

**TEKSTİL SEKTÖRÜNDE İÇ ORTAM KALİTESİ VE
AYDINLATMA SİSTEMLERİ ÜZERİNDEN TEMİZ ÜRETİM
YAKLAŞIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

SEMİH ÇAĞRI YAĞCIOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MURAT SOLAK**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL SEKTÖRÜNDE İÇ ORTAM KALİTESİ VE
AYDINLATMA SİSTEMLERİ ÜZERİNDEN TEMİZ ÜRETİM
YAKLAŞIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Semih Çağrı YAĞCIOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Murat SOLAK
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Murat SOLAK
Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Vildan Zülal SÖNMEZ
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 18/06/2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

18 Haziran 2025

Semih Çağrı YAĞCIOĞLU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Murat SOLAK'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, müstakbel eşime ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

18 Haziran 2025

Semih Çağrı YAĞCIOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. MOTİVASYON VE AMAÇ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE TEKSTİL SEKTÖRÜNÜN DURUMU.....	3
2.2. İŞLETMELERDE GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİ VE ÖNEMİ.....	4
2.2.1. Gürültü Kirliliği	4
2.2.2. Gürültü Seviyeleri	5
2.3. GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİNİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	5
2.4. GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİNİN YÖNETMELİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	6
2.5. İŞLETMELERDE İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ VE ÖNEMİ	8
2.5.1. İç Ortam Hava Kalitesi Parametreleri.....	9
2.5.2. İç Ortam Hava Kalitesinin Yönetmelik Açısından Değerlendirilmesi....	11
2.6. İŞLETMELERDE İÇ ORTAM AYDINLATMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ.....	12
2.6.1. Aydınlatma.....	13
2.6.2. Işık Akısı	15
2.6.3. Işık Şiddeti	16
2.6.4. Parıltı Lüminans.....	16
2.6.5. Aydınlık Düzeyi	16
2.7. AYDINLATMA VERİMİNİN YÖNETMELİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	17
2.8. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ AKADEMİK ÇALIŞMALAR.....	20
2.9. TEMİZ ÜRETİM VE YENİLENEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ.....	21
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. TEZ ÇALIŞMASININ KAPSAMI.....	25
3.2. FİRMAYA AİT BİLGİLER	27
3.3. VERİ TOPLAMA VE ANALİZ	29
3.3.1. Ölçüm Sonuçlarının Modellenmesi	30
3.3.2. Aydınlatma Ölçüm Yöntemi	31
3.3.3. Ölçüm Tekniği	32
3.3.4. Gürültü Ölçüm Yöntemi.....	32
3.3.5. Hava Kalitesi Ölçüm Yöntemi	32
3.4. LEAF (LIGHTING EFFICIENCY VE CARBON FOOTPRINT) YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE METODOLOJİSİ.....	33
3.4.1. YAZILIM MİMARİSİ VE KULLANILAN TEKNOLOJİLER	33

3.4.2. Veri Giriş ve Hesaplama Metodolojisi	34
3.4.3. Analiz, Karşılaştırma ve Raporlama	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1. ENDÜSTRİYEL KURULUŞUN İÇ ORTAM HAVA KALİTESİNİN CO ₂ PARAMETRESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	37
4.2. ENDÜSTRİYEL KURULUŞUN İÇ ORTAM DURUMUNUN GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİ PARAMETRESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	43
4.3. ENDÜSTRİYEL KURULUŞUN İÇ ORTAM AYDINLATMA ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	50
4.3.1. Aydınlatma Kaynaklı Enerji Tüketimi ve Güneş Enerjisi Kazanım Potansiyeli	56
4.3.1.1. Mevcut Aydınlatma Sisteminin Enerji Tüketim Analizi.....	56
4.3.1.2. Çatı Tipi Güneş Enerjisi Santrali (GES) Kazanım Analizi	57
4.4. ÖRNEK UYGULAMA: TEKSTİL İŞLETMESİ PAKETLEME BÖLÜMÜ AYDINLATMA ANALİZİ.....	59
4.4.1. LEAF Yazılımının Literatürdeki Diğer Araçlarla Karşılaştırılması	63
4.5. BULGULARIN LİTERATÜR ÇERÇEVESİNDE TARTIŞILMASI.....	64
4.5.1. Gürültü Seviyeleri	64
4.5.2. İç Ortam Hava Kalitesi (CO ₂ Konsantrasyonu).....	64
4.5.3. Aydınlatma Etkinliği.....	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
5.1. TEMİZ ÜRETİM ODAKLI SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK STRATEJİLERİ	67
5.1.1. Strateji 1: Yüksek Verimli Aydınlatmaya Geçiş (LED Retrofit).....	67
5.1.2. Strateji 2: Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu (Çatı Tipi Güneş Enerjisi Santrali- GES)	68
5.1.3. Strateji 3: Gün Işığından Maksimum Düzeyde Faydalanma (Pasif Aydınlatma ve Gün Işığı Hasadı).....	68
5.2. GENEL SONUÇ VE KATKI.....	69
6. KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. CO ₂ ve Havalandırma İlişkisi.....	12
Şekil 2.2. Elektromanyetik Tayf.....	14
Şekil 2.3. Düzce İli Toplam Güneş Radyasyonu.....	22
Şekil 2.4. Düzce Global Radyasyon Değerleri (kWh/m ² -gün).....	22
Şekil 2.5. Düzce Güneşlenme Süreleri (Saat).....	23
Şekil 3.1. Ölçüm Bölgeleri Vaziyet Planı ve Ölçüm Noktalarının Dağılımı.....	27
Şekil 3.2. TESTO 440 İç Ortam Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı ve Lüks Probu.....	28
Şekil 3.3. TESTO 440 CO ₂ Probu.....	28
Şekil 3.4. TESTO 815 Gürültü Seviyesi Ölçüm Cihazı.....	29
Şekil 3.5. CO ₂ Konsantrasyonu ve Havalandırma İhtiyacı İlişkisi.....	32
Şekil 3.6. Yazılım Ana Sayfası.....	35
Şekil 3.7. Yazılım PDF Rapor Çıktısı.....	36
Şekil 4.1. Örme Bölgesi CO ₂ Konsantrasyonu.....	38
Şekil 4.2. İplik Alanı CO ₂ Konsantrasyonu.....	39
Şekil 4.3. Hazırlık Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	39
Şekil 4.4. Aksesuar Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	40
Şekil 4.5. Dikimhane Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	40
Şekil 4.6. Paketleme Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	41
Şekil 4.7. Depo Sevkiyat Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	41
Şekil 4.8. Kumaş Kesim Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	42
Şekil 4.9. Yemekhane Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	42
Şekil 4.10. Kumaş Deposu Bölgesi CO ₂ Sonuç Grafiği.....	43
Şekil 4.11. Örme Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	44
Şekil 4.12. İplik Alanı Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	44
Şekil 4.13. Hazırlık Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	45
Şekil 4.14. Aksesuar Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	45
Şekil 4.15. Dikimhane Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	46
Şekil 4.16. Paketleme Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	46
Şekil 4.17. Depo Sevkiyat Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	47
Şekil 4.18. Kumaş Kesim Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	48
Şekil 4.19. Yemekhane Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	49
Şekil 4.20. Kumaş Deposu Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği.....	50
Şekil 4.21. Örme Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	51
Şekil 4.22. İplik Alanı Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	51
Şekil 4.23. Hazırlık Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	52
Şekil 4.24. Aksesuar Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	52
Şekil 4.25. Dikimhane Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	53
Şekil 4.26. Paketleme Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	53
Şekil 4.27. Depo Sevkiyat Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	54
Şekil 4.28. Kumaş Kesim Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	55
Şekil 4.29. Yemekhane Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	56
Şekil 4.30. Kumaş Deposu Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği.....	56
Şekil 4.31. Tesiste Aydınlatma Amacıyla Kullanılan Floresanlar.....	57
Şekil 4.32. Düzce İli İçin Farklı PV Panel Tiplerinin Yıllık Enerji Üretim Potansiyeli (GEPA, 2024).....	58
Şekil 4.33. Yazılım Veri Giriş Ekranı.....	60

Şekil 4.34. Yazılım Özet/Durum Sekmesi.....	61
Şekil 4.35. Yazılım LED’e Geçiş Sekmesi.....	62
Şekil 4.36. Yazılım Aydınlatma Teknolojileri Kıyaslama Sekmesi.....	63
Şekil 4.37. Yazılım Yeşil İpuçları Sekmesi.....	63



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Dünya Tekstil ve Hazır Giyim İhracatında Lider Ülkeler.....	3
Çizelge 2.2. Gürültü Seviyesi Sınıfları ve Potansiyel Etkileri.....	5
Çizelge 2.3. Gürültü Şiddetleri ve İnsan Sağlığına Olan Etkileri.....	6
Çizelge 2.4. Çevresel Gürültü Düzeyi Sınır Değerleri.....	7
Çizelge 2.5. Bazı Işık Kaynaklarından Yayılan Işık Akısı Miktarları.....	16
Çizelge 2.6. Aydınlık Düzeylerine İlişkin Örnek Değerler.....	17
Çizelge 2.7. Tekstil Endüstrisi İçin Minimum Aydınlatma Düzeyleri.....	18
Çizelge 2.8. Tesis İçi Gezinme Alanları ve İlkyardım Bölümleri İçin Minimum Aydınlatma Değerleri.....	18
Çizelge 3.1. Tez Çalışması Kapsamı.....	24
Çizelge 3.2. Tesis Ölçüm Bölgeleri.....	26
Çizelge 4.1. Bölgelere Göre CO ₂ Ölçüm Sonuçları.....	38
Çizelge 4.2. Bölgelere Göre Gürültü Ölçüm Sonuçları.....	43
Çizelge 4.3. Bölgelere Göre Aydınlatma Şiddeti Ölçüm Sonuçları.....	50
Çizelge 4.4. PV Panel Tipi – Yıllık Enerji Üretimi Karşılaştırması.....	58

KISALTMALAR

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AcO	Asetat
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BBP	Benzil Bütil Ftalat
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
CO ₂	Karbon Dioksit
CRI	Colour Rendering Index (Renksel Geriverim İndeksi)
DEGA	Dietilenglikol Adipat
DOP	Dioktil Ftalat
EPA	Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	Güneş Enerjisi Santrali
GUI	Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü)
IAQ	Indoor Air Quality (İç Ortam Hava Kalitesi)
IES	Illuminating Engineering Society (Aydınlatma Mühendisliği Derneği)
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
LED	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LEAF	Lighting Efficiency ve Carbon Footprint
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PDF	Portable Document Format
PV	Photovoltaic (Fotovoltaik)
TİM	Türkiye İhracatçılar Meclisi
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
TS EN	Türk Standardı Avrupa Normu
UNEP	United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
VOC	Volatile Organic Compounds (Uçucu Organik Bileşikler)

SİMGELER

A	Elektrik Akımı
cd	Işık Şiddeti (Kandela)
dB(A)	Ağırlıklı Desibel
E	Aydınlık Düzeyi (Lüks)
G	İletkenlik
H	Yükseklik
I	Işık Şiddeti
K	Oda İndeksi
L	Uzunluk / Parıltı (Lüminans)
lm	Lümen
lx	Lüks
m ²	Alan (Metrekare)
P	Güç (Watt)
SS	Standart Sapma
t	Zaman (Saniye)
V	Gerilim (Volt)
W	Genişlik / Güç (Watt)
Ø	Işık Akısı
η	Verim

ÖZET

TEKSTİL SEKTÖRÜNDE İÇ ORTAM KALİTESİ VE AYDINLATMA SİSTEMLERİ ÜZERİNDEN TEMİZ ÜRETİM YAKLAŞIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Semih Çağrı YAĞCIOĞLU

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Murat SOLAK

Haziran 2025, 76 sayfa

Endüstriyel işletmeler üretim süreçlerinde, üretilen ürünlerin kalitesi, verimliliği ve niceliği konuları üzerinde durmaktadırlar. Üretim süreçlerinde çalışanların farklı motivasyon kaynakları olsa da işin verimliliği açısından göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konuda endüstriyel firmaların üretim yaptıkları iç ortam kalitesinin çalışanlar açısından değerlendirilmesidir. İç ortam durumu, iç ortam hava kalitesi, iç ortamdaki gürültü kirliliği ve iç ortam aydınlatma etkinliği gibi parametreler ile değerlendirilmektedir. Literatürde çeşitli endüstriyel firmalar için iç ortam durumunun belirlendiği parametrelerin ayrı ayrı incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, iç ortam durumunun bütünsel olarak incelendiği çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında da tekstil ürün üretimi yapan bir firmanın iç ortam hava kalitesi CO₂ parametresi olarak, iç ortam gürültü kirliliği dB olarak, iç ortam aydınlatma etkinliği ise lux olarak tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, Python yazılımı kullanılarak işletmenin söz konusu parametreleri için haritalama yapılmış ve elde edilen veriler Ülkemizde yayınlanmış olan yönetmelikler ve dünyadaki asgari limitler kapsamında değerlendirilmiştir. İncelenen firmada üretim sahası toplam 10 bölgeye bölünmüştür. Bu bölgelerde en yoğun CO₂ kirliliğinin, gürültü kirliliğinin ve aydınlatma etkinliğinin olduğu dikimhane ve yemekhane bölgesinde ilgili yönetmelikler ve genel asgari limitler açısından herhangi olumsuz durumun olmadığı tespit edilmiştir. Özellikle, aydınlatma etkinliğinin belirlendiği çalışma için firmanın çatısına yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş panelleri yapılması durumunda elde edilecek olan enerji teorik olarak belirlenmiş ve aydınlatma verimliliğine etkisi çevresel sürdürülebilirlik parametresi olan temiz üretim çalışması olarak önerilmiştir. Ayrıca, aydınlatma etkinliğinin işletmelerde kolaylıkla tespit edilebilmesi için bir yazılım geliştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Aydınlatma Verimliliği, İç Ortam Kalitesi, İSG, Tekstil Endüstrisi, Temiz Üretim

ABSTRACT

ASSESSMENT OF CLEAN PRODUCTION APPROACHES IN THE TEXTILE SECTOR THROUGH INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY AND LIGHTING SYSTEMS

Semih Çağrı YAĞCIOĞLU

Düzce University
Graduate School, Department of Environmental Engineering
Master's Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat SOLAK

June 2025, 76 pages

In industrial enterprises, production processes primarily focus on product quality, productivity, and quantity. Although employees in production environments may be driven by different motivational factors, an important issue that should be considered in terms of operational efficiency is the evaluation of the indoor environmental quality of the production areas from the perspective of the workers. Indoor environmental conditions are assessed based on parameters such as indoor air quality, noise pollution, and lighting efficiency. In the literature, various studies have examined these parameters individually for different industrial firms. However, studies that investigate indoor environmental conditions in a holistic manner appear to be limited. In this thesis study, the indoor air quality of a textile manufacturing company was assessed using CO₂ concentration as the key parameter, indoor noise pollution was measured in decibels (dB), and indoor lighting efficiency was evaluated in lux (lx). In addition, mapping of these parameters within the production area was performed using Python software. The obtained data were then evaluated according to national regulations published in Türkiye and minimum international standards. The production area of the studied firm was divided into ten zones. It was determined that the zones with the highest concentrations of CO₂, noise pollution, and lighting levels were the sewing workshop and cafeteria. However, no negative conditions were identified in these areas with respect to the relevant regulations and general minimum standards. Specifically, regarding the assessment of lighting efficiency, the theoretical amount of energy that could be generated by installing solar panels—a renewable energy source—on the company's roof was calculated, and its potential contribution to lighting efficiency was proposed as a clean production strategy, contributing to environmental sustainability. Moreover, a dedicated software tool was developed to facilitate the easy determination of lighting efficiency within industrial facilities.

Keywords: Clean Production, IEQ, Indoor Lighting, OHS, Textile Industry

1. GİRİŞ

1.1. MOTİVASYON VE AMAÇ

Tarihsel olarak küresel sanayileşmenin lokomotifi olan tekstil endüstrisi, günümüzde Endüstri 4.0 prensipleriyle bütünleşerek radikal bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel üretim bantlarının yerini, otonom sistemler ve yapay zekâ destekli tedarik zinciri yönetimi gibi akıllı üretim teknolojileri olarak verimliliği artırmaktadır (Shishoo, 2022). Bu teknolojik devrime paralel olarak, sektörün inovasyon odağı, lineer "üret-kullan-at" modelinden, kaynak verimliliğini, eko-tasarımı ve atıkların yeniden değerlendirilmesini merkeze alan döngüsel ekonomi modeline geçiş sağlanmaktadır (Aisyah vd., 2023).

Bu tez çalışması için vaka analizi alanı olarak tekstil endüstrisinin seçilmesinin altında yatan birkaç temel motivasyon bulunmaktadır. İlk olarak, tekstil ve hazır giyim sektörü, Türkiye'nin üretim, istihdam ve ihracat rakamlarına yaptığı önemli katkılarla ülke ekonomisinin temel direklerinden biridir (TİM, 2024; SGK, 2024). Bu denli büyük bir iş gücünü barındıran sektörde çalışma koşullarının iyileştirilmesi, hem sosyal refah hem de ulusal verimlilik açısından stratejik bir öneme sahiptir. İkinci olarak, tekstil üretim tesisleri, bu çalışmanın odaklandığı iç ortam kalitesi parametrelerini (gürültü, hava kalitesi, aydınlatma) bir arada ve çeşitli seviyelerde barındıran karmaşık ortamlardır. İplik ve dikiş makinelerinden kaynaklanan gürültü, kesim sırasında ortaya çıkan lif ve tozlar ve kalite kontrol gibi hassas görevler için gereken özel aydınlatma ihtiyacı, bu sektörü bütünsel bir iç ortam kalitesi değerlendirmesi için ideal bir çalışma alanı haline getirmektedir. Son olarak, sektörün enerji yoğun yapısı, özellikle aydınlatma konusunda, temiz üretim ve enerji verimliliği potansiyelinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Endüstriyel işletmelerde yöneticiler genellikle üretimin verimliliği ve karlılığı üzerine odaklanırken, çalışanların çalışma ortamlarının kalitesini belirleyen unsurları gözden kaçırabilmektedir. Oysa ki çalışma ortamının kalitesi; İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG), iç ortam hava kalitesi ve iç ortam aydınlatma etkinliği gibi parametreler üzerinden doğrudan çalışan verimliliğini ve refahını etkilemektedir.

Bu tez kapsamında, bir tekstil endüstrisinin iç ortam kalitesinin temel parametreleri olan gürültü, aydınlatma ve iç ortam hava kalitesinin (CO₂ parametresi olarak) hem iş sağlığı ve güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik (temiz üretim) perspektifinden bütünsel olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. İş yerlerindeki fiziksel koşullar, çalışanların genel sağlığı, performansı ve iş güvenliği üzerinde doğrudan etkilere sahiptir. Bu çalışmanın temel hedefi, tekstil endüstrisi özelinde iç ortam fiziksel koşullarının mevcut durumunu nicel verilerle ortaya koymak, bu verileri ulusal ve uluslararası standartlarla karşılaştırarak potansiyel riskleri belirlemek ve özellikle aydınlatma sistemleri üzerinden enerji verimliliği ile temiz üretim odaklı iyileştirme olanaklarını somut önerilerle sunmaktır. Bu amaç doğrultusunda, aydınlatma sistemlerinin analizini kolaylaştıran pratik bir yazılım aracı da geliştirilmeye çalışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE TEKSTİL SEKTÖRÜNÜN DURUMU

Tekstil endüstrisi, tarih boyunca küresel ekonominin ve sosyal yaşamın şekillenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Günümüzde bu sektör, artan küreselleşme, dijital dönüşüm ve sürdürülebilirlik talepleriyle birlikte oldukça dinamik bir rekabet ortamına sahiptir. Bu küresel dinamikler içerisinde Türkiye, stratejik coğrafi konumu, köklü üretim tecrübesi ve esnek üretim kabiliyeti ile dünyanın önde gelen tekstil ve hazır giyim tedarikçilerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Türkiye İhracatçılar Meclisi'nin (TİM) açıkladığı 2024 yılı verilerine göre, hazır giyim ve konfeksiyon sektörü ile tekstil ve hammaddeleri sektöründe lider ülkeler arasında 5. sırada yer almaktadır (TİM, 2024) (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Dünya Tekstil ve Hazır Giyim İhracatında Lider Ülkeler (TİM, 2024).

Sıra	Ülke	İhracat Değeri (Milyar \$)	Küresel Pay (%)
1	Çin	325,4	33,9
2	Avrupa Birliği (27)	165,8	17,3
3	Vietnam	46,2	4,8
4	Bangladeş	44,5	4,6
5	Türkiye	31,5	3,3
6	Hindistan	32,1	3,3
7	Endonezya	14,9	1,5

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere Türkiye 2024 yılında gerçekleştirdiği 31,5 milyar dolarlık ihracat ile dünyanın en büyük tekstil ve hazır giyim ihracatçıları arasındaki yerini korumaktadır. Bu rakam, hazır giyim ve konfeksiyon sektörünün 19,2 milyar dolarlık ve tekstil ve hammaddeleri sektörünün 12,3 milyar dolarlık ihracatının toplamından oluşmaktadır (TİM, 2024). Bu performans, Türkiye'nin sektördeki küresel önemini ve rekabet gücünü kanıtlamaktadır. Pazarın genel dağılımı incelendiğinde, Çin'in tek başına pazarın üçte birinden fazlasını kontrol ettiği, geri kalan payın ise çok sayıda ülke arasında

bölüşüldüğü görülmektedir.

Sektörün bu ekonomik gücünün yanı sıra, insan ve çevre sağlığı üzerindeki etkileri de büyük önem taşımaktadır. Bu dönüşümün merkezinde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) ile çevresel sorunlar da yer almaktadır. Tekstil endüstrisi, doğası gereği bazı önemli riskler barındırmaktadır. Bu riskler alt başlıklar halinde incelenmiştir.

2.2. İŞLETMELERDE GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİ VE ÖNEMİ

Fabrikalardaki iç ortam gürültü kirliliği çalışanlar açısından önemli bir konudur. Endüstriyel iç ortamlardaki gürültü kirliliğinin geçmişi, fabrikaların ortaya çıkmaya başladığı Sanayi Devrimi'ne kadar uzanmaktadır. Makine ve üretim süreçlerindeki artış, bu tesislerde yüksek düzeyde gürültüye neden olmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte fabrikalardaki gürültü seviyeleri artmaya devam etmiş, işçiler ve çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olmuştur (Bronzaft, 2000). Fabrikalarda iç ortam gürültü kirliliği sadece çalışanların fiziksel ve zihinsel sağlığını değil aynı zamanda işyerinin genel verimliliği ve güvenliğini de etkileyebilmektedir. Yüksek düzeyde gürültü, iletişimi engelleyebilir, kaza riskini artırabilir ve iş tatmininde genel bir düşüşe neden olabilir. Olumlu bir perspektiften bakıldığında, fabrikalardaki iç ortam gürültü kirliliğinin ele alınması, çalışma koşullarının iyileştirilmesine, verimliliğin artmasına ve işçiler için daha sağlıklı ortamlar sunulmasına katkı sağlayabilir. Şirketler, ses izolasyon çalışmaları yürüterek, daha sessiz makineler kullanarak ve kulak koruma ekipmanlarının kullanımını sağlayarak çalışanlar için daha güvenli ve daha rahat bir ortam geliştirmektedirler (Job, 2012).

2.2.1. Gürültü Kirliliği

Gürültü, son çeyrek asırda büyük ölçüde insanların huzurunu ve işitme sağlıklarını olumsuz yönde etkileyen bir etken haline gelmiştir. Tanım olarak “gürültü”, insan sağlığına ve refahına geçici veya kalıcı zarar veren sesler veya "Hoş olmayan veya rahatsız edici hislere neden olan akustik bir olay veya istenmeyen ses grubu” olarak tanımlanabilir. Teknolojinin gelişmesi ve yaşam standartlarının hızla artmasıyla birlikte gürültüye neden olan kaynaklar ve bu kaynakların etki ettiği alanlar da hızla artmıştır. Kamu araçları, sayıları her geçen gün artan özel araçlar, işyerleri ve fabrikaların yanı sıra mutfaktaki elektrikli aletler, havalandırma üniteleri ve konforlu bir yaşam için kullanılan aletlerde insan sağlığını etkileyen gürültü kaynakları olmuşlardır. Bu sebeple “çevre

kirleticileri” arasında “gürültü kirliliği” kavramı da yerini almıştır (Çepel, 1998).

2.2.2. Gürültü Seviyeleri

Gürültü seviyesi sınıfları farklı gürültü seviyelerine göre "dB(A)" olarak 4 ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu gürültü yoğunluğu sınıfları gürültü rahatsızlığı ile canlılar arasında yer alan ekolojik ilişkilere de açıklık getirmektedir (Barner, 1983). Farklı gürültü seviyelerinin potansiyel riskleri Çizelge 2.2’de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Gürültü Seviyesi Sınıfları ve Potansiyel Etkileri

Seviye	Gürültü Şiddeti (dB(A))	Açıklamalar ve Etkiler
1	30 - 59	Genellikle zararsız kabul edilir. Konsantrasyon ve uyku üzerinde hafif rahatsızlıklara (45 dB(A) üzeri) neden olabilir.
2	60 - 89	Rahatsızlık hissi başlar. 85 dB(A) ve üzeri seviyelerde uzun süreli maruziyette işitme sağlığını koruyucu donanım gereklidir.
3	90 - 120	Kalıcı işitme kayıpları riskinin yüksek olduğu tehlikeli seviyedir. Bu seviyede korunmasız çalışmak ciddi hasarlara yol açar.
4	> 130	Ağrı eşiğinin aşıldığı seviyedir. Anlık maruziyet dahi kulak zarında yırtılma gibi fiziksel hasarlara neden olabilir.

2.3. GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİNİN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Endüstriyel firmalarda kullanılan makine, alet ve ekipmanların yüksek hızlarda (4000-7000 rpm) çalışması çalışanlar için tempolu ve hızlı bir iş hayatına neden olmaktadır. İşverenlerin özellikle sağlık ve güvenlik konularındaki ihmalleri çoğu zaman iş kazaları ve meslek hastalıkları gibi sorunlara yol açmaktadır. Mesleki işitme kaybı ve gürültüye bağlı sağlık sorunları, 8-12 saat gibi uzun çalışma saatlerinin gürültüye maruz kalma eylem değeri olan 85 dBA’i aştığı endüstrilerde en sık görülen mesleki rahatsızlıklardan biri haline gelmiştir (Ulukaya ve Çögenli, 2020).

Gürültü seviyelerinin daha yüksek olduğu tesisler:

1- Tekstil ve Dokuma Tesisleri

2- Madencilik Tesisleri

3- Kağıt Tesisleri

4- Metal İşleme Tesisleri

5- Havayolları ve Havacılık Faaliyetleri

6- Ahşap İşleme Tesisleri

7- Otomotiv Tesisleri

Kullanılan makinelerin gürültülü çalışması ve proseslerde (kaynakçılık, metal kesme, CNC işlemleri vb.) kullanılan hammadde ve aletlerin yapısından dolayı bu alanlarda üretim yapan tesislerde gürültü diğer sektörlerdeki tesislere göre daha fazla görülmektedir (Ulukaya ve Çögenli 2020). Gürültü kirliliği insanları fiziksel, fizyolojik, psikolojik ve çalışma yeteneği açısından olumsuz etkilemektedir. Gürültü rahatsızlıklarına neden olan gürültü yoğunluk seviyeleri Çizelge 2.3'te görülmektedir.

