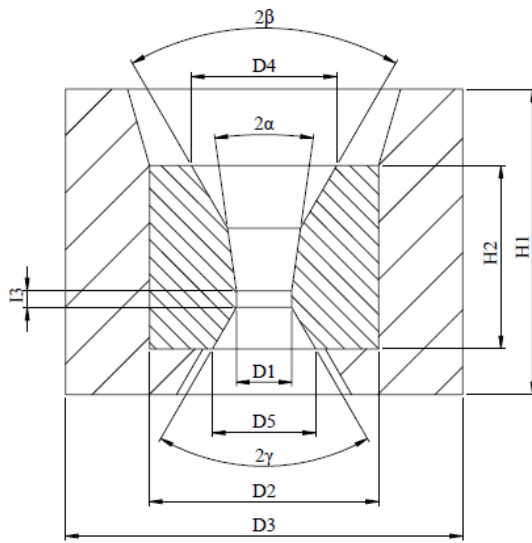
Tel çekme prosesinin en önemli elemanları ise hadde adı verilen tel çekme kalıplarıdır. Haddeler konik iç yapıya sahip elemanlardır. Bu sayede kalın kesit alanına sahip bir tel konik yapıdan geçerek belirli bir oranda küçülür.

Haddelerin kullanılacakları prosese göre standartlara uygun özelliklerde üretilmesi gerekmektedir. Bir hadde temel anlamda aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [6, 20].

- Yüksek sertlik,
- Yüksek darbe dayanımı,
- Yüksek aşınma dayanımı,
- Düşük sürtünme katsayısı.

Bu özellikler haddenin tel yüzeyinin kalitesini belirlerken aynı zaman da ömrünü de belirlemektedir [20].

Şekil 1.5'te TS 8791 standartlarına uygun bir tel çekme haddesinin kesit görünümü ve Tablo 1.1'de tel çekme prosesini etkileyen hadde ölçü parametreleri görülmektedir [21].



(a)



(b)

Şekil 1.5 Tel çekme haddesi: (a) Hadde geometrisi, (b) WC-Co hadde.

Tablo 1.1 Tel çekme haddesi parametrelerinin tanımı.

D1: Delik çapı	2 α : Çekme açısı
D2: Çekirdek çapı	2 β : Giriş açısı
D3: Zarf çapı	2 γ : Çıkış açısı
D4: Çekirdek giriş çapı	H1: Zarf yüksekliği
D5: Çekirdek çıkış çapı	H2: Çekirdek yüksekliği
I3: Silindir boyu	

Tel çekme haddeleri istenilen çaplarda üretilebilmektedir. Ayrıca hadde çekirdeklerinin dışında haddenin tel çekme makinalarına takılabilmesi ve çekirdeği muhafaza etmesi için çelik zarflar bulunmaktadır.

Haddeler üretilirken bu ölçü parametrelerinin birbiri arasındaki ilişkiler doğrultusunda standartlara uygun bir şekilde tungsten karbür-kobalt (WC-Co), PCD (polikristalin veya sentetik elmas) ya da elmas hadde olmak üzere farklı malzemelerden üretilebilirler. Sektörde en çok kullanılan hadde çekirdekleri tungsten karbürden imal edilir. WC-Co hadde üretiminde bağlayıcı eleman olarak ise belirli miktarda kobalt kullanılmaktadır. Bu hadde çekirdekleri vakum altında yüksek sıcaklıkta sinterlenerek üretilirler. Sertliği, yoğunluğu ve mukavemeti sertleştirilmiş çeliklere göre bile tungsten karbür malzemesi hadde yapımı için çok ideal bir malzemedir. Tel çekme işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklıklara dayanabilen tungsten karbürün üretimden gelecek parçacık ya da toz gibi yabancı maddelerin aşındırmasına karşı da dayanımı oldukça yüksektir. Yapılan testlerde dayanımının çeliklerin elli katına kadar çıktığı görülmüştür. Tungsten karbür yüzeyinin hassas bir şekilde işlenebiliyor olması ise diğer bir avantajıdır. Bu özelliklerden dolayı ömrü uzun olan bu malzemenin tel çekme işlemi sırasında telin yüzey kalitesinin de yüksek olmasını sağlamaktadır [22-25].

Zamana bağlı olarak belirli bir ürün metrajı çekildikten sonra hadde yüzeyinde rijit ve dayanıklı bir eleman olmasına rağmen yine de deformasyonlar meydana gelmeye başlar. Buna bağlı olarak hadde belirli bir süreden sonra kesit azaltma yeteneğini kaybederek ürünün kesit alanını istenilen boyutta küçültmeyecek hale gelir [20]. İşlevini kaybeden hadde yerine yeni bir hadde takılarak prosese devam edilir ve çıkarılan hadde revize işlemine tabi tutulur. Revizyon sonrası iç kesit çapları büyüme hadde daha büyük bir kesiti azaltmak için kullanılmaya başlar.

1.1.4. Tel Çekme ile Üretilen Malzemeler

Tel çekme prosesi ile günümüzde birçok malzemenin şekillendirmesi ve çap küçültmesi yapılabilmektedir. Tel endüstrisinde bu işlem çoğunlukla halat, yay, çivi, cıvata vb. malzemeler için çelik malzemesine yapılırken, iletken ve kablo sektöründe ise bakır ve alüminyum malzemeler içinde gerçekleştirilmektedir.

Çelik malzemesi demir malzemesine karbon eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Çelikler düşük, orta ve yüksek karbonlu olmak üzere üç sınıftan oluşmaktadır. Çelik tellerin karbon sınıflandırması şu şekilde yapılabilir [26, 27];

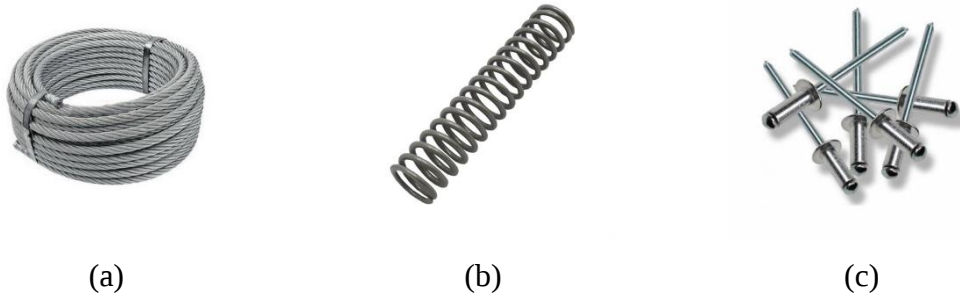
- Düşük karbonlu ($C < \%0.25$)
- Orta karbonlu ($\%0.25 < C < \%0.55$)
- Yüksek karbonlu ($\%0.55 < C$)

Çelikler ayrıca başka malzemeler ile de alaşımlandırılarak üretilebilir. Bunlara örnek olarak aşağıdaki çelikler verilebilir [26, 27];

- Manganlı çelikler
- Krom nikelli çelikler
- Paslanmaz (Galvanizli) çelikler

Ayrıca çeliğin ana elementi demir olduğu için birçok özelliğini taşımaktadır. Çeliği oluşturan demir elementi yumuşak, dayanıklı, gümüş beyazı, parlak bir madendir. Demir elementinin periyodik tablodaki simgesi Fe olup atom numarası 26 ile B grubu geçiş metalleri arasında yer almaktadır. Yoğunluğu $7,87 \text{ g/cm}^3$, erime noktası 1535°C 'dir. Kaynama noktası 3000°C 'dir. Erirmeden önce yumuşar ve hamur kıvamına gelir. Bu özelliğinden dolayı kolayca biçim verilebilir. Dövme ve tel içinde en dayanıklısıdır [28, 29].

Çelik teller ile halat, yay, çivi, cıvata, perçin gibi ürünler üretilmektedir. Bu ürünlerin üretimi için yuvarlak kesite sahip çelik tellere ihtiyaç duyulmaktadır. Yuvarlak kesitli bu ürünlerin üretilmesi için ise tercih edilen imalat yöntemlerinden birisi de tel çekme prosesidir. Tel çekme prosesi ile çelik malzemesinden üretilmiş bazı ürünlerin görselleri Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

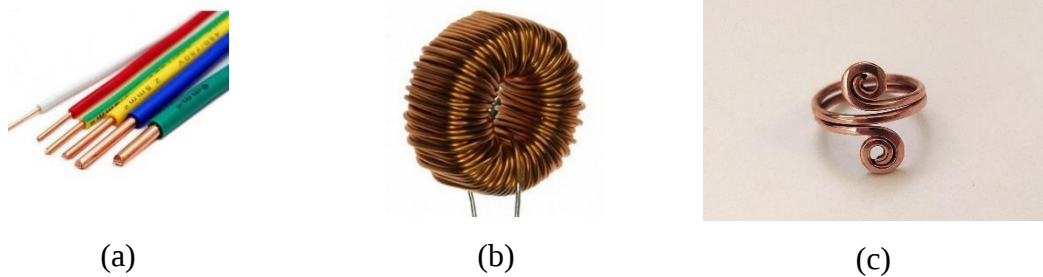


Şekil 1.6 Çelik tellerden üretilmiş ürünler: (a) halat, (b) yay, (c) perçin.

İletken ve kablo üretim sektöründe kullanılan bakır ve alüminyum teller ise yüksek saflıkta (%99,9) kullanılmaktadır. Enerji iletim sektöründe kullanılan bu malzemelerin saflığının yüksek olması iletim kayıplarının az olmasıyla verimi artırmaktadır.

Bakır çok yüksek termal ve elektrik iletkenliği olan yumuşak, dövülebilir ve sünek bir metaldir. Bakır saf bakır yüzeyi pembemsi-turuncu renklidir. Bakırın periyodik tablodaki simgesi Cu olup atom numarası 29 ile B grubu geçiş metalleri arasında yer almaktadır. Bakır doğada katı formda bulunan bir elementtir. Korozyona karşı direnci zayıf olan bakır elementinin ısı ve elektrik iletkenliği (%100 IACS) yüksek bir malzemedir. Bakırın yoğunluğu $8,96 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Erime sıcaklığı $1084 \text{ }^\circ\text{C}$ olan alüminyumun kaynama sıcaklığı ise $2562 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir [30].

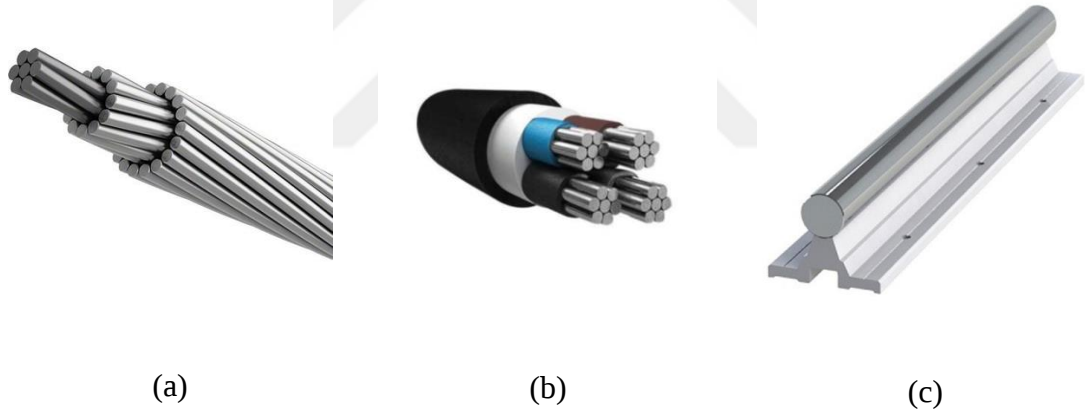
Bakır teller kablo, iletken tel, mücevher gibi ürünlerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Yuvarlak ya da farklı şekillerde kesitlere ihtiyaç duyulan bu ürünlerin üretiminde filmaşinlerin istenilen boyutlara indirgeme işlemleri tel çekme prosesi ile gerçekleştirilmektedir. Bakır tellerden üretilmiş bazı ürünlerin görselleri Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Bakır tellerden üretilmiş ürünler: (a) bakır telli kablo, (b) emaye kaplı bakır telli bobin, (c) bakır yüzük.

Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metaldir. Mat ve gümüşümsü bir renge sahiptir. Alüminyum periyodik tablodaki simgesi Al olup atom numarası 13 ile 3A grubu elementleri arasında yer almaktadır. Alüminyum doğada katı formda bulunan bir elementtir. Alüminyum zehirleyici ve manyetik olmayan bir malzemedir. Yoğunluğu, çeliğin veya bakırın yaklaşık üçte biri kadar olup $2,70 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Kolaylıkla dövülebilir ve işlenebilir olan alüminyum üstün korozyon özelliklerine sahip olması ile de diğer malzemelere göre avantaj sağlar. Bu özelliğini alüminyumun dış yüzeyinde oluşan oksit tabakası sağlamaktadır. Elektrik iletkenliği %64,94 IACS'dir. Erime sıcaklığı 660°C olan alüminyumun kaynama sıcaklığı ise 2519°C 'dir [31].

Alüminyum teller kablo, havai hat iletkeni, doğrusal hareket milleri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Hafifliği ve korozyona olan direnci ile ön plana çıkan alüminyum tellere farklı çaplar ve şekillerde ihtiyaç duyulmaktadır. Alüminyum tellerden üretilmiş bazı ürünlerin görselleri Şekil 1.8'de gösterilmiştir.



Şekil 1.8 Alüminyum tellerden üretilmiş ürünler: (a) alüminyum iletken, (b) alüminyum kablo, (c) alüminyum mil.

1.2. Tel Çekme Prosesini Etkileyen Parametreler

Tel çekme ne kadar basit bir işlem gibi görünse de bu üretim yöntemini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Tel çekme prosesini etkileyen faktörlerin yağlayıcı, hadde geometrisi, tel çekme hızı ve redüksiyon oranı parametreleri için incelenmesi aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

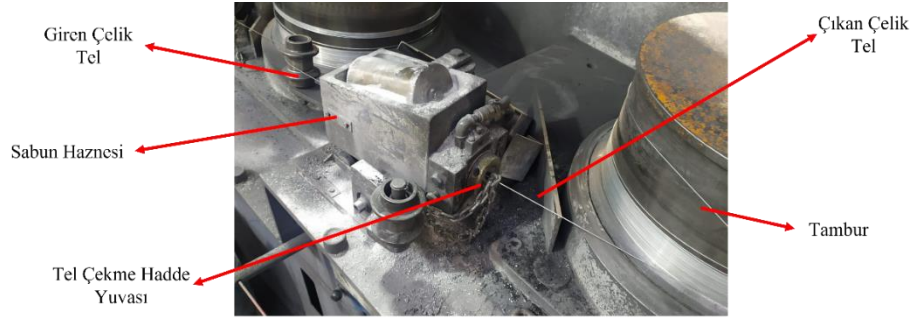
1.2.1. Yağlayıcılar

Tel çekme prosesinde kullanılan yağlayıcılar hadde ile üretimi gerçekleştirilen tel malzemesinin yüzeyine sıvanarak sürtünme etkisini azaltmakta ve bu sayede hem tel yüzeyinde oluşacak gerilmeleri minimize ederek kopma ve çatlama gibi durumların önüne geçerken hem de hadde iç yüzeyindeki gerilmeleri minimize ederek kullanım ömrünün uzamasını sağlamaktadır [18, 32].

Tel çekme işlemi yağlayıcı tipine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi kuru tel çekme işlemi olarak isimlendirilirken ikincisi sulu tel çekme işlemi olarak isimlendirilmektedir. Sabunlar ya da solüsyonlar tel çekme sırasında haddenin maruz kalacağı yüksek basınç, sıcaklığa ve kayma gerilmelerine dayanabilecek özellikte olması gerekmektedir [14, 32].

Kuru Tel Çekme İşlemi:

Tel çekme prosesinde büyük çaplarda indirgeme işlemleri için kuru tel çekme yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Kuru tel çekme işleminde katı formdaki sabun adı verilen yağlayıcılar kullanılmaktadır ve kuru tel çekme makinalarında sabunların koyulacağı hazneler vardır. Bu haznelerin çıkışına ise tel çekme haddesi takılır. Haddede oluşan ısınma sorunun önüne geçmek için ise hadde zarfının etrafından su sirkülasyonu sağlanarak hadde soğutulma işlemi gerçekleştirilir. Tel çekme işleminde çapı düşürülmek istenen tel önce Sabun haznesine girer ve burada telin yüzeyine sabun kaplanır. Yüzeyine sabun kaplanan tel buradan haddeye doğru hareket eder. Tel haddede giriş açısı olarak tanımladığımız kısma doğru ilerler ve burada sabun ile sıkışarak telin yüzeyine sabunun sıvanma işlemi gerçekleşmiş olur. Tel yüzeyine kaplanan sabun ve tel birlikte hadde içerisinden geçerek çap indirgeme işlemi gerçekleşmiş olur [14, 16, 18]. Şekil 1.9’da kuru tel çekme işleminin gösterimi gerçekleştirilmiştir. Şekilde telin sabun haznesinden geçişi ve hadde çıkışında tel üzerinde oluşan ısının soğutulması için tambura sarım anı görülmektedir.



Şekil 1.9 Kuru tel çekme işlemi ve yağlayıcı olarak kullanılan sabunun görüntüsü.

Sabunun yağ zenginliği tel çekme işlemini etkileyen önemli bir parametredir. Sabunun yağ oranı yüksek ise temasın gerçekleştiği alanda sıcaklık oranı düşüktür. Bu durumda sabun yumuşar ve hadde kutusu içinde birbirine yapışarak topaklanır. Bu şartlarda yapılan tel çekme işleminde telin parlaklığı azalır, telin yüzeyi sabun ile kaplanamaz ve bir süre sonra telde kopma meydana gelir. Eğer tel çekme işleminde sabun çok kuru veya yağsız ise işlem başarısız olabilir. Çünkü yine yüzey tam olarak kaplanmaz ve yağlama tamamıyla gerçekleşmez. Bu durumda tel yüzeyi deforme olmasına sebep olur [33]. Bu iki durumda göz önünde bulundurulduğunda sabun seçiminde yağ oranına dikkat edilmelidir.

Sulu Tel Çekme İşlemi:

Tel çekme prosesinde sulu tel çekme işlemi daha çok ince çaplardaki tellerin indirgenmesi işlemlerinde kullanılmaktadır. Sulu tel çekme işleminde yağlayıcı olarak solüsyon adı verilen sıvılar kullanılmaktadır. Sulu tel çekme işleminde tel, haddeler ve aradaki yönlendirici diskleri solüsyon dolu bir haznenin içerisinde işlemi gerçekleştirir [14, 16, 18]. Sulu tel çekme işleminin gösterimi Şekil 1.10'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Sulu tel çekme işlemi ve yağlayıcı solüsyonun görüntüsü.

Burada haddeler yönlendiriciler arasındaki bir bölümde sabitlenmektedir. Şekil 1.10'da gösterilen hazne kapatıldıktan sonra solüsyon ile doldurulur ve ardından tel ekme işlemi başlar. Tel diskler aracılığı ile haddeler içerisinde geçerek çap küçültme işlemi gerçekleşir. Burada yağlayıcı tellin yüzeyine diskler aracılığı ve haznenin solüsyon ile dolu olması sonucu ince bir film şeklinde kaplanır. Tel çekme işlemi solüsyon dolu kabın içerisinde gerçekleştiği için ayrıca teli ve haddeyi soğutma işlemi gerekmemektedir [33].

Tel çekme prosesini etkileyen bir faktör ise sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı sabunun ya da solüsyonun yağlayıcılık oranına göre değişkenlik göstermektedir. Sürtünme metal akışını zorlaştırır, gerekli pres gücünü artırır, kalıpları aşındırarak ömrünü azaltır ve imalat kalitesini düşürür. Sıcaklık arttıkça yapışma etkisi nedeniyle sürtünme artmaktadır [34]. Yapışma etkisi, sürtünme kuvvetinin kayma kuvvetini aşmasına ve iş parçasında yüzey altında koparak kesilmelere neden olur. Buna bağlı olarak sıcak ve soğuk şekillendirmelerde sürtünme katsayıları farklılık göstermektedir. Yağlayıcılar sürtünme kaynaklı oluşabilecek olumsuzlukların ortadan kaldırılmasında sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olarak katkı sağlamaktadır. Sınıflandırmak gerekir ise sıcaklığa bağlı sürtünme katsayıları şöyledir.; soğuk plastik şekil verme: $\mu < 0.1$, ılık plastik şekil verme: $0.1 < \mu < 0.4$, sıcak plastik şekil verme: $0.4 < \mu < 0.5$ [35, 36].

1.2.2. Hadde Geometrisi

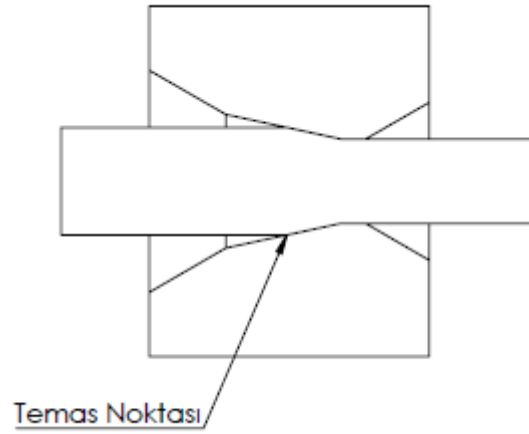
Tel çekme işleminin yapılmasını sağlayan ana elemanlardan birisi ise iç kesitleri konik yapıdaki bir geometriye sahip olan tel çekme kalıpları yani haddelerdir. Haddeler, çekimi yapılacak malzemeye göre daha sert ve rijit yapıdaki malzemelerden seçilerek üretilmektedir. Bu malzemelere elmas, PCD ve tungsten karbür malzemedan yapılmış haddeler örnek olarak verilebilir. Tel çekme işlemi sırasında büyük kesitli malzeme kalıbın yani haddenin içerisine girer ve konik yapıdaki yüzey ile temas ederek kesit alanının küçülmesi sağlanır. Burada ana deformasyon çekilen malzemedede gerçekleşir ve uzama gerçekleşmiş olur [37-39].

Tel çekme işleminde hadde geometrisi tel çekme hızına, redüksiyon oranına, yağlayıcı tipine ve çekilen tel malzemesine göre değişkenlik gösterebilir. Hadde geometrisinin standartlara uygun bir şekilde olması da ürün kalitesini etkileyen bir husustur. Hadde geometrisini belirlenmesi için kullanılan Türk standartları kodu ise TS 8791'dir [21].

Hadde geometrisini oluşturan beş ana kısım vardır. Bunlar; çan eğimi, giriş açısı, hadde açısı, kavrama (silindir) ve çıkış açısı olarak isimlendirilirler. Tablo 1.1’de de listelenen hadde çekirdeği parametrelerinin ve hadde çekirdeği geometrisinin tel çekme işlemine etkileri ise şöyle açıklanabilir;

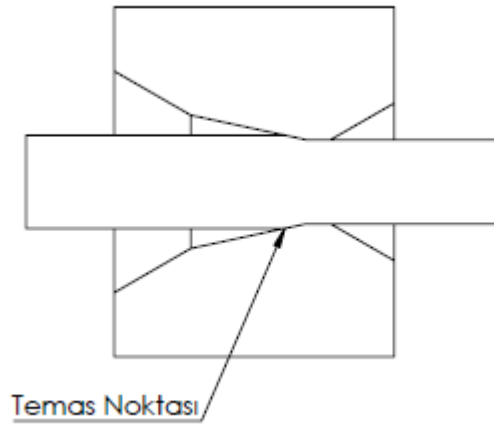
- 1- Çan Eğimi: Teli haddenin merkezine doğru yönlendiren ve doğrusal olarak haddeye girmesini sağlayan kısımdır. Tel giriş açısına gelmeden önce bu kısma anlık olarak temas etmektedir. Bu kısım hadde çekirdeğinin zarf bölümünde bulunmaktadır [40].
- 2- Giriş Açısı: Tele yön veren ve tel ile hadde arasında asıl temasın ilk olarak gerçekleştiği kısımdır. Telin haddeye girişinde hasara uğramaması için giriş açısı bölümünde hiçbir keskin kenar bulunmaması önemli bir husustur. 2β ve $D4$ ölçü parametreleri oluşturmaktadır. Ayrıca bu bölüm yağlayıcının da telle beraber hadde çekirdeğinin içerisine girmesini sağlar. Dar yapılması durumunda yağlayıcı olarak kullanılan sabun ya da solüsyonun içeriye girememesi gibi durum oluşarak tel çekme prosesinden çıkan ürünün yüzey deformasyonuna uğramasına sebep olurken, aynı zamanda hadde ömrünün kısalmasına da neden olacaktır [41].
- 3- Hadde Açısı: Haddenin en önemli kısmıdır. Hadde açısı, çekilen malzemenin cinsi ve redüksiyon oranı olmak üzere iki ana faktöre bağlıdır. 2α açısı ile tanımlanan bu kısımda tel daralma işlemine başlamaktadır. Telin çapını indirgeme işlemi ve sabunun hadde yüzeyi ve tel arasında sıkışarak telin dış yüzeyine sıvanması burada gerçekleşir. Haddenin ömrü ve verimi, bu kısmın tasarımına ve yüzey işleme kalitesine bağlıdır [42].

Tel çekme işleminde önemli olan bir diğer nokta ise telin haddeye temas noktasıdır. Tel hadde açısına mümkün olduğu kadar orta noktasından temas etmelidir. Böylece, hem yeterli sabun akışı için gerekli basıncın oluşmasına hem de telin geniş bir yüzey üzerinde indirgenmesini sağlanmış olur. Şekil 1.11’de gösterilen yaklaşım açısı ile temas noktası doğru seçilmiş bir haddeleme işlemi görülmektedir. Bu temas noktası seçildiğinde kesit daralmasının, sabunun tel yüzeyine sıvanmasının ve harcanan enerjinin optimum seviyede olması beklenmektedir [13, 40].



Şekil 1.11 Doğru seçilmiş bir hadde giriş açısında temas noktası örneği.

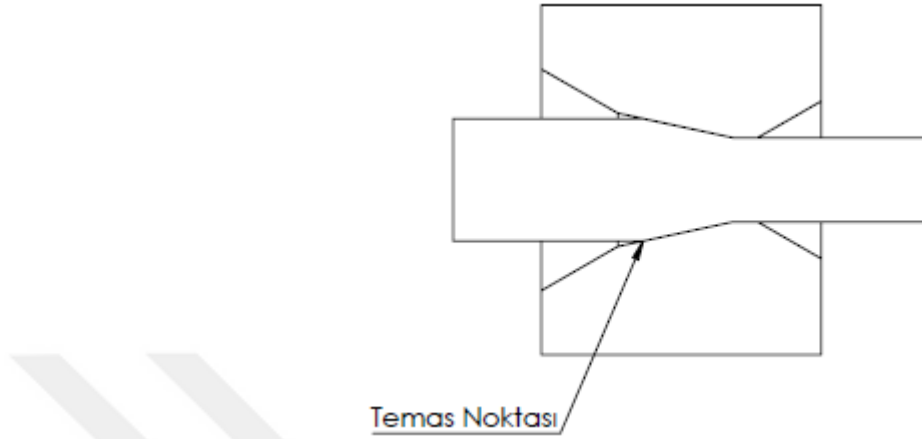
Şekil 1.12’de ise hatalı seçilmiş geniş bir yaklaşım açısı görülmektedir. Hadde açısı çok büyük seçilmiş ve telin indirgemedeki temas ettiği yüzey çok kısadır. Bunun sonucu olarak hadde kısa sürede deforme olarak büyümektedir [13, 40].



Şekil 1.12 Geniş seçilmiş bir hadde giriş açısında temas noktası örneği.

Geniş bir hadde açısı seçilmesi sonucu olarak zayıf yağlama, hızlı kalıp aşınması, aşırı sıcaklık, boyut kontrol sorunu, merkezi patlama veya kırılganlar gibi sorunların meydana gelmesi beklenmektedir [14, 18].

Şekil 1.13'te ise hatalı seçilmiş dar bir yaklaşım açısı görülmektedir. Tel haddeye çok erken temas etmekte ve sabun içeriye yeterince girmeyerek yeterli basıncın oluşmasına izin vermemektedir [13, 40].



Şekil 1.13 Dar seçilmiş bir hadde giriş açısında temas noktası örneği.

Dar bir hadde açısı seçilmesi sonucu olarak yağlama olmaması, başlangıçta tel kırılması, aşırı sıcaklık ve istenenden küçük tel çapı çıkışı gibi sorunların meydana gelmesi beklenmektedir [14, 18].

- 4- Kavrama (silindir): Çekilmiş telin çapının son kontrolünü yapar ve yüzeyin oldukça homojen bir düzgünlükte çıkmasını sağlar. I3 ve D1 ile tanımlanan bu kısımda tel nihai çapını alır. Dolayısıyla, silindir yapıdaki kavrama kısmında hadde yüzeyinin çok hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bu durum hadde içerisinden çıkacak olan telin yüzey kalitesini doğrudan etkiler [41].
- 5- Çıkış Açısı: Bu kısımda konik şekilde olup amacı haddeden tel ile birlikte çıkacak olan fazla sabun parçacıklarının haddeden geri atılmasını sağlamaktır. 2γ açısı ve D5 çapı ile tanımlanan bu kısımda tel haddeden çıkış işlemini gerçekleştirmektedir. Hadde çekirdeği içinde açığa çıkan ısıнын dağılmasını sağlar ve hadde çekirdeğinin kırılmasını önleyerek teli nihai şekli veren bu kısmın ve hadde çekirdeğinin ortak merkezde kalmasına yardımcı olmaktadır [42, 43].

1.2.3. Tel Çekme Hızı

Tel çekme işleminde çekim hızı oldukça önemli bir parametredir. Kullanılan tel çekme makinesinin teknolojisi, yağlayıcı seçimi, hadde geometrisi, malzeme yapısı ve redüksiyon oranı gibi parametreleri doğrudan etkileyen tel çekme hızı bu değişkenler göz önüne alınarak hesaplanmalıdır. Yüksek tel çekme hızları yüksek sıcaklık oluşumuna neden olmaktadır. Düşük tel çekme hızları ise üretimin yavaşlamasına sebebiyet verecek ve yüzeydeki bozulmaların da homojen olmamasına sebep olacaktır. Bu yüzden tel çekme hızı optimum seviyede ayarlanmalıdır.

Tel çekme işlemi boyunca telin kaç haddeden geçtiği ve kullanılan makine parametrelerinin dikkate alınması gereken önemli bir husustur. Çünkü hadde sayısı, tel çekme işlemi boyunca ne kadar ısının açığa çıkacağını belirler. Hadde sayısının artması ile ısı artışı doğru orantılı olarak artmaktadır. Eğer tel çekme makinesi su soğutmalı ve tamburlu bir sisteme sahip ise her hadde bloğundan sonra telde soğutma işlemi gerçekleştirilerek oluşacak sorunlar ortadan kaldırılabilir. Eğer kullanılan makine hava soğutmalı bir sisteme sahip ise tel her geçişte dahada ısınarak hem kendi deformasyonuna hem de haddelerin deformasyonuna sebep olacaktır. Bu sebeple tel çekme hızının ısınmaya etkisi düşünülerek çekme hızı optimum seviyede ayarlanmalıdır [10, 44].

Giren telin çapı ve indirgenmek istenen tel çapı bilindiğinden blok hızları bu girdiler yardımı ile Eş 1.1 kullanılarak hesaplanabilir [14].

$$d_1^2 \times V_1 = d_2^2 \times V_2 \quad (1.1)$$

Burada; d_1 giren tel çapı, V_1 giren tel hızı, d_2 çıkan tel çapı, V_2 çıkan tel hızı şeklindedir. Çıkan telin hızını birçok parametre etkilenmektedir. Tel çekme makinesinin teknolojisi, hadde blok sayısı, malzeme cinsi, redüksiyon oranı, hadde malzemesi ve yağlayıcı türü gibi parametreler tel çekme hızını önemli ölçüde etkiler. Tel çekimi sırasında bu faktörlerden bir veya birkaçı diğerleri ile uyum içerisinde olmazsa yüksek sıcaklık, soğuma problemi, mukavemet ve sertlik kaybı, sıcaklık artışına bağlı sabun yanması, çıkan telde yüzey problemleri, haddeyi kısa sürede aşındırma, tel kesitinde sünme adı verilen kesit daralmaları gibi kalite açısından olumsuz durumlar meydana getirebilir [12].

Bu sebeple kalitenin bozulmadan yüksek hızda tel çekimi yapabilmek çoğu işletme tarafından hedeflenen bir durumdur. Dolayısıyla en optimum hızda üretimin gerçekleştirilmesi hem üretim hızı hem de ürün kalitesi için önem arz eden bir faktördür.

1.2.4. Redüksiyon Oranı

Tel çekme işleminde diğer önemli bir parametre redüksiyon oranıdır. Redüksiyon oranını tel çekme işleminde giren tel çapının hadde çıkışında ne kadar düşürüleceğini belirler. Tel çekme işlemi aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Her bir aşamada redüksiyon oranları ile belirlenir. Redüksiyon oranı telin akma mukavemetine ve yüzde uzamasına doğrudan etki eder. Ayrıca tel çekim hızını da etkileyen bir parametre olan redüksiyon oranı, açığa çıkan sıcaklığı da doğrudan etkilemektedir [45].

Redüksiyon oranı yüksek olduğunda telin kesit alanı daha fazla azalacağından telin akma ve çekme dayanımında bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, redüksiyon oranı yüksek tel çekme işleminde telin sertliği artacağından, % kopma uzama değerinde de düşme yaşanacaktır. Dolayısıyla, redüksiyon oranı artışıyla telin mukavemeti de artırılabilir [45, 46].

Tel çekme işleminde hadde üreticilerinin ve makine imalatçıların tavsiye ettiği redüksiyon oranı sınırlarına bağlı kalmak şartı ile redüksiyon oranının hesaplanması için Eş. 1.2’de verilen bağıntı kullanılmaktadır. Bu bağıntıda gösterilen parametreler; d_1 giren tel çapı, d_2 çıkan tel çapı şeklindedir.

$$\%R.O. = (1 - (d_2^2/d_1^2)) \times 100 \quad (1.2)$$

Tel çekme işlemine örnek verilecek olursa; giriş çapı 8.54 mm sahip olan bir filmaşının 1,90 mm çapına sahip tele düşürülmesi için dokuz bloklu bir tel çekme makinası kullanılmaktadır. Bu tel çekme işleminde her blokta ortalama %28 redüksiyon oranı uygulanmıştır. Bu tel çekme makinasının örnek hadde serisi Tablo 1.2’de gösterilmiştir.

