



**ŞEKER ÜRETİMİNDE TEMİZ ÜRETİM
OLANAKLARININ
ÖNCELİKLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Teslima GÖKGÖZ

Eskişehir 2025

**ŞEKER ÜRETİMİNDE TEMİZ ÜRETİM OLANAKLARININ
ÖNCELİKLENDİRİLMESİ**

Teslima GÖKGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aysun ÖZKAN**

**Eskişehir
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kasım 2025**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Teslima GÖKGÖZ'ün “Şeker Üretiminde Temiz Üretim Olanaklarının Önceliklendirilmesi” başlıklı tezi 25/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı): Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

Üye : Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

Üye : Doç. Dr. Naile KARAKEHYA

Prof. Dr. Harun BÖCÜK
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

25/11/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans đrencisi Teslima GÖKGÖZ, şeker retiminde Temiz retim Olanaklarının nceliklendirilmesi başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı
Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

ÖZET

ŞEKER ÜRETİMİNDE TEMİZ ÜRETİM OLANAKLARININ ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Teslima GÖKGÖZ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kasım 2025

Danışman: Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

Sanayi sektöründe çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği, özellikle enerji ve su tüketiminin yoğun olduğu şeker endüstrisinde kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, şeker fabrikalarında uygulanabilecek temiz üretim (TÜ) olanaklarının belirlenmesi ve önceliklendirilmesi amacıyla Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri bütünleşik olarak kullanılmıştır. Kriterlerin ağırlıklandırılması için hem SWARA hem de Entropi yöntemleri uygulanmış, böylece hem öznel yargılara dayalı, hem de veri temelli nesnel ağırlıklar elde edilmiştir. Ağırlıklandırma sonuçları kullanılarak, alternatif temiz üretim seçenekleri VIKOR ve TOPSIS yöntemleriyle ayrı ayrı analiz edilmiştir. Yapılan tüm analizlerde dikkate değer bir yöntemsel tutarlılık gözlemlenmiştir. Dört farklı metodoloji sonucunda A10 alternatifi (melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesi) en uygun temiz üretim seçeneği olarak belirlenmiştir. Bu tez, şeker endüstrisinde temiz üretim teknolojilerinin seçimi ve uygulanmasına yönelik karar verme süreçlerine bilimsel katkı sağlamakta ve sürdürülebilir üretim politikalarının geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ÇKKV, SWARA, Şeker üretimi, TOPSIS, VIKOR

ABSTRACT
PRIORITIZATION OF CLEANER PRODUCTION OPTIONS
IN SUGAR MANUFACTURING

Teslima GÖKGÖZ

Environmental Engineering Program

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, November 2025

Supervisor: Prof. Dr. Aysun ÖZKAN

Ensuring environmental sustainability and resource efficiency is of critical importance in the sugar industry, where energy and water consumption are considerably high. In this study, cleaner production (CP) alternatives that can be implemented in sugar factories were identified and prioritized using integrated Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods. For the weighting of the criteria, both SWARA and Entropy methods were applied, allowing the use of subjective expert-based and objective data-driven weighting approaches together. Using these weighting results, the identified cleaner production alternatives were analyzed separately with VIKOR and TOPSIS methods. A significant methodological consistency was observed across all analyses. Among the eleven alternatives, the A10 option (utilization of molasses in feed and fermentation industries) was determined to be the most suitable cleaner production alternative according to all four methodological combinations. This thesis contributes to scientific decision-making processes for selecting and implementing cleaner production technologies in the sugar industry, demonstrates the applicability of circular economy principles in the sector, and provides guidance for the development of sustainable production policies.

Keywords: MCDM, SWARA, Sugar production, TOPSIS, VIKOR

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, iş hayatımdaki yoğunluk nedeniyle kesintilere uğramış, çok uzun bir süreç sonunda hayata geçmiş bir çalışma olup, hazırlanmasında ve tamamlanmasında, değerli bilgilerini benimle paylaşan, samimiyetini benden esirgemeyen, değerli önerileriyle çalışmaya destek olan, sabrını ve bilgilerinin kaynağını sonuna kadar kullandığım danışman hocam Prof. Dr. Aysun ÖZKAN'a;

Tez savunma jürimde olmayı kabul ederek çalışmaya destek olan Doç. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN ve Doç. Dr. Naile KARAKEHYA'ya;

Hayat yolculuğumun her aşamasında yanımda olan, beni bugünlere taşıyan tüm güzel insanlara gönülden teşekkür ederim. En büyük dayanağım olan aileme; sevgileriyle bana güç veren sevdiklerime ve umut kaynağım, ilhamım olan çocuklarıma sonsuz minnet duyuyorum. Bu çalışma onların sevgisi, sabrı ve desteği sayesinde hayat bulmuştur.

Teslima GÖKGÖZ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Teslima GÖKGÖZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	iv
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	iii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ŞEKER ÜRETİMİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ	2
2.1. Beyaz Şekerin Tarihçesi	3
2.2. Şeker Üretim Prosesi.....	4
2.2.1. Pancarların fabrikaya kabulü, boşaltılması ve silolanması.....	4
2.2.2. Pancarların silolardan fabrikaya sevki	5
2.2.3. Pancarın yıkanması	6
2.2.4. Pancarın kıyılması	6
2.2.5. Pancarın haşlanması ve ham şerbetin eldesi.....	6
2.2.6. Ham şerbetin kireçlenmesi	7
2.2.7. Ham şerbetin karbonatlanması.....	8
2.2.8. Şerbetin koyulaştırılması	9
2.2.9. Koyu şerbetin rafinasyonu.....	10

2.2.10. Şekerin kurutulması ve ambalajlanması.....	12
2.2.11. Pancar posasının (küspenin) kurutulması.....	13
2.2.12. Alkol üretim tesisi.....	14
2.2.13. Şeker üretiminin çevresel etkileri	14
3. TEMİZ ÜRETİM VE ŞEKER ÜRETİMİNDE UYGULAMALARI	16
3.1. Temiz Üretimde Kullanılan Yaklaşımlar.....	19
3.2. Şeker Üretiminde Temiz Üretim Uygulamaları	21
3.2.1. Üretilen yan ürünler.....	22
3.2.2. Emisyonlar	22
3.3. Şeker fabrikalarında temiz üretim olanakları	23
4. KONUSYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	28
5. METODOLOJİ.....	34
5.1. Alternatiflerin Belirlenmesi.....	35
5.2. Kriterlerin Belirlenmesi ve Karar Matrisi	37
5.3. Kriterlerin Ağırlıklandırması	40
5.3.1. Entropi yöntemi	40
5.3.2. SWARA Yöntemi.....	43
5.4. Kullanılan Değerlendirme Yöntemleri.....	45
5.4.1. TOPSIS yöntemi	46
5.4.2. VIKOR yöntemi.....	48
6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	51
6.1. Kriter Ağırlıklandırma Sonuçları	51
6.1.1. Entropi yöntemi sonuçları	51
6.1.2. SWARA yöntemi sonuçları.....	55
6.2. Alternatiflerin Değerlendirme Sonuçları.....	57
6.2.1. TOPSİS yöntemi sonuçları	57
6.2.2. VİKOR yöntemi sonuçları	65

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	72
KAYNAKÇA	74
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Türkiye Şeker Sektörü- Özet Tablo (Temmmuz 2025)	22
Tablo 3.2. Örnek karbonatlama çamur içeriği.....	22
Tablo 3.3. Örnek şeker fabrikası atıksu özellikleri (arıtım öncesi).....	23
Tablo 3.4. Örnek baca gazı emisyonları.....	23
Tablo 4.1. Literatürde çeşitli sektörlerle gerçekleştirilmiş çalışmalar	33
Tablo 5.1. Kullanılan kriterler ve açıklamaları	37
Tablo 5.2. Veri setinin dayandığı temel kaynaklar	38
Tablo 5.3. Kriterlerin hesaplama dayanakları (Teknik açıklama).....	39
Tablo 5.4. Karar matrisi	40
Tablo 5.5. Entropi ve SWARA yöntemlerinin karşılaştırması	45
Tablo 6.1. Entropi yöntemi için normalize karar matrisi	51
Tablo 6.2. Kriterlere ilişkin entropi değerleri	52
Tablo 6.3. e_j ve d_j değerleri	52
Tablo 6.4. w_j değerleri	52
Tablo 6.5. SWARA ile kriter ağırlıklandırma sonuçları	56
Tablo 6.6. TOPSIS yöntemi normalize karar matrisi.....	58
Tablo 6.7. Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi	58
Tablo 6.8. Entropi yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler	59
Tablo 6.9. Entropi yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları.....	60
Tablo 6.10. SWARA yöntemine göre normalize karar matrisi.....	64
Tablo 6.11. SWARA yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi.....	64
Tablo 6.12. SWARA yöntemine göre TOPSIS pozitif ve negatif ideal çözümler.....	65
Tablo 6.13. SWARA yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları	65
Tablo 6.14. VIKOR yöntemi için en iyi ve en kötü kriterler	66
Tablo 6.15. Entropi yöntemine göre VIKOR ağırlıklı normalize karar matrisi	67

Tablo 6.16. Entropi-VIKOR’a göre S_i , R_i , Q_i ve alternatiflerin sıralamaları	68
Tablo 6.17. SWARA yöntemi için VIKOR ağırlıklı normalize karar matrisi	69
Tablo 6.18. SWARA-VIKOR’a göre S_i , R_i , Q_i ve alternatiflerin sıralamaları	70



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Pancardan şeker üretimindeki temel süreçler	4
Şekil 2.2. Fabrikaya gelen pancarın boşaltılması	5
Şekil 2.3. Pancarların silolardan tesise sevkı.....	6
Şekil 2.4. Haşlama teknesi ve difüzyon kulesi	7
Şekil 2.5. Ham şerbetin I.kireçlemesi.....	8
Şekil 2.6. Ham şerbete uygulanan kireçleme ve karbonatlama işlemleri	9
Şekil 2.7. Şerbetin koyulaştırılması.....	10
Şekil 2.8. Koyu şerbetin rafinasyonu.....	10
Şekil 2.9. Şekerin kurutulması ve ambalajlanması.....	12
Şekil 2.10. Küp şeker üretimi	13
Şekil 2.11. Küşpe oluşumu ve kurutma işlemi akım şeması	14
Şekil 3.1. UNEP'inTÜ Stratejik İşletme Birimlerine ait stratejik çerçevesi	17
Şekil 5.1. Metodoloji akış şeması.....	34
Şekil 7.1. Karşılaştırmalı sıralama grafiği	72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BAT	: Mevcut En İyi Teknikler (Best Available Techniques)
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)
ANP	: Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process)
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TÜ	: Temiz Üretim (Cleaner Production- CP)
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UOB	: Uçucu Organik Bileşikler
M.S.	: Milattan Sonra
EPA	: Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
UNIDO	: Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
DANP	: DEMATEL Tabanlı Analitik Ağ Süreci
AB	: Avrupa Birliği (European Union)
IPPC	: Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol
IED	: Sanayi Emisyonları Direktifi (Industrial Emissions Directive)
EC	: Avrupa Topluluğu (European Community)
3P	: Pollution Prevention Pays
DfE	: Ürün tasarımında çevre (Design for Environment)
LCA	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment)
BREF	: En İyi Kullanılabilir Teknikler Referans Dokümanı
FDM	: Bulanık Delphi Yöntemi (Fuzzy Delphi Method)
TODIM	: Etkileşimli ve Çok Kriterli Davranışsal Karar Teorisi
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme (Multiple-Criteria Decision Making)
FAHP	: Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (Fuzzy Analytic Hierarchy P.)

FEDAS	: Ortalama Çözümünden Uzaklığa Dayalı Bulanık Değerlendirme Y.
FTOPSIS	: Bulanık TOPSIS Yöntemi
PROMETHEE	: Tercih Sıralamasına Dayalı Zenginleştirilmiş Değerlendirme Yöntemi
COMBAT	: En İyi Alternatif İçin Birleştirici Yaklaşım
SAW	: Basit Ağırlıklı Toplam Yöntemi (Simple Additive Weighting)
MUL	: Çarpımsal Model (Multiplicative Utility Model)
WP	: Çarpımsal Model (Weighted Product Method)
WASPAS	: TOPSİS/SAW ve MUL/WP'yi tek çatı altında birleştiren model
PFN	: Pisafor Bulanık Sayı (Phytagorean Fuzzy Number)
SRM	: Basit Sıralama Yöntemi (Simple Ranking Method)
WCM	: Ağırlıklı Uzlaşık Çözüm Yöntemi (Weighted Compromise Method)
ARAS	. Katkı Oranı Değerlendirme Yöntemi
WSM	: Ağırlıklı Toplam Modeli (Weighted Sum Model)
QFD	: Kalite Fonksiyon Yayılımı (Quality Function Deployment)
HRES	: Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri
TPM	: Toplam Verimli Bakım (Total Productive Maintenance)
MARCOS-G	: Gri Sistem Tabanlı Uzlaşık Çözüme Dayalı Ölçme ve Sıralama Yöntemi
EMAS	:Eko-Yönetim ve Denetim Programı
VOS	: Paydaşın Sesi (Voice of Stakeholder)
TRL	: Teknolojik Olgunluk Seviyesi (Technology Readiness Seviyesi)
DEMATEL	: Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı Yöntemi
VIKOR	: Çok Kriterli Optimizasyon ve uzlaşık çözüm Yöntemi (Vise Kriterj

Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje Method)

- SWARA : Kademeli Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi (Step-wise Weight Assesment Ratio)
- TOPSIS : İdeal Çözüme Benzerlikle Tercih Düzeni Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to İdeal Solutions)
- CRITIC : Kriterler Arası Korelasyon Yoluyla Kriter Önemi (Criteria İmportance Through Intercriteria Correlation)
- COPRAS : Kompleks Oransal Değerlendirme (Complex Proportional Assesment)
- ELECTREE : Eleme ve Gerçeği İfade Eden Seçim (Elimination and Choice Translating Reality English)

1. GİRİŞ

Günümüzde sanayi sektöründe sürdürülebilirlik, çevresel etkilerin azaltılması ve kaynakların verimli kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, çevreye duyarlı üretim anlayışını temel alan temiz üretim kavramı, özellikle yüksek çevresel etkilere sahip sektörlerde stratejik bir yaklaşım haline gelmiştir. Gıda endüstrisinin temel kollarından birisi olan şeker üretimi, gerek su ve enerji tüketimi, gerek atık yönetimi açısından çevresel boyutu yüksek olan bir üretim sürecine sahiptir. Bu nedenle, şeker fabrikalarında temiz üretim tekniklerinin uygulanması, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Temiz üretim uygulamalarının başarılı olabilmesi, sadece teknik iyileştirmelerle değil, aynı zamanda mevcut en iyi tekniklerin doğru biçimde belirlenmesi ve uygulanmasıyla mümkündür. Bu noktada, birden fazla ölçütü aynı anda değerlendirme gerekliliği, karar verme sürecini karmaşıktırmaktadır. İşte bu karmaşıklığın yönetilmesinde ÇKKV modelleri etkin araçlar olarak öne çıkmaktadır. ÇKKV yöntemlerinin, teknik, çevresel, ekonomik ve sosyal kriterlerin bir arada değerlendirildiği yapılandırılmış karar destek sistemleri sunarak, şeker fabrikalarında temiz üretim stratejilerinin belirlenmesinde önemli katkılar sağlaması mümkündür.

Bu tez çalışmasında, şeker üretim sürecinde çevresel etkileri azaltmaya yönelik temiz üretim yaklaşımları ele alınmakta ve ÇKKV modellerinin, bu süreçte en uygun mevcut en iyi tekniklerin seçimi için nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceği araştırılmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın amacı, şeker sektöründe çevresel sürdürülebilirliği destekleyecek alternatif tekniklerin çok kriterli bakış açısıyla analiz edilmesi ve karar verme sürecine bilimsel bir temel kazandırılmasıdır. Böylece hem üretim verimliliğinin artırılması hem de çevreye olan olumsuz etkilerin en aza indirilmesi hedeflenmektedir.

2. ŞEKER ÜRETİMİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

İnsanlığın emrinde bulunan en eski tatlandırıcı baldır. Daha sonra doğuda yerini şeker kamışının şekerli öz suyuna bırakmıştır. Şeker kamışı kültürüne dair bilgilere, Milattan yaklaşık 4. yüzyıl öncesine uzanan eski Hint yazılarında rastlanır. Önceleri salt şekerli özsuyla ile yetinilirken, milattan yaklaşık 300 yıl sonra Kuzey Hindistan'da "Sakara" adıyla katı haldeki sakaroz bilinmekteydi. Bugün kullanılan sakaroz kelimesi de bu eski kökten gelmektedir (Schneider, 1971).

Daha sonraki zamanlarda şeker kamışı İran üzerinden batıya yayılmış ve M.S. 627 yılında Bizans imparatoru Herakleios'un İran'ın başkenti Dastagerd'i kuşattıktan sonra, büyük miktarda şeker ele geçirdiği bildirilmiştir. Söz konusu bu şeker, köpüğü alınmış kamış ham şerbetinin koyulaştırılması ve toprak kaplarda soğutulması ile katı kalıp şeklinde elde edilmiştir. Bundan sonraki aşamada, lapaların kapsadığı şurubu pres etmek suretiyle giderilmesi sağlanmıştır. Gur adı verilen kütle, torbalara doldurularak veya göpel presleri ile sıkıştırılmıştır. Bu ilk rafine şeker üretiminde kullanılan metotlar ciddi madde kayıplarına sebep olduğundan saf şeker ürünü çok pahalı olmuş ve yalnızca tıbbi amaçlarla kullanılmıştır.

Şeker üretimi konusunda bilgi İran üzerinden Mısır'a geçmiş ve burada arıtma metotları geliştirilmiştir. Mısırlıların kullandığı teknikler arasında, şurubun yumurta akı veya kan gibi protein maddeleriyle arıtılması yer almıştır. Şurubun damlama yöntemi ile ayrılması, yapının doğası gereği, sulu bir lapa ile çalışılmasını gerektirmiştir. 18. ve 19. Yüzyılların başında arıtım sayısının olağanüstü yüksek olduğu bilinmektedir.

Zamanla şeker kamışı İran üzerinden Mısır'a ulaşmış ve M.S. 700 yıllarında Arap kimyası desteğiyle bu bölgede büyük miktarda beyaz şeker elde edilmiştir. Berberiler şeker kamışını Avrupa'ya taşımış ve M.S. 750 yılında Sicilya ile İspanya'da ilk şeker kamışı ekimleri yapılmıştır. Orta Avrupa'ya şeker Venedik üzerinden ulaşmış; Haçlı Seferleri sayesinde daha geniş kitlelere yayılmıştır.

Şeker kamışının Amerika'ya ulaşması ise Columbus'un 1494 yılındaki seferine dayanır. Kamış San Domingo'ya götürülmüş, buradan Amerika'nın tropik ve subtropik bölgelerine yayılmıştır. 17. Yüzyılda geniş çaplı ham şeker üretimi başlamış, bu ham şeker Avrupa'ya taşınarak liman şehirlerindeki rafinerilerde arıtılmıştır. 1750 yılında yalnız Hamburg'da 365'ten fazla rafineri bulunmaktaydı.

Şeker pancarı, sakaroz kaynağı olarak daha geç önem kazanmıştır. Yaklaşık 150 yıldır şeker bu bitkiden elde edilmektedir. 1747 yılında Berlin Bilimler Akademisi

Direktörü Marggraf, pancardan şeker elde edilebileceğini bilimsel olarak duyurmuştur. Öğrencisi Achard ise 1786 yılında ıslah ve fabrika denemelerine başlamış, 1799 yılında Berlin’de pancardan büyük miktarda şeker üreterek başarı sağlamıştır. Bu başarı sonrası Prusya Devleti’nin desteğiyle 1801 yılında Silezya’da ilk pancar şekeri fabrikası kurulmuştur.

Napolyon’un uyguladığı Avrupa Kuşatması nedeniyle kamış şekerinin Avrupa’ya girişi durma noktasına gelmiş, bu durum pancar tarımının hızla gelişmesine katkı sağlamıştır. 19. Yüzyılda Avrupa’nın birçok yerinde pancar şekeri fabrikaları kurulmuş, Almanya’da kişi başı yıllık şeker tüketimi 2 kg’dan 30 kg’a kadar yükselmiştir.

2.1. Beyaz Şekerin Tarihçesi

Türkiye’ye beyaz şeker 19. yüzyılın ortalarından itibaren ithal ürün olarak gelmeye başlamıştır. Ancak, yerli üretimin başlaması ve halk arasında daha yaygın tüketilmesi Cumhuriyet dönemiyle, özellikle de 1926 yılında Alpullu Şeker Fabrikası’nın açılmasıyla olmuştur. Kronolojik olarak kısaca:

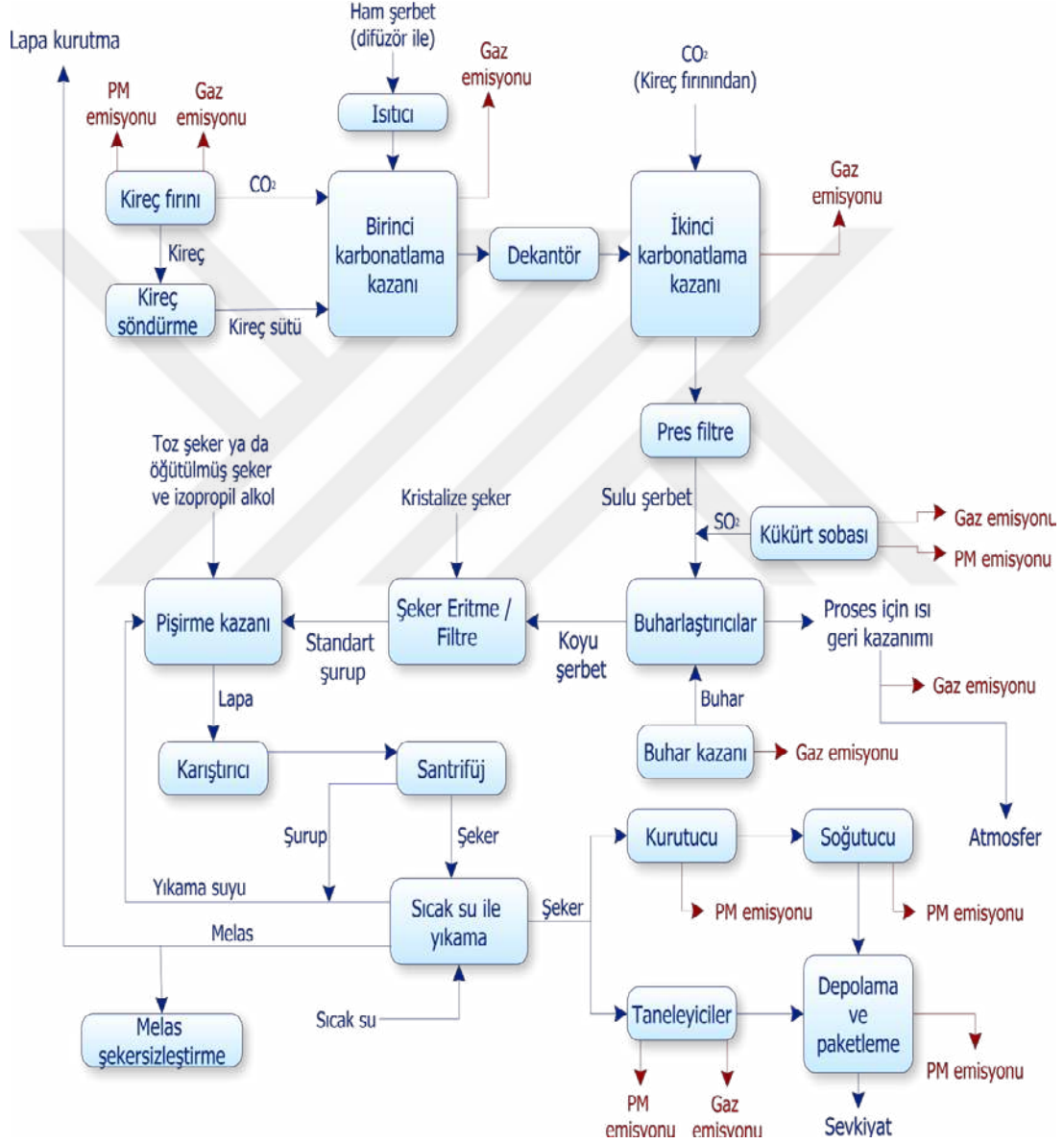
- Osmanlı döneminde, tatlandırıcı olarak daha çok bal, pekmez ve sınırlı miktarda ithal edilen kamış şekeri (rafine edilmemiş) kullanılıyordu.
- 19.yüzyılda Avrupa’dan gelen beyaz şeker, yüksek fiyatı nedeniyle sadece varlıklı kesim tarafından tüketilebiliyordu.
- 1926 yılında ilk şeker fabrikasının açılmasıyla birlikte yerli pancar şeker üretimi başladı.
- Ardından Uşak (1926), Eskişehir (1933) ve Turhal (1934) Şeker Fabrikaları kuruldu ve böylece beyaz şeker ülke geneline yayılarak günlük yaşamın bir parçası haline geldi.

Erken cumhuriyet döneminde pancar şekeri üretimi, ekonomik bağımsızlık ve sanayileşme hedeflerinin önemli bir parçası olarak görülmüştür. Bu dönemde izlenen politikalar, Türkiye’nin şeker ihtiyacını kendi kaynaklarıyla karşılayabilmesi için planlı ve kararlı bir şekilde yürütülmüştür.

2025 Yılı itibarıyla Türkiye’de toplam 32 adet şeker fabrikası faaliyet göstermektedir. Bu fabrikalardan 14 tanesi devlete aittir ve Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. tarafından işletilmektedir. 12 Fabrika özel sektöre aittir ve 6 fabrika ise pancar üreticilerinin oluşturduğu kooperatifler tarafından işletilmektedir.

2.2. Şeker Üretim Prosesi

Pancardan şeker üretimi, pancardaki istenmeyen maddelerin ayrılması, yıkama, dilimleme, ekstraksiyon, presleme, saflaştırma, buharlaştırma, kristalleştirme ve ambalajlama aşamalarını içerir. Pancar üretiminde kullanılan temel süreçler Şekil 2.1’de verilmiş, bu süreçlerle birlikte diğer yardımcı üniteler aşağıda özetlenmiştir.



