

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR OTOMOTİV FABRİKASINDA BACA GAZI ARITIM
EKİPMANININ CRITIC VE MULTIMOORA METODLARI İLE
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serkan ERDOĞAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı

KASIM 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR OTOMOTİV FABRİKASINDA BACA GAZI ARITIM
EKİPMANININ CRITIC VE MULTIMOORA METODLARI İLE
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serkan ERDOĞAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Alparslan Serhat DEMİR

KASIM 2025

Serkan Erdoğan tarafından hazırlanan “Bir Otomotiv Fabrikasında Baca Gazı Arıtım Ekipmanının Critic ve Multimoora Metodları İle Belirlenmesi” adlı tez çalışması 20.11.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç.Dr. Alparslan Serhat DEMİR** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr. Ayten Yılmaz YALÇINER**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Celal ÖZKALE**
Kocaeli Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “BİR OTOMOTİV FABRİKASINDA BACA GAZI ARITIM EKİPMANININ CRITIC VE MULTIMOORA METODLARI İLE BELİRLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(18/12/2025)

Serkan ERDOĞAN





Eşim Hülya ve Oğlum Yağız Ata 'ya ...



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasından tamamlanmasına kadar geçen süreçte akademik bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve desteğiyle bana rehberlik eden saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Alparslan Serhat DEMİR 'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışma sürecinde katkılarını esirgemeyen endüstri mühendisliğindeki diğer hocalarıma da teşekkür ederim. Bana her koşulda destek olan, sabır ve anlayışla yanımda bulunan sevgili aileme teşekkür ederim. Beni bugünlere getiren ve her zaman yanımda olan anneme, babama ve özellikle de manevi desteğini her zaman hissettiren eşime minnettarım. Onların manevi desteği olmadan bu süreci tamamlamak mümkün olmazdı.

Serkan ERDOĞAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL ANALİZ	7
2.1. Hava Kirliliği ve Tehlikeli Hava Kirlleticiler (HAP'lar)	7
2.2. Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler)	11
2.3. Otomotiv Sektöründe VOC Oluşumu ve Önlemleri	13
2.4. Baca Gazı Arıtımı ve Arıtım Yöntemleri	15
2.4.1. Termal oksidasyon (TO)	22
2.4.2. Rejeneratif termal oksidasyon (RTO)	24
2.4.3. Thermische abluft reinigung (TAR)	28
2.4.4. Döner silindirik RTO (r-RTO)	33
2.4.5. Heat recovery sistemli RTO	37
2.4.6. Heat recovery sistemli TAR	40
2.5. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Teknikleri	41
3. YÖNTEM	45
3.1. Critic Yöntemi	45
3.2. Moora ve Multimoor Yöntemleri	49
3.3. Beyin Fırtınası Yöntemi	55
4. UYGULAMA	59
4.1. Araştırma Modeli	59
4.2. Uygulamanın Yapıldığı İşletmeye Ait Bilgiler	59
4.3. Araştırma Grubu ve Karar Vericilere İlişkin Tanımlayıcı Bilgiler	61
4.4. Veri Toplama Yöntemi	61
4.5. Verilerin Analizi	64
5. BULGULAR	67
5.1. Critic Metodu 'na İlişkin Bulgular	67
5.2. MultiMoora Metodu 'na İlişkin Bulgular	72
5.2.1. Moora-oran metodu 'na ilişkin bulgular	75
5.2.2. Moora referans noktası metodu 'na ilişkin bulgular	77
5.2.3. Moora-tam çarpım metodu 'na ilişkin bulgular	79
5.2.4. MultiMoora metodu 'nda baskınlık teorisine ilişkin bulgular	81
6. TARTIŞMA	83
6.1. Senaryo 1: Maliyet Baskın Olacak Şekilde Değerlendirme	83
6.2. Senaryo 2: Yeşil Üretim Faktörü Baskın Olacak Şekilde Değerlendirme	84
7. SONUÇ	87

KAYNAKLAR.....	89
EKLER	101
ÖZGEÇMİŞ.....	103



KISALTMALAR

A	: Alternatifler
AHP	: Analitik Hiyerarşi Süreci (ÇKKV yöntemi)
ATEX	: Patlayıcı Ortamlar Yönetmeliği (AB direktifi)
BAT	: Mevcut en iyi teknikler (Mevcut en iyi teknoloji)
BREF	: Mevcut en iyi teknikler Referans Belgeleri
CRITIC	: Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (ÇKKV yöntemi)
ÇAKV	: Çok Amaçlı Karar Verme
ÇED	: Çevresel Etki Değerlendirmesi
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
ÇNKV	: Çok Nitelikli Karar Verme
DALY	: Engelliliğe Uyarlanmış Yaşam Yılları
DFTO	: Doğrudan Ateşlemeli (Yakmalı) Termal Oksitleyici
DRE	: Yok Etme Verimi
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EBSCO	: Elton B. Stephens Company (Veri tabanı adı)
EC	: Avrupa Topluluğu
EEA	: Avrupa Çevre Ajansı
EIPPCB	: Avrupa Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Bürosu
ELECTRE	: ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ÇKKV yöntemi)
EPA	: Çevre Koruma Ajansı (ABD)
EU / AB	: European Union / Avrupa Birliği
HAP/HAPs	: Tehlikeli Hava Kirlleticiler
HEXC	: Isı Değiştirici (Eşanjör)
HR	: Isı Geri Kazanımı
HVAC	: Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
IARC	: Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı
IPPC	: Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol
K	: Kriterler
KOAH	: Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı

KPR	: Katalitik Plazma Reaktörü
KV	: Karar Vericiler
Max	: Maximum, en büyük, maksimize edilmesi gereken değer
Min	: Minimum, en küçük, minimize edilmesi gereken değer
MOORA	: Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis (ÇKKV yöntemi)
MULTIMOORA	: Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis plus the Full Multiplicative Form (ÇKKV yöntemi)
PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrolör
PM10	: 10 mikrondan küçük partikül madde
PM2.5	: 2.5 mikrondan küçük partikül madde
PROMETHEE	: Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (ÇKKV yöntemi)
r-RTO	: Döner Silindirik Rejeneratif Termal Oksitleyici
RTO	: Rejeneratif Termal Oksitleyici
TAR	: Termal Egzoz Havası Arıtma
TO	: Termal Oksitleyici
UOB	: Uçucu Organik Bileşikler
VIKOR	: Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (ÇKKV Yöntemi)
VOC/VOCs	: Volatile Organic Compounds (Uçucu Organik Bileşikler)
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)
WHR	: Atık Isı Geri Kazanımı
YLD	: Engellilikle Yaşanan Yıllar
YLL	: Kaybedilen Yaşam Yılları

SİMGELER

A_j	: Alternatifler için ilgili satırdaki max değerler çarpımı
B_j	: Alternatifler için ilgili satırdaki min değerler çarpımı
C_j	: Bilgi içeriği
CO	: Karbon monoksit
CO_2	: Karbon dioksit
d_{ij}	: Alternatiflerin her bir kriterde referans noktasına olan mutlak uzaklıkları
g	: Fayda kriterlerinin sayısı
H_2O	: Su, Su Buharı
$i=1,2,...,m$	: Alternatifler (m: alternatif sayısı)
$j=1,2,...,n$	: Kriterler (n: kriter sayısı)
$n-g$	: Maliyet kriterlerinin sayısı
NO_2	: Azot dioksit
NO_x	: Azot Oksitler (genel bir azot oksit bileşik grubunu ifade eder)
O_3	: Ozon
r_{ij}	: i. alternatifin j. kriterdeki normalleştirilmiş değeri
$\bar{r}_j$	: j kriterine ait ortalama normalize değeri
SO_2	: Kükürt dioksit
U_j	: Alternatif j 'nin genel faydası
w_j	: Kriter ağırlığı
X_{ij}	: i. alternatifin j. kriterdeki performans değeri
X_{ij}^*	: i. alternatifin j. kriterdeki normalleştirilmiş değeri
ρ_{jk}	: Kriterler arası Pearson korelasyon katsayıları
σ_j	: Kriterin standart sapması



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Doğal ve Yapay Kirleticiler	10
Tablo 4.1. Karar vericilerin kişisel bilgileri.	61
Tablo 4.2. Kriterler, kriterlerin özellikleri ve açıklamaları.	62
Tablo 4.3. Kriterler, amaçları ve veri türleri.	63
Tablo 5.1. Karar Matrisi.	68
Tablo 5.2. Normalize Karar Matrisi.	69
Tablo 5.3. Korelasyon matrisi.	70
Tablo 5.4. 1-Korelasyon matrisi.	71
Tablo 5.5. Standart sapma değerleri matrisi.	72
Tablo 5.6. Bulunan değerler, kriter ağırlıkları ve kriterlerin önem sıralaması.	72
Tablo 5.7. MultiMoora Karar matrisi ve Kriter Ağırlıkları.	74
Tablo 5.8. Normalize edilmiş karar matrisi.	74
Tablo 5.9. Kriter Ağırlıkları.	75
Tablo 5.10. Ağırlıklandırılmış matris ve Moora Oran metodu sıralaması.	76
Tablo 5.11. Kriterlerin Referans Değerleri.	77
Tablo 5.12. Moora Referans Noktası metodu sıralaması.	78
Tablo 5.13. Moora Tam Çarpım metodu sıralaması.	80
Tablo 5.14. MultiMoora metodu sıralaması.	81
Tablo 6.1. Senaryo 1 'e göre kriter ağırlıkları.	83
Tablo 6.2. Maliyet Baskın MultiMoora Sonuçları.	84
Tablo 6.3. Senaryo 2 'ye göre kriter ağırlıkları.	85
Tablo 6.4. Yeşil Üretim Faktörü Baskın MultiMoora Sonuçları.	85



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. PM2.5, NO2 ve O3 için hastalık yükü 2022.....	3
Şekil 1.2. PM2.5 ve NO2 maruziyetine bağlı ölümler 2022.	4
Şekil 2.1. VOC ‘nin etkileri.	13
Şekil 2.2. Su ve solvent bazlı boyaların bileşenleri.	14
Şekil 2.3. Baca Gazı arıtım sistemi ürün uygulama alanları.	22
Şekil 2.4. Termal Oksitleyici	23
Şekil 2.5. Proses ve TO Sistem ısı değişimleri.	24
Şekil 2.6. RTO görünümü ve kullanılan seramik tuğlalar	24
Şekil 2.7. RTO yapısı ve çalışma prensibi	25
Şekil 2.8. RTO üç saykıl gaz çevirimi	26
Şekil 2.9. Proses ve RTO Sistem ısı değişimleri.	28
Şekil 2.10. TAR Sistemi iç kesit görünümü ve açıklaması.....	30
Şekil 2.11. TAR Sistemi ısı geri kazanımın fırında tekrar kullanımı	31
Şekil 2.12. Proses ve TAR Sistem ısı değişimleri.	32
Şekil 2.13. TARCÖM Brülör ısı dağılımı ve sonuçları	33
Şekil 2.14. Proses ve r-RTO Sistem ısı değişimleri.....	34
Şekil 2.15. Döner r-RTO tasarım diyagramı.....	35
Şekil 2.16. Döner r-RTO yapısı	35
Şekil 2.17. 3 odacıklı RTO ile 12 odacıklı r-RTO.....	37
Şekil 2.18. Waste Heat Recovery sistemi	39
Şekil 2.19. Proses, RTO ve HR/WHR Sistem ısı değişimleri.	40
Şekil 2.20. Proses, TAR ve HR/WHR Sistem ısı değişimleri.	41
Şekil 3.1. CRITIC Yönteminin Özeti	47
Şekil 3.2. MULTIMOORA yönteminin akış şeması	54
Şekil 4.1. Boyahane akış şeması	60
Şekil 4.2. Boyahane RTO sistem şeması ve çalışma prensibi.	60



BİR OTOMOTİV FABRİKASINDA BACA GAZI ARITIM EKİPMANININ CRITIC VE MULTIMOORA METODLARI İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Sanayileşme, kentleşme ve hızla artan nüfus, günümüzde hava kirliliğini küresel ölçekte en önemli çevresel sorunlardan biri haline getirmiştir. Özellikle enerji ve hammadde tüketimi yüksek olan otomotiv sektörü, çevreye olan etkileri açısından dikkatle incelenmesi gereken endüstriler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, otomotiv üretim tesislerinin boyahane fırınlarından kaynaklanan baca gazı emisyonları, özellikle uçucu organik bileşikler (VOC) ve tehlikeli hava kirleticiler (HAP) içeriği nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından önemli riskler oluşturmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, söz konusu emisyonların azaltılmasına yönelik olarak en uygun baca gazı arıtma sisteminin seçimini bilimsel bir yöntemle belirlemektir. Araştırma kapsamında, bir otomotiv fabrikasında uygulanabilecek çeşitli baca gazı arıtma sistemleri, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarından CRITIC ve MultiMoora yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada, teknik, çevresel ve ekonomik boyutları kapsayan toplam 14 performans kriteri dikkate alınmıştır. Bu kriterler arasında maliyet, enerji verimliliği, karbon ayak izi, VOC giderim oranı, işletme kolaylığı, bakım gereksinimi ve sistem güvenilirliği gibi göstergeler yer almaktadır. Kriterlerin ağırlıkları CRITIC yöntemi ile objektif biçimde hesaplanmış, ardından MultiMoora yöntemiyle alternatif sistemler performans skorlarına göre sıralanmıştır. Uzman görüşleri, teknik kataloglar ve literatür taraması sonucunda oluşturulan değerlendirme seti, 5 makine mühendisi ve 1 elektrik-elektronik mühendisinden oluşan uzman bir ekip tarafından puanlandırılmıştır.

Elde edilen bulgular, “Heat Recovery Sistemli Elektrikli Termal Arıtma Reaktörü (TAR)” sisteminin, başlangıç ağırlıklandırmaları dikkate alındığında en uygun alternatif olduğunu göstermiştir. Ayrıca kriter ağırlıklarının değiştirildiği iki farklı senaryo (maliyet odaklı ve yeşil üretim odaklı) kapsamında yapılan duyarlılık analizleri, karar sürecinin önceliklere göre önemli ölçüde değişebildiğini ortaya koymuştur. Yeşil üretim öncelikli senaryoda yine aynı sistem en uygun seçenek olarak belirlenirken, maliyet öncelikli senaryoda “Doğalgazlı TAR” sistemi öne çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma otomotiv sektöründe baca gazı arıtım teknolojilerinin seçiminde çok kriterli karar verme yöntemlerinin uygulanabilirliğini göstermekte; çevresel sürdürülebilirliğe dayalı karar süreçlerinin bilimsel olarak yapılandırılmasına katkı sunmaktadır. Çalışma, aynı zamanda enerji verimliliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve yeşil üretim politikaları bağlamında, çevre dostu teknolojilerin seçiminin sistematik biçimde optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.



SELECTION OF FLUE GAS TREATMENT EQUIPMENT IN AN AUTOMOTIVE FACTORY USING THE CRITIC AND MULTIMOORA METHODS

SUMMARY

Industrialization, urbanization, and rapid population growth have intensified air pollution into one of the most critical global environmental challenges. Among high energy- and material-intensive industries, the automotive sector warrants particular scrutiny for its environmental footprint. In this context, exhaust emissions originating from paint-shop oven lines—especially stacks releasing volatile organic compounds (VOCs) and hazardous air pollutants (HAPs)—pose significant risks to environmental quality and human health. The primary aim of this study is to identify, through a rigorous scientific framework, the most suitable flue gas treatment technology for mitigating these emissions. Within the scope of an automotive manufacturing facility, multiple end-of-pipe abatement alternatives were assessed using a multi-criteria decision-making (MCDM) framework that combines the CRITIC method for objective weighting of criteria and the MultiMoora method for ranking alternatives. Fourteen performance criteria spanning technical, environmental, and economic dimensions were considered, including cost, energy efficiency, carbon footprint, VOC removal efficiency, operational simplicity, maintenance requirements, and system reliability. Criteria weights were derived objectively via CRITIC, and alternatives were ranked with MultiMoora. The evaluation set, constructed through expert judgment, vendor technical catalogs, and literature synthesis, was scored by a panel of six specialists (five mechanical and one electrical-electronics engineer). The findings demonstrate that the “Electric Thermal Oxidation Reactor (TAR) with Heat Recovery” emerges as the most suitable alternative under baseline weightings. Sensitivity analyses with two divergent scenarios—cost-focused and green production-focused—reveal that the decision outcome is contingent on strategic priorities: the green production scenario reconfirms the heat-recovery electric TAR as optimal, whereas the cost-dominant scenario elevates the “Natural-Gas-Fired TAR.” Overall, the study evidences the applicability of MCDM techniques to technology selection in automotive flue gas treatment and contributes to the structured, evidence-based design of decisions grounded in environmental sustainability. In addition, it underscores how technology choice can be systematically optimized within the broader ambitions of energy efficiency, carbon mitigation, and green production policy. Expanding upon this foundation, the study first delineates the public health and ecological stakes of air pollution, framing industrial emissions not only as regulatory and technical matters but also as determinants of morbidity, mortality, and long-term environmental integrity. Synthesizing authoritative sources, the analysis reiterates that ambient air pollution contributes to millions of premature deaths annually, with particulate matter (PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), ozone (O₃), and carbon monoxide (CO) constituting core pollutants. HAPs—such as benzene, formaldehyde, and various chlorinated or aromatic organics—exert severe toxicological effects even at low concentrations, with credible links to cancer, neurological impairment, and reproductive harm. Against this epidemiological and toxicological backdrop,

automotive paint operations (encompassing surface preparation, primer and color applications, clear coat/varnish, and thermal curing) are identified as major emission sources of VOCs and selected HAPs. Particularly during drying and curing, solvents volatilize under elevated temperatures, demanding robust, continuously reliable abatement systems that harmonize regulatory compliance, worker protection, environmental stewardship, and cost-effectiveness. The study situates the automotive paint-shop context within evolving regulatory architectures. It references European and Turkish regulatory frameworks that impose stringent emission limits and require best available techniques (BAT), with specific emphasis on VOC directives and industrial emissions legislation. Within these regimes, several abatement classes are recognized as mainstream: thermal oxidation (direct-fired thermal oxidizers; recuperative and regenerative thermal oxidizers), catalytic oxidation, adsorption (typically activated carbon), and condensation-based auxiliaries. Each technology exhibits performance envelopes conditioned by the inlet concentration of VOCs, gas temperature, volumetric flow, humidity, co-contaminants, and opportunities for heat integration. Thermal oxidation technologies, in particular, deliver very high destruction efficiencies for VOCs (commonly 98–99.9%), but their energy intensity necessitates careful integration with heat recovery (e.g., high-effectiveness ceramic beds in RTOs) or upstream concentration systems to improve fuel economy. Catalytic oxidation enables lower reaction temperatures and reduced energy consumption but is sensitive to catalyst poisoning and requires vigilant maintenance regimes. Adsorption performs well at relatively low concentrations and temperatures, often as a polishing or recovery step, albeit with regeneration logistics that affect life-cycle costs and operational complexity. Condensation and other emerging methods—such as advanced membranes or photocatalysis—play ancillary roles or remain at pilot scale pending further scale-up evidence. A further conceptual thread in the study is the articulation of a “green production factor,” aggregating criteria associated with energy recuperation, carbon footprint reduction, eligibility for and integration with renewable energy (e.g., photovoltaic coupling for electrified reactors), and overall environmental performance. This concept informs both the baseline assessment and sensitivity analyses, clarifying how different corporate strategies or policy incentives (e.g., carbon pricing, renewable credits) can pivot the preferred technology. The work highlights that heat recovery is a principal lever for reconciling high removal efficiencies with economic viability; recuperative and especially regenerative designs substantially reduce net energy consumption, while electrified oxidation units can eliminate on-site combustion-derived CO₂ and simplify utility infrastructure, thereby aligning with decarbonization roadmaps. Methodologically, the research employs a transparent and replicable MCDM design. First, a decision matrix is compiled for candidate technologies sized for a representative plant: a Marmara-region automotive factory with 250,000 vehicles/year capacity, paint lines operating at a line speed of 45 vehicles per hour, and a representative oven exhaust of approximately 10,000 Nm³/h. This establishes a realistic basis for comparing alternatives at scale. Fourteen criteria capture a balanced set of performance outcomes, and the data feeding each criterion draw from vendor documentation, literature benchmarks, and structured expert scoring. Objective weighting through CRITIC proceeds by normalizing the decision matrix, calculating standard deviations and inter-criteria correlations, and deriving information content (C_j) for each criterion. Criteria with higher variability and lower redundancy (correlation) are assigned greater weights, reducing subjective bias and guarding against overweighting criteria that move in lockstep. Subsequently, MultiMoora is applied to rank alternatives using three complementary perspectives—

ratio method, reference point, and full multiplicative form—followed by a dominance-based synthesis to form the final ordering. This multi-pronged approach offers robustness because it triangulates results, mitigating artifacts attributable to any single method’s assumptions. Empirically, the heat-recovery electric thermal oxidation reactor (electric TAR with integrated heat recovery) outperforms under the baseline weighting scheme. This outcome reflects a superior combined score across VOC removal efficacy, high potential for energy recuperation, reduced local carbon externalities (particularly when electricity supply is decarbonized or coupled with on-site renewables), operational reliability, and manageable maintenance profile. Importantly, the electric TAR design simplifies fuel logistics by eliminating the need for natural gas infrastructure and associated combustion controls, while enabling factory acceptance testing under controlled conditions prior to installation. In operational environments where uptime and repeatability are paramount, such integration and pre-commissioning advantages can translate into lower commissioning risk and smoother ramp-up. The sensitivity analysis is central to the study’s decision-science contribution. When the weighting vector is re-oriented toward cost predominance—substantially increasing the relative importance of capital expenditure, maintenance cost, and operating cost—natural-gas-fired TAR becomes the top-ranked option. This pivot underscores that at higher energy prices for electricity, in markets with carbon externalities not fully internalized into power tariffs, and where fuel infrastructure already exists, a well-engineered gas-fired TAR can minimize total cost of ownership while maintaining high abatement performance. In contrast, when the weighting elevates the green production factor—giving preeminence to energy recovery, renewable compatibility, carbon footprint, and VOC destruction—the heat-recovery electric TAR is reconfirmed as optimal. This alignment with sustainability priorities emphasizes that technology selection is sensitive to governance models (ESG metrics, Science-Based Targets, internal carbon pricing), corporate strategy (net-zero pathways), and local grid carbon intensity. The study’s dual-scenario design thus functions as a practical guide for decision-makers to map alternative futures: it clarifies which technology is favored under distinct policy, price, and sustainability regimes, thereby reducing regret in long-lived capital investments. From an implementation standpoint, the plant-scale assumptions provide an illustrative anchor for engineering and procurement. The decision space presumes stable production rates and consistent coating thicknesses across the planning horizon and abstracts away site-specific constructability constraints such as building geometry or tie-in complexities—reasonable simplifications for the comparative phase. The experts’ scoring process integrates long-horizon maintenance insights—such as catalyst replacement windows, bed fouling risks in RTOs at variable solvent loads, and the trade-offs between high-effectiveness heat recovery and pressure drop penalties—with operability considerations including control system sophistication, diagnostic capabilities, and safety interlocks. This fosters a holistic value function rather than a narrow focus on headline efficiency or single-point operating conditions. The study also situates process-integrated measures as complementary to end-of-pipe controls. Upstream interventions—electrostatic application to raise transfer efficiency, closed-loop booths, robotic coating for consistency, and the use of waterborne or reformulated low-VOC coatings where process-critical properties permit—can materially reduce the inlet load to abatement systems. While powder coatings can nearly eliminate VOCs, their limited adoption for exterior Class-A automotive finishes reflects current performance and aesthetic constraints; nonetheless, they remain attractive for wheels, frames, and ancillary parts. In the ovens themselves, the thermally driven volatilization

of solvents is unavoidable; hence, abatement stages remain indispensable, and optimization focuses on heat integration and destruction efficiency. The integration of heat recovery, whether via recuperative exchangers or regenerative beds, becomes a decisive factor in reconciling environmental performance with production economics. A noteworthy triangulation in the results is the concordance between MCDM outcomes and vendor-experiential rankings. The authorized supplier's recommended installation order for facilities of similar scale—placing the heat-recovery electric TAR at the top, followed by electric TAR, natural-gas-fired TAR, electric RTO, heat-recovery natural-gas RTO, conventional natural-gas RTO, rotary RTO, and finally direct-fired thermal oxidizer—mirrors the dominance inferred by the CRITIC–MultiMoora synthesis. Such convergence between analytical modeling and field-proven practice increases confidence in the recommended choice and suggests that the criteria set, weightings, and performance data effectively capture the salient decision drivers. In terms of broader implications, the study demonstrates the practical usefulness of integrating CRITIC with MultiMoora for environmental technology selection problems characterized by multiple, sometimes competing objectives. By combining objective weight derivation with a robust multi-perspective ranking, the framework minimizes subjective bias while preserving expert knowledge where quantitative data are sparse (e.g., for qualitative operability or reliability indicators). The approach is transferable to adjacent industrial decisions—thermal vs. catalytic abatement in different sectors, solvent recovery vs. destruction trade-offs, or hybrid configurations that stage concentration, oxidation, and polishing. Moreover, the framework can be extended by incorporating life-cycle assessment (LCA) to capture embodied carbon and materials impacts, probabilistic sensitivity analyses to reflect uncertainty in energy prices and production volumes, and real options reasoning to value flexibility under evolving policy and market conditions. The study's conclusions underscore a set of actionable recommendations for automotive manufacturers and environmental engineers: Prioritize heat recovery integration irrespective of the chosen oxidation technology; energy recuperation is the single most powerful lever to reduce operating costs and carbon intensity without sacrificing removal performance. Consider electrified oxidation where grid carbon intensity is declining or where on-site renewables and storage can be deployed; the elimination of combustion CO₂, simplified utilities, and enhanced pre-commissioning can create a compelling total value case. Use structured MCDM to align technology choice with strategic priorities; explicitly test cost-dominant and sustainability-dominant scenarios to future-proof the selection and clarify triggers for switching preferences. Continue upstream VOC minimization in paint application and material selection to lower inlet loads, stabilize abatement system operation, and defer capacity expansions. Engage with vendors to validate design envelopes, pressure drops, thermal efficiencies, and control philosophies under site-specific duty cycles; reconcile MCDM outcomes with field experience to derisk procurement. In conclusion, by demonstrating that the heat-recovery electric TAR is the preferred option under balanced and sustainability-leaning priorities, and that the natural-gas-fired TAR becomes optimal under stringent cost emphasis, the study provides a calibrated decision compass for automotive paint-shop emission control. It advances an academically rigorous yet practical pathway for technology selection that harmonizes regulatory compliance, environmental performance, and economic feasibility. Future work that augments the present framework with LCA, stochastic modeling of market and policy variables, and dynamic optimization of integrated energy systems would further strengthen the robustness of investment decisions in the decarbonizing industrial landscape.

1. GİRİŞ

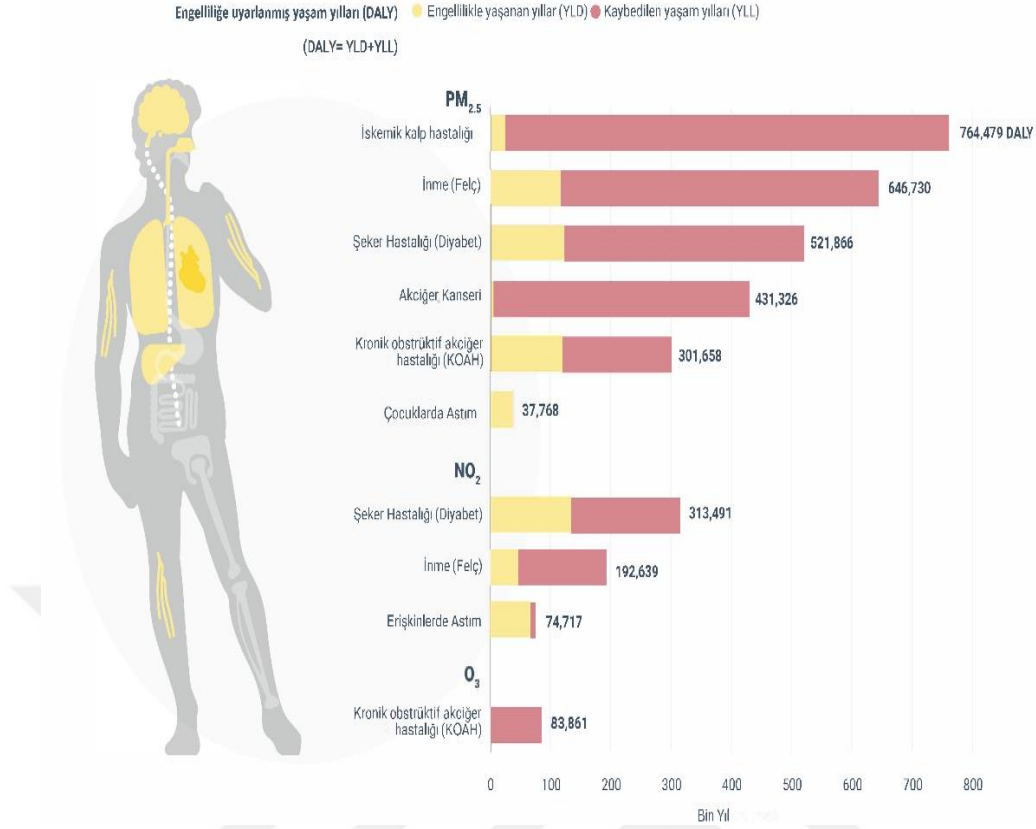
Sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışının hız kazandığı günümüzde, çevre sorunları küresel ölçekte giderek daha karmaşık ve çok boyutlu bir hal almaktadır. Bu sorunların başında ise, insan sağlığını ve ekosistemleri doğrudan tehdit eden hava kirliliği gelmektedir (Kök, 2018; Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), 2024). Hava kirliliği, havanın doğal bileşiminin insan faaliyetleri veya doğal süreçler sonucunda değişmesi ve bu değişimin canlı yaşamı üzerinde zararlı etkiler oluşturacak düzeye ulaşması olarak tanımlanmaktadır. Özellikle sanayi tesisleri, motorlu taşıtlar, plansız kentleşme ve enerji üretimi gibi insan kaynaklı faaliyetler, havaya zararlı gazlar ve partikül maddeler salarak hava kirliliğinin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Kök, 2018; Güzel ve Özer, 2022).

Hava kirliliği, yalnızca insan sağlığını değil, aynı zamanda ekosistemleri, şehirlerin yaşanabilirliğini ve ekonomik sürdürülebilirliği de tehdit eden küresel bir çevre sorunudur. DSÖ'nün 2019 yılı verilerine göre, dünya nüfusunun %99'u, hava kalitesi kılavuzunda belirlenen sınırların üzerinde kirliliğe maruz kalmıştır ve aynı yıl dış ortam hava kirliliği nedeniyle 4,2 milyon erken ölüm gerçekleşmiştir (DSÖ, 2024). Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri arasında solunum yolu hastalıkları, kalp-damar hastalıkları, astım, bronşit ve akciğer kanseri gibi ciddi sağlık sorunları yer almaktadır (Köse, 2016; DSÖ, 2024). Ayrıca, hava kirliliği kaynaklı sağlık harcamaları ve iş gücü kaybı, ülkeler için önemli bir ekonomik yük oluşturmaktadır (Güzel ve Özer, 2022).

Hava kirliliğinin başlıca bileşenleri arasında partikül maddeler (PM_{2.5} ve PM₁₀), azot dioksit (NO₂), kükürt dioksit (SO₂), ozon (O₃) ve karbon monoksit (CO) gibi yaygın kirleticiler yer almakla birlikte, tehlikeli hava kirleticiler (Hazardous Air Pollutants, HAPs) çok daha düşük konsantrasyonlarda dahi insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi ve kalıcı etkiler yaratabilen toksik kimyasal maddelerdir (Kara, 2016). HAP'lar arasında benzen, formaldehit, civa, arsenik ve dioksinler gibi maddeler bulunmakta olup, bu kirleticiler kanser, nörolojik bozukluklar ve üreme sorunları gibi ağır sağlık riskleriyle ilişkilendirilmektedir (WHO, 2024).

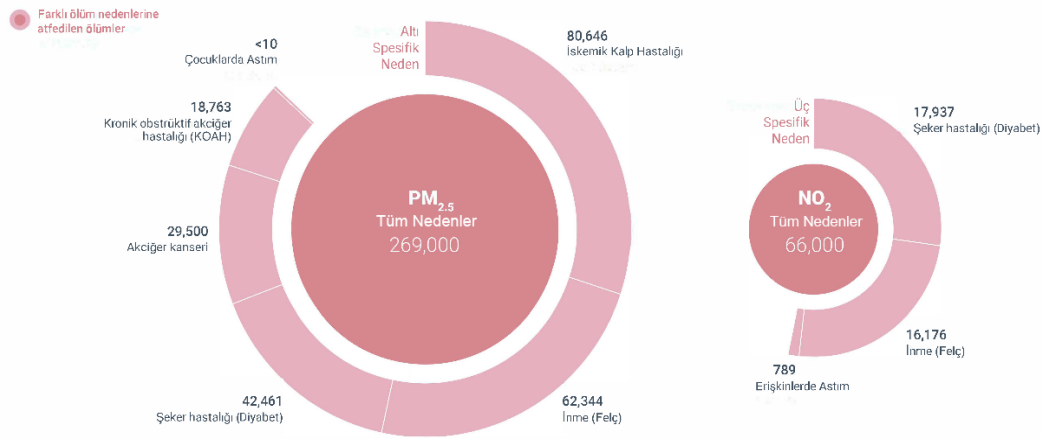
Otomotiv sektörü, enerji ve hammadde kullanım yoğunluğu nedeniyle çevreye yönelik etkileri bakımından dikkat çeken sektörlerin başında gelmektedir. Özellikle otomotiv fabrikalarının boyahane bölümlerinde, uçucu organik bileşikler (Volatile Organic Compounds, VOC'ler) ve HAP'lar gibi zararlı gazların atmosfere salınımı, hem işçi sağlığı hem de çevre açısından önemli bir risk oluşturmaktadır (Chen ve ark., 2017; Zhou ve ark., 2020). VOC'ler, düşük kaynama noktalarına sahip oldukları için oda sıcaklığında kolayca gaz fazına geçebilen ve başta endüstriyel faaliyetler olmak üzere çeşitli kaynaklardan atmosfere yayılan organik kimyasal maddelerdir (David ve Niculescu, 2021; United States Environment Protection Agency, 2025). Bu maddeler, solunum yoluyla vücuda alındığında baş ağrısı, sinir sistemi bozuklukları ve uzun vadede kanser riski gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Xiong ve ark., 2024).

