



ENDÜSTRİYEL ENERJİ VERİMLİLİĞİ TEKNİKLERİNİN COPRAS TABANLI ÇOK KRİTERLİ ANALİZİ: TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ÖRNEĞİ

Yunus Emre Demirel¹, Elif Şimşek Yeşil^{1*}, Pınar Hasanoğlu Öztürk², Emrah Öztürk³, Mehmet Kitiş¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Düzce Üniversitesi, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

³ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>COPRAS, Enerji verimliliği, Mevcut en iyi teknikler (MET'ler), Tekstil, Temiz üretim.</i>	Endüstriyel temiz üretim uygulamalarında karşılaşılan temel sorunlardan biri, işletmeler için en uygun tekniğin belirlenmesidir. Bu çalışma, entegre bir tekstil işletmesinde enerji verimliliği tekniklerinin seçimine yönelik yeni bir yaklaşım sunmakta ve karar verme aracı olarak "Karmaşık Oransal Değerlendirme (COPRAS)" yöntemini kullanmaktadır. Çalışmanın yürütüldüğü tesis; eski ve yeni tekstil teknolojilerini bir arada barındırması, büyük ölçekli bir baskı ünitesine sahip olması ve Avrupa'nın önemli ev tekstili üreticilerinden biri olması nedeniyle seçilmiştir. İşletmede ayrıntılı enerji verimliliği etütleri gerçekleştirilmiş, elde edilen bulgular doğrultusunda "mevcut en iyi teknikler (MET/BAT)" kapsamında kapsamlı bir iyileştirme listesi oluşturulmuştur. COPRAS değerlendirmesi sonucunda yedi tekniğin öncelikli olduğu belirlenmiştir: ramözlerde kumaş neminin izlenmesi ve hız optimizasyonu, ramözlerde devridaim havası kontrolü, terbiye proseslerinin optimizasyonu, klima ve nemlendirme sisteminin iyileştirilmesi, iç aydınlatma optimizasyonu, enerji izleme sisteminin kurulması ve boru/vana/tank izolasyonu. Bu tekniklerin uygulanmasıyla elektrik, buhar, doğal gaz ve hava emisyonlarında sırasıyla %2,2-3,5, %0,5-1,5, %6,3-13,5 ve %8-16,5 azalma potansiyeli hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tekniklerin geri ödeme süresi 40 ayın altında bulunmuştur. Sonuç olarak COPRAS modeli, tekstil sektöründe uygun enerji verimliliği tekniklerinin belirlenmesinde etkili bir yol haritası sunmaktadır.

COPRAS BASED MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF INDUSTRIAL ENERGY EFFICIENCY TECHNIQUES: THE TEXTILE INDUSTRY EXAMPLE

Keywords	Abstract
<i>Best available techniques (BATs), Cleaner production, COPRAS, Energy efficiency, Textile.</i>	One of the main challenges in industrial cleaner production practices is determining the most appropriate technique for a facility. This study presents a new approach for selecting energy efficiency techniques in an integrated textile plant and employs the "Complex Proportional Assessment (COPRAS)" method as a decision-making tool. The facility was selected because it incorporates both old and modern textile technologies, includes a large-scale printing unit, and is one of Europe's prominent home textile manufacturers. Detailed energy efficiency audits were carried out in the plant, and based on the findings, a comprehensive improvement list was prepared within the scope of "Best Available Techniques (BAT)". The COPRAS evaluation identified seven priority techniques: monitoring fabric moisture and optimizing speed in stenters, controlling stenter recirculation air, optimizing finishing processes, improving the air-conditioning and humidification system, optimizing indoor lighting, installing an energy monitoring system, and insulating pipes/valves/tanks. Application of these techniques offers reduction potentials of 2.2-3.5% for electricity, 0.5-1.5% for steam, 6.3-13.5% for natural gas, and 8-16.5% for air emissions. Additionally, all prioritized techniques were found to have payback periods of less than 40 months. Overall, the study demonstrates that the COPRAS model provides an effective roadmap for determining suitable energy efficiency techniques in the textile sector.

Alıntı / Cite

Demirel, Y. E., Şimşek Yeşil, E., Hasanoğlu Öztürk, P., Öztürk, E., Kitiş, M., (2026). Endüstriyel Enerji Verimliliği Tekniklerinin COPRAS Tabanlı Çok Kriterli Analizi: Tekstil Endüstrisi Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 14(1), 214-235.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
Y.E. Demirel / 0000-0002-5231-4701	Başvuru Tarihi / Submission Date
E. Şimşek Yeşil / 0000-0002-7884-8912	Revizyon Tarihi / Revision Date
P. Hasanoğlu Öztürk / 0000-0003-3025-1348	Kabul Tarihi / Accepted Date
E. Öztürk / 0000-0001-6421-6474	Yayın Tarihi / Published Date
M. Kitiş / 0000-0002-6836-3129	

* İlgili Yazar / Corresponding author: elifsimsekbursa@gmail.com, +90-246-211-1755

COPRAS BASED MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF INDUSTRIAL ENERGY EFFICIENCY TECHNIQUES: THE TEXTILE INDUSTRY EXAMPLE

Yunus Emre Demirel¹, Elif Şimşek Yeşil^{1,†}, Pınar Hasanoğlu Öztürk², Emrah Öztürk³, Mehmet Kitiş¹

¹ Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

² Department of Environmental Protection Technologies, Düzce University, Düzce, Turkey

³ Department of Environmental Protection Technologies, Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Turkey

Highlights

- 7 priority energy reduction techniques were determined by COPRAS method.
- Reductions in electricity and steam were 2.2-3.5% and 0.5-1.5%, respectively.
- Reductions in natural gas and air emissions were 6.3-13.5% and 8-16.5%, respectively.
- The payback periods were calculated shorter than 40 months.

Graphical Abstract

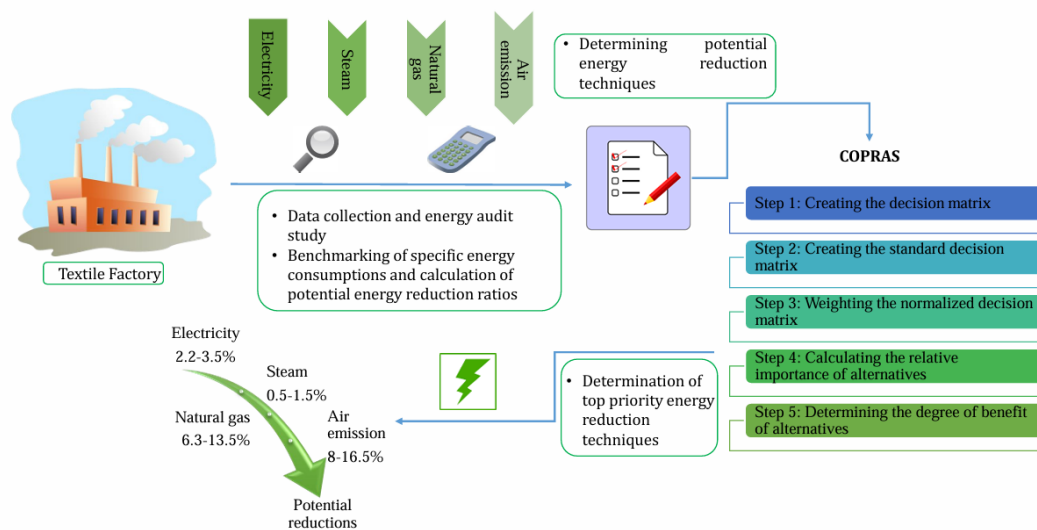


Figure. Graphical abstract of the study methodology and key findings

Purpose and Scope

The purpose of this study is to address one of the major challenges in industrial cleaner production: selecting the most appropriate energy efficiency techniques for textile enterprises. The study aims to develop a systematic and transparent decision-making approach for an integrated textile mill by applying the Complex Proportional Assessment (COPRAS) method to prioritize feasible energy efficiency techniques.

Design/methodology/approach

The research was conducted in an integrated textile mill that includes all finishing–dyeing–printing processes for woven and knitted cotton fabrics. Detailed energy efficiency audits and data collection activities were carried out across the facility. Based on the collected data, a comprehensive list of Best Available Techniques (BAT) was prepared. The COPRAS multi-criteria decision-making method was then applied to evaluate and rank the identified energy efficiency techniques.

Findings

The COPRAS evaluation revealed seven priority techniques, including stenter moisture monitoring and speed optimization, recirculation air control, finishing process optimization, improving the air-conditioning and humidification system, indoor lighting optimization, energy monitoring system installation, and insulation of pipes/valves/tanks. These techniques provide reduction potentials of 2.2–3.5% for electricity, 0.5–1.5% for steam, 6.3–13.5% for natural gas, and 8–16.5% for air emissions. All techniques showed payback periods shorter than 40 months.

Originality

This study is one of the first to apply the COPRAS method specifically for prioritizing energy efficiency techniques in the textile sector. It provides a structured, data-driven decision-making framework that integrates detailed energy audits with MCDM analysis. The approach adds value to industries, policymakers, and researchers by offering a replicable method for selecting the most effective techniques.

[†] Corresponding author: elifsimsekbursa@gmail.com, +90-246-211-1755

1. Giriş (Introduction)

Karar verme, insanlığın her döneminde karşılaşılan temel bir sorun olarak, sürecin doğru sonuçlarla tamamlanmasını zorunlu kılmaktadır. Her ne kadar kararlar çoğu zaman deneyim, sezgi ve mantığa dayansa da, günümüz koşullarında bilimsel yöntemlere başvurmanın kritik bir gereklilik haline geldiği görülmektedir (Dane ve Pratt, 2007). Karar verme, belirlenen hedefe ulaşabilmek için çeşitli kriterler doğrultusunda mevcut seçenekler arasından en uygun olanın seçilmesi sürecidir (Wang vd., 2009). Bununla birlikte, belirsiz bilgilerin bulunduğu veya nicel olarak ifade edilmesi güç faktörlerin kullanıldığı durumlarda karar verme süreci zorlayıcı (bulanık) bir yapıya bürünebilmektedir (Kahraman vd., 2015). Etkili bir karar verme için, alternatiflerin her açıdan ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Günümüzde artan rekabet, teknolojik gelişmelerin hızlanması ve çeşitlenmesi, karar verme süreçlerini daha karmaşık hale getirmiştir (Ozbek, 2017). Karar vericiler için en uygun seçeneğin belirlenmesi; hedefe etkin bir şekilde ulaşabilmek adına birbiriyle ilişkili pek çok faktörün dikkate alınmasını gerektirmektedir (Simsek vd., 2022). Belirlenen hedeflere ulaşılması, verilen kararın etkinliğini göstermektedir. Karar verme analizinin temel adımları şunlardır: (i) problemin tanımlanması, (ii) olası tüm seçeneklerin listelenmesi, (iii) karar vericinin kontrolü dışında gerçekleşebilecek olayların belirlenmesi, (iv) her seçeneğin bu olaylar karşısında elde edeceği sonuçları gösteren karar tablosunun oluşturulması, (v) bir karar modelinin seçilmesi ve (vi) modelin uygulanarak alternatifin belirlenmesidir (Aruldoss vd., 2013). Çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV), çoğu zaman birbiriyle çatışan hem nicel hem de nitel kriterler göz önünde bulundurularak alternatiflerin seçilmesi, sıralanması veya sınıflandırılması için kullanılan bir yaklaşımdır (Taherdoost ve Madanchian, 2023). Bu yöntemlerin temel amacı, karar vericilerin en uygun alternatifi belirlemesine destek sağlamaktır. Günümüzde ÇÖKV yaklaşımı birçok alanda yaygın şekilde uygulanmakta olup, bu kapsamda tanımlanmış çok sayıda yöntem bulunmaktadır (Paradowski ve Drazek, 2020). Kullanım amacına bağlı olarak en sık kullanılan ÇÖKV yöntemlerinden bazıları; Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS), Zenginleştirme Değerlendirmesi için Tercih Sıralama Organizasyonu Yöntemi (PROMETHEE), Çok Ölçütlü Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm Tekniği (VIKOR), Karmaşık Oransal Değerlendirme (COPRAS) ve Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MOORA) şeklinde sıralanmaktadır (Ozbek, 2017).

Temiz üretim yaklaşımı, endüstriyel işletmelerde kaynak kullanımının ve atık/emisyon oluşumunun kaynağında azaltılmasını hedeflemektedir (Tschiggerl ve Topic, 2019). Bu kapsamda Avrupa Komisyonu (EC) tarafından Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (IPPC) Direktifi (96/61/EC) çerçevesinde Mevcut En İyi Teknikler (MET) tanımlanmış olup, işletmelerin çevresel yüklerini en aza indirmek için uygun teknikleri çok boyutlu bir değerlendirmeye seçmeleri gerekmektedir. Uygun MET seçimi; teknik uygulanabilirlik, ekonomik göstergeler, tasarruf potansiyeli, kaynak tüketimi ve atık/emisyon azaltım etkileri gibi çeşitli kriterlerin birlikte ele alınmasını gerektirdiğinden, ÇÖKV yöntemleri bu süreçte önemli bir araçtır. MET seçim sürecini desteklemek amacıyla 2006 yılında yayımlanan Ekonomi ve Çapraz Medya Etkileri (ECM) referans dokümanı (EC, 2006) karar vericilere çevresel ve ekonomik bir çerçeve sunmakta olup, teknik ve işletmeye özgü faktörleri kapsamamaktadır (Balkan vd., 2023). Bu nedenle işletmelerde en uygun temiz üretim tekniklerinin belirlenmesi, ÇÖKV yöntemlerini zorunlu kılmaktadır (Demirel vd., 2021; Simsek vd., 2022).

Son dönemde enerji verimliliği alanındaki uygulamalarda, ÇÖKV teknikleri giderek daha fazla tercih edilmektedir. Enerji verimli malzeme seçimi (Bhatia, 2013), endüstriyel buhar kazanlarında verimlilik tekniklerinin değerlendirilmesi (Demirel vd., 2021), atık ısı geri kazanım sistemlerinin analizi (Mahdavi vd., 2022) ve gazlaştırma tipinin belirlenmesi (Hasanzadeh vd., 2022) gibi birçok çalışmada TOPSIS ve diğer ÇÖKV yöntemleri uygulanmıştır. Ayrıca enerji stratejilerinin seçimi (Kumar vd., 2017; Ishfaq vd., 2018), yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi (Li vd., 2020) ve enerji verimli malzeme seçiminde (Yang vd., 2018; Aksakal vd., 2022) ÇÖKV yaklaşımının etkili olduğu gösterilmiştir. TOPSIS, PROMETHEE, VIKOR ve COPRAS modellerinin temiz üretim uygulamalarında öncelikli tekniklerin belirlenmesinde etkili biçimde kullanılabileceği belirtilmiştir (Simsek vd., 2022).

