

Türkiye'nin Sanayide Enerji Verimliliği Görünümü Projesi Raporu

2025

Bu rapor, TÜSİAD ve Özyeğin Üniversitesi Enerji, Çevre ve Ekonomi Merkezi (CEEE/EÇEM) iş birliği ile yürütülen proje çerçevesinde EÇEM tarafından hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	1
Önsöz.....	2
1. GİRİŞ	3
1.1. 19 Aralık 2023 Tarihli Çalıştay ve Anket Çalışması	4
1.2. 12 Şubat 2024 Tarihli Çalıştay	18
2. SEKTÖREL TEMEL PERFORMANS GÖSTERGELERİ	19
2.1. Döküm Sektörü	21
2.2. Gübre Sektörü	24
2.3. Süt Sektörü	27
2.4. Yalıtım Sektörü.....	30
3. SEKTÖRLERDEKİ KIYASLAMA SONUÇLARI	33
3.1. Genel Bulgular	33
3.2. Döküm Sektörü	34
3.3. Gübre Sektörü	39
3.4. Süt Sektörü	45
3.5. Yalıtım Sektörü.....	47
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
5. KAYNAKÇA	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1 Döküm Sektörü Proses Şeması	34
Şekil 2 Ergitme Prosesi SET Kıyaslaması	35
Şekil 3 Gübre Sektörü Proses Şeması	39
Şekil 4 Gübre Sektörü Proses Şeması - 2	40
Şekil 5 Gübre Üretim Tesislerinin Spesifik Enerji Tüketimi Kıyaslaması.....	42
Şekil 6 Sadece Gübre Üretimi Spesifik Enerji Tüketimi Kıyaslaması.....	43
Şekil 7 Süt Sektörü Proses Şeması	45
Şekil 8 Yalıtım Sektörü Proses Şeması.....	47

Önsöz

Türkiye'nin Sanayide Enerji Verimliliği Görünümü Projesi, Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği (TÜSİAD) ve Özyeğin Üniversitesi Enerji, Çevre ve Ekonomi Merkezi (CEEE/EÇEM) iş birliğinde yürütülmüştür.

Bu projenin hayata geçirilmesinde verdikleri değerli destek ve katkılarıyla yanımızda olan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimizi sunarız. Projenin başlamasına verdikleri önemli desteklerinden dolayı TÜSİAD Yönetim Kurulu Başkanı Orhan Turan, Yönetim Kurulu Üyesi ve Enerji, Çevre ve İklim Değişikliği Yuvarlak Masası Başkanı Cevdet Alemdar, Yönetim Kurulu Yedek Üyesi ve Enerji, Çevre ve İklim Değişikliği Yuvarlak Masası Başkan Yardımcısı Durmuş Topcu, Enerji Verimliliği Grubu Başkanı Fatih Memiş ve Genel Sekreter Yardımcısı Dr. Nurşen Numanoglu'na teşekkür ederiz. Ayrıca, proje sürecindeki katkıları için TÜSİAD Sanayi ve Sektörel Politikalar Bölümü Uzmanları Elif Taşyürek ve Berkay Kekül'e minnettarız. Projenin yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Özyeğin Üniversitesi Enerji Çevre ve Ekonomi Merkezi (ÖzÜ-EÇEM) ve Teknoloji Transfer Ofisi (ÖzÜ-TTO) uzmanlarına da teşekkür ederiz.

Bu süreçte destekleriyle projemize değer katan Proje Grubu üyeleri Kıvılcım Grubu kurucu ortakları Canan M. Özsoy ve H. Haluk Yalçın'a, Enerji Verimliliği ve Yönetimi Derneği Yönetim Kurulu Başkanı ve Türk İş Dünyası Konfederasyonu Yönetim Kurulu Başkan Yardımcısı Onur Ünlü'ye, Escon Enerji A.Ş. Uluslararası Projeler Koordinatörü Hakkı Buyruk ile Deloitte Teknoloji ve Dönüşüm Müdürü Deniz C. Karakuz'a da ayrıca teşekkür ederiz.

Projenin başarıyla tamamlanması, yalnızca bireysel çabaların değil, aynı zamanda bu değerli iş birliklerinin bir sonucudur. Bu sebepten ötürü, projemize desteklerini sunan paydaşlarımız T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı ve Başkan Vekili Dr. Bilal Düzgün, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği ve Genel Sekreteri Tunçağ Şen, Enerji Verimliliği Derneği ve Genel Sekreteri İhsan Sabri Öksüz, Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği ve Genel Sekreteri Timur Diz, Enerji Verimliliği ve Yönetimi Derneği, Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği, Türk İş Dünyası Konfederasyonu ve ESCON'a katkılarından ötürü teşekkür ederiz.

M. Pınar Mengüç ve Kaan Gürel

Özyeğin Üniversitesi, CEEE/EÇEM

1. GİRİŞ

TÜSİAD ve Özyeğin Üniversitesi, Enerji, Çevre ve Ekonomi Merkezi (EÇEM) iş birliğinde yürütülen Türkiye'nin Sanayide Enerji Verimliliği Görünümü Projesi, 13 Eylül 2023 tarihinde yapılan açılış toplantısı ile başlatılmıştır. Proje, Türkiye'de sanayi sektörlerinin enerji verimliliği ve tasarruf potansiyelini ulusal ve uluslararası referanslar ile karşılaştırmalı olarak ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Proje ile;

- Enerji verimliliği konusunda farkındalığı en üst düzeye çıkarmak amacıyla projede yer alan sektörlerin enerji verimliliği görünümüne ilişkin bilgi paylaşılması,
- Türkiye'nin endüstriyel enerji verimliliği görünümüne ilişkin kapsamlı bir genel bakış sağlamak için bir metodoloji sunulması,
- Sanayide enerji verimliliği potansiyelinin en üst düzeyde hayata geçirilmesine katkıda bulunulması,
- Enerji tasarrufundan verimliliğe geçişte akademik rehberlik sağlanması hedeflenmiştir.

Proje katılımcılık ve veri gizliliği temel alınarak yürütülmüştür. Projeye katılım sürecinde, ağaç işleri, kâğıt ve kâğıt ürünleri; elektrik ve elektronik, cam, çimento ve toprak, kimya, petrol, lastik ve plastik, otomotiv ve yan sanayi, tarım, gıda ve içecek, tekstil, hazır giyim ve deri ve diğer sektörler olmak üzere sanayinin çeşitli alt sektörlerinden başvuru alınmıştır. Proje uygulama dönemi, kıyaslama çalışması yapılmasına imkân vereceği öngörülen yeter sayıda başvuru alınan döküm, gübre, süt ve yalıtım sektörlerinde faaliyet gösteren firmalarla gerçekleştirilmiştir.

Uygulama döneminde yer alan firmaların proje kapsamında paylaştığı verilerle ilgili tüm süreçler EÇEM tarafından yürütülmüş; veri gizliliği, EÇEM'in firmalarla imzaladığı gizlilik sözleşmeleri ile temin edilmiştir. Veri gizliliğinin sağlanması amacıyla projeye başvuran ve uygulama döneminde yer alan firmaların listesi herhangi bir şekilde duyurulmamış, diğer firmalarla paylaşılmamış ve firmaların projede yer aldığını duyurmaları kendi tasarruflarına bırakılmıştır.

Uygulama döneminde gerçekleştirilen kıyaslama çalışmaları için hangi verilerin gerekli olduğunu firmaların özgün deneyimlerini de dikkate alarak tespit etmek amacıyla iki çalıştay¹ gerçekleştirilmiştir. Bu çalıştaylardan elde edilen bilgiler ışığında veri toplama çerçeveleri oluşturulmuştur. Uygulama döneminde yer alan firmalar verilerini bu çerçeveler aracılığıyla paylaşmıştır. Kıyaslama çalışmaları yapılabilmesine imkân sağlayacak düzeyde veri döküm ve gübre sektörlerinde faaliyet gösteren firmalar tarafından paylaşılmıştır.

¹ Bu çalıştaylara ilişkin detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

Kıyaslama çalışmalarında, üretilen ürün miktarı başına tüketilen enerji miktarı olarak tanımlanan spesifik enerji tüketimleri ölçüt olarak kullanılmıştır. Firmaların spesifik enerji tüketimlerini içeren kıyaslama grafikleri, mümkün olduğunca aynı ürünü üreten ve benzer proses yapısına sahip firmaların verileri analiz edilerek hazırlanmıştır. Sağlıklı bir kıyaslama çalışması ortaya koyabilmek amacıyla, ihtiyaç olan durumlarda, hesaplanan spesifik enerji tüketimleri firmalara özgü kapasite kullanım oranı, ürün gamı, iklimsel koşullar gibi değişkenlere göre normalize edilmiştir.

Bu çerçevede, döküm ve gübre sektörlerinde kıyaslama çalışmalarını temel alan, süt ve yalıtım sektörlerinde ise proje kapsamında elde edilen bilgileri içeren proje raporları hazırlanmıştır.

1.1. 19 Aralık 2023 Tarihli Çalıştay ve Anket Çalışması

TÜSİAD-EÇEM iş birliğinde yürütülen Türkiye’de Sanayide Enerji Verimliliği Görünümü Projesi kapsamında, 19 Aralık 2023 tarihinde gerçekleştirilen çevrimiçi çalıştaya, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, iş dünyası ve sektörel derneklerden temsilciler katılmıştır.

Bu çalıştayda gerçekleştirilen anket çalışmasında, Türkiye'deki sanayi kuruluşlarının enerji verimliliği konusundaki farkındalık ve aşinalık düzeyleri, enerji yönetimi uygulamaları, kaynak tahsisi ve taahhüdü, düzenlemeler ve uyumluluk, enerji kullanımı ve üretimi, geleceğe bakış ve proje hedefleri gibi konulardaki görüşleri incelenmiştir. Anket çalışması, Türkiye'de faaliyet gösteren farklı ölçek ve sektörlerden 46 kuruluşa uygulanmıştır. Anket sonuçları, sanayi kuruluşlarının enerji verimliliği konusunda önemli ilerlemeler kaydettiğini göstermektedir; bu sonuçlara ilişkin grafikler bölümün sonunda verilmektedir.

Anket sonuçlarında katılan kuruluşlarda enerji verimliliği uygulamalarına önemli bir yer verildiği gözlemlenmiştir. Kuruluşların büyük çoğunluğunun geçmişte enerji verimliliği, enerjiye erişim veya enerji maliyeti ile ilgili konularda zorluklarla karşılaştığı; enerji verimliliği projelerini sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu şekilde aktif olarak uygulamakta olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, kuruluşların büyük çoğunluğunun enerji yönetimi strateji ve uygulamalarını devreye aldığı görülmüştür. Ancak, kuruluşların bir kısmı bu uygulamaları hayata geçirirken yaşadıkları zorlukları başarıyla ele almakta zorlandıklarını ve çalışanlarını sürece dahil etmek konusunda kararsızlıklarını ve karşıtlıklarını dile getirmiştir. Benzer bir durum kaynak kullanımı ve taahhüdü konusunda da görülmektedir. Katılımcıların yaklaşık üçte biri enerji verimlilik projelerine bütçe ayırma ve akademi ya da danışmanlık şirketleri gibi kuruluşlardan destek almak hususunda kararsızlıklarını bildirmiştir.

Kuruluşların, enerji verimliliği performanslarını koruma ve artırmada standartlara ve düzenlemelere uyum önemlidir. Ankete katılan kuruluşların yaklaşık %80'i standartlara ve düzenlemelere uyum sağladıklarını bildirmiştir. Sonuçlara göre, bu kuruluşların yarısı güncel düzenleme ve standartları takip etmek için dışarıdan destek almaktadır. Kuruluşların büyük çoğunluğu standart ve düzenlemelere uyumlu olsa da sadece üçte biri hem enerji denge hem ısı haritası çalışması, diğer üçte biri ise yalnızca enerji denge çalışması yapmıştır. Kuruluşların kalan üçte biri ise bu çalışmaların hiçbirini yapmamıştır.

Ankete katılan kuruluşların enerji yoğunluğu ve yenilenebilir enerji kullanımı da enerji verimliliği açısından önemli bulgular sunmaktadır. Ankete katılan kuruluşların, ürettikleri ürünlerin maliyetinde enerjinin payına ilişkin cevapları neredeyse dengeli dağılmıştır. Tüm katılımcılar arasında, ürün maliyetinde enerjinin payı %60-%80 aralığında olan kuruluşlar en yüksek oranla %28'i oluştururken, ürün maliyetinde enerji payı %20'den düşük olan kuruluşlar katılımcıların %13'ünü oluşturmuştur (Bknz. 16. Soru). Kuruluşların %62'si kullandıkları enerjinin en fazla %40'ının yenilenebilir ya da geri dönüştürülmüş enerji olduğunu belirtmiştir. Yenilenebilir enerji kullanım oranı düşük olmasına rağmen, katılan kuruluşların büyük çoğunluğu fosil yakıt kullanımını azaltmak için aktif çalışmalar yürüttüğünü belirtmiştir. Kuruluşlar ek olarak üretim kapasitesi ve esnekliklerini artırmak için teknoloji entegrasyonu üzerine çalıştıklarını bildirmiştir.

Kuruluşların enerji verimliliği performanslarını geliştirmek için yaptığı çalışmalar olsa da kuruluşların neredeyse yarısı mevcut üretim yöntemlerinde enerji çeşidi, tedariki ve kullanımı açısından çeşitli darboğazlar yaşadığını belirtirken, yalnızca dörtte biri bu konuda bir problem yaşamadığını bildirmiştir; kalan dörtte biri ise kararsızlıklarını bildirmişlerdir. Üretilen ürünlerin yüksek kalite standartlarının üretim hattında enerji kullanımı ile ilgili değişiklikleri zorlaştırması konusunda da benzer bir sonuç gözlemlenmiştir. Kalite standartlarında düşük esneklik payının yaşanan darboğazların bir nedeni olabileceği değerlendirilmektedir (Bknz. 20 ve 21. Sorular).

Ankete katılan kuruluşların büyük çoğunluğu yaşanan teknolojik gelişmeleri aktif olarak takip ettiğini belirtmiştir. Kuruluşların büyük çoğunluğu yapay zekanın gelecekte enerji verimliliğine etkisinin yüksek olacağını belirtirken, tüm kuruluşlar yapay zekâ yanı sıra diğer yenilikçi fikirlerin de gelecekte enerji verimliliğine katkısının büyük olacağını belirtmiştir. Kuruluşların büyük çoğunluğu, önümüzdeki beş ila on yıl içinde enerji açısından daha verimli ve sürdürülebilir hale geleceklerini öngörmüştür.

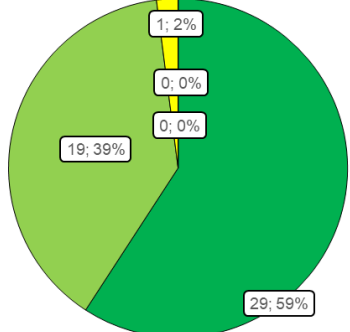
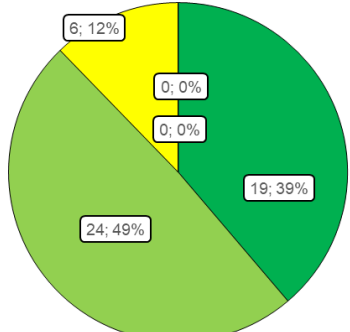
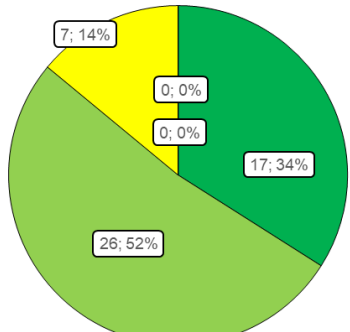
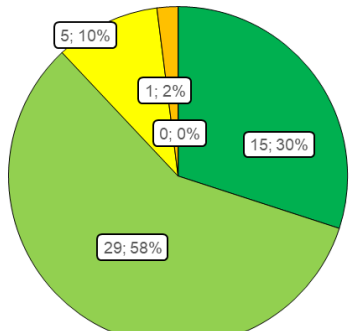
Bu çalışmada, proje beklentileri büyük önem arz etmektedir. Katılımcıların büyük çoğunluğu projenin Türkiye’de enerji verimliliği performansını iyileştirme ve kuruluşlarının enerji verimliliği performansını artırma konularında büyük katkı sağlayacağını bildirmiştir.

Projede veri analizi önemli bir rol oynamakta olup projede paylaşılması talep edilecek veriler konusu hassasiyet taşımaktadır. Anket alışması yanı sıra çalıştayda gerçekleşen iştişarede de kuruluşlar en kritik konu olarak veri gizliliğine dikkat çekmiştir. Öte yandan, katılımcıların büyük çoğunluğu veri paylaşımı konusuna olumlu baktığını bildirmiştir. Veri güvenliğinin taahhüt edilmesinin paylaşımı kolaylaştırıcı bir unsur olduğu gözlenmiştir.

Katılımcı kuruluşlar, proje kapsamındaki kıyaslama çalışmaları aracılığıyla verimlilik konusunda yol haritası çizilmesini, karşılaştırma yapılmasını ve kuruluşlarının enerji verimliliği performanslarını iyileştirmeyi hedeflemektedir. Bu çerçevede, kuruluşlar daha rekabetçi olabileceklerini belirtmiştir. Kuruluşlar ayrıca veri gizliliği, verilerin doğru toplanması analizlerin doğru yürütülmesi ve iletişimin srekliiliğinin projenin başarısı için önemli olduğunu bildirmiştir.