European Environment Agency 'nin (EEA) 2022 verilerine dayanan analizinde (Şekil 1.1.), ince partikül madde (PM_{2.5}) için değerlendirilen altı hastalık grubunda çevresel hastalık yükünün en yüksek olduğu alan iskemik kalp hastalığıdır; bunu sırasıyla inme, diyabet, akciğer kanseri, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) ve çocukluk çağı astımı izlemektedir. İskemik kalp hastalığı ve akciğer kanserinde toplam yük neredeyse tamamen mortaliteden kaynaklanırken (sırasıyla yaklaşık %97 ve %99), inme (%18), diyabet (%23) ve özellikle KOAH'ta (%40) morbiditenin payı belirgindir; çocukluk çağı astımında ise yük neredeyse bütünüyle morbiditedir (~%99) (EEA, 2024). Hastalık yükünün, hastalık isimleri ve sayısal değerleri Şekil 1.1. 'de görselleştirilmiştir.



Şekil 1.1. PM_{2.5}, NO₂ ve O₃ için hastalık yükü 2022 (EEA, 2024).

Şekil 1.2. , “tüm doğal nedenlere bağlı mortalite” yaklaşımı ile “spesifik nedenlere bağlı mortalite” yaklaşımının büyüklük farkını gösterir: PM_{2.5} için altı hastalığın toplamına atfedilen 234 bin ölüm, 40 Avrupa ülkesinde tüm nedenlere atfedilen 269 bin ölüm tahmininin biraz altında kalsa da aynı mertebeyi doğrular; NO₂ için yalnızca üç hastalık (diyabet, inme, yetişkin astımı) kapsandığından, spesifik nedenlere bağlı 35 bin ölüm, 41 ülkede tüm nedenlere atfedilen 66 bin ölüm tahmininin belirgin biçimde altındadır. Bu bulgular, hem mortalite hem de morbidite bileşenlerini birlikte dikkate alan hastalık yükü yaklaşımının, hava kirliliğinin sağlık etkilerinin eksiksiz değerlendirilmesi açısından kritik önemini ortaya koymaktadır (EEA, 2024). PM_{2.5} ve NO₂ maruziyetine bağlı ölümler, Şekil 1.2. ‘de görselleştirilmiştir.



sisteminin belirlenmesine bilimsel bir katkı sunmaktır. Böylece, otomotiv sektöründe sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılması ve çevreye verilen zararın en aza indirilmesi yönünde önemli bir adım atılması hedeflenmektedir.





2. KAVRAMSAL ANALİZ

2.1. Hava Kirliliği ve Tehlikeli Hava Kirleticiler (HAP'lar)

Hava kirliliği, havanın doğal bileşiminde bulunan ana maddelerin, insan faaliyetleri veya doğal süreçler sonucunda değişmesi ve bu değişimin canlı ve cansız yaşam üzerinde zararlı etkiler oluşturacak düzeye ulaşması olarak tanımlanır. Özellikle sanayileşme, motorlu taşıt kullanımı, plansız kentleşme ve enerji üretimi gibi insan kaynaklı faaliyetler, havaya zararlı gazlar ve partikül maddeler salarak hava kirliliğinin başlıca nedenleri arasında yer alır.

Hava kirliliği, yalnızca insan sağlığını değil, ekosistemleri ve şehirlerin yaşanabilirliğini de tehdit eden küresel bir çevre sorunudur. Havanın kalitesiz olması, canlı yaşamını ve sağlığını doğrudan olumsuz etkilemektedir. Son yıllarda, fiziksel ve sosyal etmenler sonucunda oluşan hava kirliliği, hem Türkiye’de hem de dünya genelinde önemli bir sorun haline gelmiştir. Bunun en önemli nedenlerinden biri, hızla artan nüfusun beraberinde getirdiği hatalı veya plansız kentleşmedir. Özellikle büyük şehirlerde, trafik yoğunluğu ve sanayi tesislerinin fazlalığı, hava kalitesinin düşmesine yol açmakta ve kentlerde yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir (Kök, 2018).

Hava kirliliğinin etkileri çok boyutludur ve başta insan sağlığı olmak üzere, ekonomik, ekolojik ve sosyal alanlarda ciddi sonuçlar doğurur. Dünya Sağlık Örgütü’ne (DSÖ) göre, 2019 yılında dünya nüfusunun %99’u DSÖ’nün hava kalitesi kılavuzunda belirlediği sınırların üzerinde kirliliğe maruz kalmıştır. Aynı yıl, dış ortam (ambiyans) hava kirliliği nedeniyle dünya genelinde 4,2 milyon erken ölüm gerçekleşmiştir. Bu ölümlerin %68’i iskemik kalp hastalığı ve inme, %14’ü kronik obstrüktif akciğer hastalığı, %14’ü akut alt solunum yolu enfeksiyonları ve %4’ü akciğer kanseri nedeniyle meydana gelmiştir. Ayrıca, hava kirliliğine bağlı erken ölümlerin %89’u düşük ve orta gelirli ülkelerde görülmektedir. DSÖ, hava kirliliğinin kardiyovasküler hastalıklar ve ölümler üzerindeki önemli rolünü vurgulamaktadır (DSÖ, 2024). İnsan sağlığı üzerindeki etkileri, hava kirliliğinin en çok öne çıkan ve en çok araştırılan boyutudur. Hava kirliliği, solunum yolu hastalıkları, kalp-damar hastalıkları, astım, bronşit ve akciğer kanseri gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. DSÖ’nün

verilerine göre, hava kirliliği, bulaşıcı olmayan hastalıklar için en yüksek ikinci risk faktörüdür. Özellikle partikül maddeler (PM2.5 ve PM10), çocuklar, yaşlılar ve kronik hastalığı olan bireyler için büyük risk oluşturmaktadır. Partikül maddeler, havada askıda kalan ve solunum yoluyla vücuda giren küçük parçacıklardır. Bu maddeler, akciğerlerde birikerek solunum fonksiyonlarını bozmakta ve çeşitli hastalıklara zemin hazırlamaktadır (Köse, 2016). Ayrıca, hava kirliliği sadece solunum sistemiyle sınırlı kalmayıp, kalp-damar sistemi üzerinde de olumsuz etkiler yaratmakta, felç ve kalp krizi riskini artırmaktadır (DSÖ, 2024). Hava kirliliğinin ekonomik etkileri de göz ardı edilemeyecek düzeydedir.

Hava kirliliği, sağlık harcamalarında artışa, iş gücü kaybına ve üretkenlikte azalmaya neden olmaktadır. Türkiye’de hava kirliliği kaynaklı sağlık harcamalarının yıllık maliyeti 25,8 milyar TL ile 52,5 milyar TL arasında değişmektedir. Bu maliyetler, hem bireyler hem de devletler için önemli bir ekonomik yük oluşturmaktadır (Güzel ve Özer, 2022). Ayrıca, hava kirliliği nedeniyle artan hastalık ve ölüm oranları, iş gücü kaybına ve dolayısıyla ekonomik büyümenin yavaşlamasına yol açmaktadır.

Ekosistem ve çevre üzerindeki etkiler ise, hava kirliliğinin uzun vadeli ve çoğu zaman geri dönüşü zor olan zararlarını ortaya koymaktadır. Hava kirliliği, bitki örtüsüne, su kaynaklarına ve toprak kalitesine zarar vermektedir. Asit yağmurları, ormanların ve tarım alanlarının verimliliğini düşürmekte, su ekosistemlerinde biyolojik çeşitliliği tehdit etmektedir. Ayrıca, atmosferdeki kirleticiler iklim değişikliğini tetikleyerek küresel ısınmaya katkıda bulunmaktadır (Kök, 2018). Hava kirliliği, bir ülkede ortaya çıksa bile atmosferde taşınarak başka bölgelerde de olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu nedenle, hava kirliliğiyle mücadele ulusal sınırları aşan, küresel bir iş birliği gerektiren bir konudur. DSÖ, hava kirliliğiyle mücadelede bireysel çabaların ötesinde, enerji, ulaşım, atık yönetimi, şehir planlaması ve tarım gibi sektörlerde politika yapımcıların ortak ve kararlı adımlar atmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Temiz enerjiye geçiş, ulaşımında düşük emisyonlu araçların ve toplu taşımanın teşviki, endüstriyel emisyonların azaltılması ve atık yönetiminde modern yöntemlerin kullanılması, hava kirliliğini azaltmada etkili stratejiler olarak öne çıkmaktadır (DSÖ, 2024).

Sonuç olarak, hava kirliliği çok boyutlu etkileriyle hem insan sağlığını hem de çevreyi tehdit eden ciddi bir sorundur. Etkili mücadele için bilimsel veriler ışığında politika geliştirilmesi, kent planlamasında hava kalitesinin gözetilmesi ve toplumsal

farkındalığın artırılması gerekmektedir. Hava kirliliğinin önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için bireysel, toplumsal ve kurumsal düzeyde sorumluluk alınması büyük önem taşımaktadır.

Hava kirliliği genel olarak partikül maddeler, azot dioksit, kükürt dioksit, ozon ve karbon monoksit gibi yaygın kirleticilerden oluşurken, tehlikeli hava kirleticiler (hazardous air pollutants, HAPs) bu genel kirleticilerden farklı olarak, çok daha düşük konsantrasyonlarda dahi insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi ve kalıcı etkiler yaratabilen, toksik kimyasal maddelerdir. HAP'lar arasında benzen, formaldehit, civa, arsenik, dioksinler ve bazı pestisitler gibi maddeler yer alır. Türkçe literatürde “Tehlikeli Hava Kirleticiler” veya “Toksik Hava Kirleticiler” (Kara, 2016) olarak adlandırılan Hazardous Air Pollutants (HAPs), Amerikan Temiz Hava Yasası'nın (U.S Clean Air Act, 1963), (b) alt bölümünde listelenen ve çalışmamızda aşağıdaki paragrafta aktarılan herhangi bir hava kirletici anlamına gelir.

“Acrylamide, Acrylic acid, Acrylonitrile, Aniline, Benzene (including benzene from gasoline), 1,3-Butadiene, Chlorobenzene, Cumene, Dibutylphthalate, Diethanolamine, Dimethyl formamide, Ethyl acrylate, Ethyl benzene, Ethylene glycol, Formaldehyde, Isophorone, Methanol, Methyl ethyl ketone (2-Butanone), Methyl isobutyl ketone (Hexone), Methyl methacrylate, Methylene chloride (Dichloromethane), Naphthalene, Phenol, Phthalic anhydride, Styrene, Styrene oxide, Titanium tetrachloride, Toluene, 2,4-Toluene diamine, 2,4-Toluene diisocyanate, Vinyl acetate, Xylenes (isomers and mixture), o-Xylenes, m-Xylenes, p-Xylenes, Glycol ethers (U.S Clean Air Act, 1963).” Alıntıda sadece otomotiv sektöründe kullanılan boya ve solventlerdeki kimyasallar alınmıştır. Alıntıdaki kimyasalların tamamı Ek_A 'da verilmiştir.

Bu kirleticiler, kanser, nörolojik bozukluklar, üreme ve gelişim sorunları gibi ağır sağlık riskleriyle ilişkilendirilir ve genellikle endüstriyel faaliyetler, atık yakma, kimyasal üretim ve bazı motorlu taşıt emisyonları gibi belirli kaynaklardan atmosfere salınır. Tehlikeli hava kirleticiler, yaygın hava kirleticilere kıyasla daha az miktarda bulunmalarına rağmen, yüksek toksisiteleri nedeniyle halk sağlığı ve ekosistemler için çok daha büyük bir tehdit oluştururlar (WHO, 2024). Bu nedenle, HAP'ların izlenmesi ve kontrolü, hava kalitesinin korunmasında özel bir öneme sahiptir.

Hava kirleticiler kaynaklarına göre doğal kaynaklı kirleticiler ve yapay kaynaklı kirleticiler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu ayrıma göre hava kirleticilerin sınıflandırılması Tablo 2.1. 'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Doğal ve Yapay Kirleticiler (Kök, 2018).

Kirleticiler	Doğal Kaynaklı Kirleticiler				Yapay Kaynaklı Kirleticiler		
	Volkanlar	Orman Yangınları	Okyanus Spreyler	Çürüme	Isınma Kaynaklı	Trafik Kaynaklı	Endüstriyel Kaynaklı
SO ₂				X	X	X	X
CO			X	X	X	X	
CO ₂	X	X				X	X
NO _x	X				X	X	X
O ₃							X
PM _{2.5}	X	X	X		X	X	X
PM ₁₀	X	X	X		X	X	X
H ₂ S	X	X					
H ₂	X					X	
CL	X						
CH				X			
HC						X	X

Tabloda aktarıldığı üzere hava kirleticiler, yapay ve doğal olan birçok farklı kaynaktan meydana gelebilmektedir. Bu kaynaklar içerisinde yer alan endüstriyel kaynaklı kirleticiler ise; çalışmamız, otomotiv sektöründe baca gazı arıtma sistemlerinde ekipman seçimine dair olduğu için ayrıca ele alınacaktır.

Otomotiv sektöründe, özellikle araçların boyanması sırasında kullanılan boya fırınlarından çıkan hava kirleticiler, çevre ve insan sağlığı açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu süreçte atmosfere salınan başlıca endüstriyel hava kirleticiler arasında kükürt dioksit (SO₂), karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), ozon (O₃), 2.5 mikrondan küçük partikül maddeler (PM_{2.5}) ve 10 mikrondan küçük partikül maddeler (PM₁₀) yer almaktadır. Bu maddeler, endüstriyel faaliyetlerin tipik yan ürünleri olup, hava kalitesinin bozulmasına, asit yağmurlarına, iklim değişikliğine ve solunum yolu hastalıklarına yol açabilmektedir.

Boya fırınlarında uygulanan ısıtma işlemleri sırasında ise, bu klasik endüstriyel kirleticilere ek olarak, en önemli hava kirletici gruplarından biri olan (Menteşe ve Aydın, 2024) uçucu organik bileşikler (VOC'ler), formaldehit, toluen, ksilen ve etilbenzen gibi tehlikeli hava kirleticiler de atmosfere salınır. VOC'ler, hem işçiler

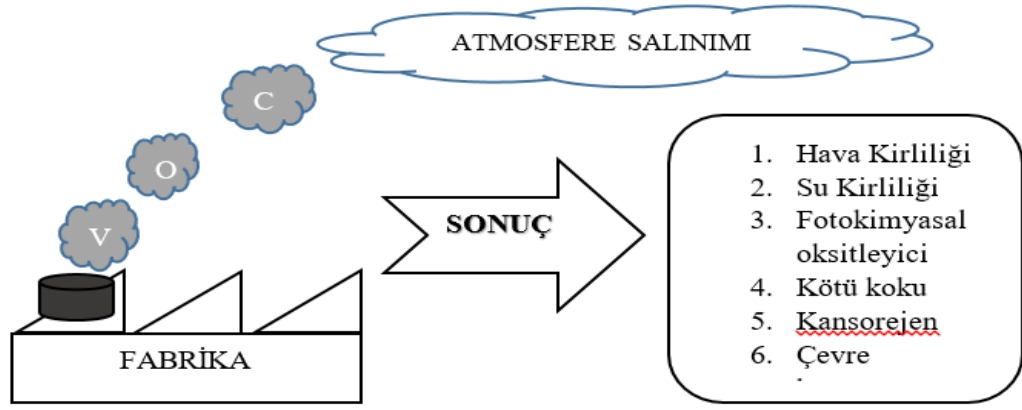
hem de çevrede yaşayanlar için solunum yolu hastalıkları, baş ağrısı, sinir sistemi bozuklukları ve uzun vadede kanser riski gibi sağlık tehditleri oluşturur. Ayrıca, VOC'ler fotokimyasal reaksiyonlarla yer seviyesinde ozon ve smog oluşumuna katkıda bulunarak hava kalitesini daha da düşürür. Otomotiv endüstrisinde bu tür emisyonların azaltılması için, düşük VOC içeren boyaların kullanılması, kapalı devre filtre sistemleri ve etkin havalandırma teknolojilerinin uygulanması gibi önlemler giderek yaygınlaşmaktadır (European Environment Agency, 2022). Bu tür uygulamalar, hem işçi sağlığının korunması hem de çevreye verilen zararın azaltılması açısından büyük önem taşır.

2.2. Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler)

Organik bileşikler, en az bir karbon elementi içeren ve karbona ek olarak hidrojen gibi diğer elementlerden en az birini de içerebilen bileşiklerdir. Organik bileşikler, uçucu organik bileşikler, yarı uçucu organik bileşikler ve uçucu olmayan organik bileşikler olarak üçe ayrılmaktadır. Türkçe literatürde “Uçucu Organik Bileşikler (UOB) olarak da adlandırılan (Alyüz ve Veli, 2006) Volatile Organic Compounds (VOC'ler), düşük kaynama noktalarına sahip oldukları için oda sıcaklığında kolayca gaz fazına geçebilen, çoğunlukla insan faaliyetleriyle ortaya çıkan organik kimyasal maddelerdir VOC'lerin tanımı ve sınıflandırılması, kaynama noktası gibi fiziksel özelliklerine ve bulundukları ortama göre değişiklik gösterebilir (United States Environment Protection Agency, 2025). Örneğin Avrupa Birliği, 21 Nisan 2004 tarihli ve 2004/42/CE sayılı, “*Belirli Boyalar, Vernikler ve Araç Tamir Ürünlerinde Organik Çözücülerin Kullanımı Nedeniyle Uçucu Organik Bileşiklerin Emisyonlarının Sınırlandırılmasına İlişkin ve 1999/13/EC Sayılı Direktifi Değiştiren Direktif*”inde VOC'leri “...standart basınçta (101,3 kPa) ilk kaynama noktası 250°C veya daha düşük olan herhangi bir organik bileşikler...” olarak tanımlamaktadır (Avrupa Birliği, 2004). Birleşik Krallık da 2012 tarihli ve 1715 sayılı “*Boyalarda, Verniklerde ve Araç Tamir Ürünlerinde Uçucu Organik Bileşikler (VOC) Yönetmeliği*”nde VOC'leri aynı şekilde tanımlamaktadır (Birleşik Krallık, 2012). En sık karşılaşılan türleri aromatik hidrokarbonlar (benzen, toluen, ksilen, etil benzen) ve halojenli hidrokarbonlar (kloroetilen, trikloroetilen) olan VOC'ler; çevrede kolayca buharlaşabilen, yüksek hareketlilik ve bozunmaya karşı direnç gösteren organik bileşikler olup, bu özellikleri sayesinde uzun mesafeler boyunca taşınabilmektedir (David ve Niculescu, 2021).

VOC'ler hem çevreyi kirletmekte hem de insan sağlığına önemli zararlar vermektedir. Uçucu organik bileşikler (VOC'ler), hem insan sağlığı hem de çevre üzerinde ciddi ve çok yönlü olumsuz etkilere sahip kimyasal maddelerdir. VOC'ler, başta endüstriyel faaliyetler, otomotiv sektörü, boya ve kaplama işlemleri, solvent kullanımı ve yakıt buharlaşması gibi kaynaklardan atmosfere yayılır. Bu maddeler, düşük konsantrasyonlarda dahi solunum yoluyla vücuda alındığında baş ağrısı, baş dönmesi, göz ve boğazda tahriş, alerjik reaksiyonlar, sinir sistemi bozuklukları ve uzun vadede bazı türleri için kanser riski gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Özellikle benzen, formaldehit, trikloroetilen ve vinil klorür gibi bazı VOC'ler, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından kanserojen olarak sınıflandırılmıştır (David ve Niculescu, 2021; Xiong ve ark., 2024). Son yıllarda yapılan küresel çalışmalar, VOC'lere maruz kalan nüfusun üçte birinin kanser riski altında olduğunu, özellikle formaldehit ve benzenin yaşam boyu maruziyetle önemli bir kanser yükü oluşturduğunu göstermektedir (Xiong ve ark., 2024). Ayrıca, VOC'ler akut maruziyette astım ve KOAH gibi solunum yolu hastalıkları riskini artırırken, uzun süreli maruziyet kalp-damar hastalıkları, nörolojik bozukluklar ve erken doğum gibi sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilmiştir (Xiong ve ark., 2024; Genç ve ark., 2012).

Çevresel açıdan bakıldığında, VOC'ler atmosferde fotokimyasal reaksiyonlara girerek yer seviyesinde ozon ve smog oluşumuna katkıda bulunur. Bu durum, hava kalitesinin bozulmasına, bitki örtüsünde zarar ve ekosistemlerde biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açar (David ve Niculescu, 2021). Ayrıca, VOC'ler atmosferde uzun mesafeler kat edebildiği için, yerel kaynaklardan çıkan emisyonlar bölgesel ve küresel ölçekte çevre sorunlarına neden olabilmektedir. Özellikle endüstriyel solventler, boya ve kaplama işlemleri, tarımsal faaliyetler ve fosil yakıt kullanımı, VOC emisyonlarının başlıca kaynakları arasında yer almaktadır (David ve Niculescu, 2021). Bu nedenle, VOC'lerin izlenmesi ve kontrolü, hem halk sağlığının korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi açısından büyük önem taşır. VOC 'nin tanımı ve çevreye verdiği zararlar Şekil 2.1. 'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.1. VOC ‘nin etkileri.

2.3. Otomotiv Sektöründe VOC Oluşumu ve Önlemleri

Günümüzde çevresel sürdürülebilirlik, otomotiv sanayisinde önemli bir stratejik öncelik haline gelmiştir. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin çevresel etkileri titizlikle değerlendirilmektedir. Otomotiv sektörünün tüm bölümlerinde VOC ve HAP ‘ların oluşumundan bahsetmek mümkündür. Ancak özellikle boyahane bölümleri, uçucu organik bileşiklerin (VOC – Volatile Organic Compounds) oluşumu ve salınımı açısından endüstrideki en önemli emisyon kaynakları arasında yer almaktadır. Bu bileşiklerin kontrolsüz salımı, hem insan sağlığını hem de çevreyi ciddi biçimde tehdit etmektedir (Zhou ve ark., 2020). Bu nedenle otomotiv üretim tesislerinde VOC oluşum mekanizmalarının anlaşılması ve önleme stratejilerinin sistematik olarak uygulanması büyük önem taşımaktadır.

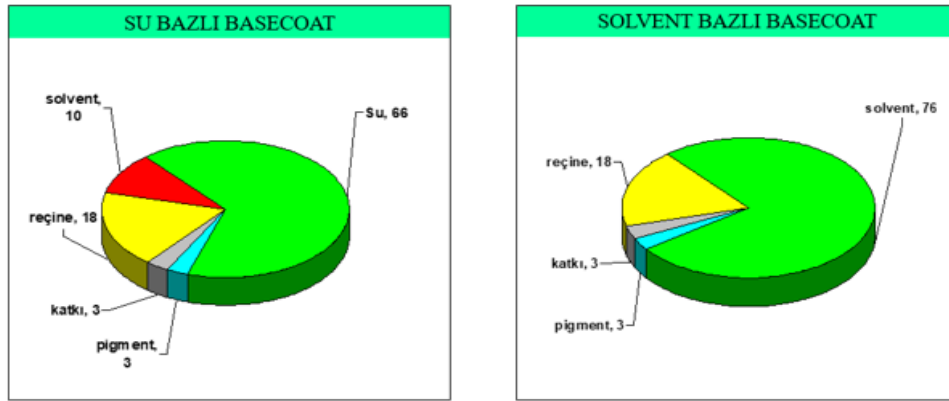
Otomotiv fabrikalarının boyahanelerinde VOC emisyonlarının kaynağı genellikle dört temel prosesten kaynaklanmaktadır:

- Yüzey Hazırlama: Boya öncesi yüzeylerin temizlenmesi amacıyla kullanılan çözücüler, genellikle VOC içerir.
- Astar ve Renk Katmanı Uygulamaları: Solvent bazlı astar ve boya ürünleri yüksek oranda VOC salınımına neden olur.
- Vernik Uygulamaları: Parlaklık ve dayanıklılık kazandırmak amacıyla uygulanan vernikler, solvent bazlı olduğunda VOC içerikleri oldukça yüksektir.

- Kurutma ve Fırınlama İşlemleri: Boya filmlerinin kurutulması sırasında solventlerin buharlaşması ile VOC'ler atmosfere karışır (Chen ve ark., 2017).

Yukarıdaki ilk üç madde boyama kabinlerinde meydana gelirken, son madde ise fırınlarda kurutma ve kirlenme esnasında oluşur. Bu iki durumu ve alınacak önlemleri ayrı ayrı incelemek gerekir. Kabinlerde ve fırınlarda VOC oluşumunu azaltacak yöntemleri incelediğimizde, ilk önlem olarak süreç iyileştirme ve malzeme seçimi karşımıza çıkar. VOC azaltımında en etkili stratejilerden biri, yüksek VOC içerikli solventlerin kullanımını sınırlandırmaktır. Bu bağlamda:

- Su bazlı boyalar: Geleneksel solvent bazlı boyalara kıyasla VOC emisyonlarını %70–80 oranında azaltabilir (Zhang ve ark., 2018). Bu bilgi Şekil 2.2. 'de görselleştirilmiştir.



Sulu bazkatın içerisindeki su oranı yaklaşık %60 'dır.

Şekil 2.2. Su ve solvent bazlı boyaların bileşenleri. (PHYS, 2013)

Bu yönüyle doğaya dost olan su bazlı boyalar, suyun bazı dezavantajlarından ötürü tercih edilmeyebilir. Bu dezavantajlar, buharlaştırma ısısı yüksek yani buharlaştırılması zor, buharlaştırma hızı ortamın nemi ile bağıntılı, metali yıpratıcı ve iletken olarak özetlenebilir.

- Toz boya sistemleri: Tamamen solventsiz çalışmaları nedeniyle VOC oluşumu neredeyse sıfırdır. Ancak toz boya uygulamaları otomotiv boya endüstrisinde tercih edilmemektedir. Toz boya; çevresel avantajları, düşük VOC emisyonları ve geri kazanım kolaylığı gibi artılara sahip olsa da, otomotiv boyahanelerinin kalite, estetik ve proses gerekliliklerini karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, otomobil dış yüzey boyamasında toz boya yerine çok katmanlı sıvı

boya sistemleri tercih edilmektedir. Toz boya genellikle otomotiv sektöründe jant, şasi parçaları, süspansiyon elemanları gibi yan parçaların kaplamasında kullanılır.

- Düşük VOC içerikli malzemeler: Yeni nesil reformüle edilmiş solventler ve reçinelerle emisyon azaltımı mümkündür.

Boya kabinlerindeki VOC oluşumunun azaltma çalışmalarına baktığımızda ise; aşağıdaki başlıklar karşımıza çıkar.

- Elektrostatik püskürtme sistemleri; boya kullanım verimliliğini artırarak hem malzeme israfını hem de VOC salınımını azaltır (Wang ve ark., 2015).
- Kapalı devre spreycabinleri; uygulama sırasında açığa çıkan VOC'lerin çevreye yayılmasını sınırlar.
- Robotik boya uygulamaları; tutarlı ve hassas uygulamalar sağlayarak emisyon kontrolüne katkı sağlar.

Bu konu, yasal düzenlemeler ve standartlar başlığı altında incelenirse şöyle bir bilgiye ulaşılır. Avrupa Birliği tarafından yayımlanan 1999/13/EC sayılı *VOC Direktifi*, otomotiv boyahaneleri de dahil olmak üzere birçok endüstriyel işletmeye emisyon sınırları getirmiştir. Türkiye’de ise bu düzenlemeler *Çevre Kanunu*, *Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği* ve *Endüstriyel Emisyonlar Direktifi* ile entegre olarak yürütülmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Boya kabinlerinde boyama esnasında kullanılan kimyasal maddeler sonucu VOC ve HAP ‘lar oluşur. Oluşumunu azaltmak için yukarıdaki önlemler alınır. Boya kabinlerinde oluşan VOC ‘ları temizlemek ve atmosfere salmamak için gerekli önlemlere değinilmemiştir.

Boya fırınlarında ise kurutma ve kürlenme esnasında sıcaklık kaynaklı boya içindeki solvent ve bazı kimsayallar buharlaşarak VOC ve HAP ‘lar oluşur. Bu oluşumların engellenmesi yerine temizleme işlemi yapılır. Temizleme işleminden sonra hava atmosfere salınır. Bu işlem, baca gazı arıtımı olarak adlandırılır.

2.4. Baca Gazı Arıtımı ve Arıtım Yöntemleri

Otomotiv endüstrisi, enerji ve hammadde kullanım yoğunluğu nedeniyle çevreye yönelik etkileri bakımından dikkat çeken sektörlerin başında gelmektedir. Bu sektörün

en fazla uçucu organik bileşik (VOC) emisyonuna neden olan birimi ise boyahane bölümüdür. Özellikle boya uygulamalarının ardından kürlenme ve kurutma işlemleri sırasında çalışan fırınlardan çıkan baca gazı içerisinde yüksek miktarda VOC bulunmaktadır. Bu bileşikler; toluen, ksilen, etilbenzen gibi aromatik hidrokarbonları içerir ve hem insan sağlığına hem de çevreye zarar vermektedir (Aburas ve ark., 2023).

VOC'lerin doğrudan atmosfere salınması; fotokimyasal smog oluşumu, ozon tabakasının incelmesi ve insan sağlığı üzerinde toksik etkiler gibi ciddi çevresel ve sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Bu nedenle otomotiv fabrikalarında, özellikle boyahane fırın çıkışlarında bu bileşiklerin etkin bir şekilde arıtılması gerekmektedir. Bu arıtım işlemleri, hem ulusal çevre mevzuatları hem de uluslararası çevre standartları ile zorunlu hale getirilmiştir (Yiğit ve ark., 2021). Bu kapsamda, otomotiv sektöründe çevresel etkilerin azaltılması için uygulanan arıtım teknolojileri ve süreç iyileştirmeleri, aynı zamanda yeşil üretim faktörünün önemini de ortaya koymaktadır. Yeşil üretim faktörü, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve kaynak kullanımını minimize eden üretim süreçlerinin değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir. Özellikle enerji verimliliği, atık azaltımı ve emisyon kontrolü gibi unsurlar, yeşil üretim faktörünün belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır (Zhu ve Sarkis, 2004; Deif, 2011). Son yıllarda yapılan çalışmalar, yeşil üretim faktörünün firma performansını artırmasının yanı sıra çevresel yüklerin azaltılmasına da katkı sağladığını ortaya koymuştur (Singh ve ark., 2020).

Avrupa Komisyonu'nun yayımladığı "Best Available Techniques (BAT) Reference Document" (BREF), termal egzoz havası arıtımı için en iyi uygulamaları ve teknik standartları belirler. Bu belge, endüstriyel emisyonların azaltılması için önerilen teknikleri detaylandırır (EIPPCB, 2023).

Ülkemizde de baca gazı arıtımı, endüstriyel tesislerin faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan zararlı gazların ve partiküllerin atmosfere salınmadan önce temizlenmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. Baca gazı arıtımı yapılması gereklidir ve hem çevresel hem de yasal gereklilikler açısından büyük öneme sahiptir:

- Çevresel Koruma: Atmosfere salınan zararlı gazlar ve partiküller, hava kalitesini düşürerek insan sağlığını olumsuz etkiler ve ekosistemlere zarar verir. Baca gazı arıtımı, bu kirleticilerin salınımını azaltarak çevreyi korur.

- **Yasal Uyumluluk:** Türkiye’deki çeşitli yasal düzenlemeler, endüstriyel tesislerin baca gazı emisyonlarını kontrol altına almasını zorunlu kılar. Bu düzenlemelere uyum sağlamak, yasal yaptırımlardan kaçınmak için gereklidir.
- **Toplumsal Sorumluluk:** Çevreye duyarlı işletmeler, toplumun ve paydaşlarının güvenini kazanır. Baca gazı arıtımı, kurumsal sosyal sorumluluk projelerinin önemli bir parçasıdır.

Türkiye’de baca gazı arıtımını zorunlu kılan başlıca yasal düzenlemeler şunlardır:

- **2872 Sayılı Çevre Kanunu:** Çevrenin korunması ve kirliliğin önlenmesine yönelik temel yasal çerçeveyi belirler. Endüstriyel tesislerin faaliyetlerinden kaynaklanan hava kirliliğini önlemek için gerekli tedbirlerin alınmasını zorunlu kılar.
- **Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği:** Hava kalitesinin korunması ve hava kirliliğinin önlenmesi amacıyla endüstriyel tesislerin baca gazı emisyonlarına sınırlamalar getiren yönetmeliktir.
- **Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği:** Sanayi kaynaklı hava kirliliğinin kontrol altına alınması ve emisyonların belirlenen sınır değerlerin altında tutulması için gerekli önlemleri tanımlar.
- **Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği:** Büyük yakma tesislerinin faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları kontrol altına almayı hedefler ve baca gazı emisyon sınırlarını belirler.
- **Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik:** Atıkların yakılması sırasında ortaya çıkan emisyonların kontrolü ve azaltılması amacıyla gerekli tedbirleri belirler.
- **Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği:** Yeni kurulacak veya kapasite artırımını yapacak endüstriyel tesislerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi sürecinde hava kirliliği ve baca gazı arıtma sistemlerine ilişkin gereklilikleri tanımlar.

Boyahane fırınlarından kaynaklanan VOC emisyonlarının kontrolü, hem enerji verimliliğini artırmak hem de çevresel düzenlemelere uyum sağlamak açısından önemlidir. Otomotiv üretim tesislerinde VOC arıtımına yönelik kullanılan başlıca teknolojiler, termal oksidasyon, katalitik oksidasyon, adsorpsiyon ve yoğunlaştırma sistemleridir (Liu ve ark., 2022). Bu teknolojilerin seçimi; baca gazı içerisindeki VOC

konsantrasyonu, gazın sıcaklığı, debisi ve arıtma tesisinin enerji verimliliği kriterleri doğrultusunda belirlenmektedir (Şahin, 2021).

