

2023



TÜBİTAK

# YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI ALÜMİNYUM SEKTÖRÜ

Versiyon: 12.05.2023

Görüşlerinizi ve sorularınızı [politikalar@tubitak.gov.tr](mailto:politikalar@tubitak.gov.tr) adresine e-postayla iletebilirsiniz.

- 1.1. Alümina üretiminde **enerji verimliliğinin** artırılması, **iyileştirilmiş hammaddeler ve proseslerin** kullanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi
- 1.2. Alüminyum üretim prosesinde **yenilikçi proseslerin** geliştirilmesine ve entegrasyonları

#### 1. Birincil Alüminyum Üretiminde Karbon Ayak İzinin Azaltılması



- 2.1. İkincil Alüminyum üretiminde, alüminyum **hurda ayıklama ve hazırlama** için yenilikçi teknolojilerin/yöntemlerin geliştirilmesi ve üretim sürecine entegrasyonları
- 2.2. İkincil Alüminyum üretiminde **enerji verimliliğini artırmaya yönelik** proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

#### 2. İkincil Alüminyum Üretiminde Hurda Ayıklama, Verimlilik Artışı



- 3.1. Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, dövme, ısıl işlem ve yüzey işlem proseslerinin **enerji verimliliklerinin artırılmasına** yönelik uygulamaların geliştirilmesi

#### 3. Yarı Mamul İşlemede Enerji Verimliliği



- 4.1. Alüminyum parça dökümünde malzeme, makine ve sıvı metal **proses teknolojilerinin** geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- 4.2. Alüminyum parça dökümünde **proses tasarımı ve optimizasyonuna** yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

#### 4. Alüminyum Parça Dökümde Verimlilik Artışı



- 5.1. Alüminyum sektöründe optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

#### 5. Alüminyum Sektöründe Optimizasyon, Enerji Girdisi, Verimlilik ve Atık Yönetimi



Şekil 1. Alüminyum Sektörünün Yeşil Dönüşümü için Teknolojik İhtiyaçlar ve Çözümler

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Alüminyum Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
1. Birincil Alüminyum Üretiminde Karbon Ayak İzinin Azaltılması	1.1. Alümina üretiminde enerji verimliliğinin artırılması, iyileştirilmiş hammaddeler ve proseslerin kullanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	a. Alüminyum ve alümina üretimi için <b>halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi)</b> kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	9	4	2026-2030
		b. <b>Hidro ve pirometalurjik prosesler</b> ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi	9	6	2026-2030-2035
		c. Alümina üretiminde ortaya çıkan <b>yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine</b> yönelik yöntemlerin geliştirilmesi	9	4	2030-2035
	1.2. Alüminyum üretiminde <b>yenilikçi proseslerin</b> geliştirilmesi ve entegrasyonları	a. <b>Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların</b> kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar	6	2-3	2026-2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
2. İkincil Alüminyum Üretiminde Hurda Ayıklama, Hazırlama ve Verimlilik Artışı	2.1. İkincil Alüminyum üretiminde, <b>alüminyum hurda ayıklama ve hazırlama için yenilikçi teknolojilerin/yöntemlerin</b> geliştirilmesi ve üretim sürecine entegrasyonları	a. <b>Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme vb.)</b> geliştirilmesi	Lak/Boya Giderme sistemleri: <b>9</b> Dikey Lak/Boya Giderme sistemleri: <b>6</b> Direkt Ergitme: <b>9</b>	Lak/Boya Giderme Sistemleri: <b>5</b> Dikey Lak/Boya Giderme Sistemleri: <b>2-3</b> Direkt Ergitme: <b>9</b>	Kaplama Giderme Sistemlerinin Geliştirilmesi: <b>2030</b>  KİK'lerin Döner Ergitme Fırında Direkt Ergitilmesine Uygun Döner Fırın Sistemlerinin Geliştirilmesi ve Ortaya Çıkan Öz Isının Değerlendirilmesi: <b>2026</b>
		b. <b>Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları vb.)</b> geliştirilmesi	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>2030-2035</b>
	2.2. İkincil Alüminyum üretiminde <b>enerji verimliliğini artırmaya</b> yönelik proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi	a. <b>Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek, metal verimini düşürmeyecek</b> yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi	<b>9</b>	<b>4-5</b>	<b>2030</b>
		b. <b>İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi vb.) ve daha yüksek kapasiteli</b> fırın tasarımlarının geliştirilmesi	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>2030</b>

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Alüminyum Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
3. Yarı Mamul İşlemede Enerji Verimliliği	3.1. Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, dövme, ısıtma işlem ve yüzey işlem proseslerinin enerji verimliliklerinin artırılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi	a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi	9	8-9	2026-2030
		b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi	9	7-8	2026-2030
4. Alüminyum Parça Dökümde Verimlilik Artışı	4.1. Alüminyum parça dökümünde malzeme, makine ve sıvı metal proses teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	Ergitme-Bekletme Sistemleri: 6-9 Sıvı Metal Prosesleri: 6-9 Alüminyum Master Alaşım: 9	Ergitme-Bekletme Sistemleri: 4-8 Sıvı Metal Prosesleri: 4-8 Alüminyum Master Alaşım: 5-6	Proseslerin Geliştirilmesi: 2026 Endüstriyel Ölçeğe Yakın Pilot Tesislerin Geliştirilmesi: 2030 Endüstriyel Ölçekli Uygulamaların Yaygınlaştırılması: 2035
		b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	Yenilikçi Döküm Teknolojileri: 6-9 Sarf Malzemeleri: 6-9	Yenilikçi Döküm Teknolojileri: 4-8 Sarf Malzemeleri: 4-8	Proseslerin Geliştirilmesi: 2026 Endüstriyel Ölçeğe Yakın Pilot Tesislerin Geliştirilmesi: 2030 Endüstriyel Ölçekli Uygulamaların Yaygınlaştırılması: 2035
	4.2. Alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi	Alüminyum Döküm Prosesi: 6-9 Eklemeli İmalat (Kalıp/Maça): 6-9	Alüminyum Döküm Prosesi: 3-8 Eklemeli İmalat (Kalıp/Maça): 4-8	Proseslerin Geliştirilmesi: 2026 Endüstriyel Ölçeğe Yakın Pilot Tesislerin Geliştirilmesi: 2030 Endüstriyel Ölçekli Uygulamaların Yaygınlaştırılması: 2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
<b>5. Alüminyum Sektöründe Optimizasyon, Enerji Girdisi, Verimlilik ve Atık Yönetimi</b>	<b>5.1.</b> Alüminyum sektöründe optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	<b>a.</b> Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin <b>dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna</b> yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması	4-6	2-4	2030
		<b>b.</b> Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan <b>enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına</b> yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi	Yenilenebilir enerji kullanımı: <b>9</b> KYKD <sup>1</sup> : <b>9</b>	Yenilenebilir enerji kullanımı: <b>9</b> KYKD: <b>3-4</b>	Yenilenebilir enerji: <b>2030-2035</b> KYKD: <b>2026-2030-2035</b>
		<b>c.</b> Tüm proseslerde <b>enerji ve malzeme verimliliğinin artırılmasına</b> yönelik <b>en iyileme çalışmalarının</b> gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması	9	8-9	Hali hazırda uygulanan proses birim işlemleri ve sarf malzemeleri: <b>2026</b> Üretim teknolojilerinin iyileştirilmesi: <b>2030</b> Malzeme (tanımlanmış ve sertifikalandırılmış) ve makina iyileştirilmesi: <b>2035</b>
		<b>d.</b> Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan <b>yan ürün ve atık yönetimine</b> ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi	9	3-4	<b>2026-2030-2035</b>
		<b>e.</b> <b>Atık ısının ve suyun geri kazanımına</b> yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması	9	8-9	2026

<sup>1</sup> Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama Teknolojileri

## İçindekiler

<b>TEKNOLOJİK HEDEF 1:</b> .....	<b>8</b>
<b>BİRİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİMİNDE KARBON AYAK İZİNİN AZALTILMASI</b> .....	<b>8</b>
1.1. ALÜMİNA ÜRETİMİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI, İYİLEŞTİRİLMİŞ HAMMADDELER VE PROSESLERİN KULLANILMASINA YÖNELİK TEKNOLOJİLERİN GELİŞTİRİLMESİ.....	9
1.2. ALÜMİNYUM ÜRETİM PROSESİNDE YENİLİKÇİ PROSESLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE ENTEGRASYONLARI .....	20
<b>TEKNOLOJİK HEDEF 2:</b> .....	<b>26</b>
<b>İKİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİMİNDE HURDA AYIKLAMA, HAZIRLAMA VE VERİMLİLİK ARTIŞI</b> .....	<b>26</b>
2.1. İKİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİMİNDE, ALÜMİNYUM HURDA AYIKLAMA VE HAZIRLAMA İÇİN YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLERİN/YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE ÜRETİM SÜRECİNE ENTEGRASYONLARI .....	27
2.2. İKİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİMİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK PROSESLERİN VE YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ .....	36
<b>TEKNOLOJİK HEDEF 3:</b> .....	<b>42</b>
<b>YARI MAMUL İŞLEMEDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ</b> .....	<b>42</b>
3.1. DÖKÜM, HADDELEME, EKSTRÜZYON, DÖVME, ISIL İŞLEM VE YÜZEY İŞLEM PROSESLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİKLERİNİN ARTIRILMASINA YÖNELİK UYGULAMALARIN GELİŞTİRİLMESİ.....	43
<b>TEKNOLOJİK HEDEF 4:</b> .....	<b>55</b>
<b>ALÜMİNYUM PARÇA DÖKÜMÜNDE VERİMLİLİK ARTIŞI</b> .....	<b>55</b>
4.1. ALÜMİNYUM PARÇA DÖKÜMÜNDE MALZEME, MAKİNE VE SIVI METAL PROSES TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE YAYGINLAŞTIRILMASI.....	56
4.2. ALÜMİNYUM PARÇA DÖKÜMÜNDE PROSES TASARIMI VE OPTİMİZASYONUNA YÖNELİK TEKNOLOJİLERİN GELİŞTİRİLMESİ .....	73
<b>TEKNOLOJİK HEDEF 5:</b> .....	<b>88</b>
<b>ALÜMİNYUM SEKTÖRÜNDE OPTİMİZASYON, ENERJİ GİRDİSİ, VERİMLİLİK VE ATIK YÖNETİMİ</b> .....	<b>88</b>
5.1. ALÜMİNYUM SEKTÖRÜNDE OPTİMİZASYON, ENERJİ GİRDİSİ, VERİMLİLİK VE ATIK YÖNETİMİNE YÖNELİK UYGULAMALARIN GELİŞTİRİLMESİ VE YAYGINLAŞTIRILMASI .....	89
<b>EK 1. YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI ALÜMİNYUM SEKTÖRÜ DANIŞMA GRUBU ÜYELERİ</b> .....	<b>107</b>
<b>EK 2. YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI ALÜMİNYUM SEKTÖREL ODAK GRUBU KATILIMCI KURULUŞLARI</b> .....	<b>108</b>
<b>EK3: ÇALIŞMANIN YÜRÜTÜLMESİNDE GÖREVLİ TÜBİTAK YETKİLİLERİ</b> .....	<b>108</b>

**Teknolojik Hedef 1:**  
**BİRİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİMİNDE KARBON AYAK İZİNİN**  
**AZALTILMASI**

Birincil Alüminyum üretiminde alümina ve alüminyum üretim proseslerinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi



**Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.**

**1.1. Alümina üretiminde enerji verimliliğinin artırılması, iyileştirilmiş hammaddeler ve proseslerin kullanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

**1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi**

**1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

## Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.

### 1.1. Alümina üretiminde enerji verimliliğinin artırılması, iyileştirilmiş hammaddeler ve proseslerin kullanılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

#### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

##### 1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

Dünyada madenciliği yapılan boksit cevherlerinin %85'i alüminyum üretiminde kullanılmaktadır. Dünyanın en büyük boksit üreticileri sırası ile Avustralya (%28), Yeni Gine (%24) ve Çin'dir (%19). Güncel olarak Dünya'da primer alüminyum üretiminde (ergimiş tuz elektrolizi) kullanılabilir kalitedeki alümina üretimi yıllık yaklaşık 120 milyon tondur ve 2050 yılında 170 milyon tona ulaşması beklenilmektedir. Bu durum, birincil alüminyum üretimi için yıllık boksit ihtiyacını (tenöre de bağlı olarak) güncel olarak en az 240 milyon tondan, 2050 yılında en az 340 milyon tona yükselebileceğini işaret etmektedir. Bu bağlamda hem artan talebin karşılanabilmesi hem de primer alüminyum üretiminin yapıldığı, diğer bölgelerde bulunan ve alüminyum içeren hammaddelerden de yararlanılıp; coğrafi çeşitliliğin sağlanabilmesi bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca:

- Hindistan ve Endonezya'nın boksit ihracatını durdurması,
- Ticari kaynakların Afrika'da odaklanması,
- Nakliye maliyetleri ve sorunları,
- Boksitin AB kritik hammaddeler listesinde yer alması gibi riskler nedeniyle ve sürdürülebilir bir birincil alüminyumun üretimi için **düşük kalitede boksit ve boksit dışı hammaddelerin birincil alüminyum üretiminde kullanımının araştırılması** gerekmektedir.

Türkiye'de güncel rezerv bilgileri Tablo 1'de verilmiş olup, bu rezerv bilgilerinin güncellenmesi ve veri kalitesinin iyileştirilmesi için ilgili kurum(lar) tarafından rezerv çalışmalarının yapılması ve daha detaylı sondajlar ile güncel durumun ortaya konulması gerekmektedir.

**Tablo 1.** Türkiye görünür ve muhtemel boksit rezervlerinin dağılımı [1].

Bölge	Görünür	Muhtemel ve Ekonomik Olmayan	Toplam	Açıklama
	Bin Ton	Bin Ton	Bin Ton	
Seydişehir -Akseki	15.019	9.906	24.925	Ağırlıklı Böhmitik, Diasporik
Milas-Yatağan	9.433	8.668	18.101	Demiri Yüksek Diasporik,Böhmitik
Zonguldak -Kokaksu	5.900	3.400	9.300	Böhmitik
İslahiye-Payas	-	215.500	215.500	Demiri Yüksek Diasporik
Tufanbeyli-Saimbeyli	5.500	6.000	11.500	Diasporik
Bolkardağı	-	3.900	3.900	Diasporik
Alanya	1.300	7.700	9.000	Düşük kalite Diasporik
<b>Toplam</b>	<b>37.152</b>	<b>255.074</b>	<b>292.226</b>	

Türkiye’de ağırlıklı olarak böhmitik boksitler işlenebilmekte olup, orta vadede birincil alüminyum üretiminin devamlılığının sağlanabilmesi için kullanılacakları öngörülmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir bir birincil alüminyum üretimi için diasporik ve boksit dışı alüminyum içeren hammaddelerin kullanılması da bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır.

Ek olarak, bu çalışmaların gerçekleştirilmesi için:

- Ulusal düşük kaliteli boksit ya da boksit dışı kaynakların rezerv tespiti/teyidi,
- Rezerv durumuna göre odaklanılacak hammadde gruplarının seçimi gerekmektedir.

Bu bağlamda **Çalışılabilir Ar-Ge ve Yenilik Konuları** aşağıda verilmektedir:

- Sensör esaslı cevher ayırma / zenginleştirme yöntemlerinin kullanımı,
- Alternatif cevher zenginleştirme yöntemleri ve flotasyon teknolojilerinin araştırılması,
- Cevher hazırlamada mekanik aktivasyonun kullanımının araştırılması,
- Diasporik cevherlerin ve alternatif hammaddelerin elektroliz kalitesinde alümina üretimi için kullanımında Bayer Prosesinin iyileştirilmesi ve/veya alternatif alümina üretim proseslerinin geliştirilmesi,
- Özellikle alunit gibi alternatif hammaddelerin kullanımında gübre, yan-ürün kimyasallar vb. üretimine de olanak sağlayan entegre proseslerin geliştirilmesi gerekmektedir,
- Birincil ve ikincil alümina içeren kaynaklardan katma değeri yüksek ürünlerin ve üretim teknolojilerin geliştirilmesi (örn. LED teknolojileri vb.),
- Farklı liç teknolojilerinin (örn. Pedersen prosesi, ALCAN, ALCOA vb.) araştırılması.

### 1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi

Mevcut Bayer prosesinin enerji tüketimi ve çevresel etki açısından geliştirilmesi (Tüp otoklavlar, yeni nesil filtrasyon ekipmanları, modelleme çalışmaları ve benzeri çalışmalar)

### **1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Alümina üretiminde yan ürün olarak kazanılabilecek lityum, galyum, stronsiyum vb. metaller havacılık, uzay, ulaşım, enerji depolama ve karbon yakalama teknolojileri için kritik bir öneme sahiptir.

Bayer işleminde oldukça alkali ve çok ince taneli bir yan ürün olan Boksit Kalıntısı da (BK; Eng. Bauxite Residue, BR) ortaya çıkmaktadır. Küresel yıllık üretimi, ~150 milyon tondur ve bu BK birikiminin artmasına, çökelme sorunlarına ve çevre sorunlarına neden olmaktadır. Bu sebeple, BK'nın güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi boksit ve alümina endüstrileri için üretim maliyetini etkileyen önemli bir sorundur. BK'nın değerlendirilmesi düşük maliyetli bir ikincil hammadde ve metal kaynağı olarak, atığın azaltılması için bir yol olabilir ve atığın tekrar ekonomiye kazandırılmasını sağlar. BK, ekonomik değeri yüksek mineraller ve metaller açısından zengindir. Fe, Al, Ca, Na, Si, Ti elementlerinin oksitlerini, tuzlarını içerir ve nadir toprak elementlerini içerir. İçeriğindeki nadir toprak elementlerinin birçoğu AB tarafından Kritik Metaller (CRM'ler) olarak sınıflandırılmıştır (Sc, Nd, Y, La, Ce, Ds). BK'daki Sc konsantrasyonu yerkabuğundaki ortalama Sc konsantrasyonundan beş kat daha fazladır.

Avrupa'da, alümina ve birincil alüminyum endüstrileri, yaklaşık olarak 7 milyon ton alümina üretmek için ortalama 12 milyon ton boksit kullanmaktadır. Alümina rafinerileri Bosna Hersek, Fransa, Macaristan, Almanya, Yunanistan, İrlanda, Romanya, İspanya ve Ukrayna'da faaliyet gösterirken, İtalya, Fransa, Almanya, Macaristan ve diğer ülkelerde faaliyetlerini durduran rafinerilerde de (eski sahalar) önemli miktarda BK yatakları mevcuttur. AB'deki mevcut BK üretimi yılda 6,8 milyon tondur ve kümülatif BK stoğunun 250 milyon tondan daha fazla olduğu tahmin edilmektedir.

## **B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri**

### **1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

Dünya'da THS 9; Türkiye'de THS 4'tür.

### **1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi**

Dünya'da THS 9; Türkiye'de THS 6'dır.

### **1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Dünya’da THS 9; Türkiye’de THS 4’tür.

## **C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

### **1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

Rus Alüminyum ve Magnezyum Enstitüsü (VAMI), alunit cevherini alümina, potasyum sülfat ve sülfürik aside dönüştürmek için bir teknoloji geliştirmiş ve ticari olarak uygulamıştır. Süreç tamamen Georgy Labutin ve diğer VAMI mühendisleri tarafından 1953'te geliştirilmiştir. Bu süreç, 150.000 t/yıl alümina üretim kapasiteli Kirovobad alümina rafinerisinin (Gence, Azerbaycan) mühendislik ve inşasında kullanılmıştır [2].

Potash Ridge (SOPerior Fertilizer Corp.), Kuzey Amerika'daki bilinen en büyük alunit yatağını işleyerek SOP (potasyumlu gübrenin sülfatı) üreten Kanada merkezli bir şirkettir. Alunit, alümina ve SOP açısından zengin bir sülfat mineralidir ve geleneksel yöntemlerle işlendiğinde üç değerli ürün (alümina, SOP ve sülfürik asit) elde edilir. Şirket, yıllık 1.300.000 ton metalurjik kalite ve yüksek saflıkta alümina üretim kapasitesine sahiptir [3].

Hudson Resources, Grönland'da yeşil madencilik projelerinin işletilmesi ve geliştirilmesine odaklanan Kanada merkezli bir madencilik şirkettir. Hudson, Grönland'da faaliyet gösteren White Mountain (Qaqortorsuaq) anortosit (kalsiyum feldspat) madeninin işletme ortağıdır. Maden 50 yıllığına işletme iznine sahiptir ve mevcut maden ömrü 100 yıldan fazladır. Yıllık 200.000 ton metalurjik kalite ve yüksek saflıkta alümina üretim kapasitesine sahiptir [4].

Altech Advanced Materials, Batı Avustralya'daki Meckering yakınlarındaki kaolin yatağından doğrudan kaolinden yüksek saflıkta alümina üretimi üzerine çalışmaktadır. 12,7 milyon ton rezerv olduğu tespit edilmiştir. Şirketin yaklaşımının önemli bir avantajı, yüksek kalite alümina üretimi için uygun maliyetli bir alternatif sağlaması ve hammadde olarak alümina açısından zengin ve doğal olarak safsızlık bakımından düşük olan kili kullanmasıdır. Altech, HCl liçine dayalı geleneksel ve kanıtlanmış bir teknoloji kullanmaktadır. Bu metot özellikle kaolin kilinden yüksek kaliteli alümina üretmek için uygundur [5].

Rusal AlumoChloride Technology, RUSAL'ın ETC ve VAMI uzmanları tarafından oluşturulan, yüksek silisli hammaddelerden metalurjik kalitede alümina üretmek için alüminyum klorür

işleme tesisidir. Bu sistem boksitten alümina üretmenin geleneksel yöntemlerine göre birçok avantaja sahiptir. Hammadde olarak kullanılan kaolinin, RUSAL tesislerinin bulunduğu bölgelerde görünür rezervleri tek başına 200 yılı aşkın bir işletme için yeterli olacağı öngörülmektedir. Bu yöntemin avantajları VAMI'deki RUSAL pilot mini rafinerisinde kaolinden alümina üretimi sırasında kanıtlanmıştır. HCl liç teknolojisi optimize edildiğinde, metalurjik alümina ve ticari potansiyeli olan yan ürünler [kostik soda, psödobemit (pseudobemite), amorf silika] üretilmektedir. Gelecekte, küresel boksit rezervleri tükendikçe, asit teknolojisinin Dünyada alümina üretmenin ana yolu haline gelebileceği tahmin edilmektedir [6].

Andromeda Metals ve Minotaur Exploration şirketleri ortak bir girişim olarak Güney Avustralya'daki halloysitten  $[Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O]$  yüksek saflıkta alümina üretimi üzerine çalışma yapmaktadır. Andromeda, yüksek saflıkta alüminaya ek olarak, nanotüp yapılı kaolinin nadir bir nanokil türevi olan halloysit içerdiğini tespit etmiştir. Halloysit, seramik ve çimento endüstrilerinde güçlendirici uygulamalara sahiptir ve "nanoteknoloji sektöründe pazar fırsatları" sunmaktadır [7].

Türkiye'deki paydaşları İstanbul Teknik Üniversitesi, Yeditepe Üniversitesi, ETİ Alüminyum, ASAŞ ve Metkim olan 'Alüminyum, diğer metaller ve bileşiklerinin üretimi için alüminyum içeren hammaddelerin kullanılması' konulu ERA-MIN 3 projesi [HORIZON 2020 EU Co-funded ERA-MIN 3 project (122N062)] halihazırda yürütülmektedir. Proje kapsamında boksit dışı cevherden (diyaspor) ve drosstan metalurjik kalite alümina ve alüminyum üretimi çalışmaları yapılmaktadır.

Tuğba Tunç, Fatih Apaydın ve Kenan Yıldız tarafından 2014 yılında 'Structural alterations and thermal behaviour of mechanically activated alunite ore' isimli çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, alunite cevheri mekanik olarak aktive edilmiş ve mekanik aktivasyonun alunite yapısı ve ayrışma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir [8].

### **1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi**

İlgili çalışmalar Dünya'da ticari ölçekte uygulanmaktadır. Türkiye'de ilgili çalışmalar kısmen endüstriyel ölçüğe aktarılacak ile beraber büyük bölümü araştırma aşamasındadır (örn. ETİ Alüminyum'da alüminyum hidroksitinin üretimi ve kalsinasyonu konusunda yoğun çalışmalar devam etmektedir.).

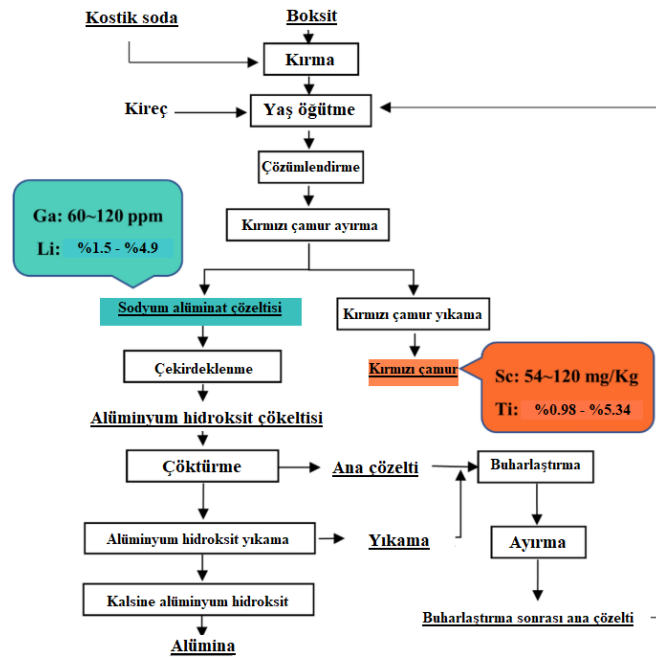
### **1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Türkiye’de Eti Alüminyum tarafından başlatılan ERA-MIN 2 projesinde alümina üretimi esnasında ortaya çıkan boksit kalıntılarının (BK) verimli bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda fiziksel (cevher hazırlama) ve hidrometalurjik süreçlerin kombinasyonuna başvurulmuştur.

Bu Ar-Ge ve yenilik konusunda Dünya’daki başarılı girişimler ve örneklerden başlıcaları aşağıda verilmektedir.