Çizelge 2.3. Gürültü Şiddetleri ve İnsan Sağlığına Olan Etkileri

Gürültü Şiddeti Db(A)	Gözlemlenen Etkiler	İzin Verilen Maksimum Maruz Kalma Süresi (Günlük)*
30	Uykusuzluk Başlangıcı	Sürekli maruziyette belirgin risk beklenmez
30-65	Öfke, Kızgınlık, Uyku Bozukluğu, Zihinsel Yorgunluk, Konsantrasyonun Yitirilmesi	Sürekli maruziyette belirgin risk beklenmez
65-90	Solunumun Hızlanması, Kalp Atışlarında Zayıflıklar, Baş Dönmesi ve Baş Ağrısı, Ani Gelen Refleksler	8 saate kadar (85 dB(A) için yasal sınır)
90-120	Sürekli Rahatsız Hissedilmesi, Fizyolojik Tepkilerde Artış	Süre önemli ölçüde kısadır (örn: 90 dB(A) için ~2-4 saat)
120-140	Dış Kulağın Ciddi Seviyede Zarar Görmesi, Dengede Bozukluklar	Anlık maruziyet dahi tehlikelidir
>140	Ciddi Derecede Beyin Tahribatı, Kulak Zarının Patlaması (>180 Db(A)).	Korunmasız kesinlikle maruz kalınmamalıdır

2.4. GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİNİN YÖNETMELİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Gürültü standartları ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Avrupa Birliği'nde bu konu, 2003/10/EC sayılı direktif ile düzenlenmiştir. Bu direktife göre, maruziyet eylem

değerleri ve sınır değerleri belirlenmiştir: En düşük maruziyet eylem değeri 80 dB(A) olup bu seviyede işveren çalışanları bilgilendirmekle yükümlüdür. En yüksek maruziyet eylem değeri 85 dB(A)'dır ve bu seviyede işverenin kulak koruyucu donanım temin etmesi ve denetlemesi zorunludur. Maruziyet sınır değeri ise kulak koruyucuların etkisi hesaba katılarak 87 dB(A) olarak belirlenmiştir ve bu değer hiçbir şekilde aşılamaz. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise Mesleki Sağlık ve Güvenlik İdaresi (OSHA) tarafından belirlenen standartlar geçerlidir. OSHA'nın yönetmeliğine göre, 8 saatlik zaman ağırlıklı ortalama (TWA) için izin verilen maruziyet limiti (PEL) 90 dB(A)'dır. Ancak OSHA, 85 dB(A)'i bir eylem seviyesi olarak kabul etmekte ve bu seviyeye ulaşıldığında işverenlerin bir "İşitme Koruma Programı" uygulamasını zorunlu kılmaktadır. Kabul edilebilir gürültü seviyesi (kabul edilebilir işitme kaybı), kişinin ses seviyesi düşük bir ortamda 1,5 metre mesafeden günlük konuşmaları anlamakta zorlandığı noktadır. Tipik olarak bu, 500, 1000 ve 2000 Hz'de ortalama 25 dB'ye karşılık gelir. Bu, Amerikan Oftalmoloji ve Kulak Burun Boğaz Akademisi'nin tanımıdır (Kryter, 1973).

Ülkemizde 30 Kasım 2022 tarih ve 32029 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren “Çevresel Gürültünün Kontrolü Yönetmeliği” uygulanmaktadır. Amaç, çevresel gürültünün firmalardan kaynaklanan gürültünün alıcılar üzerindeki zararlı etkilerinin önlenmesidir. Çevre ve insan sağlığına önem vermek ve çevresel gürültüyü azaltmak için gürültü kontrol önlemlerinin uygulanmasıdır. Bu yönetmelik, ev içi faaliyetlerden kaynaklanan gürültüyü, komşulardan kaynaklanan gürültüyü, çalışanların işyerlerinde maruz kaldıkları gürültüyü, ulaşım araçlarından kaynaklanan gürültüyü veya askeri bölgelerdeki askeri faaliyetlerden kaynaklanan gürültüyü kapsamamaktadır (Resmi Gazete, 2022). Bu yönetmeliğe göre çevresel gürültü sınır değerleri Çizelge 2.4.'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Çevresel Gürültü Düzeyi Sınır Değerleri

Gürültü Kaynağı	Ölçülen Parametre	Çevresel Gürültü Düzeyi		
		Gündüz	Akşam	Gece
Endüstri tesisleri, ulaşım kaynakları	$L_{Aeq,5min}$	65 dB(A)	60 dB(A)	55 dB(A)

Çizelge 2.4 (devamı). Çevresel Gürültü Düzeyi Sınır Değerleri

İşyerleri ⁽²⁾	$L_{Aeq,5min}$	Arka plan + 5 dB(A)	Arka plan + 3 dB(A)
Birden çok işyeri olması halinde ⁽³⁾	$L_{Aeq,5min}$	Arka plan + 7 dB(A)	Arka plan + 5 dB(A)
Tüm kaynaklar	L_{Cmax}	100 dB(C)	

20/6/2012 tarihli ve 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında yer alan işletmelerde çalışanların gürültüye maruz kalmaları sonucunda gerçekleşebilecek sağlık ve güvenlik risklerinden, özellikle işitme ile ilgili risklerden korunmaları için asgari gereklilikleri açıklayan 28.07.2013 tarihli ve 28721 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe giren “Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik” işletmelerde çalışanların gürültü maruziyet sınır değerini 87 dB(A) olarak belirlemiştir. Eğer maruziyet değeri, sınır değerden yüksek ise işverenler yeterli kulak koruyucu donanımların, çalışanlar tarafından kullanılmasını sağlamakla ve denetlemekle yükümlüdür (Resmi Gazete, 2013).

Türkiye'deki "Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik" ile uluslararası düzenlemeler karşılaştırıldığında, Ülkemizdeki mevzuatın büyük ölçüde Avrupa Birliği (2003/10/EC Direktifi) ile uyumlu olduğu görülmektedir. Türkiye’de belirlenen 80 dB(A) ve 85 dB(A) maruziyet eylem değerleri ile 87 dB(A) maruziyet sınır değeri, AB direktifindeki değerlerle birebir aynıdır. Buna karşın, ABD’deki OSHA standardı, izin verilen 8 saatlik maruziyet limitini (PEL) 90 dB(A) olarak belirleyerek Türkiye ve AB’ye kıyasla daha esnek bir yaklaşım sergilemektedir. Ancak OSHA’nın 85 dB(A) eylem seviyesi, koruyucu önlemlerin başlatılması açısından Türkiye ve AB ile benzer bir noktada buluşmaktadır.

2.5. İŞLETMELERDE İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ VE ÖNEMİ

İç ortam hava kalitesi (İOHK) (IAQ), özellikle binada bulunanların sağlığı ve konforu göz önünde bulundurularak binalardaki ve çevresindeki hava kalitesini ifade etmektedir. Tarihsel olarak ticari ortamlarda iç ortam hava kalitesi büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Ancak iç ortam hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkilerine ilişkin araştırmaların ve

farkındalığın artmasıyla birlikte şirketlerde iç ortam hava kalitesinin iyi tutulmasının gerekliliği belirlenmiştir. Düşük iç hava kalitesi, çalışanlarda solunum sorunları, alerjiler ve çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilir (Jarrahi vd., 2024). Bu durum, çalışanlarda devamsızlığa, daha düşük üretkenliğe ve daha yüksek sağlık harcamalarına yol açabilir. Öte yandan, iç ortam hava kalitesinin iyi düzeyde tutulması, daha sağlıklı ve daha üretken bir iş gücüne destek olmaktadır (Sundell, 2004).

İç ortam hava kalitesini ön planda tutan şirketler, çalışanları için daha konforlu ve elverişli bir çalışma ortamı geliştirebilir. Şirketler, düzenli hava kalitesi değerlendirmeleri, yeterli havalandırma sistemleri ve hava temizleme cihazlarının kullanımı gibi önlemleri uygulayarak çalışanlarının sağlıklı ve güvenli bir ortamda çalışmasını sağlayabilmektedirler. İyi iç ortam hava kalitesini korumanın faydalarına rağmen, işletmeler etkili hava kalitesi yönetimi stratejilerini uygulamada zorluklarla karşılaşabilirler. Bu zorluklar arasında hava kalitesi izleme sistemlerinin uygulanmasının maliyeti, havalandırma sistemlerinin düzenli bakım ihtiyacı ve eski binalarda iç ortam hava kalitesi sorunlarıyla baş etmenin karmaşıklığı yer almaktadır. Ancak doğru stratejiler ve kararlılıkla şirketler bu zorlukların üstesinden gelebilir ve çalışanları için daha sağlıklı bir iç ortam sağlayabilirler (Persily, 2007).

2.5.1. İç Ortam Hava Kalitesi Parametreleri

İç ortamda geçirilen sürenin artması nedeniyle iç ortam hava kalitesi dünya çapında önem taşımaktadır. 1992 yılında Dünya Bankası, iç ortam hava kirliliğini geliştirmekte olan ülkeler için en önemli dört çevre sorunlarından biri olarak tanımlamıştır. İç ortam hava kirliliği iki temel kaynaktan gelmektedir:

1. İç ortamdaki kimyasallardan ve faaliyetlerden kaynaklanan kirlilik
2. Dış ortamdan iç ortama akan kirleticilerden kaynaklanan kirlilik (ASRAE, 1997).

Sürekli değişen çeşitli faktörlerin etkileşimi sonucu oluştuğu için kesin olarak tanımlanamayan iç ortam hava kalitesine “Normal koşullarda belli karışımlara sahip olan ve içinde insan sağlığı için zararlı madde içermeyen hava” olarak tanımlanır. ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning) 62-1989 ve 2001 standardı ise “kabul edilebilir iç hava kalitesi” olarak isimlendirilen iç hava kalitesini, “içinde, bilinen kirleticilerin konsantrasyonlarının, yetkili kuruluşlar tarafından belirlenmiş zararlı düzeylerde bulunmadığı ve bu hava içinde bulunan insanların %80 veya daha üzerindeki oranın havanın kalitesiyle ilgili herhangi bir memnuniyetsizlik

hissetmediği havadır” şeklinde ifade etmektedir (ASRAE, 1997).

İç ortamdaki hava kalitesini düşüren ve kirleten zararlı maddeler ancak farklı gruplara ayrılarak tanımlanabilmektedir. İç ortam hava kalitesini bozan kirletici grupları şu şekilde sıralanabilir.

1. Solunan havadaki karbondioksit miktarı (İnsanların ve canlıların nefes alması ve yanma reaksiyonları nedeniyle)
2. Koku (insan kaynaklı)
3. Mikroorganizmalar (çevre ve insan kaynaklı)
4. Nem (yemek pişirme gibi çevre ve insan kaynaklı)
5. Radon gazı (toprak kaynaklı)
6. Organik buharlar (kullanılan eşyalardan ve bina malzemelerinden kaynaklı)
7. Toz (Çevre ve kullanılan eşyalardan kaynaklı)
8. Alerjenlere maddeler ve organizmalar (çevre kaynaklı)
9. Sigara dumanı (insan kaynaklı)
10. Diğer kaynaklar

İç ortam havasını kirletici bir madde olan CO₂, dış ortamdaki havada çok az miktarda bulunur. Ancak miktarı ve değişkenliği nedeniyle esansiyel bir gazdır. Dış ortamdaki CO₂'nin ana kaynakları insanlar, fabrika ve ev gibi binaların bacaları, volkanizma ve doğal maden sularıdır. Fosil yakıtların enerji amaçlı kullanımı CO₂ miktarını %80 oranında artırmaktadır. Geri kalanı ise canlıların solunumu ve organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu oluşur. Son dönemde ormansızlaşma nedeniyle atmosferdeki karbondioksit miktarı da önemli ölçüde artmıştır ve bu da çevredeki CO₂ kullanımını önemli ölçüde etkilemektedir. İç ortamdaki karbondioksitin temel kaynakları sızdıran bacalar, kazanlar, odun sobaları, yanan yüzeyler, garaj egzozu ve sigara dumanı olmasına rağmen mevcut CO₂ seviyeleri çok daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. Kapalı ortamda insan sayısı artmakta ve yeterli havalandırma sağlanamamaktadır. Dış ortamdaki karbondioksit miktarı 300-400 ppm'dir. İşyerlerinde izin verilen uluslararası maksimum CO₂ konsantrasyonu 5000 ppm'dir. Ancak günümüzde kapalı ortamlarda 1.000 ppm seviyelerine ulaşıldığında orada yaşayanlardan şikâyetlerin arttığı gözlemlenmiştir. EPA ve WHO, CO₂ için 1000 ppm'i geçmeyecek

şekilde bir üst sınır belirlemiştir. CO₂'nin neden olduğu sağlık etkileri arasında baş ağrısı, iştah kaybı, göz, burun ve boğaz tahrişi ve üst solunum yolu tahrişi yer alır (ASRAE, 1997).

Bu tez çalışmasında, iç ortam hava kalitesini değerlendirmek için temel parametre olarak karbondioksit (CO₂) konsantrasyonu seçilmiştir. Bu seçimin temelinde, CO₂'nin kapalı mekanlardaki havalandırma yeterliliğinin en yaygın kabul gören göstergesi olması yatmaktadır. Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği (ASHRAE) tarafından yayımlanan ASHRAE Standardı 62.1 gibi uluslararası standartlar, insan kaynaklı kirleticilerin (bioeffluents) kabul edilebilir seviyelerde tutulması için CO₂'yi bir vekil (proxy) veya indikatör olarak kullanır (ASHRAE, 2019).

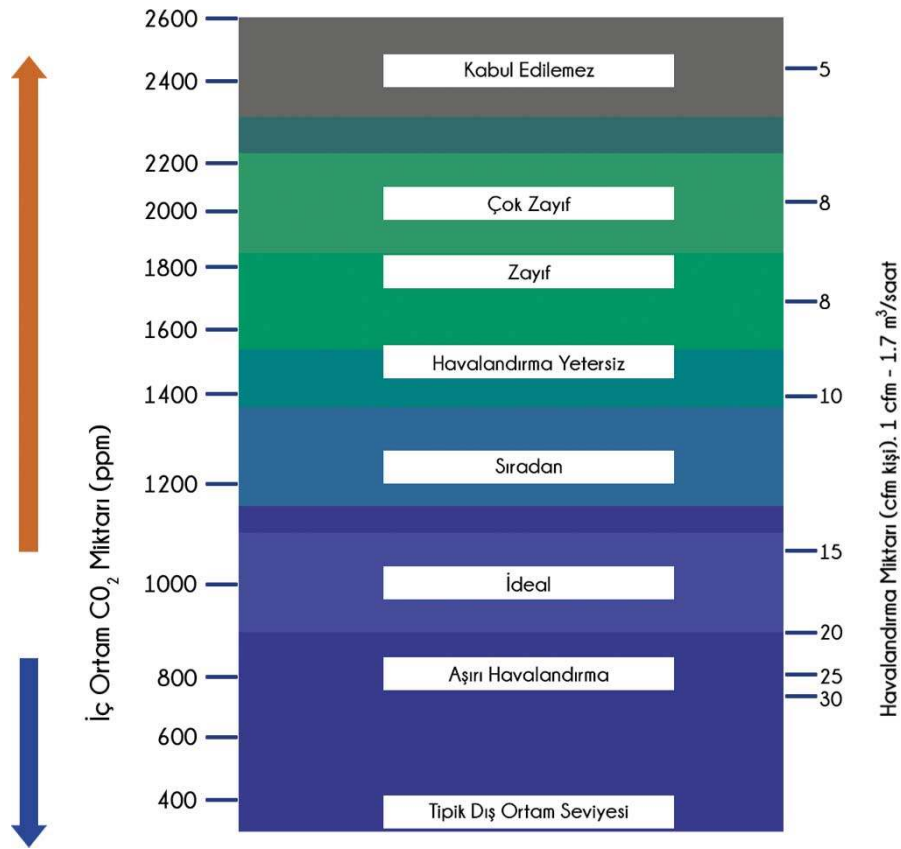
Ortamdaki CO₂ seviyeleri, doğrudan insan metabolizmasının bir ürünü olduğundan, kişi yoğunluğu ile havalandırma oranı arasındaki dengeyi yansıtır. Yüksek CO₂ seviyeleri (genellikle 1000 ppm üzeri), havalandırmanın yetersiz olduğunu ve ortamda sadece CO₂'nin değil, aynı zamanda insan kaynaklı diğer uçucu organik bileşiklerin ve biyo-aerosollerin de birikme potansiyeli taşıdığını gösterir (ASHRAE, 2019).

Tekstil endüstrisinde Partikül Madde (PM_{2.5}, PM₁₀) gibi kirleticiler proses kaynaklı (lif, toz vb.) olup önemli mesleki maruziyet riskleri oluştursa da, bu çalışma öncelikli olarak genel çalışan konforu ve temel sağlık koşullarıyla doğrudan ilişkili olan havalandırma etkinliğini belirlemeyi amaçladığından, CO₂ ölçümleri çalışmanın odağı olarak belirlenmiştir.

2.5.2. İç Ortam Hava Kalitesinin Yönetmelik Açısından Değerlendirilmesi

Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) bir parçası olan İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı'nın (OSHA) iç mekan hava kalitesini ölçmek için genel bir standardı yoktur. Hava Kalitesi İndeksi (AQI), Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından oluşturulan standart değerlerden ve ulusal sınırlara dönüştürülmüş değerlerden oluşur. Kullandığımız Ulusal Hava Kalitesi Endeksi, EPA'nın beş temel kirletici parametresinden oluşan Hava Kalitesi Endeksi incelenerek oluşturulmuş bir endekstir. Hava kalitesi endeksi, partikül madde (PM₁₀), karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO₂), nitrojen dioksit (NO₂) ve ozon (O₃) için hesaplanır (Bulut, 2012). EPA ayrıca iç ortam hava kalitesini ölçmek için standartlar oluşturmuştur. İç ortam hava kalitesini, iç sıcaklığı (T), bağıl nemi (RH), hava hızını, karbondioksiti (CO₂), solunabilir asılı parçacıkları (PM), uçucu organik bileşikleri (VOC), nitrojen oksitleri (NO_x), karbon monoksiti (CO), ozon (O₃), kükürt dioksit (SO₂),

radon, formaldehit (HCHO) ve bakteri sayısı gibi parametrelerle değerlendirilir. "ASHRAE 2004 standartlarını" kullanan, Türkiye'nin de üyesi olduğu bir dernektir (Walterton vd., 1989). 1000 ppm'lik CO₂ konsantrasyonu, iç ortam hava kalitesinin temel prensibi olarak kabul edilir. CO₂ miktarı bu seviyeden düşükse iç ortam havası kabul edilebilir iç hava kalitesindedir. 1000 ppm CO₂ miktarına Pettenkofer sayısı da denir. 1000 ppm'in üzerindeki karbondioksit seviyesi, yeterli iç ortam havası elde etmek için havalandırmanın yeterli olmadığını gösterir. 600 ppm'nin altındaki karbondioksit seviyesi havalandırmanın azaltılabileceğini ve enerji tasarrufu yapılabileceğini gösterir. Şekil 2.1. de CO₂ seviyesi ile havalandırma arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.1. CO₂ ve Havalandırma İlişkisi (Onur Enerji, 2025).

2.6. İŞLETMELERDE İÇ ORTAM AYDINLATMA ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

Tarihsel olarak, işletmelerde iç ortam aydınlatmasının önemi, fabrikalarda ve depolarda üretim seviyelerini korumak için yapay aydınlatmanın zorunlu hale geldiği Sanayi Devrimi'ne kadar uzanmaktadır. Akkor ampulün 19. yüzyılın sonlarında Thomas Edison tarafından icadı, iç ortam aydınlatmasında yeni bir çağ açarak onu ticari kullanım için

daha erişilebilir hale getirmiştir. Bu yenilik, işletmelerin çalışma saatlerini uzatmasının ve verimliliği artırmasının önünü açarak önemli bir ekonomik büyümeye yol açmıştır. İşletmelerde iç ortam aydınlatma etkinliğinin etkisi çok yönlü olup, operasyonları ve çalışan performansını çeşitli yönlerden etkilemektedir. Yeterli aydınlatma, rahat ve teşvik edici bir çalışma ortamı oluşturabilir, yorgunluğu azaltabilir ve konsantrasyon seviyelerini iyileştirebilir. Buna karşılık zayıf aydınlatma, göz yorgunluğuna, baş ağrılarına ve üretkenliğin azalmasına neden olabilir; bu da ticari ortamlarda uygun aydınlatma tasarımının önemini vurgulamaktadır (Boyce, 2014). İşletmelerde iç ortam aydınlatmasının geleceğinin LED teknolojisindeki gelişmeler, akıllı aydınlatma sistemleri ve sürdürülebilir tasarım uygulamalarındaki gelişmelerle şekillenmesi muhtemeldir. LED aydınlatma, maliyetleri ve çevresel etkiyi azaltan enerji tasarruflu çözümler sunarken, akıllı aydınlatma sistemleri, optimum performans için uzaktan kontrole ve aydınlatma ayarlarının özelleştirilmesine olanak tanımaktadır. Gün ışığı hasadı ve sensör tabanlı aydınlatma kontrolleri gibi sürdürülebilir tasarım uygulamaları, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik konusunda artan endişelere yanıt olarak ilgi görmeye devam edecektir (Veitch, 2001). Özellikle tarımsal uygulamalarda da aydınlatma etkinliğinin değerlendirildiği çalışmalar da son dönemlerde artmaya başlamıştır (Penuela vd., 2024).

İşletmelerde iç ortam aydınlatmasının etkinliğine ilişkin perspektifler açısından, farklı sektörler ve çalışma ortamları için en uygun aydınlatma koşulları konusunda farklı görüşler bulunmaktadır. Bazıları odaklanmayı teşvik etmek için parlak, tekdüze aydınlatmayı savunurken, diğerleri rahat ve sakinleştirici bir atmosfer yaratmak için daha yumuşak, daha doğal aydınlatmayı savunmaktadır. Önemli olan yönetmeliklerdeki sınır değerler, görev gereksinimleri, kişisel tercihler ve enerji verimliliği gibi faktörleri dikkate alarak işletmenin ve çalışanlarının özel ihtiyaçlarını karşılayan bir denge bulmaktır (Veitch, 2001).

2.6.1. Aydınlatma

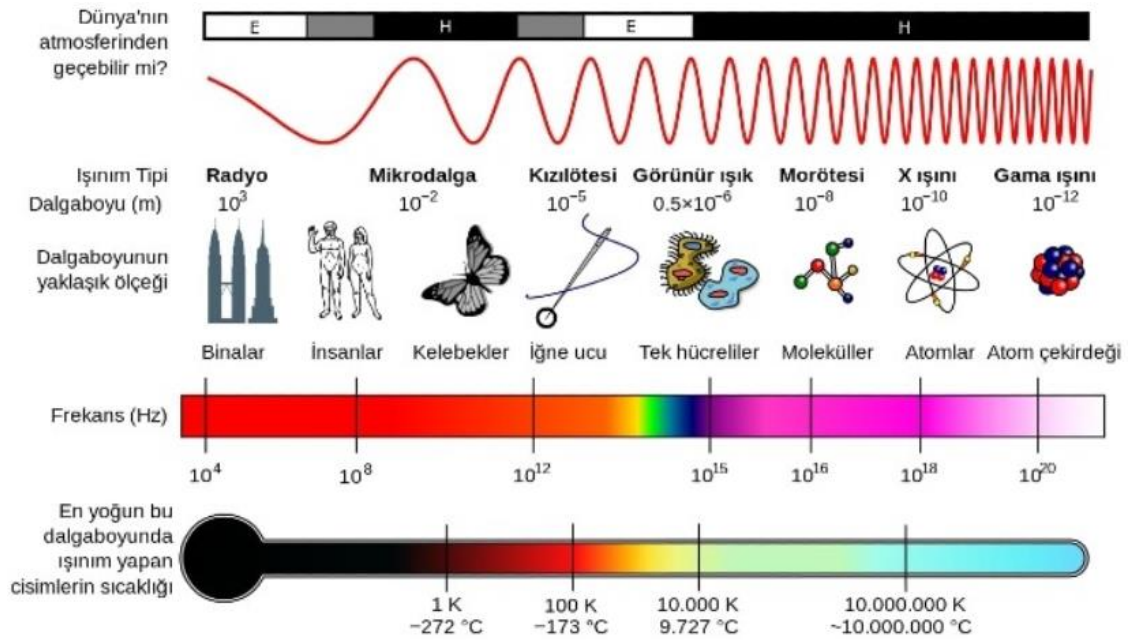
Işık, göz, nesne ve kişi arasındaki ilişkide en önemli unsurdur. Işık etrafımızdaki her şeyi görmemizi sağlar. CIE (Uluslararası Işık Komisyonu) ışığı şu şekilde tanımlamaktadır:

1. Görme organları ile gerçekleştirilen algı duyu faaliyetlerinin tümü,
2. Görme organlarını tetikleyen ışınım,

olarak tanımlanır ve görsel algılama, ışık ve görme ile oluşur (Ünver, 1984).

Güneş, yıldızlar ve aydınlatma gereçleri ışık kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Bunların dışında kalan cisimlerin görünür olabilmesi için herhangi bir ışık kaynağından yeterli miktarda ışık alması gerekir. Işık yaymayan bir nesne belirli şartlar altında oluşturulabilir. Örnek olarak fenerlerde ve lambalarda olduğu gibi ışık kaynağına dönüştürülebilir. Işık bu kaynaklardan açığa çıkan, doğrusal olarak yayılan bir enerji türüdür (Şirel, 1992).

İnsanlar elektromanyetik spektrumun oldukça düşük bir bölümünü görebilmektedir. Bu bölüm mordan kırmızıya kadar değişen renklerden oluşmaktadır. Dalga boylarına bağlı olarak kırmızı en uzun dalga boyuna, mavi-mor ise en kısa dalga boyuna sahip ışık renklerine karşılık gelmektedir (Şekil 2.2.). Renkler, farklı dalga boylarında bulunan ışığın canlı beyninde yarattığı anımsamalardır. Işık kavramı ve renk kavramı ortak paydada değerlendirilmelidir. Görsel algının temel unsurları nesneler, ışık ve görsel algılamayı gerçekleştiren görsel organımız olarak tanımlanan gözdür (Şirel, 1992).



Şekil 2.2. Elektromanyetik Tayf (Türkiye Uzay Ajansı, 2021),

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun tanımına göre aydınlatmanın temel amacı "nesnelerin ve çevrenin yeterli görünürlüğünü sağlamak için ışık kullanmaktır". Aydınlatmanın amacı yukarıda tanımlandığı gibi herhangi bir cismin veya ortamın görsel algısını sağlayabilmektir. Aydınlatma tasarımı yaparken dikkate alınması gereken temel kriterler; aydınlatma miktarı, aydınlatma kalitesi, parlaklık ve yüzey özellikleri. Aydınlatma miktarı aydınlatma düzeyiyle ilgili bir kavramdır. Aydınlatma kalitesi,

aydınlatmanın dağılımını, ışığın yönünü, aydınlatmada oluşan gölgeleri ve ışığın rengini ifade etmektedir (Şirel,1992).

Hangi alanın aydınlatıldığı, nasıl bir aydınlatma kullanıldığı, nesnenin veya ortamın fiziksel özellikleri, renkleri, dokusu, hareketli mi yoksa sabit mi olduğu, ortamın içinde mi yoksa dışında mı olduğu, mimarisi, aydınlatmanın miktarını ve dolayısıyla kalitesini belirler. Aydınlatma teknolojisi, tüm bu değişkenler göz önünde bulundurularak aydınlatmanın nasıl bir şekilde yapılması gerektiğini belirleyen teknoloji dalıdır. Dolayısıyla aydınlatma teknolojisi, görsel algının optimum şartlarda oluşmasını sağlamakla birlikte, bunun insan doğasına uygun, inşaat maliyetleri ve işletme maliyetleri açısından en ucuz çözümle mimariye uygun tatmin edici sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır (Şirel, 1991).

Kaliteli ve verimli bir aydınlatma, aydınlatılan alıcı ortama yeterli miktarda ışık gönderilmesiyle mümkündür. Kullanılmayan alanların aydınlatılması ve kullanılan alanların aşırı aydınlatılması enerji israfına neden olurken, yetersiz aydınlatma da ciddi güvenlik ve konfor sorunları oluşturabilmektedir

Özetle iyi aydınlatma aşağıdaki avantajları sunar.