- **Termal Oksidasyon Sistemleri:** Termal oksidasyon, VOC içeren gazların yüksek sıcaklıklarda (genellikle 750–850 °C) yakılarak karbondioksit (CO₂) ve su buharına (H₂O) dönüştürülmesi esasına dayanır. Bu yöntem yüksek verimlilikle VOC giderimi sağlasa da, yüksek enerji tüketimi nedeniyle özellikle atık ısı geri kazanım sistemleri ile birlikte kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2021). Bu sistemler genellikle "Doğrudan Ateşlemeli Termal Oksidizer" (Direct-Fired Thermal Oxidizer - DFTO) ya da "Rejeneratif Termal Oksidizer" (Regenerative Thermal Oxidizer - RTO) olarak sınıflandırılır. RTO sistemleri, atık ısının seramik yataklarda geri kazanımı sayesinde enerji verimliliği yüksek sistemlerdir (Aburas ve ark., 2023).
- **Katalitik Oksidasyon Sistemleri:** Termal oksidasyona benzer şekilde çalışmakla birlikte, daha düşük sıcaklıklarda (250–400 °C) işlem yapılmasını sağlayan katalizörler kullanılır. Bu sistemler enerji açısından daha verimli olmakla birlikte, katalizörün VOC türüne ve konsantrasyonuna uygun seçilmesi gerekir (Al-Malack ve Basaleh, 2016). Diğer bir ifadeyle, katalizörlerin kirlenmeye karşı hassas olması ve periyodik bakım gerektirmesi bu sistemin dezavantajları arasında yer almaktadır (Çakmak, 2021).
- **Adsorpsiyon Sistemleri:** Genellikle aktif karbon kullanılarak çalışan bu sistemler, VOC'lerin yüzeye tutunarak ortamdan uzaklaştırılmasına dayanır. Düşük konsantrasyonlu baca gazlarında oldukça etkilidir ve rejenerasyon sistemleri ile karbon yataklarının ömrü uzatılabilir. Ancak yüksek sıcaklık ve nem içeren baca gazlarında performans kaybı yaşanabilir (Luo ve ark., 2022). Genellikle düşük konsantrasyonlu VOC'lerin arıtımı için tercih edilen bu sistemler, geri kazanım veya oksidasyon sistemleri ile entegre edilerek kullanılabilir (Kang ve ark., 2022).
- **Yoğunlaştırma ve Diğer Yardımcı Sistemler:** VOC'lerin fiziksel özelliklerinden faydalanan gaz akımından ayrıştırılmasını sağlar. Bu yöntemler tek başlarına yüksek verimli VOC giderimi sağlamazlar (Yılmaz ve Demirtaş, 2020). Soğutma ile VOC'lerin sıvı faza geçirilmesi esasına dayanan bu sistemler, ön arıtma ya da yardımcı proses olarak kullanılır. Membran

sistemleri ve fotokatalitik oksidasyon gibi yeni nesil teknolojiler ise laboratuvar ve pilot ölçekte geliştirilmektedir (Cao ve ark., 2023).

Türkiye’de otomotiv fabrikalarında baca gazı atık ısısından yararlanmak amacıyla enerji geri kazanım sistemlerinin entegre edildiği uygulamalar da bulunmaktadır. Örneğin, boya kurutma fırınlarından çıkan sıcak baca gazı, ısı eşanjörleri yardımıyla diğer proseslerde kullanılmak üzere geri kazanılabilmektedir (Yiğit ve ark., 2021). Türkiye’de yapılan bir diğer çalışmada, otomotiv sektöründeki boyahanelerde kürlenme fırınlarından çıkan baca gazı atık ısısının geri kazanımı ile enerji tasarrufu sağlanabileceği ve VOC konsantrasyonunun azaltılabileceği belirtilmiştir. Bu amaçla kurulan sistemde, atık ısı eşanjörleri kullanılarak fırın çıkışındaki sıcak gazlardan enerji geri kazanılmış ve bu sayede oksidasyon sistemine giden gazın ön ısıtılması sağlanmıştır (Koç ve Keleş, 2021). Bu uygulama hem enerji verimliliği sağlamakta hem de baca gazı içerisindeki VOC’lerin termal dönüşümüne katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, otomotiv sektöründe boyahane fırınlarından kaynaklanan VOC emisyonlarının kontrol altına alınması, çevresel koruma, sürdürülebilirlik, iş sağlığı ve güvenliği ile yasal uyumluluk açısından kritik bir gerekliliktir. Aynı zamanda bu sistemi kurmak firmaya, kurumsal bir itibar kazandırır ve ekonomik tasarruf sağlar. Bu kapsamda, çevre dostu malzemelerin kullanımı, gelişmiş uygulama teknolojileri ve etkin arıtım sistemlerinin entegrasyonu, emisyonların minimize edilmesinde temel rol oynamaktadır. Ayrıca, tesislere özgü parametreler dikkate alınarak yapılan uygun mühendislik tasarımları ile prosesin optimize edilmesi, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. VOC kontrol stratejileri, teknolojik ve yönetsel boyutlarıyla bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

Hava kirliliğini kontrol altında tutmak pek çok sanayi tesisi için önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Koku, uçucu organik bileşikler (VOC’ler) ya da tehlikeli hava kirleticileri (HAP’lar) salan üretim tesisleri, emisyon içeriğini düzenleyen sıkı yasal düzenlemelere uymak zorundadır. Egzoz gazlarındaki kirletici maddelerin giderilmesi, işletmenin yasal yükümlülüklerini yerine getirmesini sağladığı gibi, bu maddelerin çevresel etkilerini de en aza indirir. Termal oksitleyiciler ise bu tür emisyonların arıtımında ekonomik ve enerji açısından verimli bir çözüm sunmaktadır (Anguil, n.d.). Diğer bir ifade ile termal oksitleyiciler diğerlerine göre en yaygın kullanılan ve uygun çözümü sunan teknolojilerdir. Endüstriyel süreçler sonucu ortaya çıkan uçucu organik bileşikler (VOC’ler) ve tehlikeli hava kirleticilerin (HAP’lar), atmosfere salınımını

önlemek amacıyla geliştirilen termal oksitleyici sistemler (Thermal Oxidizers, TO), yüksek sıcaklıklarda bu bileşikler karbondioksit (CO_2) ve su buharı (H_2O) gibi daha az zararlı bileşenlere dönüştürerek hava kirliliğini azaltmayı hedefleyen termo kimyasal sistemlerdir (Chen ve Wang, 2018; Lewandowski, 2017).

Termal oksitleyicilerin çalışma prensibi, VOC'lerin belirli bir sıcaklığa (genellikle 760–1.100 °C) kadar ısıtılması ve yeterli bekleme süresi (residence time) sağlanarak tam yanmanın gerçekleştirilmesine dayanır (Moolchandani ve Thipse, 2013). Bu işlem, kirleticilerin kimyasal olarak parçalanmasına ve çevreye salınmadan önce nötralize edilmesine olanak tanır. Oksidasyon işlemi için gerekli olan üç temel unsur; yüksek sıcaklık, yeterli süre ve iyi bir türbülansdır (Chen ve Wang, 2018).

Termal oksitleyiciler yapısal özelliklerine göre farklı tiplere ayrılmaktadır. En yaygın türleri arasında doğrudan yakmalı termal oksitleyiciler (DFTO), reküperatif termal oksitleyiciler ve rejeneratif termal oksitleyiciler (RTO) bulunur. Reküperatif tipteki oksitleyiciler, yakıt tüketimini azaltmak amacıyla ısı değiştiricilerle donatılmış sistemlerdir. Kirleticiler içeren hava akımı, ilk olarak bu hava akımının sıcaklığını yükselten bir ısı değiştirici ünitesinden geçer. Böylece, hava yanma odasına daha yüksek bir sıcaklıkta ulaştığı için, gerekli oksidasyon süreci daha az yakıt kullanılarak gerçekleştirilebilir. Buna karşılık, rejeneratif oksitleyiciler ise enerji geri kazanımı açısından en verimli sistemler arasında yer alır. Bu sistemler, proses sırasında ortaya çıkan ısıyı yaklaşık %97'sine kadarını geri kazanabilen seramik ısı değişim malzemeleri kullanmaktadır (Anguil, n.d.). Bu sistemler; otomotiv, kimya, ilaç, boya, tekstil, gıda ve atık yönetimi gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Tomatis ve ark., 2019; Kono Kogs, n.d.; Sun ve ark., 2022). Özellikle solvent bazlı proseslerde etkin VOC giderimi açısından vazgeçilmez çözümler sunarlar.

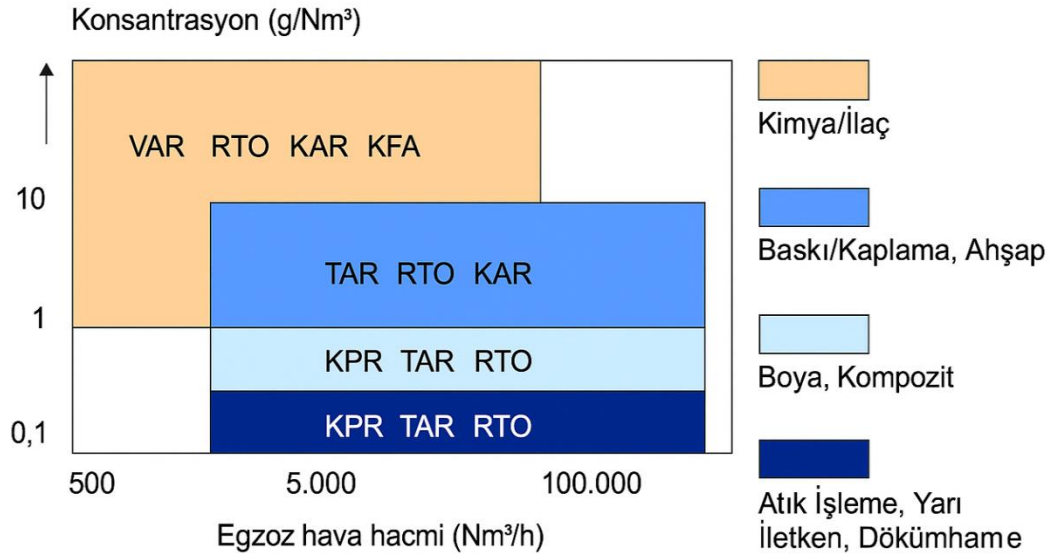
Termal oksitleyiciler genellikle %98 ila %99.9 arasında VOC giderim verimliliğine sahiptir (EPA, n.d.). Çevresel katkılarının yanı sıra, ısı geri kazanımı ile işletme maliyetlerini düşürmeleri ve karbon ayak izini azaltmaları, bu sistemleri çevre mühendisliğinde vazgeçilmez kılmaktadır (CECO Environmental, n.d.; Park ve ark., 2024; Ren ve ark., 2024). Ayrıca, modern TO sistemleri, gelişmiş kontrol sistemleri, otomasyon ile arıza teşhisi ve performans optimizasyonu açısından daha güvenilir ve sürdürülebilir hale gelmiştir (Yiğit, Erdem ve Kaplan, 2022). Sayısal modellemeler ve

simülasyonlar da tasarım sürecinde etkin rol oynayarak sistem verimliliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Ren ve ark., 2024; Zhang, Chen ve Li, 2021).

Termal oksitleyiciler doğalgazlı olarak tasarlanabildikleri gibi elektrikli olarak tasarlanabilir. Bu sistemler “Alevsiz elektrikli termal oksidizer” olarak adlandırılır. Yanma odasındaki brülör, doğalgazlı veya elektrikli yanma olarak tasarlanır. Elektrikli termal oksidizerlerde; yakıtta CO₂ üretimi yok, gaz bağlantısına gerek duymaz, entegre olan küçük bir tasarım ve kurulumu kolay, yüksek termal geri kazanım ve düşük enerji tüketimi, düşük bakım gerekliliği ve güvenilirliği çok yüksek, kurulumdan önce üretim yerinde test etme olanağı gibi bir çok avantaja sahiptirler. Güneş panelleriyle entegrasyon imkânı sayesinde, sürdürülebilirlik hedeflerine bir adım daha yaklaşılabilir; böylece hem operasyonel maliyetler düşürülebilir hem de üretim faaliyetlerinin çevresel etkileri güneş enerjisi kullanılarak azaltılabilir. Başlıca kullanım alanları şu şekildedir; kimya sanayi, farmasötik üretim, boya ve kaplama uygulamaları, baskı ve ambalaj sanayi, yüzey işlem teknolojileri, yapıştırıcı ile çözücü imalatı, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleridir (Brofind, n.d.).

Bu teknolojiler, çeşitli üretim sahalarında yüksek verimlilikle kullanılmakta olup, sıkı çevresel mevzuatlara uyum sağlarken aynı zamanda ciddi düzeyde enerji geri kazanımı sunmaktadır.

Çalışmamıza konu olan işletmemize ve bu ölçekteki firmalara uygun baca gazı arıtma sistemi ekipmanları aşağıda verilmiş ve bu ekipmanlar hakkında açıklayıcı bilgilere yer verilmiştir. Ayrıca Dürr firması tarafından hazırlanan sektöre göre ekipman tercihi gösterilmiş ve Şekil 2.3. 'te görselleştirilmiştir. Fabrikamıza, baca gazı arıtma ekipmanı seçerken yetkili firmadan bilgi alınmış ve aşağıdaki şekil göz önünde bulundurulmuştur.



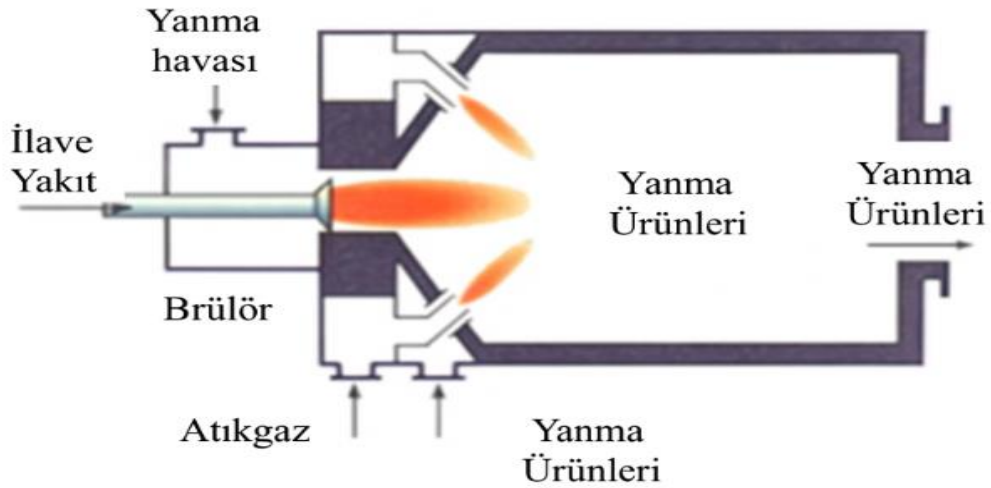
Şekil 2.3. Baca Gazı arıtım sistemi ürün uygulama alanları.(Dürr, 2021)

Şekil 2.3. 'te boya ve kompozit alanında kullanılması önerilen sistemlerden KPR sistemi tek başına bir sistem değil, diğer sistemlerin önüne entegre olan bir yoğunlaştırma ünitesidir. Dürr firmasının geliştirdiği KPR kısaltmasının açılımı Katalytisch-Plasma-Reaktor 'tür. Bu ifade Almanca kökenlidir. Katalitik Plazma Reaktörü şeklinde Türkçe 'ye çevrilir. Ecopure® KPR sistemi, uçucu organik bileşiklerin (VOC'lerin) arıtımında kullanılan bir konsantrasyon ünitesidir. KPR sistemi, düşük konsantrasyonlu ve yüksek hacimli egzoz havasındaki VOC'leri yoğunlaştırarak, bu gazların termal oksidasyon ünitesine (örneğin Ecopure® TAR veya RTO) daha verimli şekilde iletilmesini sağlar. Bu teknoloji sayesinde, işlem hacmi küçültülerek yakıt tüketimi ve işletme maliyetleri önemli ölçüde düşürülebilmektedir (Dürr, 2020). Ecopure® KPR sistemleri, özellikle düşük VOC konsantrasyonlarının ekonomik bir şekilde işlenmesini mümkün kılması nedeniyle büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir (Singh ve ark., 2020). Bu yüzden seçilecek sistemlerde değerlendirilmemiştir.

2.4.1. Termal oksidasyon (TO)

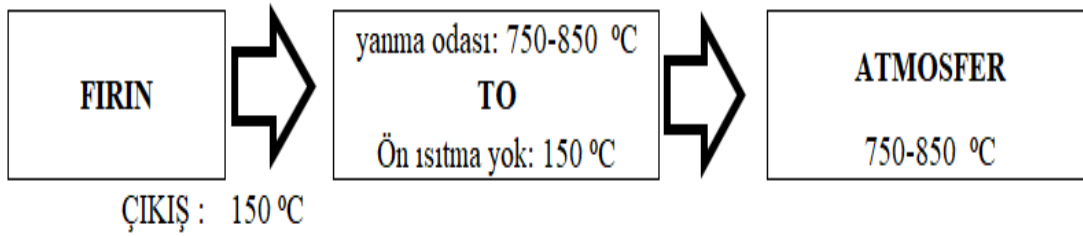
Termal oksitleyiciler, başta uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve tehlikeli hava kirleticileri (HAP'lar) olmak üzere çeşitli zararlı gazları parçalayarak zararsız bileşiklere dönüştüren ekipmanlardır. İlk teknoloji olarak hayatımıza giren Termal oksitleyiciler (TO) diğer adıyla Doğrudan ateşlemeli (yanmalı) termal oksitleyiciler (DFTO); brülör ve yanma odasından oluşan, kurulum ve bakım maliyetleri açısından en uygun maliyetli olarak kabul edilen basit ünitelerdir. Çalışma mantığı; "kirli baca

gazı yanma odasına alınır, burada yüksek sıcaklıklarda ısıtılır ve sonrasında atmosfere salınır” şeklindedir (Anguil Environmental Systems, n.d.). Bir başka tanımda ise, Doğrudan yakmalı termal oksitleyiciler (DFTO), en basit yapıya sahip olup kirli gazları doğrudan yanma odasında oksitler (Brofind, n.d.). Bu sistemlerde, hedef bileşiklerin bozulması için gereken sıcaklığa ulaşmak amacıyla bir yanma odasında yakıt kullanılır. Ancak bu süreç, sürekli yüksek sıcaklık gerektirdiğinden enerji tüketimi açısından maliyetli olabilir. Bu nedenle, termal oksitleyicilerin tasarımı enerji verimliliği açısından büyük önem taşır. Uygun mühendislik ve sistem konfigürasyonu sayesinde, bu üniteler %99.9999’a kadar yok etme verimliliğine ulaşabilmektedir (EPA, n.d.). Reaksiyonun gerçekleşebilmesi için, bu bileşiklerin kendi kendine tutuşma sıcaklığının üzerine çıkılması gerekir; bu noktada kimyasal bileşikler yanarak ısı açığa çıkarır. Boya ve kaplama endüstrileri başta olmak üzere; petrol, doğalgaz, etanol, gıda, baskı, kimya, ilaç, yarı iletken ve otomotiv gibi sektörlerde bu teknoloji çevresel etkilerin azaltılmasında etkin bir çözüm olarak kullanılmaktadır (TKS Industrial Company, 2021). Bununla birlikte, yalnızca zararlı gazların bertarafı değil, aynı zamanda açığa çıkan ısıнын geri kazanımı da bu sistemlerin verimli kullanımını mümkün kılmaktadır. Termal Oksitleyici (TO) ekipmanın şekli ve açıklaması Şekil 2.4. ‘te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Termal Oksitleyici (Venkatesh ve Woodhull, 2003).

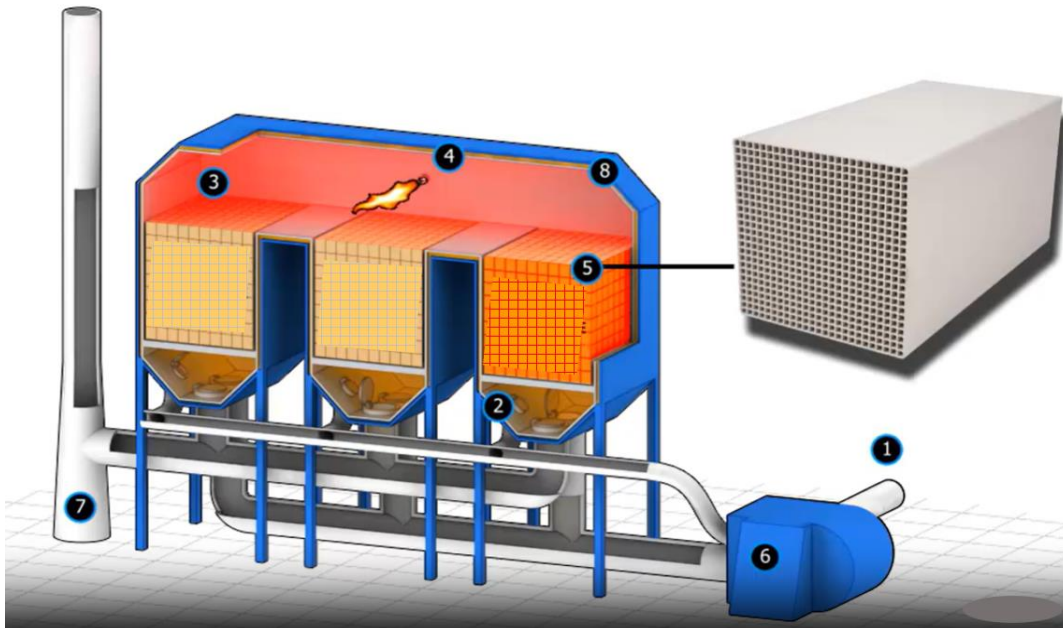
Boya fırınlarından alınan 150 °C ‘deki kirli gaz TO sisteminde yüksek sıcaklıklarda (750–850 °C) yakılıp aynı sıcaklık değerlerinde atmosfere salınır. Prosesin ve sistemin ısı değişimleri Şekil 2.5. ‘te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Proses ve TO Sistem ısı değişimleri.

2.4.2. Rejeneratif termal oksidasyon (RTO)

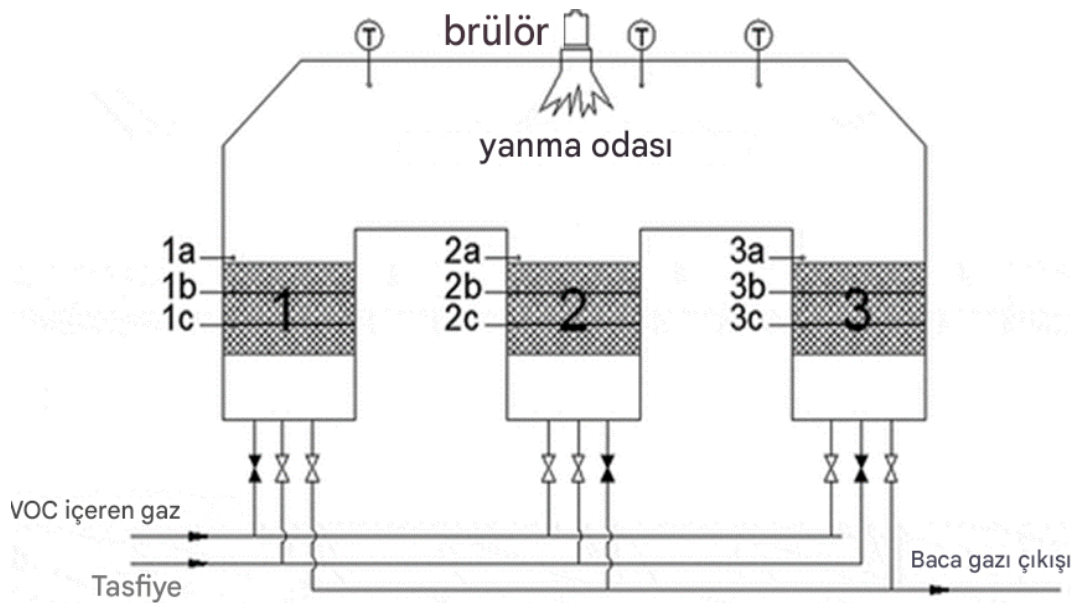
Rekuperatif ve rejeneratif termal oksitleyiciler arasındaki temel fark, enerji geri kazanım yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Rekuperatif sistemlerde, egzoz gazındaki atık ısıdan yararlanmak amacıyla ısı eşanjörleri kullanılır. Bu mekanizma, çıkış gazlarının enerjisini giriş havasını ısıtmak üzere değerlendirir. Buna karşın, rejeneratif termal oksitleyiciler daha gelişmiş ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu sistemlerde, akış yönünü değiştiren valfler ile birlikte sıcak gazlardan ısıyı emebilen seramik ısı tutucu malzemeler kullanılır. Isı ile yüklenen hava, uçucu organik bileşiklerin (VOC) yanma yoluyla yok edildiği bir yanma odasından geçirilir. RTO ‘nın görünümü ve odacıklarda kullanılan seramik tuğlalar Şekil 2.6. ‘da gösterilmiştir. Şekilde; ① Atık gaz girişi, ② yön değiştirme vanaları sistemi, ③ yanma odası, ④ brülör, ⑤ rejeneratif ısı değişim yatakları, ⑥ fan, ⑦ baca (temiz gaz çıkışı), ⑧ ısı izolasyonu anlamlarına gelmektedir.



Şekil 2.6. RTO görünümü ve kullanılan seramik tuğlalar (NT Trade, 2024).

Rejeneratif termal oksitleyiciler, genellikle daha yüksek enerji verimliliğine sahip olmaları nedeniyle daha esnek ve etkili bir çözüm sunar. Bu sistemler, özellikle uzun süreli çalışmalarda ve yüksek VOC seviyelerinin söz konusu olduğu uygulamalarda avantaj sağlar. Seramik dolgu ortamı sayesinde ısıнын geri kazanımı daha verimli biçimde gerçekleştirilir. Ayrıca düşük konsantrasyonlu VOC içeren gazların arıtılmasında da etkili performans göstermeleri, onları geniş bir kullanım alanı için uygun hale getirir (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). Bundan dolayı RTO kısaltması ile karşımıza gelen ifade genelde Regeneratif Termal Oksidasyon olarak algılanır ve kullanım olarakta daha fazla tercih edilir.

Rejeneratif Termal Oksitleyiciler (RTO), endüstriyel proseslerde ortaya çıkan uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve tehlikeli hava kirleticilerini (HAP'lar) yüksek sıcaklıklarda oksitleyerek, daha az zararlı bileşikler olan karbondioksit (CO_2) ve su buharına (H_2O) dönüştüren hava kirliliği kontrol sistemleridir (Lewandowski, 2017; Yiğit ve ark., 2022). Bu sistemler, yalnızca emisyonların azaltılmasına değil, aynı zamanda enerji verimliliğinin artırılmasına da katkı sağlamaktadır. RTO'larda yanma sıcaklığı genellikle $760\text{--}980^\circ\text{C}$ arasında olup, gazların yaklaşık bir saniye boyunca bu sıcaklıkta tutulması ile optimum oksidasyon verimi elde edilmektedir (EPA, n.d.). RTO 'nun çalışma yapısı; kirli gaz 1 numaralı odacıktan girer ve seramik tuğlalarda ön ısıtılır. Yanma odasında kirli gaz yüksek sıcaklıkta yakılır. Temizlenen gaz 2 numaralı odacıktan atmosfere salınır. 3 numaralı odacıktan yanmamış gazlar sisteme tekrar yakım için geri gönderilir. Bu ifade Şekil 2.7. 'de görselleştirilmiştir.



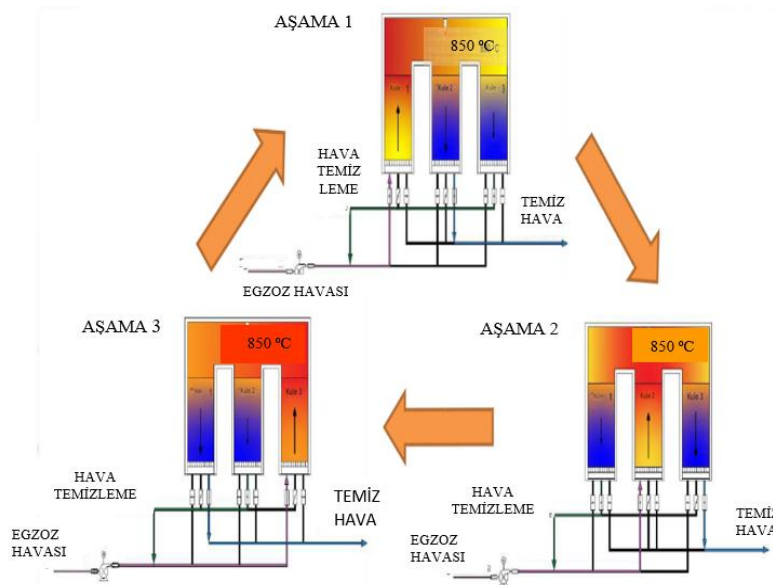
Şekil 2.7. RTO yapısı ve çalışma prensibi (Wang, Lei ve Hao, 2020).

Bir rejeneratif termal oksidasyon (RTO) sisteminin arıtma verimliliği, çeşitli operasyonel ve teknik unsurlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu unsurların başında valflerin yeterli sızdırmazlık sağlayacak biçimde çalışması gelmektedir. Ayrıca, kirletici gazların oksidasyon hücresinde yeterli süreyle kalması, yani temas süresi, etkin bir arıtma için kritik öneme sahiptir.

Bunun yanı sıra, yanma havası ile kirletici gazların homojen bir şekilde karışması da prosesin verimliliğini doğrudan etkileyen faktörlerdendir. Tüm bunlara ek olarak, sistemin düzenli ve uygun biçimde bakımdan geçirilmesi, arıtma performansının sürdürülebilirliği açısından belirleyici bir rol oynamaktadır (Brofind S.p.A., 2022).

RTO sistemleri temel olarak seramik dolgulu yataklar, yanma odası ve kontrol valflerinden oluşur. Sistem, üç seramik yataktan oluşan döngüsel bir yapıya sahiptir. VOC içeren kirli gazlar, önce seramik yataklardan geçerek ön ısıtılır, ardından yanma odasında oksitlenir ve daha sonra başka bir seramik yatağa yönlendirilerek burada ısı depolanır. Bu sayede, her çevrimde atık ısı geri kazanılarak enerji tüketimi minimize edilir (Pu ve ark., 2021; Tuncer ve ark., 2023).

Diğer bir ifadeyle; Rejeneratif termal oksitleyiciler (RTO), seramik dolgu malzemeleri sayesinde %95'e kadar ısı geri kazanımı sağlayarak oldukça yüksek düzeyde enerji verimliliği sunar (Park ve ark., 2024; IQS Directory, n.d.). Seramiklerdeki ön ısıtma, ısı depolanması ve ısı geri kazanımı sayesinde enerji tasarrufu, üç saykıl izlenerek de görselleştirilmiştir. Bu görsel Şekil 2.8. 'de verilmiştir.



Şekil 2.8. RTO üç saykıl gaz çevrimi (MWindow, 2024).

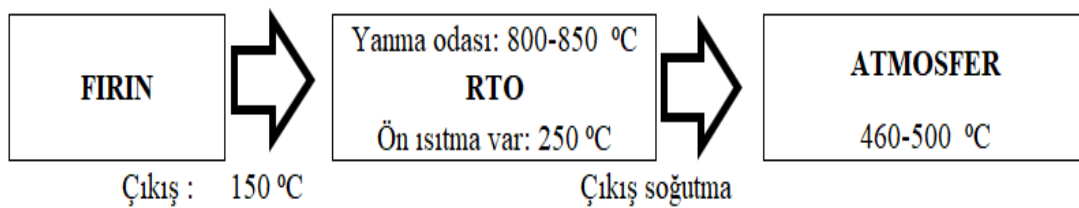
İki odalı rejeneratif termal oksidasyon sistemleri, genellikle operasyonel zorluklar nedeniyle bacada konsantrasyon piklerine neden olur. Bu durum, emisyonların giriş konsantrasyonu ile doğrudan ilişkili olmasına yol açar ve örneğin, 50 mg/nm^3 'ün altındaki baca emisyonları ancak $300\text{--}400 \text{ mg/nm}^3$ altındaki giriş konsantrasyonlarında sağlanabilir. Her ne kadar iki odalı sistemlerin yatırım maliyetleri üç odalı sistemlere kıyasla daha düşük olsa da, yetersiz bakım sonucu artan işletme maliyetleri göz ardı edilmemelidir. Öte yandan, üç odalı sistemler, özellikle $3.5\text{--}4 \text{ g/nm}^3$ üzerindeki kirlenici konsantrasyonlarında en etkin çözüm olarak öne çıkar. Bu sistemde, akış döngüsü sırasında bir oda devreden çıkarılarak atık hava yeterli süreyle işlenir ve valf dizaynı sayesinde bypass durumları minimize edilir. Üç odalı tesisler, $5\text{--}8 \text{ g/nm}^3$ aralığındaki giriş konsantrasyonlarında bile 20 mg/nm^3 düzeyinde emisyon garantisi verebilir. Yatırım maliyetleri daha yüksek olmakla birlikte, düşük işletme giderleri sayesinde bu maliyetler uzun vadede dengelenebilir. Sonuç olarak, iki ve üç odalı RTO sistemleri arasında tercih yapılırken, işletmenin teknik ihtiyaçları, ekonomik analizler ve uzman görüşleri dikkate alınmalıdır. Bu süreçte kapsamlı bir fizibilite çalışması yapılması, tesisin uzun vadeli verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Brofind S.p.A., 2022). Özellikle üç yataklı sistemler, yüksek ısı geri kazanım verimliliği ile öne çıkmaktadır. Bu sistemlerin performansı, valf geçiş süreleri, seramik dolgu malzemesinin yoğunluğu ve yatak yüksekliği gibi parametrelerle optimize edilebilmektedir. Kısa valf geçiş süreleri ve yüksek yoğunluklu dolgu malzemeleri, hem ısı transferini artırmakta hem de sistemdeki tıkanıklıkları önlemektedir (Pu ve ark., 2021). Teorik olarak rejeneratif termal oksidasyon (RTO) sistemleri genellikle üç seramik dolgulu oda ile tasarlanmaktadır. Ancak proses koşullarına bağlı olarak, özellikle yüksek debi ve uçucu organik bileşik (VOC) konsantrasyonlarının söz konusu olduğu durumlarda, bu oda sayısı beş veya daha fazla olacak şekilde artırılabilir (Hydrotur Endüstriyel Su Arıtma, n.d.).

Rejeneratif termal oksitleyici (RTO) sistemlerde hava akışının yönlendirilmesi sürecinde valfler kritik bir işlev üstlenir. Bu bileşenler, egzoz gazlarının RTO ünitesinin farklı bölümlerinden geçişini düzenleyerek sistemin verimli çalışmasını sağlar. Sistem çalışırken, valfler gelen ve giden gaz akışları için alternatif yönler oluşturmak amacıyla belirli aralıklarla konum değiştirir. Bu kontrollü geçiş süreci, sıcak gazların atmosfere temizlenmiş hava olarak salınmadan önce seramik ortam yataklarında termal enerjilerini bırakmalarına olanak tanır. Böylece, hava akışının

uygun biçimde yönlendirilmesiyle enerji geri kazanımı maksimize edilmiş olur (Purimate (Changzhou) Environmental Technology Co. Ltd., n.d.).

RTO sistemleri; kimya, ilaç, boya, otomotiv ve gıda gibi pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle solvent bazlı üretim süreçlerinde oluşan VOC emisyonlarının kontrolü için tercih edilmektedirler (Tomatis ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2021). Sistem içinde yer alan seramik yatakların geometrik özellikleri de ısı transfer verimliliğini doğrudan etkileyerek sistem performansını belirlemektedir (Zhang ve ark., 2021). Rejeneratif sistemlerin; yüksek imha verimliliği ve düşük işletme maliyetleri gibi avantajları varken, ilk yatırım maliyetleri ve bakım karmaşıklığı gibi dezavantajları vardır (Purimate (Changzhou) Environmental Technology Co. Ltd., n.d.). Sonuç olarak, Rejeneratif Termal Oksitleyiciler, hem çevresel düzenlemelere uyum sağlamak hem de enerji verimliliğini artırmak açısından kritik öneme sahip teknolojilerdir. Yüksek VOC giderim verimliliği, enerji tasarrufu ve sistem optimizasyonuna açık yapısı ile bu sistemler, sanayide sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin elektrik ve doğalgazlı modelleri mevcuttur. Yanma odasındaki brülör, doğalgazlı veya elektrikli yanma olarak tasarlanır.