Anketlerde Sorulan Sorulara Gelen Cevap Dağılımı:

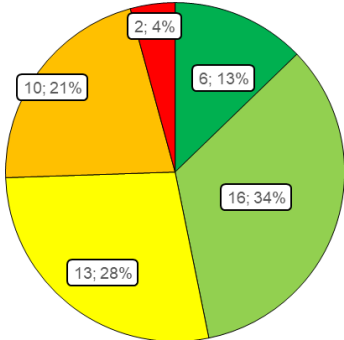
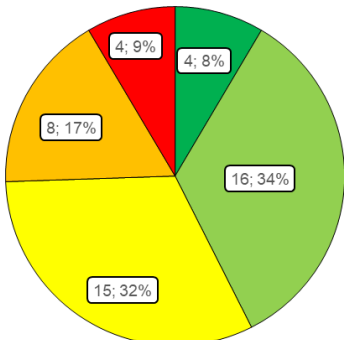
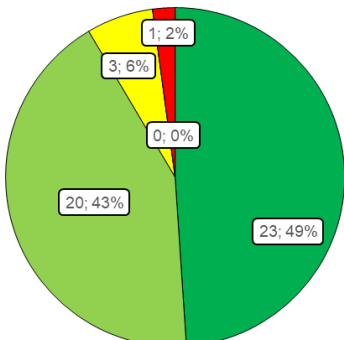
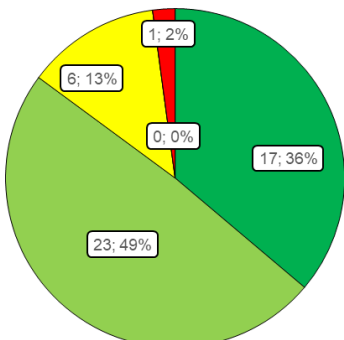
Sorular:	Cevaplar:																				
Kesinlikle Katılmıyorum Katılmıyorum Kararsızım Katılıyorum Kesinlikle Katılıyorum																					
Farkındalık ve Aşinalık:																					
1. "Enerji verimliliğinin kuruluşumuzun operasyonlarının çok önemli bir yönü olduğuna inanıyorum." (Enerji Verimliliğinin Önemi)		<table><tr><th>Cevap</th><th>Sayı</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>Kesinlikle Katılıyorum</td><td>39</td><td>80%</td></tr><tr><td>Katılıyorum</td><td>10</td><td>20%</td></tr><tr><td>Kararsızım</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>Katılmıyorum</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>Kesinlikle Katılmıyorum</td><td>0</td><td>0%</td></tr></table>	Cevap	Sayı	Oran (%)	Kesinlikle Katılıyorum	39	80%	Katılıyorum	10	20%	Kararsızım	0	0%	Katılmıyorum	0	0%	Kesinlikle Katılmıyorum	0	0%	
Cevap	Sayı	Oran (%)																			
Kesinlikle Katılıyorum	39	80%																			
Katılıyorum	10	20%																			
Kararsızım	0	0%																			
Katılmıyorum	0	0%																			
Kesinlikle Katılmıyorum	0	0%																			
2. "Kuruluşumuz, geçmişte enerji verimliliği, enerjiye ulaşım ve(ya) enerji pahalılığı ile ilgili konularda zorluklarla karşılaştı." (Enerjiyle İlgili Zorluklar)		<table><tr><th>Cevap</th><th>Sayı</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>Kesinlikle Katılıyorum</td><td>6</td><td>12%</td></tr><tr><td>Katılıyorum</td><td>30</td><td>61%</td></tr><tr><td>Kararsızım</td><td>9</td><td>19%</td></tr><tr><td>Katılmıyorum</td><td>4</td><td>8%</td></tr><tr><td>Kesinlikle Katılmıyorum</td><td>0</td><td>0%</td></tr></table>	Cevap	Sayı	Oran (%)	Kesinlikle Katılıyorum	6	12%	Katılıyorum	30	61%	Kararsızım	9	19%	Katılmıyorum	4	8%	Kesinlikle Katılmıyorum	0	0%	
Cevap	Sayı	Oran (%)																			
Kesinlikle Katılıyorum	6	12%																			
Katılıyorum	30	61%																			
Kararsızım	9	19%																			
Katılmıyorum	4	8%																			
Kesinlikle Katılmıyorum	0	0%																			
3. "Kuruluşumuz enerji verimliliği projelerini aktif olarak uyguluyor." (Enerji Verimliliği Projeleri)		<table><tr><th>Cevap</th><th>Sayı</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>Kesinlikle Katılıyorum</td><td>23</td><td>47%</td></tr><tr><td>Katılıyorum</td><td>23</td><td>47%</td></tr><tr><td>Kararsızım</td><td>3</td><td>6%</td></tr><tr><td>Katılmıyorum</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>Kesinlikle Katılmıyorum</td><td>0</td><td>0%</td></tr></table>	Cevap	Sayı	Oran (%)	Kesinlikle Katılıyorum	23	47%	Katılıyorum	23	47%	Kararsızım	3	6%	Katılmıyorum	0	0%	Kesinlikle Katılmıyorum	0	0%	
Cevap	Sayı	Oran (%)																			
Kesinlikle Katılıyorum	23	47%																			
Katılıyorum	23	47%																			
Kararsızım	3	6%																			
Katılmıyorum	0	0%																			
Kesinlikle Katılmıyorum	0	0%																			

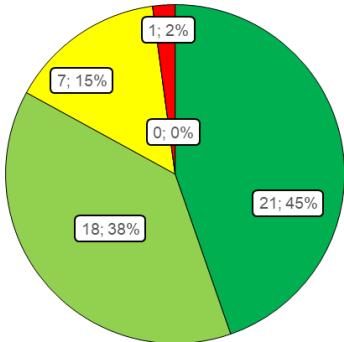
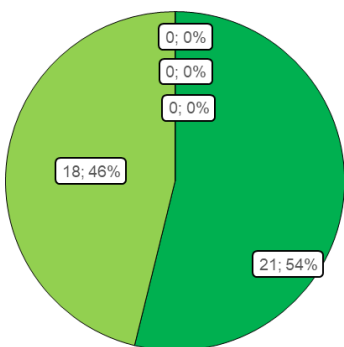
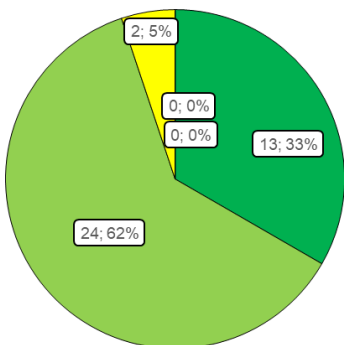
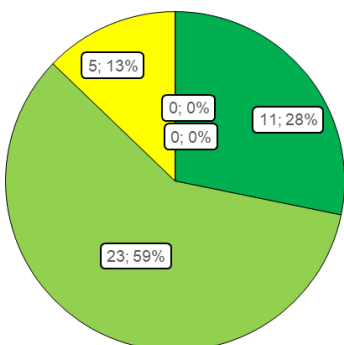
4. "Enerji verimliliği uygulamaları kuruluşumuzun daha geniş sürdürülebilirlik hedefleriyle yakından uyumludur." (Sürdürülebilirlik Hedeflerine Uyum)	 <table><tr><th>Kategori</th><th>Değer</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>19</td><td>39</td><td>39%</td></tr><tr><td>29</td><td>59</td><td>59%</td></tr></table>	Kategori	Değer	Oran (%)	1	2	0%	0	0	0%	0	0	0%	19	39	39%	29	59	59%
Kategori	Değer	Oran (%)																	
1	2	0%																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
19	39	39%																	
29	59	59%																	
5. "Kuruluşumuz, çalışanlarını enerji verimliliği uygulamalarına etkili bir şekilde dahil ediyor." (Çalışan Katılımı)	 <table><tr><th>Kategori</th><th>Değer</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>6</td><td>12</td><td>12%</td></tr><tr><td>19</td><td>39</td><td>39%</td></tr><tr><td>24</td><td>49</td><td>49%</td></tr></table>	Kategori	Değer	Oran (%)	0	0	0%	0	0	0%	6	12	12%	19	39	39%	24	49	49%
Kategori	Değer	Oran (%)																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
6	12	12%																	
19	39	39%																	
24	49	49%																	
<u>Enerji Yönetimi Uygulamaları:</u>																			
6. "Kuruluşumuzun enerji kullanımını yönetmek ve optimize etmek için iyi tanımlanmış bir stratejisi var." (Enerji Yönetim Stratejisi)	 <table><tr><th>Kategori</th><th>Değer</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>7</td><td>14</td><td>14%</td></tr><tr><td>17</td><td>34</td><td>34%</td></tr><tr><td>26</td><td>52</td><td>52%</td></tr></table>	Kategori	Değer	Oran (%)	0	0	0%	0	0	0%	7	14	14%	17	34	34%	26	52	52%
Kategori	Değer	Oran (%)																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
7	14	14%																	
17	34	34%																	
26	52	52%																	
7. "Enerji yönetimi kuruluşumuzun genel iş stratejisinde önemli bir rol oynuyor." (İş Stratejisindeki Rolü)	 <table><tr><th>Kategori</th><th>Değer</th><th>Oran (%)</th></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>2%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>5</td><td>10</td><td>10%</td></tr><tr><td>15</td><td>30</td><td>30%</td></tr><tr><td>29</td><td>58</td><td>58%</td></tr></table>	Kategori	Değer	Oran (%)	1	2	2%	0	0	0%	5	10	10%	15	30	30%	29	58	58%
Kategori	Değer	Oran (%)																	
1	2	2%																	
0	0	0%																	
5	10	10%																	
15	30	30%																	
29	58	58%																	

8. "Kuruluşumuz enerji tüketimini ve performansını etkin bir şekilde izliyor ve ölçüyor." (İzleme ve Ölçüm)	
9. "Kuruluşumuz, enerji yönetimi uygulamalarını hayata geçirirken engelleri ve zorlukları başarıyla ele aldı." (Engeller ve Zorluklar)	
10. "Kuruluşumuzda, tüm çalışanlarımızın enerji verimliliği ile görüşleri ele alınıp incelenmektedir." (Engeller ve Zorluklar)	
<u>Kaynak Tahsisi ve Taahhüdü:</u>	
11. "Kuruluşumuz enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik çalışmalarına yeterli kaynak (zaman, bütçe, personel) ayırmaktadır." (Kaynak Tahsisi)	

12. "Kuruluşumuz enerji verimliliğini artırmak için aktif olarak ortaklıklar ve iş birlikleri yürütmektedir (danışmanlık şirketleri, akademi vb.)." (Ortaklıklar ve İş birlikleri)	
<u>Düzenlemeler ve Uyumluluk:</u>	
13. "Kuruluşumuz, enerji verimliliğiyle ilgili sektöre özel düzenlemeler ve standartlarla uyumludur." (Mevzuata Uygunluk)	
14. "Kuruluşumuz, enerjiyle ilgili gelişen düzenlemeler ve gereksinimler konusunda güncel kalmak için aktif olarak dışarıdan yardım almaktadır." (Güncellik)	
<u>Enerji Kullanımı ve Üretim:</u>	
15. "Kuruluşumuzda daha önce, fabrika genelinde, enerji denge ve ısı haritası çalışmaları yapıldı." (Enerji Çalışmaları)	

16. "Ürünlerimizin maliyetinin büyük çoğunluğunu enerji giderleri oluşturmaktadır." (Enerji Yoğunluğu) Kesinlikle katılmıyorum (≤%20) Katılmıyorum (%20 - %40) Kararsızım (%40 - %60) Katılıyorum (%60 - %80) Kesinlikle Katılıyorum (≥%80)	
17. "Kuruluşumuz, kullandığı enerjinin büyük çoğunluğunu yenilenebilir (güneş, rüzgâr, jeotermal, hidro vb.) ve(ya) geri dönüştürülmüş (ör: atık ısı) kaynaklardan sağlamaktadır." (Yenilenebilir Enerji Kullanımı) Kesinlikle katılmıyorum (≤%20) Katılmıyorum (%20 - %40) Kararsızım (%40 - %60) Katılıyorum (%60 - %80) Kesinlikle Katılıyorum (≥%80)	
18. "Kuruluşumuz, fosil yakıt (kömür, doğal gaz, petrol vb.) kullanımını düşürmek için aktif çalışmalar yürütmektedir." (Fosil Yakıt Kullanımını Azaltma)	
19. "Kuruluşumuz, üretim kapasitesini ve esnekliğini arttırmak için teknoloji entegrasyonu üzerine çalışmaktadır (ör: Endüstri 4.0 ve 5.0)." (Teknoloji Entegrasyonu)	

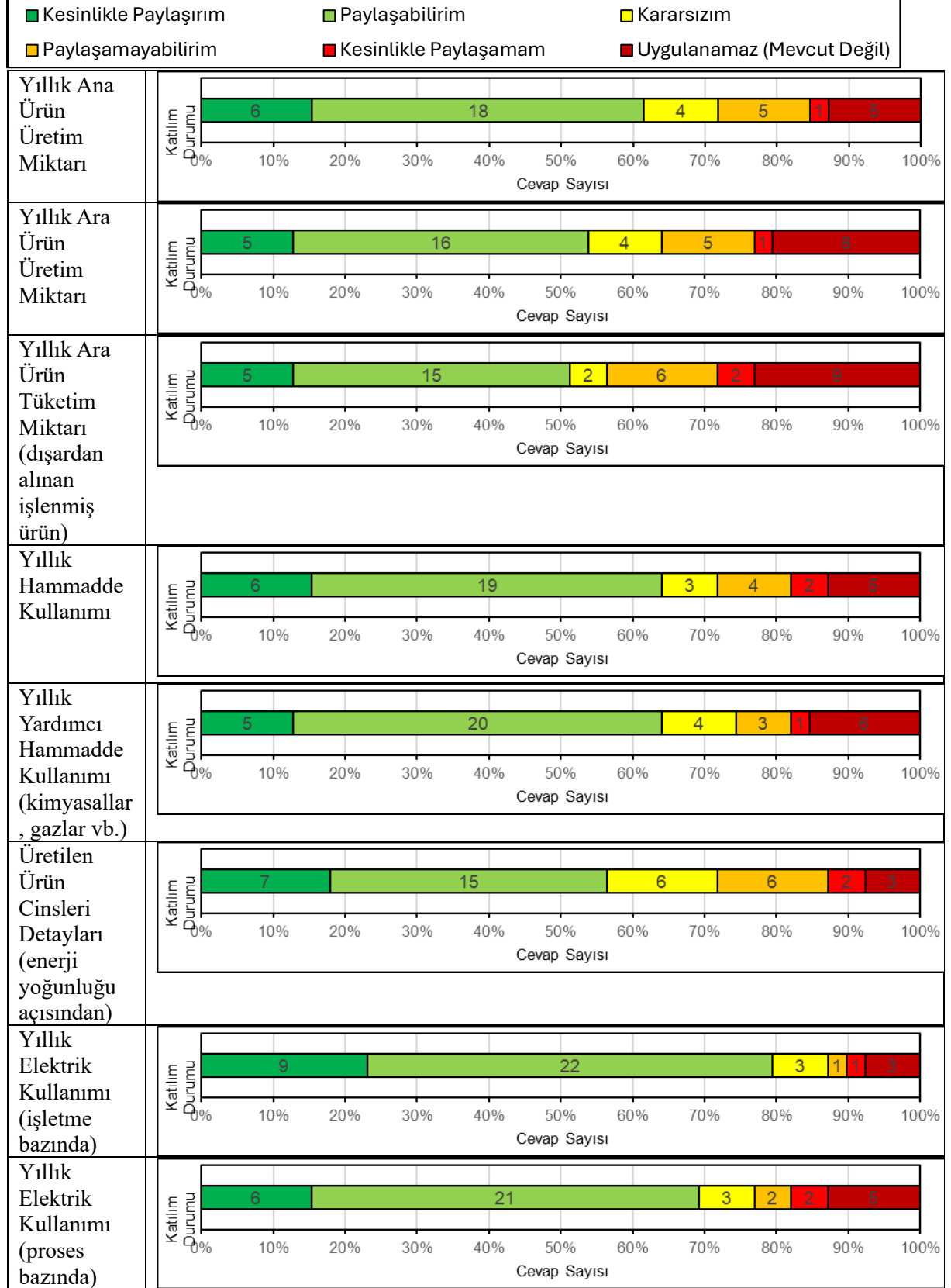
20. "Kuruluşumuz, mevcut üretim yöntemlerinde enerji çeşidi, tedariki ve kullanımı açısından çeşitli zorluklar (darboğazlar) yaşamaktadır." (Üretimsel Zorluklar)		 <table><tr><th>Energy Source</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr><tr><td>Green</td><td>16</td><td>34%</td></tr><tr><td>Yellow</td><td>13</td><td>28%</td></tr><tr><td>Orange</td><td>10</td><td>21%</td></tr><tr><td>Light Green</td><td>6</td><td>13%</td></tr><tr><td>Red</td><td>2</td><td>4%</td></tr></table>	Energy Source	Count	Percentage	Green	16	34%	Yellow	13	28%	Orange	10	21%	Light Green	6	13%	Red	2	4%	
Energy Source	Count	Percentage																			
Green	16	34%																			
Yellow	13	28%																			
Orange	10	21%																			
Light Green	6	13%																			
Red	2	4%																			
21. "Ürettiğimiz ürünlerin yüksek kalite standartları, üretim hattında enerji kullanımı ile ilgili yapmak istediğimiz değişiklikleri zorlaştırıyor." (Kalite Dengesi)		 <table><tr><th>Energy Source</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr><tr><td>Green</td><td>16</td><td>34%</td></tr><tr><td>Yellow</td><td>15</td><td>32%</td></tr><tr><td>Orange</td><td>8</td><td>17%</td></tr><tr><td>Light Green</td><td>4</td><td>8%</td></tr><tr><td>Red</td><td>4</td><td>9%</td></tr></table>	Energy Source	Count	Percentage	Green	16	34%	Yellow	15	32%	Orange	8	17%	Light Green	4	8%	Red	4	9%	
Energy Source	Count	Percentage																			
Green	16	34%																			
Yellow	15	32%																			
Orange	8	17%																			
Light Green	4	8%																			
Red	4	9%																			
<u>Geleceğe Bakış:</u>																					
22. "Önümüzdeki beş ila on yıl içinde kuruluşumuzun enerji açısından daha verimli ve sürdürülebilir hale geleceğini görüyorum." (Geleceğin Enerji Verimliliği Hedefleri)		 <table><tr><th>Energy Source</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr><tr><td>Green</td><td>23</td><td>49%</td></tr><tr><td>Light Green</td><td>20</td><td>43%</td></tr><tr><td>Yellow</td><td>3</td><td>6%</td></tr><tr><td>Red</td><td>1</td><td>2%</td></tr><tr><td>White</td><td>0</td><td>0%</td></tr></table>	Energy Source	Count	Percentage	Green	23	49%	Light Green	20	43%	Yellow	3	6%	Red	1	2%	White	0	0%	
Energy Source	Count	Percentage																			
Green	23	49%																			
Light Green	20	43%																			
Yellow	3	6%																			
Red	1	2%																			
White	0	0%																			
23. "Kuruluşumuz, potansiyel enerji verimliliği iyileştirmeleri için yeni teknolojileri ve trendleri aktif olarak izliyor." (Gelişen Teknolojiler ve Trendler)		 <table><tr><th>Energy Source</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr><tr><td>Green</td><td>23</td><td>49%</td></tr><tr><td>Light Green</td><td>17</td><td>36%</td></tr><tr><td>Yellow</td><td>6</td><td>13%</td></tr><tr><td>Red</td><td>1</td><td>2%</td></tr><tr><td>White</td><td>0</td><td>0%</td></tr></table>	Energy Source	Count	Percentage	Green	23	49%	Light Green	17	36%	Yellow	6	13%	Red	1	2%	White	0	0%	
Energy Source	Count	Percentage																			
Green	23	49%																			
Light Green	17	36%																			
Yellow	6	13%																			
Red	1	2%																			
White	0	0%																			