1. Görme gelişir.
2. Gözün sağlığının korunması sağlanır.
3. İş kazalarında azalma sağlar.
4. Ortamda gerçekleştirilen faaliyetlerin verimliliği artar.
5. Finansal potansiyeli artırır.
6. Ortam ve birey güvenliği sağlanır.
7. Konforlu ortamlar oluşturulur.

Aydınlatma tekniği ve teknolojilerinde; aydınlatma ve ışık parametrelerine özel ölçüm, hesaplama ve değerlendirmelerin yapılabilmesi için aşağıda bulunan bazı temel değerler kabul edilmiştir.

2.6.2. Işık Akısı

Işık üretici tarafından 1 saniyelik zaman diliminde yayılan ışınım akısı enerjisine, üretcin "ışık akısı enerjisi" denmektedir ve (Φ) ile gösterilmektedir. Bu değer ışık üretcinin ışık gücünü gösterir. Birimi "lümen (lm)" dir. Işık akısı, bir ışık kaynağının

saniyede yaydığı toplam ışık miktarını ifade eden bir terimdir. İnsan gözünün hassasiyetine göre ışık kaynağının saniyede yaydığı enerjidir (Güler ve Onaygil, 2016; Yüksek ve Kaderoğlu, 2017). Çizelge 2.5.'te bazı ışık kaynaklarından yayılan ışık akısı miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı Işık Kaynaklarından Yayılan Işık Akısı Miktarları (Güler ve Onaygil, 2016).

Kaynak	Enerji	Akı
Bisiklet farı	3W	30 lm
Akkor flamanlı lamba	74 W	900 lm
Florasan lamba	65 W	5000 lm
Yüksek basınçlı sodyum buh. lamba	100 W	10000 lm
Alçak basınçlı sodyum buh. Lamba	180 W	32000 lm
Yüksek basınçlı cıva buh. Lamba	1000 W	58000 lm
Metal halojen lamba	2000 W	190000 lm
LED Lamba (Modern Tip)	10-15 W	2000 lm

2.6.3. Işık Şiddeti

Bir ışık kaynağının tek açıda ve belirli bir yönde yaydığı ışık akısının yoğunluğuna, ışık kaynağının "ışık şiddeti" denmektedir. Işık şiddeti "I" harfiyle gösterilmektedir. Birimi "Candela (cd)"dir (Yüksek ve Kaderoğlu, 2017).

2.6.4. Parıltı Lüminans

Bir ışık kaynağının veya kendi başına ışık yayan veya ışık kaynaklarından alınan ışığı yansıtan, dağıtan veya yayan bir cihazın yüzey biriminin yaydığı ışık gücüne, onun ışık şiddeti (parlaklık) denmektedir. "L" harfiyle gösterilmektedir. Birimi "Stilb (sb)", "cd/cm²"dir. Daha küçük birimi ise "Apostilb (asb)" dir. Çevremizdeki nesneler yalnızca belirli yüzeylerdeki parlaklıklarıyla görüntü oluştururlar. Gözle en kolay görülebilen yüzeyin parlaklığı yaklaşık olarak 200-600 asb değerindedir. Gözün kontrast duyarlılığı ise 200-10.000 asb aralığındadır (Güler ve Onaygil, 2016).

2.6.5. Aydınlık Düzeyi

Aydınlık seviyesi, birim yüzeye düşen ışık akısı miktarıdır. Işık kaynağından yüzeye

gelen ışık akısı yüzey alanına (m²) bölünerek o yüzeyin m² cinsinden ışık seviyesi elde edilir ve (E) olarak gösterilmektedir. Birimi "lüks"tür (Yüksek ve Kaderoğlu, 2017). Çizelge 2.6.'da aydınlık düzeylerine ilişkin örnek değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.6. Aydınlık Düzeylerine İlişkin Örnek Değerler (Güler ve Onaygil, 2016).

Yazın öğle saatler (bulutsuz bir hava)	100000 lx
Yol aydınlatması	5-30 lx
Açık bir gecede dolunay	5-25 lx

Aydınlatmada kullanılmakta olan ışığın kaynağına ve aydınlatılması amaçlanan ortamın özelliklerine göre birçok farklı aydınlatma türü bulunmaktadır. Kullanılmakta olan ışık kaynağına göre doğal aydınlatma ve yapay aydınlatma, aydınlatılacak ortama göre ise iç aydınlatma ve dış aydınlatma kavramları bulunmaktadır. Doğal aydınlatmada kaynak güneş ışığıdır. Dolayısıyla bu tür aydınlatmalarda temel amaç doğadan gelen ışığın etkin bir şekilde kullanılmasıdır. Yapay aydınlatmada elektrikli ışık kaynakları kullanılır. İç aydınlatmada temel amaç kapalı ortamların aydınlatılmasının sağlanmasıdır. Evler, sinema salonları, hastaneler, işyerleri gibi ortamların aydınlatılması iç aydınlatma kapsamındadır. Dış aydınlatmanın hedef alanı ise açık ortamlar olup yollar, parklar, umumi alanlar ve araç park alanları gibi açık alanların aydınlatılmasını kapsamaktadır (Özkaya, 2000). Bir endüstride veya ofiste uygun aydınlatma işin yapımını kolaylaştırır. Parlama ve gölgeler olmadan yeterli aydınlatma, göz yorgunluğunu ve baş ağrılarını azaltır. Hareketli makina aksamalarının yeterli aydınlatılması yaşanabilecek iş kazalarının önüne geçilmesi hususunda yardımcı olmaktadır. Verimli bir aydınlatma sistemi aynı zamanda aydınlık ortamdan karanlık ortama geçişte meydana gelen "geçici körlük" nedeniyle meydana gelen kazaları da azaltma potansiyelini azaltmaktadır (Özkaya, 2000; Özdemir, 2020).

2.7. AYDINLATMA VERİMİNİN YÖNETMELİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Türkiye’de “İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik” ine göre iş yeri aydınlatmasının değerlendirilmesinde TS EN 12464

standart serisi esas alınmaktadır. 12464-1 numaralı standart ilk kez, Avrupa Standartlar Komitesi'nin Işık ve Aydınlatma başlıklı 169 Numaralı Teknik Komitesinin (CEN/TC 169) 2 numaralı çalışma grubu (WG2) tarafından oluşturulmuş ve 2002 yılında yayımlanmıştır. Standardın, birinci revizyonu 2011, ikinci revizyonu 2021 yılında yapılmıştır. Üye ülkelerin Şubat 2022'e kadar onay vermeleri istenmiştir. Ülkemiz adına üye kuruluş olan TSE, 30 Eylül 2021 de standardı onaylamış ve "ulusal standart" olarak yayımlanmıştır (TS EN 12464-1 2021).

Standart; İşyerinin bölümlerine ve yapılan işin niteliğine göre parlaklık dağılım değerini, parlaklık sınırını ve rengin görsellik değerini belirlemiştir. Bu standart iş sağlığı ve güvenliği mevzuatını kapsamamaktadır (TS EN 12464-1 2021). Standartta belirtilen aydınlatma kriterleri; Yansıtma Oranı (%), Aydınlık Düzeyi (Lx), Kamaşma (UGRL), Doğrudan Aydınlatma, Dolaylı Aydınlatma, Işığın Renk Sıcaklığı(K), Renksel Geri Verim (CRI) ve Gün Işığdır (TS EN 12464-1 2021). Çizelge 2.7., ve Çizelge 2.8. 'de TS EN 12464-1 2021 standardı kapsamında tekstil sektörü ve tesis içi alanlar için minimum aydınlatma düzeyleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.7. Tekstil Endüstrisi İçin Minimum Aydınlatma Düzeyleri.

Alan / Faaliyet Kategorisi	Aydınlatma Düzeyi (Lx)
Depolama Alanları ve Kaba İşlemler	200
Genel Makine Operasyonları ve Hazırlık	300
Ana Üretim Prosesleri	500
Detay ve Hassasiyet Gerektiren İşler	750
Kalite Kontrol ve Renk Değerlendirme	1000

Çizelge 2.8. Tesis İçi Gezinme Alanları ve Tuvalet Temizlik İlk Yardım Bölümleri İçin Minimum Aydınlatma Değerleri.

Alan / Faaliyet Kategorisi	Aydınlatma Düzeyi (Lx)
Koridorlar ve Geçiş Yolları	100
Merdivenler ve Yükleme Alanları	150

Çizelge 2.8. (devamı) Tesis İçi Gezinme Alanları ve Tuvalet Temizlik İlk Yardım
Bölümleri İçin Minimum Aydınlatma Değerleri.

Soyunma Odaları, Tuvaletler ve Dinlenme Alanları	200
İlk Yardım ve Tıbbi Müdahale Odaları	500

2.8. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Endüstriyel ortamlarda iç ortam kalitesi (İOK) parametrelerinin çalışan sağlığı, konforu ve verimliliği üzerindeki çok boyutlu etkileri, akademik literatürde geniş bir yer tutmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle İOK'nin belirli bileşenlerine veya bunların teknolojik iyileştirme potansiyellerine odaklanarak, konunun farklı yönlerini aydınlatmaktadır.

Literatürün önemli bir kısmı, yetersiz İOK koşullarının operasyonel verimlilik ve iş sağlığı üzerindeki doğrudan olumsuz etkilerini ortaya koymaktadır. Örneğin, Çakır ve Aytin (2019) tarafından bir metal işleme fabrikasında yapılan çalışma, yüksek gürültü seviyelerinin çalışanların bilişsel yükünü artırarak dikkat dağınıklığına, yetersiz aydınlatmanın ise görsel yorgunluğa ve dolayısıyla üretimdeki hata oranlarında artışa neden olduğunu göstermiştir.

Özkahraman ve Erdem (2021), bir mobilya atölyesinde ahşap tozları ve uçucu organik bileşik (VOC) konsantrasyonlarının solunmasının, "hasta bina sendromu" belirtilerine ve uzun vadede kronik solunum yolu hastalıkları riskine yol açtığını vurgulamıştır. Bu çalışmalar, temel İOK parametrelerinin kontrol altında tutulmasının bir lüks değil, temel bir iş sağlığı ve güvenliği gerekliliği olduğunu kanıtlamaktadır.

Diğer bir araştırma kolu ise İOK sistemlerinin, özellikle aydınlatma ve havalandırmanın, temiz üretim ve enerji verimliliği perspektifinden optimizasyonuna odaklanmaktadır. Garg ve Kumar (2017), Hindistan'daki bir tekstil fabrikasında çalışmada, geleneksel floresan aydınlatma sisteminin modern LED armatürlerle değiştirilmesi (retrofit) senaryosunu incelemiş ve bu basit teknolojik dönüşümün, aydınlatma kaynaklı enerji tüketiminde %65'e varan bir tasarruf potansiyeli taşıdığını hesaplamıştır. Teknolojik iyileştirmeyi bir adım öne taşıyan Colmenar-Santos vd. (2016) ise akıllı sensörler ve otomasyon sistemleri kullanarak aydınlatma ve havalandırma (HVAC) sistemlerinin entegre kontrolü ile sadece enerji tasarrufu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda ortam koşullarını anlık ihtiyaçlara göre dinamik olarak ayarlayarak çalışan konforunu da maksimize etme potansiyelini vurgulamıştır. Bu tür çalışmalar, endüstriyel sürdürülebilirliğin temelini oluşturan yenilenebilir enerji entegrasyonu için de bir zemin hazırlamaktadır; zira enerji verimliliği ile azaltılan talep, güneş enerjisi gibi yerinde üretim çözümlerinin fizibilitesini artırmaktadır (Kalogirou, 2013).

Bununla birlikte, literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı ya tek bir İOK parametresine odaklanma ya da enerji verimliliğini çalışan verimliliğinden ayrı bir konu olarak ele alma eğilimindedir. Frontczak ve Wargocki (2011) tarafından yapılan kapsamlı bir derleme, gürültü, aydınlatma ve hava kalitesi gibi faktörlerin bütünleşik etkilerinin, çalışanların bilişsel performansı üzerinde tekil etkilerinden daha büyük bir kümülatif etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Bu noktada, Yau ve Chew (2014) yaptıkları çalışmada, iç ortam kalitesinin tüm parametrelerinin bütünsel ve sinerjik bir yaklaşımla ele alınması gerektiğinin altını çizerek önemli bir boşluğa işaret etmiştir.

Bu çalışmaların ortaya koyduğu çerçeve incelendiğinde, her birinin endüstriyel iç ortam kalitesinin değerli bir boyutuna odaklandığı görülmektedir. Ancak bu çalışmalar genellikle teorik analizler veya spesifik vaka çalışmaları düzeyinde kalmakta ve elde edilen bulguları endüstri profesyonellerinin kolayca kullanabileceği pratik araçlara dönüştürme konusunda eksik kalmaktadır. Bu tez çalışması ise; gürültü, aydınlatma ve CO₂ parametrelerini bir arada ve bütünsel bir yaklaşımla ele alması, bu ölçümleri endüstride nadiren kullanılan mekansal dağılım haritalarıyla (ısı haritaları) görselleştirmesi, aydınlatma verimliliğini temiz üretim ve yenilenebilir enerji potansiyeli ile doğrudan ilişkilendirmesi ve en önemlisi, tüm bu analizleri pratikleştirmek amacıyla kullanıcı dostu bir karar destek yazılımı (LEAF) geliştirmesi yönleriyle literatürdeki mevcut çalışmalardan ayrılarak özgün ve uygulamaya dönük bir katkı sunmaktadır.

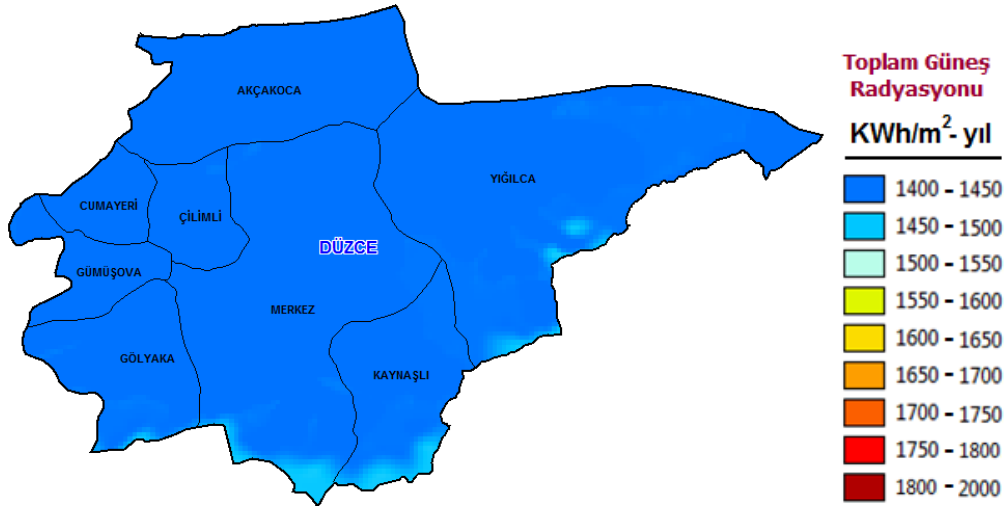
2.9. TEMİZ ÜRETİM VE YENİLENEBİLİR ENERJİ POTANSİYELİ

Sürdürülebilirlik hedeflerinin küresel ölçekte önem kazandığı günümüzde, endüstriyel işletmelerin çevresel etkilerini azaltma ve kaynak verimliliğini artırma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, Temiz Üretim yaklaşımı, geleneksel "kirlilik kontrolü" veya "boru sonu arıtım" felsefesinin ötesine geçerek, kirliliği kaynağında önlemeyi hedefleyen bütünleşik ve önleyici bir çevre stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından tanımlandığı üzere temiz üretim, "üretim süreçlerine, ürünlere ve hizmetlere, insan ve çevre üzerindeki riskleri azaltmak amacıyla, bütünleşik ve önleyici bir çevre stratejisinin sürekli olarak uygulanmasıdır" (UNEP, 2021). Bu yaklaşım, sadece atık yönetimi değil, aynı zamanda hammadde, su ve enerji gibi kaynakların daha verimli kullanılmasını da kapsar.

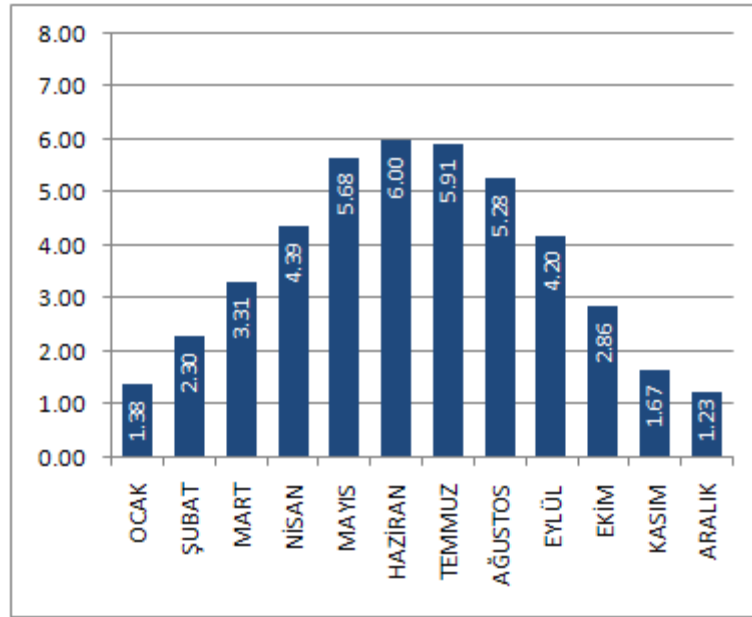
Endüstriyel tesislerde enerji tüketimi, hem işletme maliyetleri hem de karbon ayak izi açısından en kritik kalemlerden biridir. Bu nedenle, enerji verimliliği uygulamaları temiz üretimin temel taşı oluşturur. Özellikle aydınlatma, ısıtma, soğutma ve motor sistemleri gibi alanlarda yapılacak teknolojik iyileştirmeler, önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlama potansiyeline sahiptir. Örneğin, verimsiz aydınlatma armatürlerinin modern ve enerji verimli alternatiflerle (örn: LED) değiştirilmesi, doğrudan enerji tüketimini ve dolaylı sera gazı salımlarını azaltan bir temiz üretim uygulamasıdır.

Temiz üretim stratejisinin bir diğer tamamlayıcı unsuru ise enerji ihtiyacının fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltarak yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasıdır. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, endüstriyel tesisler için en uygulanabilir ve ölçeklenebilir seçeneklerden biri olarak dikkat çekmektedir. Fotovoltaik (PV) sistemler aracılığıyla güneş ışığından doğrudan elektrik üretimi, tesislerin kendi enerjisini temiz bir şekilde üretmesine olanak tanır. Güneşlenme süresi ve bir bölgenin aldığı toplam güneş ışınımı (radyasyon), PV sistemlerinin performansını ve verimliliğini doğrudan etkileyen temel parametrelerdir (Ramanathan, 2010).

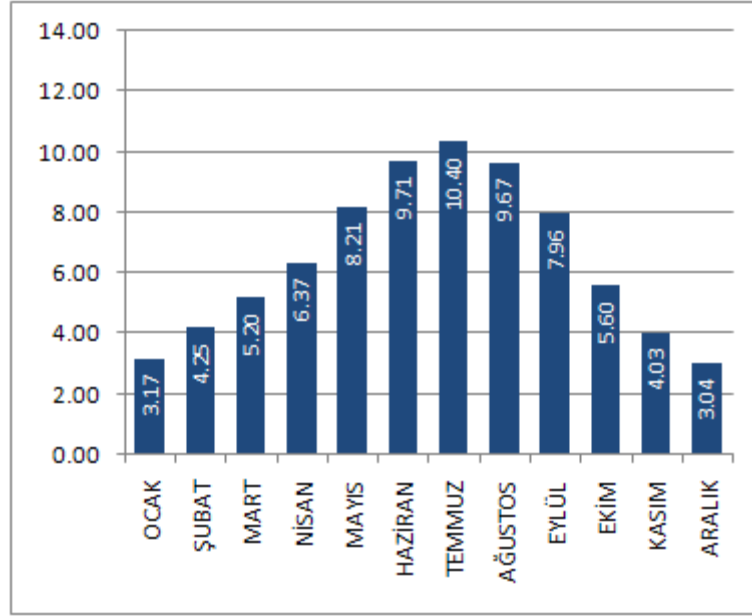
Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından geliştirilen Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA), Türkiye'nin bu alandaki potansiyelini detaylı olarak ortaya koymaktadır. Bu atlasa göre, çalışmanın yapıldığı Düzce ilinin yıllık toplam güneşlenme süresi ortalama 2.445 saat, yıllık toplam gelen güneş enerjisi ise 1.396 kWh/m²-yıl'dır. Aylık bazda bakıldığında, en az olduğu Aralık ayında yaklaşık 3,04 saat/gün ile en yüksek olduğu temmuz ayında yaklaşık 10,40 saat/gün arasında değişen bir güneşlenme potansiyeli mevcuttur (GEPA, 2024). Şekil 2.3., 2.4. ve 2.5. 'te Düzce ilinin toplam güneş radyasyonu, global radyasyon değerleri ve güneşlenme süreleri verilmiştir. Bu veriler, bölgedeki endüstriyel tesislerin çatılarının, önemli birer temiz enerji üretim santraline dönüştürülmesi için dikkate değer bir fırsat sunduğunu göstermektedir.



Şekil 2.3. Düzce İli Toplam Güneş Radyasyonu (GEPA, 2024).



Şekil 2.4. Düzce Global Radyasyon Değerleri (KWh/m²-gün) (GEPA, 2024).



Şekil 2.5. Düzce Güneşlenme Süreleri (Saat) (GEPA, 2024).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. TEZ ÇALIŞMASININ KAPSAMI

Tez çalışması kapsamında yürütülen çalışmalar Çizelge 3.1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Tez Çalışması Kapsamı.

No.	Yürütülen Çalışmalar	Amaç	Kapsam
1	Firmanın ziyaret edilerek, çalışma alanlarının krokisinin çıkarılması	Ölçüm yapılacak parametreler için uygun iç ortam ve noktaların belirlenmesi	• Bu aşamada firmadan elde edilen bilgiler ve incelemeler doğrultusunda aydınlatma gürültü ve CO ₂ ölçümü için ilgili yerler belirlenmiştir.
2	Firmada belirlenen noktalarda gürültü ölçümlerin yapılması	Gürültü ölçümü için etkin noktalarının belirlenmesi	• Aktif olarak çalışan, çalışan yoğunluğunun ve gürültü kaynağının fazla olduğu noktalar belirlenmiş ve belirli aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir.
3	Firmada belirlenen noktalarda aydınlatma ölçümlerin yapılması	Aydınlatma ölçümü için etkin noktaların belirlenmesi	• Çalışanların çalışma alanlarında maruz kaldıkları aydınlatma yapılacak noktalar belirlenmiş ve belirli aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir.
4	Firmada belirlenen noktalarda CO ₂ ölçümlerin yapılması	CO ₂ ölçüm noktalarının belirlenmesi	• Çalışanların çalışma alanlarındaki iç ortamda CO ₂ konsantrasyonu belirlenmiş ve belirli aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir.
5	Elde edilen ölçümlerin haritalandırılması	Haritalandırma ile farklı üretim bölgelerindeki CO ₂ kirliliği, gürültü kirliliği ve aydınlatma etkinliğinin detaylı görülmesi sağlanmıştır.	• Üretim yapılan hatlardaki iç ortam durumu, Python programlama dili ve ilgili bilimsel kütüphaneler (Pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib) kullanılarak oluşturulan ısı haritaları (heatmaps) aracılığıyla tespit edilmiştir.
6	Oluşturulan haritaların değerlendirilmesi	Haritalandırma ile görselleştirilen ölçüm sonuçlarının ilgili yönetmelik ve standartlar çerçevesinde değerlendirilmesi	• Haritalandırılan verilerin yönetmelikteki sınır değerleri karşılayıp karşılamadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.1. (devamı) Tez Çalışması Kapsamı.

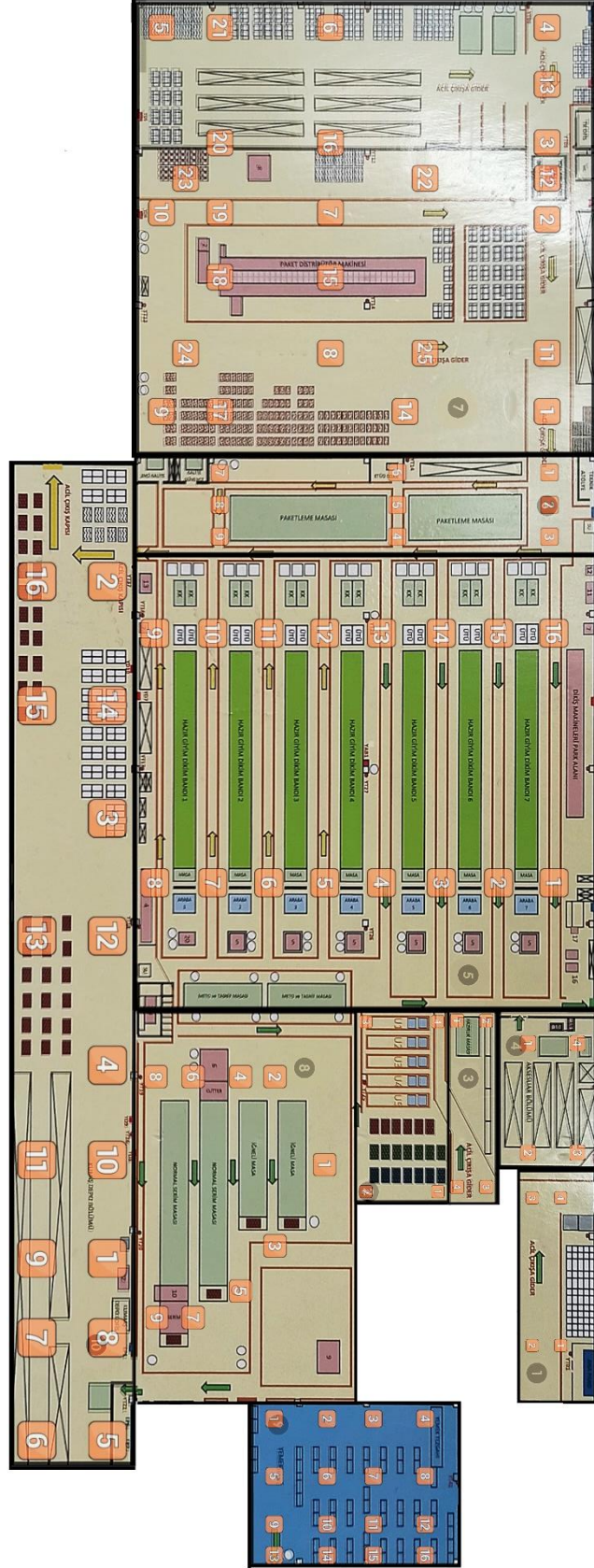
7	Temiz Üretim kapsamında tesiste yapılabilecek iyileştirmelerin geliştirilmesi	Tesiste Temiz Üretim kapsamında yapılabilecek iyileştirmelerin belirlenmesi ve etkisinin değerlendirilmesi	• Tesiste yapılabilecek iyileştirmelerin belirlenmiş ve yapıldığı takdirde ne gibi etkilerinin olacağı teorik olarak değerlendirilmiştir
8	LEAF (Lighting Efficiency ve Carbon Footprint) yazılımının geliştirilmesi	Aydınlatma verimliliği analizlerini pratikleştirecek ve yaygınlaştıracak bir metodolojik araç oluşturulması	• Aydınlatma sistemlerinin enerji, maliyet ve karbon ayak izi gibi sürdürülebilirlik metriklerini analiz eden kullanıcı dostu bir masaüstü yazılımı geliştirilmiştir.
9	Sonuç önerilerin hazırlanması	Çalışma kapsamında elde edilen bulguların toparlanması ve değerlendirilmesi	• Elde edilen veriler ve bulgular derlenip sonuçlar oluşturulmuştur.