Araştırmanın amacı, entegre bir tekstil işletmesinde enerji kullanımının daha verimli hale getirilmesi ve hava emisyonlarının azaltılmasıdır. Bu araştırma, enerji verimliliği tekniklerini belirlemek için COPRAS yöntemine dayalı yeni bir değerlendirme yaklaşımı ortaya koymaktadır. COPRAS yöntemi çeşitli alanlarda karar verme aracı olarak kullanılsa da, enerji verimliliği tekniklerinin sıralanması amacıyla literatürde daha önce uygulanmamıştır. Literatürde AHP, TOPSIS ve VIKOR gibi yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu modeller genellikle karmaşık hiyerarşiler veya ideal çözüme olan uzaklık hesaplamalarına dayanmaktadır. COPRAS yöntemi ise maliyet ve fayda kriterlerini aynı anda, daha yalın bir yaklaşımla analiz edebilmektedir. Ayrıca alternatiflerin birbirine göre üstünlüğünü 'fayda derecesi' üzerinden çok daha net yansıttığı için bu çalışmada tercih edilmiştir. Model, entegre bir ev tekstili tesisinde daha önce kullanılmamış olup bu çalışmada ilk kez değerlendirilmiştir. Çalışmanın yenilikçi yönleri; (i) ev tekstili üretiminde enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen ve kritik enerji tüketim noktalarına

odaklanan tekniklerin sunulması, (ii) enerji verimliliği açısından uygulanabilirlik temelli değerlendirme kriterlerinin geliştirilmesi, (iii) enerji verimliliği tekniklerinin seçiminde özgün kriterler ve spesifik tüketim/emisyon değerlerinin kullanılmasıdır. Ayrıca COPRAS modelinin bu sektörde ilk kez uygulanması, çalışmanın literatüre önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir. Çalışmada, model sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kriter ağırlıklarındaki değişimlerin alternatif sıralamasına etkisini inceleyen duyarlılık analizi uygulanmıştır. Öncelikli tekniklerin elektrik, buhar, doğal gaz ve hava emisyonlarında sağlayacağı azaltımlar hesaplanmıştır. Yatırım maliyetleri, geri ödeme süreleri, net bugünkü değer (NBD) ve iç kârlılık oranı (İKO) gibi finansal göstergeler kullanılarak ekonomik yapılabilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım, enerji verimliliği yatırımlarının hem çevresel hem ekonomik açıdan değerlendirildiği kapsamlı ve uygulanabilir bir karar destek modeli sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Çalışmada incelenen ev tekstili işletmesine ve kullanılan yönteme dair detaylar, aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

2.1. Çalışılan Tekstil İşletmesi (Studied Textile Enterprise)

Çalışma, yıllık yaklaşık 22 milyon kg üretim yapan ve Avrupa'nın başlıca ev tekstili üreticileri arasında yer alan entegre bir tekstil tesisinde uygulanmıştır. Batı Marmara Bölgesi'nde faaliyet gösteren bu işletmenin 60.000 m² kapalı alanı bulunmakta ve çalışan sayısı mevsimsel değişim göstererek 880 civarındadır. Üretimin yaklaşık %70'i ihraç edilmektedir. İşletmede pamuklu dokuma ve örgü kumaşlara yönelik apre, boyama ve baskı işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ön terbiye birimi; haşıl sökme, merserizasyon, ağartma ve sürekli yıkama proseslerinden oluşmaktadır. Dokuma kumaşlar pad-batch, örgü kumaşlar ise HT boyama makinelerinde işlenmektedir. Baskı ünitesi; düz baskı, rotasyon baskı ve dijital baskı hatlarını içermekte olup toplam 12 baskı makinesi bulunmaktadır.

İşletmenin yıllık ortalama enerji tüketimi; 23.053.970 kWh elektrik, 276.348 ton/yıl buhar ve 3.004.909 Sm³/yıl doğal gaz şeklindedir. Elektrik üretim ve yardımcı proseslerde, doğal gaz ise özellikle ramöz ve şardon makinelerinde kullanılmaktadır. Tesis genelinde 101 noktada hava emisyonu oluşmakta olup karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), nitrik oksit (NO), azot oksitler (NO_x), toz, uçucu organik bileşikler (VOC) ve benzen gibi kirleticileri içermektedir. Mevcut ölçümlere göre emisyon seviyeleri yasal sınırlar içerisinde. Enerji tüketimi kısmen dijital izleme sistemi ile takip edilmektedir ancak tüm prosesler için tam kapsamlı izleme altyapısı mevcut değildir. İşletme, Avrupa Birliği (AB) Yeşil Mutabakat kapsamında karbon ayak izinin azaltılmasını ve artan enerji maliyetleri nedeniyle enerji verimliliğinin artırılmasını stratejik öncelik olarak belirlemiştir. Çalışma sürecinde toplanan verilerin doğrulanması ve kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında, işletmenin 5 kişilik yetkili personelinin (yöneticiler, çalışanlar ve operatörler) oluşan uzman bir ekip ile yüz yüze görüşmeler gerçekleştirilmiştir.

2.2. Çalışma Yaklaşımı (Study Approach)

Bu çalışmada, beş aşamalı temiz üretim uygulama metodolojisi temel alınmış, ancak incelenen işletme için en uygun tekniklerin belirlenmesi amacıyla çok kriterli karar verme yaklaşımı ile geliştirilmiştir. Çalışmada izlenen temel metodoloji Şekil 1'de özetlenmiştir. İlk aşamada, işletmenin enerji kullanım noktalarına yönelik detaylı yerinde incelemeler ve veri toplama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İşletmedeki tüm enerji kullanım noktalarına ilişkin spesifik enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Ardından, işletmenin elektrik, doğal gaz, buhar ve toplam enerji tüketim değerleri, IPPC Tekstil Mevcut En İyi Teknikler Referans (BREF) Dokümanı ve literatürde yer alan benzer tekstil tesislerinin verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda enerji tasarruf potansiyelleri belirlenmiştir. Üçüncü adımda, işletme için uygun enerji verimliliği teknikleri incelenmiştir. İşletmedeki enerji analizleri, saha incelemeleri, yüz yüze görüşmeler, IPPC Tekstil BREF ve literatür kaynakları kullanılarak toplam 45 enerji verimliliği tekniği belirlenmiştir. Bu tekniklerin tamamı, herhangi bir ön eleme yapılmaksızın doğrudan COPRAS analizine dahil edilmiştir. Böylece potansiyel tüm iyileştirme fırsatlarının bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi ve sıralanması sağlanmıştır. Bu aşamada enerji verimliliği seçenekleri COPRAS yöntemiyle analiz edilerek tesis için en uygun ve öncelikli teknikler belirlenmiştir. Ardından duyarlılık analizi yapılmıştır. Son aşamada ise, her bir öncelikli enerji verimliliği tekniği için enerji verimliliği oranları, hava emisyonu azaltım oranları ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Belirlenen öncelikli enerji verimliliği uygulamalarına yönelik ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Karar matrisinde yer alan nitel kriterlerin (uygulanabilirlik, işletme önceliği vb.) sayısallaştırılmasında 1-5 arası Likert tipi ölçek kullanılmıştır. Uzmanların her bir teknik için yaptığı sözel değerlendirmeler; öncelikli değil (1 puan), düşük öncelik (2 puan), orta öncelik (3 puan), öncelik (4 puan) ve

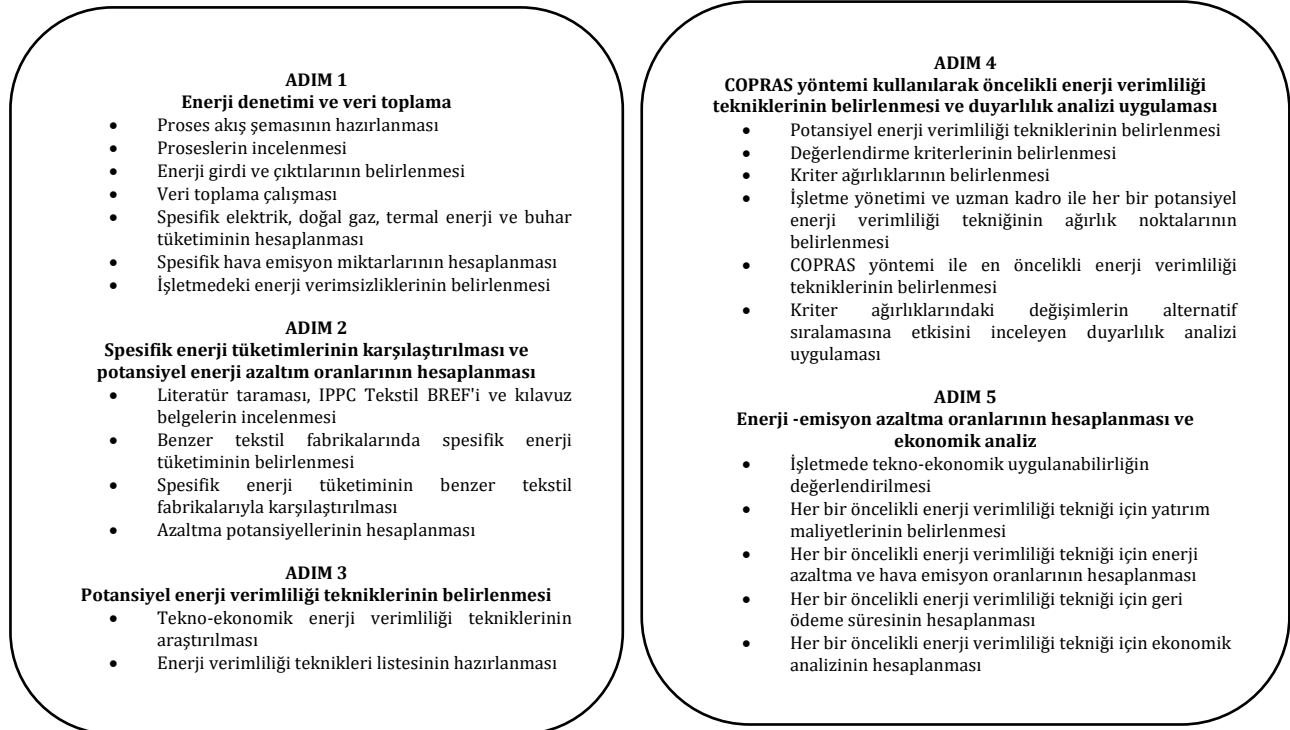
yüksek öncelik (5 puan) gibi puanlanmıştır. Bu puanların aritmetik ortalaması alınarak her bir teknik için sayısal performans değerleri oluşturulmuş ve karar matrisine aktarılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemsel yaklaşımın ayrıntıları aşağıda sunulmaktadır.

2.3. Enerji Denetimi ve Veri Toplama (Energy Audit and Data Collection)

Veri toplama süreci, proses akış şemasının ve enerji kullanım noktalarının belirlenmesiyle başlamıştır (Şekil 2). Bu çalışma kapsamında üretim, yardımcı prosesler ve proses dışı bölümlerde tüketilen elektrik, buhar ve doğal gaz gibi enerji girdileri tespit edilmiş ve bunlara yönelik detaylı bir veri toplama formu hazırlanmıştır. Veriler, enerji analizörleri, sayaçlar ve bilgisayar destekli izleme sistemleri aracılığıyla elde edilmiştir. İşletmede tüm ölçüm cihazlarının kalibrasyon ve bakımları düzenli olarak yapılmaktadır. Kritik noktalarda kütle ve enerji denklilikleri uygulanarak veriler doğrulanmış; izleme ekipmanının yetersiz olduğu noktalarda ise teorik hesaplamalarla eksikler giderilmiştir. Bu kapsamlı sürecin tamamlanması yaklaşık 8 ay sürmüştür.

İşletmenin 2019–2021 yıllarına ait elektrik, buhar, doğal gaz ve üretim verileri toplanmış olup enerji hesaplamalarında bu üç yılın ortalama değerleri kullanılmıştır. Emisyon değerleri ise veri toplama dönemini de kapsayan en güncel resmi emisyon raporundan alınmıştır. Bu rapordaki veriler doğrultusunda işletmedeki tüm emisyon kaynakları ve kütsel kirletici debileri belirlenmiş; CO, SO₂, NO_x, toz, VOC ve benzen emisyonlarına ilişkin veriler analiz edilmiştir.

İşletmenin elektrik için birim üretim başına tüketim değerleri, ilgili formül (Denklem 1) kullanılarak elde edilmiştir (Lawrence vd., 2018). Benzer şekilde, buhar ve doğal gazın spesifik tüketimleri Denklem (2) ve (3)'te verilen hesaplama yaklaşımıyla belirlenmiştir (Tamborrino vd., 2021; Kır vd., 2024). Hava emisyonlarına ilişkin birim değerler ise Denklem (4) yardımıyla hesaplanmıştır (Ozturk vd., 2020). Bu hesaplamalarda, her bir yıl için elektrik, buhar, doğal gaz tüketimi ya da CO, SO₂, NO_x, toz, VOC ve benzen gibi emisyon miktarları, o yıla ait toplam üretim miktarına oranlanmıştır. Üç yıllık dönem için yapılan bu işlemler sonucunda, her yılın ayrı ayrı hesaplanan spesifik tüketim ve emisyon değerlerinin aritmetik ortalamaları ile standart sapmaları ayrıca değerlendirilmiştir. Standart sapma değerleri, üç yıllık süreçte ortalama spesifik enerji tüketimindeki değişimi göstermektedir.



