

ENDÜSTRİ 4.0

BAĞLAMINDA

İNSAN-MAKİNE ETKİLEŞİMİ

ve

ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YAKLAŞIMLARI

Editör

HÜSEYİN ŞANLI



BİDGE Yayınları

Endüstri 4.0 Bağlamında İnsan-makine Etkileşimi ve Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları

Editör: HÜSEYİN ŞANLI

ISBN: 978-625-372-937-0

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Endüstri 4.0, üretim ve hizmet sistemlerinin dönüşümünde yalnızca teknolojik yeniliklerin değil, aynı zamanda insan–makine etkileşiminin yeniden tanımlandığı bir dönüm noktasını temsil etmektedir. Siber-fiziksel sistemler, yapay zekâ tabanlı uygulamalar, büyük veri analitiği ve otonom yapılar, günümüz mühendislik anlayışının temel bileşenleri hâline gelirken, bu yeni ekosistemin sürdürülebilir biçimde yönetilmesi çok boyutlu ve bilimsel temelli karar mekanizmalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Endüstri 4.0’ın sunduğu fırsatların yanında, yönetsel, teknik ve bilişsel düzeylerde yeni sorumluluklar ortaya çıktığı açıktır. Bu eser, söz konusu dönüşümün bilimsel olarak kavranmasına katkıda bulunmayı, araştırmacılara kapsamlı bir bakış açısı sunmayı ve mühendislik disiplinlerinin güncel gelişmelerle uyumlu bir şekilde yeniden düşünülmesine olanak sağlamayı hedeflemektedir. Kuramsal yaklaşımlar ile analitik yöntemlerin bir arada değerlendirilmesi hem akademik çalışmalar hem de uygulama alanları açısından bir referans niteliği taşımaktadır.

Bu kitabın, insan–makine etkileşimi ve çok kriterli karar verme yaklaşımlarının kuramsal, metodolojik ve uygulamalı yönlerine ilişkin literatüre değerli katkılar sunacağına inanıyor; eserin hazırlanmasında emeği geçen tüm araştırmacılara teşekkür ediyorum. Okuyuculara ise bu çalışmanın, Endüstri 4.0’ın dinamik yapısını kavramada yeni açılımlar sağlayacağını ümit ediyorum.

Doç. Dr. HÜSEYİN ŞANLI

TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

YEŞİL KAMPÜS KAPSAMINDA E-ATIK TOPLAMA NOKTALARININ ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ	1
<i>BEYZA NUR SANDIKÇI, MELİKE KÜBRA EKİZ BOZDEMİR</i>	
ATIK TOPLAMA SİSTEMİNDEKİ KONTEYNER TOPLANMA VERİLERİNDEKİ ANOMALİLERİN TESPİTİ ..	18
<i>MUHAMMED ÖZTAŞ, AHMET SARUCAN</i>	
KURUMSAL DÖNÜŞÜM UYGULAMALARINDA ZORLANILAN ALANLAR	65
<i>TUĞRUL BAYRAKTAR</i>	
ÜST EKSREMİTE ERGONOMİK RİSKLERİNİN OCRA METODU İLE ANALİZİ	95
<i>ULVIYE POLAT</i>	
KAPSAMA, ROTA DOĞRULUĞU VE BAĞLANTISALLIK GÖSTERGELERİYLE KENTSEL RAYLI SİSTEM POTANSİYEL ANALİZİ: ANTALYA 4. ETAP RAYLI SİSTEM HATTI ÖRNEĞİ	108
<i>KAMER ÖZGÜN, EMRE DEMİR</i>	
NÖROERGONOMİNİN ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDAKİ ENGELLERİNİN SIRALANMASI	128
<i>SAMET TOSUN</i>	
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ PERSPEKTİFİNDEN ZİHİNSEL İŞ YÜKÜ: ÖLÇÜM, DEĞERLENDİRME VE İŞ SAĞLIĞI AÇISINDAN YORUMLAR	144
<i>SAMET TOSUN</i>	
BİR TEKSTİL FABRİKASINDA BOYAHANE BÖLÜMÜNDE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMASI	155
<i>GAMZE CEYLAN, TULAY KORKUSUZ POLAT</i>	
ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ YAŞAM DÖNGÜSÜ VE E-ATIK YÖNETİMİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE ZORLUKLAR	183
<i>HEDİYE KIRLI AKIN</i>	

E-TİCARET KULLANICI YORUMLARININ DOĞAL DİL İŞLEMEYLE SINIFLANDIRILMASI VE KATEGORİ YÖNETİMİ KARARLARINA ETKİSİ	201
--	-----

SELAYNUR DEMİREL, AYTEN YILMAZ YALÇINER

YAPAY ZEKA ODAKLI AĞ YÖNETİMİ VE HİZMET DÜZEYİ SÖZLEŞMESİNDE YZ-MODEL BAĞLAM PROTOKOLÜ KARAR DESTEK SİSTEMİ	221
---	-----

EMİN TARAĞÇI

BÖLÜM 1

YEŞİL KAMPÜS KAPSAMINDA E-ATIK TOPLAMA NOKTALARININ ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

BEYZA NUR SANDIKÇI¹
MELİKE KÜBRA EKİZ BOZDEMİR²

Giriş

Gelişen teknoloji, değişen tüketim alışkanlıkları ve artan nüfus, elektrikli ve elektronik eşya kullanımını hızla artırmış; buna bağlı olarak e-atık miktarı da geçmiş dönemlere kıyasla çok daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Ürünlerin kısa sürede işlevini yitirdiği algısı ve tamir maliyetlerinin yüksek olması, e-eşyaların hızla tüketilip atılmasına yol açmaktadır. Kentsel atıklara göre üç kat daha fazla hacme sahip olan e-atıklar; cıva, kurşun, kadmiyum, krom (+6) gibi ağır metaller ve CFC, PCB, PVC gibi zararlı bileşenler nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından ciddi risk oluşturmaktadır (Ciftlik & ark., 2011; Yılmaz Aydın & Evcı Kiraz, 2017; Uluslararası

¹ Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0003-4581-0648

² Araştırma Görevlisi, Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-3340-0484

Telekomünikasyon Birliği & Birleşmiş Milletler Eğitim ve Araştırma Enstitüsü, 2024).

Dünya genelinde 2022 yılında oluşan 62 milyon ton e-atığın yalnızca %22,3'ünün resmi olarak geri dönüştürülebilmüş olması, yönetim süreçlerinin yetersizliğini ortaya koymaktadır. Buna karşın e-atıkların içerdiği altın, gümüş, bakır, kobalt gibi değerli metaller hem ekonomik hem çevresel açıdan geri dönüşümü gerekli ve stratejik kılmaktadır (He & ark., 2006).

Sürdürülebilir kalkınma anlayışı çerçevesinde, SKH 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) ile SKH 12 (Sorumlu Üretim ve Tüketim), atık yönetiminde sorumlu sistemler oluşturmayı hedeflemektedir. Türkiye'de bu amaçla 2012'de Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar (AEEE) Yönetmeliği yayımlanmış ve 2021'de WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) Direktifi ile uyumlu hâle getirilmiştir. Ancak uygulamada e-atık toplama ve geri dönüşüm oranları hâlen düşük seviyededir (T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi, 2025).

E-atık toplama noktalarının doğru belirlenmesi, yönetim sistemlerinin temelini oluşturmakta ve hem çevresel risklerin azaltılmasına hem de değerli hammaddelerin ekonomiye kazandırılmasına katkı sağlamaktadır (Akın & Kuru, 2011). Keçeci ve ark. (2014) Çankaya Belediyesi'nin hizmet alanı için e-atık miktarını tahminlemiş, toplama alanlarını Küme Örtme Modeli ile belirlemiştir ve e-atıkların toplamasını ise Araç Rotalama Problemi olarak ele almıştır. Boyacı (2021), bitkisel atık yağ toplama noktalarını SMAA-2 yöntemi ile analiz etmiş; nüfus yoğunluğu ve ulaşım gibi kriterlere göre alternatifleri değerlendirmiştir. Şentürk (2019) ise kullanıcıların e-atık farkındalığını inceleyerek toplama noktalarına yönelik bilgi eksikliğini ortaya koymuştur. Yer seçimi problemlerinin çok kriterli yapısı nedeniyle çalışmada Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden yararlanılmıştır. CRITIC, COPRAS ve WASPAS yöntemlerinin farklı alanlarda yoğun olarak

kullanıldığı görülmektedir. Altıntaş (2021), AB ülkelerinin lojistik performansını CRITIC, WASPAS ve COPRAS yöntemleriyle değerlendirmiştir. Çilek (2022) ise Covid-19 salgınının turizm sektöründeki firmaların finansal performansına etkisini CRITIC-COPRAS yöntemleri ile analiz etmiştir. Güner & ve ark., (2023) ise bağımsız denetim firmalarının şeffaflık raporlarını CRITIC-COPRAS yöntemleri ile değerlendirmiştir.

Yöntem

Bu çalışmada, Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Kampüsü'nde e-atık toplama kutuları için uygun noktaların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda anket çalışması gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler ÇKKV yöntemlerinde kullanılacak kriter ve alternatiflerin oluşturulmasına katkı sağlamıştır. E-atık kutularının kampüste erişilebilir noktalara yerleştirilmesinin, sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmesi ve öğrencilerde farkındalığın artmasına destek olacağı öngörülmektedir.

Yer seçimi için kampüsün genel yapısı incelenmiş; öğrenci yoğunluğu, fakültelerin konumu, giriş-çıkış bölgeleri, yurtlar, hastane ve sosyal alanlar değerlendirilmiştir. Ayrıca topoğrafya ve kampüste yaşayan sokak hayvanlarının bulunduğu bölgeler de dikkate alınmıştır. Bu inceleme, kriter ve alternatiflerin daha gerçekçi biçimde oluşturulmasını sağlamıştır.

Alternatif noktalar ve değerlendirme kriterleri, kampüsten toplanan veriler ile Sürdürülebilirlik Ofisi ve ilgili akademisyenlerin görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Böylece hem kullanıcı davranışlarını hem çevresel etkileri yansıtan kapsamlı bir kriter seti oluşturulmuştur.

1. Kriterlerin CRITIC Metodu ile Ağırlıklandırılması

CRITIC yöntemi, kriterlerin veri içindeki değişkenliği ve birbirleriyle olan ilişkisini dikkate alarak objektif ağırlıkları hesaplamak için kullanılmaktadır.

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Alternatiflerin her kritere göre aldığı değerlerden oluşan karar matrisi hazırlanır.

$$X_{ij} = \begin{matrix} & X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

Adım 2: Normalizasyon

Farklı ölçeklere sahip kriterleri karşılaştırılabilir hâle getirmek için fayda ve maliyet kriterleri uygun formüllerle normalize edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (3)$$

Adım 3: Korelasyon katsayılarının hesaplanması
Kriterler arası ilişkiyi belirlemek amacıyla korelasyon matrisi oluşturulur.

$$p_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)(r_{jk} - \bar{r}_r)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \sum_{i=1}^m (r_{jk} - \bar{r}_r)^2}} \quad (4)$$

Adım 4: Bilgi miktarının (C_j) hesaplanması
Her kriterin standart sapması ve korelasyon derecesi kullanılarak bilgi düzeyi (C_j) elde edilir.

$$C_j = \sigma_j \sum (1 - t_{jk}) \quad (5)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ji} - \bar{r}_j)^2 / m} \quad (6)$$

Adım 5: Kriter ağırlıklarının belirlenmesi
Bilgi düzeyleri kullanılarak kriterlerin objektif ağırlıkları hesaplanır.

$$w_j \equiv \frac{c_j}{\sum_{k=1}^n c_k} \quad (7)$$

2. Alternatiflerin COPRAS Yöntemi ile Sıralanması

COPRAS yöntemi, kriterlerin ağırlıklarını dikkate alarak alternatiflerin fayda ve maliyet etkilerini birlikte değerlendiren bir sıralama yöntemidir.

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

$$X_{ij} = \begin{matrix} & X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{matrix} \quad (8)$$

Adım 2: Karar matrisinin normalizasyonu

Her sütun kendi toplamına bölünerek normalize edilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} q_i}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (9)$$

Adım 3: Ağırlıklı değerlerin hesaplanması

$$d_{ij} = x_{ij}^* \cdot W_j \quad (10)$$

Adım 4: Ağırlıklandırılmış normalize değerlerin toplamı

$$s_{i+} = \sum_{j=1}^n d_{ij+} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$s_{i-} = \sum_{j=1}^n d_{ij-} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

Adım 5: Göreceli Önem (Q_i) Değeri

Alternatifler, Q_i değerleri büyükten küçüğe sıralanır.

$$Q_i = S_{i+} \frac{S_{min} \sum_{i=1}^m S_{i-}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_{i-min}}{S_i}} \quad (13)$$

3. Alternatiflerin WASPAS Yöntemi ile Sıralanması

WASPAS yöntemi, ağırlıklı toplam (WAM) ve ağırlıklı çarpım (WPM) modellerini birleştirerek daha güçlü bir karar skoru üretir.

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

$$X_{ij} = \begin{matrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{matrix} \quad (14)$$

Adım 2: : Karar matrisinin normalizasyonu

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (15)$$

$$x_{ij}^* = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (16)$$

Adım 3: Ağırlıklı toplam modeli

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n x_{ij}^* \cdot w_j \quad (17)$$

Adım 4: Ağırlıklı çarpım modeli

$$Q_j^{(2)} = \prod_{j=1}^n (x^*)^{w_j} \quad (18)$$

Adım 5: Ağırlıklandırılmış ortak genel kriter değerinin hesaplanması

$$Q_i = 0,5Q_i^{(1)} + 0,5Q_i^{(2)} \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{\sigma^2(Q_i^{(2)})}{\sigma^2(Q_i^{(1)}) + \sigma^2(Q_i^{(2)})} \quad (20)$$

Uygulama

1. Çalışma Alanının İncelenmesi

Bu çalışmanın uygulama alanı Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Kampüsü ve çevresidir. Kampüs içinde yurtlar, yemekhaneler, kütüphane, marketler, kafeteryalar, banka şubeleri ve otoparklar gibi yoğun kullanılan alanlar bulunmaktadır. Kampüs dışında ise hastane, eczaneler, özel-devlet yurtları, rezidanslar, marketler, kafe ve restoranlar ile geniş otopark alanları yer almakta ve bölge daha geniş bir kullanıcı kitlesine hizmet vermektedir.

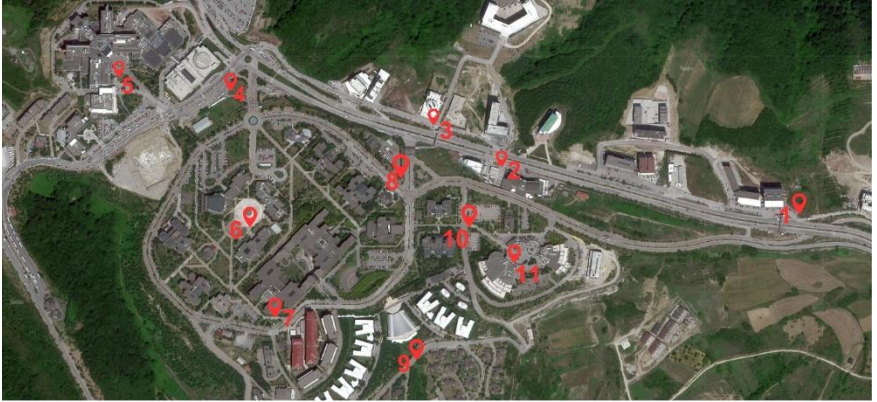
Umuttepe'nin hafif eğimli ve yer yer engebeli arazi yapısı ile yıl boyunca yağışlı iklimi, e-atık kutularının yer seçimi sürecinde erişilebilirlik ve dış mekân dayanıklılığı açısından önem taşımaktadır. Bu sosyal ve fiziksel koşullar doğrultusunda, kutuların kullanıcı yoğunluğu, ulaşılabilirlik ve güvenlik kriterlerine göre en uygun noktalara yerleştirilmesi hedeflenmiştir.

2. Kriterlerin ve Alternatif Noktaların Belirlenmesi

E-atık toplama kutularının Umuttepe Kampüsü ve çevresinde en uygun noktalara yerleştirilebilmesi için kullanılacak kriterler belirlenmiş ve bu kriterler doğrultusunda alternatif alanlar oluşturulmuştur. Kriterler, literatür taraması, kampüsün fiziksel yapısı, kullanıcı yoğunluğu ve çevresel koşullar dikkate alınarak yapılandırılmıştır. Dört ana başlık altında toplanan toplam on altı kriter; nüfus yoğunluğu (yurtlar, yerleşim alanı, fakülteler, işletme yoğunluğu, hastane uzaklığı), ulaşılabilirlik (ana yol, duraklar, arazi yapısı), güvenlik ve görünürlük şeklinde tanımlanmış ve uzman görüşleriyle puanlandırılarak karar matrisine aktarılmıştır.

Bu doğrultuda kampüs içi ve çevresinde toplam 11 alternatif yer belirlenmiştir. Alternatifler oluşturulurken yaya ve araç trafiği, sosyal alanlara yakınlık, kullanıcı profiline çeşitliliği ve fiziksel çevre koşulları dikkate alınmıştır. Yurtlara ve rezidanslara yakın A1 ve A2, yüksek ticari yoğunluğa sahip A3, hastane ve tıp fakültesine hizmet veren A5 gibi noktalar farklı kullanıcı gruplarını temsil etmektedir. Ayrıca fakültelere, yurtlara ve lojmanlara olan mesafeler ölçülmüş; yemekhane, kütüphane ve durak çevreleri gibi yoğun geçiş noktaları da alternatifler arasında değerlendirilmiştir. Her alternatif için arazi yapısı, güvenlik durumu ve görsel erişilebilirlik gibi çevresel unsurlar da analiz kapsamına alınmış olup, elde edilen veri seti çok kriterli karar verme yöntemleri için temel girdiyi oluşturmuştur.

Resim 2 Alternatif yerlerin harita üzerinde gösterilmesi



3. Karar Matrisinin Oluşturulması

Problemin çözüm sürecinde ilk olarak, 11 alternatif (A1–A11) ve 10 kriterden (K1–K10) oluşan karar matrisi oluşturulmuştur. Her hücre, bir alternatifin ilgili kriterlere göre aldığı değeri göstermektedir. Kriterlerin ağırlıklandırılması için CRITIC yöntemi tercih edilmiş olup, yöntemin doğru uygulanabilmesi adına kriterlerin fayda (maksimize edilen) veya maliyet (minimize edilen) yönlü olarak sınıflandırılması sağlanmıştır. “Yurtlar”, “Yerleşim

Alanı” ve “Fakülteler” kriterleri kapasite/mesafe değerleri üzerinden hesaplanmış ve fayda yönlü; “İşletme Yoğunluğu” kriteri ise 300 metre yakın çevredeki işletme sayısına göre değerlendirilmiş ve yine fayda kriteri olarak ele alınmıştır. Buna karşın “Hastane”, “Ana Yol” ve “Durak” kriterleri yalnızca mesafe esas alındığı için maliyet yönlü olarak tanımlanmıştır. “Arazi Yapısı”, “Görünürlük” ve “Güvenlik” kriterleri ise doğrudan ölçülmesi güç olduğundan uzman görüşlerine dayalı olarak belirlenmiş ve fayda kriteri olarak değerlendirilmiştir.

Alanı iyi tanıyan uzmanlardan, her alternatifin tüm kriterlere göre değerlendirilmesi amacıyla 5’li Likert ölçeği kullanılarak görüş alınmıştır. Elde edilen bu nitel değerlendirmeler, sayısal verilerle oluşturulan tabloyla birleştirilmiş ve iki veri setinin çarpılmasıyla nihai karar matrisi elde edilmiştir. Bu matris, sonraki aşamada CRITIC yöntemiyle ağırlıkların hesaplanmasında ve COPRAS ile WASPAS analizlerinde kullanılmıştır.

Tablo 1 Karar Matrisi

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
	max	max	max	max	min	min	min	max	max	max
A1	75,38	0,14	52,12	40,33	4.656,67	0,03	0,08	4,75	3,63	4,25
A2	155,91	0,12	206,10	82,33	2.216,67	0,02	0,22	4,75	3,75	4,50
A3	132,14	0,06	205,22	104,00	1.480,00	0,06	0,04	4,75	4,50	4,50
A4	67,45	0,02	223,93	11,67	260,00	0,03	0,04	4,75	5,00	4,75
A5	31,37	0,02	193,79	16,67	90,00	0,26	0,22	4,50	4,75	4,25
A6	80,25	0,02	541,72	7,00	968,00	0,90	0,69	4,50	4,75	3,75
A7	175,76	0,04	882,09	3,00	2.064,33	1,67	1,32	4,50	4,75	4,25
A8	149,92	0,05	623,09	16,00	1.590,00	0,12	0,08	3,75	4,75	3,75
A9	134,63	0,08	198,49	10,00	3.449,33	2,08	1,84	2,75	3,00	2,50
A10	135,40	0,06	546,52	18,00	2.784,00	0,73	0,74	4,75	4,25	4,25
A11	96,52	0,06	253,66	20,00	3.272,00	1,07	1,07	4,75	4,50	4,25
ortalama	112,25	0,06	356,97	29,91	2.075,55	0,63	0,57	4,41	4,33	4,09
toplam	1.234,73	0,67	3.926,72	329,00	22.831,00	6,96	6,32	48,50	47,63	45,00

4. CRITIC Yöntem ile Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Karar matrisindeki kriterler farklı birimlere sahip olduğundan, karşılaştırılabilirlik sağlamak için normalizasyon

uygulanmıştır. Bu işlemde kriter yönleri dikkate alınmış; fayda kriterleri (yurtlar, yerleşim alanı, fakülteler, işletme yoğunluğu, arazi yapısı, görünürlük, güvenlik) maksimize edilerek, maliyet kriterleri (hastane, ana yol, duraklar) minimize edilerek normalize edilmiştir.

Normalizasyon sonrasında CRITIC yöntemi kapsamında kriterler arası ilişkiler analiz edilmiş, kriterlerin birbirleriyle olan korelasyonları hesaplanarak bir korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Ardından, her bir kriterin taşıdığı bilgi miktarını belirlemek amacıyla bilgi düzeyi (C_j) hesaplanmıştır. Bu hesaplama, kriterlerin kendi içindeki varyasyonunu ve diğer kriterlerle olan ilişkisini birlikte dikkate almaktadır. Elde edilen bilgi düzeyi değerleri toplam bilgi düzeyine oranlanarak kriter ağırlıkları oluşturulmuştur.

Her bir kriterin bilgi içeriğini belirlemek üzere CRITIC yöntemi kapsamında bilgi düzeyi (C_j) hesaplanmıştır. Bu hesaplama, kriterlerin kendi içindeki değişkenliği ile diğer kriterlerle olan ilişkilerini birlikte dikkate almaktadır. Bilgi düzeyi, $1-p_{ij}$ tablosundaki satır toplamlarının ilgili kriterin standart sapması ile çarpılmasıyla elde edilmekte; ardından tüm kriterlere ait bilgi düzeyleri toplam bilgi düzeyine bölünerek nesnel kriter ağırlıkları oluşturulmaktadır.

Tablo 2 Korelasyon düzeyi matrisinin 1'den çıkarılmış hali

1- p_{jk}	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
	max	max	max	max	min	min	min	max	max	max
K1	-	0,740	0,461	0,783	1,297	1,330	1,344	1,251	1,236	1,179
K2	0,740	-	1,457	0,508	1,780	0,818	0,910	0,991	1,770	1,040
K3	0,461	1,457	-	1,455	0,802	1,386	1,308	1,054	0,546	1,059
K4	0,783	0,508	1,455	-	1,074	0,474	0,524	0,664	1,215	0,621
K5	1,297	1,780	0,802	1,074	-	0,699	0,626	0,830	0,259	0,689
K6	1,330	0,818	1,386	0,474	0,699	-	0,012	0,425	0,688	0,315
K7	1,344	0,910	1,308	0,524	0,626	0,012	-	0,437	0,604	0,322
K8	1,251	0,991	1,054	0,664	0,830	0,425	0,437	-	0,502	0,067
K9	1,236	1,770	0,546	1,215	0,259	0,688	0,604	0,502	-	0,428
K10	1,179	1,040	1,059	0,621	0,689	0,315	0,322	0,067	0,428	-
Toplam	9,622	10,014	9,529	7,319	8,056	6,147	6,087	6,221	7,247	5,722

Tablo 3 Kriterlerin bilgi düzeyi ve ağırlıkları

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
<i>C_j</i>	2,839	3,074	2,759	2,285	2,352	2,064	1,973	1,854	2,136	1,467
<i>W_j</i>	0,125	0,135	0,121	0,100	0,103	0,091	0,087	0,081	0,094	0,064

Analiz sonucunda, Yerleşim Alanları kriteri 0,1348 değeriyle en yüksek ağırlığa sahip olurken, bunu Yurtlar (0,1245) ve Fakülteler (0,1210) kriterleri izlemiştir. Bu üç kriterin yüksek ağırlıkları, kampüste sürekli ikamet edilen bölgeler ile öğrenci yoğunluğunun fazla olduğu alanların e-atık oluşumunda belirleyici olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, Görünürlük kriteri 0,0643 değeriyle en düşük ağırlığa sahip kriter olarak belirlenmiş; bu durum kriterin düşük varyansına ve diğer kriterlerle olan yüksek korelasyonuna bağlı olarak alternatifler arasında sınırlı bir ayırım gücüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır

5. COPRAS ile Alternatiflerin Sıralanması

Karar matrisindeki değerler sütun toplamlarına bölünerek normalize edilmiş ve bu sayede farklı ölçeklerdeki veriler karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir. Normalize matris, kriter ağırlıklarıyla çarpılarak COPRAS analizinde kullanılan ağırlıklı normalize matrise dönüştürülmüştür.

Tablo 4 Ağırlıklı normalize matrisi

<i>dij</i>	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
	max	max	max	max	min	min	min	max	max	max
A1	0,008	0,028	0,002	0,012	0,021	0,000	0,001	0,008	0,007	0,006
A2	0,016	0,025	0,006	0,025	0,010	0,000	0,003	0,008	0,007	0,006
A3	0,013	0,012	0,006	0,032	0,007	0,001	0,001	0,008	0,009	0,006
A4	0,007	0,005	0,007	0,004	0,001	0,000	0,000	0,008	0,010	0,007
A5	0,003	0,003	0,006	0,005	0,000	0,003	0,003	0,008	0,009	0,006
A6	0,008	0,005	0,017	0,002	0,004	0,012	0,010	0,008	0,009	0,005
A7	0,018	0,007	0,027	0,001	0,009	0,022	0,018	0,008	0,009	0,006
A8	0,015	0,010	0,019	0,005	0,007	0,002	0,001	0,006	0,009	0,005
A9	0,014	0,016	0,006	0,003	0,016	0,027	0,025	0,005	0,006	0,004
A10	0,014	0,012	0,017	0,005	0,013	0,010	0,010	0,008	0,008	0,006
A11	0,010	0,011	0,008	0,006	0,015	0,014	0,015	0,008	0,009	0,006

COPRAS yöntemiyle her alternatif için fayda (Si^+) ve maliyet (Si^-) toplamaları hesaplanmış, ardından Qi değerleri elde edilmiştir. Maliyet kriterleri ters yönlü olduğu için en düşük maliyete sahip A4 referans alınmış ve tüm Qi değerleri buna göre normalize edilmiştir. Qi değeri en yüksek olan alternatif en uygun seçenek olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5 S^+ , S^- değerleri ve COPRAS'a göre sıralama

	Si^+	Si^-	Si^-/S^-min	Qi	Pi
A1	0,071	0,022	0,089	0,071	75,716
A2	0,094	0,013	0,151	0,094	100,000
A3	0,086	0,008	0,250	0,086	92,045
A4	0,047	0,002	1,000	0,047	49,979
A5	0,041	0,007	0,296	0,041	43,281
A6	0,054	0,026	0,078	0,054	57,786
A7	0,076	0,049	0,041	0,077	81,591
A8	0,070	0,010	0,205	0,070	75,020
A9	0,053	0,068	0,030	0,053	56,570
A10	0,071	0,032	0,062	0,071	75,603
A11	0,058	0,043	0,046	0,058	62,129
	min	0,002	mak	0,094	
	toplam	0,280	2,248		

6. WASPAS Yöntemi ile Alternatiflerin Sıralanması

Bu yöntemde normalizasyon yapılırken kriter yönleri dikkate alınmış; fayda kriterleri sütun maksimumlarına, maliyet kriterleri ise sütun minimumlarına göre normalize edilmiştir. Böylece tüm kriterler karşılaştırılabilir hâle getirilerek normalize karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 6 WASPAS'a göre normalize karar matrisi

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
	max	max	max	mak	min	min	min	max	max	max
A1	0,429	1,000	0,059	0,388	0,019	0,556	0,467	1,000	0,725	0,895
A2	0,887	0,879	0,234	0,792	0,041	1,000	0,159	1,000	0,750	0,947
A3	0,752	0,415	0,233	1,000	0,061	0,278	0,875	1,000	0,900	0,947
A4	0,384	0,178	0,254	0,112	0,346	0,625	1,000	1,000	1,000	1,000
A5	0,178	0,119	0,220	0,160	1,000	0,064	0,162	0,947	0,950	0,895
A6	0,457	0,172	0,614	0,067	0,093	0,019	0,050	0,947	0,950	0,789
A7	1,000	0,262	1,000	0,029	0,044	0,010	0,027	0,947	0,950	0,895
A8	0,853	0,358	0,706	0,154	0,057	0,139	0,467	0,789	0,950	0,789
A9	0,766	0,559	0,225	0,096	0,026	0,008	0,019	0,579	0,600	0,526
A10	0,770	0,436	0,620	0,173	0,032	0,023	0,048	1,000	0,850	0,895
A11	0,549	0,405	0,288	0,192	0,028	0,016	0,033	1,000	0,900	0,895

Bu matris üzerinden her alternatif için ağırlıklı toplam modeli (WAM) ve ağırlıklı çarpım modeli (WPM) hesaplanmış, ardından iki model arasındaki dengeyi belirleyen λ katsayısı kullanılarak birleşik WASPAS skoru (Q_i) oluşturulmuştur. Q_i değeri en yüksek olan alternatif en uygun seçenek olarak belirlenmiştir.

Tablo 7 Q1, Q2 değerleri ve WASPAS'a göre sıralama

	WAM(Q1)	WPM(Q2)	λ	Q_i
A1	0,534	0,331	0,383	0,471
A2	0,657	0,472	0,418	0,603
A3	0,612	0,468	0,433	0,571
A4	0,532	0,411	0,436	0,498
A5	0,427	0,275	0,392	0,381
A6	0,393	0,212	0,350	0,334
A7	0,515	0,201	0,280	0,402
A8	0,518	0,380	0,423	0,478
A9	0,350	0,163	0,317	0,286
A10	0,475	0,257	0,351	0,404
A11	0,407	0,208	0,338	0,341
ortalama	0,493	0,307		
toplam	5,420	3,375		
varyans	0,008	0,011		

Farklı matematiksel yaklaşımlara sahip COPRAS ve WASPAS yöntemleri, e-atık toplama kutularının yer seçimi probleminde alternatiflerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Elde edilen sıralamalar incelendiğinde her iki yöntemde de A2 (TP istasyonu önü) ilk sırada, A3 (cami önü) ise ikinci sırada yer almış ve bu noktaların en uygun yerleşim alanları olduğu görülmüştür. Alternatiflerin çoğunda iki-üç sıra farkla benzer sonuçlar elde edilmiş olsa da A4 (peronlar önü) ve A7 (Samiha Ayverdi yurdu önü) gibi bazı noktalar yöntemler arasında belirgin farklılıklar göstermiştir. Bu durum, COPRAS'ın fayda ve maliyet kriterlerini orantısız olarak ele alan yapısı ile WASPAS'ın toplam ve çarpım modellerini birleştiren hibrit yaklaşımından kaynaklanmaktadır. Örneğin, maliyet kriterlerinde düşük değerlere sahip olan A4 WASPAS'ta üst sıralara çıkarken, COPRAS'ta düşük fayda değerleri nedeniyle geri sıralarda kalmıştır. Benzer biçimde, A7 COPRAS'ta dengeli performans gösterirken, WASPAS'ın çarpımsal yapısı düşük değerleri daha güçlü cezalandırdığı için sıralamada gerilemiştir. Bu farklılaşmalar, yer seçimi problemlerinde tek bir yöntemle karar vermenin riskli olduğunu ve çoklu değerlendirme yöntemlerinin daha güvenilir sonuçlar sunduğunu göstermektedir.

Sonuç

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Kampüsü'nde e-atık toplama kutuları için en uygun noktaların belirlenmesini amaçlamış ve bu kapsamda CRITIC, COPRAS ve WASPAS yöntemleri bütünsel olarak kullanılmıştır. CRITIC ile kriter ağırlıkları istatistiksel olarak nesnel biçimde elde edilmiş; COPRAS ve WASPAS ile alternatiflerin çok boyutlu performansı değerlendirilmiştir. Her iki yöntemin de A2 ve A3 alternatiflerinde ortak sonuç vermesi, bulguların tutarlılığını güçlendirmiştir. Elde edilen model, kampüslerde sürdürülebilir atık yönetimi için uygulanabilir, veri odaklı bir çözüm sunmakta; aynı zamanda benzer

yerleşim alanlarında farklı atık türleri için de yol gösterici bir yapı oluşturma potansiyeline sahiptir.

Kaynakça

- Akın, B., & Kuru, A. (2011). Elektrikli ve Elektronik Atıkların (E-atık) Zararları, Yönetimi ve Türkiye'deki Uygulamalarının Değerlendirilmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 3(12), 1-12.
- Altıntaş, F. F. (2021). Avrupa Birliği Ülkelerinin Lojistik Performanslarının CRITIC Tabanlı WASPAS VE COPRAS Teknikleri ile Analizi. *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 25(1), 117-146.
- Ciftlik, S., Handiri, I., Beyhan, M., Akcil, A., Ilgar, M., & Gönüllü, M. (2011). Evaluation of management, economy and the potential of metal recovery of electrical and electronic wastes (E-waste). *SIGMA JOURNAL OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES*, 3(1), 261-267.
- Çalış Boyacı, A. (2021). Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi ile bitkisel atık yağ toplama kutuları için yer seçimi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 125- 131.
- Çilek, A. (2022). Entegre CRITIC-COPRAS Yaklaşımıyla Covid-19 Salgınının Borsa İstanbul Turizm Endeksinde İşlem Gören Şirketlerin Finansal Performansına Etkisi. *Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 263-281.
- Güner, M., Karabulut, T., & Korkmaz, E. (2023). Bağımsız Denetim Şirketlerinin Critic-Copras Yöntemleriyle Sıralanması. *Trends in Business and Economics*, 37(3), 148 - 159.
- He, W., Li, G., Wang, H., Huang, J., Xu, M., & Huang, C. (2006). WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 502-512.

- Keçeci, B., Dengiz, B., Sümer, E., Kılıç, A., Çiçek, S., İnan, B., & Çeki, E. (2014). CBS Destekli E-Atık Yönetimi: Çankaya Belediyesi İçin Bir Uygulama. *Ukay*, 8-14.
- Şentürk, İ. (2019). Elektrikli ve Elektronik Eşya Atıklarının Geri Dönüşümü Konusunda Halkın Bilinç Düzeyinin Ölçülmesi: Sivas İli Örneği. *Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 11(8), 958-978.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. (2025). Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyaların Yönetimi. (16/12/2025 tarihinde <https://mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=40055&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> adresinden ulaşılmıştır).
- Uluslararası Telekomünikasyon Birliği & Birleşmiş Milletler Eğitim ve Araştırma Enstitüsü. (2024). (16/12/2025 tarihinde <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Publications/The-Global-E-waste-Monitor-2024.aspx> adresinden ulaşılmıştır).
- Yılmaz Aydın, Ç., & Evcı Kiraz, E. D. (2017). Elektronik Atıklar ve Çevre Sağlığı. *Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi*, 1(1), 39-52.