3.2. FİRMAYA AİT BİLGİLER

Çalışma, Düzce’de tekstil hazır giyim alanında faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın yapılacağı işyeri ile araştırma öncesi görüşülerek gerekli izinler alınmıştır. Tesis tek vardiya çalışmakta olup tesisin üretim sahası, içeride gerçekleşen faaliyetlere göre 10 ayrı bölüme ayrılmıştır. Bölge detaylarını içeren bilgiler Çizelge 3.2.’de, bölgeleri gösteren vaziyet planı Şekil 3.1.’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Tesis Ölçüm Bölgeleri.

Bölge Adı	Uzunluk (m)	Genişlik (m)	Yükseklik (m)	Alan (m ²)	Ölçüm Noktası Sayısı
Bölge 1 (Örme)	16.9	8.7	6	147	4 Nokta
Bölge 2 (İplik Alanı)	19	6	6	114	4 Nokta
Bölge 3 (Hazırlık)	12.4	4.9	6	60.8	4 Nokta
Bölge 4 (Aksesuar)	14.5	8.8	6	127.6	4 Nokta
Bölge 5 (Dikimhane)	31	40	6	1240	16 Nokta
Bölge 6 (Paketleme)	7.8	40	6	312	9 Nokta
Bölge 7 (Depo Sevkiyat)	38	40	6	1520	25 Nokta
Bölge 8 (Kumaş Kesim)	20	27.5	6	550	9 Nokta
Bölge 9 (Yemekhane)	13	12	3	156	16 Nokta
Bölge 10 (Kumaş Deposu)	75	12.25	5	918.7	16 Nokta



Şekil 3.1. Ölçüm Bölgeleri Vaziyet Planı ve Ölçüm Noktalarının Dağılımı

3.3. VERİ TOPLAMA VE ANALİZ

Hava kalitesi ve aydınlatma şiddeti ölçümlerinde TESTO 440 İç Ortam Hava Kalitesi ölçüm cihazı CO₂ probu ve Lüks probu ile birlikte kullanılmıştır. Gürültü ölçümleri için ise TESTO 815 Gürültü Seviyesi Ölçüm Cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihazlara ait görseller Şekil 3.2., Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'te görülmektedir.



Şekil 3.2. TESTO 440 İç Ortam Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı ve Lüks Probu



Şekil 3.3. TESTO 440 CO₂ Probu



Şekil 3.4. TESTO 815 Gürültü Seviyesi Ölçüm Cihazı

3.3.1. Ölçüm Sonuçlarının Modellenmesi

Bu çalışmada, ölçümler sonucunda elde edilen veriler, Python programlama dili (sürüm 3.11.4) ve temel bilimsel hesaplama kütüphaneleri kullanılarak modellenmiş ve ısı haritaları (heatmaps) şeklinde görselleştirilmiştir. Veri işleme ve manipülasyonu için Pandas (sürüm 2.1.0) kütüphanesi, sayısal hesaplamalar için NumPy (sürüm 1.25.2) kütüphanesi kullanılmıştır.

Ölçüm noktalarının X ve Y koordinatları ile bu noktalarda ölçülen parametre değerleri (gürültü, aydınlatma, hava kalitesi) kullanılarak mekansal interpolasyon gerçekleştirilmiştir. İnterpolasyon işlemi için SciPy (sürüm 1.11.2) kütüphanesinin interpolate.griddata fonksiyonu tercih edilmiştir. Bu fonksiyonda, ölçüm noktaları arasında doğrusal bir ilişki varsayılarak 1 aradaki değerlerin tahmin edilmesi amacıyla 'linear' (doğrusal) interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal interpolasyon, bilinen veri noktalarını birbirine düz çizgilerle (veya çok boyutlu uzayda düzlemlerle/hiperdüzlemlerle) bağlayarak aradaki değerleri hesaplar. Bu yöntem, hesaplama açısından verimlidir ve veride ani değişimler veya karmaşık olmayan eğilimler olduğunda güvenilir sonuçlar sunar. Özellikle veri noktalarının dağılımı düzensiz olduğunda veya aşırı pürüzsüzleştirme istenmediğinde tercih edilebilir.

İnterpolasyon için öncelikle, ölçüm yapılan alanın X ve Y eksenlerindeki minimum ve maksimum değerleri belirlenerek bir grid (ızgara) ağı oluşturulmuştur. Grid çözünürlüğü (Streamlit arayüzünden kullanıcı tarafından ayarlanabilen resolution parametresi ile), haritanın detay seviyesini belirlemek üzere ayarlanmıştır. ‘griddata’ fonksiyonu, bu grid ağı üzerindeki her bir nokta için ilgili parametrenin değerini, seçilen 'linear' yöntemiyle tahmin etmiştir.

Elde edilen bu interpolasyonlu grid verileri, Matplotlib (sürüm 3.7.2) kütüphanesi kullanılarak ısı haritası (imshow fonksiyonu ile) olarak görselleştirilmiştir. Isı haritalarında, farklı değer aralıklarını temsil etmek üzere kullanıcı tarafından seçilebilen çeşitli renk paletleri (colormaps) kullanılmıştır. Renk skalasının daha etkili olması ve verideki ince farklılıkları vurgulamak amacıyla, isteğe bağlı olarak renk aralığı verinin %5 ve %95'lik persentil değerleri arasına ayarlanmıştır. Grafiklerin, ölçüm yapılan alanın gerçek geometrisini yansıtması için eksenlerin en-boy oranı (aspect='equal') korunmuş ve figür boyutları, veri noktalarının yayılım aralığına göre dinamik olarak ayarlanmıştır. Son olarak, oluşturulan bu ısı haritaları, geliştirilen interaktif Streamlit (sürüm 1.28.0) uygulaması aracılığıyla sunulmuş ve analiz için görsel olarak kaydedilmiştir. Bu adımlar sonucunda, işletme içerisindeki farklı bölgelerdeki ortam parametrelerinin mekansal dağılımı başarıyla modellenmiş ve görsel olarak yorumlanabilir hale getirilmiştir.

3.3.2. Aydınlatma Ölçüm Yöntemi

Çalışma kapsamında ölçülen değerlerin ortalamaları hesaplanarak “Canada Occupational Health and Safety Regulations – Part VI Lighting” de tanımlanan minimum aydınlık düzeyi değerleri ile karşılaştırılmıştır. Aydınlık düzeyi birimi olarak “lüks” (Lx) kullanılmıştır. Ölçüm yapılacak alandaki nokta sayısını ve konumlarını belirlemek için, aydınlatma tekniğinde standart olarak kullanılan ve TS EN 12464-1 standardında da atıf yapılan oda indeksi (K) formülüne dayalı sistematik bir grid (şebeke) yaklaşımı kullanılmıştır:

$$K = (L \times W) / [H \times (L + W)]$$

Burada L işyeri uzunluğu, W işyeri genişliği ve H çalışma düzleminin tavan yüksekliğidir. Bu formül, odanın geometrisine göre temsil edici bir ortalama elde etmek için gereken minimum ölçüm noktası sayısını (4, 9, 16 veya 25) verir. Çalışmanın bütünlüğünü ve farklı parametreler arasındaki mekansal verilerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla, aydınlatma ölçümleri için referans alınan bu sistematik grid (şebeke)

belirleme yöntemi, gürültü ve CO₂ ölçümleri için de aynen uygulanmıştır. Bu sayede, her üç parametre için de aynı koordinatlarda ölçümler yapılarak oluşturulan ısı haritalarının (heatmap) doğruluğu ve tutarlılığı güvence altına alınmıştır.

3.3.3. Ölçüm Tekniği

Çalışmanın yürütüldüğü iş bölgesi, yakın iş bölgesi ya da çalışma bölgesi gibi belirli bir bölgenin aydınlık düzeyinin ölçümünde aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Kalibreli ışıkölçerin (lüksmetre) aralık seçim anahtarı mümkün olan en düşük aralığa ayarlanmıştır.
- Ölçüm sırasında ışıkölçer yatay düzlemde tutulur veya ölçüm alınan düzleme serilmiştir.
- Ölçüm yapılırken ışıkölçerin önü kapatılmamalı, üzerine ölçüm yapan kişinin gölgesi düşmeyecek şekilde ayarlanmıştır.
- Ölçüm için ışıkların açılması ya da kapatılması doğru değildir, ölçümler normal çalışma şartlarında yapılmaktadır.

3.3.4. Gürültü Ölçüm Yöntemi

Çalışma kapsamında tesiste ölçümler için belirlenen noktalarda anlık gürültü ölçümleri gerçekleştirilerek elde edilen değerler, “Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik” Madde 5 te yer alan maruziyet eylem değerleri ve maruziyet sınır değerlerine göre değerlendirilmiştir. Bu Yönetmeliğin uygulanması bakımından, maruziyet eylem değerleri ve maruziyet sınır değerleri aşağıda verilmiştir:

- a) En düşük maruziyet eylem değerleri: (LEX, 8saat) = 80 dB(A) veya (Ptepe) = 112 Pa [135 dB(C) re. 20 µPa] (20 µPa referans alındığında 135 dB (C) olarak hesaplanan değer).
- b) En yüksek maruziyet eylem değerleri: (LEX, 8saat) = 85 dB(A) veya (Ptepe) = 140 Pa [137 dB(C) re. 20 µPa].
- c) Maruziyet sınır değerleri: (LEX, 8saat) = 87 dB(A) veya (Ptepe) = 200 Pa [140 dB(C) re. 20 µPa].

Ölçümler değerlendirilirken kullanılacak sınır değer 87 dB(A) olarak belirlenmiştir.

3.3.5. Hava Kalitesi Ölçüm Yöntemi

İşletmede önceden belirlenen noktalarda CO₂ yapılmıştır. Ölçüm sonuçları, Bölüm 2.5.2'de Şekil 2.1'de gösterilen ilişki temel alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5. CO₂ Konsantrasyonu ve Havalandırma İhtiyacı İlişkisi (ISKİD 2024).

Bu yöntemler, tekstil endüstrisindeki iç ortam hava kalitesi ve aydınlatmasının çevre ve İSG üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmış ve elde edilen veriler, çalışmanın bulgular ve tartışma aşamasında detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.4. LEAF (LIGHTING EFFICIENCY VE CARBON FOOTPRINT) YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE METODOLOJİSİ

Bu tez çalışmasının önemli bir çıktısı olarak, endüstriyel tesislerdeki aydınlatma sistemlerinin performansını bütünsel bir yaklaşımla analiz etmek amacıyla LEAF (Lighting Efficiency ve Carbon Footprint) adlı bir masaüstü karar destek yazılımı geliştirilmiştir. Yazılımın geliştirilmesindeki temel amaç, aydınlatma sistemlerinin sadece teknik yeterliliğini değil, aynı zamanda enerji tüketimi, işletme maliyeti ve çevresel ayak izi gibi sürdürülebilirlik metriklerini de entegre bir şekilde değerlendiren, uzman olmayan kullanıcılar için pratik bir araç sunmaktır.

3.4.1. Yazılım Mimarisi ve Kullanılan Teknolojiler

LEAF yazılımı, platform bağımsızlığı ve geniş kütüphane desteği nedeniyle Python (sürüm 3.11) programlama dili temel alınarak geliştirilmiştir. Yazılımın modüler mimarisi, farklı işlevlerin bağımsız olarak yönetilmesine olanak tanır. Kullanılan temel

kütüphaneler şunlardır:

- Tkinter: Python'un standart Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (GUI) kütüphanesi olup, yazılımın kullanıcı dostu ve sezgisel arayüzünün oluşturulmasında kullanılmıştır.
- Matplotlib: Elde edilen analiz sonuçlarının (maliyet, enerji tüketimi, CO₂ salımı karşılaştırmaları vb.) çubuk ve gösterge (gauge) grafikleri şeklinde görselleştirilmesi için tercih edilmiştir. Verilerin görsel sunumu, sonuçların daha anlaşılır kılınmasında kritik bir rol oynamaktadır.
- FPDF2: Analiz sonuçlarının, grafiklerin ve önerilerin düzenli bir formatta bir araya getirilerek taşınabilir belge formatında (PDF) raporlanmasını sağlayan bir kütüphanedir.

3.4.2. Veri Girişi ve Hesaplama Metodolojisi

Yazılım, analizlerini gerçekleştirmek için kullanıcıdan üç ana kategoride veri talep eder:

1. Mekan ve Kullanım Bilgileri: İncelenecek alanın boyutu (m²), kullanım amacı (örn: Ofis, Depo, Paketleme, Üretim Hattı) ve aydınlatma sisteminin günlük ortalama çalışma süresi (saat).
2. Mevcut Aydınlatma Sistemi Detayları: Kullanılan lambanın tipi (Floresan, Akkor, LED vb.), armatür adedi, birim lamba gücü (Watt) ve birim lamba ışık akısı (Lümen).
3. Ekonomik ve Çevresel Parametreler: Tesisin tabi olduğu güncel elektrik birim fiyatı (TL/kWh) ve ülkenin ulusal elektrik üretim karmasına göre belirlenen CO₂ emisyon faktörü (kgCO₂e/kWh).

Bu girdilere dayanarak, yazılımın hesaplama motoru aşağıdaki temel formülasyonları kullanır. Bu formüller, aydınlatma mühendisliğinin temel prensiplerine dayanmaktadır (DiLaura vd., 2011):

- Ortalama Aydınlık Düzeyi (E_{ort}):

$$E_{ort} \text{ (lux)} = [\text{Toplam Işık Akısı (lm)} \times k_{\text{kullanım}} \times k_{\text{bakım}}] / \text{Alan (m}^2\text{)}$$

Burada k_{kullanım} (Kullanım Faktörü) ve k_{bakım} (Bakım Faktörü), armatür verimliliği ve zamanla ışık akısındaki azalmayı temsil eden ve standart tablolardan alınabilen katsayılardır. LEAF, ön analiz için bu faktörleri tipik değerler (örn: 0.8) olarak varsayar.

- Yıllık Enerji Tüketimi (kWh/yıl):

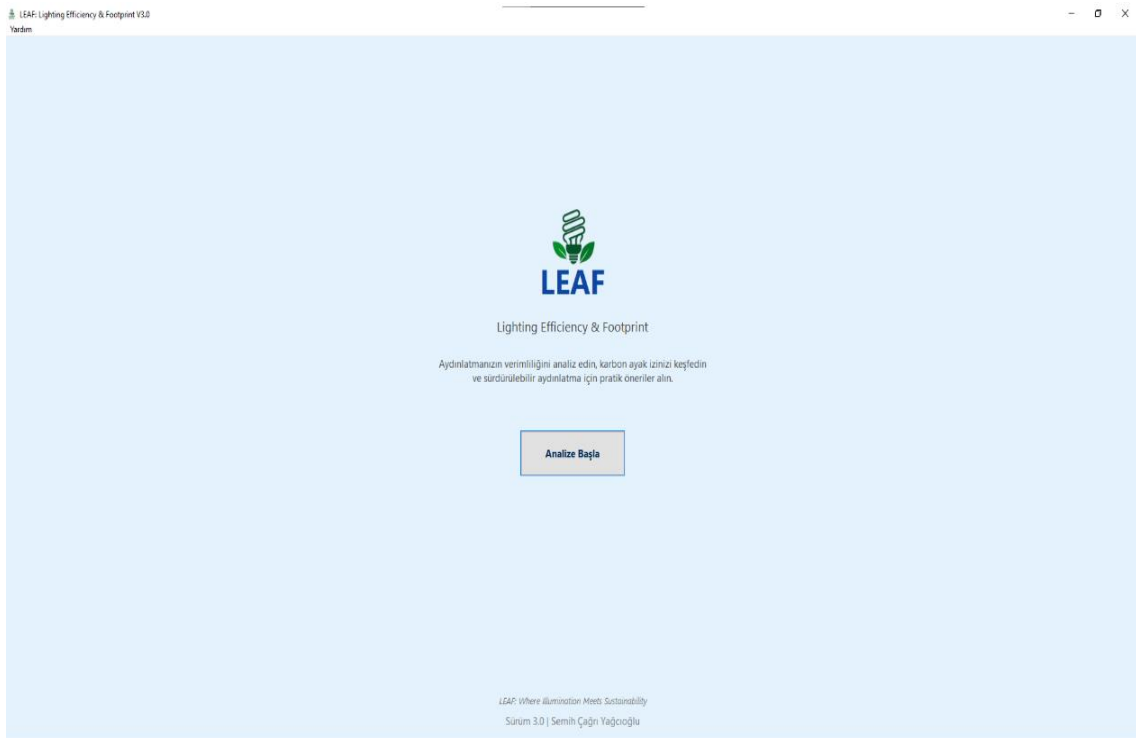
$$E_{\text{yıllık}} = [(Toplam\ Güç) / 1000] \times Günlük\ Çalışma\ Süresi \times Yıllık\ Çalışma\ Günü$$
- Yıllık Aydınlatma Maliyeti (TL/yıl):

$$Maliyet_{\text{yıllık}} = E_{\text{yıllık}} \times Elektrik\ Birim\ Fiyatı$$
- Yıllık Karbon Ayak İzi (kgCO₂e/yıl):

$$CO_2_{\text{yıllık}} = E_{\text{yıllık}} \times CO_2\ Emisyon\ Faktörü$$

3.4.3. Analiz, Karşılaştırma ve Raporlama

Yazılım, hesaplanan ortalama aydınlık düzeyini, kullanıcının seçtiği mekan türü için TS EN 12464-1 (2021) standardında önerilen minimum aydınlık düzeyi ile karşılaştırır ve mevcut durumun yeterliliğini ("Yetersiz", "Yeterli", "Aşırı") görsel bir gösterge ile belirtir. Ayrıca, mevcut sistemin daha verimli bir LED teknolojisi ile değiştirilmesi durumunda elde edilecek potansiyel enerji, maliyet ve CO₂ tasarrufunu hesaplayarak bir "LED'e Geçiş Senaryosu" sunar. Tüm bu analizler, özet tablolar ve karşılaştırmalı grafikler halinde kullanıcıya sunulur ve tek bir tuşla PDF formatında kapsamlı bir rapora dönüştürülebilir. Şekil 3.6 ve 3.7' de Yazılımın Ana Sayfa görüntüsü ve PDF rapor çıktısı görülmektedir.



Şekil 3.6. Yazılım Ana Sayfası



LEAF Aydınlatma Verimliliği ve Karbon Ayak İzi Analizi

Rapor Tarihi: 2025-05-28 08:54:39

GİRİLEN BİLGİLER

Oda Alanı:	320.0 m ²
Kullanım Amacı:	Endüstriyel Alanlar - Depo ve Lojistik -> Paketleme ve Kargo Hazırlık Alanı
Aydınlatma Kaynağı:	15 x Floresan Tüp (T8/T5 - Standart 120cm, Balastlı) (3500 lm, 36W)
Toplam Girilen Lümen:	52500 Lümen
Toplam Girilen Watt:	540 Watt
Zaman Dilimi:	Gündüz (Diğer Saatler/Az Işık)
Gün Işığı Durumu:	Yok veya Belirgin Değil
Günlük Kullanım Saati:	8.0 saat
Elektrik Birim Fiyatı:	4.47 TL/kWh

IŞIK SEVİYESİ DEĞERLENDİRMESİ

Hesaplanan Ort. Aydınlık:	126 lux
Önerilen Hedef Aydınlık:	400 lux
Ayarlanmış Hedef Aydınlık:	Yok
Hedefe Ulaşma Oranı:	~%32
Aydınlatma Durumu:	YETERSİZ AYDINLATMA
Öneriler (Işık Seviyesi için):	Aydınlatma seviyesini artırmak için daha yüksek lümenli ampul(ler) kullanabilir, ampul sayısını çoğaltabilir veya ek aydınlatma armatürleri eklemeyi düşünebilirsiniz. Sağlık ipucu: Yetersiz ışık göz yorgunluğuna ve odaklanma zorluğuna yol açabilir. Enerji ipucu: LED ampuller, aynı parlaklık için daha az enerji tüketir.

ÇEVRESEL ETKİ VE VERİMLİLİK GÖSTERGELERİ (YILLIK TAHMİNİ)

Yıllık Enerji Tüketimi:	1576.80 kWh
Yıllık CO ₂ Salımı:	678.02 kg
Yıllık CO ₂ Ağaç Eşdeğeri:	~32.3 ağaç
Yıllık Aydınlatma Maliyeti:	7048.30 TL
Seçilen Kaynağın Etkinliği (lm/W):	97.2
Genel Sürdürülebilirlik Puanı:	1.9 / 10

LED'E GEÇİŞ İLE TASARRUF POTANSİYELİ

Önerilen LED Alternatifi:	2 adet Endüstriyel LED Yüksek Tavan Armatürü (High Bay) (her biri 30000 lm, 240 W)
Yıllık Enerji Tasarrufu:	175.20 kWh (~%11)
Yıllık Maliyet Tasarrufu:	783.14 TL
Yıllık CO ₂ Azalması:	75.34 kg

GÖRSEL ANALİZ

Tüketim ve Etki Grafikleri

Şekil 3.7. Yazılım pdf Rapor Çıktısı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, tekstil endüstrisinde iç ortam hava kalitesinde CO₂ değeri, gürültü kirliliği ve iç ortam aydınlatmasının çevre ve iş sağlığı güvenliği üzerindeki etkilerini incelemek için belirli bir tekstil fabrikasında gerçekleştirilmiştir. İş yerindeki hava kalitesi ve gürültü ölçümleri için sensör cihazı kullanılmıştır. Ayrıca, aydınlatma düzeyleri ışıkölçer ile ölçülmüş ve farklı iş bölümlerindeki ışık seviyeleri belirlenmiştir. Çalışma için seçilen işyerinde el ve göz performansına dayalı işler yapılmaktadır. Araştırma kesitsel tipte bir araştırmadır. Tüm üretim süreci dikkate alınarak üretim personelinin tamamını kapsayacak şekilde saha incelemiş ve aydınlatma koşulları ve yapılan iş açısından farklılık gösteren iş alanları belirlenmiştir. İş alanları araştırma birimi olarak seçilmiştir.

Araştırma, bölgesel ve mevsimsel farklılıkların etkilerini minimize etmek amacıyla, tesisin üretim sahasında oluşturulan 10 bölgedeki toplam 125 noktada gerçekleştirilmiştir. Her bir noktada ‘İç Ortam Aydınlatma Şiddeti, İç Ortam Gürültüsü ve İç Ortam CO₂ Seviyesi’ parametreleri ölçülmüştür. Veri güvenilirliğini artırmak amacıyla, iki aylık bir süreç zarfında her ölçüm noktasından, farklı günlerde ve günün farklı saatlerinde (sabah, öğle, akşam üzeri) olmak üzere toplam 9 tekrarlı ölçüm yapılmıştır. Bu çalışmada sunulan tüm bulgular, her bir nokta için elde edilen bu 9 tekrarın aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bulunan veriler ilgili değerlendirme mevzuatına göre yorumlanmıştır. Ayrıca, ölçümlerin değişkenliğini göstermek amacıyla standart sapma değerleri de ilgili tablolarda sunulmuştur.

4.1. ENDÜSTRİYEL KURULUŞUN İÇ ORTAM HAVA KALİTESİNİN CO₂ PARAMETRESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmada iç ortam hava kalitesinin CO₂ parametresi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Endüstrinin belirlenen bölgelerde yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Buna göre CO₂ konsantrasyonunun en yüksek olduğu bölge “Yemekhane” bölgesi iken, CO₂ konsantrasyonunun en düşük olduğu bölge “Kumaş Deposu” bölgesidir.

Çizelge 4.1. Bölgelere Göre CO₂ Ölçüm Sonuçları.

Bölge Adı	Ölçüm Yapılan Nokta Sayısı	Ortalama CO ₂ (ppm)	Standart Sapma (SS)
Bölge 1 (Örme)	4	639,60	35,54
Bölge 2 (İplik Alanı)	4	615,22	43,07
Bölge 3 (Hazırlık)	4	622,19	51,29
Bölge 4 (Aksesuar)	4	637,10	65,82
Bölge 5 (Dikimhane)	16	664,58	49,98
Bölge 6 (Paketleme)	9	635,49	50,72
Bölge 7 (Depo Sevkiyat)	25	623,92	57,25
Bölge 8 (Kumaş Kesim)	9	624,31	60,25
Bölge 9 (Yemekhane)	16	770,43	193,99
Bölge 10 (Kumaş Deposu)	16	508,05	54,18

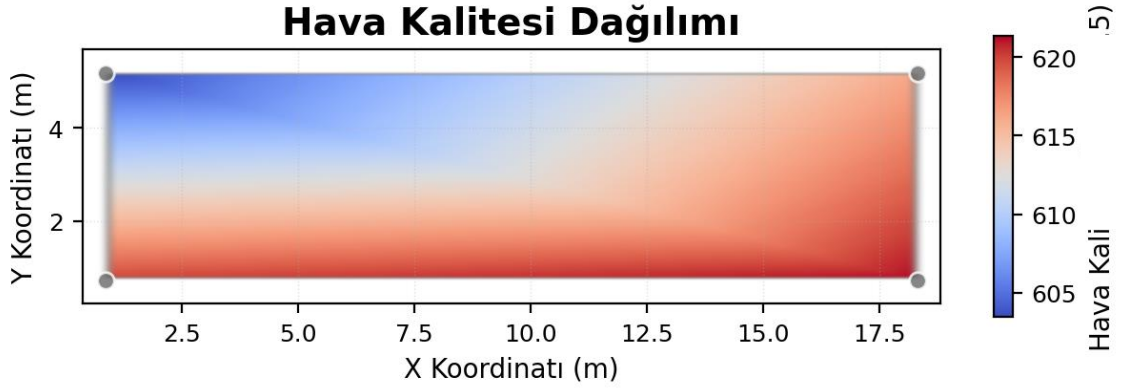
Çalışmada bölgelere göre elde edilen CO₂ konsantrasyonunun mekansal dağılımını gösteren ısı haritası modelleri Şekil 4.1'den Şekil 4.10'a kadar olan görsellerde sunulmuştur. Bu modellerde, x ve y eksenleri ilgili bölgenin boyutlarını metre cinsinden ifade etmekte olup, CO₂ seviyeleri ise renk skalası ile gösterilmektedir.

Örme bölgesinde CO₂ seviyesi ortalama 639,60 ppm olarak ölçülmüştür. Bu değer, iç ortam hava kalitesi açısından güvenli kabul edilmekte olup, 1000 ppm sınır değerinin altındadır. Havalandırma sistemlerinin mevcut kapasitesinin yeterli olduğu görülmektedir. Ancak, çalışan yoğunluğunun arttığı durumlarda ek havalandırma önlemleri alınmalıdır.



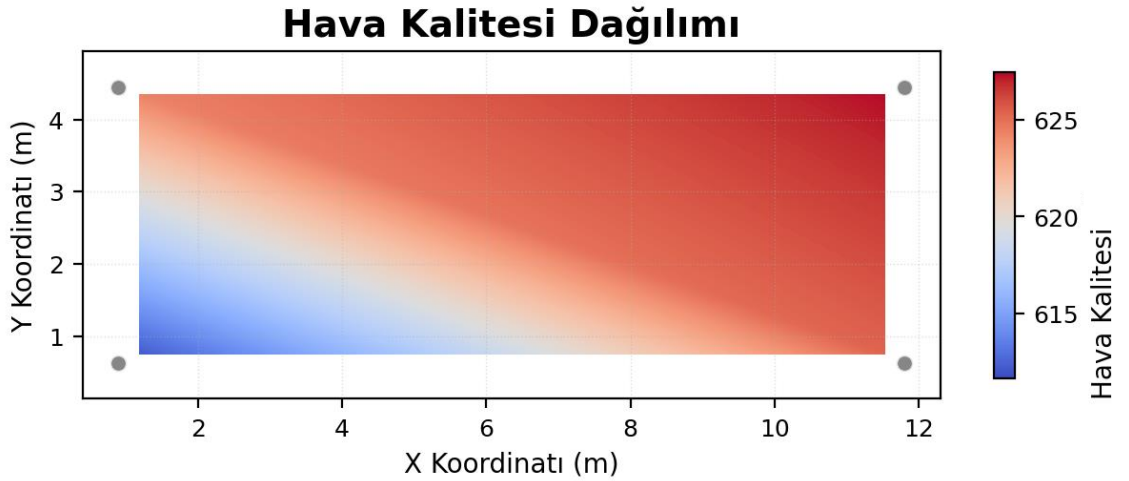
Şekil 4.1. Örme Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

İplik alanında CO₂ seviyesi 615,22 ppm olarak belirlenmiştir. CO₂ yoğunluğunun düşük olması, ortamın geniş ve iyi havalandırılmış olmasıyla ilişkilidir. Çalışma süresince CO₂ seviyeleri izlenmeli ve havalandırma sistemlerinin verimliliği kontrol edilmelidir.