24. "Önümüzdeki süreçte yapay zekanın enerji verimliliği konusunda çok daha büyük bir katkısının olacağını düşünüyorum." (Yapay Zekâ ve Enerji Verimliliği)	 <table><thead><tr><th>Segment</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>1</td><td>2%</td></tr><tr><td>7</td><td>7</td><td>15%</td></tr><tr><td>18</td><td>18</td><td>38%</td></tr><tr><td>21</td><td>21</td><td>45%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr></tbody></table>	Segment	Count	Percentage	1	1	2%	7	7	15%	18	18	38%	21	21	45%	0	0	0%
Segment	Count	Percentage																	
1	1	2%																	
7	7	15%																	
18	18	38%																	
21	21	45%																	
0	0	0%																	
25. "Başka yenilikçi fikirlerin de gelecekte enerji verimliliğine katkısının büyük olacağını düşünmemiz gerekir." (Geleceğin Enerji Verimliliği Hedefleri)	 <table><thead><tr><th>Segment</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>18</td><td>18</td><td>46%</td></tr><tr><td>21</td><td>21</td><td>54%</td></tr></tbody></table>	Segment	Count	Percentage	0	0	0%	0	0	0%	0	0	0%	18	18	46%	21	21	54%
Segment	Count	Percentage																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
18	18	46%																	
21	21	54%																	
<u>Proje Hedefleri:</u>																			
26. "Bu projenin Türkiye’de enerji verimliliği iyileştirmeleri konusunda büyük katkı sağlayacağını düşünüyorum." (Proje Hedefleri)	 <table><thead><tr><th>Segment</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>2</td><td>2</td><td>5%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>13</td><td>13</td><td>33%</td></tr><tr><td>24</td><td>24</td><td>62%</td></tr></tbody></table>	Segment	Count	Percentage	2	2	5%	0	0	0%	0	0	0%	13	13	33%	24	24	62%
Segment	Count	Percentage																	
2	2	5%																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
13	13	33%																	
24	24	62%																	
27. "Bu projenin kuruluşumuzun enerji verimliliği iyileştirmeleri konusunda büyük katkı sağlayacağını düşünüyorum." (Proje Hedefleri)	 <table><thead><tr><th>Segment</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>5</td><td>5</td><td>13%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0%</td></tr><tr><td>11</td><td>11</td><td>28%</td></tr><tr><td>23</td><td>23</td><td>59%</td></tr></tbody></table>	Segment	Count	Percentage	5	5	13%	0	0	0%	0	0	0%	11	11	28%	23	23	59%
Segment	Count	Percentage																	
5	5	13%																	
0	0	0%																	
0	0	0%																	
11	11	28%																	
23	23	59%																	

28. "Bu projenin devamında, kuruluşlar içerisinde daha detay çalışılan ikinci çalışma olursa (ikinci faz çalışmaları), katılmak için herhangi bir endişem yok." (Proje Hedefleri)		<table><tr><th>Segment Color</th><th>Count</th><th>Percentage</th></tr><tr><td>Green</td><td>23</td><td>59%</td></tr><tr><td>Yellow</td><td>8</td><td>21%</td></tr><tr><td>Green</td><td>8</td><td>20%</td></tr><tr><td>Green</td><td>0</td><td>0%</td></tr></table>	Segment Color	Count	Percentage	Green	23	59%	Yellow	8	21%	Green	8	20%	Green	0	0%	
Segment Color	Count	Percentage																
Green	23	59%																
Yellow	8	21%																
Green	8	20%																
Green	0	0%																

Anketlerde Veri Paylaşımı ile İlgili Sorulan Sorulara Gelen Cevaplar:

"Proje kapsamında, gizlilik çerçevesinde aşağıdaki bilgilerin paylaşılmasının bir sakıncası olduğunu düşünmüyorum." (Veri Paylaşımı)



Yıllık Elektrik Kullanımı (ürünler bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Doğalgaz Kullanımı (işletme bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Doğalgaz Kullanımı (proses bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Doğalgaz Kullanımı (ürün bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Kömür Kullanımı (işletme bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Jeotermal Kullanımı (işletme bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Biyokütle Kullanımı (işletme bazında)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Yıllık Enerji Üretimi ve Kullanımı (Doğrudan üretim, yenilenebilir enerji ve geri kazanım)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Üretim Proses Detayları (enerji yoğunluğu, enerji çeşitliliği, üretim-tüketim detayları)	Katılım Durumu Cevap Sayısı

Proseslerde Yıllık Kullanılan Enerji Miktarları (termal, elektrik, doğal gaz, kömür vb.)	Katılım Durumu Cevap Sayısı
Detaylı cevaplarınızı Şubat 2024 sonuna kadar bizle paylaşmanız mümkün müdür?	Katılım Durumu Cevap Sayısı

1.2. 12 Şubat 2024 Tarihli Çalıştay

TÜSİAD ve EÇEM iş birliğinde yürütülen Türkiye'nin Sanayide Enerji Verimliliği Görünümü Projesi kapsamında ikinci çalıştay 12 Şubat 2024 tarihinde TÜSİAD Genel Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. TÜSİAD Yönetim Kurulu Yedek Üyesi ve Enerji, Çevre ve İklim Değişikliği Yuvarlak Masası Başkan Yardımcısı Durmuş Topcu'nun açılış konuşmasının ardından TÜSİAD Enerji Verimliliği Grubu Başkanı Fatih Memiş ve EÇEM Direktörü Prof. Dr. M. Pınar Mengüç tarafından proje bilgilendirmesi yapılmıştır. EÇEM Enerji Verimliliği Uzmanı Kaan Gürel'in 19 Aralık 2023 tarihinde yapılan çevrimiçi çalıştayda gerçekleştirilen anketin sonuçlarını sunmasının ardından T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı Grup Koordinatörü Halil Oruç proje hakkındaki görüşlerini ve desteklerini ifade etmiştir. Çalıştayda, projede uygulama dönemine geçilen gübre, döküm, süt ve yalıtım sektörlerindeki kuruluşların enerji verimliliği alanında bilgi paylaşımında bulunması, üretim proseslerinin istişare etmesi ve çözüm odaklı yaklaşımlar geliştirilmesi amacıyla yuvarlak masa çalışmaları yapılmıştır. Yuvarlak masa çalışmalarında, sektörlerin ortak olarak ürettiği ürünleri, imalat süreçleri, bu süreçlerdeki enerji kullanımı, mevcut enerji verimliliği uygulamaları ve enerji verimliliğinin nasıl artırılabilirliği ele alınmıştır. Buna çerçevede, çalışmalarda her bir sektör özelinde proses akış şemalarının çıkartılmış, her bir proses için toplanacak enerji KPI'ları (temel performans göstergeleri, *key performance indicators*) belirlenmiş ve projede kullanılacak veri setinin sektör temsilcileri ile belirlenmesi sağlanmıştır. Yuvarlak masa çalışmalarının ardından elde edilen bilgiler, her bir sektörel yuvarlak masadan sözcü belirlenerek tüm katılımcılara aktarılmıştır. Bu çalışmalar üzerine belirlenen sektörel temel performans göstergeleri ilerleyen bölümlerde ele alınmaktadır.

2. SEKTÖREL TEMEL PERFORMANS GÖSTERGELERİ

Enerji tüketimine ilişkin Temel Performans Göstergeleri (*Key Performance Indicator* - KPI), farklı üretim aşamalarına yönelik spesifik enerji tüketimi² (SET) olarak adlandırılan ve bir birim ürün/çıktı elde etmek için kullanılan enerji miktarı gibi ölçümleri içermektedir. Bu KPI'lar, üretim süreci boyunca enerji verimliliğinin izlenmesine, yönetilmesine ve kıyaslanmasına katkı sunmaktadır. Bu kıyaslamalar hem enerji kullanımına hem de maliyete odaklanarak çeşitli tesislerin enerji performansının sanal oluşturulmuş bir kıyaslama tesisiyle karşılaştırılmasını içermektedir. Kullanım analizinde, ürünün üretim süreci boyunca birim başına enerji tüketimi (kWh/birim) dikkate alınmaktadır. Ekonomik analizde ise hem kullanıma hem de fiyata bağlı olarak, ürünün birim başına enerji maliyetleri (\$/kWh) dikkate alınmaktadır. Yapılan analizler ile potansiyel tasarruf ve hedeflenen verimlilik iyileştirme alanları ile ilgili bilgi sağlanabilmekte, çevresel değerlendirmeler aracılığıyla da enerji tüketiminin sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi gözlemlenebilmektedir. Proje uygulama döneminde odaklanılan sektörlere ilişkin detaylı tartışmalar ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

Literatürde ve uluslararası standartlarda yaygın olarak kullanılan SET, bir ürün birimini üretmek için gereken enerji miktarını niceleyen bir göstergedir [1]. SET hesaplamaları, tekil işlemlerden ulusal ve uluslararası karşılaştırmalara kadar farklı düzeylerde karşılaştırma yapmak için bir araç olarak görülse de [2,3], doğruluğunun ve karşılaştırılabilirliğinin bir dizi zorlukla sınırlandırılmasından ötürü endüstrinin sürdürülebilirliğe yönelik ilerlemesini de zorlaştırabilmektedir.

Başlıca zorluklardan birisi SET'in tanımında yatmaktadır. Yaygın olarak kullanılan *tüketim* terimi; enerjinin tüketilemeyeceği, yalnızca dönüştürülebileceği veya aktarılabileceği gerçeği göz önüne alındığında termodinamik açıdan doğru değildir [4,5]. Bu terminoloji, yanlış yorumlara yol açabilir ve sektörel proseslerde enerji akışlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını engelleyebilir. Ayrıca, SET hesaplamaları, genellikle farklı çalışmalar arasında açıkça belirtilmeyen veya tutarlı bir şekilde uygulanmayan varsayımlara dayanmaktadır [1,6]. Özellikle hangi enerji kullanımlarının dahil edilip edilmeyeceğinin belirlendiği sistem sınırlarının tanımlanması, doğru karşılaştırmalar için kritik önemdedir. Yardımcı ekipman, destek süreçleri ve farklı enerji taşıyıcılarının dahil edilmesi veya dışlanmasıyla ilgili bu tutarsızlık, güvenilirmez karşılaştırmalara yol açabilir.

² *Specific energy consumption*

SET hesaplamalarındaki bir diğer değişkenlik kaynağı ise, birincil enerji taşıyıcılarına (örneğin, elektrik) dönüştürmek için kullanılan birincil enerji faktörüdür (*Primary Energy Factor*, PEF). PEF'ler, ülkeye özgü enerji üretim karışımlarına bağlı olarak (kömür, doğal gaz, güneş gibi) önemli ölçüde değişmekte; bu uluslararası karşılaştırmaları daha da karmaşıklaktadır [7].

Bu hesaplama ile ilgili sorunların ötesinde, SET hesaplamaları için *ürün* tanımlanması da kritik önemdedir. Üretilen tüm ürünlerin veya yalnızca satılan ürünlerin kapsanması göstergenin doğruluğunu etkilemektedir [1,8]. Ek olarak, tek bir enerji girişinin birden çok ürün için kullanıldığı ortak üretim, enerji tüketiminin belirli ürünlere tahsis edilmesini zorlaştırmakta ve daha fazla belirsizlik yaratmaktadır [1].

Son olarak, özellikle küçük şirketler ve gelişmekte olan ülkeler için veriye erişim önemli bir zorluk olarak görülmektedir [5]. Enerji kullanımı ve ürün çıktısı hakkında doğru ve kapsamlı veriye erişimin genellikle sınırlı olması SET temelli karşılaştırmaların etkin bir şekilde uygulanmasını engellemektedir.

Bu zorlukları gidermek ve SET'in güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırmak için birkaç iyileştirme önerilmektedir. Sistem sınırlarının açık tanımlanması ve enerji kullanımlarının tutarlı bir şekilde dahil edilmesi veya dışlanması büyük önem taşımaktadır. Farklı çalışmalardaki SET değerlerini anlamak ve karşılaştırmak için enerji kullanımı, ürün çıktısı ve PEF'ler için kullanılan varsayımların ve hesaplamaların şeffaf bir şekilde açıklanması gerekmektedir. Ayrıca, farklı kaynaklardan gelen SET değerlerini karşılaştırırken, temeldeki varsayımlar ve veri kullanılabilirliğindeki olası farklılıkları göz önünde bulundurularak dikkatli karşılaştırmalar yapılmalıdır [8].

Hesaplamalarda karşılaşılan zorluklara rağmen, SET, karşılaştırma yapmak ve enerji verimliliğini izlemek için değerli bir araç olmaya devam etmektedir [9,10]. Bahsedilen sınırlamalar ve yanlış yorumlama potansiyeli kabul edilmeli ve ele alınmalıdır. Çeşitli tesisler, işlemler ve endüstriler arasında SET'i hesaplamak ve karşılaştırmak için daha sağlam ve güvenilir yöntemler araştırılmalı ve geliştirilmelidir. Sonuçların karşılaştırılabilirliğini artırmak ve etkili karşılaştırmayı sağlamak için, açık tanımlar, varsayımlar ve hesaplamalar içeren standardize bir SET hesaplama ve raporlama yaklaşımının geliştirilmesi çok önemlidir [8].

2.1. Döküm Sektörü

Sanayi sektörünün temel taşlarından birisi olan döküm sektöründe, sürdürülebilir üretim uygulamalarına ulaşmakta önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Enerji yoğunluğunun en yüksek olduğu sektörlerden biri olarak döküm sektöründe yüksek enerji maliyetleri rekabetçiliği doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Bu çerçevede, enerji verimliliğini izlemek ve iyileştirmek için önemli bir performans göstergesi olarak spesifik enerji tüketiminin gündeme alınmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Zorlukları gidererek ve iyileştirmeleri uygulayarak, döküm endüstrisi, enerji verimliliğinde ve sürdürülebilirlikte önemli ilerleme kaydetmek için SET'in kullanım kolaylığından yararlanabilir.

Literatürde, döküm sektöründe SET'in yukarıda açıklanan uygulaması ve zorluklarına yönelik durumu gösteren birkaç vaka çalışması sunulmaktadır. Bu çalışmalar, gri ve dövülmüş demir için kupol ve indüksiyon eritme işlemlerinin yanı sıra çelik ve paslanmaz çelik dökümhaneler de dahil olmak üzere demir döküm operasyonlarını analiz etmektedir [11]. Kupol işlemlerde kömür kullanımına bağlı yüksek enerji tüketimi ve enerji verimliliği için eritme işlemlerinin optimize edilmesinin önemi vurgulanmaktadır. Çalışmalar ayrıca, ısı işleminin gerekliliği ve dökme demire kıyasla daha düşük verimlilik dahil olmak üzere çelik dökümünün benzersiz enerji taleplerini açıklamaktadır [11].

Bazı çalışmalarda, alüminyum döküm, kayıp köpük döküm, magnezyum döküm ve bakır bazlı döküm dahil olmak üzere demir içermeyen döküm operasyonları da SET analizine tabi tutulmuştur [11]. Bu çalışmalar, istif eritme fırınlarının kullanımı ve eritme işlemlerinin optimizasyonu yoluyla potansiyel enerji tasarruflarını vurgulayarak, cüruf oluşumunun önemini ve enerji verimliliği üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Ayrıca, farklı döküm işlemlerinin enerji gereksinimleri ve coğrafi konum ve ısıtma ihtiyaçları gibi faktörlerin etkisi de incelenmektedir.

Döküm sektöründe enerji verimliliğini artırmak ve SET'i azaltmak açılarından öne çıkan hususlar aşağıda özetlenmektedir:

- **Gelişmiş Kalıp Tasarımı:** Kalıp tasarımını, her döküm işlemi için gereken metal miktarını azaltarak döküm sistemlerinin ve yükselticilerin kullanımını en aza indirecek şekilde optimize etmek enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Kalıp tasarımı ve katılaşma modellemesi için gelişmiş bilgisayar simülasyon yazılımının kullanımı bu amaca hizmet edebilir [11].

- **Optimize Edilmiş Eritme Teknikleri:** Daha eski ve daha az verimli gazla çalışan fırınlardan, modern istif eritme veya indüksiyon fırınları gibi teknolojilere geçiş, enerji tasarrufunu önemli miktarda artırabilir [11]. Bazı çelik döküm tesislerinde kullanılan elektrikli ark ocakları, geri dönüştürülebilir malzemeleri kullanarak daha düşük enerji tüketimiyle yüksek sıcaklıklara ulaşabilir ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir üretime katkı sağlayabilir [12].

- **Yalın Üretim İlkeleri:** Atıkları azaltmak, duruş sürelerini en aza indirmek ve üretim akışını optimize etmek gibi yalın üretim ilkelerinin benimsenmesi, genel enerji tasarrufuna ve verimlilik artışına katkıda bulunabilir [9].

- **Tek Atışlı Eritme İşlemleri:** Henüz yaygın ve ticarileşmiş bir uygulama olmasa da, prototip aşamasında olan Sınırlı Hızlı İndüksiyon Eritme Tek Atışlı Yukarı Döküm (CRIMSON) işleminin geliştirilmesi, döküm kalitesini artırırken enerji kayıplarını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Tek bir döküm için gereken metal miktarını eritmek için hızlı bir indüksiyon fırını kullanmak, bekleme süresini ortadan kaldırabilir, oksit oluşumunu azaltabilir ve enerji tasarrufuna katkıda bulunabilir [13].

- **Basınçlı Hava Sistemleri:** Hava kaçaqlarını tespit edip onarmak, düşük set basınçlarında çalışmak, boru hatlarını optimize etmek ve ring sistemini uygulamak ve verimli kompresör kullanımı, basınçlı hava sistemlerinde enerji tasarrufuna önemli katkıda bulunabilir [11].

- **HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) Sistemleri:** Üretim programlarına ve gerçek zamanlı izleme sistemine dayalı olarak HVAC sistemlerini optimize etmek, ısıtma ve soğutma ile ilgili enerji tüketimini azaltabilir [14].

- **Aydınlatma Sistemleri:** Enerji tasarruflu LED aydınlatmaya geçmek ve gün ışığından maksimum derecede faydalanmak enerji tasarrufları ve maliyet azaltımları sağlayabilir [11].

- **Isı Geri Kazanımı:** Eritme ve diğer işlemlerden oluşan atık ısıyı yakalayıp yeniden kullanmak için ısı geri kazanım sistemlerinin entegre edilmesi, enerji verimliliğine büyük ölçüde katkıda bulunabilir [11].

- **Çalışan Eğitimi ve Farkındalık:** Çalışanları, uygun ekipman çalıştırma, önleyici bakım ve boştaki kalma süresini azaltma gibi enerji verimliliği uygulamaları konusunda eğitmek, genel enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir [11].

- **Pota Ön Isıtma:** Döküm potalarının önceden ısıtılması, enerji tüketimini azaltarak ergitme sürecindeki enerji ihtiyacını minimize eder. Bu uygulama, enerji tüketimini %10'a kadar düşürebilir ve süreç verimliliğini artırır.

- **ORC ile Elektrik Üretimi:** Kupol fırınlarından kaynaklanan atık ısı kullanılarak Organik Rankine Çevrimi (ORC) sistemi ile elektrik üretimi sağlanabilir. Bu yöntem hem atık ısının değerlendirilmesini hem de elektrik ihtiyacının bir kısmının karşılanmasını sağlayabilir.

- **Isı Pompası Kullanımı:** Ocak soğutma kulelerinden gelen atık ısı, ısı pompası yardımıyla kullanım sıcak suyu, mahal ısıtma veya proses suyu ısıtma ihtiyaçları için kullanılabilir. Bu sistem, enerji tasarrufunda önemli bir rol oynayabilir ve karbon emisyonlarını azaltabilir.