Boya fırınlarından alınan 150 °C ‘deki kirli gaz RTO sisteminin seramik tuğlalarında ön ısıtılması ile 250 °C ‘ye yükselir ve yanma odasında yüksek sıcaklıklarda (800–850 °C) yakılır. Sonrasında seramik tuğlalarda ısı düşümü gerçekleşir. Soğuyan atık gaz, 460–500 °C sıcaklık değerlerinde atmosfere salınır. Prosesin ve sistemin ısı değişimleri Şekil 2.9. ‘da görselleştirilmiştir.



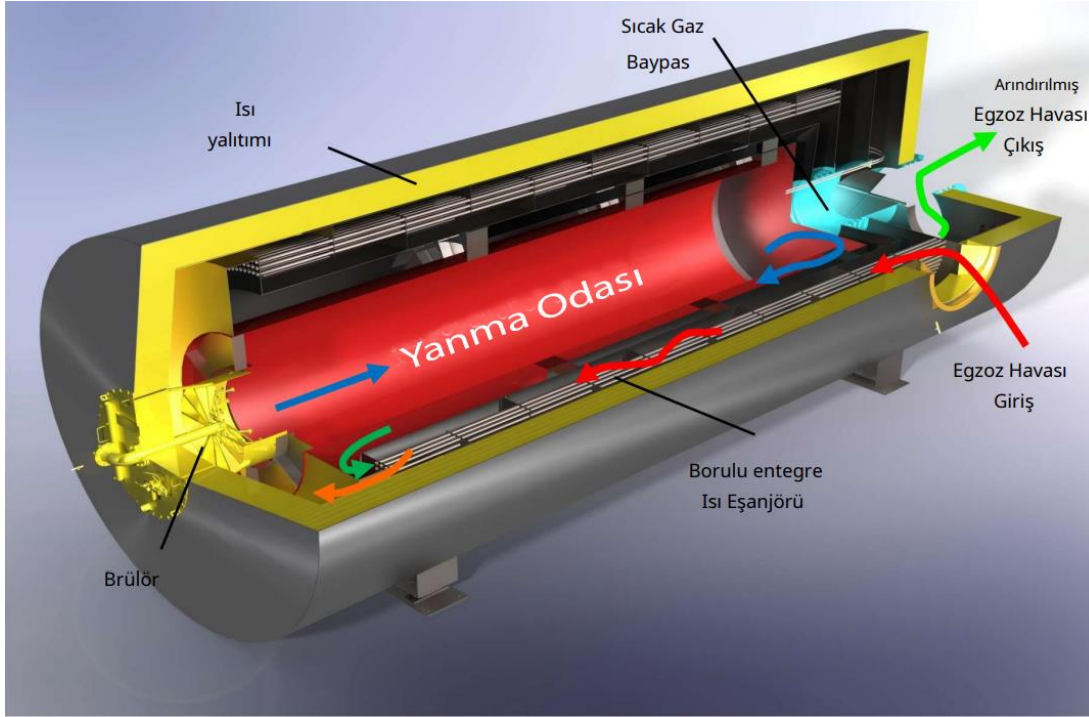
Şekil 2.9. Proses ve RTO Sistem ısı değişimleri.

2.4.3. Thermische abluft reinigung (TAR)

İngilizcesi “Thermal Exhaust Air Purification”, almancası “Thermische-Abluft-Reinigung” olan ve almanca isminin kısaltması olarak ifade edilen TAR (termal egzoz havası arıtma sistemi), uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) ve diğer zararlı gazların kontrollü bir şekilde yüksek sıcaklıklarda oksitlenerek zararsız bileşenlere

dönüştürülmesini sağlayan ileri düzey bir emisyon kontrol teknolojisidir. Bu sistem, 1.000 ila 40.000 Nm³/h arasında hava debileri için uygundur. Özellikle otomotiv, kimya, boya ve tekstil gibi sanayilerde yoğun olarak kullanılan bu sistemler, proses kaynaklı VOC emisyonlarının çevreye yayılmasını önlemekte etkin bir çözüm sunmaktadır. VOC yok etme verimi (Destruction Removal Efficiency-DRE) %99,5'e kadar çıkabilir (Dürr Systems AG, 2024; CAW Wiesloch GmbH, 2023).

TAR sistemleri içerisinde en yaygın kullanılan yapı, reküperatif termal oksitleyici sistemlerdir. Bu sistemlerde kirletici içeren egzoz havası, ilk olarak entegre bir ısı eşanjörü vasıtasıyla ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Ardından, modülasyonlu bir gaz brülörü yardımıyla 700 °C ila 750 °C sıcaklık aralığına çıkarılarak VOC'lerin oksidasyonu sağlanır. Bu sıcaklık seviyelerinde, organik bileşikler karbondioksit (CO₂) ve su buharına (H₂O) dönüşerek zararsız hale gelir. Oksidasyon sonrası elde edilen temiz sıcak gaz, tekrar ısı eşanjöründen geçirilerek gelen kirli havayı ısıtır ve böylece sisteme enerji geri kazandırılır. Bu yöntem sayesinde sistemin enerji verimliliği %65'e kadar artırılabilirken, yakıt tüketimi %15–20 oranında azaltılabilmektedir (Bäcker, 2014; Dürr Systems AG, 2024). Bazı durumlarda, egzoz havasındaki VOC yükünün yeterince yüksek olması halinde sistem harici yakıtı ihtiyaç duymadan, yani kendi enerjisiyle çalışabilecek şekilde "self-sustaining" moda faaliyet gösterebilmektedir. Bu özellik, özellikle solvent bazlı üretim yapan tesislerde önemli bir avantaj sağlamaktadır (CAW Wiesloch GmbH, 2023). Opsiyonel kondenser, ekonomizer ve heat recovery üniteleri ile daha yüksek verimler mümkün olabilir. TAR ekipmanın iç kesiti verilmiş haldeki görüntüsü ve tanımları Şekil 2.10'da görselleştirilmiştir.

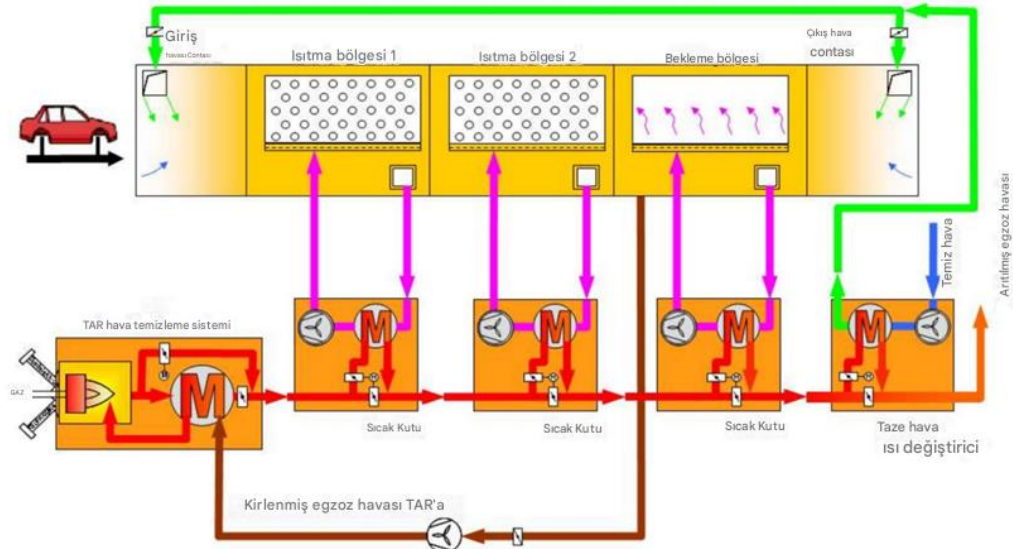


Şekil 2.10. TAR Sistemi iç kesit görünümü ve açıklaması (Dürr,2021).

Bir TAR sisteminin etkinliği, belirli proses parametrelerinin hassas şekilde kontrol edilmesine bağlıdır. Yakma sıcaklığı çoğunlukla 700 °C ile 750 °C arasında sabitlenirken, gazların yanma odasında kalma süresi en az 0,75 saniye olarak tasarlanır. Bu süre, VOC'lerin tam oksidasyonu için kritik öneme sahiptir. Akış ve hacim kontrolü ile izlenir. Yanma odasındaki sıcaklık takibi ise termokupl ve PLC kontrolü ile yapılır. Giriş havasındaki VOC konsantrasyonu genellikle 500 ila 3000 mg/Nm³ arasında değişmektedir ve bu değerler, online VOC analizörleri ile sürekli olarak izlenmektedir. Ayrıca, sistemin çıkışındaki oksijen seviyesi %3 ila %6 arasında tutulur ve oksijen sensörleriyle anlık kontrol edilir (European IPPC Bureau, 2023).

Enerji geri kazanımı ise, TAR sisteminin temel avantajlarından bir diğeri ve ekonomik verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Isı eşanjörü aracılığıyla sağlanan geri kazanım, sistemin toplam enerji kullanımını önemli ölçüde düşürmekte, doğalgaz gibi fosil yakıtların tüketimini azaltmaktadır. Aynı zamanda, proses esnasında ortaya çıkan ısı, geri kazanılarak üretim hatlarında yeniden kullanılabilir; bu da sistemin enerji tüketimini minimize ederek karbon ayak izini azaltmasına olanak tanımaktadır (Dürr, 2021a). Aynı zamanda çıkış havasının sıcaklığı, sistem içinde entegre kontrol mekanizmaları ile ayarlanabilmekte ve bu da proses güvenliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Proses güvenliğinin

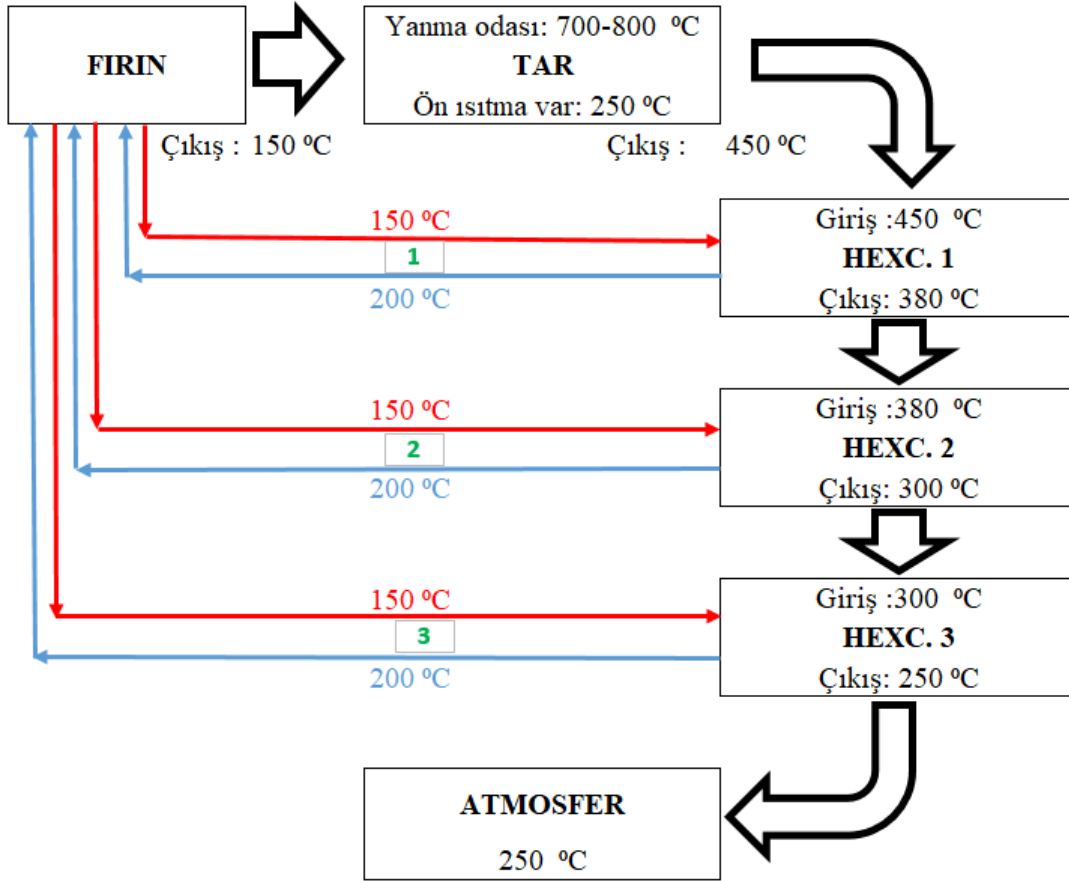
sağlanması adına sıcaklık, VOC konsantrasyonu ve oksijen seviyesi gibi tüm kritik değişkenler, genellikle PLC tabanlı otomasyon sistemleri üzerinden gelişmiş kontrol yazılımlarıyla denetlenmektedir (Dürr Systems AG, 2024). TAR sisteminde kazanılan atık ısı boya fırınlarına tekrar gönderilerek kullanılması ve bunun sonucunda enerji kazanımı Şekil 2.11. 'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.11. TAR Sistemi ısı geri kazanımının fırında tekrar kullanımı (Dürr,2021).

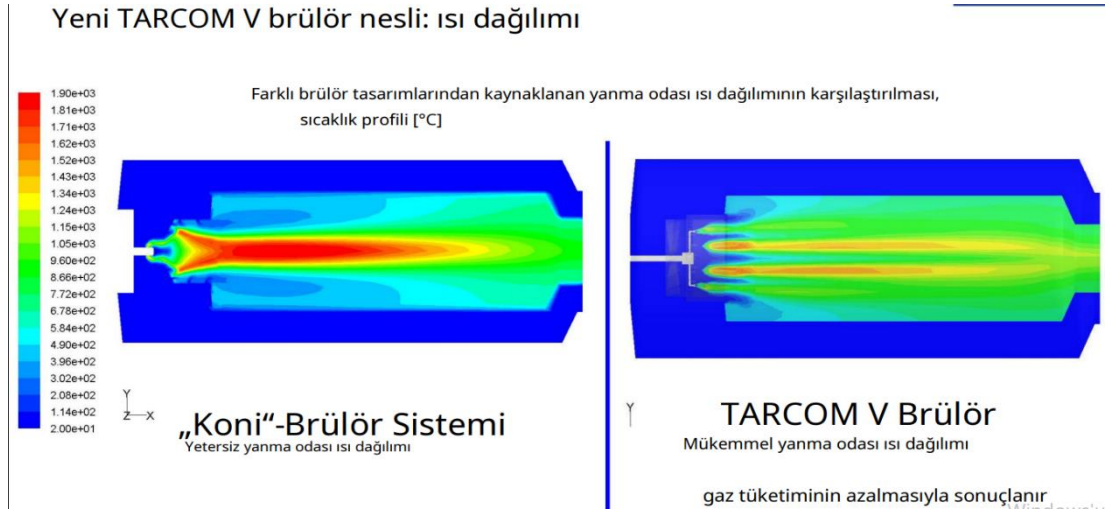
TAR sistemleri başta otomotiv boyahaneleri olmak üzere birçok endüstriyel alanda uygulanmaktadır. Boyahanelerde kullanılan solvent bazlı boyalardan kaynaklanan yüksek debili VOC yüklü hava, bu sistemlerde etkin bir şekilde arıtılmakta ve aynı zamanda fırınların ön ısıtma süreçlerinde tekrar kullanılmak üzere enerji geri kazanımı sağlanmaktadır. TAR sistemi, tünel fırınları ve boya kabinlerinden çıkan VOC yüklü havayı arıtarak, aynı zamanda proses için gerekli ısıyı geri kazandırır. Özellikle tünel tipi kurutma fırınlarında, proses havasının değişkenliği ve yüksek VOC yükü göz önüne alındığında, reküperatif sistemlerin hızlı tepki süreleri ve modüler yapıları sayesinde tercih edildiği görülmektedir (CAW Wiesloch GmbH, 2023; Dürr Systems AG, 2024). Tekstil endüstrisinde ise laminasyon ve kurutma hatlarında sabit solvent yükü altında çalışan TAR sistemleri, genellikle otomatik kontrol altında sürekli modda çalışmakta ve üretim hattına entegre şekilde faaliyet göstermektedir. Kimya ve ilaç sektörlerinde ise reçine üretimi ve solvent geri kazanımı gibi uygulamalar için ATEX sertifikalı sistem versiyonları tercih edilmektedir. Bu sektörlerde proses güvenliği açısından patlayıcı ortam riski önemli bir kriterdir ve sistem tasarımı buna göre şekillendirilmektedir (European IPPC Bureau, 2023).

Boya fırınlarından alınan 150 °C ‘deki kirli gaz TAR sisteminin ısı eşanjörlerinde ön ısıtılması ile 250 °C ‘ye yükselir ve yanma odasında yüksek sıcaklıklarda (700–800 °C) yakılır. Sonrasında yüksek sıcaklıktaki atık gaz, fırından alınan gazı ısıtır ve kendini soğutmuş olur. Bu işlem 3 ısı kutusunda tekrarlanarak atık gazın ısı düşümü gerçekleşir. Soğuyan atık gaz, 250 °C sıcaklık değerlerinde atmosfere salınır. Prosesin ve sistemin ısı değişimleri Şekil 2.12. ‘de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Proses ve TAR Sistem ısı değişimleri.

Bu tasarım sayesinde hem yakıt tüketimi düşürülmekte hem de prosesin toplam enerji ihtiyacı azaltılmaktadır (Dürr, 2021b). Ek olarak, sistemde kullanılan TARCOM adı verilen özel brülör teknolojisi, düşük sıcaklıkta çalışabilme yeteneği sayesinde donanımın ömrünü uzatmakta ve bakım sıklığını düşürmektedir. Bu sayede yanma odası ısı dağılımı mükemmelleşir ve sonuç olarak gaz tüketimi azalır (Dürr, 2021c). Bu brülörün yanma odasındaki ısı dağılım görüntüsü Şekil 2.13. ‘te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.13. TARCOM Brülör ısı dağılımı ve sonuçları (Dürr, 2021).

Modern TAR sistemlerinde otomasyon ve güvenlik ön planda tutulmaktadır. Özellikle Dürr tarafından geliştirilen kontrol sistemi, tüm kritik proses parametrelerinin merkezi olarak izlenmesine ve yönetilmesine olanak tanımaktadır. Bu sistem, ayrıca arıza tanımlama ve alarm yönetimi gibi özelliklerle donatılmıştır. Güvenlik açısından, otomatik devreye giren bypass damperleri sistemin aşırı sıcaklık gibi olumsuz durumlarda korunmasını sağlar. Enerji optimizasyonu kapsamında, geri kazanılan ısı proses içerisinde tekrar kullanılmakta ve bu sayede işletme maliyetleri azaltılmaktadır. Sistemin sunduğu düşük işletme maliyeti, uzun hizmet ömrü ve yüksek enerji verimliliği, endüstriyel hava arıtım çözümleri arasında önemli bir yer edinmesini sağlamaktadır (Dürr Systems AG, 2024).

Ayrıca bu sistemlerin elektrik ve doğalgazlı modelleri mevcuttur. Yanma odasındaki brülör, doğalgazlı veya elektrikli yanma olarak tasarlanır.

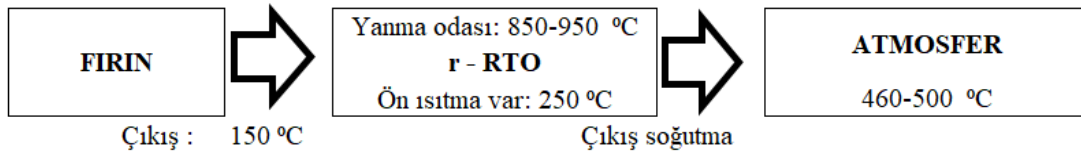
2.4.4. Döner silindirik RTO (r-RTO)

Döner silindirik rejeneratif termal oksitleyiciler (r-RTO), uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve diğer zararlı gazları yüksek sıcaklıklarda parçalayarak çevreye zararsız bileşenlere dönüştüren gelişmiş bir hava kirliliği kontrol teknolojisidir. Geleneksel üç bölge RTO sistemlerinden farklı olarak, r-RTO'lar daha az yer kaplayan kompakt yapıları, optimize edilmiş ısı geri kazanım sistemleri ve düşük basınç kayıpları ile ön plana çıkmaktadır (Sun ve ark., 2022; Ren ve ark., 2024).

Sistemin merkezinde, seramik malzeme ile donatılmış döner bir rejeneratif modül yer almakta olup, bu yapı sayesinde hem giriş havası önceden ısıtılmakta hem de çıkış

gazlarından maksimum düzeyde enerji geri kazanımı sağlanmaktadır. Döner rejeneratör, sürekli hareket ederek seramik yataklarda biriken ısıyı etkili biçimde giriş havasına aktarmakta, böylece sistemde kararlı bir termal denge kurulmasını olanaklı kılmaktadır (Ren ve ark., 2024). Bu ısı aktarımı, daha dengeli bir sıcaklık dağılımı elde edilmesini sağlarken, genel enerji verimliliğini de artırmaktadır (Zhang ve ark., 2021).

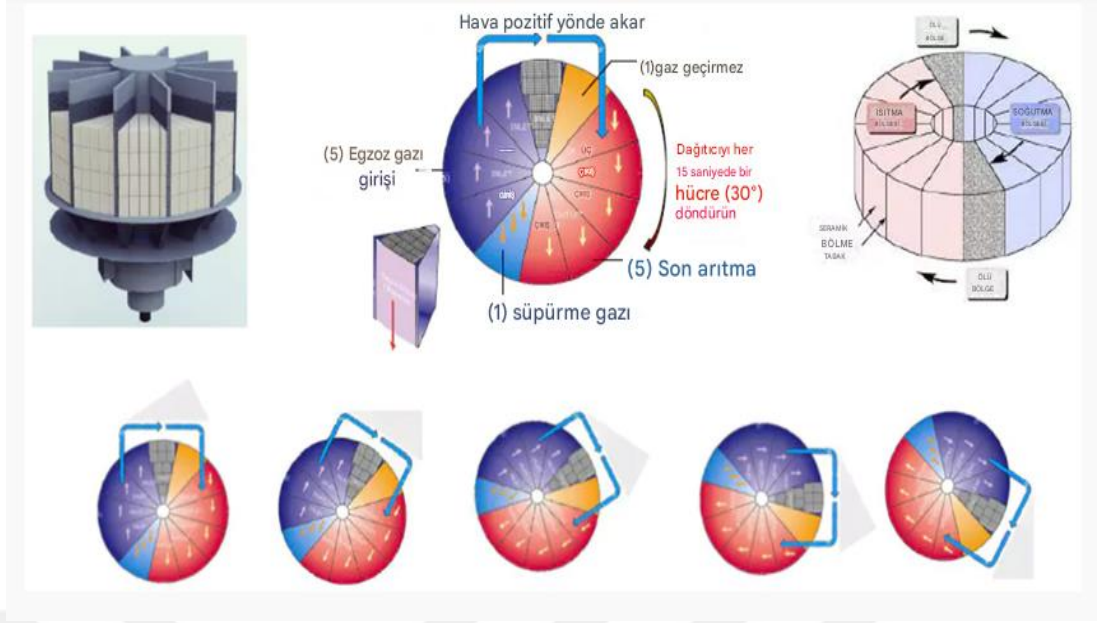
r-RTO sistemleri üç ana bölümden oluşur: giriş bölgesi, yanma odası ve çıkış bölgesi. Atık gaz, döner seramik yapı vasıtasıyla önceden ısıtılarak yanma bölgesine taşınır; burada 760–1000 °C arasında değişen sıcaklıklarda VOC'ler tamamen okside edilerek CO₂ ve H₂O'ya dönüştürülür. Oksidasyon sonrası oluşan sıcak gazlar, çıkış bölgesindeki seramik yataklarda ısınıp bırakarak sistemden tahliye edilir ve bu ısı bir sonraki çevrimde tekrar kullanılmak üzere geri kazanılır (Tuncer ve ark., 2023). Soğuyan atık gaz, 460–500 °C sıcaklık değerlerinde atmosfere salınır. Prosesin ve sistemin ısı değişimleri Şekil 2.14. 'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.14. Proses ve r-RTO Sistem ısı değişimleri.

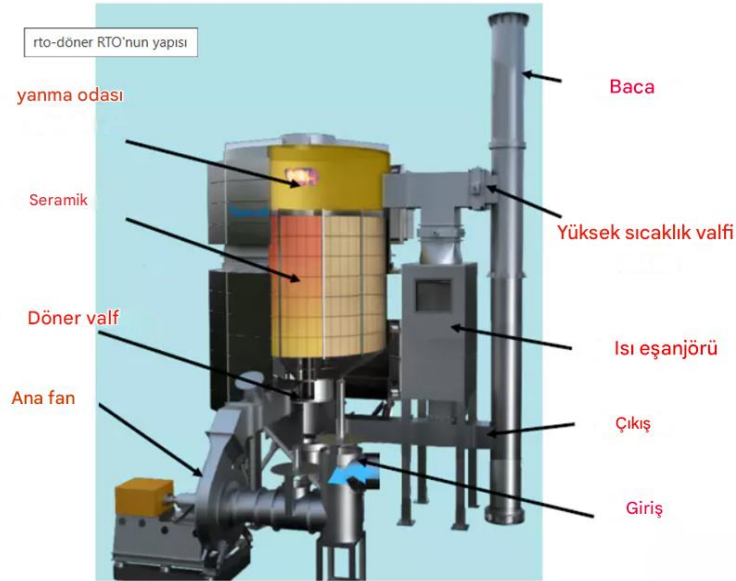
Sistem performansını artırmak amacıyla yürütülen çalışmalarda, izolasyon kalitesi, döner yapı hızı ve sıcaklık profili gibi faktörlerin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sun ve ark. (2022), geliştirdikleri termal-akışkan modelleme ile yüksek verimlilik sağlamak için sistem parametrelerinin dikkatle belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuş, özellikle yalıtım malzemesinin enerji kayıplarını minimize etmedeki kritik rolüne dikkat çekmiştir.

Modern döner RTO sistemlerinde, rejeneratif yapılar genellikle 12 adet dairesel bölmeden oluşmaktadır. Bu odalar; 5 giriş, 5 çıkış, 1 temizleme ve 1 izolasyon olmak üzere işlevsel olarak ayrılmıştır. Bu yapı sayesinde, gaz akışı kontrollü biçimde yönlendirilmekte ve arıtma süreci kesintisiz olarak sürdürülmektedir (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). Döner valf motor yardımıyla sabit hızda döndürülerek gazların bu 12 odacık arasında sürekli geçişi sağlanmakta, böylece sistemde ani sıcaklık dalgalanmalarının ve enerji kayıplarının önüne geçilmektedir (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). Döner RTO (r-RTO) Rejeneratif Termal Oksitleyiciler Tasarımı Şekil 2.15. 'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.15. Döner r-RTO tasarım diyagramı (Ever-Power Pte Ltd., n.d.).

Yapısal olarak döner RTO'lar, vakum yalıtım teknolojisi kullanılarak dış ısı kayıplarını azaltmakta ve bu sayede %3 oranında ek enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek kaliteli floro silikon esaslı sızdırmazlık elemanları, sistemin uzun ömürlü çalışmasına katkıda bulunmaktadır (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). Güvenlik açısından ise, yapay zeka destekli kontrol yazılımları, arıza tahmin sistemi ve üst düzey güvenlik donanımlarıyla donatılmıştır. Rotary RTO (r-RTO) yapısı Şekil 2.16. 'da görselleştirilmiştir.

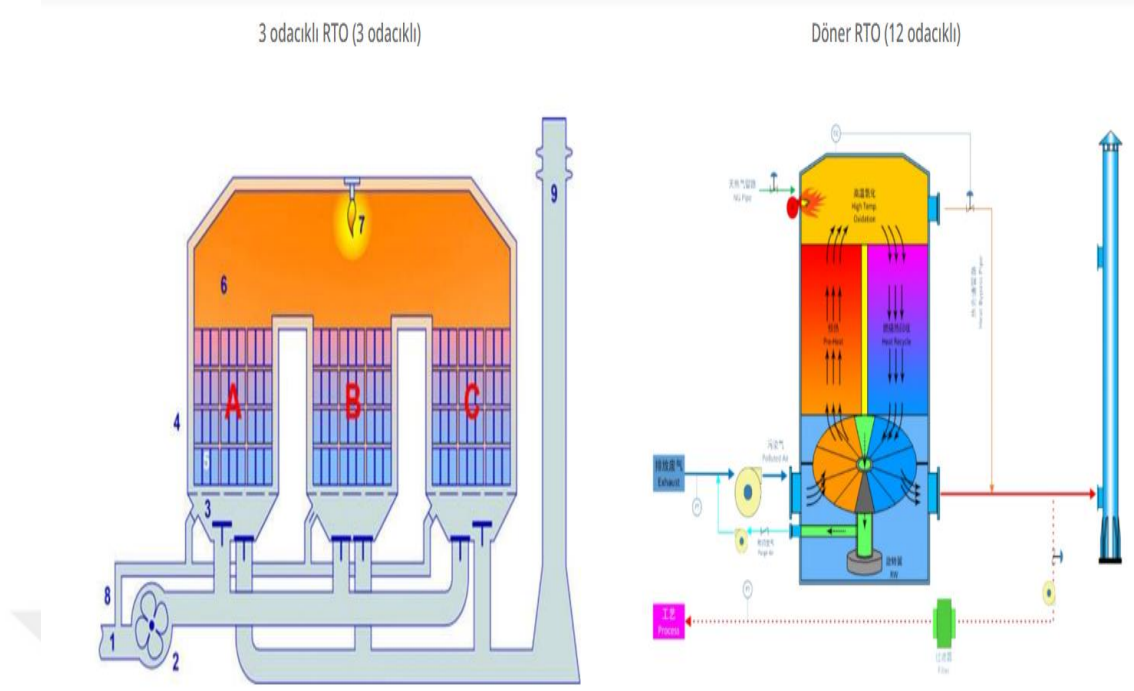


Şekil 2.16. Döner r-RTO yapısı (Ever-Power Pte Ltd., n.d.).

Enerji verimliliği bakımından, döner RTO sistemlerinin ısı geri kazanım oranı %97'ye, VOC arıtma verimi ise %99,7'ye kadar ulaşabilmektedir (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). Bu üstün performans, özellikle düşük konsantrasyonlu ancak yüksek debili atık gazların arıtılması gereken proseslerde önemli avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, sistemlerin tıkanmaya ve korozyona karşı dayanıklı tasarımı, bakım sıklığını azaltmakta ve işletme süresini uzatmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda, kimya, petrokimya, otomotiv, boya, tekstil ve elektronik gibi sektörlerde çevresel düzenlemelere uyum sağlamak ve sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmak amacıyla yaygın şekilde kullanılmaktadır (Yiğit ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2021). Modüler ve kompakt yapısı sayesinde, farklı kapasite ihtiyaçlarına göre kolayca ölçeklendirilebilen bu sistemler, mobil uygulama destekli bulut izleme çözümleri ile uzaktan yönetim imkânı da sunmaktadır (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). Bu sistemler, bakım kolaylığı ve otomasyon olanaklarıyla da işletme esnekliği sunmaktadır. Ayrıca, bu sistemlerden çıkan yüksek sıcaklıklı gazlar kojenerasyon sistemleriyle entegre edilerek ek enerji kazanımı da sağlanabilmektedir (Tuncer ve ark., 2023).

Üç odacıklı klasik RTO sistemleri ile karşılaştırıldığında, döner RTO'lar daha düşük çıkış sıcaklığı (80 °C altı), daha az enerji tüketimi ve daha uzun ömürlü ekipman kullanımı ile ekonomik ve operasyonel avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, klasik sistemlerde yılda yüz binlerce kez çalışan anahtarlama vanalarının aksine, döner valf teknolojisi bu türden mekanik yıpranmayı ortadan kaldırarak sistem ömrünü uzatmaktadır. "Toptank" RTO sistemlerinde, fırın gövdesinin dış yüzeyinde kullanılan vakum yalıtım kabuğu, konvektif ısı kayıplarını azaltacak şekilde tasarlanarak enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Ever-Power Pte Ltd., n.d.). 3 odacıklı RTO ile 12 odacıklı döner RTO görüntüleri karşılaştırması Şekil 2.17. 'de verilmiştir.



Şekil 2.17. 3 odacıklı RTO ile 12 odacıklı r-RTO (Ever-Power Pte Ltd., n.d.).

Sonuç olarak, döner silindirik rejeneratif termal oksitleyiciler; yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi, gelişmiş otomasyon kabiliyeti ve çevre dostu özellikleriyle modern endüstriyel hava arıtma teknolojileri arasında ön plana çıkmaktadır. Ancak yeni bir teknoloji olması, aynı zamanda aksel ve bükülme deformasyonu olabilecek döner bir mil üzerinde çalışması gibi özelliklerden dolayı şu anda tercih edilmemektedir. Ayrıca bu sistemlerin elektrik ve doğalgazlı modelleri mevcuttur. Yanma odasındaki brülör, doğalgazlı veya elektrikli yanma olarak tasarlanır.

2.4.5. Heat recovery sistemli RTO

Heat Recovery veya Waste Heat Recovery Sistem

Enerji verimliliğini artırma çabaları kapsamında geliştirilen atık ısı geri kazanımı (Waste Heat Recovery - WHR) ve ısı geri kazanımı (Heat Recovery - HR) sistemleri, hem endüstriyel hem de yapısal ortamlarda enerji kullanımını optimize etmeye yönelik önemli teknolojilerdir. WHR sistemleri, özellikle endüstriyel süreçler sonucu ortaya çıkan kullanılmamış ısının geri kazanılması ile karakterize edilir. Bu sistemler, proseslerden çıkan atık gazlar veya sıvılar aracılığıyla taşınan yüksek sıcaklıktaki enerjinin, başka bir proseste tekrar kullanılmasını sağlar. Böylece enerji tüketimi azaltılırken, karbon salımı da önemli ölçüde düşürülür (Jouhara ve ark., 2018; Kulkarni ve ark., 2017).