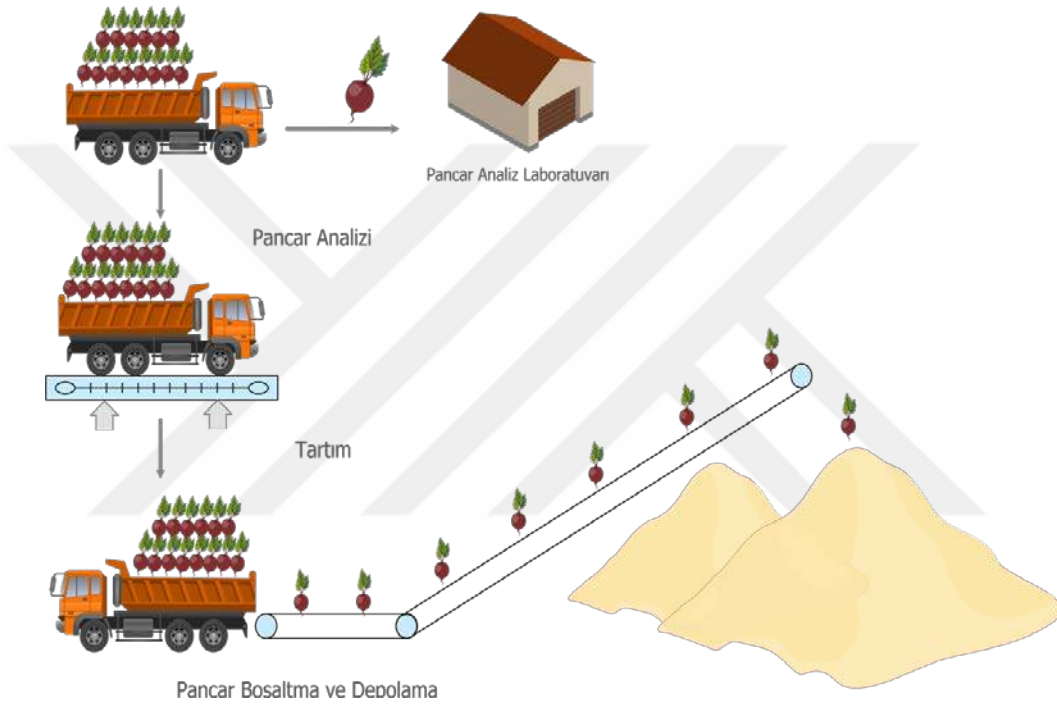
Şekil 2.1. Pancardan şeker üretimindeki temel süreçler (TŞFAŞ Yayınları, 2010)

2.2.1. Pancarların fabrikaya kabulü, boşaltılması ve silolanması

Şeker pancarı çiftçi tarafından traktör, kamyon, vb. araçlarla fabrikaya doğrudan getirilir ve her araç fabrika girişindeki kantarlarda tartılır. Tartım yapılan her araçtan

numune alınarak Pancar Analiz Laboratuvarında, pancarın şeker oranı ve getirilen ürünlerdeki toprak firesi tespit edilir. Kabule uygun bulunan pancarlar silolara alınır.

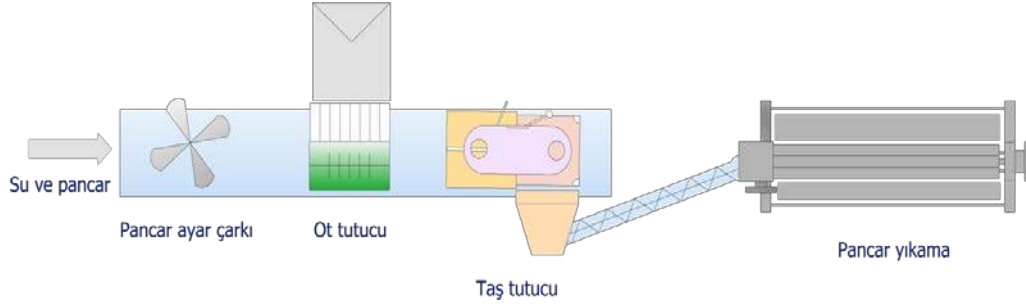
Fabrikaya gelen pancar ya mekanik yollarla ya da basınçlı su ile boşaltılır. Boşaltılan pancarlar, taşıyıcılar aracılığıyla silolara sevk edilir. Bu sistemlerde; yabancı maddelerin fabrikaya girmesini önlemek amacıyla pancardan toprak, taş, yaprak ve benzeri yabancı maddeler ayrıştırılır. Diğer boşaltma sisteminde ise fabrikaya gelen pancar basınçlı su ile pancar yüzdürme kanallarına boşaltılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Fabrikaya gelen pancarın boşaltılması (TŞFAŞ Yayınları,2010)

2.2.2. Pancarların silolardan fabrikaya sevk

Silolarda bulunan pancar, yüzdürme kanallarından fabrikaya genellikle su akışı yardımıyla sevk edilir (Şekil 2.3). Bazı tesislerde kuru yolla sevk yöntemi de kullanılmaktadır. Pancar yüzdürme kanalları vasıtasıyla fabrikaya sevk edilen pancar içindeki otlar kanallar üzerinde bulunan ot tutucuda, taşlar ise taş tutucuda ayrıştırılır.



Şekil 2.3. Pancarların silolardan tesise sevki (TŞFAŞ Yayınları,2010)

2.2.3. Pancarın yıkanması

Taşından, kumundan ve toprağından kısmen ayrılan pancar; döner kollu yıkama teknesinde 10-15 dakika döndürülerek yıkanır. Teknede yıkama görevini, hareketli bir mile bağlı olarak dönen aktarıcı, karıştırıcı ve atıcı kollar yerine getirir. Karıştırıcı kollar pancarın makine içinde hareketini sağlayarak, çamur ve yabancı maddelerden temizlenmesini, atıcı kollar ise yıkanmış pancarın çıkış helezonuna atılmasını sağlar. Yıkama teknesinin tabanındaki süzgeçten toprak, kum, pancar kuyruğu ve taşlar ayrılır.

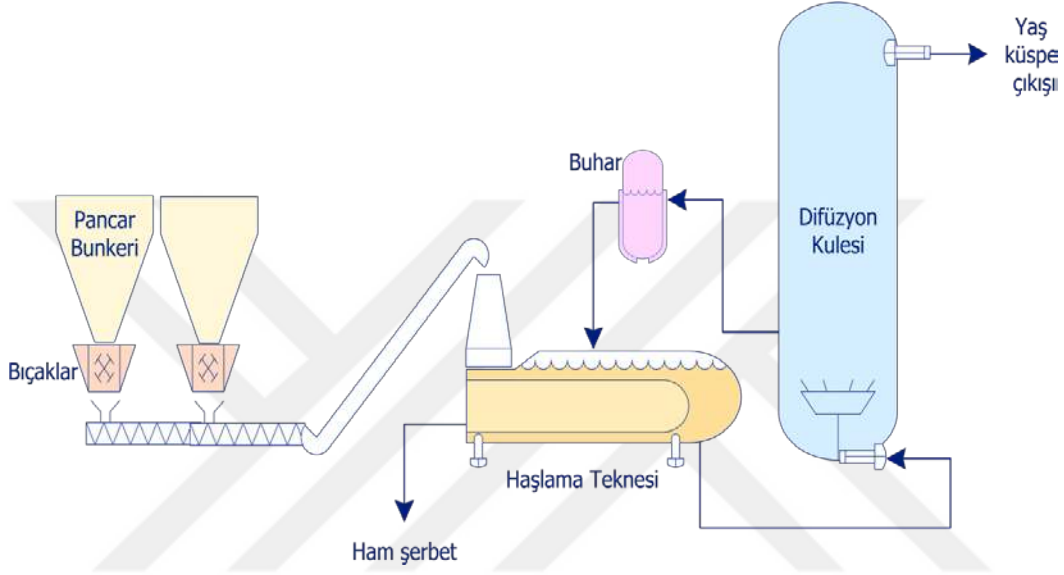
2.2.4. Pancarın kıyılması

Kıyım makinelerinde pancar tırtıklı cips şeklinde kıyılır. Pancar kıyım makineleri genellikle ekseni üzerinde dikilmiş silindirik bir bunker ve bu eksene dik dönebilen bir pancar kıyma tablasından oluşur. Bu tabla üzerinde bıçak gruplarını taşıyan pancar bıçak kasaları yerleştirilmiştir. Ağırlığı ile bıçaklara gelen pancar, dönen bıçaklar vasıtasıyla kıyım haline getirilir. Pancar bıçaklarında kıyılan pancar kıyımları nakil bandında sürekli otomatik kantarda tartılarak haşlama teknesine verilir. Bazı tesislerde dikey (tambur) tipi kıyım makinaları bulunmaktadır.

2.2.5. Pancarın haşlanması ve ham şerbetin eldesi

Kıyımlar silindirik bir kazan olan haşlama teknesine alınarak burada karıştırılır ve ısıtılır. Isıtma işlemi, Kule Difüzörü adı verilen dikey silindirik bir kazandan alınan sıcak sirkülasyon şerbeti ile yapılır. Haşlama teknesinde pancar kıyımları şerbetle karıştırılarak difüzyon kulesinin alt süzgecinin hemen üzerine basılır. Burada amaç kule içindeki sıcaklığın en uygun difüzyon sıcaklığı olan 70-72 °C'ye getirilmesi ve pancarın hücrelerini denatüre ederek şeker çıkışının sağlanmasıdır. Burada şerbetin pH'ı 5,8'in altına düşmemelidir. Kule içinde yatayla 30°'lik açı yapan dönen kanatlar vasıtasıyla

kıyımlar kulenin altından tepesine doğru, ham şerbet ise kulenin alt kısmına doğru ilerler. Kulenin üstünden şekeri alınmış yaş pancar posası helezon vasıtasıyla pancar posası preslerine verilir. Kıyımlar, kuleyi yaklaşık 60-75 dakikada terk eder. Kulenin alt ve yan süzgeçlerinden alınan sirkülasyon şerbeti tekrar haşlama teknesine verilir. Haşlama teknesine verilen şerbetin bir kısmı kıyım girişi tarafındaki alın süzgecinden ham şerbet olarak çekilerek arıtıma verilir. Bu işlemler Şekil 2.4’te görülmektedir.



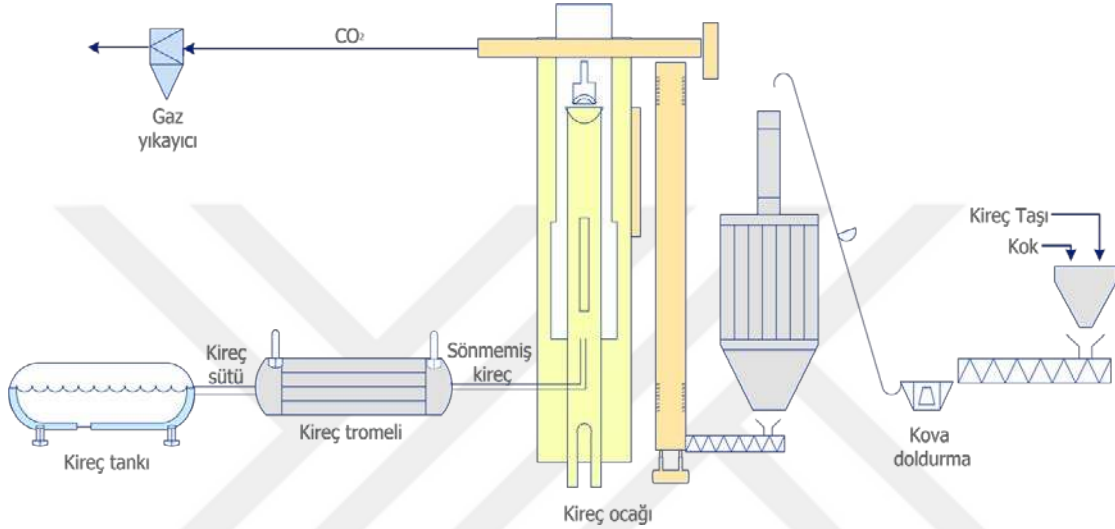
Şekil 2.4. Haşlama teknesi ve difüzyon kulesi (TŞFAŞ Yayınları, 2010)

Mekanik pres yöntemiyle sıkılarak kuru maddesi %18-22 seviyelerine çıkarıldıktan sonra satış için depolama sahasına veya kurutma ünitesine gönderilir.

2.2.6. Ham şerbetin kireçlenmesi

Ham şerbet bir tekne içinde kireçlenerek kademeli olarak pH 11’e getirilir. Burada amaç şerbet içindeki şeker dışı maddeleri çöktürmektir. Difüzyondan alınan ham şerbetin kuru maddesi %12-17, şeker yüzdesi %11-15 ve saflığı yaklaşık %84-89 civarındadır. I. Kireçleme denilen bu işlem altı bölmeli, tabandan biraz yüksekte olan “U” şeklinde levhalarla bölünmüş bir tekne içinde yapılır. Bu levhaların üst kısmında hareket edebilir kanatlar mevcuttur. Bu kanatlarla bölümler arasındaki şerbet geçiş hızı artırılıp azaltılabilir. Tekneyi baştanbaşına kat eden bir mil ve üzerinde her bölmeye ait kanatlar vardır. Teknenin bir ucundan ham şerbet verilerek bölmeden bölmeye ilerlerken, diğer ucundan alttan verilen kireç sütü $[Ca(OH)_2]$ sabit kanatların altından ters istikamette

ilerleyerek ham şerbete karışır (Şekil 2.5). I. Kireçleme pancara göre %0,2 kalsiyum oksit (CaO) içerir ve kireçleme süresi 20 dakika, sıcaklığı 65 °C, son bölmenin pH'ı ise 11 civarındadır. I. Kireçlemenin üçüncü bölmesine çökmeyi hızlandırıcı bir miktar (pancara göre %20) I. Karbonatlama şerbeti (geri alınan şerbet) eklenir.



Şekil 2.5. Ham şerbetin I. Kireçlemesi (TŞFAŞ Yayınları, 2010)

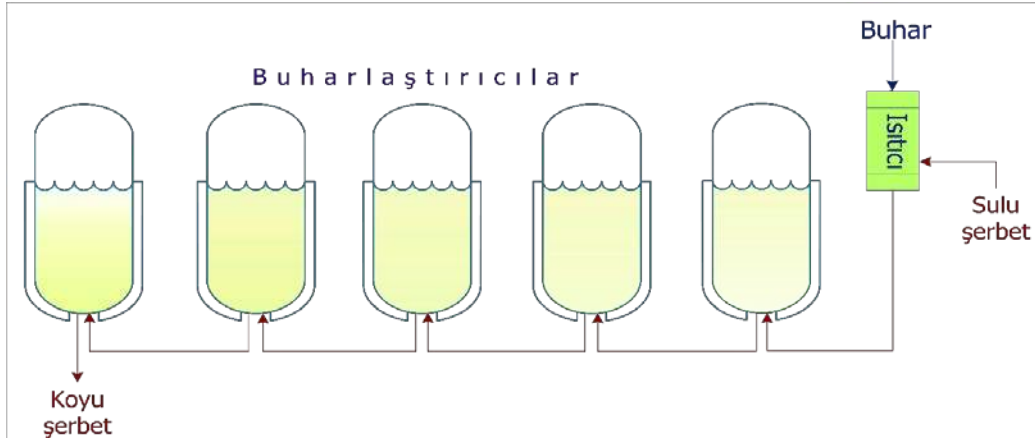
Birinci kireçleme sonunda şeker dışı maddeler pıhtılaşmış ve süzölmeye hazır hale gelmiştir. Sıcaklık 86-88 °C, CaO miktarı %1,2, pH'ı 12,6, süre ise 10-15 dakikadır. I. Kireçlemeden çıkan şerbet II. Kireçleme teknesine alınır, burada II. Kireçleme yapılarak şerbet içindeki invert şeker parçalanır ve bakteri faaliyeti durdurulur.

2.2.7. Ham şerbetin karbonatlanması

I. ve II. Kireçlemeden geçen ham şerbet 80-82 °C'de I. Karbonatlamaya gelir. Karbonatlama kazanı silindirik bir kuleye benzemekte olup, ters akım prensibine göre çalışmaktadır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi kireçlenmiş şerbet üstten, karbondioksit gazı ise alt kısımdan verilir. Çökme işlemi tamamlanmış şerbet karbonatlama kazanının alt kısmından alınır. Karbonatlanma için gerekli olan karbon dioksit (CO₂) gazı kireç üretimi yapan yan tesisten temin edilir. I. Karbonatlamaya pH'ı 12 olarak gelen kireçli şerbet I. Karbonatlamayı 10,8- 11,2 arasındaki pH değeriyle terk eder. I. Karbonatlama sonrası çamurlu şerbet, yoğunluk farkı dolayısıyla çamur parçacıklarının dibe çökmesi ilkesine

2.2.8. Şerbetin koyulaştırılması

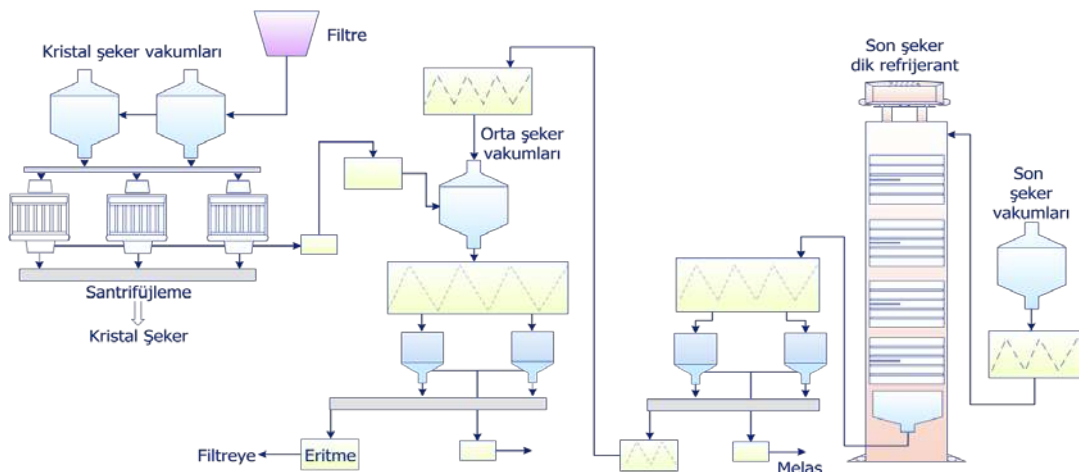
9



Şekil 2.7. Şerbetin koyulaştırılması (TŞFAŞ Yayınları,2010)

2.2.9. Koyu şerbetin rafinasyonu

Rafineride ilk işlem %60-65 kuru maddeli koyu şerbetin süzülmesidir. Bu işlem için basınçlı filtreler kullanılmaktadır. Basınçlı filtre delikli silindirik elemanlar üzerine bez takılmış kapalı silindirik bir aparatır. Üzerleri bez kaplanmış süzme elemanları süzmeden önce kaplama maddesi perlit ile sıvanır ve daha sonra filtre yardımcı maddesi (perlit) katılmış koyu şerbet bu elemanlardan süzülür. Şerbet yandan aparata verilir. Silindirik süzme elemanlarının içinden geçerek üstten temiz olarak alınır. Kirlı şerbet tarafında basıncın yükselmesi, temiz şerbet debisinin düşmesi filtre süzme alanının tıkanıldığını (kirlendiğini) gösterir. Süzme bitirilip, kirlenen süzme elemanları şerbet akışı yönünün tersinden hava-su verilerek yıkanıp temizlenir. Basınçlı filtrelerin süzme yüzeyleri şeker fabrikasının pancar işleme kapasitesine bağılı olarak değişmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Koyu şerbetin rafinasyonu (TŞFAŞ Yayınları,2010)

Süzülen şerbete daha sonra kristalizasyon işlemi uygulanır. Kristalizasyon işlemi; vakum altında çalışan ve bir buhar kamarası aracılığıyla ısıtılan, dikey silindir kazanlarda yapılır. Pişirim aparatı; Şurup kamarası, Buhar kamarası ve Mekanik karıştırıcıdan oluşur.

Pişirim başlangıcında önce buhar kamarasının üstüne kadar pişirim için gerekli şurup kazana çekilir ve buharlaştırılarak aşırı doymun hale gelinceye kadar koyulaştırılır. Aşırı doymun şuruba pudra şekeri maya olarak verilerek kristal taneleri oluşturulur ve koyulaştırmaya devam edilerek bu taneler büyütülür. Pişirim süresince lapa sürekli karıştırılır. Lapanın kuru maddesi %92-94'e gelince pişirmeye son verilip, aparatın alt kapağı açılarak lapa soğutuculara alınır. Kristal lapa pişirimi için 3. buharlaştırıcının şerbet buharı kullanılır. Pişirim cihazlarında vakum, çıkan brüdenin (şerbet buharı) kondenser denilen cihazlarda soğuk su ile yoğunlaştırılmasıyla elde edilir.

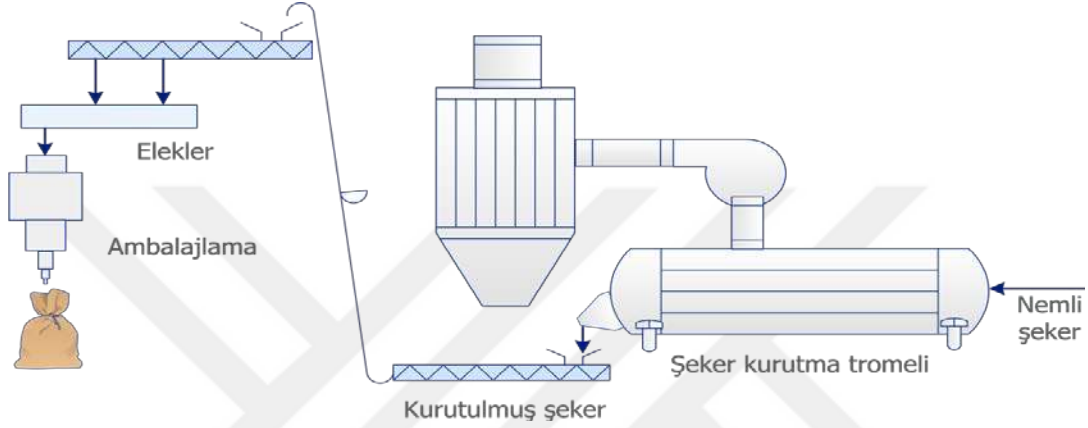
Kristal şeker lapası soğutuculara alınır. Soğutucular şeker fabrikasının pancar işleme kapasitesine bağlı olarak farklı ebatlarda olup, çoğunlukla çapları 2,5 metre, boyları 9 metre olan U şeklinde teknelerdir. Soğutuculardaki lapa, santrifüjlerin ihtiyacı kadar bir debi ile santrifüjlere işlenmek üzere sevk edilir. Tekneye alınan lapa donmaması için sürekli karıştırılır. Kristal lapa içindeki sakaroz kristallerinin ayrılması işlemi santrifüjlerde yapılır. Santrifüj üstten bir motorla çevrilen etrafı delikli levhayla kaplı silindirik yapıya sahiptir. Lapa santrifüjlendiğinde kristaller silindirin içinde kalırken şurup dışındaki gövdeye savrulur ve buradan depoya gönderilir. Şurubu ayrılan şeker kristalleri su ve buhar püskürtülerek yıkanır ve kurutma ünitesine gönderilir.

Orta şeker lapası pişirimi kristal lapa şurupları ile yapılır. Sürekli santrifüjler kullanılmaktadır. Santrifüjden çıkan orta şeker, standart şurup hazırlama teknesinde koyu şerbetle eritilerek, standart şurup elde edilir.

Orta şekerin şurupları son şeker pişirim aparatına alınır. Son şekerde pişirim süreleri kristal ve orta şekerle göre çok daha uzundur. Son şeker soğutucularına indirilen lapanın şurubunda kalan şekerin bir kısmı da, lapanın bu soğutucularda 25-35 saat soğutulması ile kazanılır. Sürekli santrifüjlerde ayrılan şeker, orta şekerle birlikte eritilerek kristal lapa pişiriminde kullanılır. Ayrılan şurup ise melas olarak isimlendirilir. Bu şurupta hala %50 oranında şeker vardır. Ancak, bu şekeri geri kazanmak ekonomik değildir. Bu nedenle etil alkol, maya, sitrik asit üretiminde ve yem sanayiinde kullanılmaktadır.

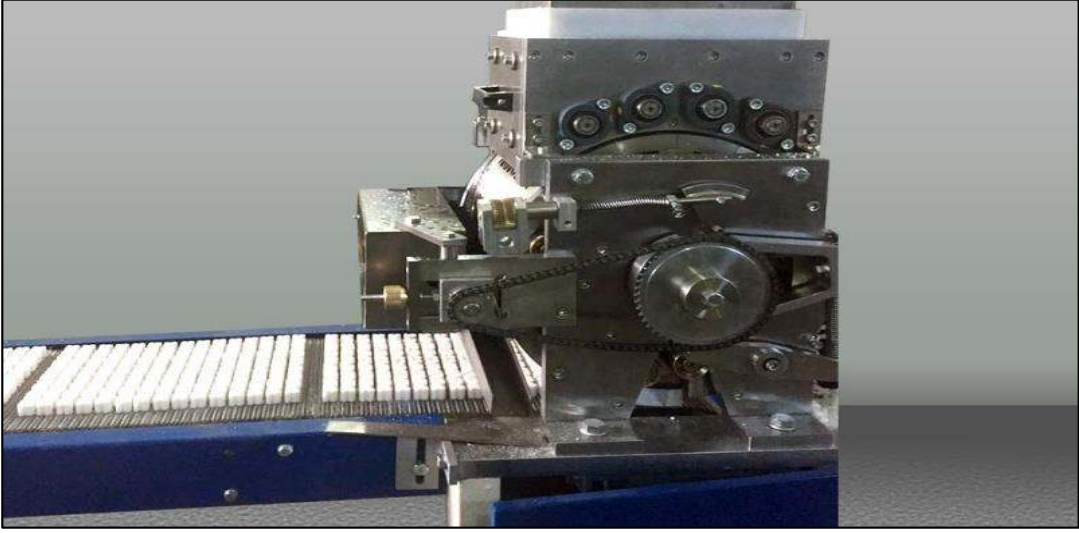
2.2.10. Şekerin kurutulması ve ambalajlanması

Santrifüjlerden çıkan şeker kurutma ünitesine nakledilir. Karıştırılarak sıcak hava ile kurutulan şeker soğutularak kristal şeker bunkerine gider. Kristal şeker depoya girmeden önce elenir. Artık kristal şeker elde edilmiş olup, ambalajlama işlemine hazırdır. Bunkerin alt kısmında hassas kantarda tartılır; 1, 2, 5, 25 ve 50 kg'lık polipropilen ambalajlarda veya 500 ve 1000 kg'lık dökme (big bag) olarak satışa sunulur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Şekerin kurutulması ve ambalajlanması (TŞFAŞ Yayınları, 2010)

Küp şeker üretiminde ise dökme kristal şeker üzerine su püskürtülerek nemlendirilip (% 2-3 su), kalıplar içinde istenilen ebatlarda preslenerek küp şeker haline getirilir (Şekil 2.10). Paslanmaz çelik hasır banda dökülen preslenmiş küp şekerler, kurutma ve soğutma tünellerinden geçirilerek dolum robotuna gelir. Burada küp şekerlerin boş kutulara otomatik olarak, istenilen sıra halinde, el değmeden dolumu yapılır. Dolum robotundan çıkan dolu kutular, kutu kapama makinesine giderek ağzı kapatılıp yapıştırılarak paketlenmiş olur.