Tablo 1.2 Örnek bir tel çekme işlemi için tel çekme makinasının hadde serisi.

8,54 mm >> 1,90 mm	Hadde Çıkış Çapı
1. Blok	7,24 mm
2. Blok	6,14 mm
3. Blok	5,21 mm
4. Blok	4,42 mm
5. Blok	3,75 mm
6. Blok	3,18 mm
7. Blok	2,70 mm
8. Blok	2,29 mm
9. Blok	1,90 mm

1.3. Literatür Çalışması

Sanayide çeşitli imalat yöntemleri bulunmaktadır. Talaşlı ve talaşsız olmak üzere ikiye ayrılan imalat yöntemleri sektörlerin tercihi ve üretim gereksinimleri doğrultusunda uygulamalarda değişkenlik göstermektedir. Endüstride en çok kullanılan ve üretim yöntemlerinden biri olan talaşsız imalat yönteminin bir alt dalı ise tel çekme prosesidir. Tel çekme prosesleri tel, çubuk formundaki malzemelerin istenilen geometri veya çaplarda üretilmesini sağlayan bir prosestir [47, 48]. Tel çekme prosesi buradan önceki bölümlerde de bahsedilen parametrelere bağlı olarak ilerleyen bir süreçtir. Tel çekme işleminin analizinin gerçekleştirilmesi ile ilgili yapılan literatür tarama çalışması aşağıda gösterilmiştir.

Vega ve arkadaşları [49], kalıp açısı ve kesit alanındaki küçülme gibi proses değişkenlerinin çekme kuvveti üzerindeki etkisini ve sürtünme katsayısını araştırmıştır. Bakırın tel çekme işlemini deneysel ve sayısal yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, bakırın çekme işlemi sırasında kalıp açısı, sürtünme katsayısı ve yatak uzunluğunun çekme kuvveti üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. İndirgeme ve kalıp açısı arttığında çekme kuvvetinin arttığını bulmuşlardır. Sürtünme katsayısının çekme kuvveti üzerinde etkisi olduğundan gerilmenin artması sonucu, enine kesit üzerinde deformasyonu daha homojen hale geldiğini ve yani kalıp ve telin temas noktası üzerinde hasara yol açtığını ifade etmişlerdir.

Chen ve arkadaşları [50, 51], geliştirdikleri malzeme özelliklerinin kalıpta nasıl bir sürtünme oluşturduğunu inceleyerek kalıp açısı ve redüksiyon oranından kaynaklı tel

çekme işlemlerinde meydana gelen deformasyonları elde etmişlerdir. 1979 yılında yapılan çalışmada o günün teknolojisinin yetersizliği sebebi ile elde edilen sonlu eleman yöntemi sonuçlarının, çekim sonucunu elde etmek için yeterli olamadığı sonucuna varmışlardır.

Dixit ve arkadaşları [52], tarafından ise çeşitli proses değişkenleri incelenmiştir. Bu parametreler; redüksiyon oranı, kalıp giriş açısı, sürtünme katsayısı ve çekme gerilimi gibi önemli çekme parametreleridir. Redüksiyon oranındaki bir artışın, kalıbın giriş açısında bir azalmanın veya sürtünme katsayısının elde edilen ürünü daha homojen hale getirdiği yönünde gözlemlerde bulunmuşlardır.

Bu çalışmalardan farklı olarak Chin ve arkadaşları [53] tel gerilme-uzama davranışını ve çekme kuvveti ile gerilme arasındaki ilişkileri incelemek için sayısal yöntemler kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada kalıp üzerinde meydana gelen anormal deformasyonların sebebini araştırmışlar, gerilme seviyesini ve sürtünme katsayısını tipik seviyelerde tutarak fazla deformasyonun neredeyse tamamının kalıp açısına ve redüksiyona bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Kim ve arkadaşları [54], kalıp aşınmasını etkileyen ana parametreleri belirlemek için sert plastik malzemeden yapılmış kalıbı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tel çekme sürecinde analiz etmeye çalışmışlardır. Kim ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada kayma hızına da bağlı olarak elde ettikleri verilerde, kalıp üzerinde oluşan maksimum basıncın kalıp girişinde olduğunu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak kalıp girişinde ve ilk temas noktasında maksimum aşınmanın olacağı kanısına varmışlardır.

Skolyszewski ve arkadaşları [55], yaptıkları çalışmada çok ince kesite sahip çelik tel çekme prosesini incelemişleridir. Çekme işleminde en uygun koşulları araştırmışlardır. Çekme işleminin en uygun koşulları, geri gerilim değeri kritik geri gerilime yakın olduğunda ortaya çıktığı sonucuna ulaşmışlardır. Yapılan testlerde endüstriyel veriler sonuç olarak sunulmuştur. Testler, birbirini takip eden deformasyon aşamalarında gerilim değeri değişkenlerinin yanı sıra çekme kuvveti, kalıp üzerindeki basınç ve gerilim ölçümlerini de incelemektedir. Amaç, kalıpların aşınmasını azaltmak ve çekme işleminin stabilitesini artırmaktır.

Gawali ve arkadaşları [56], yüksek hızda çekmenin yüksek karbonlu çelik telin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. %0,46 ve %0,71 karbon içeren çelikten 5,50 mm

çapındaki filmaşini, 8 m/sn ve 25 m/sn hızlarında, 13 hadde kafasından çekerek 1,35 mm çapına indirmişlerdir. Her çekme işleminden sonra belirli özellikler incelenmiştir. Bunlar çekme mukavemeti, sıcaklık ve tel yüzeyindeki deformasyonlardır. Çekme hızı, tel malzemesine ve kesit alanındaki azalmaya bağlıdır. Tel yüzeyinin, yüksek hızda çekildikten sonra düşük hıza göre çok daha pürüzsüz bir hal aldığını kanıtlamışlardır. Diğer elde edilen sonuçlarda ise hızın artmasının çekme mukavemetinin artmasına neden olduğunu ve sıcaklıkta artışa neden olduğunu göstermektedir [56].

Hassan ve arkadaşları [57] tarafından yapılan bir çalışmada, tel çekme prosesini etkileyen parametreleri incelemek için üç boyutlu bir sonlu eleman yöntemi kullanarak, bu parametrelerin çekme kuvveti üzerindeki etkisini analitik ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu süreci simüle etmek için Deform-3D programını kullanmışlardır. AL 1100 telini birçok parametre üzerinden incelemişlerdir. Bu parametreler, kalıp açısı (6° , 8° , 8.5° , 9° , 9.5° , 10° , 15°), redüksiyon oranı (0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3), sürtünme katsayısı (0.1, 0.08, 0.075, 0.07, 0.065, 0.06, 0.05), silindir yatak uzunluğu (0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.6 mm), çekme hızı (5000, 7500, 10000, 12500, 15000, 17500, 20000) mm/sn olacak şekilde ayarlanmıştır. Optimum kalıp açısını yakalamaya çalışan ekip birçok simülasyon yapılmıştır. Sonuçlar, optimum kalıp açısının 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 redüksiyon oranların için sırasıyla 9.5° , 9.5° , 9.5° , 10° , 10° olduğunu göstermektedir. Elde edilen diğer sonuçlarda ise silindir yatak uzunluğunun artması ile çekme kuvvetinde bir artışa neden olduğu ve çekme kuvvetinin artmasını önlemek için de kesit alanındaki azalmanın, sürtünme katsayısının ve kalıp açısının küçük olması gerektiğini belirtmişlerdir [57].

Tel çekme esnasında kalıp ve tel üzerindeki deformasyonların ve sürtünmenin azaltılması için birçok yağlayıcı geçmişten günümüze kadar kullanılmaya devam etmiştir. 1934 yılında Singer tarafından fosfatın icadı ile tel üzerine katı kaplamalar ile tel çekme verimi artırılmış ve daha kolay bir çekme prosesi kullanılarak deformasyonlar azaltılmıştır. Bu sayede tel çekme başta olmak üzere soğuk dövme işlemleri gibi işlemlerde de büyük ilerlemeler sağlanmıştır [58]. Geçmişte yapılan bazı araştırmalarda tel çekme işleminde yağlayıcı parametreler için çok sayıda analitik çalışma gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak Avitzur ve arkadaşları [7], çalışmalar yapmış fakat sürtünme koşullarının tahmini için herhangi bir karakterizasyon çalışması yapmamışlardır. Yapılan diğer çalışmalarda ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak karmaşık şekillere sahip kalıpların kullanıldığı üretim süreçlerinin analizini ve temas koşullarının iş parçasının çevresindeki izotropik akma gerilimi ile ilişkili olduğunu, katı film ve karışık yağlama gibi çeşitli yağlama

yöntemlerinin çekme prosesine etkileri araştırılmıştır [59, 60]. Lazzarotto ve arkadaşları, [58] yapmış olduğu çalışmada ise tel çekme esnasında oluşan temas koşulları tanımlanmış, sayısal ve deneysel çözümlere bağlı olarak Coulomb sürtünme katsayısı elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen Coulomb sürtünme katsayısı soğuk tel çekme işlemi için $\mu=0.15$ olarak tahmin edilmiştir.

Tel çekme prosesinin sayısal ve analitik simülasyonları birçok veriye dayanmaktadır. Malzeme davranışı, süneklik, sürtünme koşulları bunların başlıca faktörleridir. Bilgisayar teknolojisinin de ilerlemesi ile eskiye göre analitik çözümlerin yerinin artık sayısal simülasyonlar almaktadır. Bu sayede işlemler daha hızlı ve hata payı daha düşük bir şekilde yapılabilir. Brethenoux ve arkadaşları [61], yaptıkları çalışmada bunları anlatmış ve tel çekme prosesini kalıp açısı, uzunluğu ve küçülme oranları gibi parametreleri ele alarak genel bir tel çekme prosesinin modellemişlerdir. Bu model, gerilmeleri, mikro yapısal değişimleri, çekme kuvvetinin etkilerini, sürtünme faktörünü ve malzemenin elastiklik özelliğinin tahmin edilmesini sağlamaktadır. Yaptıkları çalışmada üç çelik tipi ve yağlayıcı faktörü incelenmiştir. Kalıp geometrisi hep aynı tutulan çalışmada Coulomb parametreleri kullanılarak sürtünme koşulları tanımlanmıştır. Geliştirilen modelde sonuç olarak aşamalar boyunca sürtünme koşullarının gelişimi, yağlayıcı etkileri, çelik davranışı ve yüzey durumunun bağlantılı etkisini ortaya çıkarmışlardır.

Luis ve arkadaşları [62], yaptığı çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tel çekme prosesi modellenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre, farklı sürtünme katsayılarında kalıp açılarının redüksiyon oranına etkisi gözlemlenmiştir. Optimum olarak 12° ve 18° dereceli kalıpların ideal olduğu saptanmıştır. Ayrıca sürtünme katsayısının artması ile redüksiyon oranının ve kalıp açısının artması gerektiği öngörülmüştür. Temelde bu çalışmada kalıp açısının, redüksiyon oranının ve sürtünme katsayısının tel üzerindeki gerilmeleri incelenmiştir.

El-Domiaty ve arkadaşları [63], tarafından yapılan çalışmada tel çekme işlemi esnasında meydana gelen sıcaklık artışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, kalıp açısı, çekme hızı, sürtünme katsayısı ve redüksiyon oranı gibi birçok işlem parametresi altında, farklı malzemeler için sıcaklık artışı hesaplamışlardır. Yüksek çekme hızları için, üretilen ısının dağılması için yeterli zamanı yoktur ve ürünün kalitesi üzerinde zararlı etkiye sahip olan önemli bir sıcaklık artışı meydana geldiğini belirtmektedirler. Yapılan araştırmada

redüksiyon oranının artması sonucu sıcaklık parametresinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kalıp açısının redüksiyon oranına göre sıcaklığa çok etki etmediği fakat kalıp açısının da yüksek olması ile sıcaklık artışında azalma meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmada kalıp ve tel üzerinde temas bölgesinde oluşan gerilme ve şekil değişimi incelenmiştir. Yapılan çalışmada kalıp girişinden çıkışına doğru beklenildiği gibi gerilmeye bir artış ve birim şekil değiştirmede de bir azalma meydana gelmiştir [63].

Vega ve arkadaşları [64], yaptığı bir diğer çalışmada ise, çekme kuvvetini ve 1 ile 7 m/s arasında değişen farklı hızlara karşılık gelen sıcaklık değerlerini ölçmek için bir endüstriyel tel çekme makinesi kullanılmaktadır. Çekme kuvveti, kalıbın arkasına yerleştirilmiş tel haddeme göstergesi kullanılarak ölçülür. Tel çekme işlemi sırasında üretilen ısıyı tahmin etmek için kalıplara termokupllar yerleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, çekme kuvveti ve sıcaklığın, tel malzemelerinin yanı sıra arayüz koşullarına da bağlı olduğunu göstermektedir. Sürtünme nedeniyle kalıp maksimum sıcaklığa tel-kalıp temas noktasında ulaşmıştır. Sürtünme katsayısının ve çekme hızının artması sonucu sıcaklığında arttığı deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Haddi ve arkadaşları [65], yaptığı bir diğer çalışmada ise, soğuk tel çekme işleminde sıcaklık artışı ve buna bağlı çekme gerilmeleri deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada değişken parametreler, kalıp açısı, redüksiyon oranı ve sürtünme katsayısı olmuştur. Endüstriyel bir tel çekme makinesinde, 8 mm çaplı bakır bir filmaşın ve Poly Crystal Diamond (PCD) haddeler kullanılarak yapılan çalışmada, sıcaklık artışı ve çekme gerilimi, farklı çekme hızları için sırasıyla termokupllar ve yük hücresi sistemleri kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık, kalıp üzerinde üç noktaya yerleştirilmiş 0,5 mm çapında termokupllar kullanılarak ölçülmüştür. Bunların birincisi deformasyon bölgesinin yakınında (çalışma konisinin üstünde), ikincisi tel-kalıp arayüzüne yakın (silindir yatağın üstünde) ve üçüncüsü çıkış kısmında boş PCD bölgesine yerleştirilmiştir. Çekme gerilimi ise, kalıp çıkışı üzerine yerleştirilmiş bir yük hücresi sistemi kullanılarak çekme yükü ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda mekanik sürtünme kaynaklı oluşan sıcaklığın ve çekme gerilmelerinin yağlayıcılar ile düşürülebildiği gözlemlenmiştir. Maksimum plastik deformasyonu ve sürtünme nedeniyle kalıp maksimum sıcaklığa tel-kalıp arayüzünün yakınında ulaşmıştır. Sürtünme katsayısının sıcaklığa ve çekme geriliminin stres oranına bağlı olduğu gözlemlenmiştir [65]. Yapılan çalışma Vega ve

arkadaşlarının [64] yaptığı çalışmayı destekler niteliktedir ve benzer yöntem kullanılarak yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Egea ve arkadaşlarının [66], yaptığı çalışmada ise çok farklı bir yaklaşım ile tel çekme işleminde termomekanik analiz yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada elektrik destekli bir proses oluşturularak, tel çekme işlemi, tel çekilmiş numunenin şekillendirilebilirliği, sünekliği ve uzamasının iyileştirilmesi için bir hibrit üretim süreci tasarlamışlardır. Bu hibrit sistemin önerilmesinin amacı tel çekme işlemi sonrası sertleşen malzemenin sünekliğini artırmak amaçlı daha az maliyetli olacak şekilde tavlama işleminin yapılmasını sağlamaktır. Bu çalışmada endüstriyel bir tel çekme makinesinde paslanmaz çelik çekilmiştir. Çalışmada tel yüzeyinin sıcaklığı ısı çiftleri ile takip edilmiş ve 15 sn üzerinde elektrik akımına maruz kalması malzemenin dayanıklılığını tehlikeye attığı görülmüştür. Fakat deneysel veriler sonucunda yüksek redüksiyon oranlarında oluşan sertleşmeler için hibrit sistemin olumlu etki yarattığı gösterilmiştir. Ayrıca hibrit sistem tel çekme işlemi sırasında normal proseste uygulanan deformasyon kuvvetleri gereksinimini azaltmış ve malzemenin şekillendirilebilirliğini kolaylaştırmıştır. Sonuç olarak bu da daha az kuvvet ve enerji ile tel çekme işleminin gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamış olur. Çalışmada çıkan ürünlerin yüzey özellikleri SEM görüntüleri ile incelenmiş ve yorumlanmıştır. Normal tel çekme prosesine kıyasla bu proses sonucu çıkan ürünlerin yüzeylerindeki tanecikler arası mesafeler artmış ve malzemenin süneklik kazandığı kanıtlanmıştır [66].

Altan ve arkadaşlarının [67, 68], yaptığı çalışmalarda yüksek verimlilik taleplerini karşılamak için tel çekme işleminde yüksek hızların kullanılması, tel ile çekme kalıpları arasındaki plastik deformasyon ve sürtünmeden kaynaklanan ısı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu tespit etmiştir.

Mekanik enerjinin çoğu ısıya dönüşür ve yüzlerce derecelik sıcaklık artışlarına neden olur. Bu sıcaklık artışı, yağlama koşullarını, kalıp-takım ömrünü ve nihai ürünün özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Uygun bir yağlama tekniğinin kullanılması, çekme sırasında üretilen ısı miktarını önemli ölçüde azaltır ve bu da sonuç olarak enerji tüketiminin azalmasını sağlar. Minimum enerji tüketimini elde etmek için, minimum çekme kuvveti, kesit alanı küçültme (redüksiyon oranı) ve tel ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olarak belirlenen optimum kalıp açısı kullanılarak belirlenmelidir. Literatür çalışmalarında da görüldüğü gibi yapılan çalışmalar genel

olarak bir ya da iki parametrenin hadde veya tel üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu yüzden bu tez çalışmasında parametrelerin toplu olarak belirlenmesi konusundaki eksikliklerin giderilmesi ile ilgili olarak bir dizi sayısal hesaplama yapılmıştır. Bu sayede sanayi uygulamalarında kullanılabilecek ve optimum tel çekme parametrelerinin belirlenmesini sağlayacak çözümler elde edilmiş ve endüstriyel uygulamalara katkının yanı sıra literatüre de katkı sunulmuştur.

1.4. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Literatür özetinde görüldüğü üzere tel çekme işlemi sayısal ve deneysel olarak birçok kez incelenmiştir. Genellikle yapılan çalışmalarda, tel çekme hızı, redüksiyon oranları, kalıp açılı, yağlayıcı faktörleri ve bunlara bağlı olarak meydana gelen gerilmeler, kalıp ve tel deformasyonları, tel ve kalıptaki sıcaklık artışları incelenmiştir. Fakat yapılan çalışmalardan bazıları yetersiz kalmış ve endüstriyel anlamda sanayi uygulamalarında kullanılabilecek bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu eksikliği gidermek adına bu yüksek lisans tez çalışmasında literatüre bu alanda katkılar sunulacaktır. Tez çalışmasında öncelikle deneysel yöntemler ile saha uygulamasından alınan verilere göre ANSYS sayısal çözüm modeli oluşturulmuştur. ANSYS’de oluşturulan modelin doğruluğu sahada sıcaklık ölçümü gerçekleştirilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümler farklı hızlar, farklı redüksiyon oranları ve farklı çaplarda olmak üzere yapılmış ve tel üzerinde oluşan gerilme, enerji, sıcaklık verileri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile tel çekme sanayinde kullanılabilecek bir ANSYS model geliştirilmiştir. Bu anlamda tez çalışmasının önemi ve literatüre katkısı şu şekilde sıralanabilir:

- a) Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözümler gerçekleştirilen ANSYS programı ile tel çekme modeli oluşturulmuştur. ANSYS programı kullanılarak sanayi uygulamalarına uygun bir model oluşturulmuş ve literatüre özgün katkı sağlanması amaçlanmıştır.
- b) Tel çekme proses parametreleri önceden belirlenerek harcanan enerjinin verimli bir şekilde kullanılarak tel çekme işleminin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.
- c) Tel çekme işleminde verimin artırılması adına model sonuçları incelenerek indirgeme işleminde gerekli blok sayısını azaltma veya artırma yollarına sayısal çözümler ile gidilebilecektir.

- d) Tel çekme işleminde oluşabilecek gerilmelerin mühendislik hesapları ile belirlenmesi sayesinde tel yüzeyinde oluşacak deformasyonlar ön görülürken oluşabilecek kopma durumlarına karşıda önlem alınacağından hurda miktarının azaltılmasına katkı sağlayacaktır.
- e) Tel çekme işlemi sırasında tel üzerinde oluşacak ısınma sayısal model aracılığı ile önceden tahmin edilerek soğutma kafalarındaki ve tanburlarındaki su devridaimi ayarlanarak proses verimi artırılabilir.
- f) Endüstriyel uygulamalarda tel çekme makinalarının optimum kapasitede çalışması için öngörü ve müşteri taleplerine uygun ürün üretiminin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.



2. BÖLÜM

YÖNTEM ve MATERYAL

2.1. Deneysel Ölçümlerin Gerçekleştirilmesi

Tel çekme işleminin deneysel yöntemler kullanılarak tel üzerindeki sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş. ve Hasçelik Halat San. Tic. A.Ş.'nin tel çekme proseslerinden termal görüntüler alınmıştır. Firmaların bünyesinde çelik tel üretimi için kullanılan kuru tel çekme makinasının görünümü Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Çelik tel üretimi için kullanılan tel çekme makinası.

Şekil 2.1’de gösterilen tel çekme makinası yedi adet bloktan oluşmaktadır. İstenen tel çapına göre değişkenlik gösteren tel çekme makinasında genellikle 10 m/s hızlarında tel çekimi gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmada 8,54 mm çapa sahip paslanmaz çelik filmaşın Tablo 1.2’de listelenen ilk yedi blok tel çekme haddesinden geçerek nihai ürün çapı 2,70 mm olan tel elde edilmektedir. Yapılan çalışmada birinci blok hızı 0,1 m/s hızlarında hareket etmesi istenmiştir. Bu durumun gerçekleştirilmesi için Eş. 1.1 kullanılmış ve son bloktan tel çıkış hızı 0,6 m/s hesaplanarak tel çekme işlemi başlatılmıştır. Normal üretim şartlarında düşük kabul edilecek olan bu hızın tercih edilmesinin sebebi tel çekme işlemi esnasında blok koruma muhafazalarının açık olabilmesi ve termal görüntülerin elde edilmesi için seçilmiştir. Tel çekme işlemi sırasında termal görüntülerin alınması için kullanılan termal kamera Şekil 2.2’de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.2 Termal kamera: (a) Önden görünümü, (b) Sağdan görünümü.

Termal görüntülerin alınmasında Flir i5 marka termal kamera kullanılmıştır. Termal kameranın teknik özellikleri Tablo 2.1’de görülmektedir [69].

Tablo 2.1 Flir i5 termal kamera teknik özellikleri.

IR Çözünürlük	100 x 100 pixel	Renk Paletleri	Demir, Gökkuşığı ve Siyah/Beyaz
Ölçüm Modları	Spot Merkezi	Kayıt Yeri	SD Kart
Spektral Aralık	7,5 - 13 μ m	Dosya Formatı	JPEG
Çözünürlük	3,7mrad	Batarya	Şarjedilebilir li-ion
Görüntü Frekansı	9Hz	Batarya Çalışma Süresi	5 Saat
Focus	Sabit	Adaptör Voltajı	5 VDC
Ekran	2,8" Renkli LCD	Çalışma Sıcaklığı	0 - 50 °C
Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-20 ... +250°C	Saklama Sıcaklığı	-40 ... +70°C
Sıcaklık Ölçüm Hassasiyeti	$\pm 2^\circ\text{C}$	Ebatlar	223 x 79 x 83mm
Ayarlanabilir Emissivity	0,1 - 1,0	Ağırlık	365g

Tel çekme makinasının birinci hadde çıkışından blok hızı 0,1 m/s iken telin sıcaklık ölçümleri termal kamera aracılığı ile alınmıştır. Termal kamera ile alınan görüntülerde işletme ortam sıcaklığı ortalama 22 °C kabul edilerek sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde tel ile kamera arasındaki mesafe yaklaşık olarak 15-20 cm arasında olup tüm ölçümler bu mesafede gerçekleştirilmiştir.

2.2. Sayısal Modelin Oluşturulması

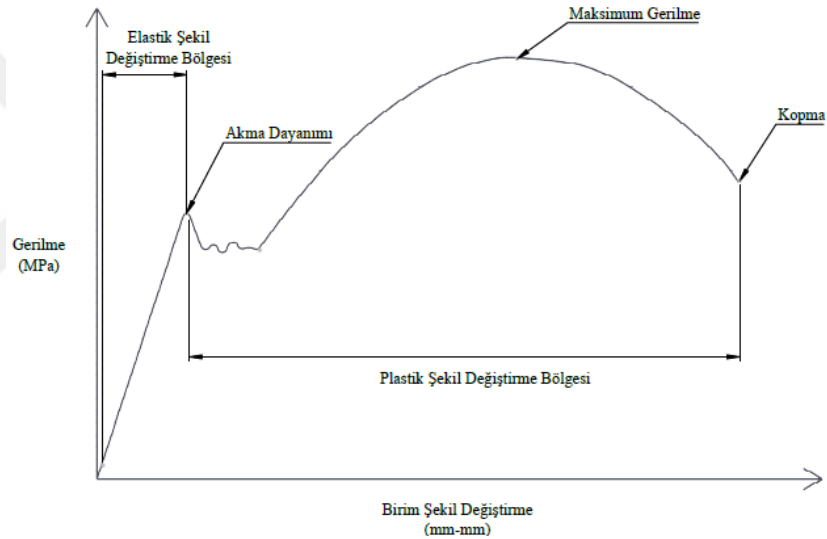
Tel çekme işleminin sayısal olarak modellenmesinde ANSYS Workbench arayüzündeki Transient Structural ve Transient Thermal modülleri kullanılması ile çözüm modeli oluşturulmuştur. Bu modüller zamana bağlı çözüm gerçekleştiren modüllerdir. Oluşturulan sayısal modelde çözümler 1 saniye için gerçekleştirilerek birim zamandaki gerilme, enerji ve sıcaklık verileri elde edilmiştir. Tel çekme işlemi ANSYS aracılığı ile modellenerek modelden alınan sonuçlar, deneysel yöntemlerle işletmeden elde edilen sıcaklık verileriyle kıyaslanmış ve modelin doğruluğu teyit edilmiştir.

Transient Structural: Hareketli mekanizmalarda mekanizmanın konum, hız, ivme analizi yanı sıra çalışma esnasında meydana gelen gerilmelerin hesaplanması için kullanılan ANSYS modülüdür.

Transient Thermal: Zamana bağlı olarak malzemede taşınım, ışıınım ve iletimle meydana gelen ısı değişimlerinin analiz edildiği ANSYS modülüdür.

2.2.1. Matematiksel Model

Tel çekme işlemi metallerde plastik şekil değiştirme prensibi kullanılarak çalışan bir prosestir. Malzemeye bir kuvvet uygulanarak malzeme üzerinde kalıcı şekil değişimi sağlanır. Malzemeye uygulanan bu kuvvet sonucu malzeme şeklinde değişme olması durumuna deformasyon adı verilir. Deformasyonlar tipleri iki bölgede incelenebilir. Bunlar elastik ve plastik şekil değişim bölgeleridir. Elastik bölgede gerçekleşen değişimde malzeme kuvvet veya şekil değişim etkisi üzerinden kalkınca ilk formuna geri döner. Plastik şekil değişim bölgesinde ise malzemenin akma dayanımını geçildiği için kalıcı olarak deforme olur ve kuvvet ya da üzerindeki etkinin kalkması sonucu eski formuna dönemez [70]. Şekil 2.3'te Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Gerilme-Birim Şekil Değiştirme (σ - ϵ) eğrisi.

Şekil 2.3'teki grafikte bir malzemenin akma dayanımına kadar olan bölümün elastik bölgeyi, akma dayanımını geçtikten sonra kopmaya kadar olan bölümün ise plastik bölge olduğu gösterilmiştir. Tel çekme işlemi ise genellikle akma dayanımı ile maksimum yük bölgesi arasında gerçekleşmektedir [71].

Tel çekme işlemini ise çekimi gerçekleştirilen malzemenin akma dayanımının üzerinde gerçekleşerek plastik şekil değişiminin gerçekleştiği bir imalat yöntemidir. Tel çekme işleminde tele kalıp tarafından basınç uygulanır. Uygulanan bu basınç sonucu tel üzerinde gerilemeler meydana gelir. Tel çekme gerilmesinin (σ_d) hesaplanması için Eş. 2.1'de verilen denklem kullanılmaktadır [72].

$$\sigma_d = \gamma_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_i}{A_0} \quad (2.1)$$

Burada; γ_f , ortalama akma dayanımını, μ , sürtünme katsayısını, α , kalıp yarım açısını, ϕ , artık iş faktörünü, A_i ve A_0 sırasıyla haddeye giren ve çıkan telin kesit alanlarını temsil etmektedir.

Plastik şekil verme işlemlerinde malzemenin akma dayanımının üzerinde yani plastik (kalıcı) şekil değişimi uygulamak gerekir. Bu bölgede malzemede pekleşme denilen plastik şekil değişim sertleşmesi görülür. Elastik bölgede atomlar arası bağlar kopmaz, ancak uygulanan kuvvet/gerilme doğrultusunda uzar. Bu nedenle, yük kalktığında denge konumlarına dönerler. Plastik bölgede ise bağlar kopar ve kayma mekanizması ile atomlar konumlarını değiştirerek yeni komşularıyla yeni bağlar kurarlar. Bu nedenle kalıcı şekil değişimi gerçekleşir. Bu esnada, kayma mekanizmasının ana unsuru olan dislokasyonların yığılması nedeniyle şekil değişimi sürekli olarak zorlaşır, yani pekleşme meydana gelir. Gerilme-Birim Şekil Değiştirme eğrisinden görüldüğü üzere, şekil değişimini devam ettirmek için sürekli olarak daha fazla gerilme uygulamak gerekir. Yani malzemenin akma dayanımı artan şekil değişimi ile artmaya devam eder. Bu nedenle, plastik şekil verme işlemlerinde kuvvet ve güç analizlerinde genellikle ortalama akma dayanımı denilen sabit bir büyüklükten yararlanılır [73].

Ortalama akma dayanımı (γ_f) Eş. 2.2’de gösterilen denklem ile hesaplanabilir.

$$\gamma_f = \frac{K \varepsilon^n}{1+n} \quad (2.2)$$

Burada; K, dayanım katsayısını, ε , oluşan gerinimi, n, ise gerinim pekleştirme üssünü temsil etmektedir [72].

Artık iş faktörü ise alan ve tel çekme haddesi geometrisindeki azaltma oranından büyük ölçüde etkilenir ve Eş 2.3’te gösterilen denklem ile hesaplanabilir.

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} \quad (2.3)$$

Burada; D, ortalama tel çapı ve L_c , tel ile haddenin temas uzunluğu parametrelerinin hesaplanmasında sırasıyla Eş 2.4 ve Eş 2.5 kullanılmaktadır.

$$D = \frac{D_i + D_0}{2} \quad (2.4)$$

$$L_c = \frac{D_i - D_0}{2 \sin \alpha} \quad (2.5)$$

Burada; D_i ve D_0 sırasıyla giren tel çapını ve çıkan tel çapını temsil etmektedir [72]. Tel çekme işleminin gerçekleşmesi için tele uygulanan bir çekme kuvveti vardır. Oluşan tel çekme kuvveti, ortalama gerilme, tel ve hadde geometrisi bilgileri ile hesaplanabilir. Tel çekme kuvvetinin (F) hesaplanması için kullanılan denklem Eş 2.6'da gösterilen [74, 75].

$$F = \sigma_d A_i \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_0}{A_i} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (2.6)$$

Burada; F tele çekme işleminin gerçekleştirilebilmesi için uygulanan kuvveti ifade etmektedir. Isı hesaplamasının yapılmasında ise Eş 2.7'de verilen denklem kullanılmaktadır [76].

$$\dot{q} = \mu \cdot F \cdot V \quad (2.7)$$

Burada; V , tel çekme hızını, q , tel çekme sırasında oluşan ısı enerjisini ifade etmektedir.

Bu bölümde bahsedilen denklemleri kullanarak ANSYS Transient Structural modülü tel çekme işlemi çözümlerini gerçekleştirmekte ve tel çekme işlemi sırasında tel yüzeyinde oluşan gerilmeleri ve açığa çıkan enerji miktarını vermektedir.

Isı akısı Eş 2.7'deki sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısı değerinin tel çekme sonucu haddeden çıkış yapan telin yüzey alanına bölünmesiyle elde edilebilir. Elde edilen ısı akısı değeri ise ANSYS Transient Thermal modülünün girdisi olacaktır. Burada ısı transferi denklemlerinin çözümü arayüz aracılığı ile gerçekleştirilerek tel çekme işlemi sonucunda tel yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri elde edilebilecektir.

Tel çekme işleminde açığa çıkan enerji ısı olarak yayılır. Burada ısı transferinin gerçekleşmesi sırasında tel içerisinde ısı iletimi, tel yüzeyi ve hava arasında ise ısı taşınımı gerçekleşmektedir. Isı transferinde ısı iletimi olayı Fourier ısı iletim kanunu ile hesaplanmakta ve bu kanunun temeli termodinamiğin birinci yasasına dayanmaktadır. Isı transferinde taşınım olayı ise Newton'un soğuma kanunu ile hesaplanmaktadır [77].

Fourier ısı iletim kanununun başlangıç anındaki ($\Delta x=0$ iken) denklemi Eş 2.8'de gösterilmiştir.

$$\dot{q}_i = -k A_x \frac{dT}{dx} \quad (2.8)$$

$$\dot{q}_i'' = \frac{q_i}{A_x} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.9)$$

$$\dot{q}_i'' = -k \nabla T = -k \left(\frac{dT}{dx} i + \frac{dT}{dy} j + \frac{dT}{dz} k \right) \quad (2.10)$$

Isı iletim denkleminde k sabit bir katsayı olup malzemenin ısı iletim katsayısını, A_x ısı iletiminin gerçekleştiği kesit alanını ve T ise sıcaklığı temsil etmektedir. Isı iletim denkleminin bir boyuta indirgenmiş yani birim alandaki ısı iletimi denklemi toplam kesit alanına bölünerek bir boyutlu ısı iletim denklemi elde edilir ve Eş 2.9'da bu denklem gösterilmiştir. Isı iletiminin hesaplanmasında üç boyutlu bir sistem içinde çözümler Eş 2.10'da gösterilmiştir [77, 78].