BÖLÜM 2

ATIK TOPLAMA SİSTEMİNDEKİ KONTEYNER TOPLANMA VERİLERİNDEKİ ANOMALİLERİN TESPİTİ

MUHAMMED ÖZTAŞ¹
AHMET SARUCAN²

Giriş

Veri devrimi (Data Revolution) ve mobil teknolojilerin entegrasyonu ile birlikte, atık yönetimi sistemleri daha güvenilir veri toplama yöntemlerinden faydalanarak karar alma süreçlerini iyileştirmektedir. Atık toplama, şehir yönetimlerinin en temel hizmetlerinden biri olup, gelişmiş atık yönetimi sistemlerinde toplam işletme maliyetlerinin %60-70'ini oluşturmaktadır. Bu

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, Orcid: 0009-0005-5354-4196, muhoztas402@gmail.com

² Doç. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye Bölüm, Orcid: 0000-0001-5582-2456, asarucan@ktun.edu.tr

hizmetin etkin yürütülmesi, halk sağlığının korunması ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir (Wilson ve ark., 2015). Günümüzde akıllı şehirlerde atık yönetimi; yapay zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve büyük veri analitiği gibi hesaplamalı araçlardan yararlanarak atık toplama, ayrıştırma ve bertaraf süreçlerini optimize etmeyi hedeflemektedir. Nesmachnow ve ark. (2025) belirttiği üzere, bu araçlar yetkililere kaynak verimliliğini artırma ve çevresel etkiyi en aza indirme imkanı tanır. Bu bağlamda, Büyükşehir Belediyesine ait büyük veri setleri (5,14 milyon kayıt) kullanılarak operasyonel süreçlerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Atık toplama sistemlerinde, konteyner toplanma verileri (toplama zamanları, sıklıkları, lokasyonları vb.), sistemin genel performansını değerlendirmek ve iyileştirme stratejileri geliştirmek için kullanılan en önemli veri kaynaklarından biridir. Adewuyi ve ark. (2024), Büyük Veri Analitiği (BDA) kapsamında geçmiş işlem kayıtlarının ve operasyonel verilerin, atık yönetimde maliyetleri düşürmek ve çevresel etkileri azaltmak için kritik olduğunu belirtmektedir. Ancak, veri toplama süreçlerinde tutarsızlıklar ve eksiklikler (veri giriş hataları, sistemsel arızalar vb.) görülebilmekte; bu durum Adewuyi ve ark. (2024) tarafından da vurgulandığı üzere, veri setlerindeki eğilimlerin, kalıpların ve anomalilerin 'Tanımlayıcı Analitik' (Descriptive Analytics) yöntemleriyle tespit edilmesini zorunlu kılmaktadır.

Anomali tespiti, bir veri setindeki normal davranış kalıplarından önemli ölçüde farklılık gösteren, nadir veya beklenmedik veri noktalarının, örüntülerin veya olayların belirlenmesi işlemidir (Liso ve ark., 2024). Atık yönetiminde sistem

performansının izlenmesi; sermaye, iş gücü ve operasyonel maliyetlerin minimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle sabit rotalara dayalı geleneksel toplama süreçlerinde, konteynerlerin doluluk durumuna dair gerçek zamanlı bilgi eksikliği, henüz dolmamış konteynerlerin ziyaret edilmesi suretiyle kaynak israfına yol açmaktadır. Bu bağlamda, atık toplama rotalarının optimize edilmesi ve gereksiz seferlerin (erken toplama) önlenmesi hem sosyoekonomik maliyetlerin düşürülmesi hem de çevresel etkilerin azaltılması için gereklidir (Hannan ve ark., 2017). Literatürde, atık yönetiminin verimliliğini artırmak amacıyla, sadece mevcut durumu izlemek yerine gelecekteki atık oluşumunu tahmin eden ve buna göre rota planlayan proaktif yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Örneğin Ahmad ve ark. (2020), atık toplama süreçlerinde taşımayı önlemek (avoidance in advance) için makine öğrenmesi tabanlı tahminleme ve evrimsel algoritmalarla desteklenen çok hedefli bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Bu tür ileri seviye optimizasyon modellerinin başarısı, temelde işlenen verinin tutarlılığına dayandığından, öncelikli olarak veri setindeki aykırı değerlerin (anomalilerin) istatistiksel yöntemlerle (Z-skor) temizlenmesi hedeflenmektedir.

Atık toplama sistemlerinin maliyet etkinliği açısından optimize edilmesi, literatürde sıkça ele alınan temel bir problemidir. Örneğin Ramos ve ark. (2013), çoklu depo ve karma rota yapılarını kullanarak toplama maliyetlerinin ve mesafelerin önemli ölçüde düşürülebileceğini göstermiştir. Ancak, statik rota planlamasının ötesine geçerek 'talep odaklı' ve dinamik bir toplama sistemine ulaşmak için, konteyner doluluk oranlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi veya izlenmesi kritik bir gerekliliktir. Bu bağlamda, doluluk

verilerinin analizi, operasyonel verimsizliklerin (erken veya geç toplama) tespiti için temel bir parametre niteliği taşımaktadır.

Ancak, tüm konteynerlerin gerçek zamanlı doluluk sensörleriyle donatılması, özellikle büyük şehirlerde yüksek maliyetli olabilmektedir. Bu gibi veri toplama altyapısının sınırlı olduğu durumlarda, Oguz-Ekim'in (2021) de belirttiği üzere, makine öğrenmesi yaklaşımları devreye girmektedir. Sensör verilerinin yokluğunda; nüfus, sosyo-ekonomik göstergeler ve geçmiş veriler gibi girdiler kullanılarak atık üretim potansiyeli yüksek doğrulukla tahmin edilebilmekte ve bu tahminler atık yönetim stratejileri için temel oluşturabilmektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin bir büyükşehirinde kentsel atık toplama sistemine ait konteyner toplama verilerinde gözlemlenen anomalilerin Z-skor tabanlı bir yöntemle kapsamlı bir şekilde tespiti ve bu tespit edilen anomalilerin, çeşitli parametreler kullanılarak oluşturulan/tahmin edilen sanal konteyner doluluk verileri ile karşılaştırmalı analizi amaçlanmıştır. Çalışma, toplama verilerindeki anormalliklerin potansiyel nedenlerini anlamaya, sanal doluluk modelinin pratikteki toplama örüntüleriyle ne ölçüde örtüştüğünü değerlendirmeye, mevcut atık toplama sisteminin performansını değerlendirmek, potansiyel iyileştirme alanlarını belirlemek ve sonuç olarak sistemin genel verimliliğini artırarak operasyonel maliyetleri azaltmak için önemli nicel bilgiler ve stratejik çıkarımlar sağlamayı hedeflemektedir.

Bu çalışma, (Adewuyi ve ark., 2024) tarafından vurgulanan 'veri entegrasyonu' prensibini temel almaktadır. Literatürde genellikle IoT tabanlı sensör verilerine odaklanılsa da, (Adewuyi ve

ark., 2024), etkili bir atık tahminlemesi için sadece operasyonel verilerin değil; nüfus artışı, gelir düzeyleri ve tüketim alışkanlıkları gibi sosyoekonomik verilerin de entegre edilmesi gerektiğini belirtmektedir. Benzer şekilde Oguz-Ekim'in (2021) de, gelişmekte olan ülkelerde veri eksikliğinin, doğru tanımlanmış girdi değişkenleri (input variables) ve makine öğrenmesi modelleriyle aşılabileceğini kanıtlamıştır. Bu bağlamda çalışma, sensör verilerinin eksik olduğu durumlarda dahi, operasyonel veriler ile bina ve nüfus verilerini birleştirerek bütüncül bir anomali tespiti ve 'sanal doluluk' modeli sunmasıyla literatürdeki bu gerekliliği karşılamaktadır.

Z-skor gibi basit ve kolay uygulanabilir bir istatistiksel yöntemin bile büyük veri setlerinde anlamlı operasyonel anomalileri ve veri kalitesi sorunlarını işaret edebileceğini göstermesi, kısıtlı kaynaklara sahip belediyeler için pratik bir değer taşımaktadır. Ayrıca, sanal doluluk modellemesi yoluyla elde edilen erken/geç toplama bulguları, dinamik toplama sıklığı ve rota optimizasyonu stratejileri için somut bir başlangıç noktası sunmaktadır.

Atık Yönetim Sistemleri

Atık yönetim sistemlerinde anomali tespiti ve konteyner doluluk tahmini, operasyonel verimliliği artırma ve maliyetleri düşürme potansiyeli nedeniyle son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Konuyla ilgili temel çalışmalar ve yaklaşımlar aşağıda incelenmiştir.

Atık Toplama Sistemlerinde Anomali Tespiti

Atık toplama süreçlerindeki anomaliler, planlanan operasyonlardan sapmaları ifade eder ve çeşitli biçimlerde ortaya çıkabilir. (Adewuyi ve ark., 2024), atık yönetiminde operasyonel verimliliği artırmak için geçmiş verilerin ve gerçek zamanlı izleme (Real-Time Monitoring) sistemlerinin önemine dikkat çekmektedir. Yazarlar, toplama rotalarındaki verimsizliklerin veya gecikmelerin tespit edilmesinde ve operasyonların optimize edilmesinde (Optimization of Operations) veri analitiğinin kritik bir rol oynadığını belirtmektedir. Bu çalışmada kullanılan istatistiksel anomali tespiti yaklaşımı, Adewuyi ve ark. (2024)'nin önerdiği 'tanımlayıcı analitik' yöntemleriyle uyumlu olarak, geçmiş verilerdeki sapmaları ortaya çıkarmayı hedeflemektedir. Hannan ve ark. (2017), katı atık toplama süreçlerinde en verimli toplama stratejisini belirlemek amacıyla kapasiteli araç rotalama problemi modeline entegre edilmiş parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını önermiştir. Çalışmada, "Eşik Atık Seviyesi" kavramı kullanılarak yapılan analizler sonucunda; %70 ila %75 doluluk oranına ulaşıldığında yapılan toplamaların; seyahat mesafesi, toplanan atık miktarı ve yakıt tüketimi açısından en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir. Bu bulgu, belirli bir doluluk eşiğinin altındaki toplamaların (erken toplama) operasyonel verimliliği düşürdüğünü kanıtlamaktadır.

Ahmad ve ark., (2020), akıllı şehir dönüşümü kapsamında atık yönetimi için hibrit bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde, geçmiş veriler (nüfus, cinsiyet, mevsimsellik) kullanılarak atık üretim davranışlarını tahmin etmek için Destek Vektör Regresyonu (SVR) gibi algoritmalar kullanılmış; elde edilen tahminler parçacık sürü optimizasyonu tabanlı bir rota öneri

mekanizmasına entegre edilmiştir. Literatürdeki bu tür hibrit modeller, sensör verilerinin veya geçmiş kayıtların güvenilirliğini esas alır; bu çalışmada ise Büyükşehirdeki veriler üzerinde uygulanan Z-skor analizi ile söz konusu veri güvenilirliğinin nasıl sağlanacağı ortaya konulmaktadır. Tirkolae ve ark. (2019), kentsel atık yönetiminde maliyetlerin %60 ile %80'inin toplama ve taşıma işlemlerinden kaynaklandığını belirterek, bu süreçteki verimsizliklerin giderilmesi için donanım tabanlı çözümler yerine algoritmik optimizasyonlara odaklanmışlardır. Yazarlar, araçların yakıt, bakım ve işgücü gibi yüksek işletme giderlerini minimize etmek amacıyla, zaman pencereli ve çok seferli (multi-trip) araç rotalama problemleri için 'Benzetim Tavlaması' (Simulated Annealing) tabanlı verimli bir algoritma önermiş ve bunun belediye harcamalarında önemli tasarruflar sağlayabileceğini ortaya koymuşlardır.

Atık toplama süreçlerinde karşılaşılan verimsizlikler ve sapmalar, Adewuyi ve ark. (2024) tarafından incelenen BDA uygulamaları kapsamında çeşitli kategorilerde ele alınabilir. Literatürdeki genel sınıflandırmalar ve Adewuyi ve ark. (2024)'nin 'Operasyonların Optimizasyonu' ve 'Veri Kalitesi' başlıkları altındaki tespitleri ışığında, bu sapmalar şu şekilde gruplandırılabilir:

Rota ve Zamanlama Sapmaları: Trafik sıkışıklığı veya verimsiz planlama kaynaklı gecikmeler.

Kapasite ve Doluluk Hataları: Konteyner doluluk tahminlerindeki hatalar veya aşırı/eksik kapasite kullanımı; çalışmamızda 'erken/geç toplama' olarak analiz edilmiştir.

Veri Kalitesi Sorunları: Eksik, tutarsız veya hatalı veri girişleri.

Frekans Anomalileri: Mevsimsel veya özel olaylara bağı beklenmedik atık artışları.

Konteyner Doluluk Tahminleri ve Rota Optimizasyonu

Konteyner doluluk tahmini, atık toplama operasyonlarının 'talep odaklı' planlanabilmesi için kritik öneme sahiptir; ancak sensör tabanlı çözümlerin maliyeti, literatürde alternatif modelleme yaklaşımlarını zorunlu kılmıştır. Oguz-Ekim (2021), veri toplamanın sınırlı olduğu bölgelerde, doğrudan ölçüm yerine doğru tanımlanmış 'girdi değişkenlerine' (input variables) dayalı makine öğrenmesi modellerinin (yapay sinir ağları, SVR) yüksek doğruluklu projeksiyonlar sunduğunu kanıtlamıştır. Yazar, çalışmasında makro ölçekli sosyo-ekonomik göstergeleri (GSYİH, tüketim verileri) kullansa da ortaya koyduğu 'dolaylı değişkenlerle tahmin' prensibi evrenseldir. Bu bağlamda çalışmada; Oguz-Ekim'in (2021) makro ölçekte uyguladığı bu metodolojiyi mikro ölçeğe uyarlayarak, sensör verilerinin yokluğunda bina özellikleri ve nüfus yoğunluğu üzerinden işleyen bir 'sanal doluluk modeli' kurgulamıştır.

Bu alandaki önemli çalışmalardan biri olan Ramos ve ark. (2013), atık yağ toplama sistemlerinin planlanması için karışık tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir metodoloji önermiştir. Yazarlar, çalışmalarında doluluk tahminlemesi yerine sabit talep verilerini kullanarak; kapalı ve açık rotaların birlikte kullanıldığı (Mixed Closed and Open Inter-Depot Routes) hibrit bir rota yapısı kurgulamışlardır. Bu yaklaşım sonucunda, mevcut şirket

operasyonlarına kıyasla kat edilen mesafede %13, filo kiralama maliyetlerinde ise %11 oranında bir azalma sağlandığı rapor edilmiştir. Literatürde atık yönetim sistemlerinin verimliliğini artırmak için çeşitli yapay zeka teknikleri kullanılmaktadır. Örneğin Oguz-Ekim (2021), atık üretim miktarının tahmin edilmesinde yapay sinir ağları ve SVR gibi makine öğrenmesi algoritmalarının performansını karşılaştırmış ve doğru girdi değişkenleri ile bu yöntemlerin yüksek başarı sağladığını göstermiştir. Bu tür tahmin modelleri, karmaşık atık toplama problemlerinde belirsizliği azaltarak, karar vericilere daha gerçekçi ve veriye dayalı stratejiler geliştirme imkanı sunmaktadır.

Ghiani ve ark. (2012), kentsel atık yönetiminde araç rotalamadan ziyade, toplama noktalarının (konteynerlerin) optimum konumu ve kapasitelerinin belirlenmesi üzerine odaklanan bir tamsayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Nardò (İtalya) örneğinde test edilen bu model, vatandaşların hizmet kalitesi (QoS) beklentilerini ve atık üretim kapasitelerini kısıt olarak ele alarak, mevcut duruma kıyasla kullanılan konteyner sayısında önemli bir azalma sağlamayı hedeflemiştir. Bu yaklaşım, çalışmada ele alınan konteynerlerin doluluk verimliliğinin (erken/geç toplama) analiz edilmesi gerekliliği ile metodolojik bir paralellik göstermektedir. Teixeira ve ark. (2004), atık toplama planlaması üzerine yaptıkları vaka çalışmasında, atık üretim miktarlarını belediye ölçeğindeki nüfus ve alan verilerine dayalı makro tahminlerle modellemiş; çalışmanın sonucunda ise hizmet kalitesinin artırılması için bireysel toplama noktalarındaki birikim oranlarına dair daha hassas verilere ihtiyaç duyulduğunu vurgulamıştır. Bu gereklilikten hareketle mevcut çalışma, literatürdeki makro yaklaşımları derinleştirerek;

bina taban alanı, kat yüksekliği ve hane halkı büyüklüğü gibi mikro ölçekli parametrelerle beslenen bir 'Sanal Konteyner Doluluk Modeli' geliştirmiştir. Büyükşehirde uygulanan bu model sayesinde, sensör verisi olmaksızın doluluk oranları simüle edilmiş ve sahadaki konteynerlerin %26,1'inde erken toplama (verimsizlik), %12,3'ünde ise geç toplama (taşma riski) anomalileri tespit edilerek operasyonel iyileştirme alanları somut verilerle ortaya konulmuştur. Literatürde sensör verileri, veri azaltma ve ilgili teknolojiler üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Dias ve ark. (2016), kablosuz sensör ağlarında tahmine dayalı veri azaltma teknikleri üzerine bir inceleme sunmuşlardır. Çalışmada, sensör verilerinin miktarını azaltmak ve iletişim maliyetlerini düşürmek için kullanılan tahmin tabanlı yöntemler incelenmiştir. Yazarlar, bu yöntemlerin atık yönetimi gibi alanlarda da uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Akıllı atık yönetiminde maliyetli sensör donanımlarına alternatif olarak, veri odaklı algoritmik yaklaşımlar giderek önem kazanmaktadır. Örneğin Hidalgo-Crespo ve ark. (2024), atık yönetim sistemlerini optimize etmek adına donanım verisi yerine; demografik değişkenleri Makine Öğrenimi (K-means kümeleme ve Temel Bileşen Analizi - PCA) teknikleriyle işleyerek atık üretim kalıplarını yüksek doğrulukla haritalandırmışlardır. Literatürdeki bu 'donanım yerine veri analitiği' yaklaşımına paralel olarak; mevcut çalışmada da Büyükşehirde ait 5,14 milyon satırlık geçmiş toplama verisi üzerinde Z-skor tabanlı istatistiksel modelleme kullanılmış ve fiziksel sensörlere ihtiyaç duyulmadan operasyonel anomaliler tespit edilmiştir.

Liso ve ark. (2024), Endüstri 4.0 kapsamındaki anomalilerin tespiti için kullanılan derin öğrenme tabanlı yöntemleri sistematik

bir şekilde incelemişlerdir. Bu yöntemlerin uygulama alanlarının; akıllı üretim, enerji yönetimi ve enerji tahmini ile yapısal ve çevresel izleme olduğunu belirlemişlerdir. Bu alanlar, gerçek zamanlı hata tespiti, bakım maliyetlerinin azaltılması ve sistem güvenliği gibi kritik hedeflere ulaşılabileceğini tespit etmişlerdir.

Wati ve ark. (2025), atık taşımacılığının çevresel etkilerini inceledikleri kapsamlı sistematik incelemelerinde; dizel, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve pnömatik toplama sistemlerini yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, dizel yakıtlı araçların en yüksek çevresel etkiye sahip olduğu, buna karşılık CNG kullanımının sera gazı emisyonlarını minimize ettiği ve yenilenebilir elektrikle desteklenen pnömatik sistemlerin sürdürülebilir bir alternatif sunduğu belirlenmiştir. Mevcut literatürde 'optimizasyon' kavramı, Wati ve ark. (2025) tarafından da vurgulandığı üzere, ağırlıklı olarak dizel araçların CNG ile değiştirilmesi veya yakıt türü bazlı emisyon azaltımı ekseninde ele alınmaktadır. Ancak literatürde yakıt ve araç teknolojisine odaklanılırken; gerçek zamanlı sensör verisinin bulunmadığı durumlarda 'sanal doluluk modellemesi' ile operasyonel 'toplama anomalilerini' (erken veya geç toplama) entegre eden ve bu verimsizlikleri Z-skor gibi istatistiksel yöntemlerle analiz eden çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışma, özellikle sensör verilerinin yaygın olmadığı büyük ölçekli sistemlerde, mevcut operasyonel verilerdeki anomaliler ile teorik doluluk tahminleri arasındaki ilişkiyi inceleyerek ve Büyükşehir özelinde bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, Z-skor gibi pratik yöntemlerle tespit

edilen toplama anomalileri ile bina verilerine dayalı sanal doluluk tahminleri arasındaki ilişkiyi analiz etmeyi ve buradan elde edilecek bulgularla atık toplama sistemlerinin optimizasyonuna yönelik somut öneriler sunmayı amaçlamaktadır.

Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan veri setleri, verilerin analize hazırlanması için uygulanan ön işleme adımları, konteyner toplanma verilerindeki anomalilerin tespiti için kullanılan metodoloji, sanal konteyner doluluk oranlarının ve modelinin hesaplanma yöntemi ve son olarak tespit edilen anomaliler ile sanal doluluk verilerinin karşılaştırılmasında izlenen metodoloji detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

Veri Setleri ve Ön İşleme

Çalışmada, Büyükşehir atık toplama takip sistemine ait üç temel veri seti kullanılmıştır. Ham veri setleri, analizlere uygun hale getirilmeden önce kapsamlı bir veri ön işleme sürecinden geçirilmiştir.

Konteyner Verileri :

Toplam 12092 adet konteynere ait kayıt içermektedir. Her bir konteyner için konteyner kimlik numarası (ContainerId), konteyner tipi, ait olduğu grup ve coğrafi konum (enlem, boylam) gibi bilgileri içeren 9 sütun bulunmaktadır. Konteynerlerin %96,9'u (11717 adet) operasyonel olarak aktif durumda olduğu belirtilmiştir. Konteynerler, Büyükşehir merkezi ve mücavir alan sınırları içerisinde (yaklaşık Enlem: 37,74-37,97; Boylam: 32,49-32,68

aralığında) dağılım göstermekte olup, toplam 47 benzersiz bölgede bulunmaktadır.

Bina Verileri :

Toplam 1.621.100 adet bina veya bağımsız bina parçasına ait kayıt içermektedir. Bu binalardan 64.237 adedi aktif operasyon bölgelerine atanmıştır. Her bir kayıt için binanın coğrafi konumu, taban alanı (footprint area) ve bina yüksekliği gibi temel bilgileri içeren 4 ana sütun bulunmaktadır. Veri seti, tahmini kat sayısı, daire sayısı, insan sayısı ve atık miktarı gibi tahminler için zenginleştirilmiştir. Binaların taban alanları 4,3 m² ile 98.751 m² arasında, yükseklikleri ise 0,01 m ile 110 m arasında geniş bir yelpazede değişiklik göstermektedir.

Konteyner Toplama Verileri :

Toplam 5.139.213 (yaklaşık 5,14 milyon) adet konteyner toplama olayına ait kayıt içermektedir. Her bir toplama olayı için konteyner kimlik numarası, toplama işleminin yapıldığı zaman damgası (tarih ve saat), toplama işlemini gerçekleştiren araç kimlik numarası ve toplamının yapıldığı bölge kimlik numarası gibi bilgileri içeren 7 sütun bulunmaktadır. Veri seti, 823.354 farklı (benzersiz) zaman damgası içermektedir. İncelenen zaman aralığı, 10 Kasım 2022 saat 11:19:30 ile 18 Ekim 2024 saat 18:03:35 arasını kapsamaktadır (yaklaşık 2 yıllık bir periyot).

Veri Ön İşleme Adımları:

Eksik Değer Analizi ve Yönetimi: Kritik eksik değerler (örn. konteyner konumları) mümkünse tamamlanmış veya uygun istatistiksel yöntemlerle doldurulmuş, doldurulamayanlar analiz dışı

bırakılmıştır. Toplama verilerindeki eksik/hatalı zaman damgaları temizlenmiştir.

Aykırı Değer Tespiti ve Düzeltilmesi: Negatif değerli ContainerId ve UserId gibi mantıksal hatalı değerler, sıfır veya anlamsız araç/bölge ID'leri tespit edilip düzeltilmiş veya işaretlenmiştir. Özellikle belirtilen 2023-06-11 tarihindeki aşırı yüksek günlük toplama sayısı (778.194) bir veri anomali örneği olarak incelenmiştir.

Veri Dönüşümleri ve Standardizasyon: Zaman damgaları standart formata (YYYY-AA-GG SS:DD:SS), coğrafi koordinatlar WGS84 ondalık derece formatına dönüştürülmüştür. Sayısal verilerde ondalık ayırıcı olarak nokta (.) kullanımı standardize edilmiştir.

Bina Verisi Filtreleme ve Zenginleştirme: Binalar aktif operasyon bölgelerine göre filtrelenmiş (1.621.100 binadan 64.237'si aktif bölgelere atanmış) ve her bina bulunduğu aktif bölgeye atanmıştır. Bina bazlı tahminler için yeni sütunlar (tahmini kat sayısı, daire sayısı, insan sayısı, atık miktarı, en yakın konteyner ID) oluşturulmuştur.

Anomali Tespit Yöntemi

Konteyner toplama verilerindeki (özellikle günlük toplam konteyner toplama sayıları) anomalileri tespit etmek için öncelikli olarak Z-skor tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Z-skor, bir veri noktasının ortalamadan kaç standart sapma uzakta olduğunu gösterir ve Eş. 1 yardımıyla hesaplanır.

$$Z=(X-\mu)/\sigma \quad (1)$$

Burada;

X: veri noktasını (ilgili günün toplam toplama sayısı),

μ : veri setinin ortalamasını (günlük toplama sayılarının genel ortalaması veya hareketli ortalaması),

σ : veri setinin standart sapmasını (günlük toplama sayılarının genel standart sapması veya hareketli standart sapması) temsil etmektedir. Çalışmada, günlük toplama sayıları için hareketli ortalama (rolling mean) ve hareketli standart sapma (rolling standard deviation) kullanılarak her gün için dinamik bir Z-skor değeri hesaplanmış ve $|Z - \text{skor}|$ değeri belirli bir eşik değerini (bu çalışmada $|Z| > 2$) aşan günler anomali olarak işaretlenmiştir.

Sanal Konteyner Doluluk Modeli

Gerçek zamanlı sensör verilerinin yokluğunda/olmadığı durumlarda, konteynerlerin doluluk oranlarını tahmin etmek için aşağıdaki faktörlere, varsayımlara ve teorik bir doluluk modeline dayanılmıştır:

Bina Özellikleri ve Tahmini Nüfus/Atık Üretimi:

Her binanın taban alanı ve yüksekliği kullanılarak tahmini kat sayısı (ortalama kat yüksekliği 3,0 m varsayımı ile) hesaplanmıştır. Binanın konut amaçlı kullanılan oranı %80 ve ortalama daire büyüklüğü 100 m² varsayılarak, binadaki tahmini toplam daire sayısı hesaplanmıştır. Türkiye genelinde ortalama hane halkı büyüklüğünün 2022 yılı için yine 3,17 kişi (TÜİK, 2023) olduğu dikkate alınarak, daire başına ortalama bu değer (veya

çalışmada kullanılan 3,2 kişilik yuvarlanmış değer) kullanılarak binadaki tahmini insan sayısı belirlenmiştir.

Atık Üretim Hızı: Kişi başı günlük ortalama atık üretim miktarı için literatürde farklı değerler bulunmaktadır. Avrupa Çevre Ajansı (European Environment Agency (EEA), 2025) verilerine göre Türkiye'de kişi başına üretilen belediye atığı miktarı 2022 yılında yaklaşık 1,05 kg/gün (382 kg/yıl) olarak belirtilmiştir. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü (CSBGM) (2024) tarafından yayınlanan rehberde ise TÜİK verilerine atıfla, bu değer 1,13 kg/gün olduğu aktarılmıştır. Büyükşehir için spesifik bir ortalama değer bu kaynaklarda doğrudan belirtilmemekle birlikte, Türkiye geneli için en güncel ve yaygın kabul edilen değer olduğu belirtilerek bu çalışmada 1,2 kg/kişi/gün değeri kabul edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak her bir binanın günlük tahmini toplam atık miktarı (kg) hesaplanmıştır.

Bina-Konteyner Ataması ve Mesafe Faktörü:

Her bina, coğrafi olarak en yakınında bulunan aktif konteynere atanmıştır. Binalar ile en yakın konteynerler arasındaki ortalama mesafe 111,29 metre olarak hesaplanmıştır.

Konteyner Kapasiteleri ve Dolum Süresi Hesaplaması:

Farklı tipteki konteynerlerin hacimleri (Tip 1: 120L, Tip 2: 240L, ..., Tip 6-11: 1100L) ve sıkıştırılmamış evsel atık için ortalama atık yoğunluğu (150 kg/m^3) kullanılarak her bir konteyner tipinin kg cinsinden kapasitesi hesaplanmıştır.

Dolum Süresi Hesap Adımları:

Her bir konteynere atanan tüm binaların günlük tahmini atık miktarları toplanarak, o konteynere bir günde bırakılan toplam atık miktarı (kg/gün) hesaplanmıştır.

Konteynerin kg cinsinden kapasitesi, bu günlük toplam atık miktarına bölünerek, konteynerin teorik olarak kaç günde dolacağı (tahmini dolum süresi - gün cinsinden) tahmin edilmiştir: Dolum Süresi (gün) = Konteyner Kapasitesi (kg) / Konteyner Başına Günlük Atık Miktarı (kg/gün) (Günlük atık miktarı > 0 olan konteynerler için hesaplanmıştır).

Teorik Doluluk Oranı (%):

Teorik Doluluk Oranı = (Konteynere Günlük Gelen Atık Miktarı × Son Toplamadan Bu Yana Geçen Süre) / Konteyner Kapasitesi × 100 şeklinde hesaplanır. Burada, "konteyner başına günlük ortalama atık miktarı" (atık üretim hızı) ve "son toplamadan bu yana geçen süre" (gün cinsinden) temel girdilerdir.

Karşılaştırma Metodolojisi

Tespit edilen konteyner toplanma anomalileri ile hesaplanan sanal konteyner doluluk verileri arasındaki ilişkiyi incelemek için aşağıdaki karşılaştırma metodolojisi kullanılmıştır:

Dolum/Toplama Oranı Hesaplaması:

Her bir konteyner için, hesaplanan sanal Dolum Süresi (gün) ile gerçek toplama verilerinden elde edilen ortalama Toplama Sıklığı (gün) (iki toplama arasındaki ortalama süre) karşılaştırılmıştır.

Dolum/Toplama Oranı = Tahmini Dolum Süresi / Ortalama Gerçek Toplama Aralığı

Bu oranın yorumlanması:

Oran > 2 : Konteyner, teorik dolum süresinin yarısından daha kısa bir sürede veya dolmadan çok önce toplanıyor ("erken toplama").

Oran $< 2/3$: Konteyner, teorik dolum süresinin önemli ölçüde üzerinde bir sürede, yani dolduktan sonra uzun bir süre bekleyerek toplanıyor ("geç toplama").

Anomali-Doluluk İlişkisi Analizi:

Anomali tespit edilen günlerdeki genel doluluk durumu ve erken/geç toplanan konteynerlerin bulunduğu bölgelerdeki anomali yoğunlukları incelenmiştir.

Bulgular

Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen temel bulgular; konteyner toplanma verilerindeki anomaliler, sanal konteyner doluluk verileri ve bu iki veri seti arasındaki ilişkiye dair analiz sonuçları sunulmaktadır.

Günlük Toplama Sayılarındaki Anomaliler

Günlük toplam konteyner toplama sayıları Z-skor yöntemi ($|Z\text{-skor}| > 2$ eşiği ile) kullanılarak analiz edildiğinde, incelenen yaklaşık 2 yıllık dönemde toplam 31 gün anormal toplama aktivitesine sahip olarak tespit edilmiştir. Bu anomalilerin 30'u pozitif Z-skoru (yani, beklenenden önemli ölçüde yüksek toplama sayısı) ve yalnızca 1'i negatif Z-skoru (yani, beklenenden önemli ölçüde düşük toplama sayısı) ile karakterize edilmiştir.

Tespit edilen önemli anomalilerden bazıları şunlardır:

2023-05-07: 121 toplama (Z-skoru: -2,04 / -2,0447) – Düşük toplama anomalisi.

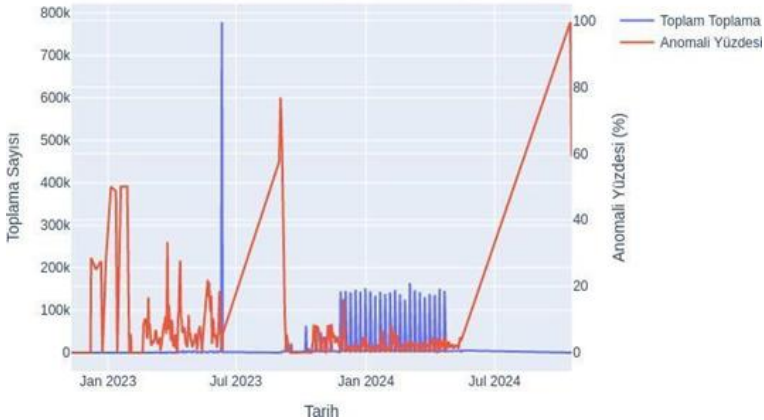
2023-06-11: 778.194 toplama (Z-skoru: 2,27 / 2,2678) – Aşırı yüksek toplama anomalisi. Bu değerin bir veri kalitesi sorununa işaret etme olasılığı yüksektir.

2023-09-10: 43.507 toplama (Z-skoru: 2,27 / 2,2677) – Yüksek toplama anomalisi.

Diğer birçok pozitif anomali de benzer Z-skor değerlerine (yaklaşık 2,26-2,27) sahiptir.

2024 yılının ilk çeyreğinden sonra çok sayıda pozitif anomali (normalden yüksek toplama) gözlemlenmiştir.

Şekil 1 Günlük toplama sayıları ve anomali yüzdeleri



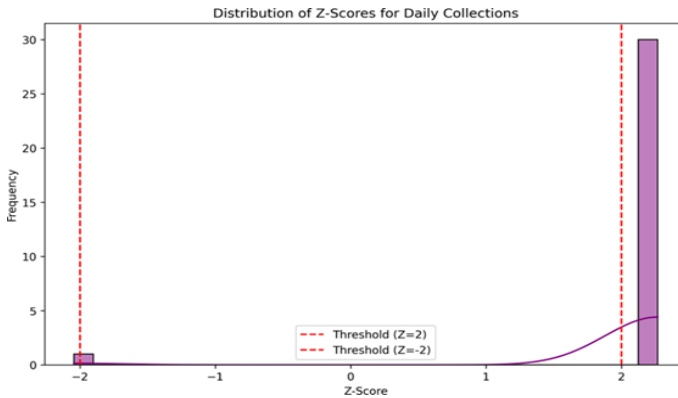
Günlük toplama sayıları ve tespit edilen anomaliler Şekil 1'de görselleştirilmiştir. Bu grafikte, günlük toplam konteyner toplama sayıları mavi bir çizgi ile gösterilmektedir. Kırmızı kesikli çizgiler $Z\text{-skor} = +2$ ve $Z\text{-skor} = -2$ eşiklerini belirtmektedir. Bu eşiklerin dışına çıkan noktalar (kırmızı daireler) anomali olarak işaretlenmiştir. Grafikte özellikle Haziran 2023'te çok büyük bir pozitif anomali ve 2024 başlarında bir dizi daha küçük pozitif anomali göze çarpmaktadır.

$Z\text{-skor}$ değerlerinin dağılımı ise Şekil 2'de sunulmuştur; bu dağılım, çoğu değer -2 ile $+2$ arasında yoğunlaştığını, ancak bazı uç değerlerin bu aralığın dışına çıkarak anomali olarak sınıflandırıldığını göstermektedir.