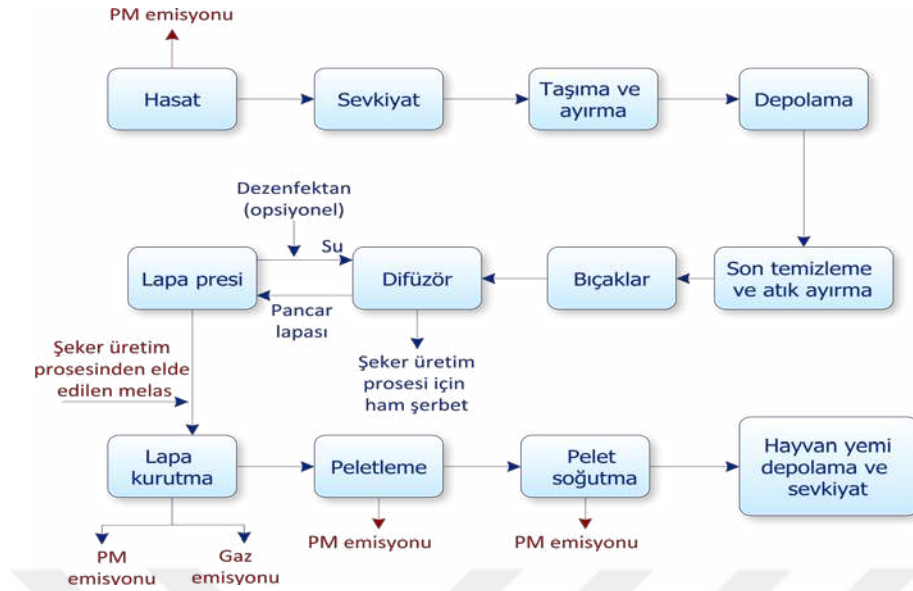
Şekil 2.10. *Küp şeker üretimi (TŞFAŞ Yayınları,2010)*

2.2.11. Pancar posasının (küspenin) kurutulması

Difüzyon kulesinden çıkan pancar posası (küspe) %9-10 kuru madde içerir. Mekanik pres yöntemiyle sıkılarak kuru maddesi %18-22 seviyelerine çıkarılır. Bazı tesislerde mevcut haliyle satış için depolama sahasına sevk edilirken bazı tesislerde de kurutulduktan sonra satıldığı için kurutma ünitesine gönderilir. Kurutulmuş küspe, nemli küspeye göre daha uzun sürelerde depolanabilir.

Küspe kurutma işlemi genellikle sıcak hava, baca gazı veya buhar ile yapılmaktadır. Hava veya baca gazı ile kurutma yapılırken, önce kurutma gazı ısıtılır, sonra da yaş küspe ile temas ettirilir. Bu esnada sıcak ve kuru olan hava, su buharına doyuncaya kadar süreçte işlem görür. Kurutma üç farklı şekilde yapılabilir. Bunlar düşük sıcaklıkta kurutma, yüksek sıcaklıkta kurutma ve iki aşamalı kurutmadır.

Pancardan şeker üretiminde küspe oluşumu ve kurutma işlemi akım şeması Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Küspe oluşumu ve kurutma işlemi akım şeması (TŞFAŞ Yayınları, 2010)

2.2.12. Alkol üretim tesisi

Şeker fabrikalarının küspe ile beraber diğer bir yan ürünü melastır. %50 oranında şeker içeren bir şurup olan melastan şekeri geri kazanmak ekonomik olmadığı için, etil alkol, maya, sitrik asit üretiminde ve yem sanayiinde kullanılmaktadır. Bazı şeker fabrikalarında da melastan etil alkol üretimi tesisi bulunmaktadır.

Etil alkol üretiminde, melastaki şekeri parçalamak için alkol mayaları kullanılmaktadır. Bu üretimde öncelikle alkol mayaları çoğaltılıp şekerin mayalar tarafından fermentasyonu sağlanır. Fermentasyon kazanlarında %5-8 arasında alkol oluşur. Distilasyon işlemi ile etil alkol konsantre edilir.

2.2.13. Şeker üretiminin çevresel etkileri

Toz, yanma ürünleri ve UOB, şeker pancarından şeker üreten tesislerden yayılan başlıca kirleticilerdir. Tesislerin enerji ve buhar ihtiyacını karşılayan yakma kazanları, prosese hammadde sağlayan kireç fırınları, proste kullanılan buharlaştırıcılar ve soğutucular ile şeker pancarının taşıma ve boşaltma ekipmanları potansiyel emisyon kaynaklarıdır.

Kireç ocağında kullanılan kok kömürü, kireç taşıyı 850-900 °C'ye ısıtarak, kireç ve karbondioksit ayırtmak amacıyla kullanılmaktadır. Sonrasında kireç, su ile söndürülerek, şerbet arıtımında kullanılmak üzere kireç sütü hazırlanır. Yanma sonrası

oluşan atık gazlar (CO₂) atmosfere verilmeyip, şerbet arıtımında kullanılan kirecin fazlasının çöktürülmesinde kullanılır. Dolayısıyla atmosfere doğrudan herhangi bir gaz verilmemektedir. Ancak kireçtaşı ve kömürün taşınması, boşaltılması ve depolanması esnasında toz emisyonları oluşabilmektedir.

Şeker üretim prosesinde kullanılan yüksek miktardaki buhar, tesis içindeki buhar santralinde üretilir. Şeker fabrikalarında yüksek basınçlı kızgın buhar üreten kazanlar kullanılmaktadır. Bu nedenle, genellikle tesislerde buhar türbini de yer almakta ve tesisin elektrik enerjisi buradan karşılanmaktadır. Kazanlarda yakıt olarak kömür, fuel-oil ve doğal gaz kullanılmaktadır. Kazan bacalarından yakıt türlerine bağlı olarak toz, yanma ürünleri ve UOB emisyonları atmosfere verilmektedir.

Karbonatlama ünitelerinde oluşan emisyonlar genellikle su buharı olmakla birlikte az miktarda amonyak (NH₃) ve UOB, ayrıca kireç ocağından CO₂ ve diğer yanma gazlarını da içerebilir. Buharlaştırıcılar, potansiyel bir CO₂, NH₃ ve UOB emisyonu kaynağı olabilir.

Şerbetin buharlaştırılması sırasında pancarın bünyesinden gelen α -amino azotu yüksek sıcaklıkta parçalanarak amonyaka dönüşür. Buhar kamerasında oluşan buharlar kapalı bir sistemle toplanarak bir yoğunlaştırucuya (kondenser) gönderilir. Kondenserde soğutma suyu ile su buharının ve oluşan diğer gazların (NH₃) yoğunlaşması sağlanır. Hava ve yoğunlaşmayan gazlar atmosfere atılır. Bu gazlar amonyak emisyonu içerir. Pancar posasının (küspenin) kurutulduğu tesisler diğer bir önemli emisyon kaynağıdır. Kurutma işlemi sırasında yüksek miktarda su buharı ile birlikte, toz ve UOB emisyonları oluşmaktadır. Ayrıca kurutma için ilave yakıcıların bulunması durumunda yanma kaynaklı emisyonlar da (Toz, CO, SO₂, NO_x, vb.) oluşacaktır.

3. TEMİZ ÜRETİM VE ŞEKER ÜRETİMİNDE UYGULAMALARI

Temiz üretim, atıkların kaynağında azaltılmasını, hammadde ve enerji verimliliğinin artırılmasını ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin en aza indirilmesini amaçlayan bütüncül bir üretim yaklaşımıdır. UNEP'in 2001 yılında yayımladığı "Cleaner Production: A Guide to the United Nations Environment Programme's Approach" raporuna göre temiz üretim; ürün, süreç ve hizmetlerin çevresel etkilerini azaltan, insan sağlığı ile ekosistem üzerindeki riskleri düşüren önleyici bir stratejidir (UNEP, 2001).

Üretim Süreçlerinde;

- Hammadde, su ve enerji kullanımının daha verimli hâle getirilmesi,
- Toksik hammadde kullanımının azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması,
- Oluşabilecek atık ve emisyonların kaynağında önlenmesidir.

Ürünlerde;

- Daha az hammadde ve enerji tüketen ürün tasarımı,
- Daha uzun ömürlü ürün geliştirilmesi,
- Yeniden kullanılabilen veya geri dönüştürülebilen ürün tasarımı,
- Çevresel etkisi düşük ambalaj kullanımıdır.

Hizmetlerde;

- Çevresel etkilerin en aza indirileceği şekilde hizmet sunumu,
- Kaynak kullanımının ve atık oluşumunun azaltılmasıdır (örneğin, enerji verimli lojistik, çevre dostu turizm).

1970'lerde 3M'in 3P programıyla başlayan önleyici yaklaşım anlayışı, zamanla UNEP ve UNIDO tarafından küresel ölçekte yaygınlaştırılmıştır. Ancak literatürde yapılan çok sayıda değerlendirme çalışması, temiz üretimin teori ve uygulama arasında önemli bir boşluk yaşadığını, birçok işletmede seçeneklerin tespit edilmesine rağmen uygulamaya geçiş oranının düşük kaldığını göstermiştir. Dieleman makalesinde, dört temel inovasyon perspektifi üzerinden temiz üretim uygulamalarının neden sınırlı kaldığını analiz eder. Bunlar;

- Öğrenme ve değişim süreci olarak inovasyon: Yeni teknolojilerin uygulanması doğrusal değil; öğrenme, uyarılma ve pratik deneyim gerektirir. Çoğu TÜ projesi uygulama aşamasını işletmelere bıraktığı için gerçek dönüşüm gerçekleşmemektedir.

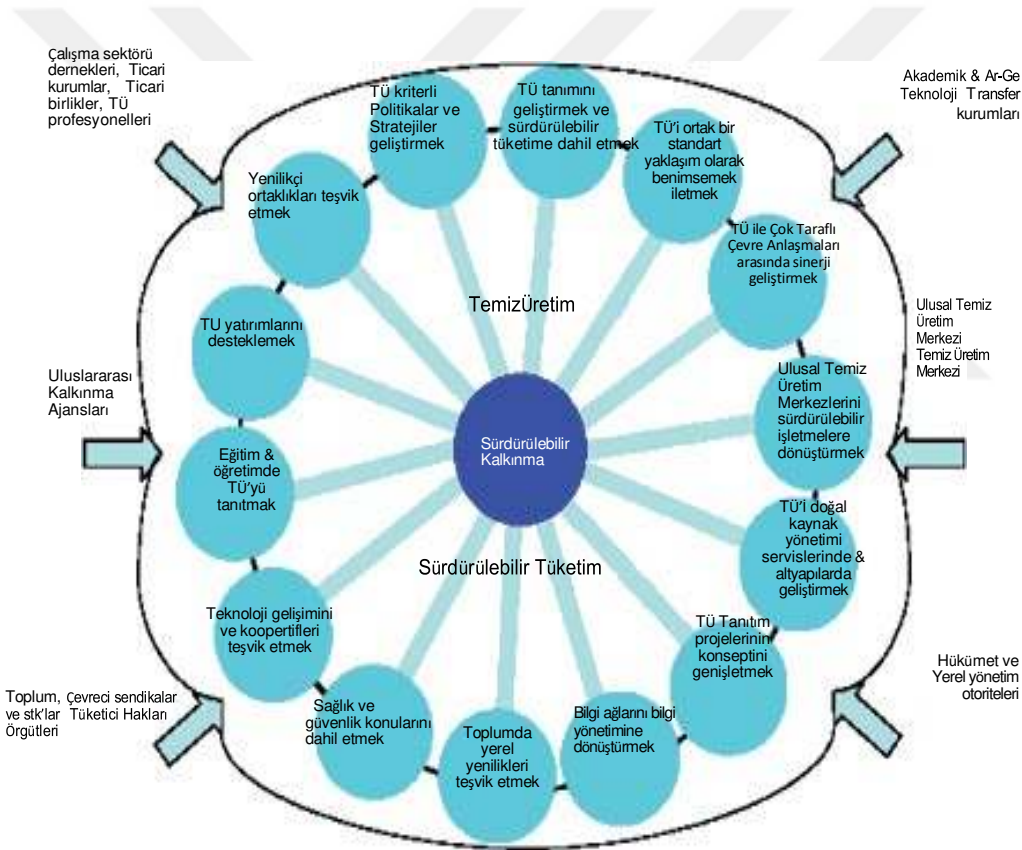
Teknolojik rejimler ve kurumsal bağımlılık: End-of-pipe (baca filtresi vb.)

çözümleri yıllarca standart hale geldiği için işletme ve kurumlar bu yaklaşımda

kilitlenmiştir. Temiz üretim perspektif değişimi gerektirir ancak mevcut rejimler bunu engeller.

Yenilik difüzyonu: Rogers'ın inovasyon eğrisine göre temiz üretim hâlen erken benimseyenler aşamasındadır. Devlet, birlikler ve kurumlar değişim ajanı olarak yeterince rol almamaktadır.

- Sosyo-teknik dönüşüm ve çeviri: Yeni teknolojiler hayata geçerken insanlar, roller ve ilişkiler de dönüşmelidir. Çalışanların yeni süreçlere uyum sağlayamaması, yeni rollerin belirsizliği veya teknik dışı bariyerler uygulamayı engeller.



Şekil 3.1. UNEP'in Tü Stratejik İşletme Birimlerine ait stratejik çerçevesi (UNEP, 2002)

Temiz üretim yalnızca teknik çözümler bütünü değildir. Gerçek dönüşüm ancak organizasyonel öğrenme, paydaş katılımı, kurumsal düzenlemelerin yenilenmesi ve sosyo-teknik çeviri süreçlerinin birlikte ele alınmasıyla mümkündür. Şeker sektörünün çevresel etkilerini azaltması, maliyetlerini düşürmesi ve rekabetçiliğini artırması için sosyal deney yaklaşımı önemli bir fırsat sunmaktadır (Dieleman, 2007).

UNEP'in temel ilkeleri:

- Önleyicilik (Prevention): Kirlilik oluştuktan sonra değil, oluşmadan önce önlenmesi.
- Bütünsellik (Integration): Çevresel etkilerin ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca dikkate alınması.
- Sürdürülebilirlik (Sustainability): Ekonomik, çevresel ve sosyal faydanın birlikte gözetilmesi.
- Sürekli İyileştirme (Continuous Improvement): Temiz üretim sürekli gelişmeyi hedefleyen bir süreçtir.

Temiz üretim, kaynakların aşırı tüketimi ve atık emisyonların önlenmesine odaklanan proaktif bir yaklaşımdır. Son 25 yılda, özellikle AB’de, “kirlilik kontrolü” çabalarının yanında “kirliliği önleme” yaklaşımları da ön plana çıkmış ve çevresel mevzuata entegre olmuştur. 1996 Yılında AB’de yayımlanan IPPC 96/61/EC Direktifi, 2010’da revize edilerek yedi ayrı direktifi kapsayan Sanayi Emisyonları Direktifi’ne dönüştürülmüştür (2010/75/EU). Bu direktif, sanayi kaynaklı kirliliğin önlenmesinde BAT uygulanmasını esas alır (EC, 2003). Direktifin 2(11). Maddesinde BAT, “emisyonların önlenmesinde veya mümkün değilse azaltılmasında temel oluşturan, faaliyetlerin ve işletme yöntemlerinin en etkili ve en ileri aşamasını” ifade eder. AB, IPPC Ofisi tarafından sektörel BAT referans belgeleri (BREF) hazırlanmakta, bu belgelerde BAT’ların sektörlere özel uygulamaları detaylandırılmaktadır.

Temiz üretimin faydaları hem çevresel, hem ekonomik, hem de sosyal boyutlarda olabilmektedir.

Çevresel Kazanımlar:

- Atık ve emisyonların azalması: Kirlilik kaynağında önlendiği için hava, su ve toprak kirliliği önemli ölçüde azalır.
- Doğal kaynakların korunması: Enerji, su ve hammadde tüketiminde ciddi tasarruf sağlanır.
- Ekosistem üzerindeki baskının azalması: Daha az atık ve daha verimli üretim, biyolojik çeşitliliğin korunmasına katkı sağlar.

Ekonomik Kazanımlar:

- Maliyetlerin düşmesi: Enerji, su ve hammadde tasarrufu doğrudan üretim maliyetlerini azaltır.

- Atık bertaraf maliyetlerinde azalma: Oluşan atık miktarı azaldıkça bertaraf ve arıtma maliyetleri de düşer.
- Ürün kalitesinde artış: Süreç optimizasyonu ve teknoloji iyileştirmeleri ürün kalitesini artırır.
- Yeni pazar fırsatları: Çevre dostu üretim, ihracatta avantaj sağlar ve marka değerini yükseltir.

Sosyal Kazanımlar:

- Toplum sağlığına katkı: Daha az emisyon ve atık, toplumun maruz kaldığı çevresel riskleri azaltır.
- Çalışan sağlığı ve güvenliği: Tehlikeli maddelerin azaltılması ve risklerin minimize edilmesi iş güvenliğini artırır.
- Kurumsal imaj ve toplumsal kabul: Temiz üretim yapan firmaların, toplum ve yatırımcıların gözünde imajları artar.

Yasal ve Stratejik Kazanımlar.

- Mevzuata uyum kolaylığı: Temiz üretim uygulamaları işletmelerin mevzuata uyumunu kolaylaştırarak ceza riskini azaltır.
- Sürdürülebilirlik hedeflerine katkı: Uzun vadede iklim değişikliğiyle mücadele ve karbon ayak izi azaltma politikalarıyla uyum ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlar.

3.1. Temiz Üretimde Kullanılan Yaklaşımlar

Temiz üretimde kullanılan yaklaşımlar, işletmelerin çevresel etkilerini azaltmak ve kaynak verimliliğini artırmak için geliştirilmiş sistematik yöntemlerdir. Öncelikle detaylı veri toplanması ve sonra uygulanacak yaklaşımlarla temiz üretim çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerekir. Toplanması gereken belli başlı veriler şu şekildedir (LaGrega, 2001):

- Atığın kaynakları
- Üretim hızı
- Fiziksel özellikleri
- Kimyasal özellikleri
- Mevcut atık yönetim metotları ve maliyetleri
- Proses akım diyagramları
- Malzeme ve enerji denklikleri (tasarım ve gerçek)

- İşletme kılavuzları ve süreç tanımları
- Ekipman listesi
- Üretim kayıtları
- Bakım kayıtları

Genel olarak uygulanan yaklaşımlar üç ana başlık altında toplanır:

Süreç Odaklı Yaklaşımlar (Process-Oriented Approaches)

Üretim süreçlerinin kendisini optimize etmeyi amaçlar.

- İyi Yönetim Uygulamaları (Good Housekeeping)

Basit ve düşük maliyetli iyileştirmelerle kaynak kaybı önlenir. Örneğin; düzenli bakım, kaçakların engellenmesi, süreç parametrelerinin optimize edilmesi.

- Proses Optimizasyonu (Process Optimization)

Sürecin daha az enerji, su ve hammaddeyle çalışacak şekilde iyileştirilmesi. Örneğin; Enerji geri kazanım sistemlerinin kurulması, üretim hatlarının modernize edilmesi.

- Hammadde ve Yardımcı Madde Değişimi (Input Substitution)

Tehlikeli ya da çevreye zararlı girdilerin yerine daha çevre dostu alternatifler kullanmak. Örnek olarak; toksik kimyasallar yerine biyolojik olarak parçalanabilir temizlik maddeleri kullanmak.

- Ekipman ve Teknoloji Değişimi (Equipment/Technology Modification)

Yeni, daha temiz ve daha verimli teknolojilerin kullanılması. Örnek: Geleneksel buharlaştırma yerine çok kademeli buharlaştırma veya membran teknolojileri.

- Çevre Yönetim Sistemleri ve Sürekli İyileştirme Araçları

ISO 14001, EMAS gibi sistemlerin kurulması, Kaizen, 5S, TPM gibi verimlilik artırıcı yöntemlerle entegre yönetim.

Ürün Odaklı Yaklaşımlar (Product-Oriented Approaches)

Ürünlerin tüm yaşam döngüsünü dikkate alır.

- DfE

Ürün, üretimden bertarafa kadar çevre dostu olacak şekilde tasarlanır. Örnek: Ambalajlarda geri dönüştürülebilir malzeme kullanmak.

- LCA

Ürünün hammadde eldesinden kullanım sonrası bertarafına tüm aşamalarının çevresel etkileri analiz edilir.

Atık ve Yan Ürün Odaklı Yaklaşımlar (Waste and By- Product Approaches)

- Atıkların Yeniden Kullanımı ve Geri Dönüşümü (Reuse and Recycling)

Süreç içi veya süreçler arası geri dönüşüm. Örnek: Şeker üretiminde küspeyi hayvan yemi olarak değerlendirmek.

- Yan Ürünlerin Değerlendirilmesi (By-product Recovery)

Üretimden çıkan yan ürünlerin başka süreçlerde hammadde olarak kullanılması. Örnek: Melasın etanol ya da maya üretiminde değerlendirilmesi.

- Su ve Enerji Verimliliği Uygulamaları

Enerji: Kojenerasyon sistemleri, yüksek verimli motorlar, atık ısı geri kazanımı.

Su: Kapalı devre su sistemleri, süreç içi suyun geri kazanımı, damla damla kontrol.

3.2. Şeker Üretiminde Temiz Üretim Uygulamaları

Türkiye’de, ılıman iklim koşullarının etkisiyle şeker üretiminin ana ham maddesi şeker pancarıdır. Türkiye, 2025 Temmuz ayı verilerine göre 23 milyon ton/yıl pancar üretimi ile toplam Dünya üretiminin % 7,28’ini oluşturmaktadır. 2024-2025 kampanya sonuçlarına göre ülkemiz, pancardan şeker üreten ülkeler arasında 3,1 milyon ton/yıl ile Dünyada 5. Avrupa da 4. durumdadır. Bu sıralama yüksek üretim kapasitesi, geniş ekim alanları, etkin üretim yönetimi ve yıllara yayılan deneyimin bir sonucudur. Yaklaşık 23 milyon tonluk pancar üretimi ve 3,1 milyon tonluk yıllık şeker üretimi, Türkiye’yi küresel şeker arz zincirinde stratejik bir üretici konumuna taşımaktadır. Ülkemizde kişi başı şeker tüketimi yaklaşık 31 kg/yıl dır. Şeker sanayiinin, GSMH olarak Türkiye genelindeki payı % 0,2, imalat sanayii içindeki payı ise % 0,8 düzeyindedir. Üretim, ihracat ve ithalat değerleri olarak sırasıyla;

- Gıda sanayii içindeki payı: %11,6, %11,5, %2,1,
- İmalat sanayii içindeki payı: %2,2, %1,3, %0,07,
- Türkiye geneli içindeki payı. %1,6, %1,2, %0,06

Şeker endüstrisi, gıda sektörünün temel yapı taşlarından birisidir. Ancak üretim süreci yoğun enerji, su ve kimyasal tüketimi içerdiğinden, çevreye önemli derecede atıksu, katı atık ve emisyon bırakır. Bu nedenle temiz üretim stratejileri bu sektörde çevresel sürdürülebilirliği sağlamak, kaynak verimliliğini artırmak ve maliyetleri azaltmak açısından kritik öneme sahiptir. Şeker üretiminde temiz üretim seçeneklerinin anlaşılabilmesi için yan ürünler ve emisyonlar açıklanmıştır.

Tablo3.1. Türkiye Şeker Sektörü – Özet Tablo (Temmuz 2025)

Gösterge	Değer (yaklaşık)	Yıl / Dönem	Kaynak
Şeker pancarı üretimi	23,0 milyon ton/yıl	2024	TÜİK 2024
Şeker pancarı üretimi	23,5 milyon ton	2023	TEPGE 2024
Şeker üretimi	3,1 milyon ton/yıl	MY 2024/25 – 2025/26	USDA FAS 2025 / ISO
Dünya sıralaması	5.	FAO 2022–2023	FAO / EJONS
Avrupa sıralaması	4.	FAO 2022	FAO / EJONS / TZOB

3.2.1. Üretilen yan ürünler

Şeker üretiminin iki önemli yan ürünü melas ve küspedir.

Melas: Şeker fabrikalarının en önemli yan ürünüdür. Kahverengi renkte olan ve vizkozitesi yüksek olan bu sıvının kuru madde içeriği %80 civarındadır. Bunun %60'ı şeker, %20'si organik maddeler ve tuzlardır. Bileşiminde sakkaroz, invert şeker, rafinoz, pektinin parçalanma ürünleri, laktik asit ve azotlu maddeler yer alır. Melas ispirto ve ekmek mayası üretiminde ve doğrudan doğruya hayvan yemi olarak kullanılır.

Küspe: Difüzyondan çıkan şekeri alınmış pancar kıyımlarına küspe adı verilir. Küspe yaş ve kuru olarak paketlenir.

3.2.2. Emisyonlar

Katı atık olarak oluşan karbonatlama çamuru, kireçleme ve karbonatlama sonucu oluşup çöken çamurun pres filtrelerden geçirilmiş son halidir. Karbonatlama çamurunun fiziko-kimyasal ve besin maddesi içeriği Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Örnek karbonatlama çamuru içeriği

Parametre	Birim	Analiz Sonucu
Nem	%	30
Toplam Organik Karbon	mg/kg	15200
Toplam Çözünmüş Karbon	mg/L	95
Toplam Çözünmüş Katı	mg/L	534
pH		8,6
İletkenlik	µs/cm	600

Şeker fabrikalarının atıksuları genel olarak yüksek organik madde kirliliği içermektedir (Tablo 3.3.).

Tablo 3.3. Örnek şeker fabrikası atıksu özellikleri (arıtım öncesi)

Atıksuyun Cinsi	pH	KOİ (mg/L)	BOİ ₅ (mg/L)	TAKM (mg/L)	Ntoplam (mg/L)	P toplam (mg/L)
Pancar toprağı sevk suyu	6,81	4700	3500	-	55	2,60
Çöktürülmüş filtrasyon Çamuru suyu	7,2	8400	5200	450	-	-
Filtre torbası yıkama suları	9,7	8100	5100	-	-	-
Fabrika temizlik suları	7,4	6900	4500	550	58,5	1,45

Yaklaşık yılda 500 bin ton pancar işleyen ve yakıt olarak doğal gaz kullanan bir fabrikanın baca gazı emisyonları ise (%3 oksijen düzeltmesiyle) Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Örnek baca gazı emisyonları

Isıl Güç MW	CO mg/Nm ³	NO mg/Nm ³	NO ₂ mg/Nm ³	SO ₂ mg/Nm ³	Toz mg/Nm ³
43,10	63,89	64,71	104,10	0,00	7,33
14,37	0,00	117,8	180,63	0,00	1,88

3.3. Şeker fabrikalarında temiz üretim olanakları

Şeker sektörü enerji yoğun bir endüstridir; pancar işleme, difüzyon, kireçleme, filtrasyon, buharlaştırma ve kristalizasyon aşamalarında önemli kaynak tüketimi bulunmaktadır. Temiz üretim çerçevesinde sektöre yönelik temel fırsatlar mevcuttur.