Şekil 1. Uygulanan metodoloji (Applied methodology)

$$\text{Spesifik elektrik tüketimi} \left(\frac{kWh}{kg} \text{ ürün} \right) = \quad (1)$$

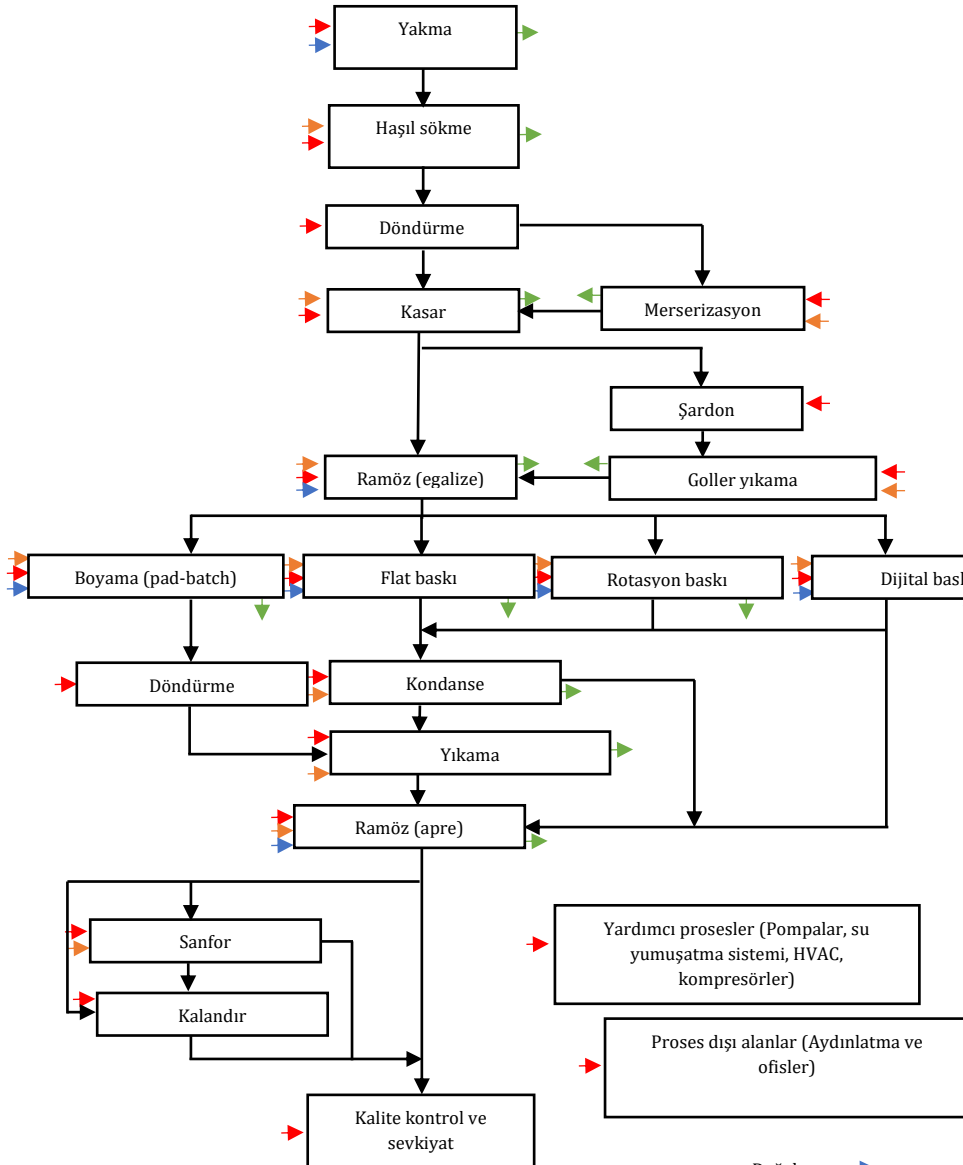
$$\frac{\text{Elektrik tüketimi (kWh/yıl)}}{\text{Yıllık üretim miktarı (kg kumaş/yıl)}}$$

$$\text{Spesifik buhar tüketimi} \left(\text{kg} \frac{\text{buhar}}{\text{kg ürün}} \right) = \frac{\text{Buhar tüketimi (kg buhar/yıl)}}{\text{Yıllık üretim miktarı (kg kumaş/yıl)}} \quad (2)$$

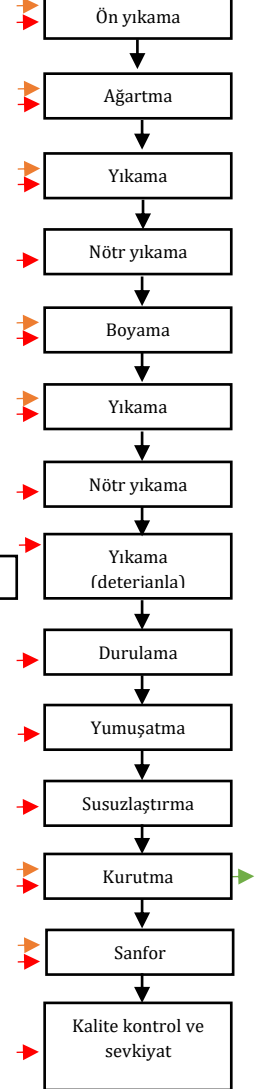
$$\text{Spesifik doğal gaz tüketimi} \left(\frac{\text{Sm}^3}{\text{kg}} \text{ ürün} \right) = \frac{\text{Doğal gaz tüketimi (Sm}^3\text{/yıl)}}{\text{Yıllık üretim miktarı (kg kumaş/yıl)}} \quad (3)$$

$$\text{Spesifik emisyon değeri} \left(\frac{\text{gr}}{\text{kg}} \text{ ürün} \right) = \frac{\text{Emisyon miktarı (kg/yıl)}}{\text{Yıllık üretim miktarı (kg kumaş/yıl)}} \quad (4)$$

Dokuma kumaş proses akışları



Örgü kumaş proses akışları



Doğal gaz → Elektrik →
Buhar → Hava emisyonu →

Şekil 2. İncelenen tekstil işletmesinin proses akışları (Process flows of the studied textile enterprise)

2.4. Potansiyel Azaltım Oranlarının Hesaplanması (Calculation of Potential Reduction Ratios)

İşletmede hesaplanan ortalama spesifik elektrik, buhar, doğal gaz ve toplam enerji tüketim değerleri; IPPC Tekstil BREF dokümanında sunulan referans bilgiler ve literatürde raporlanan benzer ölçek ve nitelikteki tekstil tesislerinin verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, işletmenin mevcut durumuna göre enerji kullanımında ne ölçüde iyileşme sağlanabileceğini belirlemek amacıyla elektrik, buhar ve doğal gaz tüketimlerine ilişkin olası azaltım oranları Denklem (5) üzerinden hesaplanmıştır (Ozturk vd., 2016; Kır vd., 2024). Hesaplanan potansiyel azaltım oranları, işletmenin enerji verimliliği fırsatları hakkında fikir vermesi açısından önemlidir. Ayrıca, işletmenin enerji verimliliği performansına ilişkin ön değerlendirme niteliği taşımaktadır.

$$\text{Potansiyel azaltım oranı (\%)} = \left(\frac{\text{Spesifik enerji tüketim değerleri}}{\text{Spesifik referans enerji değerleri}} - 1 \right) \times 100 \quad (5)$$

2.5. Öncelikli Enerji Verimliliği Tekniklerinin Belirlenmesi (Determination of Top-Priority Energy Efficiency Techniques)

Çalışma kapsamında, elde edilen bulgular ve gözlemler doğrultusunda 45 enerji verimliliği tekniğinden oluşan bir liste hazırlanmıştır (Ek A). Önerilen enerji verimliliği tekniklerinin önceliklendirilmesi, sistematik ve analitik bir karar verme yöntemi olan COPRAS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. COPRAS yönteminin bu çalışmada tercih edilmesinin başlıca nedenleri şunlardır: (i) karmaşık algoritmalar veya matematiksel modeller gerektirmemesi, (ii) kullanım kolaylığı, (iii) sonuçların yorumlanmasının basit olması, (iv) sanayinin çeşitli alanlarında yaygın uygulamalara sahip olması ve (v) alternatifleri öncelik sırasına koyabilme özelliği (Ozbek, 2017; Simsek vd., 2022). Karar verme sürecinde tekniklerin değerlendirilmesi için teknik uygulanabilirlik, ekonomik tasarruf potansiyeli, enerji verimliliği katkısı, çevresel faydalar ve işletme önceliği gibi kriterler kullanılmıştır. Bu kriterler, benzer önceliklendirme çalışmalarında kullanılan kriterler ile IPPC BREF Dokümanlarındaki MET tanımlarından yararlanılarak belirlenmiştir. İşletme önceliği kriteri ise, işletmenin karar verme sürecine aktif katılımını sağlamak, yönetim ve teknik personelin görüşlerini dahil etmek ve daha uygulanabilir sonuçlar elde etmek amacıyla eklenmiştir. Böylece işletmenin geleceğe yönelik hedefleri, mevcut ve gelecekteki yatırımları, öncelikli sorunlara yönelik çözüm ihtiyacı ile bütçe ve yatırım planları da değerlendirme sürecine dahil edilmiştir.

Ağırlıklandırma, öncelikli değil (1 puan), düşük öncelik (2 puan), orta öncelik (3 puan), öncelik (4 puan) ve yüksek öncelik (5 puan) şeklinde belirlenmiştir. Karar verme aşamasında kullanılacak her bir değerlendirme kriterinin ağırlık puanı; işletmede 5 kişilik yetkili personelin (yöneticiler, çalışanlar ve operatörler) görüşleri alınarak yüz yüze görüşmelerle belirlenmiştir. Katılımcı ağırlık puanlarının ağırlıklı ortalaması alınarak her kriter için nihai ağırlık puanı oluşturulmuştur. Son aşamada, belirlenen enerji verimliliği teknikleri COPRAS yöntemi aracılığıyla sıralanmış ve değerlendirme ölçütleri dikkate alınarak tesis için en uygun ve öncelikli teknikler ortaya konulmuştur.

2.5.1. COPRAS yöntemi (COPRAS model)

COPRAS yöntemi, karar seçeneklerinin önem düzeyini ve önceliğini, seçeneklerin birbirine göre doğrudan ve oransal bağımlılığı temelinde belirleyen bir ÇÖKV yaklaşımıdır (Zavadskas vd., 2004). Yöntemde alternatiflerin göreceli önemi, değerlendirme kriterlerinin pozitif (maksimizasyon) veya negatif (minimizasyon) yönlü olmasına bağlı olarak hesaplanmaktadır (Mulliner vd., 2013). Bu kapsamda maksimizasyon yönlü ölçütler için daha yüksek değerlerin tercih edilmesi, minimizasyon yönlü ölçütler için ise düşük değerlerin daha uygun kabul edilmesi esas alınmaktadır (Zavadskas vd., 2004; Kaklauskas vd., 2005; Ozbek, 2017). COPRAS, hem nitel hem de nicel kriterleri birlikte değerlendirebilmesi nedeniyle çok kriterli karar verme süreçlerine oldukça elverişli bir yöntemdir. Ölçütlerin yönlerini dikkate alarak alternatifleri bütüncül bir yaklaşımla sıralaması, yöntemi özellikle karşılaştırmalı performans analizlerinde avantajlı hale getirmektedir (Kaklauskas vd., 2005). Literatürde COPRAS yönteminin; çevre yönetimi, altyapı planlaması, ekonomik değerlendirme, sağlık hizmetleri, eğitim, yatırım kararları ve sosyal politika analizleri gibi pek çok alanda uygulandığı görülmektedir (Zavadskas ve Antucheviciene,

2007; Zolfani vd., 2017). Bu çalışmalar, COPRAS'ın farklı sektörlerde karşılaşılan çok boyutlu ve karmaşık karar problemlerinde etkili bir analiz aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

(a) COPRAS yönteminin ilk aşamasında karar matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisi (X), karar vericiler tarafından sürecin başlangıcında tanımlanan alternatifler ve değerlendirme ölçütlerinden meydana gelmektedir. Bu karar matrisi kapsamında satırlar, önceliklendirilmesi gereken karar seçeneklerini; sütunlar ise değerlendirmede kullanılan ölçütleri temsil etmektedir. Genel formu Denklem (6)'da verilen karar matrisinde, i satırı i. alternatifi (i = 1, 2, ..., m), j sütunu ise j. ölçütü (j = 1, 2, ..., n) göstermektedir.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(b) Karar matrisinin standartlaştırılması: Bu aşamada karar matrisi, Denklem (7) kullanılarak normalize edilmiştir. Normalize etme işlemi sırasında kullanılan q_i değerleri, ilgili ölçütlerin ağırlıklarını ifade etmektedir. COPRAS yönteminde ağırlıkların belirlenmesine yönelik yerleşik bir prosedür bulunmadığından, ölçüt ağırlıkları uygulayıcı tarafından AHP, Analitik Ağ Süreci (AAS), ENTROPİ yöntemi veya basit puanlama yaklaşımı gibi farklı teknikler aracılığıyla belirlenmiştir.

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} q_j}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (7)$$

Her bir ölçütün x_i 'ye göre ağırlıklandırılması sonucu elde edilen d_{ij} değerlerinin toplamı, o ölçüte karşılık gelen ağırlık değeri q_i ile ilişkilendirilmektedir. Bu ilişki, Denklem (8) ile ifade edilmektedir.

$$q_j = \sum_{i=1}^m d_{ij}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (8)$$

(c) Ağırlıklı normalize indekslerin hesaplanması Denklem (9): Normalize edilmiş karar matrisinin ağırlıklandırılmasının ardından, minimizasyon yönlü ölçütler için elde edilen S_{-i} değerlerinin küçük olması, alternatifin amaca daha yüksek düzeyde hizmet ettiğini göstermektedir. Buna karşılık, maksimizasyon yönlü ölçütler için hesaplanan S_{+i} değerlerinin büyük olması, alternatifin amaca ulaşmada daha avantajlı olduğunu ifade etmektedir.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n d_{+ij}; \quad S_{-i} = \sum_{j=1}^n d_{-ij}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

(d) Alternatiflerin göreceli önemi, birbirlerine göre önem düzeylerini gösteren değerleri kullanılarak ve Denklem (10) aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m S_{-min}}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (10)$$

Elde edilen Q_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanmış olup, Q_i 'nin yüksek olması alternatifin göreceli öneminin arttığını göstermektedir.

(e) Alternatiflerin fayda derecesinin hesaplanması: Son aşamada her bir alternatifin fayda derecesi, Denklem (11) aracılığıyla belirlenmiştir. Fayda derecesi 100 olan alternatif, en yüksek performansa sahip seçenek olarak belirlenmiş; diğer alternatifler ise bu en iyi seçenekle karşılaştırmalı biçimde derecelendirilmiştir.

$$N_i = (Q_i / Q_{max}) \times 100\% \quad (11)$$

2.5.2. Duyarlılık analizi aşamaları (Sensitivity analysis stages)

Kriter ağırlıklarında yapılacak küçük değişiklikler bile alternatiflerin nihai sıralamasını etkileyebilmektedir. Ağırlıklar, karar vericilerin yargılarına dayalı öznel değerler olduğundan, kriter puanları veya ağırlıklarındaki olası değişimlerin sıralama sonuçlarına etkisi incelenmelidir (Srdjevic vd., 2012). Bu nedenle modelin güvenilirliğini değerlendirmek ve elde edilen sonuçların istikrarını ortaya koymak amacıyla duyarlılık analizi uygulanmıştır. Bu kapsamda, kriterlerden biri olan w_1 ağırlığı üzerinde belirli bir değişikliğin yapıldığı varsayılmıştır. Ağırlıkların toplamının 1 olması gerektiğinden, w_1 üzerindeki bu değişim diğer kriter ağırlıklarının da yeniden düzenlenmesini zorunlu kılmaktadır.