Isı taşınımı zorlanmış ve doğal taşınım olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Zorlanmış taşınım malzeme yüzeyine temas eden akışkanın hareketi dış bir etkene bağlıdır. Doğal taşınım ise akışkanı hareketsiz halde bulunur ve malzeme-akışkan arasındaki sıcaklık yoğunluğu farkında yararlanır [78]. Tel çekme işleminde hadde çıkışında tel yüzeyi ile hava arasında doğal taşınım olayı gerçekleşmektedir ve gerçekleşen ısı transferinin hesaplanmasında Newton'un soğuma kanunu denklemleri kullanılır. Isı taşınım denklemi Newton'un soğuma kanuna göre Eş 2.11'de gösterilmiştir.

$$\dot{q}_t = h A_s (T_s(t) - T_\infty) \quad (2.11)$$

Eş 2.11'de gösterilen ısı taşınımı denkleminde h akışkanın ısı taşınım katsayısını, A_s taşınımın gerçekleştiği yüzey alanını, $T_s(t)$ ve T_∞ sırasıyla yüzey ile ortam arasındaki zamana bağlı sıcaklık değişimini ve ortam sıcaklığını temsil etmektedir [77].

Bu bölümde bahsedilen denklemleri ANSYS Transient Thermal modülü kullanarak tel çekme işleminde açığa çıkan sıcaklık hesaplanmaktadır. Transient Structural modülü aracılığı ile elde edilen enerji, Transient Thermal modülünün ısı akısı olarak girdisini oluşturmaktadır ve bu denklemler aracılığı ile tel üzerinde oluşan sıcaklık hesaplanmıştır.

2.2.2. Sayısal Çözüm Parametreleri ve Sınır Şartları

Tez çalışmasında sayısal çözümün gerçekleştirilmesi için çözüm parametrelerini ve sınır şartlarını belirlemek oldukça önemlidir. Matematiksel model oluşturulduktan sonra sayısal çözüm için tasarım parametreleri ve sınır şartları belirlenmiştir.

Tel çekme prosesinin sayısal olarak modellenmesi için başlangıçta malzeme tipleri ve özellikleri belirlenerek ANSYS programına tanımlanmıştır. Hazırlanan sayısal modelde tel çekme haddesi malzemesi olarak WC-Co tercih edilirken tel malzemesi için ise çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri tercih edilmiştir. Malzemelerin ANSYS programına tanımlanan parametreleri Tablo 2.2’de listelenmiştir.

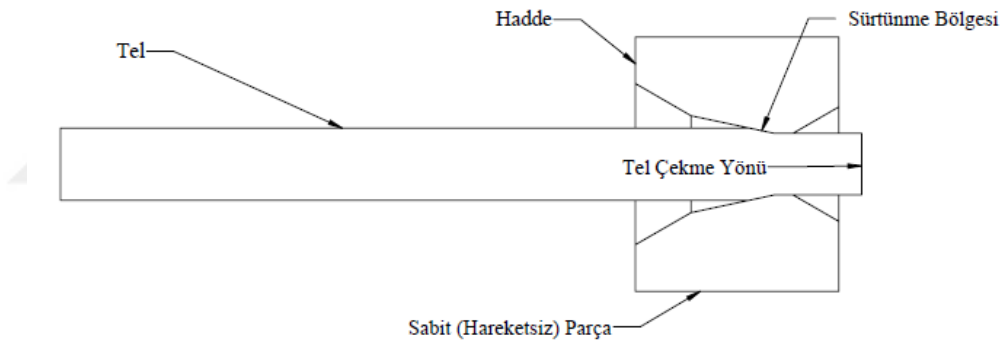
Tablo 2.2 Tel çekme işleminin sayısal modelinde kullanılan malzemelerin özellikleri.

Malzeme Adı	WC-Co Hadde [79, 80]	Çelik Tel [81]	Alüminyum Tel [82]	Bakır Tel [83, 84]
Yoğunluk (g/cm ³)	15,63	7,75	2,77	8,96
Elastisite Modülü (MPa)	6,15x10 ⁵	2,0x10 ⁵	70000	1,1x10 ⁵
Poisson Oranı	0,31	0,31	0,35	0,34
Akma Dayanımı (MPa)	-	210	280	280
Maksimum Çekme Mukavemeti (MPa)	344	-	-	-
Maksimum Basınç Dayanımı (MPa)	2700	-	-	-
Tanjant Modülü (MPa)	-	1800	500	1150
Termal Genleşme Katsayısı (1/°C)	5,5x10 ⁻⁶	1,04x10 ⁻⁵	2,37x10 ⁻⁵	1,67x10 ⁻⁵
Termal İletkenlik (W/m°C)	110	13,8	237	401
Özgül Isı (J/kg°C)	203	480	875	385

Malzemelerin tanımlamaları ANSYS programına yapılırken hadde malzemesi olan WC-Co rijit, şekil değiştirmez ve deforme olmayacak şekilde kabul edilmiş, tel malzemesi olarak seçilen çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri non-linear malzeme olarak

tanımlanmıştır. Bunun sebebi sayısal modelde çözüm gerçekleştirilirken telde plastik şekil değişimi istenmektedir ve bundan dolayı malzemeler non-linear yani doğrusal olmayan olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan analizin tercih edilmesinin sebebi malzemeye uygulanan bir kuvvet sonucunda malzeme üzerinde meydana gelen yer değiştirmeleri ve buna bağlı deformasyonu gözlemleyebilmektir. Buna karşılık deformasyon işini gerçekleştirecek olan haddenin deforme olmaması istenmektedir ve bu yüzden rijit malzeme olarak tanımlanmıştır.

Tel çekme işleminin matematiksel modeller doğrultusunda mekanik olarak modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mekanik olarak yapılan tanımlamalar sonucunda ANSYS programında yapılan sayısal çözümler ile gerilme ve açığa çıkan enerji değerleri ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mekanik olarak kurulan modelin görünümü Şekil 2.4'te görülmektedir.

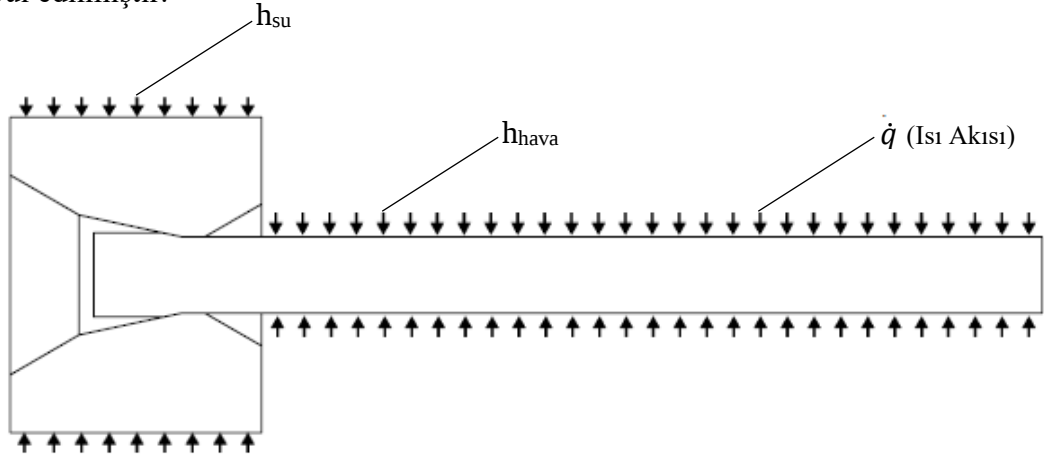


Şekil 2.4 Tel çekme işlemi için seçilen sayısal modelin gösterimi.

Sayısal model oluşturulurken Şekil 2.4'te gösterildiği gibi tel çekme haddesi sabit (hareketsiz) parça olarak tanımlanmış ve çekme işlemi gerçekleştirilecek tel geometrisine ise tel çekme yönünde hareket uygulanmıştır. Tel ve hadde temas yüzeyi arasına ise 0.1 değerinde soğuk plastik şekillendirme sürtünme katsayısı tanımlanmıştır [35, 36].

Sayısal modelde sıcaklık hesaplamalarının yapılmasında ısı transferi denklemleri kullanılmaktadır. Isı transferinde kullanılacak olan ısı iletim katsayıları malzemelerin içerisine tanımlanmaktadır ve Tablo 2.2'de listelenmiştir. Isı taşınımı denkleminde kullanılacak olan ısı taşınım katsayıları ise su (h_{su}) ve hava (h_{hava}) için sırasıyla 5000 W/m²°C ve 15 W/m²°C'dir [85]. Isı transferi katsayılarında su taşınım katsayısı hadde dış yüzeyine tanımlanmaktadır. Bunun sebebi tel çekme işlemi sırasında hadde yuvası

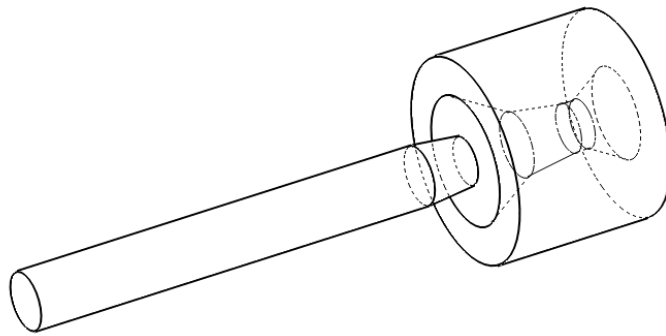
etrafında su akışı gerçekleştirilerek haddenin soğutma işlemi sağlanmaktadır. Tel ise haddenin çıkışında doğal taşınımın gerçekleşeceği hava ortamı ile temas etmektedir. Bu sebeplerden kaynaklı su ve hava ısı taşınım katsayıları malzemelerin yüzeyine tanımlanması Şekil 2.5'te görülmektedir. Yapılan çalışmada işletme ortam sıcaklığı 22°C kabul edilmiştir.



Şekil 2.5 Tel çekme işlemi sonu ısı taşınım katsayılarının ve ısı akısının tanımlanması.

Şekil 2.5'te görüldüğü üzere tel çekme işlemi sonunda telin haddeden çıkışı gerçekleşmiş ve taşınım katsayıları gösterildiği gibi yüzeylere tanımlanmıştır. Ayrıca tel yüzeyine tanımlanacak olan ve Eş 2.7 ile hesaplanan ısı akısı (q) Şekil 2.5'te gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

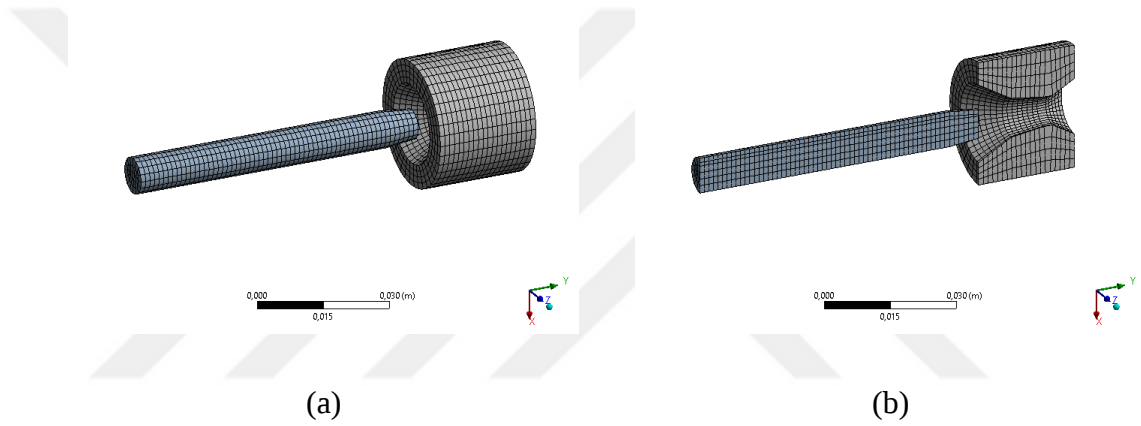
Tel çekme işleminin sayısal çözümü üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Burada analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanılacak olan tel çekme prosesinin üç boyutlu tasarımı Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 Tel çekme işleminin üç boyutlu modeli.

Şekil 2.6’da gösterilen tel çekme işleminin üç boyutlu görünümü ANSYS programına aktarılmış ve Şekil 2.4’teki tanımlamalar bu model üzerine yapılmıştır.

Geometrinin oluşturulması kısmı gerçekleştirildikten sonra mesh yapısının oluşturulmasına geçilmiştir. Modellerin mesh yapısı ANSYS Transient Structural modülü kullanılarak yapılmıştır. Mesh yapısının oluşturulmasında kenar boyutlandırma (edge sizing) ve yüzey örgüsü (face meshing) yöntemleri kullanılarak tel çekme prosesinin analiz modelinin deneysel sonuçlara yakın hesaplama yapması sağlanmıştır. Örnek mesh yapısı Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7 Sayısal model için hazırlanan mesh görüntüsü: (a) Dış yapı görünümü, (b) İç yapı görünümü.

Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere haritalanmış ağ (Mapped Mesh) yapısı kullanılarak modelin mesh çalışması yapılmıştır. Çözüm sonuçlarını mesh yapısındaki bulunan düğüm noktaları ve eleman sayıları etkilemektedir. Mesh yapısının kenar boyutları ayarlanarak farklı mesh modelleri denenmiş ve optimum çözüm sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır. Böylece deneysel sonuçlar ile uyuşan ve en kısa sürede çözümü gerçekleştirilen mesh modeli seçilerek tüm çözümler bu mesh parametreleri üzerinden yapılmıştır. Sayısal çözüm çalışmaları 5553 eleman sayılı ve 27098 düğüm noktalı ağ yapısı kullanılarak yapılmıştır.

3. BÖLÜM

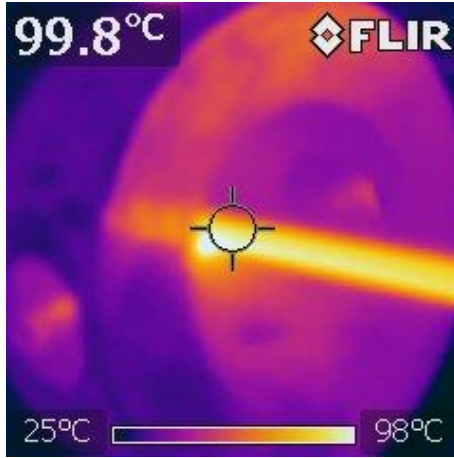
BULGULAR

3.1. Deneysel Sonuçlar

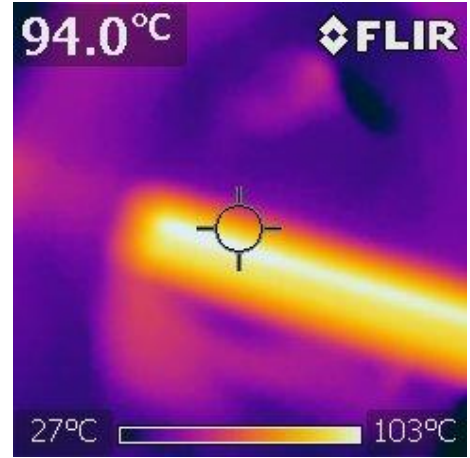
Yapılan tez çalışmasında deneysel yöntem olarak termal sıcaklık ölçüm yöntemi izlenmiş olup ölçümlerden alınan sonuçlar bu bölümde gösterilmiştir. Alınan termal görüntüler doğrultusunda sıcaklık ölçümleri sayısal model ile karşılaştırılmıştır.

3.1.1. Termal Ölçüm Sonuçları

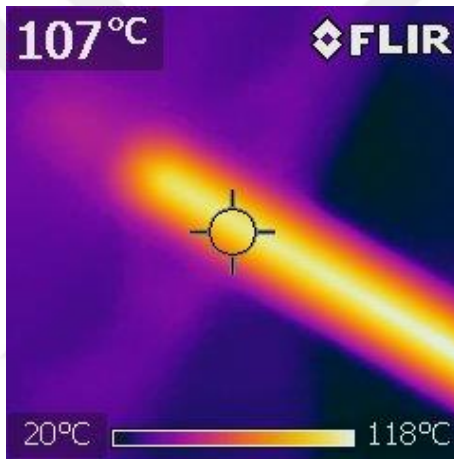
Yapılan tez çalışmasında deneysel çalışmalarda tel çekme prosesinde hadde çıkışında tel sıcaklıkları ölçülmüştür. Tel çekme prosesi yedi bloklu bir tel çekme makinasında gerçekleştirilmiş ve sıcaklık ölçümleri bu tel çekme makinasının birinci hadde çıkışından alınmıştır. Birinci haddeye tel 8,54 mm çapta giriş gerçekleştirirken yaklaşık %28 redüksiyon oranında indirgeme işlemi gerçekleştirilmiş ve tel haddeden 7,24 mm nihai çapta çıkmıştır. Sıcaklık ölçümleri birinci bloğun 0,1 m/s hızında gerçekleştirilmiş olup alınan beş sıcaklık ölçümünün termal görünümü Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



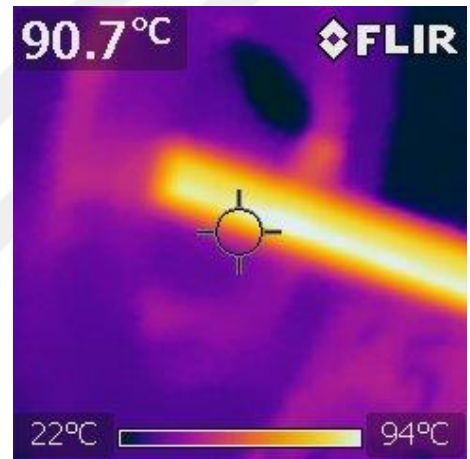
(a)



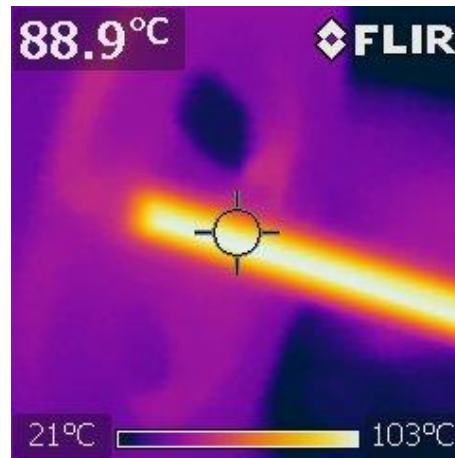
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.1 Termal kamera ile alınan sıcaklık ölçümleri: (a) 99,8 °C, (b) 94,0 °C, (c) 107,0 °C, (d) 90,7 °C, (e) 88,9 °C.

Termal ölçümler çelik teli için yağlayıcı olarak sabun kullanılan kuru tel çekme makinasından alınmış ve ölçüm sonuçları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yapılan sıcaklık ölçümlerinin hata payını azaltmak adına ortalama değeri hesaplanmıştır. Tel çekme işleminde işletme sıcaklığı 22°C kabul edilmiş olup 7,24 mm çapındaki çelik teli hadde çıkışında 0,1 m/s tel çekme hızı için hesaplanan ortalama sıcaklık değeri 96,1 °C’dir. Hesaplanan ortalama sıcaklık değerleri ANSYS modelinin doğruluğun hesaplanmasında da referans değer olarak kullanılmıştır.

3.2. Sayısal Sonuçlar

3.2.1. Çözümlerin Meshten Bağımsız Hale Getirilmesi

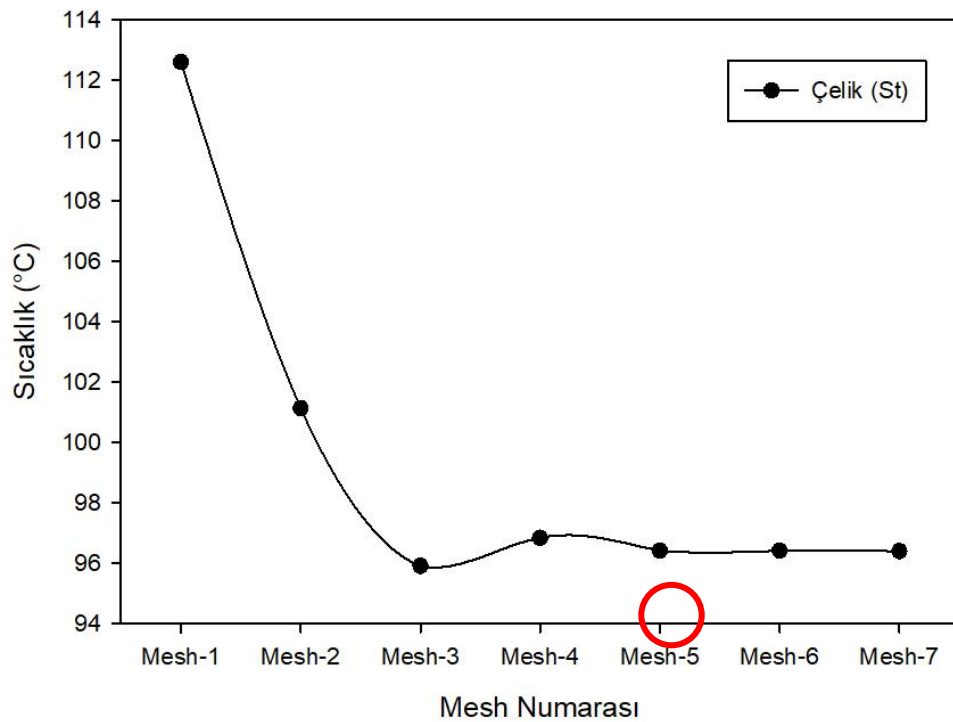
Sayısal çözümün ilk adımı olarak Şekil 2.6’da verilen üç boyutlu modelin Şekil 2.7’de gösterildiği gibi mesh çalışması yapılmıştır. Sayısal modelin doğruluğunun hesaplanmasında deneysel yöntemler ile elde edilen sıcaklık verileri kullanılmıştır. Mesh çalışması sırasında haritalanmış ağ (Mapped Mesh) yapısı kullanılırken kenar boyutlandırma ve yüzey örgüsü teknikleri kullanılarak yedi farklı mesh modelinin çözümleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta çözümleri gerçekleştirilen sayısal modellerde deneysel çalışmalardan tel sıcaklık verileri elde edilmiş çelik telinin 8,54 mm giriş çapından 7,24 mm tel çapına indirgenmesi işlemi modellenmiştir. Deneysel çalışmada hadde çıkışındaki tel çekme hızı 0,1 m/s olup sayısal modelde bu çekme hız kullanılmıştır. Mesh bağımsızlık çalışması için yapılan yedi farklı mesh modelinin özelliklerini tanımlayan eleman ve düğüm noktaları sayıları Tablo 3.1’de listelenmiştir.

Tablo 3.1 ANSYS mesh özellikleri.

Mesh Numarası	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
Mesh-1	458	2689
Mesh-2	1160	6091
Mesh-3	1717	9022
Mesh-4	3772	18346
Mesh-5	5553	27098
Mesh-6	6440	30718
Mesh-7	7145	34140

Yapılan mesh bağımsızlık çalışmasında yedi farklı mesh için 0,1 m/s hızında tel çekme işlemi çelik teli için gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümü gerçekleştirilen tel çekme işlemlerinde oluşan sıcaklığında deneysel yöntemlerde ölçülen sıcaklık değerleri ile uyumuna bakılmıştır.

Yapılan mesh bağımsızlık çalışmasında yedi farklı mesh modelinin sayısal çözümü gerçekleştirilerek Şekil 3.2’de gösterilen grafikte gösterildiği gibi her mesh yapısı için sıcaklık değerleri alınmıştır.



Şekil 3.2 Tel çekme işleminin sayısal çözümler ile meshten bağımsız hale getirilmesi.

Mesh-5 yapısı optimum çözümün gerçekleştiği mesh yapısı olarak seçilmiştir. Mesh-5 ağ yapısının tercih edilmesinin sebebi sayısal çözümde alınan tel sıcaklık sonuç değerlerinin bu nokta itibarıyla sabitlendiğinin gözlemlenmesidir. Ayrıca eleman ve düğüm noktası sayılarının artması ile sayısal çözüm süresi artmaktadır. Yapılan çalışmada Mesh-1 ağ yapısının çözüm süresi 1 saat 10 dk sürerken Mesh-7 ağ yapısının çözüm süresi 18 saat 20 dakika sürmüştür. İdeal mesh yapısı olarak kabul edilen ve Şekil 3.2’de işaretlenen Mesh-5 ağ yapısının çözüm süresi ise 12 saat 10 dakika sürmüştür ve bu ağ yapısının tercih edilmesinde önemli bir faktör olmuştur.

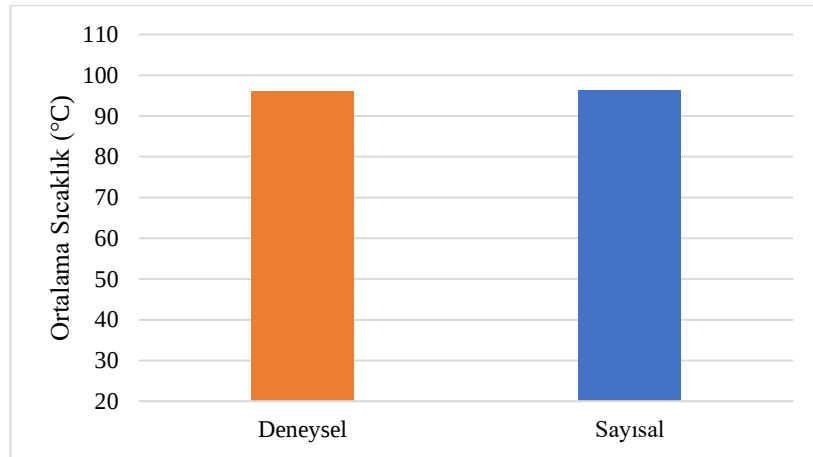
Bundan sonraki yapılacak farklı parametrelerdeki sayısal çözüm çalışmalarında 5553 eleman sayılı ve 27098 düğüm noktalı Mesh-5 ağ yapısı kullanılacaktır. Bu ağ yapısının çözümü sonucunda elde edilen sıcaklık değeri $96,42^{\circ}\text{C}$ 'dir.

3.2.2. Deneysel Sonuçlar ile Sayısal Modelin Karşılaştırılması

Tel çekme işleminde sayısal model ile deneysel çalışmaların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmanın yapılmasının amacı oluşturulan sayısal modelin doğruluğunu ölçmektir. Yapılan deneysel çalışmalarda çelik telinin 8,54 mm giriş çapından 7,24 mm tel çapına indirgenmesi işlemi sırasında tel yüzeyinde oluşan sıcaklıklar Şekil 3.1'de gösterildiği gibi termal kamera ile ölçülerek raporlanmıştır. İşletme içerisinde tel çekme makinasının birinci bloğunda yapılan tel sıcaklık ölçümlerinde hata payını azaltmak adına tüm ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

Sayısal çözüm için Bölüm 2.2'de bahsedildiği gibi deneysel modeldeki gibi çelik telinin 8,54 mm giriş çapından 7,24 mm tel çapına indirgenmesi işlemi modellenmiştir.

Şekil 3.3'te deneysel ve sayısal ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılmaları görülmektedir.



Şekil 3.3 Deneysel ve sayısal olarak ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi deneysel yöntem ile ortalama tel sıcaklığı $96,1^{\circ}\text{C}$ değerinde ölçülmüştür. Sayısal çözümlerde Mesh-5 yapısı kullanılmış ve telin haddeden çıkışı esnasında tel yüzeyinde oluşan ortalama sıcaklık değeri $96,42^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür.

Deneyisel yöntemler ile sayısal modelin çözüm sonucu elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında gerçek değer ile sayısal modelin sonucunun birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Hata payı ise Eş 3.1’de verilen denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$Hata Payı (\%) = \frac{Sayısal Değer - Gerçek Değer}{Gerçek Değer} \times 100 \quad (2.11)$$

Buradan %0,33 değerinde bir hata payının olması sayısal modelin deneysel yöntem ile elde edilen verilerle uyduğunu göstermektedir.

3.2.3. Farklı Parametreler için Zamana Bağlı Çözümler

Tel çekme işlemi için sayısal çözümlerin sayısı artırılarak farklı koşullarda analizler ANSYS programında gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal çözüm çalışmalarında farklı hızlar, farklı redüksiyon oranları ve farklı çaplarda geometriler için hazırlan modeller, sayısal model aracılığı ile çözdürülerek tel çekme hızı, redüksiyon oranı ve farklı çap parametrelerinin gerilme, açığa çıkan enerji ve sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca burada gösterilen parametrelere yapılan sayısal çözümler çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup malzemelerden kaynaklı oluşan gerilme, enerji ve sıcaklık sonuçları da incelenmiştir. Yapılan çözümlerin listesi aşağıda listelenmiştir:

- Farklı hızlar için yapılan çözümler, 0,05 – 0,1 – 0,2 – 0,3 m/s hızlarında dört farklı durum için gerçekleştirilmiştir.
- Farklı redüksiyon oranları için yapılan çözümler, %10 - %20 - %30 redüksiyon oranlarında üç farklı durum için gerçekleştirilmiştir.
- Farklı çaplar için yapılan çözümler, 8,54 mm’den 7,24 mm’ye, 7,24 mm’den 6,14 mm’ye ve 6,14 mm’den 5,21 mm’ye olacak şekilde üç durum için gerçekleştirilmiştir.
- Sayısal çözümlerin hepsi ayrı ayrı olacak şekilde çelik, bakır ve alüminyum telleri için gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.1. Farklı Hızlardaki Tel Çekme İşlemlerinin Analiz Sonuçları

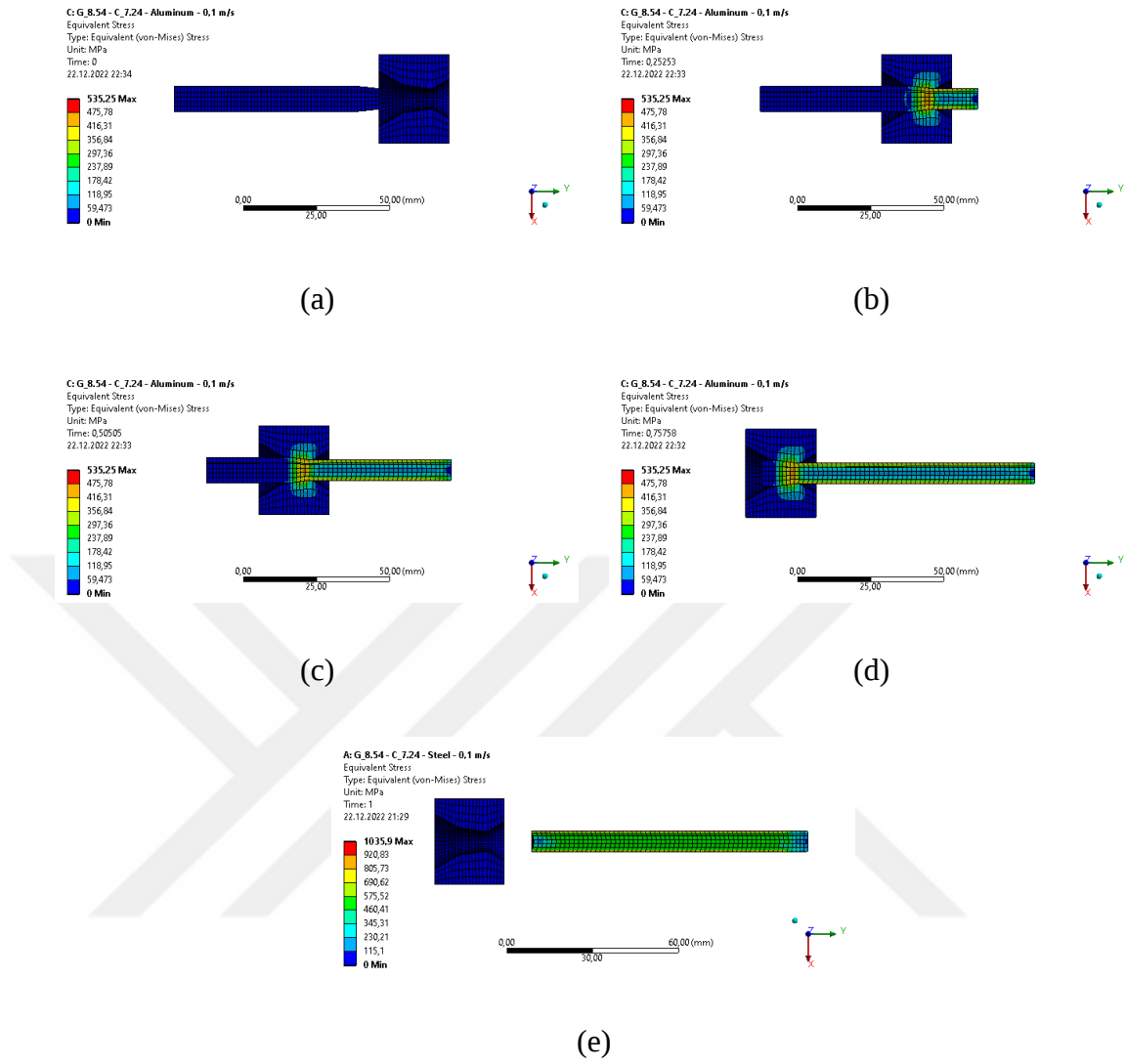
Tel çekme analizinin sayısal olarak modellenmesi ile farklı hızlarda çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum için gerçekleştirilen 4 farklı hızdaki tel çekme analizlerinin gerilme, enerji ve sıcaklık sonuçları incelenmiştir.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri için yapılan tel çekme analizlerinde giriş çapı 8,54 mm olan tel %28,13 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,24 mm'ye indirgenmiştir. Bu tel çekme işlemi parametresi farklı hızlardaki analizler içinde aynı kabul edilmiştir.

Farklı Hızlarda Meydana Gelen Gerilme Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı hızlarda sayısal analizler yapılarak gerilmeler elde edilmiş ve tel üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.