Hammadde kullanımı ve verimlilik: Pancarın tarladan sökülmesi, fabrika silo sahasına nakli ve yüzdürme kanalları vasıtasıyla bunkerlere taşınması sırasında, mekanik etkilere bağlı olarak oluşabilecek deformasyonların (kırıntı, pülp, çatlak vb.) önlenmesine dikkat edilmelidir. Yüzdürme ve yıkama sırasında pancar dış yüzeyinde oluşabilecek bu deformasyon, bünyesinde bulunan şekerin suya geçmesini kolaylaştırır ve bir miktar şeker kaybına neden olur. Pancarın üzerindeki çamur, toprak vb. maddeler, yüzdürme ve yıkama esnasında suya karışarak brückner havuzuna gönderilir ve bu havuzda çöktürülerek çamurundan ayrılan su, pancar yüzdürmede ve yıkamada kullanılmak üzere

sisteme geri alınır. Çöktürülmüş olan %10 kuru maddeli çamurlu su ise atıksu arıtma tesisine iletiildiği için, içerisindeki şeker miktarı arıtma tesisine fazladan yük gelmesine neden olur. Tarladan sökülüp, işlenmek üzere prosese alınana kadar pancara verilen zarar azaltılırsa, şeker kaybı da azalacaktır. Bu azalma, arıtma tesisine gelen organik yükün azaltılarak, arıtımın kolaylaştırılmasını, dolayısıyla arıtma maliyetinin de düşmesini sağlayacaktır

Su yönetimi: Difüzyona geri alınan küspe prese suyunun kullanılması artırılmalıdır. Küспенin preslenmesinden kazanılan su, difüzörlere geri verilerek hem enerji verimliliği, hem su tasarrufu sağlanabilir. Küspe kurutularak ya da kısmen melas ile karıştırılarak (%5-15) çiftlik hayvanları için besin olarak kullanılabilir.

Enerji verimliliği: Şeker üretiminde enerji ihtiyacı oldukça yüksektir. Evaporasyon, şerbet arıtımı, kristalizasyon ve kurutma süreçleri, enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturur. Bu nedenle kojenerasyon, çok etkili evaporasyon sistemleri ve atık su geri kazanımı gibi çözümler, enerji verimliliğini önemli ölçüde artırır. Şeker üretiminde ısı ihtiyacı; ekstraksiyon, şerbet arıtımı, buharlaştırma ve kristalizasyon denilen ve birbiriyle bağlantılı olan dört ısı yoğun süreç basamaklarıyla tanımlanır. Isı ekonomisi prensiplerine göre, ısı taşıyan ortamın detaylı dağılım hattı ısıdan tekrar tekrar faydalanılacak şekilde seçilmelidir. Çok kademeli buharlaştırıcının amacı budur. Isının tekrar kullanımı şeker üretimi dışında, ısının döngülerle veya çoklu kullanımı şeklinde olabilir. Örneğin baca gazı küspe kurutmada kullanılabilir. Vakum buharı kazan besleme suyunu ısıtmada veya küspe kurutmada kullanılabilir. Küspe kurutmada çıkan gaz ham şerbeti ısıtmada kullanılabilir. Şeker ekstraksiyonu enerji yönünden, kısmen, atık sıcak sudaki ve/veya düşük basınçlı buhardaki ısının kazanılmasına bağlıdır. Eğer fabrikada, ekstraksiyonda düşük sıcaklıkta ham şerbet elde edilirse, kondenserlerdeki veya kondense suyundaki atık ısı kazanılacağı için enerji açısından verimlilik artar. Şeker fabrikaları proseste kullanılan farklı basınç ve sıcaklıktaki buhar gereksinimlerine göre dizayn edilmiştir. Yüksek basınç ve sıcaklıktaki buhar, prosesin bir aşamasında kullanıldıktan sonra yoğunlaşarak kondensat oluşturmada ve oluşan bu kondensat, genleşme kabında genişletilerek daha düşük basınç ve sıcaklıkta buhara dönüştürülerek tekrar proseste ısıtma ya da buharlaştırma amacıyla kullanılmaktadır. Buradaki amaç, prosesteki farklı buhar gereksinimleri için kullanılan enerjiyi minimuma düşürmektir.

Buharlaştırıcı istasyonunun fabrikaya sağladığı net ısı katkısı, son kademedeki kondensere giden buhar miktarıyla belirlenir. Isı ekonomisinin doğru ayarlanması ve

uygun buharlaştırıcı kontrolü yapılmasıyla, kayıplar belirgin şekilde azaltılır. Buharlaştırıcı istasyonundan beklenen, istenen yüksek kuru madde miktarına kadar koyu şerbeti koyulaştırmaktır. Bunun faydası kristalizasyonda harcanan ısı miktarındaki düşüşle görülür. Buharlaştırıcı aparatlarında, 14-15 Brikste gelen sulu şerbet 60-65 hatta 70 Brikse kadar koyulaştırılabilir. Buharlaştırıcılarda iyi bir buharlaştırma ısıtma yüzeyi ve ısı iletim katsayısının yüksek olmasına bağlıdır.

Şerbetin koyulaştırılması sırasında I. ve II. Kademe buharlaştırıcılardan çıkan kondansat, buhar kazanlarına gönderilerek besleme suyu olarak kullanılır. Bu su, buhar kazanında ısıtılıp buharlaştırılarak, sağlam kızgın buhar olarak türbine gönderilir ve elektrik enerjisi üretilir. Türbinden çıkan basıncı ve sıcaklığı düşmüş çürük buhar ise tekrar I. kademe buharlaştırıcıya gönderilerek şerbetin koyulaştırılmasında kullanılır. Sistem kapalı çevrimdir ve bu şekilde aşırı su tüketimi önlenmiş olur. III. ve IV. kademe buharlaştırıcılarda oluşan kondensatlar süreç içerisinde farklı yerlerde (difüzyon besleme suyu, kireç söndürme suyu, yıkama suyu, perlit hazırlama suyu, santrifüj yıkama suyu vb.) kullanılır. Türbinden çıkan basıncı ve sıcaklığı düşmüş çürük buharın fabrikasyondaki ısıtıcı donanımların ısıtılmasında kullanılması ise, ısı ve gücün kojenerasyonu veya ısı ve gücün birleştirilmesi olarak bilinir.

Çok kademeli bir buharlaştırıcı istasyonunda, sulu şerbet daha az bir buhar sarfiyatı ile koyulaştırılır. Fabrikanın buharla çalışan diğer istasyonları için değişik basınç ve sıcaklıktaki brüdelere elde edilerek gerekli ünitelerce kullanılır. Buharlaştırıcı istasyonu aslında hiç buhar tüketmemektedir. Sadece almış olduğu retür buharını sıcaklığı ve basıncı daha düşük brüdelere dönüştürmekte ve bu brüdelere de diğer istasyonlarda kullanılmaktadır. Buharlaştırıcı istasyonu, üretmiş olduğu brüdelerin hepsini ısıtma, buharlaştırma, pişirme ve difüzyon gibi aparatlarda kullanılacak şekilde planlanmaktadır.

Kristal şeker fabrikasyon sürecinin temel amacı ana ürün olan kristal şekeri üretmektir. Üçlü pişirmede ise amaç, daha az enerji kullanarak maksimum miktarda kristal şeker, minimum miktarda melas üretmektir.

Kristalizasyondaki ısı ihtiyacı şeker fabrikasyonundaki en yüksek oranı kapsar. Yüksek kristal verimi ve düşük enerji sarfiyatı için, vakumlar yüksek safiyette ve istenilen briks değerinde indirilerek santrifüjlemeye hazırlanmalıdır.

Toplam ısı transfer katsayısının yüksek olması ve ısıtma yüzey alanının büyük olması kesikli vakumlar için istenilen özelliklerdir. Öncelikle vakumlarda kaynatma için;

sürenin kısa olması, yüksek kristal verimi ve yüksek kristal kalitesi istenir. Bu faktörler enerji ihtiyacı ile bağlantılıdır.

- Kristal veriminin artması lapa sirkülasyonunda düşme demektir,
- Kristal kalitesinin yükselmesi santrifüjleme için daha iyi koşullar, yani daha az su kullanımı ve şurup miktarında düşme demektir.

Yan ürün değerlendirme: Kireç çamurunun yan ürün olarak değerlendirilmesi mümkündür. Şerbetin arıtımı sırasında arta kalan karbonatlama çamuru, yüksek miktarda kalsiyum karbonat (CaCO_3) içerir ve kireç kullanımı gerektiren birçok endüstride kullanılabilir. Karbonatlama çamuru ‘toprak iyileştirici’ olarak ve asidik toprakların nötralizasyonu için de kullanılabilir. Karbonatlama çamuru, ayrıca toprak için yararlı ‘besin maddelerinden’ magnezyum, fosfat ve potasyum içerir. Bu nedenle gübre katkı maddesi olarak da kullanılabilir.

Karbonatlama çamuru, aynı zamanda kâğıt endüstrisi için hammadde olarak da kullanılabilmektedir. İngiltere’de 2003 yılında yapılan bir araştırmanın ilk aşamasında kâğıt üretim ham maddesi olarak, %16 oranında karbonatlama çamuru kullanılmıştır. Aynı çalışmanın ikinci aşamasında ise kâğıt üretimi ana hammaddesi olan selülozun yanı sıra, %23 karbonatlama çamuru ile %10 kurutulmuş küspe kullanılmıştır. Araştırmanın sonucu olarak her iki denemede de, 1. kalitede beyaz kâğıt olmasa bile, kullanılabilir kalitede kâğıt üretilenmiştir. Karbonatlama çamurunun yine çimento fabrikalarında da hammadde olarak kullanımı denenmiştir.

Santrifüj işleminin yan ürünü olarak üretilen melas birçok endüstride kullanılabilecek değerli bir üründür. Fermantasyon endüstrisi, ilaç yapımı, bio-alkol üretimi, maya üretimi, sitrik asit üretimi ve hayvan besini önemli kullanım alanlarıdır.

- Şekeri az olan bir melas elde etmek için başarılı bir soğutma kristalizasyonuna özen gösterilmelidir.
- Melas oluşumunu azaltmak için iyi bir arıtım yapılmalıdır.
- Son şeker santrifüj çıkışından numune alınarak cam üzerinde bakılmalı ve melasın kristal tane içermediğinden emin olunmalıdır. Kristal tane varsa son şeker santrifüjleri kontrol edilmeli ve son şekerin mayşelenmesine dikkat edilmelidir.

Şerbetin arıtılması kısmında da bahsedildiği gibi küspe karbonatlama çamuru ile birlikte kullanılarak kâğıt üretimi için değerlendirilebilir.

Emisyon azaltımı: Toz ve baca gazı emisyonlarının proses iyileştirmeleri ile kaynağında azaltılmasıdır.

Kimyasal kullanımının azaltılması: Kireç verimliliğinin artırılması ve yardımcı kimyasal tüketiminin minimize edilmesi. Kireç ocağında kireç taşının kok ile yakılması sonucu oluşan kireç, su ile söndürülerek kireç sütü elde edilir. Bu kireç sütü, ocakta yanma sonucu oluşan CO₂ ile beraber, şerbet arıtımında kullanılır. Kullanılan CO₂ kapalı bir sistemle direk prosese verildiği için emisyon salınmaz.

Kireç taşı ve kokun istenen ebatlarda olması, ocağa verilen kireç taşı/kok oranına dikkat edilmesi, ocağın sürekli dolu tutularak ocaktaki ateşin yukarı ya da aşağı kaymasının engellenmesi, proses optimal değerlerinin sürekli kontrol edilmesi, proses kontrol ekipmanlarının düzenli bakım ve onarımları, kullanılan kaynak miktarını azaltacak ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlayacaktır.

Son olarak teknolojik rejimlerin baskınlığı (örneğin eski buhar kazanlarına bağımlılık), inovasyonun öğrenme-uygulama süreci gerektirmesi, çalışan rollerinin değişmesi ve kurumsal yapının direnç göstermesi sektörün temiz üretim dönüşümünü yavaşlatmaktadır.

4. KONUSYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde temiz üretim kapsamında, 2001-2025 yılları arasında yer alan konuyla yakından ilgili 15 literatür çalışmasına yer verilmiştir. Ayrıca, literatürde BAT teknolojilerinin ÇKKV yöntemleriyle önceliklendirildiği çalışmalar, kullanılan yöntemler açısından Tablo 4.1’de özetlenmiştir.

Geldermann ve Rentz (2001) tarafından yapılan çalışmaya göre, BAT belirlemesi genel anlamda çevre üzerindeki etkilerin kapsamlı değerlendirmesine dayanmaktadır ve bu nedenle çok kriterli bir karar durumu oluşturmaktadır. Ancak, incelenen tekniklerin tanımlanması ve potansiyel çevresel etkilerine ilişkin kesin verilere nadiren ulaşılabilmektedir. Bu nedenle, BAT’ın belirlenmesine yönelik bir karar destek aracının, belirsiz bilgileri de dikkate alması gerekmektedir. Bu çalışmada, çok kriterli karar desteği aracı olarak PROMETHEE seçilmiştir. Belirsiz bilgilerin dikkate alınmasına yönelik bulanık aralıklar ve eksik veri kümeleri gibi iyileştirmeler tartışılmıştır. Geliştirilen çok kriterli karar destek aracının uygulanması ve grafiksel duyarlılık analizi, demir-çelik endüstrisinden bir vaka çalışması yardımıyla sunulmuştur.

Mavrotas vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, tüm endüstriyel sektörler için ekonomik ve çevresel kriterleri mümkün olduğunca karşılayan BAT seçeneğini bulmak amacıyla entegre bir yaklaşım sunulmuştur. İlki, projelerin Net Mevcut Değeri ile ifade edilen endüstri sahibinin bakış açısını; ikincisi ise bazı önemli kirleticilerdeki emisyon azaltımı ile ölçülen toplumun bakış açısını temsil etmiştir. Geliştirilen çok amaçlı optimizasyon modeli iki araç kullanılarak ele alınmıştır. Bunlardan ilki hedef programlama, diğeri Pareto optimal çözümlerin üretilmesidir. Bu araçların birlikte uygulanması sonucu COMBAT yöntemi geliştirilmiş olup, Atina bölgesindeki endüstriyel sektörlerde uygulamasından elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Öztürk vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye’deki bir tekstil fabrikasında (pamuk/poliester karışımı boyama-terbiye tesisi) TÜ değerlendirmesi yapılmıştır. Tüm üretim süreçleri yerinde analiz edilerek su, enerji, kimyasal tüketimi ve atık oluşumuna dair kütle-enerji dengeleri çıkarılmış, 92 BAT önerisi belirlenmiştir. Bu öneriler, teknik ve ekonomik uygulanabilirlik açısından tesis yönetimiyle tartışılmış ve 22 BAT’ın uygulanmasına karar verilmiştir. ÇKKV yöntemleri (SRM, WCM, WSM) ile en uygun teknikler seçilmiştir. Uygulama sonrası su tüketiminde %43-51, enerji tüketiminde %11-26 ve kimyasal kullanımında %16-39’a varan azalmalar öngörülmüştür. Geri ödeme süresi 1-26 ay arasında hesaplanmıştır.

Yazdani vd. (2017) çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yaptığı çalışmayla, yeşil tedarikçi seçimini desteklemek amacıyla, QFD ile ÇKKV yöntemlerinin bütünleşik bir çerçevesini önermiştir. Müşteri gereksinimlerinin (Customer Requirements – CRs) teknik özelliklere (Technical Requirements – TRs) dönüştürülmesinde QFD yaklaşımı kullanılmış, ardından bu kriterlerin ağırlıklandırılması için ANP, tedarikçi alternatiflerinin sıralanması için ise TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Bu entegre yapı, hem çevresel hem de operasyonel kriterlerin sistematik şekilde ele alınmasını sağlamıştır. Çalışmanın sonuçları, önerilen modelin yeşil tedarikçi seçimi kararlarında, daha dengeli ve çevre dostu sonuçlar sunduğunu ortaya koymakta; firmalara stratejik tedarik kararlarında çevresel performansı dikkate alma konusunda rehberlik etmiştir.

Liang vd. (2018) yaptığı çalışmayla, altın madenlerinde TÛ uygulamalarını değerlendirmek için hibrit bir ÇKKV yöntemi geliştirmeyi amaçlamıştır. Değerlendirme sistemi, hem nicel (kesin sayılar), hem de nitel (olasılıklı dilsel terim kümeleri -PLTS_s) verileri içerecek şekilde tasarlanmıştır. Kriter ağırlıkları uzman derecelendirmesiyle belirlenmiş, ardından genişletilmiş TODIM yöntemi hibrit veri setiyle uygulanarak BAT sıralamaları elde edilmiştir. Yöntem, vaka analiziyle doğrulanmış ve duyarlılık/karşılaştırma analizleri ile gürbüzlüğü kanıtlanmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin karar sürecinde istikrar sağladığını ve politika yapıcılar için yol gösterici olabileceğini ortaya koymuştur.

Florindo vd. (2018) yaptığı çalışmayla, Brezilya'daki sığır eti üretim zincirinde karbon ayak izini azaltmaya yönelik eylemleri belirlemek amacıyla ÇKKV yaklaşımını uygulamıştır. Yöntem olarak, beş aşamalı bir yaklaşım izlenmiş; öncelikle karbon ayak izine yönelik azaltım eylemleri tanımlanmış, ardından bu eylemler AHP kullanılarak önceliklendirilmiştir. Uzman görüşlerine dayalı olarak hem çevresel hem de ekonomik kriterler dikkate alınmış ve en etkili stratejiler belirlenmiştir. Sonuçlara göre, yem üretiminin optimizasyonu, mera yönetiminin iyileştirilmesi ve gübre kullanımının azaltılması gibi uygulamalar, karbon ayak izini düşürmede en yüksek etkiye sahip olmuştur. Bu çalışma, karar vericilere sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda somut ve uygulanabilir stratejiler geliştirmeleri için bilimsel bir temel sunmuştur.

Panchal vd. (2021) yaptığı çalışmada, çevre dostu üretimi teşvik etmek amacıyla, Hindistan'ın Agra kentindeki küçük ölçekli dökümhanelerde, sürdürülebilir en uygun yağ seçmeyi hedeflemiştir. Dökümhanelerde kullanılan yağlar, başta CO, CO₂, NO₂ ve SO₂ olmak üzere çeşitli toksik gazların salınımına neden olarak ciddi çevre kirliliği

yaratmaktadır. Bu problemi çözmek için performans, kalite ve maliyet gibi çok kriterli karar değişkenleri dikkate alınarak jatropha, sebze yağı, karanja yağı ve hafif dizel yağı olmak üzere dört alternatif değerlendirilmiştir. Karar verme sürecinde belirsizlikleri yönetmek için üç aşamalı bütünsel bir karar çerçevesi önerilmiştir: FAHP, FTOPSIS ve FEDAS. FAHP ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, bu ağırlıklarla FTOPSIS ve FEDAS yöntemleri uygulanarak yağlar sıralanmıştır. Her iki yöntemde de hafif dizel yağı en yüksek uygunluk değerleriyle en iyi seçenek olarak belirlenmiştir. Ayrıca duyarlılık analizi ile modelin tutarlılığı test edilmiş ve 12 farklı senaryonun 9'unda hafif dizel yağı yine en üst sırada yer almıştır. Bu sonuç, hafif dizel yağının sürdürülebilir üretim açısından tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Khorshidi vd. (2021) yaptığı çalışmayla, daha temiz üretim planlamasına yönelik karar verme süreçlerini analiz etmek amacıyla, ahşap işleme sektöründe AHP yöntemini uygulamıştır. Tayvan'da faaliyet gösteren bir ahşap fabrikasında uygulamalı bir vaka çalışması gerçekleştirilmiş; çevresel, teknik ve ekonomik kriterler doğrultusunda AHP yöntemi ile daha temiz üretim önlemleri ağırlıklandırılarak sıralanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, üretim proseslerinin optimizasyonu ve atıkların azaltılması gibi uygulamalar öncelikli olarak belirlenmiş, böylece çevresel etkinin azaltılmasına katkı sağlayacak stratejiler ortaya konmuştur. Sonuç olarak çalışma, AHP'nin sanayi işletmelerinde sistematik ve objektif karar desteği sunarak sürdürülebilir üretim planlamasını güçlendirdiğini ve daha temiz üretim stratejilerinin başarılı şekilde uygulanmasına katkı sağladığını göstermiştir.

Luo ve Liang (2021) yaptığı çalışmada, ağırlık bilgisi bilinmeyen durumlar için, etkileşimli ve çok nitelikli karar verme yaklaşımına sahip, hibrit bir ÇKKV yöntemi önermiştir. İlk aşamada, farklı kriter değerleri sırasıyla reel sayılar ve resimli PFN'ler olarak belirtilmiştir. Nesnel ağırlıkların hesaplanmasında entropi ağırlık yöntemi kullanılmıştır. Ardından, öznel tercihler ve nesnel gerçeklikler eş zamanlı olarak dikkate alınarak birleşik bir kriter ağırlık vektörü elde edilmiştir. Daha sonra, geleneksel TODIM yaklaşımı, hibrit değerlendirme bilgisiyle genişletilerek nihai sıralamanın belirlenmesi sağlanmıştır. Son olarak, önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, kömür madenlerinde daha temiz üretim performansının değerlendirilmesine yönelik bir örnek sunulmuştur.

Tanackov vd. (2022) gerçekleştirdiği çalışmada, Libya endüstrisinde temiz üretim çalışmaları için, sekiz kriter temelinde değerlendirilen ve beş stratejiden oluşan bir model

oluşturmuştur. Kriterlerin önem düzeyini belirlemek amacıyla, aralıklı sayılar kullanarak, karar vericilerin tercihlerini dikkate alan SWARA yöntemini ortaya çıkarmıştır. Temiz üretim için en uygun stratejinin değerlendirilmesi ve seçilmesi amacıyla ise, ARAS yöntemini geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemlerin entegrasyonu, bu politikaları duyurmak ve farkındalık yaratmak için başlatılan ilk stratejinin, Libya endüstrisinde temiz üretime ulaşmak adına en gerçekçi ve en etkili çözümü temsil ettiğini göstermiştir. Önerilen modelin üstünlüğünü doğrulamak için mevcut bazı aralıklı metodolojilerle karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen duyarlılık analizinde en önemli kritere ait ağırlığın değiştiği belirlenmiştir.

Şimşek vd. (2022) yaptığı çalışmayla, temiz üretim kapsamında, entegre tekstil tesislerinde uygulanabilecek BAT'ların, ÇKKV ile sistematik olarak değerlendirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada, 52 BAT alternatifi, 40 çok boyutlu kriter doğrultusunda analiz edilmiş ve PROMETHEE, TOPSIS, VIKOR, ARAS ve COPRAS yöntemleri kullanılarak öncelik sıralamaları yapılmıştır. Karar kriterlerinin ağırlıkları, saha uzmanları ve akademisyenlerle yapılan anket çalışmalarıyla belirlenmiş olup, tüm alternatifler, belirlenen kriterler çerçevesinde karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, özellikle VIKOR ve COPRAS modellerinin BAT seçim süreçlerinde yüksek teknik uygunluk ve karar desteği sunduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, sektörel belirsizliklerin giderilmesine katkı sağlayarak karar verme sürecinin objektif ve yeniden üretilebilir şekilde yönetilmesini mümkün kılmıştır.

Shuowei vd. (2023), doğal taş endüstrisinde yaptığı çalışmayla, daha temiz üretim hedeflerine katkı sağlamak amacıyla, çevresel ve teknik kriterleri dikkate alan ÇKKV yaklaşımıyla, elmas kesici takım seçimi üzerine odaklanmıştır. Karar verme sürecine çevresel etkilerin sistematik uyumunu sağlamak üzere, AHP ve VIKOR yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Teknik performans, maliyet ve çevresel etki gibi kriterler uzman görüşleriyle ağırlıklandırılmış ve alternatif kesici takımlar bu çerçevede değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, hem çevresel etkileri azaltan, hem de teknik verimliliği yüksek olan takımların seçimi sağlanmış; böylece doğal taş sektöründe daha temiz üretim uygulamalarının desteklenmesi mümkün olmuştur.

Dehshiri, vd. (2023), daha temiz üretim hedeflerine yönelik yaptığı çalışmayla, İran'ın tekstil sektöründe güneş enerjisinin kullanımını değerlendirerek, sürdürülebilir bir planlama ve fizibilite analizi sunmuştur. Hem teknik hem ekonomik analizler gerçekleştirilmiş; güneş enerjisi sistemlerinin kurulumu, üretim kapasitesi, geri ödeme

süresi, karbondioksit azaltım potansiyeli ve yatırım geri dönüş oranı gibi kriterler dikkate alınmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinin farklı senaryolar altında uygulanabilirliği, SWARA ve MARCOS-G yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, güneş enerjisinin tekstil sektöründe uygulanabilir bir alternatif olduğunu, çevresel etkileri azalttığını ve uzun vadede ekonomik olarak da avantaj sunduğunu ortaya koymuştur.

Roy vd. (2024) yaptığı çalışmayla, şebekeden bağımsız HRES'lerin, yeşil hidrojen üretimiyle entegre edilerek çevresel, ekonomik ve teknik açıdan optimize edilmesini amaçlamıştır. TOPSIS yazılımı kullanılarak farklı senaryolar altında fotovoltaik, rüzgar, biyokütle ve yakıt hücrelerinin teknik ve mali performansları analiz edilmiş; emisyonlar, maliyetler ve enerji güvenilirliği gibi çoklu kriterler doğrultusunda optimizasyon yapılmıştır. Ayrıca, karar verme sürecine ÇKKV yaklaşımları entegre edilerek en uygun sistem konfigürasyonları belirlenmiştir. Sonuçlar, PV-rüzgâr-yakıt hücresi sistemlerinin enerji güvenilirliği ve düşük çevresel etki açısından en verimli seçenek olduğunu göstermiş; yeşil hidrojen üretiminin ise sistem sürdürülebilirliğini azalttığını ortaya koymuştur. Sürdürülebilir enerji planlamasında bu çalışma, HRES ve yeşil hidrojen entegrasyonunun potansiyelini kapsamlı biçimde ortaya koymuştur.