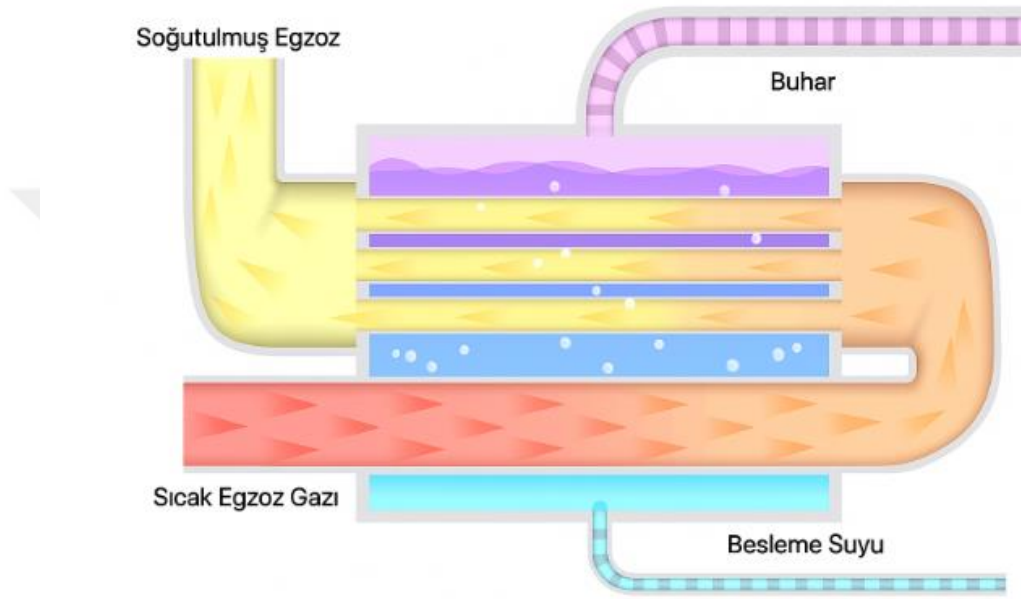
WHR sistemlerinde genellikle ısı eşanjörleri, borulama sistemleri, pompa ve kontrol üniteleri gibi elemanlar bulunur. Örneğin, cam, çelik veya seramik üretimi gibi yüksek sıcaklık içeren endüstriyel faaliyetlerde, fırınlardan çıkan sıcak gazlar ısı eşanjörleri aracılığıyla enerjiye dönüştürülerek sistemin başka bir noktasında tekrar kullanılabilir (StudySmarter, n.d.). Bu uygulama, enerji yoğun sektörlerde hem maliyetleri düşürmekte hem de sürdürülebilirliği teşvik etmektedir (Jouhara ve ark., 2018).

Isı geri kazanımı (HR) ise daha çok binalarda uygulanmakta olup, iç mekândan atılan havanın taşıdığı ısıнын geri kazanılarak dışarıdan alınan taze havanın ön ısıtılmasını sağlar. Bu sistemler genellikle sabit plakalı ısı eşanjörleri, döner tekerlekler, ısı boruları veya bobin sistemleri gibi donanımlarla uygulanır (Cuce, Cuce ve Riffat, 2019). HR sistemleri sayesinde binaların ısıtma ve soğutma yükleri azaltılırken, aynı zamanda iç ortam hava kalitesi de korunmuş olur. Özellikle HVAC sistemlerine entegre edilen HR çözümleri, enerji tasarrufu sağlarken yaşam alanlarının konforunu artırmaktadır (Cuce ve ark., 2019).

WHR sistemleri, başta çelik, cam, kimya ve gıda gibi enerji yoğun endüstrilerde tercih edilirken; HR sistemleri daha çok konutlar, ticari yapılar ve ofis binaları gibi yapı sektöründe uygulanmaktadır. Her iki teknoloji türü de fosil yakıt tüketimini azaltarak sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkıda bulunmakta ve böylece sürdürülebilir enerji yönetimine önemli destek sağlamaktadır (Kulkarni ve ark., 2017; Cuce ve ark., 2019).

Geri kazanılan ısı enerjisinin endüstriyel tesislerde farklı alanlarda değerlendirilmesi, hem enerji verimliliğini artırmakta hem de işletme maliyetlerini düşürmektedir. Bu kapsamda, geri kazanılan enerjinin kullanımı çeşitli sistemlere entegre edilerek gerçekleştirilebilmektedir. Bu uygulamalar arasında yanma havasının ısıtılması, proses makyaj hava sistemleri ve bina makyaj hava ısıtma sistemleri öne çıkmaktadır. Ayrıca, sıcak su sistemleri aracılığıyla tesisin kazan devresine enerji sağlanması, düşük sıcaklıklı buhar uygulamaları ile proses desteklenmesi ve kurutma hava perdesi sistemlerinde kullanımı da yaygın kullanım alanları arasında yer almaktadır. Bu tür enerji geri kazanım uygulamalarında maksimum verimin sağlanabilmesi için prosesin yapısına uygun yükseltmelerin yapılması ve doğru ekipmanların seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Dürr tarafından gerçekleştirilen enerji etütleri, tesisin maksimum proses kapasitesiyle uyumlu çözümler geliştirilmesine yardımcı olmakta, aynı zamanda sistem entegrasyonunun doğru planlanmasını sağlamaktadır. Etkili bir enerji

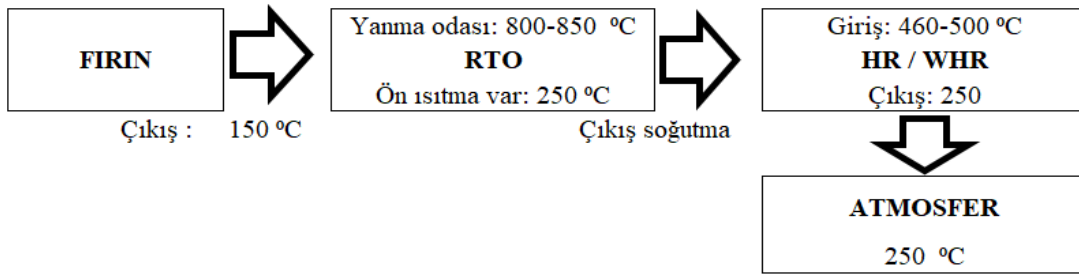
geri kazanımı için öncelikle enerjinin en uygun kaynaklarının ve kullanım alanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun ardından, enerjinin taşınması ve iletimi için hem maliyet açısından uygun hem de verimli sistemlerin seçilmesi, enerji geri kazanımının başarısını doğrudan etkilemektedir (Dürr, n.d.). Bacadan çıkan yüksek sıcaklıktaki gaz atmosfere atılmadan önce kurulan Waste Heat Recovery sisteminde suyu ısıtarak buhar elde edilmiş ve elde edilen buhar başka bir proseste kullanılmıştır. Bu durum Şekil 2.18. 'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.18. Waste Heat Recovery sistemi (TLV., 2021).

Enerji verimliliği açısından RTO sistemleri büyük avantajlar sunmaktadır. Atık ısının geri kazanılmasıyla hem işletme maliyetleri düşürülmekte hem de karbon ayak izi azaltılmaktadır. Tuncer ve arkadaşları (2023), RTO sistemlerinin kojenerasyon üniteleri veya Heat Recovery sistemi ile entegre edilmesi durumunda, enerji geri kazanımının daha da artırılabilirliğini göstermiştir. Bu tür uygulamalar, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Boya fırınlarından alınan 150 °C 'deki kirli gaz RTO sisteminin seramik tuğlalarında ön ısıtılması ile 250 °C 'ye yükselir ve yanma odasında yüksek sıcaklıklarda (800–850 °C) yakılır. Sonrasında seramik tuğlalarda ısı düşümü gerçekleşir. Soğuyan atık gaz, 460–500 °C sıcaklık değerlerine gelir. Sistemin sonuna Atık ısı geri kazanım ünitesi eklenerek sıcaklık biraz daha düşürülerek atmosfere salınır. Kazanılan atık ısı tekrar kullanılarak tasarruf elde edilir. Prosesin ve sistemin ısı değişimleri Şekil 2.19. 'da görselleştirilmiştir.

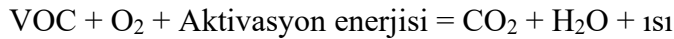


Şekil 2.19. Proses, RTO ve HR/WHR Sistem ısı değişimleri.

Uygulamanın yapılacağı firmada daha önce Doğalgazlı RTO sistemi kurulmuştur. Sonraki yıllarda ise sistemin sonrasına Heat Recovery veya diğer adıyla Waste Heat Recovery sistemi eklenmiştir. Bacadan atmosfere atılan yüksek sıcaklıktaki temiz gaz su ısıtmada kullanılmıştır. Isıtılan su boyahanedeki araçların belli bir proseste sıcak su ile yıkanması aşamasında kullanılmıştır. Bu proseste suyu ısıtmak için başka bir enerji kaynağı kullanılacağına baca atık gaz sıcaklığından faydalanılmıştır. Böylece yeni bir enerji kaynağı kullanılmamış ve hem enerji tasarrufu sağlanarak maliyetler düşürülmüş hem de bu proseste VOC veya HAP oluşumu engellenmiştir.

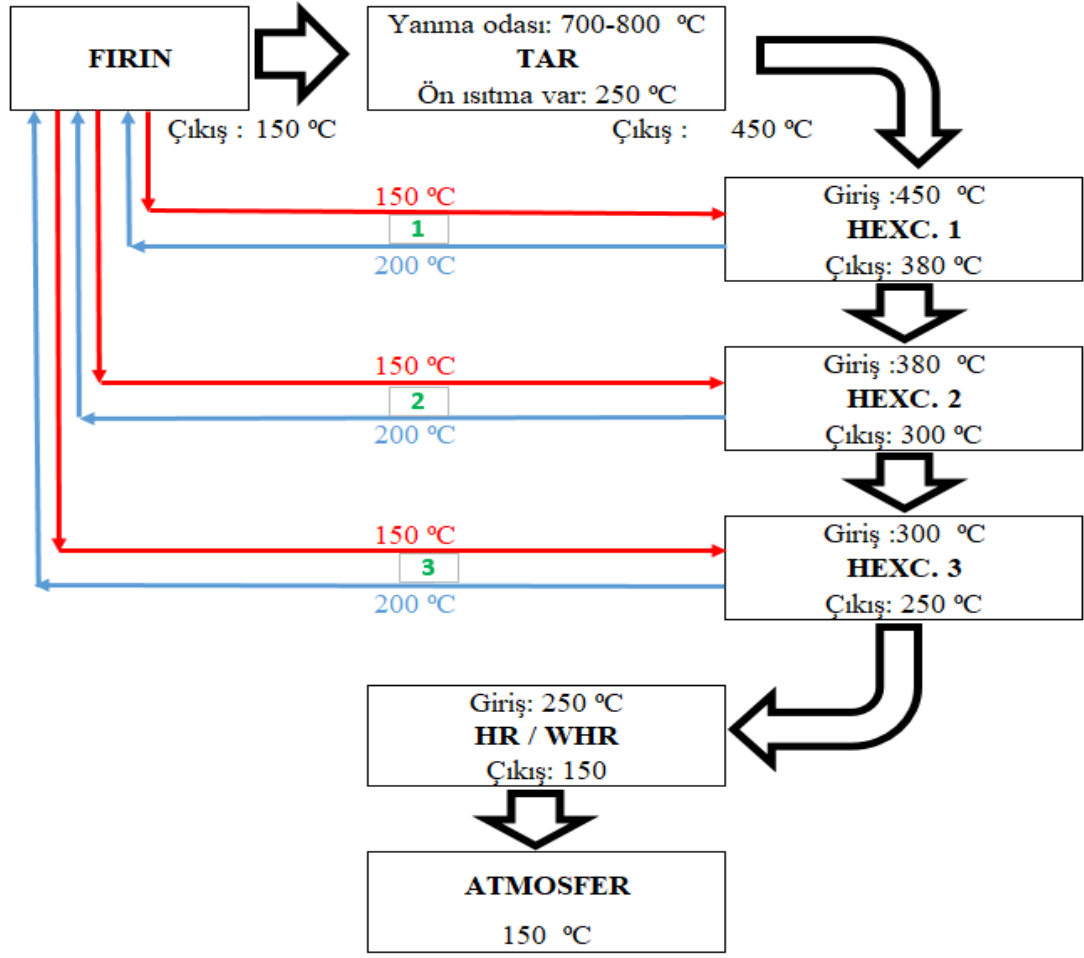
2.4.6. Heat recovery sistemli TAR

Yeni bir sistem olan reküperatif sistemlerden esinlenerek üretilen TAR sisteminin çıkışına da atık ısı kazanımı veya diğer ifadeyle ısı kazanımı sistemleri eklenebilmektedir.



Bu reaksiyonla elde edilen yüksek sıcaklık, sisteme entegre edilen ısı eşanjörleri veya atık ısı geri kazanım sistemleri aracılığıyla geri kazanılarak, tesisin ihtiyaç duyulan çeşitli alanlarında enerji kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir (Hydrotur Endüstriyel Su Arıtma, n.d.).

Boya fırınlarından alınan 150 °C ‘deki kirli gaz TAR sisteminin ısı eşanjörlerinde ön ısıtılması ile 250 °C ‘ye yükselir ve yanma odasında yüksek sıcaklıklarda (700–800 °C) yakılır. Sonrasında yüksek sıcaklıktaki atık gaz, fırından alınan gazı ısıtır ve kendini soğutmuş olur. Bu işlem 3 ısı kutusunda tekrarlanarak atık gazın ısı düşümü gerçekleşir. Soğuyan atık gaz, 250 °C sıcaklık değerlerine gelir. Sistemin sonuna Atık ısı geri kazanım ünitesi eklenerek sıcaklık biraz daha düşürülerek atmosfere salınır. Kazanılan atık ısı tekrar kullanılarak tasarruf elde edilir. Prosesin ve sistemin ısı değişimleri Şekil 2.20. ‘de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.20. Proses, TAR ve HR/WHR Sistem ısı değişimleri.

2.5. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Teknikleri

Karar verme, günümüzde hemen her alanda karşılaşılan ve giderek daha karmaşık bir hâl alan bir süreçtir. Bireyler ve kurumlar, artan belirsizlik, hızlı değişen rekabet koşulları ve teknolojik gelişmelerin etkisiyle, karar verme sürecinde çok sayıda faktörü dikkate almak zorunda kalmaktadır. Karar vericiler için asıl güçlük, karar vermek değil, mevcut alternatifler arasından probleme en uygun seçeneği belirlemektir. Bu süreçte, karar vericiler problemi etkileyebilecek tüm kriterleri göz önünde bulundurmalı ve kararlarını hem nicel hem de nitel verilerle desteklemelidir (Ersöz ve Kabak, 2010; Özbek, 2014; Aktaş ve ark., 2015).

Sağlıklı ve doğru bir karar verme süreci; bilgi toplama, karar kriterlerinin belirlenmesi, alternatiflerin ortaya konulması ve veri analizinin yapılması gibi bir dizi aşamadan oluşur. Karar verme eylemi, kararın verildiği durum, çevre, karar türü ve problemin ortaya çıkış şekli gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle, karar vericiler

yalnızca kendi deneyim ve stratejik amaçlarını değil, aynı zamanda psikolojik durumlarını, sosyal çevrelerini ve gelecekte beklenenlerini de dikkate almak durumundadır (Durak, 2023; Lopez ve ark., 2023). Ayrıca, karar verme sürecinde kimi zaman objektif kriterler, kimi zaman ise karar vericilerin tecrübelerine dayalı yarı subjektif veya nitel yaklaşımlar kullanılabilir.

Karar verme sürecinin etkinliği, istenen sonuçların elde edilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Doğru ve sağlıklı karar verme, yalnızca bir seçim yapmakla sınırlı değildir; aynı zamanda sıralama ve sınıflandırma gibi farklı problemlerin çözümünü de kapsar. Karar verme sürecinde, kararın karmaşıklığı, zorluk düzeyi, hız gereksinimi ve sonuçlarının yaygın etkisi gibi unsurlar, sürecin daha sistematik ve bilimsel yöntemlerle ele alınmasını gerektirmektedir (Durak, 2023). Özellikle günümüzün dinamik ve belirsiz ortamında, kararların ekonomik, çevresel, sosyal ve kültürel boyutları da dikkate alınmalıdır.

Karar analizi, karmaşık ve belirsiz koşullarda karşılaşılan karar problemlerinin sistematik bir yaklaşımla çözümlenmesini sağlayan bir süreçtir. Bu süreçte, karar probleminin tanımlanması, amaçların ve değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi, alternatiflerin ortaya konulması, belirsizlik ve risklerin analiz edilmesi, alternatiflerin fayda ve maliyetlerinin değerlendirilmesi ve elde edilen sonuçların uygulamaya aktarılması gibi temel adımlar izlenir (Clemen ve Reilly, 2013; Goodwin ve Wright, 2014; Atan ve Altan, 2020; Raiffa ve Schlaifer, 2000). Karar analizi, karar vericilere en uygun çözüm yöntemini belirlemede kılavuzluk eden, problemi anlaşılabilir parçalara ayırarak mantıki yollarla bütünleştiren bir yaklaşımdır (Malczewski, 1999; Parnell ve ark., 2013).

Karar verme sürecinde, karar alternatifleri, bu alternatiflerin olası sonuçları, belirsizlikler, karar vericinin tercih ve değerleri, hedefler, karar yapısı, karar kuralları, paydaşlar, bilgi ve veriler ile analiz teknikleri temel bileşenler olarak öne çıkar. Bu bileşenler, kararın sistematik ve tutarlı bir şekilde alınmasını sağlar (Clemen ve Reilly, 2013; Goodwin ve Wright, 2014).

Günümüzde, karar verme süreçlerinde çoğu zaman tek bir kriter yerine birden fazla kriterin dikkate alınması gerekmektedir. Bu noktada, çok kriterli karar verme yöntemleri devreye girerek, karar vericilerin birden fazla kriter arasında dengeli bir tercih yapmasına olanak tanır (Durak, 2023).

Çok kriterli karar verme (ÇKKV), kökleri 1960'lı yıllara dayanan ve 1970'lerden itibaren hızla gelişen bir karar analizi disiplini. ÇKKV, bireyler, işletmeler ve kamu kurumları tarafından karar alma süreçlerinde birden fazla ve çoğu zaman birbiriyle çelişen ölçütlerin dikkate alınarak, hedefe en yakın seçeneğin belirlenmesini amaçlar (Köksalan ve ark., 2011; Yanar, 2019). Günlük yaşamda da bireyler, çoğu zaman çoklu kriterleri sezgisel olarak değerlendirir ve kararlarını bu doğrultuda verirler (Rew, 1988). Tercih edilen her alternatif, genellikle maliyet, sürdürülebilirlik, performans veya üretim artışı gibi çelişen kriterleri içerir.

ÇKKV'nin temel amacı, karar alıcıyı en optimal çözüme yönlendirmektir. Karar vericiler, ÇKKV çerçevesinde ortaya çıkan avantaj ve dezavantajları bir bütün olarak değerlendirerek, birden fazla seçenek arasından hedefle en çok örtüşeni seçmek durumundadır (Madurika ve Hemakumara, 2015). Bu yöntem, çoklu kriterleri içeren karar ve planlama problemlerini yapılandırmak ve çözmekle ilgilendiğinden, çelişkili kriterlere sahip sorunlarla karşılaşan karar vericilere önemli bir destek sunar.

ÇKKV problemlerinin tipik özellikleri arasında, çoklu amaçlara veya niteliklere sahip olmaları, kriterler arasında çatışma bulunması, farklı ölçü birimlerinin kullanılması ve problemlerin ya bir seçim ya da bir tasarım problemi olması yer alır (Çınar, 2004; Karaca, 2011). Örneğin, bir araba satın alma sürecinde konfor ve ucuzluk gibi kriterler arasında çatışma yaşanabilir. Ayrıca, ev satın almak isteyen bir kişi için maliyet para birimiyle, evin genişliği ise metrekareyle ölçülür; bu da farklı ölçü birimlerinin bir arada değerlendirilmesini gerektirir.

ÇKKV yöntemleri, karar vericinin amaç ve kısıtlarını dikkate alarak, alternatifler arasından en uygun olanı seçmeyi, sıralamayı veya sınıflandırmayı sağlar. Bu yöntemler, karar vericinin değer yargılarını ve önceliklerini sistematik bir biçimde karar sürecine dâhil eder. Literatürde en yaygın kullanılan ÇKKV yöntemleri arasında AHP, ELECTRE, PROMETHEE, MOORA, VIKOR ve TOPSIS gibi teknikler yer almaktadır (Yanar, 2019; Öztel, 2016). Ayrıca, ÇKKV yöntemleri iki ana kategoride incelenir: Çok Nitelikli Karar Verme (ÇNKKV) ve Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV). ÇNKKV genellikle seçim, ÇAKV ise tasarım problemlerinde kullanılır (Ceyhan ve Demirci, 2016).

Sonuç olarak, çok kriterli karar verme, günümüzün karmaşık ve çok boyutlu karar problemlerinde, karar vericilere sistematik, şeffaf ve rasyonel bir çözüm yaklaşımı

sunar. Özellikle alternatif ve kriter sayısının fazla olduğu, kriterlerin birbiriyle çeliştiği ve karar vericinin hem nicel hem de nitel verileri dikkate almak zorunda olduğu durumlarda ÇKKV yöntemleri vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.



3. YÖNTEM

Çalışmamızda iki adet yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde; aşağıdaki iki neden dolayısıyla Critic yöntemi seçilmiştir.

CRITIC yöntemi, çok kriterli karar verme süreçlerinde nesnel ve veri temelli bir yaklaşımla kriter ağırlıklandırması yapmak isteyen uygulayıcılar için güçlü bir araçtır. Özellikle uzman görüşlerine dayalı sübjektif yöntemlerin riskli veya uygun olmadığı durumlarda, CRITIC yöntemi alternatifler arasında öne çıkar. Kriterler arası bilgi örtüşmesini azaltarak karar verme sürecinin güvenilirliğini ve tutarlılığını artırır. Veri değişkenliği, korelasyon etkisi, hız ve uygulanabilirlik gibi avantajları vardır.

2023 yılında, ÇKKV alanında yapılan çalışmalarda EBSCO veri tabanı incelemesi adı altında yayınlanan bir makalede, kullanılan yöntemlerin dağılımı açıklanmıştır. Çalışmada 196 adet makale incelenmiş, bazılarında birden fazla yöntem kullanıldığından 310 adet yöntem kullanılmıştır. Bu rakamın 14 tanesi Critic yöntemi olmuştur. Critic %4,52 ile üst sıralarda kendine yer bulmuştur (Kocatürk Çetin, 2023).

Alternatif sıralamalarının yapılmasında ve en uygun alternatifin bulunmasında ise, MultiMoora yöntemi seçilmiştir. Bu metodun seçim nedeni ise, birden çok metodu bir arada içerdiği ve sonucu bulurken hepsini göz önünde bulundurduğu içindir. Bu özelliği ile diğer yöntemlerin önünde yer almıştır. Diğer bir ifadeyle, çok boyutlu değerlendirme yapısı, esnekliği, ölçek bağımsızlığı ve güvenilir sıralama mekanizması sayesinde ÇKKV problemlerinde alternatif sıralaması yapılırken diğer yöntemlere göre daha avantajlı ve tercih edilebilir bir yöntemdir.

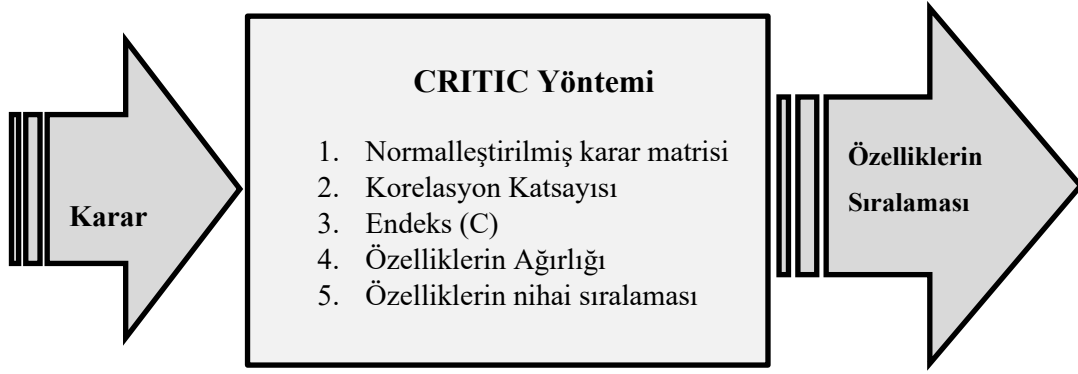
3.1. Critic Yöntemi

CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi, çok kriterli karar verme (ÇKKV) süreçlerinde kriterlerin göreceli önem düzeylerinin nesnel biçimde belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir (Diakoulaki ve ark., 1995). Bu yöntem, ilk olarak 1995 yılında Diakoulaki, Mavrotas ve Papayannakis tarafından literatüre kazandırılmıştır (Diakoulaki ve ark., 1995; Fidan, 2021).

Temelinde, karar matrisindeki kriterlerin varyansını ve aralarındaki karşılıklı ilişkiyi dikkate alan istatistiksel bir yaklaşım bulunmaktadır (Wang ve Luo, 2010). CRITIC yönteminin öne çıkan yönü, karar vericilerin öznel yargılarından bağımsız olarak, sadece veriye dayalı bir ağırlıklandırma yapmasıdır (Ömürbek ve ark., 2020; Demircioğlu ve Coşkun, 2018). Bu sayede analiz sürecinde nesnellik ve güvenilirlik artırılmaktadır (Ersoy, 2022; Akçakanat ve ark., 2022). CRITIC yöntemi, varyans ve korelasyon olmak üzere iki önemli faktöre odaklanır. Varyans, bir kriterin karar verme üzerindeki etkisini artırırken; yüksek varyansa sahip kriterler, daha fazla bilgi içerdiği için daha yüksek ağırlık alır. Korelasyon ise kriterler arasındaki ilişkiyi ölçer; diğer kriterlerle yüksek korelasyona sahip kriterlerin taşıdığı bilgi tekrar içerdiği için ağırlığı düşürülür. Bu iki faktör sayesinde CRITIC, bilgi yoğunluğu yüksek ve diğer kriterlerden bağımsız olan kriterlere daha fazla ağırlık verir. Ayrıca CRITIC yöntemi yalnızca performans matrisinden faydalandığı için karar vericinin yargılarına gerek duymaz; bu da yöntemin tekrar üretilebilir ve nesnel olmasını sağlar.

Yöntem, kriterlerin taşıdığı bilgi miktarını ölçmek için standart sapmalarını dikkate alırken, aynı zamanda kriterler arasındaki ilişkiselliği (korelasyonları) da hesaba katar (Wang ve Zhao, 2016; Kazan ve Özdemir, 2014). Böylece, hem değişkenliği yüksek olan hem de diğer kriterlerle düşük korelasyona sahip olan kriterler daha yüksek ağırlıklarla değerlendirilir (Çakır ve Perçin, 2013; Jahan ve ark., 2012).

Bu metodun temel varsayımı; bir kriterin hem bilgi içerme kapasitesinin (varyansın yüksekliği) hem de diğer kriterlerle örtüşmemesinin (düşük korelasyon) onun önem düzeyini artırdığıdır (Fidan, 2021; Alinezhad ve Khalili, 2019). CRITIC yöntemi özellikle öznel değerlendirmelere dayanmayan karar problemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Akbulut, 2019; Şenol ve Ulutaş, 2018). CRITIC yönteminin özeti Şekil 3.1. 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. CRITIC Yönteminin Özeti (Alinezhad ve Khalili, 2019).

CRITIC yöntemi, beş temel adımdan oluşan sistematik bir süreçtir:

Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

Yöntemin ilk adımı, karar problemine ait karar matrisinin oluşturulmasıdır. Bu matris, alternatiflerin belirlenen kriterler doğrultusunda değerlendirildiği tablodur. Karar matrisi şu şekilde tanımlanır (Diakoulaki ve ark., 1995: 763):

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

Burada $i=1,2, \dots, m$ alternatifleri ve $j=1,2, \dots, n$ kriterleri ifade etmektedir.

Adım 2: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi

Farklı ölçü birimlerine sahip kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesi amacıyla karar matrisi normalize edilir. Normalizasyon işlemi, fayda kriterleri için aşağıdaki eşitlikle (maksimum değer esas alınarak):

$$r_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)}$$

maliyet kriterleri için ise:

$$r_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)}$$

şeklinde gerçekleştirilir (Jahan ve ark., 2012; Diakoulaki ve ark., 1995). Burada $\max(X_j)$ ve $\min(X_j)$, ilgili kriterin maksimum ve minimum değerlerini göstermektedir.

Adım 3: Kriterler Arası Korelasyon Katsayılarının Hesaplanması

Bu aşamada, kriterler arasındaki etkileşimi ve birbirlerine olan bağımlılık düzeyini ortaya koymak amacıyla Pearson korelasyon katsayıları hesaplanır. İlgili formülasyon şu şekildedir:

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}}$$

Burada $\bar{r}_j$, j kriterine ait ortalama normalize değerini ifade etmektedir (Çakır ve Perçin, 2013; Işık, 2019).

Adım 4: Toplam Bilgi İçeriği ve Standart Sapmaların Hesaplanması

Her kriterin sahip olduğu bilgi miktarı, kriterin standart sapması ile diğer kriterlerle olan ilişkisinin birleşiminden oluşur. Öncelikle her kriterin standart sapması hesaplanır:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}$$

Daha sonra, bilgi içeriğini temsil eden C_j değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$C_j = \sigma_j \cdot \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk})$$

Bu ifade, hem kriterin kendi iç varyasyonunu hem de diğer kriterlerle olan bağımsızlığını dikkate alır (Şenol ve Ulutaş, 2018; Kiracı ve Bakır, 2018).

Adım 5: Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

CRITIC yönteminin son aşamasında, her bir kriterin ağırlığı, bilgi miktarı toplamına oranlanarak hesaplanır:

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}$$

Bu şekilde elde edilen ağırlıklar, kriterlerin karar sürecindeki göreceli önemini yansıtır. En yüksek ağırlığa sahip kriter, karar verme sürecinde en fazla bilgi içeren ve en az diğer kriterlerle ilişkili olan kriter olarak kabul edilir (Akbulut, 2019).

Bu yöntem sayesinde, veriye dayalı ve tutarlı ağırlıklar elde edilerek çok kriterli karar problemlerinde daha sağlıklı sonuçlara ulaşmak mümkün hale gelir (Demircioğlu ve Coşkun, 2018).

3.2. Moora ve Multimoora Yöntemleri

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri, karmaşık karar problemlerinde alternatiflerin çoklu değerlendirme kriterleri açısından analiz edilmesine imkân tanıyan yöntemler bütünüdür. Bu bağlamda, MOORA (Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis) yöntemi, 2006 yılında Brauers ve Zavadskas tarafından önerilerek literatüre kazandırılmıştır. MOORA yöntemi, temel olarak karar matrisinin normalizasyonu yoluyla kriterlerin etkisinin dengelenmesini ve karar alternatiflerinin bu dengeye göre sıralanmasını esas alır. MOORA'nın uygulanmasında, kriterler olumlu (maksimize edilmesi gereken) ve olumsuz (minimize edilmesi gereken) olarak sınıflandırılır ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılır.

Literatürde, MOORA yöntemine ilişkin beş farklı yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar; Oran Temelli MOORA Yöntemi, Referans Noktasına Dayalı MOORA Yaklaşımı, Önem Katsayısı Yöntemi, Tam Çarpanlı MOORA Yöntemi ve bu yöntemlerin birleşiminden oluşan MULTIMOORA modelidir (Ersöz ve Atav, 2011; Özbek, 2015; Ömürbek ve Özcan, 2016; Bulut, 2017). Çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemlerinde, bu çeşitli MOORA tekniklerinin uygulanması ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmesi önerilmektedir (Ömürbek ve Özcan, 2016).

MOORA yöntemi üç ana analiz tekniğini içerir: Oran Metodu (Ratio System), Referans Noktası Yaklaşımı (Reference Point Approach) ve kriter ağırlıklarının dikkate alındığı ağırlıklı değerlendirme. Bu yöntem, karar matrisinin her bir kriterine ilişkin verilerin normalize edilmesini, ardından fayda ve maliyet kriterlerinin birbirinden ayrılarak net skorların elde edilmesini sağlar. Sonuçta, alternatiflerin sıralaması yapılır (Brauers ve Zavadskas, 2006).

MOORA metoduna 2010 yılında Tam Çarpımsal Form (Full Multiplicative Form) analiz tekniği eklenmiş ve böylece MULTIMOORA yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu genişletilmiş yaklaşım, MOORA'nın üç analiz tekniğiyle elde edilen sonuçların Baskınlık Teorisi (Theory of Dominance) çerçevesinde bütüncül bir sıralamaya dönüştürülmesini sağlar. Bu teori; baskınlık, geçişlilik, eşitlik ve döngüsel değerlendirme gibi kavramlara dayanarak alternatifler arasında karşılaştırma yapılmasını ve nihai sıralamanın oluşturulmasını amaçlar (Brauers ve Zavadskas, 2010).

MULTIMOORA yöntemi, karar vericilere farklı bakış açısı sunarak, çok kriterli problemlerde daha güvenilir ve dengeli sonuçlar elde etmelerini sağlar. Özellikle karmaşık ve çok boyutlu karar verme problemlerinde, yöntemin esnekliği ve bütüncül yaklaşımı öne çıkmaktadır (Demir ve Gelen, 2022; Arslankaya ve Göraltay, 2019). Çok sayıda alternatifin ve kriterin söz konusu olduğu karar problemlerinde; uygulanabilirliği kolay, sayısal olarak güçlü ve tarafsız veri kullanımına olanak tanıyan bir yaklaşım sunar. Bu yöntemin temel avantajları arasında; sade matematiksel işlemlerle uygulanabilmesi, farklı analiz türlerinin aynı karar çerçevesinde entegre edilmesi ve karar vericinin öznel değerlendirmelerine daha az ihtiyaç duyulması yer almaktadır. Bu yönüyle MULTIMOORA, TOPSIS, AHP, ELECTRE ve PROMETHEE gibi geleneksel yöntemlere alternatif olarak sıklıkla tercih edilmektedir.

Günümüzde MULTIMOORA, çok sayıda sektörde ve problem alanında (personel seçimi, tedarikçi değerlendirmesi, üretim planlaması, performans ölçümü, sağlık hizmetleri vb.) başarılı şekilde uygulanmaktadır. Ayrıca akademik çalışmalarda da geniş bir uygulama alanı bulmuştur. MULTIMOORA yönteminin adımları ve uygulama süreci aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Karar Matrisi Oluşturulması

MULTIMOORA yönteminin ilk adımı, alternatiflerin her bir kriter açısından performans değerlerini içeren bir karar matrisinin oluşturulmasıdır. Bu matrisin satırlarında alternatifler, sütunlarında ise karar kriterleri yer alır. Her bir hücre, ilgili alternatifin belirli bir kritere göre aldığı değeri gösterir (Çelik ve Genç, 2024; Süzölmüş ve Polat, 2020). Kriterler; $j=1,2,...,n$ (n : kriter sayısı) ve alternatifler; $i=1,2,...,m$ (m : alternatif sayısı) olmak üzere oluşturulan karar matrisi aşağıdaki gibidir.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

Adım 2: Normalizasyon İşlemi

Karar matrisinin oluşturulmasının ardından, kriterler arasında ölçü birliği sağlamak amacıyla normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Normalizasyon genellikle, her bir kriter için alternatiflerin performans değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne

bölünmesiyle elde edilir. Bu sayede, farklı ölçeklerdeki kriterler karşılaştırılabilir hale gelir (Arslankaya ve Göraltay, 2019; Demir, Gelen ve Acır, 2021). Karar matrisine, normalizasyon işlemi uygulanırken kriterlerin max veya min olması ile ilgilenilmez.