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1 \quad (12)$$

$p_1 = w_2/w_3$, $p_2 = w_4/w_3$, $p_3 = w_5/w_3$ ve $p_4 = w_6/w_3$ biçiminde tanımlandığında, bu oranların Denklem (12)'de yerine yazılmasıyla aşağıdaki ifade Denklem (13) elde edilmektedir:

$$w_1 + p_1 w_3 + w_3 + p_2 w_3 + p_3 w_3 + p_4 w_3 = 1 \quad (13)$$

ve w_3 'ün, w_1 'in bir fonksiyonu olarak ifadesi

$$w_3 = \frac{1 - w_1}{1 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4} \quad (14)$$

Bu sonuç, tüm diğer kriter ağırlıklarının belirleyici tek değişken olarak w_1 'e bağlı biçimde ifade edilebildiğini göstermektedir.

$$\begin{aligned} w_2 &= \frac{p_1(1-w_1)}{1+p_1+p_2+p_3+p_4}, w_4 = \frac{p_2(1-w_1)}{1+p_1+p_2+p_3+p_4} \\ w_5 &= \frac{p_3(1-w_1)}{1+p_1+p_2+p_3+p_4}, w_6 = \frac{p_4(1-w_1)}{1+p_1+p_2+p_3+p_4} \end{aligned} \quad (15)$$

w_1 değerinin belirlenmesinin ardından, kalan tüm kriterlere ait ağırlıklar Denklem (14) ve Denklem (15) aracılığıyla hesaplanmaktadır.

2.6. Enerji Tüketimi ve Emisyonlardaki Azalma Potansiyelinin Belirlenmesi (Determining the Reduction Potential in Energy Consumption and Emissions)

Tesis için öncelikli olarak belirlenen enerji verimliliği tekniklerinin uygulanması halinde, elektrik, buhar, doğal gaz tüketimleri ile hava emisyonlarında ortaya çıkması beklenen azaltım oranları ilgili hesaplama adımlarıyla belirlenmiştir. Her bir öncelikli enerji verimliliği tekniği için tedarikçi firmalardan fiyat teklifleri alınmıştır. Bu doğrultuda başlangıç yatırım maliyetleri belirlenmiş ve hesaplanan enerji tasarruflarının parasal karşılıkları tespit edilmiştir. Birim elektrik maliyeti 0,25 USD/kWh, birim buhar maliyeti 17,85 USD/ton buhar ve birim doğal gaz maliyeti 0,87 USD/Sm³ olarak kabul edilmiştir. Her bir öncelikli enerji verimliliği tekniği için geri ödeme süreleri Denklem (16) kullanılarak hesaplanmıştır (Oyeleran vd., 2016).

$$\text{Geri ödeme süresi (ay)} = \frac{\text{Toplam ilk yatırım maliyeti}}{\text{Toplam yıllık tasarruf}} \times 12 \quad (16)$$

2.6.1. Ekonomik analiz (Economic analysis)

Geleceğe yönelik nakit giriş ve çıkışlarının bugünkü değer üzerinden değerlendirilmesiyle elde edilen finansal gösterge literatürde "net bugünkü değer (NBD)" olarak adlandırılmaktadır. Genellikle finansal varlıkların veya yatırım projelerinin değerini değerlendirmek için kullanılmaktadır. NBD'nin hesaplanmasında, gelecekteki nakit akımlarını bugünkü değerine indirmek için belirli bir iskonto oranı kullanılmaktadır (Cınar, 2020). MET seçeneklerini değerlendirirken, gerekli yatırım miktarını belirlemek amacıyla NBD yaklaşımından yararlanılmıştır (Çakır vd., 2020). Diğer çözümlerin uygunluğu ise iç kârlılık oranı (İKO) kullanılarak değerlendirilmiştir. İKO, alternatif seçeneklerden elde edilen tüm nakit akımlarının NBD'nin sıfır olduğu faiz oranı olarak tanımlanmaktadır (İbrahim vd., 2017). Öncelikli her bir enerji verimliliği tekniği için NBD değerleri Denklem (17) kullanılarak hesaplanmıştır (Balkan vd., 2023). İKO değerleri ise her bir öncelikli enerji verimliliği tekniği için Denklem (18) kullanılarak hesaplanmıştır (Erkan vd., 2020).

$$\text{Net bugünkü değer} = -(\text{Yatırım maliyeti}) + \sum_{t=0}^n \frac{\text{Net gelir}_t}{(1+r)^t} \quad (17)$$

t = baz yıldaki maliyet, n = proje ömrü, r = iskonto (faiz) oranı

$$İç\ karlılık\ oranı = I_1 + \frac{PV(I_2 - I_1)}{PV + |NV|} \quad (18)$$

PV: Sıfıra yakın pozitif bir NBD ifade eder, NV: Sıfıra yakın bir NBD ifade eder, I_1 : PV'nin elde edildiği iskonto oranı, I_2 : I_1 'den daha büyük olan ve NV'nin elde edildiği ikinci iskonto oranıdır.

Tüm tesislerde yatırımların ilk 5 yıl (2021–2025) içerisinde eşit miktarlarda yapılması gerekmektedir. Mevcut bilgilere göre, önlemlerin uygulanması için öngörülen asgari süre ortalama 5 yıldır. Uygulama yıllarında (2021–2025), önlemlerle sağlanan tasarruf oranları; 2021 ve 2022 için toplam tasarrufun %10'u, 2023 ve 2024 için toplam tasarrufun %40'ı, 2025 için toplam tasarrufun %60'ı ve 2026 yılından itibaren %100 olarak değerlendirilebilir. 2021 yılı için iskonto (faiz) oranı %20'dir (TCMB, 2021).

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Elektrik, buhar ve doğal gaz tüketimi dâhil olmak üzere enerji tüketim detayları; işletme düzeyi, üretim prosesleri, yardımcı prosesler ve proses dışı alanlar bazında aşağıdaki alt başlıklar altında sunulmaktadır.

3.1. Enerji Tüketimi ve Dağılımları (Energy Consumption and Distributions)

İşletmenin elektrik ihtiyacı yakın bir enerji santralinden sağlanmakta olup yıllık ortalama tüketim 23.053.970 kWh'dır. İşletmede tüketimin yaklaşık %65'i üretim süreçlerinde, %14'ü yardımcı ünitelerde ve %6'sı proses dışı alanlarda gerçekleşmektedir. Enerji dengesi analizine göre trafolar ve elektrik motorlarında %15 düzeyinde kayıp olduğu belirlenmiş olup bu kayıpların azaltılması mümkün olmaktadır. Isıl enerji ihtiyacı buhar ve doğal gazdan karşılanmakta, yıllık buhar tüketimi 276.348 ton olup bunun %91'i dokuma, %9'u örgü kumaş proseslerinde gerçekleşmektedir. Doğal gaz tüketimi 3.004.909 $\text{Sm}^3/\text{yıl}$ olup tüketimin %49'u dokuma ön terbiye, %33'ü baskı-boyama ve %18'i dokuma apre süreçlerine ait olmaktadır. Üç yıllık verilere göre ortalama spesifik tüketimler elektrik için $1,28 \pm 0,06$ kWh/kg ürün, buhar için $15 \pm 0,7$ kg/kg ürün, doğal gaz için $0,16 \pm 0,02$ Sm^3/kg ürün ve toplam enerji için $69 \pm 4,3$ MJ/kg ürün olarak hesaplanmıştır. Spesifik toplam enerji tüketimi dokuma kumaşlarda $67 \pm 1,8$ MJ/kg, örgü kumaşlarda ise 106 ± 35 MJ/kg'dır. Örgü kumaşlardaki bu yüksek standart sapma değeri; tesiste işlenen örgü kumaşların iplik yapısı ve gramajlarındaki çeşitlilikten kaynaklanmaktadır. Ayrıca, örgü kumaşların HT boyama makinelerinde farklı parti (batch) büyüklüklerinde ve değişken banyo oranlarında işlenmesi, kg ürün başına düşen buhar ve elektrik tüketiminde geniş bir varyasyona neden olmaktadır.

3.1.1. Dokuma kumaş ön terbiye prosesleri (Woven fabric pretreatment processes)

Dokuma kumaş ön terbiye prosesleri haşıl sökme, meriserizasyon, ağartma, lisa, hav kaldırma ve kontinü yıkamadan oluşmakta olup işletmenin toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. En fazla elektrik tüketilen prosesler ramöz (%10,7), ağartma (%3,7) ve soğuk ağartmada yapılan döndürme (%3,1) işlemidir. Döndürme dolaplarının tek bir motor üzerinden çalıştırılması ve motorlarda hız sürücülerinin kullanılması elektrik tüketimini azaltabilmektedir. Spesifik elektrik tüketimi haşıl sökmede $1,6 \pm 0,96$ kWh/kg ürün ile en yüksek seviyededir. Diğer ön terbiye işlemlerinde elektrik tüketimi, kg ürün başına 0,2 kWh'nin altındadır. Elektrik, buhar ve doğal gaz kullanımının dağılımları ve spesifik tüketim değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Dokuma kumaş ön terbiye proseslerinde spesifik enerji tüketimi ve dağılımı (Specific energy consumption and distribution in woven fabric pretreatment processes)

Prosesler	Elektrik tüketimi		Buhar tüketimi		Doğal gaz tüketimi	
	Dağılım (%)	Ortalama spesifik elektrik tüketimi (kWh/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik buhar tüketimi (kg buhar/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik doğal gaz tüketimi (Sm^3/kg ürün)
Haşıl sökme/kasar (soğuk)	1,5 $\pm$ 0,25 ^a	1,6 $\pm$ 0,9	0,6 $\pm$ 0,08	0,1 $\pm$ 0,02	23 $\pm$ 1,8	0,04 $\pm$ 0,01
Döndürmeler	3,1 $\pm$ 0,02	0,1 $\pm$ 0,01	- ^b	-	-	-
Merserizasyon	1 $\pm$ 0,25	0,1 $\pm$ 0,01	7 $\pm$ 0,4	6,7 $\pm$ 0,2	-	-
Kasar (sıcak)	3,7 $\pm$ 1	0,09 $\pm$ 0,02	24 $\pm$ 0,9	8 $\pm$ 0,3	-	-
Ram (emilsiyon)	0,3 $\pm$ 0,16	0,16 $\pm$ 0,02	0,14 $\pm$ 0,15	0,83 $\pm$ 0,5	0,91 $\pm$ 0,6	0,07 $\pm$ 0,03
Lisa	0,21 $\pm$ 0,21	0,04 $\pm$ 0,01	-	-	-	-
Şardon	2,2 $\pm$ 0,84	0,16 $\pm$ 0,2	-	-	-	-
Kontinü yıkama	0,1 $\pm$ 0,05	0,14 $\pm$ 0,02	1,2 $\pm$ 0,6	16,7 $\pm$ 3	-	-
Ram (egalize)	10,7 $\pm$ 0,6	0,16 $\pm$ 0,01	7,4 $\pm$ 1,07	1,33 $\pm$ 0,2	25 $\pm$ 3	0,05 $\pm$ 0,01

^a Standart sapma. ^b Tüketim yoktur.

Ön terbiye prosesleri, işletmenin toplam buhar tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Buhar özellikle haşıl sökme, merserizasyon, ağartma ve kontinü yıkamada kullanılmaktadır. Spesifik buhar tüketimleri sıcak ağartmada $8\pm0,3$ kg/kg, merserizasyonda $6,7\pm0,2$ kg/kg ve kontinü yıkamada $16,7$ kg/kg ürün değerlerine ulaşmaktadır. Kontinü yıkamanın çok sayıda kabinden oluşması enerji kullanımını artırmaktadır. Isı kayıplarının azaltılması ve son yıkama suyunun geri kullanımıyla tasarruf sağlanabilir.

Doğal gaz tüketimi ise yalnızca yakma, emülsiyon ve dengeleme işlemlerinde görülmekte olup bu süreçlerin doğal gaz tüketimindeki payları sırasıyla %23, %1 ve %25'tir. Spesifik doğal gaz tüketimleri $0,04\pm0,01$, $0,07\pm0,03$ ve $0,05\pm0,01$ Sm³/kg ürün olarak hesaplanmıştır. Genel olarak dokuma ön terbiyede ortalama spesifik toplam enerji tüketimi $32\pm1,8$ MJ/kg'dır ve bu değerler IPPC Tekstil BREF aralıklarıyla uyumludur (EC, 2022).

3.1.2. Dokuma kumaş baskı ve boyama prosesleri (Woven fabric printing and dyeing processes)

Dokuma kumaş boyama-baskı ünitesi; pad-batch boyama, düz baskı, rotatif baskı, dijital baskı, buharlama, fikse ve sürekli yıkama proseslerinden oluşmakta olup, işletmenin toplam elektrik tüketiminin ortalama %19'unu karşılamaktadır. Elektrik, esas olarak pompa, motor ve elektronik ekipmanların çalıştırılmasında kullanılmaktadır. Rotatif baskı makineleri çok sayıda baskı silindiri, bu silindirleri hareket ettiren motorlar ve baskı pastası dozaj pompaları nedeniyle yüksek enerji tüketimine sahiptir. Dijital baskı prosesinde spesifik elektrik tüketimi en yüksek değerini göstermiş olup, $4,9\pm0,3$ kWh/kg ürün olarak ölçülmüştür. Dijital baskının tamamen elektrikle çalışması ve iklimlendirilmiş ortamlarda işletilmesi bu değeri artırmakta; kapasitenin sınırlı olması ise spesifik tüketimi yükseltmektedir. Diğer boyama-baskı proseslerinde spesifik elektrik tüketimi 1 kWh/kg ürünün oldukça altındadır. İlgili enerji tüketimi dağılımları ve spesifik değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Dokuma kumaş boyama ve baskı proseslerinde spesifik enerji tüketimi ve dağılımı (Specific energy consumption and distribution in woven fabric dyeing and printing processes)

Prosesler	Elektrik tüketimi		Buhar tüketimi		Doğal gaz tüketimi	
	Dağılım (%)	Ortalama spesifik elektrik tüketimi (kWh/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik buhar tüketimi (kg buhar/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik doğal gaz tüketimi (Sm ³ /kg ürün)
Reaktif düz boya	$0,32\pm0,02^a$	$0,3\pm0,06$	- ^b	-	-	-
Döndürme	$0,45\pm0,06$	$0,05$	-	-	-	-
Flat baskı	$5,8\pm0,9$	$1,07\pm0,03$	$1\pm0,2$	$1,5\pm0,2$	$12\pm0,5$	$0,3\pm0,02$
Rotasyon baskı	$5,6\pm0,3$	$0,29\pm0,01$	$4\pm0,6$	$2,2\pm0,2$	$13,5\pm0,5$	$0,1\pm0,01$
Ram baskı patı	$1,14\pm1,11$	$0,2\pm0,04$	$0,02\pm0,03$	$0,04\pm0,03$	$4,1\pm3$	$0,1\pm0,01$
Dijital baskı	$1\pm0,8$	$4,9\pm0,3$	$0,02\pm0,02$	-	$3,3\pm3$	$0,2\pm0,01$
Buharlama	$0,81\pm0,03$	$0,03\pm0,01$	$8,8\pm0,4$	$4,85\pm0,7$	-	-
Fikse	$0,8\pm0,01$	$0,02\pm0,01$	$4,5\pm0,03$	$1,73\pm0,06$	-	-
Kontinü yıkama	$2,6\pm0,4$	$0,3\pm0,03$	$18\pm1,4$	27 ± 3	-	-
Gravür dairesi	$0,62\pm0,03$	$0,02$	-	-	-	-

^a Standart sapma. ^b Tüketim yoktur.