Gosen ve Choate 2021 yılında ‘Reconnaissance Study of the Major and Trace Element Content of Bauxite Deposits in the Arkansas Bauxite Region, Saline and Pulaski Counties, Central Arkansas’ isimli raporu yayınlamıştır. Bu rapora göre Arkansas boksit bölgesi, Amerika Birleşik Devletleri’ndeki diğer boksit bölgelerinin toplamından çok daha fazla boksit ve alümina üretmiş bir bölgedir. Boksit içerisindeki galyumun, Arkansas boksit yataklarında potansiyel bir yan ürün olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, Arkansas boksit cevherlerinde ortalama 662 ppm niyobyum içeriği ve düşük skandiyum konsantrasyonları bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, düşük konsantrasyonlarda hafif ve ağır nadir toprak elementleri de bulunmaktadır. Ancak bu konsantrasyonlar, nadir toprak elementlerini geri kazanmak için ek işleminin öngörülebilir gelecekte ekonomik olma ihtimalinin düşük olduğunu göstermektedir [9].

Chen ve arkadaşları, 2022 yılında ‘Extraction and Utilization of Valuable Elements from Bauxite and Bauxite Residue: A Review’ isimli makaleyi yayınlamıştır. Alümina üretiminde boksit kalıntısı önemli miktarlarda değerli elementler içermektedir ve bu da onları potansiyel bir polimetalik kaynağı yapmaktadır. Bu temel bileşenlerin geri kazanımının, çevresel etkiyi azaltırken alümina üretim sürecindeki verimliliği büyük ölçüde artırabileceği belirtilmiştir [10].



**Şekil 1.** Bayer yönteminin proses akış diyagramı [10].

Şu anda, alümina endüstrisinin sürdürülebilir gelişimine yönelik araştırmalar, esas olarak boksit kalıntılarının çevreye zararsız şekilde işlenmesine, demir ve alüminyum kaynaklarının geri kazanılmasına odaklanmaktadır. Boksit kalıntısından değerli elementlerin geri kazanılması sürecinde, şu anda esas olarak hidroklorik asit, sülfürik asit, nitrik asit vb. içeren asit liç proses yöntemleri kullanılmaktadır. Nitrik asit oldukça aşındırıcı olması sebebi ile genel olarak hidroklorik asit veya sülfürik asit liçi kullanır [10].

Zhu ve arkadaşları (2015), boksit kalıntısından titanyumu ekstrakte etmek için asit liçi yöntemini kullanmıştır. Üç farklı liç reaktifi (sülfürik asit, hidroklorik asit ve nitrik asit) ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuca göre, sülfürik asidin titanyum ekstraksiyonu için en iyi liç bileşeni olduğu gözlemlenmiştir. Titanyumun liç oranının, 1 saat boyunca %40'lık bir sülfürik asit konsantrasyonunda, 100°C'lik bir liç sıcaklığında ve 6:1'lik bir sıvı-katı oranında %90'a ulaşabildiği saptanmıştır. Jiang ve arkadaşları (2011), hammadde olarak alümina fabrikasının iki bileşenli klinker yakma işleminden elde edilen boksit kalıntısını kullanarak, boksit kalıntısından metalik skandiyum ve titanyumu ekstrakte etmek için bir yöntem bildirmiştir. BK, %80 - %90 sülfürik asitle üç kez asitle yıkanmıştır sonrasında demir tozuyla indirgenerek demir kristalleştirilmiştir. Ardından  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  formunda çöktürülmüştür ve yıkanıp kurutulmuştur. Bu yöntem karmaşıktır, ancak titanyum, skandiyum, demiri geri kazanma avantajına sahiptir. Zhang ve arkadaşları (2017), yüksek demirli trihidrat boksit tipi boksitten galyum liçi için sodyum kavurma-yüksek basınçlı alkali liç yöntemi kullanmıştır. Kavurma sıcaklığı 1000°C ve kavurma süresi 60 dk olarak belirlenmiştir. Sodyum karbonat oranı %100, liç sıcaklığı 160°C, liç süresi 120 dk, NaOH konsantrasyonu %15 ve sıvı-katı oranı 15 olarak belirlenen koşullarda galyumun liç oranı %91,25'e ulaşmıştır. Li ve arkadaşları (2014), Henan Eyaletindeki düşük dereceli lityum içeren bir kil cevheri için %95,32'lik lityum liç oranı elde etmek için birincil kavurma prosesini kullanmıştır. Boksit ile ilişkili lityumun ekstraksiyonu özelinde daha az sayıda çalışma literatürde bulunmaktadır. Zhang ve arkadaşları (2020) Henan Eyaletinde lityum içeren boksiti ilk olarak alüminyum ve lityum için ayrı ayrı yüzdürme işlemiyle zenginleştirmiştir. %61,72  $Al_2O_3$  ve 11,45 Al-Si olan bir konsantre boksit ürünü ve ayrıca lityum açısından zengin bir konsantre elde etmişlerdir [10].

#### **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

##### **1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**



Metalurji ve malzeme mühendisleri, maden/cevher hazırlama mühendisleri, alüminyum işletme mühendisleri, makine mühendisleri, kimya mühendisleri/kimyasal karakterizasyon uzmanları, kimyasal madde, enerji, gübre, çimento üreticileri ve birincil alüminyum üreticileri bir araya gelerek çalışabilirler.

**1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi**

Metalurji ve malzeme mühendisleri, maden/cevher hazırlama mühendisleri, alüminyum işletme mühendisleri, kimya mühendisleri/kimyasal karakterizasyon uzmanları, çevre mühendisleri, elektrik – elektronik mühendisleri, makine mühendisleri, enerji üreticileri ve birincil alüminyum üreticileri bir araya gelerek çalışabilirler.

**1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Metalurji ve malzeme mühendisleri, maden/cevher hazırlama mühendisleri, alüminyum işletme mühendisleri, kimya mühendisleri/kimyasal karakterizasyon uzmanları, birincil alüminyum üreticileri bir araya gelerek çalışabilirler.

**E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması**

**1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

Öncelikli alanlarda Ar-Ge proje desteği kapsamında üniversite-sanayi iş birliği ile pilot tesis kurulmasına yönelik sürdürülebilir bir iş birliği modeli gerekmektedir.

**1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi**

Öncelikli alanlarda hem laboratuvar hem de pilot ölçekte Ar-Ge proje destekleri ile Üniversite-Sanayi iş birliği modeli gerekmektedir.

**1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Öncelikli alanlarda Ar-Ge proje desteği ile Üniversite-Sanayi iş birliği ile pilot tesis kurulmasına yönelik sürdürülebilir bir iş birliği modeli gerekmektedir.

## **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

### **1.1.a. Alüminyum ve alümina üretimi için halihazırda kullanılmayan hammaddelerin (Diasporit boksit, Alunit, Kil gibi) kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

Pilot ölçek için orta / uzun vade gerekmektedir ve bütçe olarak proje başına yaklaşık 110 Milyon TL gerekmektedir.

### **1.1.b. Hidro ve pirometalurjik prosesler ile pilot çalışmalar gerçekleştirilmesi ve halihazırda gerçekleştirilen proseslerin iyileştirilmesi**

Laboratuvar ölçeğindeki çalışmalar için kısa vade ve proje başına 15 milyon TL destek gerekmektedir.

Pilot ölçek için orta / uzun vade gerekmektedir ve bütçe olarak yaklaşık 150 Milyon TL gerekmektedir.

### **1.1.c. Alümina üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerin (Lityum, Galyum, Stronsiyum gibi) elde edilmesine yönelik yöntemlerin geliştirilmesi**

Pilot ölçek için orta / uzun vade gerekmektedir ve bütçe olarak yaklaşık proje başına 140 Milyon TL gerekmektedir.

## **G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar**

Hammadde kaynaklarının MTA ile iş birliğinde detaylı etüdü (örn. görünür ve muhtemel rezervlerin tespiti).

## **Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler**

Gelişmelere göre mevzuatın da güncellenmesi çalışmaları sürdürülmelidir.

### **Teknik Altyapılar**

Enerji ve altyapı konusunda yeterliliğin sağlanması / destek olunması; laboratuvar test ve karakterizasyon sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

### **İnsan Kaynakları**

Bu konuda uzmanlaşmış akademik ve saha personeli sayısı yeterli değildir. Arttırılması teşvik edilmelidir. Özellikle AB Yeşil Mutabakatı ve alüminyum üretimi konusunda yüksek lisans ve doktora çalışmaları teşvik edilmeli ve yapılacak tezler desteklenmelidir.

Firmaların bünyesinde çalışan mühendislerin bu konu kapsamında özel olarak eğitimler verilmesi yoluyla sistemin iyileştirilmesi sağlanabilir.

Projelerin tamamlanmasıyla birlikte bu alanlarda uzmanlaşmış akademisyenler (yüksek lisans, doktora ve doktora sonrası araştırmacı) ile ortak çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Projelerde yer alacak bursiyerlerin burs ve özlük haklarının arttırılması gerekmektedir.

### **Destek ve Teşvikler**

Pilot ölçekli tesislerin kurulabilmesi için Ar-Ge teşviklerinin verilmesi,

Pilot ölçekli tesislerin kurulması için gerekli olan makine ekipman yurt dışından gelmesi durumunda gümrük muafiyeti ve KDV istisnası vb. vergi muafiyetlerinin sağlanması.

**Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.**

**1.2. Alüminyum üretim prosesinde yenilikçi proseslerin geliştirilmesi ve entegrasyonları**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar**

## Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.

### 1.2. Alüminyum üretim prosesinde yenilikçi proseslerin geliştirilmesi ve entegrasyonları

#### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

#### ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

##### 1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar

Günümüzde, birincil alüminyum üretimi alüminyum elektroliz hücrelerinde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem Hall-Heroult olarak isimlendirilmektedir ve elektroliz için karbon esaslı anot ve katotlar kullanılmaktadır. Alüminyumun redüksiyonu esnasında, yüksek verimli katodik biriktirme, anot-katot mesafesini en aza indirmek ve tamamen sıvı alüminyum ile ıslatabilmek için ıslanabilir bir katot gereklidir [11].

Hall-Heroult prosesi, yüksek enerji tüketimi ve yüksek miktarlarda karbondioksit ve sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Bu yöntem yerine alternatif yöntemler üzerine çalışmalar yapılmaktadır ve hatta bazı pilot tesisler kurulmuştur. Ancak, bu yöntemlerin endüstriyel uygulama alanı bulma konusunda oluşan sorunlar nedeni ile araştırmalar elektroliz yönteminin performansını artırma yönünde yoğunlaşmıştır. Sürdürülebilirlik açısından bakıldığında enerjinin verimli ve çevreyi kirletmeden tüketilmesi de “temiz” ve “ucuz” enerji temini kadar önem arz etmektedir. Elektroliz yöntemine yapılacak optimizasyonlar da bu açıdan önemlidir. Ayrıca, alüminyum üretim teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, küresel ölçekte bütün katma değerli metallerin sürdürülebilir üretiminde de yol gösterebilir [11,12].

Birincil alüminyum üretim teknolojilerinde inert anot kullanımı ile;

- CO2 salınımı azaltılabilir ya da tamamen ortadan kaldırılabilir,
- Anot etkisi ortadan kaldırılabilir ve
- PFC (perflorokarbon) gazlarının salınımı engellenebilir.

Bunlara ek olarak, inert anot kullanımı ile karbon anot üretimine gerek kalmayacağından yeni birincil alüminyum tesislerinin yatırım maliyetleri ve anot değişimi ve üretimi olmadan üretim maliyetleri de düşecektir. Ancak, inert anot teknolojisindeki kritik nokta anot malzemesinin ne

olacaktır. Çünkü anot malzemesinin hem elektriği iletebilmeli hem yüksek oksidasyon direncine sahip olmalı ve hem de kriyolit esaslı elektrolit banyosu içinde çözünmemelidir [12].

## **B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri**

### **1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar**

Dünya’da THS 6; Türkiye’de THS 2-3’tür.

## **C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

### **1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar**

Alcoa ve Rio Tinto liderliğindeki ELYSIS, inert anot teknolojisinin ilk ticari ölçekli prototip hücrelerinin yapımına başlamıştır. ELYSIS ile alüminyum ergitme işleminden kaynaklanan tüm doğrudan sera gazlarının ortadan kaldırılması için büyük bir adım atılmıştır. Bu teknoloji, karbon ayak izinde önemli bir azalma ile alüminyum endüstrisinde yeni bir çağ açma potansiyeline sahiptir. İnert anot prototip hücrelerinin, 450 kiloamperlik (kA) elektrik akımı kullanması ve büyük modern alüminyum izabe tesislerine özgü ticari ölçekte çalışması planlanmıştır [13].

KCL Enterprises (ABD), ‘Method for fabricating a dense, dimensionally stable, wettable cathode substrate in situ’ patenti yayınlamıştır. Alüminyum üretmek için bir elektrolitik hücrede kullanıma uygun bileşimler için çalışma yapılmıştır. Bor oksit, titanyum dioksit, alüminyum ve titanyum diborür oluşan bir toz karışımı katot yüzeyi olarak düzenlenmiştir. Bor oksit ve titanyum dioksit, titanyum diborit (TiB<sub>2</sub>) üretmek için düşük sıcaklıkta erimiş alüminyum altında reaksiyona sokulmuştur. Reaksiyon sonucunda, ıslanabilir bir katod substratı elde edilmiştir. Alcoa Inc. (ABD), ‘Composition for making wettable cathode in aluminum smelting’ isimli patentinde ıslatılabilir katot üzerine çalışma yapmıştır. Alüminyum elektroliz hücrelerinde kullanılacak ıslatılabilir katotlar için bileşimler için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Belirlenen bileşim TiB<sub>2</sub> ve metal katkı maddelerini içermektedir. Elysis Limited Partnership (Canada), alüminadan alüminyum üretimi için dikey olarak yönlendirilmiş inert anot modülü üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. İnert anot için ticari düzeyde kullanıma uygun prototip uygulaması yapmıştır. Aluminium Corporation of China Limited (Çin), inert anotlar kullanarak birincil

alüminyum üretmek için bir elektrolitik hücre üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elektrolit sistemi  $KF-NaF-AIF$  içermektedir ve hücrenin çalışma sıcaklığı 700-850 °C'dir.

Bu hususta, Türkiye'de başarılı örnek ve girişimler henüz bulunmamaktadır.

#### **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

##### **1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar**

Metalurji ve malzeme mühendisleri, alüminyum işletme mühendisleri, kimya mühendisleri / kimyasal karakterizasyon uzmanları, makine mühendisleri, elektrik ve elektronik mühendisleri, ileri seramik malzeme üreticileri ve birincil alüminyum üreticileri bir araya gelerek çalışabilirler.

#### **E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması**

##### **1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar**

Öncelikli alanlarda Ar-Ge proje desteği kapsamında üniversite-sanayi iş birliği ile laboratuvar ölçeğinde ve pilot tesis kurulmasına yönelik sürdürülebilir bir iş birliği modeli gerekmektedir.

#### **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

##### **1.2.a. Elektroliz proseslerinde inert anotlar ve ıslatılabilir katotların kullanımına yönelik proseslerin geliştirilmesi ve üretime entegrasyonuna yönelik pilot uygulamalar**

Laboratuvar ölçeğindeki çalışmalar için kısa vade ve proje başına 20 milyon TL destek gerekmektedir. Pilot ölçek için uzun vade gerekmektedir ve bütçe olarak proje başına yaklaşık 200 Milyon TL destek gerekmektedir.

## **G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar**

Anot ve katotlarda kullanılacak ileri seramiklerin üretilmesi kritik husus olarak karşılaşılabılır.

### **Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler**

Gelişmelere göre mevzuatın da güncellenmesi çalışmaları sürdürülmelidir.

### **Teknik Altyapılar**

Enerji ve altyapı konusunda yeterliliğin sağlanması / destek olunması; laboratuvar test ve karakterizasyon sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

### **İnsan Kaynakları**

İlgili Ar-Ge ve yenilik konusunda uzmanlaşmış akademik ve saha personeli sayısı yeterli değildir. Arttırılması teşvik edilmelidir. Özellikle AB Yeşil Mutabakatı ve alüminyum üretimi konusunda yüksek lisans ve doktora çalışmaları teşvik edilmeli ve yapılacak tezler desteklenmelidir.

Firmaların bünyesinde çalışan mühendislerin bu konu kapsamında özel olarak eğitimler verilmesi yoluyla sistemin iyileştirilmesi sağlanabilir.

Projelerin tamamlanmasıyla birlikte bu alanlarda uzmanlaşmış akademisyenler (yüksek lisans, doktora ve doktora sonrası araştırmacı) ile ortak çalışmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Projelerde yer alacak bursiyerlerin burs ve özlük haklarının arttırılması gerekmektedir.

### **Destek ve Teşvikler**

Pilot ölçekli tesislerin kurulabilmesi için Ar-Ge teşviklerinin verilmesi,

Pilot ölçekli tesislerin kurulması için gerekli olan makine ekipman yurt dışından gelmesi durumunda gümrük muafiyeti ve KDV istisnası vb. vergi muafiyetleri.



## Referanslar

- [1] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Dünya'da ve Türkiye'de Alüminyum Raporu, 2018.
- [2] VAMI. <https://rusal.ru/en/innovation/research-centres/vami/>.
- [3] <https://www.soperiorfertilizer.com/>.
- [4] Critical and Strategic Metals in Greenland. <https://hudsonresourcesinc.com/>.
- [5] <https://www.altechadvancedmaterials.com/>.
- [6] Aluminium chloride process. <https://rusal.ru/en/innovation/technology/acid-technology/>.
- [7] Andromeda to acquire Minotaur and create leading Australian entity. <https://www.andromet.com.au/news/andromeda-to-acquire-minotaur-and-create-leading-australian-entity/>.
- [8] Tunç, T., Apaydin, F., Yıldız, K. 2014. Structural alterations and thermal behaviour of mechanically activated alunite ore. *J Therm Anal Calorim* 118, 883–889. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3918-9>.
- [9] Gosen S. B., Choate, L. M. 2021. Reconnaissance Study of the Major and Trace Element Content of Bauxite Deposits in the Arkansas Bauxite Region, Saline and Pulaski Counties, Central Arkansas. <https://doi.org/10.3133/ofr20211073>.
- [10] Chen, Y., Zhang, Ta., Lv, G. et al. 2022. Extraction and Utilization of Valuable Elements from Bauxite and Bauxite Residue: A Review. *Bull Environ Contam Toxicol* 109, 228–237. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03502-w>.
- [11] Padamata, S.K., Singh, K., Haarberg, G.M. et al. 2022. Wettable TiB<sub>2</sub> Cathode for Aluminum Electrolysis: A Review. *J. Sustain. Metall.* 8, 613–624. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00526-8>.
- [12] Birincil Alüminyum Üretimi “Devrimin” Arefesinde. <https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/94/birincil-aluminyum-uretimi-devrimin-arefesinde.html>.
- [13] ELYSIS - Start of Construction of Commercial-Scale Inert Anode Cells, 2021. <https://news.alcoa.com/media-center/alcoa-in-the-headlines/alcoa-in-the-headlines-details/2021/ELYSIS-Additional-20-million-in-federal-funding/default.aspx>.

**Teknolojik Hedef 2:**

**İKİNCİL ALÜMİNYUM ÜRETİMİNDE HURDA AYIKLAMA,  
HAZIRLAMA VE VERİMLİLİK ARTIŞI**

İkincil alüminyum üretiminde **hurda ayıklamaya ve verimliliği artırmaya yönelik** yöntemlerin geliştirilmesi

**Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.**

**2.1. İkincil Alüminyum üretiminde, alüminyum hurda ayıklama ve hazırlama için yenilikçi teknolojilerin/yöntemlerin geliştirilmesi ve üretim sürecine entegrasyonları**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi**

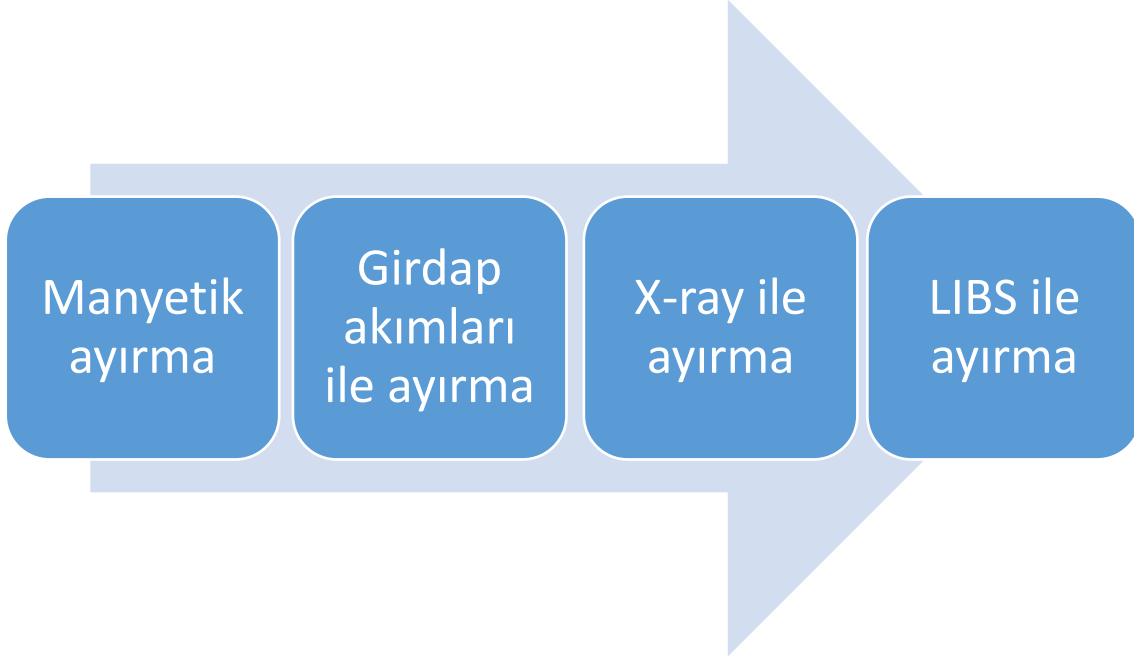
**2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi**

### Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.

#### 2.1. İkincil Alüminyum üretiminde, alüminyum hurda ayıklama ve hazırlama için yenilikçi teknolojilerin/yöntemlerin geliştirilmesi ve üretim sürecine entegrasyonları

##### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Alüminyum hurda ayrıştırmada kullanılan mekanik bazlı, sensör bazlı ve spektroskopi yöntemleri Şekil-1’de verilmiştir. Alüminyum sektöründeki en kritik ürünlerden birisi hurda ayrıştırmada kullanılan X-ışını floresans spektroskopisi (XRF), X-Ray transmission (XRT) yöntemi ve lazer oluşturmali plazma spektroskopisi (LIBS) yöntemleridir.



**Şekil 1:** Hurda ayrıştırma yöntemleri gelişimi (Rombach ve Bauerschlag, 2019).

Ülkemizdeki temel problem hurda ayrıştırma teknolojilerinin yaygın olarak kullanılmaması ve kullanılan sistemlerin ise ithal ürün olmasıdır. Bu nedenle sistemlerin kullanımının yaygınlaşması için teknolojinin yerleşmesi esastır.

Hurdaların ayrıştırılmasından sonra hurdalar doğrudan fırına şarj edilememektedir. Hurda yüzeyinde bulunan boya ve lakların giderilmesinden sonra fırına şarj edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle lak alma fırınlarında ısıl işleme tabi tutularak döner tip fırınlarda temiz hurda elde

edilmektedir. Ancak yüksek optimum kapasite üretim yapabilecek lak fırınları ülkemizde üretilmemektedir.

## ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

### 2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi

- Hedeflenmesi gereken yenilikçi özellikler ve performans
  - (1) Termal lak-boya gidermede ortaya çıkan gazların kontrolü
  - (2) Termal lak-boya gidermeye uygun / çevreci lak-boya sistemlerinin geliştirilmesi
  - (3) Organik kirlilik (lak-boya, selüloz, plastik vb.) içeren hurdalardan enerji üretimi

Alüminyum kullanılmış içecek kutuları (KİK), yukarı akış ikincil alüminyum üretiminde alüminyum üretmek için en önemli kaynaklardan biridir. İçecek kutuları, görsel kalite ve altındaki metal üzerinde koruma sağlayan organik bazlı boya ve lak katmanlarına (uçucu organik bileşikler: UOB; volatile organic compounds: VOC) sahiptir. KİK geri dönüşümünde bir seçenek, özel olarak dizayn edilmiş fırınlarda yüksek sıcaklıklarda piroliz ile kaplama giderme işleminden sonra ergitme uygulamasıdır. Diğer bir seçenek ise, KİK'lerin kaplama giderme işlemleri olmaksızın doğrudan ergitilmesidir. Literatürde ve endüstriyel uygulamada bildirildiği gibi, KİK'lerin kaplaması alınmadan doğrudan ergitme, alüminyum metalinin kaybına neden olur. Doğrudan ergitme genellikle ikincil alüminyum tesisleri tarafından döner fırınlar kullanılarak gerçekleştirilir. Döner fırınlar, özellikle UOB içeren alüminyum hurdalarının ergitilmesinde üç nedenden dolayı tercih edilir; (1) lak-boya giderme için ilave yatırıma gerek duyulmaması, (2) çeşitli hurda türlerinin (ve bunların karışımlarının), herhangi bir hurda hazırlama aşaması olmaksızın döner fırınlar vasıtasıyla ergitilebilmesi ve (2) UOB'lerin yakılması ile üretilen enerjinin de fırının enerji balansına pozitif katkı sağlaması.

Ayrıca, her yıl 180 milyar alüminyum içecek kutusunun üretildiğini (2,5 milyon tondan fazla alüminyum) düşündüğümüzde, KİK'lerin geri dönüştürülmesinin önemini açıkça görülmektedir.

Ergitme öncesinde UOB'lerin pirolizi, inklüzyon oluşumuna da engel olmaktadır. Kaplama giderme işlemi, özellikle büyük ölçekli tesislerde özel fırınlarda ve kontrollü atmosfer altında yapılır. Başlıca avantajları; ergitmede metal kazanım veriminin artması, nemin uzaklaştırılarak takip eden ergitme kademesinde olası patlamaların önüne geçilmesi, ergitmede oluşan baca gazının daha temiz olması, ergitmede daha az cüruflaştırıcı kullanımı ve ergitme sonucunda daha az cüruf oluşumudur. Kaplama gidermenin tüm bu avantajları ile beraber en büyük dezavantajı ise işlemin yatırım ve işletme maliyetleridir. Ayrıca, kaplama giderme hususunda öne çıkan konu, dikey boya-lak giderme sistemleridir.