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}}$$

Burada;

X_{ij} , i. alternatifin j. kriterdeki performans değerini,

X_{ij}^* , ise normalleştirilmiş değerini ifade eder.

X_{ij}^* değeri genelde $[0,1]$ arasında çıkmasına rağmen bazı durumlarda ise $[-1,1]$ aralığında çıktığı da görülmektedir (Yıldırım ve ark., 2013).

MOORA-Oran Yöntemi (Ratio Method)

Normalleştirilmiş matris değerleri ile kriter ağırlıkları çarpılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi bulunur. Bulunan bu yeni matris kullanılarak, MOORA-Oran yöntemi uygulanır. Bu yöntemde, fayda (maksimize edilecek) kriterlerinin toplamından maliyet (minimize edilecek) kriterlerinin toplamı çıkarılır. Böylece her bir alternatif için bir skor elde edilir (Demir ve Gelen, 2022; Yanar, 2019).

$$y_j^* = \sum_{i=1}^g X_{ij}^* - \sum_{i=g+1}^n X_{ij}^*$$

Burada g, fayda kriterlerinin sayısını, n-g ise maliyet kriterlerinin sayısını gösterir. Elde edilen y_j^* değerleri büyükten küçüğe sıralanarak alternatiflerin öncelik sırası belirlenir. En büyük değerli alternatif, en uygun alternatif olarak seçilir.

MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı (Reference Point Approach)

Bu aşamada, ağırlıklandırılmış matris üzerinden her bir kriter için referans noktaları (r_i) belirlenir. Fayda kriterlerinde maksimum, maliyet kriterlerinde ise minimum değerler referans noktası olarak alınır. Alternatiflerin her bir kriterde referans noktasına olan mutlak uzaklıkları hesaplanır ve her alternatif için en büyük uzaklık değeri dikkate alınır (Çelik ve Genç, 2024; Süzölmüş ve Polat, 2020).

Kriterler eşit önem düzeyine sahipse;

$$d_{ij} = |r_i - X_{ij}^*|$$

Yeni matrise, TchebycheffMin-Max işlemi uygulanırsa;

$$\min_j = \{ \max_i (|r_i - X_{ij}^*|) \}$$

Kriterler farklı önem düzeyine sahipse;

$$d_{ij} = |w_i * r_i - w_i * X_{ij}^*|$$

Yeni matrise, TchebycheffMin-Max işlemi uygulanırsa;

$$\min_j = \{ \max_i (|w_i * r_i - w_i * X_{ij}^*|) \}$$

Bulunan değerler küçükten büyüğe doğru sıralanır ve en küçük değere sahip alternatif en iyi olarak değerlendirilir (Akar ve ark., 2016).

Tam Çarpım Formu (Full Multiplicative Form)

MULTIMOORA'nın üçüncü bileşeni olan tam çarpım formunda, alternatiflerin fayda kriterlerine göre aldığı değerlerin çarpımı, maliyet kriterlerine göre aldığı değerlerin çarpımına bölünür. Bu işlem, karar matrisi üzerinden yapılır (Demir, Gelen ve Acır, 2021; Yavuz, Hazar ve Babuşcu, 2023).

Kriterler eşit önem düzeyine sahipse;

Karar matrisindeki X_{ij} değerleri kullanılır. Max değerler çarpımı, min değerler çarpımına bölünerek U_j değerleri bulunur. Bulunan değerler için kullanılan formüller aşağıdaki gibidir.

$$A_j = \prod_{i=1}^g X_{ij} \quad , \quad B_j = \prod_{i=g+1}^n X_{ij}$$

$$U_j = \frac{A_j}{B_j}$$

Kriterler farklı önem düzeyine sahipse;

Karar matrisindeki X_{ij} değerleri, Kundakçı tarafından önerilen ve aşağıdaki formül çubuğunda belirtilen ifade ile ağırlıklandırılır (Kundakçı,2016).

$$X_{ij}^{w_j}$$

Bu ağırlıklandırma sonucu yeni bir başlangıç matrisi elde edilir. Bu matriste, alternatiflerdeki ilgili satır Max değerler çarpımı, min değerler çarpımına bölünerek U_j değerleri bulunur. Bulunan değerler için kullanılan formüller aşağıdaki gibidir.

$$A_j = \prod_{i=1}^g X_{ij}^{w_j} \quad , \quad B_j = \prod_{i=g+1}^n X_{ij}^{w_j}$$

$$U_j = \frac{A_j}{B_j}$$

Burada;

A_j : Alternatifler için ilgili satırdaki max değerler çarpımı

B_j : Alternatifler için ilgili satırdaki min değerler çarpımı

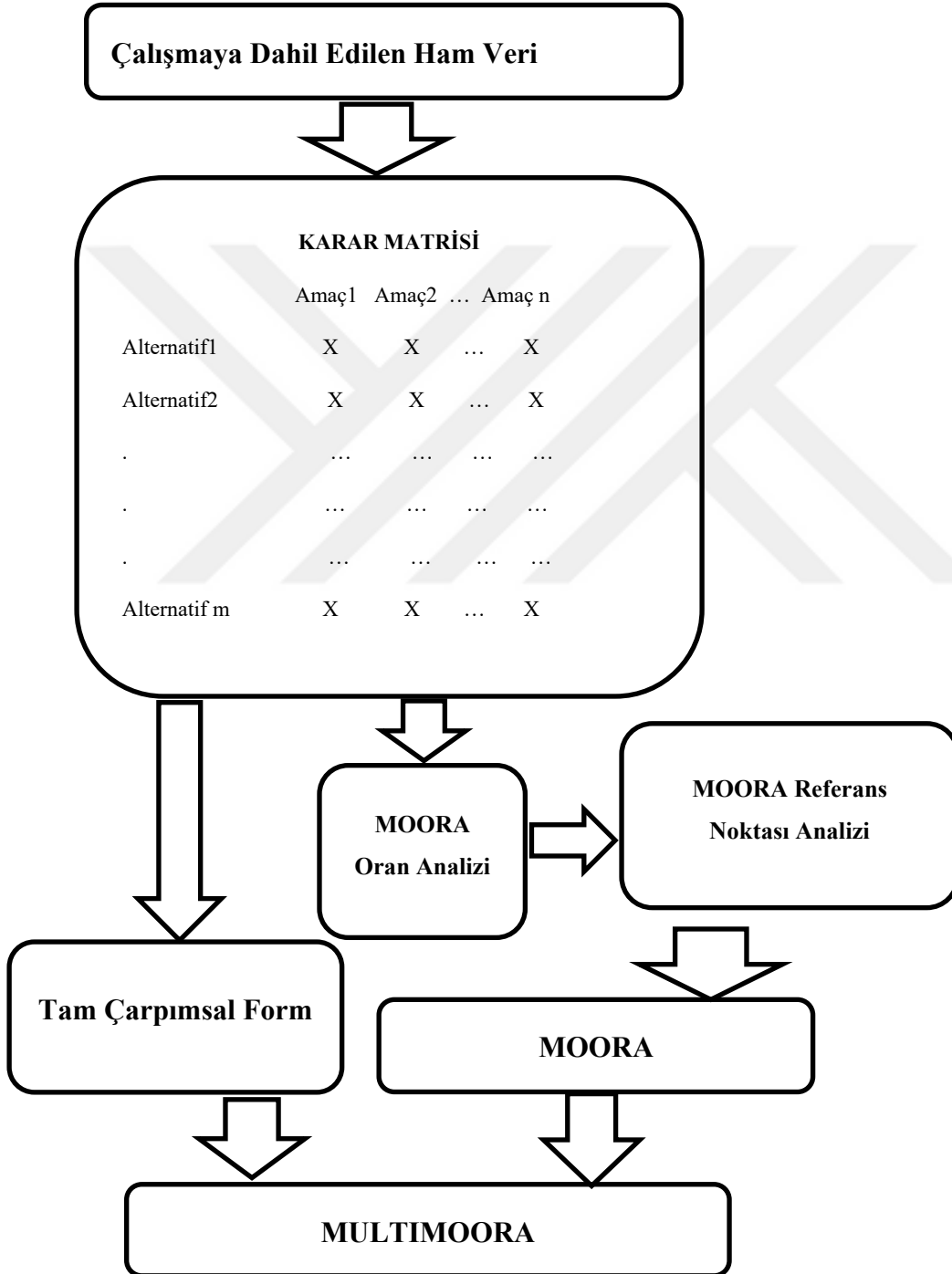
U_j : Alternatif j 'nin genel faydası

Elde edilen U_j değerleri büyükten küçüğe sıralanarak alternatiflerin tam çarpım formuna göre sıralaması yapılır.

Sıra Baskınlık Teorisi (Dominance Theory)

MULTIMOORA yönteminin son aşamasında, Moora yönteminin üç farklı analiz tekniğinden elde edilen sıralamalar, sıra baskınlık teorisiyle birleştirilir. Bu teori, alternatiflerin üç yöntemden elde edilen sıralama değerlerine göre mutlak baskınlık, genel baskınlık, geçişkenlik ve dengelilik gibi kuralları uygular (Brauers ve Zavadskas, 2011; Yanar, 2019). MULTIMOORA yaklaşımı çerçevesinde, karar alternatiflerinin üç farklı teknikle sıralanması durumunda, eğer tüm tekniklerden elde edilen sıralama değerleri birbirine eşit ise (örneğin 2-2-2), bu durum mutlak baskınlık olarak ifade edilmektedir (Brauers ve Zavadskas, 2010). Mutlak baskınlık, ilgili alternatifin tüm değerlendirme yöntemlerinde aynı üstünlük düzeyinde yer alması anlamına gelir. Genel baskınlık durumunda ise, sıralama değerleri farklılık gösterse de belirli bir alternatifin diğerlerine karşı göreceli üstünlüğü gözlemlenebilir. Örneğin, alternatiflerin sıralamaları sırasıyla $k < l < f < z$ şeklindeyse, bu durumda $z-k-k$ değeri, $f-l-l$ değerine; $k-z-k$ değeri, $l-f-l$ değerine; ve $k-k-z$ değeri, $l-l-f$ değerine kıyasla daha baskın olarak değerlendirilebilir. Bu tür bir baskınlık, karar vericinin göreceli üstünlük analizi yapmasına olanak sağlar. Geçişkenlik ilkesi ise, baskınlık ilişkilerinin mantıksal sürekliliğini ifade eder. Yani, eğer bir alternatif k , başka bir alternatif l 'ye baskınlık sağlıyorsa ve aynı şekilde l , f 'ye üstünse; o hâlde k 'nın da f 'ye baskın olduğu varsayılabilir. Böyle bir durumda, $k-k-k$ biçiminde temsil edilen bir alternatif, $l-l-l$ biçiminde ifade edilen diğer alternatiften baskın kabul edilir. Son olarak, dengelilik kavramı ise, alternatiflerin farklı değerlendirme tekniklerinden elde ettiği sonuçlara dayanır. Eğer bir alternatifin sıralama değerleri $c-c-c$ biçiminde mutlak dengeli bir

görünüm sergiliyorsa veya sıralamalar 4-c-11 ya da 6-c-7 gibi farklılık gösterse bile üç koşuldan ikisinde denge sağlanıyorsa, bu durumda da dengelikten söz edilebilir (Brauers ve Zavadskas, 2010). Bu yaklaşım sayesinde, alternatiflerin sadece sayısal üstünlükleri değil, aynı zamanda yapısal ilişkileri ve mantıksal tutarlılıkları da analiz edilerek çok kriterli karar verme süreçleri daha etkin şekilde yönetilebilmektedir. MULTIMOORA yönteminin akış şeması Şekil 3.2. 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. MULTIMOORA yönteminin akış şeması (Brauers ve Zavadskas, 2011).

3.3. Beyin Fırtınası Yöntemi

Beyin fırtınası, bir problem hakkında mümkün olduğunca çok sayıda fikir üretmeyi amaçlayan ve katılımcıların yaratıcı düşünme süreçlerini teşvik eden bir grup tekniğidir. Yöntem ilk olarak Osborn (1953) tarafından sistematik bir yaratıcı düşünme yaklaşımı olarak geliştirilmiştir. Osborn'un modelinde temel amaç, yargılamayı geçici olarak askıya alarak serbest düşünmeyi güçlendirmek ve grup üyelerinin birbirlerinin fikirlerinden ilham alarak yeni fikirler üretmesini sağlamaktır. Bu nedenle beyin fırtınası, hem nicelik hem de çeşitlilik açısından zengin fikir üretimini merkeze alan bir yaratıcı problem çözme yöntemidir (Osborn, 1953; Paulus & Nijstad, 2003).

Beyin fırtınası yöntemi, özellikle eğitim, işletme, tasarım, mühendislik ve sosyal bilim araştırmalarında farklı paydaşların görüşlerini hızlı ve üretken bir şekilde toplamak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Paulus ve Brown'a (2007) göre yöntemin en güçlü yönü, bireylerin tek başlarına üretemeyeceği türden fikirleri grup etkileşimi sayesinde ortaya çıkarabilmesidir. Grup dinamikleri, bilişsel uyarım (cognitive stimulation) yaratarak fikir sayısını ve yaratıcılığını artırmaktadır. Fikir üretim aşamasında katılımcılar birbirlerinin düşüncelerini geliştirebilir; bu durum literatürde "üyeler arası etkileşim yoluyla fikir zincirleme etkisi" olarak tanımlanmaktadır (Sutton & Hargadon, 1996). Bununla birlikte, sosyal kaytarma, üretim engellenmesi ve değerlendirilme kaygısı gibi faktörlerin grup performansını sınırlayabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle modern beyin fırtınası uygulamalarında nominal grup tekniği, elektronik beyin fırtınası ve yapılandırılmış moderasyon gibi yöntemsel iyileştirmeler önerilmektedir (Paulus & Brown, 2007). Grup dinamiklerinin uygun şekilde yönetilmesi, fikir sayısı ve çeşitliliğini doğrudan etkilediği için beyin fırtınası oturumlarında moderatörün rolü oldukça kritiktir (Paulus & Yang, 2000).

Yöntemin Temel İlkeleri :

Osborn'un (1953) ve daha sonraki araştırmaların (Paulus & Nijstad, 2003) vurguladığı beyin fırtınası ilkeleri şunlardır:

Eleştiri ve yargı yoktur: Fikirler üretilirken hiçbir öneri eleştirilmemeli veya değerlendirilmemelidir.

Mümkün olduğunca çok fikir üretmek: Fikir sayısının artması, yaratıcı çözümlere ulaşma olasılığını artırır.

Serbest çağrışım ve özgünlük: Katılımcılar sınırsız şekilde düşünmeli ve alışılmadık, özgün fikirler teşvik edilmelidir.

Fikirlerin geliştirilmesi: Bir katılımcının sunduğu fikir bir başkası tarafından genişletilebilir, değiştirilebilir veya yeni bir fikre dönüştürülebilir.

Bu ilkeler, yöntemin etkili uygulanması için gerekli olan psikolojik güven ortamının oluşturulmasını sağlamaktadır (Paulus & Brown, 2007).

Beyin Fırtınası Yönteminin Uygulama Adımları :

Beyin fırtınası süreci literatürde genellikle dört temel aşamadan oluşur (Osborn, 1953; Michalko, 2006; VanGundy, 2005):

Adım 1: Problemin Tanımlanması ve Oturumun Planlanması

Araştırmacı, üzerinde çalışılacak problemi açık ve anlaşılır şekilde belirler. Katılımcılar seçilir, oturumun süresi, yeri ve kuralları belirlenir. Bu aşama, sürecin verimli ilerlemesi açısından kritik önem taşır.

Adım 2: Kuralların Açıklanması ve Isınma

Oturumun başında katılımcılara yöntemin temel kuralları açıklanır. Yargılamanın askıya alınması, fikir üretiminde serbestlik ve niceliğin önemi vurgulanır. Bazı çalışmalarda yaratıcılığı artırmak için kısa ısınma etkinlikleri uygulanır (Paulus & Nijstad, 2003).

Adım 3: Fikir Üretme Süreci

Bu aşamada katılımcılar hızlı ve kesintisiz biçimde fikir üretir. Genellikle bir moderatör fikirlerin akışını yönetir ve tüm önerileri kaydeder. Amaç, kısa sürede mümkün olduğunca fazla fikir üretmektir. Grup etkileşiminden doğan “bilişsel uyarım”, yeni ve yaratıcı fikirlerin ortaya çıkmasını sağlayan temel mekanizmadır (Paulus & Brown, 2007).

Adım 4: Fikirlerin Sınıflandırılması ve Değerlendirilmesi

Fikir üretme aşaması tamamlandıktan sonra, yargılama ve değerlendirme sürecine geçilir. Bu aşamada fikirler gruplandırılır, sınıflandırılır ve araştırmanın amacına uygun olanlar seçilir. Uygun görülen fikirler üzerinde derinlemesine analiz yapılır ya da daha sonra kullanılmak üzere kategorilere ayrılır (Michalko, 2006).

Beyin fırtınası, grup üyeleri arasında yaratıcı düşünmeyi teşvik ederek çok yönlü fikir üretimine katkı sağlayan etkili bir yöntemdir. Akademik araştırmalarda veri toplama, problem çözme veya tasarım geliştirme süreçlerinde hızlı, üretken ve katılımcı odaklı bir yaklaşım olarak kullanılabilir. Yöntemin temel gücü, bireysel düşünme süreçleri yerine grup etkileşiminden doğan kolektif yaratıcılığı ortaya çıkarmasıdır.





4. UYGULAMA

Bu bölümde öncelikle, araştırma modeli başlığı altında çalışmadaki temel problem ve bunun çözümü için hangi yöntemlerin kullanılacağına değinilmiştir. Devamında uygulamanın yapıldığı işletmeye ait bilgiler aktarılmıştır. Sonrasında karar vericilerden oluşturulan araştırma grubunun kaç kişi olduğu, nitel kriterleri puanlandırmalarına ait bilgiler paylaşılmış ve verilerin nasıl toplandığı hakkında bilgiler verilmiştir. Son aşamada ise, verilerin analizi ele alınmıştır. Verilerle ilgili teknik detaylar, açıklamalar ve kullanılan yöntemlerin çözümlerine detaylı olarak yer verilmiştir.

4.1. Araştırma Modeli

Bir otomotiv firmasında baca gazı emisyon azaltma çalışması kapsamında baca gazlarındaki VOC 'lerin önlenmesi incelenmiştir. Bunun için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak ekipman seçimi yapılmıştır. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden Critic ve MultiMoora kullanılmıştır. Kriterlerin ağırlıkları belirlenirken Critic metodu kullanılırken, alternatiflerin sıralaması ve en uygun seçim yapılırken ise MultiMoora metodu kullanılmıştır.

4.2. Uygulamanın Yapıldığı İşletmeye Ait Bilgiler

Çalışmaların yapıldığı işletme, Marmara bölgesinde bulunan ve otomotiv sektöründe faaliyetlerine devam eden bir şirkettir. Yıllık 250.000 adet araç kapasitesine sahiptir. Fabrika, pres ve kaynak olarak iki bölümden oluşan gövde, boya, montaj, plastik, kalite bölümleri, sosyal ve idari binalardan oluşmuştur. Çalışma daha çok boyahane bölümünde gerçekleştirilmiştir. Gövde bölümünden gelen araç gerekli işlemlerden sonra, astar, boya ve vernik olacak şekilde boya kabinlerinden geçer. Buradan fırında kurutma ve kürlenme işleminden sonra gerekli kalite kontrol işlemleri yapılarak bir sonraki proses olan montaj bölümüne yönlendirilir. Boyahane bölümündeki akış şeması Şekil 4.1. 'de verilmiştir.

Bu çalışmada da fırın baca çıkışı veya yakılacak baca gazı 10.000 Nm³/saat olan bir araç fabrikası için emisyon düşürme ekipmanı seçiminde önerilebilecek boyuttaki ekipmanlar değerlendirilmiştir.

4.3. Araştırma Grubu ve Karar Vericilere İlişkin Tanımlayıcı Bilgiler

Araştırma binek otomotiv üreten bir otomotiv fabrikasında yapılmıştır. Kriterler belirlenirken; firmadaki ekipman, daha önceki bilgi ve tecrübelerden faydalanılmıştır. Bu kriterlerin belirlenmesinde fabrikadaki bakım personelleri ve teknik müdürlerin fikirlerinden yararlanılmıştır. Kurulabilecek ekipmanlar yani alternatifler için ise ekipmanın yetkili firmasından bilgi alınmıştır ve belirlenen kriterlerde danışılmıştır. Ayrıca yetkili firmada çalışan farklı pozisyon, tecrübe ve görevlerdeki 5 makine mühendisi ve 1 elektrik elektronik mühendisi olmak üzere 6 kişi karar verici olarak belirlenmiştir. Karar matrisindeki bilgilerin elde edilebilmesi için, işlerinde uzman olan karar vericilerin oluşturduğu grubun bilgilerine başvurulmuştur. Karar vericilere ait kişisel ve firmadaki durumlarını gösteren bilgiler Tablo 4.1. 'de görselleştirilmiştir.

Tablo 4.1. Karar vericilerin kişisel bilgileri.

Karar Verici	Cinsiyeti	Yaşı	Eğitim Durumu	Eğitim Bölümü	Tecrübe (yıl)	Görevi (Firma)	Pozisyonu (Firma)
KV1	Erkek	45	Üniversite	Makine Mühendisi	24	Proje Geliştirme ve Satış Müdürü	Müdür
KV2	Erkek	27	Üniversite	Makine Mühendisi	5	Proje Geliştirme Uzman Mühendis	Mühendis
KV3	Erkek	39	Üniversite	Makine Mühendisi	14	Proje Yön. Ve Dev. Alma Md.	Müdür
KV4	Erkek	37	Üniversite	Makine Mühendisi	15	Proje Yön. Ve Dev. Alma Md.	Müdür
KV5	Erkek	33	Üniversite	Makine Mühendisi	8	Proje Devreye Alma Mühendisi	Mühendis
KV6	Erkek	46	Üniversite	Elk. Elektro. Mühendisi	25	Proje Devreye Alma Müdürü	Uzman

4.4. Veri Toplama Yöntemi

Çalışmada kriterleri belirlemek için fabrikanın geçmiş tecrübeleri ve kurulu ekipman bilgilerinin yanı sıra yasal gereklilikler göz önünde bulundurulmuştur ve uygulamanın

yapıldığı fabrikadaki uzman kadro ile 14 adet kriter belirlenmiştir. Kriterler, genel yatırım kriterleri de düşünülerek uzmanlar tarafından beyin fırtınası yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Kriterler belirlenirken içerik açısından benzerlik gösteren kriterler birleştirilerek optimum sayıda kritere ulaşılmıştır. Çevreyle ilgili tespit edilen dört kriter (K9-K12-K13-K14), çevresel değerlendirme açısından aralarında tercih yapılacak ekipmanların çevreye etkileri açısından en uygun kriterler olarak yeterli görülmüştür. Belirlenen kriterler, kriterlerin özellikleri ve kısaca açıklamaları Tablo 4.2. 'de verilmiştir. Tablo 4.2.'de görüldüğü gibi; bazı kriterler max. iken bazı kriterler min. 'dur.

Tablo 4.2. Kriterler, kriterlerin özellikleri ve açıklamaları.

Kriter No:	Kriterler:	Kriter Özelliği: (max / min)	Kriterlerin Açıklaması:
K1	Kurulum maliyeti	Min	Ekipman kurulum aşamasında kullanılacak; bağlantı kanalları, baca, elektrik malzemeleri, otomasyon donanımı ve fanlar gibi parçaların maliyetleridir. Ayrıca firma kurulum ücreti ve verilecek eğitim ücretleri ilave edilir.
K2	Kurulum kolaylığı ve Devreye alma	Max	Ekipmanın montaj yerine taşınması, kurulması ve devreye alınmasındaki kolaylık (çalışma alanı, arıza ve sorun çıkarmaması açısından)
K3	Bakım maliyeti	Min	Yedek parça maliyeti, arıza ve periyodik kontroller için gerekli olan iç ve dış personel maliyetleri, bakım anındaki sarf malzeme maliyetlerini kapsar.
K4	İşletme maliyeti	Min	Ekipmanı çalıştırma ve durdurma aşamasındaki personel maliyetleri, kullanılan enerji (elektrik, su, doğalgaz, basınçlı hava) maliyetleridir. (Bakım hariç)
K5	Bakım kolaylığı	Max	Arıza tespit kolaylığı, parça değişim kolaylığı, periyodik kontrol ve bakım esnasındaki ergonomik kolaylığı kapsar.
K6	Kullanım kolaylığı	Max	Operatörün ekipmanı kolay ve doğru bir şekilde kullanabilmesini ifade eder.
K7	Yenilemeye uygunluk	Max	Ekipmanın yeni teknolojilere kolayca uygulanabilir olmasıdır.
K8	Ekonomik kullanım ömrü	Max	Ekipmanın işletmeye faydalı olmaya devam ettiği süredir. Ekipmanın atılmasına sebep olacak kadar büyük arıza olmadan kullanılabileceği süreyi ifade eder.
K9	Enerji geri kazanım oranı	Max	Atmosfere atılacak sıcak havanın enerjisinin tekrar kullanım (geri dönüşüm) oranıdır.
K10	Enerji tedarik riski	Min	Ekipmanın ihtiyaç duyduğu doğalgaz veya elektrik enerjisinin tedarik riskini ifade eder.
K11	Ekipman parçaları atık geri dönüşüm kolaylığı	Max	Ekipmanın çalışma ömrü boyunca, ömrünü doldurma kaynaklı atılacak parça ve bileşenlerin geri dönüşüm kolaylığıdır.
K12	Yeşil enerji kaynaklarının uygulanabilirliği	Max	Yeşil enerji kaynaklarının (rüzgar, güneş paneli vb.) sisteme entegrasyon kabiliyetidir.
K13	Karbon ayak izi miktarı	Min	Ekipmanın üretimi ve işletimi sırasında salınan toplam sera gazıdır.
K14	VOC temizleme oranı	Max	Ekipmanın Uçucu Organik Bileşikler (VOC) temizleme oranı veya VOC yakma miktarıdır.

Ayrıca çalışmanın çözümünde kullanılmak üzere; önceki tecrübe, bilgi birikimi, yetkili firma deneyim ve görüşleri göz önünde bulundurularak belirlenen bu kriterlerin adları, amaçları, birimleri ve veri türleri Tablo 4.3. 'te görselleştirilmiştir. Tablo 4.3.'te görüldüğü gibi; seçilebilecek alternatiflerin sıralandırılmasında yol gösterecek kriterler nicel (sayısal) verilerden oluşabileceği gibi nitel (sayısal olmayan) verilerden de oluşabilir. K1-K3-K4-K8-K9-K14 numaralı kriterler nicel(sayısal), K2-K5-K6-K7-K10-K11-K12-K13 numaralı kriterler ise nitel(sayısal olmayan) 'dır.

Tablo 4.3. Kriterler, amaçları ve veri türleri.

Kriter No	Kriter Adı	Kriter Amacı	Kriterin Birimi	Veri Türü
K1	Kurulum maliyeti	Min	Euro (€)	Nicel
K2	Kurulum kolaylığı ve Devreye alma	Max	Birimsiz	Nitel
K3	Bakım maliyeti	Min	Euro/Yıl (€/Yıl)	Nicel
K4	İşletme maliyeti	Min	Euro/Yıl (€/Yıl)	Nicel
K5	Bakım kolaylığı	Max	Birimsiz	Nitel
K6	Kullanım kolaylığı	Max	Birimsiz	Nitel
K7	Yenilemeye uygunluk	Max	Birimsiz	Nitel
K8	Ekonomik kullanım ömrü	Max	Yıl	Nicel
K9	Enerji geri kazanım oranı	Max	Birimsiz	Nicel
K10	Enerji tedarik riski	Min	Birimsiz	Nitel
K11	Ekipman parçaları atık geri dönüşüm kolaylığı	Max	Birimsiz	Nitel
K12	Yeşil enerji kaynaklarının uygulanabilirliği	Max	Birimsiz	Nitel
K13	Karbon ayak izi miktarı	Min	Birimsiz	Nitel
K14	VOC temizleme oranı	Max	Birimsiz	Nicel

Alternatiflerin belirlenmesi için ise, diğer benzer otomotiv fabrikaları, yetkili firmadan alınan katalog ve teknik bilgilerden faydalanılmıştır. Karar matrisindeki değerleri belirlemek için yetkili firmanın farklı departmanlarında çalışan ve konularında uzman olan 6 kişinin bilgilerine başvurulmuştur. Ayrıca bu kişiler alternatifler ve seçilme sıralamaları hakkında bilgilerini de paylaşmışlardır.

4.5. Verilerin Analizi

Çözüm yolu aranırken Critic ve MultiMoora yöntemleri kullanılmıştır. Kriterler bilgi birikimi ve tecrübelerle birlikte yasal sorumluluklardan çıkartılırken, alternatifler ise yetkili firma çalışanlarından oluşturulan 6 kişilik uzman ekipten alınmıştır. Satırlarında alternatiflerin sütunlarında ise kriterlerin bulunduğu karar matrisi oluşturulur. Bazı kriterlerde maximizasyon amaçlanırken bazılarında ise minimizasyon amaçlanır. Karar matrisindeki değerler, nicel (sayısal) ve nitel (sayısal olmayan) olmak üzere ikiye ayrılır. Nicel değerler firmadan alınan katalog ve ekipman teknik bilgilerinden oluşur. Nitel değerler için ise; oluşturulan 6 kişilik uzman personelden, kriterleri 1-5 arasında (“çok iyi-iyi-orta-kötü-çok kötü” olacak şekilde) puanlaması istenir. Her uzman kendi bilgi birikimlerine göre nitel kriterleri puanlandırır. Her bir kriter için puanların aritmetik ortalaması alınarak karar matrisindeki ilgili yerlere yazılır.

Karar matrisi oluşturulduktan sonra, kriterlerin ağırlıklandırılması için Critic metodu uygulanır. Karar matrisinde maliyetler (min) ve fayda (max) kriter değerleri için ayrı formüller kullanılarak matris normalize edilir. Normalize edilmiş matris kullanılarak corelasyon değerleri hesaplanır ve buradan 1-corelasyon değerleri matrisi oluşturulur. Normalize edilmiş matris kullanılarak kriterlerin standart sapmaları hesaplanır. Her bir kriterde bulunan toplam bilgi miktarı (C_j) değerleri ayrı ayrı hesaplanır ve bu değerlerin toplamı bulunur. İlgili C_j değerinin toplam C_j değerine bölünmesiyle ilgili kriterin ağırlıkları (w_j) hesaplanmış olur. Bu değerlere yani önem sıralarına göre büyükten küçüğe bir sıralama yapılır. En büyük değer, önem düzeyi en yüksek kriteri gösterir.

Alternatiflerin sıralanması ve en uygun alternatifin belirlenmesi için MultiMoora metodu kullanılır. MultiMoora metodu için oluşturulan karar matrisi, ilgili formülle normalize edilir. Normalize edilmiş karar matrisi değerleri, Critic metodu ile bulunan ağırlıklar ile çarpılarak ağırlıklandırılır. Böylece ağırlıklandırılmış karar matrisi oluşturulur. MultiMoora metodu, Moora metodunun üç adımıyla başlar. Moora yönteminin ilk adımı olan oran yönteminde; her bir satır (alternatif) için max değerli kriterler toplamından min değerli kriterler toplamı çıkarılarak yeni değerler bulunur. Bu değerler büyükten küçüğe doğru sıralanarak Moora oran yöntemine göre alternatifler sıralanmış olur.

Moora yönteminin ikinci adımında ise Moora referans noktası yöntemine göre bir sıralama yapılır. Ağırlıklandırılmış matriste; kriter min ise en küçük, max ise en büyük değer alınarak referans noktası değerleri belirlenir. Kriterler önem düzeylerine göre gerekli formül kullanılarak yeni bir matris oluşturulur. Burada her bir satırdaki (alternatif), max değer yeni bir değer olarak alınır. Bu değer küçükten büyüğe doğru sıralanarak, alternatiflerin bu metoda göre sıralaması elde edilmiş olur.

Yöntemin üçüncü adımında karar matrisi değerleri kullanılır. Eğer kriterlerin önem düzeyleri aynı ise karar matrisi, önem düzeyleri farklı ise “karar matris değerleri üstü ilgili kriter ağırlığı formülü” kullanılarak yeni bir matris oluşturulur. Kullanılacak matriste, her bir satırdaki ilk kriterden başlayarak ikinci kriter özelliği max ise iki değer çarpılır min ise ilk değer ikinci değere bölünür. Bu işlem son kritere kadar devam ettirilir ve yeni bir değere ulaşılmış olunur. Bulunan yeni değerler büyükten küçüğe doğru sıralanarak, Moora tam çarpım yöntemine göre alternatiflerin sıralaması yapılmış olur.

MultiMoora uygulamasının son adımında ise bundan önceki 3 sıralama yan yana yazılarak bir tablo oluşturulur. Bu tablonun sonuna ise dördüncü sütun olarak MultiMoora baskınlık teorisine göre bir değerlendirme eklenir. Böylece alternatiflerin nihai sıralaması ve seçilebilecek en uygun alternatif MultiMoora yöntemine göre belirlenmiş olur.



5. BULGULAR

Bu bölümde; Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri arasından seçilen Critic ve MultiMoora yöntemlerinden elde edilen sonuçlara değinilmiştir. Bu bölümün son aşamasında ise, bu çalışma için seçilebilecek en uygun alternatif seçeneği açıklamalı bir şekilde aktarılmıştır.

5.1. Critic Metodu 'na İlişkin Bulgular

Belirlenen kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi için Critic metodu kullanılmıştır. Öncelikle karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi Tablo 5.1. 'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Karar Matrisi.