Ptuskın (2024) tarafından yapılan çalışmada, çevresel performansın artırılması amacıyla BAT'ların seçimini desteklemek için bulanık mantığa dayalı çok kriterli bir karar verme modeli önerilmiştir. Belirsizlikleri yönetmek ve uzman görüşlerini sistematik bir şekilde değerlendirmek amacıyla bulanık mantık temelli bir karar modeli geliştirilmiş; çeşitli kriterler (teknik uygulanabilirlik, maliyet, çevresel etki vb.) altında alternatif teknikler değerlendirilmiştir. Uzmanlardan elde edilen dilsel veriler, bulanık sayılara dönüştürülerek karar matrisleri oluşturulmuş ve en uygun teknik belirlenmiştir. Sonuç olarak, önerilen yaklaşımın BAT seçiminde belirsizlikleri azaltarak daha güvenilir ve sistematik sonuçlar sunduğu görülmüş; bu çerçevenin, karar vericiler için pratik ve esnek bir araç olabileceği ifade edilmiştir.

Tighnavard Balasbaneh vd. (2025) yaptığı çalışmayla, döngüsel ekonomi uygulamalarında ÇKKV yöntemlerinin kullanımını sistematik olarak inceleyerek, özellikle maliyet odaklı kriterlerin entegrasyonuna odaklanmıştır. Küresel ölçekte Scopus veri tabanından derlenen 31 hakemli yayın (kitap bölümleri, konferans bildirileri ve dergi makaleleri) değerlendirilmiş; yayınların co-yazar, kaynak dağılımı, co-keyword ağları gibi bibliyometrik analizleri yapılmıştır. Analiz bölümü, VOS viewer kullanılarak anahtar kelime eş-kullanımı, literatür kaynakları ve bölgeler arası dağılım gibi yapıları

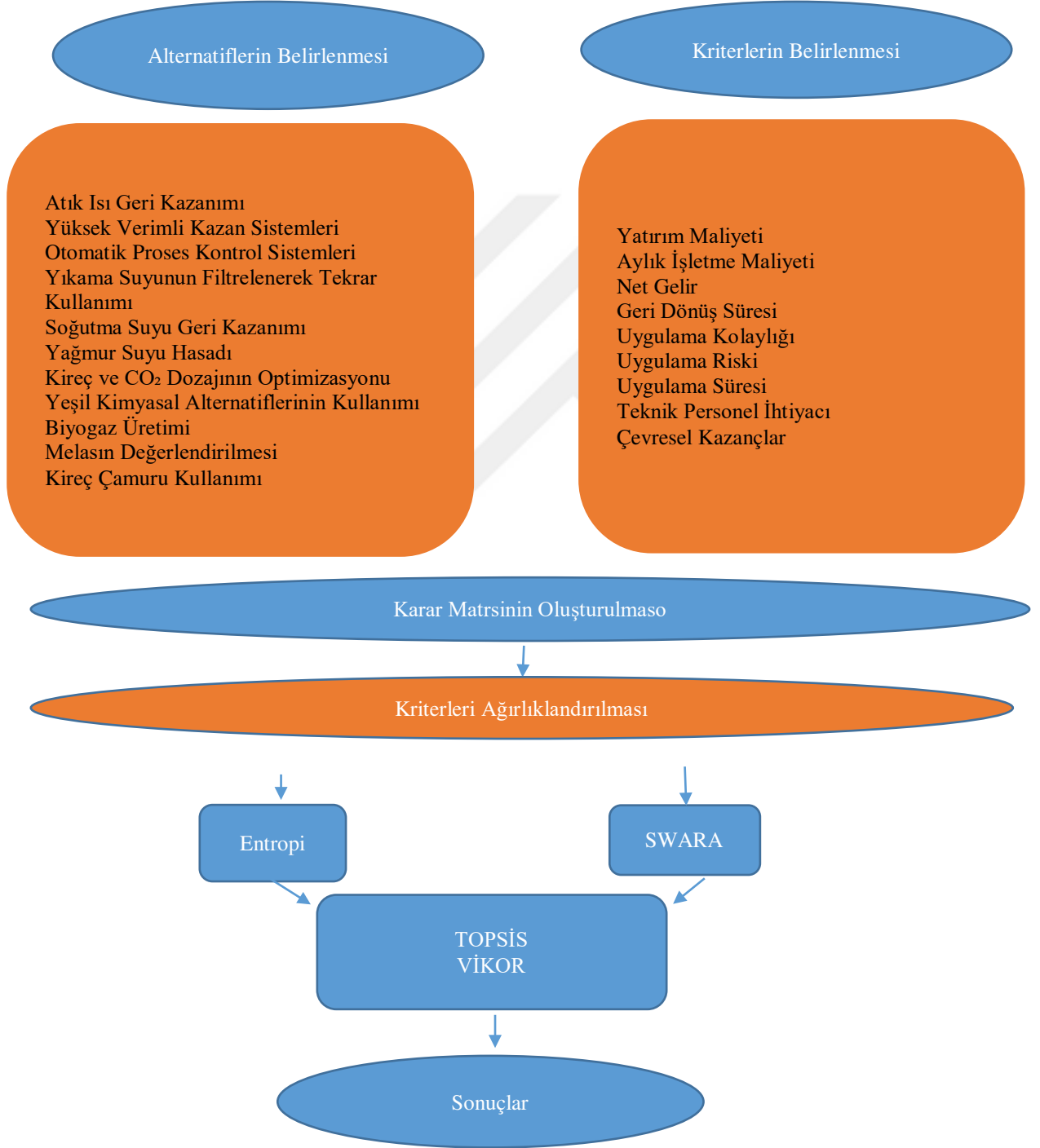
ortaya koymuş; ÇKKV yöntemlerinden AHP, TOPSIS, DEMATEL, ANP, DANP, CRITIC-TOPSIS gibi modellerin sıkça uygulandığını göstermiştir. Ancak yöntem seçiminde kesin bir standartlaşma olmadığı; AHP-TOPSIS kombinasyonlarının daha yaygın tercih edildiği, diğer yaklaşımların ise çeşitlilik gösterdiği ortaya konmuştur. Sonuçlar, ÇKKV'nin karmaşık ve çelişkili çevresel, ekonomik ve sosyal kriterleri entegre ederek dengeli bir değerlendirme sunduğunu göstermektedir. Özellikle finansal/mali kriterlerin, döngüsel ekonomi uygulamalarında en hassas ya da en kritik faktör olduğu vurgulanmıştır. Bununla birlikte, yöntem seçimine dair net bir rehber bulunmaması, gelecekte bu alandaki araştırmalar için önemli bir boşluk olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.1. Literatürde çeşitli sektörlerle gerçekleştirilmiş çalışmalar

Referans	Sektör	Yöntem
Geldermann ve Rentz (2001)	Demir-Çelik	PROMETHEE
Mavrotas vd. (2009)	Endüstri (Atina Bölgesi)	COMBAT
Govindan vd. (2014)	Kauçuk Lastik –İç Lastik	DANP-PROMETHEE
Öztürk vd. (2016)	Tekstil	SRM, WCM, WSM
Yazdani vd. (2017)	Tedarik Zinciri Yönetimi	ANP, TOPSIS
Liang vd. (2018)	Altın Madeni	TODIM
Florindo vd. (2018)	Sığır Eti Üretimi	AHP
Panchal vd. (2021)	Dökümhanelerde Kullanılan Yağlar	FTOPSIS ve FEDAS
Khorshidi vd. (2021)	Ahşap İşleme	AHP
Lou ve Liang (2021)	Kömür	TODIM
Tanackov vd (2022)	Endüstri (Libya)	ARAS
Şimşek vd. (2022)	Tekstil	VIKOR-COPRAS
Shouwei vd. (2023)	Doğal Taş Endüstrisi	AHP-VIKOR
Dehshiri vd. (2023)	Tekstil	SWARA - MARCOS-G
Roy vd. (2024)	Yenilebilir Enerji Sistemleri	TOPSIS
Tighnavard vd. (2025)	Döngüsel Ekonomi	AHP-TOPSIS

5. METODOLOJİ

Bu tezde, şeker üretiminde temiz üretim seçeneklerinin önceliklendirilmesi için ÇKKV Yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle kriterler iki farklı (Entropi ve SWARA) yöntem ile ağırlıklandırılmış ve elde edilen sonuçlarla alternatifler, TOPSIS ve VIKOR yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntem Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Metodoloji akış şeması

5.1. Alternatiflerin Belirlenmesi

Bu çalışmada, şeker üretiminde temiz üretim seçenekleri ile ilgili olarak, aşağıda yer alan 11 alternatif belirlenmiştir. Bu alternatifler içeriklerine göre dört temel başlık altında gruplandırılmıştır.

Enerji Verimliliği

- Atık ısı geri kazanımı (A1)
- Yüksek verimli kazan sistemleri (A2)
- Otomatik proses kontrol sistemleri (A3)

Su Yönetimi

- Yıkama suyunun filtrelenecek tekrar kullanımı (A4)
- Soğutma suyunun kapalı devre sistemlerde geri kazanımı (A5)
- Yağmur suyu hasadı (A6)

Kimyasal Kullanımının Azaltılması

- Kireç ve CO₂ dozajının optimizasyonu (A7)
- Yeşil kimyasal alternatiflerinin kullanımı (A8)

Atık Yönetimi ve Geri Kazanım

- Biyogaz üretimi için şeker posası kullanımı (A9)
- Melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesi (A10)
- Kireç çamurunun tarımda kullanımı (A11)

Atık ısı geri kazanımı (A1): Şeker üretiminde buhar kondenserleri ile kireç sütü hazırlama ve pişirme sistemlerinden çıkan atık ısının, ısı değiştiriciler aracılığıyla geri kazanılmasıdır. Bu uygulama, enerji tüketimini %10–15 oranında azaltır ve yıllık yaklaşık 300–350 bin USD tasarruf sağlar. Bu sistemler özellikle Konya ve Turhal Şeker Fabrikalarında uygulanmaktadır (UNEP, 2001; European Commission, 2010; Türkşeker, 2022).

Yüksek verimli kazan sistemleri (A2): Düşük verimli eski kazanların yerine, %85'in üzerinde verime sahip ekonomizörlü kazanların kurulmasıdır. Yakıt tüketimini %12 oranında düşürür ve CO₂ emisyonlarını azaltır. Afyon Şeker Fabrikası modernizasyon projesinde uygulanmıştır (IPPC, 2019; TMMOB, 2014; TÜBİTAK MAM, 2015).

Otomatik proses kontrol sistemleri (A3): Buhar, kireç ve CO₂ dozajının otomatik kontrol edilmesiyle enerji ve kimyasal tüketimi azaltılır. Verimlilik %8–10 artar, şeker

saflığı yükselir. Türkşeker modernizasyon projelerinde yaygındır (TÜBİTAK MAM, 2015; Yılmaz, 2019; Türkşeker, 2022).

Yıkama suyunun filtrelenerak tekrar kullanımı (A4): Pancar yıkama hattından çıkan bulanık suyun çöktürme ve filtrasyon sonrası tekrar kullanılmasıdır. Tatlı su ihtiyacını %30 azaltır, atıksu yükünü düşürür. Eskişehir Şeker Fabrikası'nda uygulanmaktadır (UNEP, 2001; IPPC, 2019; TÜBİTAK MAM, 2015).

Soğutma suyunun kapalı devre sistemlerde geri kazanımı (A5): Soğutma suyunun kule veya ısı değiştirici sistemlerle devirdaim edilmesiyle su kaybı azaltılır. Yıllık 150–200 bin m³ su tasarrufu sağlar. Konya Şeker'de uygulanmaktadır (European IPPC Bureau, 2019; Türkşeker, 2022).

Yağmur suyu hasadı (A6): Fabrika çatı ve saha alanlarından toplanan yağmur sularının depolanarak yıkama ve soğutma sistemlerinde kullanılmasıdır. Tatlı su tüketimini düşürür. Düşük maliyetli bir uygulamadır (UNEP, 2001; TÜBİTAK MAM, 2015).

Kireç ve CO₂ dozajının optimizasyonu (A7): Saflaştırma aşamasında kullanılan kireç ve CO₂ miktarlarının sensör kontrollü otomatik sistemlerle optimize edilmesidir. Kimyasal kullanımını %15 azaltır ve çamur miktarını düşürür (Yılmaz, 2019; IPPC, 2019; Türkşeker, 2022).

Yeşil kimyasal alternatiflerin kullanımı (A8): Geleneksel flokülant ve temizleyiciler yerine çevre dostu biyobazlı kimyasalların kullanılmasıdır. Çalışan sağlığını korur, toksisiteyi azaltır ve çevre mevzuatına uyumu kolaylaştırır (UNEP, 2001; TÜBİTAK MAM, 2015; Demirbaş, 2017).

Biyogaz üretimi için şeker posası kullanımı (A9): Şeker üretiminden çıkan pancar posasının anaerobik çürütücülerde biyogaz üretiminde değerlendirilmesidir. 1 ton posa 80–100 m³ biyogaz üretir; Konya Çumra Biyogaz Tesisi'nde yılda 25 MW elektrik elde edilmektedir (Türkşeker, 2022; TÜBİTAK MAM, 2015; UNEP, 2001).

Melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesi (A10): Melasın hayvan yemi veya etanol/fermantasyon hammaddesi olarak kullanılmasıdır. Atık yerine ekonomik girdi sağlar ve yılda yaklaşık 150–200 bin USD gelir oluşturur (TÜBİTAK MAM, 2015; Yılmaz, 2019; Gönüllü ve Demir, 2014).

Kireç çamurunun tarımda kullanımı (A11): Saflaştırma çamurunun tarımsal pH düzenleyici olarak kullanılmasıdır. Atık bertaraf maliyetini ortadan kaldırır ve toprak

verimliliğini artırır. Susurluk ve Yozgat fabrikalarında pilot uygulamalar yapılmıştır (IPPC, 2019; Türkşeker, 2022; UNEP, 2001).

5.2. Kriterlerin Belirlenmesi ve Karar Matrisi

Kriterler için farklı sektörlerdeki BAT uygulamalarının önceliklendirmesi ile ilgili literatür taraması yapılmış ve aşağıdaki kriter listesi dikkate alınmıştır (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Kullanılan kriterler ve açıklamaları

Kriter No	Kriterin Adı	Birim, Tercih Yönü	Açıklamalar
c1	Yatırım Maliyeti (YM)	\$, azalan	Kurulum ve donanım yatırımlarının düşük olması tercih edilir.
c2	Aylık İşletme Maliyeti (AİM)	\$/ay, azalan	İşletme sırasında enerji, işçilik ve bakım maliyetlerinin düşük olması gerekir.
c3	Net Gelir (NG)	\$, artan	Yatırımın getireceği ekonomik faydanın yüksek olması beklenir.
c4	Geri Dönüş Süresi (GDS)	Yıl, azalan	Yatırım maliyetinin kısa sürede geri kazanılması tercih edilir.
c5	Uygulama Kolaylığı (UK)	1-9 puanı, artan	Teknolojinin uygulanabilirliğinin pratik ve kolay olması gerekir.
c6	Uygulama Riskleri (UR)	1-9 puanı, azalan	Teknolojinin uygulanması sırasında karşılaşılabilecek risklerin minimum olması beklenir.
c7	Uygulamaya Alınma Süresi (UAS)	Ay, azalan	Seçilen yöntemin devreye alınma süresinin kısa olması gerekir.
c8	Teknik Personel İhtiyacı (TPI)	Kişi, azalan	Yöntemin uygulanması için daha az teknik personele ihtiyaç duyulması tercih edilir.
c9	Çevresel Kazançlar (ÇK)	%, artan	Yöntemin enerji verimliliği, su tasarrufu, emisyon azaltımı gibi çevresel faydalarının yüksek olması gerekir.

Yukardaki kriterler ve alternatiflere göre veriler, şeker üretiminde temiz üretim teknolojilerinin ekonomik ve çevresel açıdan karşılaştırılmasına olanak sağlayacak biçimde düzenlenmiştir. Bunun için kullanılan temel kaynaklar Tablo 5.2’de ve

hesaplama detayları Tablo 5.3’te sunulmuştur. Tablo 5.2 ve 5.3’e göre hazırlanan karar matrisi ise 5.4’te verilmiştir. Bu matris, ÇKKV (Entropi, TOPSİS, VİKOR) analizlerinde girdi olarak kullanılmıştır.

Tablo 5.2. Veri setinin dayandığı temel kaynaklar

Kaynak Türü	Referans	Açıklama
Uluslararası rehber	“ <i>Cleaner Production in the Sugar Industry</i> ” (UNEP, 2001)	Temiz üretim tekniklerinin enerji, su, kimyasal ve atık yönetimi açısından maliyet ve çevresel kazanç verileri referans alınmıştır.
Avrupa Birliği BAT Referansı	“ <i>Best Available Techniques (IPPC) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries</i> ” (FDM BREF) (European IPPC Bureau, 2010; 2019)	Şeker üretiminde kullanılan enerji verimliliği, su geri kazanımı, atık çamur kullanımı gibi uygulamaların, yatırım ve işletme maliyet aralıklarını içeren teknik verileri alınmıştır.
Ulusal Literatür	“ <i>Şeker Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları Raporu</i> ” (TÜBİTAK MAM, 2015)	Türkiye’deki kamu şeker fabrikalarının modernizasyon maliyetleri, biyogaz, su geri kazanımı ve süreç kontrol yatırımları kullanılmıştır.
Saha Gözlemleri / Tesis Verileri	“ <i>Enerji Yönetim ve Çevre Faaliyet Raporu</i> ” (Türkşeker, 2022)	Konya, Eskişehir, Turhal ve Afyon Şeker Fabrikalarındaki enerji ve su tasarruf projelerinin yatırım maliyetleri ve kazanç oranları kullanılmıştır.
Akademik Tez ve Makaleler	Yılmaz, A. (2019). <i>Şeker Sanayinde Temiz Üretim Yaklaşımları</i> , Selçuk Üniversitesi. Gönüllü, M.T. ve Demir, H. (2014). <i>Endüstriyel Enerji Verimliliği Uygulamaları</i> .	Akademik düzeyde maliyet ve geri dönüş süresi aralıklarını destekleyen veriler alınmıştır.

Tablo 5.3. Kriterlerin hesaplama dayanakları (Teknik açıklama)

Kriter	Hesaplama/ Dayanak	Değer Aralıkları
c1	Kurulum ve donanım yatırımlarının düşük olması tercih edilir. UNEP (2001) ve TÜBİTAK (2015) kaynaklarındaki benzer kapasiteli tesislerin donanım ve süreç modifikasyon maliyetleri temel alınmıştır. Örnek: Atık ısı geri kazanımı 1,0-1,5 milyon USD; biyogaz sistemi 2,0 milyon USD.	0,25 - 2,1 milyon USD
c2	İşletme sırasında enerji, ısıtılık ve bakım maliyetlerinin düşük olması beklenir. Enerji, bakım, kimyasal ve personel giderlerinden türetilmiştir. UNEP tarafından önerilen yaklaşım: yatırım maliyetinin %2-5'i /ay.	8.000 - 60.000 USD /ay
c3	Yatırımın sağlayacağı ekonomik faydanın yüksek olması beklenir. Enerji veya malzeme tasarrufundan elde edilen yıllık kazanç + yan ürün satış gelirleri dikkate alınmıştır (örneğin biyogaz, melas).	90.000 - 520.000 USD/yıl
c4	Yatırım maliyetinin kısa sürede geri kazanılması tercih edilir. YM / (NG-yıllık işletme maliyeti farkı) formülü kullanılmıştır. Gerçek tesis örneklerinden (Türkşeker ve IPPC) elde edilen verilere dayanmaktadır.	2,2 - 5,1 yıl
c5	Teknolojinin uygulanabilirliğinin pratik ve kolay olması gerekir. Literatürdeki TRL seviyeleri ve operatör geri bildirimlerine göre 1-9 arasında subjektif bir puanlama yapılmıştır.	5 - 9 puan
c6	Teknolojinin uygulanması sırasında karşılaşılabilecek risklerin minimum olması beklenir. İşletme ve güvenlik risklerinin (kimyasal, mekanik, süreç kesintisi) azlığına göre 1-9 arasında puanlama yapılmıştır.	2 - 4 puan
c7	Seçilen yöntemin devreye alma süresinin kısa olması gerekir. Türkşeker proje takvimleri ve tesis modifikasyonu süresi dikkate alınmıştır	3 - 8 ay
c8	Yöntemin uygulanması için daha az teknik personele ihtiyaç duyulması tercih edilir. Yeni sistem devreye alınırken gerekli ek personel sayısı, UNEP (2001) Annex 4 verilerine göre değerlendirilmiştir.	3 -7 kişi
c9	Yöntemin enerji verimliliği, su tasarrufu ve emisyon azaltımı gibi çevresel faydalarının yüksek olması gerekir. Enerji Verimliliği (%), su geri kazanımı (%) ve emisyon azaltımı (%) değerlerini ortalaması alınmıştır.	%80 – 95

Tablo 5.4. Karar matrisi

	Azalan	Azalan	Artan	Azalan	Artan	Azalan	Azalan	Azalan	Artan
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	1200	45.000	320.000	4,2	7	3	6	5	90
A2	1500	60.000	280.000	5,1	6	4	6	6	85
A3	950	30.000	250.000	3,8	8	2	7	7	80
A4	650	20.000	180.000	3,5	7	3	6	5	95
A5	800	25.000	210.000	3,8	6	3	6	6	90
A6	350	10.000	90.000	3,2	8	2	5	4	80
A7	500	18.000	160.000	3	7	3	5	5	85
A8	1100	40.000	240.000	4,5	6	4	6	6	90
A9	2100	25.000	520.000	4,1	5	4	8	6	95
A10	400	15.000	200.000	2,4	8	2	4	4	90
A11	250	8.000	100.000	2,2	9	2	4	3	85
Sayısal olmayan değerler 1'den 9'a ölçeklendirilmiştir: artan yönlü kriterler için; mükemmel = 9; çok iyi = 8; iyi = 7; az ya da çok iyi = 6; kayıtsız = 5; biraz kötü = 4; kötü = 3; çok kötü = 2; berbat = 1 ve azalan yönlü kriterler için; mükemmel = 1; çok iyi = 2; iyi = 3; az ya da çok iyi = 4; kayıtsız = 5; biraz kötü = 6; kötü = 7; çok kötü = 8; kötü = 9.									

5.3. Kriterlerin Ağırlıklandırması

ÇKKV probleminde kriter ağırlıklandırma işleminin amacı, kriterleri bir değer ile ilişkilendirerek bu kriterlerin karar problemindeki göreceli önemini belirlemektir. Böylece elde edilen ağırlıklandırılmış sonuçlar, kullanılacak yöntemde alternatiflerin değerlendirilmesi ve sıralanması için temel girdi olarak kullanılır. Ağırlıklandırma yöntemleri genel olarak objektif ve subjektif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu tez çalışmasında hem objektif (entropi), hem de subjektif (SWARA) ağırlıklandırma yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemlerinin birlikte kullanılmasının nedeni; subjektif ağırlıklandırma ile karar vericinin değerlendirmesi esas alınırken, objektif ağırlıklandırma ile karar matrisinin skorlarının bilindiği durumlarda kişisel yargılara ihtiyaç duyulmadan, kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesine olanak sağlamasıdır.

5.3.1. Entropi yöntemi

Shannon entropisi, bilgi teorisyeni Claude Shannon tarafından 1948 yılında bilgi teorisi kapsamında geliştirilmiş bir kavramdır (Shannon, 1948). Temel amacı, bir sistemdeki belirsizlik veya rastlantısallık düzeyini nicel olarak ifade etmektir. Çok

Kriterli Karar Verme uygulamalarında entropi, her bir kriterin verilerindeki farklılaşma düzeyini (ayırt ediciliğini) ölçmek ve buna göre objektif kriter ağırlıkları hesaplamak için kullanılır. Kriter içerisindeki değerler ne kadar çeşitliyse, bilgi değeri o kadar yüksek ve entropi tabanlı ağırlığı da o kadar büyük olur. Kısacası kriterin değeri ne kadar değişken ve bilgi içeriği yüksekse, ağırlığı da o kadar yüksek olur. Tüm kriterlerin aldığı değerlerin birbirine çok yakın olması halinde, kriterin ayırt ediciliği düşüktür ve ağırlığı azalır. Bu nedenle Shannon Entropisi yöntemi, tamamen very setine dayalı, objektif bir yöntemdir (SWARA gibi öznel değildir.). Yöntem, kriter ağırlıklarını doğrudan verinin dağılımına göre belirlemeyi sağlar. Subjektif değerlendirmelerin aksine, ölçümler doğrudan verinin dağılımına dayanır. Bu özellik; özellikle enerji, çevre yönetimi, endüstriyel süreç optimizasyonu ve temiz üretim uygulamalarında kriterlerin doğal değişkenliğinin değerlendirilmesinde çok etkilidir Zeleny, 1982; Zeleny, 1996)

Shannon Entropisi Mantığı;

- Bir kriterin değerleri birbirine çok yakınsa
→ Belirsizlik yüksek → kriter “ayırt edici” değildir → ağırlığı düşük çıkar
- Bir kriterin değerleri çok farklıysa
→ bilgi yüksek → ağırlığı yüksek çıkar.

Shannon entropisi, “*Verisi çok çeşitlilik gösteren kriter önemlidir.*” mantığına dayanır.

Aşağıdaki adımlar, ÇKKV literatüründe kullanılan Entropi yönteminin adımlarıdır.

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Entropi yönteminde, diğer birçok çok kriterli karar verme problemlerinde olduğu gibi, öncelikle karar matrisi oluşturulmaktadır. Eşitlik 5.1 ‘deki matris, alternatiflerin kriterlere göre aldığı değerleri içerir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1m} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Adım 2: Normalize edilmiş karar matrisinin elde edilmesi

Normalizasyon: $p_{ij} = x_{ij} / \sum x_{ij}$ formülü ile kriter bazında normalize edilir. Burada x_{ij} , i alternatifinin j kritere ilişkin ham değeridir. Bu adımda Eşitlik 5.2’den faydalanılır:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (5.2)$$

Burada; i alternatifler, j kriterler, p_{ij} normalize edilmiş değerler ve x_{ij} i alternatifinin j kriteri için verilen fayda değeridir.

İkinci adımda Eşitlik 5.2 yardımıyla gerçekleştirilen normalizasyon işlemi sonucunda

$R=[p_{ij}]m \times n$ normalize edilmiş karar matrisi elde edilir.

Adım 3: Kriterlere ilişkin entropi değerlerinin bulunması

Bu adımda kriterlere ilişkin entropi değerleri Eşitlik 5.3 yardımıyla bulunur. Entropinin hesaplanması:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n) \quad (5.3)$$

Burada; k entropi katsayısı [$k = 1/\ln(m)$], m karar alternatif sayısı, p_{ij} normalize edilmiş değerler ve e_j Entropi değeridir.