Boyama-baskı prosesleri, işletmenin toplam buhar tüketiminin yaklaşık %37'sini oluşturmaktadır. Buhar; buharlı silindirlerde, buharlama ve fikse işlemlerinde, ayrıca reaktif boyama ve baskı sonrası sürekli yıkama banyolarının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Sürekli yıkama makinelerinde çok sayıda banyonun ısıtılması nedeniyle spesifik buhar tüketimi 27 ± 3 kg/kg ürün gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır. Buharlama işlemlerinde $4,85\pm0,72$ kg/kg, rotatif baskıda $2,2\pm0,2$ kg/kg ve fikse prosesinde $1,73\pm0,06$ kg/kg buhar tüketilmektedir.

Doğal gaz tüketimi çoğunlukla baskı sonrası kurutmanın gerçekleştirildiği direkt ısıtılmalı ramözlerde meydana gelmekte ve toplam doğal gaz kullanımının %33'ünü oluşturmaktadır. Bu süreçlerde spesifik doğal gaz tüketimi $0,1-0,3$ Sm³/kg ürün aralığındadır. Boyama-baskı prosesleri için ortalama spesifik toplam enerji tüketimi 30 ± 1 MJ/kg ürün olup IPPC Tekstil BREF'te verilen aralıklarla uyumludur. Bununla birlikte, enerji verimliliği açısından iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır. Sürekli yıkama makinelerinde ısı kayıplarının azaltılması, son yıkama banyolarının geri kazanımı ve ısı geri kazanım sistemlerinin uygulanması buhar tüketimini düşürebilir. Düz ve rotatif baskı makinelerinde yüksek verimli motorlar ve değişken hızlı sürücüler kullanılması elektrik tüketimini azaltabilir. Ayrıca ramözlerde kumaş neminin izlenmesi, proses hızlarının optimize edilmesi ve kumaşın daha düşük nemle ramöze verilmesi doğal gaz kullanımını azaltabilecek önemli uygulamalardır.

3.1.3. Dokuma kumaş apre prosesleri (Woven fabric finishing processes)

Dokuma kumaş apre prosesleri; ramöz (fluarda apre), sanforizasyon, kalandırlama ve kalite kontrol aşamalarından oluşmakta olup işletmenin toplam elektrik tüketiminin ortalama %16'sını karşılamaktadır. Apre kimyasalları ramöze giriş öncesinde fluarda uygulanmakta ve dokuma kumaş üretiminin neredeyse tamamının

bu süreçten geçmesi elektrik tüketimini artırmaktadır. Nihai apre proseslerinde spesifik elektrik tüketimi 0,01–0,17 kWh/kg ürün aralığında değişmektedir.

Tablo 3, apre proseslerinde enerji tüketim oranlarını ve ortalama spesifik enerji değerlerini göstermektedir. Dokuma kumaş apre işlemleri için belirlenen ortalama spesifik toplam enerji tüketimi $15 \pm 0,7$ MJ/kg'dir. İşletmenin spesifik enerji tüketimi IPPC Tekstil BREF tarafından verilen aralıklarla uyumludur ancak bu değerlerde azaltım potansiyeli bulunmaktadır (EC, 2022). Bu proseslerde buhar yalnızca buhar ramözleri ve sanforizasyonda kullanılmakta olup işletmenin toplam buhar tüketiminin yaklaşık %15'i apre proseslerinde gerçekleşmektedir. Ramöz ve sanforizasyon işlemlerinin spesifik buhar tüketimleri sırasıyla $1,97 \pm 0,1$ kg/kg ve $2 \pm 0,5$ kg/kg ürün olarak belirlenmiştir. Doğal gaz tüketimi ise yalnızca direkt ısıtmalı ramözlerde ortaya çıkmakta ve bu ramözlerin yüksek üretim payı nedeniyle toplam doğal gaz tüketiminin %18'i bu proseslerde gerçekleşmektedir. Ramöz makinelerinde hesaplanan ortalama spesifik doğal gaz tüketimi $0,03 \pm 0,01$ Sm³/kg ürün'dür. Apre proseslerinde enerji kullanımı referans aralıkları içinde olsa da iyileştirme olanakları mevcuttur.

Tablo 3. Dokuma kumaş apre proseslerinde spesifik enerji tüketimi ve dağılımı (Specific energy consumption and distribution in woven fabric finishing processes)

Prosesler	Elektrik tüketimi		Buhar tüketimi		Doğal gaz tüketimi	
	Dağılım (%)	Ortalama spesifik elektrik tüketimi (kWh/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik buhar tüketimi (kg buhar/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik doğal gaz tüketimi (Sm ³ /kg ürün)
Ram apre	12±1 ^a	0,17±0,01	12±0,5	1,97±0,12	18±3	0,03±0,01
Sanfor	0,07±0,01	0,01	2±0,3	2,03±0,5	- ^b	-
Kalandır	2,5±0,2	0,05±0,01	-	-	-	-
Kalite kontrol	1,5±0,04	0,02	-	-	-	-

^a Standart sapma. ^b Tüketim yoktur.

3.1.4. Örgü kumaş ön terbiye ve boyama prosesleri (Knitted fabric pretreatment and dyeing processes)

İşletmede örgü kumaşların ön terbiye, boyama ve durulama-yumuşatma işlemleri HT boyama makinelerinde yürütülmektedir. Nihai apre işlemleri ise farklı parti proseslerinde gerçekleştirilmektedir. Tablo 4'te görüldüğü üzere, örgü kumaşların ön terbiye aşamaları toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %1,7'sini oluştururken, boyama ve reaktif yıkama adımları sırasıyla %0,4 ve %0,1 civarındadır. Spesifik elektrik tüketimi ön terbiye proseslerinde 0,2 kWh/kg, boyama proseslerinde 0,07 kWh/kg ve reaktif yıkamada 0,06 kWh/kg ürün düzeyindedir. Örgü kumaşların ön terbiye ve boyama işlemlerinde banyoların ısıtılması için gerekli ısı enerji buhar ile sağlanmakta olup, buhar tüketimi toplam tüketimin yaklaşık %3'üne denk gelmektedir. Su tüketimi ve banyo sayısına bağlı olarak, ön terbiye işlemlerinde buharın yaklaşık %1,3'ü, reaktif yıkamada ise %1,2'si kullanılmaktadır (Tablo 4). Reaktif yıkamada spesifik buhar tüketimi, taşma (overflow) tipi yıkamalar ve artan banyo sayısı nedeniyle diğer proseslere kıyasla daha yüksektir. Boyama ve ön terbiye işlemlerinde ortalama spesifik buhar tüketimleri sırasıyla 1,5 kg/kg ve 2,5 kg/kg ürün olarak gözlemlenmiştir (Tablo 4). IPPC Tekstil BREF verilerine göre bu değerler kabul edilebilir sınırlar içerisindedir (EC, 2003). Örgü kumaş ön terbiye proseslerinde ortalama spesifik toplam enerji tüketimi $14 \pm 0,2$ MJ/kg ürün, boyama proseslerinde ise 15 ± 3 MJ/kg ürün olarak bulunmuştur. Örgü kumaş ön terbiye ve boyama adımlarına ilişkin enerji tüketim dağılımları ve spesifik tüketim değerleri Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Örgü kumaş ön terbiye ve boyama proseslerinde spesifik enerji tüketimi ve dağılımı (Specific energy consumption and distribution in knitted fabric pretreatment and dyeing processes)

Prosesler	Elektrik tüketimi		Buhar tüketimi		Doğal gaz tüketimi	
	Dağılım (%)	Ortalama spesifik elektrik tüketimi (kWh/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik buhar tüketimi (kg buhar/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik doğal gaz tüketimi (Sm ³ /kg ürün)
Modal örgü kumaş ön terbiye	0,2±0,03 ^a	0,2±0,01	0,22±0,03	2,8±0,23	- ^b	-
Pamuklu örgü kumaş ön terbiye	1±0,12	0,2±0,01	1,1±0,13	2,5±0,03	-	-
Örgü kumaş boyama	0,4±0,04	0,07±0,01	0,6±0,08	1,5±0,3	-	-
Reaktif yıkama	0,1±0,01	0,06±0,02	1,2±0,15	8,7±2,9	-	-

^a Standart sapma. ^b Tüketim yoktur.

3.1.5. Örgü kumaş apre prosesleri (Knitted fabric finishing processes)

Nihai apre işlemleri kapsamında, örgü kumaşların elektrik tüketimi toplamda %5 civarındadır; bu tüketim büyük ölçüde motor ve elektronik sistemlerin çalıştırılmasına yöneliktir. Tüp kurutma adımı, toplam elektrik tüketiminin yaklaşık %3,2'sini oluştururken, balon sıkma, tüp kesme, düzleştirme ve sanforizasyon gibi diğer işlemler %1'in altında paya sahiptir (Tablo 5). Tüp kesme, tüp kurutma ve düzleştirme proseslerinde spesifik elektrik tüketimi

0,4±0,03 kWh/kg ürün olarak ölçülmüş, diğer nihai apre adımlarında ise bu değer <0,1 kWh/kg ürün düzeyindedir. Düzleştirme-kurutma işlemi toplam buhar tüketiminin yaklaşık %4,1'ini oluştururken, diğer ön terbiye proseslerinin toplam payı %2'dir. Nihai apre adımlarında doğal gaz kullanılmamaktadır ve bu işlemler için hesaplanan ortalama spesifik toplam enerji tüketimi 30±2 MJ/kg ürün olarak tespit edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Örgü kumaş apre proseslerinde spesifik enerji tüketimi ve dağılımı (Specific energy consumption and distribution in knitted fabric finishing processes)

Prosesler	Elektirik tüketimi		Buhar tüketimi		Doğal gaz tüketimi	
	Dağılım (%)	Ortalama spesifik elektrik tüketimi (kWh/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik buhar tüketimi (kg buhar/kg ürün)	Dağılım (%)	Ortalama spesifik doğal gaz tüketimi (Sm ³ /kg ürün)
Balon sıkma	0,02±0,002 ^a	<0,01	- ^b	-	-	-
Tüp kesme	0,3±0,06	0,06±0,01	-	-	-	-
Tüp kurutma	3,2±0,58	0,4±0,03	4,13±0,5	6,5±0,4	-	-
Egalize-Kurutma	0,74±0,24	0,4±0,03	1±0,4	6,5±0,4	-	-
Açık en sanfor	0,72±0,25	0,4±0,02	1±0,4	6,5±0,4	-	-
Tüp sanfor	0,02	<0,01	-	-	-	-

^a Standart sapma. ^b Tüketim yoktur.

3.1.6. Yardımcı prosesler ve proses dışı alanlar (Auxiliary processes and non-process areas)

İşletmenin yardımcı prosesleri ve proses dışı alanlardaki enerji tüketimi de incelenmiştir (Tablo 6). İşletmenin toplam enerji tüketiminde yardımcı proseslerin payı ortalama %14, proses dışı alanların payı %6'dır. Su pompaları, su yumuşatma sistemi (katyonik iyon değiştiriciler), iklimlendirme ve nemlendirme sistemi ile kompresör ünitesinin toplam elektrik tüketimindeki payları sırasıyla %2,1, %2,8, %5,3 ve %3,5'tir.

Tablo 6. Yardımcı prosesler ve proses dışı alanlarda spesifik enerji tüketimi ve dağılımı (Specific energy consumption and distribution in auxiliary processes and non-process areas)

	Prosesler	Elektirik tüketimi	
		Dağılım (%)	^a Ortalama spesifik elektrik tüketimi (kWh/kg ürün)
Yardımcı prosesler	Hidroforlar	2,1±0,01 ^b	0,03±0,01
	Su yumuşatma sistemi	2,8±0,01	0,04±0,01
	Klima santrali ve nemlendirme	5,3±0,01	0,07±0,01
	Kompresörler (basınçlı hava)	3,5±0,01	0,05±0,01
Proses dışı alanlar	Aydınlatma	4,2±0,01	0,05±0,01
	Bürolar	1,8±0,01	0,02±0,01

* Yardımcı proseslerde ve proses dışı alanlarda buhar ve doğal gaz tüketimleri bulunmamaktadır. ^a Spesifik elektrik tüketimleri, fabrikanın ortalama toplam üretim değerlerine göre hesaplanmıştır. ^b Standart sapma.

Yardımcı proseslerde elektrik genellikle su pompaları ve kompresörlerin çalışmasında kullanılmaktadır. Bu proseslerin ortalama spesifik elektrik tüketimi 0,03–0,07±0,01 kWh/kg aralığında değişmektedir. Su pompaları ve su yumuşatma sistemlerinde elektrik ihtiyacının azaltılması, proses suyunun azaltılması ve yumuşatma sisteminin iyileştirilmesiyle mümkün olabilmektedir. Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) sistemlerinde elektrik tüketimini azaltmak için, tesis içi nem ve sıcaklık ölçüm cihazlarının izlenmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Kompresör sisteminde ise, bilgisayar destekli izleme ve kontrol sistemi kurulması, ihtiyaç olmadığında otomatik devre dışı bırakılması ve kompresörlerin ihtiyaçlara göre devreye alınmasıyla elektrik tüketimi azaltılabilir.

İç aydınlatma ve ofis alanlarında da elektrik tüketimi mevcuttur. İşletmede iç aydınlatma ve ofis elektrik tüketimi toplam elektrik tüketiminin sırasıyla %4,2 ve %1,8'ini oluşturmaktadır. Özellikle iç aydınlatmada kullanılan elektrik miktarı, bazı üretim proseslerindeki tüketimin üzerinde olabilmektedir. İşletmede kullanılan aydınlatma sistemi oldukça eski olup, bazı alanlarda floresan lambalar ve projektörler kullanılmaktadır. İç aydınlatma ihtiyacının belirlenmesi ve LED gibi daha verimli aydınlatma sistemlerinin kullanılması, elektrik tüketimini önemli ölçüde azaltılabilir.