- **Isıl Enerji Yönetim Sistemleri:** Fabrika genelinde tüm sıcaklık seviyelerindeki enerjinin izlenmesi ve optimize edilmesi için dijital izleme sistemlerinin entegrasyonu sağlanarak süreçlerin daha verimli yönetilebilir.

- **Fırınlarda Termal İzolasyon İyileştirmesi:** Kupol ve indüksiyon fırınlarında termal izolasyon malzemelerinin yenilenmesi, enerji kaybını azaltarak toplam enerji tüketimini düşürebilir.

Sonuç olarak; SET kıyaslaması, döküm sektöründe enerji verimliliği iyileştirmelerini yönlendirmek için kritik öneme sahiptir. Döküm sanayicileri, performanslarını sektör standartlarıyla karşılaştırarak ve en iyi uygulamaları devreye alarak, çevresel ayak izlerini önemli ölçüde azaltabilir ve ekonomik rekabet güçlerini artırabilir.

2.2. Gübre Sektörü

Küresel gıda güvenliği için hayati önem taşıyan gübre endüstrisi, başlıca enerji tüketicilerinden biridir. Üretilen ürün birimi başına kullanılan enerji olarak tanımlanan spesifik enerji tüketimi, gübre üretiminin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğini değerlendirmek ve iyileştirmek için temel bir ölçüttür.

SET kıyaslaması, belirli bir tesisin veya prosesin enerji performansının, sektördeki en iyi uygulamalar, geçmiş veriler veya teorik minimumlarla karşılaştırılmasını içermektedir. Bu uygulama, gübre üreticilerinin iyileştirme alanlarını belirlemesi, gerçekçi enerji tasarrufu hedefleri koyması ve ilerlemeyi izlemelerine katkı sunmaktadır. Uluslararası Gübre Birliği (IFA) de dahil olmak üzere birçok kuruluş, sektör genelinde karşılaştırmaları kolaylaştırmak için kıyaslama araçları ve veri tabanları geliştirmiştir. Bu araçlar genellikle tesisleri üretim teknolojisi, hammadde türü ve ürün sınıfı gibi faktörlere göre sınıflandırarak daha doğru ve anlamlı bir kıyaslama yapılmasını sağlamaktadır.

Küresel gübre tüketimi, üretimi ve ticaretinde ağırlık sahibi olan Azot (N) gübreleri tarımsal ürün verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır. 2022-2023 yıllarında küresel gübre tüketimi, öncelikle rekor nitelikte yüksek fiyatların neden olduğu düşük satın alınabilirlik nedeniyle önemli ölçüde daralmıştır [15]. Bu daralma, özellikle gübre satın alınabilirliğinin gıda güvenliğini önemli ölçüde etkilediği gelişmekte olan ekonomilerde üretim maliyetlerini düşürmenin önemini vurgulamaktadır. Azotlu gübre üretiminde enerji verimliliğini iyileştirmek, maliyet düşürme ve nihayetinde küresel gıda güvenliğini sağlamak için önemli bir stratejidir [16].

Çoğu azotlu gübrenin birincil yapı taşı olan amonyak, enerji yoğun bir işlemle üretilmektedir. Amonyak üretimindeki spesifik enerji tüketimi, teknolojik gelişmeler ve enerji verimli uygulamaların benimsenmesi sayesinde azalmıştır: 1930'larda SET 80 GJ/t NH₃'ün üzerindeyken, bugün en iyi mevcut teknolojiler (BAT) vasıtasıyla 28 GJ/t NH₃'ün altındaki seviyelere ulaşabilir [17]. Bu ilerlemeye rağmen, IFA'nın kıyaslama verileri, 2008 yılında 93 amonyak tesisinde ortalama SET'in hala 34,6 MMBtu/ton NH₃ olduğunu ortaya koymaktadır [18]. Bu, en iyi uygulamaların yaygın olarak benimsenmesinin enerji tasarrufu için önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Verimlilik iyileştirme için başlıca fırsatlar, reformasyon bölümü, CO₂ giderme ve amonyak sentezi olarak öne çıkmaktadır [19].

Gübre tesisleri arasında SET hesaplamalarında değişikliğe katkıda bulunan çeşitli faktörler bulunmaktadır. Örneğin, süreç entegrasyonu için sistematik bir metodoloji olan *pinch* analizi,

bir üretim tesisi boyunca ısıtma ve soğutma talepleri arasında sinerjiyi belirlemek ve bunlardan yararlanmak için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır [19]. Toplam saha *pinch* analizi, kimyasal tesislerde enerji kullanımını optimize etmede etkili olduğunu kanıtlanmış ve tipik olarak %20-%30 tasarruf sağlamıştır [20]. Bu metodoloji hem yeni tesis tasarımlarına hem de mevcut tesislerin yenilenmesine uygulanabilir ve enerji tüketimini en aza indirmek için bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır.

Isı değiştirici reformatörler ve ototermal reformatörler gibi gelişmiş teknolojiler, yeni amonyak tesislerinde enerji yoğunluğunu düşürmektedir [19]. Bu teknolojiler ısı geri kazanımını en üst düzeye çıkarmakta ve genellikle yakıtla çalışan birincil reformatörlere olan ihtiyacı ortadan kaldırarak önemli enerji ve maliyet tasarrufları sağlamaktadır. Öte yandan, ekonomik uygulanabilirlikleri genellikle alternatif enerji kaynaklarının mevcudiyetine ve doğal gazın maliyetine bağlıdır [19].

Gübre endüstrisi, yenilenebilir enerjiyi aktif olarak kullanmakta ve operasyonlarını karbondan arındırma yollarını da araştırmaktadır [21]. Yenilenebilir enerjiyle çalışan elektroliz kullanılarak yeşil amonyak üretimine yönelik son zamanlardaki ivme, sektörün karbon ayak izini azaltmak için önemli bir potansiyel sunmaktadır [22].

Yeşil amonyak ve biyoetanol üretiminden elde edilen yan ürün CO₂ kullanılarak yenilenebilir üre üretimi azotlu gübre üretimini karbondan arındırmak için zorlayıcı bir yoldur [22]. Yenilenebilir enerjinin değişkenliği, depolama kapasiteleri ve ısıtma yakıtı karışımı gibi faktörleri göz önünde bulundurarak, bu tür tesislerin üretim maliyetlerini en aza indirmek ve optimum tasarım ile çalışmasını belirlemek için tekno-ekonomik optimizasyon modelleri kullanılmaktadır [22].

Gübre sektöründe enerji verimliliğini artırmak ve SET'i azaltmak açılarından öne çıkan hususlar aşağıda özetlenmektedir:

- **Üretim Teknolojisi:** Haber-Bosch prosesi yerine SWAP prosesi entegre edilerek %90 verimlilikte 300 – 500 kat hızla amonyak sentezlenebilir [23].

- **Hammadde Kalitesi:** Amonyak üretimi için birincil hammadde olan doğal gaz gibi hammaddelerin kalitesi, enerji gereksinimlerini doğrudan etkiler. Hammaddelerin saflık oranı proses verimliliğini azaltabilir ve enerji tüketimini artırabilir.

- **Tesis Yaşı ve Durumu:** Daha eski tesislerde genellikle ekipman eskimesi, verimsiz ısı entegrasyonu ve güncel olmayan kontrol sistemlerinden kaynaklanan daha yüksek SET görülür [24].

- **İşletme Uygulamaları:** Katalizör aktivitesi, çalışma basıncı ve sıcaklığı ve proses optimizasyonu stratejileri gibi faktörler enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyebilir [25].

- **Kojenerasyon:** Sülfürik asit üretim prosesinde hem elektrik hem buhar üretimi ile tesis genelinde enerji tüketimini azaltan sistemler uygulanabilir. Bu yöntemle %37'ye varan enerji verimliliği sağlanabilir [26].

- **Amonyak Ön Isıtma:** Depo tanklarından prosese beslenen amonyağın, mevcut düşük sıcaklık/atık ısı kaynakları ile önceden ısıtılması enerji tasarrufu sağlayabilir.

- **Kondens Geri Kazanımı:** Üretim süresince oluşan buharın kondensini geri kazanıp tekrar proseste kullanmak hem enerji verimliliğini hem kaynak verimliliği artırabilir.

- **Atık Isıdan Absorpsiyonlu Soğutma:** Üretim süreçlerinde oluşan atık ısının absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılması, yaz aylarında soğutma ihtiyacının karşılanmasına yardımcı olabilir.

- **Proses Havası Isıtma:** Kimyasal reaksiyonlarda kullanılan hava düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarıyla önceden ısıtılarak enerji maliyetleri azaltılabilir.

Sonuç olarak; SET kıyaslaması, gübre endüstrisinde enerji verimliliği iyileştirmelerini yönlendirmek için kritik öneme sahiptir. Gübre üreticileri, performanslarını sektör standartlarıyla karşılaştırarak ve en iyi uygulamaları devreye alarak, çevresel ayak izlerini önemli ölçüde azaltabilir ve ekonomik rekabet güçlerini artırabilir.

2.3. Süt Sektörü

Ultra yüksek sıcaklık (UHT) süt üretim sektöründe, ürün güvenliğini ve kalitesini korurken enerji tüketimini en aza indirmeye konusunda zorluklarla karşılaşmaktadır. UHT işlemesi ile sütün uzun raf ömrüne sahip bir ürün olmasını sağlamak için kısa süreler boyunca yüksek sıcaklıklara ısıtılarak sterilize edilmesini amaçlamaktadır. Bu bakteri yok edici etkiyi elde etmek, esas olarak ısıtma ve soğutma aşamaları için önemli miktarda enerji girişi gerektirmektedir. Sıcaklık-zaman profili kritik önemde olup, doğrudan ısıtma yöntemlerinin (buhar enjeksiyonu veya infüzyonu) aynı bakteri öldürme etkisi için dolaylı yöntemlerden daha enerji verimli olduğunu kanıtlanmıştır [27]. Bu verimlilik, doğrudan sistemlerin hızlı ısıtma ve soğutma hızlarından kaynaklanarak pişmiş tatlara katkıda bulunan kimyasal değişiklikleri en aza indirmektedir. Özellikle Pure-Lac™ ve Yenilikçi Buhar Enjeksiyonu (ISI) süreçleri gibi yenilikçi teknolojiler, daha kısa süreler için daha yüksek sıcaklıklar kullanarak UHT'nin sınırlarını zorlamakta, enerji verimliliğini ve ürün kalitesini daha da artırmaktadır [27,28].

Kıyaslama, farklı UHT süt işleme tesisleri arasında enerji performansını karşılaştırmak ve iyileştirme fırsatlarını belirlemek için değerli bir araç sağlamaktadır. Browning [29], değişen ısıtma ve soğutma profillerine dayalı olarak güvenlik ve kalite parametrelerini tahmin etmek için bir elektronik tablo modelinin kullanılabilirliğini göstermiş, tesis performansını optimize etme potansiyelini vurgulamıştır.

Enerji yoğunluğunu ölçmek için, ürün birimi başına enerji kullanımı olarak tanımlanan spesifik, temel bir gösterge olarak hizmet etmektedir [30–33]. SET değerleri tesisler ve süreçler arasında karşılaştırılarak verimsiz tasarımlar ve işlemler tespit edilebilir. Kanada Süt Konseyi için Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı'nın Enerji Verimliliği Ofisi tarafından yayınlanan bir rapor, UHT işleme dahil olmak üzere sıvı süt tesisleri için değerli karşılaştırma verileri sunmaktadır [30]. Bu çalışma, Kanada'daki toplam üretimin %50'sinden fazlasını temsil eden 17 sıvı süt tesisini analiz ederek, toplam enerji kullanımı, enerji bileşimi, enerji kaynağına göre kullanım ve birim enerji maliyetleri için karşılaştırma noktaları belirlemiştir. Rapor, tesisler arasında enerji tüketimi ve maliyetlerinde önemli farklılıklar olduğunu bulmuş ve iyileştirme fırsatlarını vurgulamıştır. Örneğin, rapor, SET'in 0,1104 ila 0,2943 kWh/L arasında önemli ölçüde değiştiğini tespit ederek tesisin toplam enerji tüketimi için 0.1183 kWh/L'lik bir karşılaştırma enerji kullanımı hedefi belirlemiş, örneklemdeki tesislerin %10'luk dilimini karşılaştırma noktası olarak kullanılmıştır. Bu rapor ayrıca, süt alma, ayrıştırma, homojenizasyon/pastörizasyon, dolum, soğutma ve CIP, HVAC ve diğer çeşitli kullanımlar

olmak üzere tesis hizmetleri gibi üretim aşamalarına göre enerji tüketiminin ayrıntılı analizlerini içermektedir.

UHT süt üretiminde enerji verimliliğini artırmak için potansiyel hedefler olarak birkaç temel alan ortaya çıkmaktadır. Clairand [34], gıda endüstrisinde enerji verimliliği teknolojilerine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunarak, termal ve elektrik enerjisi optimizasyonunu, atık ısı geri kazanımını ve Endüstri 4.0 teknolojilerinin veriye dayalı iyileştirmeler için potansiyelini kapsayan entegre bir yaklaşıma olan ihtiyacı vurgulamaktadır.

UHT süt üretiminde enerji verimliliğini artırmak ve SET'i azaltmak açılarından öne çıkan hususlar aşağıda özetlenmektedir:

- **Buhar Üretimi ve Dağıtımı:** Fazla hava azaltımı, baca gazı izleme ve yoğunlaşma suyu geri dönüşü yoluyla kazan verimliliğini optimize etmek, genel enerji kullanımını önemli ölçüde etkiler [30,32,33]. Ek olarak, Niamsuwan [31] tarafından önerilen ekonomizerlerin uygulanması, baca gazlarından daha fazla atık ısı geri kazanımına olanak sağlayarak sistem verimliliğini daha da artırır.

- **Soğutma:** Soğutma, UHT süt işleminde enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturur. Uygun kompresör boyutlandırma, yük optimizasyonu ve sıcaklık farklarının en aza indirilmesi, sistem verimliliğinin artırılması için esastır [30,32,33]. Atık ısı ile çalışan soğurma soğutması gibi alternatif soğutma döngüleri de önemli fırsatlar sunabilir [33]. Kanada Doğal Kaynaklar çalışması [30] özellikle kış aylarında serbest soğutma kullanımının potansiyelini vurgulayarak önemli enerji tasarruflarına yol açabileceğini göstermiştir.

- **Süreç Entegrasyonu:** Isı transferi artırımı ve kirlenmenin giderilmesi gibi teknikler yoluyla ısı eşanjörü ağlarının optimizasyonu, enerji kullanımını önemli ölçüde etkileyebilir [33]. *Pinch* analizi, UHT işleme tesisleri içinde verimli ısı geri kazanım sistemleri tasarlamak için sistematik bir yaklaşım sunar [33]. Kanada Doğal Kaynaklar çalışması [30] ayrıca ısı geri kazanımını kullanarak, proses veya kazan besleme suyunun ön ısıtılmasını önermekte olup bunun kazan yakıtı gereksinimlerini %5-10 oranında azaltabileceğini belirtmektedir.

- **Gelişen Teknolojiler:** Gıda işleme teknolojilerindeki sürekli ilerlemeler, enerji verimliliği için yeni yollar sunmaktadır. Darbeli elektrik alanları uygulaması ve yüksek basınçlı işleme gibi termal olmayan teknikler, geleneksel termal yöntemlerin yerini alarak potansiyel olarak daha düşük enerji girişiyle benzer sonuçlar elde edebilir [33].

- **Basınçlı Hava Sistemleri:** Kaçakları gidererek, hava basıncını optimize ederek ve giriş hava sıcaklığını düşürerek basınçlı hava sistemlerinin optimize edilmesi, önemli enerji

tasarrufları sağlayabilir [30]. Ek olarak, pompalarda ve havalandırma fanlarında ayarlanabilir hız sürücüleri, enerji optimizasyonu için daha fazla fırsat sunar [30].

- **Isı Pompası Kullanımı:** CIP (yerinde temizlik) ve inkübasyon gibi proseslerde, atık ısı kaynaklarından veya eş zamanlı ısıtma-soğutma ihtiyaçları için ısı pompası kullanılabilir. Bu sistemle %15'e varan enerji tasarrufu sağlanabilir.

- **Desuperheater Kullanımı:** Soğutma ünitelerinde oluşan kızgın amonyak gazının enerjisi geri kazanılarak su ön ısıtma işlemi yapılabilir. Bu yöntem, enerji kayıplarını önler ve su ısıtma maliyetlerini düşürür.

- **Süt Tozu Atık Isı Geri Kazanımı:** Süt tozu üretimi sırasında oluşan egzoz ısısı, brülör yakma havasını önceden ısıtarak enerji tasarrufu sağlar. Egzoz ısısından elde edilen enerji, genel verimliliği artırır.

- **HVAC Verimliliği:** Süt işleme tesislerinde karışım havası, entalpi kontrolü, ısı geri kazanımı ve plug fan gibi uygulamalar ile işletme maliyetlerini düşürürken iç ortam koşullarını optimize eder.

- **Soğutma Deposu Optimizasyonu:** Soğuk hava depolarında enerji yönetim sistemlerinin devreye alınması ile enerji tüketimi azaltılabilir.

UHT süt üretim sektörü, enerji verimliliği iyileştirmeleri açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Kıyaslama metodolojilerini, sürecin çeşitli aşamalarında SET'e ilişkin kapsamlı bir anlayışla birleştirmek, temel iyileştirme alanlarının belirlenmesini sağlayacaktır. Enerji verimli teknolojilerin kullanılması, proseslerin optimize edilmesi ve yeniliklere uyum sağlanması, daha sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir bir UHT süt üretim sektörünün oluşmasına katkıda bulunacaktır. Gelecek araştırmalar, UHT süt işleme tesislerinin özelliklerine göre uyarlanmış özel araçlar ve en iyi uygulamalar geliştirmeye, bilgi açığını kapatmaya ve enerji tasarrufu önlemlerinin yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmaya odaklanmalıdır.

2.4. Yalıtım Sektörü

Binalarda ve diğer sektörlerde enerji tüketimini azaltmak için hayati önem taşıyan yalıtım malzemelerinin kendi çevresel etkisini de en aza indirmek kritik önemdedir.

Bir birim ürün üretmek için gereken enerji miktarını ölçen [1] SET, yalıtım sektörü için metre-kare başına mega-joule (MJ) olarak ifade edilebilir. SET'i anlamak, enerji yoğun alanların belirlenmesi, zaman içindeki ilerlemenin izlenmesi ve sektördeki en iyi uygulamalara göre kıyaslama yapılması için esastır.

Araştırmacılar, yalıtım malzemesi üretiminde yapılan kıyaslamalar için SET değerlerini hesaplama amacıyla çeşitli metodolojiler kullanmıştır. Chan [35], Tayvan'daki enerji yoğun sektörlerden enerji tüketimi verilerini toplayarak ve bunları uluslararası kıyaslamalarla karşılaştırarak veriye dayalı bir yaklaşım kullanmaktadır. Çalışma, stiren monomer (SM), saflaştırılmış tereftalik asit (PTA) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) üretiminde SET'i azaltmak için en iyi uygulama teknolojisinin (*best practice technique*, BPT) potansiyelini vurgulamaktadır.