Adım 4: Bilgi değerinin belirlenmesi

Bilgi değeri: $d_j = 1 - e_j$ şeklinde hesaplanır. Entropisi düşük olan kriterlerin bilgi değeri daha yüksektir. Eşitlik 5.4 yardımıyla elde edilen d_j değerlerinin yüksek olması, kriterlere ilişkin alternatif skorlarının birbirinden daha fazla farklılaştığını gösterir.

$$d_j = 1 - e_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5.4)$$

Adım 5: Entropi kriter ağırlıklarının hesaplanması

Bu adımda entropi kriter ağırlık değerleri Eşitlik 5.5 veya 5.6 yardımıyla elde edilir.

$$w_j = d_j / \sum d_j \quad (5.5)$$

Alternatif formül:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (5.7)$$

Ağırlıkların toplamı eşitlik 5.7 ile bulunur. Burada w_j ağırlık değeri, e_j entropi değeridir.

Tüm kriter ağırlıkları pozitif olup toplamaları 1'e eşittir.

Yöntemin Avantajları

- Tamamen objektiftir ve uzman yargısına ihtiyaç duymaz.
- Kriterlerin doğal değişkenliğini temel alır.
- Verideki çeşitliliği dikkate aldığı için ayırt edici kriterlere daha yüksek ağırlık verir.
- TOPSIS, VIKOR, WASPAS, COPRAS gibi ÇKKV yöntemleriyle kolayca entegre edilebilir.
- Endüstriyel karar destek uygulamalarında güvenilir ve tutarlı sonuçlar sağlar.

5.3.2. SWARA Yöntemi

SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemi, ilk kez Keršulienė, Zavadskas ve Turskis (2010) tarafından geliştirilen çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, karar vericilerin kriterlerin göreceli önemini adım adım (stepwise) değerlendirmesine dayanır ve uzman görüşlerinin sistematik olarak modele aktarılmasını sağlar.

SWARA yönteminin temel amacı, karar sürecinde değerlendirilen kriterlerin ağırlıklarını belirlemektir. Bu yöntemde her bir kriter, kendisinden önceki kritere göre önem farkı dikkate alınarak ağırlıklandırılır. Böylece kriterlerin göreceli önem dereceleri adım adım güncellenir ve nihai ağırlıklara ulaşılır. (Keršulienė, 2010)

SWARA Yönteminin mantığı;

- Bir uzman grubu veya tek bir uzman,
- Kriterleri önem sırasına göre dizilir.
- Her kriterin bir öncekine göre ne kadar daha az /çok önemli olduğunu uzman belirler.
- Bu fark s_j olarak adlandırılır.
- Bu farklar kullanılarak katsayılar (k_j) hesaplanır.
- Son adımda, kriterlerin normalize edilmiş ağırlıkları (w_j) bulunur.

SWARA özellikleri;

- Uzman görüşü doğrudan sürece katılır.
- Kriterler kademeli olarak ağırlıklandırılır.

- Her kriter yalnızca kendisinden önceki kriterle karşılaştırılır (AHP’deki gibi tüm kriterleri tek tek karşılaştırmak gerekmez).

SWARA Yönteminin adımları

Adım 1: Kriterlerin sıralanması

Kriterler, karar vericiler tarafından en önmliden en az önemliye doğru sıralanır.

Adım 2: Karşılaştırmalı Önem Katsayısı (sj)

Her kriter, kendisinden önceki kriterle göre ne kadar daha az veya daha çok önemli olduğunu gösteren bir değer alır. Bunun için j kriteri, kendisinden bir önceki kriter (j-1) ile karşılaştırılır. Bu oran “ortalama değerin karşılaştırmalı önemi” olarak tanımlanır ve sj simgesi ile gösterilir.

Adım 3: Düzeltme Katsayısı (kj)

Her kriter için $kj = 1 + sj$ formülüyle hesaplanır.

$$kj = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ sj + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (5.8)$$

Adım 4: Önem Vektörü (wj)

$wj = w_{j-1} / kj$ formülüyle kriterlerin görelî katsayısı hesaplanır. Önem vektörü (wj), Eşitlik 5.9 ile hesaplanır.

$$wj = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{w_{j-1}}{kj} & j > 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

Adım 5: Normalize Edilmiş Ağırlıklar (qj)

$qj = wj / \sum wj$ formülüyle kriterlerin toplam içindeki yüzdelik ağırlıkları hesaplanır.

$$qj = \frac{wj}{\sum_{j=1}^n wj} \quad (5.10)$$

Aşağıdaki şekil, SWARA yönteminin temel adımlarını akış şeması biçiminde göstermektedir. Kriterlerin önem sırasına göre değerlendirilmesi, görelî önem farklarının belirlenmesi, katsayıların hesaplanması ve nihai ağırlıkların elde edilmesi süreci adım adım sunulmuştur.

Entropi ve SWARA yöntemlerinin karşılaştırılması Tablo 5.5’te verilmiştir.

Tablo 5.5. Entropi ve SWARA yöntemlerinin karşılaştırması

Karşılaştırma Kriteri	Entropi Yöntemi	SWARA Yöntemi
Veri Türü	Sayısal performans verileri (nicel)	Uzman değerlendirmeleri (nitel)
Temel Yaklaşım	Nesnel (veri dağılımı ve bilgi entropisine dayanır)	Öznel (karar verici görüşlerine dayanır)
Amaç	Verinin çeşitliliğini ölçerek kriterlerin bilgi içeriğini hesaplar	Uzman görüşlerine göre kriterlerin göreceli önemini belirler
Girdiler	Performans matrisi (veri seti)	Uzman veya karar verici tarafından verilen önem dereceleri (karşılaştırmalar)
Avantajları	• Tamamen objektiftir. • İnsan hatasından veya yargıdan etkilenmez. • Veri çeşitliliğini doğrudan ölçer.	• Uzman bilgi ve deneyimini modele katar. • Uygulaması kolay ve adımları basittir. • Kriterlerin sıralı bağımlılığını dikkate alır.
Sınırlamaları	• Sadece verilere dayanır, uzman görüşünü içermez. • Düşük varyansa sahip kriterlerin etkisini küçümser. • Verinin kalitesine duyarlıdır.	• Kriter sıralaması değiştiğinde sonuçlar değişir. • Subjektif değerlendirmelere bağlıdır. • Uzman sayısı arttıkça görüş farklılıkları artar.

Sonuç olarak, Entropi yöntemi objektif bir yaklaşım sunarken, SWARA yöntemi uzman görüşlerini yansıtır. Şeker sektöründe temiz üretim olanaklarının değerlendirilmesinde her iki yöntemin kullanılmasıyla, hem sayısal verilerden gelen nesnellik hem de sektörel deneyimden gelen öznel bilgi karar sürecine dâhil edilmiş olur. Bu nedenle iki yöntemin birlikte kullanımı, daha dengeli ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

5.4. Kullanılan Değerlendirme Yöntemleri

ÇKKV, birden fazla kriterin aynı anda değerlendirildiği durumlarda seçim, değerlendirme ve sıralama problemlerine analitik çözüm üreten yöntemler bütünüdür. Enerji, çevre, sürdürülebilirlik, süreç iyileştirme ve endüstriyel performans analizlerinde yoğun şekilde kullanılmaktadır (Hwang ve Yoon, 1981).

Bu tez çalışmasında VIKOR ve TOPSIS değerlendirme yöntemleri farklı matematiksel yaklaşımları nedeniyle tercih edilmiştir. TOPSIS, alternatifleri pozitif ideal

çözüme yakınlık ve negatif ideal çözüme uzaklık prensibine göre sıralayan bir yaklaşımdır. Bu çalışmada TOPSIS'in tercih edilme nedenleri şöyledir:

- Hem maliyet hem fayda türündeki kriterleri birlikte değerlendirebilmesi.
- Farklı ölçeklerdeki verileri normalize ederek karşılaştırılabilir hâle getirmesi.
- Endüstriyel karar problemlerinde yaygın olarak kullanılması nedeniyle literatür uyumu sağlaması.
- İdeal çözüme uzaklık-yakınlık yaklaşımı nedeniyle anlaşılır ve yorumlanabilir sonuçlar sunması.

VIKOR, uzlaşmacı çözüm yaklaşımıyla hem grup faydasını hem de bireysel maksimum kaybı dikkate alan çok kriterli bir yöntemdir. Bu çalışmada VIKOR'un seçilme nedenleri şunlardır:

- Alternatifler birbirine yakın performans gösterdiğinde daha hassas ayırt edici özelliğe sahip olması.
- Sürdürülebilirlik ve çevresel değerlendirmelerde yaygın kullanılması.
- Risk azaltma ve kayıp minimizasyonuna odaklanarak dengeli bir çözüm önermesi.
- Grup faydası ve bireysel kaybı aynı anda değerlendirmesi sayesinde çok boyutlu kriterlere uygun olması.

TOPSIS analizi, en iyi çözüme yakınlık ve en kötü çözümden uzaklık prensibine göre alternatifleri sıralarken; VIKOR analizi grup faydası ve bireysel pişmanlık ölçütlerini dikkate alarak uzlaşmacı bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada her iki yöntemin birlikte kullanılmasının temel amacı, farklı matematiksel yaklaşımların sonuçlarını karşılaştırarak daha tutarlı ve güvenilir bir karar süreci oluşturmaktır. TOPSIS ideal çözüme yakınlığı temel alırken, VIKOR uzlaşmacı çözümü dikkate alır. Böylece karar vericiye çok yönlü bir değerlendirme sağlanır (Opricovic,1998).

5.4.1. TOPSIS yöntemi

TOPSIS, (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilen bir ÇKKV yöntemidir. *Yöntem, her alternatifin pozitif ideal çözüme (en iyi değerler) en yakın olması, negatif ideal çözüme (en kötü değerler) en uzak olması mantığıyla sıralanmasına dayanır.* (Demireli, 2010). Bu yaklaşım, karar problemini geometrik bir uzaklık ölçümü ile çözer. Yöntemin temel gücü hem fayda, hem de maliyet kriterlerini aynı anda değerlendirebilmesidir. *TOPSIS, ideal çözüme yakınlık ilkesiyle çalışır* (Hwang ve Yoon 1981). *Yöntem; normalizasyon,*

ağırlıklandırma, ideal çözüm belirleme ve uzaklık hesaplama adımlarından oluşur (Yoon ve Hwang 1995). TOPSIS, VIKOR gibi yöntemlere göre daha esnek ve geniş uygulama alanına sahiptir (Opricovic ve Tzeng 2004). TOPSIS'in en önemli avantajı, karar vericinin subjektif etkisini azaltmasıdır (Chen, 2000).

TOPSIS Yönteminin Adımları ve Formülleri

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Karar matrisi $X = [X_{ij}]_{m \times n}$ biçimindedir (Eşitlik 5.11). Burada X_{ij} , i alternatifin j kriterine ilişkin değeridir.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, n) \quad (5.11)$$

Adım 2: Normalize edilmiş matrisin hesaplanması (Vektör Normalizasyonu)

Normalize değer r_{ij} , Eşitlik 5.12'deki formülle hesaplanır:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5.12)$$

Adım 3: Ağırlıklı Normalize Matrisin hesaplanması

$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$ formülü ile her kriter için ağırlıklı değer bulunur.

Burada w_j kriterin ağırlığıdır.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (5.13)$$

Adım 4: Pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi

- Fayda kriterleri (büyük daha iyi) için Eşitlik 5.14 kullanılır:

$$A^+ = \{ \max (v_{ij}) \} \quad A^- = \{ \min (v_{ij}) \} \quad (5.14)$$

- Maliyet kriterleri (küçük daha iyi) için Eşitlik 5.15 kullanılır:

$$A^+ = \{ \min (v_{ij}) \} \quad A^- = \{ \max (v_{ij}) \} \quad (5.15)$$

Adım 5: Öklid uzaklıklarının hesaplanması

- Pozitif ideale uzaklık için Eşitlik 5.16'dan yararlanılır:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (5.16)$$

- Negatif ideale uzaklık için Eşitlik 5.17'den yararlanılır:

$$Si^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vij - Aj^-)^2} \quad (5.17)$$

Adım 6: İdeal çözüme göreli yakınlık katsayısının hesaplanması

$$Ci = \frac{Si^-}{Si^+ + Si^-} \quad (5.18)$$

Adım 7: Alternatiflerin sıralanması ve sonuç

Bütün alternatifler Ci değerine göre büyükten küçüğe sıralanır.

5.4.2. VIKOR yöntemi

VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemi, birden fazla kriter altında en iyi alternatifin seçilmesi veya sıralanması amacıyla kullanılan uzlaşmacı bir yöntemdir. Özellikle farklı kriterler arasında çatışma olduğunda (örneğin: maliyet minimum, verim maksimum, emisyon minimum) kompromis (uzlaşmacı) çözüm önerir. Yöntem ilk olarak Opricovic'in doktora tezinde (1979-1998) geliştirilmiş, daha sonar Opricovic ve Tzeng'in 2004 tarihli makalesiyle literatürde geniş yer bulmuştur. Vikor yönteminin amacı, hem grup faydasını artırmak (Si değeri), hem de maksimum bireysel pişmanlığı azaltmaktır (Ri değeri). Temel yaklaşım: ideal çözüme en yakın olan ve en kötü kriterdeki pişmanlığı en aza indiren çözümün seçilmesidir. Bu nedenle, "uzlaşmacı çözüm" yaklaşımını benimser.

VIKOR yönteminin adımları aşağıda açıklanmıştır (Opricovic ve Tzeng, 2004). Öncelikle Alternatifler ve kriterler belirlenir. Karar matrisi oluşturulur. TOPSIS yönteminde olduğu gibi, kriter ağırlıkları (Entropi, SWARA, AHP vb. ile) belirlenir.

Adım 1: En iyi ve en kötü kriter değerlerinin belirlenmesi

Her bir kriter j için ideal (en iyi) ve anti-ideal (en kötü) değerler belirlenir. Bu adım, TOPSIS'in ideal çözüm belirleme adımına benzer.

- Fayda kriteri (büyük daha iyi) için:

$$F^+_{\ j} = \max_i (f_{ij})$$

$$f^-_{\ j} = \min_i (f_{ij})$$

- Maliyet kriteri (küçük daha iyi) için:

$$F^+_{\ j} = \min_i (f_{ij})$$

$$f^-_{\ j} = \max_i (f_{ij})$$

Adım 2: Normalize pişmanlık değerlerinin (E_{ij}) hesaplanması

Her bir alternatif i ve kriter j için pişmanlık terimi Eşitlik 5.19 yardımıyla hesaplanır.

$$E_{ij} = w_j \times \frac{(f_j^+ - f_{ij})}{(f_j^+ - f_j^-)} \quad (5.19)$$

Burada; w_j j kriterin ağırlığı, f_j^+ j kriteri için ideal değer (en iyi), f_j^- j kriteri için anti-ideal değerdir (en kötü).

Ağırlıklar genellikle $\sum w_j = 1$ olacak şekilde normalize edilir.

Adım 3: S_i (Toplam Pişmanlık) ve R_i (Maksimum Pişmanlık) hesabı

Her bir alternatif için önce Eşitlik 5.20 'deki toplam pişmanlık (S_i), ardından Eşitlik 5.21 'deki maksimum pişmanlık (R_i) hesaplanır:

$$S_i = \sum_j (E_{ij}) \quad (5.20)$$

$$R_i = \max_j (E_{ij}) \quad (5.21)$$

S_i , tüm kriterler üzerindeki toplam pişmanlığı (veya grup faydasını) gösterir.

R_i , alternatifin en kötü durumda kaldığı kriterdeki pişmanlığı temsil eder.

Adım 4: S^+ , S^- , R^+ , R^- ve Q_i değerlerinin hesaplanması

Önce S_i ve R_i değerleri içinden en iyi ve en kötü değerler belirlenir:

$$S^+ = \min_i (S_i)$$

$$S^- = \max_i (S_i)$$

$$R^+ = \min_i (R_i)$$

$$R^- = \max_i (R_i)$$

Daha sonra her alternatif i için VIKOR kompromis (uzlaşma) indeksi Q_i , Eşitlik 5.22 ile hesaplanır.

$$Q_i = \{v \times [(S_i - S^+) / (S^- - S^+)]\} + \{(1 - v) \times [(R_i - R^+) / (R^- - R^+)]\} \quad (5.22)$$

Burada, v : grup faydasına verilen önem parametresidir (genellikle $v = 0.5$ alınır).

Adım 5: Sıralama ve kompromis çözümün seçilmesi

Alternatifler S_i , R_i ve Q_i değerlerine göre ayrı ayrı artan şekilde sıralanır. VIKOR sıralaması, Q_i değerine göre yapılır; en küçük Q_i en iyi alternatiftir.

Kompromis çözümün kabul edilebilir olması için literatürde iki temel koşul bulunur:

1) Kabul edilebilir üstünlük koşulu için Eşitlik 5.23 kullanılır:

$$Q(A_2) - Q(A) \geq \frac{1}{(m-1)} \quad (5.23)$$

Burada; m=alternatif sayısıdır. A_1 , en iyi Q değerine sahip alternatif; A_2 ise Q sıralamasında ikinci alternatiftir.

2) Kabul edilebilir istikrar koşulu

A_1 alternatifi; S sıralamasında veya R sıralamasının en az birinde birinci sırada olmalıdır.

Kompromis çözümün belirlenmesi

- Her iki koşul da sağlanıyorsa; A_1 tek başına kompromis çözüm olarak kabul edilir.
- Koşullardan biri sağlanıyorsa; birden fazla alternatif, kompromis çözüm kümesi olarak önerilir.

6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde kriter ağırlıklandırma ve alternatiflerin değerlendirilmesi ile ilgili sonuçlar verilmiştir.

6.1. Kriter Ağırlıklandırma Sonuçları

Performans değerleri belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması Entropi ve SWARA teknikleri kullanılarak yapılmış; elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

6.1.1. Entropi yöntemi sonuçları

Entropi yöntemi kullanılarak yapılan kriter ağırlıklandırma sonuçları aşağıdaki tablolarda aşamalı olarak verilmiştir. Karar matrisi olarak Tablo 5.4 kullanılmıştır. Bu matris kullanılarak her bir kritere ait değerler Eşitlik 5.2 yardımıyla normalize edilmiştir. Normalize edilmiş karar matrisi Tablo 6.1’de gösterilmektedir.

Tablo 6.1. Entropi yöntemi için normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,1224	0,1520	0,1254	0,1055	0,0909	0,0930	0,0952	0,0877	0,0932
A2	0,1530	0,2027	0,1098	0,1281	0,0779	0,1250	0,0952	0,1052	0,0880
A3	0,0969	0,1013	0,0980	0,0954	0,1038	0,0625	0,1111	0,1228	0,0829
A4	0,0663	0,0675	0,0705	0,0879	0,0909	0,0937	0,0952	0,0877	0,0984
A5	0,0816	0,0844	0,0823	0,0954	0,0779	0,0937	0,0952	0,1052	0,0932
A6	0,0357	0,0337	0,0352	0,0804	0,1038	0,0625	0,0793	0,0701	0,0829
A7	0,0510	0,0608	0,0627	0,0753	0,0909	0,0937	0,0793	0,0877	0,0880
A8	0,1122	0,1351	0,0941	0,1130	0,0779	0,1250	0,0952	0,1052	0,0932
A9	0,2142	0,0844	0,2039	0,1030	0,0649	0,1250	0,1269	0,1052	0,0984
A10	0,0408	0,0506	0,0784	0,0603	0,1038	0,0625	0,0634	0,0701	0,0932
A11	0,0255	0,0270	0,0392	0,0552	0,1168	0,0625	0,0634	0,0526	0,0880

Eşitlik 5.3 yardımıyla hesaplanan kriterlere ilişkin entropi değerleri (e_j) Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Kriterlere ilişkin entropi değerleri

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	-0,2571	-0,2864	-0,2605	-0,2373	-0,218	-0,2219	-0,2239	-0,2135	-0,2213
A2	-0,2873	-0,3235	-0,2426	-0,2633	-0,1989	-0,2599	-0,224	-0,237	-0,214
A3	-0,2262	-0,2320	-0,2277	-0,2243	-0,2353	-0,1733	-0,2441	-0,2575	-0,2064
A4	-0,18	-0,1821	-0,1871	-0,2138	-0,218	-0,2219	-0,2239	-0,2135	-0,2282
A5	-0,2045	-0,2087	-0,2056	-0,2243	-0,1989	-0,2219	-0,2239	-0,237	-0,2213
A6	-0,1190	-0,1145	-0,1180	-0,2027	-0,2353	-0,1733	-0,2011	-0,1864	-0,2064
A7	-0,1518	-0,1703	-0,1737	-0,1949	-0,218	-0,2219	-0,2011	-0,2135	-0,214
A8	-0,246	-0,271	-0,222	-0,2465	-0,1989	-0,26	-0,224	-0,237	-0,221
A9	-0,330	-0,21	-0,3242	-0,2341	-0,1776	-0,2599	-0,262	-0,237	-0,228
A10	-0,131	-0,151	-0,2	-0,1694	-0,2353	-0,1733	-0,175	-0,186	-0,221
A11	-0,094	-0,098	-0,127	-0,16	-0,2509	-0,1733	-0,175	-0,155	-0,214

Yukarıdaki adımda elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan entropi değerleri 1'den çıkarılmıştır. Elde edilen bilginin farklılaşma derecesinin (d_j) değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Entropi katsayısı k ;

$$k = \frac{1}{\ln(11)} = 0,417$$

Tablo 6.3. e_j ve d_j değerleri (e_j =entropi değeri) (d_j =farklılaşma derecesi)

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
e_j	0,9281	0,9363	0,9543	0,9885	0,9945	0,9845	0,9917	0,9899	0,9993
d_j	0,0718	0,0636	0,0456	0,0114	0,0054	0,0155	0,0082	0,0101	0,0006

Kriterlere ilişkin entropi değerleri Eşitlik 5.5 yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.4. w_j değerleri

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
w_j	0,3089	0,2736	0,1962	0,0492	0,0235	0,0668	0,0354	0,0434	0,0029
Sıralama	1	2	3	5	8	4	7	6	9

Entropi yöntemi, kriterlerin alternatifler arasında ne ölçüde ayırt edici bilgi taşıdığını ölçen, tamamen objektif bir ağırlıklandırma yöntemidir. Bu nedenle elde edilen kriter ağırlıkları (w_j), uzman görüşlerine değil, karar matrisindeki verilerin dağılımına dayanmaktadır.

Tablo 6.4'te verilen entropi kriter ağırlıkları incelendiğinde, en yüksek ağırlığın yatırım maliyeti (c1) kriterine ait olduğu görülmektedir ($w_j = 0,3089$). Yatırım maliyetlerinin alternatifler arasında geniş bir aralıkta dağılması, bu kriterin bilgi içeriğinin ve ayırt ediciliğinin yüksek olmasına neden olmuştur. Bu durum, şeker sektöründe temiz üretim uygulamalarının değerlendirilmesinde ilk karar filtresinin yatırım maliyeti olduğunu göstermektedir.

İkinci sırada aylık işletme maliyeti (c2) yer almaktadır ($w_j = 0,2736$). Enerji, bakım ve personel giderlerinin alternatifler arasında önemli farklılıklar göstermesi, bu kriterin entropi ağırlığının yüksek çıkmasına neden olmuştur. Bu sonuç, işletme maliyetlerinin uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Üçüncü sırada net gelir (c3) kriteri bulunmaktadır ($w_j = 0,1962$). Yan ürün satışları ve enerji tasarruflarından elde edilen ekonomik kazanımların alternatifler arasında belirgin şekilde farklılaşması, bu kriterin yüksek ayırt ediciliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Uygulama riskleri (c6) ($w_j = 0,0668$) ve geri dönüş süresi (c4) ($w_j = 0,0492$) kriterleri orta düzeyde ağırlıklara sahiptir. Bu kriterler karar verme sürecinde önemli olmakla birlikte, alternatifler arasında keskin farklılıklar içermemeleri nedeniyle entropi yöntemi tarafından daha düşük ağırlıklarla değerlendirilmiştir.

Bu kriterleri sırasıyla, uygulamaya alınma süresi (0,0354) ve uygulama kolaylığı (0,0235) izlemektedir.

Çevresel kazançlar (c9) kriteri ise en düşük ağırlığa sahip kriter olarak belirlenmiştir ($w_j = 0,0029$). Bunun temel nedeni, tüm alternatiflerin çevresel performanslarının benzer ve yüksek düzeyde olmasıdır. Entropi yöntemi, alternatifler arasında benzerlik gösteren kriterleri, düşük bilgi taşıyan kriterler olarak değerlendirdiğinden, çevresel kazançların ağırlığı düşük çıkmıştır.

Genel olarak entropi yöntemi sonuçları incelendiğinde, ilk üç kriter toplam ağırlığın yaklaşık %78'ini oluşturmaktadır. Bu durum, şeker sektöründe temiz üretim alternatiflerinin değerlendirilmesinde ekonomik kriterlerin çevresel ve teknik kriterlere kıyasla daha yüksek ayırt ediciliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Entropi Ağırlıklandırma yönteminin uygulanmasıyla ilgili bir örnek

Adım1: Karar Matrisinin oluşturulması

Tablo 5.4'te verilen karar matrisi, alternatiflerin (A1-A11) kriterlere (c1-c9) göre aldığı ham değerlerden oluşmaktadır.

Örneğin A1 alternatifinin c1 kriterine ilişkin değeri:

- A1-c1 ham değeri: $x_{11}=1200$

Bu değer, A1 alternatifinin c1 kriteri açısından başlangıç performansının göstermektedir.

Adım 2: Normalize karar matrisinin elde edilmesi (Eşitlik 5.2)

Normalizasyon formülü: $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}}$

c1 Kriteri için tüm alternatifler toplanmıştır. Excel'de bu değer payda (denominator) olarak hesaplanmıştır.

A1 için normalize edilmiş değer aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{11} x_{1j} &= 1200 + 1500 + 950 + 650 + 800 + 350 + 500 + 1100 + 2100 + 400 + 250 \\ &= 9800\end{aligned}$$

$$\text{Normalize değer: } p_{11} = \frac{1200}{9800} = 0,1224$$

Bu değer, Tablo 6.1 'in A1- c1 hücresinde yer almaktadır.

Adım 3: Entropi Değeri Hesabı (Eşitlik 5.3)

Normalizasyon sonrası $p_{11} = 0,1224$ (Tablo 6.1)

c1 kriteri için entropi:

$$\ln(0,1224) = -2,1004$$

$$A1-c1 \text{ için } p_{11} \ln(p_{11}) = 0,1224 \times \ln(0,1224)$$

$$= 0,1224 \times (-2,1004)$$

$$= -0,2571 \text{ (Bu değer Tablo 6.2'de yer almaktadır.)}$$

Alternatif sayısı $m=11$

Entropi katsayısı $k = 1/\ln(m)$

$$= 1 / \ln(11) = 0,417$$

Tablo 6.2 ‘deki c1 sütununda yer alan değerlerin toplamı: -2, 22569

Entropi değeri formülü:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij})$$

Toplam entropi: $e_1 = -(k) \times (-2,22569)$

$$e_1 = - (0,417) \times (-2,22569)$$

$$e_1 = 0, 92819 \text{ (Tablo 6.3)}$$

3. Adım: Bilgi Derecesi Hesabı (d_j) (Eşitlik 5.4)

Bilgi derecesi

$$d_1 = 1 - e_1 = 1 - 0,92819 = 0,0718 \text{ (Tablo 6.3 ile birebir uyumludur)}$$

4. Adım: Kriter Ağırlığı (w_j) (Eşitlik 5.5)

Kriter ağırlığı:

$$w_1 = \frac{d_1}{\sum d_j}$$

$$\sum d_j = 0,23249$$

$$d_1 = 0,0718$$

$$w_1 = \frac{0,07181}{0,23249} = 0,3089$$

Bu değer Tablo 6.4’teki w_1 değeri ile birebir uyumludur.