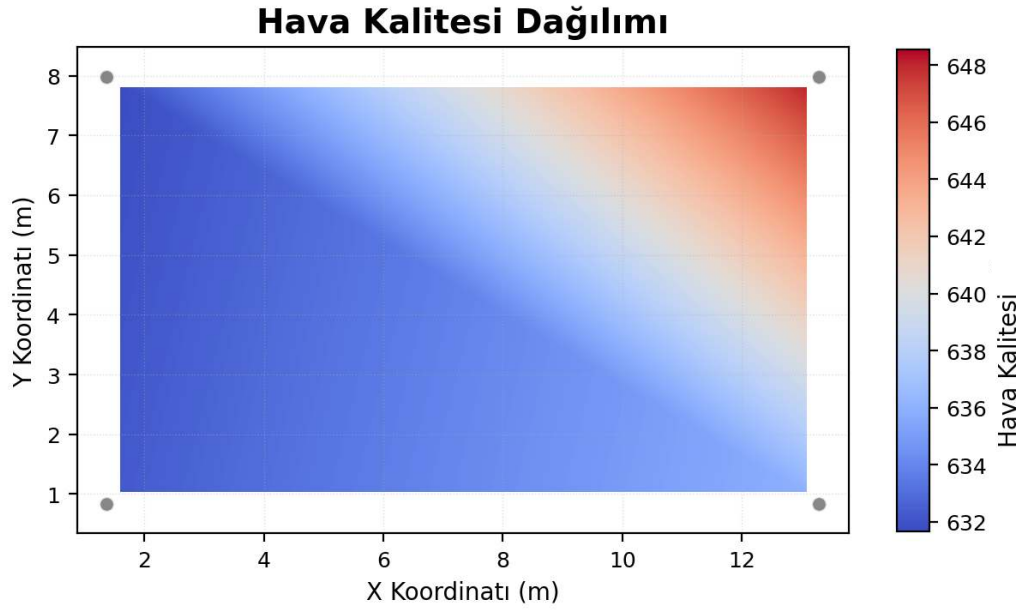
Şekil 4.2. İplik Alanı Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Hazırlık bölgesinde CO₂ seviyesinin 622,19 ppm olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, kabul edilebilir sınırlar içerisinde ve iş sağlığı açısından herhangi bir risk oluşturmamaktadır.



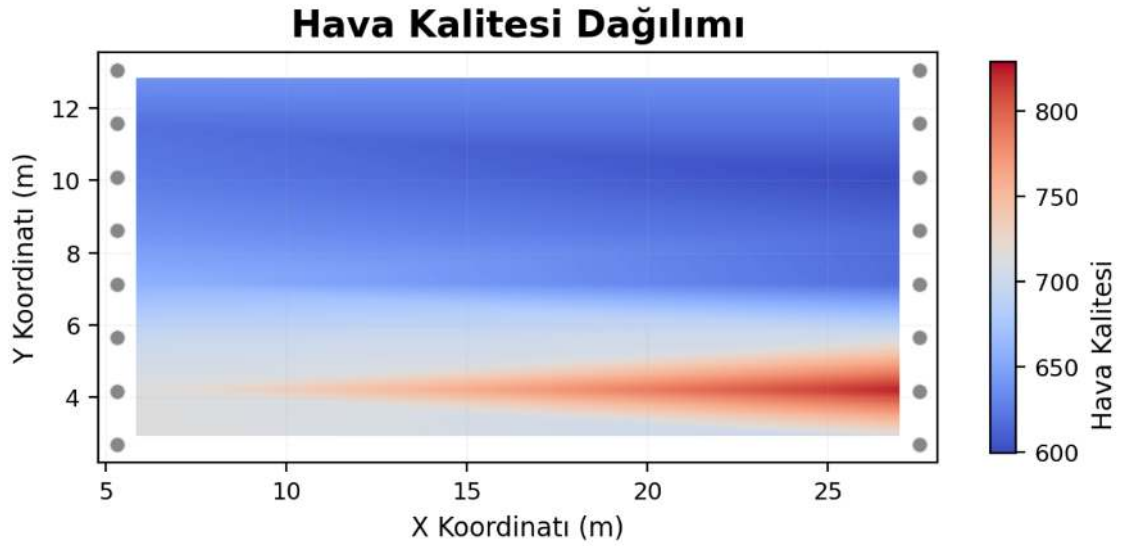
Şekil 4.3. Hazırlık Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Aksesuar bölgesinde CO₂ seviyesi 637,10 ppm olarak ölçülmüştür. Bölgedeki CO₂ seviyelerinin optimum seviyede kalması için, havalandırmanın düzenli olarak çalıştığından emin olunmalıdır.



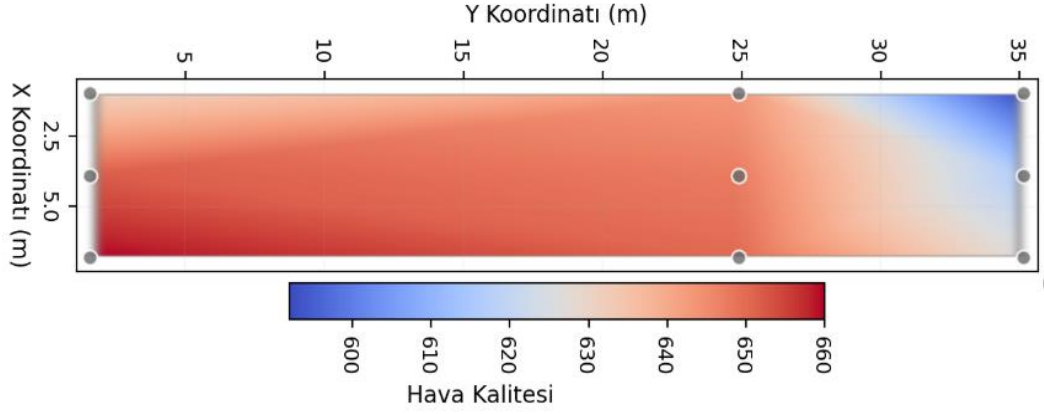
Şekil 4.4. Aksesuar Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Dikimhane bölgesinde CO₂ seviyesi 664,58 ppm olarak ölçülmüştür. Çalışan sayısının fazla olduğu bu alanda, havalandırmanın sürekli olarak etkin çalışması sağlanmalıdır.



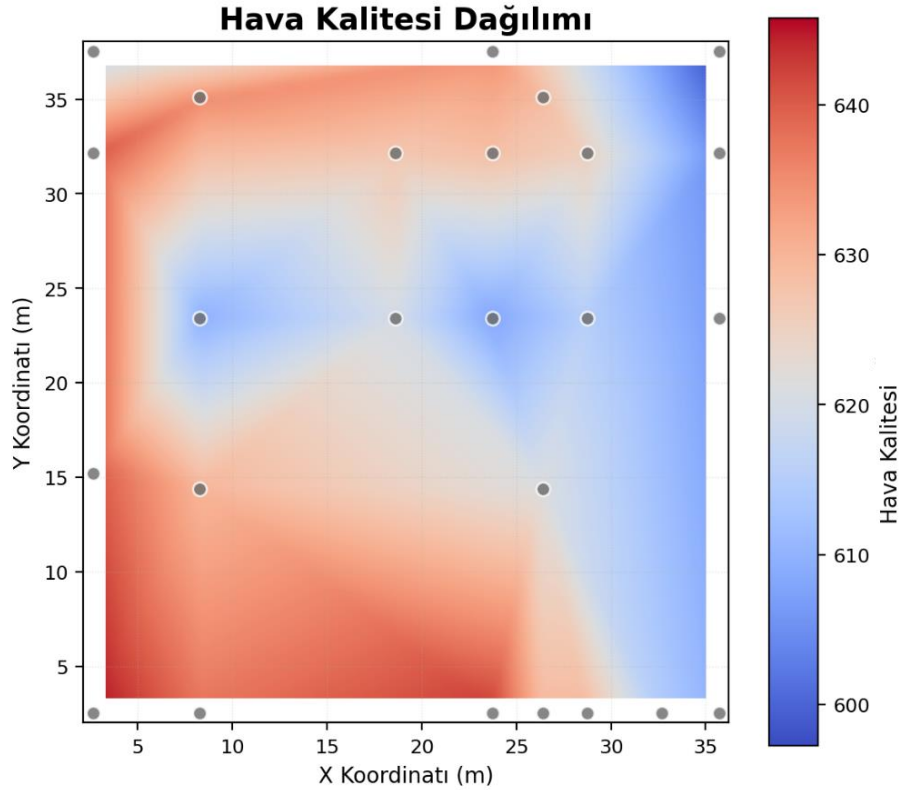
Şekil 4.5. Dikimhane Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Paketleme bölgesinde ölçülen CO₂ seviyesi 635,49 ppm olup, iç hava kalitesi açısından kabul edilebilir seviyededir. Çalışma süreleri boyunca CO₂ seviyelerinin yükselmemesi için düzenli hava değişimi sağlanmalıdır.



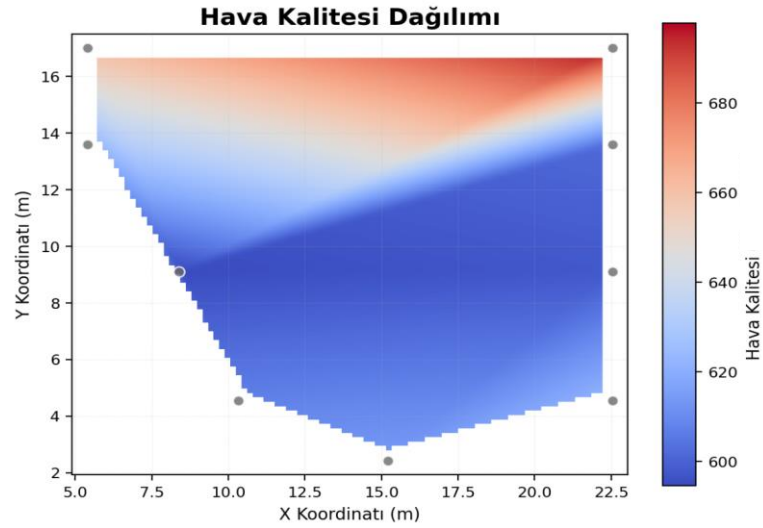
Şekil 4.6. Paketleme Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Depo sevkiyat bölgesinde CO₂ seviyesi 623,92 ppm olarak belirlenmiştir. Depolama alanlarında hava sirkülasyonunun yavaş olabileceği göz önüne alındığında, mekanik havalandırmanın etkin kullanılması önemlidir.



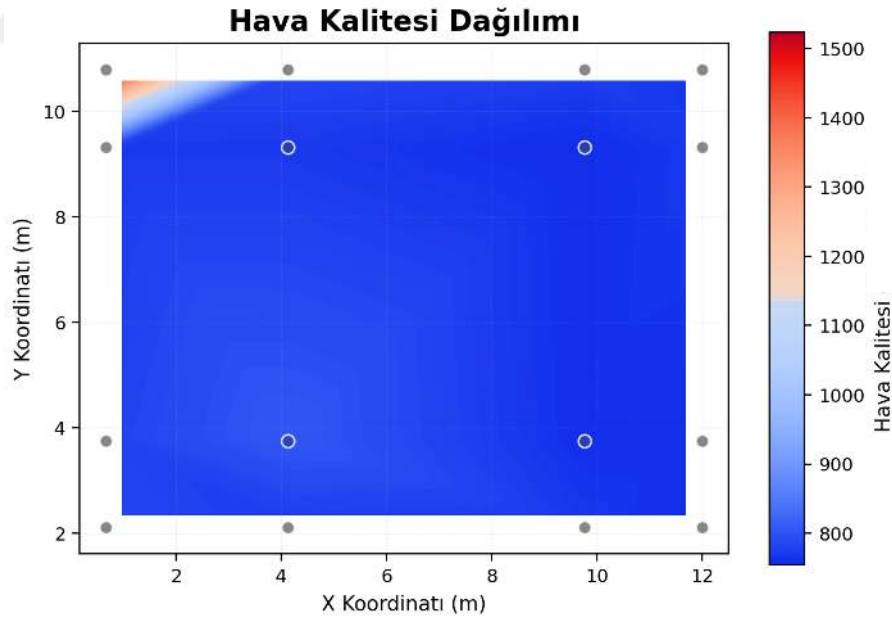
Şekil 4.7. Depo Sevkiyat Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Kumaş kesim bölgesinde ölçülen CO₂ seviyesi 624,31 ppm'dir. Kesim işlemleri sırasında çalışanların rahat bir solunum ortamına sahip olması için havalandırma kapasitesi yüksek tutulmalıdır.



Şekil 4.8. Kumaş Kesim Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

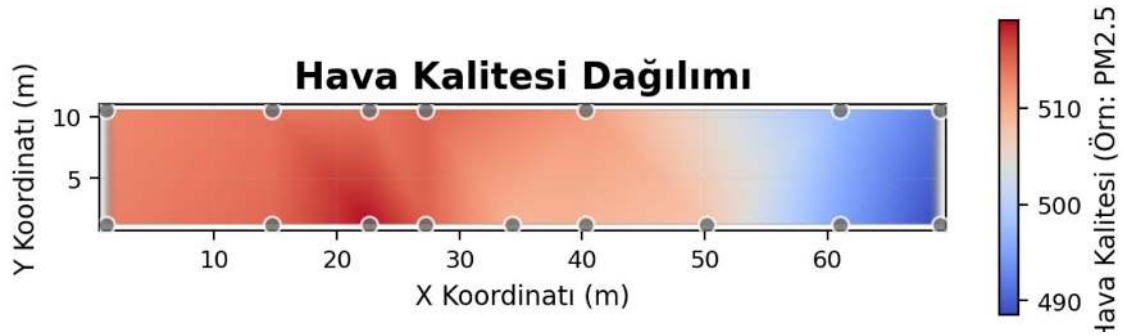
Yemekhane bölgesinde CO₂ seviyesi 770,43 ppm olarak ölçülmüştür. Bu seviyenin diğer çalışma alanlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yemek saatlerinde çalışanların yoğun şekilde bulunduğu bu alanda, doğal havalandırma artırılmalı veya mekanik havalandırma sistemleri güçlendirilmelidir.



Şekil 4.9. Yemekhane Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

Kumaş deposunda ölçülen CO₂ seviyesi, 600 ppm civarında olup kabul edilebilir düzeydedir. Ancak, havalandırma eksikliği nedeniyle CO₂ seviyelerinin artabileceği

öngörülmektedir. Bu nedenle, depo alanında hava sirkülasyonunu artıracak mekanik havalandırma sistemleri kurulmalıdır.



Şekil 4.10. Kumaş Deposu Bölgesi CO₂ Sonuç Grafiği

4.2. ENDÜSTRİYEL KURULUŞUN İÇ ORTAM DURUMUNUN GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİ PARAMETRESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

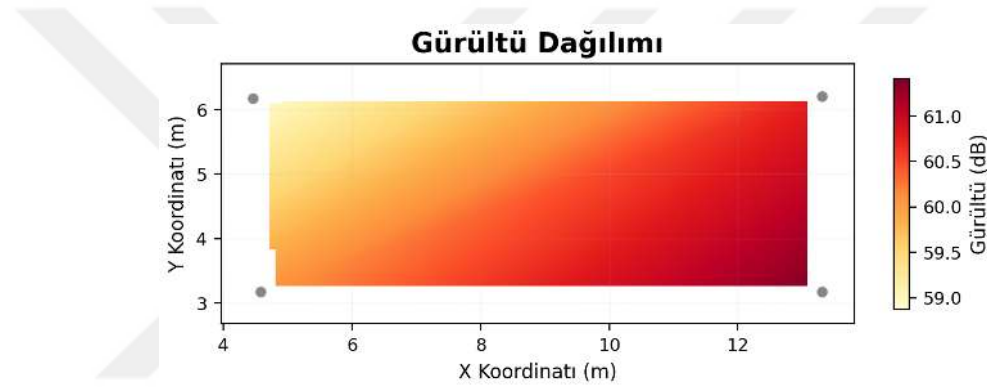
Çalışmada iç ortam durumu gürültü kirliliği parametresi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Endüstrinin belirlenen bölgelerde yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.2.’de verilmiştir. Buna göre gürültü kirliliğinin en yüksek olduğu bölge “Yemekhane” bölgesi iken, gürültü kirliliğinin en düşük olduğu bölge “Kumaş Deposu” bölgesidir.

Çizelge 4.2. Bölgelere göre Gürültü Ölçüm Sonuçları.

Bölge Adı	Ölçüm Yapılan Nokta Sayısı	Ortalama Gürültü Seviyesi (dB)	Standart Sapma (SS)
Bölge 1 (Örme)	4	60,28	1,73
Bölge 2 (İplik Alanı)	4	63,33	3,25
Bölge 3 (Hazırlık)	4	62,27	1,58
Bölge 4 (Aksesuar)	4	63,04	1,70
Bölge 5 (Dikimhane)	16	69,42	2,46
Bölge 6 (Paketleme)	9	66,86	2,69
Bölge 7 (Depo Sevkiyat)	25	59,40	1,82
Bölge 8 (Kumaş Kesim)	9	65,54	1,96
Bölge 9 (Yemekhane)	16	72,02	163,79
Bölge 10 (Kumaş Deposu)	16	51,89	2,24

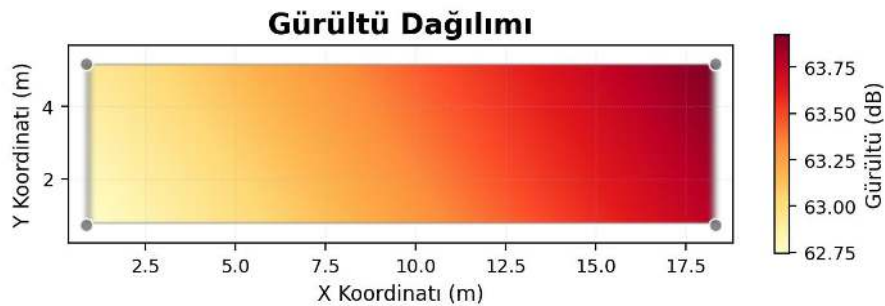
Çalışmada bölgelere göre elde edilen gürültü seviyelerinin mekansal dağılımını gösteren modeller, Şekil 4.11'den Şekil 4.20'ye kadar olan görsellerde sunulmuştur. Bu ısı haritalarında, x ve y eksenleri ilgili bölgenin boyutlarını metre cinsinden ifade etmekte olup, gürültü seviyeleri ise renk skalası ile gösterilmektedir.

Örme bölgesinde ölçülen ortalama gürültü seviyesi 60,28 dB olarak belirlenmiştir. Bu seviye, iş sağlığı açısından kabul edilebilir düzeydedir ancak uzun süre maruziyet durumunda rahatsızlık yaratabilir. Gürültüyü azaltmak için makinelerin izolasyonu sağlanmalı ve gürültü emici malzemeler kullanılmalıdır. Sürdürülebilirlik açısından, enerji verimli makinelerin tercih edilmesi ve ses izolasyonlu çalışma alanlarının oluşturulması önerilmektedir.



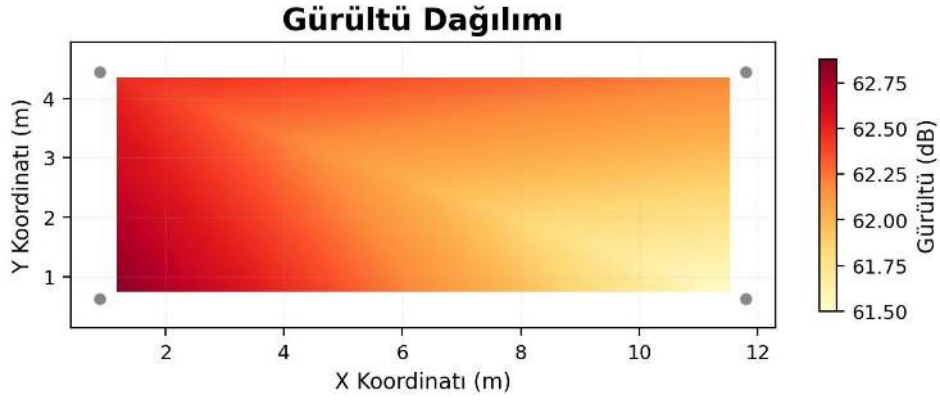
Şekil 4.11. Örme Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

İplik alanında ortalama 63,33 dB gürültü seviyesi ölçülmüştür. Bu seviye, sürekli maruziyet durumunda çalışanların dikkat seviyelerini ve verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Gürültüyü azaltmak için bakım periyotları sıklaştırılmalı ve eskiyen makineler sessiz çalışan yeni nesil ekipmanlarla değiştirilmelidir. Enerji verimliliği açısından, makinelerin düzenli bakımının yapılması ve düşük güç tüketimli motorlara geçiş sağlanması önerilmektedir.



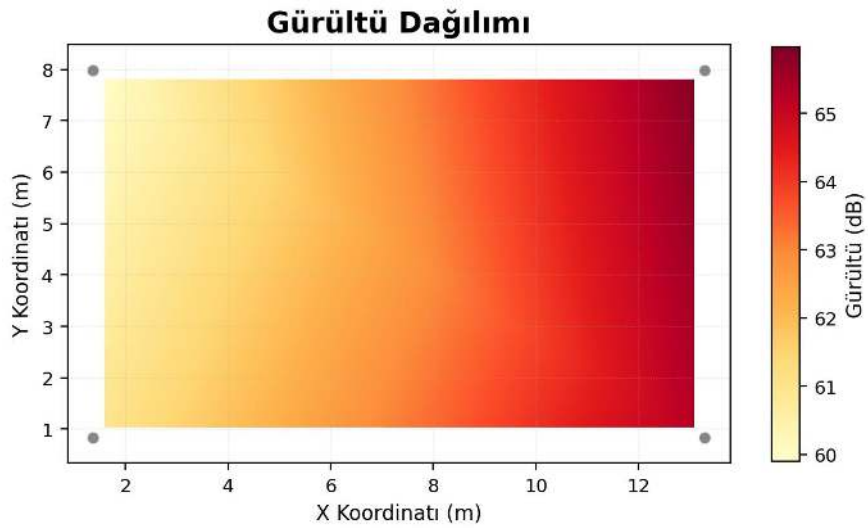
Şekil 4.12. İplik Alanı Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

Hazırlık bölgesinde ölçülen 62,27 dB seviyesi, iş sağlığı açısından kabul edilebilir sınırdadır. Ancak, çalışan konforunu artırmak için ses emici paneller kullanılabilir. Çevresel iyileştirme kapsamında, gürültü seviyesini azaltacak şekilde makine düzenlemeleri yapılmalı ve iş istasyonları arasındaki mesafeler optimize edilmelidir.



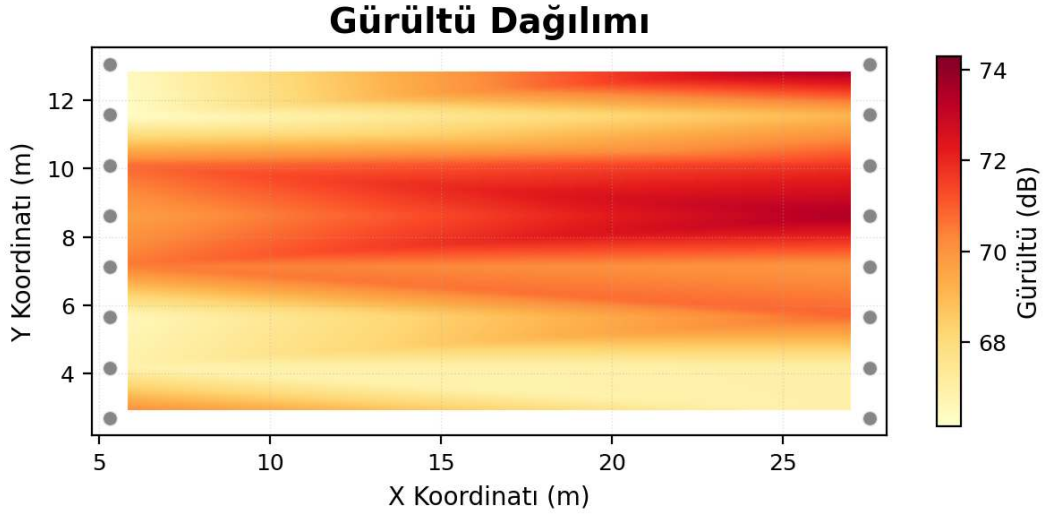
Şekil 4.13. Hazırlık Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

Aksesuar bölgesinde 63,04 dB olarak ölçülen gürültü seviyesi, çalışanların uzun süre maruz kalmaları durumunda rahatsız edici olabilir. Ses yalıtım malzemeleri kullanılarak bu seviyeler düşürülebilir. Sürdürülebilir üretim açısından, geri dönüştürülebilir malzemelerle yapılan yalıtım sistemleri tercih edilmelidir.



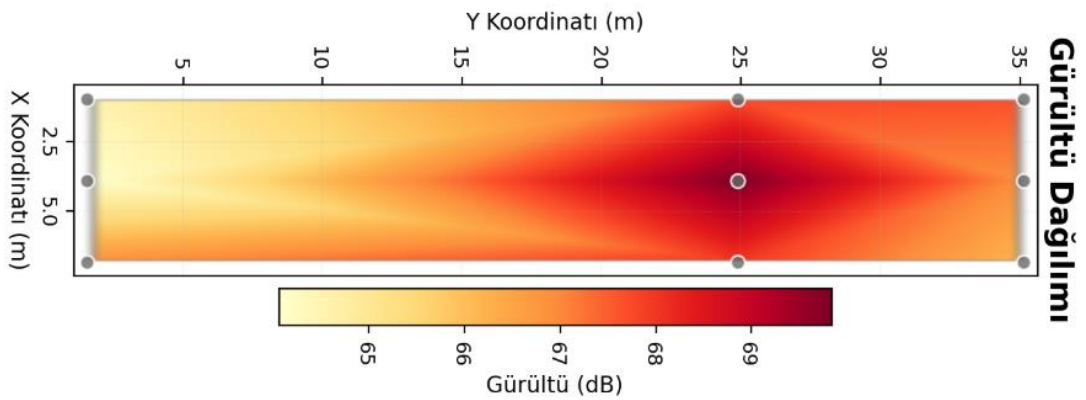
Şekil 4.14. Aksesuar Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

Dikimhane bölgesinde ölçülen gürültü seviyesi 69,42 dB olarak belirlenmiştir. Bu seviyede çalışanların uzun süre maruz kalmaları işitme sağlığı açısından risk oluşturabilir. Çalışanların kulak koruyucu ekipmanlar kullanması sağlanmalı ve makinelerin titreşimini azaltan yalıtım malzemeleri uygulanmalıdır. Enerji tasarrufu sağlamak için, düşük sesli motorlar ve elektrik tüketimi optimize edilmiş makineler kullanılmalıdır.