Mineral yünü, cam yünü, genişletilmiş polistiren (EPS), ekstrüde polistiren (XPS) ve poliüretan (PUR) gibi yalıtım malzemelerinin üretimi, doğası gereği enerji yoğun bir süreçtir. Birkaç çalışma, hammadde çıkarımı, üretim süreçleri ve taşımacılıkta önemli enerji talebini ortaya koymuştur [35,36]. Örneğin, Chan [35], yalıtım malzemelerinde de kullanılan, Tayvan'daki kâğıt hamuru üretiminin enerji yoğunluğunu analiz etmiş ve En İyi Mevcut Teknoloji'ye (*Best Application Technology*- BAT) göre enerji verimliliğinin %33 artabileceğini tespit ederek enerji verimliliği iyileştirme potansiyelini vurgulamıştır.

Ayrıca, farklı bir enerji tüketimi takibi metodolojisi olan yaşam döngüsü değerlendirmesi (*life cycle assessment*, LCA), ürünlerin veya hizmetlerin tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için bütünsel bir yöntemdir ve bu alanda da yaygın olarak uygulanmıştır [37–39]. LCA, hammaddenin, çıkarımından kullanım ömrü sonunda bertarafına kadar enerji tüketimini ve emisyonları dikkate alarak yalıtım malzemelerinin çevresel ayak izi ile ilgili kapsamlı bir anlayış sağlamaktadır.

Bir kuruluşun performansının sektör liderlerine veya belirlenmiş standartlara göre karşılaştırılması anlamına gelen kıyaslama, SET'te sürekli iyileştirmeyi sağlamak için güçlü bir araçtır. Üreticiler, sınıfının en iyisi olan performansı analiz ederek potansiyel enerji tasarrufu fırsatlarını belirleyebilir ve hedefe yönelik iyileştirme stratejileri geliştirebilir.

Araştırmalar, kıyaslamanın enerji verimliliğini artırmadaki önemli rolünün altını çizmektedir. Örneğin Sarkis [40], kıyaslama programlarına katılan şirketlerin, katılmayanlara kıyasla daha fazla enerji tasarrufu sağladığını tespit etmiştir.

Yalıtım ürünleri üretiminde SET'i etkileyen faktörler, enerji verimliliğini artırmak ve SET'i azaltmak açılarından öne çıkan hususlar aşağıda özetlenmektedir:

- **Hammaddeler:** Hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesinin enerji yoğunluğu, genel SET'i önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, mineral yün üretimi, bazı alternatif malzemelere göre genellikle daha fazla enerji yoğunudur. Hammadde kullanımında geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı da enerji tüketimini azaltabilir. Ancak Füchsl [41], geri dönüştürülebilir malzemelerin otomatik olarak çevresel üstünlük sağlamadığı konusunda uyarıda bulunmaktadır. Bu inceleme, bu malzemelerin üretiminde kullanılan bağlayıcı ve katkı maddelerinin genellikle önemli çevresel sıcak noktalar oluşturduğunu ortaya koymuştur. Bu, yalıtım sektöründe, kimyasal katkı maddelerine olan bağımlılığı düşürmeye odaklanarak sürekli iyileştirme ve inovasyon ihtiyacını vurgulamaktadır.

- **Üretim Süreci:** Yalıtım malzemesinin ısıtılması, kurutulması ve şekillendirilmesi için kullanılan enerji dahil olmak üzere üretim sürecinin verimliliği hayati bir rol oynar.

- **Teknoloji Benimseme:** Gelişmiş üretim teknolojilerinin ve enerji tasarruflu ekipmanların kullanılması SET'i önemli ölçüde azaltabilir [42].

- **Tesis İşlemleri:** Optimize edilmiş proses kontrolü, atık ısı geri kazanımı ve enerji tasarruflu aydınlatma gibi işletme uygulamaları genel enerji performansına katkıda bulunur [43].

- **Freecooling Entegrasyonu:** Soğutma ihtiyacının karşılanması için freecooling sistemlerinin entegre edilmesi, soğutma sürecinde elektrik tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Bu yöntem, özellikle yılın serin dönemlerinde düşük maliyetli soğutma imkânı sağlar.

- **Süreç Optimizasyonu:** Knauf Insulation, mineral yün üretim tesislerinde fiberizasyon sürecini optimize eden bir proje uygulamıştır. Sıcaklık ve hava akışı gibi proses parametrelerini ayarlayarak önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamıştır [44].

- **Atık Isı Geri Kazanımı:** Owens Corning, cam eritme fırınlarından atık ısıyı geri kazanmak için bir sistem uygulayarak hammaddeleri ön ısıtmada ve toplam enerji talebini azaltmada kullanmıştır [45].

- **Enerji Verimli Ekipman:** Rockwool International, gelişmiş yalıtım ve ısı geri kazanım sistemlerine sahip son teknoloji ürünü kürleme fırınlarına yatırım yaparak önemli enerji tasarrufu ve daha düşük SET elde etmiştir [46].

- **Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu:** Cam yünü yalıtım üreticisi CertainTeed, birçok üretim tesisine yerinde güneş enerjisi fotovoltaik sistemleri kurarak fosil yakıtlara olan bağımlılıklarını azaltıp karbon ayak izlerini küçültmüştür [47].

SET kıyaslamasının avantajlarına rağmen, bazı zorluklar devam etmektedir. Örneğin; farklı üreticiler ve tesisler arasında güvenilir ve karşılaştırılabilir SET verilerine ulaşmak, gizlilik endişeleri ve ölçüm yöntemlerindeki farklılıklar nedeniyle zor olabilir. Diğer sektörlerde de olduğu gibi, ürün tanımlaması yapmak ve sınırlamaları belirlemek önem arz etmektedir. Enerji tüketiminin bir üretim sürecindeki birden fazla çıktıya tahsis edilmesi, SET analizinde metodolojik bir zorluk oluşturmaktadır [1]. Farklı üretim süreçleri ve bölgeler arasında kapsamlı ve güvenilir enerji tüketimi verileri, etkili kıyaslama için çok önemli olmaya devam etmektedir [35]. Üreticiler arasında artan şeffaflık ve veri paylaşımı, daha sağlam karşılaştırmaları kolaylaştıracak ve sektör genelinde ilerlemeyi teşvik edecektir. Ayrıca, daha düşük somutlaştırılmış enerjiye sahip yeni yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi ve üretim süreçlerinde sürekli inovasyon uzun vadeli sürdürülebilirlik için çok önemlidir [36,41]. Bu zorlukların ele alınması, yalıtım sektörü için önemli fırsatlar sunmaktadır. Sektör genelinde veri toplama protokollerinin oluşturulması ve şeffaflık kültürünün teşvik edilmesi, anlamlı kıyaslamayı ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi yolunda kolektif ilerlemeyi kolaylaştırabilir.

Sonuç olarak; SET kıyaslaması, yalıtım üretim sektöründe enerji verimliliğini artırmak için kritik önemdedir. Üreticiler, enerji performanslarını sektör kıyaslamalarına göre anlayarak iyileştirme alanlarını belirleyebilir, en iyi uygulamaları benimseyebilir ve daha sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunabilirler. Yalıtım ürünlerine talep artmaya devam ettikçe, bu önemli sektörün çevresel etkisini en aza indirmek için SET'in azaltılmasını önceliklendirmek son derece önemlidir.

3. SEKTÖRLERDEKİ KIYASLAMA SONUÇLARI

3.1. Genel Bulgular

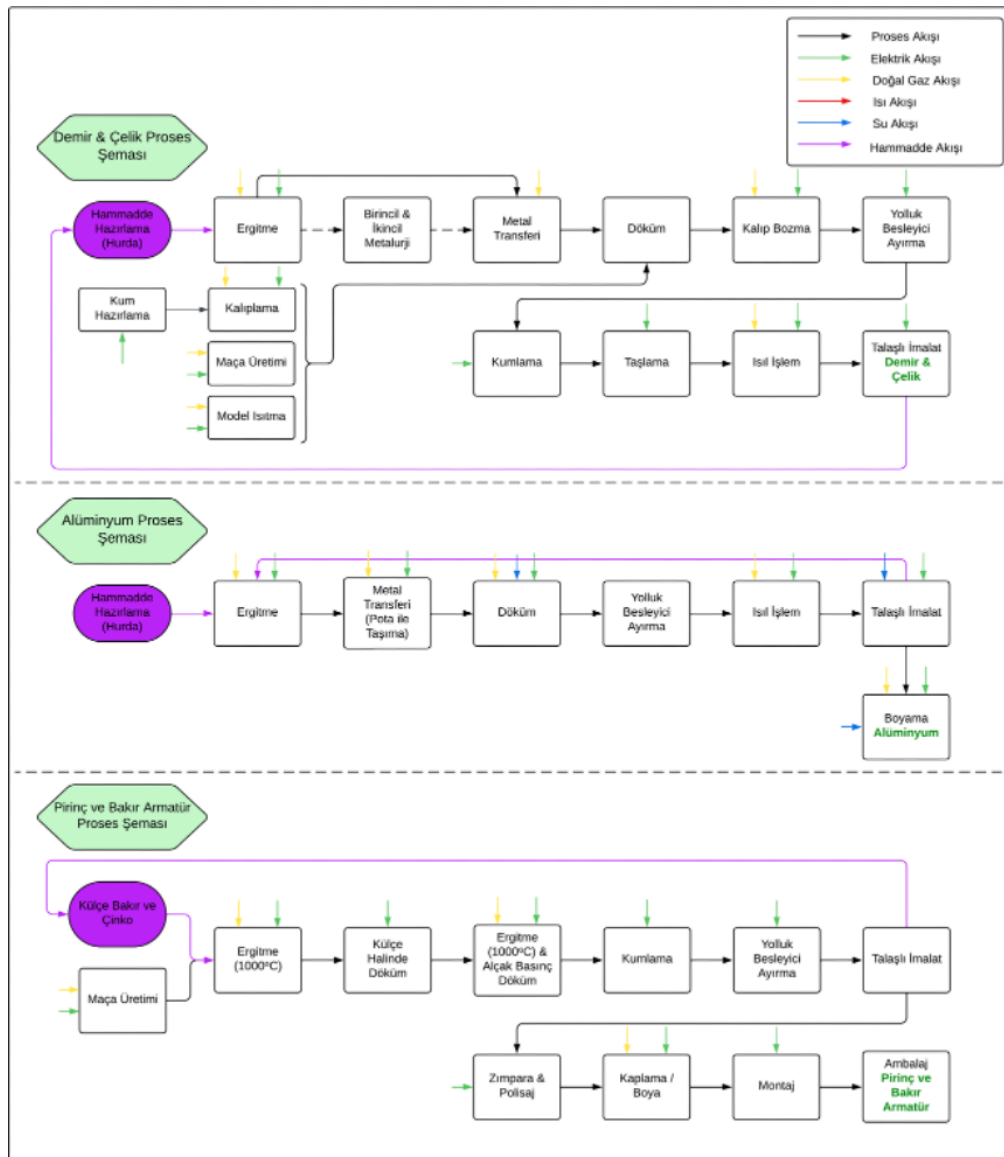
Bu bölümde sunulan kıyaslamalar döküm, gübre, süt ve yalıtım olmak üzere dört sektörden, 12 firmanın katılımı ile yapılmıştır. Dört sektörde yapılan kıyaslamalar sonucunda enerji tüketimini etkileyen temel unsurların her sektörde benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Üretim süreçlerindeki verimlilik, teknolojik altyapının seviyesi ve kapasite kullanım oranları, spesifik enerji tüketimini belirleyen en önemli faktörler olarak öne çıkmıştır. Özellikle teknolojik altyapı farklılıklarının enerji verimliliği üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Ancak, birçok proses arasında enerji ölçüm altyapısındaki eksiklikler, detaylı analiz yapılmasını zorlaştırmakta ve enerji tüketimindeki iyileştirme çalışmalarını sınırlamaktadır. Ayrıca reaksiyon türleri, proses koşulları ve ekipman verimliliği gibi unsurlar enerji tüketiminde çeşitliliklere neden olmaktadır. Mevsimsel koşulların ise spesifik enerji tüketimine anlamlı bir etkisinin görülmediği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, bazı ürünlerin adet birimlerinin farklı hesaplanması, enerji tüketimi kıyaslamalarında ortak bir standart oluşturulmasını güçleştirmektedir.

Bu durumun çözümü için süreçlerin optimize edilmesi, enerji ölçüm altyapısının geliştirilmesi, modern ve verimli teknolojilere geçiş yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu tür iyileştirmeler, enerji verimliliğinin artırılması yolunda kritik adımlar olarak öne çıkmakta ve sektörlerin daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşması için bir gerekliliktir. Teknolojik altyapının modernize edilmesi hem işletme maliyetlerini düşürebilir hem de çevresel etkileri en aza indirebilir.

Yapılacak bu iyileştirmeler, enerji tüketimini azaltarak işletmelerin maliyet avantajı elde etmesini sağlayacaktır. Aynı zamanda, inovasyon stratejilerine bir yol haritası sunarak işletmelerin uzun vadeli sektörel rekabet gücünü artıracak, işletmelerin hem çevresel hem de ekonomik anlamda daha güçlü bir konuma gelmesine katkı sunarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine daha hızlı ulaşmalarını sağlayacaktır.

3.2. Döküm Sektörü

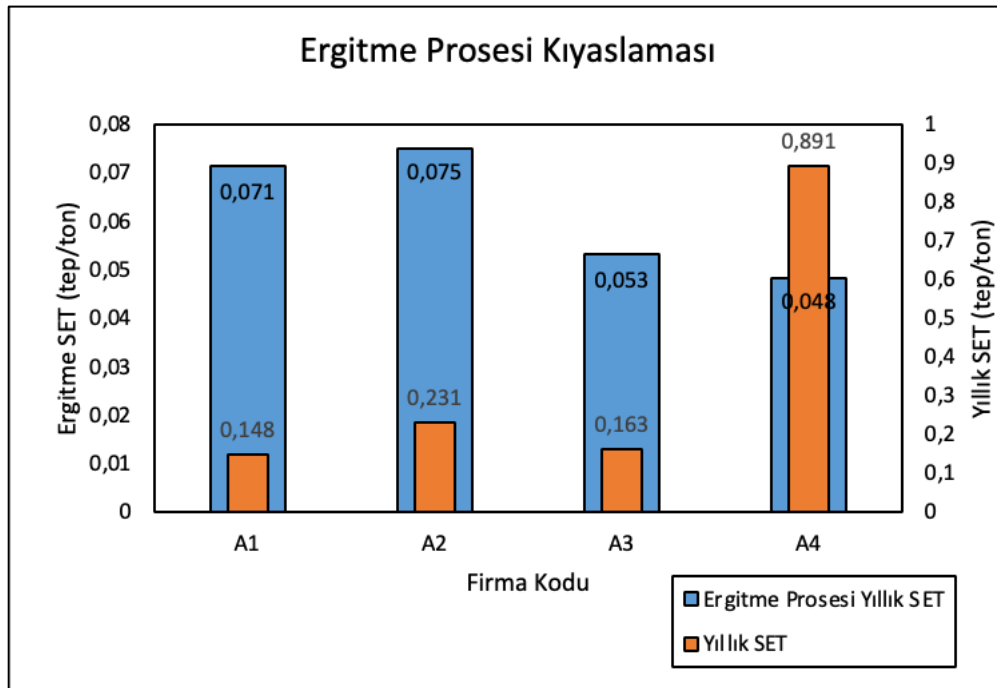
Döküm sektörü kıyaslama çalışması için dört tesisin 2023 yılına ait aylık verileri analiz edilmiştir. Toplamda 12 aylık veriyi içeren bu dosyalar birleştirilerek genel hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikle, döküm sektöründe ürün ağırlığı iki aşamalı olarak brüt ve net ağırlık üzerinden hesaplanmıştır. Bu aşamalar, 12 Şubat 2024 tarihinde gerçekleştirilen çalıştayda kararlaştırılmış, *Şekil 1*'de gösterilen proses akış şemaları ile belirlenmiştir. Üretilen ürünün spesifik enerji tüketimi “yolluk ve besleyici ayırma” kısmına kadar brüt ağırlık üzerinden, devamında ise net ağırlık üzerinden hesaplanmıştır. Ürün, kumlama, taşlama, talaşlı imalat gibi proseslerde de ağırlık kaybına uğrasa da en yüksek miktarda kayıp “yolluk ve besleyici ayırma” prosesinde yaşandığı için ayırım noktası bu proses olarak kabul edilmiştir. Hesaplamaların sonucunda ise nihai spesifik enerji tüketimi ağırlıklı ortalama hesaplanarak ortaya konmuştur.



Şekil 1 Döküm Sektörü Proses Şeması

Sektör katılımcıları tarafından kapasite değeri paylaşılmadığı için kapasite kullanım oranı gibi metrikler hesaplanamamıştır. Fakat, projedeki kısıtlı veri paylaşımına rağmen, üretim miktarındaki değişikliklerin spesifik enerji tüketimine etkisi gözlemlenebilmiştir. Örneğin, düşük üretim seviyelerinde spesifik enerji tüketiminde artış yaşanabilmektedir. Bu artış, ekipmanların genellikle nominal kapasitelerine yakın çalışacak şekilde optimize edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle ergitme ve diğer enerji yoğun proseslerde, düşük tonajlarda çalışmanın enerji verimliliği üzerindeki olumsuz etkisi daha da belirginleşebilmektedir. Düşük üretim miktarlarında ekipmanların sabit enerji kayıplarının üretilen ton başında daha yüksek bir paya sabit olması, spesifik enerji maliyetinin yükselmesine neden olabilmektedir.

Döküm sektöründe prosesler özelinde enerji ölçüm altyapısının yetersizliği detaylı yorumlamayı zorlaştırmaktadır. Ayrıca, verilerin firmalar tarafından hangi yöntemle ve ölçüm periyotlarıyla toplandığı bilgisi paylaşılmamıştır. Bu durum, veri toplama metodolojisindeki olası farklılıkların analizi nasıl etkileyebileceği konusunda bir belirsizlik yaratmaktadır. Bu durum, özellikle enerji yoğun proseslerde spesifik tüketimlerin daha net analiz edilmesini engellemektedir. Ancak, döküm sektöründe önemli proseslerden biri olan *ergitme* prosesi özelinde belirli ölçümler yapılabildiği için bu proses özelinde daha ayrıntılı değerlendirmeler yapılabilmektedir.



Şekil 2 Ergitme Prosesi SET Kıyaslaması

Şekil 2’de görüldüğü üzere, A1 ve A2 firmalarının ergitme prosesine özgü spesifik enerji tüketimleri benzer seviyelerde (0,07-0,08 tep/ton) olmakla birlikte, toplam yıllık spesifik enerji tüketimleri açısından A2’nin daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu fark, A2 firmasının diğer proseslerde daha yüksek enerji tüketimine sahip olabileceğini işaret etmektedir. A3 ve A4 firmalarının ergitme prosesindeki spesifik enerji tüketimi, diğer firmalara kıyasla düşük seviyededir. Bu noktada, ergitme proseslerindeki 0,075 ve 0,048 TEP/ton gibi spesifik enerji tüketim değerleri arasındaki farkın temel nedenlerini açıklamak önemlidir. Aksi takdirde, 0,048 TEP/ton gibi düşük bir değer için bir hedef olabileceği gibi yanıltıcı bir algı oluşturabilir. Yapılan incelemede, bu farkın temelde firmaların üretim profilleri, ergitilen metalin cisi ve parça boyutlarının yarattığı anlaşılmıştır. A1 ve A2 firmaları yoğun olarak 1000 kg üzeri büyük kütleli çelik döküm yaparken; A3 firması 100 – 500 kg aralığında, A4 firması ise 0 – 50 kg aralığında daha küçük kütleli demir döküm üretmektedir. Çelik, demire göre daha yüksek ergitme sıcaklığı gerektirdiğinden ve büyük kütleli parçaların ergitme süreçleri daha fazla enerji tükettiğinden, A1 ve A2 firmalarının ergitme prosesindeki spesifik enerji tüketiminin daha yüksek olması beklenen bir durumdur. Bu üretim farklarına ek olarak, firmaların kullandığı ocak tiplerinin (indüksiyon, doğalgaz, kupol vb.) ve uyguladıkları döküm yöntemlerinin de enerji verimliliğini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Ancak bu bilgiler firmalar tarafından paylaşılmamıştır. Farklı ocak teknolojileri temel verimlilik açısından önemli farklılıklar gösterdiğinden, bu kritik veri olmadan firmaların spesifik enerji tüketim (SET) değerlerini tam anlamıyla adil bir zeminde kıyaslamak ve aradaki farkların kök nedenini kesin olarak belirlemek zorlaşmaktadır. Bu bağlamda, A4’ün toplam yıllık spesifik enerji tüketimi de bu durumu yansıtmakta ve ergitme prosesinde kendi segmenti için enerji verimliliği açısından diğer firmalardan daha avantajlı olduğunu göstermektedir. A4 firması, ergitme prosesinde en düşük spesifik enerji tüketimine sahip olmasına rağmen toplam yıllık spesifik enerji tüketimi açısından da en yüksek değere sahiptir. A4’ün ergitme sonrası kumlama, taşıma, döküm sonrası ısıtma işlemleri veya talaşlı imalat gibi diğer proseslerinin enerji yoğun olması; üretim süreçlerinde yer alan yardımcı sistemlerin (örneğin, havalandırma, aydınlatma, kompresör sistemleri veya soğutma sistemleri) fazla enerji tüketiyor olması gibi durumlar toplam spesifik enerji tüketimini yükselttiği değerlendirilebilir. A1 ve A2 firmalarında ise zıt yönde bir durum gözlemlenmektedir. Bu iki firmada ergitme prosesi spesifik enerji tüketimi yüksek olmasına rağmen yıllık spesifik enerji tüketimi düşüktür. Bu iki firmada döküm sonrası ısıtma işlemleri, talaşlı imalat ve yardımcı sistemlerin enerji tüketiminin düşük olması, toplam spesifik enerji tüketimini azaltmıştır. Sonuç olarak ergitme prosesi, toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluştursa da tek başına belirleyici değildir. Diğer proseslerin enerji tüketimi ve ekipman

verimliliği firmalar arasındaki toplam enerji tüketimi farklılıklarını açıklamada kritik rol oynamaktadır. Ayrıca, ekipmanların bakım durumu ve modernizasyon seviyesi enerji tüketimini etkileyen kritik faktörlerdir. Eski ve bakım gerektiren fırınlar yerine, özellikle elektrikli ark ocakları gibi yeni ve modern ergitme fırınlarına yönelmek enerji tüketimini düşürebilir.

Bu kapsamda, dört firma arasındaki farkın doğrudan nereden kaynaklandığını belirlemek kolay olmamakla birlikte proses bazlı ölçüm altyapısının geliştirilmesi ve detaylı saha analizlerinin yapılması, bu tür farkların nedenlerini daha iyi anlamaya yardımcı olabilir.

Döküm sektöründe fabrikalar üzerinde mevsimsel bir etki gözlemlenmemiştir. Bu durumu teyit etmek amacıyla Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan bölgesel aylık sıcaklık verileri ile aylık enerji tüketimleri karşılaştırılmış, fakat anlamlı bir korelasyon saptanmamıştır. Ancak, bu bulgunun yorumlanmasında dikkatli olunmalıdır. Firmaların kullandığı ocak tipleri bilinmediği için mevsimsel etki analizinde belirsizlik payı mevcuttur. Ocak tipi verisinin yokluğu, gözlemlenen tüketimlerdeki olası mevsimsel değişimlerin teknoloji farklarından mı yoksa iklimsel koşullardan mı kaynaklandığının ayırt edilmesini engellemektedir. Ancak, hammaddeden nihai ürüne kadar olan süreçte, kullanılan malzemelerin özellikleri ve proses koşulları enerji tüketiminde farklılıklara yol açabilmektedir. Hammaddenin işlenmişlik seviyesi veya üretim sürecinin başlangıç noktası, aynı üretim miktarına rağmen enerji tüketiminde önemli farklar oluşturabilir.

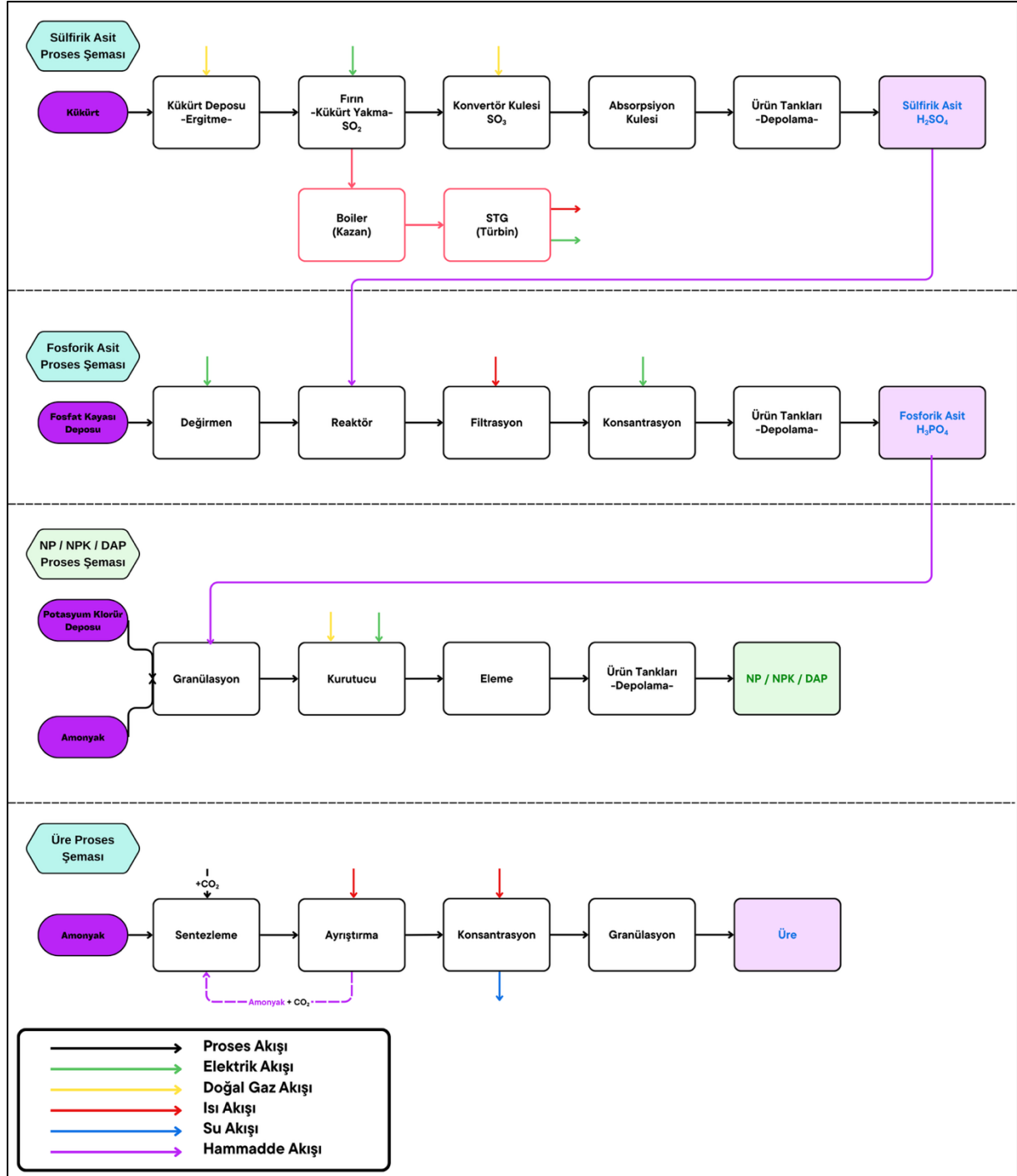
Bu çerçevede, döküm sektöründeki spesifik enerji tüketimini etkileyen faktörler arasında kapasite kullanım oranı, ekipman verimliliği, proses özelinde enerji kayıpları ve teknolojik altyapı bulunmaktadır. Sektördeki proses ölçüm altyapısının iyileştirilmesi ve üretim ekipmanlarının enerji verimliliği açısından optimize edilmesi, enerji tüketimini azaltmak için önemli adımlar olabilir.

Sonuç olarak, döküm sektörü özelinde yapılan bu analiz, firmalar arası spesifik enerji tüketimi (SET) kıyaslamasının yalnızca nihai üretim ve tüketim verileriyle yapılmasının ne kadar yanıltıcı olabileceğini net bir şekilde ortaya koymuştur. Üretim profilindeki temel farklılıklar: ergitilen metalin cinsi, dökülen parçanın kütlesi ve firmalar tarafından proses verimliliğini doğrudan etkileyen ocak tipi gibi kritik teknolojik bilgilerin paylaşılamaması, basit bir "elma-elma" karşılaştırmasını imkânsız kılmaktadır. Buna ek olarak, proses bazlı ölçüm altyapısının ve veri toplama metodolojisinin standart olmaması gibi belirsizlikler, gözlemlenen tüketim farklarının kök nedenlerinin kesin olarak tespit edilmesini engellemektedir. Bu bulgular, döküm sektöründe anlamlı bir enerji verimliliği kıyaslaması (benchmark) yapılabilmesi için, firmaların üretim teknolojisi ve proses detaylarını da içeren daha kapsamlı

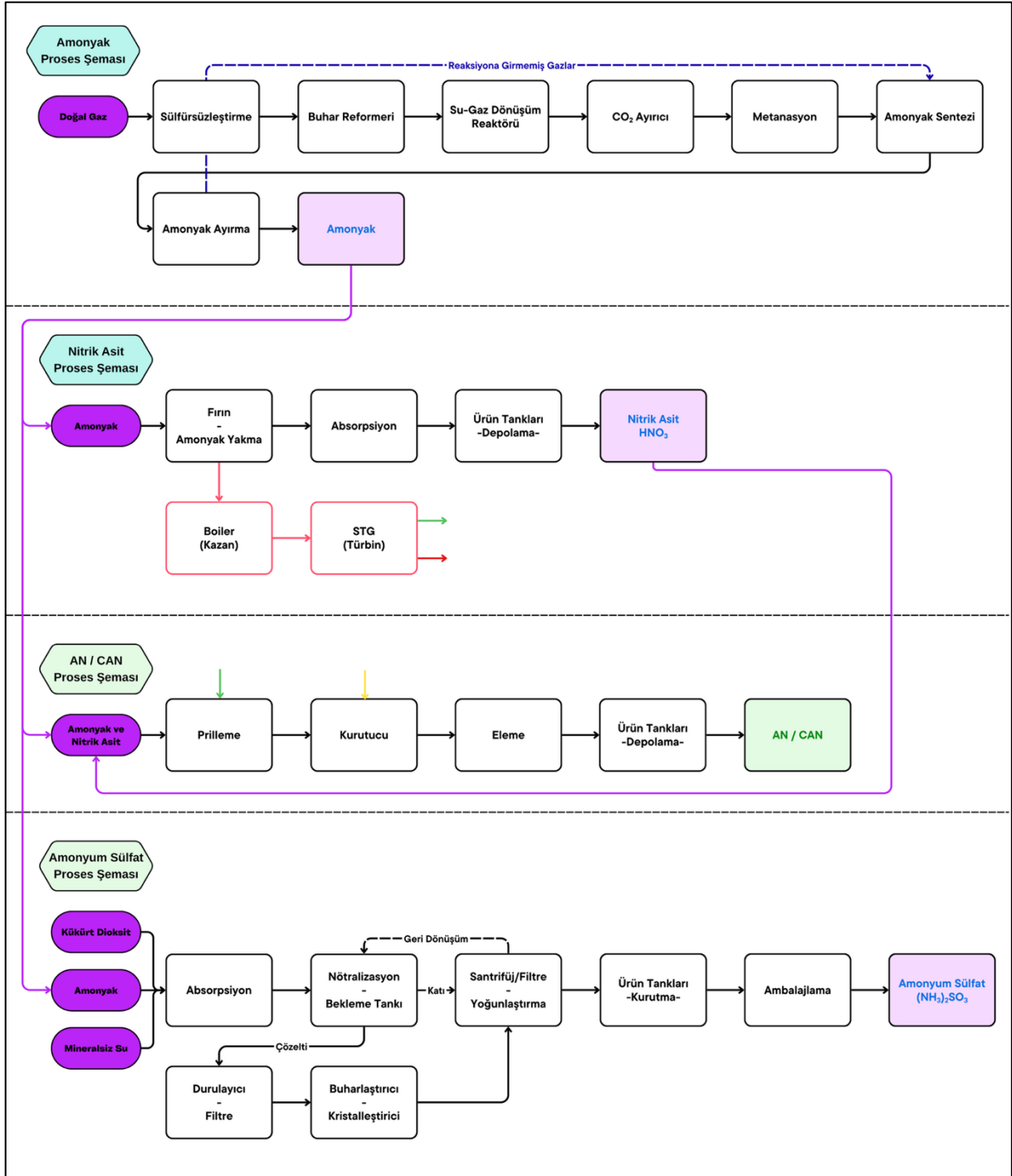
bir veri setine dayalı olarak kendi segmentleri içinde değ erlendirilmesi gerektiğinin altını çizmektedir.

3.3. Gübre Sektörü

Gübre sektöründe kıyaslama çalışması için üç farklı firmanın 2023 yılına ait aylık verileri analiz edilmiştir. Bu analizlerde kullanılan proses akış şeması 12 Şubat 2024 tarihli çalıştayda belirlenmiş olup Şekil 3'te ve Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 3 Gübre Sektörü Proses Şeması



Şekil 4 Gübre Sektörü Proses Şeması - 2

Bu analizler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Firmaların spesifik enerji tüketimleri ile kapasite kullanımı arasında ters bir ilişki gözlemlenmiştir. Firmalarda kapasitelerinin altında üretim yapıldığında spesifik enerji tüketiminde artış gözlemlenmiştir. Bu durum firmaların sahip olduğu ekipmanların belirli bir üretim miktarına göre optimize edilmiş olmasından kaynaklanabilir. Örneğin; kullanılan ekipman 1 ton ürün işleme için tasarlanmışken kapasite altı çalışıldığı durumlarda bile tüm

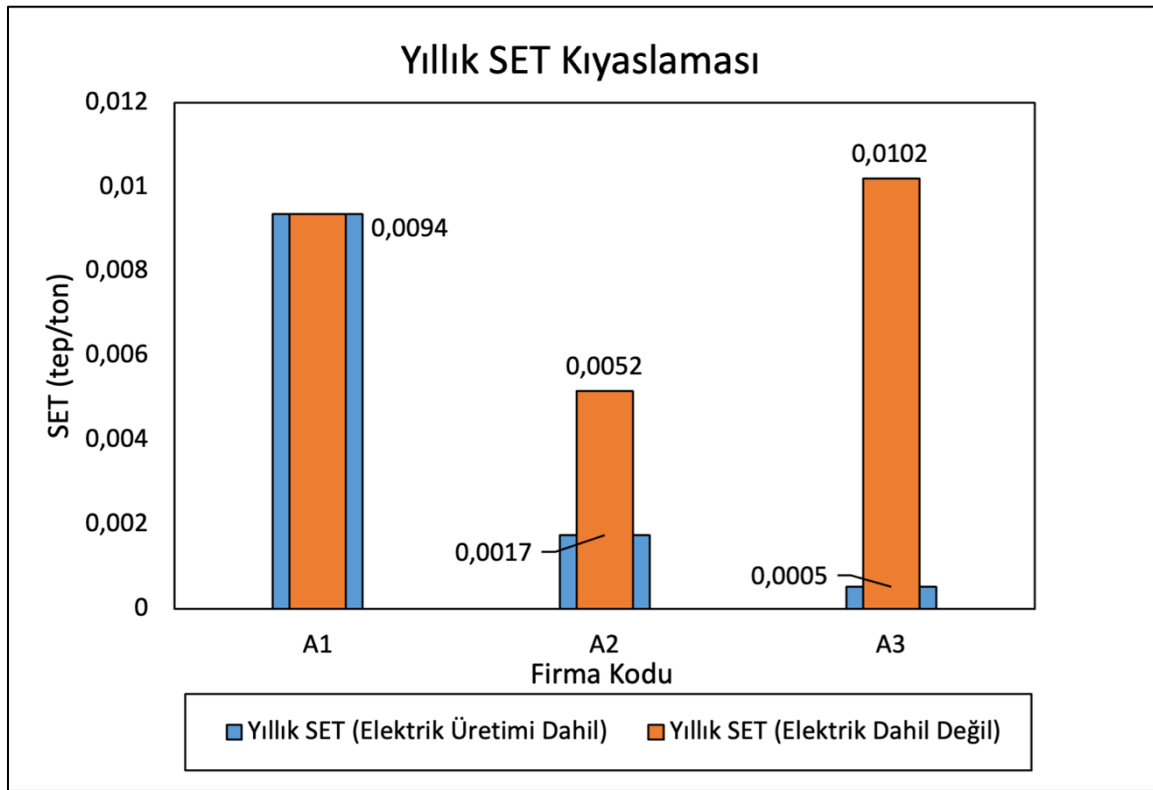
ekipman hazır hale getirildiği için üretilmesi istenen ürün için fazladan enerji kullanılmış olabilir. Kapasite altı çalışmanın enerji verimliliği üzerindeki etkisi diğer ekipmanlar ve proses aşamaları için de geçerlidir. Reaktörler, fırınlar ve kurutucular ve bunlar gibi büyük ölçekli üretim cihazları, genellikle tam kapasite çalıştırıldıklarında maksimum verimlilik sağlamaktadır. Bu ekipmanların belirli bir sıcaklık veya basınç seviyesine ulaşmak için sabit enerji girdisine ihtiyaç duymaları nedeniyle kapasitenin altında üretim yapıldığında gereğinden fazla enerji tüketilebilir. Bu çerçevede, düşük üretim hacmi, enerji kullanımının ürün başına maliyetini artırmakta, bu da spesifik enerji tüketiminde artışa yol açmaktadır.