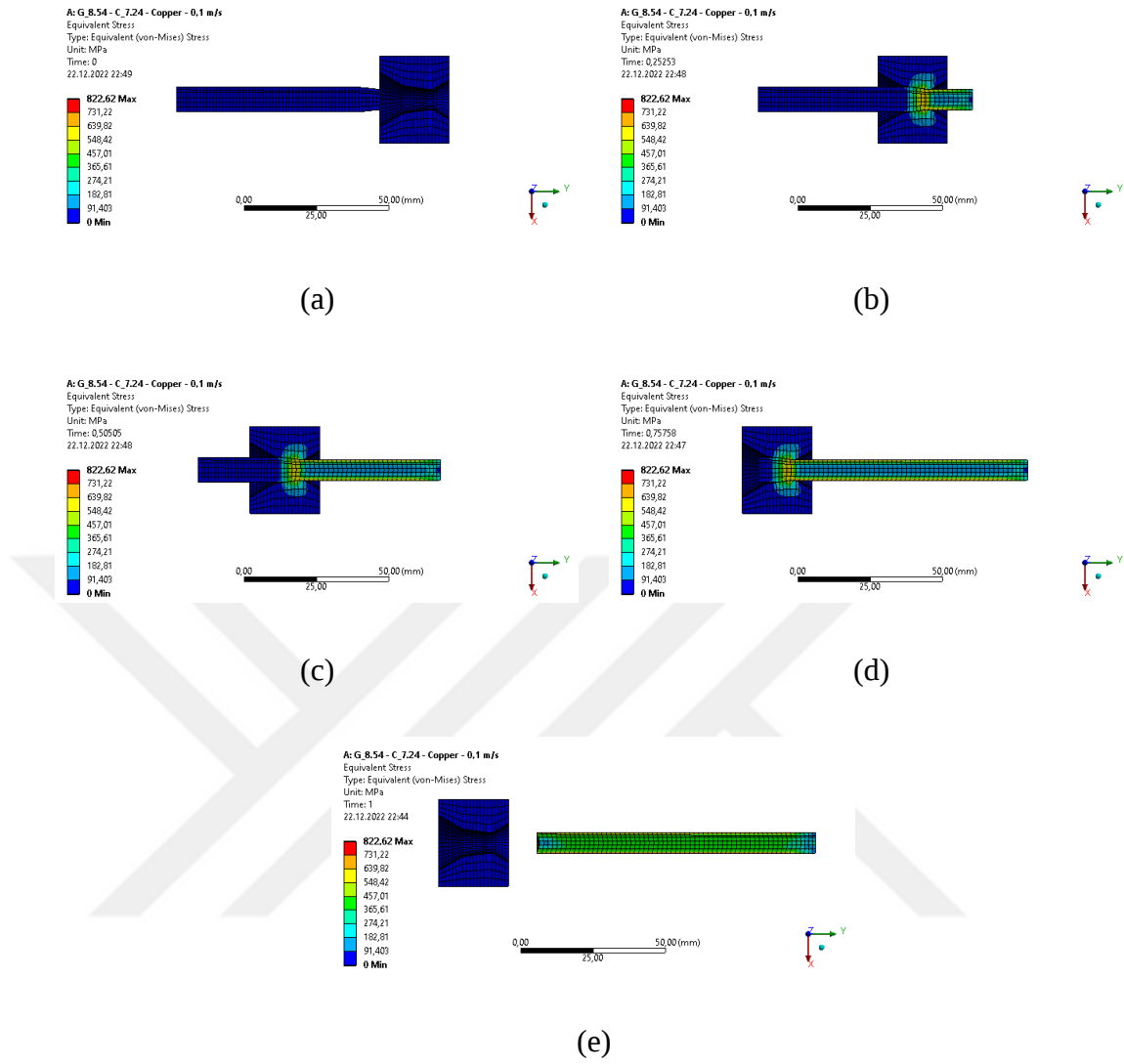
Çelik tel için yapılan analizde 0,1 m/s hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç dağılımları Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 0,1 m/s’de çeliğin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda çelik tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 129,24 MPa ölçülmüştür. 0.1 m/s hız için çelik tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 588,11 MPa’dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

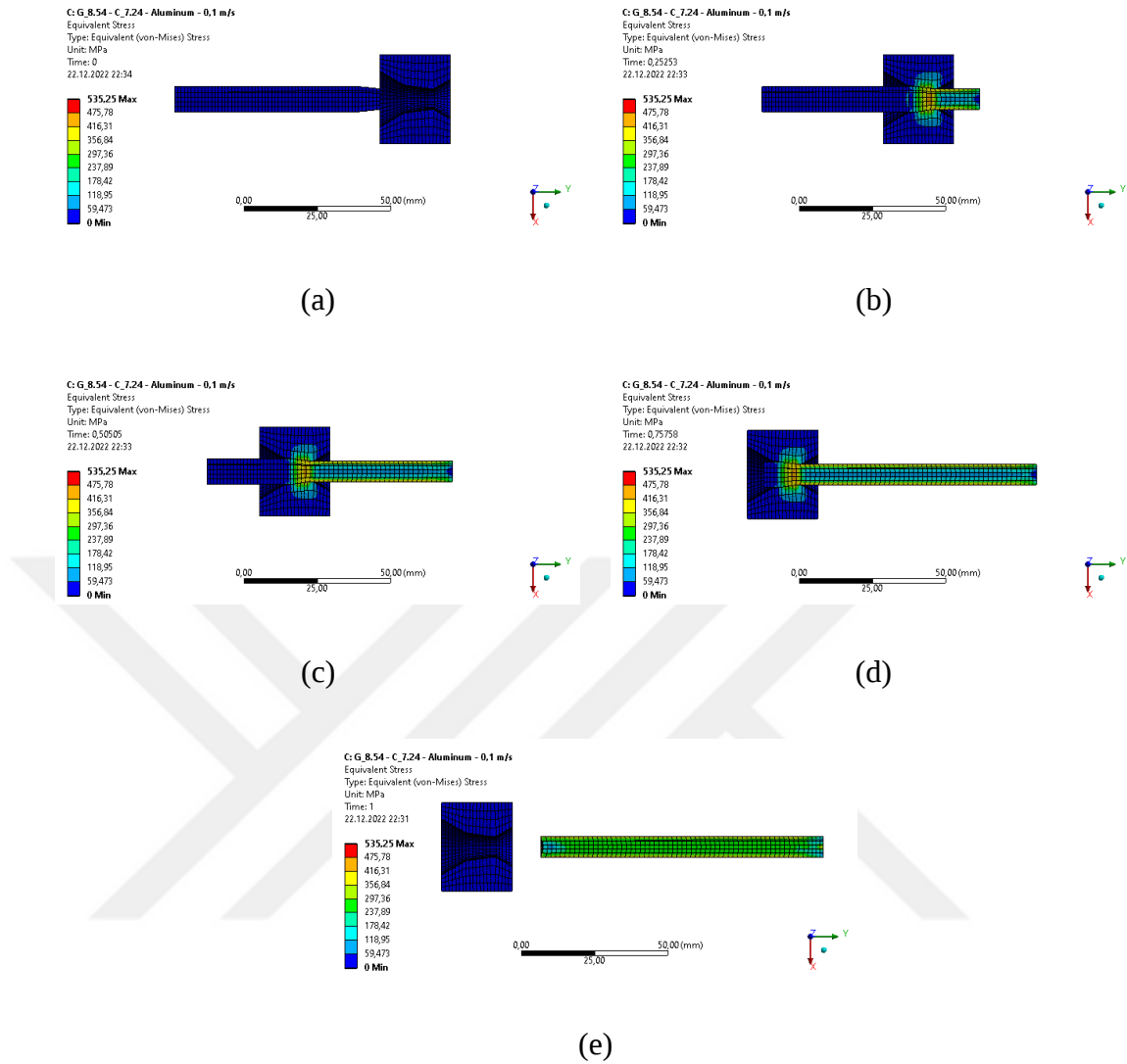
Bakır tel için yapılan analizde 0,1 m/s hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 0,1 m/s’de bakırın tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda bakır tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 104,99 MPa ölçülmüştür. 0.1 m/s hız için bakır tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 472,41 MPa’dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

Alüminyum tel için yapılan analizde 0,1 m/s hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 0,1 m/s’de alüminyumun tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı:

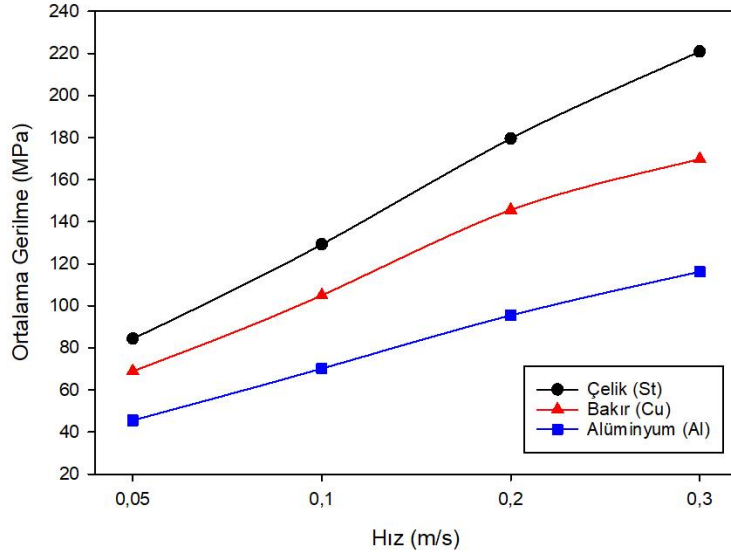
(a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda alüminyum tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 70,19 MPa ölçülmüştür. 0.1 m/s hız için alüminyum tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 298,56 MPa’dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemelerine yapılan analizlerde, plastik şekil değişiminin gerçekleşmesi için kalıbın tel yüzeyine uyguladığı basınç, telin yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin maksimum olmasına sebep olmuştur.

Şekil 3.7’de ise çelik, bakır ve alüminyum tel analizlerinin aynı yöntem ile farklı hızlarda oluşan gerilmelerin sonuç grafiği verilmiştir. Yapılan analizlerde giriş çapı 8,54 mm olan

tel %28,13 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,24 mm'ye indirgenmiş ve bu değerler tüm hızlar için sabit tutulmuştur.



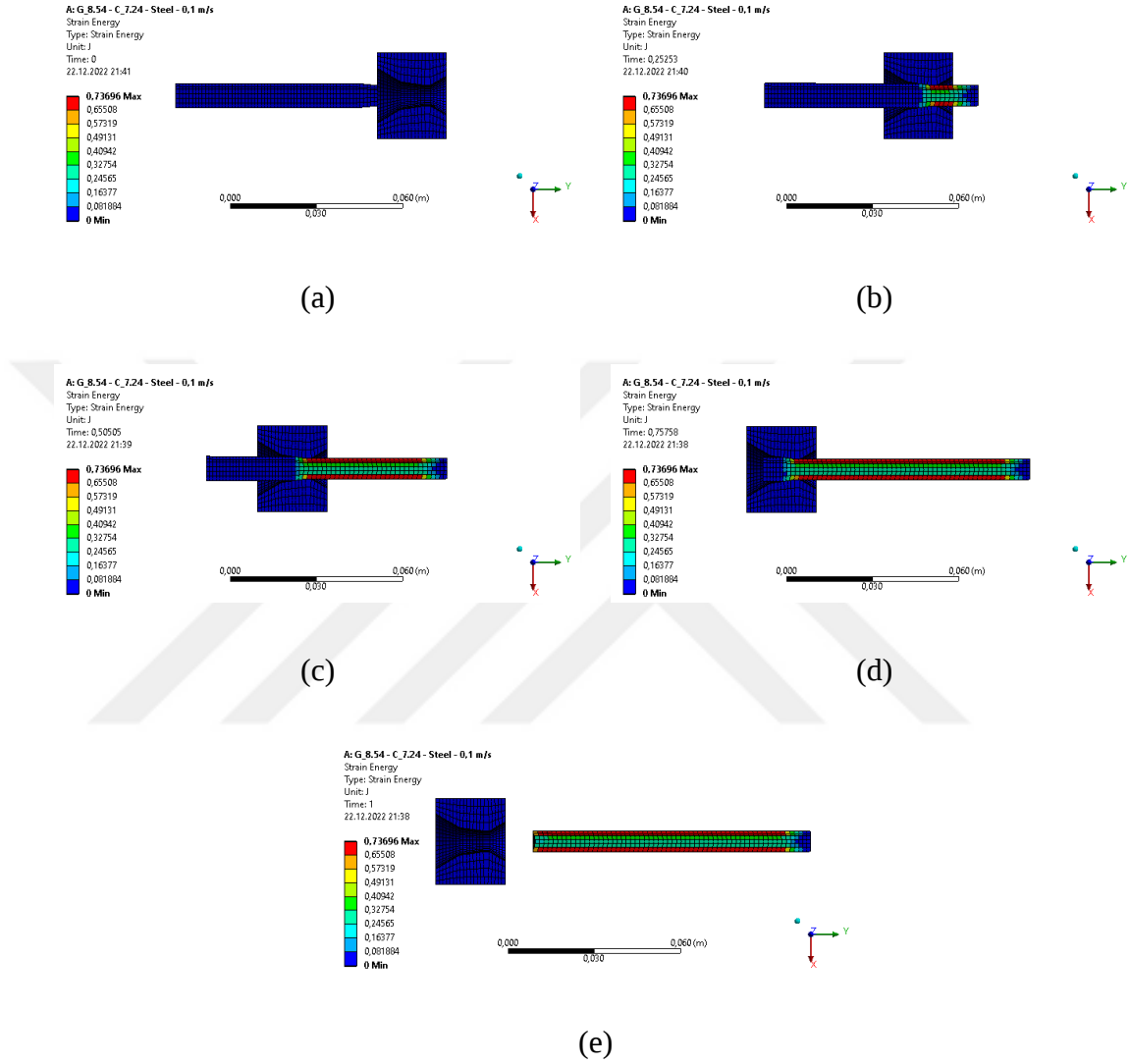
Şekil 3.7 Farklı hızlardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için hız-gerilme grafiği.

Çelik, bakır ve alüminyum tellere yapılan analizlerde 0,05, 0,1, 0,2 ve 0,3 m/s hızlarında meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde her bir hız değeri kendi içerisinde incelendiğinde, elastisite modülü yüksek olan malzemenin gerilmesinin diğer iki malzemeye göre daha yüksek gerilmeye sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde en çok gerilmenin 0,3 m/s tel çekme hızında çelik telinde meydana geldiği görülmüş ve gerilme değeri 220,92 MPa ölçülmüştür. En düşük gerilme ise 0,05 m/s tel çekme hızında alüminyum telinde meydana gelmiş ve 45,57 MPa olarak ölçülmüştür. Bakır telde ise tüm hızlar için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme hızının 0,05 m/s'den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %262, bakır telde %246 ve alüminyum telde %255 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin arttığı görülmüştür. Böylece hızlara bağlı olarak grafik incelendiğinde tel çekme hızının artması ile telde oluşacak gerilmenin de arttığı gözlemlenmiştir.

Farklı Hızlarda Açığa Çıkan Enerji Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı hızlarda sayısal analizler yapılarak açığa çıkan enerjiler elde edilmiş ve tel üzerinde açığa çıkan enerjiler incelenmiştir.

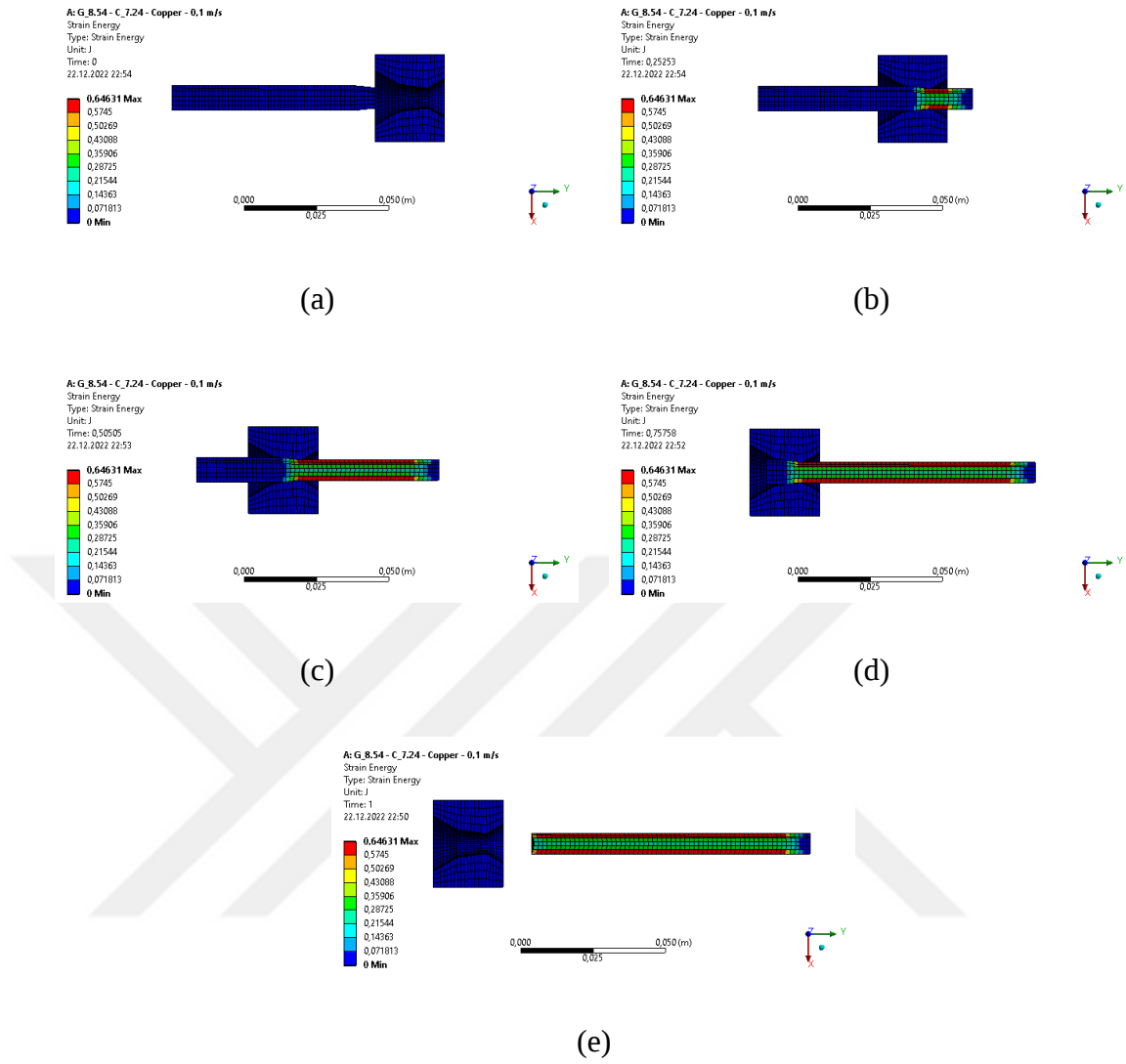
Çelik tel için yapılan analizde 0,1 m/s hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 0,1 m/s’de çeliğin tel çekme işlemi sonrası açığa çıkan enerji değerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda çelik tel üzerinde oluşan toplam enerji 1161,60 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

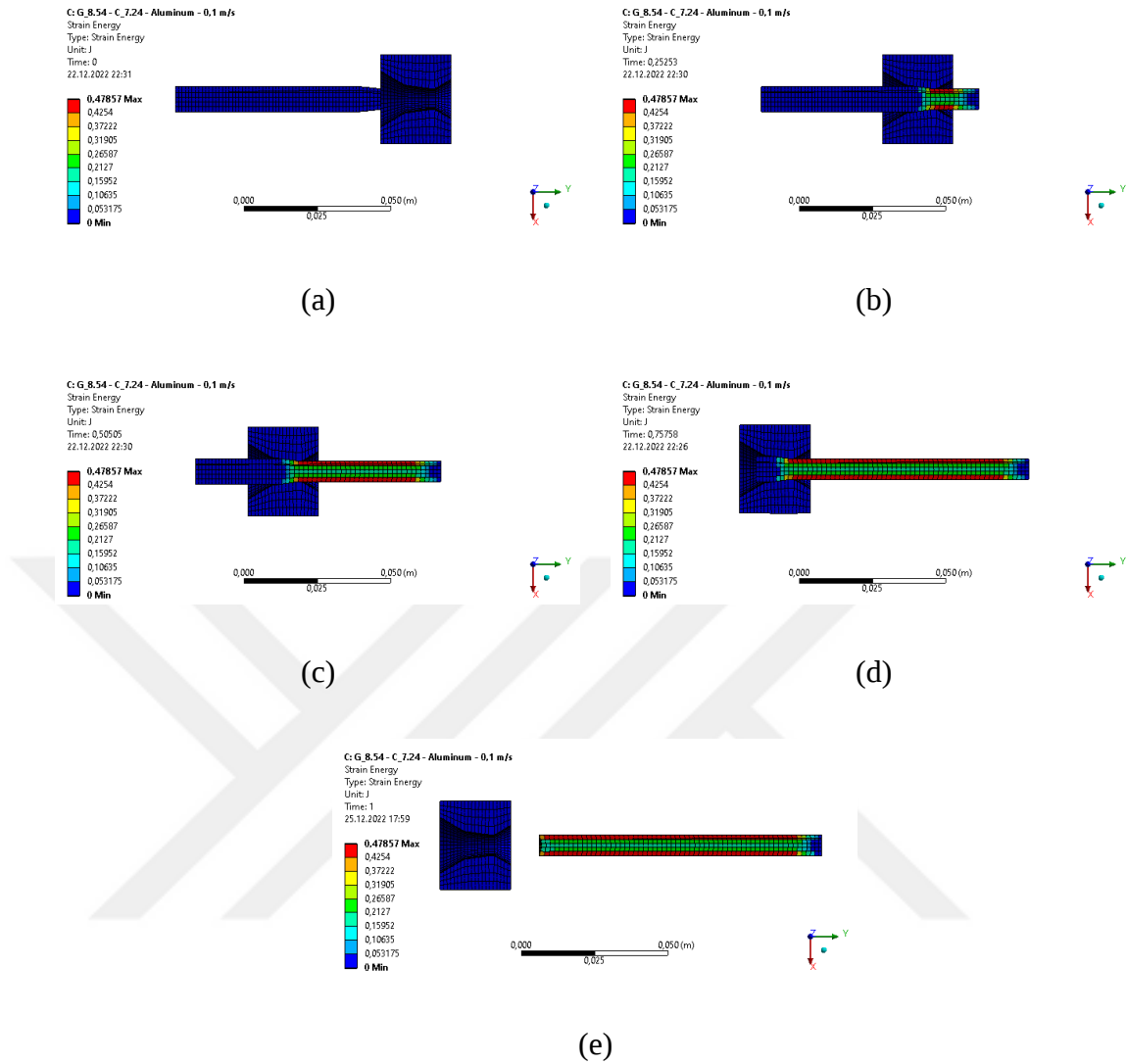
Bakır tel için yapılan analizde 0,1 m/s hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 0,1 m/s’de bakırın tel çekme işlemi sonrası açığa çıkan enerji değerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda bakır tel üzerinde oluşan toplam enerji 1020,50 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

Alüminyum tel için yapılan analizde 0,1m/s hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.10’da verilmiştir.

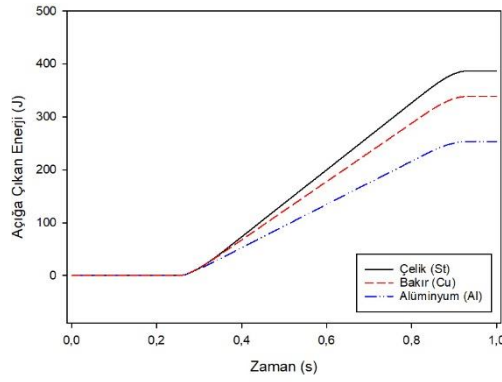


Şekil 3.10 0,1 m/s’de alüminyum tel çekme işlemi sonrası açığa çıkan enerji değerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

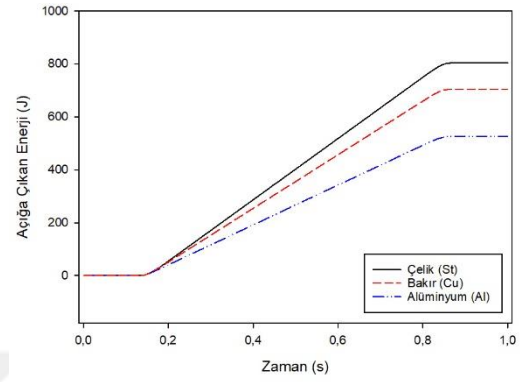
Bu analiz sonucunda alüminyum tel üzerinde oluşan toplam enerji 762,54 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemelerine yapılan analizlerde, plastik şekil değişimi gerçekleşirken tel yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri ve sürtünme sonucu yine aynı bölgelerde açığa çıkan birim enerjinin fazla olduğu görülmüştür. Tel üzerindeki birim enerjilerin toplamından ise tel üzerinde oluşan toplam enerji hesaplanmaktadır. Açığa çıkan toplam enerji ise tel yüzeyinde ısı oluşmasına sebep olacaktır.

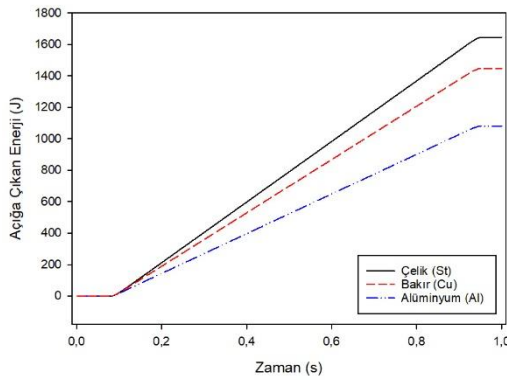
Yapılan analiz çalışmasında açığa çıkan enerji tel çekme işlemi süresince artmaktadır. Tel çekme işlemi süresince açığa çıkan birim enerjilerin toplamından elde edilen grafikler Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



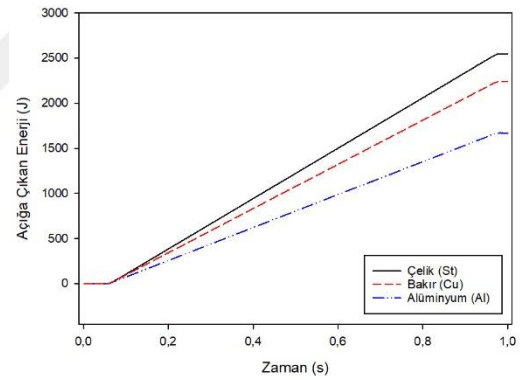
(a)



(b)



(c)



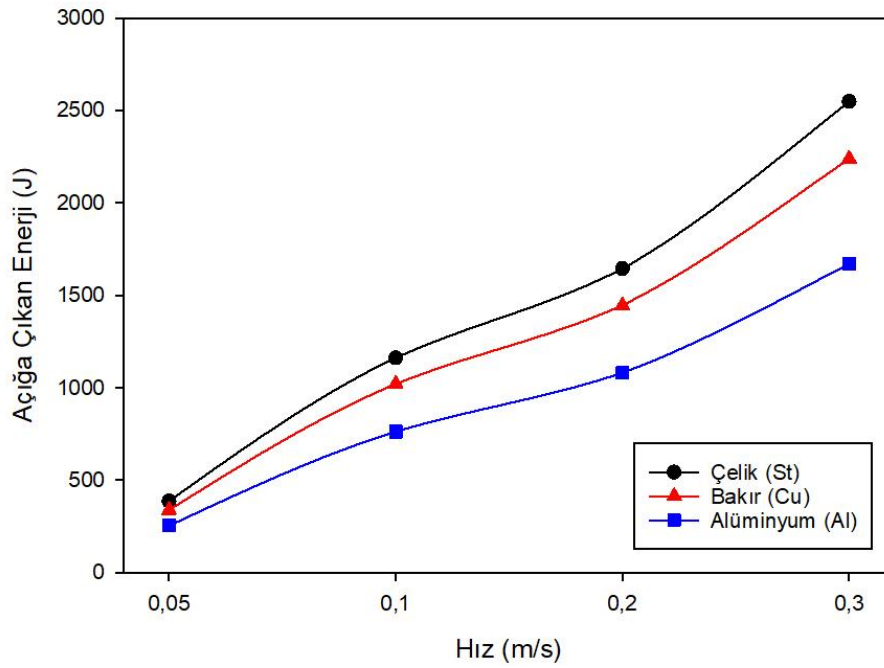
(d)

Şekil 3.11 Farklı hızlardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için enerji-zaman grafikleri: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.

Grafikler incelendiği zaman tel çekme işleminin devam etmesi ile tel üzerinde meydana gelen enerjinin arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca tel üzerinde açığa çıkan enerjinin tel çekme hızının artması ile daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, çelik için tel çekme hızı 0,05 m/s tel çekme hızında açığa çıkan enerji 386,81 J iken tel çekme hızı artışı ile 0,3 m/s’de 2548 J olarak ölçülmüştür. Bu durumun bakır ve alüminyum telleri içinde aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bakır tel için 0,05 ve 0,3 m/s hızlarında açığa çıkan

enerji sırasıyla 338,56 J – 2239,60 J'dür. Alüminyum tel için ise 0,05 ve 0,3 m/s hızlarında açığa çıkan enerji sırasıyla 253,38 J – 1670,60 J'dür.

Çelik, bakır, alüminyum teller için açığa çıkan enerjinin farklı hızlarda incelenmesi ise Şekil 3.12'de gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde giriş çapı 8,54 mm olan tel %28,13 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,24 mm'ye indirgenmiş ve bu değerler tüm hızlar için sabit tutulmuştur.



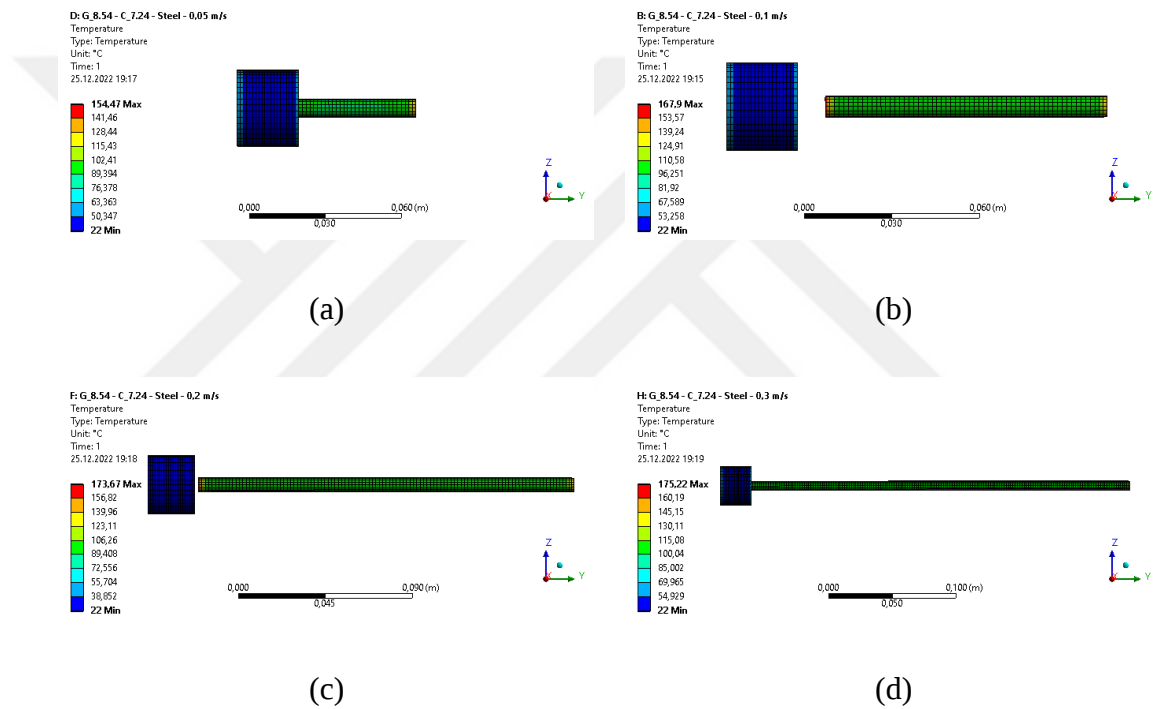
Şekil 3.12 Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı hızlardaki hız-enerji grafiği.

Şekil 3.12'de verilen grafik incelendiği zaman çelik, bakır alüminyum telleri için hız artışıyla tel üzerinde oluşan enerjinin arttığı görülmektedir. Tel çekme işlemi sırasında malzemeler arasında en çok enerji 0,3 m/s hızında 2548,00 J ile çelik telinde oluşurken, en az enerji ise 0,05 m/s hızında 253,38 J ile alüminyum telinde oluşmaktadır. Bakır telde ise tüm hızlar için diğer iki malzemeye göre ortalama bir enerjinin açığa çıktığı gözlemlenmektedir. Tel çekme hızının 0,05 m/s'den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %659, bakır telde %662 ve alüminyum telde %659 oranında tel üzerinde açığa çıkan enerjinin arttığı görülmüştür. Buna göre her bir hız değeri kendi içerisinde incelendiğinde, gerilme değeri yüksek olan malzemede açığa çıkan enerjinin diğer malzemelere göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum farklı hızlar da tel yüzeyinde oluşan gerilmenin telin yüzeyinde açığa çıkan enerjiyi doğru oranda etkilediği şeklinde yorumlanabilir.

Farklı Hızlarda Oluşan Sıcaklık Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı hızlarda sayısal analizler yapılarak sıcaklıklar elde edilmiş ve tel üzerinde oluşan sıcaklıklar incelenmiştir.