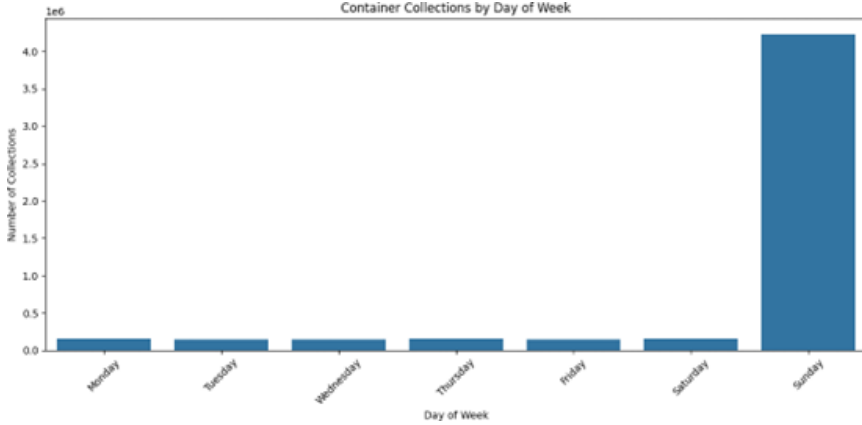
Toplama Sıklığının Zamansal Örüntüleri ve Anomalileri

Konteyner toplama sıklığının zamansal örüntüleri incelendiğinde belirgin farklılıklar ve potansiyel anomaliler tespit edilmiştir:

Şekil 2 Günlük toplamalar için $Z\text{-skor}$ dağılımı



Şekil 3 Haftanın günlerine göre konteyner toplama



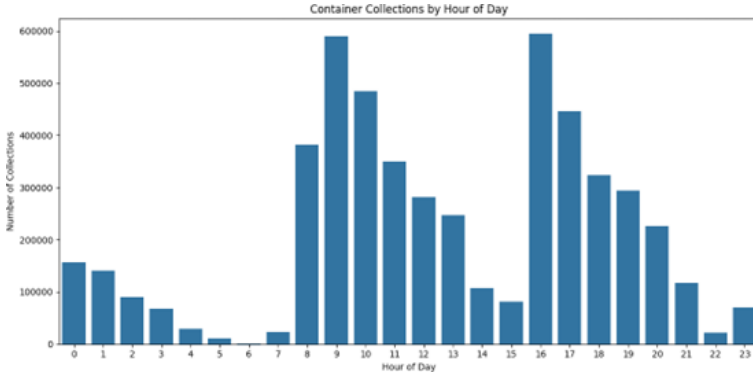
Haftanın Günlerine Göre Toplama Sıklığı: Şekil 3’e göre en yüksek toplama aktivitesi Pazar günü gözlemlenirken, en düşük aktivite Pazartesi günü kaydedilmiştir.

Günün Saatlerine Göre Toplama Sıklığı: Şekil 4’e göre toplama işlemleri en yoğun olarak sabah 09:00-10:00 veya genel olarak 08:00-12:00 ve öğleden sonra/akşamüstü 16:00-19:00 saatleri arasında gerçekleşmektedir. Gece saatlerinde (00:00-06:00) ve öğle saatlerinde aktivite oldukça düşüktür/azalmaktadır. Bu, önceki analizlerle genel olarak uyumludur.

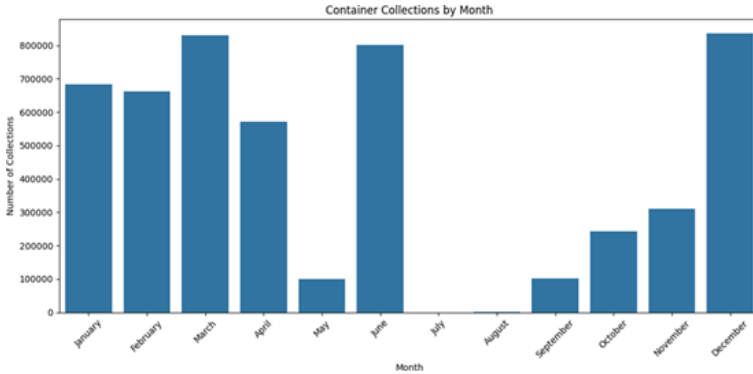
Aylara Göre Toplama Sıklığı: Şekil 5’e göre Mart, Haziran ve Aralık aylarında yüksek toplama sayıları gözlenirken, Mayıs ve Temmuz-Eylül arası dönemde daha düşük toplamalar görülmektedir. En yüksek toplama ayının Haziran, en düşük toplama ayının Mayıs olduğu belirtilmektedir.

Gün ve Saat Bazında Toplama Sıklığı Isı Haritası: Şekil 6’da haftanın ve günün saatleri bazında toplama yoğunluğunu bir ısı haritası üzerinde görselleştirmektedir günleri. Bu harita, en yoğun toplama periyotlarının Pazar günleri sabah ve öğleden sonra saatleri olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

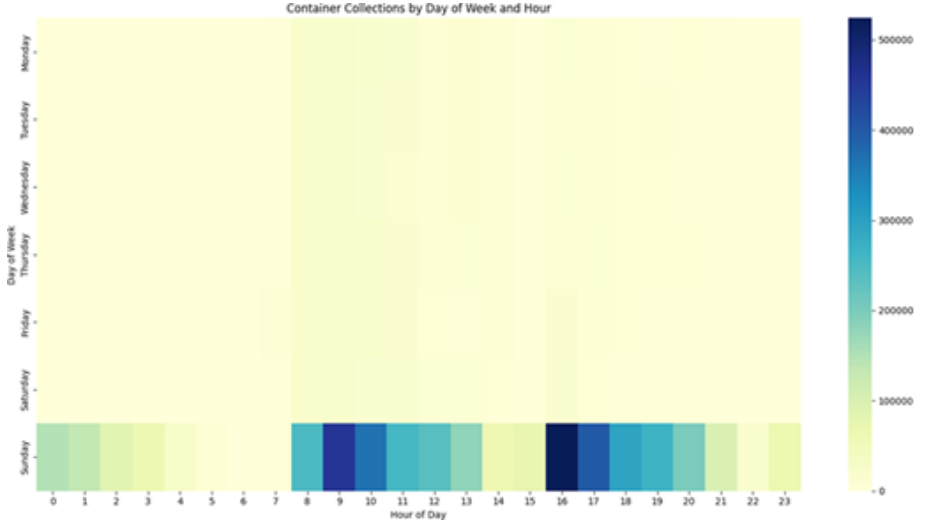
Şekil 4 Günüün saatlerine göre konteyner toplama sayıları



Şekil 5 Aylara göre konteyner toplama sayıları



Şekil 6 Gün ve saate göre konteyner toplama ısı haritası

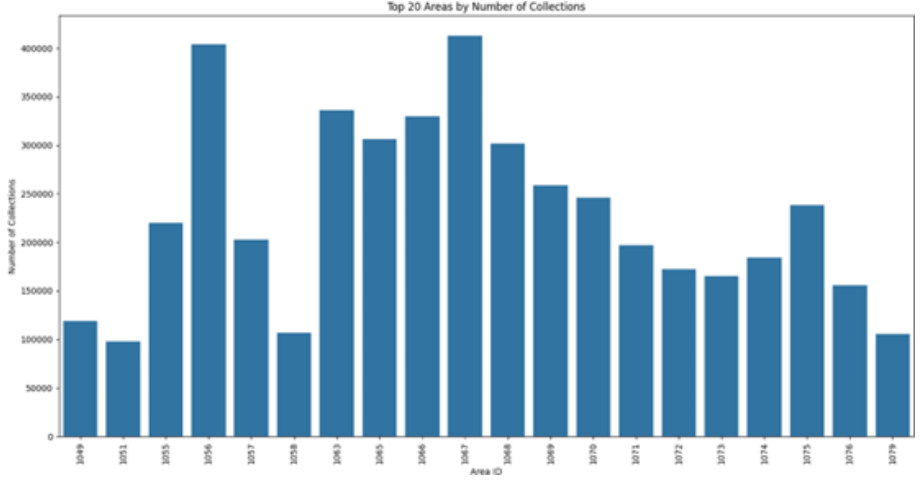


Belirli zaman dilimlerindeki operasyonel yoğunluğu gösterir. Bu zamansal analizler, toplama operasyonlarının belirli periyotlarda yoğunlaştığını ve bu periyotların dışındaki toplama olaylarının veya bu periyotlardaki aşırı düşük/yüksek aktivitelerin potansiyel anomali olarak daha detaylı incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

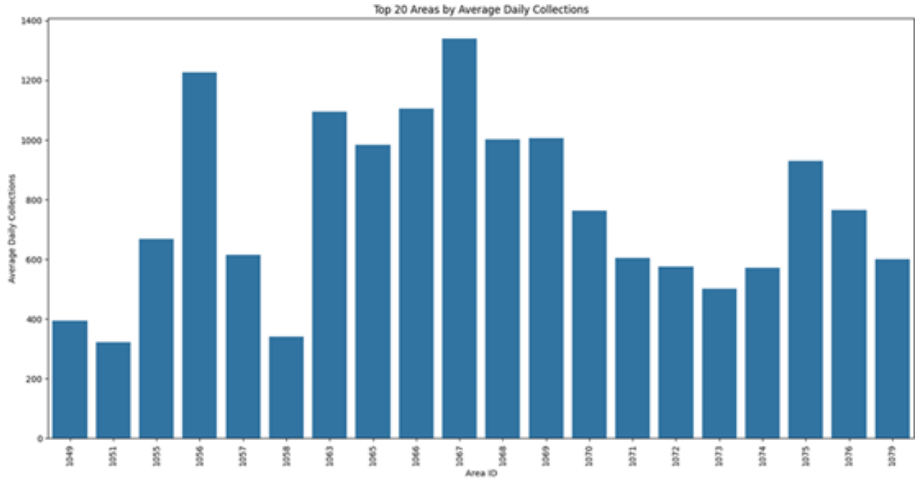
Bölge Bazlı Toplama Analizleri ve Özellikleri

Bölgelere göre toplama sıklığı, nüfus ve bina yoğunluğu analizleri yapılmıştır: En çok toplama yapılan ve günlük ortalama toplama sayısı en yüksek olan ilk 20 bölge Şekil 7 ve Şekil 8'de (Günlük ortalama toplama sayısına göre en üst bölgeler gösterilmektedir. Bu grafikler, bazı bölgelerin diğerlerinden önemli ölçüde daha fazla toplama aldığını ve bölgeler arasındaki toplama yoğunluğu farklarını ortaya koymaktadır.

Şekil 7 Toplama sayısına göre ilk 20 bölge



Şekil 8 Günlük ortalama toplama sayısına göre ilk 20 bölge



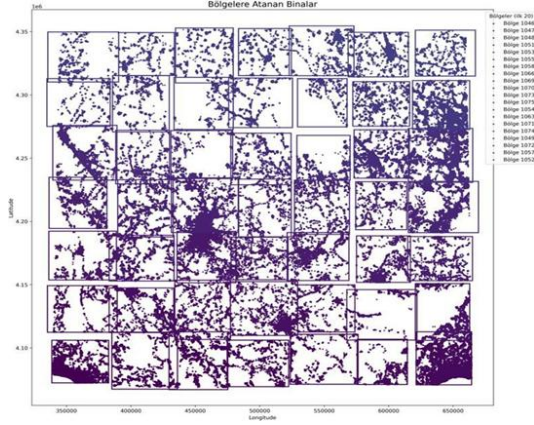
Bölgelere Göre Nüfus Yoğunluğu Haritası: Şekil 9'daki harita, farklı aktif bölgelerin renk kodlarıyla nüfus yoğunluğunu (bina sayısı/km² olarak tahmin edilmiştir) göstermektedir. Koyu renkler daha yüksek yoğunluğu, açık renkler daha düşük yoğunluğu temsil eder. Bu, atık üretim potansiyelinin mekansal dağılımı hakkında fikir verir. Bu bulgu nüfus yoğunluğu ve bina dağılımının mekansal farklılıklarını ortaya koyan analizleri desteklemektedir.

Şekil 9 Bölgelere göre nüfus yoğunluğu haritası



Bölgelere Atanan Binalar Haritası: Şekil 10'daki harita, aktif bölgelerin sınırlarını ve bu bölgelere atanmış binaların (noktalarla temsil edilen) dağılımını göstermektedir. Her bölge farklı bir renkle belirtilmiştir. Binaların bazı bölgelerde kümелendiği, bazılarında ise daha seyrek olduğu görülmektedir. Bu bölgesel analizler, atık üretim potansiyelinin bölgelere göre değiştiğini ve toplama stratejilerinin buna göre ayarlanması gerektiğini desteklemektedir.

Şekil 10 Bölgelere atanan binalar haritası



Konteyner Bazlı Toplama Analizleri

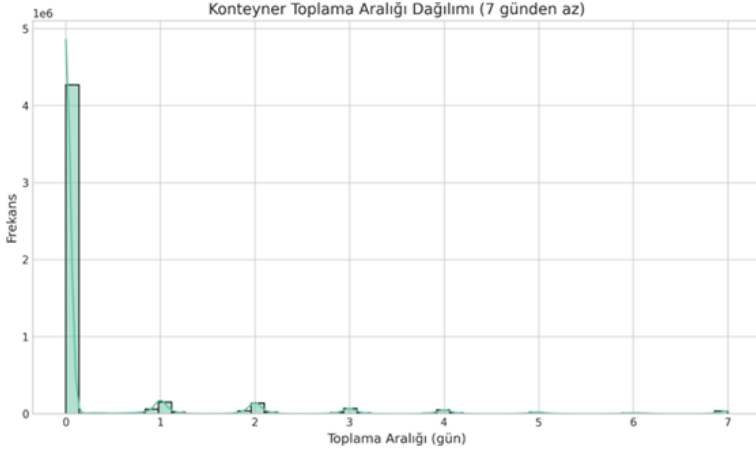
Bireysel konteynerlerin toplama sıklıkları ve aralıkları incelendiğinde önemli farklılıklar ve anomaliler gözlemlenmiştir:

Konteyner Toplama Aralığı Analizi: İki ardışık toplama arasında geçen süre olarak tanımlanan konteyner toplama aralığı incelendiğinde, aralıkların çoğunlukla 0-1 gün arasında yoğunlaştığı, ancak bazı konteynerler için bu sürenin 7 güne kadar çıkabildiği görülmüştür. Şekil 11 Konteyner toplama aralığı dağılımı, Şekil 12'te ise normal, geç ve çok sık toplama aralığı anomalileri görselleştirilmiştir.

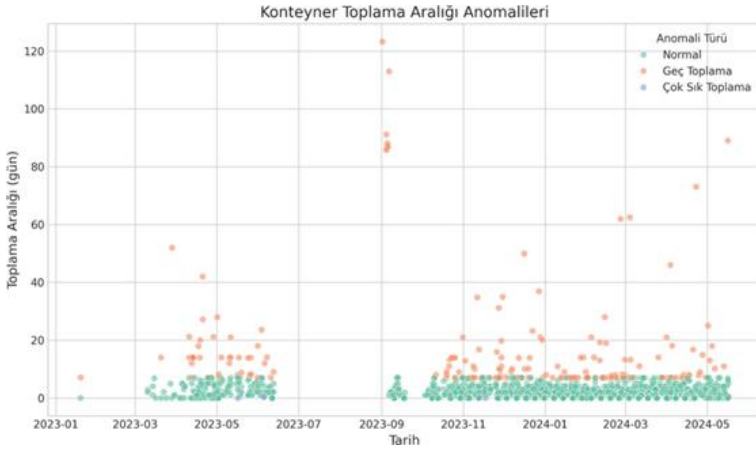
Anomali Türleri (Toplama Aralığı Bazında): Toplama aralığı bazında yapılan sınıflandırmada, gözlemlerin %97,2'si "normal" toplama, %2,1'i "geç toplama" ve %0,7'si "çok sık toplama" olarak sınıflandırılmıştır. Bu, günlük toplama sayısı anomalilerinden farklı

bir anomali türü analizidir ve konteyner bazlı toplama düzenliliğine odaklanır.

Şekil 11 Konteyner toplama aralığı dağılımı

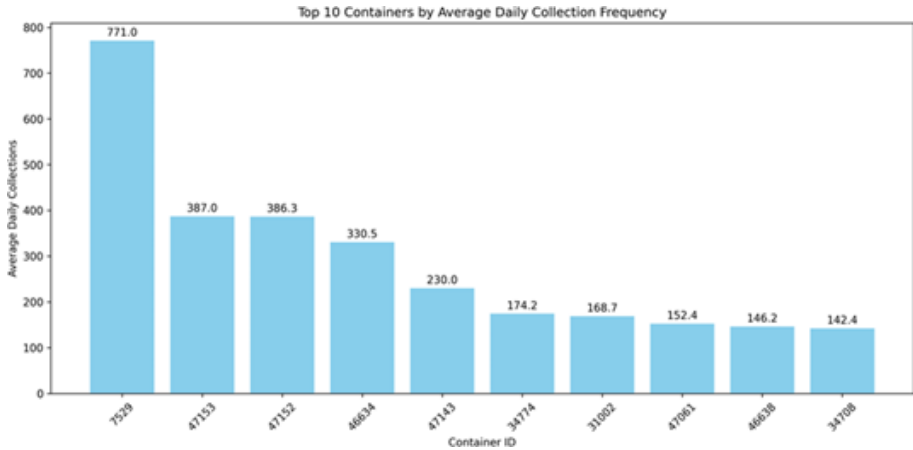


Şekil 12 Normal, geç ve çok sık toplama aralığı anormallikleri



En Yüksek Günlük Ortalama Toplama Frekansına Sahip Konteynerler: Bireysel konteynerlerin toplama sıklıkları incelendiğinde önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. En yüksek günlük ortalama toplama sıklığına sahip ilk 10 konteyner Şekil 13 'de görselleştirilmiştir. Şekle göre ilk üç sıralama: konteyner ID 7529: Günlük ortalama 771,0 toplama; konteyner ID 47153: Günlük ortalama 387,0 toplama ve konteyner ID 47152: Günlük ortalama 386,3 toplama şeklinde gerçekleşmiştir. Bu durum, bazı konteynerlerin aşırı kullanıldığını, bu özel konteynerler için veri doğrulaması veya özel bir durum analizi gerektiğini ya da toplama verilerinde tutarsızlıklar olabileceğini düşündürmektedir.

Şekil 13 Günlük ortalama toplama frekansı en yüksek ilk 10 konteynerin görselleştirilmesi



Sanal Konteyner Doluluk Analizi

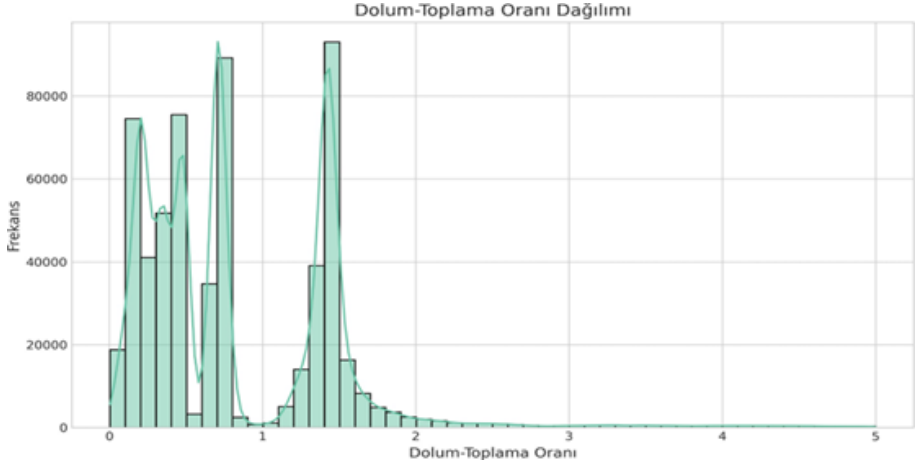
Teorik Konteyner Doluluk Oranı İstatistikleri: Sanal doluluk modeline göre yapılan hesaplamalarda elde edilen istatistiklerde

konteynerlerin ortalama teorik doluluk oranının %16,56 olduğu, medyan değerin ise %0,00 olduğu bulunmuştur. Medyanın sıfır olması, konteynerlerin yarısından fazlasının teorik olarak bir sonraki toplamaya kadar hiç dolmadığını veya çok düşük seviyelerde kaldığını göstermektedir.

Konteyner Dolum Süresi İstatistikleri: Aktif bölgelerdeki ve günlük tahmini atık miktarı sıfırdan büyük olan konteynerler için hesaplanan sanal dolum sürelerine göre minimum dolum süresinin 0,00 gün, maksimum dolum süresinin 45,83 gün, ortalama dolum süresinin 3,29 gün, medyan dolum süresin ise 0,83 gün olduğu hesaplanmıştır. Medyan dolum süresinin ortalamadan düşük olması, dağılımın sağa çarpık olduğunu ve bazı konteynerlerin dolum sürelerinin çok uzun olabildiğini göstermektedir. Çoğu konteynerin 0-5 gün arasında dolduğu, ancak bazılarının dolum süresinin 10, 20, 30 ve hatta 45 güne kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir Şekil 14'e göre konteyner kapasitelerinin bazı bölgeler için fazla büyük olduğunu veya bu konteynerlere atanan bina sayısının/nüfusun çok düşük olduğunu düşündürmektedir.

Konteyner Toplama Sıklığı İstatistikleri (Gerçek Verilerden): Gerçek toplama verilerinden elde edilen ortalama toplama sıklığı (iki toplama arasındaki ortalama gün sayısı) istatistikleri şöyledir: minimum toplama sıklığı: 0,01 gün, maksimum toplama sıklığı: 1,00 gün, ortalama toplama sıklığı: 0,71 gün, medyan toplama sıklığı: 1,00 gündür.

Şekil 14 Doluluk ve toplama oranı dağılımı



Doluluk ve Toplama İlişkisi (Erken/Geç Toplama)

Teorik dolum süreleri ile gerçek ortalama toplama sıklıkları karşılaştırılarak elde edilen Dolum/Toplama Oranı analizi sonucunda: 3165 konteynerin (%26,1) dolum süresinin %50'sinden önce, yani teorik olarak dolmadan çok önce toplandığı tespit edilmiştir (Oran > 2 varsayımıyla "erken toplama"). 1490 konteynerin (%12,3) ise dolum süresinin %150'sinden sonra, yani teorik olarak dolduktan sonra önemli bir süre bekleyerek toplandığı tespit edilmiştir (Oran $< 2/3$ varsayımıyla "geç toplama"). Bu bulgular, konteynerlerin yaklaşık %38,4'ünün toplama zamanlaması açısından optimize edilmemiş olabileceğini göstermektedir. Geri kalan yaklaşık %61,6'lık kısım ise daha optimal aralıklarda toplanıyor olabilir.

Anomaliler ve Doluluk Verileri Arasındaki Genel İlişki

Konteyner toplanma verilerindeki günlük anomaliler ile sanal konteyner doluluk verileri (özellikle erken ve geç toplama eğilimleri) arasındaki ilişki incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

Erken Toplanan Konteynerler ve Anormal Toplama Günleri: Sürekli olarak erken toplandığı tahmin edilen 3165 konteynerin bulunduğu bölgelerde, günlük toplam toplama sayılarında gözlenen anomalilerin (özellikle normalden yüksek toplama günleri) bir kısmının bu verimsiz pratikten kaynaklanabileceği düşünülebilir.

Geç Toplanan Konteynerler ve Anormal Toplama Günleri: Sürekli olarak geç toplandığı tahmin edilen 1490 konteynerin varlığı, bu konteynerlerin bulunduğu bölgelerde hizmet kalitesinin düşük olabileceğine ve potansiyel olarak normalden düşük toplama günlerinde (negatif anomaliler) bir faktör olabileceğine işaret eder.

Yüksek Anomali Günleri ve Genel Doluluk Durumu: Aşırı yüksek toplama sayısı gibi ekstrem günlük anomalilerin, genel konteyner doluluk oranlarından ziyade, veri kayıt sistemlerindeki hatalar, toplu veri girişleri veya çok spesifik, geniş çaplı bir operasyonel durumla ilişkili olma olasılığı daha yüksektir.

Daha makul seviyelerdeki günlük pozitif anomalilerin olduğu günlerde, genel doluluk seviyelerinin ortalamasının üzerinde olup olmadığı veya belirli bölgelerde biriken atıkların temizlenmesi için ekstra seferler düzenlenip düzenlenmediği incelenebilir.

Bu analizler, anomali tespitinin sadece toplama sayılarındaki sapmaları değil, aynı zamanda bu sapmaların altında yatabilecek

operasyonel verimsizlikleri (erken/geç toplama gibi) de ortaya çıkarabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada, Büyükşehir atık toplama sistemindeki konteyner toplanma verilerinde Z-skor yöntemiyle anomaliler tespit edilmiş ve bu anomaliler, bina ve nüfus verilerine dayalı sanal konteyner doluluk tahminleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, literatürdeki önceki çalışmalar ve benzer sistemlerin operasyonel gerçekleriyle ilişkilendirilerek aşağıda tartışılmıştır. Bu bölüm, çalışmanın kısıtlılıklarını ve atık yönetimi sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik çıkarımları da içermektedir.

Anomali Tespiti, Veri Kalitesinin Önemi ve Operasyonel Yansımalar

Günlük toplam toplama sayılarında Z-skor yöntemiyle belirlenen 31 anormal gün, sistemin operasyonel tutarlılığında ve genel işleyişinde zaman zaman önemli sapmalar olduğunu göstermektedir. Özellikle 2023-06-11 tarihinde gözlemlenen 778.194 gibi aşırı yüksek bir toplama sayısı, büyük olasılıkla bir veri kayıt hatasına, sistemsel bir soruna veya genel bir veri kalitesi sorununa işaret etmektedir. Bu tür veri hatalarının ve kalitesi sorunlarının tespit edilip düzeltilmesi, gelecekteki analizlerin ve operasyonel kararların doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Anomali tespit algoritmalarının yanlış alarm veya önemli olayları gözden kaçırmaya neden olabileceğinden, anomali tespit süreçlerinin etkinliği büyük ölçüde girdi verilerinin kalitesine bağlıdır. Veri kalitesi, başarılı bir anomali tespiti ve tahminleme modelinin temel taşıdır. Adewuyi ve ark. (2024), atık verilerinin kullanılabilirliği, doğruluğu ve tamlığının tahminleme başarısını doğrudan

etkilediğini vurgulamaktadır. Yazarlar, sağlam veri yönetim çerçevelerinin ve veri temizleme (data cleaning) süreçlerinin; tutarsızlıkların ve hataların giderilmesi için zorunlu olduğunu belirtmektedir. Bu metodolojik gereklilik, Nesmachnow ve ark. (2025) tarafından incelenen güncel literatürdeki teknik bulgularla da desteklenmektedir. Örneğin Baldo ve ark.. (2021), sensör ölçümlerindeki hafif sapmaların ve dalgalanmaların sistem güvenilirliği için önemli bir kısıt olduğunu belirtirken; Namoun ve ark. (2022) güncel veri setlerinin kıtlığının temel bir zorluk olduğunu ifade etmiştir. Bu çalışmada uygulanan 'Eksik Değer Analizi' ve 'Aykırı Değer Tespiti' adımları, hem Adewuyi ve ark. (2024)'nin belirttiği veri temizleme standartlarıyla hem de Nesmachnow ve ark. (2025)'nin aktardığı teknik kısıtlarla tam bir uyum içindedir.

Bu çalışma, sensörsüz bir ortamda bile operasyonel verilerdeki bariz tutarsızlıkların Z-skor gibi basit istatistiksel yöntemlerle dahi yakalanabileceğini, ancak bu tür bulguların öncelikle veri doğrulama süreçlerini tetiklemesi gerektiğini göstermektedir.

Diğer pozitif ve negatif günlük anomaliler ise mevsimsel değişimler (örn. yaz aylarında artan nüfus veya tüketim), özel olaylar (festivaller, tatiller), planlanmamış operasyonel değişiklikler, operasyonel aksaklıklar (araç arızaları, personel eksikliği/sorunları), planlı bakım/temizlik çalışmaları, özel etkinlikler veya hava koşulları gibi gerçek dünya olaylarının bir yansıması olabilir. Bu tür anomalilerin kök nedenlerinin araştırılması, sistemin dayanıklılığını ve tepki verme kapasitesini artırmak için önemlidir.

Bölge bazlı ve konteyner bazlı toplama sıklığı analizleri, atık üretiminin ve toplama ihtiyacının mekansal olarak homojen olmadığını açıkça ortaya koymuştur. Bazı bölgelerin ve konteynerlerin diğerlerine göre çok daha yoğun bir şekilde kullanılması, bu alanlara yönelik özel bir kaynak planlaması ve toplama stratejisi geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Örneğin, Konteyner ID 7529'un günlük ortalama 771 toplama gibi aşırı yüksek bir değere sahip olması, ya bu konteynerin bulunduğu noktanın olağanüstü bir atık üretim merkezinde olduğunu (örn. büyük bir pazar yeri, sanayi tesisi yakını, büyük bir işletme, transfer noktası) ya da bu konteynere ait toplama kayıtlarında sistematik bir hata, konteyner tanımlamasında bir sorun veya veri kayıtlarında bir problem olduğunu düşündürmektedir. Bu bağlamda Tirkolae ve ark. (2019), hastaneler veya yoğun atık üreten merkezler gibi öncelikli hizmet gerektiren noktaların (demand nodes), standart toplama prosedürleri yerine, talep hacmine ve zaman kısıtlarına göre optimize edilmiş özel algoritmalarla yönetilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Toplama Sıklığı ve Zamansal Örüntülerin Değerlendirilmesi

Toplama sıklığının haftanın günlerine, günün saatlerine ve aylara göre gösterdiği değişimler, atık üretiminin ve toplama operasyonlarının dinamik doğasını yansıtmaktadır. Yeni analize göre Pazar günleri ve sabah 09:00-10:00 saatleri arasındaki yoğunluk, hafta sonu biriken atıkların toplanması ve/veya operasyonel planlamanın bu şekilde yapılmasıyla açıklanabilir. Aylara göre gözlenen dalgalanmalar Mart-Nisan zirve, Ağustos dip; ise mevsimsel nüfus hareketleri (örn. tatil dönemleri, öğrenci

hareketliliği) veya mevsimsel tüketim alışkanlıklarındaki değişimlerle ilişkili olabilir.

Zamansal örüntülerin anlaşılması, kaynakların (araç, personel) etkin planlanması için hayati önem taşır. Adewuyi ve ark. (2024), zaman serisi analizi yöntemlerinin, atık üretimindeki mevsimsel değişimleri ve uzun vadeli eğilimleri belirlemede etkili olduğunu ifade etmektedir. Bu analizler sayesinde, genel örüntülerin dışına çıkan aktiviteler potansiyel anomali olarak değerlendirilebilir ve stratejik planlama süreçlerinde 'reaktif' yaklaşımlar yerine 'proaktif' önlemler alınabilir (Adewuyi ve ark., 2024). Çalışmada tespit edilen 'Pazar günü yoğunluğu' gibi zamansal bulgular, bu tür analizlerin operasyonel planlamadaki önemini desteklemektedir.

Sanal Konteyner Doluluk Modeli: Yorumlar ve Kısıtlılıklar

Konteyner toplama aralıklarının çoğunlukla 0-1 gün arasında yoğunlaşması, genel olarak sık bir toplama rejiminin uygulandığını göstermektedir. Ancak, bazı konteynerlerin toplama aralığının 7 güne kadar uzaması, bu konteynerlerin ya çok düşük atık üretimi olan noktalarda bulunduğunu ya da operasyonel olarak ihmal edildiğini düşündürmektedir.

Gerçek zamanlı sensör verilerinin yokluğunda geliştirilen sanal konteyner doluluk modeli, bina özellikleri, tahmini nüfus ve standart atık üretim oranları gibi parametrelere dayanmaktadır. Teorik konteyner doluluk modelinden elde edilen ortalama %16,56'lık doluluk oranı ve %0,00'lık medyan doluluk, konteynerlerin büyük bir çoğunluğunun teorik olarak dolmadan toplandığına işaret etmektedir. Bu durum, "erken toplama" (%26,1)

ve "geç toplama" (%12,3) olarak sınıflandırılan konteynerlerin varlığıyla da desteklenmektedir. Literatürdeki saha çalışmaları, statik toplama planlarının sahadaki dinamik ihtiyaçları karşılamada yetersiz kaldığını somut verilerle ortaya koymaktadır. Ramos vd. (2013), atık yağ toplama operasyonlarında sabit rotaların talep dalgalanmalarını karşılayamadığını belirterek, çoklu depolu araç rotalama yaklaşımıyla filo kiralama maliyetlerinde %11 ve kat edilen mesafede %13'lük bir düşüş sağlanabileceğini kanıtlamışlardır. Benzer şekilde Ghiani ve ark. (2012), optimize edilmemiş toplama noktası yerleşimlerinin kaynak israfına yol açtığını göstermiştir. Bu çalışmada Büyükşehir verileriyle tespit edilen %26,1 oranındaki "erken toplama" (gereksiz maliyet) ve %12,3 oranındaki "geç toplama" (hizmet aksaması) bulguları, literatürde belirtilen bu operasyonel verimsizliklerin yerel ölçekteki somut kanıtları niteliğindedir. Bu model, sistem genelindeki doluluk eğilimleri ve potansiyel verimsizlikler hakkında önemli ön bilgiler sağlamıştır.

Ancak, bu sanal doluluk modelinin ve varsayımlarının bazı önemli kısıtlılıkları bulunmaktadır:

Kişi başı atık miktarı Büyükşehir için 1,2 kg/gün varsayımına göre kullanılmıştır.

Ortalama hanehalkı büyüklüğü için kullanılan 3,17 kişi (TÜİK, 2023) ulusal bir ortalama ve bölgesel farklılıklar gösterebilir.

Diğer varsayımlar ise ortalama daire büyüklüğü (100 m²), konut kullanım oranı (%80) ve atık yoğunluğu (150 kg/m³) gibi genellemeler içermektedir. Büyükşehirin tüm bölgeleri, bina tipleri

ve sosyo-ekonomik düzeyleri için tam olarak geçerli olmayabilir. Atık üretimi, yaşam tarzı, mevsim ve ticari aktivite gibi birçok faktöre bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilir.

Bina-Konteyner Ataması: Binaların en yakın konteynere atandığı varsayımı, pratikte her zaman doğru olmayabilir. Vatandaşların atık bırakma alışkanlıkları (örn. işe giderken yol üzerindeki bir konteyneri kullanma) bu durumu etkileyebilir.

Dinamik ve Dış Faktörlerin Eksikliği: Model, günlük olaylar, turizm, özel etkinlikler, tatiller veya hava durumu gibi atık üretimini ve toplama operasyonlarını anlık olarak etkileyebilecek dinamik ve dış faktörleri tam olarak hesaba katmamaktadır.

Veri Kalitesi: Tespit edilen bazı ekstrem anomaliler, altta yatan veri kalitesi sorunlarına işaret etmekte olup, bu durum model girdilerinin doğruluğunu da etkileyebilir.

Bu kısıtlılıklara rağmen, sanal doluluk modeli, özellikle sensör yatırımının yüksek maliyetli olduğu durumlar için, sistemdeki genel eğilimleri ve potansiyel sorun alanlarını belirlemede değerli bir ilk adım aracı olarak kabul edilebilir. Modelin doğruluğu ve yerel düzeydeki güvenilirliği, Büyükşehir özgü, daha detaylı, güncel ve yerel parametrelerle (örn. mahalle bazlı atık üretim katsayıları, bina kullanım türüne göre farklılaştırılmış parametreler) zenginleştirilerek artırılabilir.

Anomaliler, Doluluk Verileri ve Operasyonel Çıkarımlar Arasındaki İlişki

Toplama verilerindeki günlük anomaliler ile sanal doluluk verileri arasındaki ilişki, operasyonel planlama ve verimlilik

açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır. Günlük toplama sayısı anomalileri ile toplama aralığı bazlı "geç toplama" veya "çok sık toplama" anomalileri farklı operasyonel sorunlara işaret edebilir.