6.1.2. SWARA yöntemi sonuçları

Kriterlerin birbirlerine göre hangi oranda önemli olduğu; karşılaştırmalı önem düzeyleri (s_j), önem vektörü (w_j) ve kriter ağırlıkları (q_j) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.5’te sunulmaktadır.

S_j ve önem sırası uzman görüşüne dayanmaktadır.

$$k_j = 1 + s_j$$

$$w_j = w_{j-1} / k_j$$

$$q_j = w_j / \sum w_j$$

Tablo 6.5. SWARA ile kriter ağırlıklandırma sonuçları

Kriter	Önem sırası	s_j	k_j	w_j	q_j
c9-Çevresel Kazançlar	1		1	1,00	0,17
c3-Net Gelir	2	0,18	1,18	0,85	0,14
c1-Yatırım Maliyeti	3	0,13	1,13	0,75	0,12
c2-Aylık İşletme Maliyeti	4	0,10	1,10	0,68	0,11
c4-Geri Dönüş Süresi	5	0,09	1,09	0,63	0,10
c5-Uygulama Kolaylığı	6	0,09	1,09	0,57	0,10
c7-Uygulamaya Alınma Süresi	7	0,07	1,07	0,54	0,09
c6-Uygulama Riski	8	0,06	1,06	0,51	0,08
c8-Teknik Personel İhtiyacı	9	0,05	1,05	0,48	0,08
		0,77		6,0026	1,00

Tabloda yer alan 0,77 değeri, uzmanlar tarafından belirlenen göreceli önem katsayılarının (s_j) toplamını göstermekte olup, yalnızca bilgilendirme amacıyla sunulmuştur. Nihai kriter ağırlıkları normalize edilmiş q_j değerleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Tablo 6.5'te verilen sonuçlar, uzmanların temiz üretim uygulamalarını değerlendirirken önceliklerini açık bir şekilde yansıtmaktadır. Buna göre, çevresel kazançlar (c9) kriteri, 0,17'lik ağırlık değeri ile en yüksek öneme sahip kriter olmuştur. Bu durum, temiz üretim uygulamalarında çevresel faydaların (su ve enerji tasarrufu, emisyon azaltımı, atık geri kazanımı vb.) şeker sektöründeki karar vericiler açısından öncelikli olduğunu göstermektedir. Net gelir (c3) kriterinin 0,14'lük değerle ikinci sırada yer alması, çevresel faydanın ekonomik sürdürülebilirlikle birlikte ele alındığını, ancak çevresel performansın karar sürecinde stratejik bir öncelik taşıdığını ortaya koymaktadır.

Yatırım maliyeti (c1) ve aylık işletme maliyeti (c2) kriterleri ise sırasıyla 0,12 ve 0,11 ağırlıklarıyla ekonomik unsurların karar sürecindeki önemini göstermektedir. Bu değerler, maliyet unsurlarının dikkate alınsa da, çevresel ve ekonomik kazançlar yanında ikinci planda yer aldığını ortaya koymaktadır.

Genel olarak, SWARA yöntemi ile elde edilen sonuçlar, şeker sektöründe temiz üretim stratejilerinin başarıya ulaşması için çevresel faydaların ekonomik performansla dengelenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, hem sürdürülebilir kalkınma hedeflerine hem de endüstriyel rekabetçiliğe katkı sağlamaktadır.

Şeker üretiminde temiz üretim kriterlerinin değerlendirilmesinde kullanılan SWARA ve Entropi yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, iki yaklaşımın farklı bakış açıları sunduğu açıkça görülmektedir. Entropi yöntemi, karar matrisindeki sayısal verilerden hareketle ekonomik kriterleri baskın olarak belirlemiştir. SWARA yöntemi ise uzman görüşlerine dayanarak çevresel kazançları en önemli kriter olarak ön plana çıkarmıştır. Bu farklılık, çalışmanın hem veri temelli (objektif) hem de uzman deneyimine dayalı (subjektif) değerlendirmeleri kapsadığını ve ÇKKV yaklaşımının bütüncül yapısını güçlendirdiğini göstermektedir.

Özellikle, temiz üretim uygulamaları gibi sürdürülebilirlik odaklı karar problemlerinde, yalnızca ekonomik göstergelere değil, çevresel performansa da yüksek önem verilmesi gerektiği SWARA sonuçlarıyla desteklenmiştir. Entropi yöntemi ise, mevcut tesis koşullarında ekonomik fizibilitenin karar sürecinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, Entropi ve SWARA yöntemlerinin birlikte kullanılması, kriter ağırlıklarının hem sayısal ayrıştırıcılığa hem de uzman önceliklerine dayalı olarak belirlenmesini sağlamış; karar sürecinin güvenilirliğini ve analitik derinliğini artırmıştır. Elde edilen sonuçlar, temiz üretim alternatiflerinin değerlendirilmesinde ekonomik fizibilite ile çevresel sürdürülebilirliğin dengeli bir biçimde ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

6.2. Alternatiflerin Değerlendirme Sonuçları

6.2.1. TOPSİS yöntemi sonuçları

Şeker fabrikalarında temiz üretim olanaklarının değerlendirilmesi için oluşturulan model, TOPSIS yönteminin yedi adımdan oluşan çözüm aşamaları dikkate alınarak Microsoft Office Excel programında uygulanmıştır. Her iki kriter ağırlıklandırma yönteminden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Entropi ağırlıklandırma yöntemine göre TOPSIS sonuçları:

Entropi yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS analizinin sonuçları bu bölümde aşamalı olarak sunulmuştur. Tüm ağırlıklandırma yöntemlerinde olduğu gibi TOPSIS metodunun uygulama adımları aynı olduğundan, yalnızca bu bölümde ayrıntılı açıklamalara yer verilmiş; SWARA yöntemi için de aynı hesaplama adımları takip edilmiştir.

Bu analizde karar matrisi olarak Tablo 5.4 esas alınmıştır.

Tablo 5.4'teki karar matrisinin her sütunundaki değerlerin, ilgili sütundaki değerlerin kareleri toplamının kareköküne bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş değerler Tablo 6.6'da gösterilmiştir.

Tablo 6.6. TOPSIS yöntemi normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,348	0,439	0,374	0,341	0,298	0,300	0,310	0,284	0,309
A2	0,435	0,586	0,327	0,414	0,255	0,400	0,310	0,341	0,292
A3	0,276	0,293	0,292	0,309	0,340	0,200	0,361	0,398	0,275
A4	0,189	0,195	0,210	0,284	0,298	0,300	0,310	0,284	0,326
A5	0,232	0,244	0,246	0,309	0,255	0,300	0,310	0,341	0,309
A6	0,102	0,098	0,105	0,260	0,340	0,200	0,258	0,228	0,275
A7	0,145	0,176	0,187	0,244	0,298	0,300	0,258	0,284	0,292
A8	0,319	0,391	0,281	0,365	0,255	0,400	0,310	0,341	0,309
A9	0,610	0,244	0,608	0,333	0,213	0,400	0,413	0,341	0,326
A10	0,116	0,146	0,234	0,195	0,340	0,200	0,207	0,228	0,309
A11	0,073	0,078	0,117	0,179	0,383	0,200	0,207	0,171	0,292

Tablo 6.6'daki normalize karar matrisi, Entropi yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıklarıyla çarpılarak, Tablo 6.7'deki ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmiştir. Bu tablo TOPSİS'in sonraki adımları için temel oluşturmuştur.

Tablo 6.7. Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,108	0,120	0,073	0,017	0,007	0,020	0,011	0,012	0,001
A2	0,134	0,160	0,064	0,020	0,006	0,027	0,011	0,015	0,001
A3	0,085	0,080	0,057	0,015	0,008	0,013	0,013	0,017	0,001
A4	0,058	0,053	0,041	0,014	0,007	0,020	0,011	0,012	0,001

Tablo 6.7. (Devam) Entropi yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A5	0,072	0,067	0,048	0,015	0,006	0,020	0,011	0,015	0,001
A7	0,045	0,048	0,037	0,012	0,007	0,020	0,009	0,012	0,001
A8	0,099	0,107	0,055	0,018	0,006	0,027	0,011	0,015	0,001
A9	0,188	0,067	0,119	0,016	0,005	0,027	0,015	0,015	0,001
A 10	0,036	0,040	0,046	0,010	0,008	0,013	0,007	0,010	0,001
A 11	0,022	0,021	0,023	0,009	0,009	0,013	0,007	0,007	0,001

Tablo 6.7’deki ağırlıklı normalize matrisin her bir sütunundaki en büyük değer pozitif ideal çözümü (A^+); ağırlıklı normalize matrisin her bir sütunundaki en küçük değer ise negatif ideal çözümü (A^-) temsil etmektedir (Tablo 6.8).

Tablo 6.8 Entropi yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A+	0,0224	0,0214	0,1193	0,0088	0,0090	0,0134	0,0073	0,0074	0,0009
A-	0,1883	0,1603	0,0206	0,0204	0,0050	0,0268	0,0146	0,0173	0,0008

Alternatiflere ait pozitif ideal uzaklık (S^+), negatif ideal uzaklık (S^-) ve ideal çözüme göre yakınlık katsayısı (C_i) hesaplanmıştır. C_i değeri 1’e yaklaştıkça alternatifin daha iyi olduğu kabul edilmektedir (Tablo 6.9)

Bu çalışmada, şeker üretiminde temiz üretim seçeneklerinin önceliklendirilmesi amacıyla Entropi yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiş ve bu ağırlıklar kullanılarak TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Analiz kapsamında toplam 11 temiz üretim alternatifi değerlendirilmiş ve her bir alternatif için ideal çözüme yakınlık katsayısı (C_i^+) hesaplanmıştır. Tablo 6.9’da görüldüğü üzere, TOPSIS analizi sonuçlarına göre alternatiflerin sıralanması, $A_{10} > A_{11} > A_6 > A_7 > A_4 > A_5 > A_3 > A_8 > A_9 > A_1 > A_2$ şeklinde oluşmuştur. Bu sıralama, her bir alternatifin çevresel, ekonomik ve teknik performansının bütüncül değerlendirmesini yansıtmaktadır.

Tablo 6.9. Entropi yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları

	S_i^+	S_i^-	C_i^+	Sıralama
A1	0,1389	0,1049	0,4303	10
A2	0,1878	0,0694	0,2698	11
A3	0,1068	0,1365	0,5610	7
A4	0,0923	0,1699	0,6481	5
A5	0,0986	0,1522	0,6070	6
A6	0,0993	0,2069	0,6756	3
A7	0,0901	0,1833	0,6704	4
A8	0,1326	0,1100	0,4535	8
A9	0,1730	0,1360	0,4401	9
A10	0,0770	0,1968	0,7188	1
A11	0,0964	0,2175	0,6930	2

A10 - Melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesi, en yüksek C_i^+ değerine (0, 7188) sahip olarak birinci sırada yer almıştır. Melasın geleneksel satışı yerine, ekonomik değeri yüksek bir yan ürüne dönüştürülmesi, hem çevresel hem ekonomik kazanç sağlamaktadır. Bu seçenek, döngüsel ekonomi yaklaşımına en uygun uygulamalar arasında öne çıkmaktadır.

A11- Kireç çamurunun tarımda kullanımı, 0, 6930 değeriyle ilk alternatifi izlemiştir. Kireç çamurunun tarımsal amaçla değerlendirilmesi, toprak kalitesini artırmakta ve atık depolama ihtiyacını azaltmaktadır. Düşük yatırım maliyeti ve yüksek çevresel fayda, bu seçeneğin öne çıkmasını sağlamıştır.

Su yönetimi (A4, A6) ve kimyasal azaltımı (A7) uygulamaları orta düzeyde performans göstermiştir. Bu alternatiflerin özellikle düşük maliyetli olmaları ve doğrudan çevresel kazanım sağlamaları nedeniyle avantajlı olduğu söylenebilir.

Enerji verimliliğine yönelik çözümler (A1, A2, A3), teknik olarak avantajlı olsa da, yatırım maliyeti ve risk faktörleri nedeniyle alt sıralarda yer almıştır. Bu bulgular, temiz üretim stratejilerinin sadece çevresel değil, ekonomik uygulanabilirlik açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Entropi–TOPSIS bütünleşik yöntemi ile elde edilen bulgular, şeker endüstrisinde atıkların ekonomik değere dönüştürülmesine yönelik temiz üretim uygulamalarının, sürdürülebilir üretim hedefleri açısından öncelikli olarak ele alınması

gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, çalışmada elde edilen sıralamanın, sektör için karar vericilere yol gösterici nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

Entropi ağırlıklandırma yöntemine göre TOPSIS analizi için bir örnek

Bu çalışmada TOPSIS yöntemi, Entropi yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak uygulanmıştır. Hesaplama adımları Microsoft Excel ortamında gerçekleştirilmiştir. Aşağıda, yöntem adımları A1 alternatifi ve c1 kriteri üzerinden örneklenerek açıklanmıştır.

Adım1: Karar Matrisinin oluşturulması

Tablo 5.4'te verilen karar matrisi, alternatiflerin (A1-A11 kriterlere (c1-c9) göre aldığı ham değerlerden oluşmaktadır.

Örneğin A1 alternatifi için c1 kriterine ilişkin değeri:

$$A1-c1 \text{ ham değeri: } x_{11}=1200$$

Bu değer, A1 alternatifi için c1 kriteri açısından başlangıç performansının göstermektedir.

Adım 2: Normalize karar matrisinin elde edilmesi (Eşitlik 5.12)

$$\text{Normalizasyon formülü: } r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

c1 kriteri için tüm alternatiflerin kareleri toplanmış ve karekökü alınmıştır. Excel'de bu değer payda (denominator) olarak hesaplanmıştır.

A1 için normalize edilmiş değer aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\sqrt{1200^2 + 1500^2 + 950^2 + 650^2 + 800^2 + 350^2 + 500^2 + 1100^2 + 2100^2 + 400^2 + 250^2}$$

Karekök hesaplaması:

$$\sqrt{11870023} = 3445,3$$

Normalize değer:

$$r_{11} = \frac{1200}{3445,3} = 0,348$$

Bu değer, Tablo 6.6'daki A1- c1 hücresinde yer almaktadır.

Adım 3: Ağırlıklı normalize karar matrisinin hesaplanması

Entropi yöntemi sonucunda her kriter için bir ağırlık değeri elde edilmiştir. c1 kriterinin entropi ağırlığı w_1 olup, Excel'de ilgili hücrede tanımlanmıştır.

Ağırlıklı normalize değer, Eşitlik 5.13 kullanılarak hesaplanır.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

$$w_1 = 0,3089 \text{ (Tablo 6.4)}$$

$$A_1 \text{ alternatifini ve } c_1 \text{ kriteri için: } v_{11} = w_{11} \times 0,348$$

$$v_{11} = 0,1075$$

Bu değer, Tablo 6.7'deki A1- c1 hücresinde görölmektedir.

Adım 4: Pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi

Ağırlıklı normalize karar matrisinde her kriter sütunu için:

- En iyi pozitif ideal çözümleri (A^+),
- En kötü değer ise negatif ideal çözümleri (A^-) temsil etmektedir.

Tablo 6.7 'deki ilk sütundan en küçük ve en büyük değerler bulunur.

Maliyet kriterleri (küçük daha iyi) için Eşitlik 5.15 kullanılır:

c1 Kriteri için;

$$A_1^+ = \{\min (v_{11}, 1)\}$$

$$= 0, 0224 (A_{11})$$

$$A_1^- = \{\max (v_{9, 1})\}$$

$$= 0, 1883 (A_9)$$

Bu değerler Tablo 6.8'de bulunmaktadır.

Adım 5: Pozitif ve negatif ideal çözümleri uzaklıklarının hesaplanması

Her alternatifin en iyi duruma ve en kötü duruma olan uzaklıkları hesaplanır. Her kriter için şu sorular sorulur: A1'in bu kriterdeki değeri,

- Ideal çözümleri ne kadar uzak?
- En kötü çözümleri ne kadar uzak?

Bu uzaklıklar A_1 için pozitif ideal uzaklık Eşitlik 5.16 ile hesaplanır.

$$S_1^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_1^+)^2}$$

A1 için c1: (tek hücre üzerinden)

$$(v_{1,1} - A_1^+)^2 = (0,108 - 0,0224)^2$$

$$= (0, 0856)^2$$

$$= 0, 00733$$

Negatif ideale uzaklık katkısı için Eşitlik 5.17 'den yararlanılır.

$$S_1^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{1,j} - A_{1j}^-)^2}$$

A1 için c1: (tek hücre üzerinden)

$$\begin{aligned}(V_{1,1} - A_{11}^-)^2 &= (0,108 - 0,1883)^2 \\ &= (-0,0803)^2 \\ &= 0,00645\end{aligned}$$

Bu iki değer A1 alternatifinin toplam S^+ ve S^- hesabına c1 kriterinin katkısıdır. Tüm kriterler (c1-c9) için aynı işlem yapılır. Bulunan sayılar toplanır ve karekökü alınır.

Sonuç A1 için $S_1^+ = 0,1389$

$$S_1^- = 0,1049$$

Adım 6: Görelî Yakınlık Katsayısının Hesaplanması

Son adımda A1 alternatifinin ideal çözüme görelî yakınlık katsayıları Eşitlik 5.18'den hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}c_1 &= \frac{S_1^-}{S_1^+ + S_1^-} \\ &= \frac{0,1049}{0,1389 + 0,1049} \\ &= 0,4303\end{aligned}$$

Özellikleri:

- $0 \leq C_1 \leq 1$
- 1'e yaklaştıkça alternatif daha iyidir.
- 0'a yaklaştıkça alternatif daha kötüdür.

Adım 7: Alternatiflerin sıralanması ve sonuç

Elde edilen C_i değerleri doğrultusunda, alternatiflerin büyükten küçüğe sıralanması sonucunda C^+_1 , 10. sırada yer almıştır.

SWARA yöntemine göre TOPSIS sonuçları:

SWARA yöntemi ile kriter ağırlıklandırması yapılan değerlerin TOPSIS sonuçları Tablo 6.10 - 6.13 arasında gösterilmiştir.

Tablo 6.10. SWARA yöntemine göre normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,348	0,439	0,374	0,341	0,298	0,300	0,310	0,284	0,309
A2	0,435	0,586	0,327	0,414	0,255	0,400	0,310	0,341	0,292
A3	0,276	0,293	0,292	0,309	0,340	0,200	0,361	0,398	0,275
A4	0,189	0,195	0,210	0,284	0,298	0,300	0,310	0,284	0,326
A5	0,232	0,244	0,246	0,309	0,255	0,300	0,310	0,341	0,309
A6	0,102	0,098	0,105	0,260	0,340	0,200	0,258	0,228	0,275
A7	0,145	0,176	0,187	0,244	0,298	0,300	0,258	0,284	0,292
A8	0,319	0,391	0,281	0,365	0,255	0,400	0,310	0,341	0,309
A9	0,610	0,244	0,608	0,333	0,213	0,400	0,413	0,341	0,326
A10	0,116	0,146	0,234	0,195	0,340	0,200	0,207	0,228	0,309
A11	0,073	0,078	0,117	0,179	0,383	0,200	0,207	0,171	0,292

Tablo 6.11. SWARA yöntemine göre TOPSIS ağırlıklı normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,059	0,062	0,045	0,038	0,030	0,030	0,028	0,023	0,025
A2	0,074	0,082	0,039	0,046	0,026	0,040	0,028	0,027	0,023
A3	0,047	0,041	0,035	0,034	0,034	0,020	0,033	0,032	0,022
A4	0,032	0,027	0,025	0,031	0,030	0,030	0,028	0,023	0,026
A5	0,039	0,034	0,029	0,034	0,026	0,030	0,028	0,027	0,025
A6	0,017	0,014	0,013	0,029	0,034	0,020	0,023	0,018	0,022
A7	0,025	0,025	0,022	0,027	0,030	0,030	0,023	0,023	0,023
A8	0,054	0,055	0,034	0,040	0,026	0,040	0,028	0,027	0,025
A9	0,104	0,034	0,073	0,037	0,021	0,040	0,037	0,027	0,026
A10	0,020	0,021	0,028	0,021	0,034	0,020	0,019	0,018	0,025
A11	0,012	0,011	0,014	0,020	0,038	0,020	0,019	0,014	0,023

Tablo 6.12. SWARA yöntemine göre TOPSIS pozitif ideal ve negatif ideal çözümler

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A ⁺	0,0123	0,0109	0,0730	0,0196	0,0383	0,0200	0,0186	0,0137	0,0261
A ⁻	0,1036	0,0820	0,0126	0,0456	0,0213	0,0400	0,0372	0,0319	0,0220

Tablo 6.13. SWARA yöntemine göre TOPSIS genel sonuçları

	Si+	Si-	Ci+	Sıralama
A1	0,0788	0,0620	0,4405	8
A2	0,1073	0,0414	0,2785	11
A3	0,0656	0,0783	0,5442	7
A4	0,0584	0,0940	0,6167	5
A5	0,0625	0,0840	0,5732	6
A6	0,0619	0,1156	0,6513	3
A7	0,0568	0,1021	0,6426	4
A8	0,0805	0,0615	0,4333	9
A9	0,1019	0,0778	0,4328	10
A10	0,0470	0,1129	0,7062	1
A11	0,0590	0,1242	0,6780	2

Tablo 6.13'te de görüldüğü üzere, SWARA yöntemiyle ağırlıklandırılmış kriterlere göre yapılan TOPSIS analizinde alternatiflerin sıralaması **A10 > A11 > A6 > A7 > A4 > A5 > A3 > A1 > A8 > A9 > A2** şeklinde oluşmuştur. Bu sıralama, Entropi yöntemiyle elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde benzerlik göstermekte olup, yalnızca alt sıralarda küçük farklılıklar gözlenmiştir. Her iki yöntemde de A10 ve A11 alternatiflerinin ilk iki sırada yer alması, sonuçların tutarlılığını ve güvenilirliğini desteklemektedir.

Sonuç olarak, SWARA-TOPSIS analizi, şeker üretiminde temiz üretim stratejilerinin seçiminde, yan ürün değerlendirme ve atık geri kazanımına dayalı uygulamaların öncelikli olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, sektörde döngüsel ekonomi, kaynak verimliliği ve sürdürülebilirlik ilkelerinin karar vericiler açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

6.2.2. VİKOR yöntemi sonuçları

Şeker fabrikalarında temiz üretim olanaklarının değerlendirilmesi için oluşturulan modelin VİKOR yöntemine göre 6 adımdan ve iki koşuldan oluşan çözümü Microsoft

Office Excel programı kullanılarak yapılmıştır. Entropi-VİKOR ve SWARA-VİKOR yöntemleri değerlendirme sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Entropi ağırlıklandırma yöntemine göre VİKOR sonuçları:

Her bir kriterin veri dağılımına bakılarak, Entropi yöntemi ile objektif ağırlıklar (w_j) Tablo 6.4'te hesaplanmıştır. Bu kriter ağırlıkları VİKOR yönteminde kullanılmıştır.

İlk adımda, Tablo 5.4 'te verilen karar matrisi kullanılarak her bir kriter için en iyi fj^+ ve en kötü fj^- değerleri belirlenmiştir (Tablo 6.14). Fayda (artan) yönlü kriterlerde fj^+ , ilgili sütundaki maksimum değeri, fj^- ise minimum değeri; maliyet (azalan yönlü kriterlerde ise bunun tersi alınmıştır).

Tablo 6.14. VİKOR yöntemi için en iyi ve en kötü kriterler

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
fj^+	250	8000	520000	2,2	9	2	4	3	95
fj^-	2100	60000	90000	5,1	5	4	8	7	80

İkinci adımda, kriterlerin farklı birimlere sahip olması nedeniyle, karar matrisi Entropi yöntemiyle elde edilen w_j ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı normalize değerler elde edilmiştir. Bu çalışmada değerler Eşitlik 6.19 yardımıyla hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.15'te verilmiştir.

$$E_{ij} = w_{ij} \times \frac{(f^+ - f_{ij})}{(f^+ - f^-)}$$

Burada; w_j j kriterin ağırlığı, f^+ i kriteri için ideal değer (en iyi) ve f^- j kriteri için anti-ideal değerdir (en kötü).

Tablo 6.15'te yer alan A1 alternatifinin c1 kriteriyle olan normalize değerini hesaplarsak;

$$A1-c1 \text{ için } E_{11} = 0,308 \times \frac{250-1200}{(250-2100)}$$

$$E_{11} = 0,308 \times (0,513)$$

$$E_{11} = 0,1586$$

Tablo 6.15 Entropi yöntemine göre VİKOR ağırlıklı normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,1586	0,1946	0,0912	0,0339	0,0117	0,0334	0,0177	0,0216	0,0009
A2	0,2087	0,2736	0,1095	0,0492	0,0176	0,0668	0,0177	0,0325	0,0019
A3	0,1168	0,1157	0,1232	0,0271	0,0058	0	0,0265	0,0433	0,0028
A4	0,0667	0,0631	0,1551	0,0220	0,0117	0,0334	0,0177	0,0216	0
A5	0,0918	0,0894	0,1414	0,0271	0,0176	0,0334	0,0177	0,0325	0,0009
A6	0,0166	0,0105	0,1962	0,0169	0,0058	0	0,0088	0,0108	0,0028
A7	0,0417	0,0526	0,1642	0,0135	0,0117	0,0334	0,0088	0,0216	0,0019
A8	0,1419	0,1683	0,1277	0,0390	0,0176	0,0668	0,0177	0,0325	0,0009
A9	0,3088	0,0894	0	0,0322	0,0235	0,0668	0,0354	0,0325	0
A10	0,0250	0,0368	0,1460	0,0033	0,0058	0	0	0,0108	0,0009
A11	0	0	0,1916	0	0	0	0	0	0,0019

Üçüncü adımda, her bir alternatif için toplam görelî uzaklık (S_i) ve maksimum pişmanlık (R_i) değerleri, Eşitlik 5.20 ve 5.21 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$S_i = \sum_j (E_{ij})$$

$$R_i = \max_j (E_{ij})$$

Dördüncü adımda, elde edilen S_i ve R_i değerleri, minimum (S^+ , R^+) ve maksimum (S^- , R^-) noktalar kullanılarak, her alternatif için VİKOR kompromis (uzlaşma) indeksi Q_i , Eşitlik 5.22 ile hesaplanmıştır.

$$Q_i = \{v \times [(S_i - S^+) / (S^- - S^+)] + \{(1 - v) \times [(R_i - R^+) / (R^- - R^+)]\}$$

Bu çalışmada karar vericinin stratejisini yansıtmak üzere, $v = 0,5$ alınmıştır. S_i , R_i , Q_i değerleri ve alternatiflerin sıralaması Tablo 6.16'da gösterilmiştir.