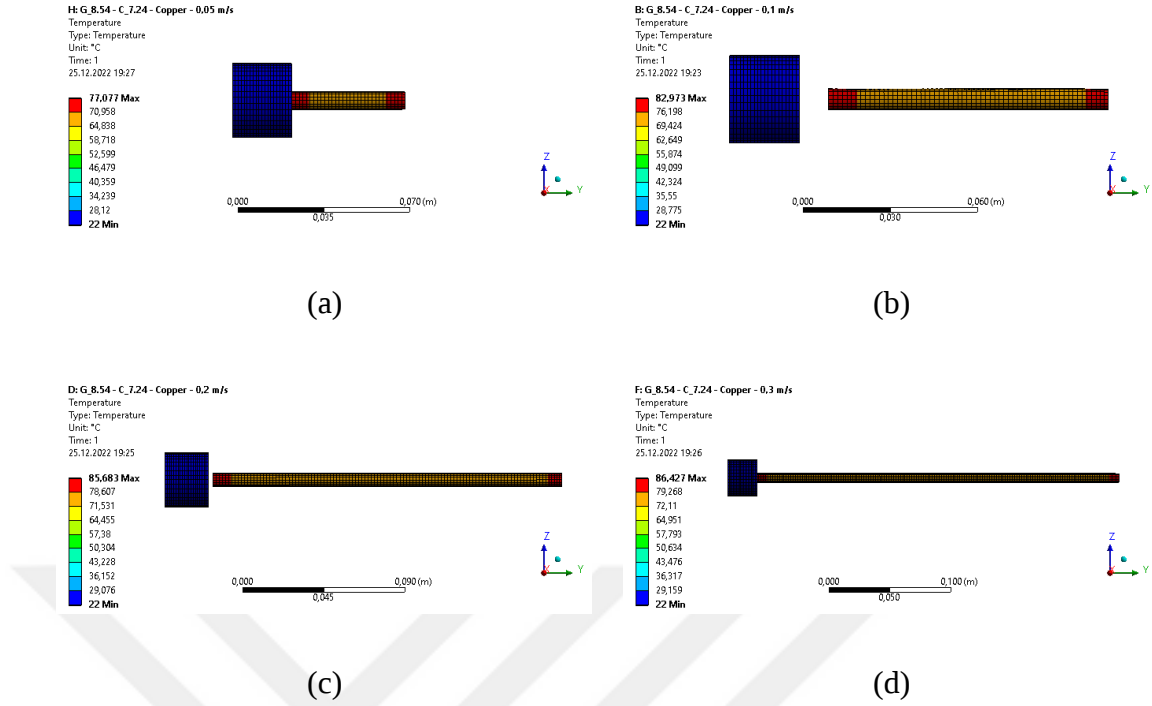
Çelik tel için yapılan analizlerde 0,05, 0,1, 0,2 ve 0,3 m/s hızlarda olmak üzere tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı hız değerleri için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Çelik için farklı hızlardaki tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.

Sonuçlar incelendiği zaman çelik tel çekme işlemindeki hız artışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen verilere göre çelik tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok 0,3 m/s hızında ortalama 100,68 °C ölçülürken 0,05 m/s hızında ise ortalama 89,40 °C sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

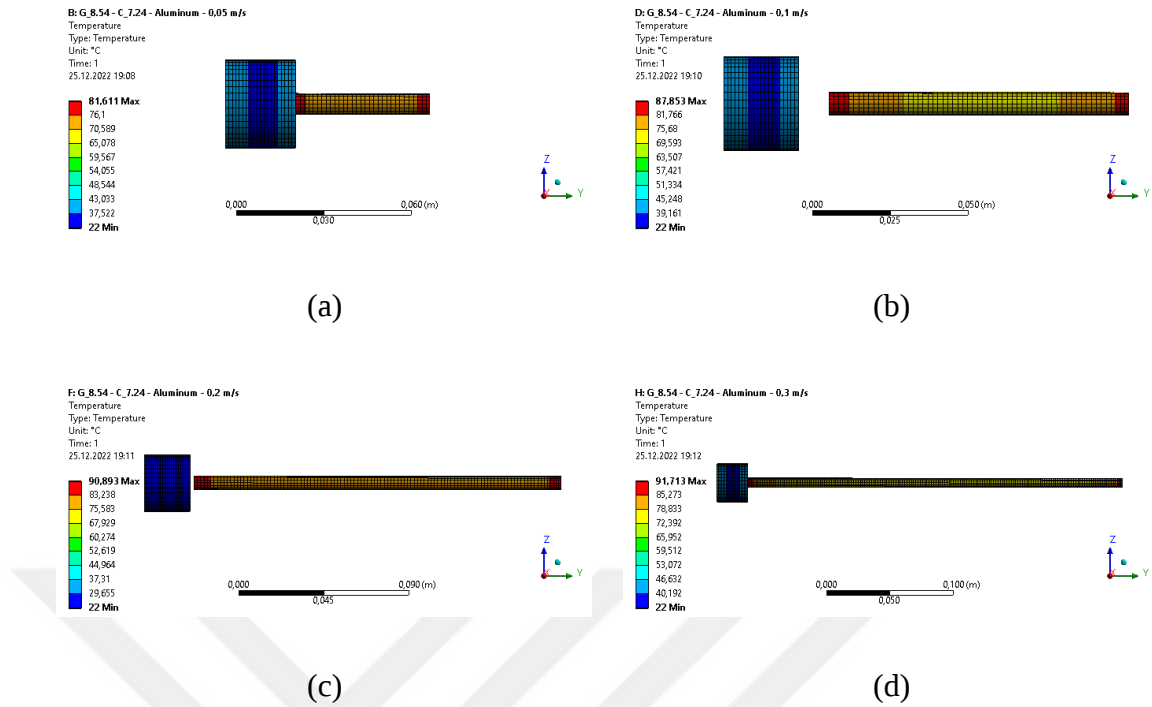
Bakır tel için yapılan analizlerde 0,05, 0,1, 0,2 ve 0,3 m/s hızlarda olmak üzere tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı hız değerleri için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Bakır için farklı hızlardaki tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.

Sonuçlar incelendiği zaman bakır tel çekme işlemindeki hız artışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen verilere göre bakır tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok 0,3 m/s hızında ortalama 74,74 °C ölçülürken 0,05 m/s hızında ise ortalama 68,60 °C sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

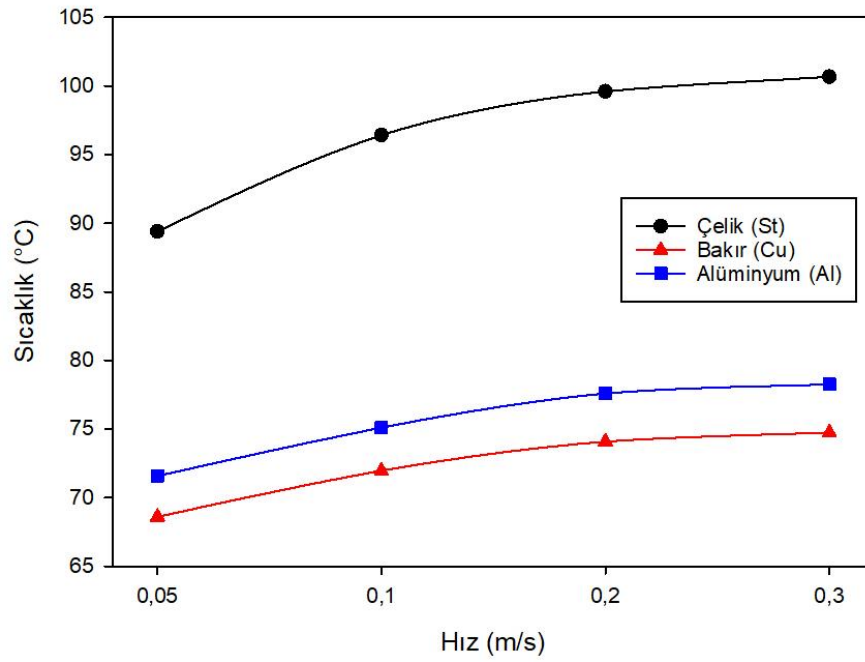
Alüminyum tel için yapılan analizlerde 0,05, 0,1, 0,2 ve 0,3 m/s hızlarda olmak üzere tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı hız değerleri için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15 Alüminyum için farklı hızlardaki tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 0,05 m/s, (b) 0,1 m/s, (c) 0,2 m/s, (d) 0,3 m/s.

Sonuçlar incelendiği zaman alüminyum tel çekme işlemindeki hız artışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen verilere göre alüminyum tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok 0,3 m/s hızında ortalama 78,25 °C ölçülürken 0,05 m/s hızında ise ortalama 71,58 °C sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

Çelik, bakır, alüminyum teller için tel üzerinde oluşan sıcaklığın farklı hızlar için incelenmesi ise Şekil 3.16'da gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde giriş çapı 8,54 mm olan tel %28,13 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,24 mm'ye indirgenmiş ve bu değerler tüm hızlar için sabit tutulmuştur.



Şekil 3.16 Çelik, bakır, alüminyum tel malzemeleri için farklı hızlardaki hız-sıcaklık grafiği.

Şekil 3.16’da verilen grafik incelendiği zaman çelik, bakır alüminyum telleri için hız artışıyla tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmektedir. Tel çekme işlemi sırasında malzemeler arasında ise en çok sıcaklık 0,3 m/s hızında 100,68 °C çelik telinde oluşurken, en az sıcaklık ise 0,05m/s hızında 68,60 °C ile bakır telinde oluşmaktadır. Alüminyum telde ise tüm hızlar için diğer iki malzemeye göre ortalama bir sıcaklığın olduğu gözlemlenmektedir. Buna göre her bir hız değeri kendi içerisinde incelendiğinde, termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha çabuk soğuma eğilimi göstereceğinden, bu malzemenin sıcaklığının daha az olduğu görülmüştür. Tel çekme hızının 0,05 m/s’den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %113, bakır telde %109 ve alüminyum telde %109 oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmüştür. Ayrıca farklı hızlarda tellerin üzerinde oluşan sıcaklık için tel üzerindeki enerji artışıyla tel sıcaklığının doğru orantılı olduğu yorumu da yapılabilir.

3.2.3.2. Farklı Redüksiyon Oranlarındaki Tel Çekme İşlemlerinin Analiz Sonuçları

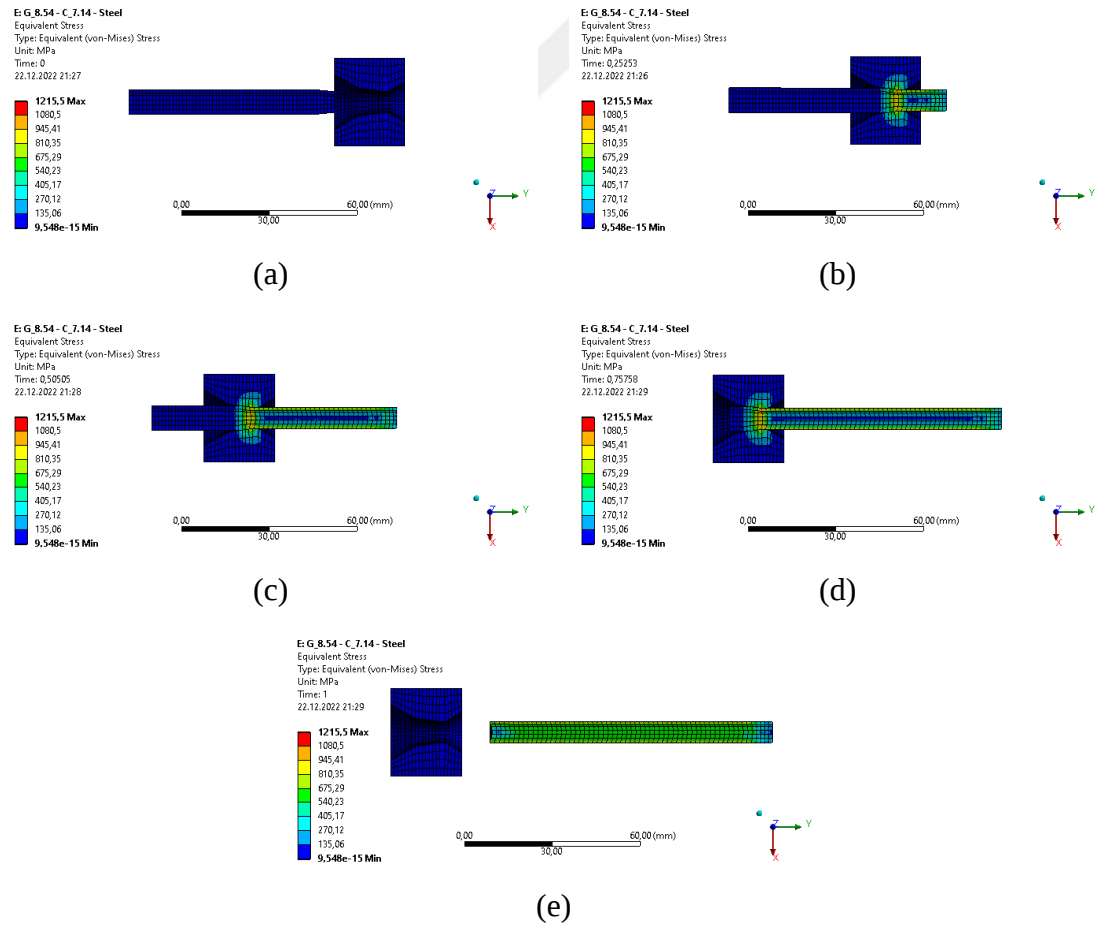
Tel çekme analizinin sayısal olarak modellenmesi ile farklı redüksiyon oranlarında çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum için gerçekleştirilen üç farklı redüksiyon oranındaki tel çekme analizlerinin gerilme, enerji ve sıcaklık sonuçları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri için yapılan tel çekme analizlerinde giriş çapı üç durum içinde 8,54 mm olan tel, %30 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,14 mm'ye, %20 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,64 mm'ye ve %10 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 8,10 mm'ye indirgenmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s alınmış olup, bu parametre tüm redüksiyon oranları için sabit tutulmuştur.

Farklı Redüksiyon Oranlarında Meydana Gelen Gerilme Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı redüksiyon oranlarında sayısal analizler yapılarak gerilmeler elde edilmiş ve tel üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.

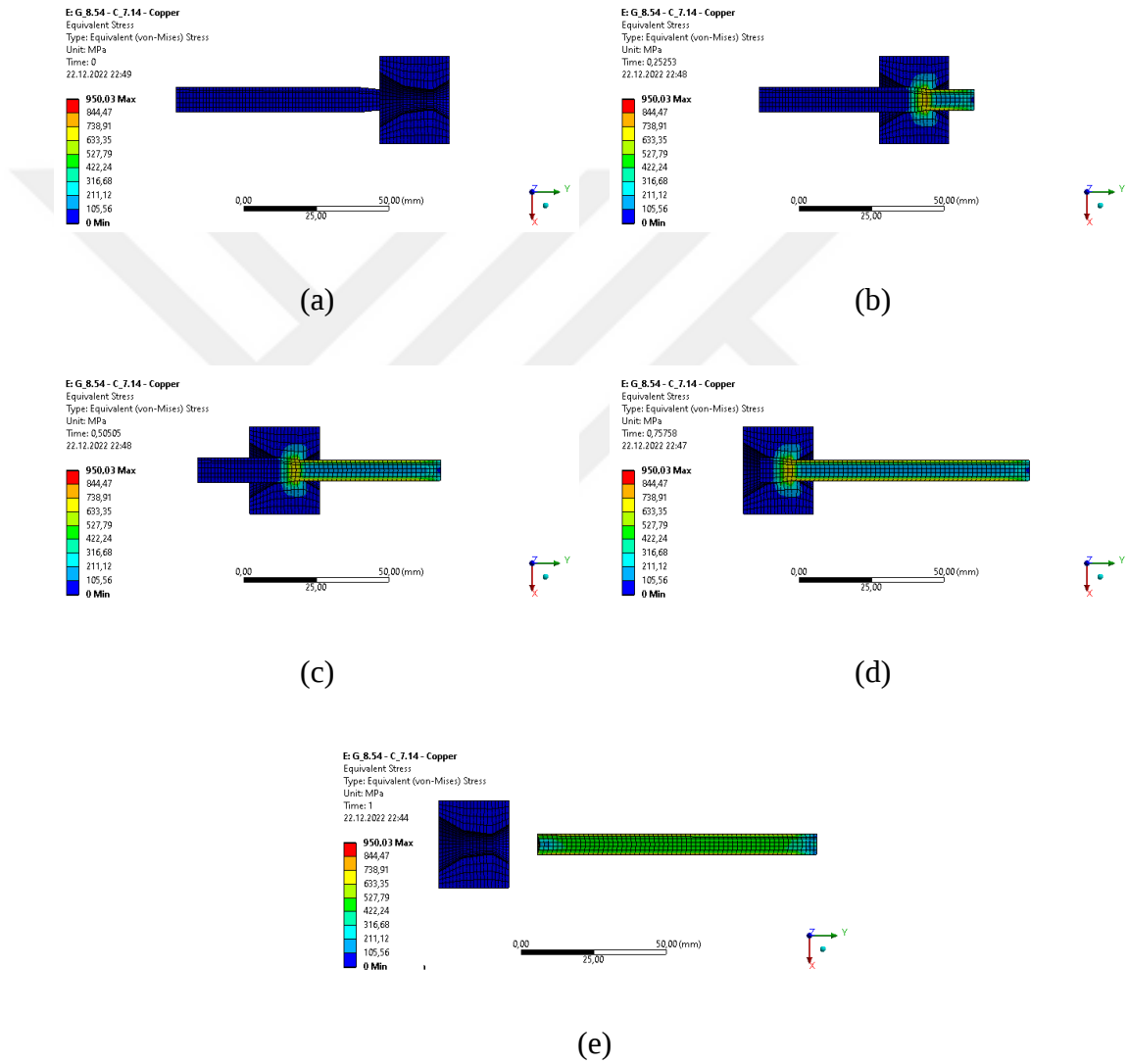
Çelik tel için yapılan analizde %30 redüksiyon oranı için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17 %30 redüksiyon oranında çelik malzemesi tel çekme işlemi için Von-Misses gerilmelerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda çelik tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 131,46 MPa ölçülmüştür. %30 redüksiyon oranı için çelik tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 592,87 MPa'dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

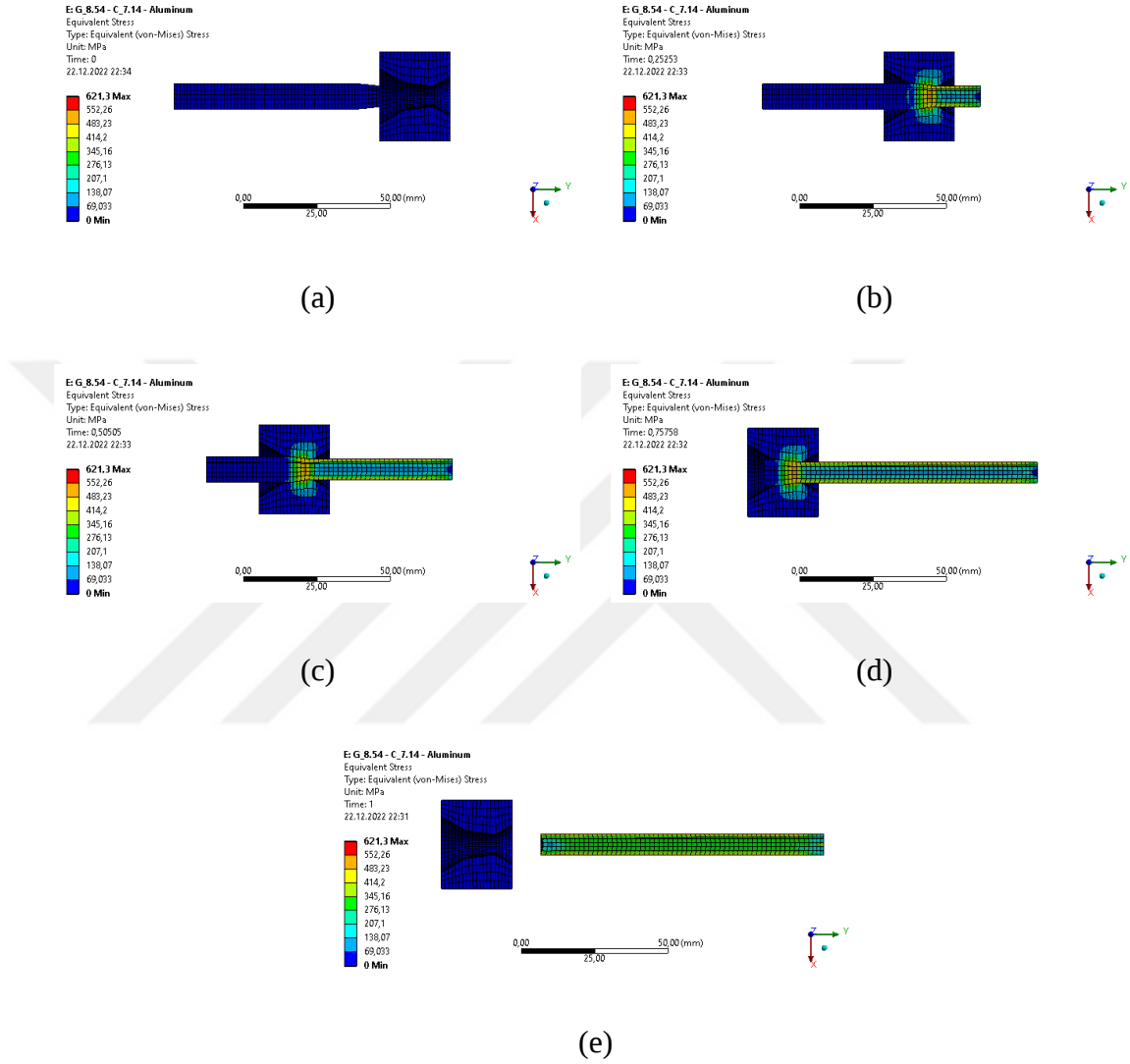
Bakır tel için yapılan analizde %30 redüksiyon oranı için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 %30 redüksiyon oranında bakır malzemesi tel çekme işlemi için Von-Misses gerilmelerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda bakır tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 106,31 MPa ölçülmüştür. %30 redüksiyon oranı için bakır tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 482,64 MPa'dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

Alüminyum tel için yapılan analizde %30 redüksiyon oranı için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.19'da verilmiştir.

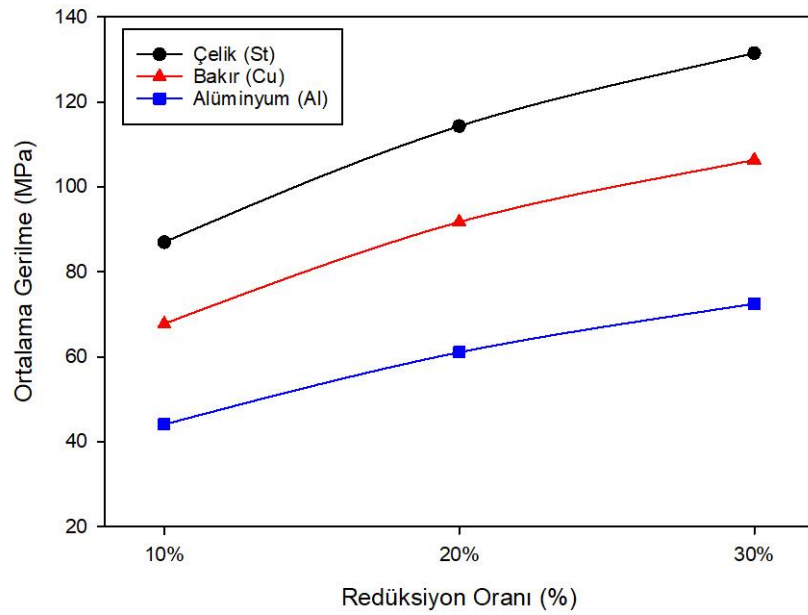


Şekil 3.19 %30 redüksiyon oranında alüminyum malzemesi tel çekme işlemi için Von-Misses gerilmelerinin dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda alüminyum tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 72,47 MPa ölçülmüştür. %30 redüksiyon oranı için alüminyum tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 302,60 MPa'dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemelerine yapılan analizlerde, plastik şekil değişiminin gerçekleşmesi için kalıbın tel yüzeyine uyguladığı basınç, telin yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin maksimum olmasına sebep olmuştur.

Şekil 3.20’de ise çelik, bakır ve alüminyum tel analizlerinin aynı yöntem ile farklı redüksiyon oranlarında oluşan gerilmelerin sonuç grafiği verilmiştir. Yapılan analizlerde giriş çapı üç durum içinde 8,54 mm olan tel, %30 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,14 mm’ye, %20 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,64 mm’ye ve %10 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 8,10 mm’ye indirgenmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s alınmış olup, bu parametre tüm redüksiyon oranları için sabit tutulmuştur.



Şekil 3.20 Farklı redüksiyon oranlarındaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için redüksiyon oranı-gerilme grafiği.

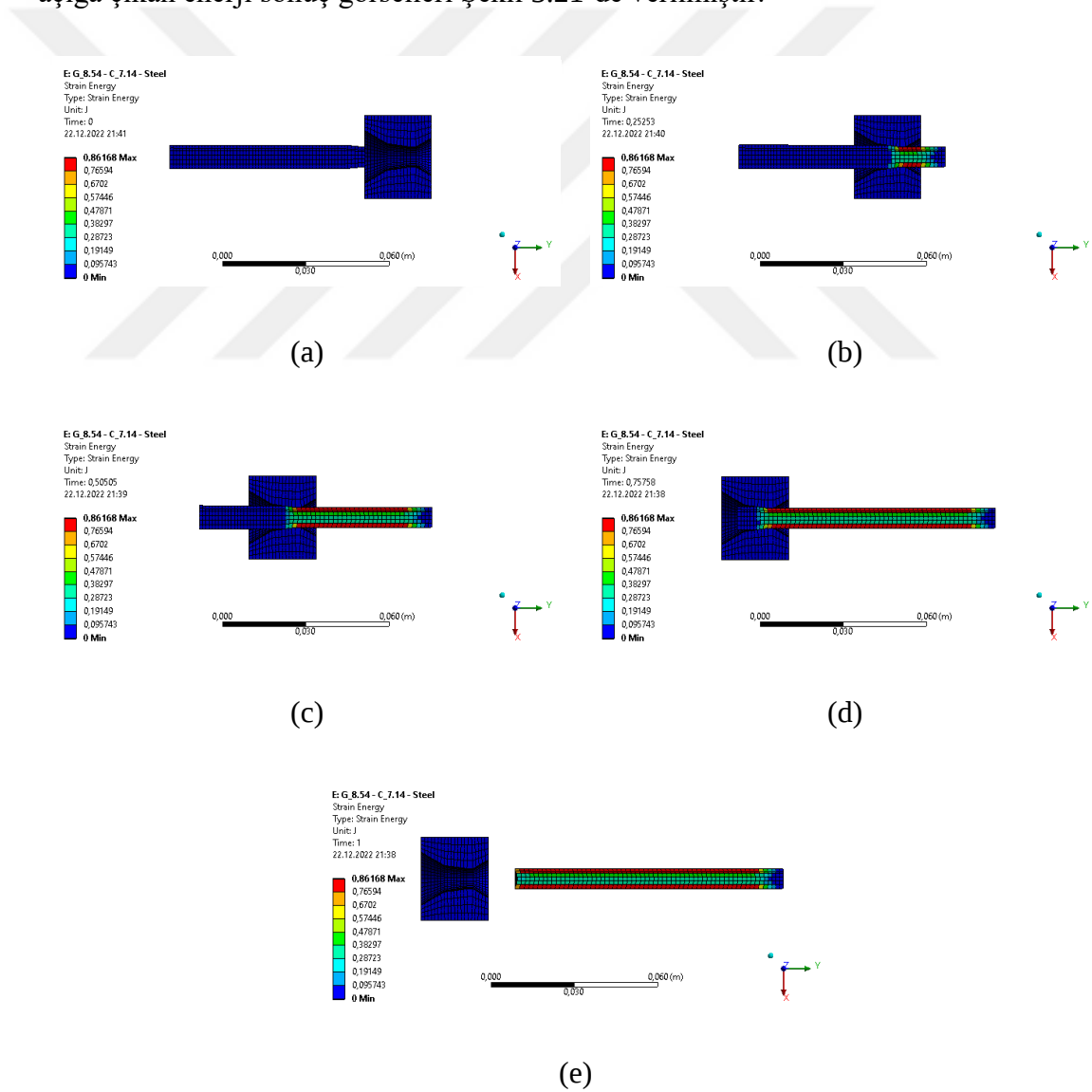
Çelik, bakır ve alüminyum tellere yapılan analizlerde %30, %20 ve %10 redüksiyon oranlarında meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde her bir redüksiyon oranı kendi içerisinde incelendiğinde, elastisite modülü yüksek olan malzemenin gerilmesinin diğer iki malzemeye göre daha yüksek gerilmeye sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde en çok gerilmenin %30 redüksiyon oranında çelik telinde meydana geldiği görülmüş ve gerilme değeri 131,46 MPa ölçülmüştür. En düşük gerilme ise %10 redüksiyon oranında alüminyum telinde meydana gelmiş ve 44,07 MPa olarak ölçülmüştür. Bakır telde ise tüm redüksiyon oranları için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme redüksiyon oranının %10’dan %30’a artırılması ile çelik telde %151, bakır telde %157 ve alüminyum telde %165 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin arttığı görülmüştür. Ayrıca redüksiyon

oranlarına göre grafik incelendiğinde redüksiyon oranının artması ile tel üzerinde meydana gelen gerilme değerin arttığı saptanmıştır.

Farklı Redüksiyon Oranlarında Açığa Çıkan Enerji Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı redüksiyon oranlarında sayısal analizler yapılarak açığa çıkan enerjiler elde edilmiş ve tel üzerinde açığa çıkan enerjiler incelenmiştir.

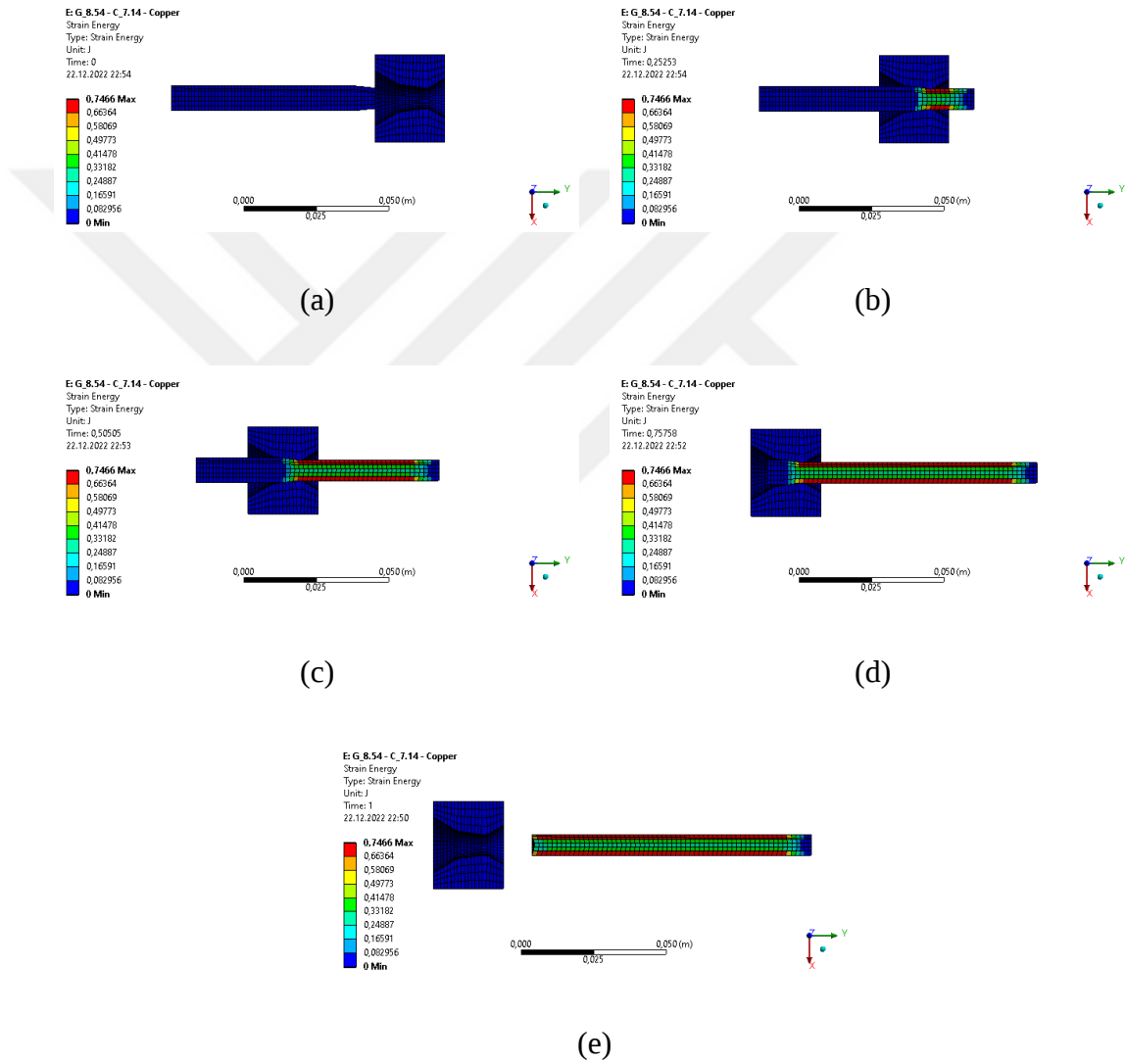
Çelik tel için yapılan analizde %30 redüksiyon oranı için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21 %30 redüksiyon oranında çelik tel çekme işlemi için açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda çelik tel üzerinde oluşan toplam enerji 1296,20 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

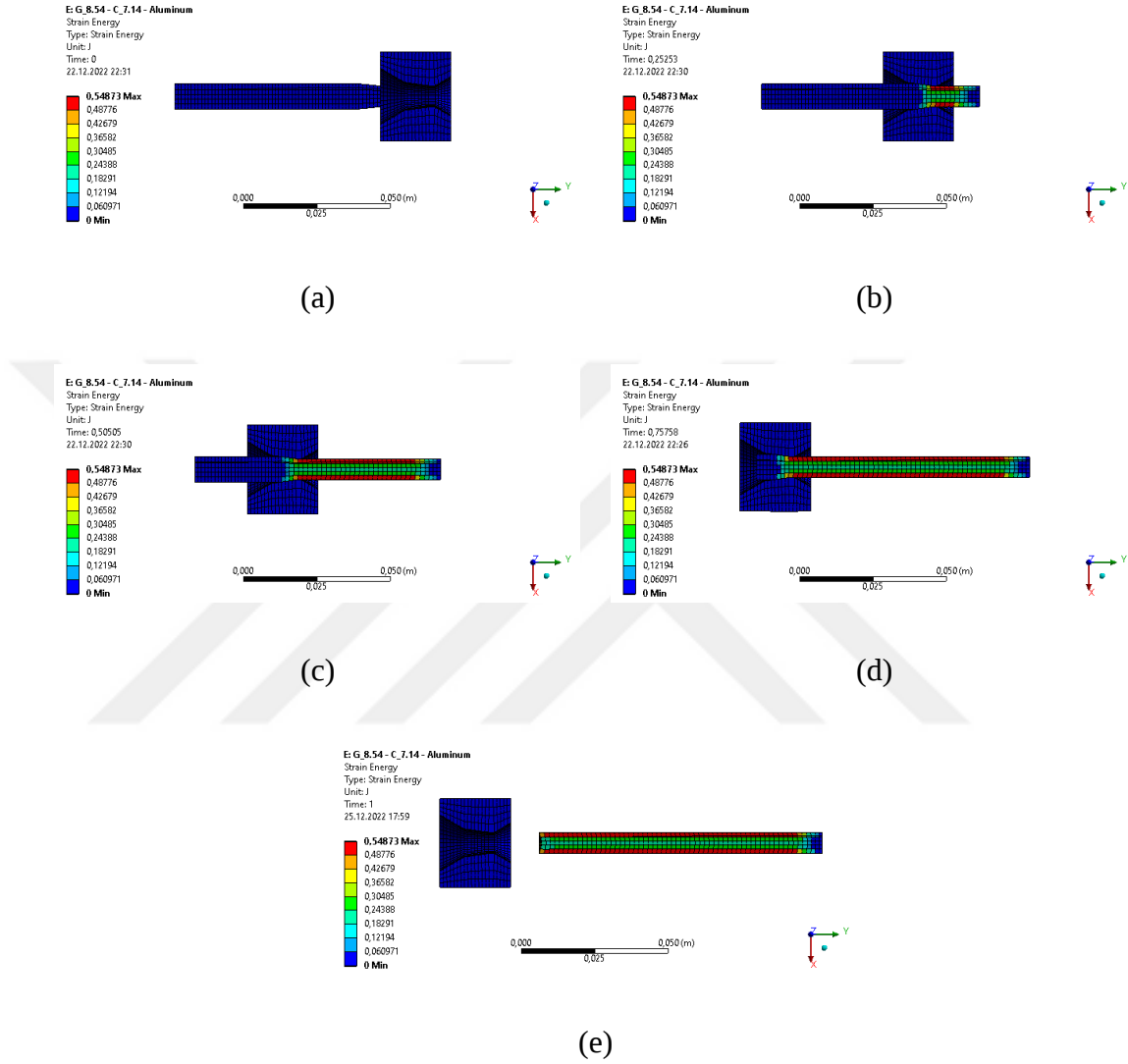
Bakır tel için yapılan analizde %30 redüksiyon oranı için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22 %30 redüksiyon oranında bakır tel çekme işlemi için açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda bakır tel üzerinde oluşan toplam enerji 1132,60 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

Alüminyum tel için yapılan analizde %30 redüksiyon oranı hız için tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.23'te verilmiştir.