Şekil 4.15. Dikimhane Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

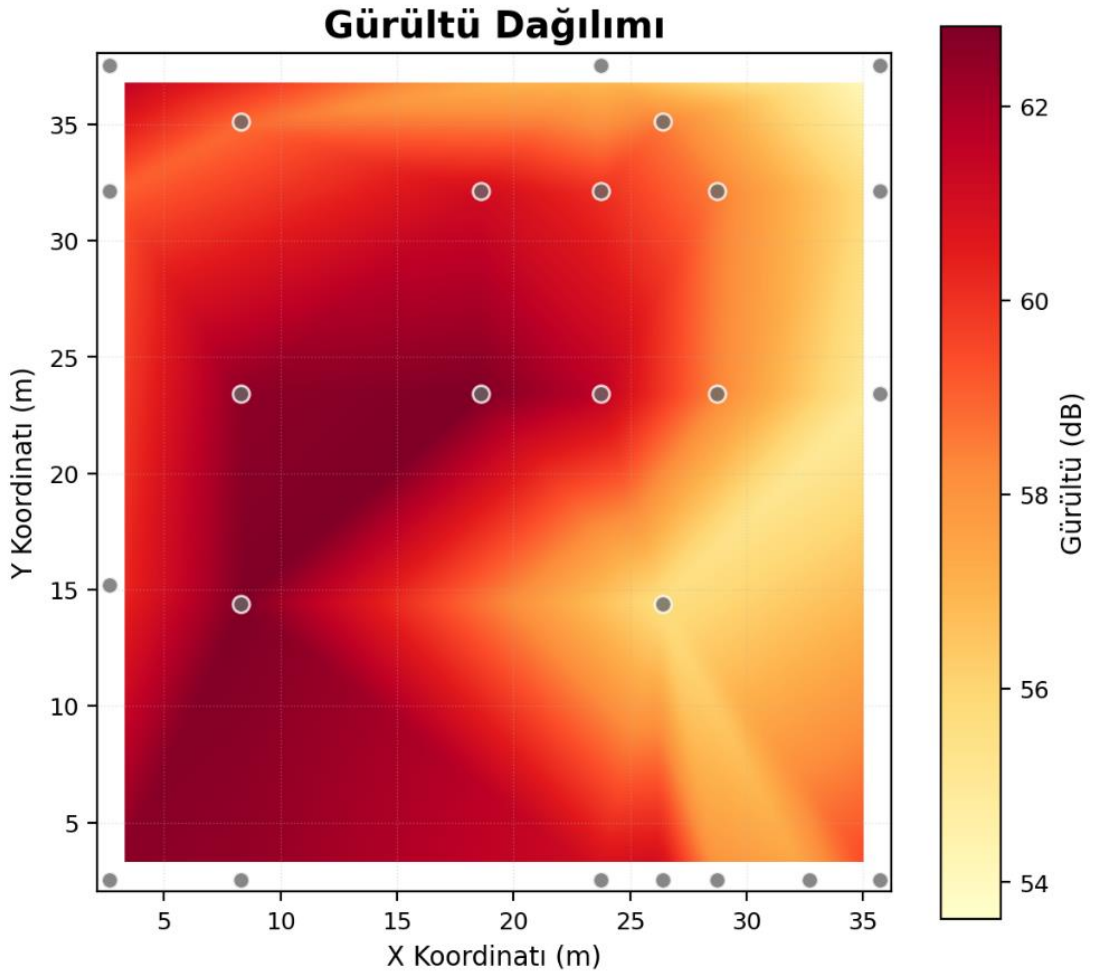
Paketleme bölgesinde ortalama 66,86 dB seviyesinde gürültü ölçülmüştür. Çalışma alanında ses yalıtım sistemlerinin kullanımı önerilmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından, paketleme hatlarında gürültüyü azaltan yumuşak kaplamalar ve yenilenebilir malzemelerden yapılmış izolasyon ürünleri kullanılabilir.



Şekil 4.16. Paketleme Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

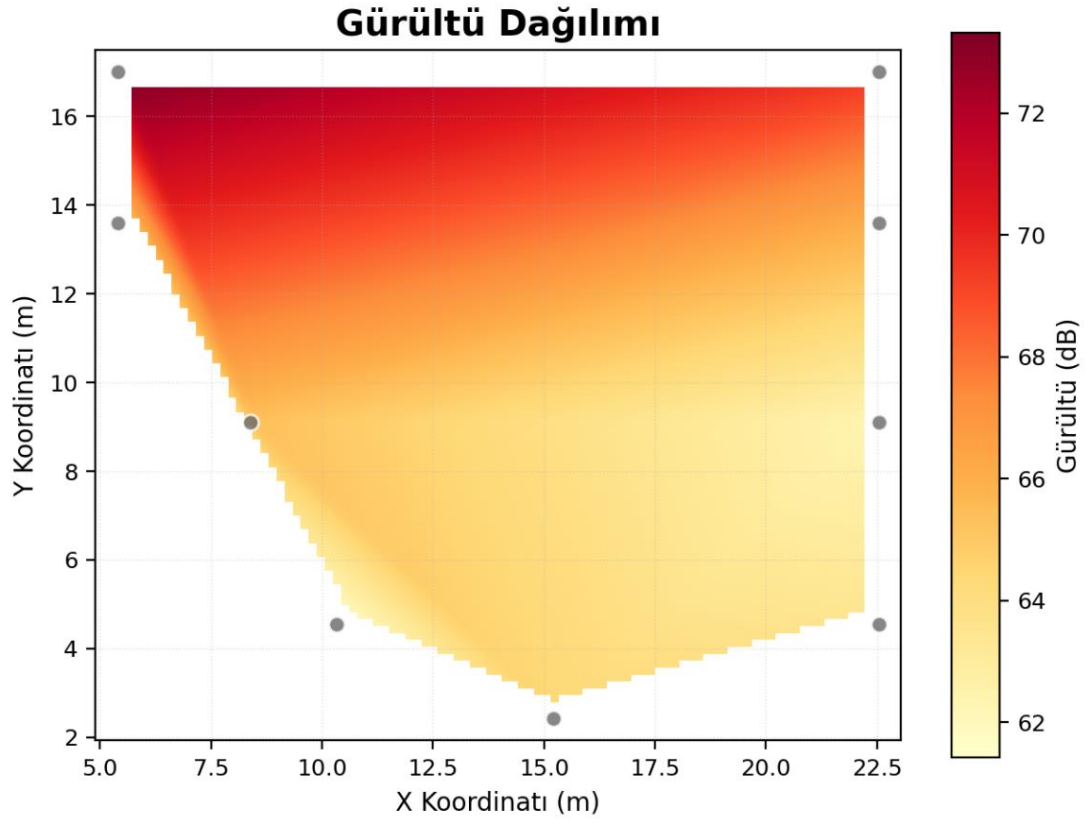
Depo sevkiyat bölgesinde ortalama 59,40 dB gürültü seviyesi ölçülmüştür. Bu değer, çalışma ortamında düşük riskli kabul edilse de, gürültünün dalgalanmaması için forklift gibi gürültü kaynağı olan makinelerde bakım periyotları artırılmalıdır. Enerji verimliliğini

artırmak adına, elektrikli ve sessiz çalışan taşıma sistemlerine geçiş önerilmektedir.



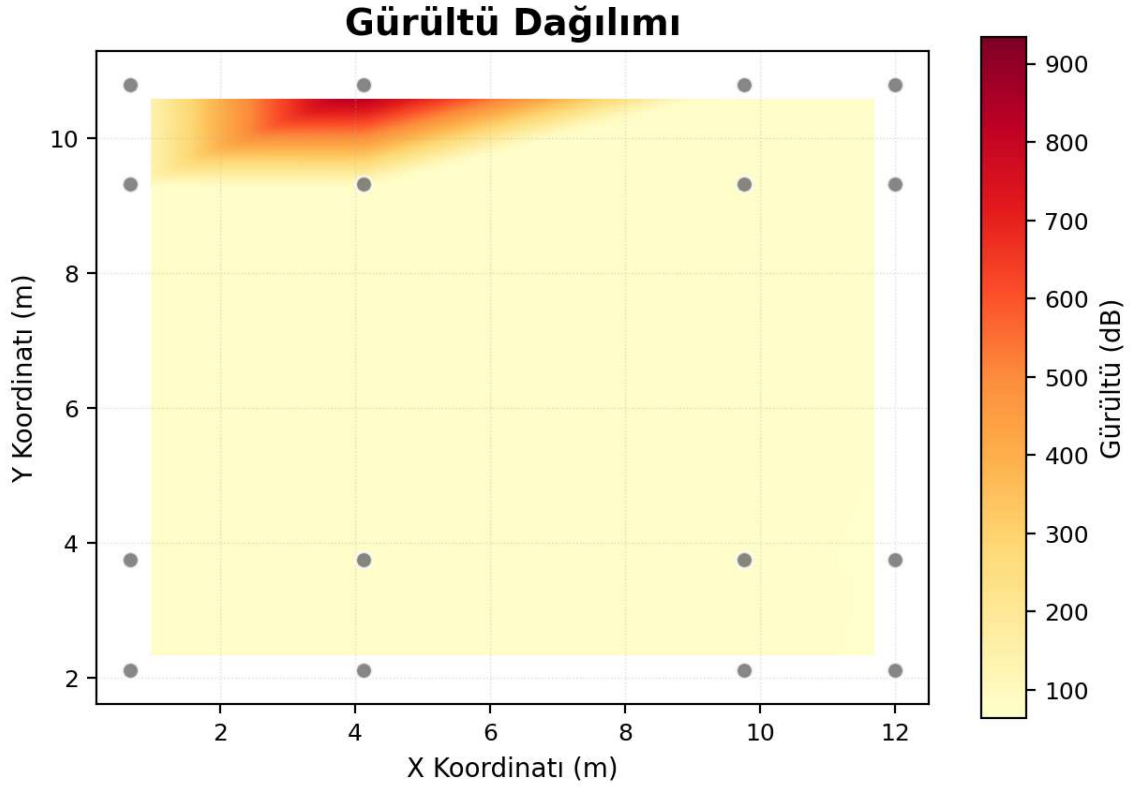
Şekil 4.17. Depo Sevkiyat Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

Kumaş kesim bölgesinde ölçülen gürültü seviyesi 65,54 dB'dir. Çalışanların dikkat seviyelerini koruyabilmesi için ortam akustiğinin iyileştirilmesi önerilmektedir. Gürültü seviyesini düşürmek için makinelerin altına titreşim önleyici kauçuk pedler eklenebilir. Çevre dostu üretim açısından, makinelerin enerji tüketimini azaltacak otomasyon sistemlerine entegrasyonu önerilmektedir.



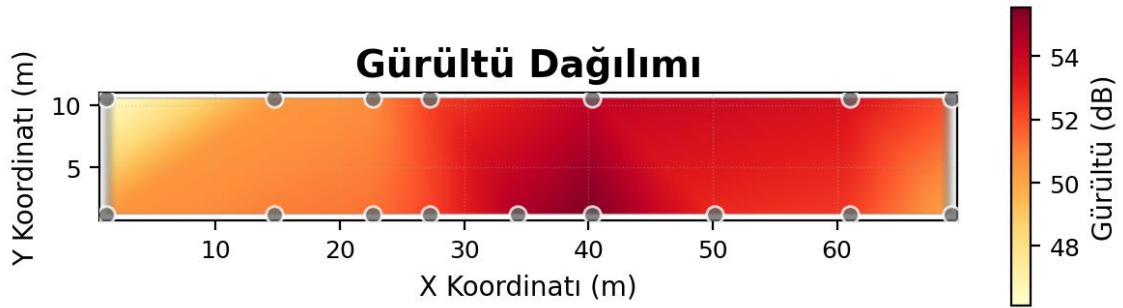
Şekil 4.18. Kumaş Kesim Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

Yemekhane bölgesinde 72,02 dB seviyesinde gürültü ölçülmüştür. Yemekhane alanındaki yankıyı azaltmak için akustik tavan panelleri ve duvar kaplamaları kullanılmalıdır. Ayrıca, çalışanların daha huzurlu bir yemek ortamında bulunabilmesi için ses emici malzemeler önerilmektedir. Enerji verimliliği açısından, doğal havalandırma sistemleri ve enerji tasarruflu aydınlatmalarla yemekhane alanı optimize edilebilir.



Şekil 4.19. Yemekhane Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

Kumaş deposunda ölçülen ortalama gürültü seviyesi 51,89 dB'dir. Bu seviye, en düşük gürültü seviyesine sahip bölge olup, ek önlem gerektirmemektedir. Ancak, çevresel iyileştirme kapsamında, depo alanlarında ses yalıtımı sağlanarak çalışanların konforu artırılabilir ve enerji verimliliği sağlanabilir.



Şekil 4.20. Kumaş Deposu Bölgesi Gürültü Sonuç Grafiği

4.3. ENDÜSTRİYEL KURULUŞUN İÇ ORTAM AYDINLATMA ETKİNLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

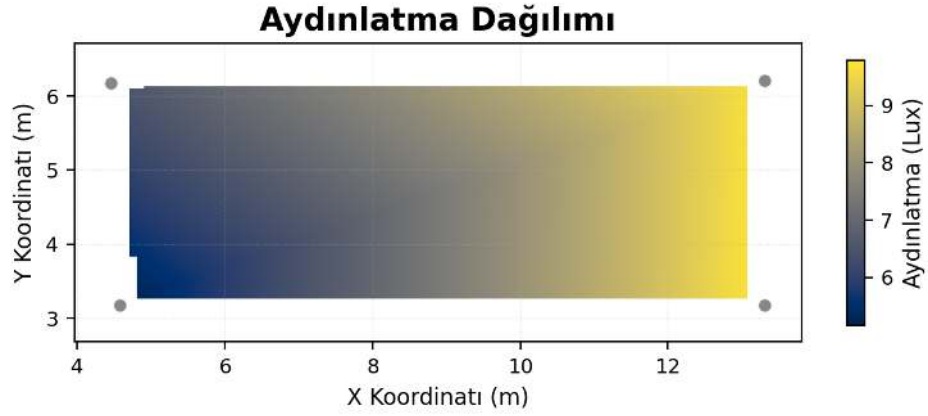
Çalışmada endüstrinin iç ortam aydınlatma etkinliği belirlenmeye çalışılmıştır. İç ortam aydınlatma etkinliğinin mimari açıdan değerlendirildiği çalışmalar bulunmaktadır (Mahmoudzadeh vd., 2024; İzmirlioğlu ve Sözer, 2025). İç ortam aydınlatma etkinliğinin değerlendirilmesi endüstriyel kuruluşlar açısından da önem teşkil etmektedir. Endüstrinin belirlenen bölgelerde yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Buna göre aydınlatma etkinliğinin en yüksek olduğu bölge “Dikimhane” bölgesi iken, aydınlatma etkinliğinin en düşük olduğu bölge “Örme” bölgesidir.

Çizelge 4.3. Bölgelere Göre Aydınlatma Şiddeti Ölçüm Sonuçları.

Bölge Adı	Ölçüm Yapılan Nokta Sayısı	Ortalama Aydınlatma Şiddeti (Lx)	Standart Sapma (SS)
Bölge 1 (Örme)	4	07,80	0,55
Bölge 2 (İplik Alanı)	4	59,81	3,86
Bölge 3 (Hazırlık)	4	136,70	0,34
Bölge 4 (Aksesuar)	4	88,34	0,90
Bölge 5 (Dikimhane)	16	265,95	3,05
Bölge 6 (Paketleme)	9	244,12	1,16
Bölge 7 (Depo Sevkiyat)	25	303,77	40,87
Bölge 8 (Kumaş Kesim)	9	63,46	0,81
Bölge 9 (Yemekhane)	16	241,16	16,12
Bölge 10 (Kumaş Deposu)	16	51,38	0,33

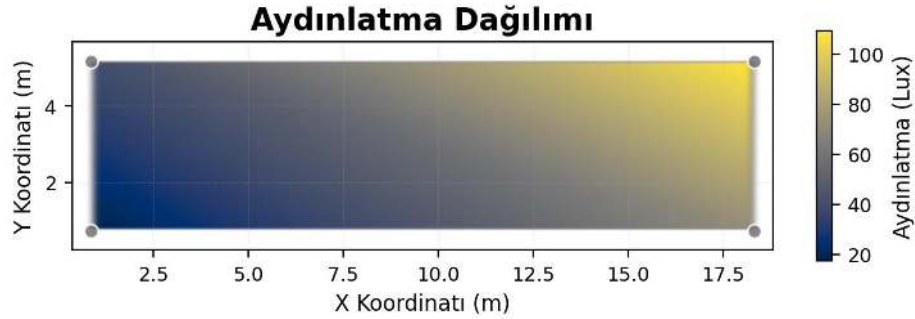
Çalışmada bölgelere göre elde edilen aydınlatma şiddetinin mekansal dağılımını gösteren modeller, Şekil 4.21'den Şekil 4.30'a kadar olan görsellerde sunulmuştur. Bu ısı haritalarında, x ve y eksenleri ilgili bölgenin boyutlarını metre cinsinden ifade etmekte olup, aydınlatma şiddeti (lüks) ise renk skalası ile gösterilmektedir.

Örme bölgesinde ortalama aydınlatma seviyesi 7,80 lüks olarak ölçülmüştür. Bu değer, çalışma ortamları için önerilen minimum sınırın oldukça altındadır. Yetersiz aydınlatma çalışanların göz yorgunluğunu artırabilir, hata oranlarını yükseltebilir ve iş kazalarına neden olabilir. Bu nedenle, enerji verimli LED aydınlatma sistemleri ile ortamın aydınlatma seviyesi artırılmalıdır. Temiz üretim açısından ise gün ışığından daha fazla yararlanmak için pencerelerin konumlandırılması ve yansıtıcı yüzeyler kullanılması önerilmektedir.



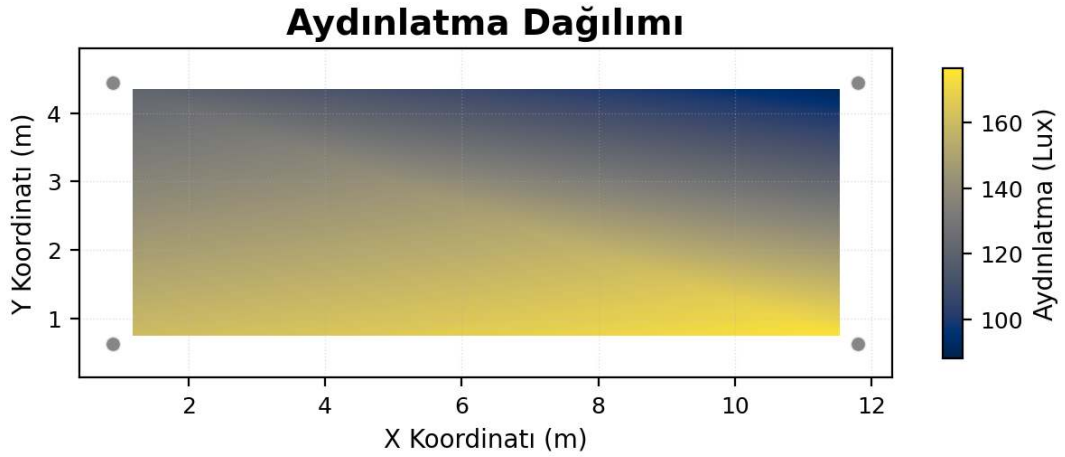
Şekil 4.21. Örme Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

İplik alanında ölçülen ortalama aydınlatma şiddeti 59,81 lüks olarak belirlenmiştir. Bu değer, temel aydınlatma ihtiyaçlarını karşılamaya yakın olsa da, daha hassas çalışma gerektiren işler için yetersiz olabilir. Çalışanların göz sağlığını korumak için daha dengeli ve homojen bir aydınlatma sağlanmalıdır. Enerji verimliliği açısından, hareket sensörlü LED lambalar kullanılarak gereksiz enerji tüketimi azaltılabilir.



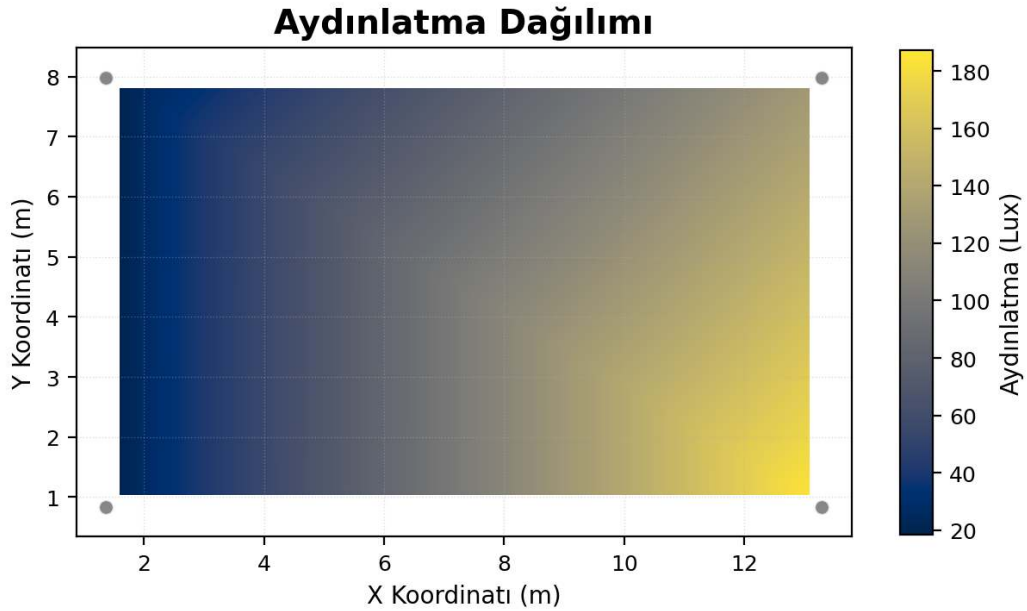
Şekil 4.22. İplik Alanı Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Hazırlık bölgesinde ortalama 136,70 lüks aydınlatma seviyesi ölçülmüştür. Bu değer, genel çalışma alanları için yeterli kabul edilse de, hassas işlerde ilave aydınlatmaya ihtiyaç duyulabilir. Aydınlatma homojenliğinin artırılması için ışık kaynaklarının yerleşimi optimize edilmelidir. Çevresel etkilerin azaltılması adına, düşük karbon salımlı aydınlatma sistemleri tercih edilmelidir.



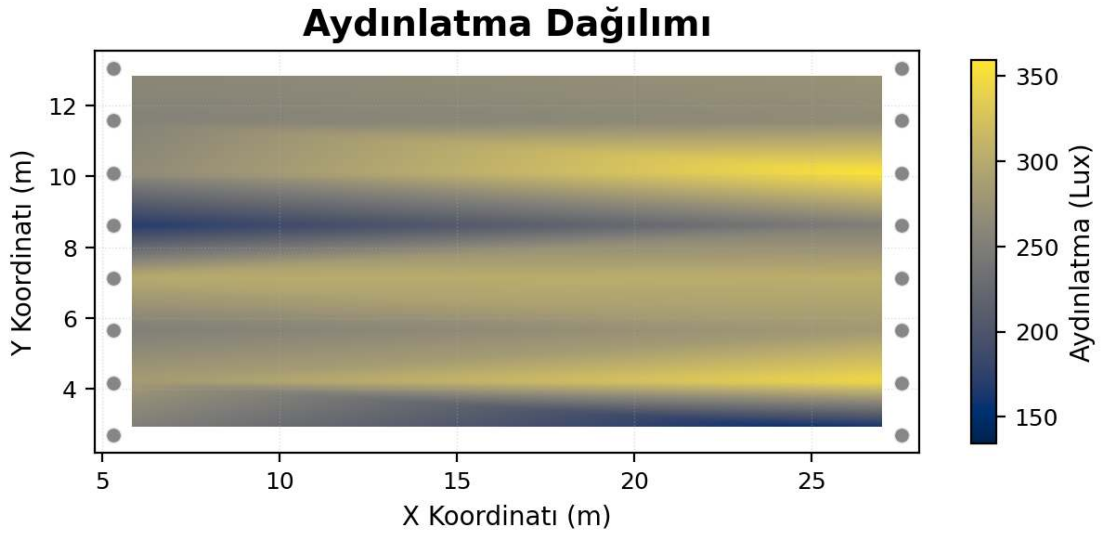
Şekil 4.23. Hazırlık Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Aksesuar bölgesinde 88,34 lüks seviyesinde aydınlatma ölçülmüştür. Çalışanların görsel konforunu artırmak ve hataları minimize etmek için ışığın renk sıcaklığı ve homojenliği dikkate alınmalıdır. Bu bölgede sürdürülebilirlik açısından, düşük enerji tüketimli aydınlatma armatürleri kullanılması önerilmektedir.



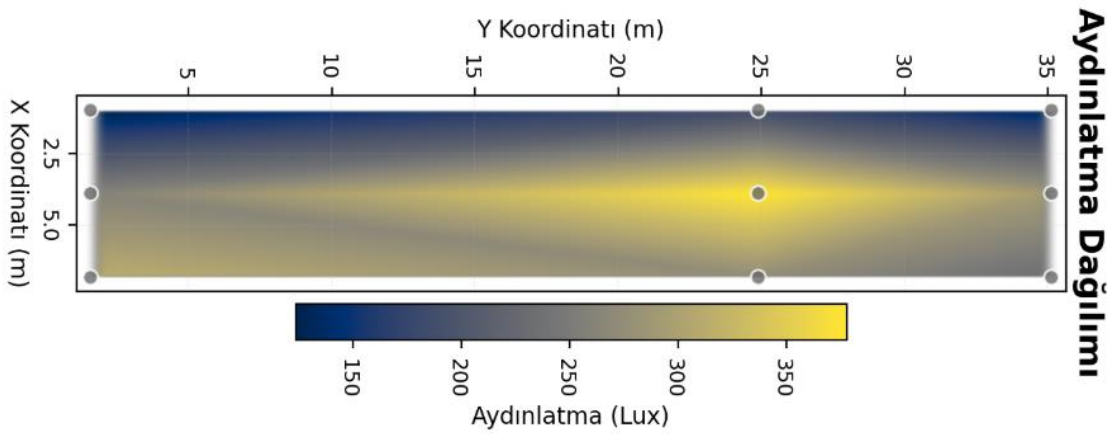
Şekil 4.24. Aksesuar Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Dikimhane bölgesinde 265,95 lüks seviyesinde aydınlatma ölçülmüştür. Bu değer, dikiş ve detaylı işçilik gerektiren faaliyetler için uygundur. Ancak, kamaşmayı önlemek için ışık kaynaklarının uygun açılarla yerleştirilmesi gerekmektedir. Temiz üretim çerçevesinde, enerji tasarruflu aydınlatma sistemleri kullanılarak karbon ayak izi azaltılabilir.