Alternatif No	Alternatifler	Kriter Özellikleri	min	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max	min	max
			(Nicel)	(Nitel)	(Nicel)	(Nicel)	(Nitel)	(Nitel)	(Nitel)	(Nicel)	(Nicel)	(Nitel)	(Nitel)	(Nitel)	(Nitel)	(Nicel)
		Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
			Kurulum maliyeti	Kurulum kolaylığı ve Devreye alma	Bakım maliyeti	İşletme maliyeti	Bakım kolaylığı	Kullanım kolaylığı	Yenilemeye uygunluk	Ekonomik kullanım ömrü	Enerji geri kazanım oranı	Enerji tedarik riski	Ekipman parçaları atık geri dönüşüm kolaylığı	Yeşil enerji kaynaklarının uygulanabilirliği	Karbon ayak izi miktarı	VOC temizleme oranı
A1	TO (Doğalgaz)		800000	4	5000	170000	5	3	1	25	0	3	4	1	1	0,99
A2	Elektrikli RTO		1850000	5	15000	100000	4	4	5	20	0,5	4	3	4	3	0,99
A3	Doğalgazlı RTO		1350000	3	15000	150000	3	3	4	18	0,6	3	3	3	3	0,98
A4	Elektrikli TAR		1600000	4	4000	80000	4	4	4	25	0,7	4	4	4	4	0,99
A5	Doğalgazlı TAR		1200000	3	4000	120000	3	3	3	20	0,7	3	4	4	3	0,98
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem		1850000	4	5000	90000	4	5	5	25	0,85	5	5	5	5	0,995
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)		1700000	3	16000	160000	3	3	3	15	0,5	3	3	3	2	0,99
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem		1600000	3	15000	140000	3	4	4	18	0,65	3	3	4	3	0,99

İlgili kriter için sütundaki max ve min değer bulunur. Normalizasyon işlemi yapılırken; maliyet (min) kriterleri için ilgili hücrenin normalizasyon değerini bulurken, sütun max değerinden ilgili hücredeki değer çıkarılır. Bu değer, sütundaki max ve min değer farkına bölünür. Fayda (max) kriterleri için ise ilgili hücrenin normalizasyon değerini bulurken, ilgili hücredeki değerden sütun min değeri çıkarılır. Bu değer, sütundaki max ve min değer farkına bölünür. Bu işlemler sonucunda normalize edilmiş değerler bulunarak normalize karar matrisi elde edilir. Normalize karar matrisi Tablo 5.2. 'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Normalize Karar Matrisi.

Kriter Özellikleri	min	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max	min	max
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
Alternatifler														
A1	1	0,5	0,917	0	1	0	0	1	0	1	0,5	0	1	0,667
A2	0	1	0,083	0,778	0,5	0,5	1	0,5	0,588	0,5	0	0,75	0,5	0,667
A3	0,476	0	0,083	0,222	0	0	0,75	0,3	0,706	1	0	0,5	0,5	0
A4	0,238	0,5	1	1	0,5	0,5	0,75	1	0,824	0,5	0,5	0,75	0,25	0,667
A5	0,619	0	1	0,556	0	0	0,5	0,5	0,824	1	0,5	0,75	0,5	0
A6	0	0,5	0,917	0,889	0,5	1	1	1	1	0	1	1	0	1
A7	0,143	0	0	0,111	0	0	0,5	0	0,588	1	0	0,5	0,75	0,667
A8	0,238	0	0,083	0,333	0	0,5	0,75	0,3	0,765	1	0	0,75	0,5	0,667

Normalize edilmiş karar matrisindeki değerler alınarak ve ilgili formüller kullanılarak korelasyon değerleri bulunur. Sonrasında ise korelasyon matrisi oluşturulur. Korelasyon matrisi Tablo 5.3. 'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Korelasyon matrisi.

Kriter	Karar Değişkenleri (Kriterler)													
Özellikleri	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
K1	1	-0,257	0,388	-0,595	0,303	-0,683	-0,878	0,218	-0,679	0,617	0,090	-0,789	0,664	-0,461
K2	-0,257	1	0,179	0,519	0,742	0,484	0,276	0,562	-0,198	-0,635	0,226	0,080	-0,161	0,520
K3	0,388	0,179	1	0,393	0,512	0,179	-0,278	0,833	0,033	-0,344	0,878	0,031	-0,249	0,079
K4	-0,595	0,519	0,393	1	0,121	0,746	0,718	0,481	0,675	-0,811	0,462	0,796	-0,849	0,284
K5	0,303	0,742	0,512	0,121	1	0,226	-0,313	0,811	-0,575	-0,381	0,484	-0,402	0,161	0,520
K6	-0,683	0,484	0,179	0,746	0,226	1	0,719	0,462	0,556	-0,889	0,4839	0,723	-0,803	0,701
K7	-0,878	0,276	-0,278	0,718	-0,313	0,719	1	-0,078	0,792	-0,653	-0,018	0,872	-0,826	0,194
K8	0,218	0,562	0,833	0,4812	0,811	0,462	-0,078	1	-0,091	-0,590	0,811	-8,6274E-18	-0,311	0,394
K9	-0,679	-0,198	0,033	0,675	-0,575	0,556	0,792	-0,091	1	-0,482	0,217	0,939	-0,892	-0,033
K10	0,617	-0,635	-0,344	-0,811	-0,381	-0,889	-0,653	-0,590	-0,482	1	-0,635	-0,632	0,791	-0,624
K11	0,090	0,226	0,878	0,462	0,484	0,484	-0,018	0,811	0,217	-0,635	1	0,2410	-0,482	0,339
K12	-0,789	0,080	0,031	0,796	-0,402	0,723	0,872	-8,6274E-18	0,939	-0,632	0,241	1	-0,9	0,169
K13	0,664	-0,161	-0,249	-0,849	0,161	-0,803	-0,826	-0,311	-0,892	0,791	-0,482	-0,9	1	-0,225
K14	-0,461	0,520	0,079	0,284	0,520	0,701	0,194	0,394	-0,033	-0,624	0,339	0,169	-0,225	1

- ❖ Yukarıdaki matristeki korelasyon değerleri kullanılarak, 1-Korelasyon formülü ile yeni değerlere ulaşılır. Bu yeni değerlerle (1-korelasyon) matrisi oluşturulur. Oluşturulan yeni matris Tablo 5.4. 'te verilmiştir.

Tablo 5.4. 1-Korelasyon matrisi.

Kriter Özellikleri	Karar Değişkenleri (Kriterler)													
	Maliyet	Fayda	Maliyet	Maliyet	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda	Fayda	Maliyet	Fayda
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
K1	0	1,257	0,612	1,595	0,697	1,683	1,878	0,782	1,679	0,383	0,910	1,789	0,336	1,461
K2	1,257	0	0,821	0,481	0,258	0,516	0,724	0,438	1,198	1,635	0,774	0,920	1,161	0,480
K3	0,612	0,821	0	0,607	0,488	0,821	1,278	0,167	0,967	1,344	0,122	0,969	1,249	0,921
K4	1,595	0,481	0,607	0	0,879	0,254	0,282	0,519	0,325	1,811	0,538	0,204	1,849	0,716
K5	0,697	0,258	0,488	0,879	0	0,774	1,313	0,189	1,575	1,381	0,516	1,402	0,839	0,480
K6	1,683	0,516	0,821	0,254	0,774	0	0,281	0,538	0,444	1,889	0,516	0,277	1,803	0,299
K7	1,878	0,724	1,278	0,282	1,313	0,281	0	1,078	0,208	1,653	1,018	0,128	1,826	0,806
K8	0,782	0,438	0,167	0,519	0,189	0,538	1,078	0	1,091	1,590	0,189	1	1,311	0,606
K9	1,679	1,198	0,967	0,325	1,575	0,444	0,208	1,091	0	1,482	0,783	0,061	1,892	1,033
K10	0,383	1,635	1,344	1,811	1,381	1,889	1,653	1,590	1,482	0	1,635	1,632	0,209	1,624
K11	0,910	0,774	0,122	0,538	0,516	0,516	1,018	0,189	0,783	1,635	0	0,759	1,482	0,661
K12	1,789	0,920	0,969	0,204	1,402	0,277	0,128	1	0,061	1,632	0,759	0	1,9	0,831
K13	0,336	1,161	1,249	1,849	0,839	1,803	1,826	1,311	1,892	0,209	1,482	1,9	0	1,225
K14	1,461	0,480	0,921	0,716	0,480	0,299	0,806	0,606	1,033	1,624	0,661	0,831	1,225	0
Sütun Toplamı	15,062	10,663	10,366	10,060	10,791	10,095	12,473	9,498	12,738	18,268	9,903	11,872	17,082	11,143

Normalize karar matrisi ve ilgili formüller kullanılarak standart sapma değerleri hesaplanır. Bulunan standart sapma değerleri tablosu Tablo 5.5. 'te verilmiştir.

Tablo 5.5. Standart sapma değerleri matrisi.

Kriter Özellikleri	min	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max	min	max
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
Alternatifler														
A1	1	0,5	0,917	0	1	0	0	1	0	1	0,5	0	1	0,667
A2	0	1	0,083	0,778	0,5	0,5	1	0,5	0,588	0,5	0	0,75	0,5	0,667
A3	0,476	0	0,083	0,222	0	0	0,75	0,3	0,706	1	0	0,5	0,5	0
A4	0,238	0,5	1	1	0,5	0,5	0,75	1	0,824	0,5	0,5	0,75	0,25	0,667
A5	0,619	0	1	0,556	0	0	0,5	0,5	0,824	1	0,5	0,75	0,5	0
A6	0	0,5	0,917	0,889	0,5	1	1	1	1	0	1	1	0	1
A7	0,143	0	0	0,111	0	0	0,5	0	0,588	1	0	0,5	0,75	0,667
A8	0,238	0	0,083	0,333	0	0,5	0,75	0,3	0,765	1	0	0,75	0,5	0,667
σ_j	0,343	0,372	0,481	0,375	0,372	0,372	0,326	0,385	0,300	0,378	0,372	0,299	0,299	0,354

Bulunan değerlerle ilgili formül kullanılarak, her bir kritere ait C_j bulunur. C_j değerleri toplanarak toplam C_j değerine ulaşılır. İlgili kriterin C_j değeri, toplam C_j değerine bölünerek her bir kritere ait ağırlıkları bulunur. Bulunan sonuçlar, kriterlerin ağırlıkları ve kriterlerin önem sıralaması Tablo 5.6. 'da görselleştirilmiştir.

Tablo 5.6. Bulunan değerler, kriter ağırlıkları ve kriterlerin önem sıralaması.

Kriterler	m i n	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	ma x	min	max
	K 1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
σ_j (1)	0,343	0,372	0,481	0,375	0,372	0,372	0,326	0,385	0,300	0,378	0,372	0,299	0,299	0,354
(2)	1	10,6	10,3	10,0	10,7	10,0	12,4	9,49	12,7	18,2	9,90	11,8	17,0	11,1
$\sum_{j=1}^n 1 - r_{ij}$	5,06	63	66	6	91	95	73	8	38	68	3	72	82	43
(Cj) (1*2)	5,16	3,96	4,98	3,77	4,01	3,75	4,06	3,65	3,82	6,90	3,68	3,55	5,10	3,94
	6	7	6	3	4	5	6	7	1	5	4		8	5
TOPLAM (Cj SÜTUN TOPLAMLARI)														
							60,396							
W_j (Cj / SUM)	0,00855	0,0657	0,0826	0,0625	0,0665	0,0622	0,0673	0,0605	0,0633	0,1143	0,061	0,0588	0,0846	0,0653
SIRALAMA	2	7	4	10	6	11	5	13	9	1	12	14	3	8

5.2. MultiMoora Metodu 'na İlişkin Bulgular

MultiMoora metoduna karar matrisi oluşturularak başlanır. Bir önceki bölümde kriterlerin ağırlıklarını belirlerken kullandığımız Critic metodunda oluşturduğumuz

karar matrisini kullanabiliriz. MultiMoora yönteminde kullanacağımız karar matrisi ve Critic metodundan elde edilen kriter ağırlıkları Tablo 5.7. 'de verilmiştir.



Tablo 5.7. MultiMoorra Karar matrisi ve Kriter Ağırlıkları.

Alternatif No	Kriter Özellikleri	min (Nicel)	max (Nitel)	min (Nicel)	min (Nicel)	max (Nitel)	max (Nitel)	max (Nitel)	max (Nitel)	max (Nitel)	min (Nitel)	max (Nitel)	max (Nitel)	min (Nitel)	max (Nitel)
	Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
A1	TO (Doğalgaz)	800000	4	5000	170000	5	3	1	25	0	3	4	1	1	0,99
A2	Elektrikli RTO	1850000	5	15000	100000	4	4	5	20	0,5	4	3	4	3	0,99
A3	Doğalgazlı RTO	1350000	3	15000	150000	3	3	4	18	0,6	3	3	3	3	0,98
A4	Elektrikli TAR	1600000	4	4000	80000	4	4	4	25	0,7	4	4	4	4	0,99
A5	Doğalgazlı TAR	1200000	3	4000	120000	3	3	3	20	0,7	3	4	4	3	0,98
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	1850000	4	5000	90000	4	5	5	25	0,85	5	5	5	5	0,995
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	1700000	3	16000	160000	3	3	3	15	0,5	3	3	3	2	0,99
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	1600000	3	15000	140000	3	4	4	18	0,65	3	3	4	3	0,99
KRİTER AĞIRLIKLARI (W _j)		0,0855	0,0657	0,0826	0,0625	0,0665	0,0622	0,0673	0,0605	0,0633	0,1143	0,0610	0,0588	0,0846	0,0653

Tablo 5.8. Normalize edilmiş karar matrisi.

Alternatif No	Kriter Ağırlıkları	0,0855	0,0657	0,0826	0,0625	0,0665	0,0622	0,0673	0,0605	0,0633	0,1143	0,0610	0,0588	0,0846	0,0653
	Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
A1	TO (Doğalgaz)	0,185	0,383	0,157	0,462	0,479	0,287	0,092	0,420	0	0,297	0,383	0,096	0,110	0,354
A2	Elektrikli RTO	0,427	0,479	0,471	0,272	0,383	0,383	0,462	0,336	0,289	0,396	0,287	0,385	0,331	0,354
A3	Doğalgazlı RTO	0,312	0,287	0,471	0,407	0,287	0,287	0,370	0,302	0,347	0,297	0,287	0,289	0,331	0,351
A4	Elektrikli TAR	0,369	0,383	0,126	0,217	0,383	0,383	0,370	0,420	0,405	0,396	0,383	0,385	0,442	0,354
A5	Doğalgazlı TAR	0,277	0,287	0,126	0,326	0,287	0,287	0,277	0,336	0,405	0,297	0,383	0,385	0,331	0,351
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	0,427	0,383	0,157	0,244	0,383	0,479	0,462	0,420	0,492	0,495	0,479	0,481	0,552	0,356
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	0,393	0,287	0,503	0,435	0,287	0,287	0,277	0,252	0,289	0,297	0,287	0,289	0,221	0,354
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	0,369	0,287	0,471	0,380	0,287	0,383	0,370	0,302	0,376	0,297	0,287	0,385	0,331	0,354

İkinci adım olarak karar matrisinde normalizasyon işlemi uygulanır. Kriterin ilgili hücre değeri, kriterin bulunduğu sütundaki tüm değerlerin kareleri toplamına oranı ile bulunur. Bulunan değerler Normalizasyon matrisi adı altında Tablo 5.8. 'de verilmiştir.

Bu iki ana işlemden sonra MultiMoora metodu için Moora metodunun üç adımı uygulanır ve son adım olarak MultiMoora metodunun baskınlık teorisi yöntemi eklenerek MultiMoora metodu sonuçlarına ulaşılır. MultiMoora metodu uygulama adımları aşağıda açıklanmıştır.

5.2.1. Moora-oran metodu 'na ilişkin bulgular

Çok kriterli karar verme metodlarından elde edilen kriter ağırlıkları alınır. Bulunan kriter ağırlıkları Tablo 5.9. 'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Kriter Ağırlıkları.

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K 10	K 11	K 12	K 13	K 14
Kriter Ağırlıkları	0,0855	0,0657	0,0826	0,0625	0,0665	0,0622	0,0673	0,0605	0,0633	0,1143	0,0610	0,0588	0,0846	0,0653

Karar matrisi değerleri ile kriter ağırlıkları çarpılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi elde edilir. Ağırlıklandırılmış karar matrisinde her alternatif için, satır max ve min değerleri kendi aralarında toplanır. Toplam max değerinden toplam min değeri çıkarılarak her bir alternatife ait y_j değerleri bulunur. Bu değerler büyükten küçüğe doğru sıralanarak Moora oran metodunun sıralaması bulunur. En büyük değer, bu metoda göre en iyi alternatiftir. Bu metodun sıralamasına göre, en iyi alternatif A4 seçeneği olan “Elektrikli TAR” ekipmanı bulunurken en kötü alternatif olarak A7 seçeneği olan “Doğalgazlı Döner Silindirik RTO (r-RTO)” ekipmanı bulunmuştur. Bu metoda ait bulunan değerler ve Moora oran metodu sıralaması Tablo 5.10. 'da görselleştirilmiştir.

Tablo 5.10. Ağırlıklandırılmış matris ve Moora Oran metodu sıralaması.

Alternatif No	Kriter Özellikleri	min	Max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max	min	max	(TOPLAM = TOP.MAX - TOP.MIN)	
	Kriter Ağırlıkları	0,085	0,065	0,082	0,062	0,066	0,062	0,067	0,060	0,063	0,114	0,061	0,058	0,084	0,0653		
	Kriterler	5	7	6	5	5	2	3	5	3	3	0	8	6			
	Alternatifler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	TOPLAM	SIRALAMA
A1	TO (Doğalgaz)	0,016	0,025	0,013	0,029	0,032	0,018	0,006	0,025	0	0,034	0,023	0,006	0,009	0,0231	0,0577	4
A2	Elektrikli RTO	0,037	0,031	0,039	0,017	0,025	0,024	0,031	0,020	0,018	0,045	0,018	0,023	0,028	0,0231	0,0480	5
A3	Doğalgazlı RTO	0,027	0,019	0,039	0,025	0,019	0,018	0,025	0,018	0,022	0,034	0,018	0,017	0,028	0,0229	0,0253	7
A4	Elektrikli TAR	0,032	0,025	0,010	0,014	0,025	0,024	0,025	0,025	0,026	0,045	0,023	0,023	0,037	0,0231	0,0813	1
A5	Doğalgazlı TAR	0,024	0,019	0,010	0,020	0,019	0,018	0,019	0,020	0,026	0,034	0,023	0,023	0,028	0,0229	0,0729	3
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	0,037	0,025	0,013	0,015	0,025	0,030	0,031	0,025	0,031	0,057	0,029	0,028	0,047	0,0232	0,0807	2
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	0,034	0,019	0,041	0,027	0,019	0,018	0,019	0,015	0,018	0,034	0,018	0,017	0,019	0,0231	0,0108	8
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	0,031 2	0,019	0,039	0,024	0,019	0,024	0,025	0,018	0,024	0,034	0,018	0,023	0,028	0,0231	0,0358	6

5.2.2. Moora referans noktası metodu ‘na ilişkin bulgular

İkinci adımda Moora Referans noktası yöntemi kullanılır ve bir sıralama oluşturulur. Ağırlıklandırılmış matriste sütunlarda bulunan her bir kriterin max-min olma özelliği göz önünde bulundurulur. Kriter min ise sütundaki en küçük değer, max ise en büyük değer seçilerek referans noktası değerleri belirlenir. Belirlenen referans değerleri Tablo 5.11. ‘de verilmiştir.

Tablo 5.11. Kriterlerin Referans Değerleri.

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K 10	K 11	K 12	K 13	K 14
Kriter Ağırlıkları	0,016	0,031	0,010	0,014	0,032	0,030	0,031	0,025	0,031	0,034	0,029	0,028	0,009	0,023

Bu değerler ile gerekli formüller kullanılarak yeni bir matris oluşturulur. Oluşturulan matrisin her bir satırında bulunan alternatiflerde belirlenen değerlerden max olanı seçilerek sütun sonuna yeni bir değer olarak eklenir. Bu sütundaki değerler küçükten büyüğe doğru sıralanarak Moora Referans metoduna göre alternatiflerin sıralamasına ulaşılmış olunur. Bu metottaki sıralamaya göre, en iyi alternatif A5 seçeneği olan “Doğalgazlı TAR” ekipmanı bulunurken en kötü alternatif olarak A6 seçeneği olan “Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR” ekipmanı bulunmuştur. Bu metoda ait bulunan değerler ve Moora Referans Noktası metodu sıralaması Tablo 5.12. ‘de görselleştirilmiştir.

Tablo 5.12. Moora Referans Noktası metodu sıralaması.

Kriter Özellikleri	min	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max	min	max		
Kriter Ağırlıkları	0,0855	0,0657	0,0826	0,0625	0,0665	0,0622	0,0673	0,0605	0,0633	0,1143	0,0610	0,0588	0,0846	0,0653		
Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14		
Alternatifler	Saturın Max Alternatiflerin														Değeri	Sıralaması
A1	0	0,00629	0,00259	0,01529	0	0,01192	0,02488	0	0,03110	0	0,00585	0,02262	0	0,00012	0,03110	6
A2	0,02074	0	0,02853	0,00340	0,00637	0,00596	0	0,00508	0,01280	0,01133	0,01169	0,00565	0,01867	0,00012	0,02853	3*4*5
A3	0,01086	0,01259	0,02853	0,01189	0,01274	0,01192	0,00622	0,00711	0,00915	0	0,01169	0,01131	0,01867	0,00035	0,02853	3*4*5
A4	0,01580	0,00629	0	0	0,00637	0,00596	0,00622	0	0,00549	0,01133	0,00585	0,00565	0,02801	0,00012	0,02801	2
A5	0,00790	0,01259	0	0,00680	0,01274	0,01192	0,01244	0,00508	0,00549	0	0,00585	0,00565	0,01867	0,00035	0,01867	1
A6	0,02074	0,00629	0,00259	0,00170	0,00637	0	0	0	0	0,02265	0	0	0,03735	0	0,03735	8
A7	0,01777	0,01259	0,03112	0,01359	0,01274	0,01192	0,01244	0,01016	0,01280	0	0,01169	0,01131	0,00934	0,00012	0,03112	7
A8	0,01580	0,01259	0,02853	0,01020	0,01274	0,00596	0,00622	0,00711	0,00732	0	0,01169	0,00565	0,01867	0,00012	0,02853	3*4*5

5.2.3. Moora-tam çarpım metodu ‘na ilişkin bulgular

Bu yöntemde başlangıç karar matrisi kullanılır. Kriterlerin önem düzeylerinin aynı veya farklı olmasına göre gerekli formüller uygulanarak yeni bir matrise ulaşılır. Bu matriste kriterlerin max-min özelliğine göre işlemler uygulanır. İlk kriterden sonra gelen ikinci kriterin özelliğine göre çarpma veya bölme işlemi uygulanır. İkinci kriterin özelliği max olduğu için birinci kriter değeri ile ikinci kriter değeri çarpılır. Üçüncü kriter özelliği min olduğu için bulunan değeri üçüncü kriterin değerine bölünür. İşlemler son kriter kadar devam ettirilir. Bulunan değerler sütun sonuna eklenerek her bir alternatif için bir değeri yazılır. Bu sütundaki değerler büyükten küçüğe sıralanır ve Moora tam çarpım metodunun sıralaması oluşturulmuş olur. Bu metotta elde edilen sıralamaya göre, en iyi alternatif A6 seçeneği olan “Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR” ekipmanı bulunurken en kötü alternatif olarak A1 seçeneği olan “TO (Doğalgazlı)” ekipmanı bulunmuştur. Bu metoda ait bulunan değerler ve Moora Tam arpım metodu sıralaması Tablo 5.13. ‘te görselleştirilmiştir.

Tablo 5.13. Moora Tam Çarpım metodu sıralaması.

Alternatif No	Kriter Özellikleri	min	max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max	min	max	Çarpım	Alternatiflerin Sıralama
	Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14		
	Alternatifler																
A1	TO (Doğalgaz)	800000	4	5000	170000	5	3	1	25	0	3	4	1	1	0,99	0	8
A2	Elektrikli RTO	1850000	5	15000	100000	4	4	5	20	0,5	4	3	4	3	0,99	4,88	4
A3	Doğalgazlı RTO	1350000	3	15000	150000	3	3	4	18	0,6	3	3	3	3	0,98	0,69	6
A4	Elektrikli TAR	1600000	4	4000	80000	4	4	4	25	0,7	4	4	4	4	0,99	22,18	2
A5	Doğalgazlı TAR	1200000	3	4000	120000	3	3	3	20	0,7	3	4	4	3	0,98	4,94	3
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	1850000	4	5000	90000	4	5	5	25	0,85	5	5	5	5	0,995	34,77	1
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	1700000	3	16000	160000	3	3	3	15	0,5	3	3	3	2	0,99	0,60	7
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	1600000	3	15000	140000	3	4	4	18	0,65	3	3	4	3	0,99	1,69	5

5.2.4. MultiMoora metodu ‘nda baskınlık teorisine ilişkin bulgular

Bundan önceki Moora metodundaki üç adımda bulunan değerler yan yana yazılarak bir tablo oluşturulmuştur. MultiMoora metodunda ise bu üç adım göz önünde bulundurularak tabloya dördüncü sütun eklenir. Bu sütunda önceki üç değere uygulanacak baskınlık teorisi sonuçları elde edilir. Bu son bulunan sıralama değerlerine göre nihai tabloya ulaşılır. Diğer bir ifade ile MultiMoora metoduna göre alternatiflerin sıralaması yapılmış ve en uygun alternatif seçilmiş olur. Bu durumda elde edilen nihai sonuçlar MultiMoora sonuçları olarak Tablo 5.14 ‘da görselleştirilmiştir. MultiMoora metoduna göre ulaşılan nihai sonuçta, en iyi alternatif A6 seçeneği olan “Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR” ekipmanı bulunurken en kötü alternatif olarak A1 seçeneği olan “TO (Doğalgazlı)” ekipmanı bulunmuştur.

Tablo 5.14. MultiMoora metodu sıralaması.

Alternatif No	Alternatifler	Moora Oran Yöntemi Sıralaması	Moora Referans Noktası Yöntemi Sıralaması	Moora Tam Çarpım Yöntemi Sıralaması	MultiMoora Metodu Sıralaması
A1	TO (Doğalgaz)	4	6	8	8
A2	Elektrikli RTO	5	3-4-5	4	4
A3	Doğalgazlı RTO	7	3-4-5	6	6
A4	Elektrikli TAR	1	2	2	2
A5	Doğalgazlı TAR	3	1	3	3
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	2	8	1	1
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	8	7	7	7
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	6	3-4-5	5	5



6. TARTIŞMA

Bu bölümde öncelikle iki senaryo belirlenmiştir. Bu senaryolara göre kriter ağırlıkları değiştirilerek MultiMoora çözümü tekrar yapılmıştır. Çıkan sonuçlara göre en iyi ve en kötü alternatifler değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

6.1. Senaryo 1: Maliyet Baskın Olacak Şekilde Değerlendirme

Critic metodu ile hesaplanan ağırlıklara göre MultiMoora metodu ile sonuçlara ulaşılmıştır. Kriter ağırlıkları maliyet baskın olacak şekilde değiştirilmiştir. Maliyet kriterleri olan; Kurulum maliyeti (K1), Bakım maliyeti (K3) ve İşletme maliyeti (K4) değerlerinin, yüzdelik değerleri arttırılmıştır. Critic metodu sonuçlarına göre; K1=8.55, K3=8.25, K4=6.26 ve bu üç değer yüzdelik toplamı %23.06 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin her biri %26 'ya ve maliyetler toplamı %78 'e yükseltilmiştir. Buna bağlı olarak diğer kriterlerin değerleri de aynı oranda yüzdesel olarak azaltılmıştır. Diğer kriterlerin toplam yüzdesel değerleri %22 olarak yansıtılmıştır. Bu bilgiler ışığında oluşan kriter ağırlıkları Tablo 6.1. 'de görselleştirilmiştir.

Tablo 6.1. Senaryo 1 'e göre kriter ağırlıkları.

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K 10	K 11	K 12	K 13	K 14
Kriter Ağırlıkları	26	1,879	26	26	1,901	1,779	1,924	1,730	1,807	3,271	1,745	1,680	2,418	1,866

Tablo 6.1. 'deki değerlere göre MultiMoora metodu ile problem tekrar çözülmüştür. MultiMoora sonuçları Tablo 6.2. 'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Maliyet Baskın MultiMoora Sonuçları.

Alternatif No	Alternatifler	Moora Oran	Moora Referans	Moora Tam	MultiMoora
		Yöntemi Sıralaması	Noktası Yöntemi Sıralaması	Çarpım Yöntemi Sıralaması	Metodu Sıralaması
A1	TO (Doğalgaz)	4	4	8	4
A2	Elektrikli RTO	5	5-6-7	4	5
A3	Doğalgazlı RTO	6	5-6-7	6	6
A4	Elektrikli TAR	1	2	2	2
A5	Doğalgazlı TAR	2	1	3	1
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	3	3	1	3
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	8	8	7	8
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	7	5-6-7	5	7

Senaryo 1 ‘de belirtilen maliyet baskın sonuçları incelendiğinde, Tablo 6.2. ‘de de görüldüğü gibi en iyi alternatif A5 (Doğalgazlı TAR) seçeneği, en kötü alternatif ise A7 (Doğalgazlı r-RTO) olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda sadece maliyetler göz önüne alındığı, diğer kriterlerin ağırlıkları yok denecek kadar azaltıldığı için farklı bir sıralamada, seçilebilecek uygun bir sonuca ulaşılmıştır.

6.2. Senaryo 2: Yeşil Üretim Faktörü Baskın Olacak Şekilde Değerlendirme

Critic metodu ile hesaplanan ağırlıklara göre MultiMoora metodu ile sonuçlara ulaşılmıştır. Kriter ağırlıkları yeşil üretim faktörü baskın olacak şekilde değiştirilmiştir. Yeşil üretim faktörü kriterleri olan; Enerji geri kazanım oranı (K9), Yeşil enerji kaynaklarının uygulanabilirliği (K12), Karbon ayak izi miktarı (K13) ve VOC temizleme oranı (K14) değerlerinin, yüzdelik değerleri arttırılmıştır. Critic metodu sonuçlarına göre; K9=6.32, K12=5.88, K13=8.46, K14=6.52 ve bu dört değer yüzdelik toplamı %27.18 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin her biri %16.5 ‘e ve yeşil üretim faktörü toplamı %66 ‘e yükseltilmiştir. Buna bağlı olarak diğer kriterlerin değerleri de aynı oranda yüzdesel olarak azaltılmıştır. Diğer kriterlerin toplam yüzdesel değerleri %34 olarak yansıtılmıştır. Bu bilgiler ışında oluşan kriter ağırlıkları Tablo 6.3. ‘te görselleştirilmiştir.

Tablo 6.3. Senaryo 2 ‘ye göre kriter ağırlıkları.

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K 10	K 11	K 12	K 13	K 14
Kriter Ağırlıkları	3,994	3,068	3,854	2,920	3,105	2,905	3,141	2,825	16,5	5,340	2,849	16,5	16,5	16,5

Tablo 6.3. ‘teki değerlere göre MultiMoora metodu ile problem tekrar çözülmüştür. MultiMoora sonuçları Tablo 6.4. ‘te verilmiştir.

Tablo 6.4. Yeşil Üretim Faktörü Baskın MultiMoora Sonuçları.

Alternatif No	Alternatifler	Moora Oran Yöntemi	Moora Referans Noktası Yöntemi	Moora Tam Çarpım Yöntemi	MultiMoora Metodu
		Sıralaması	Sıralaması	Sıralaması	Sıralaması
A1	TO (Doğalgaz)	8	8	8	8
A2	Elektrikli RTO	5	2-3-4-5	4	4-5
A3	Doğalgazlı RTO	6	2-3-4-5	6	6
A4	Elektrikli TAR	3	6	2	2-3
A5	Doğalgazlı TAR	2	2-3-4-5	3	2-3
A6	Elektrikli TAR + Heat Recovery Sistem	1	7	1	1
A7	Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirik)	7	1	7	7
A8	Doğalgazlı RTO + Heat Recovery Sistem	4	2-3-4-5	5	4-5

Senaryo 2 ‘de belirtilen yeşil üretim faktörü baskın sonuçları incelendiğinde, Tablo 6.4. ‘te de görüldüğü gibi en iyi alternatif A6 (Heat Recovery Sistemli Elektrikli TAR) seçeneği, en kötü alternatif ise A1 (TO (Doğalgaz)) olarak belirlenmiştir. Seçtiğimiz 4 kriterin değerleri birbirine yakın olduğu için baskınlık değeri, Senaryo 1 ‘deki baskınlık değerine göre daha küçük seçilmiştir. Sonuçta; Senaryo 2 sıralaması ile problemin çözümünde kullanılan MultiMoora sıralamasında, hemen hemen aynı sonuçlara ulaşılmıştır.



7. SONUÇ

Sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte çevresel sürdürülebilirlik, endüstriyel üretim süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe, çevresel etkilerin azaltılması, yasal yükümlülüklerin karşılanması ve kurumsal sosyal sorumluluk politikalarının hayata geçirilmesi açısından baca gazı emisyonlarının kontrolü büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, otomotiv sektöründe yoğun olarak karşılaşılan uçucu organik bileşikler (VOC) ve tehlikeli hava kirleticilerin (HAP) atmosfere salınımının önlenmesi, hem insan sağlığı hem de ekosistem bütünlüğü açısından kritik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, bir otomotiv fabrikasında fırınlardan kaynaklanan baca gazı emisyonlarının azaltılması amacıyla, çeşitli baca gazı arıtma sistemlerinin çevresel, ekonomik ve teknik kriterler ışığında değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Ekipman seçimine yönelik olarak çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden CRITIC ve MultiMoora yaklaşımları entegre biçimde kullanılmıştır. CRITIC yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda, MultiMoora yöntemiyle alternatif sistemler nesnel bir biçimde analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, temel kriterlerin dengeli biçimde değerlendirildiği ana senaryoda, "Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR" ekipmanı (A6), en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Bu sonuca ulaşılırken; enerji geri kazanım oranı, VOC giderim etkinliği, işletme maliyetleri ve karbon ayak izi gibi faktörlerin bütüncül şekilde dikkate alınması etkili olmuştur. Alternatif sistemlerin teknik özellikleri ve çevresel performansları kadar, bakım ve kurulum maliyetlerinin de karar sürecinde önemli rol oynadığı görülmüştür.

Senaryo analizleri kapsamında, maliyet ağırlıklı kriter setiyle yapılan değerlendirmede ise "Doğalgazlı TAR" sistemi (A5) öne çıkmış, bu da karar vericilerin hedef önceliklerine göre sistem tercihlerinin önemli ölçüde değişebileceğini ortaya koymuştur. Diğer yandan, yeşil üretim faktörlerinin baskın olduğu ikinci senaryoda ise tekrar "Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR" ekipmanı (A6) en uygun seçenek olarak ön plana çıkmıştır. Bu durum, söz konusu sistemin sürdürülebilirlik odaklı stratejilere uyumlu olduğunu göstermektedir.