Erken toplandığı tahmin edilen konteynerlerin yoğun olduğu bölgelerde, kaynakların (araç, personel, yakıt) verimsiz kullanıldığı ve bu durumun bazı günlerdeki anormal (gereksiz yere yüksek) toplama sayılarına yansıyabileceği düşünülebilir. Bir konteynerin sürekli "çok sık" toplanması, o konteynerin gereksiz yere sık ziyaret edildiğini ve kaynak israfına neden olduğunu gösterir. Tersine, geç toplandığı tahmin edilen veya sürekli "geç toplanan" konteynerler, hizmet kalitesinde sorunlara (konteyner taşması, çevre kirliliği, potansiyel halk sağlığı riskleri) ve potansiyel olarak bazı günlerdeki anormal (beklenenden düşük) toplama sayılarına (eğer bazı bölgeler ihmal ediliyorsa) işaret edebilir.

Ancak, 2023-06-11 gibi ekstrem günlük anomalilerin doluluk durumuyla doğrudan ilişkili olmaması, bu tür olayların altında yatan temel nedenlerin veri kalitesi veya sistemsiz kayıt hataları olabileceğini kuvvetle düşündürmektedir. Bu, anomali tespitinin sadece operasyonel sapmaları değil, aynı zamanda veri toplama ve yönetim süreçlerindeki zafiyetleri de ortaya çıkarabileceğini göstermesi açısından önemlidir. En yüksek günlük toplama frekansına sahip konteynerlerin (örn. ID 7529) durumu da bu bağlamda özel bir inceleme gerektirmektedir.

Çalışmanın Genel Kısıtlılıkları

Yukarıda detaylandırılanlara ek olarak, bu çalışmanın genel kısıtlılıkları şu şekilde özetlenebilir:

Sanal Doluluk Modelinin Varsayımları ve Parametreleri: Model, genelleştirilmiş ve ulusal ortalamalara dayanan parametreler kullanmakta olup, yerel ve dinamik farklılıkları tam olarak yansıtmayabilir.

Veri Kalitesi Sorunları: Tespit edilen bazı ekstrem anomaliler, altta yatan veri kalitesi sorunlarına işaret etmektedir ve bu durum analizlerin güvenilirliğini etkileyebilir.

Dış Faktörlerin Sınırlı Entegrasyonu: Model, atık üretimini ve toplama operasyonlarını etkileyebilecek anlık dış faktörleri (özel etkinlikler, tatiller, hava durumu vb.) tam olarak hesaba katmamaktadır.

Anomali Tespit Yönteminin Kapsamı: Temel olarak Z-skor yöntemine odaklanılmış olup, daha karmaşık ve çok değişkenli anomali tespit yöntemleri bu çalışmanın kapsamında derinlemesine incelenmemiştir.

Bu kısıtlılıklara rağmen çalışma, büyük ölçekli operasyonel veriler kullanılarak atık toplama sistemlerindeki anlamlı örüntülerin, potansiyel verimsizliklerin ve iyileştirme alanlarının belirlenebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada, bir Büyükşehirin atık toplama sistemindeki konteyner toplanma verilerinde Z-skor yöntemiyle anomaliler tespit edilmiş, bu anomaliler bina ve nüfus verilerine dayalı sanal konteyner doluluk tahminleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve Büyükşehirdeki atık toplama sistemine ait veriler kullanılarak kapsamlı bir anomali tespiti ve sanal doluluk analizi gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar ve Öneriler

İncelenen yaklaşık 2 yıllık periyotta, günlük toplam konteyner toplama sayılarında Z-skor yöntemiyle istatistiksel olarak anlamlı 31 anormal gün tespit edilmiştir. Bu anormalliklerin büyük çoğunluğu (%96,8'i, yani 30 gün) beklenenden yüksek toplama sayıları şeklindedir. Bu durum, sistemde zaman zaman aşırı operasyonel yüklenmelerin veya veri kayıt sorunlarının olabileceğine işaret etmektedir. Özellikle 2023-06-11 tarihindeki aşırı yüksek değer gibi bazı anomalilerin veri kalitesi sorunlarına işaret ettiği, diğerlerinin ise operasyonel veya dışsal faktörlerden kaynaklanıyor olabileceği değerlendirilmiştir.

Toplama sıklığı ve atık toplama yoğunluğunun bölgeler, bireysel konteynerler, haftanın günleri, günün saatleri ve aylara (Mart-Nisan zirve, Ağustos dip) göre önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Bu örüntüler, kaynak planlaması için dikkate alınmalıdır.

Konteyner toplama aralıkları çoğunlukla 0-1 gün arasında yoğunlaşmakla birlikte, bazı konteynerlerin 7 güne varan aralıklarla toplanması, hizmette potansiyel aksamalara veya gereksiz beklemelere işaret etmektedir.

Sanal doluluk modeli, konteynerlerin ortalama teorik doluluk oranının %16,56 (medyan %0,00) olduğunu ve konteynerlerin ortalama 3,29 günde dolduğunu (medyan 0,83 gün) tahmin etmiştir. Bu, konteynerlerin önemli bir bölümünün teorik olarak dolmadan toplandığını düşündürmektedir. Nitekim, gerçek toplama sıklıkları ile karşılaştırıldığında, konteynerlerin %26,1'i “erken”, %12,3'ü ise

“geç” toplandığı belirlenmiştir. Bu durum, sistemde önemli bir optimizasyon potansiyeli olduğunu göstermektedir.

En yüksek günlük toplama frekansına sahip konteynerler (örn. ID 7529, günlük ortalama 771 toplama) özel bir inceleme gerektirmekte olup, bu durum veri doğruluğu veya olağandışı bir operasyonel ihtiyacı gösterebilir.

Ekstrem günlük toplama anomalilerinin genellikle doğrudan doluluk durumuyla ilişkili olmadığı, daha çok veri sorunlarından kaynaklanabileceği; ancak genel operasyonel verimsizliklerin (erken/geç toplama) bazı bölgelerdeki anormal toplama örüntülerine dolaylı olarak katkıda bulunabileceği düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, atık toplama sisteminin verimliliğini artırmak, operasyonel maliyetleri düşürmek ve hizmet kalitesini iyileştirmek amacıyla aşağıdaki stratejik öneriler sunulmaktadır:

2023-06-11 gibi ekstrem anomaliye neden olan veri kayıtları acilen ve detaylı bir şekilde incelenmeli, altında yatan nedenler (veri giriş hatası, sistem arızası vb.) tespit edilerek düzeltilmelidir.

Düzenli veri doğrulama ve temizleme süreçleri işletilmeli, veri giriş ve kayıt süreçlerinde düzenli kontroller yapılmalı, veri doğrulama mekanizmaları güçlendirilmeli ve personel eğitimleri verilmelidir. Z-skor gibi yöntemlerle anomali tespiti rutin bir operasyonel izleme faaliyeti haline getirilmelidir.

Tüm veri kaynaklarında (konteyner ID, bölge ID, zaman damgaları vb.) tutarlı ve standart bir formatın kullanılması sağlanmalıdır.

Sanal doluluk analizine göre "erken" toplandığı belirlenen konteynerlerin (3.165 adet) toplama sıklığı, saha doğrulamaları ve gerekirse pilot saha gözlemleriyle desteklenerek kademeli olarak azaltılmalıdır.

"Geç" toplandığı belirlenen konteynerlerin (1.490 adet) toplama sıklığı artırılmalı veya bu bölgelere ek/daha büyük kapasiteli konteynerlerin yerleştirilmesi ya da kapasiteleri gözden geçirilmelidir.

Toplama operasyonları, tespit edilen zamansal yoğunluklara (gün, saat, ay) ve yüksek atık üretimi olan bölgelere göre daha dinamik bir şekilde planlanmalı; kaynaklar (araç, personel) bu yoğunluklara göre tahsis edilmelidir. Yüksek atık üretimi olan ve sık toplama gerektiren bölgeler için özel toplama programları ve daha sık seferler planlanmalıdır.

Toplama operasyonlarının, trafik yoğunluğunun daha az olduğu ve vatandaşların daha az rahatsız olacağı zaman dilimlerine (mevcut yoğun saatler de dikkate alınarak) kaydırılması için fizibilite çalışması yapılması değerlendirilmelidir.

Mevcut toplama rotalarının, doluluk verileri ve anomali analizleri ışığında modern rota optimizasyon yazılımları kullanılarak yeniden değerlendirilmesi önerilir.

Modelde kullanılan kişi başi atık üretimi, hanehalkı büyüklüğu gibi parametreler, Büyükşehir özgü ve daha granüler (mahalle, bina tipi bazında) verilerle kalibre edilmelidir. Özellikle kişi başi atık üretim miktarının literatürdeki farklı değerler dikkate alınarak Çalışma yapılan şehir için daha hassas bir şekilde

belirlenmesi veya modelin bu farklılıklara duyarlılığının analiz edilmesi gerekmektedir.

Mevsimsel etkiler, tatil günleri, özel günler gibi dinamik faktörler modele entegre edilmelidir.

Z-skor gibi basit yöntemlerle başlayan, ancak zamanla daha karmaşık ve gelişmiş istatistiksel (STL, ARIMA) ve makine öğrenmesi/derin öğrenme tabanlı (Isolation Forest, LSTM Autoencoder) anomali tespit modellerinin (örn. rota sapmaları, anormal duraklama süreleri için) araştırılarak geliştirilmesi ve gerçek zamanlı bir izleme sistemine entegre edilmesi değerlendirilmelidir.

Tespit edilen önemli anomaliler için ilgili operasyon birimlerine otomatik uyarılar gönderen bir sistemin kurulması faydalı olacaktır.

Tespit edilen her anomali için (özellikle tekrarlayanlar) bir kök neden analizi süreci işletilerek kalıcı çözümler üretilmelidir.

Bu önerilerin hayata geçirilmesi, Büyükşehirin atık yönetimi sisteminin verimliliğini artırarak kaynakların daha etkin kullanılmasını, maliyetlerin düşürülmesini, sunulan hizmet kalitesinin iyileştirilmesini ve sistemi daha ekonomik ve daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşturmasını sağlayacaktır.

İleride yapılacak çalışmalarda yüksek maliyetli olsa da, kritik bölgelerde, yüksek atık üretimi olan noktalarda veya pilot alanlarda IoT tabanlı doluluk sensörlerinin kullanımı, sanal modelin doğrulanması, gerçek zamanlı optimizasyon ve hibrit bir yaklaşımın değerlendirilmesi için düşünülmelidir.

Kaynakça

Adewuyi, A. Y., Adebayo, K. B., Adebayo, D., Kalinzi, J. M., Ugiagbe, U. O., Ogunraku, O. O., Samson, O. A., Oladele, O. R., Tahiru, A. & Adeniyi, S. A. (2024). Application of big data analytics to forecast future waste trends and inform sustainable planning. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(01), 2469–2479. Doi: 10.30574/wjarr.2024.23.1.2229

Ahmad, S., Imran, Jamil, F., Iqbal, N. & Kim, D. (2020). Optimal route recommendation for waste carrier vehicles for efficient waste collection: A step forward towards sustainable cities. *IEEE Access*, 8, 77875-77887. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988173

Dias, G. M., Bellalta, B. & Oechsner, S. (2016). A survey about prediction-based data reduction in wireless sensor networks. *ACM Computing Surveys*, 49 (3), Article 58. Doi: 10.1145/2996356

European Environment Agency. (2025). Waste management country profile with a focus on municipal and packaging waste: Türkiye. European Environment Agency.

Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E. & Triki, C. (2012). Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. *Waste Management*, 32, 1291-1296. Doi: 10.1016/j.wasman.2012.02.009

Hannan, M.A., Akhtar, M., Begum, R.A., Basri, H., Hussain, A. & Scavino, E. (2017). Capacitated vehicle-routing problem model

for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste Management*, Baskıda (In Press). Doi: 10.1016/j.wasman.2017.10.019

Hidalgo-Crespo, J., Rivas-García, P., García-Balandrán, E. E., Albalade-Ramírez, A., Quintero-Herrera, S., Velastegui-Montoya, A., Rivas, J.L.A. & Soto, M. (2024). Validating Circular End-of-Life Strategies for Domestic Post-Consumer Materials in the Latin American Region: A Life Cycle Assessment Approach. *Environments*, 228 (11), 1-30. Doi: 10.3390/environments11110228

Liso, A., Cardellicchio, A., Patruno, C., Nitti, M., Ardino, P., Stella, E. & Renò, V. (2024). A review of deep learning-based anomaly detection strategies in Industry 4.0 focused on application fields, sensing equipment, and algorithms. *IEEE Access*, 12, 93911-93923. Doi: 10.1109/ACCESS.2024.3424488

Nesmachnow, S., Rossit, D. & Moreno-Bernal, P. (2025). A literature review of recent advances on innovative computational tools for waste management in smart cities. *Urban Science*, 9 (16). Doi: 10.3390/urbansci9010016

Oguz-Ekim, P. (2021). Machine learning approaches for municipal solid waste generation forecasting. *Environmental Engineering Science*, 38(6), 489-499. doi:10.1089/ees.2020.0232

Ramos, T. R. P., Gomes, M. I. & Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems. *Waste Management*, 33, 1691-1703. doi:10.1016/j.wasman.2013.04.005

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). Akıllı atık toplama uygulaması rehberlik kılavuzu. Ankara: Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü.

Teixeira, J., Antunes, A. P. & Sousa, J. P. de. (2004). Recyclable waste collection planning—a case study. *European Journal of Operational Research*, 158, 543-554. Doi: 10.1016/S0377-2217(03)00379-5

Tirkolaee, E. B., Abbasian, P., Soltani, M. & Ghaffarian, S. A. (2019). Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study. *Waste Management & Research*, 37 (1 Supplement), 4-13. Doi: 10.1177/0734242X18807001

Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). İstatistiklerle aile, 2022 (Haber Bülteni, Sayı: 49683). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Istatistiklerle-Aile-2022-49683>

Wati, H. R., Budihardjo, M. A. & Andarani, P. (2025). Waste transportation environmental impact using life cycle assessment: Bibliometric analysis and systematic review. *Pol. J. Environ. Stud.*, 34 (1), 563-571. Doi: 10.15244/pjoes/186580

Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero Rogero, A., Velis, C., ... Simonett, O. (2015). Global waste management outlook. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP) & International Solid Waste Association (ISWA).

Wilson, D. C., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Rogero, C.A., Velis, C., Iyer, M. and Simonett, O., 2015, Global waste management outlook, UNEP, Nairobi, Kenya.

BÖLÜM 3

KURUMSAL DÖNÜŞÜM UYGULAMALARINDA ZORLANILAN ALANLAR

TUĞRUL BAYRAKTAR¹

Giriş

Kurumsal ve dijital dönüşüm, son yıllarda yönetim literatüründe en sık karşılaştığımız kavramlardan biri hâline geldi. Neredeyse her sektörde, farklı ölçeklerdeki örgütler; artan rekabet baskısı, yeni regülasyonlar, teknolojik yeniliklerin hızı ve müşteri beklentilerindeki değişim gibi etkenlerle iş modellerini, süreçlerini ve örgüt yapılarını yeniden düşünmek zorunda kalmaktadırlar (Hanelt, Bohnsack, Marz, & Antunes Marante, 2021) (Feliciano-Cestero, Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023) (Brunetti, ve diğerleri, 2020). “Dönüşüm” ifadesi artık birçok strateji belgesinde yer alır hale geldi. Buna karşın, dönüşüm projelerinin sahadaki izleri takip edildiğinde belirsiz, parçalı ve çoğu zaman çelişkili tablolarla karşılaşılabilir.

Son yıllardaki akademik çalışmalarda öne sürülen önermeler ve bu önermeleri destekleyen vaka analizlerinden hareketle kurumsal ve dijital dönüşüm uygulamalarının önemli bir bölümünün

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-5620-5804

hedeflenen çıktılara tam anlamıyla ulaşamadığı ortaya çıkmaktadır (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019). Bazı çalışmalar büyük dönüşüm projelerinin üçte ikisinin bütçe ve zaman hedeflerini şaşırdığını, önemli bir kısmının ise beklenen performans artışını yakalayamadığını göstermektedir (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021). Bu başarısızlıkların çoğunun altında teknolojik altyapı eksikliği dışında birçok sebep yer alabilmektedir. Stratejinin net belirlenmemesi, proje liderliğinin inişli çıkışlı seyri, örgüt kültürüyle yaşanan çatışmalar, çalışanların dönüşüm sürecine mesafeli duruşu ve değişim yönetiminin kâğıt üzerinde kalması gibi faktörler ile hemen her uygulamada tekrar tekrar karşılaşılabilmektedir (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024).

Dijital dönüşüm araştırmaları, bu resme daha da kritik bir boyut eklemektedir. Dijital dönüşümü yeni bir yazılım satın almak ya da birkaç manuel adımı otomatik hâle getirmek şeklinde algılayan yaklaşımların hem teorik hem de pratik açıdan yetersiz olduğu artık yaygın biçimde kabul edilen bir gerçek halini almıştır (Chuunga & Mpundu, 2025). Dijital dönüşüm; iş modeli, değer önerisi, karar alma mekanizmaları ve insan kaynakları düzenlemeleriyle birlikte ele alındığında anlam ifade eden bir kurumsal dönüşüm sürecine evrilebilmektedir. Bu bakış açısı, odağı doğal olarak insan faktörüne ve örgüt kültürüne kaydırmaktadır. Uygulamaya alınan projeye dair çalışanların ve özellikle de orta kademe yöneticilerin, hedeflenen dönüşümün nedenlerine, kapsamına ve elde edilebilecek sonuçlarına dair inançları; basma kalıp dönüşüm planlarından daha belirleyici bir rol oynayabilmektedir (Bagrationi & Thurner, 2023) (Cieslak & Valor, 2025).

Literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmı “başarı faktörleri” listesini uzatmayı tercih etmektedir. Liderlik nasıl olmalı, hangi iletişim araçları kullanılmalı, hangi adımlar izlenmeli gibi sorulara verilen yanıtlar, kimi zaman kontrol listesi mantığında

sunuluyor. Bununla birlikte, dönüşüm projelerinde “en çok nerede zorlanıldığı” daha az gündeme alınan bir mesele olarak karşımıza çıkmaktadır. İddialı dönüşüm stratejilerinin sahadaki gündelik iş akışlarıyla çelişmesi, yıllar içinde oluşmuş veri yapılarıyla yeni kurumsal mimari arasındaki çatışmalar, sorumluluklardaki belirsizliklerin ve görünmez güç ilişkilerinin teknik tasarımları gölgelemesi gibi zorlayıcı unsurlar hali hazırda yeterince incelenmemektedir (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024).

Bu bölümde, kurumsal dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan zorlukların değerlendirilmesine dair eksik görülen yönler mercek altına alınmaktadır. Bunu yaparken kurumsal/dijital dönüşüm, değişim yönetimi, örgüt kültürü, çalışan direnci ve operasyonel dijitalleşme alanlarında son yıllarda yayımlanmış akademik çalışmalar ve bir kurumsal dönüşüm projesinin hayata geçirildiği örnek vakada elde edilen saha tecrübelerinden faydalanılmaktadır. Ayrıntılı bir vaka analizi sunmaktan ziyade, edinilen tecrübeyi literatürdeki olgularla karşılaştırarak nerede örtüştüklerine, nerede ayrıştıklarına ve hangi alanlarda literatür diliyle pratikte yaşananların arasında boşluklar olduğu analiz edilmektedir.

Bu amaçla, dönüşüm projelerinde en çok zorlanılan alanları beş başlık altında topluyoruz: (1) strateji ve dönüşüm vizyonunun operasyona indirgenmesi, (2) veri modeli, süreç mimarisi ve entegrasyon, (3) liderlik, kültür ve direnç, (4) değişim yönetimi ve örgütsel öğrenme ve (5) operasyonel dijitalleşme ve günlük iş pratikleri. Bu başlıklar, hem literatürde sıkça karşımıza çıkan temalar hem de sahadaki tecrübelerin tekrar tekrar işaret ettiği problem unsurları oldukları için seçilmiştir.

Bölümün alt başlıklarında, öncelikle kuramsal çerçeve ana hatlarıyla ortaya konmakta, ardından çalışmanın bağlamı ve yaklaşımı kısaca açıklanmaktadır. Ardından, ele alınan her bir zorlanma alanı literatür ve saha tecrübeleri ışığında tartışılmaktadır. Son bölümde ise, bu tartışmadan elde edilen çıkarımlar toparlanarak

hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için bazı öneriler sunulmaktadır.

Kuramsal Çerçeve

Kurumsal Dönüşüm ve Dijital Dönüşümün Boyutları

Kurumsal dönüşüm ve dijital dönüşüm kavramları, ilk bakışta birbirinin yerine kullanılıyormuş gibi görünse de bu iki kavram literatürde farklı şekillerde ele alınmaktadırlar. Kurumsal dönüşüm, en genel ifadesiyle, bir örgütün stratejisi, yapısı, süreçleri ve insan kaynakları boyutlarında köklü değişiklikler içeren, çoğu zaman birden fazla yıla yayılmış dönüşüm programlarına işaret etmektedir (Hanelt, Bohnsack, Marz, & Antunes Marante, 2021) (Christou & Piller, 2024). Bu tür programlar genellikle mevcut iş yapma biçiminin zaman içinde sürdürülemez hâle geldiği ya da yeni fırsatların mevcut örgütsel davranışlarla yakalanmasının mümkün olmadığı durumlarda gündeme gelmektedir. Dijital dönüşüm ise, bu kurumsal dönüşüm ihtiyacını bilgi ve iletişim teknolojileri, veri analitiği, otomasyon ve yapay zekânın sunduğu imkânlarla ilişkilendirerek ele almaktadır (Feliciano-Cestero, Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023) (Chunga & Mpundu, 2025).

Son yıllarda yapılan sistematik çalışmalar, dijital dönüşümün sadece yeni bir yazılım seçimi ya da birkaç manuel adımın otomatikleştirilmesiyle sınırlı olmadığını göstermektedir (Dutta, Kumar, Sindhvani, & Singh, 2022). İş modellerinin dijital araçlar etrafında yeniden şekillenmesi, ürün ve hizmetlerin veri odaklı hâle gelmesi, müşteriyle kurulan ilişkinin çok kanallı ve anlık bir yapıya bürünmesi gibi sağladığı faydalar ile dijital dönüşüm kurumsal kimlikle ve kültürle iç içe geçen çok boyutlu bir süreci temsil etmektedir (Brunetti, ve diğerleri, 2020).

İncelenen çalışmalar içerisinde Hanelt ve arkadaşları dönüşüm süreçlerini etkileyen faktörleri daha sistematik biçimde kategorize ederek stratejik hizalama, liderlik ve yönetim, örgüt

kültürü, değişim yönetimi ve teknik entegrasyon gibi boyutların ön plana çıktığı yönünde tespitte bulunmaktadır (Hanelt, Bohnsack, Marz, & Antunes Marante, 2021). Farklı derleme çalışmalarında benzer şekilde strateji ve teknoloji arasındaki uyum, üst yönetimin dönüşüm vizyonuna ne ölçüde sahip çıktığı, örgüt kültürünün belirsizliğe, yeniliklere ve hatalardan öğrenmeye ne derece açık olduğu, çalışanların karar süreçlerine ne kadar dâhil edildiğı ve süreç ile veri mimarisinin ne kadar bütüncül kurgulandığının dönüşüm süreçlerin başarılı olup olmayacağını belirleyen ölçütler olduğu vurgulanmaktadır (Brunetti, ve diğerleri, 2020) (Feliciano-Cestero, Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023) (Porfirio, Felício, & Carrilho, 2024).

Dijitalleşme projelerinde veri modeli ve süreç mimarisinin yapısı özellikle operasyonel düzlemde kritik rol üstlenmektedir. Yıllar içinde farklı ihtiyaçlara göre yamalı bir şekilde geliştirilen bilgi sistemleri, çoğu zaman kendi içinde tutarlı bir veri modeli sunamamaktadır (Bianchini, Savini, Andreoni, Morolli, & Solfrini, 2024) (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024). Kod yapılarının birbirinden kopuk, alan tanımlarının belirsiz ve süreçler arası sınırların net olmadığı dijital dönüşüm projelerinde, tam entegrasyonu sağlamak, gerçek zamanlı ve güvenilir bir sistem kurmak mümkün değilken dönüşüm sürecinin sağlıklı yürütülebilmesi için gerekli olan örgüt içi müzakere ve uzlaşma zeminin sağlanması da zorlaşmaktadır (Gajo & Akyuz, 2023).

Çalışmada odaklandığımız bu kuramsal çerçeve, bölümün ilerleyen kısımlarında sıkça değineceğimiz beş zorlanma alanının da arka planını oluşturmaktadır. Stratejik vizyonun nasıl gündelik kararlara dönüştürüldüğünü, veri ve süreç tasarımının sahadaki gerçek pratiklerle nerede çatıştığını, liderliğin ve kurum kültürünün hem hızlandırıcı hem de frenleyici rollerini, değişim yönetimi çabalarının ne zaman etkili olduğunu ve operasyonel dijitalleşmenin

sahadaki uygulayıcıların deneyimiyle nasıl ilişkilendiğini bu çerçeve üzerinden takip edeceğiz.

Başarı ve Başarısızlık Sebepleri

Kurumsal dönüşüm projelerindeki başarı ve başarısızlığın sebeplerine odaklanan çalışmalar, farklı sektör ve ülkelerde yürütülmüş olsalar da pek çok ortak noktaya değindikleri görülmektedir (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019) (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021) (Feliciano-Cestero, Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023) (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024). Bu sebeplerden ilki, dönüşüm hedeflerinin yeterince somutlaştırılamaması olarak gösterilebilir. Strateji belgelerinde vizyon düzeyinde gayet çekici görünen, “müşteri odaklılık”, “veri temelli yönetim” ya da “uçtan uca izlenebilirlik” gibi ifadeler sahadaki insanlar için çoğu zaman ne tür davranışlar, sorumluluklar ve performans kriterleri anlamına geldiği netleştirilmediği sürece havada kalabilmektedir (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024).

Bu noktada, literatürde “hedeflerin ayrıştırılarak sınıflandırılması” ya da “stratejinin yerelleştirilmesi” yaklaşımı ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Dönüşüm hedeflerinin, farklı birimlerdeki çalışanların gözünden bakıldığında nasıl karşılık bulduğunu birim bazında tartışmak, yani “Bu hedef bizim için ne demek?” sorusuna ortak yanıt aramak, pek çok dönüşüm modelinde kritik bir adım olarak görülmektedir (Christou & Piller, 2024). Buna rağmen pek çok vakada, bu tür tartışmaların ya hiç yapılmadığı ya da projenin erken safhalarıyla sınırlı kaldığı gözlenmektedir (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019) (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021).

İkinci önemli nokta olarak gösterilen liderliğin rolü dönüşüm projelerinde stratejik liderlik ve gündelik liderlik olmak üzere iki boyutu ile öne çıkmaktadır (Schiuma, Santarsiero, Carlucci, &

Jarrar, 2024). Stratejik liderlik, dönüşümün genel yönüne karar verir, dönüşüm için gerekli olan kaynakları tahsis eder ve proje dahilinde örgütün önceliklerini belirler. Gündelik liderlik ise, orta kademe ve ekip liderleri düzeyinde, stratejik kararlara anlam kazandıran, bunları gündelik kararlarla ilişkilendiren ve çalışanların kaygılarını dinleyip yanıtlayan bir işlev görmektedir (Bagrationi & Thurner, 2023). Vaka çalışmalarında, bu iki liderlik türünün birbirini desteklemediği durumlarda projelerin yavaşlaması ve hatta zaman zaman görünmez biçimde askıya alınması ile sonuçlandığı görülmektedir (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021) (Schiuma, Santarsiero, Carlucci, & Jarrar, 2024).

Üçüncü olarak, örgüt kültürü ve çalışan direnci boyutu öne çıkmaktadır (Nalbantoğlu, 2021) (Kurter, 2025). Burada “direnc” kavramını sadece değişime karşı durma isteği olarak değil, insanların belirsizlik ve kayıp algılarına verdikleri bir tepki olarak da görmek gerekir (Cieslak & Valor, 2025). Çalışmalar, direncin çoğu zaman “hatalara karşı toleransın düşük olduğu”, “bilginin paylaşılmaktan çok korunduğu” ve “hiyerarşinin çok keskin olduğu” ortamlarda daha sert ve görünür biçimlerde ortaya çıktığını, buna karşılık, hatalardan öğrenmeye izin veren, geri bildirim kanalları açık olan ve katılımcılığı teşvik eden kültürlerde daha yönetilebilir hâle geldiğini göstermektedir (Coşar, 2020) (Çelik, 2023).

Son önemli nokta olarak, değişim yönetimi ve örgütsel öğrenme alanı gösterilebilir. Çoğu model, iletişim planlarından eğitim programlarına, pilot uygulamalardan geri bildirim mekanizmalarına kadar uzanan bir araç seti sunmaktadır (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024). Ancak sahadaki uygulamalar, bu araçların çoğu zaman “yapılması gereken işler listesi”nin bir parçası olarak görüldüğünü, projenin baskı altında olduğu dönemlerde ilk gözden çıkarılan faaliyetler hâline geldiğini göstermektedir (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019) (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021). Bu durum, değişim

yönetiminin sadece proje başlangıcına sıkışmış bir etkinlik değil, dönüşümün örgüt ömrünün tamamına yayılması gereken bir süreç olması gerektiğini göstermektedir.

İnsan Faktörü, Örgüt Kültürü ve Direnç

İnsan faktörü ve örgüt kültürü, dönüşüm tartışmalarında belki de en zor ama en belirleyici alanlardan birisidir. Çalışanların yeni sürece dair ne hissettikleri, neyi kaybetmekten korktukları, hangi noktalarda heyecanlandıkları ya da mesafe aldıkları proje belgelerinde yer almayan ama çoğu zaman projenin kaderini yakından etkileyen unsurlar olarak yer almaktadır (Cieslak & Valor, 2025) (Kurter, 2025).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, direnci mantıklı olmayan bir tepki olmaktan ziyade anlamlı bir tepki olarak okuma yaklaşımını benimsemektedir (Çelik, 2023). Örneğin, yeni sistemin şeffaflığı artıyorsa, bu durum bazı çalışanlar için adalet duygusunu pekiştirirken başkaları için, özellikle geçmişte hataları nedeniyle olumsuz tecrübeler yaşamış olanlar için, risk duygusunu tetikleyebilmektedir. Aynı uygulama, farklı gruplarda farklı duygusal karşılıklar doğurabilmektedir. Bundan dolayı, dönüşüm projelerinde duygulara ve kimlik boyutuna daha fazla dikkat edilmesi gerekmektedir (Cieslak & Valor, 2025).

Örgüt kültürü çalışmalarında ise, yeniliğe açıklık, öğrenme yönelimi, hata toleransı, iş birliği ve psikolojik güvenlik gibi boyutlar öne çıkıyor (Coşar, 2020) (Nalbantoğlu, 2021). Örneğin, hataların açıkça konuşulabildiği ve “suçlu arama” kültürünün baskın olmadığı ortamlarda, insanlar yeni sistemlerdeki eksikleri ve aksaklıkları daha rahat dile getirebiliyor. Buna karşılık, geçmişte hataların ağır yaptırımlarla karşılandığı tecrübeler, çalışanların yeni sistemdeki sorunları saklama eğilimini artırmaktadır (Çelik, 2023).

Dönüşüm projelerinde uygulayıcı ekipleri yönlendirme karakteristiğini taşıyan dijital liderlik sadece teknolojiyi bilen bir

profil olmaktan ziyade belirsizlik yönetimi, denemeye alan açma, farklı disiplinler arası köprü kurma ve veriye dayalı karar alma süreçlerini örgütün geneline yayma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Böyle bir liderlik yokluğunda, dijital projeler çoğu zaman teknik birimlerin “kendi işi” gibi algılanır ve örgütün geri kalanından kopuk ilerlemelerine sebebiyet verir (Schiuma, Santarsiero, Carlucci, & Jarrar, 2024) (Köksoy & Oktaysoy, 2025).

Bu bölüm kapsamında ele aldığımız saha tecrübeleri, bu kuramsal tartışmaların somut karşılıklarını görmemiz için de bir fırsat sunmaktadır. Direncin hangi biçimlerde ortaya çıktığı, liderliğin hangi anlarda belirleyici olduğu, kültürün nerede dönüşümü zorlaştırıp nerede kolaylaştırdığına dair örnekler, ilerleyen sayfalarda ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Operasyonel Dijitalleşme ve Bilgi Sistemleri

Operasyonel dijitalleşme ve bilgi sistemleri ile ilgili çalışmalar, dönüşüm projelerinin en görünür yüzü olan günlük iş akışlarının dijital sistemlerle yeniden kurgulanmasına odaklanmaktadır (Dutta, Kumar, Sindhwani, & Singh, 2022) (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024). Günümüzde dijital araç olarak depo hareketlerinden üretim çizelgelerine, müşteri siparişlerinden sevkiyat planlamasına kadar pek çok alanda, veriye dayalı ve gerçek zamanlı karar alma imkânı sunan sistemler tasarlanmaktadır. Ancak bu sistemlerin sahada nasıl uygulandığı ve bir çalışanın vardiya sırasında bu sistemle nasıl temas ettiği çoğu zaman tasarım raporlarından daha farklı bir hikâye sunabilmektedir.

Araştırmalar, operasyonel dijitalleşme projelerinde en sık karşılaşılan problemler arasında veri kalitesi, entegrasyon güçlükleri, kullanıcı tecrübesi problemleri ve teknik altyapı yetersizliklerini işaret etmektedir. Veri kalitesi eksik, hatalı ya da tutarsız kayıtlar şeklinde karşımıza çıkarken, entegrasyon problemleri ise genellikle farklı sistemlerin birbiriyle konuşamaması

veya konuşurken bilgi kaybı yaşanması olarak karşımıza çıkabilmektedir. Kullanıcı tecrübesi tarafında, sahadaki fiziksel koşulları ve iş temposunu hesaba katmayan arayüzler, çalışanların yeni sistemle kurduğu ilişkiyi zayıflatabilmektedir. (Gajo & Akyuz, 2023) (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024).

Bunun yanı sıra, donanım ve altyapı boyutu da bu alanda yapılan çalışmalarda özellikle vurgulanmaktadır. Barkod okuyucuların, el terminallerinin, etiket yazıcılarının ve ağ bağlantılarının günlük operasyonlar gerçekleşirken arızalanmaları durumunda ne denli engel teşkil eder hale gelebilecekleri, sistemin çalışıp çalışmadığı ile ilgili düşünceleri doğrudan etkileyebilmektedir. Küçük gibi görünen ama sık tekrarlanan teknik aksaklıklar, “zaten sistem düzgün çalışmıyor” duygusunu kuvvetlendirirken dijitalleşme adımlarının etrafından dolaşıp proje öncesi iş yapma reflekslerine dönme eğilimini artırabilmektedir (Dutta, Kumar, Sindhwani, & Singh, 2022) (Bianchini, Savini, Andreoni, Morolli, & Solfrini, 2024).

Kuramsal çerçeve bu şekilde belirlendikten sonra, çalışmanın bağlamına ve nasıl bir analiz yolu izlendiğine odaklanabiliriz.

Çalışmanın Bağlamı ve Yaklaşımı

Bu bölümde konuyla alakalı tartışma, iki temel veri kaynağının buluşturulmasına dayanmaktadır. Kaynaklardan ilki olan literatürde, kurumsal ve dijital dönüşüm, değişim yönetimi, örgüt kültürü, çalışan direnci ve operasyonel dijitalleşme alanlarında güncel çalışmalardan faydalanılmıştır. Bu çalışmalar seçilirken, hem genel çerçeveler sunan sistematik derlemelere hem de belirli sektör ve bağlamlara odaklanan vaka çalışmalarına yer verilmiş olmasına dikkat edilmiştir. Amaç, sadece soyut kavramlar üzerinden gitmek değil, bu kavramların farklı örgütsel ortamlarda ne şekilde hayata geçtiğine dair örnekleri de tartışmaya dâhil etmektir.