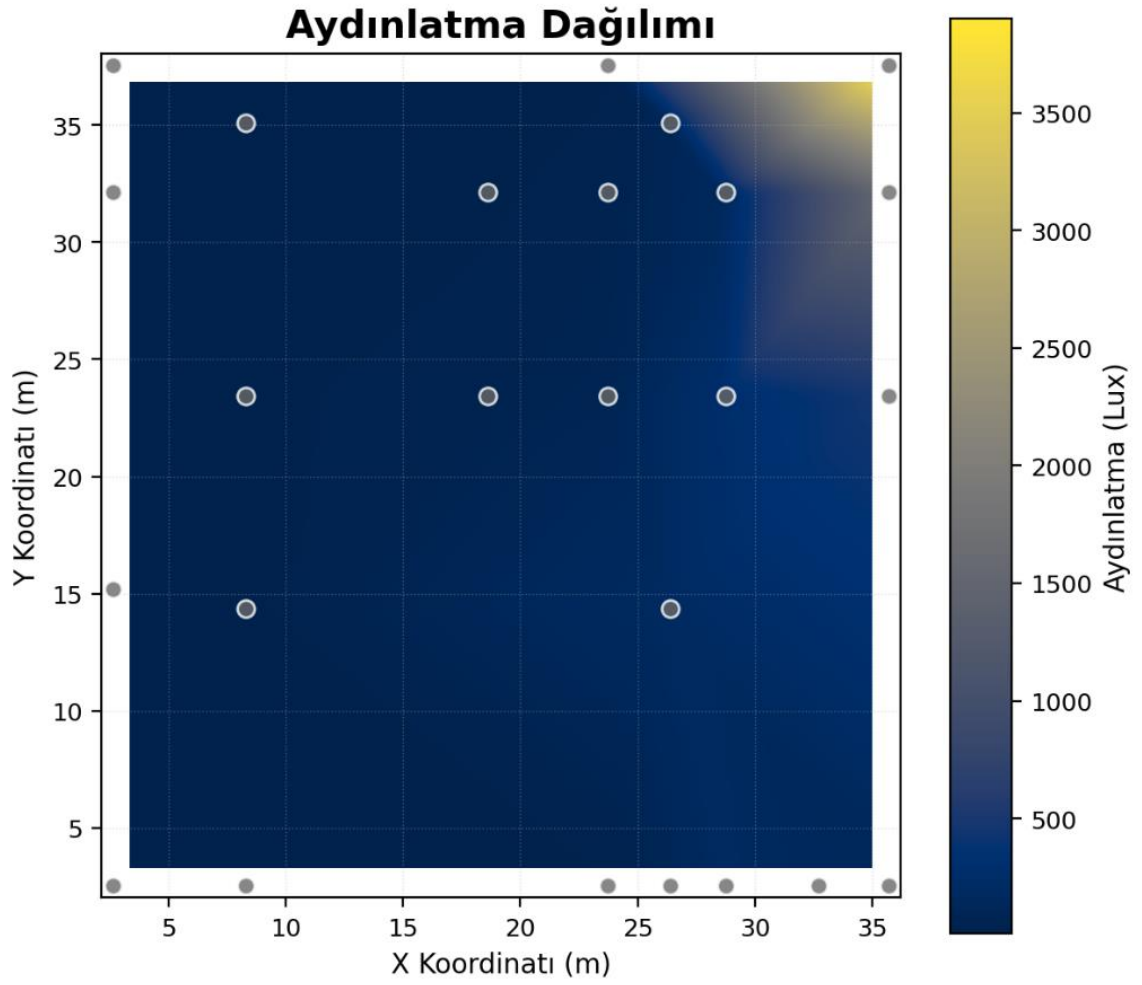
Şekil 4.25. Dikimhane Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Paketleme bölgesinde ölçülen 244,12 lüks seviyesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından uygundur. Çalışanların göz yorgunluğunu önlemek için ışığın parlaklığı dengelenmelidir. Sürdürülebilirlik kapsamında, düşük tüketimli LED lambalar ve hareket sensörleri ile aydınlatma sistemleri optimize edilmelidir.



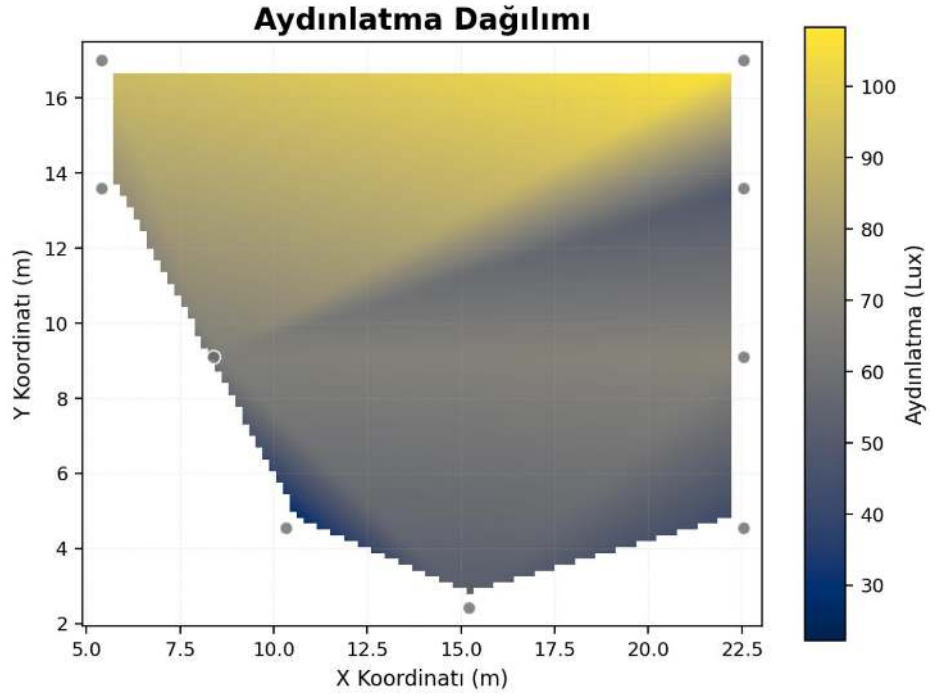
Şekil 4.26. Paketleme Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Depo sevkiyat bölgesinde 303,77 lüks seviyesinde aydınlatma ölçülmüştür. Depo alanlarında genellikle daha düşük aydınlatma değerleri yeterli olsa da, güvenli taşıma ve iş verimliliği için bu seviyenin korunması gerekmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından, güneş enerjili aydınlatma sistemleri entegre edilerek enerji tasarrufu sağlanabilir.



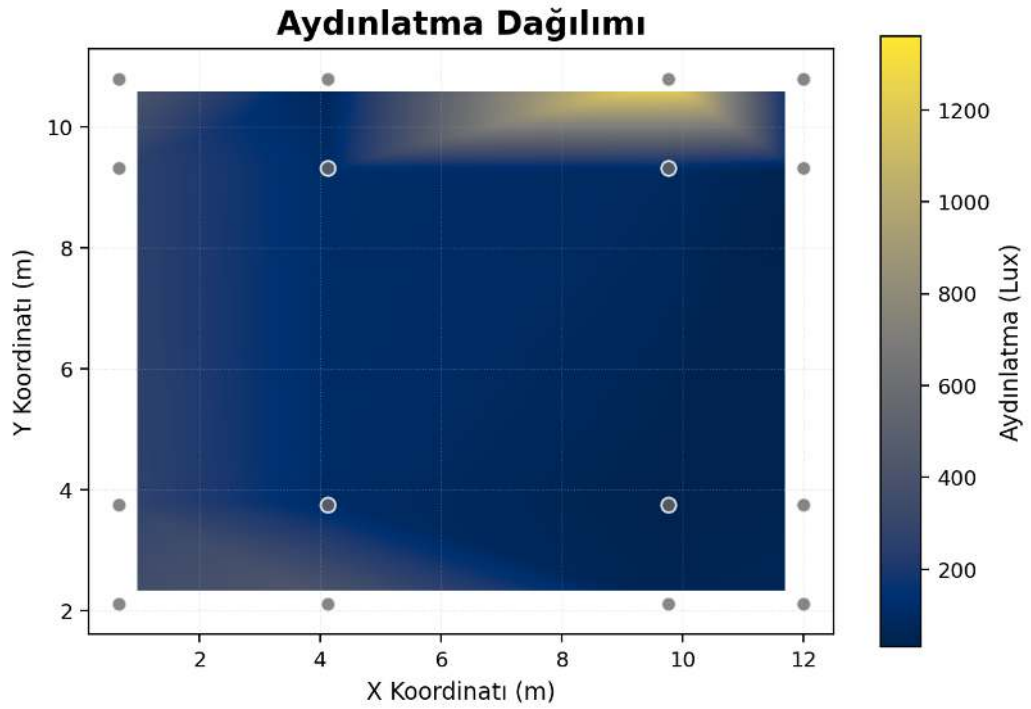
Şekil 4.27. Depo Sevkiyat Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Kumaş kesim bölgesinde ortalama 63,46 lüks ölçülmüştür. Kesim işlemlerinde detayların iyi görülmesi gerektiğinden, bu seviye yetersiz olabilir. Aydınlatma şiddetinin artırılması ve homojen bir dağılım sağlanması önerilmektedir. Sürdürülebilir üretim kapsamında, enerji tasarruflu ve uzun ömürlü ışık kaynaklarının kullanımı teşvik edilmelidir.



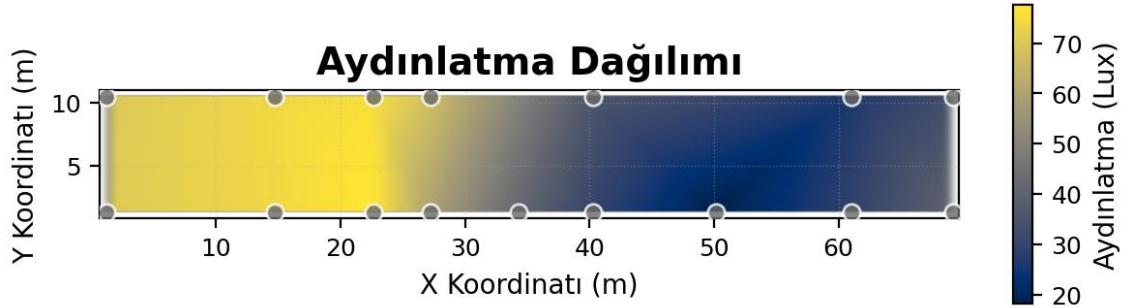
Şekil 4.28. Kumaş Kesim Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Yemekhane bölgesinde 241,16 lüks seviyesinde aydınlatma ölçülmüştür. Konforlu ve sağlıklı bir yemek ortamı sağlamak için aydınlatmanın homojen olması önemlidir. Gün ışığından daha fazla yararlanmak için geniş cam yüzeyler veya reflektörlü aydınlatma sistemleri önerilmektedir.



Şekil 4.29. Yemekhane Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

Kumaş deposunda ortalama 51,38 lüks seviyesinde aydınlatma ölçülmüştür. Depolama alanları için genellikle daha düşük aydınlatma yeterli olmakla birlikte, güvenli çalışmayı sağlamak için belirli bölgelerde ek ışıklandırma sağlanabilir. Enerji verimliliği için akıllı aydınlatma sistemleri kullanılmalı ve gereksiz enerji tüketimi önlenmelidir.



Şekil 4.30. Kumaş Deposu Bölgesi Aydınlatma Şiddeti Sonuç Grafiği

4.3.1. Aydınlatma Kaynaklı Enerji Tüketimi ve Güneş Enerjisi Kazanım Potansiyeli

Aydınlatma sistemlerinin etkinliği, sadece sağladığı görsel konforla değil, aynı zamanda enerji tüketimi ve çevresel etkileriyle de değerlendirilmelidir. Bu başlık altında, incelenen tekstil tesisinin mevcut aydınlatma sisteminin enerji tüketim profili çıkarılmış ve bu ihtiyacın çatı tipi bir Güneş Enerjisi Santrali (GES) ile karşılanma potansiyeli analiz edilmiştir.

4.3.1.1. Mevcut Aydınlatma Sisteminin Enerji Tüketim Analizi

Tesiste yapılan incelemelerde, aydınlatma amacıyla, her biri 36 Watt gücünde olan toplam 347 adet T8 tipi floresan lamba kullanıldığı tespit edilmiştir. Tesiste kullanılan floresan lambalar Şekil 4.31'de gösterilmektedir. Tesisin ayda ortalama 20 gün ve günde 9 saat çalıştığı bilgisi temel alınarak, aydınlatma sisteminin toplam kurulu gücü ve yıllık enerji tüketimi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

- Toplam Kurulu Güç: $347 \text{ adet} \times 36 \text{ Watt/adet} = 12.492 \text{ Watt} = 12,49 \text{ kW}$
- Yıllık Çalışma Süresi: $9 \text{ saat/gün} \times 20 \text{ gün/ay} \times 12 \text{ ay/yıl} = 2.160 \text{ saat/yıl}$
- Yıllık Enerji Tüketimi: $12,49 \text{ kW} \times 2.160 \text{ saat/yıl} = 26.982,72 \text{ kWh/yıl}$

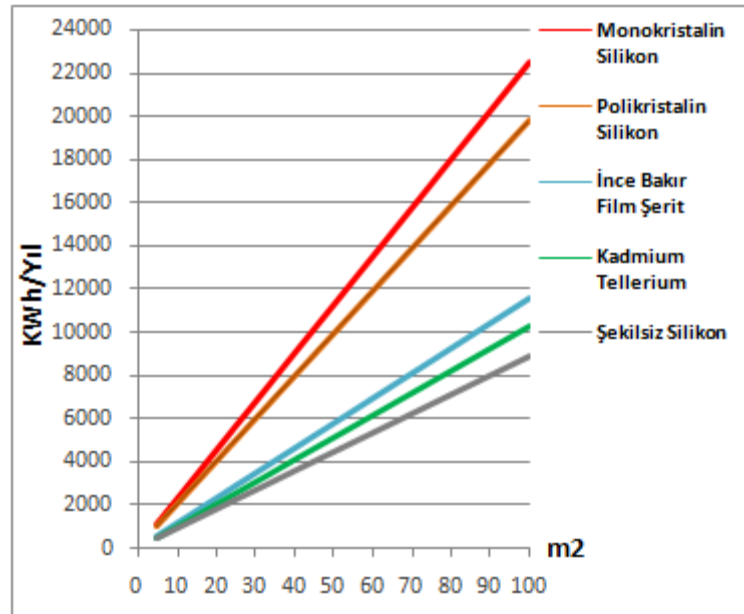
Hesaplamalar, mevcut aydınlatma sisteminin yılda yaklaşık 27.000 kWh elektrik tükettiğini göstermektedir. Bu, tesisin toplam yıllık elektrik tüketimi olan 956.475 kWh'in yaklaşık %2,8'ini oluştursa da, verimsiz floresan teknolojisi nedeniyle önemli bir enerji tasarrufu ve temiz üretim potansiyeli barındırmaktadır.



Şekil 4.31. Tesiste Aydınlatma Amacı İle Kullanılan Floresanlar

4.3.1.2. Çatı Tipi Güneş Enerjisi Santrali (GES) Kazanım Analizi

Aydınlatma ve diğer operasyonel ihtiyaçların temiz enerji ile karşılanması potansiyelini değerlendirmek amacıyla, tesisin çatı alanı için bir GES fizibilitesi yapılmıştır. Tesisin 120 metreye 40 metre boyutlarındaki çatısının (toplam 4.800 m²) %70'inin (3.360 m²) PV panel kurulumu için verimli bir şekilde kullanılabileceği varsayılmıştır. GEPA (2024) verileri temel alınarak, bu alana kurulabilecek farklı PV panel teknolojilerine göre elde edilebilecek yıllık enerji üretimi Çizelge 4.4'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.32. Düzce İli İçin Farklı PV Panel Tiplerinin Yıllık Enerji Üretim Potansiyeli (GEPA, 2024).

Çizelge 4.4’ te, 3.360 m²’lik alanda farklı PV panel tiplerinin yıllık enerji üretim potansiyelini gösterilmektedir:

Çizelge 4.4. PV Panel Tipi-Yıllık Enerji Üretimi Karşılaştırması.

Panel Tipi	Yüzey Alanı (m ²)	Verim (%)	Yıllık Üretim (kWh)
Monokristalin Silikon	3.360	23	775.123
Polikristalin Silikon	3.360	19	646.311
İnce Film (CIGS)	3.360	15	517.049
CdTe	3.360	13.75	474.627
Amorf Silikon (a-Si)	3.360	10	345.682

Çizelge 4.4’ teki analiz, en yüksek verime sahip monokristalin silikon panellerin kullanılması durumunda, tesiste yıllık yaklaşık 775.123 kWh elektrik enerjisi üretme potansiyeli bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu potansiyel üretim miktarı, sadece aydınlatma kaynaklı yıllık 27.000 kWh’lik tüketimi yaklaşık 28 kat aşmakla kalmayıp, aynı zamanda tesisin toplam elektrik tüketiminin de %81’ini karşılayabilecek düzeydedir. Bu durum, kurulacak bir GES sisteminin tesisi enerji açısından büyük ölçüde bağımsız hale getirebileceğini ve önemli bir gelir modeli oluşturma potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

Sistemin çevresel katkısı da bu analizin önemli bir boyutunu oluşturmaktadır. Yüksek verimli panellerle üretilecek bu enerji, yıllık yaklaşık 329,4 ton karbondioksit (CO₂) eşdeğeri (Türkiye için ortalama 0,425 kgCO₂e/kWh emisyon faktörü baz alınarak) sera gazı salımının önüne geçilmesini sağlayacaktır. Bu miktar, doğaya yaklaşık 14.900 adet yetişkin ağacın bir yılda absorbe ettiği CO₂ miktarına eşdeğer bir çevresel fayda anlamına gelmektedir. Bu bulgular, GES yatırımının sadece ekonomik bir hamle değil, aynı zamanda işletmenin sürdürülebilirlik hedeflerine ve temiz üretim vizyonuna hizmet eden güçlü bir çevresel eylem olduğunu kanıtlamaktadır.

4.4. ÖRNEK UYGULAMA: TEKSTİL İŞLETMESİ PAKETLEME BÖLÜMÜ AYDINLATMA ANALİZİ

Geliştirilen LEAF yazılımının pratik uygulamasını ve yeteneklerini göstermek amacıyla, daha önce incelenen tekstil işletmesinin paketleme bölümü için bir aydınlatma analizi gerçekleştirilmiştir. Paketleme bölümü, ürünlerin son kontrolünün yapıldığı, etiketlendiği ve sevkiyata hazırlandığı, dolayısıyla doğru ve yeterli aydınlatmanın önemli olduğu bir alandır.

Paketleme bölümünün toplam alanı 320 m² olarak ölçülmüştür. Bölümde, her biri 36 Watt gücünde ve 3500 lümen ışık akısına sahip 15 adet T8 tipi floresan tüp armatür kullanılmaktadır. Bu armatürler, vardiya düzenine bağlı olarak günde ortalama 8 saat çalışmaktadır. Analiz sırasında güncel ticarethane elektrik birim fiyatı 4.47 TL/kWh olarak alınmıştır. Gün ışığından faydalanma imkanının bu bölümde kısıtlı olduğu gözlemlenmiş ve "Gün Işığı Durumu" "Yok veya Belirgin Değil" olarak, "Zaman Dilimi" ise "Gündüz (Diğer Saatler/Az Işık)" olarak seçilmiştir. Bu veriler LEAF yazılımının ilgili giriş alanlarına girilmiştir.





A. Alan Bilgileri

Oda Alanı (m²):

Kullanım Kategorisi:

Endüstriyel Alanlar - Depo ve Loji: ▾

Detaylı Alan/Görev:

Paketleme ve Kargo Hazırlık Alanı ▾



B. Aydınlatma Kaynağı



Toplam Lümen/Watt Değerlerini Manuel Gireceğim

Ampul Adedi:

Ampul Tipi:

Floresan Tüp (T8/T5 - Standart 120cm, Balastlı) ▾

Ampul Lümen/Watt:

3500 lm (36W) ▾

Toplam Lümen (Manuel):

52000

Toplam Watt (Manuel):

576



C. Zaman ve Kullanım Koşulları

Günün Zaman Dilimi:

Gündüz (Diğer Saatler/Az Işık) ▾



Oda Belirgin Gün Işığı Alıyor mu?

Günlük Kullanım (saat):

8



Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh):

4,47



Analiz Et ve Değerlendir

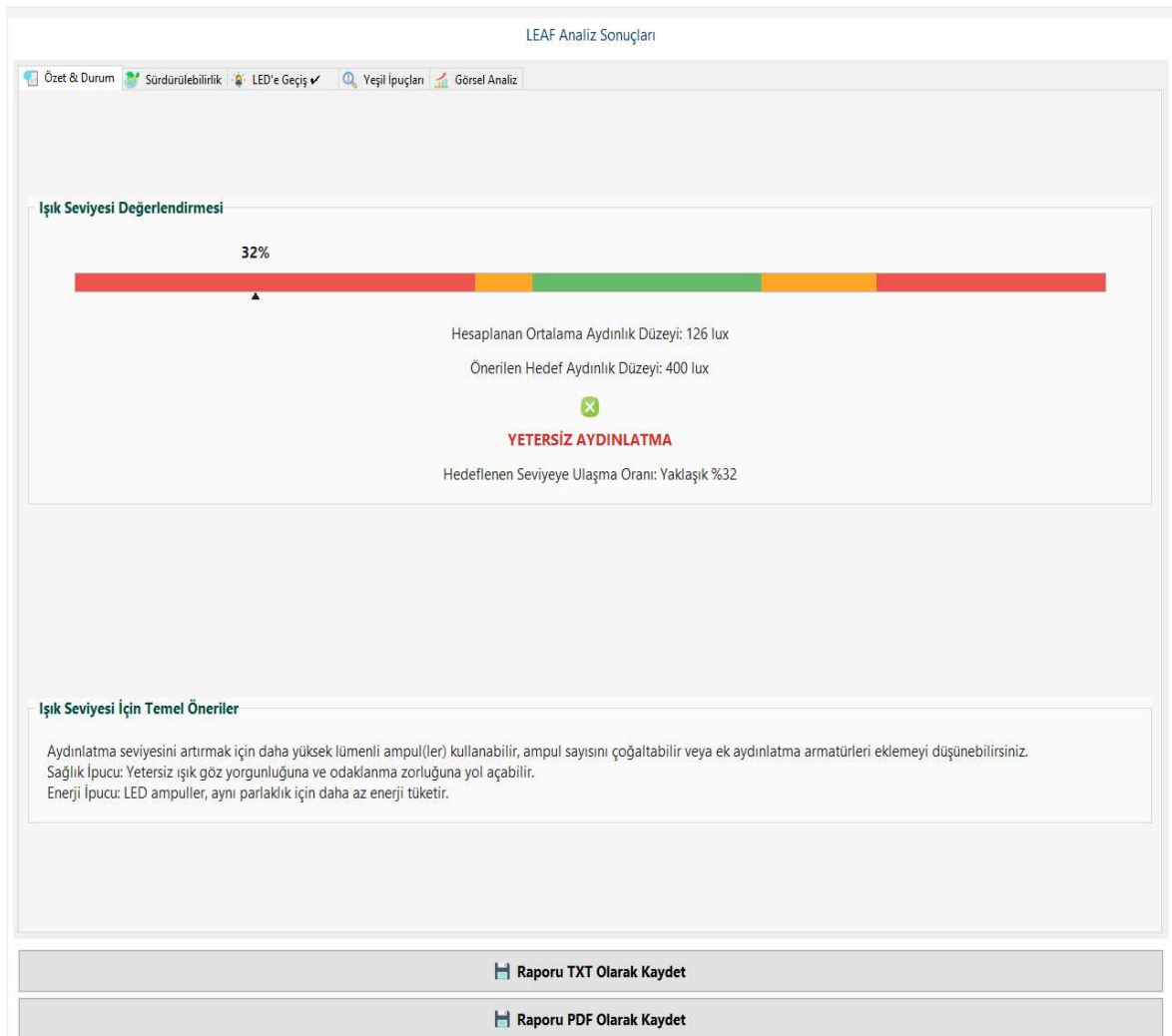


Ana Sayfaya Dön

Şekil 4.33. Yazılım Veri Giriş Ekranı

Yukarıdaki girdilere dayanarak LEAF yazılımı tarafından üretilen analiz raporu, paketleme bölümündeki mevcut aydınlatma durumunu ve potansiyel iyileştirmeleri ortaya koymaktadır.

Rapor sonuçlarına göre, paketlenme bölümündeki mevcut aydınlatma sistemi ile hesaplanan ortalama aydınlık düzeyi 126 lux'tür. "Paketleme ve Kargo Hazırlık Alanı" için önerilen hedef aydınlık düzeyi olan 400 lux (TS EN 12464-1 [TSE, 2013] referans alınarak) dikkate alındığında, mevcut aydınlatmanın hedefin sadece %32'sini karşıladığı ve "YETERSİZ AYDINLATMA" kategorisinde olduğu görülmektedir. Bu durum, paketlenme işlemlerinde görsel hatalara, çalışan yorgunluğuna ve verimlilik düşüşüne neden olabilir. Yazılımın sunduğu "Özet ve Durum" sekmesindeki görsel gösterge (gauge) de bu yetersizliği teyit etmektedir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. Yazılım Özet/Durum Sekmesi

Çevresel etki ve verimlilik göstergeleri incelendiğinde, mevcut floresan sisteminin yıllık 1576.80 kWh enerji tükettiği, bunun sonucunda 7048.30 TL maliyete ve 678.02 kg CO₂ salımına (yaklaşık 32 ağacın yıllık emilimine eşdeğer) neden olduğu görülmektedir. Seçilen floresan tüplerin aydınlatma etkinliği 97.2 lm/W olarak hesaplanmış olup, genel

sürdürülebilirlik puanı 10 üzerinden 1.9 gibi oldukça düşük bir seviyededir. Bu düşük puan, hem yüksek enerji tüketimi ve maliyeti hem de yetersiz aydınlatma performansından kaynaklanmaktadır.

LEAF yazılımı, bu verimsiz duruma karşılık olarak bir LED geçiş senaryosu da sunmuştur. Önerilen alternatif, her biri 30000 lümen ışık akısına ve 240 Watt güce sahip 2 adet Endüstriyel LED Yüksek Tavan Armatürü (High Bay) kullanılmasıdır. Bu alternatif, toplamda 60000 lümen ışık sağlayarak (mevcut 52500 lümene kıyasla önemli bir artış) ve toplam gücü 480 Watt'a düşürerek (mevcut 540 Watt'a göre %11 azalma) hem aydınlık seviyesini hedefe yaklaştıracak hem de enerji tasarrufu sağlayacaktır. Bu geçişle yıllık bazda yaklaşık 175.20 kWh enerji, 783.14 TL maliyet ve 75.34 kg CO₂ salımı tasarrufu öngörülmektedir. Yazılımın "LED'e Geçiş" sekmesinde bu bilgiler detaylı olarak sunulmuştur.

"Görsel Analiz" sekmesinde sunulan grafikler, bu durumu daha çarpıcı bir şekilde ortaya koymaktadır. Şekil 4.35'te, mevcut floresan sisteminin yıllık enerji tüketimi, maliyeti ve CO₂ salımı ile önerilen LED alternatifinin bu metriklerdeki potansiyel değerleri karşılaştırmalı çubuk grafiklerle gösterilmektedir.



Şekil 4.35. Yazılım LED'e Geçiş Sekmesi

Aynı sekmede yer alan aydınlatma etkinliği grafiği (Şekil 4.36), mevcut floresan sisteminin (97.2 lm/W) etkinliğinin, önerilen LED High Bay armatürlerinin (30000 lm / 240 W = 125 lm/W) ve diğer referans aydınlatma teknolojilerinin etkinlikleriyle kıyaslandığında nerede konumlandığını göstermektedir. LED alternatifinin belirgin şekilde daha yüksek bir etkinlik sunduğu açıktır.



Şekil 4.36. Yazılım Aydınlatma Teknolojileri Kıyaslama Sekmesi

Son olarak, yazılım tarafından sunulan yeşil ipuçları (Şekil 4.37), işletmenin genel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması için ek öneriler sunmaktadır. Bu örnek analiz, LEAF yazılımının bir endüstriyel alandaki aydınlatma sisteminin mevcut durumunu değerlendirme, iyileştirme potansiyellerini belirleme ve bu iyileştirmelerin çevresel ve ekonomik faydalarını somut verilerle ortaya koyma yeteneğini göstermektedir.

SÜRDÜRÜLEBİLİR AYDINLATMA İPUÇLARI

- Düşük sürdürülebilirlik puanı, hem cebinize hem de çevreye olumsuz yansır. Küçük değişikliklerle hem tasarruf edin hem de daha yeşil bir geleceğe katkıda bulunun.
- Kullanım ömrü dolan CFL (tasarruflu) ampuller cıva içerir; bunları evsel atıklarla karıştırmayın ve yerel yönetiminizin belirlediği özel atık toplama noktalarına teslim edin.