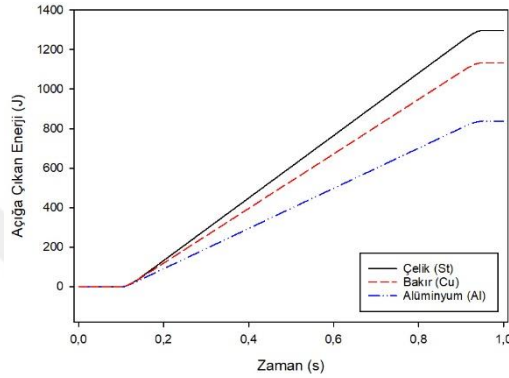
Şekil 3.23 %30 redüksiyon oranında alüminyum tel çekme işlemi için açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda alüminyum tel üzerinde oluşan toplam enerji 837,59 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

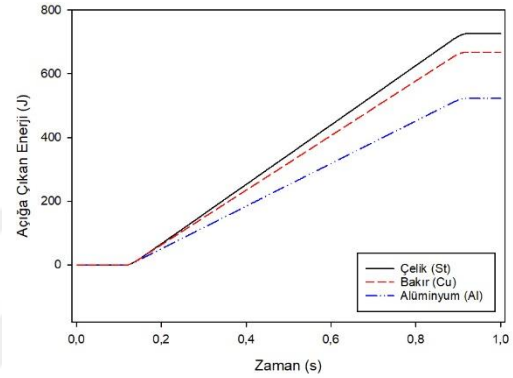
Çelik, bakır ve alüminyum malzemelerine yapılan analizlerde, plastik şekil değişimi gerçekleşirken tel yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri ve sürtünme sonucu yine aynı bölgelerde açığa çıkan birim enerjinin fazla olduğu görülmüştür. Tel üzerindeki birim

enerjilerin toplamından ise tel üzerinde oluşan toplam enerji hesaplanmaktadır. Açığa çıkan toplam enerji ise tel yüzeyinde ısı oluşmasına sebep olacaktır.

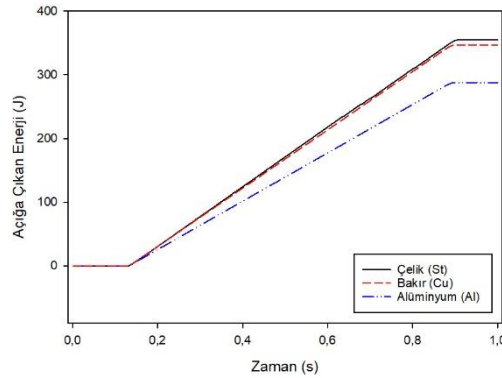
Yapılan analiz çalışmasında açığa çıkan enerji tel çekme işlemi süresince artmaktadır. Tel çekme işlemi süresince açığa çıkan birim enerjilerin toplamından elde edilen grafikler Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



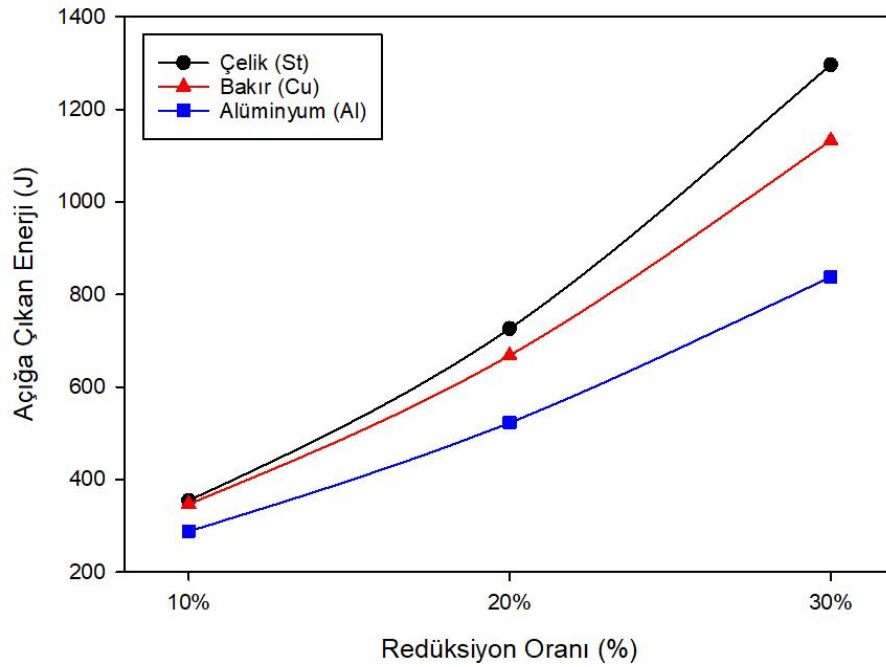
(c)

Şekil 3.24 Farklı redüksiyon oranlarındaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için enerji-zaman grafikleri: (a) %30, (b) %20, (c) %10.

Grafikler incelendiği zaman tel çekme işleminin devam etmesi ile tel üzerinde meydana gelen enerjinin arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca tel üzerinde açığa çıkan enerjinin redüksiyon oranının artması ile daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, çelik için %10 redüksiyon oranında açığa çıkan enerji 354,61 J iken redüksiyon oranı artışı ile %30'da 1296,20 J olarak ölçülmüştür. Bu durumun bakır ve alüminyum telleri içinde aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bakır tel için %10 ve %30 redüksiyon oranlarında açığa çıkan

enerji sırasıyla 346,62 J – 1132,60 J'dür. Alüminyum tel için ise %10 ve %30 redüksiyon oranlarında açığa çıkan enerji sırasıyla 287,73 J – 837,59 J'dür.

Çelik, bakır, alüminyum teller için açığa çıkan enerjinin farklı redüksiyon oranlarında incelenmesi ise Şekil 3.25'te görüldüğü gibidir. Yapılan analizlerde giriş çapı üç durum içinde 8,54 mm olan tel, %30 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,14 mm'ye, %20 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,64 mm'ye ve %10 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 8,10 mm'ye indirgenmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s alınmış olup, bu parametre tüm redüksiyon oranları için sabit tutulmuştur.



Şekil 3.25. Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı redüksiyon oranlarındaki redüksiyon oranı-enerji grafiği.

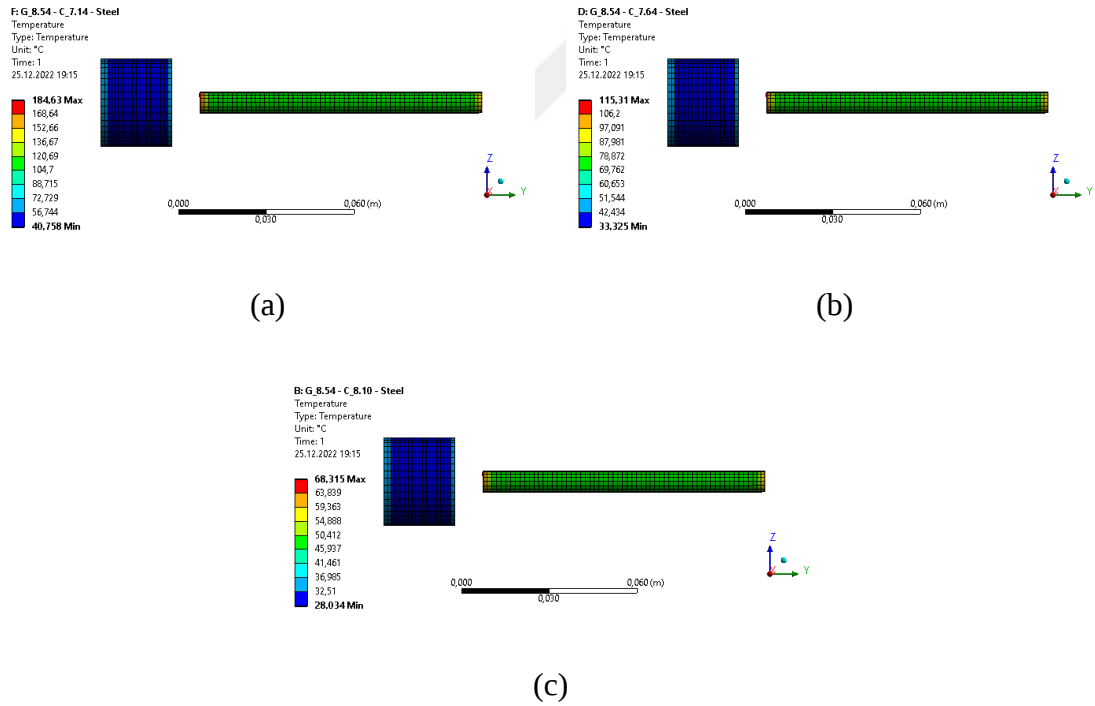
Şekil 3.25'te verilen grafik incelendiği zaman çelik, bakır alüminyum telleri için redüksiyon oranı artışıyla tel üzerinde oluşan enerjinin arttığı görülmektedir. Tel çekme işlemi sırasında malzemeler arasında en çok enerji %30 redüksiyon oranında 1296,20 J ile çelik telinde oluşurken, en az enerji ise %10 redüksiyon oranında 287,73 J ile alüminyum telinde oluşmaktadır. Bakır telde ise tüm redüksiyon oranları için diğer iki malzemeye göre ortalama bir enerjinin açığa çıktığı gözlemlenmektedir. Tel çekme redüksiyon oranının %10'dan %30'a artırılması ile çelik telde %366, bakır telde %327 ve alüminyum telde %291 oranında tel üzerinde açığa çıkan enerjinin arttığı görülmüştür. Ayrıca her bir redüksiyon oranı kendi içerisinde incelendiğinde, gerilme değeri yüksek

olan malzemede açığa çıkan enerjinin diğer malzemelere göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum farklı redüksiyon oranlarında da tel yüzeyinde oluşan gerilmenin telin yüzeyinde açığa çıkan enerjiyi doğru oranda etkilediği şeklinde yorumlanabilir.

Farklı Redüksiyon Oranlarında Oluşan Sıcaklık Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı redüksiyon oranlarında sayısal analizler yapılarak sıcaklıklar elde edilmiş ve tel üzerinde oluşan sıcaklıklar incelenmiştir.

Çelik tel için yapılan analizlerde %30, %20 ve %10 redüksiyon oranlarında olmak üzere tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı redüksiyon oranları için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.26’da verilmiştir.

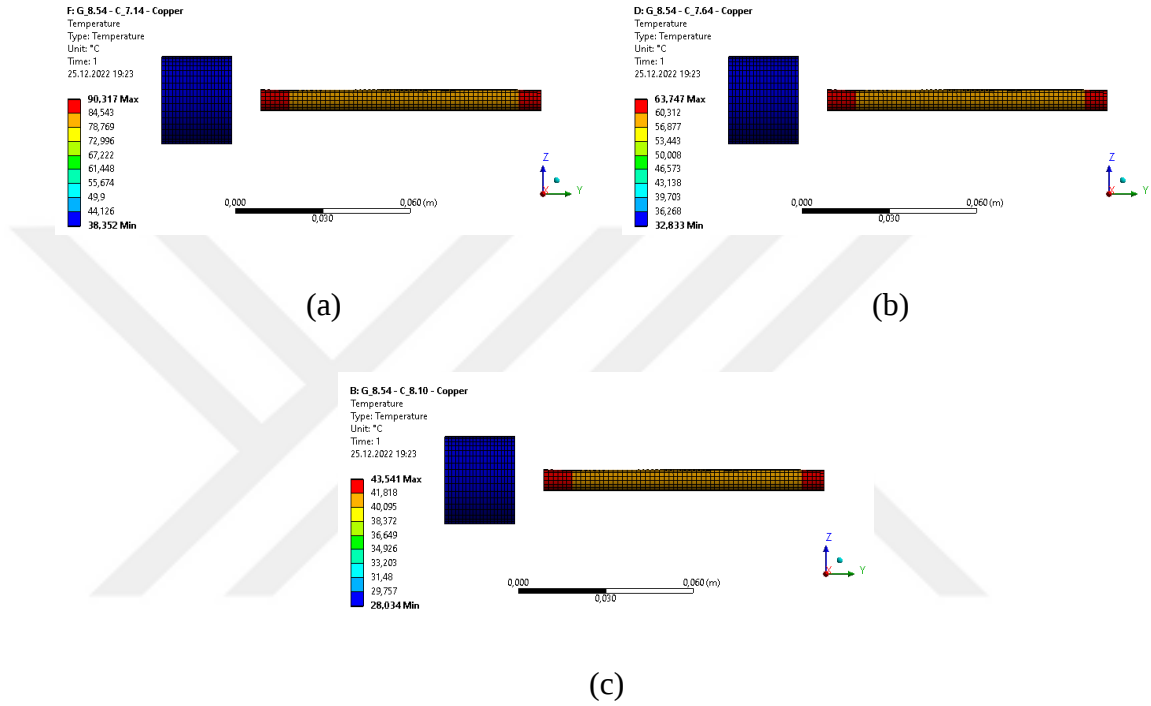


Şekil 3.26. Farklı redüksiyon oranlarında çelik malzemesi için tel çekme işlemi sonunda sıcaklığın değişimi: (a) %30, (b) %20, (c) %10.

Sonuçlar incelendiği zaman çelik tel çekme işlemindeki redüksiyon oranı artışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler göre çelik tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok %30 redüksiyon oranında ortalama 105,50

°C ölçülürken %10 redüksiyon oranında ise ortalama 46,44 °C sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

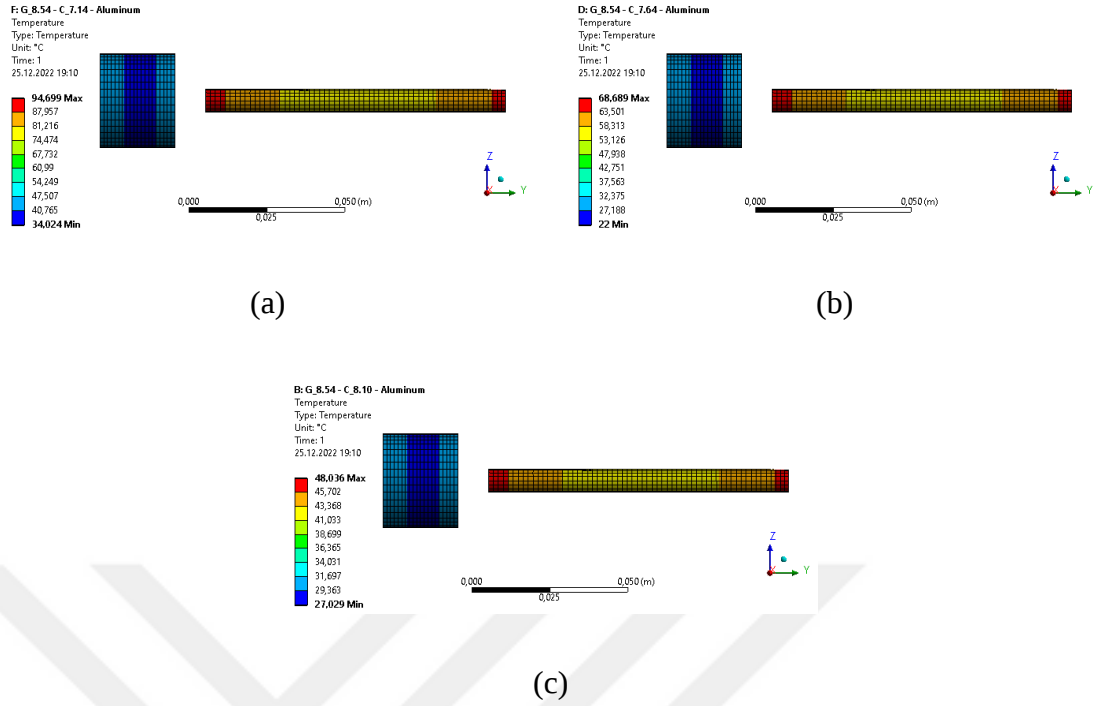
Bakır tel için yapılan analizlerde %30, %20 ve %10 redüksiyon oranlarında olmak üzere tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı redüksiyon oranları için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Farklı redüksiyon oranlarında bakır malzemesi için tel çekme işlemi sonunda sıcaklığın değişimi: (a) %30, (b) %20, (c) %10.

Sonuçlar incelendiği zaman bakır tel çekme işlemindeki redüksiyon oranı artışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler göre bakır tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok %30 redüksiyon oranında ortalama 78,02 °C ölçülürken %10 redüksiyon oranında ise ortalama 39,51 °C sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

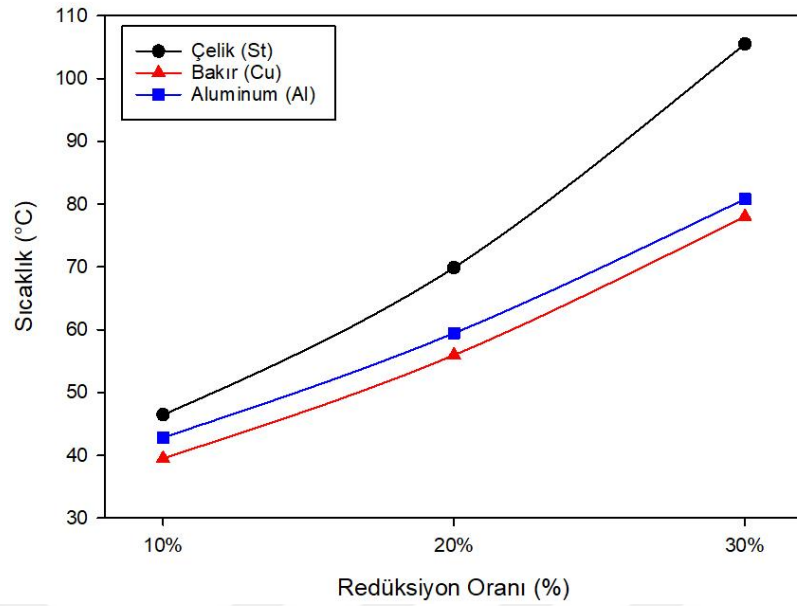
Alüminyum tel için yapılan analizlerde %30, %20 ve %10 redüksiyon oranlarında olmak üzere tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı redüksiyon oranları için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3.28. Farklı redüksiyon oranlarında alüminyum malzemesi için tel çekme işlemi sonunda sıcaklığın değişimi: (a) %30, (b) %20, (c) %10.

Sonuçlar incelendiği zaman alüminyum tel çekme işlemindeki redüksiyon oranı artışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler göre alüminyum tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok ortalama %30 redüksiyon oranında 80,79 °C ölçülürken %10 redüksiyon oranında ise ortalama 42,83 °C sıcaklık değeri ile en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

Çelik, bakır, alüminyum teller için tel üzerinde oluşan sıcaklığın farklı redüksiyon oranları için incelenmesi ise Şekil 3.29’da gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde giriş çapı üç durum içinde 8,54 mm olan tel, %30 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,14 mm’ye, %20 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 7,64 mm’ye ve %10 redüksiyon oranı uygulanarak tel çapı 8,10 mm’ye indirgenmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s alınmış olup, bu parametre tüm redüksiyon oranları için sabit tutulmuştur.



Şekil 3.29. Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı redüksiyon oranlarındaki redüksiyon oranı-sıcaklık grafiği.

Şekil 3.29’da verilen grafik incelendiği zaman çelik, bakır alüminyum telleri için redüksiyon oranı artışıyla tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmektedir. Tel çekme işlemi sırasında malzemeler arasında ise en çok sıcaklık %30 redüksiyon oranında 105,50 °C çelik telinde oluşurken, en az sıcaklık ise %10 redüksiyon oranında 39,51 °C ile bakır telinde oluşmaktadır. Alüminyum telde ise tüm redüksiyon oranları için diğer iki malzemeye göre ortalama bir sıcaklığın oluştuğu gözlemlenmektedir. Tel çekme redüksiyon oranının %10’dan %30’a artırılması ile çelik telde %227, bakır telde %197 ve alüminyum telde %189 oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmüştür. Ayrıca her bir redüksiyon oranı kendi içerisinde incelendiğinde, termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha çabuk soğuma eğilimi göstereceğinden, bu malzemenin sıcaklığının daha az olduğu görülmüştür. Farklı redüksiyon oranlarında tellerin üzerinde oluşan sıcaklık için tel üzerindeki enerji artışıyla tel sıcaklığının doğru orantılı olduğu yorumu yapılabilir.

3.2.3.3. Farklı Çaplardaki Tel Çekme İşlemlerinin Analiz Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum için gerçekleştirilen üç farklı giriş çapındaki tel çekme analizlerinin gerilme, enerji ve sıcaklık sonuçları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

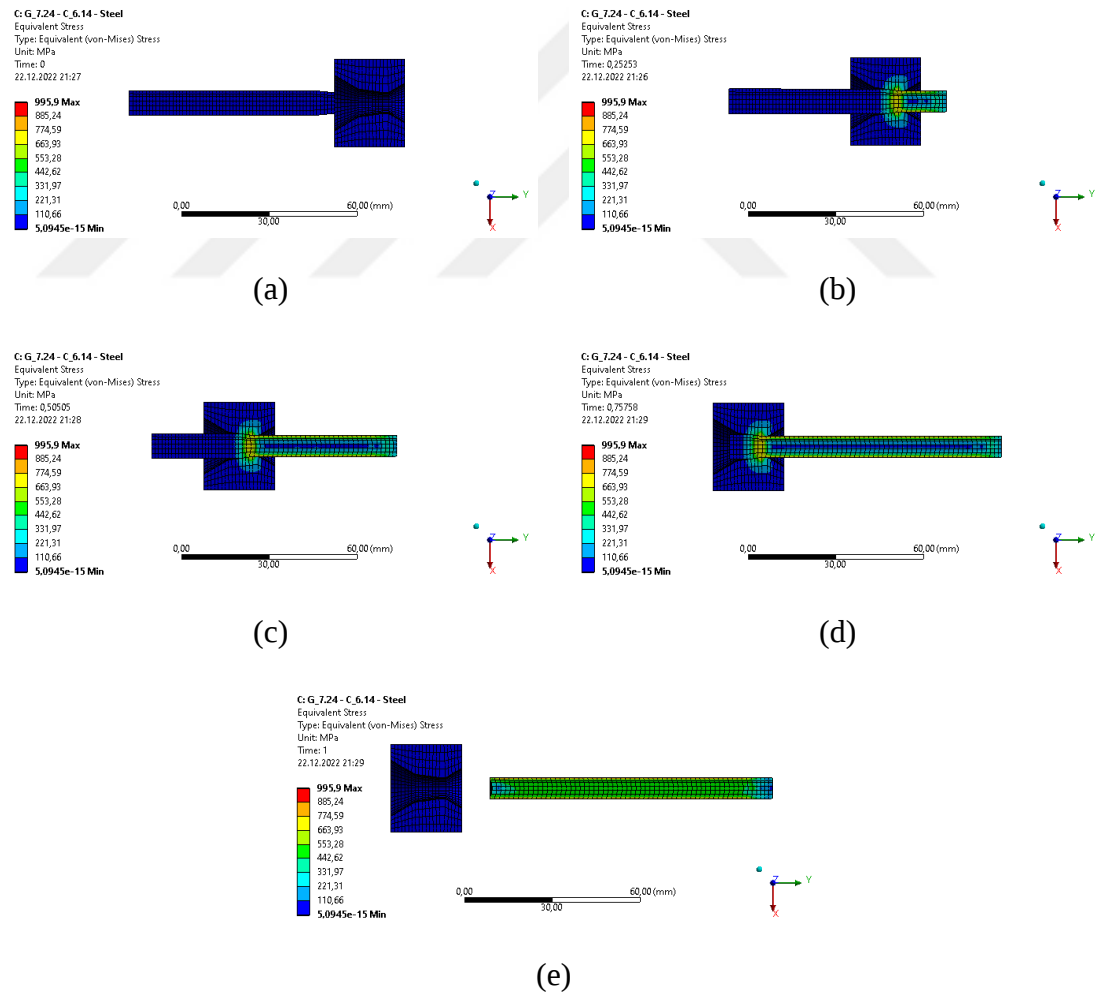
Çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri için yapılan tel çekme analizlerinde birinci durum için telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, ikinci durum için

telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve üçüncü durum için telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olarak seçilmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s ve redüksiyon oranı yaklaşık %28 alınmış olup, bu parametreler bütün çaplar için sabit tutulmuştur.

Farklı Çaplarda Meydana Gelen Gerilme Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı çaplarda sayısal analizler yapılarak gerilmeler elde edilmiş ve tel üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir.

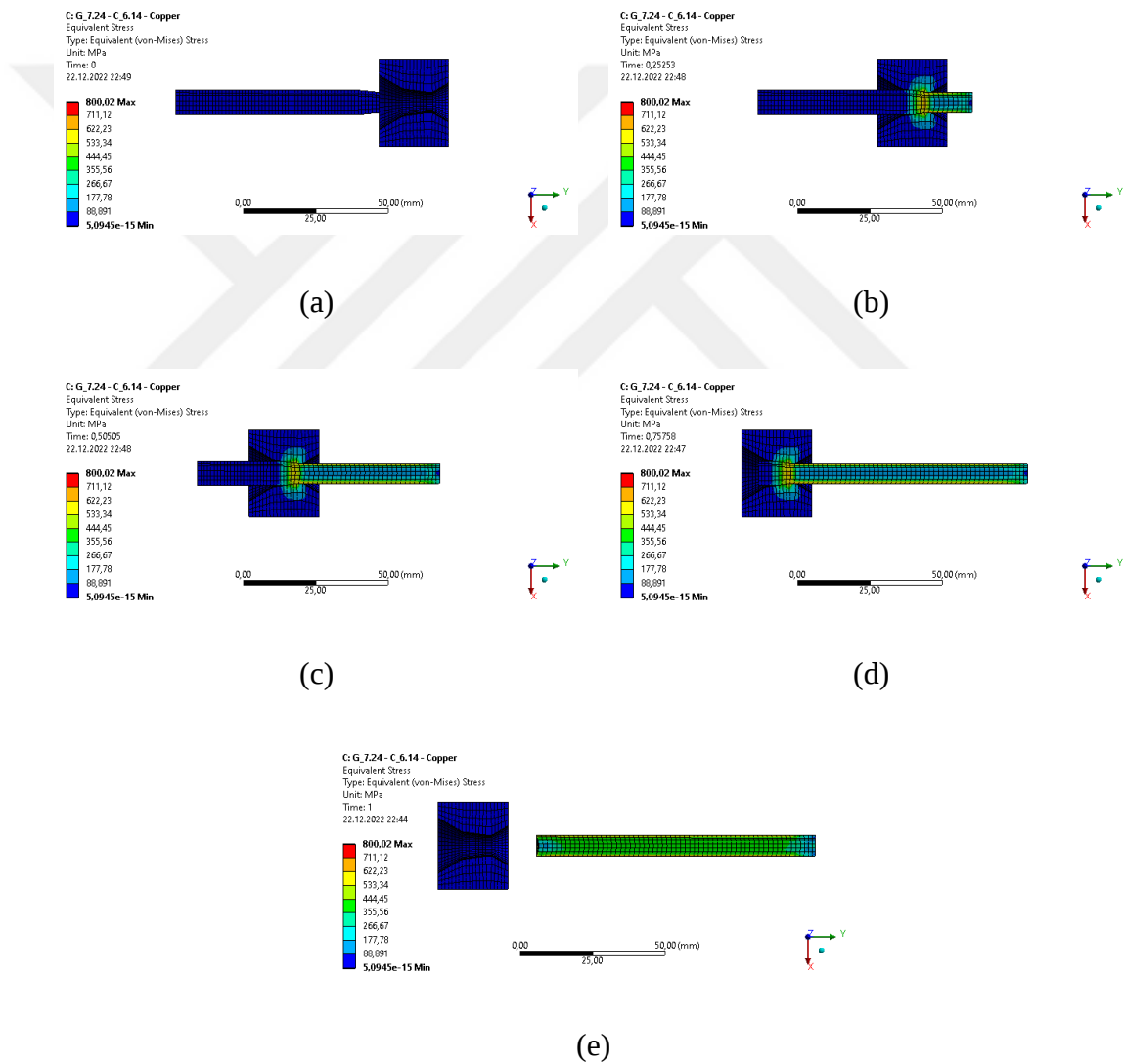
Çelik tel için yapılan analizde telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm olacak şekilde tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30 Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için çelik malzemenin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda çelik tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 122,31 MPa ölçülmüştür. Tel giriş çapı 7,24 mm, çıkış çapı 6,14 mm için çelik tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 502,40 MPa'dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

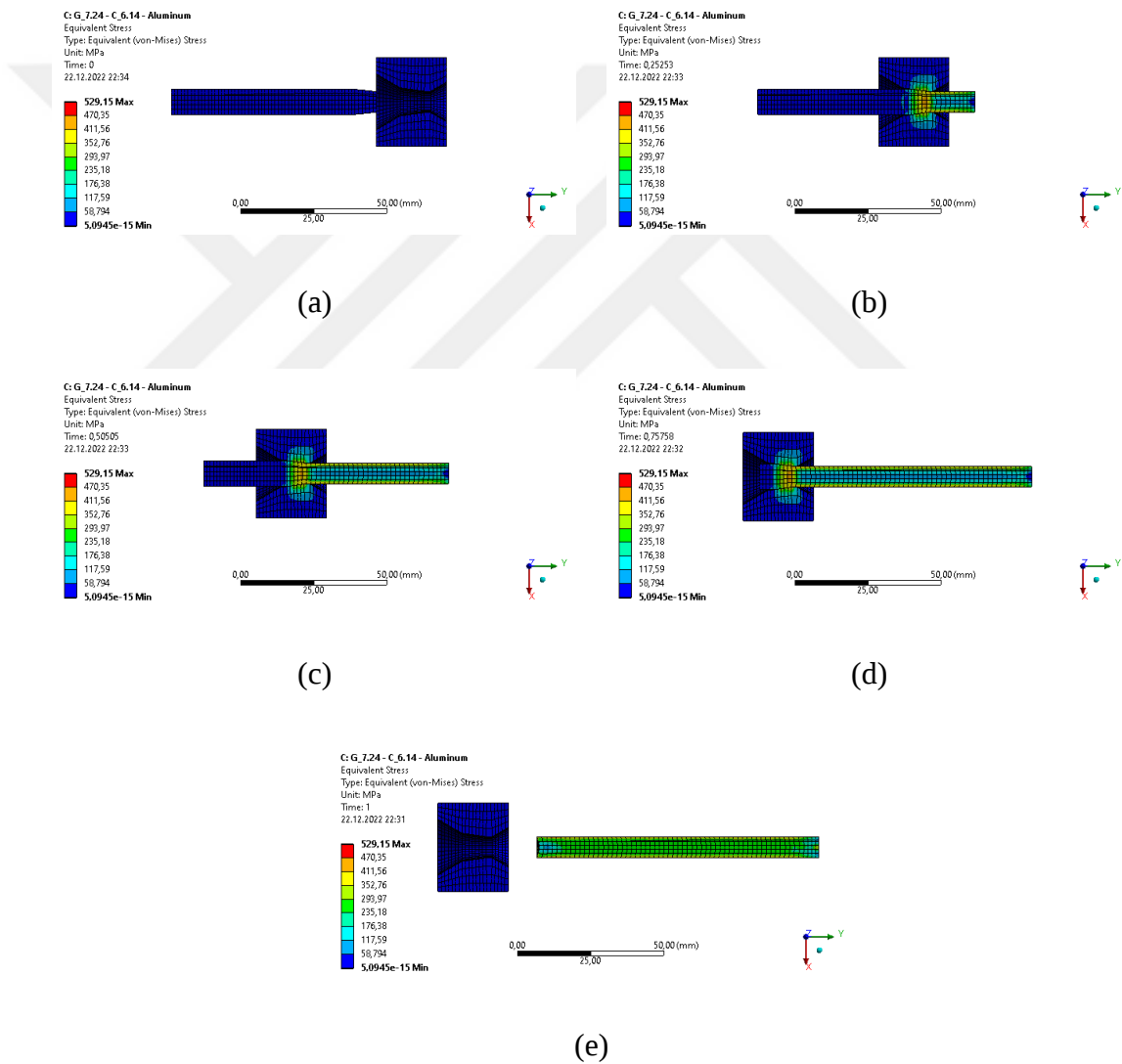
Bakır tel için yapılan analizde telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm olacak şekilde tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.31 Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için bakır malzemenin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda bakır tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 99,27 MPa ölçülmüştür. Tel giriş çapı 7,24 mm, çıkış çapı 6,14 mm için bakır tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 401,09 MPa'dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

Alüminyum tel için yapılan analizde telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm olacak şekilde tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) gerilme sonuç görselleri Şekil 3.32'de verilmiştir.