Döner fırınlar, kaplama giderme için yeterli alt yapıya sahip olmayan tesislerde doğrudan ergitme yoluyla KİK geri dönüşümü için kullanılır. Döner fırınlarda ilk olarak KİK hurdaları, ergitme sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara kadar adım adım ısıtılır. KİK hurdalarının doğrudan ergitilmesi için dikkat edilmesi gereken bazı parametreler aşağıda sıralanmaktadır:

- Proses sıcaklığı,
- Fırındaki oksijen konsantrasyonu,
- İşlem süresi,
- Gaz-metal teması.
- Hurda boyutu

KİK'lerin döner fırın ile gerçekleştirilen doğrudan ergitme işleminde en büyük dezavantaj, UOB'lerin yanmasından kaynaklanan metal kaybıdır. Yanma, alüminyumun oksitlenmesine (ve cüruf fazının oluşmasına) neden olur ve geri dönüşü olmayan bir reaksiyondur. Alüminyumun en kararlı oksidi  $Al_2O_3$ 'tür ve alüminyumun oksidasyonu oldukça ekzotermiktir.

### **2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi**

#### **Sensör bazlı hurda ayırma işlemlerinin geliştirilmesi**

Hat üzerinde elementel analiz yapacak olan XRT, XRF ve LIBS sistemlerinin yerli olarak üretilmesi öncelikli alanda değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sistemlerin endüstriyel olarak yüksek hızda çalışabilmesi için çeşitli yazılımların geliştirilmesiyle birden fazla alaşım bazında analiz yapabilme özelliği geliştirilmelidir.

## **B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri**

### **2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi**

Hurda hazırlama yöntemleri aşağıda dünyada ve ülkemizdeki durumu THS'lerine göre sıralanmıştır:

#### Dünyada

Lak/boya giderme sistemleri: THS 9

Dikey lak/boya giderme sistemleri: THS 6

Direkt ergitme: THS 9

#### Türkiye’de

Lak/boya giderme sistemleri: THS 5

Dikey lak/boya giderme sistemleri: THS 2-3

Direkt ergitme: THS 9

#### **2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi**

Hurda ayrıştırma teknolojileri ile ilgili dünyada TOMRA, Steinert, Redwave gibi firmalar tarafından geliştirilen sistemler ticari olarak kullanılmaktadır ve THS 8’dir. Ancak bu sistemlerdeki temel problem kapasitenin alüminyum üretim tesisleri için yetersiz kalmasıdır. LIBS’te alaşım bazında %80’e kadar ayrıştırma yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra ülkemizde XRF, XRT ve LIBS gibi teknolojiler hakkında üretilmiş ve piyasaya sunulmuş ticari ürün bulunmamaktadır. Yüksek teknoloji içeren bu ürünlerin yerli olarak üretilmesi elzemdir. Türkiye’de THS 4’tür.

#### **C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

##### **2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi**

#### Dünyada

INSERTEC Furnaces & Refractories (İspanya)

GUILLESPIE POWER

SANKEN INC

THORPE TECHNOLOGIES

Mechatherm- (Birleşik Krallık)

#### Türkiye’de

Sistem Teknik Endüstriyel Fırınlar LTD.

**2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi**

Dünyada Steinert, Tomra ve Redwave gibi firmalar X-ışını ve lazer oluşturmali spektroskopi yöntemleri ile ilgili hurda ayrıştırma sistemlerini üretmektedir. Ülkemizde bu yöntemler ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

**D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

**2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Endüstri Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği, Alüminyum Teknoloji Sağlayıcısı Firmalar, Alüminyum Üreticileri, TALSAD, GALSIAD.

**2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi**

Fizik bölümü, Fizik Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği, Elektronik Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği, Mekatronik Mühendisliği, Alüminyum Teknoloji Sağlayıcısı Firmalar, Alüminyum Üreticileri, Geri Dönüşüm firmaları.

**E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması**

**2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi**

Öncelikli alanlarda üniversite-sanayi iş birliği ve siparişe dayalı Ar-Ge projelerinde ise orta ve büyük ölçekli projeler gerekmektedir. Kümelenmelere imkân vermelidir.

**2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi**

Öncelikli alanlarda üniversite-sanayi iş birliği ile orta ve büyük ölçekli projeler gerekmektedir. Kümelenmelere imkân vermelidir.



## F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

### 2.1.a. Isıl hurda hazırlama yöntemlerinin (Döner ya da akışkan yatak, lak ve boya giderme gibi) geliştirilmesi

Kaplama giderme sistemlerinin geliştirilmesi için orta vadeli (3-5 yıl) projeler ile 40 milyon TL / proje bütçe gerekmektedir.

KİK'lerin döner ergitme fırında direkt ergitilmesine uygun döner fırın sistemlerinin geliştirilmesi ve ortaya çıkan öz ısının (Eng. self-heat formation) değerlendirilmesine ilişkin projeler için kısa vadeli (1-3 yıl) projeler ile 10 milyon TL / proje bütçe gerekmektedir.

### 2.1.b. Alaşım özelinde hurda ayırma teknolojilerinin (Sensör bazlı hurda ayırma, x-ışınları gibi) geliştirilmesi

Orta ve uzun vadede bu sistemlerin geliştirilmesi için 20 M TL/proje gerekmektedir. Spektrometre ve lazer kaynağının yerleşmesi projeye dahil edilirse 50 M TL/proje bütçe gerekmektedir.

## G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Özellikle spektroskopi geliştirme çalışmalarında yerli lazer ve spektroskopi geliştirilmesi için destek verilmesi gerekmektedir.

Ülkenin stratejik bir çalışma (güdümlü proje) olarak değerlendirmesi ve bunun üzerine ağırlık vermesi gerekmektedir.

Kullanılmış içecek kutularının raf ömrü ~2 aydır. Özellikle KİK'ler için otomatların kurulması ile daha hızlı ve yüksek oranda hurda toplama gerçekleştirilebilir.

Devlet tarafından çeşitli regülasyonların oluşturulması gerekir.

### Alüminyum hurda hazırlama sektörünün döngüsel ekonomiyi etkin kullanacak şekilde ortak kullanıma açık ve ölçeklendirilebilir şekilde desteklenmesi

Kullanılmış içecek kutuları (KİK) toplamada Türkiye'nin oranı %75, ABD %51 (bugün yasal düzenleme ile %80 olmuştur), AB %68, Fransa %40'dir. Avrupa Alüminyum Cemiyeti 2020 için %80 KİK toplamayı öngörmektedir. Kutular için en düşük hurda toplama ve geri dönüşüm oranı

## TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Alüminyum Sektörü, 2023

%6 ile Körfez Ülkelerinde, en yüksek değer ise %98 ile Brezilya'dadır (Çin'de kayıtsızlarla birlikte oran %99,5'dir). Japonya ise bu oranı %95'dir. Ülkemizde 2000'li yılların başında %50'lerde olan KİK geri dönüşüm oranları bugün itibariyle %75'leri aşmıştır, bu oranın %90 üstü olması elzemdir. Öncelikli hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- (1) Geri dönüştürülebilir ürün ve alayım tasarımı
- (2) Hazırlanmış hurdaya olan talebin artırılması (işletme bazında)
- (3) Tüketici davranışlarının değıştirilmesi için ilkokul çağında eğitim programları oluşturulmalıdır.
- (4) Depozito sistemi yaygınlaştırmalıdır.
- (5) Özellikle işlem alayımalarında hurda kullanımının özendirilmesi ve önde gelen firmaların öncülük etmesi
- (6) Belediyelerdeki çöp yakma prosesi atıklarının değeriendirilmesi (bottom-ash)
- (7) Yurt içindeki hurda miktarlarının kayıt altına alınması gerekmektedir.
- (8) Hurda ihracatının yasaklanması gerekmektedir.
- (9) Katma değeri yüksek ikincil ürün ithalatı kolaylaştırılmalıdır.

### **Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler**

Mevzuatta engelleyici bir unsur bulunmamaktadır.

### **Teknik Altyapılar**

Ülkemizdeki üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterlidir.

### **İnsan Kaynakları**

Ülkemizdeki uzmanlaşmış akademik ve saha personeli sayısı yeterli değildir. Arttırılması teşvik edilmelidir. Özellikle AB Yeşil Mutabakatı ve alüminyum üretimi konusunda yüksek lisans ve doktora çalışmaları teşvik edilmeli ve yapılacak tezler desteklenmelidir. Üniversitelerde araştırma projelerine katılacak yüksek lisans, doktora, doktora sonrası seviyelerdeki araştırmacıların burs ve özlük haklarının iyileştirilmesi gerekmektedir.

Firmaların bünyesinde çalışan mühendislere, bu konu kapsamında özel olarak eğitimler verilmesi yoluyla süreçlerin iyileştirilebileceği öngörülmektedir.

Sekonder alüminyumun imalatı konusunda İşkur, Kalkınma Ajansları ya da MEB üzerinden mesleki yetkinlik desteği sağlanabilir.

**Destek ve Teşvikler**

Ar-Ge projelerinde kullanılacak alet ve teçhizatlardan ithalat yoluyla temin edilecek olanlarının ithalat vergi istisnasına tabi tutulması gerekmektedir.

Geri dönüşümün artırılması konusunda hurda toplamanın teşvik (bilinçlendirme, vergi indirimi, dönüşüme uygun bina tasarımları vb.) edilmesi gerekmektedir.

**Kritik Ürün/Teknoloji 2.2.**

**2.2. İkincil Alüminyum üretiminde enerji verimliliğini artırmaya yönelik proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

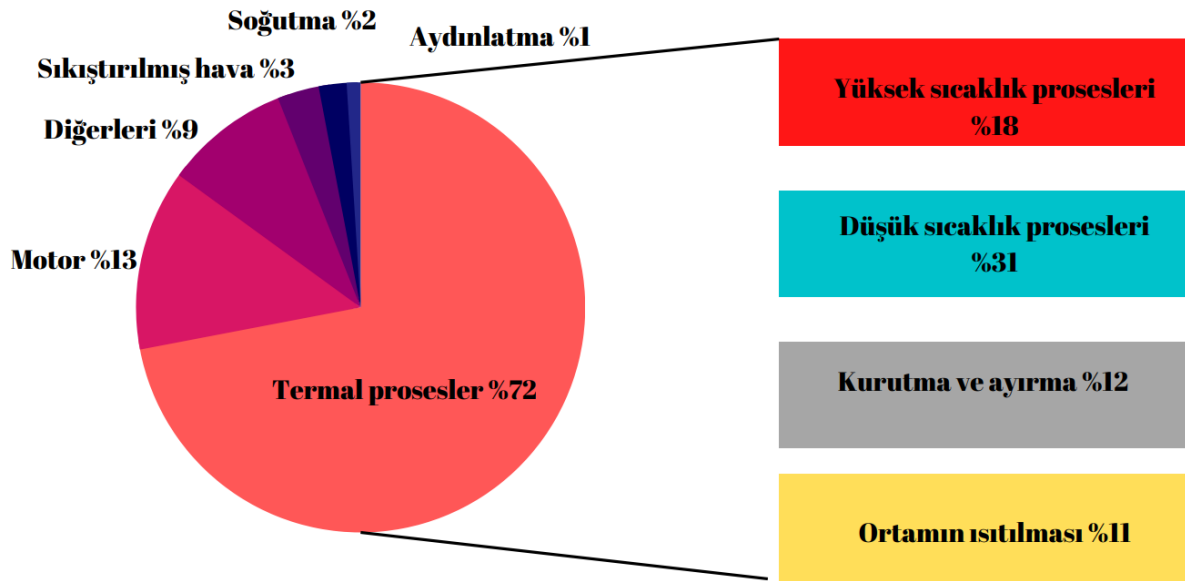
**2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

## Kritik Ürün/Teknoloji 2.2.

### 2.2. İkincil Alüminyum üretiminde enerji verimliliğini artırmaya yönelik proseslerin ve yöntemlerin geliştirilmesi

#### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

İngiltere’de toplam enerji tüketiminin %17’si imalat sektörü tarafından kullanılmaktadır. İmalat sektöründe ise en büyük enerji kullanımı %72’si termal proseslerde olduğu görülmektedir (Şekil-2). Kullanılan enerjinin ~%20’sinin yeniden kullanımı ile yıllık 40 TWh bir kazanç sağlanacağı ön görülmüştür. Ülkemizde de en büyük problemden biri enerji verimliliği düşük sistemlerin kullanımından dolayı etkin enerji kullanımının düşük olmasıdır. Bu nedenle enerji verimli sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye için bir herhangi bir veri tespit edilememiştir. Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik gereği, 1000 TEP ve üzeri tüketimi olan alüminyum tesislerinden de enerji tüketimine ilişkin bilgi toplanmaktadır. Yeni portalin devreye alınması ile sektörde tüketilen enerjinin dağılımına ilişkin bilgi düzenli olarak elde edilecektir.



Şekil 2: İngiltere’de imalat sektöründe enerji tüketim oranları (Jouhara vd., 2018).

## ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

### 2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi

Tasarım kaynaklı ve proses kaynaklı meydana gelen enerji kayıpları aşağıda sıralanmıştır. Bu konuları ile ilgili yapılacak çalışmalar öncelikli alan konusudur.

#### Tasarım kaynaklı ve Proses kaynaklı

- (1) Metal / enerji verimi, düşük karbon salınımı (Kapsam 1), yüksek ergonomi ve iş-işçi sağlığı güvenliği.
- (2) Alternatif yakıt kullanımı (hidrojen, piroliz gazı vb.)
- (3) Hammaddeye uygun fırın seçimi
- (4) Fabrika içi trafik
- (5) Operasyonel verimlilik (ölü zaman tanımı, kayıt tutma, tutulan kayıtların makine öğrenmesine entegrasyonu vb.)
- (6) Isı transferinin iyileştirilmesi (pompalar vb.)
- (7) Metal besleme sistemlerinin geliştirilmesi
- (8) Flaks seçimi, kullanımı ve dizaynı (inert flaks ile üretim dahil)
- (9) Atık ısı kullanımı
- (10) Makine öğrenmesi ile enerji verimliliğinin artırılması
- (11) Değişik fırın tiplerinden verinin toplanması, doğrulanması ve analizinin yapılması

### 2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi

- (1) Uygun frekans seçimi
- (2) Refrakter seçimi
- (3) Bobin soğutmanın alternatif yolları
- (4) Tesis içi trafik optimizasyonu
- (5) Kısmi kristalizasyon
- (6) Çift-potalı ergitme sistemlerinin uyarlanması
- (7) İndüksiyon ile ergitmeye uygun hammadde standartlarının geliştirilmesi

## **B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri**

### **2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Alüminyum sektörü için tasarlanan ergitme işlemlerinde insana bağımlı aşamaları geliştirilecek yazılım ile otomatik hale getirilmelidir. Böylece üretim izlenebilirliği sağlanırken kalite problemlerinin önüne geçilebilecektir. Ayrıca sürekli baca gazı analizleri ve yakıt/hava parametre ayarının optimize edilmesi ile karbon emisyonları salınımı azaltılması hedeflenmelidir. Geliştirilecek yazılımlar ile insandan bağımsız, emisyon değerleri düşürülmüş yakıcı performansı sağlanarak verim artırılmalıdır.

Dünya’da THS 9; Türkiye’de THS 4-5’dir.

### **2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Dünya’da THS 9; Türkiye’de THS 8’dir.

## **C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

### **2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

#### Dünyada

North American, Bloom

#### Türkiye’de

Sistem Teknik Endüstriyel Fırınlar LTD.

### **2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

#### Dünyada

Inductotherm, ABB

#### Türkiye’de

5M, Inductotherm, EGES, İzomsan

## **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

### **2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Metalurji ve malzeme mühendisleri, makine mühendisleri, elektrik mühendisleri, çevre mühendisleri

### **2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Metalurji ve malzeme mühendisleri, makine mühendisleri, elektrik mühendisleri, enerji sistemleri mühendisleri.

## **E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması**

### **2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Siparişe dayalı Ar-Ge projeleri kapsamında orta-uzun vadede projeler desteklenmelidir.

### **2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Siparişe dayalı Ar-Ge projeleri kapsamında orta-uzun vadede projeler desteklenmelidir.

## **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

### **2.2.a. Yanma, yakma ve ergitme verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Yanma verimi yüksek çeşitli brülör tasarımı için orta vade 20 M TL/proje proje bütçesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra enerji verimliliği ile ilgili yazılımların geliştirilmesi için de 25 M TL bütçe gerekmektedir.



**2.2.b. İndüksiyon fırınlarında daha verimli (Frekans seçimi gibi) ve daha yüksek kapasiteli fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Orta vade hedeflenmelidir. Proje başına 15 M TL bütçe öngörülmektedir.

**G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar**

Üretilcek ve kullanılacak olan fırınlar için standartların oluşturulması gerekmektedir.

**Referanslar**

Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S. A. 2018. "Waste heat recovery technologies and applications". Thermal Science and Engineering Progress, 6(April), 268–289.

Rombach, G., Bauerschlag, N. 2019. "LIBS based sorting—a solution for automotive scrap". Minerals, Metals and Materials Series, 1351–1357.

**Teknolojik Hedef 3:**

**YARI MAMUL İŞLEMEDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ**

Yarı mamul alüminyum işlenmesinde döküm, haddeleme, ekstrüzyon, dövme, ısıtma işlem ve yüzey işlemlerinin **enerji verimliliğini artırmaya** yönelik yenilikçi uygulamaların geliştirilmesi

**Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.**

**3.1. Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, dövme, ısıtım işlem ve yüzey işlem proseslerinin enerji verimliliklerinin artırılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi**

**3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

### Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.

#### 3.1. Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, dövme, ısıtma işlem ve yüzey işlem proseslerinin enerji verimliliklerinin artırılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi

##### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Döküm yöntemi malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmakla birlikte çok farklı döküm yöntemleri bulunmaktadır. Yarı mamul ürün üretimi olarak sürekli bant döküm, ikiz merdane ile döküm, biyet döküm ve parça döküm kullanılan en yaygın yöntemleri oluşturmaktadır. Sektördeki mamul ve yarı mamul tanımının yapılması da yapılması gereklidir. Bu durumda, eğer döküm ile üretildikten sonra malzeme herhangi bir ısıtma işlemine ya da yüzey işleme tabi tutulursa yarı mamul adını almaktadır. Bu malzemenin yeni bir ürüne dönüştürülmek üzere kullanılması durumunda ise hammadde ya da mamul olarak adlandırılması söz konusudur.

**Ham madde:** İşletmede üretime giren ve üzerinde işlem yapılarak değer kazanan varlıklardır.

**Yarı mamul:** Üzerlerinde yapılması gereken işlemler henüz tamamlanmamış varlıklar.

**Mamul:** üzerinde yapılacak işler tamamlanıp satışa hazır hale getirilen varlıklardır.

Bir fabrikanın mamul üretimi bir başka fabrika için hammaddedir. Aynı durum yarı mamul için de geçerlidir. Alüminyum külçeler buna örnektir. Külçe üretim tesisi için dökülmüş külçe satışa hazırdır ve bu işletme için bu mamuldür. Ancak enjeksiyon dökümhanesi için hammaddedir.

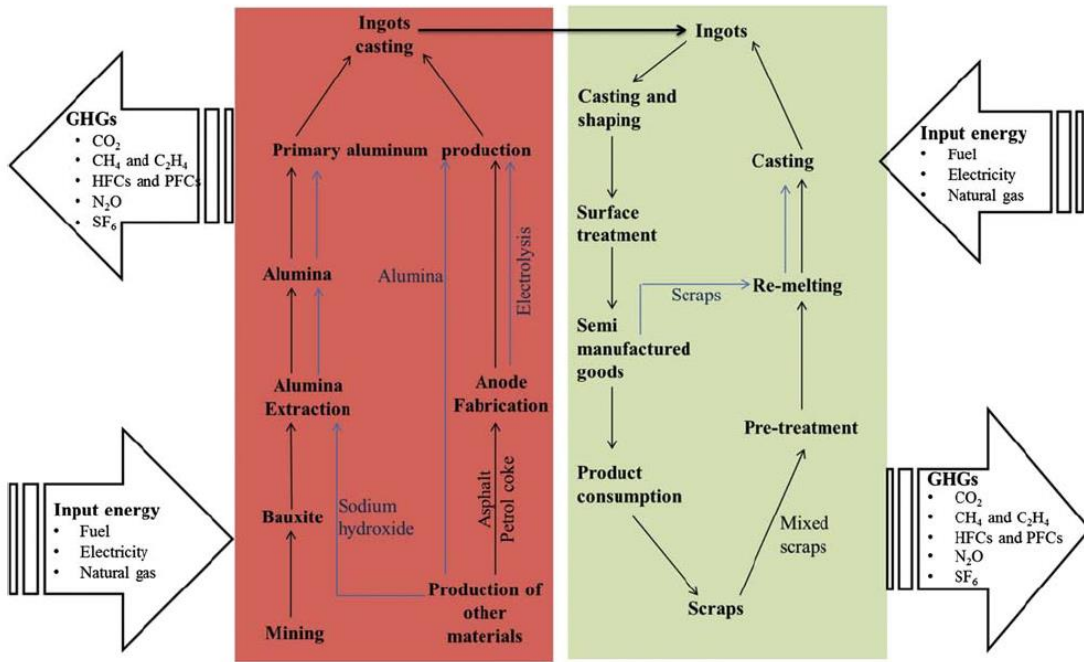
Alüminyum alaşımları, aşağıda ifade edilen ürünler şeklinde üretilmektedir.

- Sıcak ve soğuk hadde ürünü plakalar, levhalar ve bobinler
- Ekstrüzyonla elde edilen profil malzemeler
- Doğrudan döküm tekniği ile elde edilen biyet malzemeler
- Enjeksiyon ya da kalıba dökümle elde edilen parçalar
- Dövme, şekillendirme ya da talaşlı imalat ile son şekli verilen parçalar

Bununla birlikte, üretilen alüminyum alaşımlara gerekli özellikleri sağlamak için yapılan ısıtma ve yüzey işlemlerde de enerji kullanımının yüksek oranda olduğu ve yaklaşık olarak alüminyum üretiminde kullanılan enerjinin %20'sini oluşturduğu ifade edilmektedir (*REF: New Plant-Technologies for Reducing Carbon Emissions and Costs in Heat Treatment Processes of Aluminium Castings*)

TÜBİTAK'ın yönettiği bu çalışmanın temelini AB Yeşil Mutabakatı ile gündeme gelen emisyon sebebiyle oluşacak karbon ayak izi ve vergi yükü oluşturmaktadır. Bu sebeple öncelikli olarak alüminyum sektörünün yaklaşık olarak karbon ayak izinin ne olduğu, mümkünse sektörel dağılımlara göre ne olduğu konusunda bilgiler oluşturulmalıdır. Ayrıca AB'nin şu anda kendi üreticilerinden beklediği hedef karbon ayak izinin de ne olduğu belirlenmelidir. Bu konu tüm çalışmaların temelini oluşturmakla birlikte ve tüm sektörlerdeki hedef pazarın koyduğu hedeflere ulaşmak için yol haritasını oluşturmaya katkı sağlayacaktır.

Şekil 3.1'de alüminyum üretiminde ortaya çıkan karbonun iki ana alandan geldiği ifade edilmektedir. Bu alanlarda kullanılan enerjilerin fosil, elektrik ve doğal gaz kaynaklarından sağlandığı anlaşılmaktadır. Genel olarak kullanılan enerji kaynağının akaryakıt, elektrik ve doğal gaz olduğu görülmektedir. Kullanılan enerjiye bağlı olarak karbon ayak izinin miktarı da belirlenmektedir. Kullanılan enerjinin fosil yakıtlar yerine temiz enerji olarak adlandırılan rüzgar, güneş gibi enerji kaynaklarına yönelmesinin karbon salınımını azaltacağı açıkça görülmekte ve temiz enerji kaynaklarının kullanımının da teşvik edilmesi gerektiği vurgulanmalıdır.



Şekil 3.1. Alüminyum üretiminde karbon ve sera gazlarının salınımının olduğu prosesler.

## ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

### 3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi

Yarı mamul üretiminin başlangıç aşaması olarak döküm ile şekillendirme esas alındığında, alınması gereken önlemlerin aşağıdaki gibi şekillendiği görülmektedir.

Genel olarak alüminyum alaşımlarının mekanik şekil verme işlemlerinde salınan CO2 gaz miktarı:

- Dövme ve Haddeleme için : 0,56-0,62 kg/kg
- Ekstrüzyon için : 1,11-1,23 kg/kg
- Tel çekme için : 4,11-4,55 kg/kg olarak verilmektedir.

Yarı mamul işleme sürecinde, hurda ve ikincil alüminyum kullanımını artıracak alayım geliştirme çalışmalarının yapılması ve bunun paralelinde sıvı metal saflaştırma tekniklerinin geliştirilmesi ile verimliliğin artacağı beklenmektedir. Dünyada ve Türkiye'de alüminyum alaşımlarının kullanıldığı üç önemli sektör otomotiv, inşaat ve makine imalat sektörleridir. Her üç sektörde fiyat farklılığından dolayı da ikincil alüminyum kullanılma tercihi daha yüksek olmakla birlikte, birincil alüminyum isteği sadece yeteri kadar ikincil alüminyum bulunamadığı zaman gerçekleşmektedir. Buna rağmen üretim aşamasında birincil alüminyum kullanımının azalmasının sağlanması dolaylı olarak karbon salınımının azaltılmasına olumlu etki yapacaktır.

Geri dönüşüm indüksiyon fırınlarının temiz enerji ile çalıştırılması önemlidir. Tüm dünyada geri dönüşüm fırınlarının belkide %95 den fazlası, doğalgaz ve doğalgazın farklı şekilde sıkıştırılmış versiyonları (LNG, CNG) veya dökme gaz diye tabir edilen (LPG likit petrol gazı – bütan ve propan karışımı) veya propan ile ergitme yapmaktadırlar. Çünkü elektrik bir çok ülkede gaz çevrim santrallerinden üretildiği için pahalıdır. Aynı zamanda indüksiyon ergitme sisteminin ilk yatırım maliyeti çok yüksektir.