Şekil 4.37. “Yeşil İpuçları”

4.4.1. LEAF Yazılımının Literatürdeki Diğer Araçlarla Karşılaştırılması

Geliştirilen LEAF yazılımının literatürdeki ve piyasadaki yerini doğru konumlandırmak için, mevcut profesyonel aydınlatma tasarım ve analiz araçlarıyla karşılaştırılması gerekmektedir. Piyasada, DIALux ve RELUX gibi, aydınlatma mühendisleri ve mimarlar tarafından yaygın olarak kullanılan son derece gelişmiş yazılımlar bulunmaktadır. Bu araçlar, karmaşık 3D mekan modellemesi, gün ışığı simülasyonu ve fotometrik hesaplamalar yaparak son derece detaylı ve hassas aydınlatma projeleri oluşturulmasına olanak tanır (Bodart ve De Herde, 2002).

Ancak LEAF, bu profesyonel araçlardan hem felsefi hem de işlevsel olarak bilinçli bir şekilde ayrılmaktadır. Görüldüğü üzere, DIALux gibi yazılımlar "bir mekan nasıl aydınlatılmalı?" sorusuna odaklanırken, LEAF "mevcut aydınlatma sistemi ne kadar verimli ve nasıl daha sürdürülebilir hale getirilebilir?" sorusuna hızlı ve pratik bir yanıt sunar. LEAF'in en büyük ayırt edici özelliği, aydınlatma performansını enerji verimliliği, ekonomik fizibilite ve çevresel etki gibi üç temel sürdürülebilirlik

sütunuyla entegre bir şekilde sunması ve bunu uzmanlık gerektirmeyen bir arayüzle yapmasıdır. Bu niteliğiyle LEAF, özellikle mevcut endüstriyel tesislerin modernizasyonu ve temiz üretim hedeflerine ulaşması için stratejik bir boşluğu doldurmaktadır.

4.5. BULGULARIN LİTERATÜR ÇERÇEVESİNDE TARTIŞILMASI

Bu çalışmada elde edilen iç ortam kalitesi parametreleri, tekstil endüstrisi ve genel endüstriyel ortamlar üzerine yapılmış mevcut bilimsel literatürle karşılaştırıldığında hem tutarlı hem de dikkate değer bulgular sunmaktadır.

4.5.1. Gürültü Seviyeleri

İncelenen tesiste, en yoğun makine faaliyetinin olduğu dikimhane bölgesinde ölçülen 69,42 dB(A) ve paketlenme bölümünde ölçülen 66,86 dB(A) gibi gürültü seviyeleri, "Çalışanların Gürültü İle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik" ile belirlenen 87 dB(A) maruziyet sınır değerinin oldukça altındadır. Bu bulgular, Neitzel vd. (2017) tarafından yapılan ve modern konfeksiyon sektöründeki dikiş makinelerinin ortalama gürültü seviyelerini 70-75 dB(A) aralığında raporlayan çalışma ile de uyumludur. İncelenen tesisteki değerlerin bu aralığın bir miktar altında kalması, tesiste kullanılan makinelerin nispeten yeni teknolojiye sahip olmasına ve düzenli bakımlarının yapıyor olmasına atfedilebilir. Buna karşın, literatürde iplik eğirme veya dokuma gibi ağır sanayi proseslerini içeren tekstil fabrikalarında gürültü seviyelerinin kolaylıkla 90-100 dB(A) aralığına ulaşabildiği rapor edilmektedir (Tharrrmapornphilas ve Boonkasem, 2007). Bu durum, bizim çalışmamızın odaklandığı hazır giyim imalatının, tekstil sektörünün diğer kollarına kıyasla daha yönetilebilir bir gürültü profiline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, dB(A) seviyesi yasal sınırlar içinde olsa dahi, dikiş makinelerinin ürettiği gibi yüksek frekanslı ve tekrarlı seslerin, uzun vadede çalışanların konsantrasyonunu bozabileceği ve strese neden olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, gürültü yönetimi sadece yasal bir zorunluluk olarak değil, aynı zamanda çalışan konforu ve verimliliğini artırmaya yönelik bir iyileştirme alanı olarak da değerlendirilmelidir.

4.5.2. İç Ortam Hava Kalitesi (CO₂ Konsantrasyonu)

Çalışmada, iç mekan hava kalitesinin bir göstergesi olarak kullanılan CO₂ konsantrasyonu, en yüksek değerine öğle saatlerinde yoğun insan kullanımı nedeniyle yemekhane bölgesinde (770,43 ppm) ulaşmıştır. Bu değer, ASHRAE Standardı 62.1'de

önerilen ve yetersiz havalandırmanın bir göstergesi olarak kabul edilen 1000 ppm konfor eşiğinin belirgin şekilde altındadır (ASHRAE, 2019). CO₂ seviyesinin doğrudan insan metabolizmasının bir ürünü olduğu ve ortamdaki diğer biyo-atıkların (bioeffluents) bir vekil (proxy) göstergesi olarak kabul edildiği düşünüldüğünde, bu bulgu tesisin havalandırma sisteminin insan kaynaklı kirleticileri seyreltmede genel olarak yeterli olduğunu göstermektedir. Literatür, iç mekan CO₂ konsantrasyonlarının 1000 ppm'i aşmasının, çalışanlarda baş ağrısı, yorgunluk ve uyuşukluk gibi "hasta bina sendromu" belirtilerini artırdığını ve karar verme gibi üst düzey bilişsel fonksiyonları olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır (Seppänen, Fisk ve Mendell, 1999). Dolayısıyla, ölçülen değerlerin bu kritik eşiğin altında olması, çalışan sağlığı ve temel bilişsel performans açısından olumlu bir bulgudur ve firmanın temel havalandırma stratejisinin başarılı olduğunu teyit etmektedir.

4.5.3. Aydınlatma Etkinliği

Aydınlatma ölçümleri, bu çalışmanın en kritik ve eyleme geçirilebilir bulgularını ortaya koymuştur. Bulgular, tesiste aydınlatma konusunda çarpıcı bir ikilik olduğunu göstermektedir: bir yanda görsel performans için yetersizlik, diğer yanda ise enerji verimsizliği bulunmaktadır.

Dikimhane (265,95 lx) ve paketleme (244,12 lx) gibi hassas görsel görevlerin yapıldığı alanlarda ölçülen aydınlık düzeyleri, TS EN 12464-1 (2021) standardının bu tür "ince" işler için önerdiği 500-750 lx aralığının oldukça altındadır. Bu durum, sadece bir standart uyumsuzluğu değil, aynı zamanda doğrudan bir verimlilik kaybı riskidir. Juslén, Wouters ve Tenner (2007) tarafından yapılan bir araştırma, aydınlatma seviyesinin artırılmasının görsel görevlerdeki performansı ve doğruluğu %10'a varan oranlarda iyileştirebildiğini göstermiştir. Ayrıca, yetersiz aydınlatma sadece hata oranını artırmakla kalmaz, aynı zamanda çalışanların daha fazla odaklanmak için kendilerini zorlamasına neden olarak göz yorgunluğu ve baş ağrısı gibi sorunlara da yol açar (Boyce, 2010). Çalışmamızdaki düşük aydınlık düzeyleri, bu literatür bulgularıyla tutarlı bir şekilde, tesiste hem gizli bir verimlilik kaybı hem de önlenebilir bir sağlık riski potansiyeli olduğuna işaret etmektedir.

Depo gibi daha az hassas görevlerin yapıldığı alanlarda ölçülen yüksek aydınlık düzeyleri (303,77 lx) bulunmaktadır. Bu seviye, standardın bu tür alanlar için önerdiği 150-200 lx değerinin oldukça üzerindedir ve gereksiz bir enerji tüketimine işaret etmektedir. Bu bulgular, tesisin aydınlatma sisteminin, yapılan işin gerekliliklerine göre optimize

edilmediğini ve "her yere aynı ışık" yaklaşımının hem verimlilik kayıplarına hem de enerji israfına yol açtığını göstermektedir. Dolayısıyla, aydınlatma sisteminin iyileştirilmesi, sadece çalışanların görsel konforunu ve performansını artırmakla kalmayacak, aynı zamanda işletmenin enerji maliyetlerini ve karbon ayak izini düşürmesi için en önemli temiz üretim fırsatlarından birini oluşturmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. TEMİZ ÜRETİM ODAKLI SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK STRATEJİLERİ

Bu tez çalışmasında yapılan analizler, incelenen tekstil tesisinin operasyonel verimliliğini ve çevresel performansını artırmak için uygulanabilecek, Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından tanımlanan temiz üretim felsefesiyle uyumlu, somut stratejiler ortaya koymuştur. Temiz üretim, "üretim süreçlerine, ürünlere ve hizmetlere, insan ve çevre üzerindeki riskleri azaltmak amacıyla, bütünsel ve önleyici bir çevre stratejisinin sürekli olarak uygulanmasıdır" (UNEP, 2021). Bu bağlamda, aydınlatma sisteminin optimizasyonu, hem kaynak verimliliği hem de kirliliğin önlenmesi açısından kilit bir rol oynamaktadır.

5.1.1. Strateji 1: Yüksek Verimli Aydınlatmaya Geçiş (LED Retrofit)

Doğrudan ve hızlı geri dönüş sağlayan temiz üretim stratejisi, mevcut verimsiz aydınlatma sistemlerinin modern LED teknolojisi ile değiştirilmesidir (retrofit). Tesiste yaygın olarak kullanılan T8 floresan lambalar, LED'lere kıyasla daha düşük lümen/watt verimliliğine, daha kısa ömre ve cıva gibi tehlikeli maddeler içermeleri nedeniyle çevresel risklere sahiptir.

- **Enerji ve Maliyet Tasarrufu:** Yapılan analizler ve literatürdeki vaka çalışmaları, endüstriyel tesislerde LED dönüşümünün aydınlatma kaynaklı enerji tüketimini %50 ila %80 oranında azaltabildiğini göstermektedir (Pardo, Moya ve Vatopoulos, 2017). İncelenen tesis için bu, yıllık yaklaşık 18.663 kWh enerji tasarrufuna denk gelmektedir.
- **Operasyonel Verimlilik ve Atık Azaltımı:** LED lambaların 50.000 saati aşan ömürleri, floresan lambalara göre 3-5 kat daha uzundur. Bu durum, bakım sıklığını, iş gücü maliyetlerini ve değiştirme nedeniyle oluşan lamba atıklarını önemli ölçüde azaltır.
- **Ürün Kalitesi:** LED'lerin yüksek renksel geriverim indeksi ($CRI > 80$), renklerin daha doğru algılanmasını sağlar. Bu, özellikle tekstil sektöründe kumaş rengi kontrolü ve kalite denetimi gibi görsel hassasiyet gerektiren süreçlerde hata oranlarını düşürerek ürün kalitesini artırır.

5.1.2. Strateji 2: Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu (Çatı Tipi Güneş Enerjisi Santrali- GES)

Temiz üretimin bir diğer temel bileşeni, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasıdır. Tesisin geniş çatı alanı, bu strateji için önemli bir fırsat sunmaktadır.

- **Karbon Ayak İzini Düşürülmesi:** Bölüm 4.3.1.2'de detaylandırıldığı üzere, çatıya kurulacak bir GES, tesisin sadece aydınlatma ihtiyacını değil, toplam elektrik tüketiminin büyük bir kısmını karşılayabilir. Bu, işletmenin operasyonel karbon ayak izini radikal bir şekilde düşürerek "yeşil" ve "sürdürülebilir" bir marka imajı oluşturmaya katkı sağlar.
- **Enerji Arz Güvenliği ve Maliyet Stabilitesi:** Şebekeden bağımsız olarak kendi enerjisini üretmek, işletmeyi gelecekteki elektrik fiyat artışlarına karşı korur ve enerji maliyetlerinde uzun vadeli bir istikrar ve öngörülebilirlik sağlar.

5.1.3. Strateji 3: Gün Işığından Maksimum Düzeyde Faydalanma (Pasif Aydınlatma ve Gün Işığı Hasadı)

En temiz ve en ucuz ışık kaynağı Güneş'tir. Yapay aydınlatmaya olan bağımlılığı azaltmak, en öncelikli temiz üretim stratejilerinden biridir.

- **Pasif Aydınlatma Teknolojileri:** Özellikle geniş ve tek katlı üretim ve depo alanlarında, tavana monte edilecek ışık tüpleri (solar tubes) veya prizmatik şeffaf çatı panelleri, gün ışığını dağıtarak iç mekana taşır.
- **Gün Işığı Hasadı (Daylight Harvesting):** Bu aktif strateji, pencerelere yakın yerleştirilen fotosensörler aracılığıyla ortamdaki doğal ışık seviyesini sürekli olarak ölçer. Doğal ışık yeterli olduğunda, sensörler aydınlatma otomasyon sistemine sinyal göndererek yapay aydınlatma armatürlerinin parlaklığını kısar (dimming) veya tamamen kapatır. Yapılan çalışmalar, gün ışığı hasadı sistemlerinin aydınlatma enerjisi tüketiminde %20 ila %60 arasında ek tasarruf sağlayabildiğini göstermektedir (Li, Lam ve Cheung, 2011).
- **İnsan Odaklı Faydalar:** Bu stratejinin en önemli çıktılarından biri de insan sağlığı ve refahı üzerindeki olumlu etkileridir. Gün ışığına maruz kalmanın, çalışanların sirkadiyen ritmini düzenlediği, ruh halini iyileştirdiği, göz yorgunluğunu azalttığı ve genel üretkenliği artırdığı bilimsel olarak kanıtlanmıştır (Edwards ve Torcellini, 2002).

Bu üç strateji, sinerji yaratan bir bütün olarak düşünülmelidir. Pasif aydınlatma ile azaltılan enerji ihtiyacı, LED dönüşümü ile daha da verimli hale getirilebilir ve kalan net enerji ihtiyacı da çatıdaki GES ile temiz bir şekilde karşılanabilir. Bu bütünlük yaklaşım, tesisi sürdürülebilir ve rekabetçi bir geleceğe taşıyacaktır.

5.2. GENEL SONUÇ VE KATKI

Bu tez çalışması, bir endüstriyel tekstil firmasında iç ortam kalitesinin üç temel parametresini; gürültü, hava kalitesi (CO₂) ve aydınlatma etkinliği olarak bütünsel bir yaklaşımla ele almıştır. Yapılan saha ölçümleri ve mekansal modellemeler sonucunda, tesisteki gürültü seviyeleri ile CO₂ konsantrasyonlarının ilgili yasal yönetmelikler ve uluslararası standartlar çerçevesinde kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, firmanın havalandırma ve makine gürültüsü yönetimi konusunda temel gereklilikleri karşıladığını göstermektedir. Ancak çalışma, aydınlatma sistemlerinin hem çalışan verimliliği hem de enerji tüketimi açısından ciddi bir "zayıf halka" olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur. Özellikle dikiş ve paketleme gibi hassas görsel görevlerin yapıldığı alanlarda aydınlık düzeylerinin standartların önemli ölçüde altında kalması, potansiyel bir verimlilik kaybına ve artan hata oranlarına işaret ederken, bazı depolama alanlarındaki aşırı aydınlatma ise gereksiz enerji sarfiyatına neden olmaktadır.

Çalışmanın en önemli katkılarından biri, bu aydınlatma sorununu sadece bir İSG problemi olarak değil, aynı zamanda bir temiz üretim fırsatı olarak ele almasıdır. Geliştirilen stratejiler, aydınlatma sistemlerinin modernizasyonunun yalnızca çalışma koşullarını iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda işletmenin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğine de doğrudan hizmet ettiğini göstermiştir. LED dönüşümü, çatı tipi GES entegrasyonu ve gün ışığından faydalanma stratejileri, birbirini tamamlayan bir yol haritası sunmaktadır. Bu entegre yaklaşım, işletmenin enerji maliyetlerini ve karbon ayak izini etkin bir şekilde azaltma, atık miktarını azaltma ve aynı zamanda çalışan memnuniyeti ile verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla, aydınlatma etkinliğinin iyileştirmesi, tek bir yatırım ile birden fazla kazanç sağlayan stratejik bir "temiz üretim" hamlesi olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, bu tez, endüstriyel tesislerde iç ortam kalitesi değerlendirmelerinin tekil parametreler yerine bütünsel bir bakış açısıyla yapılmasının önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca, bu tür analizleri pratikleştirmek ve yaygınlaştırmak amacıyla geliştirilen LEAF yazılımı, tezin somut bir çıktısı olarak literatüre özgün bir metodolojik katkı sunmaktadır. LEAF, benzer tesislerdeki yöneticilerin ve mühendislerin, karmaşık simülasyon programlarına ihtiyaç duymadan, kendi aydınlatma sistemlerinin verimliliğini, maliyetini ve çevresel etkilerini hızla değerlendirmelerini sağlayacaktır. Bu çalışma, elde ettiği saha verileri, sunduğu entegre sürdürülebilirlik stratejileri ve geliştirdiği pratik analiz aracı ile hem akademik literatüre hem de endüstriyel uygulamalara somut bir referans kaynak oluşturmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Aisyah, D., Pinem, D. S., Huda, M., & Maseleno, A. (2023). The transition to a circular economy in the textile industry: A systematic literature review. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 6, 100095.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta, GA: Author.
- Barner, J. (1983). *Experimentelle Landschaftsökologie*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Bodart, M., & De Herde, A. (2002). Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings*, 34(5), 421-429.
- Boyce, P. R. (2010). The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task. *Lighting Research & Technology*, 42(2), 169-184.
- Boyce, P. R. (2014). The impact of light in buildings on human health. *Lighting Research & Technology*, 46(3), 255-267.
- Bronzaft, A. L. (2000). The effect of noise on man. *Noise & Health*, 2(6), 47-56.
- Bulut, H. (2012). Havalandırma ve iç hava kalitesi açısından CO2 miktarının analizi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 128, 45-51.
- Colmenar-Santos, A., de-Palacio-Rodriguez, C., Borge-Diez, D., & Castro-Gil, M. (2016). Integrated management of lighting and HVAC systems in industrial buildings for energy saving. *Energy and Buildings*, 111, 23-34.
- Çakır, S., & Aytin, A. (2019). The effects of noise and lighting on employee performance: A study in the metal industry. *Journal of Occupational Health and Safety*, 6(2), 88-102.
- Çakır, U., & Küçüker, A. (2019). Ofislerde Aydınlatma Kalitesinin Çalışan Performansına Etkileri. *Mekân ve İnsan Dergisi*, 1(1), 45-58.

Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik. (2013). T.C. Resmi Gazete, 28721, 28 Temmuz 2013.

Çepel, N. (1998). *Çevre ve insan*. İstanbul: Altın Kitaplar Yayını.

Çevresel Gürültünün Kontrolü Yönetmeliği. (2022). T.C. Resmi Gazete, 32029, 30 Kasım 2022.

DiLaura, D. L., Houser, K. W., Mistrick, R. G., & Steffy, G. R. (Ed.). (2011). *The lighting handbook: Reference and application* (10. Baskı). New York, NY: Illuminating Engineering Society (IES).

Edwards, L., & Torcellini, P. (2002). *A literature review of the effects of natural light on building occupants* (Rapor No. NREL/TP-550-32769). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2025). *Türkiye elektrik piyasası raporları*. Erişim adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-raporlari> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2024). *Güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA)*. Erişim adresi: <https://gepa.enerji.gov.tr> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).

Frontczak, M., & Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4), 922-937.

Garg, A., & Kumar, P. (2017). Energy efficiency improvement in textile industry by retrofitting of lighting system. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(4), 3121-3127.

Gazioglu, C. (2013). Occupational respiratory diseases in textile industry workers in Turkey. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 26(2), 265-272.

Green Solar Network. (2024). *Karbon emisyonu eşdeğer hesaplayıcı*. Erişim adresi: <https://greensolarnetwork.org/emisyonhesaplama> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).

Güler, Ö., & Onaygil, S. (2016). *Aydınlatma Tekniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

- Hanim, S. A., Taufik, Y., Amilia, W., & Muhaimin, A. (2023). The role of supply chain management and digital technology on the performance of the textile industry. *Uncertain Supply Chain Management*, 11(3), 1145–1152.
- Illuminating Engineering Society (IES). (2011). *The lighting handbook: Reference and application* (10. Baskı). New York, NY: IES.
- International Trade Centre (ITC). (2024). *Trade map: Trade statistics for international business development*. Erişim adresi: <https://www.trademap.org> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).
- İklimlendirme Soğutma Klima İmalatçıları Derneği (İSKİD). (t.y.). *İç hava kalitesi nasıl sağlanır?*. Erişim adresi: <https://iskid.org.tr/ichavakalitesi/ichava-kalitesi/ic-hava-kalitesi-nedir/ic-hava-kalitesi-nasil-saglanir/> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).
- İzmirlioğlu, M., & Sözer, H. (2025). Enhancing virtual indoor environment and energy efficiency with real-time BIM and Unreal Engine integration in building lighting design. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(2), 103249.
- Jarrah, A., Aflaki, A., Khakpour, M., & Esfandiari, M. (2024). Enhancing indoor air quality: Harnessing architectural elements, natural ventilation and passive design strategies for effective pollution reduction — A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 946, 176631.
- Job, R. F. S. (2012). Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to exposure to noise. *Noise & Health*, 14(61), 47-56.
- Jones, A. P. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33(28), 4535-4564.
- Juslén, H., Wouters, M., & Tenner, A. (2007). The influence of controllable task-lighting on productivity: a field study in a factory. *Applied Ergonomics*, 38(1), 39-44.
- Kalogirou, S. A. (2013). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, 102, 151-161.
- Kaya, T. (2016). The textile and apparel industries in Turkey. *International Journal of Business and Social Science*, 7(8), 35-40.
- Körlü, A. (2020). Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101642.

- Kryter, K. D. (1973). Impairment to hearing from exposure to noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 53(5), 1211–1234.
- Li, D. H. W., Lam, J. C., & Cheung, G. H. W. (2011). Energy and cost analysis of daylighting (light-shelf) and solar-film (spectrally selective glazing) applications in a fully-air-conditioned office. *Applied Energy*, 88(12), 4418-4427.
- Mahmoudzadeh, P., Hu, W., Davis, W., & Durmus, S. (2024). Spatial efficiency: An outset of lighting application efficacy for indoor lighting. *Building and Environment*, 255, 111409.
- Neitzel, R., Croteau, G., Kelskey, W., & Meischke, H. (2017). Noise exposures in the construction, manufacturing, and service industries. *The Annals of Work Exposures and Health*, 61(6), 679-690.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (t.y.). *Occupational noise exposure*. Erişim adresi: <https://www.osha.gov/noise> (Erişim tarihi: 29 Mayıs 2024).
- Onur Enerji. (t.y.). *İç hava kalitesi ölçümü*. Erişim adresi: <https://onurenerji.com.tr/hizmetler/olcumler/ic-hava-kalitesi-olcumu/> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).
- Özdemir, A. (2020). ‘Genel Aydınlatma ve Acil Durum Aydınlatma Sistemlerinin İncelenmesi ve Uygulaması’. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Özkahraman, B., & Erdem, H. (2021). Assessment of indoor air quality in a furniture manufacturing workshop: a case study on wood dust and VOCs. *Turkish Journal of Engineering*, 5(3), 150-161.
- Özkaya, M. (2000). *Aydınlatma tekniğı*. İstanbul: Birsen Yayınları.
- Pardo, N., Moya, J. A., & Vatopoulos, K. (2017). *Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the EU iron & steel industry*. Lüksemburg: Publications Office of the European Union.
- Penuela, J., Ben, C., Boldyrev, S., Gentzbittel, L., & Ouerdane, H. (2024). The indoor agriculture industry: A promising player in demand response services. *Applied Energy*, 372, 123756.

- Persily, A. (2007). Indoor air quality in high performance buildings. *ASHRAE Journal*, 49(9), 25-29.
- Ramanathan, V., & Xu, Y. (2010). *The heat is on: Greenhouse gases, climate change, and solar radiation management*. Arlington, VA: Pew Center on Global Climate Change.
- Saatcioğlu, M. A., & Özaydın, B. (2017). Sustainable practices in the Turkish textile and clothing industry. *Journal of Fashion Marketing and Management*, 21(2), 274-291.
- Seppänen, O. A., Fisk, W. J., & Mendell, M. J. (1999). Association of ventilation rates and CO2 concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, 9(4), 226-252.
- Shishoo, R. (2022). Recent trends and new challenges in the textile industry. *The Journal of The Textile Institute*, 113(10), 2217–2228.
- Solar Energy Industries Association (SEIA). (2021). *Photovoltaic vs. solar thermal: System suitability*. Washington, DC: SEIA.
- Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK). (2024). *İstatistik yıllıkları*. Erişim adresi: https://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari (Erişim tarihi: 29 Mayıs 2024).
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14(Suppl 7), 51-58.
- Şirel, Ş. (1991). Renk, insan ve çevre. *Sistem Dekor Dergisi*, 2, 62-65.
- Şirel, Ş. (1992). *Aydınlatma tasarımında temel kurallar*. YFU Kitapçık No: 07.
- Tesisat Mühendisleri Derneği (TTMD). (1997). *ASRAE temel el kitabı (Fundamentals): Havada bulunan kirletici maddeler*. İstanbul: Yazar.
- Tharmmapornphilas, W., & Boonkasem, S. (2007). A case study on noise exposure of workers in a textile factory. *Journal of the Medical Association of Thailand*, 90(9), 1941-1946.
- Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (2021). *TS EN 12464-1: Işık ve aydınlatma - İş yerlerinin aydınlatılması - Bölüm 1: Kapalı çalışma alanları*. Ankara: TSE.

Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM). (2024). *2023 yılı ihracat değerlendirme raporu*. Erişim adresi: <https://tim.org.tr/tr/raporlar> (Erişim tarihi: 29 Mayıs 2024).

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2024). *Enerji istatistikleri*. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=cevre-ve-enerji-103> (Erişim tarihi: 20 Mayıs 2025).

Türkiye Uzay Ajansı (2021). *Dalgalar ve Elektromanyetik Tayf (Spektrum)*. Erişim adresi: <https://tua.gov.tr/tr/blog/havacilik-ve-teknoloji/dalgalar-ve-elektromanyetik-tayf-spektrum> (Erişim tarihi: 16 Temmuz 2025).

Ulukaya, F., & Çögenli, M. Z. (2020). Gürültülü çalışma ortamının çalışanlar üzerindeki psikososyal etkilerinin incelenmesi: Tekstil sektöründe ampirik bir çalışma. *Anadolu Akademi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(1), 131-140.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Resource efficiency and cleaner production*. Erişim adresi: <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/resource-efficiency-and-cleaner-production> (Erişim tarihi: 27 Mayıs 2024).

Ünver, R. (1984). ‘Yapıların içinde ışık-renk ilişkisi’. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Yıldız Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Veitch, J. A. (2001). Effects of illumination on performance: A design paradox. *Ergonomics*, 44(4), 345-360.

Wolverton, B. C., Johnson, A., & Bounds, K. (1989). *Interior landscape plants for indoor air pollution abatement*. NASA Final Report. Stennis Space Center, MS: NASA.

Yau, Y. H., & Chew, K. W. (2014). A study of the indoor environmental quality of an office building in Malaysia. *Indoor and Built Environment*, 23(6), 848-857.

Yüksek, İ., & Kaderoğlu, C. (2017). Aydınlatma Tekniğinin Temel Bileşenleri ve Bir Uygulama. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 617-628.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Semih Çağrı YAĞCIOĞLU

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Çevre Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2025
Lisans	Çevre Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2021
Lise		Düzce Arsal Anadolu Lisesi	2014

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

Yağcıoğlu, S. Ç., Solak, M., 2024. Endüstriyel Kuruluşlarda Gürültü Kirliliği, İç Ortam Hava Kalitesi ve Aydınlatma Etkinliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi, *4th International Congress of Engineering and Natural Sciences (ICENSS 2024)*, 720, Mayıs 24-25, Ankara, Türkiye.