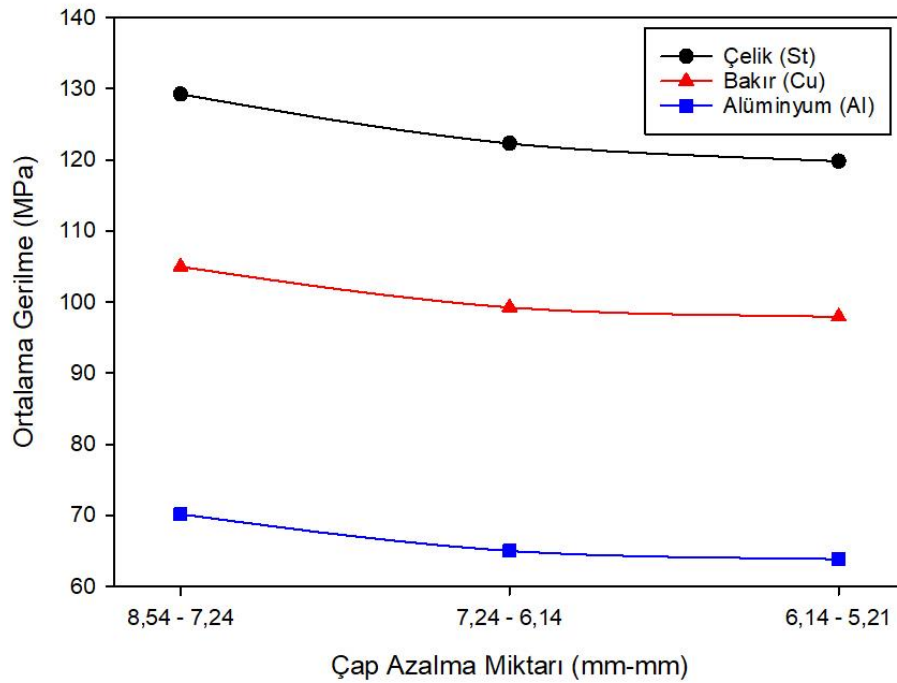


Şekil 3.32 Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için alüminyum malzemenin tel çekme işlemi süresince gerilme sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda alüminyum tel üzerinde oluşan ortalama gerilme 65,03 MPa ölçülmüştür. Tel giriş çapı 7,24 mm, çıkış çapı 6,14 mm için alüminyum tel üzerinde oluşan maksimum gerilme ise 253,95 MPa'dır. Maksimum gerilmeler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmıştır.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemelerine yapılan analizlerde, plastik şekil değişiminin gerçekleşmesi için kalıbın tel yüzeyine uyguladığı basınç, telin yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin maksimum olmasına sebep olmuştur.

Şekil 3.33'te ise çelik, bakır ve alüminyum tel analizlerinin aynı yöntem ile farklı çaplarda oluşan gerilmelerin sonuç grafiği verilmiştir. Yapılan analizlerde birinci durum için telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, ikinci durum için telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve üçüncü durum için telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olarak seçilmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s ve redüksiyon oranı yaklaşık %28 alınmış olup, bu parametreler bütün çaplar için sabit tutulmuştur.



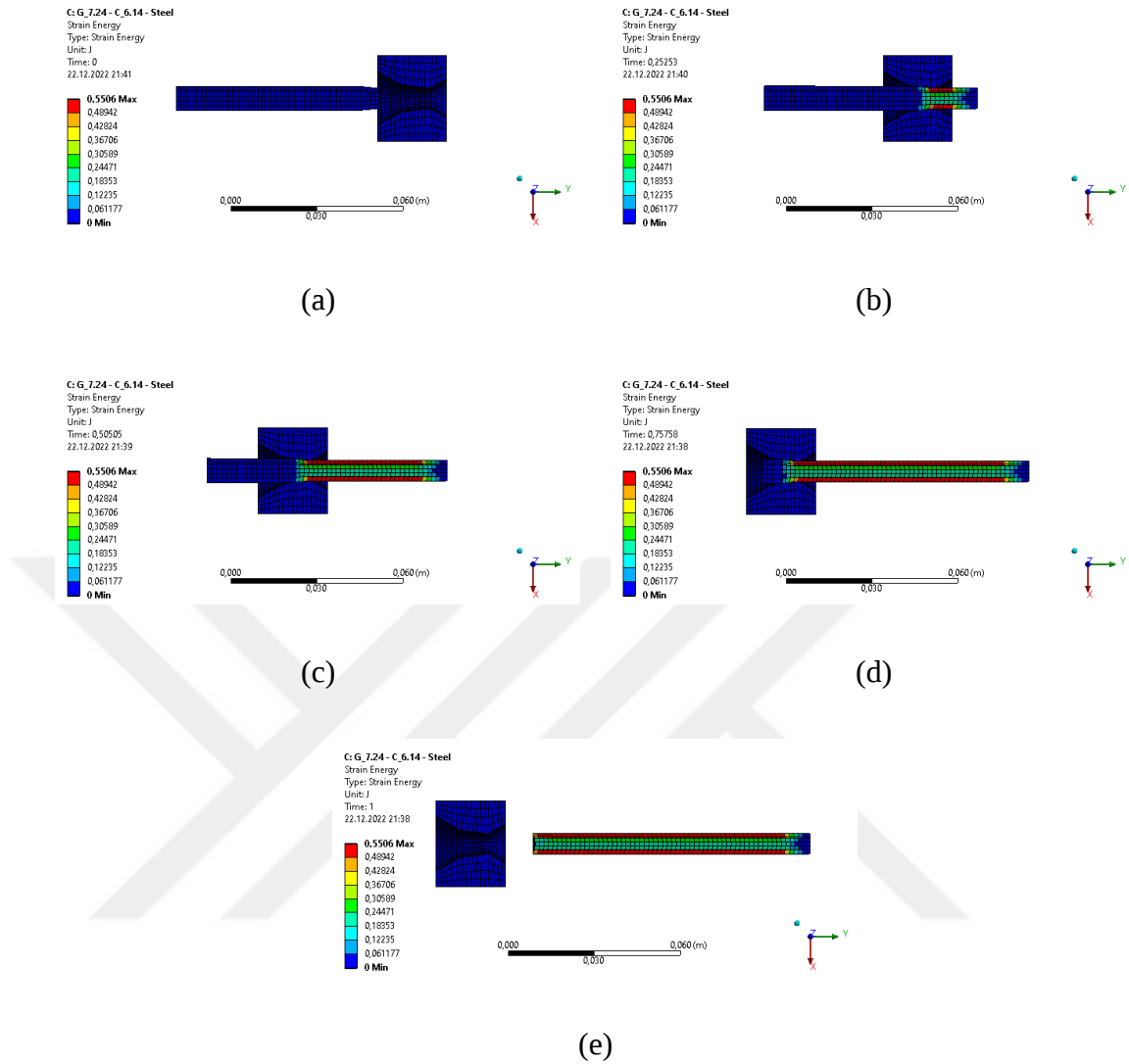
Şekil 3.33 Farklı çaplardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için çap azalma miktarı-gerilme grafiği.

Çelik, bakır ve alüminyum tellere yapılan analizlerde telin haddeye giriş ve çıkış çapları sırasıyla 8,54-7,24, 7,24-6,14 ve 6,14-5,21 mm olduğu durumda meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde her bir çap değeri kendi içerisinde incelendiğinde, elastisite modülü yüksek olan malzemenin gerilmesinin diğer iki malzemeye göre daha yüksek gerilmeye sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde en çok gerilmenin 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında çelik telinde meydana geldiği görülmüş ve gerilme değeri 129,24 MPa ölçülmüştür. En düşük gerilme ise 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesi sırasında alüminyum telinde meydana gelmiş ve 63,88 MPa olarak ölçülmüştür. Bakır telde ise tüm çap indirgemeleri için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çap indirgemelerine göre grafik incelendiğinde tel çapının azalması ile tel üzerinde meydana gelen gerilme değerinin azaldığı saptanmıştır. Tel çekme işleminde tel giriş çapının 8,54 mm'den 7,24mm'ye indirgenirken 1,30 mm küçültme yapılması yerine 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesinde 0,93 mm küçültme yapılması durumunda çelik telde %93, bakır telde %93 ve alüminyum telde %91 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin daha az olduğu görülmüştür.

Farklı Çaplarda Açığa Çıkan Enerji Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı çaplarda sayısal analizler yapılarak açığa çıkan enerjiler elde edilmiş ve tel üzerinde açığa çıkan enerjiler incelenmiştir.

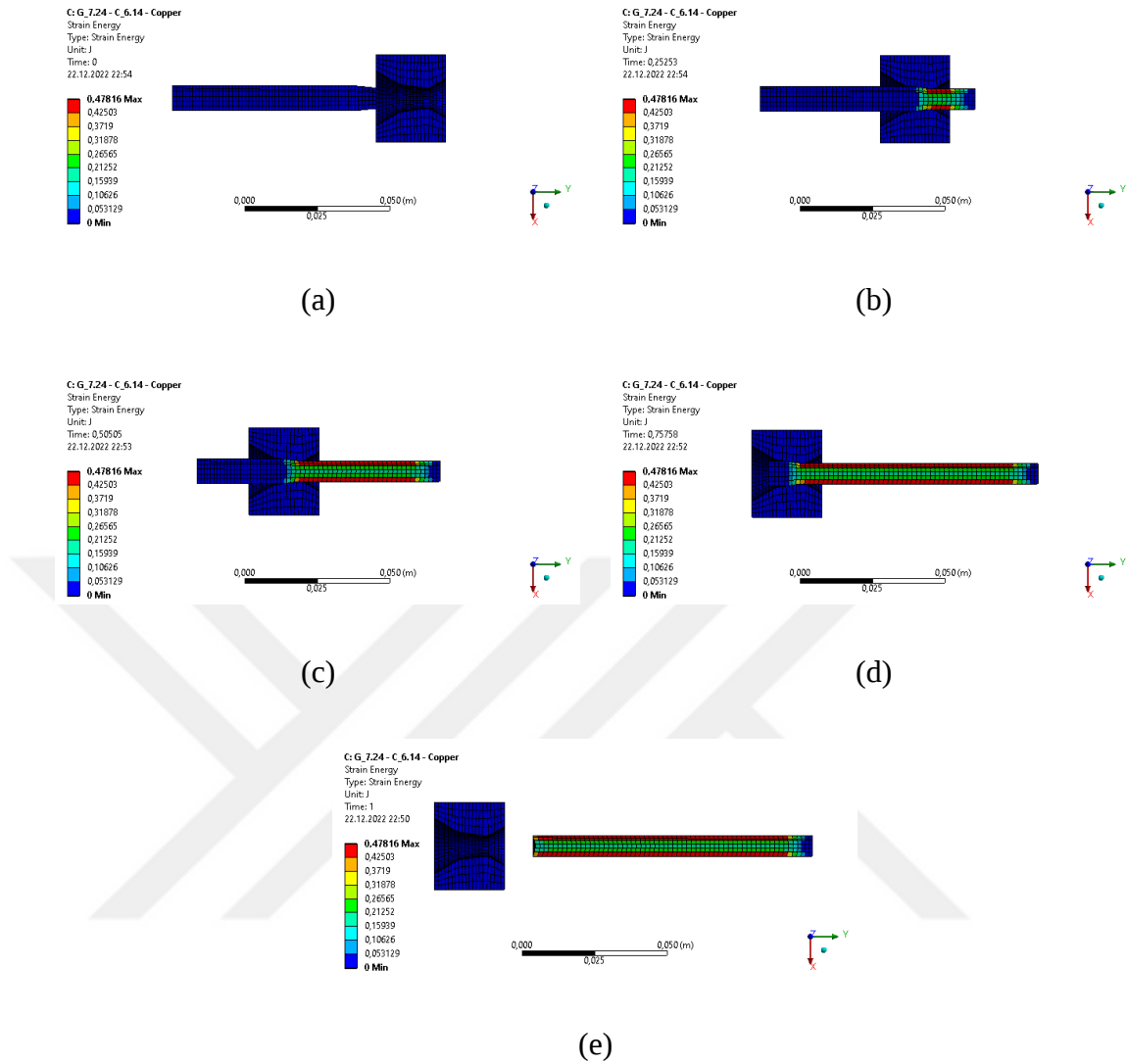
Çelik tel için yapılan analizde telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm olacak şekilde tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34 Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için çelik malzemesinde tel çekme işlemi sonrasında açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda çelik tel üzerinde oluşan toplam enerji 818,00 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

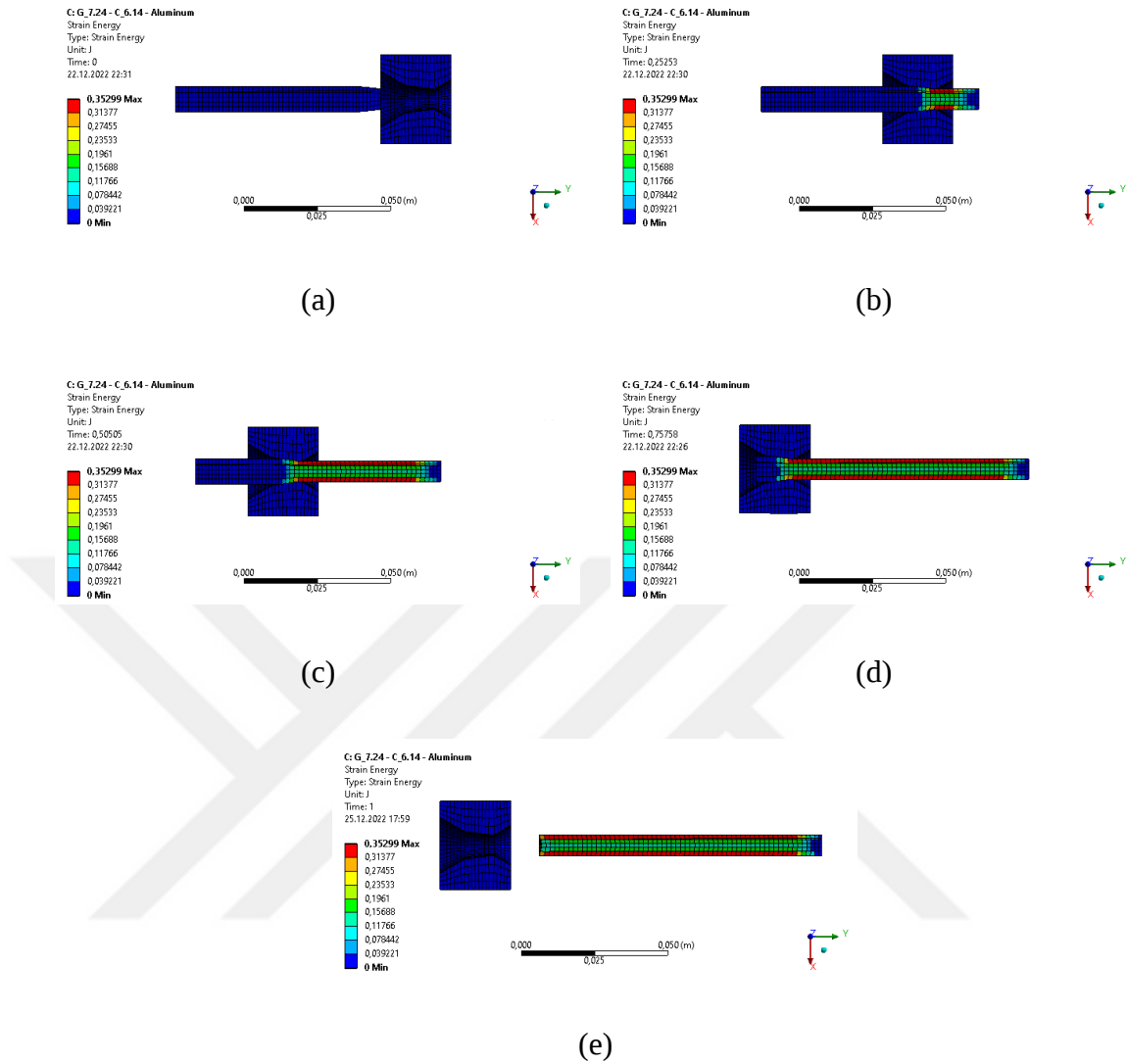
Bakır tel için yapılan analizde telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm olacak şekilde tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35 Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirgenmesi için bakır malzemesinde tel çekme işlemi sonrasında açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda bakır tel üzerinde oluşan toplam enerji 721,89 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

Alüminyum tel için yapılan analizde telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm olacak şekilde tel çekme işleminin başlama anından son anına kadar olan beş farklı zamandaki (0., 0,25., 0,5., 0,75. ve 1. saniyelerde) açığa çıkan enerji sonuç görselleri Şekil 3.36'da verilmiştir.

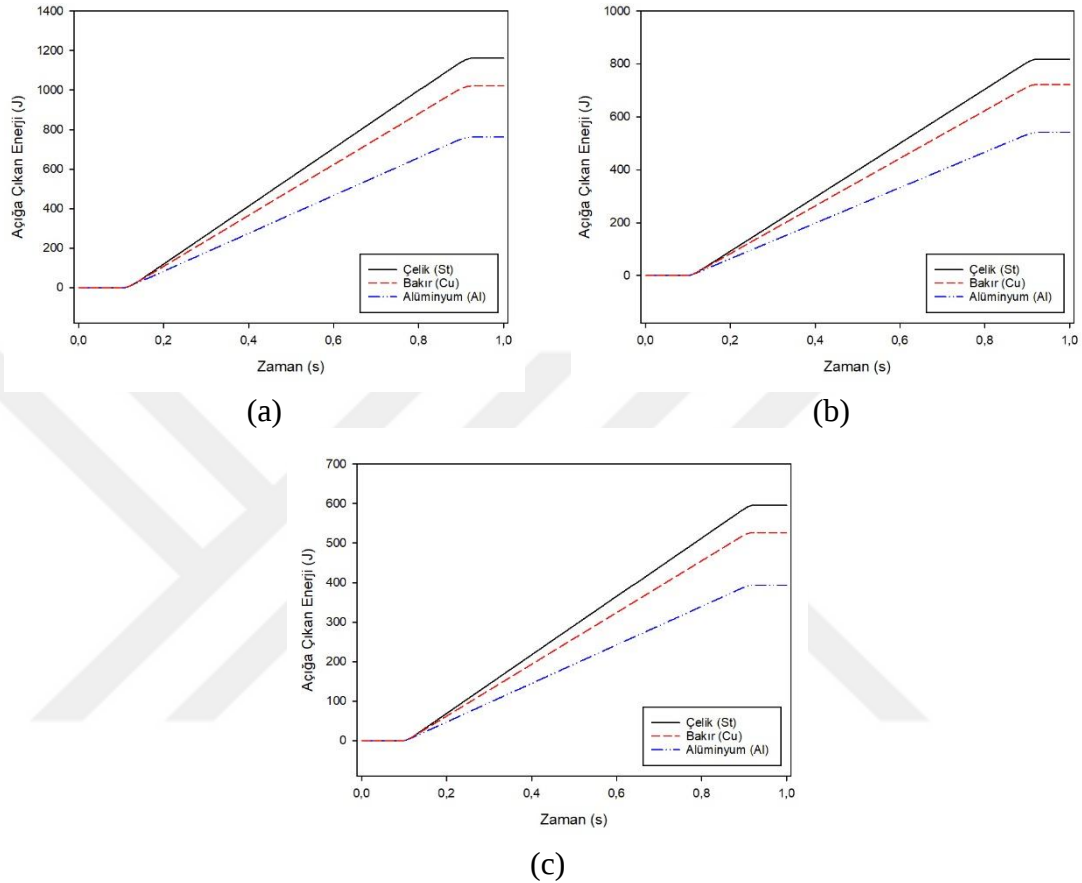


Şekil 3.36 Tel giriş çapı 7,24 mm'den çıkış çapı 6,14 mm'ye indirilmesi için alüminyum malzemesinde tel çekme işlemi sonrasında açığa çıkan enerji sonuç dağılımı: (a) 0. s, (b) 0,25. s, (c) 0,5. s, (d) 0,75. s, (e) 1. s.

Bu analiz sonucunda alüminyum tel üzerinde oluşan toplam enerji 540,77 J ölçülmüştür. Açığa çıkan enerjiler daha çok telin dış yüzeyinde saptanmış ve toplam enerji birim alandaki enerjilerin toplamından elde edilmiştir.

Çelik, bakır ve alüminyum malzemelerine yapılan analizlerde, plastik şekil değişimi gerçekleşirken tel yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri ve sürtünme sonucu yine aynı bölgelerde açığa çıkan birim enerjinin fazla olduğu görülmüştür. Tel üzerindeki birim enerjilerin toplamından ise tel üzerinde oluşan toplam enerji hesaplanmaktadır. Açığa çıkan toplam enerji ise tel yüzeyinde ısı oluşmasına sebep olacaktır.

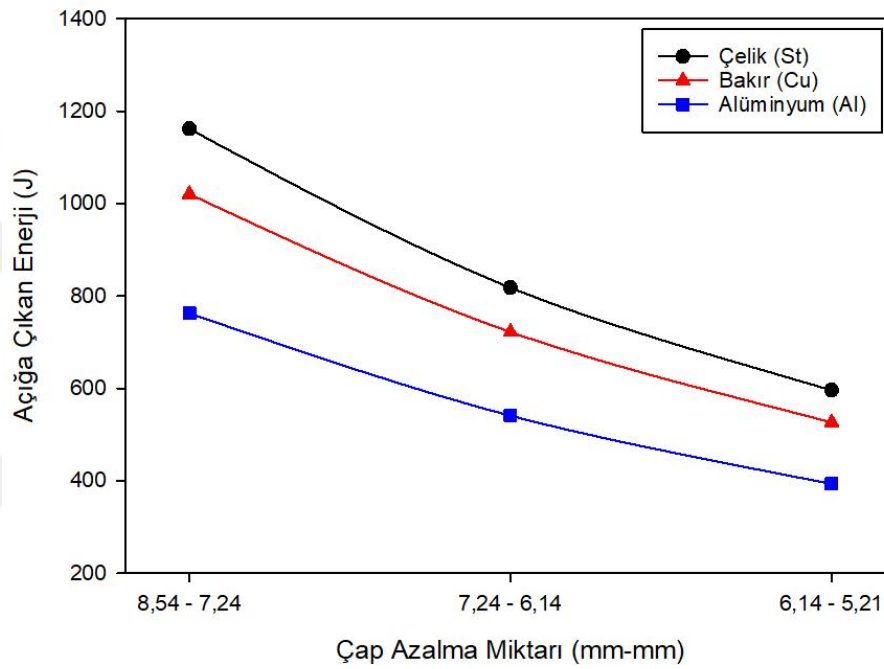
Yapılan analiz çalışmasında açığa çıkan enerji tel çekme işlemi süresince artmaktadır. Tel çekme işlemi süresince açığa çıkan birim enerjilerin toplamından elde edilen grafikler Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



Şekil 3.37 Farklı çaplardaki tel çekme işleminde çelik, bakır ve alüminyum için enerji-zaman grafikleri: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.

Grafikler incelendiği zaman tel çekme işleminin devam etmesi ile tel üzerinde meydana gelen enerjinin arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca tel üzerinde açığa çıkan enerjinin haddeye giren tel çapı artması ile daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, çelik için telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm’de açığa çıkan enerji 1161,60 J iken giren tel çapı azalışı ile telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm’de 595,60 J olarak ölçülmüştür. Bu durumun bakır ve alüminyum telleri içinde aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bakır tel için telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm’ye ve ile telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm’ye indirgeme işlemlerinde açığa çıkan enerji sırasıyla 1020,50 J – 526,28 J’dür. Alüminyum tel için ise telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm’ye ve ile telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm’ye indirgeme işlemlerinde açığa çıkan enerji sırasıyla 762,54 J – 393,12 J’dür.

Çelik, bakır, alüminyum teller için açığa çıkan enerjinin farklı çapları indirgeme işleminin incelenmesi ise Şekil 3.38’de gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde birinci durum için telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, ikinci durum için telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve üçüncü durum için telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olarak seçilmiştir. Yapılan bu analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s ve redüksiyon oranı yaklaşık %28 alınmış olup, bu parametreler bütün çaplar için sabit tutulmuştur.



Şekil 3.38 Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı çaplardaki çap azalma miktarı-enerji grafiği.

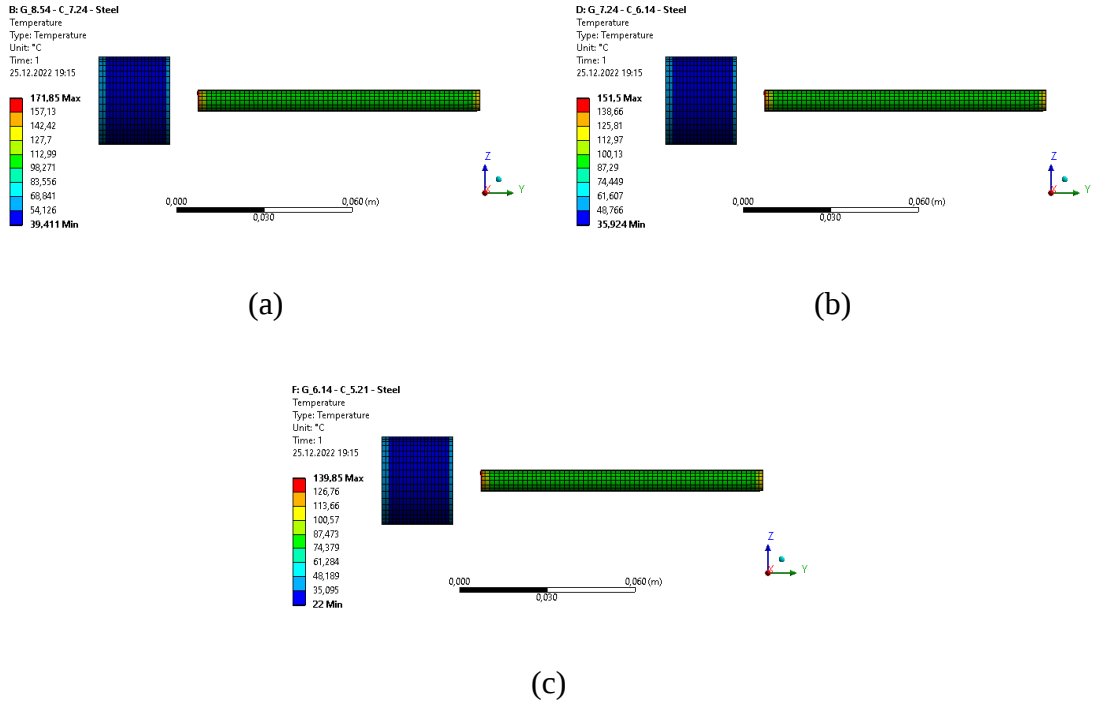
Şekil 3.38’de verilen grafik incelendiği zaman çelik, bakır alüminyum telleri için çap indirgemesinin azalışıyla tel üzerinde oluşan enerjinin azaldığı görülmektedir. Tel çekme işlemi sırasında malzemeler arasında en çok enerji telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm’ye indirgenmesinde 1161,60 J ile çelik telinde oluşurken, en az enerji ise telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm’ye indirgenmesinde 393,12 J ile alüminyum telinde oluşmaktadır. Bakır telde ise tüm çap indirgemeleri için diğer iki malzemeye göre ortalama bir enerjinin açığa çıktığı gözlemlenmektedir. Tel çekme işleminde tel giriş çapının 8,54 mm’den 7,24mm’ye indirgenirken 1,30 mm küçültme yapılması yerine 6,14 mm’den 5,21 mm’ye indirgenmesinde 0,93 mm küçültme yapılması durumunda çelik telde %51, bakır telde

%52 ve alüminyum telde %52 oranında tel üzerinde açığa çıkan enerjinin daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca her bir çap indirgemesi kendi içerisinde incelendiğinde, gerilme değeri yüksek olan malzemede açığa çıkan enerjinin diğer malzemelere göre daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum farklı çap indirgeme işlemlerinde tel yüzeyinde oluşan gerilmenin telin yüzeyinde açığa çıkan enerjiyi doğru oranda etkilediği şeklinde yorumlanabilir.

Farklı Çaplarda Oluşan Sıcaklık Sonuçları

Bu bölümde çelik, bakır, alüminyum tel malzemelerine farklı çaplarda sayısal analizler yapılarak sıcaklıklar elde edilmiş ve tel üzerinde oluşan sıcaklıklar incelenmiştir.

Çelik tel için yapılan analizlerde telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olacak şekilde üç durum için tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı çap indirgeme işlemleri için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.39’da verilmiştir.

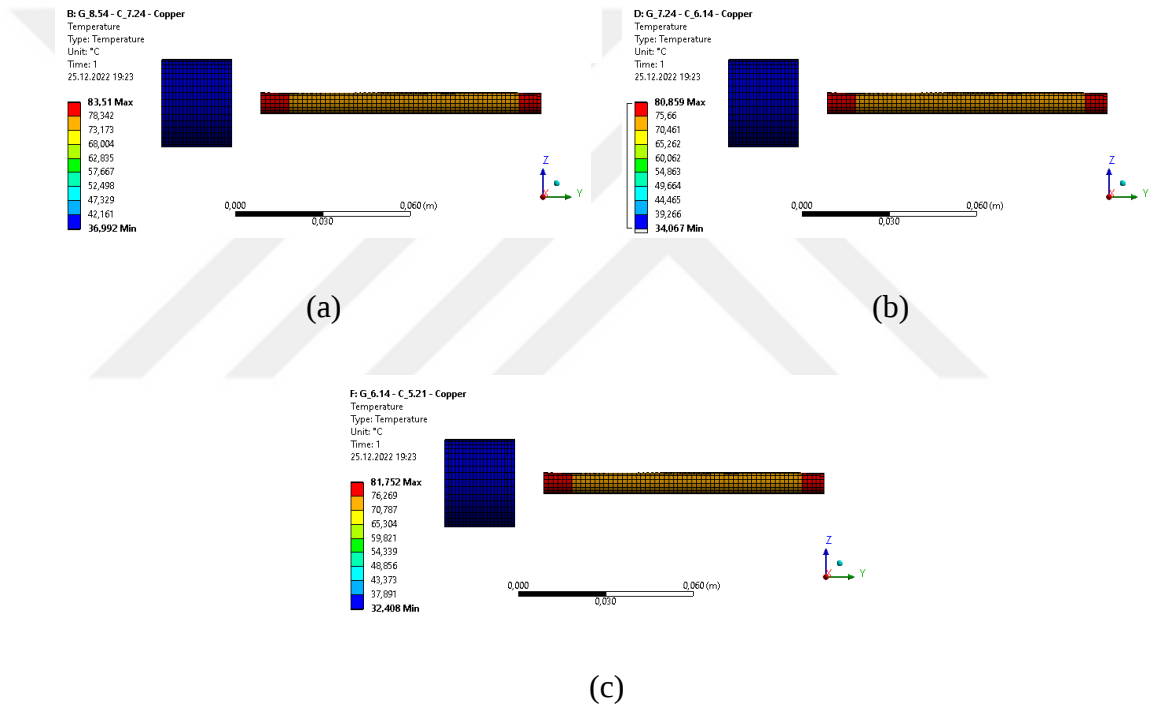


Şekil 3.39 Farklı çaplardaki çelik için tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.

Sonuçlar incelendiği zaman çelik tel çekme işlemindeki giriş teli çapı azalışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda azaldığı gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler

göre çelik tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok telin çapı 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında ortalama 96,42 °C olarak ölçülürken, telin çapı 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesi sırasında ise ortalama 87,82 °C olarak en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

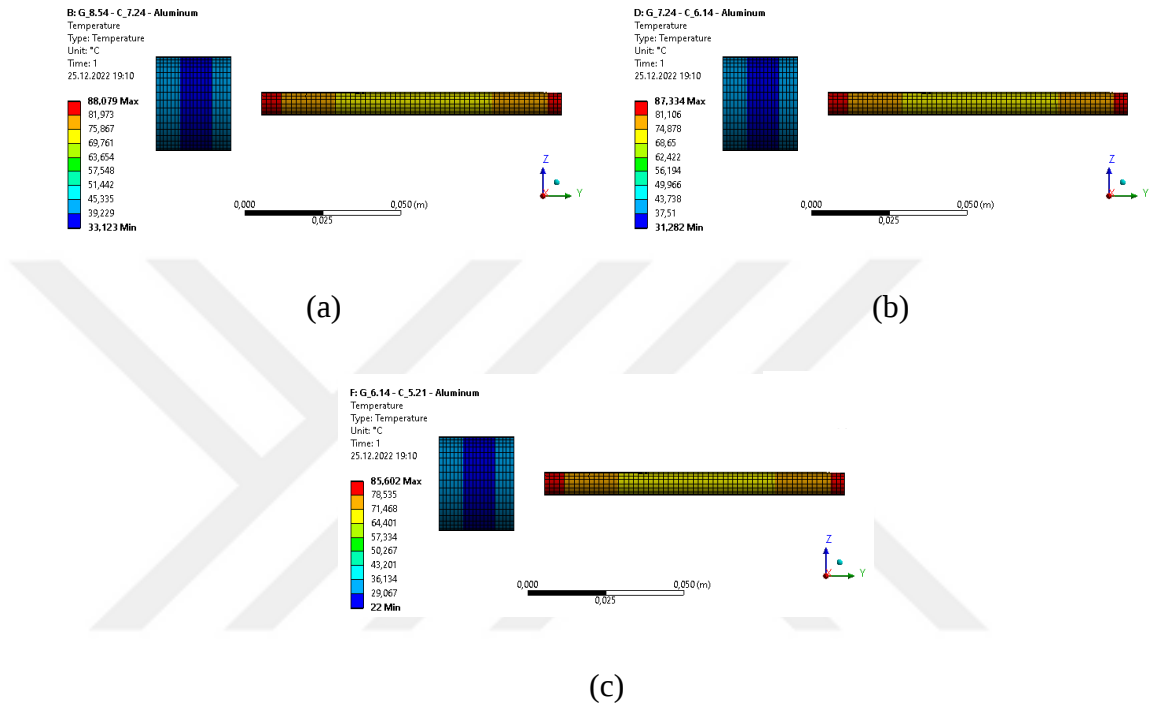
Bakır tel için yapılan analizlerde telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olacak şekilde üç durum için tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı çap indirgeme işlemleri için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.40'ta verilmiştir.