Bu çalışmaların yanı sıra müşteri beklentilerinin çevreci alüminyum alaşımlarına yönlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda verimliliği artıracak uygun yarı mamul üretimi ve kontrollü mikroyapı eldesi için tekniklerin devreye alınması da önemli hale gelmektedir.

Verimliliği arttırmak için;

- **Boşluklu (Alüminyum köpük) dökümler üretimi:** Bu, hem döküm işlemi sırasında hem de nihai üründe ağırlık ve enerji tasarrufu sağlayacaktır. Fakat boşluk oluşumu için

kullanılan organik bileşenlerin yerine çevreye karbon salmayan çevre dostu malzemelerin kullanımının sağlanması gereklidir.

- **Kısmi katı döküm yöntemi kullanılması:** Daha düşük sıcaklıklarda yapılacak olan sürekli döküm işlemi ile hem döküm sıcaklığı azalacak, hem de CO2 emisyonları da azalacaktır. Çok karmaşık olmayan ve enjeksiyon yöntemi ile üretilen ürünler için uygun görünmektedir.
- **Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi**
- **Infrared yöntemi kullanılarak kalıp ön ısıtma fırınlarının kullanımının artırılması:** Bu yöntem ile çalışan çok sayıda ürün piyasada kullanılmakta ve ciddi bir miktarda enerji verimliliği sağladığı belirtilmektedir. Bu tip fırınların kullanımının artırılması enerji verimliliği ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında fayda sağlayacaktır.
- **Şekil verme işlemlerinde kalıp ile malzemenin kolay ayrılması için organik yağlayıcılar kullanılmakta ve bu nedenle işlem süresince karbon salınımı olmaktadır. Organik yağlayıcı yerine yapışmayı önleyecek özel kalıp yüzeylerinin geliştirilmesi, özel kaplamaların uygulanması ya da kalıp yüzeylerinin modifiye edilmesi organik yağların kullanımı azaltacaktır.**

### **Tane inceltme ve modifikasyon**

Tane inceltme, alüminyum döküm alaşımlarında mekanik özelliklerin homojen dağılımı ve kontrol altında tutulabilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Döküm yapısında ikincil fazların ve mikro porozitelerin boyut ve dağılımı, sıvı metalin iş parçasını daha yüksek verimlilikte beslemesi sonucu çekinti porozitelerinin eliminasyonu, dayanım değerlerinin artması ve yorulma ömrünün uzaması gibi parametreler açısından tane inceltme çalışmaları, akademik ve endüstriyel araştırmalarda güncelliğini korumaktadır. Bu amaçla günümüzün modern tekniklerinden biri olan termal analiz sistemi kullanılarak tane yapısının kontrolü, alüminyum alaşımlarında ötektik modifikasyon gibi katılma özelliklerini dökümden kısa bir süre önce ölçülebilmesi önem taşımaktadır. Dökümcüler, dökümden hemen önce sıvı metalin termal analiz ile kontrolü ile, tane inceltmenin veya stronsiyum modifikasyon işlemlerinin yeterli olup olmadığını anlamaktadırlar.

Bunlara ilaveten mekanik şekil verme işlemlerinde minimum enerji kullanımı eldesi için, paso sayısını azaltmayı sağlayacak uygun boyutta (kalınlıkta) alüminyum alaşımı üretiminin yapılması da katkı sağlayacaktır. Ayrıca giriş malzemesi kalitesinde artış sağlanması ile, proses sırasında kopma gibi istenmeyen duruşların meydana gelmesi engellenebilecektir. Mevcut alaşımların özelliklerinin geliştirilmesi ya da yeni tür alaşımların oluşturulmasının,

kullanım alanlarındaki ömürlerine etki ederek karbon salınımına olumlu yönde katkılar sağlacağı da öngörülmektedir.

### **3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Alüminyum üretim süreçlerinde büyük miktarda enerji harcamaları aşağıda belirtilen süreçlerde olmaktadır:

- Ergitme Sistemleri,
- Şekil verme makinalarının enerji tüketimleri
- Isıl işlem ve yüzey işlemleri için harcanan enerji
- Üretim sürecindeki basınçlı hava ihtiyacından kaynaklı kullanılan kompresörlerin motorları
- Döküm sistemlerinde kullanılan kalıpları ve şekil verme aparatlarının ısıtılması veya soğutulması için kullanılan sistemlerin enerji harcamaları.

Bu açıdan bakıldığında enerji verimliliğini artırmak ve yarı mamul karbon ayak izinin azaltılması aşağıda belirtilen noktaların dikkate alınması önem kazanmaktadır.

- Enerji verimliliğinin artırılması; baca gazı ısını reküperatörler vasıtasıyla geri kazanmak, şaft tipi ergitme ocaklarında baca tasarımı geliştirilerek baca gazları ile yüklenen metalin ısıtılmasını sağlamak, eşanjörler vasıtasıyla bacagazının ısından faydalanarak bina ısıtmasını yapmak, üretimde ihtiyaç duyulan sıcak su veya sıcak yağları ısıtmak ile mümkün olacaktır. Bununla birlikte Avrupada doğal gaz içerisine belirli oranlarda hidrojen ilave ederek yanma veriminin artırılması çalışmalarının yapıldığı bilinmektedir. Üretim ya da ısıl işlem yapılması esnasında enerji kayıplarının azaltılması için uygun yalıtım malzemelerinin kullanımı ve uygun tasarımların yapılması da gerekmektedir.
- Enerji verimliliği yüksek motorlara geçilmesi (İE3,İE4), sürücü kullanılması, çevrim süresi ve motorların boşta çalışma süresi uzun sistemlerde sürücü ve sisteme özel yapılan programlarla sistemin start/stop çalışmasının sağlanması, servo motorlar kullanılması ve servo motor üretiminin teşvik edilmesi
- Genel kabul görmüş operasyon hurdalarını ve bunların geri kazanım oranlarında iyileşmeler sağlayacak yeniliklerin desteklenmesi: Proses şartları gereğince oluşan hurdalarda daha da iyileştirme yapabilecek projelerin desteklenmesi.



- Daha düşük karbon ayak izi oluşturacak alternatif üretim tekniklerinin desteklenmesi, yarı mamul üretimlerinde bunların denenmesi için gerekli olan makine ekipman testlerin proje bazında desteklenmesi
- Proje hedeflerinde karbon ayak izinin bir parametre hatta ana parametre olacağı projelerin oluşturulmasının teşvik edilmesi
- Üretimle ilgili hızlı çözümler üretilmesini sağlayan simülasyon yazılımlarının alımlarının desteklenmesi: Bu aynı zamanda tekrarlı iş yapmayı önleyecek, kaynak kullanımını en uygun seviyeye çekecektir.

Atık ısı geri kazanımlarının geliştirilmesi ve dökümhanelerdeki süreçlerde ısı kayıplarının en az indirgenmesine yönelik çalışmaların yapılması önemlidir. Fırın içi ve yolluklardaki ısı kayıplarını en aza indirgeyecek malzemelerin kullanılması ve dökümhane yerleşim planlarının bu hedefe yönelik yapılması verimliliği arttıracaktır. Isıtma ihtiyaçlarını sistemdeki ısı kaynaklarından elde etmek ya da sistemlerin soğutulmasında stabil bir ısıya ihtiyaç olmadığı sürece çiller kullanmak yerine soğutma kulesinden faydalanmak şeklinde tasarımların yapılması uygun olacaktır. Döküm hattından çıkan sıcak ürünlerin bekleme aşamasında ortama vermiş oldukları ısının hurda malzemelerin ön ısıtılmasında kullanımı bu duruma bir örnek olarak gösterilebilir. Bunlara ilaveten hem döküm ve hem de ısıl işlem uygulamalarında bilgisayar destekli proses izleme sistemlerinin anlık olarak takip edilmesi için uygun şartların sağlanması gerekmektedir. Yarı mamuller üretimi sırasında yapı içerisine karışan empürümler, takip eden proseslerde hatalara neden olarak genel proses verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Giriş malzemesi kalitesinin artırılmasına yönelik çalışmalar sağlanmasının da faydalı olacağı göz önüne alınmalıdır.

Türkiye’de çeşitli fırın üretici firmalar bulunmaktadır. Aynı zamanda yerinde temiz enerji üreten fırınlarda kullanımına yönelik çalışmalar da mevcuttur. Bu fırınlarda karbon ayak izini azaltıcı, verimliliği artırıcı çalışmalar yapılmaktadır.

Ekstrüzyon prosesindeki baca atık ısısından sıcak hava kazanılarak, brülörlerin yakma havasının ısıtılmasında kullanılabilir. 2. alüminyum biyet kullanımı ile 1. alüminyum biyet kullanımları arasındaki ürün farkı incelenerek alaşım, mekanik özellikler ve enerji kazanımları değerlendirilmelidir.

Tüketicilerin biyet karakterizasyonu ile ilgili bilinçlendirilmesi önemlidir. Birincil malzemedeki imal biyet ile ikincil biyet arasında ortaya çıkan farkların bilinmesi, tüketicinin bu iki tür biyet arasındaki farkın ortaya çıktığı durumlarda kıyas yapmasına, ekonomik ve enerji verimliliği açısından uygun biyet seçimini yapabilmesinin sağlanması gerekmektedir. Aynı zamanda ikincil alüminyumun sektörde kullanılması durumunda, beklenen mekanik özelliklerin

sağlanması açısından yapılacak çalışmaların desteklenmesi, proses hurdaları ve primer alüminyum belirlenen oranlarıyla alüminyum biyetlerin üretimi karbon salınımının azaltılmasına katkı verecektir.

## **B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri**

### **3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi**

Dünyada THS 9; Türkiye’de THS 8-9’dur.

### **3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Dünyada THS 9; Türkiye’de THS 7-8’dir.

## **C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

### **3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi**

Yarı katı üretim sistemlerinin enerji verimliliği açısından önemli olduğu yukarıda vurgulanmıştı. "*Semi-solid processing of aluminum and magnesium alloys: Status, opportunity, and challenge in China*" başlıklı çalışmanın 2021 yılında yapıldığı göz önüne alındığında, enerji verimliliği konusunda çalışmaların ilerlediği anlaşılmaktadır.

Ülkemizde de enerji verimliliği ve karbon salınımını azaltıcı çalışmaların yapılması desteklenmelidir. Firmalarımızın bu konudaki çalışmalarını hızlandırdığı ve hatta bazı üretim tesislerinde ikincil hurda malzeme kullanılarak ve karbon emisyonunu da hesaplayarak ürünlerin üretildiği görülmektedir.

Termal analiz sistemlerini kullanarak tane inceltme, soğuma eğrisi ya da ötektik yapının modifiye edilmesine yönelik katılma özelliklerinin kısa sürelerde belirlenmesi için kullanılmalarının sağlanması hem istenilen özellikte alaşım üretilmesi hem de zaman kazanımı açısından uygun olduğu düşünülmektedir.

### **3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Alüminyum işletmelerinde kullanılan tüm fırın sistemlerinin (ergitme, tutma, indüksiyon, tavlama vb.) enerji verimliliklerinin artırılmasına yönelik tasarım geliştirme çalışmalarının başlatılması önemlidir. Yapılan bir çalışmada [*New Plant-Technologies for Reducing Carbon Emissions and Costs in Heat Treatment Processes of Aluminium Castings*] alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlem fırınlarında yakma sisteminin değiştirilmesi ile CO<sub>2</sub> salınımının %60'lara yakın oranda azaltıldığı, aynı zamanda maliyetin de %75 oranında azaldığı ifade edilmektedir.

## **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

### **3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini artırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi**

Makine, Metalurji ve Malzeme, Elektrik-Elektronik, Çevre, Kimya, Endüstri Mühendislikleri ve Temel Kimya Bölümü ve aynı zamanda sektörde uzun süre çalışan deneyimli personel bir araya gelebilir. Fırın ve makine üreticileri, alüminyum yarı mamul üreticileri, temiz enerji üreticileri de projelerde biraraya gelmelidir.

Üniversiteler, Araştırma Kuruluşları, Sektördeki Sivil Toplum Kuruluşları (GALSİAD, TALSAD v.b), Fırın ve Makine Üreticileri, Alüminyum Yarı Mamul Üreticileri, Temiz Enerji Üreticileri, Türkiye ve Avrupa'daki sektör birlikleri ile alt çalışma grupları kurulmalıdır.

### **3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Makine, Metalurji ve Malzeme, Elektrik-Elektronik, Çevre, Kimya, Endüstri Mühendislikleri ve Temel Kimya Bölümü ve aynı zamanda sektörde uzun süre çalışan deneyimli personel bir araya gelebilir. Fırın ve makine üreticileri, alüminyum yarı mamul üreticileri, temiz enerji üreticileri de projelerde biraraya gelmelidir.

Üniversiteler, Araştırma Kuruluşları, Sektördeki Sivil Toplum Kuruluşları (GALSİAD, TALSAD v.b), Fırın ve Makine Üreticileri, Alüminyum Yarı Mamul Üreticileri, Temiz Enerji Üreticileri, Türkiye ve Avrupa'daki sektör birlikleri ile alt çalışma grupları kurulmalıdır.

## **E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması**

### **3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini arttırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi / 3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Enerji verimliliğinin artırılması ve karbon salınımının azaltılabilmesi için, kişi ve kuruluşların Ar-Ge aşamasından endüstriyel üretime kadar uzanan sürecin teknolojik hedeflere ulaşması için desteklenmesi önem arz etmektedir. TÜBİTAK öncülüğünde hem akademik hem de uygulama alanlarında karbon salınımını azaltmaya yönelik üretim ve teknik yaklaşımların teşvik edilmesi açısından çağrılı proje duyurularının yapılması, Türkiye'deki mevcut durumun analiz edilmesi ve iyileştirilmesi bakımından önemli görülmektedir. Proje çalışmaları için destek fonlar oluşturulmalı ve sağlanacak desteklerin kapsamının net olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu sayede, çalışma gruplarının odaklanması ve çözüme kavuşturulması gereken alanlar daha net ortaya konmuş olacaktır. Odak çalışma gruplarının sonuçları diğer disiplinlerin katkılarıyla donatılarak sektörün yorumuna açılmalıdır. THS odaklı küçük ölçekli projelerden, olumlu sonuçları görülenler birbiriyle entegre edilerek daha büyük projeler halinde teşvik edilmesi sağlanmalıdır. Üniversitelerde yapılacak yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri arttırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında yapılan çalışmaların üretim aşamalarına adapte edilmesi aşamasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem kazanacaktır. Uluslararası iş birlikleri ile yapılan çalışmalar da ülkemizde katma değeri yüksek, teknolojik çalışmaların yapılmasını sağlayacaktır.

## **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

### **3.1.a. Yarı mamul proseslerinin (Döküm, haddeleme, ekstrüzyon, tel çekme vb.) ve malzemelerinin verimliliğini arttırılmasına yönelik sistem ve yöntemlerin geliştirilmesi / 3.1.b. Yanma ve yakma verimi yüksek; metal verimini düşürmeyecek yenilikçi sistem ve fırın tasarımlarının geliştirilmesi**

Kısa ve orta vadede yapılmalı, gerekli teşvik ve destek sistemi oluşturulmalıdır.

## G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Yeşil dönüşüm için AB ile uyumlu mevzuatların yayınlanması ile sektörün Ar-Ge çalışmalarında ilgili konuların önceliklendirilmesinin sağlanmasına yönelik adımların atılması önemlidir. Bununla birlikte, yatırım düşünen bütün işletmelere "sıfır kirletme-kirlenme" kriteri olarak konmalı ve enerji verimliliği konusunda farkındalık oluşturmak temel amaçlardan biri olmalıdır. Her firmanın kendine özgü olan standartlarının yanında devlet tarafından sağlanacak destekler ve getirilecek uygulamalar ile sıfır karbon salınımına ulaşılması sağlanmalıdır. Bu çerçevede makina tedarikçilerinin bu kurallar bütününe esas alarak üretimlerini gerçekleştirmeleri de teşvik edilecektir.<sup>2</sup>

### Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevzuatlar ile sektör (beyaz eşya, otomotiv vb.) bazlı hurda toplama sistemlerinin geliştirilmesi ve bu şekilde temiz hurdaya erişimin sağlanması faydalı olacaktır. Bu amaca yönelik alüminyum hurdalarının toplanması, ayrıştırılması ve işleme tesislerinin yaygınlaştırılması sağlanmalıdır. Bunlara ek olarak birincil olmayan alüminyumdan üretilmiş alaşımlarının teşvik edilmesine yönelik mevzuatlar hazırlanabilir. Ergitilmiş alüminyumun nakliyesine yönelik yasal düzenlemelerin yapılması da faydalı olacaktır. Üretim proseslerinde kullanılan enerjinin belirlenecek olan oranı kadar kısmının yenilebilir enerji ile sağlanması konusunda yasal düzenleme yapılabilir.

### İnsan Kaynakları

Ülkemiz üniversitelerinde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Enerji Mühendisliği özelinde yeterli sayıda bölüm olmasına rağmen, bazı bölümlerin nitelik ve nicelik bakımından daha uygun ve yeterli hale getirilmesi gerekmektedir. Bu sayede ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı sağlanabilir. Şu anda ara kademe teknik personel insan kaynağına ihtiyaç olduğu ifade edilmektedir. İŞKUR üzerinden AB Yeşil Mutabakatı kapsamında yapılacak çalışmalara dahil edilecek olan beyaz ve mavi yaka için özel teşviklerin oluşturulması faydalı olacaktır. Bu konuyla ilgili bir çalışan kapsamı oluşturulup, firmaların işe alım sürecinde sürdürülebilirlik bölümü oluşturması durumunda çalışan sayısı ve prosesleri ile bağlantılı olarak İŞKUR desteklerinin oluşturulması önem arz etmektedir.

---

<sup>2</sup> Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Notu: Bu paragrafta bahsedilen karbon ayak izine etki eden yeni yatırımların destek kapsamına alınması konusunda enerji verimliliği için "Verimlilik Artırıcı Proje (VAP) Destek Programı", "Gönüllü Anlaşma Destek Programı" ve "Enerji Verimliliği Yatırımlarına Beşinci Bölge Teşvikleri" yürütülmektedir.

**Destek ve Teşvikler**

THS odaklı küçük ölçekli projelerden (örneğin "yenilenebilir enerji sistemleri" gibi) olumlu sonuçları görülen projeler birbiriyle entegre edilerek daha büyük projeler halinde teşvik edilebilir. Ödül mekanizmaları gerçekleştirilebilir.

**Teknolojik Hedef 4:**

**ALÜMİNYUM PARÇA DÖKÜMÜNDE VERİMLİLİK ARTIŞI**

Alüminyum parça döküm proseslerinde verimliliğinin artırılmasına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi

**Kritik Ürün/Teknoloji 4.1.**

**4.1. Alüminyum parça dökümünde malzeme, makine ve sıvı metal proses teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**4.1.a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

**4.1.b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**



## **Kritik Ürün/Teknoloji 4.1.**

### **4.1. Alüminyum parça dökümünde malzeme, makine ve sıvı metal proses teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

#### **A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler**

Alüminyum alaşımlarının metal döküm yöntemi ile şekillendirilmesinde yaklaşık olarak %59 oranında yüksek basınçlı döküm, %37 metalik kalıba döküm ve alçak basınçlı döküm ile %4 oranında kum kalıba ve seramik kalıba döküm gibi yöntemler kullanılmaktadır. Alüminyum parça döküm proseslerinde ergitme, bekletme, gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve modifikasyon ile sıvı metalin döküm tezgahına transferi esnasında sabit sıcaklıkta korunması büyük önem arz etmektedir. Bir alüminyum dökümhanesinde toplam enerji tüketiminin büyük bir çoğunluğu ergitme ve sıvı fazda bekletme süreçleri sırasında gerçekleşmektedir [1-4].

Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme, modifikasyon ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması ile enerji verimliliğinde sağlanacak gelişmeler sera gazı (CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>) emisyonlarının azaltılması konusunda katkı sağlayacaktır [1-6].

#### **ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI**

##### **4.1.a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

###### **Alüminyum parça döküm proseslerinde kullanılan ergitme ve bekletme sistemleri:**

Alüminyum alaşımlarını ergitme ve sıvı fazda bekletme amacıyla; gaz ve sıvı yakıtlı şaft fırınları (kule), reverber, elektrik direnç ve indüksiyon ocağı gibi değişik tip ve tasarımlarda fırınlar kullanılmaktadır. Bu fırınlardaki enerji verimliliği; şarja ısı transferi, şarjın yüklenmesi, yanma, fırın içi basınç, fırın atmosferi, baca gazı kayıpları, atık ısı, ocak içinde sıvı metal sirkülasyonu, oksidasyon, refrakter cinsi ve kalitesi, hava-yakıt oranı, yacıcıların verimliliği, havanın sıcaklığı ve oksijen miktarı, ocak tasarımı ve izolasyonu, yanma verimi, yararlı ısı ve ergiyik (sıvı metal) yüzey temizliği ve hidrojen emilimine doğrudan bağlıdır [4-6]. Bu sebeple aşağıda ayrıntılı şekilde verilen söz konusu başlıkların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması büyük önem arz etmektedir. Alüminyum parça döküm proseslerinde ergitme ve bekletme süreçlerinde enerji verimliliğini artıracak önlemler aşağıda verilmiştir;

- Şarj malzemelerinin kontrol altında tutulması (optimum reçete geliştirilmesi, külçe kalite kontrolleri, magnezyum gibi alüminyum için kritik hammaddelerin belirlenmesi vb.),
- Tedarik yöntemlerine yönelik uygulamaların (tedarik zinciri yönetimi, magnezyum gibi alüminyum için kritik hammaddelerin belirlenmesi vb.) geliştirilmesi,
- Fırın performansının iyileştirilmesi,
- Fırın işletme verimliliğinin artırılması,
- Taşıma ve bekletmede yenilikçi sistem ve teknolojilerin geliştirilmesi,
- Düşük maliyetli, verimli ve hızlı ergitme sistemlerinin geliştirilmesi,
- Enerjiyi direkt şarja veren ergitme sistemlerinin (indüksiyon, ark vb.) geliştirilmesi,
- Enerji verimliliği sağlayan ergitme, taşıma ve bekletme sistemlerinin geliştirilmesi,
- Ergitme, taşıma ve bekletme sırasında oksidasyonu önleyen sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Baca gazının rejenerasyonu ve atık ısının geri kazanılması,
- Fırın izolasyonu ve sızdırmazlığının iyileştirilmesi,
- Fırın kapağı açma-kapama ve şarj yükleme sistemlerinin geliştirilmesi,
- Yenilikçi, sürdürülebilir ve verimli refrakter malzemelerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Yenilikçi, sürdürülebilir ve verimli yakıcı sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Çevresel odaklı ve yüksek verimli yakıtların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Fırın ve sıvı metal içerisinde homojen sıcaklık dağılımının sağlanmasına yönelik çalışmalar.

### **Alüminyum parça dökümünde uygulanan sıvı metal prosesleri:**

Alüminyum parça dökümünde ergitme, sıvı durumda bekletme, transfer, gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve modifikasyon gibi süreçlerde alüminyumun oksijene olan yüksek ilgisi nedeniyle sıvı yüzeyinde alüminyum oksit meydana gelmektedir. Ayrıca, sıvı alüminyum ile ocak ve pota atmosferi arasında meydana gelen etkileşimler, hidrojen emilimine de neden olmaktadır. Atmosferik nem, tane incelticiler, cüruf giderici flakslar, nemli aletler, kirli hurda ve yanma ürünleri önemli hidrojen kaynaklarıdır. Bu nedenle hidrojenin sıvı alüminyumdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Alüminyum parça döküm prosesinde alaşım özelliklerinin geliştirilmesi için tane inceltme işlemi uygulanmaktadır. Tane inceltme işlemi; döküm kabiliyeti, mekanik özellikleri, döküm verimi, talaş kaldırma kabiliyeti, sıvı metal akıcılığı gibi özellikleri arttırmaktadır [7-12]. Bu sebeple sıvı metal proseslerine yönelik yapılacak iyileştirme

çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Sıvı metal proseslerinde enerji verimliliğini artıracak önlemler aşağıda verilmiştir;

- Alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi ve yeni alaşımların geliştirilmesi,
- Çevresel odaklı gaz ve cüruf giderici yöntemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Tane inceltme yöntemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- Modifikasyon yöntemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- Çevresel odaklı gaz ve cüruf giderici malzemelerin geliştirilmesi,
- Verimli ve çevresel odaklı tane inceltici malzemelerin geliştirilmesi,
- Verimli ve çevresel odaklı modifiye edici ajanların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Sıvı metal proseslerinin optimizasyonu ile ilgili yöntemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Sıvı metal proseslerinin (ergitme, bekletme, cüruf giderme ve gaz giderme, tane inceltme, modifikasyon ve döküm sıcaklığı ve süresi vb.) kontrol altında tutulmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Sıvı metal proseslerine yönelik simülasyon uygulamalarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması.
- Sıvı metal proseslerine yönelik ekipmanların otomasyonu, otonom haberleşmesi ve uzaktan kontrolüne yönelik uygulamaların geliştirilmesi.

### **4.1.b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Yenilikçi döküm teknolojileri incelendiğinde; vakum altında ergitme ve döküm, yarı katı döküm, konformal şartlandırma, minimal yağlama, hızlı soğutma gibi uygulamalar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Ayrıca döküm hücresinin otomasyonu ve uzaktan kontrolüne yönelik yazılımsal ve donanımsal entegrasyonlar, mevcuttaki konvansiyonel hatların günümüz teknolojisini yakalaması açısından oldukça önemlidir. Bunlarla beraber, günümüz döküm tezgahlarının gerçek zamanlı ve hızlı reaksiyon süresine sahip özelliklere sahip olacak şekilde yenilenmesi gerekmektedir. Hem basınçlı döküm hem de gravite döküm proseslerinde kullanılan tezgahların enerji verimliliğini ön planda tutan elektrik ve hidrolik sistemler ile donatılması sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir. Yenilikçi döküm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda yapılabilecek iyileştirmeler aşağıda verilmiştir.