3.2. Hava Emisyonları (Air Emissions)

Hava emisyonlarına ilişkin veriler, işletmenin mevcut resmi emisyon raporundan elde edilmiştir. Tesis içindeki emisyonların çoğunluğu, doğal gaz ve buhar kullanılan proseslerden kaynaklanmaktadır. Raporda, işletmede toplam 101 emisyon kaynağı tespit edilmiştir. Bu kaynaklar, baskı ünitesinde gerçekleşen yıkama, merserizasyon, ağartma, yakma, fikse ve buharlama adımlarının yanı sıra kurutma ve nihai apre işlemlerini kapsamaktadır. İşletmenin buhar ihtiyacı harici bir enerji tesisinden karşılandığından, sahada buhar kazanlarından kaynaklı herhangi bir emisyon gözlemlenmemektedir. En yaygın emisyon türleri CO, NO_x, SO₂, toz, VOC ve benzendir. Büyük

ölçekli baskı bölümü özellikle VOC akış hızını artırmaktadır. Proses bazında hesaplanan ortalama spesifik hava emisyonları Tablo 7’de verilmiştir. Buna göre, işletmede ortalama spesifik CO emisyonu 0,6 g/kg ürün, SO₂ emisyonu 1,2·10⁻³ g/kg ürün, NO emisyonu 0,07 g/kg ürün, NO_x emisyonu 0,1 g/kg ürün, toz 0,12 g/kg ürün, VOC 0,13 g/kg ürün ve benzen 9·10⁻⁵ g/kg ürün olarak bulunmuştur. İşletmeden atmosfere salınan emisyonlar yasal sınırların altında kalmaktadır. Bununla birlikte, işletmede buhar ve doğal gaz kullanımının azaltılmasıyla hava emisyonlarında önemli düşüşler sağlanabilir.

Tablo 7. İncelenen işletmede spesifik hava emisyonu değerleri (Specific air emissions values in the studied enterprise)

Prosesler	Spesifik hava emisyonları (g/kg ürün)						Benzen
	CO	SO ₂	NO	NO _x	Toz	VOC	
Yıkamalar (Goller)	- ^a	-	-	-	12.10 ⁻³	-	-
Merserizasyon	-	-	-	-	25.10 ⁻⁴	-	-
Kasar	-	-	-	-	8.10 ⁻³	5.10 ⁻³	-
Yakma	2.10 ⁻²	4.10 ⁻⁵	-	-	6.10 ⁻³	-	-
Rotasyon baskı-Fikse	2.10 ⁻¹	-	4.10 ⁻³	6.10 ⁻³	2.10 ⁻²	6.10 ⁻²	9.10 ⁻⁵
Flat baskı-Fikse	2.10 ⁻³	-	2.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁵	8.10 ⁻⁵	-
Buharlama	7.10 ⁻²	-	3.10 ⁻²	5.10 ⁻²	12.10 ⁻³	-	-
Ram	3.10 ⁻¹	-	3.10 ⁻²	4.10 ⁻²	5.10 ⁻²	7.10 ⁻²	-
Turbang bacası	-	-	-	-	10 ⁻³	7.10 ⁻⁴	-
Flat baskı-numune	-	-	-	-	9.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	-
Rotasyon baskı-numune	7.10 ⁻³	-	3.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	9.10 ⁻⁴	-	-
Dijital baskı	6.10 ⁻⁴	11.10 ⁻⁴	15.10 ⁻⁴	2.5.10 ⁻³	3.10 ⁻³	1.3.10 ⁻³	-
Gravür dairesi	-	-	-	-	14.10 ⁻⁴	9.10 ⁻⁴	-
Toplam	0,6	1,2.10⁻³	0,07	0,1	0,12	0,13	9.10⁻⁵

^a İlgili emisyonlar oluşmaz.

3.3. Enerji Azaltım Potansiyelinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Energy Reduction Potential)

İşletmenin ortalama spesifik elektrik, buhar, doğal gaz ve toplam enerji tüketimleri belirlenmiş ve IPPC Tekstil BREF dokümanı ile literatürde pamuk dokuma ve örgü kumaş apre-boya-baskı yapan benzer işletmelere ait verilerle karşılaştırılmıştır. BREF dokümanında enerji verilerinin alt sektör bazında sunulması, referans değerlerin elde edilmesini kolaylaştırmıştır. Karşılaştırmada ağırlıklı olarak pamuk dokuma ile örgü kumaş apre-boya yapan ve baskı bölümü bulunan işletmeler dikkate alınmıştır. Bu analiz, işletmenin enerji kullanım performansının değerlendirilmesine ve potansiyel azaltım oranlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

IPPC Tekstil BREF’e göre pamuk dokuma işletmelerinde spesifik elektrik tüketimi 0,5–1,5 kWh/kg ürün ve toplam enerji tüketimi 28–72 MJ/kg ürün aralığındadır (EC, 2003). Benzer işletmelerde elektrik tüketiminin 0,5–7,3 kWh/kg ürün (Koc ve Kaplan, 2007; Palamutcu, 2010; EC,2022), toplam enerji tüketiminin ise 11–80 MJ/kg ürün arasında değiştiği belirtilmiştir. Örgü kumaş apre-boya işletmelerinde spesifik elektrik tüketimi 1–3 kWh/kg ürün ve toplam enerji tüketimi 11–61 MJ/kg ürün; buhar tüketimi 4–14 kg buhar/kg ürün ve doğal gaz tüketimi 0,15–1,88 Sm³/kg ürün aralığındadır. İşletmenin enerji kullanım performansının referans aralıklarıyla uyumu Tablo 8 üzerinden detaylandırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre; spesifik elektrik (1,28 kWh/kg) ve toplam enerji tüketimi (69 MJ/kg ürün), IPPC BREF’in sırasıyla 0,5–3 kWh/kg ürün ve 28–72 MJ/kg ürün olarak belirlediği referans aralıklarının içerisinde yer almaktadır. Ancak bu değerlerin referans aralıklarının üst sınırına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Buna karşılık, spesifik buhar tüketiminin (15 kg buhar/kg ürün) benzer işletmeler için raporlanan 4–14 kg buhar/kg ürün aralığının bir miktar üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, işletmenin doğal gaz ve elektrik kullanımında referans değerlerle uyumlu bir performans sergilemesine rağmen, özellikle buhar tüketimi ve buna bağlı ısı enerji verimliliği noktasında önemli bir iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 8. Spesifik enerji tüketiminin benzer tekstil işletmeleriyle karşılaştırılması ve azaltım potansiyelleri (Benchmarking specific energy consumption with similar textile enterprises and reduction potentials)

Parametreler	Birim	Çalışılan Tekstil İşletmesi	IPPC Tekstil BREF	Benzer Tekstil İşletmesi	Maksimum potansiyel azalmalar (%)	Referanslar
Spesifik elektrik tüketimi	kWh/kg ürün	1,28±0,06	0,5-3	0,5-7,3	61	(EC, 2003; Koc ve Kaplan, 2007; Palamutcu, 2010; Hasanbeigi ve Price, 2012; Ozturk, 2014; Esteve-Turillas ve Guardia, 2017; Raja vd., 2019; Samantha vd., 2019; EC, 2022)
Spesifik buhar tüketimi	kg buhar/kg ürün	15±0,7	- ^a	4-14	73	(Hasanbeigi, 2010; Ozturk, 2014; WWF, 2014; Bhatia, 2017; Esteve-Turillas ve Guardia, 2017; EC, 2022)
Spesifik doğal gaz tüketimi	Sm ³ /kg ürün	0,16±0,02	-	0,15-1,88	6,3	(Ozturk, 2014; WWF, 2014)
Spesifik toplam enerji tüketimi	MJ/kg ürün	69±4,3	28-72	11-80	84	(EC, 2003; Koc ve Kaplan, 2007; Chapman, 2010; UNIDO, 2010; Kurshid vd., 2012; Uddin, 2014;

						Strand, 2015; Saxena vd., 2017; Ozturk vd., 2020; EC, 2022;)
--	--	--	--	--	--	--

^a Veri mevcut değil.

İşletmenin doğal gaz tüketimi ve toplam enerji kullanımı referans aralıklarıyla uyumlu olup, buhar tüketiminin referans değerlere kıyasla bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Hesaplamalara göre maksimum enerji tasarrufu potansiyeli; elektrik için %61, buhar için %73, doğal gaz için %6,3 ve toplam enerji için %84'tür (Tablo 8). Ancak işletme koşulları dikkate alındığında, buhar tüketiminde uygulanabilir azaltım %40, toplam enerji tüketiminde ise %28'dir. İşletme elektrik ve buharı enerji santralinden temin ettiğinden doğal gaz tüketimi oldukça düşüktür.

3.4. Öncelikli Enerji Verimliliği Tekniklerinin Belirlenmesi (Determination of Priority Energy Efficiency Techniques)

Toplam 45 potansiyel enerji verimliliği tekniği oluşturulmuştur (Ek A). Teknikler; işletmedeki enerji analizleri, saha incelemeleri, yüz yüze görüşmeler, IPPC Tekstil BREF ve literatür kaynakları kullanılarak belirlenmiştir. Önceliklendirme için COPRAS modeli uygulanmıştır. İlk olarak belirlenen kriterler potansiyel azaltma oranı (K1), çevresel fayda (K2), yan etkiler (K3), uygulanabilirlik (K4), ekonomik tasarruf ve fayda (K5), işletmenin tercih önceliği (K6) ağırlıklandırılmıştır (Tablo 9). Ardından teknikler kriterlere göre ağırlıklandırılarak işletmeye en uygun teknikler belirlenmiştir (Tablo 10). Seçilen tekniklerin enerji/emisyon azaltım oranları ve geri ödeme süreleri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 9. Kriter ağırlıkları (Criterion weights)

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Kriter ağırlıkları (w _i)	0,154	0,154	0,154	0,192	0,192	0,154

Tablo 10. Öncelikli enerji verimliliği tekniklerinin COPRAS yöntemi ile sıralanması (Ranking of priority energy efficiency techniques using the COPRAS method)

Öncelikli enerji verimliliği teknikleri	S _{+i}	S _{-i}	S _{min}	S _{i-Top}	S _{min} /S _i	S _{min} /S _{i-Top}	Q _i	N _i	Sıra
Ramözlerde kumaş neminin izlenmesi ve geçiş hızının optimize edilmesi	0,03	0,001	0,001	0,15	1	20,9	0,04	1	1
Ramözlerde devreye alınan havanın kontrolü	0,03	0,001			1		0,04	0,96	2
Terbiye proseslerinde proses optimizasyonu	0,03	0,001			1		0,04	0,96	3
Klima ve nemlendirme sisteminin modifikasyonu	0,03	0,002			0,5		0,03	0,88	4
İç mekan aydınlatmasının optimizasyonu	0,03	0,004			0,25		0,03	0,85	5
Enerji izleme sisteminin kurulması	0,03	0,006			0,2		0,03	0,81	6
Boru, vana ve tankların izolasyonu	0,03	0,002			0,5		0,03	0,80	7

3.4.1. Ramözlerde kumaş neminin izlenmesi ve geçiş hızının optimizasyonu (Monitoring fabric moisture and optimizing passage speed in the stenters)

Ramözlerde kumaş kuruluğu ve geçiş hızı optimize edilerek elektrik, doğal gaz ve buhar tüketimi azaltılabilir. Nem ve sıcaklık kontrol cihazları ile doğal gaz tüketiminde %22, elektrik tüketiminde %11 azalma sağlanabildiği bildirilmektedir (Hasanbeigi ve Price, 2012). İncelenen işletmede eski tip ramözlerde ayarlar manuel yapılmakta olup, bu ramözlere nem kontrol cihazı kurulması önerilmiştir. Birim fiyatlar 2.500–5.600 USD olup toplam maliyet 10.000–22.400 USD'dir. Uygulama ile doğal gaz tüketiminde %3–4,2 ve elektrik tüketiminde %1,1–1,3 azalma mümkündür; geri ödeme süresi 0,6–1,7 aydır.

3.4.2. Ramözlerde devreye alınan havanın kontrolü (Control of recirculated air in stenters)

Ramözlerde taze havanın sıcaklığı enerji tüketimini etkiler ve yanma verimliliğini azaltabilir. Borulu ısı değiştiriciler ile ısı geri kazanımı sağlanarak enerji tüketiminde %30'a kadar azalma elde edilebildiği bildirilmektedir (Hasanbeigi ve Price, 2012). İncelenen işletmede dört ramözde ısı geri kazanımı uygulanmış olup toplam yatırım maliyeti 200.000 USD'dir. Uygulamanın doğal gaz tüketimini %2,3–6,3, hava emisyonlarını %3–7 azalttığı ve geri ödeme süresinin 15–40 ay olduğu hesaplanmıştır.

3.4.3. Apre işlemlerinde proses optimizasyonu (Process optimization in finishing processes)

Ramözlerde aşırı kurutmanın ve gereksiz geçişlerin azaltılması önemli enerji tasarrufu sağlar. Proses optimizasyonu ile elektrik tüketiminde %8–12, termal enerji tüketiminde %12–32 azalma elde edilebilmektedir (Ozturk vd., 2020). İşletmede bazı mekanik presler kullanılarak ramöz geçiş hızlarının azaltılmasına yönelik optimizasyon ihtiyacı tespit edilmiştir. Uygulama ile toplam doğal gaz tüketiminde %0,5–1,5 azalma sağlanabilir; yatırım maliyeti bulunmadığından geri ödeme süresi anlık gerçekleşmektedir.

3.4.4. Nemlendirme-havalandırma sisteminin modifikasyonu (Modification of the humidification-ventilation system)

HVAC sistemlerinde hız kontrollü motor kullanımı ile elektrik tüketiminde %50, toplam elektrik tüketiminde %6–9 tasarruf sağlanabilir. İşletmede HVAC'ın toplam elektrik tüketimindeki payı %5,3'tür. Fanların hız kontrollü motorlara bağlanması ve nozulların değiştirilmesi ile elektrik tüketiminde %5–6, toplam elektrik tüketiminde %0,3–0,4 azalma sağlanabilir. Yatırım maliyeti 14.000–17.250 USD olup geri ödeme süresi 12–14 aydır.

3.4.5. İç mekân aydınlatmasının optimizasyonu (Optimization of indoor lighting)

Aydınlatma sistemlerinde LED kullanımının ve sensör uygulamalarının toplam elektrik tüketiminde %0,6–1,3 azaltım sağladığı bilinmektedir. İşletmenin 3 vardiya çalışması nedeniyle LED dönüşümü ve doğal ışık kullanımı önerilmiştir. Uygulamanın maliyeti 25.000–50.000 USD olup geri ödeme süresi 4–16 ay arasındadır.

3.4.6. Enerji izleme sisteminin kurulması (Establishment of an energy monitoring system)

Proses bazlı enerji izleme, verimsizliklerin tespiti ve azaltımların izlenmesi için gereklidir. Enerji izleme sistemleriyle enerji tüketiminde %1–5 azalma sağlanabildiği bildirilmektedir (Ozturk vd., 2020). İşletmede mevcut sistemin eksik analizör ve sayaçlarla güçlendirilmesi ve yazılımın geliştirilmesi sağlanmıştır. Yatırım maliyeti 6.500–14.000 USD olup elektrik ve ısı enerji tüketiminde %0,2–0,5 azalma elde edilmiştir. Geri ödeme süresi yaklaşık 12 aydır.