Şekil 3.40 Farklı çaplardaki bakır için tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.

Sonuçlar incelendiği zaman bakır tel çekme işlemindeki giriş teli çapı azalışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda azaldığı gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler göre bakır tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok telin çapı 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında ortalama 71,96 °C olarak ölçülürken, telin çapı 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesi sırasında ise ortalama 64,55 °C olarak en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

Alüminyum tel için yapılan analizlerde telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olacak şekilde üç durum için tel çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı çap indirgeme işlemleri için oluşan sıcaklık dağılım sonuçları Şekil 3.41’de verilmiştir.

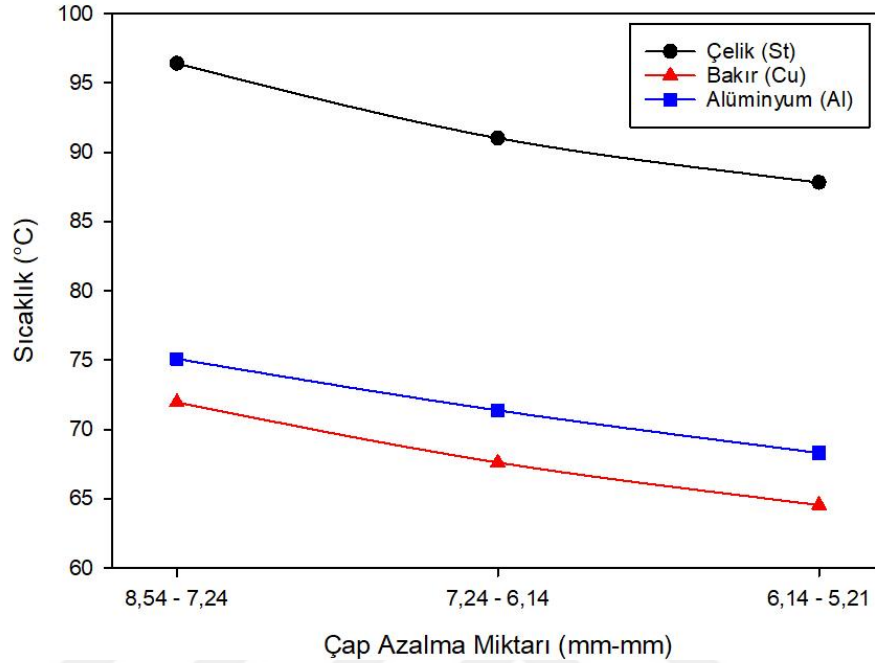


Şekil 3.41 Farklı çaplardaki alüminyum için tel çekme işleminde sıcaklığın değişimi: (a) 8,54mm-7,24mm, (b) 7,24mm-6,14mm, (c) 6,14mm-5,21mm.

Sonuçlar incelendiği zaman alüminyum tel çekme işlemindeki giriş teli çapı azalışı ile tel yüzeyinde oluşan sıcaklığın doğru oranda azaldığı gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler göre alüminyum tel yüzeyinde oluşan sıcaklık en çok telin çapı 8,54 mm’den 7,24 mm’ye indirgenmesi sırasında ortalama 75,10 °C olarak ölçülürken, telin çapı 6,14 mm’den 5,21 mm’ye indirgenmesi sırasında ise ortalama 68,31 °C olarak en düşük sıcaklık ölçülmüştür.

Çelik, bakır, alüminyum teller için açığa çıkan enerjinin farklı çapları indirgeme işleminin incelenmesi ise Şekil 3.42’de gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde birinci durum için telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, ikinci durum için telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve üçüncü durum için telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olarak seçilmiştir. Yapılan bu

analizlerde tel çekme hızı 0,1 m/s ve redüksiyon oranı yaklaşık %28 alınmış olup, bu parametreler bütün çaplar için sabit tutulmuştur.



Şekil 3.42 Çelik, bakır, alüminyum tel için farklı çaplardaki çap azalma miktarı-sıcaklık grafiği.

Şekil 3.42’de verilen grafik incelendiği zaman çelik, bakır alüminyum telleri için çap indirgemesinin azalışıyla tel üzerinde oluşan sıcaklığın azaldığı görülmektedir. Tel çekme işlemi sırasında malzemeler arasında ise en çok sıcaklık telin çapı 8,54 mm’den 7,24 mm’ye indirgenmesi sırasında 96,42 °C çelik telinde oluşurken, en az sıcaklık ise telin çapı 6,14 mm’den 5,21 mm’ye indirgenmesi sırasında 64,55 °C ile bakır telinde oluşmaktadır. Alüminyum telde ise tüm çap indirgeme işlemlerinde diğer iki malzemeye göre ortalama bir sıcaklığın oluştuğu gözlemlenmektedir. Tel çekme işleminde tel giriş çapının 8,54 mm’den 7,24mm’ye indirgenirken 1,30 mm küçültme yapılması yerine 6,14 mm’den 5,21 mm’ye indirgenmesinde 0,93 mm küçültme yapılması durumunda çelik telde %91, bakır telde %90 ve alüminyum telde %91 oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca her bir çap indirgeme işlemi kendi içerisinde incelendiğinde, termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha çabuk soğuma eğilimi göstereceğinden, bu malzemenin sıcaklığının daha az olduğu görülmüştür. Farklı çap indirgemelerinde tellerin üzerinde oluşan sıcaklık için tel üzerindeki enerji artışıyla tel sıcaklığının doğru orantılı olduğu yorumu da yapılabilir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada tel çekme işleminin deneysel ve sayısal yöntemler ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Tel çekme işleminde tungsten karbür kobalt (WC-Co) tel çekme haddesi kullanılırken tel malzemesi olarak çelik, bakır ve alüminyum telleri tel çekme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışma sonucunda 8,54 mm çapa sahip bir çelik filmaşinin yedi bloklu bir tel çekme makinasında 2,70 mm çapa indirgenmesi işleminde birinci blok hadde çıkışında oluşan tel sıcaklığı termal kamera aracılığı ile ölçülmüştür. Termal kamera ile alınan tel sıcaklık değerlerinin ortalaması 96,1 °C olarak hesaplanmıştır. Birinci bloktan sonraki diğer blokların haddelerinin çıkışındaki tel sıcaklıklarının sırasıyla çap azalmasına bağlı yüzey alanının azalmasından sıcaklık düşüşü olacağı literatür ve yapılan sayısal çalışmalardan ön görülmüştür.

Tel çekme işleminin bilgisayar ortamında ANSYS programı aracılığı ile Transient Structural ve Transient Thermal modülleri kullanılarak sayısal modeli oluşturulmuştur. Başlangıçta mesh bağımsızlık çalışması yapılarak deneysel çalışmalar ile sayısal çözümler karşılaştırılmış ve deneysel çalışmalara en yakın sonucu veren mesh modeli çözümler için kullanılmıştır. Yapılan çalışmada deneysel yöntem ile elde edilen tel sıcaklık değerinin ve sayısal çözümün sonucunda alınan sıcaklık değeri ile karşılaştırılması sonucu sayısal modelin gerçek verilere göre hata payı %0,33 olarak hesaplanmıştır.

Hazırlanan sayısal model aracılığı ile 0,05, 0,1, 0,2, ve 0,3 hızlarında çelik, bakır ve alüminyum telleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı hızlar için hazırlanan sayısal modelde 8,54mm çapa sahip filmaşin telinin 7,24mm'ye indirgenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde tel üzerinde oluşan gerilme, açığa çıkan

enerji ve sıcaklık değerleri birbirleri arasında kıyaslanmıştır. Sayısal çözüm sonuçları şu şekilde açıklanabilir:

- i. Farklı hızlar için yapılan analizlerde elastisite modülü yüksek olan çelik malzemesinin bakır ve alüminyum malzemelerinin gerilme değerlerine göre yüksek gerilmeye sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde en çok gerilme 0,3 m/s tel çekme hızında çelik telinde olduğu görülürken bu değer 220,92 MPa ölçülmüştür. En düşük gerilme ise 0,05 m/s tel çekme hızında alüminyum telinde oluşmuş olup bu değer 45,57 MPa ölçülmüştür. Bakırda ise tüm hızlar için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme hızının 0,05 m/s'den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %262, bakır telde %246 ve alüminyum telde %255 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin arttığı görülmüştür. Böylece tel çekme hızının artması ile telde oluşacak gerilmenin de arttığı gözlemlenmiştir.
- ii. Farklı hızlar için yapılan analizlerde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için hız artışıyla tel üzerinde oluşan enerjinin arttığı gözlemlenmiştir. Analizlerde en çok enerjinin 0,3 m/s hızında 2548,00 J ile çelik telinde olduğu görülürken en az enerjinin ise 0,05 m/s hızında 253,38 J ile alüminyum telinde olduğu görülmüştür. Bakırda ise tüm hızlar için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde enerjinin açığa çıktığı gözlemlenmiştir. Tel çekme hızının 0,05 m/s'den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %659, bakır telde %662 ve alüminyum telde %659 oranında tel üzerinde açığa çıkan enerjinin arttığı görülmüştür. Böylece tel çekme hızının artması ile tel yüzeyinde açığa çıkan enerjinin de arttığı gözlemlenmiştir.
- iii. Farklı hızlar için yapılan analizlerde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için hız artışıyla tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmüştür. Tel çekme işlemi sonunda haddene çıkış yapan telinin sıcaklıkları hesaplanmış ve bu sıcaklık değerlerine göre en çok sıcaklık 0,3 m/s hızında 100,68 °C ile çelik telinde oluşurken, en az sıcaklık ise 0,05m/s hızında 68,60 °C ile bakır telinde olduğu görülmüştür. Alüminyumda ise tüm hızlar için çelik ve bakır tele göre ortalama bir sıcaklığın olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme hızının 0,05 m/s'den 0,3 m/s hıza artırılması ile çelik telde %113, bakır telde %109 ve alüminyum telde %109

oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmüştür. Ayrıca termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha çabuk soğuma eğilimi göstereceğinden, bakırın sıcaklığının diğer malzemelerden daha düşük olduğu da gözlemlenmiştir.

Sayısal model kullanılarak yapılan bir diğer karşılaştırma ise tel çekme işleminin bir parametresi olan redüksiyon oranlarıdır. Analizler %10, %20 ve %30 redüksiyon oranları için gerçekleştirilmiştir. Farklı redüksiyon oranları için hazırlanan sayısal modelde 8,54mm çapa sahip filmaşın için ayarlanan redüksiyon oranına göre 0,1 m/s hızda indirgenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde tel üzerinde oluşan gerilme, açığa çıkan enerji ve sıcaklık değerleri birbirleri arasında kıyaslanmıştır. Sayısal çözüm sonuçları şu şekilde açıklanabilir:

- i. Farklı redüksiyon oranları için yapılan analizlerde elastisite modülü yüksek olan çelik malzemesinin gerilmesinin bakır ve alüminyum malzemelerine göre daha yüksek gerilme değerine sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde en çok gerilme %30 redüksiyon oranında çelik telinde olduğu görülürken bu değer 131,46 MPa ölçülmüştür. En düşük gerilme ise %10 redüksiyon oranında alüminyum telinde oluşmuş olup bu değer 44,07 MPa ölçülmüştür. Bakırda ise redüksiyon oranları için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme redüksiyon oranının %10'dan %30'a artırılması ile çelik telde %151, bakır telde %157 ve alüminyum telde %165 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin arttığı görülmüştür. Böylece redüksiyon oranının artması ile telde oluşacak gerilmenin de arttığı gözlemlenmiştir.
- ii. Farklı redüksiyon oranları için yapılan analizlerde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için redüksiyon oranı artışıyla tel üzerinde oluşan enerjinin arttığı gözlemlenmiştir. Analizlerde en çok enerjinin %30 redüksiyon oranında 1296,20 J ile çelik telinde olduğu görülürken en az enerjinin ise %10 redüksiyon oranında 287,73 J ile alüminyum telinde olduğu görülmüştür. Bakırda ise tüm hızlar için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde enerjinin açığa çıktığı gözlemlenmiştir. Tel çekme redüksiyon oranının %10'dan %30'a artırılması ile çelik telde %366, bakır telde %327 ve alüminyum telde %291 oranında tel üzerinde açığa çıkan enerjinin arttığı görülmüştür. Böylece tel çekme redüksiyon oranının artması ile tel yüzeyinde açığa çıkan enerjinin de arttığı gözlemlenmiştir.

- iii. Farklı redüksiyon oranları için yapılan analizlerde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için redüksiyon oranı artışıyla tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmüştür. Tel çekme işlemi sonunda haddene çıkış yapan telinin sıcaklıkları hesaplanmış ve bu sıcaklık değerlerine göre en çok sıcaklık %30 redüksiyon oranında 100,68 °C ile çelik telinde oluşurken, en az sıcaklık ise %10 redüksiyon oranında 68,60 °C ile bakır telinde olduğu görülmüştür. Alüminyumda ise tüm redüksiyon oranları için çelik ve bakır tele göre ortalama bir sıcaklığın olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme redüksiyon oranının %10'dan %30'a artırılması ile çelik telde %227, bakır telde %197 ve alüminyum telde %189 oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın arttığı görülmüştür. Ayrıca termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha çabuk soğuma eğilimi göstereceğinden, bakırın sıcaklığının diğer malzemelerden daha düşük olduğu da gözlemlenmiştir.

Sayısal modelde yapılan bir diğer karşılaştırma ise tel çekme işleminde farklı çaplara sahip tellerin indirgeme işlemidir. Analizler üç durum için gerçekleştirilmiştir. Bu durumlar; telin haddeye giriş çapı 8,54 mm, haddeden çıkış çapı 7,24 mm, telin haddeye giriş çapı 7,24 mm, haddeden çıkış çapı 6,14 mm ve telin haddeye giriş çapı 6,14 mm, haddeden çıkış çapı 5,21 mm olduğu durumlardır. Farklı çaplar için hazırlanan sayısal modelde redüksiyon oranı %28,13 ve tel çekme hızı 0,1 m/s olacak şekilde sabit parametreler ile indirgenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde tel üzerinde oluşan gerilme, açığa çıkan enerji ve sıcaklık değerleri birbirleri arasında kıyaslanmıştır. Sayısal çözüm sonuçları şu şekilde açıklanabilir:

- i. Farklı çaplar için yapılan analizlerde elastisite modülü yüksek olan çelik malzemesinin gerilmesinin bakır ve alüminyum malzemelerine göre daha yüksek gerilme değerine sahip olduğu görülmüştür. Analizlerde en çok gerilme 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında çelik telinde olduğu görülürken bu değer 129,24 MPa ölçülmüştür. En düşük gerilme ise 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesi sırasında alüminyum telinde oluşmuş olup bu değer 63,88 MPa ölçülmüştür. Bakırda ise farklı çaplar için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde gerilmeler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çap azalması ile telde oluşacak gerilmenin de azaldığı gözlemlenmiştir. Tel çekme işleminde tel giriş çapının 8,54 mm'den 7,24mm'ye indirgenirken 1,30 mm küçültme yapılması

yerine 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesinde 0,93 mm küçültme yapılması durumunda çelik telde %93, bakır telde %93 ve alüminyum telde %91 oranında tel üzerinde oluşan gerilmenin daha az olduğu görülmüştür.

- ii. Farklı çaplar için yapılan analizlerde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için çap azalışıyla tel üzerinde oluşan enerjinin azaldığı gözlemlenmiştir. Analizlerde en çok enerjinin 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında 1161,60 J ile çelik telinde olduğu görülürken en az enerjinin ise 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesi sırasında 393,12 J ile alüminyum telinde olduğu görülmüştür. Bakırda ise tüm çaplar için çelik ve alüminyum tele göre ortalama değerlerde enerjinin açığa çıktığı gözlemlenmiştir. Tel çekme işleminde tel giriş çapının 8,54 mm'den 7,24mm'ye indirgenirken 1,30 mm küçültme yapılması yerine 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesinde 0,93 mm küçültme yapılması durumunda çelik telde %51, bakır telde %52 ve alüminyum telde %52 oranında tel üzerinde açığa çıkan enerjinin daha az olduğu görülmüştür.
- iii. Farklı çaplar için yapılan analizlerde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri için çap azalışıyla tel üzerinde oluşan sıcaklığın azaldığı görülmüştür. Tel çekme işlemi sonunda haddene çıkış yapan telinin sıcaklıkları hesaplanmış ve bu sıcaklık değerlerine göre en çok sıcaklık 8,54 mm'den 7,24 mm'ye indirgenmesi sırasında 100,68 °C ile çelik telinde oluşurken, en az sıcaklık ise 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesi sırasında 68,60 °C ile bakır telinde olduğu görülmüştür. Alüminyumda ise tüm çaplar için çelik ve bakır tele göre ortalama bir sıcaklığın olduğu gözlemlenmiştir. Tel çekme işleminde tel giriş çapının 8,54 mm'den 7,24mm'ye indirgenirken 1,30 mm küçültme yapılması yerine 6,14 mm'den 5,21 mm'ye indirgenmesinde 0,93 mm küçültme yapılması durumunda çelik telde %91, bakır telde %90 ve alüminyum telde %91 oranında tel üzerinde oluşan sıcaklığın daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca termal iletkenlik katsayısı yüksek olan bakır malzemesinin diğer iki malzemeye göre daha çabuk soğuma eğilimi göstereceğinden, bakırın sıcaklığının diğer malzemelerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan tez çalışmasında sonuçlar genel olarak incelendiğinde tel yüzeyinde oluşan gerilme ve açığa çıkan enerji yüksekten düşüğe sırasıyla çelik, bakır ve alüminyum

telinde olduğu gözlemlenirken tel üzerinde oluşan sıcaklık dağılımlarının ise çelik, alüminyum ve bakır şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada ile tel çekme sanayinde kullanılabilecek bir ANSYS model geliştirilmiştir. Yapılan çalışma sanayi uygulamalarında optimum proses parametrelerinin belirlenmesine ve verimli bir üretimin gerçekleştirilmesine ışık tutacaktır.

4.2. Öneriler

Yapılan tez çalışması sonucunda tel çekme işlemi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel yöntemler ile bir tel çekme hattında 8,54mm çapa sahip filmaşinin 7,24mm'ye indirgenmesi sırasında haddeden çıkış yapan telin sıcaklığı ölçülmüştür. Termal kamera kullanılarak yapılan sıcaklık ölçümlerinde çelik telinin ortalama 96,1°C derece sıcaklığa sahip olduğu görülmüştür. ANSYS programı ile hazırlanan sayısal model ise deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sayısal modelin hata payı %0,33 bulunmuştur. Deneysel çalışmalar için farklı hızlar ve farklı çaplarda ölçümlerde alınarak deneysel çalışmaların sayısı artırılabilir. Buda sayısal modelin doğruluk oranının artırılması için fayda sağlayacağı öngörülmüştür.

Sayısal model aracılığı ile tel çekme işlemi üç ana parametre için modellenerek çözümlerin sayısı artırılmış ve sonuçları yorumlanmıştır. Sayısal çözüm sonuçları farklı hızlar, farklı redüksiyon oranları ve farklı çaplar için incelenmiştir. Sonuç olarak %28 redüksiyon oranında tel çekme hızının 0,05 m/s hızdan 0,3 m/s hıza çıkarılması ile sıcaklık artışı meydana geldiği görülmüş olup tel çekme işleminin dahada hızlandırılması ile sıcaklığın dahada artarak tel yüzey deformasyonlarının olumsuz yönde artmasına sebep olacağı öngörülmektedir. Ayrıca yapılan analizlerde redüksiyon oranın %30 redüksiyon oranını geçmememiz gerektiği görülmüştür. Bunun sebebi ise daha yüksek redüksiyon oranlarında oluşacak gerilme artışından dolayı tel çekme işlemi sırasında kopma durumunun yaşanabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca sayısal modelde çelik, bakır ve alüminyum tel malzemeleri kullanılmış ve bu malzemelerin tel çekme işlemi tungsten karbür kobalt (WC-Co) haddeler modellenerek yapılmıştır. Sayısal çözümlerin sayısı elmas haddeler gibi farklı hadde malzemeleri ve geometrileri için artırılabilir. Hazırlanacak farklı sayısal modeller aracılığı ile sanayi uygulamalarında kullanılan farklı şartlardaki tel çekme işlemlerinin de modellenmesi gerçekleştirilerek literatüre ve tel çekme endüstrisine katkı sağlanabilir. Ayrıca sayısal

model tel haricinde profil, boru ve sa gibi endüstriyel ürünlerinde üretiminin modellenmesi için benzetim yapılarak kullanılabilir.



KAYNAKÇA

1. Kalpakjian, S., 1984. Manufacturing processes for engineering materials. Pearson Education India,
2. Soykan, C., İmalat işlemleri. Cengiz Soykan,
3. Dedeakayoğulları, H., Kaçal, A., 2020. Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. **İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 1: (1): 1-12.**
4. Durgun, İ., Doruk, E., 2015. Hızlı donma prototipleme yöntemi ile parça üretimi. **Politeknik Dergisi, 18: (2): 53-61.**
5. Güzey, A., 2009. Demirsel tellerin üretim sürecinin incelenmesi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
6. Newbury, B. D., Notis, M. R., 2004. The history and evolution of wiredrawing techniques. **Jom, 56: (2): 33-37.**
7. Avitzur, B., 1968. Metal forming.. processes and analysis. **MCGRAW-HILL, INC., New York. 1968: (500 P):**
8. Wistreich, J., 1958. The fundamentals of wire drawing. **Metallurgical Reviews, 3: (1): 97-142.**
9. The James, F., 2000. Lincoln arc welding foundation: arc-welding fundamentals. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation Cleveland, OH, 1.3-1.
10. Altun, K., 2015. Soğuk çekme metoduyla üretilen kaynak tellerinde görülen hataların belirlenmesi ve giderilmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü,
11. Wright, R. N., 2016. Wire technology: process engineering and metallurgy. Butterworth-Heinemann,
12. Balin, B., 2004. Seçilen karakteristiklerin tel çekme işlemi üzerindeki etkileri.
13. Özer, Ö., 1993. Tel çekme işlemine etki eden faktörlerin mekanik ve teknolojik olarak incelenmesi.
14. Benlice, E., 2020. Tel çekme prosesinde kullanılmış atık toz sabunun geri kazanımı için endüstriyel tasarımı. Fen Bilimleri Enstitüsü,
15. Aksoy, C., Kaftanoğlu, B., Tel çekme işleminin bilgisayar yardımı ile modellenmesi. **Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, 2: (1): 18-26.**
16. Çelik, E., 2019. Çelik tel çekme hadde geometrisinin telin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi,
17. Şenyürek, Ü., Cömert, H., 2002. Tel çekme prosesi ve inklüzyon hasarları. **Sakarya University Journal of Science, 6: (3): 178-182.**

18. Ünseren, M., 2006. Tel çekme matrisleri üzerine bir araştırma. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,
19. <https://www.omerler.com.tr/>, Erişim tarihi: Aralık 2022.
20. Fleming, M., 2000. The role of wire drawing dies and the factors influencing die life. **Tecnologie del Filo(Italy), 4:** (82-88):
21. TS8791, “Tel, çubuk veya boru çekme kalıpları - sinterlenmiş, sert metal (karbür) kalıp çekirdekleri - boyutlar” (TSE, 1991).
22. Bozkurt, Ö., Benlice, E., Yıldırım, S., Kaya, M. F., “Çelik tellerin redüksiyon işlemlerinde kullanılan tungsten karbür haddenin karakterizasyonu” (4.International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC 2019), 2019).
23. Committee, W. A. S. W. H., 1965. Steel wire handbook. **Wire Association, Incorporated, 1-4:**
24. Jennings, M., 1987. Wire drawing with natural diamond and PCD. **Ind. Diamond Rev., 47:** (523): 259-261.
25. Lin, Z., Sun, F., Shen, B., 2011. Wear behavior of diamond-coated drawing dies. **Transactions of Tianjin University, 17:** (4): 259-263.
26. Bodur, H. O., 1975. Metallere plastik şekil verme usulleri. Birsen Kitabevi,
27. İçin, K., Çeliklerin sınıflandırılması, <https://avesis.ktu.edu.tr/kursaticin/dokumanlar>, Erişim tarihi: Aralık 2022.
28. Yalçın, T., Ateşok, G., 1979. Demir cevherlerinin zenginleştirilmesi. **Bilimsel Madencilik Dergisi, 18:** (2): 20-32.
29. Yaşar, M., “Demir çelik mamülleri, <https://web.karabuk.edu.tr/myasar/demircelik/demir-celik.html>, Erişim tarihi: Aralık 2022”.
30. McHenry, C., 1992. The new encyclopedia britannica. 3 . chicago: encyclopedia britannica. **Inc, 1150pp,**
31. Kimyaevi, “Saf metallerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, <http://www.kimyaevi.org/TR/Genel/BelgeGenis.aspx>, Erişim tarihi: Aralık 2022”.
32. Yıldırım, Y., 2019. 316L kaliteye sahip paslanmaz çelik tellerin tel çekme ve parlak tavlama proseslerinin araştırılması. Fen Bilimleri Enstitüsü,

33. Gzesh, D., Colvin, M., 1999. Wire drawing lubricant chemistry. **Wire & Cable Technology International(USA)**, **27**: (2): 60-61.
34. Snidle, R., 1977. Contribution to the theory of frictional heating and the distribution of temperature in wires and strips during drawing. **Wear**, **44**: (2): 279-294.
35. Wistreich, J., 1955. Investigation of the mechanics of wire drawing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, **169**: (1): 654-678.
36. Wright, R., 1979. Mechanical analysis and die design.
37. Elgammi, M., Baranoğlu, B., Elastoplastik problemlerin çözümünde sınır eleman-sonlu eleman yöntemlerinin girişimli kullanımı.
38. Kıstı, E., 2016. Kompozit özlü alüminyum iletkenlerin (ACCC) üretilmesi ve iletkenliğinin yükseltilmesi için yapılan çalışmalar. İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü ...,
39. Akgöl, O., KISTI, E. A., Karaaslan, M., Emin, Ü., 2018. Kompozit özlü alüminyum iletkenlerin (ACCC) üretilmesi ve iletkenliğinin yükseltilmesi için yapılan çalışmalar. **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, **9**: (2): 657-669.
40. Özer, Ö., Yurci, M., 1997. Tel çekme işleminde matris açılarının optimizasyonu ve sapmaların belirlenmesi. **ODTÜ Makine Fakültesi**, **1**: 4-6.
41. Koner, S., 1992. Tungsten carbide wire drawing dies. **Wire Industry**, 350-356.
42. Lange, K., 1985. Handbook of metal forming. **McGraw-Hill Book Company**, **1985**, 1216.
43. Dove, A., Moritz, J., Smigel, W., 1980. Steel wire handbook, 372 s.
44. McNulty, M., 2006. Spotlight on drawing machines. **Wire And Cable Technology International**, **34**: (1): 54.
45. Hwang, J.-K., Son, I.-H., Yoo, J.-Y., Zargarani, A., Kim, N. J., 2015. Effect of reduction of area on microstructure and mechanical properties of twinning-induced plasticity steel during wire drawing. **Metals and Materials International**, **21**: (5): 815-822.
46. Çetinarslan, C. S., Genç, S. K., Güzey, A., 2013. Tel çekme işleminde redüksiyon oranının akma ve çekme mukavemeti üzerine etkileri. **Trakya University Journal of Engineering Sciences**, **14**: ((1):87):
47. Çapan, L., 1999. Metallerde plastik şekil verme. **Çağlayan Kitabevi**,
48. Ceylan, İ., 2008. Metallerin plastik şekillendirilmesinde kullanılan malzeme modellerinin sonlu elemanlar ile analizi. Fen Bilimleri Enstitüsü,

49. Vega, G., Haddi, A., Imad, A., 2009. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. **Materials & Design**, **30**: (8): 3308-3312.
50. Chen, C., Oh, S., Kobayashi, S., 1979. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing—Part 1: Deformation mechanics of extrusion and drawing.
51. Oh, S., Chen, C., Kobayashi, S., 1979. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing—part 2: workability in extrusion and drawing.
52. Dixit, U., Dixit, P., 1995. An analysis of the steady-state wire drawing of strain-hardening materials. **Journal of Materials Processing Technology**, **47**: (3-4): 201-229.
53. Chin, R., Steif, P., 1995. A computational study of strain inhomogeneity in wire drawing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, **35**: (8): 1087-1098.
54. Kim, T., Kim, B., Choi, J., 1997. Prediction of die wear in the wire-drawing process. **Journal of Materials Processing Technology**, **65**: (1-3): 11-17.
55. Skołyszewski, A., Paćko, M., 1998. Back tension value in the fine wire drawing process. **Journal of Materials Processing Technology**, **80**: 380-387.
56. Gawali, P., Paul, A., Selokar, G., 2012. Effect of high speed drawing on properties of high carbon steel wires. **International Journal of Modern Engineering Research**, **2**: (2): 209-214.
57. Hassan, A. K. F., Hashim, A. S., 2015. Three dimensional finite element analysis of wire drawing process. **Univers. J. Mech. Eng**, **3**: (3): 71-82.
58. Lazzarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P., Oudin, J., 1997. Identification of Coulomb's friction coefficient in real contact conditions applied to a wire drawing process. **Wear**, **211**: (1): 54-63.
59. Bay, N., Wanheim, T., 1990. Contact phenomena under bulk plastic deformation conditions. **Keynote paper at 3rd ICTP Int. Conf. on Technol. of Plasticity**, 1677-1691.
60. Wilson, W., Chang, D.-f., 1996. Low speed mixed lubrication of bulk metal forming processes.
61. Brethenoux, G., Bourgain, E., Pierson, G., Jallon, M., Secordel, P., 1996. Cold forming processes: some examples of predictions and design optimization using numerical simulations. **Journal of materials processing technology**, **60**: (1-4): 555-562.

62. Luis, C., Leon, J., Luri, R., 2005. Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes. **Journal of materials processing technology**, **164**: 1218-1225.
63. El-Domiaty, A., Kassab, S. Z., 1998. Temperature rise in wire-drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, **83**: (1-3): 72-83.
64. Vega, G., Haddi, A., Imad, A., 2009. Temperature effects on wire-drawing process: experimental investigation. **International Journal of Material Forming**, **2**: (1): 229-232.
65. Haddi, A., Imad, A., Vega, G., 2011. Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process. **Materials & Design**, **32**: (8-9): 4310-4315.
66. Sánchez Egea, A. J., González Rojas, H. A., Celentano, D. J., Jorba Perió, J., Cao, J., 2017. Thermomechanical analysis of an electrically assisted wire drawing process. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, **139**: (11):
67. Altan, T., 1970. Heat generation and temperatures in wire and rod drawing. **Wire Journal**, **3**: (3):54-59.
68. Altan, T., Im, Y.-T., 1988. Heat generation and transfer in metal forming: recent developments. **Thermal Aspects in Manufacturing (edited by Attia, MH and Kops, L.)**: 77-88.
69. Flir_i5, “Flir i5 termal kamera, <https://www.makinaturkiye.com/bakim-onarim-icin-termal-kamera-p-119021>, Erişim tarihi: Aralık 2022”.
70. Gülmez, T., “İmal usulleri - İTÜ makine mühendisliği ders notu - <http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/plastik-sekil-verme-turgut-gulmez.pdf>, Erişim tarihi: Aralık 2022”.
71. “Malzemelerin Mekanik Özellikleri Ders Notu (Bartın Üniversitesi)- <https://metalurji.bartin.edu.tr/dokumanlar/ders-notlari.html>, Erişim tarihi: Aralık 2022”.
72. Shukur, J. J., Khudhir, W. S., Abbood, M. Q., 2022. Analysis of tool geometry and lubrication conditions effect on the forming load during wire drawing process. **Advances in Science and Technology Research Journal**, **16**: (4): 279-286.
73. Erdin, E., Plastik şekil verme ders notu - <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin>, Erişim tarihi: Aralık 2022.

74. Handoyo, E. A., Hazman, A., 2018. Optimization of wire drawing die's cooling system. **AIP Conference Proceedings, 2001:** (1): 020001.
75. Kalpakjian, S., Schmid, S., 2014. Manufacturing processes for engineering materials–5th edition. **agenda, 12:** 1.
76. Bimshan, B., 2013. Introduction to tribology: second edition.
77. Çengel, Y. A., 2015. Isı ve kütle transferi: esaslar ve uygulamalar.
78. Yeşilata, B., Isı transferi.
79. Groover, M. P., 2020. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons,
80. Kurlov, A. S., Gusev, A. I., 2013. Tungsten carbides. **Springer Ser. Mater. Sci, 184:** 34-6.
81. Jones, D. R., Ashby, M. F., 2012. Engineering materials 2: an introduction to microstructures and processing. Butterworth-Heinemann,
82. Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., Qian, M., 2017. Light alloys: metallurgy of the light metals. Butterworth-Heinemann,
83. Hammond, C., 2000. The elements. **Handbook of chemistry and physics, 81:**
84. Lide, D. R., 2004. CRC handbook of chemistry and physics. CRC press,
85. Kosky, P., Balmer, R., Balmer, R. T., Keat, W. D., Wise, G., 2012. Exploring engineering: an introduction to engineering and design. Academic Press,

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Furkan KORKMAZ
Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh.	
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Enerji Sistemleri Müh.	2019
Lise	İnönü Anadolu Lisesi	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-Halen	Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş.	Ar-Ge / Araştırmacı

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

- Korkmaz F., Kaya, M. F., 2023. Çelik Tel Çekme İşleminde Tel Üzerinde Meydana Gelen Gerilme ve Sıcaklık Değişimlerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *International Materials Engineering And Advanced Manufacturing Technologies Congress (IMEAMTC-2023)*, 12-13 Ocak 2023, İstanbul, Türkiye.