- Vakum altında ergitme ve döküm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Kısmi katı fazda uygulanan döküm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,

- Sıkıştırma döküm, bağlayıcısız kum kalıba döküm yöntemleri, kum erozyonu (ablation döküm) ve benzeri yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesi,
- Kum hazırlama ile kalıp ve maça üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Otomatik dozajlama sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Eklemeli imalat yöntemiyle kalıp ve maça üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Konformal ısıtma ve soğutma yöntemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Minimum miktarda yağlama (MQL) teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Kalıp yüzey işlemlerinin (kaplama, modifikasyon, vb.) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Yenilikçi yağlama sistemlerinin (kuru, toz, granül vb.) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Kalıp içi hızlı soğutma sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Gerçek zamanlı (*Real Time*) üretim yapabilen makine ve teknolojilerin geliştirilmesi,
- Alüminyum parça dökümünde ileri kontrol teknolojilerinin (dijital ikiz vb.) geliştirilmesi,
- Makine reaksiyon sürelerinin azaltılmasına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi,
- Döküm makine ve ekipmanları için verimli elektrik ve hidrolik sistemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Döküm hücrelerine yönelik kontrol ve otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Döküm hücrelerine yönelik yapay zekâ, otonom takip ve müdahale sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Çevresel ve yenilikçi yüzey işlem teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması.

Alüminyum parça dökümünde kullanılan çok farklı hammadde ve sarf malzemeler mevcuttur. Tezgahlarda kullanılan hidrolik yağlar ile kızak yağları, kalıp-maça imalatında kullanılan refrakter benzeri malzemeler-bağlayıcı-yapıştırıcı ve kimyasallar, kalıp ve maça üretiminde kullanılan astar ve boyalar, kalıp ve piston yağlama ajanları, kalıp şartlandırma sistemlerinde kullanılan ısı transfer yağları gibi mineral, sentetik ve su bazlı birçok yağ çeşidi ile kumlama ve vibrasyon gibi yüzey işlemlerinde kullanılan aşındırıcı-parlatıcı ve kimyasallar genel olarak sarf malzemelerini oluşturmaktadır.

Söz konusu malzemelerin sürdürülebilir ve döngüsel üretim bağlamında geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması AB Yeşil Mutabakatı uyum sürecine katkı sunacaktır. Yenilikçi sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda yapılabilecek çalışmalar aşağıda verilmiştir.

- Mineral, sentetik ve su bazlı yağların olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması,
- Minimum yağlama sistemleri için uygun ajanların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Yenilikçi ve çevreci yağlama sistemleri için (kuru, toz, granül vb.) uygun ajanların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Üretimde kullanılan sıvıların sürdürülebilirlik açısından performansını bozan unsurları (bakteri oluşumu vb.) önlemeye yönelik malzeme ve tekniklerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Kalıp şartlandırma için kullanılan ısı transfer kimyasallarının verimli hale getirilmesi,
- Çevresel kalıp-maça kumlarının ve bağlayıcıların yerli imkanlar ile geliştirilmesi,
- Kalıp, piston, hazne ve maça vb. malzemeler için döngüsel özellikte hammadde geliştirilmesi,
- Yenilikçi ve çevresel yolluk, filtre, soğutucu ve besleyici sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Yenilikçi döküm teknolojilerine uygun bağlayıcı ve kimyasalların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Yüzey işlemlerinde (kumlama ve vibrasyon gibi) kullanılan yenilikçi ve çevreci aşındırıcı-parlatıcı ve kimyasalların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması.

## B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

### 4.1.a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Türkiye’de Alüminyum parça dökümde yapılacak Ar-Ge ve Yenilik projelerini Teknoloji Hazırlık Seviyeleri bakımından değerlendirdiğimizde:

- Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemleri geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS 4-8 aralığında;
- Sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS 4-8 aralığında;
- Kritik öneme sahip alüminyum master alaşımlarının (AISr, AlTiB, AIP vb.) geliştirilmesi için dünyada THS 9, Türkiye’de ise THS 5-6’dır.

Dünyada, uygulama kısmında verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS 6-9 aralığında, sıvı metal

proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS ise 6-9 aralığındadır [13-19].

#### **4.1.b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Türkiye’de Alüminyum parça dökümde yenilikçi döküm teknolojileri ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için yapılacak Ar-Ge ve Yenilik projelerini Teknoloji Hazırlık Seviyeleri bakımından değerlendirdiğimizde;

- ✓ Yenilikçi döküm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS 4-8 aralığında;
- ✓ Sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS 4-8 aralığında değişkenlik gösterebilir.

Dünyada, yenilikçi döküm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS 6-9 aralığında, sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için THS ise 6-9 aralığındadır.

### **C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

#### **4.1.a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Dünya’da ergitme-bekletme ve sıvı metal proseslerinde küresel pazarda söz sahibi olan yabancı menşeli firmalar mevcuttur. Bu sistemlerin tamamı seri imalat yapan dökümhanelerde halihazırda kullanılmalarından dolayı THS 6-9 aralığında başarılı bir şekilde hizmet vermektedir. Bununla birlikte ülkemizde de benzer sistemlerin yurt dışındaki muadillerinden geri kalmayacak şekilde imalatının gerçekleştiği ve birçok dökümhane tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Bu sistemlerin THS aralığı 4-8 olup gerek servis hizmeti gerekse kolay ulaşılabilirlik açısından tercih edilmektedirler.

Yüksek verimliliğe sahip ergitme ve bekletme sistemlerinin dünyada son dönemde yaygın bir şekilde kullanıldığı gözlenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ergitme ve bekletme sistemlerinde yaygın şekilde kullanıldığı, yeni teknoloji hava soğutmalı ve enerjinin doğrudan şarja verildiği ergitme sistemleri ile yüksek verimli yakıcı sistemlerinin geliştirilmekte olduğu

görülmektedir [20]. Sıvı metal proseslerinden gaz giderme ve cüruf giderme işlemlerinin eş güdümlü yapıldığı, döner gaz giderme sistemlerine ek olarak flaks besleyici sistemlerin de kullanıldığı bilinmektedir.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarını alüminyum alaşımlarını ergitme ve bekletme sistemlerinde aktif bir şekilde kullanarak CO2 salınımının düşürülmesine önemli katkı sağlayan [21] ve sıvı metal döner gaz giderme sistemlerini yerli imkanlar ile üretebilen firmalarımız [22, 23] bulunmaktadır. Yüksek verimli yakıcı sistemleri ile 3 farklı yakıtın tek bir ergitme ocağında kullanılabilirdiği örnekler mevcuttur [24]. Bu firmalar, alüminyum dökümhanelerine halihazırda sistemlerinin satışını gerçekleştirmiş ve talep olduğu zamanlarda da başarılı bir şekilde bakımlarını gerçekleştirerek seri imalatta aksaklıkları asgari seviyeye çekebilmektedirler.

#### **4.1.b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Dünya’da yenilikçi döküm teknolojileri ve sarf malzemeleriyle ilgili olarak küresel pazarda söz sahibi olan yabancı menşeli firmalar mevcuttur. Söz konusu teknolojilerin bir kısmı seri imalat yapan dökümhanelerde halihazırda kullanıldığından dolayı THS 6-9 aralığında olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ülkemizde de benzer teknolojilerin yurt dışındaki muadilleriyle rekabet edebilir seviyede hayata geçirildiği ve birçok dökümhane tarafından denendiği bilinmektedir. Bu sistemlerin THS aralığı 4-8 olup bu konuda çalışacak yerli sanayi ve akademinin teşvik edilmesi faydalı olacaktır.

Döküm teknolojisinde ülkemizde özellikle yüksek basınçlı döküm makinası üretimi 2 bin ton ve üzerindeki kilitleme kuvvetlerine ulaşılmıştır. Dünyada gelinen noktaya bakıldığında 10 bin ton seviyelerinde denemeler sürmektedir. Bu noktada halen bazı noktalarda dünyada gelinen seviyeyi bir miktar geriden takip ettiğimiz anlaşılabilmektedir. Bu sistemlerde THS 4-8 aralığında olduğumuz ve gün geçtikçe daha yüksek seviyelerde çıktılara ulaşacağımız öngörülmektedir. Benzer şekilde döküm sarf malzemelerinde kalıp boyalarında THS 9 seviyesinde hem kum hem de kokil (metal) kalıplarda özellikle grafit ve su esaslı kalıp boyaları üretilebilmektedir. İlaveten döküm kumunda da bağlayıcı olarak karbondioksit gazı, ısı ile sertleşen sistemler ya da katalizörler ile sertleştirilebilen bağlayıcılar geliştirilip dökümhanelerde mevcutta kullanılabilir. Bu sistemlerde de sektör THS 9 seviyesindedir.

Yenilikçi döküm teknolojileri içerisinde yer alan yarı katı döküm teknikleri, vakum destekli döküm yöntemleri, kum erozyonu ile döküm (ablation casting) gibi yöntemlerin yaygın bir

şekilde kullanıldığı gözlenmektedir. Bununla beraber yüksek verimliliğe sahip ve çevre dostu sarf malzemelerinin son yıllarda geliştirildiği ve yaygınlaştığı bilinmektedir.

Dünya’da tıpkı gaz giderme süreçlerinde olduğu gibi özellikle İngiltere ve Amerika menşeli birçok sistem vardır. Bu firmaların ürettiği tüm kalıp boyasından yağlayıcılara kadar tüm döküm sarf malzemeleri hemen hemen Dünya’nın her ülkesinde birçok dökümhanede kullanılmaktadır ve bu ürünler de THS 6-9 aralığındadır.

Ülkemizde yenilikçi döküm teknolojileriyle ilgili yapılan Ar-Ge çalışmaları gün geçtikçe artmakta ve bu konuda elde edilen sonuçlar uygulamaya koyulmaktadır. Yarı katı döküm, vakum destekli dozajlama ve döküm, konformal soğutma ve minimal yağlama konularında başarılı girişimler mevcuttur. Bununla beraber verimli ve çevre dostu sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve kullanılması noktasında da başarılı uygulamalar bulunmaktadır.

Özellikle kalıp boyası ve bağlayıcılar konusunda yerli firmalarımız mevcuttur. Bunlara ilaveten besleyici gömlek tarafında da yine uluslararası kalitede yerli firmalarımız bulunmaktadır. Besleyici kısmı alüminyum dökümde bir miktar geri planda kalmış gibi görünse de ülkemizde hemen hemen tüm ölçülerde ve tiplerde besleyici üretimi başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Ticari olarak kullanılabilen bu sarflar da THS 4-8 aralığındadır.

### **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

#### **4.1.a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji eğitime-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Öncelikli olarak sektörün gereksinimi gereği Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ön lisans ve lisans derecesine sahip uzmanların konuya müdahil olması gerekmektedir. Ayrıca, gerek gaz giderme prosesinin mekanik bir işlem de içermesi, gerekse proses tasarımı gibi detaylara da ihtiyaç duyulmasından dolayı mutlaka Makine Mühendisi uzmanlar ile birlikte çalışılmalıdır. Konunun enerji verimliliği, dijitalleşme ve ısı transfer türüne doğrudan bağlı olması nedeniyle Matematik, Bilgisayar Mühendisliği, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Mekatronik ve Elektrik-Elektronik Mühendislerinin de projelerde yer almasında fayda bulunmaktadır. Cüruf giderme prosesinin kimyasal tepkimeler özelinde bir proses olması doğrultusunda, tepkimelerin hazırlık aşamasında klor ve flor içerikli tuzlara eklenen diğer bileşiklerin doğru ve uygun seçimi için de Fizik, Kimya ve Çevre Mühendisliği diplomasına sahip uzmanlar bulunmalıdır. Ayrıca, alüminyum parça döküm sektöründe çalışan tekniker, teknisyen, formen ve operatörler de çalışma gruplarına dahil edilmelidir.



Metal döküm sektörü ile ilişkili olarak Metalurji, Makine, Kimya sektörleri, Makine-İmalat firmaları ile kimyasal madde üreten ve satan kuruluşlar paydaş olmalıdır. Kamu tarafında başta üniversiteler, Savunma Sanayi Başkanlığı, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı gibi kurumların da paydaş olacağı çalışma grupları oluşturulmalıdır. İlave olarak sektördeki sivil toplum kuruluşları ve meslek odalarının da faaliyetlerde yer alması gerekmektedir.

Metal döküm sektörüne hitap eden ergitme-bekletme fırınları ile transfer potası üreticilerinden, sarf malzeme üreticileri ve tedarikçilerinden, makine-imalat firmalarından cihazların tasarımı, üretimi ve bakımı konularında katkılar alınması doğru olacaktır.

Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, teknoparklar ve teknoloji transfer ofisleri ortak paydada buluşturulmalı, endüstriyel ekosistem kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Sektörel sivil toplum kuruluşları (TÜDÖKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, TALSAD Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği, GALSİAD Girişimci Alüminyum Sanayici ve İşadamları Derneği, AYİD Alüminyum Yüzey İşlem Derneği vb.) ile meslek odalarından çalıştay, seminer, konferans, eğitim ve sempozyumlar düzenlenmesi noktasında katkılar alınabilir.

### **4.1.b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Öncelikli olarak sektörün gereksinimi gereği Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ön lisans ve lisans derecesine sahip uzmanların konuya müdahil olması gerekmektedir. Ancak gerek döküm teknolojilerinin mekanik işlemler içermesi gerekse kalıp, makine ve ekipman tasarımı gibi detaylara da ihtiyaç duyulmasından dolayı mutlaka Makine, Mekatronik ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği uzmanlar ile de çalışılmalıdır. Sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda Fizik, Kimya ve Çevre Mühendisliği lisansına sahip uzmanlar bulunmalıdır. Ayrıca, alüminyum parça döküm sektöründe çalışan tekniker, teknisyen, formen ve operatörler de çalışma gruplarına dahil edilmelidir.

Metal döküm sektörü ile ilişkili olarak Metalurji, Makine, Kimya sektörleri, Makine-İmalat firmaları ile kimyasal madde üreten ve satan kuruluşlar paydaş olmalıdır. Kamu tarafında başta üniversiteler, Savunma Sanayi Başkanlığı, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Hazine ve Maliye Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı gibi kurumların da paydaş olacağı

çalışma grupları oluşturulmalıdır. İlave olarak sektördeki sivil toplum kuruluşları ve meslek odalarının da faaliyetlerde yer alması gerekmektedir.

Metal döküm sektörüne hitap eden kalıp, ekipman ve makineler için üreticilerden, sarf malzemeler konusunda ise üreticiler/tedarikçilerden katkılar alınması doğru olacaktır.

Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, tekno parklar ve teknoloji transfer ofisleri ortak paydada buluşturulmalı, endüstriyel ekosistem kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Sektörel sivil toplum kuruluşları (TÜDÖKSAD Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, TALSAD Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği, GALSİAD Girişimci Alüminyum Sanayici ve İşadamları Derneği, AYİD Alüminyum Yüzey İşlem Derneği vb.) ile meslek odalarından çalıştay, seminer, konferans, eğitim ve sempozyumlar düzenlenmesi noktasında katkılar alınabilir.

### **E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş Birliği Modeli ve Destek Mekanizması**

Alüminyum parça döküme yönelik söz konusu teknolojilerin geliştirilmesi noktasında Ar-Ge safhasından endüstriyel ölçekli üretime kadar uzanan sürecin teknolojik hedefler ve endüstriyel potansiyeli göz önüne alınarak tasniflenmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla ortaya konacak projelerin ölçek odaklı aşamalandırılması, sağlanacak desteklerin bu ölçeklere göre düzenlenmesi, her bir ölçek için düşünülen proje çalışmalarının bulunduğu ölçekte hedeflenen ve mümkün olan seviyedeki teknolojik ürünü ortaya koyması zorunlu kılınmalıdır. Proje çalışmaları yalnızca bulunduğu ölçeği ve bu ölçeğin gerekliliklerini yerine getirmekle kalmamalı, aynı zamanda ölçeği bir üst seviyeye taşıyacak şekilde yeni proje çalışmalarının öngörülebilir ve gerçekçi bir projeksiyonunu ortaya koymalıdır.

Öte yandan söz konusu teknoloji için yürütülecek proje çalışmalarının çok farklı disiplinleri tek potada eritecek ve endüstriyel ekosistemlerin kurulmasını mümkün kılacak bir yapıda geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Alüminyum parça döküm yöntemlerinde verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin, sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi), yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına yönelik odaklanacak Ar-Ge projelerinin enerji verimliliği, CO2 emisyonlarının ve metal kayıplarının azaltılması vb. noktalarda farklı proses ve disiplinleri bir araya getirecek bir **ortak çalışma platformu** üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Aynı zamanda farklı endüstrilerin de olası endüstriyel ekosistem

fırsatlarını değerlendirebileceği ve geliştirebileceği ve farklı ölçeklerde proje iş birlikleri kurabileceği bir yapının oluşturulması gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilecek lisansüstü çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve **Üniversite-Sanayi iş birliği** destekleri artırılmalı ve teşvik edilmelidir. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önemlidir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilecek çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürünlerin üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Destek mekanizmaları özelinde döngüsel ekonomi için artık bir zorunluluk olarak görülebilecek endüstriyel ekosistem kavramı bağlamında projelere destek verilmesinin yanında ölçek büyütme potansiyelinin önemsenmesi doğru olacaktır. Yürütülecek projeler devam destekleri ve teşvik mekanizmaları ile hayata geçirilmelidir. Bu noktada projeler için THS odaklı bir ek teşvik mekanizması oluşturularak proje boyunca veya proje sonrasında atlanacak her bir THS için ek teşvik sağlanması, nihai ürün niteliğinin yükseltilmesi noktasında yararlı bir yaklaşım olacaktır.

### **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

#### **4.1.a. Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin ve sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi) kısa dönem için laboratuvar ölçeğinde araştırılması ve teknolojilerin ortaya konması adına ortalama 15 milyon TL civarında bir başlangıç bütçesi yeterlidir. Orta vadede endüstriyel ölçeğe yakın pilot tesislerin geliştirilmesi ve optimizasyonunun tamamlanması için ise yaklaşık 50 milyon TL seviyesine çıkılması gerekmektedir. Uzun vadede gerçekleştirilecek endüstriyel ölçekli uygulamaların yaygınlaştırılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetleri için bütçe oranları fizibilite çalışmalarıyla belirlenmelidir.

#### **4.1.b. Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması noktasında kısa dönem için laboratuvar ölçeğinde araştırılması ve teknolojilerin ortaya konması adına ortalama 30 milyon TL civarında bir başlangıç bütçesi yeterlidir. Orta vadede endüstriyel ölçeğe yakın pilot tesislerin ve endüstriyel nitelikte malzemelerin geliştirilmesi ve optimizasyonunun tamamlanması için ise yaklaşık 60 milyon TL seviyesine çıkılması gerekmektedir. Uzun vadede gerçekleştirilecek endüstriyel ölçekli uygulamaların yaygınlaştırılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetleri için bütçe oranları fizibilite çalışmalarıyla belirlenmelidir.

### **G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar**

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması noktasında en önemli hususlardan biri kamu tarafından mevzuat düzenlemeleri ile izleme, yönlendirme, teşvik etme olgularının sağlam bir zemine oturtulabilmesidir. Döngüsel ekonomiye geçişte en önemli faktör olan, alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına, mevcut mevzuatlarda bu dönüşümü endüstriyel ekosistemler çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir.

#### **Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler**

Sağlık ve çevre açısından zararlı olan alaşımların ve malzemelerin kullanımıyla ilgili yasal düzenlemelere ve mevzuatlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Mevcut mevzuatlar; teknolojik ilerlemelerin sağlanması konusunda herhangi bir engel teşkil etmese de yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması için revizyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) esaslarının dikkate alındığı, döngüsel ekonomiyi teşvik edecek, atıkların takibini, geri dönüşümünü ve geri kazanımını mümkün kılacak düzenlemelerin ivedi bir biçimde mevzuatlara eklenmesi gerekmektedir.

#### **Teknik Altyapılar**

Alüminyum parça döküm yöntemlerinde verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin, sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi), yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması üzerine gerçekleştirilen Ar-Ge projeleri çok sınırlı olmakla birlikte ihtiyaç duyulan teknik altyapı da yetersiz olmaktadır.

Birçok üniversite, enstitü ve Ar-Ge merkezlerinde mevcut üretim, test ve sertifikasyon alt yapılarının sürekliliği sağlanamamaktadır. Üniversite ve enstitülerde merkezi laboratuvarların oluşturulması ve alt yapı sürekliliğinin finans ve insan kaynakları desteklenmesi zorunludur.

Merkezi laboratuvarların altyapı sürekliliğini sağlayacak yönetim sistemleri, finans kaynakları ve insan kaynakları için gerekli mekanizmalar oluşturulmalıdır. İlave olarak öğrencisi olmayan birçok üniversitenin ilgili laboratuvarlarında atıl durumda olan makine, cihaz, teçhizat vb. kaynaklar değerlendirilmelidir. Cihazların teknolojik ve ekonomik ömrüyle ilgili olarak çalışma gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Metal döküm sektörünün yoğun kümelendiği bölgelerde Ar-Ge ve test laboratuvarlarının yeterli teçhizat ve insan kaynağı ile kurulması ve bu yapıların sürekliliği için finans kaynaklarını oluşturacak mekanizmalar yaratılmalıdır. Bu bağlamda sektörel sivil toplum kuruluşları da ortak çalışma platformlarına dahil edilmelidir.

### **İnsan Kaynakları**

Alüminyum parça döküm proseslerinde verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji eğitme-bekletme sistemlerinin, sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi), yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerin geliştirilmesi üzerine Ar-Ge çalışmaları için hem üniversitelerde hem de sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağının geliştirilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir.

Hali hazırda ülkemizde mevcut üniversiteler ve enstitüler metal döküm sektörünün ihtiyaçlarına cevap verememektedir. Ülkemizde döküm sektörünün ihtiyacı olan insan kaynaklarının karşılanması adına üniversitelerde müfredat programlarının güncellenmesi, lisansüstü çalışmaların teşvik edilmesi ve döküm araştırma enstitülerinin kurulması elzemdir. Sertifikalı eğitim programlarıyla döküm konusunda uzmanlaşacak insan kaynağının (mühendis, tekniker, teknisyen, vb.) oluşturulması gerekmektedir. MYK (Mesleki Yeterlilik Kurumu) alüminyum özelinde (mavi yaka) yetkinliklerinin belgelenmesine yönelik geliştirmeler gerekmektedir.

Kamu (TÜBİTAK ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı) destekli sanayi doktora programları geliştirilerek ilgili pozisyonlar için yerleştirme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Üniversiteler, araştırma enstitüleri, araştırma merkezleri ve kamu kuruluşları, sektörün ulusal ve uluslararası iş birlikleri yetkin insan kaynaklarına ulaşılması noktasında avantaj

sağlayacaktır. Metal döküm sektörü her durumda kamunun desteğini almalı ve rekabet gücünü artırmalıdır. Bu amaçla gerekli destek ve teşvik mekanizmaları değerlendirilmelidir.

### **Destek ve Teşvikler**

Alüminyum parça döküm teknolojilerinde verimli ve çevresel odaklı yeni teknoloji ergitme-bekletme sistemlerinin, sıvı metal proseslerinin (gaz giderme, cüruf giderme, tane inceltme ve alaşım özelliklerinin iyileştirilmesi), yenilikçi döküm teknolojilerinin ve sarf malzemelerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge projelerine girişimcilik aşamasından yatırım aşamasına kadar teşvik ve desteklerin sağlanması bir zorunluluktur.

Üniversite-sanayi iş birlikleri kapsamında gerçekleştirilecek çok disiplinli endüstriyel ölçekli Ar-Ge projeleri ile elde edilecek çıktıların sektöre entegre edilmesi önemli katkılar sağlayacaktır. Üniversite-sanayi iş birlikleri kapsamında gerçekleştirilecek çok disiplinli endüstriyel ölçekli Ar-Ge projeleri için Yüksek Öğretim Kurulu akademik yükselme kriterleri de teşvik edici şekilde düzenlenmelidir.

Bakanlıkların eşgüdüm içerisinde çalışarak teşvik ve izleme mekanizmalarını tasarımları ve yürütmeleri gerekmektedir.