3.4.7. Boru, vana ve tankların izolasyonu (Insulation of pipes, valves and tanks)

Yetersiz izolasyon, önemli ısı kayıplara neden olur. Doğru izolasyon ile buhar kazanlarında yakıt tüketimi %6–26 ve ramözlerde enerji tüketimi %20 azaltılabilmektedir. İncelenen işletmede eksik izolasyonlu ekipmanlar tespit edilerek uygun malzeme ile izole edilmiştir. Yatırım maliyeti 10.000–12.000 USD; doğal gaz ve buhar tüketiminde %0,3–1 azalma ve 1–3 ay geri ödeme süresi hesaplanmıştır.

3.4.8. Ekonomik analiz (Economic analysis)

Her öncelikli enerji verimliliği tekniği için ekonomik analiz yapılmıştır. Her öncelikli enerji verimliliği tekniği için NBD ve IKO değerleri hesaplanmıştır. Ekonomik analiz hesaplamalarında toplam tüketim (elektrik, buhar ve doğal gaz), azalma oranı (%), birim maliyet (USD), yatırım maliyeti (USD) ve iskonto oranı (%) değerleri kullanılmıştır. Başlangıç yatırım maliyetleri ve azalma oranları aralık değerleri olarak sunulduğundan, NBD ve IKO değerleri de minimum-maksimum aralık değerleri olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan NBD ve IKO değerleri Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. Öncelikli enerji verimliliği teknikleri ve azaltım oranları (Priority energy efficiency techniques and reduction ratios)

Öncelikli enerji verimliliği teknikleri	Azaltım oranları (%)				Geri ödeme süresi (ay)	Ekonomik Analiz	
	Elektrik	Buhar	Doğal gaz	Hava emisyonları		NBD (USD)	IKO (%)
Ramözlerde kumaş neminin izlenmesi ve geçiş hızının optimize edilmesi	1,1-1,3	-a	3-4,2	3-5	0,6-1,7	401.748-542.440	633-1.847
Ramözlerde devreye alınan havanın kontrolü	-	-	2,3-6,3	3-7	15-40	-20.180-292.551	15-78
Terbiye proseslerinde proses optimizasyonu	-	-	0,5-1,5	0,5-2	Hemen	39.091-117.274	-b
Klima ve nemlendirme sisteminin modifikasyonu	0,3-0,4	-	-	-	12-14	34.459-54.945	97-163
İç mekân aydınlatmasının optimizasyonu	0,6-1,3	-	-	-	4-16	53.418-199.073	63-299
Enerji izleme sisteminin kurulması	0,2-0,5	0,2-0,5	0,2-0,5	<1	12	65.614-192.534	189-1.024

Boru, vana ve tankların izolasyonu	-	0,3-1	0,3-1	0,5-1,5	1-3	55.711-215.704	188-755
Toplam	2,2-3,5	0,5-1,5	6,3-13,5	8-16,5	<40	629.862-1.614.521	97-236

^a Veri mevcut değil. ^b Bu enerji verimliliği tekniği için yatırım/işletme ve bakım maliyeti olmadığından hesaplanmadı.

Ramözlerde devridaim havasının kontrolü için negatif bir NBD değeri söz konusudur. Bu negatif değer, en yüksek yatırım maliyetine ve en düşük azalma oranına sahip senaryodan kaynaklanmaktadır. Son aşama proses optimizasyonu için IKO değeri hesaplanamamıştır; çünkü bu enerji verimliliği tekniği için herhangi bir yatırım veya işletme/bakım maliyeti gerekmemektedir. IKO değerleri incelendiğinde, geri ödeme süresi ile IKO değerleri arasında bir ilişki olduğu görülmektedir. Eğer bir enerji verimliliği tekniğinin geri ödeme süresi uzun ise, IRR oranı düşük olmaktadır. NBD ve IKO değerlerinin pozitif olması, söz konusu tekniğin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu durumda, belirlenen öncelikli tekniklerin NBD ve IKO değerleri incelendiğinde, tüm öncelikli enerji verimliliği tekniklerinin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna varılabilir.

Aynı koşullar altında yedi öncelikli enerji verimliliği tekniğinin uygulanması da değerlendirilmiştir. Yedi öncelikli enerji verimliliği tekniği için NBD ve IKO değerleri hesaplanmıştır. Eğer bu yedi öncelikli enerji verimliliği tekniği, incelenen işletmede aynı dönemde uygulanırsa, NBD ve IKO değerleri sırasıyla 629.862–1.614.521 USD ve %97–236 olarak bulunmuştur. Belirlenen tüm öncelikli enerji verimliliği teknikleri, aynı koşullar ve aynı dönemde uygulanabilir olduklarını göstermektedir ve ekonomik olarak uygulanabilirliklerini kanıtlamaktadır.

3.4.9. Duyarlılık analizi (Sensitivity analysis)

En yüksek puan alan kriterlerin (uygulanabilirlik (K4), ekonomik tasarruf ve fayda (K5) ile işletmenin öncelik tercihi (K6)) ağırlıkları değiştirildiğinde, seçeneklerin öncelik sıralamalarında ve sıralamada değişiklikler gözlemlenebilir. Duyarlılık analizi sonucunda, sıralamanın belirli kriterlerin ağırlıklarındaki küçük değişikliklere karşı oldukça hassas olduğu durumlarda, bu ağırlıkların dikkatle gözden geçirilmesi önerilmektedir. Diğer kriterlerin ağırlıkları, seçilen kriterin değeri (bu örnekte uygulanabilirlik, ekonomik tasarruf ve fayda ile fabrikanın öncelik tercihi) 0'dan 1'e değiştirildiğinde aralarındaki oranların sabit kalacak şekilde ayarlanmaktadır (Erkut ve Tarımcılar, 1991).

Önceki bölümde elde edilen kriter ağırlıkları ($w_2=0,15$, $w_3=0,15$, $w_4=0,19$, $w_5=0,19$ ve $w_6=0,15$) için p_1+p_4 değerleri şu şekilde hesaplanmıştır: $p_1=1,00$, $p_2=1,27$, $p_3=1,27$ ve $p_4=1,00$. Duyarlılık analizi sonuçları, COPRAS yöntemiyle elde edilen alternatif sıralamalarında en fazla ve en az katkı yapan kriterlerin sırasının değişmediğini göstermektedir (Ek B). Bu durum, yürütülen çalışmanın duyarlılık analizi açısından anlamlı ve uygulanabilir olduğunu ifade etmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, entegre bir tekstil işletmesinde enerji verimliliği tekniklerinin önceliklendirilmesi için COPRAS yöntemi kullanılmış ve altı kriter doğrultusunda yedi öncelikli teknik belirlenmiştir. Bu teknikler için enerji tasarruf oranları hesaplanmış ve ekonomik analizler yapılmıştır. Son bitim proseslerinde sıcaklık–nem kontrolü ve kumaş geçiş hızlarının optimize edilmesiyle elektrik tüketiminde %1,1–1,3, doğal gaz tüketiminde %3–4,2 ve hava emisyonlarında %3–5 azalma sağlanmakta; geri ödeme süresi 0,6–1,7 ay arasındadır. Atık gaz ısısının ramöz taze hava hattında kullanılması ise doğal gaz tüketiminde %2,3–6,3 ve hava emisyonlarında %3–7 azalma sağlayarak 7–9 ayda geri dönmektedir. Proses optimizasyonlarıyla ayrıca doğal gazda %0,5–1,5 ve emisyonlarda %0,5–2 azalma hemen geri kazanımla elde edilmektedir. Yardımcı proseslerde fan motorlarına hız sürücüleri takılması ve diğer iyileştirmeler elektrik tüketimini %0,3–0,4 azaltmakta ve 12–14 ayda geri dönmektedir. Aydınlatma optimizasyonu ile elektrik tüketimi %0,6–1,3 azaltılabilmekte, geri ödeme süresi 4–16 ay arasında değişmektedir. Enerji izleme sisteminin iyileştirilmesiyle tüm enerji türlerinde %0,2–0,5, ısı yalıtımıyla buhar/doğal gazda %0,3–1 ve emisyonlarda %0,5–1,5 azalma sağlanmaktadır. Tüm teknikler uygulandığında işletmede toplam tasarruf oranı yaklaşık %5 olup, geri ödeme süresi 40 aydan kısadır. İşletmenin buharı harici bir tesisten tedarik etmesi nedeniyle buhar tüketimindeki azalmaların emisyonlara etkisi olmamakla birlikte, tüm azalma değerlerinin toplam tüketim/emisyon miktarına göre hesaplandığı unutulmamalıdır. Düşük yatırım ve kısa geri ödeme sürelerine dayalı tekniklerin tercih edildiği gözlenmiş, buna rağmen anlamlı enerji ve emisyon azaltımları elde edilmiştir. Artan enerji maliyetleri bu bulguları desteklemektedir.

COPRAS yönteminin bu çalışmada enerji verimliliği tekniklerinin seçiminde ilk kez uygulanması, yöntemin temiz üretim kararlarında pratik ve etkili bir yol haritası sunabileceğini göstermektedir. Model, tekstil sektörü dışında da farklı endüstrilerde MET/temiz üretim tekniklerinin belirlenmesine uygulanabilir. Ayrıca belirsizliklerin bulunduğu durumlarda bulanık ÇÖKV yöntemleri ve diğer yöntemlerin (VIKOR, PROMETHEE, ARAS vb.)

kullanılabileceği önerilmektedir. Gelecek çalışmalarda, öncelikli tekniklerin seçiminde farklı ÇÖKV yöntemlerinin karşılaştırılması, yaşam döngüsü değerlendirmelerinin yapılması ve maliyet-fayda analizlerinin enerji fiyatları ve mevzuat değişiklikleri gibi ek faktörlerle genişletilmesi önerilmektedir. Ayrıca belirlenen tekniklerin ürün kalitesi, proses verimliliği, işçi güvenliği ve diğer sürdürülebilirlik boyutlarıyla etkileşimlerinin incelenmesi literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

Teşekkürler (Acknowledgements)

Bu çalışma, “Entegre bir tekstil tesisinde temiz üretim yaklaşımıyla kaynak verimliliğini ve çevresel performansı iyileştirmeye yönelik Mevcut En İyi Tekniklerin (MET) Geliştirilmesi” başlıklı projenin bir bölümünü oluşturacak şekilde yürütülmüştür. Proje, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından TEYDEB Projesi (Proje No: 3170583) kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, çalışma süresince sundukları desteklerden dolayı ZORLUTEKS Tekstil firması (Türkiye) Ar-Ge departmanı çalışanlarına ve Murat Yıldırım’a teşekkür eder. Elif Şimşek Yeşil, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Programı ile TÜBİTAK 2211/A Yurt İçi Genel Doktora Burs Programı kapsamında “Sürdürülebilir Su Kaynakları” tematik alanında doktora çalışmalarını yürütmüş ve bu programlar tarafından desteklenmiştir. Bu çalışma ayrıca Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (SDÜ BAP, Proje No: FDK-2022-8638) ve YÖK 100/2000 Doktora Programı tarafından mali olarak desteklenmiştir. Yazarlar, destekleri için SDÜ BAP Birimine, YÖK’e ve TÜBİTAK’a teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aksakal, B., Ulutaş, A., Balo, F., Karabasevic, D., 2022. A new hybrid MCDM model for insulation material evaluation for healthier environment. *Buildings*, 12(5), 655.
- Aruldoss, M., Lakshmi, T.M., Venkatesan, V.P., 2013. A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), 31–43.
- Balkan, M., Ozturk, E., Kitis, M., 2023. Economic and cross-media effect analyses of best available techniques for caustic recovery from mercerization textile wastewater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25, 1043–1058.
- Bhatia, S.C., 2017. *Pollution Control in Textile Industry*. Editor: Devraj, S. Woodhead Publishing India in Textiles, Daryaganj, New Delhi, India.
- Cakır, N., Alp, E., Yetis, U., 2020. Assessing technologies for reducing dust emissions from sintermaking based on cross-media effects and economic analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 1909–1928.
- Chapman, A., 2010. *Mistra Future Fashion – Review of Life Cycle Assessments of Clothing*. MISTRA Foundation for Strategic Environmental Research, Stockholm, Sweden.
- Cınar, Y., 2020. Finansal analiz. <http://ocw.ankara.edu.tr:81/eduCommons/isletme/yatirim-projeleri-ve-analizi/materyal/finansal-analiz> (Erişim Tarihi: 13.05.2020).
- Dane, E., Pratt, M.G., 2007. Exploring intuition and its role in managerial decision making. *Academy of Management Review*, 32(1), 33–54.
- Demirel, Y.E., Simsek, E., Ozturk, E., Kitis, M., 2021. Selection of priority energy efficiency practices for industrial steam boilers by PROMETHEE decision model. *Energy Efficiency*, 14(89).
- Erkan, N., Ok, K., Parlak, S., 2020. ENAT Karacabey industrial afforestation investment revenue and internal profitability analysis. *Forestry Research Journal*, 7(1), 62–75.
- Erkut, E., Tarimcilar, M., 1991. On sensitivity analysis in the analytic hierarchy process. *IMA Journal of Management Mathematics*, 3(1), 61–83.
- Esteve-Turrillas, F.A., Guardia, M., 2017. Environmental impact of recovery cotton in textile industry. *Resources, Conservation & Recycling*, 116, 107–115.
- European Commission (EC), 2003. *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for the Textile Industry*. EC IPPC Bureau, Seville, Spain.
- European Commission (EC), 2006. *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) reference document on economics and cross-media effects*. EC IPPC Bureau, Seville, Spain.
- European Commission (EC), 2022. *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques (BAT) for the Textiles Industry*. European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- Hasanbeigi, A., Price, L., 2012. A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3648–3665.
- Hasanzadeh, R., Mojaver, M., Azdast, T., Park, C.B., 2022. A novel systematic multi-objective optimization to achieve high-efficiency and low-emission waste polymeric foam gasification using response surface methodology and TOPSIS method. *Chemical Engineering Journal*, 430(3), 132958.