İkinci kaynak olarak ise, orta ölçekli bir işletmede yürütülen kurumsal dönüşüm projesinde edinilen tecrübeler ele alınmaktadır. Bu kapsamda sadece resmi proje belgelerine değil, toplantılarda dile getirilen kaygılar, zamanla değişen öncelikler, sahada karşılaşılan beklenmedik sorunlar ve bu sorunlara verilen tepkilere yer verilmiştir. Çalışmanın odağı ise bu çok katmanlı tecrübeyi akademik literatürle karşılaştırmalı şekilde analiz etmektir. Dolayısıyla nicel bir araştırma tasarımıyla ziyade, nitel ve yorumlayıcı bir yaklaşım benimsenmektedir.

Analiz süreci kısaca şu şekilde ilerlemiştir: Öncelikle literatürde öne çıkan temel temalar belirlendi ve beş ana başlık altında toplandı. Daha sonra, saha tecrübesi bu temalar ışığında yeniden gözden geçirildi. Hangi olayların stratejik hizalama sorunu ile, hangilerinin veri modeli ve süreç mimarisiyle, hangilerinin liderlik ve kültürle, hangilerinin değişim yönetimiyle ve hangilerinin operasyonel dijitalleşmeyle daha yakından ilişkili olduğu tartışıldı. Bu aşamada amaç, yaşanan her olayı bir kategoriye zorla yerleştirmek değil; tekrar eden örüntüleri ve bunların literatürde karşılığı olan kavramlarla ilişkisini görmektir.

Çalışmanın bağlamı, anonim tutulmuştur. Metin boyunca herhangi bir firma ismi, sektör bilgisi ya da coğrafi ayrıntı verilmemektedir. Böylelikle, bir yandan gizlilik gerekliliklerine önemli ölçüde cevap verilirken, diğer yandan okuyucunun dikkati belirli bir kurumdan çok, dönüşüm süreçlerinin genel dinamiklerine yönelmesi sağlanmaktadır. Elbette her vaka kendi özgünlüğünü taşır fakat burada tartışılan örüntülerin, benzer dönüşüm projeleri yürüten pek çok örgütte tanıdık geleceği görülebilir.

Son olarak, bu bölümün bir “kesin reçete” sunma iddiası taşımadığını vurgulamak gerekir. Daha çok, literatürde sıkça karşılaştığımız kavramların sahada nasıl ete kemiğe büründüğünü, nerede sınıdığını, nerede eksik kaldığını ve nerede yeni sorular

doğurduğunu görünür kılmaya çalışan bir okuma önerisi olarak düşünülmelidir.

Kurumsal Dönüşüm Uygulamalarında Başlıca Zorlanma Alanları

Strateji ve Dönüşüm Vizyonunun Operasyonel Düzeyde Anlatımı

Strateji ve vizyon, dönüşüm projelerinin başlangıç noktası gibi görünür. Ne var ki, literatür ve saha tecrübesi yan yana konduğunda, asıl meselenin çoğu zaman vizyonu tanımlamaktan ziyade, gündelik operasyonlara olan etkisi noktasında düğümlendiği görülür (Feliciano-Cestero, Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023) (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019). Strateji belgelerinde yer alan geniş çerçeveli ifadeler –örneğin “müşteri odaklılık”, “veri temelli yönetim”, “sürdürülebilir rekabet avantajı” gibi– çoğu çalışanın günlük hayatında ne anlama geldiği netleştirilmediğinde, dönüşüm “üst yönetimin projesi” olarak kalmaya mahkûm olabilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda sıklıkla hedeflerin farklı seviyeler için yeniden tanımlanması gerekliliğine dikkat çekilmektedir (Christou & Piller, 2024) (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024). Üst yönetim düzeyinde “veri temelli karar alma” bir stratejik ilke olarak ifade edildiğinde, bu ilkenin örneğin depo çalışanı, planlama uzmanı ya da satış temsilcisi için ne tür davranış değişiklikleri gerektirdiği birlikte konuşulmadıkça, ilke soyut bir slogandan öteye geçememektedir. Yapılan vaka çalışmasında da kurumsal dönüşüm hedeflerinin başlangıçta görece net olmasına karşın, ilerleyen aylarda gündemin daha çok teknik sorunlara ve kısa vadeli aksaklıklara kaydığı; stratejik tartışmaların ise zaman zaman geri planda kaldığı görülmüştür. Bu tablo, “taktiksel sapma” olarak anılan olguya işaret etmektedir. Stratejik hedeflerle başlayan projeler, süreç içinde operasyonel yangınlara verilen tepkilerle

şekillenir hâle gelebilmektedir (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021).

Bu durumun bir başka boyutu, dönüşüm vizyonunun farklı paydaş grupları tarafından farklı anlamlandırılmasıdır. Örneğin, “şeffaflık” üst yönetim için risklerin daha erken görülmesi ve süreçlerin daha iyi kontrol edilmesi anlamına gelebilirken, sahada çalışan biri için daha fazla denetime maruz kalmak, daha çok rapor üretmek ve hata yaptığında bunun hızla görünür hâle gelmesi anlamına gelebilir (Kurter, 2025). Bu tür algı farklarına yönelik yapılan çalışmalarda özellikle dijital dönüşüm çalışmalarında, şeffaflık ve izlenebilirliğin aynı anda hem güven hem de kaygı üretebilme potansiyeline sahip olduğu üzerinde durulmaktadır (Coşar, 2020).

İncelenen dönüşüm sürecinde, kimi dönemlerde strateji ile operasyon arasındaki bu mesafeyi kapatmaya yönelik bilinçli adımlar atıldığı görülmüştür. Birlikte süreç haritalama oturumları, farklı birimlerin aynı masada yer aldığı toplantılar ve hedeflerin günlük iş akışlarıyla ilişkilendirildiği atölyeler, bu çabalara örnek olarak gösterilebilir. Bu tür uygulamalarda çalışanların “Bu hedef, bizim yaptığımız işi nasıl etkileyecek?” sorusuna daha somut cevaplar bulabildiği ve böylece dönüşümün sadece “yukarıdan gelen bir talimat” değil, birlikte şekillenen bir çerçeve olarak algısının oluştuğu gözlenmiştir. Bu şekilde katılımcı strateji oluşturma yaklaşımlarının sahada karşılık bulduğu anlar tam da bu tür toplu tartışma ortamlarının olduğu yapılan çalışmalar ile de desteklenmektedir (Christou & Piller, 2024).

Özetle, strateji ve vizyon, dönüşüm projeleri için gerekli bir başlangıç noktası olmakla birlikte asıl kritik olan, bu vizyonun farklı seviyelerde yeniden üretilmesi ve somut davranışlara tercüme edilmesidir. Bunu yapamadığımızda, en parlak stratejiler bile gündelik işin gerçekliği karşısında anlamını yitirebilmektedir.

Veri Modeli, Süreç Mimarisi ve Entegrasyon Sorunları

Veri modeli ve süreç mimarisi, dönüşüm projelerinin belki en az görünen fakat en çok üzerinde durduğu alanlardan birisi olarak yer almaktadır. Pek çok örgütte bilgi sistemleri, yıllar içinde farklı dönemlerin ihtiyaçları ve farklı karar vericilerin tercihlerine göre adım adım inşa edilmiştir (Brunetti, ve diğerleri, 2020). Yeni bir kurumsal mimari tasarlamaya girildiğinde, farklı anlamlar yüklenmiş benzer kodlar, isimlendirme standartları olmayan veriler, aynı şeyi ifade etmek için kullanılan birden fazla isimlendirme ya da tam tersi olarak tek bir alana sıkıştırılmış birden çok anlam ifade eden terimlerden oluşan tarihsel mirasla karşı karşıya kalılabilmektedir.

Literatürde “parçalı mimari” ya da “yamalı bilgi sistemi” olarak adlandırılan bu durumun oluştuğu bir zeminde yeni bir veri modeli tasarlamak, sadece teknik bir süreç değil aynı zamanda bir kurum için politika meselesi hâline gelebilmektedir. Çünkü her bir bölüm, bugüne kadar alıştığı kodlama mantığını, raporlama biçimini ve kontrol noktalarını korumak isteyebilmektedir (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024) (Bianchini, Savini, Andreoni, Morolli, & Solfrini, 2024). Verinin nasıl tanımlanacağı ve hangi alanların “asıl” kabul edileceğine, aslında güç ilişkilerinin de yeniden tanımlandığı kararlar olarak bakabiliriz. İncelenen vakada da farklı birimlerin ihtiyaçlarının veri modeline nasıl yansıtılacağı konusu, teknik toplantıların ötesinde uzun müzakerelere sahne olmasıyla yönüyle literatürde geçen “veri egemenliği” tartışmalarını işaret etmektedir (Dutta, Kumar, Sindhvani, & Singh, 2022) (Gajo & Akyuz, 2023).

Süreç mimarisi tarafında ise benzer bir gerilim, kâğıt üzerindeki ideal akış ile sahadaki fiilî işleyiş arasında yaşanmaktadır (Brunetti, ve diğerleri, 2020). Çoğu örgütte süreçler, resmi dokümanlarda anlatılandan daha karmaşık ve çoğu zaman daha esnek biçimde yürütülebilmektedir. İnsanlar, yıllar içinde

geliştirdikleri pratik çözümlerle belirlenen kurum içi işleyiş kurallarının etrafında yeni yollar bulabilmektedirler. Yeni bir süreç mimarisi tasarladığınızda, bu pratik çözümleri ne kadar görmezden gelinirse sistemle günlük iş arasında kopukluklar o derecede artacaktır. Bu kopukluk meselesi “kâğıttaki süreçler” ve “yaşanan süreçler” arasındaki fark üzerinden literatürde ayrıntılı şekilde ele alınmıştır (Dutta, Kumar, Sindhwani, & Singh, 2022) (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024).

İncelenen dönüşüm programında ise, süreç çizimleri masa başında yapıldığında gayet tutarlı ve akıcı görünen akışların, sahaya indiğinde beklenmedik dirençlerle karşılaştığı durumlar yaşanmıştır. Örneğin, belirli bir kontrol adımının sistemsel olarak zorunlu kılınması, sahadaki hız gereksinimiyle çeliştiğinde, çalışanların bu adımı atlamak için yollar aradığı, bazı kayıtların sonradan topluca girildiği ya da kritik alanların doldurulmadan geçildiği görülmüştür. Bu tür pratikler, veri kalitesini zedelediği gibi, zamanla sistemin güvenilirliğine dair kuşku da artırabilmektedir (Bianchini, Savini, Andreoni, Morolli, & Solfrini, 2024).

Edinilen bu tecrübe, literatürde sıkça önerilen “sahadan öğrenme” ve “ortak tasarım” yaklaşımlarının önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir (Gajo & Akyuz, 2023). Veri modeli ve süreç mimarisi çalışmaları, sadece uzmanların dar bir odada yürüttüğü bir faaliyet olmaktan çıkarılıp, sahadaki kullanıcıların deneyimlerinin de sistematik olarak dâhil edildiği bir sürece dönüştürüldüğünde daha kalıcı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Aksi hâlde, teknik olarak çok iyi tasarlanmış görünen yapılar, gerçek çalışma hayatı karşısında esnemek zorunda kalmakta ya da fiilen kullanılmayan bir “ideal model”e dönüşmektedir.

Liderlik, Örgüt Kültürü ve Direnç Dinamikleri

Liderlik ve kültür, dönüşüm projelerinin üzerine inşa edildiği zemini oluşturmaktadır. Bu zemin sağlam değilse, en iyi tasarlanmış

proje planları bile beklenmedik şekillerde sonlanabilmektedir (Schiuma, Santarsiero, Carlucci, & Jarrar, 2024) (Cieslak & Valor, 2025). Literatürde özellikle üst yönetim liderliği ve orta kademe liderliğine dikkat çekilmektedir. Üst yönetim, dönüşümün yönünü belirleyen ve kaynakları tahsis eden aktör; orta kademe ise bu yönü gündelik kararlarla ilişkilendiren, ekiplerin nabzını tutan ve çoğu zaman çalışanların ilk muhatap olduğu liderlik katmanı olarak yer almaktadır (Bagrationi & Thurner, 2023).

Saha tecrübelerinde, üst yönetimin dönüşüme desteğinin zaman içinde dalgalandığı, ama kritik anlarda açık ve görünür destek vermesinin süreç üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Örneğin, zor kararların alındığı, bazı alışkanlıkların terk edilmesinin beklendiği dönemlerde, üst yönetimin bu kararların arkasında durması, çalışanların “bu iş gerçekten ciddiye alınıyor” duygusunu güçlendirmiştir. Buna karşılık, önceliklerin sık sık değiştiği ve üst yönetimin odağının farklı projeler arasında dağıldığı dönemlerde, dönüşümün “geçici bir gündem” olarak algılanma riski artmıştır. Literatürde “projelerin ömrü” tartışmalarında benzer gözlemlerle karşılaşılmaktadır (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021).

Orta kademe liderliği ise, çoğu zaman dönüşüm projelerinin görünmeyen kahramanları veya gizli frenleri olarak karşımıza çıkabilmektedir (Bagrationi & Thurner, 2023). Bir yandan üst yönetimin hedeflerini ekiplerine aktarmak, diğer yandan ekiplerin kaygılarını yukarıya taşımak sorumluluklarını üstlenmektedirler. Bu yüzden Zaman baskısı, performans beklentileri ve çalışanların günlük ihtiyaçları arasında denge kurmaya çalışmaktadırlar. İncelenen vakada, bazı orta kademe yöneticilerin yeni sistemi sahiplenip ekipleriyle birlikte çözüm arayan bir rol üstlendiği, bazılarının ise mesafeli kalmayı tercih ettiği ve sürecin “nasıl olsa değişir” duygusuyla geçici bir dalga olarak görüldüğü örnekler gözlenmiştir. Bununla birlikte sahiplenilenlerin oranı arttıkça geçici

bir heves olarak görenlerin de zamanla dönüşüm sürecine inançlarının arttığı gözlenmiştir.

Direnç kavramı, bu noktada devreye girmektedir. Çalışanların yeni sisteme yönelik soru işaretleri, kaygıları ve itirazları, çoğu zaman doğrudan “Hayır” cümleleriyle değil, dolaylı davranışlarla ifade edilir (Cieslak & Valor, 2025) (Çelik, 2023). Bazı adımların atlanması, manuel çözümlerin devam ettirilmesi, yeni arayüzler yerine eski notların kullanılmaya devam edilmesi gibi pratikler, direncin sessiz biçimleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde “gölge sistemler” olarak anılan bu tür alternatif işleyişler, resmi sistemin açıklarını kapatırken aynı zamanda dönüşümün gerçek etkisini de sınırlayabilmektedir (Nalbantoğlu, 2021).

Bu noktada kurum kültürünün rolü belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Hataların konuşulabildiği, deney yapmanın cezalandırılmadığı ve geri bildirimin gerçekten değer gördüğü ortamlarda, direncin daha kolay görünür hâle geldiğini, dolayısıyla üzerinde konuşulabilir ve yönetilebilir olduğu görülecektir (Huda & Hambali, 2025). Buna karşılık, risk almanın ve hata yapmanın ağır bedellerle karşılaştığı tecrübelere sahip çalışanlar, sorunları görünür kılmaktan kaçınmaktadırlar. Bu durum hem öğrenme fırsatlarını azaltırken hem de sistemin gerçekten nasıl çalıştığına dair bilinmezlikler yaratmaktadır.

Özetle, liderlik ve kültür, dönüşüm projelerinin hızını ve yönünü belirleyen temel arka plan etkenleri olarak ele alınmalıdır. Dönüşüm liderliği sadece proje planını onaylayan bir rol değil; süreç boyunca anlam üreten, belirsizlikleri görünür kılan ve insanlar için güvenli alanlar açan bir pratik olarak düşünülmelidir (Feliciano-Cestero, Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023).

Değişim Yönetimi, İletişim ve Örgütsel Öğrenme Zorlukları

Değişim yönetimi, neredeyse her zaman önerilirken pratikte çoğu zaman “vakit kalırsa yapılacak işler” listesinden kendisine yer

bulabilmektedir (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019) (Huda & Hambali, 2025). İyi bir iletişim planı, yapılandırılmış eğitimler, pilot uygulamalar, geri bildirim toplantıları, başarı hikâyelerinin paylaşılması gibi faaliyetler dönüşüm projelerinin sunumlarında yerini alır ancak iş günlük operasyonlara entegre etmeye geldiğinde, bu adımların ne kadarının hayata geçtiği ne kadarının sembolik düzeyde kaldığı ciddi bir soru işareti olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürde değişim yönetimi modelleri incelendiğinde, pek çoğunun “başlangıçta yoğun, sonra azalan” bir etki örüntüsü taşıdığı görülür (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021). Projenin ilk aylarında sık toplantılar, bilgilendirme oturumları ve eğitimler yapılır ve zamanla bu yoğunluk düşer. Oysa dönüşümün asıl etkisi, sistemler devreye alındıktan, ilk hatalar yapıldıktan, beklenmedik sorunlar yaşandıktan sonra ortaya çıkar. Tam da bu dönemde, çalışanların duygusal desteğe, net bilgiye ve birlikte çözüm üretme ortamlarına daha fazla ihtiyacı vardır. İncelenen sahada da benzer bir örüntü gözlenmiştir. Başta yoğun olan iletişim ve eğitim faaliyetlerinin, zaman içinde operasyonel baskılar nedeniyle giderek azaldığı, buna karşılık sorunların ve soru işaretlerinin arttığı dönemlerde, bu tür çabalara yeniden ihtiyaç duyulduğu açıkça görülmüştür.

Örgütsel öğrenme boyutu, değişim yönetimine derinlik kazandırmaktadır (Kurter, 2025) (Huda & Hambali, 2025). Hataların kaydedilip konuşulduğu, süreç iyileştirmelerinin sadece teknik değil, davranışsal boyutlarıyla da ele alındığı ve çalışanların kendi deneyimlerinden çıkardıkları dersleri paylaşabildikleri yapılar kurulmadığında, dönüşüm projeleri “seri krizler yönetimi”ne dönüşebilmektedir. Böylesi bir ortamda aynı hata farklı birim ve zamanlarda tekrar tekrar yaşanır ve herkes bu hatanın sık yaşandığını bilmesine rağmen bu bilgi kurumsal seviyede bir öğrenmeye dönüşmez.

İncelenen deneyimde, belirli dönemlerde bu tür öğrenme mekanizmalarının kurulmaya çalışıldığı, hataların ve aksaklıkların periyodik olarak ele alındığı toplantıların yapıldığı görülmüştür. Bu toplantılarda, “suçlu arama” yerine “neden böyle oldu, bir daha olmaması için ne yapabiliriz?” sorularına odaklanıldığında, çalışanların daha açık davrandığı ve sistemle ilgili kritik gözlemlerini daha rahat paylaştığı gözlenmiştir. Bu tür deneyimler, literatürde “psikolojik güvenlik” kavramının neden bu kadar önemsendiğini somut biçimde ortaya koymaktadır (Kurter, 2025).

Ancak bu tür uygulamaların sürekliliği sağlanamadığında, dönüşüm süreci yeniden bireysel çabalara ve çözümlere bağlı kalabilmektedir. Dolayısıyla değişim yönetimi, sadece proje başlangıcında hazırlanmış bir plan olarak değil dönüşüm boyunca tekrar tekrar gözden geçirilen, güncellenen ve kurumun ritmine uyarlanan bir süreç olarak düşünülmelidir (Inampudi, Rajkumar, Gopi, Vany Mol, & Sruthi, 2024).

Operasyonel Dijitalleşme ve Günlük İş Pratiklerinin Dönüşümü

Operasyonel dijitalleşme ve günlük iş pratikleri, dönüşümün çalışanlar tarafından en çıplak gözle görülen yüzünü oluşturmaktadır. Ekranlar, el terminalleri, barkod okuyucular, yeni formlar, farklı raporlama biçimleri gibi unsurlar çoğu zaman bir çalışanın vardiyasını proje öncesine göre başka bir şekilde yürütmesini gerektirebilmektedir. Bu yüzden, dijitalleşme adımlarının nasıl tasarlandığı ve hayata geçirildiği, dönüşümün genel algısı üzerinde son derece etkilidir (Mendoza Zenozain, 2025).

Literatür, operasyonel dijitalleşmenin iki uçlu bir deneyimin oluşturulabileceğini göstermektedir. Bir yandan, iyi tasarlanmış sistemler işleri hızlandırırken üretim hatalarını azaltmakta ve karmaşık süreçlerin daha yönetilebilir hâle gelmesini sağlayabilmektedir (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024). Diğer yandan, kötü tasarlanmış arayüzler, aşırı veri girişi

yükü, sahadaki fiziksel koşullara uygun olmayan cihazlar veya sık yaşanan teknik aksaklıklar, çalışanlar için dijitalleşmeyi “ek iş” ve “ek risk” olarak hissettirmesi kaçınılmazdır (Dutta, Kumar, Sindhwani, & Singh, 2022) (Mendoza Zenozain, 2025).

İncelenen sahada da bu ikili yapı açık biçimde gözlenmiştir. Bazı birimlerde, yeni sistemlerin sağladığı görünürlük ve takip imkânları, çalışanların kendi işlerini daha net görmelerini ve hataları daha çabuk fark etmelerini sağlamıştır. Bu durum, özellikle belirsizlikten rahatsız olan ve yaptığı işin “görür olmasını” arzu eden çalışanlar için olumlu bir tecrübe olarak yansımıştır. Buna karşılık, zaman baskısının yüksek olduğu, iş yükünün dalgalı seyrettiği alanlarda, sistemsel adımların ek bir yük olarak algılandığı örnekler de sıkça görülmüştür. Bu tür ortamlarda, bazı çalışanlar yeni adımları atlamanın yollarını aramış, bazıları ise eski kâğıt notlara ve sözlü teyitlere geri dönmüştür.

Performans ölçümü boyutu, bu iki uçlu denklemi daha da hassas hâle getirmektedir. Dijital sistemlerin ürettiği detaylı veriler, yönetim için güçlü bir izleme ve analiz aracı sunarken, çalışanlar açısından “sürekli izlenme” duygusunu tetikleyebilmektedir. Çalışmalar, performans sistemlerinde adalet ve şeffaflık algısının ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır (Coşar, 2020) (Kurter, 2025). İncelenen vakada, performans verilerinin nasıl kullanılacağı, hangi tür hataların tolere edileceği ve hangi davranışların ödüllendirileceği konusunda net ve ortak bir çerçeve oluştuğunda, dijitalleşmeye duyulan güvenin arttığı; bu çerçevenin belirsiz olduğu dönemlerde ise kaybın yükseldiği görülmüştür.

Teknik altyapı da bu resmin önemli bir parçasıdır. Ne kadar iyi tasarlanmış olursa olsun, sık sık donanım arızası yaşanan, ağ bağlantısının sorunlu olduğu veya cihazların işin doğasına uygun olmadığı ortamlarda, sistemle ilgili olumsuz duyguların birikmesi kaçınılmazdır (Mendoza Zenozain, 2025). Küçük ama sık tekrarlanan aksaklıklar, “zaten çalışmıyor” söylemini güçlendirerek,

sistemin etrafından dolaşma eğilimini artırabilir. Dolayısıyla, operasyonel dijitalleşmede sadece yazılım tarafına odaklanmak, resmin önemli bir bölümünü eksik bırakmak anlamına gelir.

Kısacası, operasyonel dijitalleşme, süreçler, teknoloji ve insan deneyimi arasında hassas bir denge arayışıdır. Bu dengenin sağlanamadığı durumlarda, dijitalleşme hedefi, çalışanların gözünde “iş i zorlaşt ıran” bir girişim olarak kodlanabilir. Sağa sola konulan yeni cihazların ya da ekranda görünen yeni menülerin ötesine geçip, bu değ iş i klerlerin insanların iş lerini nasıl yaptıklarıyla olan iliş ki bağ ını kurmadıkça, dijital dönüş ümün potansiyeli tam anlamıyla aç ığ a çıkamamaktadır (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024)

Tartış ma ve Sonuç

Bu bölümde, kurumsal ve dijital dönüş üm projelerinde en çok zorlanılan alanları hem literatür hem de saha tecrübeleri beş baş lık altında hem akademik metinlerde tekrar tekrar karş ımıza çıkan hem de sahada sık sık “kritik nokta” hâline gelen alanlar üzerinden tartış tık. Stratejik hizalama, veri ve süreç mimarisi, liderlik ve kültür, değ iş im yönetimi ve öğrenme ile operasyonel dijitalleş me birbirinden bağı msız değ il aksine sürekli birbirini besleyen ve kimi zaman da birbirini zorlaşt ıran dinamik alanlar olarak yer alabilmektedir.

Karşı laşt ırılmalı tartış madan hareketle, kurumsal ve dijital dönüş üm projeleri için birkaç genel öneri sıralanabilir:

- Strateji, sadece üst yönetimin dokümanlarında yer alan bir metin olmaktan çık arılıp, farklı seviyelerde birlikte tartış ılan ve somut örneklerle zenginleştirilen bir süreç olarak ele alınmalıdır (Christou & Piller, 2024) (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024).

- Veri modeli ve süreç mimarisi çalışmaları, sahadaki pratiklerin ve farklı birimlerin ihtiyaçlarının sistematik biçimde dâhil edildiği ortak tasarım süreçleri olarak yürütülmelidir (Dutta, Kumar, Sindhvani, & Singh, 2022) (Gajo & Akyuz, 2023) (Gomes, Busanello, Padilha, Lerman, & Tabim, 2024).

- Liderlik, yalnızca kısa vadeli performans hedeflerine odaklanan bir yönetim tarzından çok, belirsizlikleri görünür kılan, hatalardan öğrenmeye alan açan ve güven inşa eden bir pratik olarak yeniden düşünülmelidir (Schiuma, Santarsiero, Carlucci, & Jarrar, 2024)

- Değişim yönetimi, projenin başına sıkıştırılmış bir “iletişim kampanyası” olmamalı, dönüşüm boyunca, özellikle de zorlu dönemlerde, insanların yanında olmayı ve birlikte düşünmeyi önemseyen bir yaklaşımın parçası olmalıdır (Jones, Firth, Hannibal, & Ogunseyin, 2019) (Inampudi, Rajkumar, Gopi, Vany Mol, & Sruthi, 2024)

- Operasyonel dijitalleşme projelerinde, teknolojik çözümler insan deneyimiyle birlikte tasarlanmalı; performans ölçümü ve izlenebilirlik mekanizmaları adil ve şeffaf bir çerçeveye oturtulmalıdır (Coşar, 2020) (Mendoza Zenozain, 2025)

Çalışmanın sınırlılıkları da göz ardı edilmemelidir. Saha analizi, tek bir örgütte bir yıldan fazla süredir yürütülen bir dönüşüm programının deneyimsel bulgularına dayanmakta ve dolayısıyla bu saha çalışmasından edinilen çıkarımlar farklı bağlamlara doğrudan genellenemez. Buna karşın, burada ortaya çıkan örüntülerin ve gerilimlerin, benzer ölçek ve nitelikteki dönüşüm projelerinde karşılaşılabilecek durumlara dair fikir verici olduğu düşünülmektedir. Gelecekte yapılacak karşılaştırmalı çalışmalarda, farklı sektör ve kültürel bağlamlarda bu beş zorlanma alanının nasıl biçim değiştirdiğini daha yakından incelenebilir (Feliciano-Cestero,

Ameen, Kotabe, Paul, & Signoret, 2023) (Porfirio, Felício, & Carrilho, 2024).

Sonuç olarak, kurumsal ve dijital dönüşüm projeleri, teknoloji, süreç ve insan boyutlarının iç içe geçtiği karmaşık yolculuklardır. Bu yolculukta en çok nerede zorlanıldığını bilmek hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için önemli bir başlangıç avantajı sağlar. Bu bölümde sunulan tartışma, bu zorlanma alanlarını daha net görmeye ve bu alanlara yönelik daha bilinçli müdahaleler tasarlamaya davet niteliğindedir. Ayrıca sunulan karşılaştırmalı analiz ile literatür ve saha tecrübesinin birbirinden bağımsız değil, tersine birbirini besleyen ve çoğu zaman çakışan güçlükleri barındırdığını ortaya koymaktadır

Strateji ve dönüşüm vizyonu açısından, literatürde vurgulanan belirsizlik ve uyum sorunlarının sahada da benzer biçimde yaşandığı görülmüştür (Bucy, Schaninger, VanAkin, & Weddle, 2021). Vizyonun net ifade edilmesi tek başına yeterli olmamakta, bu vizyonun farklı örgütsel seviyelere uygun biçimde uygulamaya sokulması, somut süreç değişiklikleriyle ilişkilendirilmesi ve gündelik karar alma pratiklerine yansıtılması gerekmektedir (Hanelt, Bohnsack, Marz, & Antunes Marante, 2021). Saha tecrübesi, bu uygulamanın yeteri düzeyde yapılmadığı durumlarda, dönüşümün soyut bir “proje” olarak kaldığını ve operasyonel sorunların gündemi belirlediğini göstermiştir. Bu bulgu, dönüşüm programlarında strateji ve uygulama arasında köprü kuran ara liderlik rollerinin güçlendirilmesinin önemine işaret etmektedir (Schioma, Santarsiero, Carlucci, & Jarrar, 2024).

Veri modeli, süreç mimarisi ve entegrasyon alanında ise, literatürde tanımlanan teknik ve örgütsel bariyerlerin büyük ölçüde doğrulandığı söylenebilir. Tarihsel olarak şekillenmiş veri yapıları, tutarsız kodlamalar, manuel ara çözümler ve entegrasyon zorlukları, saha tecrübelerinde de somut biçimde gözlemlenmiştir. Bu bulgu, dönüşüm projelerinde veri ve süreç mimarisi çalışmalarına yeterli

zaman ve kaynak ayrılmasının, hatta bu çalışmaların dönüşüm programının omurgası olarak tasarlanmasının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, veri modelinin yalnızca teknik bir tasarım değil, farklı birimlerin ihtiyaç ve beklentilerini uzlaştıran bir müzakere alanı olduğu da yeniden görünür hâle gelmiştir (Gajo & Akyuz, 2023).

Liderlik, örgüt kültürü ve direnç dinamikleri açısından, literatürde yer alan kavramsallaştırmaların büyük ölçüde açıklayıcı olduğu, ancak sahada bazı ek nüansların ortaya çıktığı söylenebilir. Özellikle dijital dönüşüm projelerinde verinin şeffaflaşması hem güven inşa eden hem de güveni zedeleme potansiyeli taşıyan bir unsur olarak karşımıza çıkabilmektedir (Cieslak & Valor, 2025). Direnç, çoğu zaman açık itiraz biçiminde değil, yeni süreçlerin kısmen uygulanması, bazı adımların atlanması veya eski pratiklerin gölge sistemler olarak sürdürülmesi şeklinde tezahür etmiştir (Bagrationi & Thurner, 2023). Bu gözlemler, direncin sadece eğitim eksikliğiyle açıklanamayacağını, aynı zamanda güven, adalet algısı ve sahiplenme ile birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, dönüşüm liderliğinin şeffaflık ile güven inşası, denetim ile öğrenme arasında hassas bir denge kurması gerekmektedir (Kurter, 2025).

Değişim yönetimi ve örgütsel öğrenme boyutunda, literatürde önerilen araç ve yaklaşımların sahada kullanıldığı, ancak bu faaliyetlerin yoğunluğu ve sürekliliğinin operasyonel baskılardan etkilendiği görülmüştür (Hariyani, Hariyani, Mishra, & Sharma, 2024). Pilot uygulamalar, yerinde eğitimler ve geri bildirim mekanizmaları devrede olduğunda, yeni süreçlerin kabulü artmış, ancak iş yükünün yoğun olduğu dönemlerde bu faaliyetlerin geri plana itilmesi, öğrenme döngülerinin kesintiye uğramasına neden olmuştur. Bu bulgu, değişim yönetiminin proje başlangıcına sıkışmaması, programın tüm yaşam döngüsüne yayılması ve örgütsel öğrenmenin sürekliliğini güvence altına alacak yapısal

düzenlemelerin yapılması gerektiği yönündeki literatür vurgusunu desteklemektedir (Huda & Hambali, 2025).

Operasyonel dijitalleşme ve günlük iş pratiklerinin dönüşümü alanında ise, teknik hedefler ile çalışanların deneyimi arasındaki gerilim belirgin biçimde ortaya çıkmıştır (Gajo & Akyuz, 2023). Dijital sistemler, bir yandan şeffaflık, izlenebilirlik ve verimlilik vadederken; diğer yandan çalışanlarda iş yükü artışı, sürekli denetlenme hissi ve hata yapma kaygısı yaratabilmektedir. Bu ikili yapı, literatürde “dijital yük” olgusu ve performans yönetimi ile ilgili tartışmalarla uyumludur (Coşar, 2020). Saha deneyimi, bu gerilimin adil ve şeffaf performans çerçeveleri, kullanıcı dostu tasarımlar ve güven temelli liderlik yaklaşımlarıyla kısmen yumuşatılabildiğini göstermiştir.

Bu bulgular ışığında, kurumsal ve dijital dönüşüm projelerine ilişkin bazı pratik öneriler geliştirilebilir:

- Dönüşüm programları, baştan itibaren veri modeli ve süreç mimarisi etrafında kurgulanmalı; bu alanlara yeterli kaynak ve liderlik desteği sağlanmalıdır.

- Strateji ve dönüşüm vizyonu, farklı örgütsel seviyelere uygun bir dilde ve somut örneklerle anlatılmalı; paydaşların katılımını sağlayan ortak tasarım süreçleri kullanılmalıdır.

- Liderlik, yalnızca hedef koyan değil, sahayı dinleyen, denemeye ve hatalardan öğrenmeye alan açan bir profil sergilemeli; direnç, bastırılması gereken bir engel olarak değil, anlamlandırılması gereken bir sinyal olarak ele alınmalıdır.

- Değişim yönetimi faaliyetleri, programın sadece başlangıç dönemine değil, tüm yaşam döngüsüne yayılan bir yaklaşımla tasarlanmalı, eğitim, iletişim ve geri bildirim mekanizmaları süreklilik kazanmalıdır.

- Operasyonel dijitalleşme projelerinde kullanıcı deneyimi, performans ölçümünün adalet ve şeffaflık boyutları ve teknik altyapının güvenilirliği birlikte ele alınmalıdır.

Saha analizi, tek bir örgütte bir yıldan fazla süredir yürütülen bir dönüşüm programının deneyimsel bulgularına dayanmakta ve dolayısıyla bu saha çalışmasından edinilen çıkarımlar farklı bağlamlara doğrudan genellenemez. Ancak bu sınırlı tecrübeye rağmen, çalışmanın derinlikli bir vaka temelli içgörü sunma hedefiyle uyumludur. Gelecekteki araştırmalarda, farklı büyüklük ve sektörlerdeki örgütleri kapsayan karşılaştırmalı çalışmalarla, burada tanımlanan zorlanma alanlarının hangi koşullarda nasıl değiştiğini incelenebilir. Ayrıca, nicel veri toplama yöntemleriyle, literatürde öne çıkan faktörlerin göreceli ağırlıkları ve etkileşim biçimleri daha ayrıntılı biçimde analiz edilebilir.

Sonuç olarak, kurumsal ve dijital dönüşüm projeleri, teknik ve örgütsel boyutları iç içe geçmiş karmaşık süreçlerdir. Bu bölümde sunulan literatür ve saha deneyimi karşılaştırması, bu süreçlerde en çok zorlanılan alanları görünür kılarak hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için yol gösterici bir çerçeve sunmayı amaçlamıştır. Dönüşüm projelerinin geleceğinde, strateji, süreç, teknoloji ve insan boyutlarını eşit ciddiyetle ele alan bütüncül yaklaşımların belirleyici olması beklenmektedir.