## Referanslar

- [1]. EUROPEAN COMMISSION, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Smitheries and Foundries Industry, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), JOINT RESEARCH CENTRE Directorate B – Growth and Innovation Circular Economy and Industrial Leadership Unit, European IPPC Bureau Draft 1 (February 2022)
- [2]. EUROPEAN COMMISSION, Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry
- [3]. May 2005.
- [4]. ASM Handbook, Volume 15, Casting, ISBN: 978-1-62708-026-2, 2022.
- [5]. ALÜMİNYUM ERGİTME VE TUTMA SÜREÇLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ,
- [6]. Erman CAR, Sistem-Teknik Endüstriyel Fırınlar, 3.Endüstriyel Fırınlar ve Refrakter Sempozyumu, 29-30 Nisan 2010, Sakarya Üniversitesi.
- [7]. Erman CAR, METKİM Metal Makine Kimya San. ve Dış Tic. Ltd.Şti., ALÜMİNYUM ÜRETİM ve ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN FIRINLARDA VERİMLİLİK ve ENERJİ YÖNETİMİ, Alus. 7. Alüminyum Sempozyumu, 08-09-2015 İstanbul
- [8]. Akın Obalı-Erman Car SİSTEM TEKNİK Endüstriyel Fırınlar Ltd., İkincil Alüminyum Üretim Sürecinde Tesis Tasarımı ve Teknoloji Seçimi, 5. ALÜMİNYUM SEMPOZYUMU 13-16 EKİM 2011 İSTANBUL.
- [9]. Alexander James Gerrard, Inclusions and Hydrogen and Their Effects on the Quality of Direct Chill Cast and Flat Rolled Aluminium Alloys for Aerospace Applications, PhD. College of Engineering and Physical Sciences of The University of Birmingham, 2014.
- [10]. Alüminyum Alaşımlarında Yenilikçi Gaz Giderme ve Tane İnceltme Uygulamaları» Melih Evirgen (Foseco TR), Tüdoksad Akademi 2. Ulusal Döküm Kongresi 30.11.2019 – 01.12.2019 / İzmir.
- [11]. DERYA DISPINAR, Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys, PhD. School of Metallurgy and Materials The University of Birmingham January 2005.
- [12]. Alexander James Gerrard, Inclusions and Hydrogen and Their Effects on the Quality of Direct Chill Cast and Flat Rolled Aluminium Alloys for Aerospace Applications, PhD. The college of Engineering and Physical Sciences of The University of Birmingham, United Kingdom, 2014.
- [13]. Alessio Zambon, Phosphorus modification in Al-Si hypereutectic alloys, PhD., Department of Materials Science and Engineering, July 2016, Norwegian University of Science and Technology
- [14]. CHEN Chong(% #), LIU Zhong-xia(\$I, %-I%R), EN Bo(4Z %), WANG Ming-Xing(€ % E), WENG Yong-gang(\$&MrJ), LIU Zhi-yong(3U 3 %) , Influences of complex modification of P and RE on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy, Trans. Nonferrous Met. SOCC. hina 17(2007) 301-306.
- [15]. <https://cordis.europa.eu/project/id/876648>, European Commission , SmartMelt SmartMelt: A Data-Driven Melting Process Optimizer, ID: 876648, From: 1 August 2019 to: 31 January 2020, Coordinated in: Switzerland, Programme: PRIORITY 'Societal challenges, INDUSTRIAL LEADERSHIP - Innovation In SMEs, INDUSTRIAL LEADERSHIP - Leadership in enabling and industrial technologies, Last update: 16 August 2022
- [16]. <https://cordis.europa.eu/project/id/EE.-00323-86>, European Commission, , MELTING PROCESS REGULATION AND CONTROL SYSTEM FOR THE OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN AN ELECTRIC FURNACE, ID: EE.-00323-86, From: 15 May 1987 to: 15 June 1989, Coordinated in: Spain, Programme: Programme (EEC) of demonstration projects and industrial pilot projects (EEC) in the energy field, 1985-1989, Last update: 21 October 1999,

- [17]. <https://cordis.europa.eu/project/id/876648>, European Commission , Periodic Reporting for period 1 - SmartMelt (SmartMelt: A Data-Driven Melting Process Optimizer), Project: SmartMelt (ID: 876648), Programme: PRIORITY 'Societal challenges, Last update: 20 April 2020.
- [18]. <https://cordis.europa.eu/project/id/315506/reporting>, European Commission, Final Report Summary - SOUNDCAST (Vacuum-assisted high pressure die castings with reduced porosity at low cost), Project: SOUNDCAST (ID: 315506), Programme: Specific Programme "Capacities": Research for the benefit of SMEs, Last update: 12 January 2017,
- [19]. <https://cordis.europa.eu/project/id/246335>, European Commission, Final Report Summary - EDEFU (New Designs of Ecological Furnaces), Project: EDEFU (ID: 246335), Programme: Specific Programme "Cooperation": Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and new Production Technologies, Last update: 25 May 2015,
- [20]. <https://cordis.europa.eu/project/id/0020>, European Commission, Development and qualification of crucibles for high temperature metallic melts, ID: 0020, from: 1 January 1992 to: 31 December 1994, Coordinated in: Italy, Programme: Specific research programmes (EEC) to be implemented by the Joint Research Centre - Exploratory research -, 1992-1994, Last update: 7 July 1993.,
- [21]. <https://cordis.europa.eu/project/id/EE.-00078-87>, European Commission, HIGH EFFICIENCY QUICK MELTING AND HOLDING FURNACE FOR ALUMINIUM, ID: EE.-00078-87,
- [22]. INDUCTOTHERM İndüksiyon Sistemleri Sanayi A.Ş.
- [23]. ALTUN DÖKÜM SANAYİ A.Ş.
- [24]. DOĞUŞ DÖKÜM MALZEMELERİ AŞ.
- [25]. FOSECO- VESUVIUS İSTANBUL REFRAKTER SAN. TİC. A.Ş.
- [26]. Encotherm Endüstriyel Fırın Sistemleri San. ve Tic. Ltd.



**Kritik Ürün/Teknoloji 4.2.**

**4.2. Alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**4.2.a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi**

## Kritik Ürün/Teknoloji 4.2.

### 4.2. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi

#### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Alüminyum döküm parçalara olan talep özellikle dünya genelindeki ana sanayi kollarının cihaz ve parçaları hafifletme eğilimleri dolayısıyla giderek artmaktadır. Bu talebin ana kaynağı ise CO<sub>2</sub> emisyonları ve karbon ayak izinin azaltılmasının yanı sıra, hafifleme sayesinde enerji verimliliğinin artırılması ihtiyacından oluşmaktadır. Hali hazırda farklı alaşımlardan üretilen döküm parçalar (pik, sfero, çelik vb.) bir yanda olmak üzere alüminyumun sahip olduğu yoğunluk/mukavemet avantajı son dönemde alüminyum döküm parçaların daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır. Birden çok bileşenden (komponent) oluşan ve bileşenlerin üretilip montaj/kaynak yapıldığı ürünlere nazaran metal döküm prosesi sayesinde tek seferde parça elde edilmesi önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi enerji verimliliğine önemli katkı sağlayacaktır.

#### ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

##### 4.2.a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi

- **Proses parametrelerinin bu amaçla belirlenmesi ve kontrol altında tutulması**

Alüminyum parça dökümünde otomotiv parçaları genellikle birincil alüminyum alaşımları ile üretilmektedir. Son zamanlarda enerji tüketiminin azaltılması ve verimlilik artışı için ikincil alüminyum kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Alüminyum parça döküm prosesinde sıcaklık, dolum süreleri, dolum hızları, dolum basınçları ve soğutma ana parametreleri önem taşımaktadır. Proses parametreleri döküm metoduna göre değişkenlik göstermektedir. Yüksek Basıncılı Dökümde (High Pressure Die Casting-HPDC) en kritik olan proses parametreleri; alaşım cinsi, döküm sıcaklığı, faz hızları, dolum oranı, kalıp içi basınç ve yolluk giriş kesit alanları ve ondüla çıkışlarının belirlenmesidir. Yapılan hesaplamalara göre döküm tezgâhı seçimi yapılmaktadır. Parametre hesaplamaları Kuzey Amerika Basıncılı Dökümcüler Birliği'nin (North American Die Casting Association-NADCA) belirlemiş olduğu metoda göre yapılmaktadır. Belirlenen parametreler dolum simülasyonu ile doğrulanmaktadır. Alçak Basıncılı Dökümde (Low Pressure Die Casting-LPDC) kritik olan proses parametreleri; alaşım cinsi, soğutma süreleri, dolum süresi, dolum basıncı, katılma süresi, döküm sıcaklığı, yolluk

ve besleyici tasarımlarının belirlenmesidir. Alüminyum parça döküm üretiminde kullanılan kum kalıba döküm, metalik kalıba döküm, hassas döküm vb. proseslerde üretim parametrelerinin belirlenmesi ve doğrulanması yapılmaktadır.

Bu doğrultuda öne çıkan hususlar şu şekildedir:

- Döküm sıcaklığının optimizasyonu ile enerji verimliliğinin sağlanması mümkündür.
  - Dolum kesit alanı ve yolluk giriş kesit alanlarının optimizasyonu ile alüminyum kullanım oranı azaltılabilir.
  - Uygun faz hızları ve kalıp içi basınç ile parça özelinde belirlenen kriterlerin ve özelliklerin tekrarlanabilirliğinin yüksek olması ve fire oranının azaltılması sağlanabilir.
  - Ondüla tasarımının doğru belirlenmesiyle kullanılacak makine, kalıp verimliliği ve parça kalitesi artırılarak fire oranının düşürülmesi sağlanabilir.
  - Kalıp termal yönetiminin iyileştirilmesi ile katılma süresinin azaltılması, fire oranının düşürülmesi sayesinde yüksek döküm verimliliği sağlanabilir.
  - Dökümde yapılacak soğutma prosesleri ile ısı işlem proses adımlarının azaltılması sağlanabilir.
  - Besleyici ve yolluk tasarımı optimizasyonu ile minimum malzeme kullanımı sağlanabilir, önceki ve sonraki proseslerin verimliliği artırılabilir.
- **Yerli döküm simülasyon programlarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Alüminyum parça döküm prosesinde hesaplama yöntemiyle bulunan parametrelerin doğrulanması ve optimizasyonu amacıyla döküm simülasyon programı kullanılmaktadır. Döküm simülasyonu kalıp tasarımı ve parçanın üretilebilirliği açısından çok önemli rol oynamaktadır. Döküm simülasyonu olmaması durumunda uygun kalıp tasarımı ve akabinde uygun parametrelerle döküm yapılabilmesi için çok sayıda deneme dökümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Döküm simülasyonu sayesinde optimum deneme miktarı ile deneme maliyeti azaltılmaktadır. Ayrıca parça ağırlık optimizasyonunun sağlanmasında simülasyon programı önemli rol oynamaktadır. Döküm simülasyonlarının da maliyetleri bulunmaktadır, ayrıca simülasyon programları yabancı menşeli yazılımlardır. Yıllık olarak döviz bazında çok yüksek lisans ve bakım bedelleri ödenmektedir. İlave olarak, bu programları kullanacak mühendislerin eğitimi kritik öneme sahiptir.

- Döküm simülasyon programı yerli firmalar tarafından geliştirilirse kullanım arayüzünün Türkçe olmasıyla kullanım kolaylığı ve yaygınlaştırılması desteklenebilir.

- Yerli yazılım sayesinde lisans ve bakım bedelleri daha makul seviyeye düşürülebilir ve dökümhanelerimizde kullanım oranı arttırılabilir.
- Yerli yazılımlar simülasyon programlarının geliştirilmesine olanak sağlayabilir.
- Yerli yazılımlar ithal ikamesini sağlamakla birlikte ihracatı da olanaklı kılacaktır.
- Döküm simülasyon programının yerleştirilmesi ülkemiz açısından stratejik öneme sahiptir.

- **Dökümde verimliliği artırmak amacıyla kalıp ve yolluk sistemlerinin iyileştirilmesi**

Alüminyum yüksek basınçlı döküm prosesinde (HPDC) parçalar döküm tezgahında maçalarla birlikte yolluk sistemi de düşünülerek uygun pozisyonda konumlanacak şekilde tasarlanır. Proses parametreleri ile uygun yolluk sistemlerinin geliştirilmesi, parça geometrisine göre sıvı metalin kalıp içinde en uygun akışını sağlayacak yolluk giriş bölgelerinin ve kesit alanlarının belirlenmesi önemlidir. Simülasyon ortamında deney tasarımı yapılarak yolluğun optimizasyonu sağlanır. Simülasyondan destek alarak dolmada hava sıkışması görülen bölgelere hava cepleri ve ondülalar eklenerek kalıp geliştirilir. Alçak basınçlı dökümde (LPDC) parça tasarımına göre uygun yolluk alanı belirlenmektedir. Simülasyon ile yolluk girişi doğrulanmaktadır. Uygun yolluk ve kalıp tasarımı ile döküm hataları azaltılabilir. Parça geometrisi iyileştirilerek uygun döküm kesitleri belirlenmekte, uygun dolumun ve yönlü katılaşmanın sağlanması için soğutma rejimi geliştirilmektedir. Termal dengeyi sağlamak amacıyla ilgili kalıp kesitlerinin optimizasyonu gerçekleştirilir.

- Termal denge ile kalıp ömrünün artırılması sağlanmaktadır.
- Pimler ve kalıp üzerindeki değiştirilebilir parçaların (insert) kaplanması kalıptaki parçaların ömrünü ve üretim verimini artırabilir.
- Sıcak iş takım çeliklerinde eklemeli imalatın geliştirilmesiyle karmaşık kalıp geometrileri elde edilerek daha az malzeme tüketimi ve işleme maliyetinin azaltılması sağlanabilir.

- **Verimli ve çevresel odaklı kalıp yağlama ve şartlandırma sistemlerinin geliştirilmesi**

Alüminyum alaşımlarının yüksek basınçlı döküm yöntemlerinde (HPDC) parçanın kalıptan ayrılmasını sağlamak amacıyla kalıp yağlama işlemi yağlayıcı robotlarla, spreya veya fırça ile uygulanmaktadır. Kalıp dolum simülasyonuna göre belirlenen sıcak bölgelerin kontrolü için öngörülen soğutma hatları, kalıpla birlikte çalıştırılan söz konusu simülasyonla doğrulanmaktadır. Soğutma hatlarıyla ulaşılamayan kalın bölgelere (sıcak) soğutma tüpü vb.

destekler uygulanmaktadır. Hava cebi ve gaz tahliye sistemleri (ondüla) vakum şartlandırıcıya bağlanarak parça kalitesi artırılmaktadır.

Alüminyum alçak basınçlı döküm yönteminde (LPDC) dolumdan sonra alüminyum parçanın kalıptan ayrılmasını sağlamak amacıyla kalıpta sıvı metalin temas ettiği yüzeylere poteyaj kaplaması uygulanmaktadır. Parça geometrisine göre simülasyondan elde edilen sıcak bölgelere bölgesel soğutma kanalları eklenerek yönlendirilmiş katılaşma sağlanmaktadır. Soğutma kanallarında hava, hava-su karışımı ve su ile soğutma uygulamaları mevcuttur.

- Soğutma sistemi ve optimizasyonu geliştirilerek çevrim süreleri azaltılabilir. Böylece kapasite artışı ve üretim verimliliği artırılabilir.
  - Jet soğutma sistemleri kullanılarak parça verimliliği artırılabilir.
  - Yüksek basınçlı döküm yönteminde kalıp şartlandırma sistemlerinin optimizasyonu yoluyla yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların imalatı gerçekleştirilebilir.
  - Yüksek basınçlı döküm yönteminde vakum sistemlerinin iyileştirilmesi ile ısı işlemleri sürecinde kendisini gösteren döküm hataları giderilebilir.
  - Farklı döküm yöntemleri (yarı katı vb.) geliştirilerek çevrim süreleri, enerji sarfiyatı, kalıp ömrü ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlanabilir.
- **Eklemeli imalat yönteminin kalıp ve maça üretiminde kullanımının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Eklemeli İmalat, geleneksel imalat yöntemlerine eklenen yeni bir tekniktir. Eklemeli imalat, üç boyutlu model verileri kullanılarak, malzemelerin katmanlar halinde üst üste biriktirilmesiyle nesnelere oluşturulduğu üretim yöntemidir.

Geleneksel tekniklerle prototip oluşturmak için genellikle birkaç farklı üretim tekniğine ve farklı becerilere sahip kişilere ihtiyaç duyulurken, eklemeli imalat ile doğrudan CAD dosyası üzerinden prototip üretimi mümkün hale gelmektedir.

Geleneksel eşdeğer malzeme üretimi (döküm, dövme ve kaynak vb.) ve eksiltici üretim (tornalama, frezeleme ve taşlama vb.) teknolojileriyle karşılaştırıldığında; eklemeli imalat, kalıplara, aletlere veya fikstürlere ihtiyaç duymadan karmaşık bileşenleri oluşturmanın zorluğunu büyük ölçüde azaltmaktadır.

Eklemeli imalatın geleneksel döküm teknolojisiyle birleştirilmesi ile (karmaşık kalıpları hazırlamak için eklemeli imalat teknolojisini kullanmak ve daha sonra bunlarla döküm yapmak)

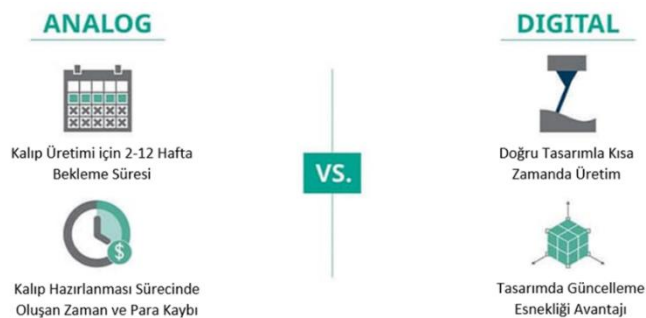
havacılık sektörü ve savunma sanayi için büyük, karmaşık ve özel şekilli ana metal bileşenlerin hızlı genel üretimi kolaylıkla sağlanabilecektir [1].

Geleneksel üretim teknikleriyle karşılaştırıldığında eklemeli imalat bazı avantajları ile cazip hale gelmektedir. Bu avantajlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Yeşil tasarım; eklemeli imalat ile, karmaşık yapıları parçalar daha hafif tasarımlara sahip şekilde tasarlanabilecek ve dolayısıyla malzeme tüketimi azaltılabilecektir.
- Yeşil üretim; eklemeli üretim teknolojisini kullanarak kalıp hazırlamak, malzeme kaybını ve enerji tüketimini azaltabilir, işleme yöntemlerinin değişmesini sağlayabilir ve üretim verimliliğini artırabilir. Ek olarak, eklemeli üretimle onarım teknolojisi, yüksek kaliteli dökümlerin fire oranını azaltabilir ve yeşil üretimi sağlayabilir.
- Eklemeli imalatın, geleneksel üretim tekniklerinde kullanılan aparat, kesici takım, kalıp gibi ilave yardımcı aletlere gereksinim duymamasından dolayı maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır [1].
- Eklemeli imalat, ilave üretim süreçlerine gerek kalmadan parçaların doğrudan tek seferde üretebildiği bir yöntemdir. Bu özelliğinden dolayı gerekli iş gücünü ve zamanı azaltarak verimliliği artırır.
- Prototip üretiminde maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır [1].
- İki veya daha fazla parçadan oluşan nesnelere doğrudan tek bir seferde üretilmiş olduğundan dolayı montaja gerek yoktur [1].

Dökümhaneler; dijitalleşmenin artışı neticesinde, daha karmaşık geometrilere sahip kalıplara duyulan ihtiyaç ve işgücü kıtlığı neticesinde eklemeli imalat çözümlerini benimseyerek artan endüstri baskılarının üstesinden gelmeye çalışmaktadır.

Dijital dökümhane çağında bu çözümler daha yüksek otomasyon dereceleri ve geliştirilmiş operasyonel verimliliğin yanı sıra önemli zaman ve maliyet tasarrufları ile kolaylaştırılmış üretim iş akışları sunmaktadır. Döküm için, döküm kalıbının veya modelinin 3D yazdırılmış veya geleneksel olarak üretilmiş olması neredeyse hiçbir fark yaratmamaktadır.



**Şekil 3: Geleneksel (analog) ve Dijital Üretim karşılaştırması.[2]**

Dökümhanelerde yaygın olarak kullanılan denenmiş ve test edilmiş malzemelerin kullanımı sayesinde, eklemeli imalat döküm bileşenleri mevcut üretim süreçlerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Hibrit bir uygulama da mümkündür, daha az karmaşık kalıplanmış parçalar geleneksel olarak üretilebilir ve yalnızca karmaşık veya filigran çekirdek yapıları 3D yazdırılabilir [2].

Yıllardır birçok dökümhane, 3D yazıcı ile üretilen döküm kalıplarını ve maçaları standart olarak kabul etmektedir. Bu teknoloji, demir ve demir dışı metal döküm alanında önemli bir konuma ulaşmıştır. Bu uygulamalar öncelikle prototipler ve küçük adetli üretim serileri alanında yer alırken, 3D baskı sistemlerinin performansı artmaya devam ettikçe sınırlar giderek daha büyük hacimlere doğru yönelmektedir. Günümüz döküm teknolojileri için eklemeli imalat, seri üretim için hala yetersizdir [2].

Her çalışmada olduğu gibi eklemeli imalat teknolojilerinde de standartlar sistemin daha stabil ilerleyebilmesi için elzemdir. Birden fazla alanda eklemeli imalat teknolojileri için çeşitli standart çalışmaları yürütülmektedir. Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM, American Society for Testing and Materials), Uluslararası Eklemeli İmalat Mükemmeliyet Merkezi (AM CoE), 30.000 üyesi ile hükümet, akademi ve endüstri temsilcileri arasında, eklemeli imalatın tüm yönlerinde standartları ilerletmek için stratejik Ar-Ge yürüten işbirlikçi bir ortaklık kurmuştur. ASTM, standartlaştırmayı; hammadde, uygulama alanları ve test metotlarına göre ayırmıştır. Örneğin, dünya çapında hammaddelerin üretimi ve karakterizasyonu genellikle ASTM standartlarına göre yapılmaktadır [3].

## B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

### 4.2.a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi

Türkiye’de Alüminyum parça dökümde yapılacak Ar-Ge ve Yenilik projelerini Temel Hazırlık Seviyeleri bakımından değerlendirdiğimizde;

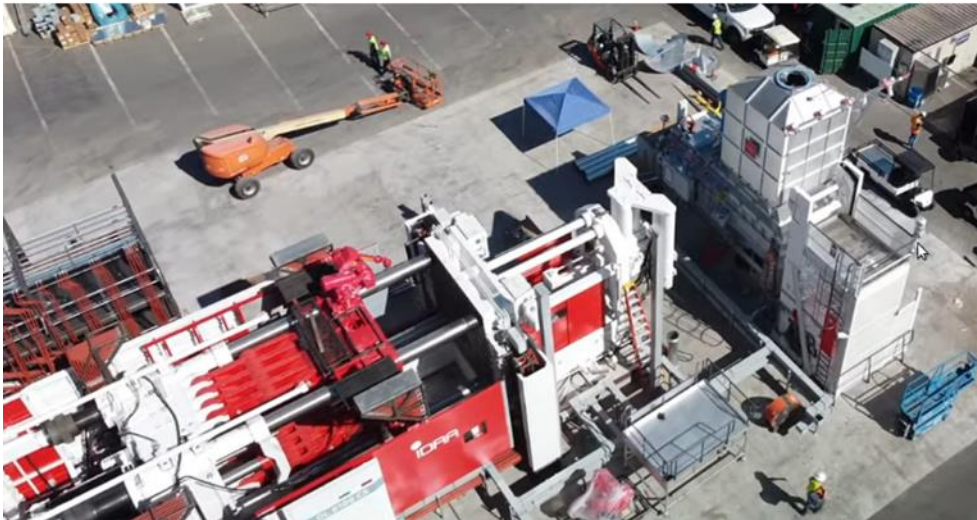
- ✓ Alüminyum döküm prosesinde yapılacak çalışmalar için THS seviyeleri 3-8 aralığında,
- ✓ Eklemeli imalat yönteminin kalıp ve maça üretiminde kullanımının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması noktasında THS seviyeleri 4-8 aralığında değişiklik gösterebilir.

Dünyada, uygulama kısmında alüminyum döküm prosesinde yapılacak çalışmaları için THS seviyeleri 6-9 aralığında, eklemeli imalat yönteminin kalıp ve maça üretiminde kullanımının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması noktası için THS seviyeleri 6-9 aralığındadır.

## C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

### 4.2.a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi

Alüminyum dökümhanelerinde proses optimizasyonları ve simülasyon doğrulamaları hem Türkiye’de hem de dünyada yoğun olarak uygulanmaktadır. Proses parametrelerinin ve farklı metotların geliştirilmesi konuları da yoğun olarak çalışılmaktadır. Kalıp soğutma ve şartlandırıcıları ile ilgili firmaların (Fondarex, Pfeiffer vb.) girişimleri bulunmaktadır. Döküm



Şekil 4. "Giga Pres" yüksek basınçlı döküm tezgâhı



metotları ile ilgili çok sayıda proje Türkiye’de ve dünyada gerçekleştirilmektedir ve bu projelerden elde edilen bilgiler ile metotları geliştirip ticaretini yapan firmalar oluşmaktadır. Özellikle son 30 yıldır çalışılmakta olan Yarı-Katı döküm metodu (semi solid casting) özelinde yurtdışındaki firmalar (Comptech, GISS, Rheometal vb.) çoğalmaktadır. Ek olarak dünyada tek seferde karmaşık ve büyük parça üretimleri için “Giga” boyutta yüksek basınçlı döküm tezgâhları IDRA grup tarafından geliştirilmiştir. Elektrikli araçların ana gövdesi tek seferde bu döküm tezgahında (Tesla tarafından) gerçekleştirilmektedir.

Alüminyum döküm sektöründe kullanılan ekipmanların yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı kurulan hatların maksimum verimde çalışması gerekli görülmektedir. Çevrimsel süreklilik ve verimden dolayı 3 boyutlu yazıcılarla üretilen, özel ısıtma ve soğutma kanallarına sahip geçme çelik parçaların (insert) kalıplarda kullanılması, üretim sürelerinin ve iskarta oranlarının düşürülmesini sağlamakta ve atıl tezgah kapasitesi yaratılıp, hem enerji verimliliği sağlanabilmekte hem de yeni projeler için ek kapasiteler yaratılabilmektedir. Bu vesilelerle 3 boyutlu yazıcılar ile hem yapılmış olan yüksek yatırımlardan daha iyi performans alınması sağlanabilirken hem de enerji ve doğal kaynak kullanımının olabildiğince düşük seviyelere indirgenmesi amaçlanmaktadır. NADCA (North American Die Casting Association) başkanı, 3D baskının kalıpların ömrünü önemli ölçüde uzatarak sektöre yılda tahmini 500 Milyon ABD Doları tasarruf sağlayabileceğini belirtmektedir.

DMLS (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme) sisteminin kurucusu olan Alman EOS firması kalıp ve takımlarla ilgili çalışmalarına devam etmektedir. Salcomp firması ile yaptıkları projede, takım girişine uyumlu soğutma kanallarını başarıyla monte etmişlerdir. Isının çok daha hızlı uzaklaştırılması ile üretim döngüsü 14 saniyeden 8 saniyeye düşürülmüştür ve aylık üretim 56.000 adetten fazla artmıştır. Diğer yandan toz yataklı sistemlerden SLM (Seçici Lazer Ergitme) yöntemini kullanan SLM Solutions, metal eklemeli imalat teknolojisi ile basınçlı döküm kalıpları için özel tasarlanmış soğutma kanallarına sahip geçme çelik parçaları hızla üretebilmektedir. SLM® teknolojisi, döngü süresini %75'e kadar azaltmaktadır ve kalıplarla üretilen parçalarda daha yüksek ürün kalitesi oluşturarak üretim verimliliğini iyileştirmektedir. Özel tasarımı metal kalıp parçaları daha yüksek üretkenlik için üretim süreçlerini geliştirmektedir.