- Ibrahim, A.Y., Ghallab, A.O., Gadalla, M.A., Makary, S.S., Ashour, F.H., 2017. Technical and economical/financial feasibility analyses of flared gas recovery in Egypt from oil and gas industry. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 1423–1436.
- Ishfaq, S., Ali, S., Ali, Y., 2018. Selection of optimum renewable energy source for energy sector in Pakistan by using MCDM approach. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2, 61–71.
- Kahraman, C., Onar, S.C., Oztaysi, B., 2015. Fuzzy multicriteria decision-making: A literature review. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(4), 637–666.
- Kaklauskas, A., Zavadskas, E.K., Raslanas, S., 2005. Multivariant design and multiple criteria analysis of building refurbishments. *Energy and Buildings*, 37(4), 361–372.
- Kır, A., Ozturk, E., Yetis, U., Kitis, M., 2024. Resource utilization in the sub-sectors of the textile industry: opportunities for sustainability. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 25312–25328.
- Koc, E., Kaplan, E., 2007. The energy consumption of textile finishing mills general utilization. *Journal of Textile Engineering*, 65, 39–47.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A.R., Deng, Y., Kumar, X.H.P., Bansal, R.C., 2017. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596–609.
- Kurshid, M.F., Asad, M., Khan, A.A., Chaudhry, M.A., 2012. Investigation of specific energy consumption and possible reduction measures of textile spinning mills. *Journal of American Science*, 8, 535–542.
- Lawrence, A., Thollander, P., Andrei, M., Karlsson, M., 2018. Specific energy consumption/use (SEC) in energy management for improving energy efficiency in industry: meaning, usage and differences. *Energies*, 12(2), 247.
- Li, T., Li, A., Guo, X., 2020. The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry – A comprehensive analysis of MCDM methods. *Energy*, 212, 118694.
- Mahdavi, N., Mojaver, P., Khalilarya, S., 2022. Multi-objective optimization of power, CO₂ emission and exergy efficiency of a novel solar-assisted CCHP system using RSM and TOPSIS coupled method. *Renewable Energy*, 185, 506–524.
- Mulliner, E., Smallbone, K., Maliene, V., 2013. An assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method. *Omega*, 41, 270–279.
- Oyeleran, O.A., Twada, Y.Y., Sanusi, O.M., 2016. Energy audit of an industry: a case study of fabrication company. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 5(2), 45–53.
- Ozbek, A., 2017. Multi Criteria Decision Making Methods and Problem Solution with Excel. Seçkin Publishing, Ankara, Türkiye.
- Ozturk, E., 2014. Applications of Integrated Pollution Prevention and Control and Cleaner Production in Textile Industry. PhD Thesis, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.
- Ozturk, E., Cinperi, N.C., Kitis, M., 2020. Improving energy efficiency using the most appropriate techniques in an integrated woolen textile facility. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120145.
- Ozturk, E., Koseoglu, H., Karaboyacı, M., Yigit, N.O., Yetis, U., Kitis, M., 2016. Sustainable textile production: cleaner production assessment/eco-efficiency analysis study in a textile mill. *Journal of Cleaner Production*, 138, 248–263.
- Palamutcu, S., 2010. Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. *Energy*, 35, 2945–2952.
- Paradowski, B., Drazek, Z., 2020. Identification of the decision-making model for selecting an information system. *Procedia Computer Science*, 176, 3802–3809.
- Raja, A.S.M., Arputharaj, A., Saxena, S., Patil, P.G., 2019. Water requirement and sustainability of textile processing industries. In: Muthu, S.S. (Ed.). *Water in Textiles and Fashion Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Samantha, K.K., Pandit, P., Samantha, P., Basak, S., 2019. Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation. In: Muthu, S.S. (Ed.). *Water in Textiles and Fashion Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Saxena, S., Raja, A.S.M., Arputharaj, A., 2017. Challenges in sustainable wet processing of textiles. In: Muthu, S.S. (Ed.). *Textiles and Clothing Sustainability*. Textile Science and Clothing Technology, Springer, Singapore.
- Simsek, E., Demirel, Y.E., Ozturk, E., Kitis, M., 2022. Use of multi-criteria decision models for optimization of selecting the most appropriate best available techniques in cleaner production applications: A case study in a textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 335, 130311.
- Srdjevic, Z., Samardzic, M., Srdjevic, B., 2012. Robustness of AHP in selecting wastewater treatment method for the coloured metal industry: Serbian case study. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 29(2), 147–161.
- Strand, J., 2015. Environmental Impact of the Swedish Textile Consumption – A General LCA Study. Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Uppsala, Sweden. [https://w-program.nu/filer/exjobb/Jelina Strand.pdf](https://w-program.nu/filer/exjobb/Jelina%20Strand.pdf) (Erişim Tarihi: 09.12.2023).
- Taherdoost, H., Madanchian, M., 2023. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3, 77–87.
- Tamborrino, A., Catalano, F., Berardi, A., Bianchi, B., 2021. New modelling approach for the energy and steam consumption evaluation in a fresh pasta industry. *Chemical Engineering Transactions*, 87, 409–414.
- Tschiggerl, K., Topic, M., 2019. Cleaner Production and Sustainable Development. In: Leal Filho, W. (Ed.). *Encyclopedia of Sustainability in Higher Education*. Springer, Cham.
- Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (TCMB), 2021. Annual Reports: 2021. Ankara, Turkey.
- Uddin, F., 2014. Energy management and energy crisis in textile finishing. *American Journal of Energy Research*, 2, 53–59.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2010. Global Industrial Energy Efficiency Benchmarking: An Energy Policy Tool Working Paper. UNIDO, Vienna, Austria.
- Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., Zhao, J.H., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2263–2278.
- World Wide Fund (WWF), 2014. Training Manual on BWMPs in Textile Sector of Pakistan. WWF-Pakistan.

- Yang, K., Zhu, N., Chang, C., Wang, D., Yang, S., Ma, S., 2018. A methodological concept for phase change material selection based on multi-criteria decision making (MCDM): A case study. *Energy*, 165, 1085–1096.
- Zavadskas, E.K., Antucheviciene, J., 2007. Multiple criteria evaluation of rural building's regeneration alternatives. *Building and Environment*, 42(1), 436–451.
- Zavadskas, E.K., Kaklauskas, A., Banaitis, A., Kvederyte, N., 2004. Housing credit access model: the case for Lithuania. *European Journal of Operational Research*, 155(2), 335–352.
- Zolfani, S.H., Pourhossein, M., Yazdani, M., Zavadskas, E.K., 2017. Evaluating construction projects of hotels based on environmental sustainability with MCDM framework. *Alexandria Engineering Journal*.

Ek A

Başlangıç enerji verimliliği tekniklerinin listesi

Kod	Teknikler
T1	Tüm malzeme giriş ve çıkışlarını gösteren kütle dengelerine dayalı yıllık atık envanter raporlarının hazırlanması.
T2	Üretim sürecine ilişkin tüm girdi ve çıktılar (hammadde, kimyasal, enerji, su, ürün, atık su, hava emisyonları, çamur, katı atık, tehlikeli atık ve yan ürünler) miktar ve kalite açısından izlenmesi.
T3	Proses tabanlı temiz üretim yazılımının geliştirilmesi ve böylece üretim proseslerinin verimliliğinin izlenmesi ve kontrol edilmesi
T4	Yardımcı kimyasalların dozajlanması için otomatik dozajlama ve dağıtım sisteminin kurulumu.
T5	Yanma sırasında soğutma fan motoru ile yakma makinesinin ana motorunun birbirine bağlanmasıyla elektrik enerjisinden tasarruf edilmesi.
T6	Ön işlem proseslerinde farklı proseslerin tek adımda birleştirilme olanaklarının araştırılması. (Hasıl sökme/hidrofilleştirme ve ağartma vb.)
T7	Su yumuşatma sisteminin optimizasyonu.
T8	Yüksek su tüketimine neden olan sürekli çamaşır makinelerinde optimizasyon ve minimizasyon çalışmaları.
T9	Boyama sonrası bazı işlem basamaklarının enzimatik işlemlerle (nötralizasyon vb.) ortadan kaldırılması.
T10	Nispeten temiz atıksu akımlarının artırılmadan uygun proses dışı alanlarda (tesis, tank, ekipman temizliği ve otomatik dozajlama vb.) yeniden kullanılması.
T11	Enerji kayıplarını en aza indirmek için boru, vana ve tankların izolasyonu.
T12	Terbiye proseslerinde (özellikle ramlarda) proses optimizasyonu.
T13	Cıvalı floresan lambaların daha verimli LED aydınlatma sistemleriyle değiştirilmesi.
T14	Yüksek ve düşük aydınlatma gerektiren iç ünitelerde tesis aydınlatmasının optimizasyonu (lüks optimizasyonu) yapılarak belirlenmesi. Aydınlatma gereksinimleri dikkate alınarak aydınlatma sistemlerinin değiştirilmesi veya optimize edilmesi.
T15	Isıtma havalandırma ve nemlendirme (HVAC) sisteminin değiştirilmesi
T16	Ramözlerde ısı geri kazanımı.
T17	Ultrafiltrasyon (UF) ile boyutlandırma malzemelerinin geri kazanımı.
T18	Etkili ve kapsamlı haşıl sökme için oksidatif yöntemin uygulanması. (Haşıl sökme, hidrofilleştirme ve ağartma tek adımda birleştirilebilir)
T19	Alkali merserizasyon çökme suyunun artırılmadan haşıl sökmede tekrar kullanılması.
T20	Tesiste kostik geri kazanım sisteminin daha verimli hale getirilmesi.
T21	Enerji izleme sistemi kurulumu
T22	Ramözlerde kumaş nem oranının izlenmesi ve bu etken göz önünde bulundurularak ramöz geçiş hızının optimize edilmesi veya ayarlanması.
T23	Ram makinelerinde kumaş enine göre ayarlanabilen nozul sistemlerinin kullanılması.
T24	Kumaş boyamada son durulamada oluşan atık suyun artırılmadan tekrar kullanılması.
T25	Teknik olarak mümkün olan proseslerde arıtma yapılmadan durulama suyunun tekrar kullanılması.
T26	Durulama suyunun benzer atık su akımlarıyla birleştirilip artıldıktan sonra proses suyu olarak tekrar kullanılması.
T27	Nispeten temiz yıkama/durulama atık suyunun temizlik amaçlı kullanımının değerlendirilmesi.
T28	Kompresör izleme sisteminin kurulması, yük dağılımlarının izlenmesi. (Kompresör kontrol sisteminin kurulması ile %5 ile %20 arasında tasarruf sağlanmaktadır.)
T29	Kompresör ve fan sistemindeki yükleri azaltmak için değişken frekanslı veya değişken hızlı kontrol sürücülerinin kullanılması.
T30	Yüksek gerilim ve akım harmonik değerlerine sahip kompresör sistemlerinde kompresöre filtre uygulanarak frekans sürücüsünün ürettiği harmonik frekansların önlenmesi.
T31	Basınçlı hava sistemlerinde sızıntıları önlemek için sıvı contaların kullanılması.
T32	Giriş hava sıcaklığının 4°C azaltılması (Basınçlı hava üretim kapasitesinin %1 oranında artırılması).
T33	Kompresörün hava girişine bir nem giderici takılması
T34	Kompresörde değişken hız tahriki kullanılıyor.
T35	Kompresörlerin kontrolü (Kompresör kontrolü yapılarak işletme maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilir. Uygun kontroller sağlanmazsa işletme giderleri %20 oranında artar.)
T36	Kompresör sistemlerinin kuzey cephesine konumlandırılması veya bunun mümkün olmadığı durumlarda hava emiş sisteminin kuzey cephesine konumlandırılması.
T37	Solvent bazı ürünler yerine su bazı ürünlerin kullanılması.
T38	VOC emisyonlarını azaltıcı önlemlerin alınması (kimyasal değişim, etkili iç mekan havalandırması ve hava tahliyesi vb.)
T39	Katyonik iyon değişim reçinelerinde rejenerasyon süresinin optimizasyonu.
T40	Rejenerasyon suyunun tekrar kullanımı (Tuz gerektiren boyama işlemlerinde veya tesis-ekipman temizliğinde).
T41	Ters ozmoz (RO) konsantrelerini birleştirerek ham su tankına gönderin.
T42	Sertlik izleme sensörleri, katyonik iyon değişim reçinesi sistemi çıkış suyunda (proses suyu yumuşatılmış) kullanılabilir ve rejenerasyon sistemine entegre edilebilir. Bu sayede rejenerasyon süreleri optimize edilebilir.
T43	Gerekirse, ham su tankı ve su yumuşatma sisteminin önüne kum filtresi kullanılabilir. Kum filtresi yıkama suları, basit bir çöktürme işlemiyle artırılmadan doğrudan ham su tankına geri verilerek, bahçe sulama vb. alanlarda tekrar kullanılabilir.
T44	Su yumuşatma sisteminde otomatik tuz dozajlaması.
T45	Ramözlerde devridaim havasının kontrolü.

Ek B

Duyarlılık analizi hesaplamaları

W1

w ₁	0.15
w ₂	0.15
w ₃	0.15
w ₄	0.19
w ₅	0.19
w ₆	0.15

p ₁	1.00
p ₂	1.27
p ₃	1.27
p ₄	1.00

w ₃	0.15	
w ₄	0.15	0.15
w ₅	0.15	0.19
w ₆	0.15	0.15

w ₁	0.15	4	3
w ₂	0.15	4	3
w ₃	0.15	4	3
w ₄	0.19	1	1
w ₅	0.19	1	1
w ₆	0.15	3	3

W2

w ₁	0.15
w ₂	0.15
w ₃	0.15
w ₄	0.19
w ₅	0.19
w ₆	0.15

p ₁	1.00
p ₂	1.27
p ₃	1.27
p ₄	1.00

w ₃	0.15	
w ₄	0.15	0.15
w ₅	0.15	0.19
w ₆	0.15	0.15

w ₁	0.15	4	3
w ₂	0.15	4	3
w ₃	0.15	4	3
w ₄	0.19	1	1
w ₅	0.19	1	1
w ₆	0.15	3	3

W4

w ₁	0.15
w ₂	0.15
w ₃	0.15
w ₄	0.19
w ₅	0.19
w ₆	0.15

p ₁	1.00
p ₂	1.00
p ₃	1.27
p ₄	1.00

w ₃	0.15	
w ₄	0.15	0.15
w ₅	0.15	0.15
w ₆	0.15	0.19

w ₁	0.15	4	3
w ₂	0.15	4	3
w ₃	0.15	4	3
w ₄	0.19	2	1
w ₅	0.19	1	1
w ₆	0.15	3	3

W5

w ₁	0.15
w ₂	0.15
w ₃	0.15
w ₄	0.19
w ₅	0.19
w ₆	0.15

p ₁	1.00
p ₂	1.00
p ₃	1.27
p ₄	1.00

w ₃	0.15	
w ₄	0.15	0.15
w ₅	0.15	0.15
w ₆	0.15	0.19

w ₁	0.15	3	3
w ₂	0.15	3	3
w ₃	0.15	6	3
w ₄	0.19	1	1
w ₅	0.19	1	1
w ₆	0.15	3	3

W6

w ₁	0.15
w ₂	0.15
w ₃	0.15
w ₄	0.19
w ₅	0.19
w ₆	0.15

p ₁	1.00
p ₂	1.00
p ₃	1.27
p ₄	1.27

w ₃	0.15	
w ₄	0.15	0.15
w ₅	0.15	0.15
w ₆	0.15	0.19

w ₁	0.15	3	3
w ₂	0.15	3	3
w ₃	0.15	5	3
w ₄	0.19	1	1
w ₅	0.19	1	1
w ₆	0.15	5	3

	w1	w2	w4	w5	w6
C1	3	3	3	3	3
C2	3	3	3	3	3
C3	3	3	3	3	3
C4	1	1	1	1	1
C5	1	1	1	1	1
C6	3	3	3	3	3

—C1 —C2 —C3 —C4 —C5 —C6