Q_i değerleri, tüm kriterleri birlikte dikkate alan genel performans göstergesi olup, en küçük Q_i değerine sahip alternatif, en uygun temiz üretim seçeneği olarak yorumlanmaktadır. Ancak, kompromis çözümün kabul edilebilir olması için literatürde iki temel koşuldan söz edilmiştir.

1) Kabul edilebilir üstünlük koşulu kontrolü için Eşitlik 5.23 kullanılmıştır.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{(m-1)}$$

Burada:

m = alternatif sayısı

$$DQ = \text{Eşik} = 1/10$$

$$0,0926 < 0,1$$

Tablo 6.16 Entropi-VİKOR'a göre S_j , R_j , Q_j ve alternatiflerin sıralamaları

	S_j	R_j	Q_j	Sıralama
A1	0,5640	0,1946	0,5095	8
A2	0,7777	0,2736	0,9049	11
A3	0,4616	0,1232	0,2294	3
A4	0,3917	0,1551	0,2556	5
A5	0,4521	0,1414	0,2705	7
A6	0,2688	0,1962	0,2610	6
A7	0,3498	0,1642	0,2443	4
A8	0,6128	0,1683	0,4804	9
A9	0,5889	0,3088	0,8384	10
A10	0,2289	0,1460	0,0917	1
A11	0,1935	0,1916	0,1843	2

Entropi-VİKOR analizine göre, melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesini temsil eden A10 alternatifi, 0,0917 değeri ile ilk sırada yer almıştır. Ancak, kabul edilebilir üstünlük ve istikrar koşulları birlikte değerlendirildiğinde, A10 alternatifinin tek başına yeterli bir çözüm olarak seçilemediği görülmüştür. Buna karşılık, kireç çamurunun tarımda kullanılması (A11 - 0, 1843) ve yıkama suyunun filtrelererek tekrar kullanımı (A4 - 0, 02294) alternatiflerinin de karar vericiler açısından dikkate alınması gereken önemli seçenekler olduğu görülmektedir. Koşullardan biri sağlanmadığı için, bu üç alternatif, **kompromis çözüm kümesini** oluşturmaktadır. Bu çözüm kümesi, ekonomik geri dönüşü, çevresel kazanımları ve işletme maliyetleri dikkate alındığında temiz üretim açısından optimum çözümdür.

SWARA ağırlıklandırma yöntemine göre VİKOR sonuçları:

Her bir kriterin veri dağılımına bakılarak, SWARA yöntemi ile objektif ağırlıklar (qj) Tablo 6,5'te hesaplanmıştır. Bu kriter ağırlıkları VİKOR yönteminde kullanılmıştır.

İlk adımda, Tablo 5.4 'te verilen karar matrisi kullanılarak her bir kriter için en iyi ff^+ ve en kötü ff^- değerleri belirlenmiştir (Tablo 6.14). Fayda (artan) yönlü kriterlerde ff^+ , ilgili sütundaki maksimum değeri, ff^- ise minimum değeri; maliyet (azalan yönlü kriterlerde ise bunun tersi alınmıştır).

İkinci adımda, kriterlerin farklı birimlere sahip olması nedeniyle karar matrisi, SWARA yöntemiyle elde edilen q_j ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı normalize değerler elde edilmiştir. Bu çalışmada değerler Eşitlik 6.19 yardımıyla hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.17’de verilmiştir.

$$E_{ij} = q_j \times \frac{(f^+ - f_{ij})}{(f^+ - f^-)}$$

Burada; q_j j kriterin ağırlığı, f^+ i kriteri için ideal değer (en iyi), f^- j kriteri için anti-ideal değerdir (en kötü).

Tablo 6.17’de yer alan A1 alternatifinin c1 kriteriyle olan normalize değerini hesaplırsak;

$$A1-c1 \text{ için } E_{11} = 0,17 \times \frac{250-1200}{(250-2100)}$$

$$E_{11} = 0,17 \times (0,513)$$

$$E_{11} = 0,0872$$

Tablo 6.17 SWARA yöntemi için VİKOR ağırlıklı normalize karar matrisi

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	0,0872	0,0996	0,0558	0,0758	0,050	0,050	0,045	0,040	0,0266
A2	0,1148	0,1400	0,0669	0,1100	0,075	0,100	0,045	0,060	0,0533
A3	0,0643	0,0592	0,0753	0,0606	0,025	0	0,067	0,080	0,080
A4	0,0367	0,0323	0,0948	0,0493	0,05	0,050	0,045	0,040	0
A5	0,0505	0,0457	0,0865	0,0606	0,075	0,050	0,045	0,060	0,0266
A6	0,0091	0,0053	0,1200	0,0379	0,025	0	0,022	0,020	0,080
A7	0,0229	0,0269	0,1004	0,0303	0,05	0,050	0,022	0,040	0,0533
A8	0,0781	0,0861	0,0781	0,0872	0,075	0,100	0,045	0,060	0,0266
A9	0,1700	0,0457	0	0,0720	0,1	0,100	0,090	0,060	0
A10	0,0137	0,0188	0,0893	0,0075	0,025	0	0	0,020	0,0266
A11	0	0	0,1172	0	0	0	0	0	0,0533

Üçüncü adımda, her bir alternatif için toplam göreceli uzaklık (S_i) ve maksimum pişmanlık (R_i) değerleri, Eşitlik 5.20 ve 5.21 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$S_i = \sum_j (E_{ij})$$

$$R_i = \max_j (E_{ij})$$

Dördüncü adımda, elde edilen S_i ve R_i değerleri, minimum (S^+ , R^+) ve maksimum (S^- , R^-) noktalar kullanılarak, VIKOR kompromis (uzlaşma) indeksi Q_i , her alternatif için Eşitlik 5.22 ile hesaplanmıştır.

$$Q_i = \{v \times [(S_i - S^+) / (S^- - S^+)]\} + \{(1 - v) \times [(R_i - R^+) / (R^- - R^+)]\}$$

Bu çalışmada karar vericinin stratejisini yansıtmak üzere, $v = 0,5$ alınmıştır. S_i , R_i , Q_i değerleri ve alternatiflerin sıralaması Tablo 6.18’de gösterilmiştir.

Tablo 6.18 SWARA-VIKOR’a göre S_i , R_i , Q_i ve alternatiflerin sıralamaları

	S_j	R_j	Q_i	Sıralama
A1	0,5302	0,0996	0,4114	8
A2	0,7651	0,1400	0,8333	10
A3	0,5120	0,080	0,2871	4
A4	0,3982	0,0948	0,2741	3
A5	0,5001	0,0865	0,3133	6
A6	0,3200	0,1200	0,3478	7
A7	0,3965	0,1004	0,3037	5
A8	0,6363	0,1000	0,5027	9
A9	0,6378	0,1700	0,8929	11
A10	0,2011	0,0893	0,0774	1
A11	0,1705	0,1172	0,2067	2

Q_i değerleri, tüm kriterleri birlikte dikkate alarak her alternatifin genel performansını temsil eder. Q_i değeri küçük olan alternatif en uygun temiz üretim seçeneğidir. Ancak, kompromis çözümün kabul edilebilir olması için literatürde iki temel koşuldan söz edilmiştir.

- 1) Kabul edilebilir üstünlük koşulu kontrolü için Eşitlik 5.23 kullanılmıştır.

$$DQ = \text{Eşik} = 1/10$$

$$0,1293 > 0,1$$

- **Üstünlük koşulu sağlanmadığı için 3. sıradaki alternatif ile 1. Sıradaki alternatifin arasındaki farka bakılır.**

$$Q(A_4) - Q(A_{10}) = 0,1967$$

$$0,1967 > 0,1$$

- **Üstünlük farkı koşulu sağlanmıştır.**

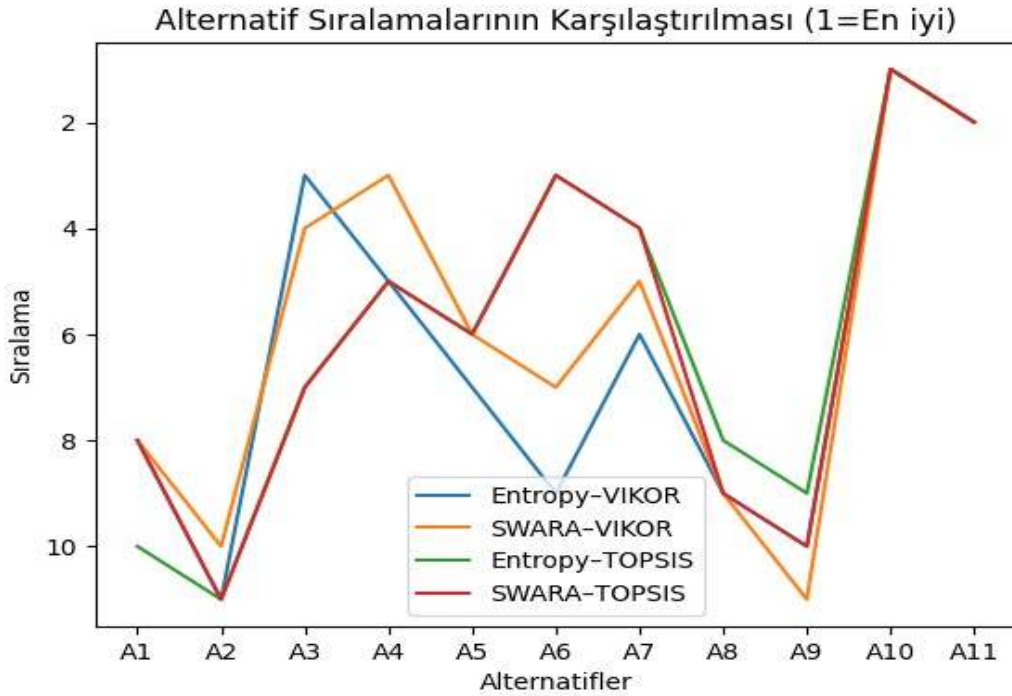
VIKOR yöntemi, SWARA ile belirlenen kriter ağırlıklarını dikkate alarak temiz üretim alternatiflerinin uzlaşık çözümünü belirlemiştir. Analiz sonucunda elde edilen S_i ve R_i değerleri, en düşük tatminsizlik düzeyini gösteren alternatifin A10 (melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesi) olduğunu ortaya koymuştur. Bu alternatif, çevresel kazanç, ekonomik getiri ve uygulanabilirlik açısından en dengeli çözümü temsil etmektedir. Melasın yan ürün olarak değerlendirilmesiyle katma değerli ürünler (biyoteknolojik hammaddeler, yem katkıları, etanol vb.) elde edilmektedir.



7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada şeker üretiminde uygulanabilecek temiz üretim alternatiflerinin değerlendirilmesi amacıyla dört farklı ÇKKV yöntemi birlikte kullanılmış ve alternatiflerin sıralamaları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, sektörde mevcut üretim süreçlerini çevresel, ekonomik ve teknik açıdan iyileştirebilecek en uygun temiz üretim seçeneklerini belirlemek, böylece sürdürülebilir üretim uygulamalarına bilimsel bir katkı sunmaktır. Bu doğrultuda, toplam 11 alternatif belirlenmiş ve bu alternatifler; yatırım maliyeti, işletme maliyeti, geri dönüş süresi, çevresel kazanımlar, uygulama kolaylığı, uygulama riskleri ve teknik personel ihtiyacı gibi dokuz kriter kapsamında değerlendirilmiştir.

Kriter ağırlıklandırma aşamasında Entropi ve SWARA yöntemleri uygulanmış; alternatiflerin sıralanmasında ise, VIKOR ve TOPSIS yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu iki aşamalı yaklaşım, hem veri temelli nesnel ağırlıklandırmayı, hem de uzman görüşüne dayalı öznel değerlendirmeyi modele entegre ederek sonuçların güvenilirliğini artırmıştır. Elde edilen sıralama sonuçlarının karşılaştırmalı analizi sonucunda, yöntemler arasında yüksek düzeyde tutarlılık olduğu görülmüştür (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Karşılaştırmalı sıralama grafiği

Yapılan analizler sonucunda dört yöntemin tamamı A10 alternatifini (melasın yem ve fermantasyon endüstrisinde değerlendirilmesi) en uygun temiz üretim seçeneği olarak belirlemiştir. Melas şeker üretiminde doğal olarak oluşan bir yan ürün olup, mevcut süreçlere kolayca entegre edilebilmekte, fermantasyon ve yem sanayisinde katma değerli ürünlere dönüştürülebilmekte ve böylece hem atık oluşumunun azaltılmasına, hem de ekonomik gelir elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle A10 alternatifi, çevresel kazanç, ekonomik getiri ve uygulanabilirlik kriterleri açısından dengeli bir çözüm sunduğu için ön plana çıkmıştır.

Benzer şekilde, tüm yöntemlerde ikinci sırada A11 alternatifi (kireç çamurunun tarımda kullanımı) yer almıştır. Kireç çamurunun bertaraf edilmesi yerine, tarımsal girdiye dönüştürülmesi, hem çevresel yükün azaltılması, hem de ekonomik kazanım elde edilmesi bakımından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca düşük maliyet gereksinimi, düşük uygulama riski ve sektöre uygulanabilirlik düzeyi, bu alternatifin öne çıkmasında etkili olmuştur.

Buna karşılık, yüksek yatırım maliyeti ve uzun geri dönüş süresi olan A2 ve A9 alternatifleri, sıralamada alt seviyelerde yer almıştır. Bu durum, söz konusu teknolojilerin kısa vadede uygulanabilir olmayabileceğini, ancak orta ve uzun vadeli stratejik planlamalarda potansiyel taşıyabileceğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, çalışmada kullanılan Entrop-SWARA-VIKOR-TOPSIS bütünlük yaklaşımı, şeker sektöründe uygulanabilecek temiz üretim seçeneklerinin çok yönlü biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamış; karar verme sürecinde teknik, ekonomik ve çevresel boyutların birlikte ele alınmasını mümkün kılmıştır. Analiz sonuçları doğrultusunda, A10 ve A11 alternatiflerinin sektörde öncelikli olarak uygulanmasının, hem çevresel sürdürülebilirliği artıracak, hem de ekonomik performans olumlu katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, belirsizlik içeren durumlar için bulanık (fuzzy) mantık tabanlı yaklaşımların uygulanması, yaşam döngüsü değerlendirmesi entegrasyonu ve sosyal etkilerin karar modellerine dahil edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, karar vericilerin stratejik planlamalarında alternatif senaryoların değerlendirilmesi, şeker sektöründe temiz üretim uygulamalarının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Akkurt, T., (2022). *Tıbbi Atık Yönetiminde Swot Analizi ve Çok Ölçülü Karar Verme Teknikleri İle Çözüm Önerilerinin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği, Eskişehir.
- Akçakanat, T. ve Kara, H. (2021). SWARA ve WASPAS yöntemleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi: Türkiye örneği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1309–1323.
- Büyüközkan, G. and Çifçi, G. (2012). A novel hybrid MCDM approach based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS to evaluate green suppliers. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3000–3011.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2009). *Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği*. Ankara.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2014). *Temiz Üretim (Eko-verimlilik) Rehberi*. Ankara.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2023). *Şeker Sanayiinde Temiz Üretim Uygulamaları Rehberi*. Ankara.
- Chatterjee, P. and Chakraborty, S. (2012). Materials selection using multi-criteria decision-making methods: *Materials and Design*, 35, 384-393.
- Chen, T. Y. and Wang, J. Q. (2009). Fuzzy VIKOR approach for selecting energy-saving and environmentally friendly suppliers. *Energy Policy*, 37(11), 4443–4450.
- Çizakça, M. (2000). *Osmanlı'da Şeker ve Şeker Ticareti Tarihi*. Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, 2000.
- Dehshiri, S. S. H., Dehshiri, S. J. H., Firoozabadi, B., (2023). Evaluation of using solar energy in Iran's textile industry towards cleaner production: Sustainable planning and feasibility analysis. *Journal of Cleaner Production* 421, 138447.
- Demir, G. ve Ersöz, F. (2020). SWARA ve COPRAS yöntemleri ile sürdürülebilir üretim performansının değerlendirilmesi. *Journal of Yaşar University*, 15(58), 669–683.
- Demirbaş, A. (2017). *Endüstriyel Enerji Verimliliği ve Temiz Üretim Teknolojileri*. İstanbul: Nobel Akademik Yayıncılık. (ISBN: 978-605-320-728-2).

- Dieleman, H., (2007). Cleaner Production and Innovation Theory: Social Experiments as a New Model to Engage in Cleaner Production. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 23 (2), 79-94.
- European Commission (2010a). *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency*. Joint Research Centre, European Union.
- European Commission, (2010b). Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control). *Official Journal of the European Union*, L 334, 17–119.
- European IPPC Bureau. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Documents (BREFs)*. Joint Research Centre, Seville.
- European IPPC Bureau (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries (FDM BREF)*. European Commission, Joint Research Centre, Seville.
- Florindo, T.J., Florindo, G. I. B.de M., Talamini, E., da Costa, J.S., de Leis, C.M., Tang, W.Z., Schultz, G., Kulay, L., Pinto, A.T., Ruviaro, C.F., (2018). Application of the multiple criteria decision-making (MCDM) approach in the identification of Carbon Footprint reduction actions in the Brazilian beef production chain. *Journal of Cleaner Production* 196, 1379-1389.
- Galloway, J. H. (2005). *The Sugar Cane Industry: An Historical Geography*. Cambridge University Press.
- Geldermann, J. and Rentz, O, (2001). Integrated technique assessment with imprecise information as a support for the identification of best available techniques (BAT). *OR Spektrum* (2001) 23 (1), 137–157.
- Govindan, K., Kannan, D., Shankar, M., (2014), Evaluation of green manufacturing practices using a hybrid MCDM model combining DANP with PROMETHEE. *International Journal of Production Research*, 52(20), 5985-6007.
- Gökkaya, H. ve Kellegöz, T, (2017). Personel Tayin İşlemleri için AHP, TOPSIS ve Macar Algoritması Tabanlı Karar Destek Modeli. *Endüstri Mühendisliği*, 28(1), 2-18.
- Gönüllü, M. T. ve Demir, H. (2014). Endüstriyel Enerji Verimliliği Uygulamaları. *TMMOB Enerji Verimliliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İzmir.
- Haber, F. (1958). *The Chemical Industry 1750–1850*. Oxford University Press.
- Headrick, D. (1988). *The Tools of Empire*. Oxford University Press.

- Hwang, C. L., ve Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag.
- IPPC. (2001). *IPCC Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries*. Integrated Pollution Prevention and Control.
- International Sugar Organization. (2025). *Pres Release (25): Various sugar-related articles*, <https://isosugar.org>.
- Kandakoglu, A., Celik, M., Akgun, I. (2009). A multi-methodological approach for shipping registry selection in maritime transportation industry. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(3-4), 586–597.
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., ve Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243–258. <https://doi.org/10.3846/jbem.2010.12>
- Khorshidi, F. H., Azizi, M., Ray, C., Faezipour, M. M., Hosseinabadi, H. Z., (2021). An analysis of cleaner production planning by applying analytic hierarchy process: A wood industry case study. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(3), 245–254.
- Koparal, O., (2022). *Katı Atık Yönetiminde Sıfır Atık Yaklaşımının Performans Değerlendirmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği, Eskişehir.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., Evans, J. C., (2010). *Hazardous Waste Management*. Waveland Press.
- Liang, W., Luo, S., Zhao, G., (2018). Evaluation of Cleaner Production for Gold Mines. *Journal of Cleaner Production*, 193, 643-653.
- Liang, W., Luo, S., Zhao, G., (2019). Employing a Hybrid Multi-Criteria Decision Making Approach to Evaluate Cleaner Production Performance. (2019). *MDPI Sustainability*, 11(1), 146.
- Luo, S., Liang, W., (2021). A hybrid TODIM approach with unknown weight information for the performance evaluation of cleaner production. *Computational and Applied Mathematics*, 40(23), 1-20.
- Mavi, R. K. and Standing, C. (2018). Critical success factors of sustainable project management in construction: A fuzzy DEMATEL–ANP–VIKOR analysis. *Journal of Cleaner Production*, 194, 751–765.

- Mavrotas, G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Lalas, D., Hontou V., Gakis, N., (2009). Multi-objective combinatorial optimization for selecting best available techniques (BAT) in the industrial sector: the COMBAT tool. *Journal of the Operational Research Society* 60(6), 906-20.
- Mintz, S. (1986). *Sweetness and Power: The Place of Sugar in Modern History*. Penguin Books.
- OECD (2009) – *Eco-Innovation and Cleaner Production*. OECD Publishing.
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. Faculty of Civil Engineering, Belgrade.
- Opricovic, S. and Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- Ömürbek N. ve Şimşek A., (2014). Analitik Hiyerarşi Süreci ve Analitik Ağ Süreci Yöntemleri ile Online Alışveriş Site Seçimi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*. 22, 1-20.
- Öztürk, E., Köseoglu, H., Karaboyacı, M., Yigit, N. O., Yetiş, Ü., Kilis, M., (2016). 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*, 138, 248-263.
- Panchal, D., Chatterjee, P., Sharma, R., Garg, R. K., (2021). Sustainable oil selection for cleaner production in Indian foundry industries: A three-phase integrated decision-making framework. *Journal of Cleaner Production* 313, 127827.
- Ptuskin, A., (2024). A fuzzy approach for selection of best available techniques. *E3S Web of Conferences* 531, 03003.
- Roy, D., Bhowmik, M., Roskilly, A. P., (2024). Technoeconomic, environmental and multi-criteria decision making investigations for optimisation of off-grid hybrid renewable energy system with green hydrogen production. *Journal of Cleaner Production* 443, 141033.
- Schneider, F., (1971). *Şekerin Teknolojisi*. Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Yayınları.
- Semerci and Ural (2024) Analysis of Agricultural Support Practices in Sugar Beet Production: The Case of Çanakkale Province- Türkiye. *Ejons International Journal*, 8 (4): 281-389.

- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379–423.
- Shuowei, B., Huisin, D., Wang, Q., Hao Qiu, H., Elwert, T., Jia, S., Wang, Y., Sun, Y., (2023). Green multiple-criteria decision-making method of selection of diamond cutting tool for promoting cleaner production in the natural stone industry. *Journal of Cleaner Production*, 415, 1377580.
- Şimşek, E., Demirel, Y.E., Öztürk, E., Kitiş, 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.
- TA Luft, 2002. “Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit”, *Almanya Hava Kirliliği Kontrolü Teknik Talimatnamesi - TA Luft*.
- Tanackov, I., Badi, İ., Stevic, Z., Pamucar, D., Bausys, R., Zavadskas, E.K., Bausys, R., (2022). A Novel Hybrid Interval Rough SWARA–Interval Rough ARAS Model for Evaluation Strategies of Cleaner Production. *Sustainability*, 14, 4343. <https://doi.org/10.3390/su14084343>
- TEPGE. (2024)- *Şeker Pancarı/ Sugar Beet 2024- Tarım Ürünleri Piyasaları Raporu* (Temmuz 2024), Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, Ankara.
- Tighnavard Balasbaneh, A., Aldrovandi, S., Sher, W., (2025). A Systematic Review of Implementing Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Approaches for the Circular Economy and Cost Assessment. *Sustainability*, 17, 5007.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer.
- Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. (TŞFAŞ). (2010) *Şeker Üretimi ve Teknolojisi*. Ankara. TŞFAŞ Yayınları.
- Türkşeker Genel Müdürlüğü (2022). *Enerji ve Çevre Yönetimi Faaliyet Raporu*. Ankara.
- TÜİK. (2024) –*Bitkisel Üretim İstatistikleri 2024*, (No. 53447). Ankara: Türkiye İstatistik Kurumu.
- Tzeng, G. H. and Huang, J. J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press.
- UNEP. (2001). *Cleaner Production in the Sugar Industry: Case Studies and Guidance*. United Nations Environment Programme, Industry and Environment.

- UNIDO. (2020). *Cleaner Production Assessment Manuals*. United Nations Industrial Development Organization.
- United Nations Environment Programme (2001), *Cleaner Production: A Guide to the United Nations Environment Programme's Approach*, Paris, UNEP.
- USDA Foreign Agricultural Service (2025) – *Turkey Sugar Annual* (Report No: TU2025-0016). U.S. Department of Agriculture. <https://apps.fas.usda.gov>
- US Environmental Protection Agency, 1995. AP-42: *Compilation of Air Emissions Factors*. USEPA.
- Wu, H. Y., Lin, Y. H. and Chang, C. H. (2008). Performance Evaluation Using Entropy and TOPSIS Methods. *Journal of American Academy of Business*, 12(2), 178–183.
- Yavuz, V. A., (2016). Coğrafi pazar seçiminde promethee ve entropi yöntemlerine dayalı çok kriterli bir analiz: Mobilya sektöründe bir uygulama. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9 (2), 69-86.
- Yazdani, M., Chatterjee, P., Zavadskas, E. K., Zolfani, S. H., (2017). Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3728-3740. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.095>.
- Yılmaz, A., (2019). *Şeker Sanayinde Temiz Üretim Yaklaşımları*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yılmazbilek, E., (2021). *Vaks İçeren Kompozit Atıkların Yönetiminin Farklı Karar Verme Teknikleriyle Değerlendirmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği, Eskişehir.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z. and Kildienė, S. (2014). State of art surveys of MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165-179
- Zeleny, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill.
- Zeleny, M. (1996). Entropy Optimization and Information Optimality. *European Journal of Operational Research*, 93(3), 565–576. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00209-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00209-8)
- Zolfani, S. H. and Saparauskas, J. (2013). New application of SWARA method in prioritizing sustainability assessment indicators of energy system. *Engineering Economics*, 24(5), 408–414. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.24.5.415>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: TESLİMA GÖKGÖZ

ORCID İD: 0009-0002-8292-4049

Yabancı Dil: Flamanca, İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 1998, Anadolu Üniversitesi, Çevre Mühendisliği
- 2000, Bozat Şirketler Grubu, Çevre Mühendisi
- 2004, Yozgat Şeker Fabrikası, Anaerobik-Aerobik Atıksu arıtım tesisi montajı ve devreye alma çalışmaları, Çevre/İşletme Mühendisi
- 2007, Ankara Şeker Fabrikası, Anaerobik Atıksu ön arıtım tesisi montajı ve devreye alma çalışmaları, Çevre Mühendisi
- 2017, Ankara Şeker Fabrikası, İşletme Şefi
- 2023, T.Ş.F.A.Ş. Genel Müdürlük, İş Güvenliği Müdür (V.)