GE ise eklemeli imalatı tüm uygulamaları için kullanmaktadır. Şu anda geliştirilmekte olan Advance Casting Cell (ACC) 3D yazıcı, Almanya Federal Ekonomi ve Enerji Bakanlığı tarafından desteklenecek ve GE Haliade-X nacelle içine kurulacak döküm bileşenler için kalıplar üretilmiştir. Amaç, ağırlığı 60 tona kadar olan kalıpların üretim süresini 10 haftadan 2 haftaya indirmektir. Proje, açık deniz rüzgâr türbini gövdelerine yerleştirilen son derece

karmaşık metal bileşenlerin dökümünde kullanılacak olan kum kalıplarının eklemeli imalatı için yeni, geniş formatlı bir 3D yazıcının geliştirilmesini içermektedir.

Metal döküm süreçleri eklemeli imalattan etkilenmekte ve daha çok noktada faydalanmaya yönelmektedir. Stratasys Direct Manufacturing, Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'daki çok sayıda dökümhaneye 3D baskının faydalarını tanıtmak için 20 yılı aşkın süredir çalışmaktadır. Bu deneyim, üstün eklemeli imalat hassas döküm modelleri ve özel araçlar ile üretim yardımcıları gibi diğer önemli üretim uygulamaları için tescilli yapım stilleri ve süreçlerinin geliştirilmesini sağlamaktadır.

Bağlayıcı püskürtme sistemleri şu anda dökümhanelerde kullanılmaktadır. Birçok seçenek mevcut olmakla birlikte, ExOne ve Voxeljet, özellikle 3D eklemeli kum imalatı için özel olarak tasarlanmış bağlayıcı püskürtme sistemleri sunmaktadır. Örneğin, Voxeljet VX4000, kum döküm kalıplarını ve maçalarını doğrudan yazdırmak için dünyanın en büyük 3D baskı sistemini üretmiştir. Baskı işleminden sonra kalıp açılıp fazla kum alınmakta ve ek bir süreç bulunmamaktadır. Kum kalıpları direkt olarak dijital veriler baz alınarak üretildiğinden ince detay ve hassasiyet elde edilmektedir. Benzer şekilde EnvisionTEC ve Viridis3D gibi yeni oyuncular, kalıpları ve maçaları ve ayrıca hassas döküm modellerini üretmek için robotik kolları ve bağlayıcı püskürtme teknolojisini birleştirmektedir.

Uzun süredir takım çeliği üretimi ve tedariğinde dünya lideri olan firmalar, farklı sektörlerin özel çelik ihtiyaçlarına yönelik yüksek performanslı, optimize edilmiş eklemeli imalat hammaddeleri ve üretim parametreleri üzerine çalışmalar yürütmektedirler.

### **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Bir Araya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi adına alüminyum parça döküm üretim süreçlerinde;

- Proses parametrelerinin bu amaçla belirlenmesi ve kontrol altında tutulması,
- Yerli döküm simülasyon programlarının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Dökümde verimliliği artırmak amacıyla kalıp ve yolluk sistemlerinin iyileştirilmesi,
- Verimli ve çevresel odaklı kalıp yağlama ve şartlandırma sistemlerinin geliştirilmesi,
- Eklemeli imalat yönteminin kalıp ve maça üretiminde kullanımının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

konularında uzman akademisyenler ile sektörün ilgili paydaşlarının uzman mühendislerinin koordinasyonunda; tüm hammaddeler, ekipmanlar, enerji sistemleri ve atık yönetimi gibi konular özelinde bilgi birikimine dayalı projelerin yürütülmesi esastır. Bu noktada üniversiteler, araştırma enstitüleri, sektör firmaları ortak paydada buluşturulmalı ve endüstriyel ekosistem kurabilmek ve döngüsel ekonomiyi disiplinler arasına yayabilmek adına çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

### **E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İş Birliği Modeli ve Destek Mekanizması**

#### **4.2.a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi**

Alüminyum parça döküm teknolojilerin gerçekleştirilmesi noktasında teknolojinin Ar-Ge safhasından endüstriyel ölçekli üretime kadar uzanan sürecin teknoloji hedefleri ve endüstriyelleşme potansiyeli göz önünde bulundurularak tasniflenmesi önem arz etmektedir. Bu noktada ortaya konacak proje çalışmalarının ölçek odaklı aşamalandırılması, sağlanacak desteklerin bu ölçeklere göre düzenlenmesi, her bir ölçek için düşünülen proje çalışmalarının bulunduğu ölçekte hedeflenen ve mümkün olan seviyedeki teknolojik ürünü ortaya koyması zorunlu kılınmalıdır. Proje çalışmaları yalnızca bulunduğu ölçeği ve bu ölçeğin gerekliliklerini yerine getirmekle kalmayacak, aynı zamanda ölçeği bir üst seviyeye taşıyacak şekilde yeni proje çalışmalarının öngörülebilir ve gerçekçi bir projeksiyonunu ortaya koymalıdır.

Öte yandan söz konusu teknoloji için yürütülecek proje çalışmalarının çok farklı disiplinleri tek potada eritecek ve endüstriyel ekosistemlerin kurulmasını mümkün kılacak bir yapıda kurulması önem arz etmektedir.

Alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi üzerine odaklanacak projelerin hammadde, ekipman, enerji sistemleri, sera gazı çıktıları, atık yönetimi, eklemeli imalat gibi farklı proses ve disiplinleri bir araya getirecek bir ortak çalışma platformu üzerinden açılacak çağrılar vasıtasıyla yönetilmesi faydalı olacaktır. Aynı zamanda farklı endüstrilerin de olası endüstriyel ekosistem fırsatlarını değerlendirebileceği ve geliştirebileceği ve farklı ölçeklerde proje iş birlikleri kurabileceği bir yapının oluşturulması gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilecek yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri artırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilecek çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile

önerilecek çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Destek mekanizmaları özelinde döngüsel ekonomi için artık bir zorunluluk olarak görülen endüstriyel ekosistem kavramının gerek proje desteklerinde ek destekler sağlaması, gerekse projelerin ölçek büyütme potansiyellerine yönelik, başarılı sonuçların ortaya konulduğu noktalarda sağlanacak ve devam projelerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılacak bir teşvik mekanizmasının oluşturulması faydalı olacaktır. Bu noktada projeler için THS odaklı bir ek teşvik mekanizması oluşturularak proje boyunca veya proje sonrasında atlanacak her bir THS için ek teşvik sağlanması, nihai ürün niteliğinin yükseltilmesi noktasında yararlı bir yaklaşım olacaktır.

### **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

#### **4.2.a. Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesi**

Döküm üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik geliştirilebilecek projeler düşünüldüğünde kısa dönem için laboratuvar ölçeğinde araştırılması ve teknolojilerin ortaya konması adına ortalama 20 milyon TL civarında bir başlangıç bütçesi yeterlidir. Orta vadede endüstriyel ölçeğe yakın pilot tesislerin geliştirilmesi ve optimizasyonunun tamamlanması için ise yaklaşık 50 milyon TL seviyesine çıkılması gerekmektedir. Uzun vadede gerçekleştirilecek endüstriyel ölçekli uygulamaların yaygınlaştırılmasına yönelik Ar-Ge faaliyetleri için bütçe oranları fizibilite çalışmalarıyla belirlenmelidir.

### **G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar**

Hedeflenen teknolojinin mümkün kılınması noktasında en önemli hususlardan biri kamu tarafında mevzuat düzenlemeleri ile izleme, yönlendirme, teşvik etme olgularının sağlam bir zemine oturtulabilmesidir. Döngüsel ekonomiye geçişte en önemli faktör olan, alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaşması adına, mevcut mevzuatlarda bu dönüşümü endüstriyel ekosistemler çerçevesinde sağlamayı mümkün kılacak revizyonlar gerçekleştirilmelidir.

### **Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler**

Mevcut mevzuatlar teknolojik ilerlemelerin sağlanması konusunda herhangi bir engel teşkil etmese de yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması amacıyla revizyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu noktada Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) esaslarının dikkate alındığı, döngüsel ekonomiyi teşvik edecek, atıkların takibi ve geri dönüşümünü mümkün kılacak bazı düzenlemelerin ivedi bir biçimde mevzuatlara eklenmesi gerekmektedir.

### **Teknik Altyapılar**

Teknik altyapı noktasında her ne kadar Ar-Ge çalışmaları gerçekleştiren kamu ve özel kuruluşların yanı sıra üniversitelerde alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi adına laboratuvar ölçeğinde çalışmalar sürdürülse de teknolojilerin endüstriyellemesi adına yatırım ve destekler doğrultusunda THS'lerinin yükseltilmesi hayati derecede önem arz etmektedir.

### **İnsan Kaynakları**

Alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi üzerine Ar-Ge gerçekleştirmek adına üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağının geliştirilmesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Öte yandan söz konusu tekniklerin bilimin kolektif yapısı altında yurtdışında bulunan üniversiteler ve araştırma enstitüleri ile kurulacak iş birlikleri ile hızlı ve efektif bir biçimde geliştirilmesinin sağlanacağı da aşıkardır. Ülkemizde döküm sektörünün ihtiyacı olan insan kaynaklarının karşılanması adına üniversitelerde müfredat programlarının güncellenmesi ve döküm araştırma enstitüsü kurulması elzemdir. TÜBİTAK destekli sanayi doktora programları geliştirilerek ilgili pozisyonlar için yerleştirme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir.

### **Destek ve Teşvikler**

Alüminyum parça dökümünde proses tasarımı ve optimizasyonuna yönelik teknolojilerin geliştirilmesi amacıyla küçük ölçekte Ar-Ge çalışmaları ile başlayıp endüstriyel ölçekli projelere dönüştürülmesi konusunda en önemli husus üniversite-sanayi iş birliklerinin kurulacağı proje çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla destek sağlayıcı kuruluşların bilimsel gelişmeyi

daha hızlı bir biçimde elde etmeyi mümkün kılacak destek ve teşvik mekanizmaları ortaya koymaları, patent desteklerini arttırmaları, katma değeri yüksek ürünlerin pazara sürülmesinde teşvik mekanizmalarını sıklaştırmaları önem arz etmektedir.

Alüminyum üretim tesislerinde enerji tüketen tüm birimlerin fikrinin alınacağı bir enerji yönetim ekibinin kurulması ilk önceliktir. Bu ekibin alacağı kararların yaptırım gücü, AB Yeşil Mutabakatına olan uyumu karşılayacaktır. Özellikle toplam enerji tüketimi 1000 TEP üzerinde olan işletmelerde bulundurmaları gereken enerji yöneticisinin liderlik edeceği enerji yönetim ekibi, bu çalışmalara öncülük etmek ve tesis içerisinde aldığı verileri değerlendirip ona göre önlem alabilmektedir.

### Referanslar

- [1] M. M. BÖLÜMÜ, «EKLEMELİ İMALAT DENEY FÖYÜ,» BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, DOĞA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİK, Türkiye, 2022.
- [2] 3. Systems, "Supporting Your Business Growth, Profitability and Responsiveness with Additive Manufacturing Expertise for Metal Casting," <https://www.3dsystems.com/foundries>, 2022.
- [3] A. I. A. M. C. o. E. (. CoE), "Accelerating R&D, standardization, and innovation in AM," <https://amcoe.org/about/>

**Teknolojik Hedef 5:**  
**ALÜMİNYUM SEKTÖRÜNDE OPTİMİZASYON, ENERJİ GİRDİSİ,**  
**VERİMLİLİK VE ATIK YÖNETİMİ**

Alüminyum sektöründe **optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimi** yöntemlerin geliştirilmesi



**Kritik Ürün/Teknoloji 5.1.**

**5.1. Alüminyum sektöründe optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

**Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları**

**5.1.a. Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

**5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

**5.1.c. Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

**5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

**5.1.e. Atık ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması**

## Kritik Ürün/Teknoloji 5.1.

### 5.1. Alüminyum sektöründe optimizasyon, enerji girdisi, verimlilik ve atık yönetimine yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

#### A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

#### ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

##### 5.1.a. Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması

Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda yapılacak çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Tüm proseslerde ürün, enerji ve su kayıplarını gerçek zamanlı takip edebilecek ve gerekli önlemleri gerçek zamanlı alabilecek yapay zeka tabanlı, akıllı otomasyon sistemlerinin ve kontrol yazılımlarının geliştirilmesi ve uygulanması
- Tüm proseslerde verimlilik artışı sağlayacak şekilde proses parametrelerinin kayıt edilmesi ve öğrenen sistemler (Makine öğrenme, bulanık mantık gibi) ile optimize edilmesine yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi
- Tüm proses süreçlerine yönelik olarak Dijital ikizleme tasarımları ve uygulamalarının geliştirilmesi
- Döküm prosesi hazırlama aşamasında (Kum ve kalıp hazırlama gibi) yönelik Magma, Novacast benzeri simülasyon programları geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması
- Özellikle birincil Alüminyum üretimi Elektroliz hücrelerinde Hücre otomasyon (kontrol) sistemlerinin en verimli şekilde çalışabilmesi için alümina ve anot karbonu gibi hammadde teknik spektlerinin stabil kalabilmesi için bayer prosesi ve anot karbon blok üretim tesislerinde çok değişken değil mümkün olduğunca stabil hammaddelerin kullanılması ve üretim sürecinde ürün spektlerine etki eden üretim prosesinde optimizasyonun sağlanması (Örneğin proseste sürekli dur-kalk'ların yaşanmaması, konsantrasyon, sıcaklık, basınç, süre v.b. parametrelerin en mükemmel şekilde sabit tutulabilmesi).

### **Parametrelerinin kayıt edilmesi ve öğrenen sistemler ile optimize edilmesi**

Günümüzde yüksek kaliteli ürünü çok sayıda üretme yaklaşımı yerine, üretimin hem birincil hem de ikincil kaynaklarının şeffaf bir şekilde gösterilip, bir nevi ürünün çevresel koşullara uygunluğunu gösteren etiketinin çıkarılması en uygun ve en yenilikçi yaklaşımdır. AB tarafından, pazarın AB Yeşil Mutabakatına uymayan ülkelere doğru kaymasının engellemesi için sınırda karbon düzenleme mekanizması hayata geçirilmektedir. Bu düzenlemeye göre ürünün doğaya bıraktığı her bir karbon izi, fiyatındaki değişimi etkileyecektir. Dolayısıyla ürünün üretilmesi için birincil ve ikincil üretim kademeleri, ürünün ihraç edildiği ülkelere hangi nakli yollarla yapıldığı, hatta ürünün kullanım ömrünü tamamlayana kadar geçen zaman, ürünün muhtelif malzeme ve ekolojik ayak izlerini belirleyecektir. Üretim sektörü için birim zaman içerisinde kaynağını en verimli şekilde en kaliteli ürünü üretmek gibi bir sorumluluğu vardır. Artık kitlesel üretim yöntemlerinin şekillendirdiği üretim planlama yöntemleri; günümüz sorunlarına cevap verememektedir. Döngüsel ekonomi analitiği baz alınarak üretim planlamanın, matematiksel modellemelerinin entegre edilmesi şart olmaktadır. Böylesine bir sistem; üretim sisteminin dijitalleşip, verileri toplanması sonucunda mümkün olacaktır. Veriler fabrika içerisinden veya hammadde taşıyan kamyonlardan, müşterinin deposundaki sensörlü paletlerden toplanabilir. Akıllı bir planlama sisteminin varlığı, üretim sürecinin ve envanter durumunun kontrol edilebilirliği sayesinde olmaktadır. Anlık veriler ile birlikte çeşitli simülasyon senaryoları sayesinde uzun vadeli planlar yapılabilir. Uzun vadeli planlar içerisinde şirketin geçmiş satış verileri ve pazar gelişmeleri, teknolojik trendler, piyasa koşulları, politik şartlar gibi geleceğe yönelik verilerle bağlantı kurulmasını gerektirir. Talep yapısındaki nitel ve nicel kalıpları ortaya çıkarmak için farklı istatistiksel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu yüzden firmalar;

- Üretim hattının ayrıntılı bir çizelgesini oluşturmalıdır.
- Planlanan programdan sapmalara karşı çevrimiçi tepki oluşturmalıdır.
- Üretim hattını otomasyon sistemleri ile entegre edip, birbirleriyle haberleşebilir kılmalıdır.
- Sürecin her aşamasında anlık veri her yerden kontrol edilebilir olmalıdır.
- Tüm üretim sistemi anlık değişkenlere karşı esnek nitelikte olma amacını taşımalıdır.

Modern planlama yöntemlerinin oluşmasının tek koşulu tüm bu verileri erişilebilir konuma getirmektir. Artırılmış gerçeklik uygulamaları ve sanal gerçeklik oluşturma konusunda deneyim sahibi, mobil uygulamalar geliştirme konusunda bilgi sahibi olması gibi dijital dünyada çalışma yetkinliğinin arandığı filtrelemelere tabi olmaktadır.

### **5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüsellığe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

Alüminyum ve alaşımlarının tesislerinin üretiminde kullanılan enerji girdisinin döngüsellığe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi konusunda yapılacak çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin uygulamaların geliştirilmesi
- Yakıt tüketiminde doğal gaz yerine alternatif yakıt (Hidrojen, biyoyakıt gibi) kullanımına ilişkin uygulamalar
- Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi
- Metalurji sektörü proses şartları gereği yüksek oranda enerji gereksinimi duyulan bir sektör olduğu için, en azından gündüz şartlarında ülkemizin de konumu itibarıyla güneş enerjisinden veyahut sürekli rüzgar alması sebebiyle ege ve güney-batı marmara sahillerine ve limanlara yakın şekilde tesislerin konumlandırılması maksimum faydalanma sağlayacaktır. Mevcut durumda birçok alüminyum tesisinin İstanbul, İzmit bögesinde konumlandırılması lojistikte yüksek oranda maliyet artışına, Anadolu'ya göre daha pahalı işgücüne; proses suyu tedariginde ve atık depolama alanlarında sorunlarla karşılaşılmasına neden olmaktadır. Bu bölgelerde arazi çok pahalı olduğu için güneş paneli yatırımı için uygun olmamakta ve enerjinin hemen hemen tamamı enterkonnekte sisteminden çekilmektedir. Halbuki Antalya ve Mersin limanlarına yakın konuma sahip yerleşim yerlerinin dışında, güneş panelleri kurmak için uygun kıraç tarım dışı arazilerin bulunduğu Burdur, Isparta, Denizli, Konya, Kahramanmaraş, Osmaniye gibi illerin güney kesimleri ile Antalya, Mersin ve Muğlanın kuzey kesimleri bu tür tesislerin konumlanması için uygundur. (1 MWH elektrik üreten güneş paneli kurulacak alan büyüklüğü yaklaşık 15-17 dakardır). Enerjinin belli bir kısmının bu şekilde öztüketimle sağlanması bu tür sektörlerde faaliyet gösteren şirketlerin rekabet gücünü artıracaktır.
- Ayrıca fotovoltaik enerji üretiminde güneş ışığının yetersiz olduğu anlarda bile daha iyi verim alabilmek için silisyum monokristal yerine GaN paneller, pahalı olmalarına rağmen, dışa bağımlılığı azaltmak ve enerjide sürekliliği sağlamak için tercih edilebilir.

### **Elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin uygulamaların geliştirilmesi**

Yeşil dönüşüm sistemi, ürün ve malzeme için toplam yaşam boyu emisyonu dikkate alır. Örneğin Çin bataryası (Üretimde kirletici kömür elektriği kullanılır) AB Tarifelerine göre ithalinde maliyetinin %5-8 i kadar ilave karbon vergisi yükü getirir. Bu, elektrikli araçtaki (EV) pil paketi başına ilave 500 \$ para vermek/almak anlamı taşır. Northvolt Start Up'ı bataryası (Üretimde Nordic Hydroelectricity elektriği kullanır) hiçbir ilave karbon yükü getirmez. Endonezya, nikel rezervlerinin %37'sine ev sahipliği yapmaktadır. Endonezya nikeli düşük kaliteli olduğundan, yüksek kaliteli nikelden (Kanada, New Caledonia, Rusya orijinli) 3 kat fazla emisyon verir.

Karbon ayak izi, üretimle ilgili tüm faaliyetleri içeren belirli bir miktarda ürün üretmek için doğrudan ve dolaylı (örn. ulaşım, enerji üretimi, bertaraf vb.) olarak salınan CO<sub>2</sub> miktarı ile diğer sera gazlarının (örn. CH<sub>4</sub>) CO<sub>2</sub> eşdeğerinin toplamını tanımlamak için kullanılan bir terimdir ve CO<sub>2</sub> eşdeğeri CO<sub>2e</sub> veya CO<sub>2(eşdeğer)</sub> şeklinde gösterilir [1]. Birincil Al üretimi, yıllık olarak dünya elektrik tüketiminin %4'ünden ve sera gazı salınımının %2'sinden sorumludur. Yeni teknolojiler ile dünya ortalaması 12,5 - 16,0 ton CO<sub>2(eşdeğer)</sub>/ton Al olan sera gazı salınımının 2,5 ton CO<sub>2(eşdeğer)</sub>/ton Al'ye indirilebilmesini mümkün kılınmaktadır. Alüminyum üretiminde sera gazı salınımını ve karbon ayak izini azaltacak başlıca teknolojiler, üretimde geri dönüşümün payının arttırılması ve birincil alüminyum üretiminde yenilenebilir enerjinin ve hidroelektriğin kullanımınıdır [2 - 4].

Alüminyumun üretiminde (özellikle primer) CO<sub>2</sub> ve perflorokarbonlar (PFC'ler) direkt olarak ortaya çıkan başlıca sera gazlarıdır. Küresel sera gazı emisyonlarının %2'si alüminyum endüstrisinden kaynaklanmaktadır. Çinli üreticiler, toplam alüminyum endüstrisi kökenli sera gazlarının %70'inden sorumludur. 2018 yılında, alüminyum endüstrisi emisyonları yaklaşık 1,1 Gt CO<sub>2e</sub> ve antropojenik sera gazı emisyonları yaklaşık 55 Gt CO<sub>2e</sub> olarak hesaplanmıştır. Emisyonlar üç alt gruba ayrılmaktadır: Kapsam 1 (doğrudan üretim esnasında), Kapsam 2 (doğrudan ve satın alınan ısı, buhar ve elektrik ile oluşan) ve Kapsam 3 (üretimdeki madencilik, nakliye, elektrik iletimi kayıpları vb. tüm hususları kapsayarak) [2 - 4].

### **Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi**

Karbon yakalama, yakma öncesi ve yakma sonrası yaklaşımlar aracılığıyla kaynaklarından CO<sub>2</sub> emisyonlarını yakalamak için kullanılan yöntemleri içermektedir. Karbon yakalama yöntemleri, proses CO<sub>2</sub> emisyonlarını yakalamak için Hall-Herault Ergimiş Tuz Elektrolizi Sürecinde kullanılabilir. İşlemin en önemli dezavantajı, karbon yakalama işlemlerinin çalışması için ek enerji kullanımını gereksinimidir. CO<sub>2</sub>'i Hall-Herault Prosesi'nin çıkış gazından ayırmak için ortalama olarak yaklaşık 0,5 kWh/kg Al enerji gerekmektedir [5].

### **5.1.c. Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması konusunda yapılacak çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik ısı yalıtım (refrakter vb.) malzemelerin geliştirilmesi
- Üretim proseslerinde kullanılan ısı üretimi ve iletimini arttıracak yöntemlerin (rejeneratif-halihazırda Eti Alüminyum A.Ş. dökümhanesinde döküm fırınında uygulanmaktadır, oksijen-yakıt brülörler, sirkülasyon pompaları gibi) geliştirilmesi ve uygulanması
- Enerji verimliliği yüksek tesis (ısı ve aydınlatma kayıplarının giderilmesi, lojistik gibi) ve işletme yönetim modellerinin geliştirilmesi
- Üretim proseslerinde ısı, enerji ve sarf malzemelerin kullanımlarının azaltılmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi
- Çok soğuk bölgelerdeki tesis konumlandırmalarında proses soğutma suyu sirkülasyonu ve bazı hidrometalurjik proseslerde donma, borularda sık sık patlakların yaşanması v.b. sorunların yaşanmaması için çok iyi bir fizibilite çalışması yapılmalıdır.
- Fabrika binaları güneş ışığından maksimum verim almak ve gündüz vakti aydınlatma lambalarının yakılmaması için yeterli pencere sistemine sahip olmalıdır.
- Birincil Alüminyum tesislerinde Elektroliz hücreleri konumlandırılırken manyetohidrodinamik iyi hesaplanmalı, sistemdeki manyetik alan etkisi hücre içerisinde alümina çözünürlüğünü olumsuz etkilememelidir. Hücrelerin belli bölgelerinin rüzgar, soğuk hava gibi dış etmenlerden fazla etkilenmesi, hücre içerisindeki sıcaklık gradyanında büyük farklılıklar oluşmasına sebep olarak verimliliği düşürür.

### **Enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik ısı yalıtım (refrakter vb.) malzemelerin geliştirilmesi**

Fırın imalatı standardize edildiğinde, bunun doğal bir sonucu olarak refrakter kalitesi de standart olacaktır. Örneğin döküm fırınında manyetik karıştırıcı kullanılıyorsa, fırında sadece statik değil yüksek tonajda metalin yaratacağı dinamik hareket de olacaktır. Şayet düşük basma mukavemetine sahip izolasyon seramik fiber, kalsiyum silikat plaka veya ksonolit seçilmesi durumunda fırın tabanında zamanla çökmeler yaşanabilecek; refrakter fırın taban

betonunda bölgesel erozyonlar yaşanabilecektir. Kalitesiz, yani kısa ömürlü malzeme seçimi durumunda fırın tamiri için dur-kalklar artacak, verim düşecektir.

Özellikle cüruf tutmayan/ıslanmaz (*non-wet*) refrakter dizaynı, üzerinde çalışılması gereken bir konudur. Bu konuda fırın içerisinde cüruf ile temas eden yüzeylerde belli oranlarda SiC içeren yüksek alüminalı veya andaluzit esaslı refrakter beton harçları kullanılabilir. Ancak bu malzemelerin termal iletkenliği biraz yüksek olduğu için enerji verimliliği açısından arka planları, yüksek izolasyon özelliğine sahip malzemeler ile desteklenmelidir. Ancak bu şekilde sıvı metal yapışması olmayacaktır. Düşük refrakter erozyonu sebebiyle sıvı metale yabancı cisim parçacıkları karışmayacak, filreyi tıkamayacaktır. Refrakter beton harcında fosfat bağlayıcı kullanılması durumunda filtrede kaçaklar olursa döküm yüzeyinde çizikler yaşanabilir.