Bir diğer husus ise, düşük kapasitede çalışan firmaların sık sık üretim durdurma ve başlatma işlemi yapmak zorunda kalabilmesidir. Bu durum, firmaların her yeniden başlatıldığında büyük miktarda enerji tüketmesine neden olabilir. Örneğin, makinelerin yeniden ısınması veya reaksiyonların yeniden başlatılması için harcanan enerji, üretim sürecinin verimliliğini düşürebilir ve spesifik enerji tüketimini artırabilir. Fazla enerji kullanımı sadece proses başlangıcında değil, proses sürecinde ve sonunda da gerçekleşebilir: kapasite altı çalışıldığında, özellikle büyük boyutlu ekipmanlarda işlem sırasında (örneğin büyük reaktörler veya kazanlar) boş hacimleri nedeniyle ısı kaybı meydana gelebilir. Yetersiz üretim yükü nedeniyle enerji kaybı artar ve daha fazla enerji proses dışına sızabilir. Bu, enerji tüketiminin gereksiz yere yükselmesine ve spesifik enerji tüketiminin orantısız şekilde artmasına neden olur.

Analizde yer alan, farklı bölgelerdeki üç firmaların yıllık ortalama spesifik enerji tüketimleri arasında gözle görünür bir fark gözlemlenmiştir. *Şekil 5*'te görüldüğü üzere, firmaların bulunduğu bölgelerin ortalama sıcaklıkları ile yıllık SET değerleri arasında doğrudan bir korelasyon saptanmamıştır. Bu durum, firmalar arasındaki SET farklılıklarının temel nedenlerinin iklimsel koşullardan ziyade proses ve teknoloji farklılıkları olduğunu göstermektedir. Bu farklılaşmada gübre üretimindeki kimyasal tepkimenin çeşidi göz önünde bulundurulabilir. Ekzotermik reaksiyonlarda tepkime belirli bir enerji ihtiyacı karşılandıktan sonra kendiliğinden gerçekleşerek ortama ısı açığa çıkarmaktadır. Tepkimenin kendiliğinden gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan bu enerji az olabilir ya da hiç olmayabilir. Bu sayede, ekzotermik reaksiyon içeren proseslere sahip firmaların enerji tüketiminin endotermik proseslere sahip firmalara kıyasla düşük olması beklenen bir sonuçtur. Farklı firmalarda uygulanan sıcaklık, basınç ve reaksiyon süreleri gibi proses koşulları, enerji tüketimini doğrudan etkileyebilir. Örneğin, bazı firmalarda reaksiyonların gerçekleşmesi için daha yüksek sıcaklıklar veya uzun süreler gerekebilir, bu da enerji ihtiyacını artırmaktadır. Diğer firmalarda ise daha düşük sıcaklıklarda çalışmak mümkün olabilir ve bu durumda enerji tüketiminin daha

az olması beklenmektedir. Bu koşullar, enerji verimliliğini optimize etme açısından kritik rol oynamaktadır. Bu durum, firmaların ürettiği gübre çeşidi (örneğin, amonyak, nitrik asit, AN/CAN bazlı gübreler), kullanılan kimyasal reaksiyonun türü (ekzotermik/endotermik) ve hammaddenin işlenmişlik seviyesi gibi kritik proses detayları bilinmeden yapılacak doğrudan bir SET kıyaslamasının, bir “kıyaslama” oluşturmaktan ziyade yanıltıcı olabileceğini göstermektedir.

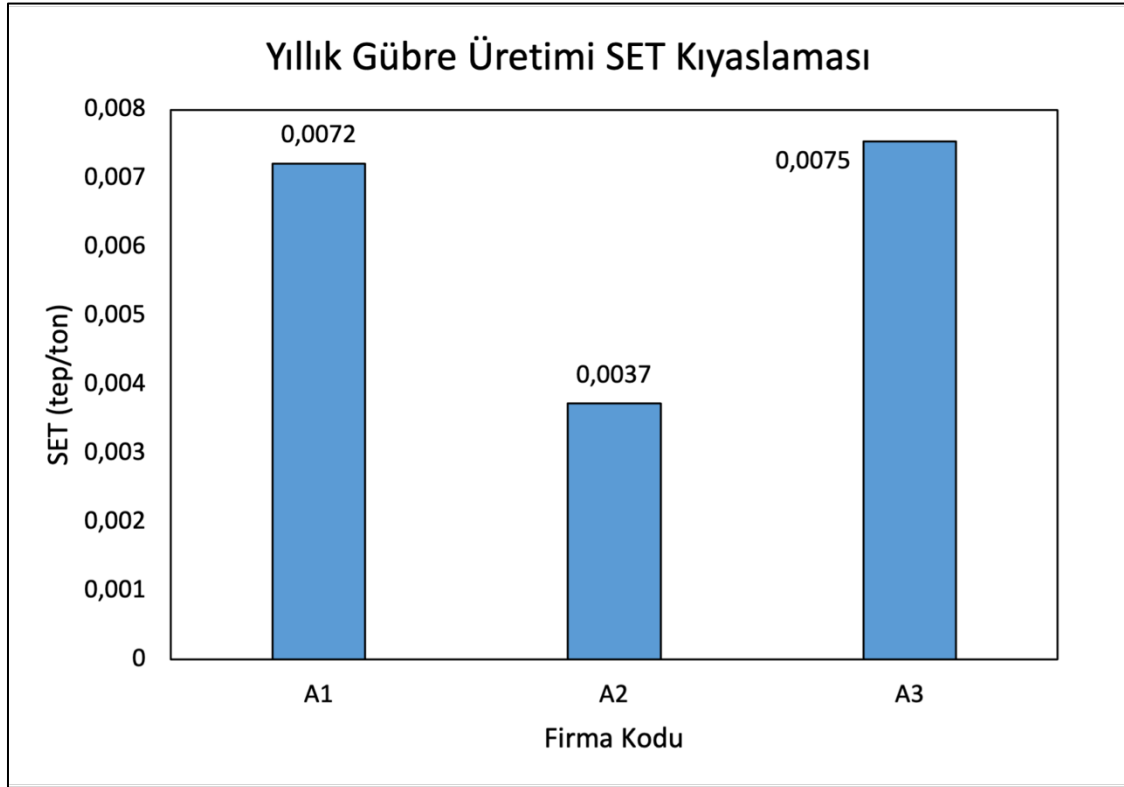
Aynı zamanda, firmalarda kullanılan üretim ekipmanlarının verimliliği de önemli bir faktördür. Yeni ve modern ekipmanlar genellikle daha az enerji tüketirken, eski ve bakım gerektiren makineler daha fazla enerji harcayabilir. Ayrıca, ekipmanların bakım durumu ve düzenli olarak yenilenip yenilenmemesi, enerji tüketimini doğrudan etkileyen bir diğer faktördür. Verimli ekipmanların kullanıldığı firmalar, daha düşük enerji tüketimi gösterirken, daha az verimli ekipmanlar enerji tüketimini artırabilir. Süreç optimizasyonu ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik diğer uygulamalar da enerji tüketiminde görünen farklılıkların sebebi olabilir.



Şekil 5 Gübre Üretim Tesislerinin Spesifik Enerji Tüketimi Kıyaslaması

Şekil 5, katılımcı firmaların yıllık spesifik enerji tüketim (SET) değerlerini iki farklı senaryoda göstermektedir. Mavi sütunlar, firmaların sülfürik asit üretimi gibi proseslerde kendi ürettikleri elektriğin de dahil edildiği toplam SET değerini temsil ederken, turuncu sütunlar bu

Üretilen elektriği hariç tutularak, sadece tüketilen enerjiyle hesaplanan SET değerini göstermektedir. Özellikle A3 firması gibi yüksek miktarda kendi elektriğini üreten tesislerde, bu ayırım firmanın dış enerji kaynaklarına olan bağımlılığını ve proseslerinin içsel verimliliğini daha adil bir şekilde karşılaştırma imkânı sunmaktadır.



şekil 6 Sadece Gübre retimi Spesifik Enerji Tüketimi Kıyaslaması

Analizi daha da derinleştirmek amacıyla, firmaların toplam üretimleri yerine sadece nihai ürün olan gübre üretim miktarları ve bu üretime doğrudan atfedilebilen enerji tüketimleri baz alınarak şekil 6’da yeni bir SET hesaplaması yapılmıştır. Bu karşılaştırma önemli bir bulguyu ortaya koymaktadır: Her üç firmada da sadece gübre üretimine odaklanıldığında hesaplanan SET değerleri, tesisin tüm operasyonlarını içeren toplam SET değerlerinden (bknz. şekil 5) daha düşüktür. Bu durum, sülfürik asit veya fosforik asit gibi ara ürünlerin üretiminin ve diğer proses dışı operasyonların, tesisin genel spesifik enerji tüketimini önemli ölçüde artırdığını net bir şekilde göstermektedir. Dolayısıyla, gübre sektöründe verimlilik iyileştirmesi hedeflenirken, sadece nihai ürün proseslerine değil, aynı zamanda bu destekleyici ve ara ürün proseslerine de odaklanılması kritik bir gerekliliktir.

Analizlerde, bazı firmaların üretim yapmadığı aylarda dahi enerji tüketimlerinin devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, proses dışı bir tüketim artışından ziyade, firmaların üretim sırasında (rneğin sülfürik asit prosesi gibi) kendi elektriklerini üretirken, üretim durduğu

dönemlerde şebekeden elektrik almaya devam etmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu da üretimin olmadığı aylarda dahi belirli bir enerji giderinin oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, üretimde kullanılan malzemelerin ve üretilen ürün miktarının benzer olmasına rağmen bazı aylarda proseslerde kullanılan enerjinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumu açıklamakta ürünün üretim aşamasına başlandığı nokta önemli rol oynamaktadır. Hammaddeden nihai ürüne ulaşımında gereken proseslerde firmaya giren hammaddenin işlenmişlik seviyesi, aynı miktarda ürün tüketilip üretilmesine rağmen spesifik enerji tüketiminde farklılık gözlemlenmesine sebep olabilmektedir. Aynı zamanda, üretilen ürünün yapısı gereği üretim aşamasında gereken enerjide ya da proseslerinde değişiklik beklenebilir. Dolayısıyla aynı ürünü üreten iki fabrikanın spesifik enerji tüketimlerinde farklılık gözlemlenmektedir.

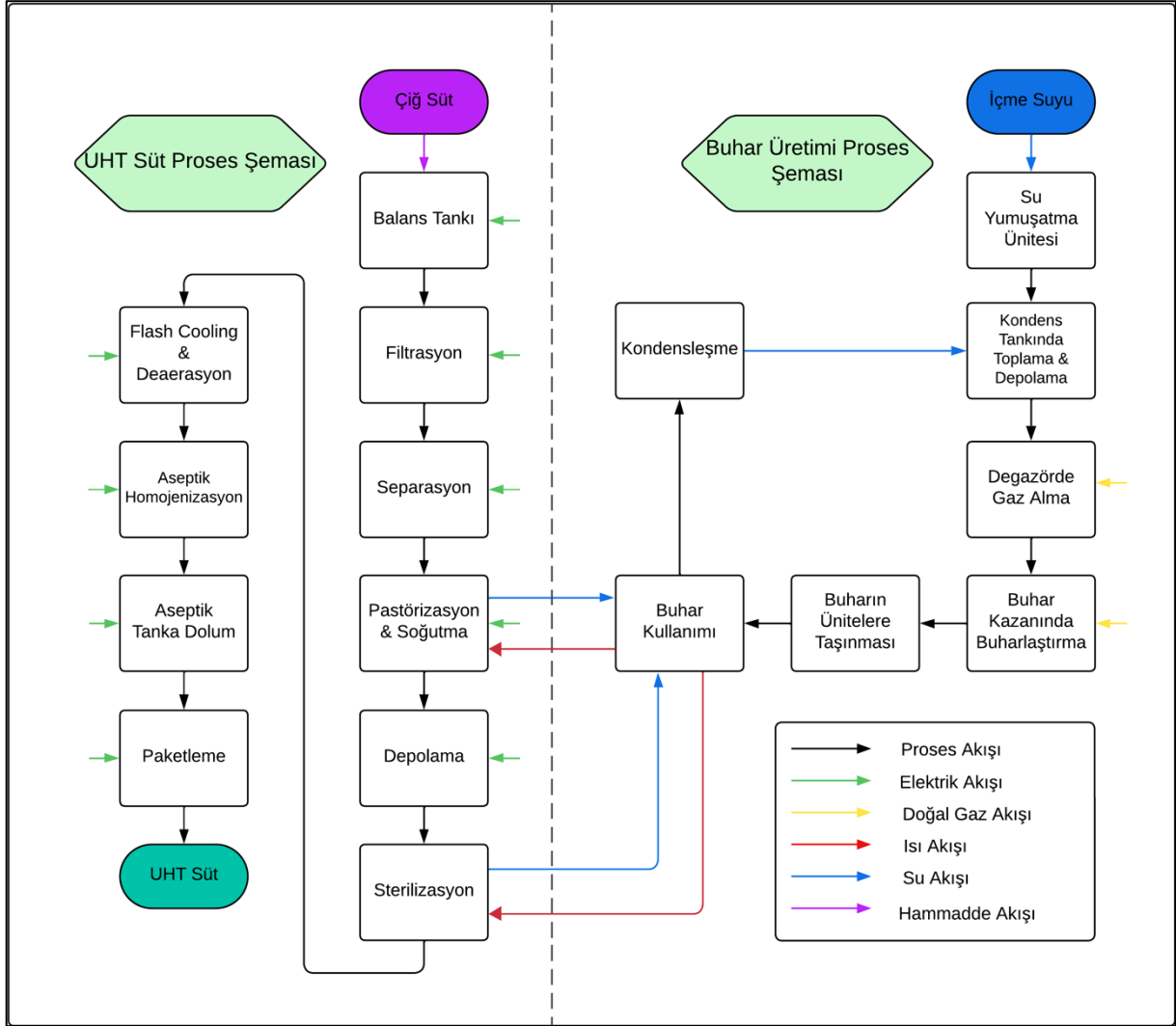
Bu sektördeki sera gazı emisyonları genel olarak kullanılan enerjiden kaynaklanmayıp gerçekleşen kimyasal reaksiyonların sonucunda oluşan emisyonlardır.

Bu çerçevede, gübre sektöründeki proses farklılıkları, ürünün kimyasal yapısı, pazar hareketliliği, enerji fiyatları, arz – talep dengesi ve diğer parametrelerin spesifik enerji tüketimi üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Bu tür kıyaslama çalışmalarının daha keskin sonuçlar verebilmesi için proses bazlı ölçüm altyapısının detay seviyesi kritik bir rol oynamaktadır. Üretim süreçlerindeki enerji tüketimlerinin ayrı ayrı ve hassas bir şekilde ölçülebildiği bir altyapı, enerji verimliliği potansiyellerinin daha net belirlenmesine ve firmalar arası kıyaslamaların çok daha sağlıklı yapılmasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, firmaların paylaştığı genel verilerin hangi periyotlarda ve ne tür bir metodoloji ile (otomatik sayaç, manuel kayıt vb.) toplandığı bilgisi de mevcut olmadığından, bu durum veri toplamadaki olası farklılıkların analizi nasıl etkileyebileceği konusunda bir belirsizlik yaratmaktadır. Bu nedenle, sektörel düzeyde enerji ölçüm altyapısının geliştirilmesi, gelecekteki verimlilik çalışmalarının etkinliğini artıracaktır.

Sonuç olarak, gübre sektöründeki bu kıyaslama çalışması, spesifik enerji tüketimindeki farklılıkların ne kadar çok katmanlı olduğunu göstermektedir. Kapasite kullanım oranları enerji verimliliğini doğrudan etkilerken, firmalar arasındaki temel farklılıklar; uygulanan kimyasal reaksiyonun türü, kullanılan teknolojinin modernliği ve hatta sürece dahil olan hammaddenin işlenmişlik seviyesi gibi yapısal özelliklerden kaynaklanmaktadır. Proses bazında ölçüm altyapısının eksik olması ve teknoloji detaylarının bilinmemesi, bu farkların kök neden analizini sınırlamaktadır. Bu bulgular, gübre sektöründe adil ve anlamlı bir kıyaslama için firmaların teknoloji, ürün gamı ve proses tipine göre kendi segmentleri içinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.4. Süt Sektörü

Süt sektörü kıyaslama çalışması için yapılan analizlerde, buhar üretimi ve süt üretimi arasındaki enerji tüketimi ilişkisi detaylı şekilde incelenmiştir. Bu analizlerde kullanılan proses akış şeması 12 Şubat 2024 tarihli çalıştayda belirlenmiş olup Şekil 7’de sunulmaktadır.



Şekil 7 Süt Sektörü Proses Şeması

Öncelikle, buhar üretimi süt üretim süreçlerinin vazgeçilmez bir parçası olup, buharın üretim ve kullanım aşamalarındaki enerji tüketimi kritik bir role sahiptir. Buhar üretimindeki gözlemlenen spesifik enerji tüketimi değerleri, süt üretimi ile kıyaslandığında ortalama olarak %100 daha yüksektir. Üretilen bu buharın %25'inin ise süt üretiminde sterilizasyon prosesinde kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda buhar üretiminin toplam süt üretimi SET değerinde yaklaşık %15'lik bir artışa sebep olduğu görülmüştür.

Bu durum, süt sektöründeki enerji tüketiminde buhar kullanımının ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Özellikle, sterilizasyon ve diğer enerji yoğun proseslerde buharın temel bir ihtiyaç olması, buhar üretiminde verimlilik sağlanması ve tüm sektöre etkisini artırmaktadır.

Diğer sektörlerde olduğu gibi süt sektöründe de ölçüm sistemleri, teknolojik altyapı ve kapasite kullanım oranı enerji tüketimi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Buharın yoğun kullanıldığı bu sektörde, enerji kayıplarını önlemek için ısı haritalandırması kritik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Buhar hatlarındaki kayıpların ve ekipman verimsizliklerinin tespit edilmesi, spesifik enerji tüketiminin düşürülmesine katkı sağlayabilir.