Ayrıca bu ölçekli bir fabrika için yetkili firmaya alternatiflerin kurulum sıralaması sorulmuştur. Yetkili firma tecrübe ve deneyimlerine dayanarak; Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR(A6), Elektrikli TAR(A4), Doğalgazlı TAR(A5), Elektrikli RTO(A2), Heat Recovery Sistemli Doğalgazlı RTO(A8), Doğalgazlı RTO(A3), Doğalgazlı r-RTO (Döner Silindirlik)(A7), TO (Doğalgaz)(A1) şeklinde alternatifleri kurulum sırasına göre önermiştir. Firmanın kurulum sıralaması ile ÇKKV yöntemleriyle bulunan sonuç sıralaması aynı çıkmıştır. Çözüm yönteminde ve firma önerisine göre kurulacak ilk ekipman "Heat Recovery sistemli Elektrikli TAR" ekipmanı (A6) olmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışmada uygulanan entegre CRITIC-MultiMoora yöntemi, teknik, çevresel ve ekonomik parametrelerin bütüncül olarak ele alınabildiği etkili bir karar destek aracı sunmuştur. Otomotiv sektörü özelinde yapılan bu uygulama, yalnızca baca gazı arıtma sistemlerinin seçimi açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim politikalarının uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından da faydalı bir örnek teşkil etmektedir. Gelecekte yapılacak benzer çalışmalarda, çevresel risk analizleri ve yaşam döngüsü değerlendirmeleri gibi unsurların da entegre edilmesiyle daha kapsamlı sonuçlara ulaşılması mümkün olacaktır. Ayrıca bundan sonraki çalışmalarda kriter setine NO_x , SO_2 , partikül madde gibi başka önemli baca gazı kirleticilerine ilişkin parametrelerin eklenmesi, daha kapsamlı bir çevresel değerlendirme yapılmasına imkan tanıyacaktır.

KAYNAKLAR

- Aburas, A., Al-Malack, M. H., & Basaleh, A. M. (2023). Evaluation of regenerative thermal oxidizer for VOC abatement in industrial paint operations. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103071. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103071>
- Akar, D. G., & vd. (Mayıs,2016). Lojistik Sektöründe Bütünleştirilmiş Bulanık Ahp - Moora Yaklaşımı İle Personel Seçimi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*.
- Akbulut, R. (2019). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile tedarikçi seçimi: Demir-çelik sektöründe bir uygulama (Yüksek lisans tezi, Kırıkkale Üniversitesi).
- Akçakanat, Ö., Aksoy, E., & Teker, T. (2022). CRITIC ve MDL Temelli EDAS Yöntemi ile TR-61 Bölgesi Bankalarının Performans Değerlendirmesi.
- Aktaş, E., Yılmaz, B., & Yıldız, M. (2015). Karar verme. In *Yönetim ve Organizasyon* (pp. 8-15).
- Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM) (1st ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9>.
- Al-Malack, M. H., & Basaleh, A. M. (2016). Performance assessment of a catalytic oxidizer for VOC removal from industrial emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5487-3>
- Alyüz, B., Veli, S. (2006). İç ortam havasında bulunan uçucu organik bileşikler ve sağlık üzerine etkileri. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 109–116.
- Anguil Environmental Systems, Inc. (n.d.). *Types of thermal oxidizers*. Anguil. <https://anguil.com/resources/air-pollution/types-of-thermal-oxidizers/>
- Arslankaya, S., & Göraltay, K. (2019). Çok kriterli karar verme yöntemlerinde güncel yaklaşımlar. *Iksad Publications*.
- Atan, S., & Altan, M. (2020). Karar analizi ve uygulamaları. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 12(2), 123-135.
- Avrupa Birliği. (2004). 21 Nisan 2004 tarihli ve 2004/42/CE sayılı, “Belirli Boyalar, Vernikler ve Araç Tamir Ürünlerinde Organik Çözücülerin Kullanımı Nedeniyle Uçucu Organik Bileşiklerin Emisyonlarının Sınırlandırılmasına İlişkin ve 1999/13/EC Sayılı Direktifi Değiştiren Direktif. *Official Journal of the European Union*, 30.04.2004 L 143/87. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0042>, (Erişim Tarihi: 09.05.2025).

- Aytekin, A. (2016). Hastaların hastane tercihinde etkili kriterler ve hastanelerin MULTIMOORA ile sıralanması: Eskişehir örneği. *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 4(4), 134–143.
- Bäcker, H. (2014). *Industrial Waste Air Treatment*. Springer-Verlag.
- Bäcker, T. (2014). *Modellbildung und Analyse des Betriebsverhaltens von Systemen zur thermischen Abluftreinigung* (Doctoral dissertation, TU Clausthal).
- Birleşik Krallık. (2012). The Volatile Organic Compounds in Paints, Varnishes and Vehicle Refinishing Products Regulations No. 1715. https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2012/1715/pdfs/ukxi_20121715_en.pdf, (Erişim Tarihi: 09.05.2025).
- Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2010). Project management by MULTIMOORA as an instrument for transition economies. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(1), 5-24.
- Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2010). *Project management by the MOORA method*. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(4), 612–627. <https://doi.org/10.3846/tede.2010.38>
- Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2011). MULTIMOORA optimization used to decide on a bank loan to buy property. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(1), 174-188.
- Brofind. (n.d.). *Direct-fired thermal oxidizers*. Retrieved from <https://www.brofind.com>
- Brofind. (n.d.). *Regenerative thermal oxidizers (RTO)*. <https://www.brofind.com/product/regenerative-thermal-oxidizers>
- Brofind S.p.A. (2022, Ekim 18). *Rejeneratif termal oksitleyici tasarımı: Kaç oksidasyon odası?* Brofind. <https://www.brofind.com.tr/rejeneratif-termal-oksitleyici-dizayni>
- Bulut, E. (2017). *İnşaat projelerinde müteahhit seçimi için çok kriterli karar verme yöntemlerinin karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Cao, Y., Zhang, L., Li, W., & Liu, H. (2023). Recent advances in VOC removal technologies: Photocatalytic and membrane-based strategies. *Journal of Cleaner Production*, 422, 138527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138527>
- CAW Wiesloch GmbH. (2023). *Industrieabluft-Reinigungssysteme*. <https://www.caw-wiesloch.de>
- CAW Wiesloch GmbH. (2023). *Thermal Exhaust Air Purification and Recovery Systems*. Erişim adresi: <https://www.caw-wiesloch.de>
- CECO Environmental. (n.d.). *Thermal oxidizers: Technologies and applications*. Retrieved from <https://www.cecoenviro.com>
- Ceyhan, İ. F., & Demirci, F. (2016). MULTIMOORA Yöntemiyle Finansal Performans Ölçümü: Leasing Şirketlerinde Bir Uygulama.

- Ceyhan, İ. F., & Demirci, F. (2017). MULTIMOORA yöntemiyle finansal performans ölçümü: Leasing şirketlerinde bir uygulama. *Bartın Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, 8(15), 163–184.
- Chen, Y., Liu, W., & Zhang, J. (2017). Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from different processes in automobile painting workshops. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3566–3578. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.117>
- Chen, Y., & Wang, M. (2018). Application Study on Three-Bed Regenerative Thermal Oxidizers to Treat Volatile Organic Compounds. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121(4), 042004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/4/042004>
- Chen, Y., & Wang, X. (2018). *Thermal oxidation technology for VOC control in industrial processes*. *Journal of Environmental Protection Engineering*, 44(1), 23–31.
- Chen, Y., Liu X., Zhang, Y. & Huang, Z. (2019). VOCs emission control and management strategies in automobile industry. *Journal of Cleaner Production*, 225, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.243>
- Clemen, R. T., & Reilly, T. (2013). *Making hard decisions with DecisionTools*. Cengage Learning.
- Cuce, P. M., Cuce, E., & Riffat, S. B. (2019). Review of heat recovery technologies for building applications. *Energies*, 12(7), 1285. <https://doi.org/10.3390/en12071285>
- Çakır, S., & Perçin, S. (2013). CRITIC ve EDAS yöntemleri ile otomobil tercihi üzerine bir uygulama. *Journal of Business Research - Türk*, 5(4), 206–221.
- Çakmak, A. (2021). *VOC gazlarının katalitik oksidasyonu için kullanılan katalizörlerin karşılaştırmalı analizi*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 36(2), 421–432.
- Çelik, A., & Genç, Y. G. (2020). MOORA yöntemi ile spor salonu yer seçimi. *Social Sciences Studies Journal*, 6(64), 1012–1027. <https://doi.org/10.26449/sssj.1961>
- Çeyrek Mühendis. (n.d.). Fabrikasyon boyama süreci. *Çeyrek Mühendis*. Erişim tarihi 26/06/2025, <https://ceyrekmuhendis.com/fabrikasyon-boyama-sureci/>
- Çınar, A. (2004). *Karar Verme Sürecinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*.
- David, E., & Niculescu, V.-C. (2021). Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Occurrence and Mitigation Using Nanomaterials. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), 13147. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8700805/>
- Deif, A. M. (2011). A system model for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1553–1559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.022>
- Demir, A. S., & Gelen, M. B. (2019). Selection of information technology personnel for an enterprise in the process of Industry 4.0 with the MultiMoora method. *Sakarya University Journal of Science*, 23(4), 663–675.

- Demir, A. S., & Gelen, M. B. (2021). A new approach to solving multiobjective flowshop scheduling problems: A MultiMOORA-based genetic algorithm. *Journal of Engineering Research*, 9(4A), 191–200. <https://doi.org/10.36909/jer.8307>
- Demir, A. S., Gelen, M. B., & Acır, Ş. (2021). Supplier selection for a business operating on a just-in-time production system using an integrated DEMATEL and MULTIMOORA approach. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9(1), 67–78.
- Demir, A. S., & Gelen, M. B. (2022). A new selection strategy for multi objective genetic algorithm: MultiMoora rank selection. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(4), 2119–2131.
- Demircioğlu, M., & Coşkun, İ. T. (2018). CRITIC-MOOSRA Yöntemi ve UPS Seçimi Üzerine Bir Uygulama. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 183–195.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763–770. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00059-H](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H)
- Durak, İ. (2023). Çok Kriterli Karar Verme: Temel Yöntemler, Süreçler ve Hibrit Yaklaşımı. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub468.c1968>
- Dünya Sağlık Örgütü (2024). Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (erişim tarihi: 21.05.2025).
- Dürr. (2020). Environmental technologies for air pollution control – Ecopure® systems. Retrieved from <https://www.durr.com>
- Dürr. (2021a). Verified Ecopure® TAR thermal oxidizer technology for new markets. Dürr Group. <https://www.durr.com/en/media/news/news-detail/view/verified-ecopurer-tar-thermal-oxidizer-technology-for-new-markets-589>
- Dürr. (2021b). Efficient exhaust air purification for drying and painting processes. Dürr Group. <https://www.durr.com/en/media/news/news-detail/view/efficient-exhaust-air-purification-for-drying-and-painting-processes-633>
- Dürr. (2021c). Dürr presents the new TAR oxidizer generation IV. Dürr Group. <https://www.durr.com/en/media/news/news-detail/view/7-duerr-open-house-duerr-presents-the-new-tar-oxidizer-generation-iv-599>
- Dürr. (n.d.). Process energy optimization and heat recovery. In Service-X Revamp. Dürr. Retrieved June 8, 2025, from <https://www.durr.com/en/service/environmental-technology/service-x-revamp/process-energy-optimization-and-heat-recovery>
- Dürr Systems AG. (2021). *DSDE CTS, TAR sunumu* [Sunum slaytları]. Dürr Group.
- Dürr Systems AG. (2024). Ecopure® TAR – Rekuperative thermische Abluftreinigung. <https://www.durr.com/de/produkte/umwelttechnik/abgas-und-abluftreinigung/oxi-x-thermische-verfahren/oxi-x-tr>
- Dürr Systems AG. (2024). Ecopure® TAR – Thermal Oxidizer Systems Brochure. Erişim adresi: <https://www.durr.com>

- EPA. (n.d.). *Air Pollution Control Technology Fact Sheet*. United States Environmental Protection Agency. <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/fregen.pdf> (Erişim Tarihi: 26.06.2025)
- Ersoy, N. (2022). Kriter Ağırlıklandırma Yöntemlerinin ÇKKV Sonuçları Üzerindeki Etkisine Yönelik Gerçek Bir Hayat Uygulaması. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(4), 1449-1463.
- Ersöz, S., & Atav, A. (2011). MOORA yönteminin çok kriterli karar verme problemlerinde uygulanması. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(3), 1–18.
- Ersöz, S., & Kabak, Ö. (2010). Karar verme sürecinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanımı. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(18), 1-10.
- European Environment Agency (EEA). (2024). Harm To Human Health From Air Pollution In Europe: Burden Of Disease Status, 2024, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution-2024>.
- European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau. (2023). *Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment: Industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Publications Office of the European Union. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>
- European IPPC Bureau. (2023). BAT Reference Document for Waste Gas Treatment in Common Waste Gas Treatment Systems in the Chemical Sector. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu>
- European IPPC Bureau. (2023). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Waste Treatments. Publications Office of the European Union.
- Ever-Power Pte Ltd. (n.d.). *About Us*. Regenerative Thermal Oxidizers. <https://regenerative-thermal-oxidizers.com/about-us/>
- Fidan, H. (2021). Critic ve Mairca Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Uluslararası Hedef Pazar Seçimi.
- Genç, S., Zadeoglulari, Z., Fuss, S.H., & Genç, K. (2012). The adverse effects of air pollution on the nervous system. *Journal of Toxicology*, 2012, Article ID 782462. <https://doi.org/10.1155/2012/782462>
- Goodwin, P., & Wright, G. (2014). *Decision analysis for management judgment* (5th ed.). Wiley.
- Güzel, Ş., & Özer, P. (2022). Türkiye’de Hava Kirliliği ve Sağlık Harcamaları. *Sağlık ve Sosyal Refah Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 186-202. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sarad/issue/70907/1138629>
- HEAL (2022). Hava Kirliliğinin Sağlık Etkileri Bilgi Notu. https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2022/03/Hava_Kirliligi_Bilgi_Notu.pdf
- Hydrotur Endüstriyel Su Arıtma. (n.d.). *Rejeneratif termal oksidasyon*. Erişim adresi: <https://www.hydrotur.com.tr/rejeneratif-termal-oksidasyon/>

- Hydrotur Endüstriyel Su Arıtma. (n.d.). *Rekuperatif termal oksidasyon*. Erişim adresi: <https://www.hydrotur.com.tr/rekuperatif-termal-oksidasyon/>
- IQS Directory. (n.d.). *What is a thermal oxidizer?*. Retrieved from <https://www.iqsdirectory.com>
- Işık, M. (2019). CRITIC ve MARCOS yöntemleri ile performans değerlendirme: Eğitim sektöründe bir uygulama (Yüksek lisans tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi).
- Jahan, A., Edwards, K. L., & Bahraminasab, M. (2012). Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design. Butterworth-Heinemann.
- Jahan, A., Mustapha, F., Ismail, M. Y., & Sapuan, S. M. (2012). A comprehensive VIKOR method for material selection. *Materials & Design*, 32(3), 1215–1221.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>
- Kang, S., Lee, M., & Park, J. (2022). Advanced Adsorption Materials for Volatile Organic Compound Removal: Recent Progress and Future Outlook. *Environmental Science & Technology*, 56(10), 6815–6827. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00123>
- Kara, G. (2016). Konya'daki hava kalitesi, AB ve HKDY standartları ile karşılaştırılması. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 15(2), 60–65.
- Karaca, M. (2011). Karar Verme Sürecinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri.
- Kazan, H., & Özdemir, M. (2014). Objektif ağırlıklandırma yöntemleri karşılaştırması.
- Kiracı, K., & Bakır, M. (2018). CRITIC ve COPRAS yöntemleri ile sürdürülebilir tedarikçi seçimi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 56, 155–170.
- Kocatürk Çetin, S. (2023). Çok kriterli karar verme alanında yayınlanan çalışmalar üzerine bir içerik analizi; EBSCO veri tabanı incelemesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Y2023, 28(3), s.365–385. <https://orcid.org/0009-0002-2494-8739>
- Koç, A., & Keleş, M. (2021). Otomotiv sektöründe boya fırınlarından çıkan atık ısının geri kazanımı. *Journal of Natural and Applied Sciences*, 25(3), 159–168.
- Kono Kogs. (n.d.). *Thermal oxidizer systems*. Retrieved from <https://www.konokogs.com>
- Kök, F. (2018). Kentlerde Hava Kirliliğini Önleyecek ya da Azaltacak Yöntem İçin Verilerin Toplanması ve Değerlendirilmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(3), 145-157. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ucbad/issue/39777/470744>
- Köksalan, M., Wallenius, J., & Zionts, S. (2011). Multiple Criteria Decision Making: From Early History to the 21st Century.

- Köse, İ. (2016). Hava Kirliliği ve Partikül Maddeler. https://www.academia.edu/26410236/HAVA_KIRLILIGI_VE_PARTIKUL_MADDLER
- Kulkarni, S., Pradhan, A., Wattamwar, A., & Lokhande, P. (2017). Review on principle and applications of waste heat recovery unit. *International Engineering Research Journal (IERJ)*, 2(8), 2578–2581. https://www.academia.edu/78227962/Review_on_Principle_and_Applications_of_Waste_Heat_Recovery_Unit
- Kundakcı N., Combined multi-criteria decision making approach based on MACBETH and MULTI-MOORA methods, *Alphanumeric Journal*, 4 (1), 17-26, 2016.
- Lewandowski, A. (2017). *Air pollution control technologies*. Springer.
- Lewandowski, K. (2017). *Regenerative Thermal Oxidizer Technology Overview*. *Journal of Environmental Engineering*, 143(4), 1–6.
- Liu, H., Zhang, Y., & Chen, T. (2022). VOC control technologies in automotive painting: A review of thermal, catalytic, and hybrid systems. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131112>
- Lopez, A., ve ark. (2023). Decision making in complex environments. *Journal of Decision Systems*, 32(1), 45-60.
- Luo, J., Wang, Q., & Chen, X. (2022). Adsorptive removal of VOCs from flue gas streams: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 34012–34030. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19415-1>
- Madurika, U., & Hemakumara, G. (2015). *Multi Criteria Decision Making Approaches in Urban Planning*.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- Menteşe, S., & Aydın, M. (2024). Gelibolu hava kalitesinin belirlenmesi. *Environmental Toxicology and Ecology*, 4(1), 11–25.
- Michalko, M. (2006). *Thinkertoys: A handbook of creative-thinking techniques* (2nd ed.). Ten Speed Press.
- Moolchandani, K., & Thipse, S. S. (2013). Thermal Oxidizers and Their Use in Industrial Air Pollution Control. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(2), 1235-1241.
- MWindow. (2024). *RTO – Regenerative Thermal Oxidation: Working principle and applications*. <https://mwindow.vn/rto-regenerative-thermal-oxidation/> Erişim tarihi: 25.06.2025.
- NT Trade. (2024). *Regenerative thermal oxidizer (RTO)*. <https://nttrade.pl/en/rto> Erişim tarihi: 25.06.2025.
- Osborn, A. F. (1953). *Applied imagination: Principles and procedures of creative problem-solving*. Charles Scribner's Sons.
- Ömürbek, N., & Özcan, Y. (2016). MOORA ve MULTIMOORA yöntemleriyle performans analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25, 67–88.

- Ömürbek, N., Yıldırım, H., Parlar, G., & Karaatlı, M. (2020). CRITIC Yöntemi ve Oyun Teorisi Bütünleşik Yaklaşımı ile Hastane Performanslarının Değerlendirilmesi.
- Özbek, M. (2014). Karar verme sürecinde bireysel ve çevresel faktörlerin etkisi. *Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(2), 55-68.
- Özbek, N. (2015). MOORA yönteminin tedarikçi seçimine uygulanması (Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Özgel, A. (2016). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Uygulamaları.
- Park, M., Lee, H., & Kim, D. (2024). Advances in regenerative thermal oxidizers: Design, operation, and performance optimization. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137301.
- Parnell, G. S., Driscoll, P. J., & Henderson, D. L. (2013). Decision making in systems engineering and management (2nd ed.). Wiley.
- Paulus, P. B., & Brown, V. R. (2007). Toward more creative and innovative group idea generation: A cognitive-social-motivational perspective of brainstorming. *Social and Personality Psychology Compass*, 1(1), 248–265. <https://doi.org/10.1111/j.1751-9004.2007.00006.x>
- Paulus, P. B., & Nijstad, B. A. (Eds.). (2003). *Group creativity: Innovation through collaboration*. Oxford University Press.
- Paulus, P. B., & Yang, H. C. (2000). Idea generation in groups: A basis for creativity in organizations. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 82(1), 76–87. <https://doi.org/10.1006/obhd.2000.2888>.
- PHYS (2013). *Industry's First Use of Water-based Paint for Plastic Chassis ICT Equipment*. <https://phys.org/news/2013-03-industry-water-based-plastic-chassis-ict.html>. Erişim tarihi: 25.06.2025.
- Purimate (Changzhou) Environmental Technology Co. Ltd.. (n.d.). *Regenerative thermal oxidizer manufacturer – Benefits*. Purimate (Changzhou) Environmental Technology Co. Ltd.. <http://tr.plm-environmental.com/Regenerative-Thermal-Oxidizer-Manufacturer-Benefits.html>
- Pu, Y., Chen, L., & Wang, H. (2021). Performance analysis of a three-bed regenerative thermal oxidizer: Optimization and application. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127678.
- Raiffa, H., & Schlaifer, R. (2000). Applied statistical decision theory. Wiley.
- Ren, K., Zhang, Z., Qin, H., Tan, J., & Hao, X. (2024). Velocity and Temperature Simulation for a Cylindrical Regenerative Thermal Oxidizer. *ACS Omega*, 9(14), 15893–15903. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08352>
- Ren, X., Liu, H., Wang, C., & Zhou, Y. (2024). Design optimization of rotary regenerative thermal oxidizers for VOC abatement in continuous processes. *Journal of Cleaner Production*, 438, 140298. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140298>
- Ren, Y., Zhao, L., & Xu, Q. (2024). Energy recovery improvements in non-regenerative thermal oxidizers. *Energy & Fuels*, 38(2), 1534–1541.

- Rew, R. (1988). Decision Making in Everyday Life.
- Singh, S., Del Giudice, M., Chierici, R., & Graziano, D. (2020). Green innovation and environmental performance: The role of green transformational leadership and green human resource management. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119762. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119762>
- Sun, W., Zhang, F., & Liu, C. (2022). VOC control strategies in industrial coating processes: Comparative study of thermal oxidizer types. *Environmental Science and Technology*, 56(4), 2345–2352.
- Sun, Z., Zhang, L., & Wang, X. (2022). Performance optimization of rotary regenerative thermal oxidizers using heat-fluid matching and regression modeling. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130952. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130952>.
- Sutton, R. I., & Hargadon, A. (1996). Brainstorming groups in context: Effectiveness in a product design firm. *Administrative Science Quarterly*, 41(4), 685–718. <https://doi.org/10.2307/2393872>.
- StudySmarter. (n.d.). Waste heat recovery: System & boiler. <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/engineering/automotive-engineering/waste-heat-recovery/>
- Süzülmüş, S., & Polat, Y. (2022). Çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak sığır işletmelerinin hayvan refahına göre sıralaması. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 8(1), 1–16.
- Şahin, S. (2021). Otomotiv sektöründe boyahane baca gazlarının değerlendirilmesi: Enerji geri kazanımı ve çevresel etkiler. *Journal of New Approaches in Natural and Social Sciences*, 3(2), 56–65. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jonas/issue/60051/859670>
- Şenol, D., & Ulutaş, A. (2018). ÇKKV'de Ağırlık Belirleme Yöntemleri.
- Şenol, H., & Ulutaş, A. (2018). CRITIC-TOPSIS yöntemleri ile çok kriterli karar verme: Finansal performans analizi üzerine bir uygulama. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 18(3), 1–18.
- Şimşek, A., & Çatır, O. (2020). MOORA yöntemi ile ürün seçimi: Turizm sektöründe bir uygulama. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(74), 553–566.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr>
- TKS Industrial Company. (2021). *Thermal oxidizers: VOC and HAP control solutions*. Retrieved from <https://www.tksindustrial.com/>
- TLV. (2021). *Waste heat recovery*. TLV. <https://www.tlv.com/en-gb/steam-info/steam-theory/energy-saving/waste-heat-recovery> (Erişim Tarihi: 28.06.2025)
- Tomatis, M., Brambilla, L., & Rossi, F. (2019). Application of thermal oxidizers in industrial solvent emissions treatment. *Journal of Industrial Pollution Control*, 35(3), 879–886.
- Tomatis, M., Malucelli, G., & Bianchi, S. (2019). VOC abatement strategies in the coating industry: Efficiency of thermal oxidation technologies. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 38–48.

- Tuncer, M., Yılmaz, D., & Arslan, O. (2023). Integration of regenerative thermal oxidizer and cogeneration systems for enhanced energy efficiency. *Energy Conversion and Management*, 275, 116432.
- Tuncer, S., Aydın, H., & Demirkıran, A. (2023). *Energy recovery integration in rotary regenerative thermal oxidizers via cogeneration systems*. *Energy Reports*, 9, 2863–2876. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.012>
- United States Environment Protection Agency, 2025, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#1>, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs#:~:text=Volatile%20organic%20compounds%20are%20compounds,paints%2C%20pharmaceuticals%2C%20and%20refrigerants> (Erişim Tarihi: 09.05.2025).
- VanGundy, A. B. (2005). *101 activities for teaching creativity and problem solving*. Pfeiffer.
- Venkatesh, M., & Woodhull, J. (2003). Destroying gaseous emissions. *Chemical Engineering*, 67.
- Wang, F., Lei, X. ve Hao, X. (2020). Key factors in the volatile organic compounds treatment by regenerative thermal oxidizer. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(5), 557–567. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1752331>
- Wang, L., Liu, Y., & Song, X. (2015). Reduction of VOC emissions in automotive painting workshops using electrostatic spray systems. *Environmental Technology*, 36(23), 2967–2975. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1051605>
- Wang, Y., & Zhao, Y. (2016). Improved objective weight determination using CRITIC method.
- Wang, Y. M., & Luo, Y. (2010). Integration of correlation coefficients into the TOPSIS method. *European Journal of Operational Research*, 199(1), 195–204.
- Xiong, Y., Du, K., & Huang, Y. (2024). One-third of global population at cancer risk due to elevated volatile organic compounds levels. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, Article 54. <https://www.nature.com/articles/s41612-024-00598-1>
- Yanar, T. M. (2019). Bir Otomotiv Fabrikasında AHP-MULTIMOORA Hibrit Yaklaşımı Kullanılarak CO2 Salınımının Azaltılması (Yüksek Lisans Tezi).
- Yavuz, A.E., Hazar, A., & Babuşcu, Ş. (2023). Kalkınma ve yatırım bankalarının performanslarının MULTIMOORA yöntemiyle karşılaştırılması: Türkiye örneği. *Verimlilik Dergisi*, 57(1), 139–158.
- Yılmaz, F., & Demirtaş, Ö. (2020). Membran teknolojisi ile VOC giderimi: Uygulamalar ve gelişmeler. *Çevre Teknolojileri Dergisi*, 8(1), 23–31.
- Yiğit, B., Demir, İ., & Koç, A. (2022). Rejeneratif termal oksitleyicilerde emisyon kontrolü: Teori ve uygulama. *Çevre Teknolojileri Dergisi*, 6(2), 123–132.

- Yiğit, F., Erdem, A., & Kaplan, M. (2022). *Thermal stability and efficiency analysis of rotary regenerative oxidizers in industrial applications*. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102684. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102684>
- Yiğit, M., Demirtaş, İ., & Aydın, M. (2021). Enerji geri kazanımı ve VOC arıtımı entegrasyonu: Otomotiv boyahane fırınlarında baca gazı yönetimi. *Çevre Bilimleri Dergisi*, 12(1), 22–35. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/482788>
- Yiğit, O., Erdem, A., & Kaplan, R. (2022). Erken anomali tespiti ile bütünleşik dinamik belirsiz nedensellik grafiği aracılığıyla rejeneratif termal oksitleyici sistemin arıza teşhisi. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(3), 529–541. <https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00050>
- Zhang, J., Chen, Y., & Li, W. (2021). Numerical evaluation of the energetic performances of structured and random packed beds in regenerative thermal oxidizers. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117144>
- Zhang, T., Chen, R., & Li, J. (2021). Effects of ceramic bed structure on the performance of regenerative thermal oxidizers. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116842.
- Zhang, Y., Bai, X., & Wang, Y. (2018). The performance of waterborne coatings in automotive applications. *Progress in Organic Coatings*, 119, 28–35.
- Zhang, Y., Chen, H., & Zhou, M. (2021). Energy-efficient thermal oxidation of VOCs with integrated heat recovery. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128041. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128041>
- Zhang, Y., Chen, J., & Li, K. (2021). *Advancements in rotary regenerative thermal oxidizers: Design, modeling and performance evaluation*. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 727–738. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.004>
- Zhang, Y., Liu, Z., & Han, J. (2021). Influence of ceramic bed structure on the efficiency of regenerative thermal oxidizers. *Journal of Environmental Management*, 294, 112990.
- Zhou, Y., Huang, R., & Zhang, X. (2020). Emission factors and health risk of VOCs from vehicle coating processes. *Science of The Total Environment*, 720, 137495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137495>
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265–289. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.01.005>



EKLER

EK A. Alıntının tamamı

“Acetaldehyde, Acetamide, Acetonitrile, Acetophenone, 2-Acetylaminofluorene, Acrolein, Acrylamide, Acrylic acid, Acrylonitrile, Allyl chloride, 4-Aminobiphenyl, Aniline, o-Anisidine, Asbestos, Benzene (including benzene from gasoline), Benzidine, Benzotrichloride, Benzyl chloride, Biphenyl, Bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), Bis(chloromethyl)ether, Bromoform, 1,3-Butadiene, Calcium cyanamide, Caprolactam, Captan, Carbaryl, Carbon disulfide, Carbon tetrachloride, Carbonyl sulfide, Catechol, Chloramben, Chlordane, Chlorine, Chloroacetic acid, 2-Chloroacetophenone, Chlorobenzene, Chlorobenzilate, Chloroform, Chloromethyl methyl ether, Chloroprene, Cresols/Cresylic acid (isomers and mixture), o-Cresol, m-Cresol, p-Cresol, Cumene, 2,4-D, salts and esters, DDE, Diazomethane, Dibenzofurans, 1,2-Dibromo-3-chloropropane, Dibutylphthalate, 1,4-Dichlorobenzene(p), 3,3-Dichlorobenzidine, Dichloroethyl ether (Bis(2-chloroethyl)ether), 1,3-Dichloropropene, Dichlorvos, Diethanolamine, N,N-Diethyl aniline (N,N-Dimethylaniline), Diethyl sulfate, 3,3-Dimethoxybenzidine, Dimethyl aminoazobenzene, 3,3'-Dimethyl benzidine, Dimethyl carbamoyl chloride, Dimethyl formamide, 1,1-Dimethyl hydrazine, Dimethyl phthalate, Dimethyl sulfate, 4,6-Dinitro-o-cresol, and salts, 2,4-Dinitrophenol, 2,4-Dinitrotoluene, 1,4-Dioxane (1,4-Diethyleneoxide), 1,2-Diphenylhydrazine, Epichlorohydrin (1-Chloro-2,3-epoxypropane), 1,2-Epoxybutane, Ethyl acrylate, Ethyl benzene, Ethyl carbamate (Urethane), Ethyl chloride (Chloroethane), Ethylene dibromide (Dibromoethane), Ethylene dichloride (1,2-Dichloroethane), Ethylene glycol, Ethylene imine (Aziridine), Ethylene oxide, Ethylene thiourea, Ethylidene dichloride (1,1-Dichloroethane), Formaldehyde, Heptachlor, Hexachlorobenzene, Hexachlorobutadiene, Hexachlorocyclopentadiene, Hexachloroethane, Hexamethylene-1,6-diisocyanate, Hexamethylphosphoramide, Hexane, Hydrazine, Hydrochloric acid, Hydrogen fluoride (Hydrofluoric acid), Hydroquinone, Isophorone, Lindane (all isomers), Maleic anhydride, Methanol, Methoxychlor, Methyl bromide (Bromomethane), Methyl chloride (Chloromethane), Methyl

chloroform (1,1,1-Trichloroethane), Methyl ethyl ketone (2-Butanone), Methyl hydrazine, Methyl iodide (Iodomethane), Methyl isobutyl ketone (Hexone), Methyl isocyanate, Methyl methacrylate, Methyl tert butyl ether, 4,4-Methylene bis(2-chloroaniline), Methylene chloride (Dichloromethane), Methylene diphenyl diisocyanate (MDI), 4,4'-Methylenedianiline, Naphthalene, Nitrobenzene, 4-Nitrobiphenyl, 4-Nitrophenol, 2-Nitropropane, N-Nitroso-N-methylurea, N-Nitrosodimethylamine, N-Nitrosomorpholine, Parathion, Pentachloronitrobenzene (Quintobenzene), Pentachlorophenol, Phenol, p-Phenylenediamine, Phosgene, Phosphine, Phosphorus, Phthalic anhydride, Polychlorinated biphenyls (Aroclors), 1,3-Propane sultone, beta-Propiolactone, Propionaldehyde, Propoxur (Baygon), Propylene dichloride (1,2-Dichloropropane), Propylene oxide, 1,2-Propylenimine (2-Methyl aziridine), Quinoline, Quinone, Styrene, Styrene oxide, 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin, 1,1,2,2-Tetrachloroethane, Tetrachloroethylene (Perchloroethylene), Titanium tetrachloride, Toluene, 2,4-Toluene diamine, 2,4-Toluene diisocyanate, o-Toluidine, Toxaphene (chlorinated camphene), 1,2,4-Trichlorobenzene, 1,1,2-Trichloroethane, Trichloroethylene, 2,4,5-Trichlorophenol, 2,4,6-Trichlorophenol, Triethylamine, Trifluralin, 2,2,4-Trimethylpentane, Vinyl acetate, Vinyl bromide, Vinyl chloride, Vinylidene chloride (1,1-Dichloroethylene), Xylenes (isomers and mixture), o-Xylenes, m-Xylenes, p-Xylenes, Antimony Compounds, Arsenic Compounds (inorganic including arsine), Beryllium Compounds, Cadmium Compounds, Chromium Compounds, Cobalt Compounds, Coke Oven Emissions, Cyanide Compounds, Glycol ethers, Lead Compounds, Manganese Compounds, Mercury Compounds, Fine mineral fibers, Nickel Compounds, Polycyclic Organic Matter, Radionuclides (including radon), Selenium Compounds.” (U.S Clean Air Act, 1963).”

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Serkan ERDOĞAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi , Endüstri Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2005-2015 yılları arasında bir otomotiv fabrikasında ekipman bakım personeli olarak çalıştı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Erdoğan, S., Demir, A. S. (2025, 22 Haziran). Bir Otomotiv Fabrikası İçin En Uygun Baca Gazı Arıtım Sisteminin WASPAS Metodu İle Seçimi. *11th International Azerbaijan Congress on Life, Engineering, Mathematical, and Applied Sciences*, Azerbaijan.

DİĞER ESERLER:

- Turgay, S., Ömeroğlu, M. K., Erdoğan, S. 2025. Deep Learning Empowered Intermodal Path Optimization in Logistics: Deep Shortest Approach, *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 22, 832- 844.
- Akbilek, N., Erdoğan, S. (2017, 4-8 Ekim). Lean Oriented Industry 4.0 Applications in Automotive Industry. *4th International Conference on Computational and Experimental Sciences and Engineering (ICCESEN)*, Antalya- Türkiye.