### **5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi konusunda yapılacak çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Atık olarak ayrıştırılan kırmızı çamurun değerlendirilmesi (Sekonder Alümina, Sodyum Hidroksit, diğer stratejik elementler) ve geri kazanımı
- Alüminyum cürufunun değerlendirilmesine (metalik alüminyumun yüksek verimlilikle geri kazanımı, alümina esaslı bileşiklerin elde edilmesi, sekonder tuz üretimi) yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi
- Döngüsel ekonomiye uygun, geri dönüşümü destekleyecek yeni alarım, proses ve ürün geliştirilmesi
- Tüm proseslerde katı/sıvı (filtre, kumlama, baca, mekanik hurda hazırlamadan gelen, hadde yağları ve filtre, döküm seramik filtre ve refrakter, anodik oksidasyon banyo, talaş vb.) yan atıklarının değerlendirilmesi
- Çok kez yeniden kullanılmasıyla özelliğini kaybetmiş döküm ve maça kumlarının, diğer sektörlerde (çimento, peyzaj, dolgu gibi) kullanılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi
- Ömrünü doldurmuş alüminyum elektroliz hücrelerinden çıkan malzemelerin (Karbon katot, çelik kollektör bar ve refrakter gibi) değerlendirilmesi

**Atık olarak ayrıştırılan kırmızı çamurun değerlendirilmesi (Sekonder Alümina, sodyum hidroksit, diğer stratejik elementler) ve geri kazanımı**

Kırmızı çamur yapısı itibarıyla demir, alümina, kostik, vanadyum, titanyum, nadir toprak elementleri; özellikle lantanit grubu metaller için bir hammadde kaynağıdır. Ancak tüm bu değerli metal ve bileşiklerin geri kazanımı, kısacası sıfır atık teknolojisi için çok yüksek enerji ihtiyacı, yüksek oranda karbon emisyonu olan entegre tesisler zincirine (piro-hidro-elektro proseslerinin her üçüne birden) gereksinim vardır. Bu tek başına bir özel sektörün altından kalkabileceği bir yatırım değildir. Çünkü buradan elde edilecek ürünlerin bazıları stratejik (askeri teknolojilerde kullanılan) metaller olduğu için yüksek oranda devlet desteğine ve devletin alım garantisine ihtiyaç vardır.

Birincil alüminyum üretiminde dünyada yıllık yaklaşık 120 milyon ton kırmızı çamur ortaya çıkmaktadır. Yüksek bazikliği nedeniyle, depolanması kritik bir çevre sorunudur. Kırmızı çamurun depolanma alanı önceden hazırlanmalı ve herhangi bir sızıntının önüne geçmek için sürekli kontrol altında tutulmalıdır. Tüm bu sebepler ile bu malzemenin büyük ölçekte değerlendirilmesi çok kritik bir hal almıştır. Güncel olarak literatürdeki değerlendirme yöntemleri metalurjik ürünlere, inşaat malzemelerinin ve kimyasal ürünlerin üretimine odaklanmaktadır [1]. İçeriğindeki değerli bileşenlerin / metallerin geri kazanılmasının önündeki ana engellerden biri, muhteviyatındaki yüksek demir ve alüminyum içeriğidir. Uygulanabilecek liç işlemlerinden önce direkt redüksiyon veya redüktif ergitme yoluyla özellikle demirin geri kazanılmasının, geriye kalan nadir toprak elementlerinin geri kazanımını kolaylaştırabileceği literatürde bildirilmektedir [2, 3]. Ayrıca alüminanın değerlendirilmesi için de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ile alkali kavurma ve yüksek sıcaklık-basınç liçi uygulanabilecek yöntemlerdir [4]. Asit liçi, titanyum ve skandiyumun geri kazanılması için tercih edilen işlem yoludur [5]; ayrıca iyon değiştirme reçineleri vanadyum geri kazanımı için literatürde çalışılmıştır [6].

**Alüminyum cürufunun değerlendirilmesine (metalik alüminyumun yüksek verimlilikle geri kazanımı, alümina esaslı bileşiklerin elde edilmesi, sekonder tuz üretimi) yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

Alüminyum cürufu (İng. dross, Türkçe’de diğer isimlendirmesi dros); alüminyum metali, metal oksitler, halojenürler ve diğer bileşiklerin (örn. nitrürler) bir karışımıdır ve alüminyumun ergitme işlemlerinde oluşur. Alüminyum endüstrisinde alüminyum cürufları genel olarak beyaz ve siyah olmak üzere iki alt gruba ayrılır. "Beyaz cüruf", ağırlıkça %20'den fazla metalik alüminyum içermektedir. "Siyah cürufun" metalik alüminyum içeriği ise %20'den düşüktür [1 - 3]. Endüstride beyaz cürufun yüksek metalik alüminyum içeriğinden dolayı, kırma ve öğütme işlemlerinden sonra eleme ve vakum separasyonu ile metalik alüminyum ve kalan metalik



olmayan fraksiyonu birbirinden ayırılır. Metalik alüminyum fraksiyonundan üretilen külçeler (alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek empürite değerlerine sahiptir), çelik endüstrisinde deoksidan olarak kullanılır. Kalan metalik olmayan fraksiyon (İng. non-metallic residue, NMR) ise atık olarak depolama sahalarına gönderilir. NMR değerlendirme üzerine literatürdeki çalışmalar alümina-esaslı seramik üretimi üzerine yoğunlaşmaktadır (örn. CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> çelik flaksı, fused Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> esaslı bileşikler vb.) [4]. Siyah cürufun metalik alüminyum içeriğinin düşük olması nedeniyle, literatürde bulunan çalışmalar; metalik alüminyum içeriğinin beyaz cüruf gibi geri kazanımı yerine, esas olarak alternatif uygulama alanları (CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> çelik flaksı ve alümina-esaslı seramik üretimi gibi) ile ilgilidir [1, 5 - 7]. Nguyen ve ark. 2020'de siyah cüruftan saf alümina ve magnezyum spinel sentezine ilişkin bir çalışmanın sonuçlarını yayınlamışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmanın işlemleri; mekanik aktivasyonlu liç (5 M NaOH), adsorpsiyon yoluyla liç solüsyonundan silikat giderme, alüminyum hidroksit çökeltme (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile) ve çökeltmiş alüminyum hidroksiti kullanarak magnezyum spinel üretimidir. Alüminanın liç verimi yaklaşık %34 iken, sentezlenen spinel fazın saflığı %99,99'dur [7]. Çınarlı ve Turan, kalsinasyon (1100 °C'ye kadar) ve asit liçi (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> ve HCl) yoluyla siyah cüruftan MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> esaslı spinel sentezlemişlerdir. Araştırmacılar, metalik alüminyum ve AlN'ün kalsinasyon aşamasında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e dönüştürülmesi ve bazı halojenür fazlarının buharlaştırılmasını ve ardından kalan halojenür fazlarını uzaklaştırmak için liç işlemini içeren bir süreç geliştirmişlerdir. Kalsinasyon sıcaklığı 1100 °C olan ve takip eden H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> liçini (3,5 M, 60 dk.) içeren deneyde MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (%61,4) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%36,8) ile eser miktarda safsızlık içeren toz karışımı üretmişlerdir. Çalışmanın son bölümünde üretilen seramik tozların sinterleme işlemleri de başarı ile gerçekleştirilmiştir [1].

Ayrıca alüminyum cüruflarından metalik alüminyumun ve alümina esaslı seramiklerin geri kazanımından sonra arda kalan tuzların, alüminyum ergitme flaksı olarak değerlendirilebileceğine ilişkin çalışmalar da literatürde mevcuttur. Alüminyum ergitme flaksları, esas olarak NaCl (%47,5) ve KCl'den (%47,5) ve bazı florür bazlı bileşiklerden (örn. NaF) oluşur. Ergitme operasyonlarında, flaksın iki olumlu etkisi vardır: daha fazla oksidasyonu önlemek ve cüruf fazındaki metalik alüminyum miktarını azaltmak. Cüruf işlemede elde edilen tuzlu fraksiyonlar, alüminyum ergitme flaksı üretmek için dikkate değer bir kaynak olma potansiyeline sahiptir [8 - 10].

**Ömrünü doldurmuş alüminyum elektroliz hücrelerinden çıkan malzemelerin (Karbon katot, çelik kollektör bar ve refrakter gibi) değerlendirilmesi**

Alüminyum Elektroliz hücresinden çıkan demontaj atıklarının bir çoğu farklı şekilde değerlendirilebilir. Katot karbon blokların bazıları antrasit esaslı olduğu için 1000°C'nin altındaki proses sıcaklıklarında yanması zordur. Ayrıca bünyesinde görev yaptığı sürece difüzyon yoluyla absorbladığı elementer sodyum, potasyum v.b. alkali elementler barındırır (Küçük boyuta indirgenmezse bu elementler serbest oksijenle karşılaşınca kıvılcım veya küçük patlamalar yapabilir). Bu yüzden çok düşük boyutlara kırılıp öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda faaliyet gösteren özellikle çimento, cam üretim fırınlarında yakıt olarak kullanılabilir. Çelik kollektör barası aynı şekilde çelik hurdası olarak değerlendirilir (Bünyesindeki sodyum, sıvı ham demirin içerisindeki kükürdü sodyum sülfid şeklinde bağlayarak kükürt giderme görevi üstlenir. SiC+ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> esaslı kompozit bloklar refrakter üretim firmaları tarafından kırma+öğütmeye müteakiben bağlayıcı ilavesiyle tekrar SiC malzeme veya refrakter dolgu malzemesi üretilebilir. Cürufa yapışmaz, cüruflla reaksiyona girmez. Demontaj atığı izolasyon tuğlaları da tekrar kırma+öğütme+bağlayıcı ilavesi ile düşük kaliteli refrakter malzeme üretiminde kullanılarak, kritik olmayan proseslerde veya arka plan dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

### **5.1.e. Atık ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması**

Atık gazların, ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi konusunda yapılacak çalışmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Atık ısının alternatif kullanımı için geri kazanım sistemlerinin geliştirilmesi ve entegre edilmesi
- Atık su ve kimyasalların geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların geliştirilmesi

## **B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri**

### **5.1.a. Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Dünyada THS 4-6; Türkiye'de THS 2-4'tür.

**5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüselliğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

Elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin uygulamaların geliştirilmesi:

Birincil Üretim: Dünyada THS 9; Türkiye’de THS 9 (Güneş enerjisi)’dur.

Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi

Birincil üretim : Dünyada THS 9; Türkiye’de THS 3-4’tür.

**5.1.c. Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 8-9 ‘dur.

**5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

Dünyada THS 9; Türkiye’de THS 3-4’tür.

**5.1.e. Atık ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması**

Dünyada THS 9, Türkiye’de THS 8-9 ‘dur.

**C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler**

**5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüselliğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

**Elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin uygulamaların geliştirilmesi**

Kömür yakıtlı elektrik ile enerji sağlanan birincil tesislerde karbon ayak izi yaklaşık 15-20 CO<sub>2e</sub> t/t Al’dir. Ancak %100 hidroelektrik enerjisi kullanan tesisler için bu değer 4 CO<sub>2e</sub> t/t Al’den azdır

(Kapsam 1, 2 ve 3). Kömür kaynaklı enerji kullanan tesislerin çoğu Çin'de bulunduğu için, endüstrinin emisyonlarının en büyük payı (yaklaşık %70) Çin'den gelmektedir. Küresel alüminyum üretiminin küçük bir kısmı Norveç ve İzlanda'da üretilmekle birlikte, yenilenebilir enerji ve hidroelektriğin kullanımının bir sonucu olarak bu tesislerde 3 CO<sub>2e</sub> t/t Al değeri hesaplanmaktadır.

Ülkemizdeki primer alüminyum üretimi için, toplam %93,9'luk yenilenebilir payı ile ETİ Alüminyum da Dünya'daki başarılı örneklerden bir tanesi olarak ortaya çıkmaktadır. ETİ Alüminyum'da yıllık olarak (2022) tüketilen toplam enerjinin %86'sı hidroelektrik, %7,9'u güneş, %1,1'i kömür ve gerisi ana dağıtım şebekesinden çekilen (enterkonnekte) elektrik kaynağıdır.

### **Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi**

Çin için 2 ton CO<sub>2</sub>/1 ton çelik C ayak izi verilmiştir. Çeliğin Şanghay'dan NewYork'a gemi ile transferi sırasında +0,3 ton ilave emisyon kaydedilir.

Dünya'da, Hydro (Norveç), 2030 yılında birincil alüminyum üretimi ile entegre pilot ölçekteki ilk karbon yakalama tesisini devreye almayı planlamaktadır.

Türkiye'de birincil alüminyum üretimine entegre karbon yakalama araştırmaları, ETİ Alüminyum, İTÜ, Yeditepe Üniversiteleri işbirliği ile araştırılmaktadır ve çalışmalar başlangıç aşamasındadır (THS 3).

### **5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

Dünyada:

- Ferroalaşım, çimento hammadesi, alümina, rutil ve nadir toprak metalleri üretimi için RemovAl projesi <https://www.removal-project.com/>
- FEECO International, Inc., Inovasyon Merkezi <https://feeco.com/>
- RUSAL (Sc kazanımı)
- Peloton Resources (alümina üretimi)

Türkiye'deki paydaşları İstanbul Teknik Üniversitesi, Yeditepe Üniversitesi, ETİ Alüminyum, ASAŞ ve Metkim olan 'Alüminyum, diğer metaller ve bileşiklerinin üretimi için alüminyum içeren hammaddelerin kullanılması' konulu ERA-MIN 3 projesi [HORIZON 2020 EU Co-funded ERA-MIN 3 project (122N062)] halihazırda yürütülmektedir. Proje kapsamında boksit dışı cevherden (diyaspor) ve drosstan metalurjik kalite alümina ve alüminyum üretimi çalışmaları

yapılmaktadır. Ayrıca, proje kapsamında kırmızı çamurdan direkt redüksiyon ile demir kazanımı ve sonrasında geri kalan stratejik metallerin kazanımına yönelik çalışmalar da yürütülmektedir.

#### **D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler**

##### **5.1.a. Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Kimya Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Endüstri Mühendisleri, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Kontrol Mühendisleri, Otomasyon Mühendisleri, Enerji Mühendisliği, Bilgisayar ve Yazılım Mühendisleri projelerde biraraya gelmelidir.

##### **5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Enerji (Sistemleri) Mühendisleri, Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Kimya Mühendisleri; Endüstri Mühendisleri, Bilgisayar ve Yazılım Mühendisleri; Alüminyum Üreticisi Firmalar; Enerji Üreticisi Firmalar; Enerji Dağıtım Firmaları projelerde biraraya gelmelidir.

##### **5.1.c. Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin artırılmasına yönelik en iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Elektrik ve Elektronik Mühendisleri, Enerji (Sistemleri) Mühendisleri, Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Kimya Mühendisleri; Endüstri Mühendisleri, Temel Fen Bilimleri, Çevre Mühendisleri, Bilgisayar ve Yazılım Mühendisleri, Alüminyum Üreticisi Firmalar projelerde biraraya gelmelidir.

##### **5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Kimya Mühendisleri; Endüstri Mühendisleri, Çevre Mühendisleri, Bilgisayar ve Yazılım Mühendisleri, Alüminyum Üreticisi Firmalar; Alüminyum Teknoloji Sağlayıcılar projelerde biraraya gelmelidir.

**5.1.e. Atık ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması**

Metalurji ve Malzeme Mühendisleri, Makine Mühendisleri, Kimya Mühendisleri; Endüstri Mühendisleri, Enerji Mühendisleri, Çevre Mühendisleri, Bilgisayar ve Yazılım Mühendisleri, Alüminyum Üreticisi Firmalar, Alüminyum Teknoloji Sağlayıcılar projelerde biraraya gelmelidir.

**E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması**

**5.1.a. Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Büyük ölçekli projeler ile üniversite-sanayi işbirliğinin desteklenmesi gerekmektedir.

**5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

Öncelikli alanlarda, küçük ölçekli projeler ile üniversitelerin, orta ve büyük ölçekli projeler ile üniversite-sanayi işbirliğinin desteklenmesi gerekmektedir.

**5.1.c. Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Öncelikli alanlarda (makina, malzeme ve üretim teknolojisi) küçük ve orta ölçekli projeler ile üniversite-sanayi işbirliğinin desteklenmesi gerekmektedir.

**5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

Öncelikli alanlarda (makina, malzeme ve üretim teknolojisi) orta ve büyük ölçekli projeler ile üniversite-sanayi işbirliğinin desteklenmesi gerekmektedir.

**5.1.e. Atık ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması**

Öncelikli alanlarda (makina, malzeme ve üretim teknolojisi) küçük ve orta ölçekli projeler ile üniversite-sanayi işbirliğinin desteklenmesi gerekmektedir.

## **F. Zaman ve Bütçe Tahminleri**

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

### **5.1.a. Alüminyum sektöründe üretim proseslerinin dijital ve elektronik teknolojilerle optimizasyonuna yönelik uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Orta Vade hedeflenmelidir.

### **5.1.b. Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin ekonomik döngüsellığe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

#### **Elektrik tüketiminde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin uygulamaların geliştirilmesi**

Büyük ölçekli projeler oluşturulmalıdır. Orta ve uzun vade hedeflenmelidir. 110 milyon TL/proje bütçe öngörülmektedir.

#### **Karbon yakalama, kullanımı ve depolama (CCUS) teknolojilerinin prosese entegrasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi**

Laboratuvar ölçeğinde çalışmalar: kısa vade hedeflenmelidir. 6 milyon TL / proje bütçe öngörülmektedir.

Orta ölçekli projeler: orta vade hedeflenmelidir. 40 milyon TL / proje bütçe öngörülmektedir.

Büyük ölçekli projeler: uzun vade hedeflenmelidir. 90 milyon TL / proje bütçe öngörülmektedir.

### **5.1.c. Tüm proseslerde enerji ve malzeme verimliliğinin arttırılmasına yönelik en iyileme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve yaygınlaştırılması**

Hali hazırda uygulanan proses birim işlemleri ve sarf malzemeleri kısa vade, üretim teknolojilerinin iyileştirilmesi orta vade, malzeme (tanımlanmış ve sertifikalandırılmış) ve makina iyileştirilmesine uzun vade hedeflenmelidir.

### **5.1.d. Alüminyum tesislerinde ortaya çıkan yan ürün ve atık yönetimine ilişkin yöntemlerin ve uygulamaların geliştirilmesi**

Kısa/orta/uzun vade hedeflenmelidir.

**5.1.e. Atık ısının ve suyun geri kazanımına yönelik teknolojilerin ve uygulamaların yaygınlaştırılması**

Kısa vade hedeflenmelidir.

**G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar**

Sıfırdan kurulacak tesislerde dögüsel ekonomiyi hedef alan ve enerji verimliliğini en üst düzeye çıkaracak detaylı fizibilite (ara birimlerin yerleşimi, makine seçimi, vb.) çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Alüminyum sektörü ile ilişkili yatırım planlamalarında ulusal ve küresel gerçeklerin dikkate alınması, ihtiyacın (talebin) iyi yönetilmesi, yatırımın ÇED raporunun detaylandırılması (hangi enerji kaynağı kullanılacak, sürdürülebilirlik, simbiyotik atık yönetimi vb.) ve detaylı fizibilitenin çevre, iş sağlığı ve güvenliğini de kapsayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Her durumda **yaşam dögüsü** ve **sosyal yaşam dögüsü** dikkate alınmalıdır.



## Referanslar

### **Alüminyum ve alaşımlarının üretim tesislerinde kullanılan enerji girdisinin döngüsellğe uygun ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

[1] Saevarsdottir G, Kvande H, Welch BJ. Aluminum Production in the Times of Climate Change: The Global Challenge to Reduce the Carbon Footprint and Prevent Carbon Leakage. JOM. 2020;72(1):296-308. doi:10.1007/S11837-019-03918-6/FIGURES/4[2] <http://www.world-aluminium.org/>

[3] United Nations Framework Convention on Climate Change. The Paris Agreement | UNFCCC. *United Nations Framew Conv Clim Chang*. Online yayınlanma tarihi 2020. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

[4] Das S. The Quest for Low Carbon Aluminum: Developing a Sustainability Index. Light Met Age. Online yayınlanma tarihi 2021.

[5] Grandfield J. Update on the Aluminium Industry Response to Climate Change, Light Metal Age. Light Met Age. Online yayınlanma tarihi 2020.

### **Atık olarak ayrıştırılan kırmızı çamurun değerlendirilmesi (Sekonder Alümina, sodyum hidroksit, diğer stratejik elementler) ve geri kazanımı**

[1] Silveira, N.C.G.; Martins, M.L.F.; Bezerra, A.C.S.; Araújo, F.G.S. Red Mud from the Aluminium Industry: Production, Characteristics, and Alternative Applications in Construction Materials—A Review. *Sustainability* 2021, 13, 12741.

[2] Liu Y, Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): recovery of metals. *Waste Manag*. 2014;34(12):2662-73.

[3] Chun T, Zhu D, Pan J, He Z. Recovery of Alumina from Magnetic Separation Tailings of Red Mud by Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Solution Leaching. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014;45(3):827-32.

[4] Deng B, Li G, Luo J, Ye Q, Liu M, Peng Z, et al. Enrichment of Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> from bauxite ore residues. *Journal of Hazardous Materials*. 2017;331:71-80.

[5] Gomes HI, Jones A, Rogerson M, Burke IT, Mayes WM. Vanadium removal and recovery from bauxite residue leachates by ion exchange. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23(22):23034-42.

[6] Borra CR, Blanpain B, Pontikes Y, Binnemans K, Van Gerven T. Smelting of Bauxite Residue (Red Mud) in View of Iron and Selective Rare Earths Recovery. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016;2(1):28-37.

**Alüminyum cürufunun değerlendirilmesine (metalik alüminyumun yüksek verimlilikle geri kazanımı, alümina esaslı bileşiklerin elde edilmesi, sekonder tuz üretimi) yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi**

[1] Cinarli U, Turan A (2021) Investigation of Alumina-Based Ceramic Production from Aluminum Black Dross. Mining, Metallurgy & Exploration (2021) 38:257–267. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00344-0>

[2] Mahinroosta M, Allahverdi A (2018) A promising green process for synthesis of high purity activated-alumina nanopowder from secondary aluminum dross. J Clean Prod 179:93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.079>

[3] Huang XL, El Badawy A, Arambewela M, Ford R, Barlaz M, Tolaymat T (2014) Characterization of salt cake from secondary aluminum production. J Hazard Mater 273:192–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.035>

[4] Polat, B.T., Öner, İ.E., Kan, S. et al. Fused Calcium Aluminate Production from Aluminum White Dross Residue. J. Sustain. Metall. 8, 851–862 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00532-w>

[5] Beheshti R, Moosberg-Bustnes J, Akhtar S, Aune RE (2017) Black dross processing: utilization of black dross in the production of a ladle fluxing agent. J Sustain Metall 3:265–273. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0076-2>

[6] Nguyen TTN, Lee MS, Nguyen TH (2018) Ball milling treatment of black dross for selective dissolution of alumina in sodium hydroxide leaching. Processes 6. <https://doi.org/10.3390/pr6040029>

[7] Nguyen TTN, Song SJ, Lee MS (2020) Development of a hydrometallurgical process for the recovery of pure alumina from black dross and synthesis of magnesium spinel. J Mater Res Technol 9:2568–2577. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.087>

[8] <https://aluminium-guide.com/>

[9] Gallo R, Neff D, Aluminum Fluxes and Fluxing Practice, ASM Handbook Volume 15: Casting, 2008. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.a0005300>

[10] <http://www.salt-partners.com/>

## EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Alüminyum Sektörü Danışma Grubu Üyeleri

No	Ad-Soyad	Kurum/Kuruluş
1	Prof. Dr. Özgül KELEŞ (Moderatör)	İstanbul Teknik Üniversitesi
2	Prof. Dr. Ahmet ÖZEL	Sakarya Üniversitesi
3	Doç. Dr. Ahmet TURAN	Yeditepe Üniversitesi
4	Prof. Dr. Ali KALKANLI	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
5	Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar VANLI	Yıldız Teknik Üniversitesi
6	Doç. Dr. Çağlar Oğuz Kağan YÜKSEL	Atatürk Üniversitesi
7	Prof. Dr. Fevzi YILMAZ	Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi
8	Prof. Dr. Kadir KOCATEPE	Gazi Üniversitesi
9	Dr. M. Cumhur ÖZGİRGİN	Almesan Alüminyum
10	Doç. Dr. Önder AYER	Trakya Üniversitesi
11	Prof. Dr. S. Can KURNAZ	Sakarya Üniversitesi

## EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Alüminyum Sektörel Odak Grubu Katılımcı Kuruluşları

**Moderatör – Celalettin KIRBOZ** Girişimci Alüminyum Sanayici ve İş Adamları Derneği (GALSİAD)

Kurum / Kuruluş	Kurum / Kuruluş
Akpa Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.	İstanbul Demir ve Demir Dışı Metaller İhracatçıları Birliği (İDDMİB)
Al Dross Alüminyum San. ve Tic. Şti.	Mita kalıp ve döküm sanayi a.ş
Almesan Alüminyum	P.M.S. Metal Profil Alüminyum San ve Tic. A.Ş.
Arslan Alüminyum A.Ş.	Panda Alüminyum A.Ş.
Asaş Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Sarkuysan Elektrolitik Bakır San. Tic. A.Ş.
Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Seykoç Alüminyum
Astaş Alüminyum San. ve Tic. A.Ş.	Sistem Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.
Cansan Alüminyum Profil San ve Tic. A.Ş.	Sistem Teknik
Cevher Jant	Şahinler Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş.
CW Metal San ve Tic. A.Ş	T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı - Sanayi Genel Müdürlüğü - Metal Sanayi Daire Başkanlığı
Çelikel Alüminyum	TOBB
Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş.	TRİ Metalurji A.Ş.
Döktaş Dökümcülük Tic. Ve San. A.Ş.	Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği (TALSAD)
ETİ Alüminyum	Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD)
<b>Girişimci Alüminyum Sanayici ve İş Adamları Derneği (GALSİAD)</b>	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi
INSERSEK	

### EK3: Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli TÜBİTAK Yetkilileri

Ad Soyad	Kurum/Kuruluş
Hande ALPASLAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanı
Melis KOCATÜRK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Müdür V.
Dr.Özlem DOĞAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Başuzmanı
Mehmet İmran AKSU	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı
Büşra YILMAZ YANIK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı