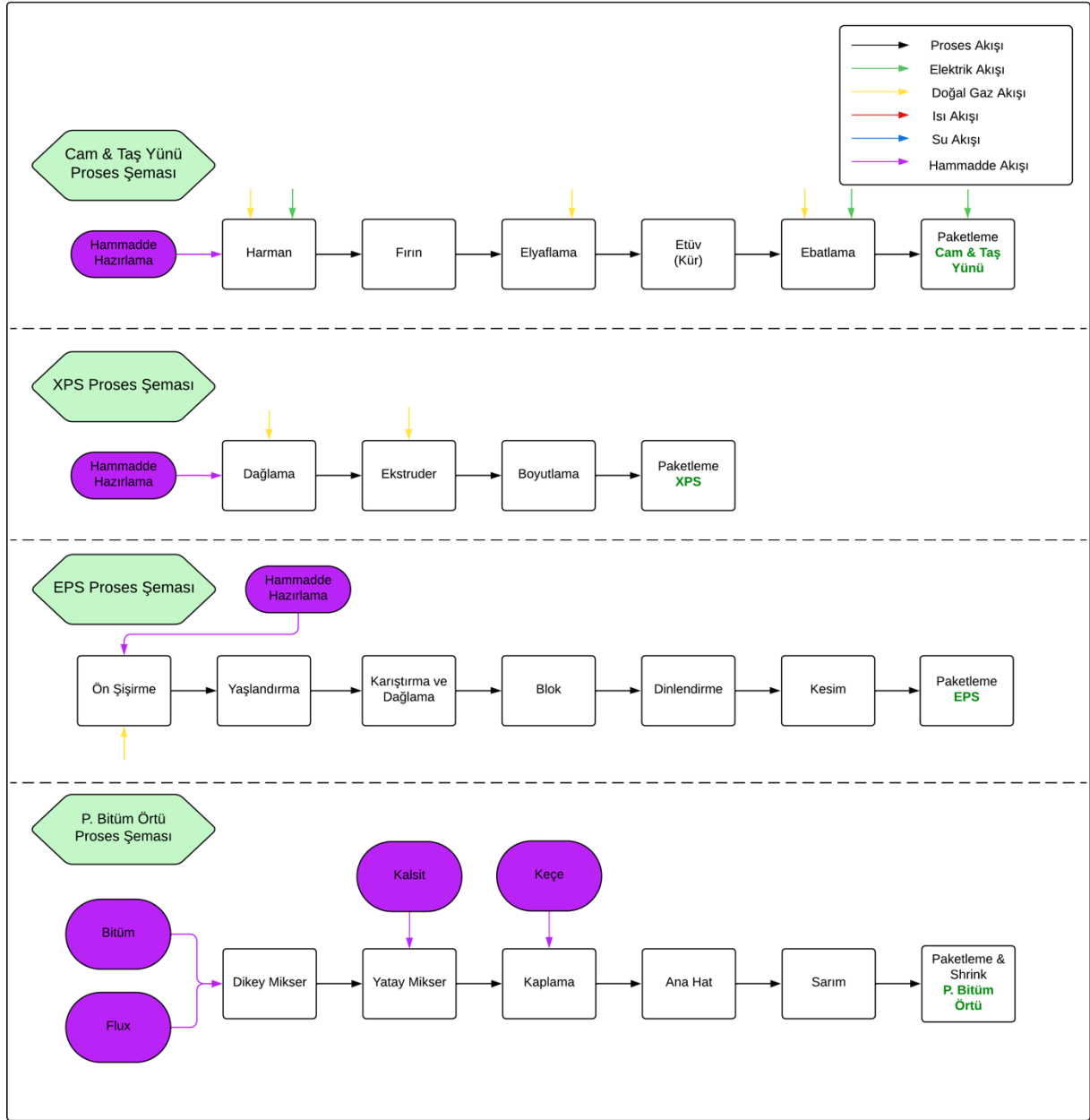
Mevsimsel ve bölgesel faktörler de süt sektöründeki enerji tüketim farklılıklarında etkili olmaktadır. Süt retiminde kullanılan çiğ süt kalitesi, buharın kullanıldığı sterilizasyon gibi proseslerdeki enerji tüketimini doğrudan etkileyebilir. Örneğin, iğ sütün daha yoğun işlem gerektirmesi veya mevsimsel değişiklikler nedeniyle üretim koşullarının değişmesi enerji tüketiminde artışa neden olabilir.

Süt retiminde buhar üretimi tonajının, üretilen sütün yaklaşık onda biri kadar olduğu göz önüne alındığında, buhar üretiminin toplam enerji tüketimindeki payı daha iyi anlaşılabilir. Enerji tüketimini optimize etmek için buhar üretim proseslerinde verimlilik artırıcı teknolojilere yönelmek ve enerji ölçüm altyapısını geliştirmek önem arz etmektedir.

Bu çerçevede, süt sektöründeki spesifik enerji tüketimini etkileyen faktörler arasında buhar üretimi, enerji ölçüm altyapısı, çiğ süt kalitesi ve proses özelindeki enerji kayıpları yer almaktadır. Sektördeki enerji tüketimini azaltmak için buhar kullanımı özelinde iyileştirmeler yapılması, ısı haritalandırması ve modern ekipmanların kullanımı gibi adımlar kritik önem taşımaktadır.

3.5. Yalıtım Sektörü

Yalıtım sektörü kıyaslaması için yapılan analizler, ürün yelpazesinin genişliği ve sektöre özgü farklılıklar nedeniyle oldukça karmaşık bir yapı sergilemektedir. Bu analizlerde kullanılan proses akış şeması 12 Şubat 2024 tarihli çalıştayda belirlenmiş olup Şekil 8’de sunulmaktadır.



Şekil 8 Yalıtım Sektörü Proses Şeması

Sektördeki ürün çeşitliliği, doğru analizler yapılabilmesi için aynı ürünü üreten birden fazla firmanın kıyaslanmasını gerektirmektedir. Ancak, katılımcı firma sayısındaki azlık bu tür analizlerin yapılmasını zorlaştırmaktadır.

Diğer sektörlerde olduğu gibi yalıtım sektöründe de enerji ölçüm sistemlerinin eksikliği önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bu eksiklik, enerji yoğun proseslerin belirlenmesinde zorluklara yol açmakta ve spesifik enerji tüketiminin detaylı bir şekilde incelenmesini engellemektedir. Ayrıca, her ürün için farklı KPI standartlarının bulunması, enerji tüketimi kıyaslamalarının karmaşıklığını artırmaktadır. Örneğin, bazı ürünlerde ağırlık (ton) esas alınırken, bazı ürünlerde hacim (m³) ya da alan (m²) gibi farklı ölçütler ön plana çıkmaktadır.

Bu çeşitlilik, yalıtım sektöründe standart bir SET kıyaslaması yapılmasını güçleştirmektedir. Ürün yoğunluklarının takibi bu zorluğun üstesinden gelmek için bir yöntem olarak düşünülebilir, ancak bu yöntem de tam anlamıyla doğru sonuçlar vermemektedir. Bunun yanı sıra, yalıtım ürünlerinin reçetelerinin ticari sır niteliği taşıması, aynı ürünü üreten firmalar arasında bir kıyaslama yapılsa dahi sonuçların doğruluğunu tartışmalı hale getirmektedir.

Ayrıca, aynı fabrika içerisinde birbirinden farklı ürünlerin üretilmesi, farklı KPI'lara sahip süreçlerin bir arada bulunmasına neden olmaktadır. Bu durum, fabrika geneli bir SET değeri oluşturulurken sonuçların doğruluğunu şüpheli hale getirebilmektedir. Fabrika bazlı kıyaslamalar yerine, proses veya ürün bazlı enerji tüketim analizlerine odaklanılması daha doğru sonuçlar verebilir.

Bu çerçevede, yalıtım sektöründe spesifik enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörler arasında ürün çeşitliliği, ölçüm altyapısının yetersizliği, farklı KPI standartları ve ticari sır niteliğindeki ürün reçeteleri yer almaktadır. Sektörde enerji tüketiminin daha doğru analiz edilebilmesi için ürün bazlı kıyaslama yöntemlerinin geliştirilmesi, enerji ölçüm altyapısının iyileştirilmesi ve proses bazlı analizlere ağırlık verilmesi kritik öneme sahiptir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

TÜSİAD ve Özyeğin Üniversitesi Enerji, Çevre ve Ekonomi Merkezi iş birliğinde yürütülmüş Türkiye'nin Sanayide Enerji Verimliliği Görünümü Projesi çeşitli sanayi sektörlerinde enerji kullanımına başka bir pencereden bakma fırsatı vermiştir. Dört sektör temelinde enerji verimliliğine odaklanan bu kısıtlı kıyaslama çalışmasında, farklı sektörlerden gelen verilere dayanarak sınırlı olsa da önemli olan biz dizi bulguya ulaşılmıştır:

- Tüm üretim süreçlerinde verimlilik, teknolojik altyapı seviyesi ve kapasite kullanım oranları, enerji tüketimini belirleyen temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır.
- Teknolojik altyapıdaki farklılıklar enerji verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.
- Birçok firma, ölçüm altyapısındaki eksikliklerden dolayı enerji tüketimini daha detaylı ve verimli bir şekilde analiz etmekte zorlanmaktadır.
- Proses koşulları, reaksiyon türleri ve ekipman verimliliği gibi faktörler enerji tüketiminde çeşitliliklere neden olmaktadır.

Bu bulgular, enerji verimliliği konusunda bir standart oluşturulması gerektiğini ve ölçüm altyapısının güçlendirilmesinin önemli olduğunu göstermektedir. Bu bulgular aynı zamanda enerji verimliliği ve enerji tasarrufu arasındaki farkı ve bilimsel ve bütünsel çalışmaların önemini vurgulamaktadır.

Sektörel düzeyde yapılacak iyileştirmeler, Türkiye sanayisinde enerji verimliliği açısından büyük fark yaratma potansiyeline sahiptir. Özellikle, proseslerin optimize edilmesi, modern enerji ölçüm altyapısının kurulması ve verimli teknolojilere geçiş yapılması gereklidir. Bu iyileştirmeler, yalnızca işletmelerin enerji tüketimini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda maliyet avantajı sağlayarak sektörlerin sürdürülebilir bir yapıya kavuşmalarını hızlandıracaktır. Teknolojik altyapının iyileştirilmesi, işletme maliyetlerini düşürürken çevresel etkileri en aza indirecektir. Bu tür adımlar, aynı zamanda uzun vadede sektörel rekabet gücünü artırarak firmaların daha güçlü bir konum elde etmesini sağlayacaktır. Böylece, işletmeler hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha verimli hale gelerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine daha hızlı ulaşabilecektir.

Öte yandan, yönetsel altyapının enerji tüketimine olan etkisi de dikkate alınmalıdır:

- Birçok firma, enerji yönetim sistemi ve ekibi konusunda eksiklikler yaşamaktadır.
- Ölçüm altyapısı ve enerji verimliliği konusundaki eksiklikler, firmaların bu alanda somut adımlar atmasını engellemektedir.

- Enerji verimliliğinin net sıfır emisyon hedefleri doğrultusundaki önemi ve sağlayabileceği potansiyel açısından farkındalık yeterli seviyeye gelmemiştir ve firmaların enerji verimliliği durumları ile ilgili farkındalıkları sınırlıdır.
- Bu eksikliklerin giderilmesi için şirketlerin enerji yönetimi altyapısının güçlendirilmesi, gerekli ölçüm sistemlerinin kurulması ve bu alandaki bilinirliklerinin artırılması önemlidir.

Bu sayede, firmalar daha verimli bir enerji kullanımına geçerek, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir adım atmış olacaklardır.

Proje sürecinde gözlemlenen ve deneyimlenen zorluklar arasında, firmaların bilgi paylaşımından kaçınması ve hukuki konularda oldukça temkinli davranması etkili unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu unsurlar, gelecek çalışmalarda kavramsal çerçeve ve metodolojik yaklaşımda değişiklik yapmanın gerekliliğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, benzer bir çalışmanın etkin şekilde gerçekleştirilebilmesi için firmalarla bire bir ve disiplinler-ötesi (transdisipliner) kurguda ilave çalışmalar yapılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Patterson MG. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy* 1996;24:377–90. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1).
- [2] Phylipsen GJM, Blok K, Worrell E. International comparisons of energy efficiency - Methodologies for the manufacturing industry. *Energy Policy* 1997;25:715–25. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(97\)00063-3](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(97)00063-3).
- [3] Andersson E, Arfwidsson O, Thollander P. Benchmarking energy performance of industrial small and medium-sized enterprises using an energy efficiency index: Results based on an energy audit policy program. *J Clean Prod* 2018;182:883–95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.027>.
- [4] Smith JM. Introduction to chemical engineering thermodynamics. vol. 27. 1950. <https://doi.org/10.1021/ed027p584.3>.
- [5] Saygin D, Worrell E, Patel MK, Gielen DJ. Benchmarking the energy use of energy-intensive industries in industrialized and in developing countries. *Energy* 2011;36:6661–73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.025>.
- [6] Farla J, Blok K, Schipper L. Energy efficiency developments in the pulp and paper industry: A cross-country comparison using physical production data. *Energy Policy* 1997;25:745–58. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(97\)00065-7](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(97)00065-7).
- [7] Wilby MR, Rodríguez González AB, Vinagre Díaz JJ. Empirical and dynamic primary energy factors. *Energy* 2014;73:771–9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.083>.
- [8] Lawrence A, Thollander P, Andrei M, Karlsson M. Specific energy consumption/use (SEC) in energy management for improving energy efficiency in industry: Meaning, usage and differences. *Energies (Basel)* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/en12020247>.
- [9] Salonitis K, Zeng B, Mehrabi HA, Jolly M. The Challenges for Energy Efficient Casting Processes. *Procedia CIRP* 2016;40:24–9. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.043>.
- [10] Jolly MR, Salonitis K, Charnley F, Ball P, Mehrabi H, Pagone E. Energy Efficiency Status-Quo at UK Foundries: The “Small-Is-Beautiful” Project, Springer, Cham; 2017.
- [11] Eppich RE. Robert E. Eppich Eppich Technologies May 2004 2004.
- [12] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Bakanlık Dokümanı: Sanayide Enerji Verimli Teknolojiler. n.d.
- [13] Salonitis K, Jolly M, Zeng B. Simulation Based Energy and Resource Efficient Casting Process Chain Selection: A Case Study. *Procedia Manuf* 2017;8:67–74. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.008>.
- [14] Berglund J, Michaloski J, Leong S, Shao G, Riddick F, Arinez J, et al. Energy efficiency analysis for a casting production system. *Proceedings - Winter Simulation Conference* 2011:1060–71. <https://doi.org/10.1109/WSC.2011.6147829>.
- [15] IFA. Public Sumary Medium-Term Fertilizer Putlook 2023-2027 2023.
- [16] Mudahar MS, Hignett TP. Energy efficiency in nitrogen fertilizer production. *Energy in Agriculture* 1985;4:159–77. [https://doi.org/10.1016/0167-5826\(85\)90014-2](https://doi.org/10.1016/0167-5826(85)90014-2).
- [17] Rafiqul I, Weber C, Lehmann B, Voss A. Energy efficiency improvements in ammonia production - Perspectives and uncertainties. *Energy* 2005;30:2487–504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.12.004>.
- [18] IFA. Energy Efficiency and CO2 Emissions in Ammonia Production. *Production* 2009:4.
- [19] Kermeli K, Worrell E, Graus W, Corsten M. Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Ammonia and Nitrogenous Fertilizer Production: An ENERGY STAR® Guide for Energy & Plant Managers. EPA-United States Environmental Protection Agency 2017:1–430.

- [20] March L. Introduction to Pinch Technology 2000.
- [21] YARA. Annual Report 2018 2018.
- [22] Palys MJ, Daoutidis P. Techno-economic optimization of renewable urea production for sustainable agriculture and CO₂ utilization. *JPhys Energy* 2024;6. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ad0ee6>.
- [23] Ashida Y, Arashiba K, Nakajima K, Nishibayashi Y. Molybdenum-catalysed ammonia production with samarium diiodide and alcohols or water. *Nature* 2019;568:536–40. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1134-2>.
- [24] Worrell E, Price L, Martin N, Hendriks C, Meida LO. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment* 2001;26:303–29. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>.
- [25] Szmigiel D, Bielawa H, Kurtz M, Hinrichsen O, Muhler M, Raróg W, et al. The kinetics of ammonia synthesis over ruthenium-based catalysts: The role of barium and cesium. *J Catal* 2002;205:205–12. <https://doi.org/10.1006/jcat.2001.3431>.
- [26] Sun ZG. Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine. *Energy Build* 2008;40:126–30. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.013>.
- [27] Deeth H. Improving UHT processing and UHT milk products. vol. 1. Woodhead Publishing Limited; 2010. <https://doi.org/10.1533/9781845699420.4.302>.
- [28] Rysstad G, Kolstad J. Extended shelf life milk - Advances in technology. *Int J Dairy Technol* 2006;59:85–96. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2006.00247.x>.
- [29] Browning E, Lewis M, Macdougall D. Predicting safety and quality parameters for UHT-processed milks. *Int J Dairy Technol* 2001;54:111–20.
- [30] Natural Resources Canada. Energy Performance Indicator Report: Fluid Milk Plants. 2001.
- [31] Niamsuwan S, Kittisupakorn P, Mujtaba IM. A newly designed economizer to improve waste heat recovery: A case study in a pasteurized milk plant. *Appl Therm Eng* 2013;60:188–99. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.056>.
- [32] Kalla AM, R. D. Energy Efficient and Cost Saving Practices in Dairy Industries: a Review. *International Journal of Applied Engineering Research and Development (IJAERD)* 2017;7:1–10.
- [33] Wang L. Energy Consumption and Reduction Strategies in Food Processing. *Sustainable Food Processing* 2014;13:378–97.
- [34] Clairand JM, Briceno-Leon M, Escriva-Escriva G, Pantaleo AM. Review of energy efficiency technologies in the food industry: Trends, barriers, and opportunities. *IEEE Access* 2020;8:48015–29. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979077>.
- [35] Chan DYL, Huang CF, Lin WC, Hong GB. Energy efficiency benchmarking of energy-intensive industries in Taiwan. *Energy Convers Manag* 2014;77:216–20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.027>.
- [36] Zabalza Bribián I, Valero Capilla A, Aranda Usón A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build Environ* 2011;46:1133–40. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>.
- [37] Toller S, Wadeskog A, Finnveden G, Malmqvist T, Carlsson A. Energy use and environmental impacts of the Swedish building and real estate management sector. *J Ind Ecol* 2011;15:394–404. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00340.x>.
- [38] Ardente F, Beccali M, Cellura M, Mistretta M. Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy Build* 2008;40:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.009>.

- [39] Yıldız NB, Arslan H, Yılmaz E. Yapı Malzemelerinin Yaşam Döngü Değerlendirmesi : Literatür Taraması. Düzce University Journal of Science and Technology 2020;8:210–9. <https://doi.org/10.29130/dubited.572810>.
- [40] Sarkis J, Zhu Q, Lai KH. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. Int J Prod Econ 2011;130:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.010>.
- [41] Füchsl S, Rheude F, Röder H. Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review. Cleaner Materials 2022;5. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100119>.
- [42] Ernst W, Galitsky C. Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR □ Guide for Energy and Plant Managers Ernst Worrell and Christina Galitsky 2004. <https://doi.org/10.2172/927882>.
- [43] Abdelaziz EA, Saidur R, Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011;15:150–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.003>.
- [44] Knauf Insulation. Annual Review 2020. 2020.
- [45] Owens Corning. Building a Sustainable Future 2021 Sustainability Report. 2021.
- [46] Rockwool. Sustainability Report 2019. 2019.
- [47] Saint-Gobain. Creating Sustainable Growth. 2023. <https://doi.org/10.1177/174578660401600204>.