Kaynakça

- Bagrationi, K., & Thurner, T. (2023). Middle management's resistance to digital change. *Foresight and STI Governance*, 17, 49–60.
- Bianchini, A., Savini, I., Andreoni, A., Morolli, M., & Solfrini, V. (2024). Manufacturing execution system application within manufacturing small–medium enterprises towards key performance indicators development and their implementation in the production line. *Sustainability*, 16, 2974.
- Brunetti, F., Matt, D. T., Bonfanti, A., De Longhi, A., Pedrini, G., & Orzes, G. (2020). Digital transformation challenges: strategies emerging from a multi-stakeholder approach. *The TQM Journal*, 32, 697–724.
- Bucy, M., Schaninger, B., VanAkin, K., & Weddle, B. (2021). Losing from day one: Why even successful transformations fall short. *McKinsey & Company*.
- Christou, E., & Piller, F. (2024). Organizational transformation: A management research perspective. *Transformation towards sustainability: A novel interdisciplinary framework from RWTH Aachen University*, 303–330.
- Chuunga, K., & Mpundu, M. (2025). Organization Change through Digital Transformation. *International Journal of Advanced Business Studies*, 4, 222–235.
- Cieslak, V., & Valor, C. (2025). Moving beyond conventional resistance and resisters: an integrative review of employee resistance to digital transformation. *Cogent Business & Management*, 12, 2442550.

- Coşar, B. (2020). Dijital ve çevik örgüt kültürü ölçeğinin geliştirilmesi., (s. 615).
- Çelik, D. (2023). Kamu Yönetiminde Dijital Dönüşümde Bir Sorun Alanı: Dijital Kültüre Yönelik Direnç. *Kamu Yönetimi ve Teknoloji Dergisi*, 5, 69–86.
- Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2022). Overcoming the barriers of effective implementation of manufacturing execution system in pursuit of smart manufacturing in SMEs. *Procedia Computer Science*, 200, 820–832.
- Feliciano-Cestero, M. M., Ameen, N., Kotabe, M., Paul, J., & Signoret, M. (2023). Is digital transformation threatened? A systematic literature review of the factors influencing firms' digital transformation and internationalization. *Journal of business research*, 157, 113546.
- Gajo, A. H., & Akyuz, G. A. (2023). Digital Transformation Implementation Challenges in Turkish Industrial Enterprises. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 20, 2350037.
- Gomes, C., Busanello, E., Padilha, B., Lerman, L. V., & Tabim, V. M. (2024). Exploring Key Factors for Implementing Manufacturing Execution Systems (MES) within the Framework of Industry 4.0 for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) in the Manufacturing Sector. *Production*, 34, e20230085.
- Hanelt, A., Bohnsack, R., Marz, D., & Antunes Marante, C. (2021). A systematic review of the literature on digital transformation: Insights and implications for strategy and organizational change. *Journal of management studies*, 58, 1159–1197.

- Hariyani, D., Hariyani, P., Mishra, S., & Sharma, M. K. (2024). Causes of organizational failure: A literature review. *Social Sciences & Humanities Open*, 10, 101153.
- Huda, N., & Hambali, R. (2025). Redesigning the Digital Organization: A Systematic Literature Review on the Role of HRM in Orchestrating Agile and Hybrid Transformations. *Taylorian Insights: Journal of Management Review*, 1, 35–45.
- Inampudi, S., Rajkumar, E., Gopi, A., Vany Mol, K. S., & Sruthi, K. S. (2024). Barriers to implementation of digital transformation in the Indian health sector: a systematic review. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11.
- Jones, J., Firth, J., Hannibal, C., & Ogunseyin, M. (2019). Factors contributing to organizational change success or failure: a qualitative meta-analysis of 200 reflective case studies. *Evidence-based initiatives for organizational change and development* (s. 155–178). içinde IGI Global.
- Köksoy, E., & Oktaysoy, O. (2025). Dijital Liderliğin Dijital Örgütsel Dönüşüm Sürecine Etkisi: Örgütsel Çevikliğin Aracı Rolü. *Uluslararası Ekonomi İşletme ve Politika Dergisi*, 9, 799–817.
- Kurter, O. (2025). Strategic Design of Organizational Culture for Digital Transformation. *Toplum Ekonomi ve Yönetim Dergisi*, 6, 524–544.
- Mendoza Zenozain, E. A. (2025). Evolution and application of Lean manufacturing in the production industry: advances and trends (2015-2025) through neutrosophic cognitive mapping analysis of critical success factors. *Neutrosophic Sets and Systems*, 84, 8.

- Nalbantoğlu, C. B. (2021). Dijital dönüşümün örgüt kültürü üzerine yansımaları. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 23, 193–207.
- Porfirio, J. A., Felício, J. A., & Carrilho, T. (2024). Factors affecting digital transformation in banking. *Journal of Business Research*, 171, 114393.
- Schiuma, G., Santarsiero, F., Carlucci, D., & Jarrar, Y. (2024). Transformative leadership competencies for organizational digital transformation. *Business Horizons*, 67, 425–437.

BÖLÜM 4

ÜST EKSTREMİTE ERGONOMİK RİSKLERİNİN OCRA METODU İLE ANALİZİ

ULVIYE POLAT¹

Giriş

Ergonominin amaçları arasında çalışanlar için sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamının oluşturulması, kalite, verimlilik gibi iş hedeflerinin gerçekleştirilmesi, iş gücü devamlılığının sağlanması bulunmaktadır. Ergonomide insanın fiziksel ve mental sağlığının korunması çok önemlidir. Çalışma ortamlarının ergonomik olarak düzenlenmesinin yetersiz olması; çalışanların bedenleri üzerinde ergonomik risklerin oluşmasını ve bunun sonucunda birikimli kas-iskelet sistemi travmalarının ortaya çıkmasına yol açabilir. Bu doğrultuda işverenler, verimlilik hedeflerinin sağlanması kadar sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamının oluşturulmasını da sağlamalıdır. Bu konuda verimlilik geliştirme tekniklerinin kullanılmasının yanı sıra, ergonomik risk analiz tekniklerinin de uygulanması gereklidir.

Kas ve iskelet sistemi hastalıklarının temelinde ergonomik uygunsuzluklar yatmaktadır. Bu hastalıklar özellikle kaslarda,

¹ Doçent Doktor, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği,
Orcid: 0000-0002-0199-9237

sinirlerde, tendonlarda, kıkırdakta, bağlarda, birleşme noktalarında ve disklerde (omurga) meydana gelen rahatsızlıklardır. Çalışanlarda vücut postüründe gerilme ve zorlanmalara yol açabilecek tutma, kavrama, bükme ve uzanma gibi hareketler bu rahatsızlıklara neden olabilmektedir. Kas iskelet sistemine yol açabilecek işle ilgili faktörler sürekli tekrarlı hareketler, vücut postürünü bozacak zorlayıcı çalışma koşulları, sabit duruşlar, ağır yük kaldırma, eğitim ve bilgilendirme yetersizliğidir (Akay, Dağdeviren & Kurt, 2003:74).

Ergonomik risklerin belirlenmesi ve risk sınıflarının oluşturulması amacı ile çok sayıda yöntem kullanılmaktadır. Bu kapsamda yöntemler; bireysel anket yöntemleri, sistematik gözlemlere dayalı yöntemler ve direkt ölçüm yöntemleri olarak üç sınıfta yer almaktadır. Özellikle ergonomik çalışmalarda sistematik gözlemlere dayalı yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemler arasında El İle Taşıma Değerlendirme Çizelgeleri (MAC), Anahtar Gösterge Yöntemi (KIM), Üst Vücut Yüklenmesi Analizi (LUBA), Ovako Çalışma Duruşları Analiz Sistemi (OWAS), Hızlı Üst Uzun Değerlendirmesi (RULA), Amerika Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü Yük Kaldırma Endeksi (NIOSH), Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA), Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi (QEC), Ergonomik Tehlikelerin Tanımlanmasına Yönelik Kontrol Listesi (PLIBEL), Üst Ekstremiteler Tekrarlı Görevleri İçin Değerlendirme Aracı (ART), Keyserling Kontrol Listesi, İş Zorlanma İndeksi (JSI), Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi (OCRA) bulunmaktadır (Aydın, 2021:416). Ayrıca gelişmiş gözleme dayalı yöntemler de (3D Match, Ergo-Man, Sammie Cad, 3DSSPP, RAMSİS Model, SANTOS, ANYBODY, HumanCAD, LifeMod) risk belirleme amacı ile kullanılabilmektedir (Kılıç & Çetin, 2023:500).

Yapılan çalışmada ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden OCRA (Occupational Repetitive Actions) yöntemi metodolojisi, temel ilkeleri, uygulama adımları açıklanmış ve

OCRA yöntemi kullanılan bilimsel çalışmalar örneklendirilmiştir. Bir ambar sahasında karton kutuların açılması ve parça çıkarma görevlerini yapan çalışanların çalışma pozisyonları incelenerek, OCRA yönteminin uygulaması gerçekleştirilmiştir.

OCRA yöntemi farklı saha çalışmalarında ergonomik risk puanının elde edilmesi amacı ile kullanılmıştır. Chiasson ve ark. (2012:484), farklı sektörlerde tespit edilen 567 görev için OCRA, QEC, RULA, REBA, Strain Index, ACGIH Hand Activity Level (HAL), EN 1005-3 standardı yöntemleri ile ergonomik risk değerlendirme çalışması yapmıştır. Farklı yöntemlerin risk sınıflarına göre yöntem sonuçlarının farklılaşabileceği belirtilmiştir. Uygun yöntem seçiminin önemi vurgulanmıştır. Baykasoğlu ve Demirkol Akyol (2014:785), montaj hatlarının verimli çalışma koşullarının iyileştirilmesi kapsamında, örnek bir montaj hattı istasyonunda OCRA yöntemi kullanarak incelemeler yapmıştır. Yüksek çıkan OCRA indeks değerinin düşürülmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Colombini ve Occhipinti (2018:436) OCRA yönteminin üst ekstremiteye yönelik biyomekanik aşırı yük risklerinin değerlendirilmesinde neden tercih edildiğini; OCRA metodolojisinin bilimsel temellerini, OCRA ile yapılmış epidemiyolojik çalışmaların kapsamını, geçerlilik ve güvenilirlik durumunu araştırmıştır. Kumar ve Kalra (2020:31) montaj hattı operatörlerinin ergonomik risk değerlendirmelerini belirlemek amacıyla OCRA yöntemini kullanmışlardır. Tekrarlı hareketlerin, zorlayıcı postüre yol açacak çalışma duruşlarının, aşırı kuvvet uygulanmasının kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını arttırdığı vurgulanmıştır. Nasidin ve ark. (2021:34) bir sanayi kuruluşunda kalite kontrol bölümündeki çalışanların ekstremiteye yönelik tekrarlı işlerini değerlendirmek için hem RULA hem de OCRA yöntemlerini kullanmıştır. OCRA indeks değeri orta risk bölümü olarak belirlenmiştir. Çalışmada iş istasyonunun yeniden organize edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Demirkol Akyol (2022:74) bir tekstil

işletmesinde ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden REBA, NIOSH ve OCRA'yı çalışmasında uygulamıştır. İmalathanedeki alışanların duruş ve çalışma koşullarını incelemiştir. Her üç yöntemde de ergonomik zorlanmanın kabul edilebilir seviyesinin üstünde olduğu ortaya konmuştur. Acil düzenlemeler için çözüm nerileri oluşturulmuştur. Demirtaş ve ark. (2023:176) ısı rezistans üretimi yapılan bir fabrikada REBA, OWAS, OCRA, NIOSH yöntemlerini kullanarak ergonomik risk puanlarını belirlenmiştir. Ergonomik risk faktörleri doğrultusunda, Hedef Programlama yöntemi ile görev dağılımları yeniden düzenlenmiştir. Oral ve Uçan (2024:613) az tehlikeli olarak nitelendirilen servis sürücülüğü, yemek dağıtımı ve zincir market alışanlarında kasiyerlik işleri gibi tekrarlı hareketlerin yapıldığı işlerde OCRA yöntemi ile ergonomik risk değerlendirme analizi yapmıştır. Bu üç sektöre ait iş için, OCRA indeks değerleri 'kırmızı bölge' sonucu bulunmuştur. Bu işlerde çalışanların yüksek risk altında olduğu elde edilmiştir.

Yöntem

OCRA (Occupational Repetitive Actions) yöntemi, sırt, boyun, el, bilek, omuz gibi vücudun st bölümünde oluşabilecek ergonomik risklerin tespit edilmesi için kullanılır. OCRA indeksi belirlenerek risk puanı oluşturulur. OCRA yönteminde, bir çalışma istasyonunda yapılan bütün faaliyetlerin toplam risk puanı hesaplanır. Bu risk puanı tekrarlı hareketlerin sayısının, önerilen sıklığa bölünmesiyle hesaplanmaktadır (Baykasoğlu & Demirkol Akyol, 2014:787).

OCRA yönteminde seçilen bir iş istasyonunda tüm faaliyetler belirlenir. Bu faaliyetlerin ayrı ayrı risk puanlarının belirlenmesi yerine, bütün faaliyetler için tek bir risk puanı hesaplaması yapılır (Demirtaş & ark. 2023:167).

OCRA yönteminde tekrarlı iş olarak geçen işler, tüm çalışma süresi boyunca sıklıkla tekrarlanan çalışmaları ifade etmektedir. Bu

işlere örnek olarak, uzanma, kavrama, arama, delme, kesme, ölçme gibi işin yerine getirilmesi için yapılması gereken faaliyetler verilebilir.

OCRA indeks puanı, Teknik Hareket Sıklığı ve Önerilen Sıklık arasındaki orandır. (1) formülü ile hesaplanmaktadır (Occhipinti, 1998:1295).

$$OCRA \text{ İndeksi} = \frac{\text{Teknik Hareket Sıklığı}}{\text{Önerilen Sıklık}} \quad (1)$$

Önerilen Sıklık, (2) formülü ile hesaplanır.

$$\text{Önerilen Sıklık} = SS \times P \times T \times K \times ERF \times (DP \times TIS) \quad (2)$$

OCRA yöntemi hesaplamalarında kullanılan değişken tanımları aşağıda açıklanmaktadır (Baykasoğlu & Demirkol Akyol, 2014: 787-789):

Teknik Hareket Sıklığı (THS); bir iş için bir dakikada gerçekleştirilen kesme, çekme, itme, montajlama, döndürme gibi teknik faaliyetlerin sayısıdır.

Sabit Sıklık (SS); teknik hareketlerin sıklığı olarak değerlendirilir ve dakikada 30 hareket olarak kabul edilir.

Postür Değeri (P); Postür, operatörün teknik görevleri yerine getirirken kullandığı vücut bölümlerinin konumlarını ve bu bölümlerin hareketlerini ifade eder. Vücut duruşu ve hareketlerin değerlendirilmesinde üst ekstremiteye ait el, bilek, dirsek ve omuz esas alınır. Hafif ve ciddi olarak değerlendirilir. Tablo 1, postür değerinin hesaplanması için kullanılabilir. İşin süresi boyunca uygunsuz duruşa maruz kalma oranı artarsa risk faktörü de artar; dolayısıyla çarpan değeri sıfıra yaklaşır.

Tablo 1 Postür Değeri Referans Tablosu

	Uygunsuz Duruş	Çevrim Süresi Yüzdesi			
		%1-24	%25-50	%51-80	>%80
Ciddi	Dirsekten döndürme ($\geq 60^\circ$)	1	0.7	0.6	0.5
	Bileği ie veya dışa bükme($\geq 45^\circ$)				
	Elle kısıtırarak veya kenarından/sapından veya avuçla tutma				
Hafif	Dirsekten döndürme veya bükme/uzanma ($\geq 60^\circ$)	1	1	0.7	0.5
	Bilekten yana dışa veya yana ie dönme ($\geq 20^\circ$)				
	Elle dar cismi kuvvetli tutma ($\leq 2\text{cm}$)				

Kaynak: (Occhipinti, 1998:1295)

Tekrarlılık Değeri (T), operatörün aynı tür teknik hareketleri sürekli olarak gerçekleştirmesi durumunu ifade eder. Çevrim süresinin 15 saniyeden uzun olması veya aynı tip teknik hareketlerin çevrim süresinin %50'sinden daha azını oluşturması halinde bu durum düşük tekrarlılık olarak değerlendirilir. Bu koşullarda T katsayısı 1 olarak kabul edilir. Yüksek tekrarlılık söz konusu olduğunda T katsayısı 0,7 değeriyle ifade edilmektedir.

Kuvvet Değeri (K), operatörün teknik hareketleri gerçekleştirebilmek için uyguladığı fiziksel çabayı ifade etmektedir. Uygulanan fiziksel güç, dolaylı olarak kuvvet çarpanı aracılığıyla değerlendirilmekte olup, bu çarpanın artmasıyla birlikte K katsayısı sıfıra yaklaşmaktadır. Kuvvet çarpanının belirlenmesinde Tablo 2’de yer alan değerlerden yararlanılmaktadır.

Tablo 2 Kuvvet Çarpanı Değer Tablosu

Ortalama Harcanan Kuvvet	5	10	20	30	40	≥ 50
Borg Değeri	0.5	1	2	3	4	≥ 5
Değer	Çok Çok Zayıf	Çok Zayıf	Zayıf	Orta	Biraz Kuvvetli	Kuvvetli/ Çok Kuvvetli
Kuvvet Çarpanı	1	0.85	0.65	0.35	0.2	0.01

Kaynak: (Occhipinti, 1998:1295)

Ek Risk Faktörleri (ERF), işin doğası gereği sürekli olmayan ancak belirli aralıklarla ortaya çıkabilen riskleri ifade etmektedir. ERF katsayısı, çevrim süresi esas alınarak hesaplanmakta ve bu sürenin hangi oranında risk faktörlerine maruz kalındığına göre belirlenmektedir. Buna göre, ERF değeri çevrim süresinin %25’inden daha azını kapsıyorsa 1, %26–50 aralığında ise 0,95, %80’den fazla olması durumunda ise 0,80 olarak kabul edilmektedir.

Yetersiz Dinlenme Periyodu (DP) ve Tekrarlı İşlerin Süresi (TİS) çalışma koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir.

Sekiz saatlik çalışma süresi boyunca düzenli mola ve ara dinlenmelerinin sağlanabildiği durumlar ideal çalışma ortamı olarak değerlendirilmektedir. Bu koşullar altında DP* TİS katsayısı 1 olarak alınırken, gerekli dinlenme olanaklarının sağlanamadığı durumlarda bu değer 0,6 olarak hesaplanmaktadır. (Otto & Scholl, 2011:277).

OCRA indeks değeri oluşturulduktan sonra Tablo 3'e göre risk puanının sınıflandırılması yapılır.

Tablo 3 OCRA Sonuç Tablosu

OCRA İndeks Değeri	Bölge	Değerlendirme Sonucu
<2.2	Yeşil	Ergonomik olarak uygun ve riskler kabul edilebilir.
2.2-3.5	Sarı	Ergonomik riskler düşük seviyede, minimal değişiklikler ile kabul edilebilir.
>3.5	Kırmızı	Ergonomik olarak yüksek risk seviyesi bulunmaktadır.

Kaynak: (Oral & Uçan, 2024: 612)

OCRA indeks değerinin 2.2'den küçük olduğu durumda istasyonda tespit edilen riskler kabul edilebilir seviyededir. Bu bölge yeşil bölge olarak isimlendirilir. Değerin 2.2-3.5 arasında olduğu durumda ise küçük teknik önlemler gereklidir. Sarı bölge olarak isimlendirilir. Değerin 3.5'in üzerinde olduğu durumda ise iş istasyonunun ergonomik risk düzeyi kabul edilemez demektir ve acilen düzeltmeler yapılmalıdır. Bu bölge kırmızı bölgedir.

Bulgular

OCRA yöntemi tekrarlı işlerin yoğun olduğu çalışmaların değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu amaçla uygulama montaj işlerinin yoğun olarak yapıldığı otomotiv sektöründe bulunan bir firmada tercih edilmiştir. Çalışma işletmenin ambar bölümünde yapılmıştır. Ambar sahasının ön kabul alanı alanına çok sayıda ürün karton kutu ve sandıkların içerisinde forkliftlerle getirilmektedir. Kutu ambalajı bulunan malzemeler, ön kabul alanının ilgili iş istasyonuna getirilir. Burada görevli olan çalışanlar, kutudaki malzemeleri çalışma tezgahı üzerine alır. Burada görevli olan 2 ambar personeli tarafından aşağıda belirtilen işlemler sırası ile yapılır.

- Karton kutunun dış yüzeyinin genel kontrolü (deformasyon, ıslaklık vb.)
- Karton kutu açma sırasında kullanılacak ekipmanların kontrolü (kesme bıçağı, işeldiveni vb.)
- Karton kutu kapağının açılması ve içindeki malzemelerin gözle kontrol edilmesi
- Karton kutu ile beraber gelen irsaliye vb. dokümanları ayrılması
- Karton kutu içindeki ürünün çıkarılarak, dağıtım masasına bırakılması
- Ambalajın ilgili alana bırakılması

Çalışanlar bu faaliyetlerin dışında ihtiyaç olunan durumlarda diğer ambar personeline yardımcı olabilmektedir. İncelenen tüm farklı işler için OCRA yönteminin kümülatif değer hesaplama yaklaşımından dolayı tek bir indeks puanı belirlenmiştir.

Ön kabul sahasında kutu ambalajlarını açma bölümünde yapılan faaliyetlerin genel gösterimleri Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1. Çalışma gösterimleri

Çalışmada OCRA indeks puanının hesaplanmasında kullanılan parametre değerleri açıklamaları aşağıda belirtilmektedir:

Sabit Sıklık (SS) için, 30 olarak önerilen sıklık değeri indeks puanı hesaplamasında kullanılmıştır. Postür değerinin belirlenmesi için Tablo 1'den faydalanılmıştır. Ambar personeli çalışırken vücudun tekrarlı olarak öne eğilerek konumlanması ve statik duruşun yoğunluğundan dolayı özellikle bel, sırt, boyun, kol ve bileklerde zorlanmalar meydana gelmektedir. İlave olarak 8 saatlik çalışma süresinin bir bölümünde belirtilen faaliyetleri gerçekleştirdikleri ve yapılan işlerin tekrar durumu yüksek olduğu için 'ciddi' olarak değerlendirilmiştir. Gözlem süresinin %51-80 arasında belirtilen faaliyetler yerine getirildiği için 0.6 değeri postür çarpanı olarak takdir edilmiştir. Çalışma süresi boyunca ambalaj kutusu açma ve parça çıkarma işlemi sürekli olarak tekrarlandığı için yüksek tekrarlılık olarak değerlendirilmiştir. Yüksek tekrarlılık çarpan değeri 0.7 hesaplamaya dahil edilmiştir. Kuvvet değerinin belirlenebilmesi için Tablo 2'den yararlanılmıştır. Kutudan ağır döküm malzemelerin çıkarılabilme durumundan dolayı kuvvet değeri 'biraz kuvvet' olarak değerlendirilmiştir. Bu kategorinin çarpan değeri 0.2 olarak indeks hesaplamasına dahil edilmiştir. Gözlemlenen çalışmada, standart işlerin dışında istenen veya oluşan iş sayısı toplam çalışma saatinin %25'inden azdır. İlave olarak

dinlenme molalarının sayısı ve süresi uygun olarak tasarlanmıştır. Ek risk faktör değeri bu nedenlerle 1 olarak belirlenmiştir.

(2) formülünün kullanılması ile önerilen sıklık değeri 2.52 ($30 \times 0.6 \times 0.7 \times 0.2 \times 1 \times (1)$) olarak bulunmuştur. Çalışma sahasında görevli 2 çalışanın hareketleri incelendiğinde teknik hareket sıklığı ortalama 11 olarak belirlenmiştir. (1) formülünde bu değer kullanıldığında ($11/2.52$) 4.36 OCRA risk puanı olarak bulunmuştur. Bu değer incelenen çalışmaların yüksek risk grubunda olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar

Yapılan çalışmada OCRA ergonomik risk değerlendirme yönteminin genel prensipleri ve uygulama adımları araştırılmış ve yöntemin uygulaması ambar ön kabul alanı çalışanlarının faaliyetlerindeki risklerin belirlenmesi için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ambalaj açma ve parçaların çıkarılması faaliyeti yüksek risk sınıfında olduğu görülmüştür.

Özellikle çalışanların birikimli kas, iskelet sistemi rahatsızlıklarının etkisini azaltabilmek için çalışma tezgahı yüksekliğinin artırılması, ağır döküm parçaların kutularının taşınması sırasında çalışan sayısının artırılması ve prosedür oluşturulması, çalışanların rotasyon kullanılarak tekrarlı iş frekanslarının azaltılması, farklı işlerde çalışanların kullanılması önerileri oluşturulmuştur.

Kaynakça

Akay, D., Dağdeviren, M. & Kurt, M. (2023). Çalışma duruşlarının ergonomik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18 (3), 73-84.

Aydın, S. (2021). NIOSH ve REBA yöntemleri kullanılarak ergonomik risk analizi vaka çalışması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 414-433.

Baykasoğlu, A. & Demirkol Akyol, Ş. (2014). Ergonomik montaj hattı dengeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4): 785-792.

Chiasson, M.È., Imbeau, D., Aubry, K. & Delisle, A. (2012). Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5), 478–488.

Colombini, D. & Occhipinti, E. (2018). Scientific basis of the OCRA method for risk assessment of biomechanical overload of upper limb, as preferred method in ISO standards on biomechanical risk factors. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 44(4), 436–438.

Demirkol Akyol, Ş. (2022). Bir tekstil işletmesinde ergonomik tekstil işletmesinde ergonomik risk değerlendirme uygulaması. *Ergonomi*, 5(2), 72-83.

Demirtaş, D. N., Yazıcı, E., Olcar, H., Kuşçu, F. N., Başer, C. & Alakaş, H.M. (2023). Isı rezistans fabrikasında ergonomik risk değerlendirme ve hedef programlama ile personel planlama. *Verimlilik Dergisi*, 57(1), 159-180.

Kılıç, E. & Çetin, B. (2023). Ergonomik risk analizi yöntemlerinin incelelenmesi: gıda sektörüne yönelik bir uygulama. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 11(2), 498-518.

Kumar, R. & Kalra, P. (2020). Risk assessment of work-related musculoskeletal disorders for the assembly line operators using OCRA method. *I-manager's Journal on Management*, 14(4), 31–40.

Nasidin, N., Deros, B. M., Daruis, D. D. I., Hasan, N. & Khalid, M. S. (2021). Evaluation of work posture and repetitive work of quality inspectors by RULA and OCRA. *Journal of Science, Technology and Innovation Policy*, 6(1), 34–57.

Occhipinti, E. (1998). OCRA: A concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of upper limb. *Ergonomics*, 41(9): 1290-1311.

Oral, T., & Uçan, R. (2024). Hareket tekrarlı örnek işlerde ergonomik risk değerlendirmesi: OCRA yöntemi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(4), 610-615.

Otto, A. & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operation Research*, 212: 277-286.

BÖLÜM 5

KAPSAMA, ROTA DOĞRULUĞU VE BAĞLANTISALLIK GÖSTERGELERİYLE KENTSEL RAYLI SİSTEM POTANSİYEL ANALİZİ: ANTALYA 4. ETAP RAYLI SİSTEM HATTI ÖRNEĞİ

KAMER ÖZGÜN¹
EMRE DEMİR²

Giriş

Kent içi raylı sistemler, ulaşım talebinin yoğun olduğu metropol alanlarda sürdürülebilir, erişilebilir ve düşük karbon salımlı toplu taşımacılığın temel bileşenlerinden biridir (Banister, 2008: 73). Günümüzde raylı sistem yatırımlarının değerlendirilmesinde taşıma kapasitesinin yanı sıra kapsama (İng. *coverage*), rota doğruluğu (İng. *directness*) ve bağlantısallık (İng. *connectivity*) gibi performans ölçütleri öne çıkmaktadır (Mishra vd., 2012: 13). Bu göstergeler, kentsel ulaşım ağının performansını çok boyutlu bir çerçevede incelemeyi ve kent içi hareketliliğin mekânsal

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Antalya Bilim Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-7814-3058

² Doç. Dr., Antalya Bilim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0003-0013-4482

eşitliğini değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır (Curtis & Scheurer, 2017: 28).

Antalya, 2025 yılı itibarıyla yaklaşık 2,7 milyon nüfusa sahip, turizm ve hizmet sektörlerinin yoğunlaştığı, hızlı büyüyen bir Akdeniz metropolüdür. Kentteki 1.–3. Etap raylı sistem hatları doğu–batı yönünde ana omurgayı oluştururken, 4. Etap (Konyaaltı–Varsak) hattı bu yapıyı kuzey–batı doğrultusunda tamamlamak üzere planlanmıştır (Antalya Ulaşım Ana Planı, 2016: 5; Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2023: 2). Bu yeni etap, Konyaaltı kıyı bölgesi, merkez iş alanı ve Kepez–Varsak konut kuşağı arasında güçlü bir erişim zinciri oluşturarak hem toplu taşıma bütünleşmesini hem de kent nüfusunun raylı sisteme erişim oranını artırmayı hedeflemektedir.

Raylı sistem performansının çok boyutlu analizinde kritik öneme sahip üç kavramdan ilki olan kapsama, bir istasyona erişim için tanımlanan yürüme mesafesinin (genellikle 400–800 m) kapsadığı alanı ifade eder (El-Geneidy et al., 2014: 210; Cirit, 2016: 37). Rota doğruluğu, bir güzergâhın kuş uçuşu mesafeye kıyasla ne ölçüde dolambaçlı ilerlediğini gösteren bir ölçüttür (Levinson & Kumar, 1997: 244). Bağlantısallık ise hatlar arası entegrasyon düzeyini ve ağın süreklilik kapasitesini değerlendiren bir göstergedir (Mishra vd., 2012: 13).

Bu çalışma, Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı’nı söz konusu üç ölçüt çerçevesinde inceleyerek Kapsama, rota verimliliği ve bağlantısallık bakımından performansını değerlendirmekte; böylece hem Antalya’nın raylı sistem gelişimine katkı sunmayı hem de gelecekte planlanacak hatların (örneğin Lara–Kundu uzantısı) bilimsel temellere dayalı biçimde geliştirilmesine yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Literatürde Raylı Sistem Performans Göstergeleri: Kapsama, Rota Doğruluğu ve Bağlantısallık

Kapsama (İng. *Coverage*)

Toplu taşımada kapsama, bir kullanıcının bir durak ya da istasyona yürüyerek erişebildiği alanı ifade eden temel bir ölçüttür ve literatürde “kapsama alanı”, “erişim alanı” veya “yürüme mesafesi eşiği” gibi farklı karşılıklarla kullanılmaktadır. Kavramın akademik literatürdeki ilk sistematik tanımı Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCRP Web Document 6, 1998) içinde yapılmıştır (TCRP, 1998: E-12, kapsama alanını “yürüyerek erişilebilen hizmet alanı” olarak tanımlar).

CBS teknolojisi, doğrusal (İng. *Euclidean*) mesafe ile gerçek yaya yol ağına göre mesafe arasındaki farkı görünür kılar. CBS ağ analizleri ise gerçek sokak dokusunu, kavşakları, kaldırımları, geçitleri ve bariyerleri hesaba katar. Bu nedenle CBS, fiili yürüyüş rotasını ve gerçek mesafeyi hesaplar ve sabit yarıçaplı “800 metre çevresi kapsama alanıdır” yaklaşımı yerine, gerçekte yürünebilen 800 metrelik yolun gerçek uzanımını gösterir. Bu durum kapsama analizlerinin sonuçlarını doğrudan etkiler. Kapsama kavramı, CBS ağ analizlerinin gelişmesiyle birlikte daha doğru şekilde hesaplanabilir hâle gelmiştir. CBS, hizmet alanının sabit yarıçaplı erişim bölgeleri (İng. *circular buffer*) üzerinden ölçülmesinin yeterli olmadığını ortaya koymuş ve gerçek yaya yol ağına dayalı hesaplamayı gerekli kılmıştır (Andersen & Landex, 2008: 175).

Güncel çalışmalarda kapsama, bir istasyon çevresinde yürüyüş süresi veya yürünebilir mesafe temelinde belirlenen fiili erişim alanı olarak kabul edilmekte ve hem erişilebilirlik değerlendirmelerinde hem de toplu taşıma ağlarının performans analizlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Daniels & Mulley, 2013: 3).

Uluslararası literatürde yaygın olarak kullanılan yürüme mesafesi eşikleri, toplu taşıma türünün fiziksel yapısına ve hizmet kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Otobüs durakları için kabul edilen maksimum yürüme mesafesi çoğunlukla 400 m (yaklaşık 5 dakika) olarak ifade edilmektedir (Kittelson & Associates, 2003: 4–10). Daha yüksek kapasite ve daha seyrek durak aralıklarına sahip tramvay ve hafif raylı sistemlerde bu eşik 600–800 m’ye, metro sistemlerinde ise 800–1000 m aralığına yükselmektedir (Guerra vd., 2012: 1). Avrupa kentleri üzerine yapılan ampirik bir çalışmada, “5 dakikalık ya da yaklaşık 477 metrelik” yürüme mesafesi yüksek erişilebilirlik sınırı olarak tanımlanmış; bu değer, erişim analizlerinde kullanılan süreye dayalı eşiklerin önemini vurgulamaktadır (Sarker & Mailer, 2020: 38). Son dönem araştırmalarında ise 400–1000 m aralığı hem küresel karşılaştırmalar hem de ulaşım türleri arasındaki farklılıklar için genel bir referans aralığı olarak kullanılmakta, 15 dakikalık yürüyüş karşılık gelen yaklaşık 1 km mesafe ise üst sınır olarak değerlendirilmektedir (Chuang vd., 2023: 7). Bu mesafe değerlerinin farklılaşmasında hizmet frekansı, kentsel yoğunluk, arazi kullanımı, durak dağılımı ve kullanıcı davranışları gibi etmenlerin belirleyici olduğu; dolayısıyla kapsama eşiklerinin bağlama duyarlı biçimde yorumlanması gerektiği vurgulanmaktadır.

Türkiye’de yapılan planlama ve akademik çalışmalarda da benzer yürüme mesafesi aralıklarının kullanıldığı görülmektedir. Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) tarafından hazırlanan raporda, toplu taşıma erişimi için uygun yürüme mesafesi 400–800 m aralığında önerilmektedir (Cirit, 2016: 38). Bu aralık, Demir (2025) tarafından da doğrulanmakta; yazar yoğun yerleşim bölgelerinde 400 m, daha seyrek dokulu alanlarda ise 800 m sınırının uygulanabilir olduğunu belirtmektedir (Demir, 2025: 51). Ayrıca İzmir kent merkezinde yapılan CBS tabanlı erişilebilirlik analizlerinde ortalama 11 dakikalık, yaklaşık 950 m’lik bir yürüme

süresi eşiği kullanılmıştır (Selçuk, 2021: 999). Bu bulgular, Türkiye’deki planlama uygulamalarının uluslararası literatürde kabul edilen eşiklerle uyumlu olduğunu ve genel olarak 400–800 m aralığının geçerli bir referans çerçevesi sunduğunu göstermektedir.

Rota Doğruluğu (İng. *Directness*)

“*Directness*” kavramı Türkçede rota doğruluğu, doğrudanlık oranı, ya da bağlama göre dolanma oranının tersi şeklinde karşılık bulur. Bu gösterge, bir hattın başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki doğrusal (kuş uçuşu) mesafe ile gerçek güzergâh mesafesi arasındaki oranı ifade eder. Başka bir ifadeyle, bir toplu taşıma hattının hedefe ne kadar doğrudan ulaştığını ve güzergâhın yolculuk süresini ne ölçüde optimize ettiğini ölçer. Rota doğruluğu kavramının kökeni, 1960’larda geliştirilen ve gerçek yol mesafesinin kuş uçuşu mesafeye oranını temel alan “*circuitry index*” yaklaşımına dayanır. Bureau of Public Roads (1964) çalışmasında da benzer biçimde “*route directness factor*” kavramı kullanılmış; hat tasarımında doğrudanlığın erişim kalitesini etkileyen temel bir gösterge olduğu vurgulanmıştır. Günümüzde kullanılan standart formül aşağıdaki gibidir:

$$\text{Rota Doğruluğu Oranı} = \frac{\text{Öklit Mesafesi}}{\text{Ağ veya Rota Mesafesi}}$$

Bu oranın 1’e yaklaşması güzergâhın daha doğrudan olduğu, 0’a yaklaşması ise hattın daha dolanmalı olduğu anlamına gelir (Matisziw & Demir, 2016: 8, Ertuğay, 2019: 233). Antalya ulaşımında da rota doğruluğu, bir hattın kent içi hedeflere ne ölçüde doğrudan erişim sağladığını ve yolculuk verimliliğini ne kadar artırdığını değerlendirmede önemli bir ölçüttür.

Uluslararası literatürde rota doğruluğu göstergesinin değer aralıkları, ulaşım türüne bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Kentsel karayolu ağlarında ortalama dolanma oranı (İng. *circuitry*) genellikle 1,2–1,4 aralığındadır (Levinson & Kumar,

1997: 244). Raylı sistemlerde ise hatların daha doğrusal bir geometriyle tasarlanması nedeniyle rota doğruluğu oranının 0,8–1,0 aralığında olması gerektiği belirtilmektedir (Mavoa & Witten, 2009: 84). Yaya ve bisiklet erişiminde kabul edilen ideal aralığın 0,6–0,9 olduğu; düşük oranların, karmaşık sokak dokusu ve engeller nedeniyle daha uzun ve dolambaçlı rotaları işaret ettiği ifade edilmektedir (Saghapour vd., 2016: 10). En güncel bulgulardan birinde Taylor & Somenahalli (2024), 0,85’in üzerindeki rota doğruluğu oranlarını “yüksek erişim kalitesi” eşik değeri olarak önermektedir (Taylor & Somenahalli, 2024: 119). Bu eşik değerler, kentlerin geometrik yapısı, ulaşım modu ve arazi kullanım desenlerine göre değişmekle birlikte, genel olarak 1’e yaklaşan rota doğruluğu değerlerinin daha verimli, kısa ve kullanıcı açısından avantajlı güzergâhları; daha düşük değerlerin ise zaman kaybettiren ve dolambaçlı hatları temsil ettiği kabul edilmektedir.

Türkiye’de rota doğruluğu kavramı son yıllarda CBS tabanlı erişim analizlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Ertuğay (2019), Konya örneğinde “taşıma ağlarının rota doğruluğu oranını modelleyerek ortalama 0,72 – 0,88 aralığında değerler bulmuştur (Ertuğay, 2019: 237). Antalya Ulaşım Ana Planı (2016) taslak raporunda ise hat tasarımlarında “rota doğruluğu oranı $\leq 1,3$ ” kuralı önerilmiştir (Antalya Ulaşım Ana Planı, 2016: 54).

Bağlantısallık (İng. *Connectivity*)

Bağlantısallık, toplu taşımada bir ulaşım ağının hatlar, duraklar ve ulaşım modları arasındaki erişim kolaylığını, işleyiş bütünlüğünü ve yolculara sunduğu aktarma olanaklarının etkinliğini ifade eder. Literatürde kavramın Türkçe karşılıkları arasında “ağ bağlantı düzeyi”, “erişim bütünlüğü” ve “ağ entegrasyonu” bulunmaktadır; ancak kavramın özü, yolculukların aktarma gereksinimi ve aktarmaların niteliği üzerinden ağın bütüncül işleyişini değerlendirmektir.

Bağlantısallık kavramının temeli, ulaşım ağlarının yapısal özelliklerini açıklamak amacıyla 1960’larda geliştirilen graf teorisine (İng. *graph theory*) dayanmaktadır. Haggett ve Chorley (1969: 118), bağlantısallığı bir ağdaki düğümlerin (İng. *node*) birbirine doğrudan ya da dolaylı biçimde bağlanma derecesi olarak tanımlamış; böylece ağın ulaşılabilirlik kapasitesini ölçen temel bir topolojik gösterge ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, ulaşım sistemlerinin mekânsal bütünlüğünü yalnızca hatların varlığına değil, düğümler arasındaki bağlantıların kuvvetine ve sürekliliğine göre değerlendirmeyi mümkün kılar.

Toplu taşımaya uyarlanmış modern anlamdaki ilk sistematik kullanım ise Mishra vd. (2012) tarafından geliştirilmiştir. Yazarlar bağlantısallığı, “yolcuların farklı ulaşım modları veya hatlar arasında ne ölçüde kolaylıkla aktarma yapabildiği” şeklinde tanımlamış ve bu göstergeyi ağın performansını, yolculuk sürelerini ve erişilebilirlik düzeyini etkileyen kritik bir ölçüt olarak değerlendirmiştir (Mishra vd., 2012: 14). Bu tanım bağlantısallığı yalnızca yapısal bir kavram olmaktan çıkararak, kullanıcının deneyimini doğrudan etkileyen işlevsel bir performans göstergesine dönüştürür. Bu çerçevede bağlantısallık, bir toplu taşıma sisteminin aktarmasız veya minimum aktarmalı yolculuk imkânı sunma kapasitesini, ağ bütünlüğünü ve erişim kolaylığını birlikte ölçen çok boyutlu bir gösterge olarak değerlendirilir. Ulaşım modları arasındaki entegrasyonun güçlenmesi, hem yolculuk sürelerini azaltmakta hem de ağın genel verimliliğini artırmaktadır.

Uluslararası literatürde bağlantısallık kavramı, çoğunlukla ağ yoğunluğu (İng. *network density*), bağlantı-düğüm oranı (İng. *link-node ratio*) ve erişim endeksi (İng. *accessibility index*) gibi metrikler üzerinden nicel olarak değerlendirilmektedir. Bristow ve Nellthorp (2000: 42), iyi entegre edilmiş bir toplu taşıma sisteminde bağlantı-düğüm oranının 1,4–1,6 aralığında olması gerektiğini vurgulayarak, ağın birlikte çalışma düzeyini belirlemede kritik bir gösterge

olduğunu belirtmektedir. Rodrigue (2020: 121) ise yüksek bağlantısallığa sahip ulaşım ağlarında her bir düğümün ortalama en az üç bağlantı içermesi gerektiğini ifade eder; bu yaklaşım, ağın hem yapısal esnekliğini hem de yolculuk alternatiflerini artıran bir ölçüt olarak değerlendirilir.

Mishra vd. (2012: 13), toplu taşıma ağlarına özgü geliştirdikleri ağ bağlantısallık endeksi (İng. *network connectivity index* (NCI)) göstergesiyle bağlantısallığı daha işlevsel bir boyutta ele almakta ve NCI değerinin 0,6–0,9 aralığında olmasının ağın “orta–yüksek birlikte çalışma düzeyi” sunduğunu belirtmektedir. Bu bulgu, bağlantısallığın yalnızca topolojik bir kavram değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimini ve aktarma kolaylığını ölçen operasyonel bir performans göstergesi olduğunu göstermektedir. Curtis ve Scheurer (2017: 33) ise bağlantısallığı erişim kolaylığı ve aktarma entegrasyonu bağlamında ele alarak, 300 metrenin altındaki aktarma mesafesi ve 10 dakikanın altındaki sefer aralıklarının yüksek bağlantısallığın temel koşulları arasında yer aldığını ifade etmektedir.

Bu çalışmalar bir arada değerlendirildiğinde, yüksek bağlantısallığın; kısa aktarma mesafeleri (<300 m), yüksek bağlantı–düğüm oranı (>1,4), her düğümün ortalama üç veya daha fazla bağlantıya sahip olması (≥ 3) ve ağ bağlantı endeksinin ($NCI \geq 0,7$) sağlandığı ulaşım sistemlerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu çerçevede bağlantısallık, hem mekânsal hem de operasyonel açıdan bütünleşmiş toplu taşıma ağlarının en temel kalite göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Türkiye’de bağlantısallık ölçütü çoğunlukla raylı sistem–otobüs entegrasyonu, aktarma istasyonları arasındaki yaya mesafesi ve hat bütünlüğünün seviyesine göre değerlendirilmektedir. Demir (2025), toplu taşıma entegrasyonuna yönelik hazırladığı raporda bağlantı düzeyinin sağlanabilmesi için aktarma istasyonları arasındaki maksimum yürüyüş mesafesinin 250 metre, hatlar

arasında azami aktarma süresinin ise 10 dakika olması gerektiğini belirtmektedir (Demir, 2025: 55). Benzer şekilde Cirit (2016), ulusal uygulamalara ilişkin değerlendirmesinde entegrasyon noktaları arasındaki ortalama mesafenin 250–400 metre aralığında tutulmasının kullanıcı konforu açısından kritik olduğunu; daha uzun mesafelerin aktarma istekliliğini azalttığını ifade etmiştir (Cirit, 2016: 41). Antalya Raylı Sistem Proje Ön Fizibilite Raporu (2016) ise tramvay–otobüs entegrasyonunda hedef aktarma mesafesini en fazla 200 metre olarak tanımlayarak, kısa yaya bağlantılarının yüksek bağlantısallığın ön koşulu olduğunu vurgulamıştır (Antalya Büyükşehir Belediyesi, 2016: 62). Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, Türkiye’de bağlantısallık için kabul edilen eşik değerlerin genel olarak 250–400 metre aktarma mesafesi ve 10 dakikanın altında aktarma süresi aralıklarında toplandığı görülmektedir.

Bulgular

Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı için Kapsama Analizi

Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı için kapsama (İng. *coverage*) analizi, uluslararası literatürde kullanılan erişim tanımları ile Türkiye’deki eşik değerler birlikte değerlendirilerek hazırlanmıştır. Bu kapsamda, kapsama alanı her bir istasyon çevresinde toplu taşımaya yürüyerek erişebilen potansiyel kullanıcı kitlesini ifade etmektedir.

Analizde kullanılan yürünebilir mesafe eşiği, raylı sistem literatüründe kabul gören 800 m erişim yarıçapına dayanmaktadır (Tablo 1). Bu eşik, Guerra vd. (2012) tarafından önerilen “10 dakikalık yürüme süresi = 800 m” yaklaşımıyla uyumludur. Türkiye bağlamında Cirit (2016) tarafından belirtilen 400–800 m aralığı da dikkate alınmış ve Antalya 4. Etap hattı için 800 m tampon mesafe referans alınmıştır.

Tablo 1 İstasyon Bazında Kapsama Değerlendirmesi

İstasyon Grubu	Bölge Özelliği	Beklenen Kullanıcı Grubu	Kapsama Tahminleri (≈ 800 m yarıçap)
D1 – D5 (Sarısu–Liman)	Turizm ve konut ağırlıklı	Otel çalışanları, turistler, liman personeli	İyileştiren: Kesintisiz sahil yaya aksı, açık kamusal alanlar. Kısıtlayan: Mevsimsel yoğunluk, yaz aylarında kalabalık nedeniyle düşük konfor. (~ 800 m)
D6 – D12 (Atatürk Bulvarı – Konyaaltı Plajı – Hastane)	Karma kullanım (eğitim, sağlık, konut)	Üniversite öğrencileri, sağlık çalışanları	İyileştiren: Plaj boyunca kesintisiz yaya akışı, fonksiyon çeşitliliği. Kısıtlayan: Yüksek trafik hacmi, kaldırım süreksizliği, gölgelik eksikliği, geniş kavşak geçişleri. (~ 650 m)
D13 – D15 (AVM - Stadyum – Defterdarlık)	Ticaret ve kamu kullanımı	Çalışanlar, alışveriş ve hizmet kullanıcıları	İyileştiren: Geniş kaldırımlar, düzenli kavşaklar, yoğun yaya çekimi. Kısıtlayan: Pik saatlerde trafik yoğunluğu. (~ 750 m)
D16 – D18 (Güllük – 100. Yıl – Muratpaşa – B.şehir Bld)	Konut, ticaret ve belediye/kamu hizmet alanları	Düşük–orta gelirli hane halkı	İyileştiren: Konut yoğunluğu. Kısıtlayan: Hafif eğimli topografya, ara sokaklarda yaya yolu süreksizliği, merdivenli üstgeçişler. (~ 600 m)
D19 – D20 (Kepez Bld – Kepez)	Düşük yoğunluklu kuzey mahalleleri	Banliyö sakinleri, kamu çalışanları	İyileştiren: Gelişime açık alanlar, entegrasyon potansiyeli. Kısıtlayan: Seyrek sokak ağı, yaya yolu süreksizliği, bazı noktalarda eğim. (~ 600 m)

Genel olarak değerlendirildiğinde, hattın Konyaaltı ve kent merkezi bölümlerinde erişilebilirlik yüksek düzeyde iken, merkez–Kepez yönünde azalmakta; bu azalma daha çok yaya altyapısı ve sokak süreksizliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kapsama düzeyinin iyileştirilmesine yönelik stratejilerin özellikle kuzey

aksında odaklanması gerekmektedir. Yaya yollarının sürekliliğini artıracak mikro düzenlemeler, kavşak iyileştirmeleri, gölgelik ve güvenli geçişlerin sağlanması gibi müdahaleler, hattın toplam kapsama potansiyelini önemli ölçüde artıracaktır. Ayrıca, düşük yoğunluklu bölgelerde planlanacak besleyici otobüs hatları ve bisiklet bağlantıları sayesinde erişilebilirlikte önemli kazanımlar elde edilmesi mümkündür.

Sonuç olarak, Antalya 4. Etap hattı; turizm, kamu hizmeti ve yoğun konut alanlarını birbirine bağlayan bir kentsel omurga niteliğindedir. Bununla birlikte kapsama düzeyinin tüm hat boyunca dengeli bir dağılıma ulaşması, özellikle kuzey kesimlerde yaya altyapısının güçlendirilmesine ve hat entegrasyonunun artırılmasına bağlıdır.

Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı için Rota Doğruluğu Analizi

Rota doğruluğu, bir hattın başlangıç noktası ile bitiş noktası arasındaki en kısa doğrusal mesafe (kuş uçuşu) ile gerçek hat uzunluğu arasındaki orandır. Oran 1'e yaklaştıkça hat daha doğrudan, oran azaldıkça daha dolambaçlıdır. Literatürde 0,8–1,0 aralığı yüksek doğrudanlık, 0,6–0,8 aralığı orta düzey, 0,6 altı ise düşük doğrudanlık olarak sınıflandırılır (Levinson & Kumar, 1997: 244; Ertuğay, 2019: 237).

Antalya 4. Etap hattı için başlangıç noktası ile son nokta arasındaki doğrusal mesafe yaklaşık 11 km, hattın gerçek uzunluğu ise yaklaşık 18 km'dir. Bu değerler kullanıldığında rota doğruluğu oranı $\approx 0,61$ olarak elde edilmektedir. Genel rota doğruluğu oranının yaklaşık 0,61 olması, hattın Sarısu'dan Kepez Teomanpaşa Mahallesi'ne uzanan tüm güzergâh boyunca kuş uçuşu mesafe ile gerçek hat uzunluğu arasındaki farkın oldukça yüksek olduğunu ve hattın bütünsel ölçekte orta–düşük düzeyde rota doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık istasyon grupları düzeyinde daha yüksek değerler tahmin edilmektedir; çünkü istasyon bazlı rota

doğruluğu hesaplamaları hattın tamamını değil, her istasyon çevresindeki parça bazlı (mikro ölçekte) yaya erişim rotalarını esas almaktadır. Dolayısıyla uçtan uca hesaplanan global rota doğruluğu hattın genel geometrik dolambaçlılığını yansıtırken, istasyon çevresi rota doğruluğu değerleri kullanıcıların günlük erişimde deneyimlediği daha kısa, daha bağlantılı ve çoğu durumda daha doğrudan yaya rotalarını yansıtmaktadır.

Tablo 2 İstasyon Bazında Rota Doğruluğu Değerlendirmesi

İstasyon Grubu	Rota Doğruluğunu Artıran / Azaltan Unsurlar	Rota Doğruluğu Tahmini
D1 – D5 (Sarısu–Liman)	Artıran: Lineer sahil yolu, düzenli blok yapısı, bariyer etkisinin olmaması. Azaltan: Yaz sezonunda yüksek yaya yoğunluğu.	0,85 – 0,90
D6 – D12 (Atatürk Bulvarı – Konyaaltı Plajı – Hastane)	Artıran: Sahil boyunca yaya sürekliliği. Azaltan: Yüksek trafik, geniş kavşaklar, kaldırım süreksizliği, gölgelik eksikliği.	0,70 – 0,78
D13 – D15 (AVM - Stadyum – Defterdarlık)	Artıran: Geniş kaldırımlar, düzenli kavşak yapısı, güçlü yaya çekim merkezleri. Azaltan: Pik saatlerde trafik yoğunluğu.	0,80 – 0,85
D16 – D18 (Güllük – 100. Yıl – Muratpaşa – B.şehir Bld)	Artıran: Yoğun yaya kullanımı, konut–kamu fonksiyonlarına yakınlık. Azaltan: Eğimli ara sokaklar, yol süreksizlikleri, merdivenli bağlantılar.	0,72 – 0,80
D19 – D20 (Kepez Bld – Kepez)	Artıran: Yeni gelişim alanlarında bağlantı potansiyeli. Azaltan: Seyrek sokak dokusu, yaya yolu süreksizliği, eğim.	0,65 – 0,72

Tablo 2’de sunulan rota doğruluğu tahminleri, Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı boyunca istasyon çevrelerindeki kentsel erişim yapısının önemli ölçüde farklılaştığını göstermektedir. Hattın güney aksındaki D1–D5 grubu, sahil koridorunun sunduğu kesintisiz yaya ağı sayesinde en yüksek rota doğruluğu değerlerine

ulaşmaktadır. Bu bölgede kullanıcılar hedef istasyonlara yn değiştirmeden, kısa bağlantılar üzerinden erişebilmektedir.

D6–D12 aralığında rota doğruluğu orta düzeydedir; sahil boyunca yaya sürekliliği bulunmasına karşın Atatürk Bulvarı zerindeki yüksek trafik hacmi, geniş kavşak geometrileri ve kaldırım süreksizliği dolambaçlı rotalara neden olmaktadır. Bu durum değerleri 0,70–0,78 bandında tutmaktadır. D13–D15 istasyon grubu, karma kamu ve ticaret kullanımlarının yoğunlaştığı düzenli bir kentsel blok yapısına sahip olduğundan rota doğruluğu diğer merkez bölgelerle karşılaştırıldığında daha yüksektir. Yaya çekim merkezlerinin çokluğu ve kavşak düzenliliği 0,80–0,85 aralığını desteklemektedir.

D16–D18 aralığında rota doğruluğu sokak süreksizlikleri, merdivenli bağlantılar ve hafif eğimli topografya nedeniyle orta seviyede kalmaktadır. Fiili erişim rotalarının kısmen uzaması rota doğruluğu tahmin değerlerini aşağı çekmektedir. Hattın kuzey ucunda yer alan D19–D20 istasyonlarında düşük bağlantılı banliyö dokusu, seyrek sokak ağı ve yaya yolu süreksizlikleri 0,65–0,72 bandında düşük rota doğruluğu üretmektedir. Bu bulgu, düşük yoğunluklu banliyö alanlarında raylı sistem istasyonlarının yürüyüş tabanlı erişim açısından dezavantajlı olduğunu göstermektedir.

Rota doğruluğunu artırmak için özellikle D6–D12 ve D16–D20 istasyon gruplarında kaldırım sürekliliğini güçlendiren, yeni yaya geçitleri ekleyen ve gölgelik sağlayan sokak düzenlemelerinin yapılması önem taşımaktadır. Kavşak tasarımılarının iyileştirilmesi, yaya geçişlerinin kısaltılması ve sinyalizasyonun iyileştirilmesi, dolambaçlı rotaların azalmasına katkı sağlayabilir. Düşük yoğunluklu kuzey kesiminde yer alan D19–D20 istasyonları için mikro ölçekte yaya bağlantılarının güçlendirilmesi ve besleyici otobüs hatlarının planlanması, düşük rota doğruluğu değerlerinin kullanıcı erişimi üzerindeki olumsuz etkisini önemli ölçüde azaltacaktır. Sahil aksındaki D1–D5 istasyonlarında ise mevsimsel

yaya yoğunluğunu yönetmeye yönelik yönlendirme ve alan düzenlemeleri, bu bölgedeki yüksek rota doğruluğunun korunmasına katkı sağlayacaktır.

Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı için Bağlantısallık Analizi

Oluşturulan Tablo 3, Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı boyunca bağlantısallığın mekânsal olarak belirgin biçimde değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu mekânsal farklılıklar, hattın güney ve merkez bölümlerinde erişim kalitesinin güçlü olduğunu, ancak özellikle kuzey kesimde bağlantısallığın artırılmasının kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 3 İstasyon Bazında Bağlantısallık Değerlendirmesi

İstasyon Grubu	Sokak Ağı Yapısı, Kavşak Yoğunluğu ve Yaya Sürekliliği	Bağlantısallık Düzeyi Tahmini
D1 – D5 (Sarısu–Liman)	Kavşak yoğunluğu orta; sahil bandı boyunca lineer ve kesintisiz yaya omurgası mevcut; blok boyu uzun olsa da sahil yolu yüksek geçirgenlik sağlar.	Orta–Yüksek
D6 – D12 (Atatürk Bulvarı – Konyaaltı Plajı – Hastane)	Kavşak yoğunluğu yüksek; ancak Atatürk Bulvarı’nın trafik bariyeri, kaldırım süreksizliği ve geniş kavşak geometrisi gerçek yaya sürekliliğini düşürmektedir.	Orta
D13 – D15 (AVM - Stadyum – Defterdarlık)	Düzenli, grid’e yakın sokak ağı; kavşak yoğunluğu yüksek; geniş kaldırımlar ve yaya öncelikli geçiş noktaları bağlantısallığı artırır.	Orta–Yüksek
D16 – D18 (Güllük – 100. Yıl – Muratpaşa – B.şehir Bld)	Kavşak yoğunluğu orta–yüksek; ancak ara sokaklarda topografya ve süreksizlikler nedeniyle mikro ölçekte bağlantısallık yer yer zayıflar.	Orta
D19 – D20 (Kepez Bld – Kepez)	Kavşak yoğunluğu düşük; uzun blok boyları ve kopuk sokak ağı yaya yönlendirmesini sınırlar; sokak süreksizliği belirgindir.	Düşük–Orta

Bağlantısallığın iyileştirilmesi için öncelikli müdahale alanı Atatürk Bulvarı çevresidir. Bu bölgede yaya geçişlerini kolaylaştıracak kavşak iyileştirmeleri, taşıt trafiğini kesen güvenli geçiş düzenlemeleri ve kaldırım sürekliliğini sağlayan mikro bağlantılar, bağlantısallığı hissedilir biçimde artıracaktır. Kent merkezi istasyonlarında kavşaklardaki yönlendirme elemanlarının güçlendirilmesi ve yaya öncelikli düzenlemelerin genişletilmesi, mevcut güçlü sokak ağına ek bir erişim derinliği sağlayacaktır. Güllük–100. Yıl hattında ara sokaklardaki süreksizlikleri gideren küçük ölçekli sokak uzantıları ve kot farkını azaltan yaya bağlantıları, mikro ölçekte bağlantısallığı güçlendirecektir. Hattın kuzey ucunda yer alan D19–D20 istasyon grubu için yeni planlama alanlarında kısa blok boylarını temel alan sokak tasarımı, kesintisiz kaldırımlar ve düzenli kavşak yapısı bağlantısallığın artırılmasında kritik önem taşımaktadır. Bu müdahaleler, hattın özellikle düşük bağlantısallık gösteren Kepez’e yakın bölgelerde yaya erişiminin bütünleşmesini sağlayarak hattın genel erişilebilirlik performansını önemli ölçüde artıracaktır.

Sonuç

Bu çalışma, Antalya 4. Etap Raylı Sistem Hattı’nın performansını kapsama, rota doğruluğu ve bağlantısallık göstergeleri üzerinden değerlendirmiş ve hattın kentsel yapı içindeki işlevselliğini çok boyutlu bir perspektifle ortaya koymuştur. Bulgular, hattın Konyaaltı kıyı koridoru ve kent merkezi arasında yüksek servis sunduğunu, ancak Kepez’e yaklaştıkça yaya altyapısındaki eksiklikler, topografik koşullar ve seyrek sokak dokusu nedeniyle servis kalitesinin belirgin biçimde azaldığını göstermektedir.

Kapsama analizleri, sahil ve merkez bölgesindeki istasyonların yaklaşık 650–800 metrelik etkin erişim alanlarına sahip olduğunu, buna karşın Kepez yönünde bu değerin 600 metreye kadar

düştüğünü ortaya koymuştur. Bu durum, hattın kuzey aksında yaya sürekliliğini güçlendiren fiziksel iyileştirmelere ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Rota doğruluğunda elde edilen $\approx 0,61$ 'lik uçtan uca değer, hattın genel geometri bakımından dolambaçlı bir niteliğe sahip olduğunu ortaya koysa da istasyon çevresi erişiminde görülen 0,65–0,90 aralığındaki yerel değerler, kullanıcıların günlük hareketlerinde daha doğrudan mikro rotalardan yararlanabildiğini göstermektedir. Özellikle Atatürk Bulvarı ve Kepez çevresindeki geniş kavşaklar ve topografya rota doğruluğunu düşüren temel faktörlerdir.

Bağlantısallık açısından hat, Konyaaltı ve kent merkezinde orta–yüksek düzeyde bir ağ bütünlüğü sunarken, kuzey kesimde bağlantı-düğüm yapısının zayıflaması yaya yönlendirmesini kısıtlamaktadır. Bu bağlamda küçük ölçekli sokak uzantıları, güvenli yaya geçişleri, kaldırım sürekliliği ve kavşak düzenlemeleri hem bağlantısallığı hem de kapsama ve rota doğruluğunu eşzamanlı olarak iyileştirecek stratejik müdahaleler olarak öne çıkmaktadır.

Genel olarak çalışma, Antalya 4. Etap Hattı'nın kentin turizm, ticaret, eğitim ve konut alanlarını birbirine bağlayan önemli bir erişim omurgası olduğunu; ancak özellikle kuzey aksında yaya odaklı tasarım, sokak sürekliliği ve besleyici toplu taşıma entegrasyonu konularında güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Kapsama, rota doğruluğu ve bağlantısallığın birlikte değerlendirilmesi, yalnızca mevcut hattın gelişim potansiyelini ortaya koymakla kalmamakta; aynı zamanda Antalya'da planlanacak yeni raylı sistem etapları için bilimsel temelli bir planlama çerçevesi sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesi ve kentsel hareketliliğin mekânsal eşitlik temelinde güçlendirilmesi açısından önemli bir katkı niteliğindedir.

Kaynakça

Andersen, J. L. E., & Landex, A. (2008). Catchment areas for public transport. *WIT Transactions on the Built Environment*, 101, 175–184.

Antalya Büyükşehir Belediyesi. (2016). *Antalya Raylı Sistem Proje Ön Fizibilite Raporu*. Antalya Ulaşım Dairesi Başkanlığı.

Antalya Büyükşehir Belediyesi. (2023). *Antalya 4. Etap Raylı Sistem Basın Bilgilendirme Raporu*. Antalya Ulaşım Dairesi Başkanlığı.

Antalya Ulaşım Ana Planı. (2016). *Antalya Ulaşım Ana Planı Taslak Raporu*. Antalya Büyükşehir Belediyesi.

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80.

Bristow, A. L., & Nellthorp, J. (2000). Transport project appraisal in the European Union. *Transport Policy*, 7(1), 51–60.

Bureau of Public Roads. (1964). *Traffic assignment manual*. U.S. Department of Commerce.

Chuang, I. T., Beattie, L., & Feng, L. (2023). Analysing the relationship between proximity to transit stations and local living patterns: A study of human mobility within a 15-min walking distance through mobile location data. *Urban Science*, 7(4), 105.

Cirit, F. (2016). *Sürdürülebilir kent içi ulaşım politikaları ve toplu taşıma sistemlerinin karşılaştırılması*. T.C. Kalkınma Bakanlığı.

Curtis, C., & Scheurer, J. (2017). Performance measures for public transport accessibility: Learning from international practice. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 93–118.

Daniels, R., & Mulley, C. (2013). Explaining walking distance to public transport: The dominance of public transport supply. *Journal of Transport and Land Use*, 6(2), 5–20.

Demir, A. (2025). *İstanbul ulaşımına bütüncül yaklaşım: Sorunlar, politikalar ve stratejik yaklaşımların değerlendirilmesi*. ESAM İstanbul.

El-Geneidy, A., Grimsrud, M., Wasfi, R., Tétreault, P., & Surprenant-Legault, J. (2014). New evidence on walking distances to transit stops: Identifying redundancies and gaps using variable service areas. *Transportation*, 41(1), 193–210.

Ertuğay, K. (2019). A simulation-based accessibility modeling approach to evaluate performance of transportation networks by using directness concept and GIS. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*.

Guerra, E., Cervero, R., & Tischler, D. (2012). Half-mile circle: Does it best represent transit station catchments? *Transportation Research Record*, 2276(1), 101–109.

Haggett, P., & Chorley, R. J. (1969). *Network analysis in geography*. Edward Arnold.

Kittelson & Associates, Transit Cooperative Research Program, & Transit Development Corporation. (2003). *Transit capacity and quality of service manual* (Vol. 42). Transportation Research Board.

Levinson, D. M., & Kumar, A. (1997). Density and the journey to work. *Growth and Change*, 28(2), 147–172.

Matisziw, T. C., & Demir, E. (2016). Measuring spatial correspondence among network paths. *Geographical Analysis*, 48(1), 3–17.

Mavoa, S., Witten, K., Pearce, J., & Day, P. (2009). Measuring neighbourhood walkability in New Zealand cities. *Centre for Social and Health Outcomes Research and Evaluation*. Massey University.

Mishra, S., Welch, T. F., & Jha, M. K. (2012). Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(7), 1066–1085.

Rodrigue, J. P. (2020). *The geography of transport systems*. Routledge.

Saghapour, T., Moridpour, S., & Thompson, R. G. (2016). Public transport accessibility in metropolitan areas: A new approach incorporating population density. *Journal of Transport Geography*, 54, 273–285.

Sarker, R. I., Mailer, M., & Sikder, S. K. (2020). Walking to a public transport station: Empirical evidence on willingness and acceptance in Munich, Germany. *Smart and Sustainable Built Environment*, 9(1), 38–53.

Selçuk, İ. A. (2021). Erişilebilirlikte eşik değerler: İzmir merkez kent örneği. *Uluslararası Sosyal Bilimler Akademi Dergisi*, (6), 986–1011.

Taylor, M. A., & Somenahalli, S. (2024). Distributions of walking access to public transport in Melbourne, Australia—Evidence on acceptable and tolerable walking distances. *International Journal of Sustainable Transportation*, 18(7), 576–588.

Transit Cooperative Research Program (TCRP). (1998). *Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCRP Web*

Document 6). Transportation Research Board, National Research Council.

BÖLÜM 6

NÖROERGONOMİNİN ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARINDAKİ ENGELLERİNİN SIRALANMASI

SAMET TOSUN¹

Giriş

Dördüncü Sanayi Devrimi olarak da adlandırılan Endüstri 4.0, üretim ve hizmet sistemlerinde siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), yapay zekâ, büyük veri analitiği ve bulut bilişim gibi bileşenlerle radikal bir dönüşüm yaratmaktadır (Kagermann vd., 2013; Lasi vd., 2014; Lu, 2017). Geleneksel hat üretiminden akıllı fabrikalara geçiş, yalnızca makine parkının yenilenmesi anlamına gelmemekte; aynı zamanda insan-iş sistemi ilişkisini yapısal olarak değiştirmektedir. Operatörün rolü, fiziksel iş gücünün yoğun kullanımından; izleme, karar verme, denetleme ve problem çözme odaklı bilişsel ağırlıklı bir role doğru evrilmektedir (Cunha vd., 2022; Reiman vd., 2021).

Bu dönüşüm, ergonomi perspektifinden bakıldığında çift yönlü bir etki yaratmaktadır. Bir yandan otomasyon ve robotik sistemler, insanın fiziksel iş yükünü azaltarak kas-iskelet sistemi sorunlarının ve klasik iş kazalarının azaltılmasına katkı sağlayabilecek fırsatlar sunmaktadır. Diğer yandan, karmaşık insan-makine arayüzleri, yüksek bilgi yoğunluğu, gerçek zamanlı karar verme baskısı ve otomasyona aşırı/yanlış güven gibi faktörler, zihinsel iş yükü ve bilişsel hata riski açısından yeni tehditler doğurmaktadır (Çakıt vd., 2020; Beier vd., 2020).

Tam bu noktada, nöroergonomi kavramı öne çıkmaktadır. Parasuraman ve Rizzo (2007) nöroergonomiyi, “çalışma ve günlük yaşam bağlamlarında insan beyninin ve davranışının incelenmesi” olarak tanımlamakta; alanın temel hedefini de nöro bilim bulgularını ergonomik tasarım ve insan faktörleri mühendisliği ile bütünleştirerek güvenli, verimli ve insan-merkezli sistemler tasarlamak şeklinde özetlemektedir (Parasuraman & Rizzo, 2007; Gramann vd., 2017; Ayaz & Dehais, 2018).

Son yıllarda geliştirilen taşınabilir EEG, fNIRS, göz izleme, kalp atım değişkenliği ve diğer fizyolojik ölçüm teknolojileri sayesinde, “beyni iş başında” incelemek ve gerçek üretim ortamlarında zihinsel iş yükü, dikkat, stres ve yorgunluk gibi göstergeleri neredeyse gerçek zamanlı izlemek mümkün hâle gelmiştir (Ayaz vd., 2018, Charles & Nixon, 2019). Bu gelişmeler, Endüstri 4.0’ın yüksek otomasyonlu ve veri yoğun ortamlarında nöroergonomik izleme ve tasarım yaklaşımlarını kritik hâle getirmektedir.

Türkiye bağlamında da nöroergonomi kavramı, özellikle Endüstri 4.0 uygulamalarıyla birlikte mental iş yükünün doğru analiz edilmesi ve insan-robot/makine etkileşimindeki risklerin azaltılması

¹ Öğr. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Zile Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, ORCID: 0000-0002-5454-3057

için önemli bir araç olarak tartışılmaya başlanmıştır. Adem, Çakıt ve Dağdeviren (2019) nöroergonomi çalışmalarına yönelik literatür derlemelerinde, alanın hızla gelişen ama yöntemsel ve pratik açıdan pek çok boşluk içeren bir araştırma alanı olduğunu vurgularken; Çakıt vd. (2020) Endüstri 4.0'ın ergonomi için hem tehdit hem de fırsat oluşturduğunu, bu tehditlerin fırsata çevrilmesinde nöroergonomik uygulamaların belirleyici rol oynayacağını belirtmektedir.

Bununla birlikte, nöroergonomik yaklaşımın Endüstri 4.0 uygulamalarına sistematik biçimde entegre edilmesi pek çok engel ile karşılaşmaktadır. Uygulamada öne çıkan sorunlar; pahalı ve kırılgan teknolojik donanım gereksinimleri, standartlaşmamış yöntemler, etik ve mahremiyet kaygıları, kurum içi direnç, çok disiplinli ekip eksikliği, veri entegrasyonu ve analitik zorluklar, mevzuat ve yasal altyapının yetersizliği gibi boyutlarda kümelenmektedir (Dehais vd., 2020; Brouwer, 2021; Adem vd., 2019). Bu engellerin görece önem düzeylerinin ve birbirleriyle ilişkilerinin analitik olarak değerlendirilmesi, sınırlı kaynakların hangi bariyerlere öncelikle yönlendirilmesi gerektiği konusunda karar vericilere yol gösterebilir.

Bu kitap bölümü, nöroergonominin Endüstri 4.0 uygulamalarındaki rolünü ve bu alandaki engellerin nasıl sıralanabileceğini endüstri mühendisliği ve iş sağlığı–güvenliği perspektifleriyle birlikte ele almayı amaçlamaktadır. Bölümde önce nöroergonomi kavramının kuramsal temelleri ve ölçüm yaklaşımları açıklanacak, ardından Endüstri 4.0 iş sistemlerinde ortaya çıkan bilişsel talepler tartışılacaktır. Daha sonra, nöroergonomi uygulamalarının önündeki genel engeller standart bir çerçeve altında sınıflandırılacak; Endüstri 4.0'a özgü ek bariyerler tanımlanacak ve bu engellerin çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarıyla nasıl sıralanabileceğine ilişkin metodolojik bir çerçeve sunulacaktır. Son olarak iş sağlığı ve güvenliği (İSG) bağlamında tartışma ve uygulamaya dönük öneriler verilerek, hem geleneksel hem de yeni nesil üretim ortamlarında bilişsel ergonomi ve nöroergonominin etkin şekilde yönetilmesi için disiplinlerarası bir yaklaşım önerilecektir.

1. Nöroergonomi: Kuramsal Çerçeve ve Ölçüm Yaklaşımları

1.1. Nöroergonominin Tanımı ve Gelişim Süreci

Nöroergonomi, genel olarak “beyin–davranış–iş sistemi” üçgenini inceleyen, nörobilim ile ergonomiyi birleştiren disiplinlerarası bir alan olarak tanımlanmaktadır (Parasuraman & Rizzo, 2007; Gramann vd., 2017). Alanın amacı, nörogörüntüleme ve nörofizyolojik ölçüm yöntemleriyle elde edilen verileri kullanarak, insanın bilişsel kapasitesine uygun sistemler tasarlamak, hataları ve kazaları azaltmak, güvenliği artırmak ve iş deneyimini iyileştirmektir (Ayaz & Dehais, 2018).

Geleneksel ergonomide insanın fiziksel boyutu ve makineyle olan fiziki ilişkisi (durus, tekrarlayan hareket, yük kaldırma vb.) uzun yıllardır sistematik olarak incelenirken; nöroergonomi bu yaklaşımı bilişsel ve sinir sistemi düzeyine taşımaktadır. Böylece zihinsel iş yükü, dikkat, durumsal farkındalık, stres, duygusal durum ve öğrenme gibi süreçler doğrudan beyin ve fizyolojik sinyaller üzerinden analiz edilebilmektedir (Biyıklı & Aydoğan, 2015; Adem vd., 2019).

1.2. Temel Nöroergonomik Ölçüm Araçları

Nöroergonomik çalışmalar, çoğunlukla birden fazla ölçüm aracının çoklu modlu (multimodal) şekilde kullanıldığı hibrit tasarımlara dayanır (Ayaz & Dehais, 2018; Gramann vd., 2021). Başlıca araçlar şunlardır:

- EEG (Elektroensefalografi): Kafa derisine yerleştirilen elektrotlarla beyin elektriksel aktivitesinin ölçülmesine olanak tanır. Özellikle theta ve beta bant güçlerindeki değişimler, zihinsel iş yükü ve dikkat düzeyleriyle ilişkilendirilmektedir. Endüstriyel ortamlarda taşınabilir EEG sistemleriyle operatörlerin iş başındaki bilişsel yükleri analiz edilmektedir (Kosti vd., 2018; Liu vd., 2017).

- fNIRS (Fonksiyonel Yakın Kızılötesi Spektroskopisi): Prefrontal kortekste oksijenlenme değişimlerini ölçerek karar verme ve çalışma belleği yükünü değerlendirmede kullanılır. Mobil fNIRS sistemleri, yürüyen, hareket eden ya da üretim hattı üzerinde çalışan personelin bilişsel taleplerini incelemede önemli avantaj sağlar (Ayaz & Dehais, 2018).
- Göz izleme (Eye-tracking): Bakış noktası, fiksasyon süresi, sakkadlar ve pupilla çapı gibi parametrelerle dikkat dağılımı ve zihinsel iş yükü hakkında bilgi sunar (Beatty, 1982; Giraudet vd., 2015).
- Kalp atım hızı ve değişkenliği (HR/HRV): Otonom sinir sistemi aktivitesinin bir göstergesi olup, stres ve mental iş yükü düzeyleriyle ilişkilendirilmektedir (Charles & Nixon, 2019).
- Solunum, deri iletkenliği ve diğer fizyolojik göstergeler: Özellikle stres, kaygı ve duygusal durum boyutlarının izlenmesinde kullanılmaktadır.

Bu sinyaller genellikle performans ölçütleri (tepki süresi, hata oranı vb.) ve öznel ölçeklerle (NASA-TLX, CarMen-Q vb.) birlikte kullanılarak, çok boyutlu bir nöroergonomik profil oluşturulur (Rubio-Valdehita vd., 2017; Hart & Staveland, 1988).

1.3. Uygulama Alanları ve Endüstri Mühendisliği ile İlişkisi

Nöroergonomi; havacılık, kara ve deniz taşımacılığı, sağlık hizmetleri, eğitim, savunma, inşaat ve üretim sistemleri gibi pek çok alanda uygulanmaktadır (Gramann vd., 2017; Ayaz & Dehais, 2018; Reiman vd., 2021) Endüstri mühendisliği açısından bakıldığında ise nöroergonomi:

- İş tasarımı ve görev dağılımında,
- İnsan-makine arayüzlerinin tasarımında,
- İş etüdü ve zaman etüdü çalışmalarında,
- İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmelerinde,
- Çok kriterli karar verme modellerinde (ör. görev önceliklendirme, iş istasyonu sıralama)

bilişsel parametrelerin nesnel şekilde hesaba katılmasını sağlar (Çakıt vd., 2020; Adem vd., 2019; Brito vd., 2019).

Bu bağlamda nöroergonomi, yalnızca bir araştırma alanı değil, aynı zamanda Endüstri 4.0 stratejilerinin insan faktörü boyutunu güçlendiren bir tasarım ve karar destek aracı olarak da değerlendirilmelidir.

2. Endüstri 4.0 ve İnsan Faktörü: Bilişsel Taleplerin Dönüşümü

2.1. Endüstri 4.0'ın Temel Bileşenleri ve İş Sistemlerine Etkisi

Endüstri 4.0 literatüründe, siber-fiziksel sistemler (CPS), nesnelerin interneti (IoT), nesnelerin hizmetleri (IoS), büyük veri ve analitik, bulut bilişim ve akıllı fabrikalar temel bileşenler olarak tanımlanmaktadır (Kagermann vd., 2013; Lasi vd., 2014; Lu, 2017; Benitez vd., 2019).

Bu bileşenler, üretim sistemlerinde şu dönüşümleri tetiklemektedir:

- Makine ve ekipmanların sürekli bağlantılı olduğu,
- Sensörlerden gelen verilerin gerçek zamanlı izlendiği,
- Karar destek algoritmalarının ve yapay zekânın süreçlere entegre edildiği,
- İnsan-robot işbirliği (cobot) ile karma görevlerin yürütüldüğü,

- Tedarik zincirinin uçtan uca dijitalleştirildiği

bir sosyoteknik sistem ortaya çıkmaktadır (Gorecky vd., 2014; Brito vd., 2019; Reiman vd., 2021).

2.2. Endüstri 4.0 ve Bilişsel İş Yükü

Otomasyonun artması, fiziksel iş yükünü azaltırken bilişsel talepleri önemli ölçüde artırmaktadır. Operatör ve mühendisler; alarm yönetimi, karmaşık arayüzlerin yorumlanması, büyük veri göstergelerinin filtrelenmesi, çoklu makine ve süreçlerin eşzamanlı izlenmesi gibi görevlerle karşı karşıyadır (Dombrowski & Wagner, 2014; Çakıt vd., 2020).

Bu bağlamda ortaya çıkan temel bilişsel zorluklar şunlardır:

- Bilgi aşırı yüklenmesi ve alarm yorgunluğu: Akıllı fabrikalarda yüzlerce sensör ve alarm sinyali, operatörün dikkat kapasitesini zorlamaktadır.
- Durumsal farkındalığın korunması: Otomatikleşen süreçlerde, operatör “döngüden çıkma” riskiyle karşı karşıyadır. Bu durum beklenmedik durumlarda yetersiz müdahaleye yol açabilir.
- Otonom sistemlere güvenin kalibrasyonu: Aşırı güven veya aşırı güvensizlik, hatalı kararların temel kaynakları arasındadır.
- İnsan–robot etkileşimi: Cobot’larla aynı çalışma alanını paylaşan çalışanların hem fiziksel hem de bilişsel güvenliği ön plandadır.

Çakıt, Adem ve Dağdeviren (2020) Endüstri 4.0 uygulamalarında artan otomasyonun, doğru yönetilmediğinde çalışanların mental iş yükünü katlanarak artıracığını, bunun da insan–makine etkileşiminde hatalara ve verimsizliklere yol açabileceğini vurgulamaktadır.

Bu nedenle Endüstri 4.0’ın insan faktörü boyutuna bütüncül bakan ergonomi ve nöroergonomi çalışmaları, dijital dönüşümün sürdürülebilir ve insan-merkezli olmasının ön koşulu hâline gelmiştir (Çakıt vd., 2020; Reiman vd., 2021; Beier vd., 2020)

3. Nöroergonomi Uygulamalarının Önündeki Temel Engeller

Bu bölümde, nöroergonomi uygulamalarının genel olarak karşılaştığı ve literatürde sıklıkla tartışılan temel engeller on başlık altında özetlenmektedir. Bu liste, Endüstri 4.0 bağlamından bağımsız olarak nöroergonomik uygulamaların “standart” engel çerçevesi olarak düşünülebilir; bir sonraki bölümde Endüstri 4.0’a özgü ek bariyerler ayrıca ele alınacaktır.

- Teknolojik Donanım Eksikliği
- Yöntemsel Standartların Belirsizliği
- Etik ve Gizlilik Kaygıları
- Çok Disiplinli Uzmanlık Eksikliği
- Eğitim ve Farkındalık Eksikliği
- Yüksek Maliyet ve Kaynak Sınırlılıkları
- Kurumsal Direnç ve Değişim Karşıtlığı
- Veri Entegrasyonu ve Analiz Zorlukları
- Uygulama Ortamlarının Kontrolsüzlüğü
- Mevzuat ve Yasal Altyapı Yetersizlikleri

Aşağıda her bir engel, nöroergonomik uygulama bağlamında ayrıntılı biçimde tartışılmaktadır.

3.1. Teknolojik Donanım Eksikliği

Taşınabilir EEG, fNIRS, göz izleme, kablosuz HRV sistemleri ve entegre sensör ağları, nöroergonomik analizlerin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Ancak bu donanımlar hâlen birçok kurum için yüksek yatırım maliyetleri, hassas kalibrasyon gereksinimleri ve bakım–onarım zorlukları nedeniyle sınırlı erişilebilirliğe sahiptir (Ayaz & Dehais, 2018; Adem vd., 2019).

Ayrıca ağır sanayi, inşaat ya da maden gibi zorlu çalışma ortamlarında sensörlerin fiziksel dayanıklılığı, sinyal kalitesinin korunması ve çalışanların cihazları sürekli takmaya istekli olması ek zorluklar yaratmaktadır (Fernández & Pérez, 2015).

3.2. Yöntemsel Standartların Belirsizliği

Nöroergonomik çalışmalar, deney tasarımı, sinyal işleme, özellik çıkarımı ve istatistiksel analiz boyutlarında hâlen tam olarak standardize edilmiş protokollere sahip değildir (Dehais vd., 2020; Gramann vd., 2021).

Farklı araştırma gruplarının:

- Farklı EEG/fNIRS bantları ve metrikleri,
- Farklı pencereleme ve filtrasyon stratejileri,
- Çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri

kullanmaları, sonuçların yeniden üretilebilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu durum, nöroergonominin endüstriyel standartlara dönüşmesini geciktiren önemli bir engeldir.

3.3. Etik ve Gizlilik Kaygıları

Beyin ve fizyolojik veriler, kişisel verilerin en hassas kategorilerinden biridir. Nöroergonomik analizlerde çalışanların duygusal durumu, stres düzeyi, dikkat eksikliği gibi bilgilerin ortaya çıkması, bu verilerin işveren tarafından performans değerlendirme veya disiplin süreçlerinde kullanılması riskini gündeme getirmektedir (Brouwer, 2021; Driessen vd., 2010).

Bu nedenle veri anonimleştirme, bilgilendirilmiş onam, veri saklama süreleri ve üçüncü taraflarla paylaşım gibi konularda net etik çerçeveler ve yasal düzenlemeler gerekmektedir.

3.4. Çok Disiplinli Uzmanlık Eksikliği

Nöroergonomik projelerin başarısı; nörobilim, sinyal işleme, makine öğrenmesi, ergonomi, endüstri mühendisliği, psikoloji ve İSG gibi farklı disiplinlerden uzmanların birlikte çalışmasını gerektirir. Ancak pratikte bu alanların hepsinde yetkin insan kaynağına sahip ekipleri bir araya getirmek zor ve maliyetlidir (Adem vd., 2019).

Bu eksiklik, nöroergonomik projelerin ya dar bir teknik bakış açısına sıkışmasına ya da sınırlı saha uygulanabilirliğine sahip “laboratuvar çalışmaları” olarak kalmasına neden olmaktadır.

3.5. Eğitim ve Farkındalık Eksikliği

Nöroergonomi kavramı, pek çok işletmenin üst yönetimi ve İSG profesyonelleri açısından hâlâ yeni ve nispeten soyut bir kavramdır. Çalışanlarda “beyin ölçümü” yapılmasına yönelik yanlış anlamalar, kaygılar veya dirençler görülebilmektedir (Çakıt vd., 2020; Adem vd., 2019).

Bu nedenle nöroergonomik uygulamalarla ilgili bilgilendirme toplantıları, eğitimler ve pilot projeler yoluyla farkındalığın artırılması gerekmektedir.

3.6. Yüksek Maliyet ve Kaynak Sınırlılıkları

Donanım yatırımı dışında, veri toplama, analiz yazılımları, uzman personel ve proje süresi gibi kalemler nöroergonomik çalışmaların toplam maliyetini artırmaktadır. KOBİ’ler ve sınırlı bütçeye sahip kamu kurumları için bu maliyetler önemli bir bariyerdur (Lu, 2017; Brito vd., 2019).

Bu engelin aşılmasında:

- Üniversite–sanayi işbirlikleri,
- Ulusal/uluslararası proje fonları,
- Paylaşımlı laboratuvar ve mobil ölçüm merkezleri

önemli rol oynayabilir.

3.7. Kurumsal Direnç ve Değişim Karşıtlığı

Dijital dönüşüm projelerinde olduğu gibi, nöroergonomik ölçüm ve tasarım girişimleri de örgütsel kültür, mevcut iş yapma biçimleri ve güç ilişkileriyle doğrudan ilişkilidir (Hernandez-Vivanco vd., 2018).

Bazı yöneticiler nöroergonomiyi “fazladan maliyet ve iş yükü”, bazı çalışanlar ise “gizli denetim aracı” olarak algılayabilmektedir. Bu algıyı dönüştürecek şeffaf iletişim, katılımcı tasarım ve “hızlı kazanım” (quick win) örneklerinin gösterilmesi kritik önemdedir.

3.8. Veri Entegrasyonu ve Analiz Zorlukları

Nöroergonomik veriler; çok kanallı, yüksek frekanslı, gürültüye hassas ve çoğunlukla multimodal yapıda olduğundan, klasik İSG ya da üretim verilerine göre çok daha karmaşık bir analitik altyapı gerektirir (Ayaz & Dehais, 2018; Gramann vd., 2021).

Ayrıca EEG/fNIRS/göz izleme verilerinin; ERP sistemleri, üretim izleme yazılımları ve kalite kayıtları ile entegre edilmesi, büyük veri ve yapay zekâ araçlarının etkin kullanımını gerektirmektedir. Bu altyapı yoksa nöroergonomik veriler “raf verisi” olma riski taşır.

3.9. Uygulama Ortamlarının Kontrolsüzlüğü

Gerçek iş ortamları, laboratuvar koşullarına kıyasla son derece değişkendir. Gürültü, titreşim, sıcaklık, elektromanyetik parazit ve çalışanların doğal hareketleri, sinyal kalitesini olumsuz etkileyebilir (Fernández & Pérez, 2015; Liu vd., 2017).

Bu nedenle nöroergonomik ölçümlerde saha gerçekliğini korurken, aynı zamanda yeterli sinyal–gürültü oranına ulaşmak ciddi bir metodolojik zorluktur.

3.10. Mevzuat ve Yasal Altyapı Yetersizlikleri

Birçok ülkede, beyin ve fizyolojik verilerin iş ortamında toplanmasına ilişkin özel mevzuat henüz olgunlaşmamıştır. Veri koruma kanunları çoğu zaman genel hükümler içermekte, nöroergonomik uygulamaların özel risklerine doğrudan atıf yapmamaktadır (Brouwer, 2021).

Bu belirsizlik, hem işverenler hem de çalışanlar açısından hukuki risk algısını artırmakta, nöroergonominin yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır.

4. Endüstri 4.0 Uygulamalarına Özgü Ek Engeller

Yukarıda sunulan standart engellere ek olarak, Endüstri 4.0 bağlamı nöroergonomik uygulamalar için bazı özel bariyerleri de gündeme getirmektedir. Bu bölümde Endüstri 4.0’a özgü olarak öne çıkan birkaç ek başlık önerilmektedir:

- Siber-Fiziksel Sistemlerle Entegrasyon Güçlükleri
- Gerçek Zamanlı İzleme ve Karar Verme Baskısı
- İnsan–Robot İşbirliğinde Güven ve Kabul Sorunları
- Dijital İkiz ve Sanal Gerçeklik Ortamlarının Nöroergonomik Tasarımı
- Veri Güvenliği ve Siber Güvenlik Riskleri

4.1. Siber-Fiziksel Sistemlerle Entegrasyon Güçlükleri

Endüstri 4.0 ortamlarında nöroergonomik verilerin yalnızca bireysel değerlendirme için değil, aynı zamanda siber-fiziksel sistemlerin geri besleme döngüsüne entegre edilmesi hedeflenmektedir. Örneğin, operatörün zihinsel iş yükü artığında robot hızının otomatik düşürülmesi ya da arayüz karmaşıklığının azaltılması gibi adaptif sistemler tasarlanabilir (Gorecky vd., 2014).

Ancak bu tür adaptif sistemler, yazılım mimarisi, gerçek zamanlı veri işleme, güvenilirlik ve emniyet açısından ciddi tasarım zorlukları içermektedir. Ayrıca siber-fiziksel sistem tedarikçileriyle nöroergonomi ekibinin ortak dil geliştirmesi gerekmektedir.

4.2. Gerçek Zamanlı İzleme ve Karar Verme Baskısı

Akıllı fabrikalarda nöroergonomik verilerin gerçek zamanlı kullanımı, sürekli izleme ve anlık müdahale gereksinimi doğurur. Bu da hem teknik açıdan (düşük gecikmeli veri hattı, gerçek zamanlı algoritmalar) hem de operasyonel açıdan (süreçlere müdahale yetkisi, sorumluluk paylaşımı) yeni engeller yaratmaktadır (Gášová vd., 2017; Reiman vd., 2021).

Yanlış kalibre edilmiş bir sistem, örneğin her küçük stres artışında üretimi yavaşlatırsa, verimlilik kaybı ve sistem güvenine zarar verme riski taşımaktadır. Bu nedenle “uygun eşik değerleri” ve insan–merkezli kontrol stratejileri büyük önem taşır.

4.3. İnsan–Robot İşbirliğinde Güven ve Kabul Sorunları

Cobot’ların yaygınlaşmasıyla birlikte, insan–robot işbirliği alanında hem fiziksel hem de bilişsel güvenlik tartışmaları gündeme gelmiştir.

Çalışanların nöroergonomik izleme altında çalışırken aynı zamanda robotlarla fiziksel alanı paylaşması, çifte belirsizlik yaratabilir:

“Hem beynimi ölçüyorlar hem robotla yan yanayım; hata yaparsam ne olur?”

Bu algı, nöroergonomik sistemlere ve Endüstri 4.0 uygulamalarına yönelik güven ve kabul düzeyini olumsuz etkileyebilir. Dolayısıyla bu alanda, katılımcı tasarım, çalışan temsilcilerinin sürece dahil edilmesi ve sonuçların şeffaf paylaşımı kritik önemdedir.

4.4. Dijital İkiz ve Sanal Gerçeklik Ortamlarının Nöroergonomik Tasarımı

Endüstri 4.0 ile birlikte dijital ikiz ve sanal/karma gerçeklik (VR/AR/MR) ortamları, hem eğitim hem de süreç tasarımı için yaygın araçlar hâline gelmektedir (Caputo vd., 2017).

Bu ortamların nöroergonomik açıdan değerlendirilmesi;

- Sanal senaryoların bilişsel gerçekçiliği,
- Görsel-işitsel uyarı yoğunluğu,
- Hareket hastalığı (cybersickness) riskleri,
- Uzun süreli kullanımda dikkat ve yorgunluk profilleri

gibi konularda yeni engeller ortaya çıkarır. Uygun tasarlanmamış VR/AR uygulamaları, beklenen eğitim ve performans kazanımlarını sağlamadığı gibi, yeni psikososyal riskler de yaratabilir.

4.5. Veri Güvenliği ve Siber Güvenlik Riskleri

Endüstri 4.0 altyapısında nöroergonomik veriler, çoğu zaman kurumsal ağlar ve bulut sistemleri üzerinden iletilmekte ve saklanmaktadır. Bu durum, klasik kişisel veri risklerine ek olarak siber güvenlik boyutunda yeni riskler doğurmaktadır (Kritikos & Massonet, 2016; Witkowski, 2017).

Beyin ve fizyolojik verilerin üçüncü kişilerce ele geçirilmesi, manipüle edilmesi veya yetkisiz erişim, hem çalışanların hem de kurumun güvenliğini tehdit eder. Bu engelin aşılması, nöroergonomik veri yönetiminde kriptografik yöntemler, erişim kontrol politikaları ve siber güvenlik standartlarının sıkı şekilde uygulanmasını gerektirir.

5. Engellerin Sıralanması için Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları

5.1. Neden Çok Kriterli Bir Yaklaşım?

Nöroergonominin Endüstri 4.0 uygulamalarındaki engelleri, yalnızca “görülme sıklığı” ya da “kolay giderilebilirlik” gibi tek bir ölçüte göre sıralanamaz. Her bir engel:

- Etki düzeyi (insan güvenliği, kalite, verimlilik),
- Giderme maliyeti,
- Uygulama süresi,
- Kurumsal kabul edilebilirlik,
- Mevzuata uyum gereksinimi

gibi birden çok kriter açısından değerlendirilmelidir. Bu nedenle Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımları, engellerin önceliklendirilmesi ve stratejik yol haritasının belirlenmesinde güçlü araçlar sunar (Chakraborty & Zavadskas, 2014; Adem vd., 2019).

5.2. Kullanılabilecek Başlıca ÇKKV Yöntemleri

Literatürde engel ve risk önceliklendirme çalışmalarında sıklıkla kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

- AHP / Bulanık AHP: Uzmanların ikili karşılaştırmalarına dayanarak kriter ve alternatifler için ağırlıkların belirlendiği hiyerarşik bir yaklaşım.
- BWM / q-ROHF-BWM: En iyi ve en kötü kriterlere göre ikili karşılaştırma yoluyla daha az veri gerektiren, tutarsızlığa duyarlı bir yöntem. Özellikle belirsiz dilsel değerlendirmeler için bulanık ve q-rung orthopair uzantıları avantaj sağlamaktadır.
- VIKOR / Bulanık VIKOR: Kriterler bazında ideal çözüme yakınlık temelinde sıralama yapan ve uzlaşmacı çözüm öneren bir yöntem.
- DEMATEL: Kriterler arası nedensel ilişkileri ve etki-etkilenen kümelerini ortaya koyarak, hangi engellerin “tetikleyici” olduğunu belirlemede kullanılır.

Bu yöntemler, nöroergonomi ve Endüstri 4.0 bağlamında; engellerin göreceli önem ağırlıklarının ve kritik etki zincirlerinin belirlenmesinde kullanılabilir (Adem vd., 2019; Çakıt vd., 2020; Brito vd., 2019).

6.3. Önerilen Analitik Çerçeve

Nöroergonominin Endüstri 4.0 uygulamalarındaki engellerinin sıralanmasına yönelik genel bir metodolojik akış şu adımlarla özetlenebilir:

Engel Setinin Tanımlanması:

- Standart 10 engel (Bölüm 4)
- Endüstri 4.0'a özgü ek engeller (Bölüm 5)

Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi:

Örneğin:

- K1: İnsan sağlığı ve güvenliği üzerindeki potansiyel etki
- K2: Üretim performansı/verimlilik üzerindeki etki
- K3: Engelin giderilme maliyeti
- K4: Uygulama süresi/zaman gereksinimi
- K5: Kurumsal kabul edilebilirlik ve kültürel uyum

Uzman Grubunun Oluşturulması:

Nöroergonomi, ergonomi, endüstri mühendisliği, İSG, bilişim/siber güvenlik ve yönetsel pozisyonlardan uzmanların yer aldığı çok disiplinli bir panel.

Dilsel Değerlendirmelerin Toplanması:

Uzmanlar, engelleri kriterlere göre “çok yüksek–yüksek–orta–düşük–çok düşük” gibi dilsel ifadelerle değerlendirir. Bu ifadeler uygun bir bulanık sayı ya da q-rung orthopair gösterimine dönüştürülür.

ÇKKV Yönteminin Uygulanması:

Örneğin:

- q-ROHF-BWM ile kriter ağırlıklarının belirlenmesi,
- Bulanık VIKOR ile engellerin sıralanması,
- DEMATEL ile nedensel ilişkilerin analizi.

Sonuçların Yorumlanması ve Yol Haritası Geliştirilmesi:

- En kritik engellerin tanımlanması (örneğin veri güvenliği, etik kaygılar, yöntemsel belirsizlikler),
- Kısa, orta ve uzun vadeli müdahale planlarının oluşturulması,
- Kurumsal politika ve yatırım stratejilerinin bu önceliklere göre şekillendirilmesi.

Bu çerçeve, nöroergonomiyi Endüstri 4.0 uygulamalarına entegre etmek isteyen kurumlara hem nicel hem nitel bir karar destek altyapısı sağlamaktadır.

6. İş Sağlığı ve Güvenliği Perspektifinden Tartışma

Nöroergonominin Endüstri 4.0 bağlamındaki engelleri, aynı zamanda psikososyal riskler ve İSG yönetim sistemleri açısından da kritik önemdedir. ISO 45001 standardı, psikososyal risklerin tanımlanması ve yönetilmesi gereğini açıkça vurgulamakta; Endüstri 4.0 ile artan zihinsel iş yükü, belirsizlik ve insan–robot etkileşimi bu risk grubunun önemli bileşenleri hâline gelmektedir (Fernández & Pérez, 2015; EU-OSHA, 2019).

Nöroergonomik ölçümler, İSG profesyonellerine klasik gözlem ve anket yöntemlerinin ötesinde:

- Zihinsel iş yükü ve dikkat dalgalanmalarının nesnel izlenmesi,
- Stres ve yorgunluğun erken uyarı sinyallerinin tespiti,
- Kritik görevlerde riskli bilişsel durumların belirlenmesi,

gibi olanaklar sunmaktadır (Ayaz & Dehais, 2018).

Ancak Bölüm 3 ve 4'te tartışılan engeller dikkate alınmadan nöroergonomik sistemlerin İSG süreçlerine entegrasyonu, etik sorunlar, çalışan direnci, veri güvenliği açığı gibi yeni riskler de doğurabilir. Bu nedenle:

- Nöroergonomik projelerin İSG kurulları ve çalışan temsilcileriyle birlikte tasarlanması,
- Elde edilen verilerin anonimleştirilerek sistem seviyesinde kullanılması,

Sonuçların “bireyi suçlayıcı” değil, sistemi iyileştirici bir dille ele alınması, hem etik hem de kurumsal sürdürülebilirlik açısından kritik önemdedir.

Sonuç ve Değerlendirme

Bu kitap bölümünde, nöroergonominin Endüstri 4.0 uygulamalarındaki rolü ve bu alandaki engellerin nasıl sınıflandırılıp sıralanabileceği, endüstri mühendisliği ve iş sağlığı–güvenliği perspektifleriyle bütüncül biçimde ele alınmıştır. Nöroergonomik yaklaşımlar, akıllı fabrikalar ve dijitalleşen üretim sistemlerinde insanın bilişsel kapasitesine uyumlu, güvenli ve verimli iş ortamları tasarlamak için güçlü bir araç sunarken; teknolojik, metodolojik, etik, kurumsal ve yasal pek çok engel bu potansiyelin tam anlamıyla gerçekleşmesini sınırlamaktadır (Parasuraman & Rizzo, 2007; Ayaz & Dehais, 2018; Çakıt vd., 2020; Reiman vd., 2021).

Bu çalışma genel olarak, nöroergonominin Endüstri 4.0 dönüşümünde “insan faktörü” bileşenini güçlendiren stratejik bir araç olduğunu göstermektedir. Ayaz ve Dehais'in (2018) ortaya koyduğu gibi nöroergonomi, gerçek iş ortamlarında beyin ve fizyolojik tepkilerin incelenmesiyle insan–makine sistemlerinin bilişsel sınırlarını görünür kılmakta; böylece yeni nesil otomasyon, insan–robot işbirliği ve dijital ikiz uygulamalarında, insan kapasitesine duyarlı tasarım ilkelerinin geliştirilmesine imkân vermektedir.

Taşınabilir nörogörüntüleme (örneğin fNIRS, mobil EEG) ve fizyolojik izleme teknolojilerinin gelişmesi, operatörlerin sahadaki gerçek üretim koşullarında zihinsel iş yükü, dikkat, stres ve uyanıklık düzeylerinin zaman içinde izlenmesini mümkün kılmakta; bu da Endüstri 4.0 ortamlarında geleneksel ergonomi ölçümlerinin ötesine geçen, nesnel veri temelli bir insan faktörü yönetimi perspektifi sunmaktadır.

Bununla birlikte, bulgular nöroergonomik uygulamaların önünde çok boyutlu ve birbiriyle etkileşimli engeller bulunduğunu da ortaya koymaktadır. Literatürde Industry 4.0 uygulamalarına ilişkin engeller; teknoloji altyapısının yetersizliği, standart eksikliği, data güvenliği, insan kaynağı ve örgütsel direnç başlıkları altında sıkça sınıflandırılmaktadır (Müller, 2019; León-García et al., 2021; Ligarski, 2021).

Nöroergonomi özelinde bakıldığında ise, teknolojik donanım ve yazılım altyapısının eksikliği, ölçüm ve analiz standartlarının henüz tam oturmamış olması, biyometrik veri toplamanın doğurduğu etik ve gizlilik kaygıları, çok disiplinli uzman ekip ihtiyacı, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri, kurumsal değişime yönelik direnç, veri entegrasyonu ve büyük veri analitiği zorlukları ile mevzuat ve yasal çerçevedeki boşluklar, uygulama önündeki temel bariyerler olarak öne çıkmaktadır.

Nöroergonominin “yüksek teknoloji” etiketi taşıması, çalışanların mahremiyet ve performans izleme konusundaki endişeleriyle birleştiğinde, teknik fizibiliteden bağımsız bir sosyal ve kurumsal bariyerler seti üretmektedir.

Endüstri 4.0 bağlamı, nöroergonomiye özgü ilave engeller de yaratmaktadır. Siber-fiziksel sistemler, IoT altyapıları ve bulut tabanlı analitik platformlarla nörofizyolojik verilerin entegrasyonu; hem veri hacmi hem de veri güvenliği açısından yeni teknik gereksinimler doğurmaktadır (Caiazzo et al., 2025; Diarra et al., 2025).

Gerçek zamanlı izleme baskısı, operatörlerin “sürekli gözetim” altında olduğu algısını güçlendirirken, insan–robot işbirliğinde güven, yetki paylaşımı ve kontrol hissi gibi hususlar nöroergonomik verilerle desteklenmesi gereken kritik tasarım değişkenlerine dönüşmektedir. Aynı şekilde sanal ve artırılmış gerçeklik (VR/AR) tabanlı dijital ikiz ortamlarının tasarımında, senaryo zenginliği ile kullanıcıların bilişsel ve duysal yüklenmesi arasında hassas bir denge kurulması gerekmektedir (Cakıt, 2019; Vidhyathanan, 2024).

Bütün bu unsurlar, nöroergonominin Endüstri 4.0 bağlamında yalnızca klasik zihinsel iş yükü azaltımından ibaret olmayan, siber güvenlik, veri yönetimi ve insan–yapay zekâ etkileşim tasarımını kapsayan geniş bir müdahale alanına sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışma ayrıca, bu engellerin sistematik biçimde önceliklendirilmesi ve aralarındaki nedensel ilişkilerin açığa çıkarılması için çok kriterli karar verme (ÇKKV) temelli analitik çerçevelerin kullanılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır. Industry 4.0 literatüründe AHP, BWM, VIKOR, DEMATEL, ANP ve bunların bulanık veya q-rung uzantılarının; hem teknoloji bileşenlerinin hem de engel kümelerinin sıralanmasında başarıyla uygulandığı görülmektedir (Sadeghi-Niaraki et al., 2019; Rahardjo et al., 2023; Zayat et al., 2023; Sumrit, 2021). Benzer şekilde ergonomi ve insan faktörleri alanında da ÇKKV tekniklerinin ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasında giderek daha yaygın kullanıldığı rapor edilmektedir (Adem, 2024). Bu çerçeve nöroergonomik engellerin de uzman yargılarına dayalı olarak ağırlıklandırılmasına, etki–bağımlılık yapılarının haritalandırılmasına ve hangi bariyerlere öncelikli müdahale edilmesi gerektiğinin sayısal olarak ortaya konmasına olanak tanımaktadır.

Elde edilen bulgular, nöroergonomik verilerin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetim sistemlerine entegrasyonunun hassas bir etik, hukuki ve kurumsal tasarım gerektirdiğini göstermektedir. ISO 45001 gibi çağdaş İSG standartları psikososyal risklerin tanımlanmasını açık biçimde şart koşarken, nöroergonomik ölçümlerin bu çerçeveye dâhil edilmesi; çalışan mahremiyeti, veri güvenliği ve kurumsal iletişim açısından ayrıntılı politika ve prosedürlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Nörofizyolojik göstergelerin bireyleri etiketlemek, performans baskısı oluşturmak veya disiplin süreçlerini beslemek için değil; iş istasyonu tasarımı, arayüz geliştirme, vardiya planlaması ve eğitim programlarının iyileştirilmesi gibi sistem düzeyinde müdahale alanlarında kullanılması gerektiği özellikle vurgulanmalıdır. Bu nedenle, nöroergonomik uygulamaların tasarımında etik kurullar, meslek örgütleri, sendikalar, İSG profesyonelleri ve hukukçuların birlikte yer aldığı çok paydaşlı bir yönetim modeli önerilmelidir.

Sonuç olarak, nöroergonomi Endüstri 4.0’ın teknik olanakları ile insanın bilişsel ve nörofizyolojik sınırları arasında köprü kurma potansiyeline sahip, henüz gelişmekte olan ancak yüksek stratejik değeri olan bir alandır (Ayaz & Dehais, 2018).

Bu bölümde tanımlanan engellerin analitik biçimde sıralanması ve önceliklendirilmesi, hem akademik araştırma gündemi hem de sanayi uygulamaları açısından yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır. Böylece Endüstri 4.0’ın sunduğu siber-fiziksel altyapı, nöroergonomik ölçüm ve analiz teknikleriyle bütünleştirilerek insan-merkezli, güvenli ve sürdürülebilir çalışma ortamlarının

geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu bağlamda pilot projeler, üniversite–sanayi işbirlikleri, etik ve hukuki çerçeve çalışmaları ile veri odaklı iyileştirme yaklaşımları, nöroergonominin Endüstri 4.0 fabrikalarında rutin bir İSG ve mühendislik aracı hâline gelmesi için somut adımlar olarak görülmelidir.

KAYNAKÇA

- Adem, A. (2024). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Ergonomik Risk Değerlendirmesi. Nobel Yayınları.
- Adem, A., Çakıt, E., & Dağdeviren, M. (2019). Nöroergonomi alanındaki çalışmaların bibliyometrik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1621–1641.
- Ayaz, H., & Dehais, F. (Eds.). (2018). *Neuroergonomics: The brain at work and in everyday life*. Academic Press.
- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276–292. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>
- Beier, G., Ullrich, A., & Niehoff, S. (2020). Industry 4.0: How it is perceived by industrial workers? *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120414.
- Bell, S. W., Kong, J. C., Clark, D. A., Carne, P., Skinner, S., Pillinger, S., ... & Brown, W. (2022). The NASA-TLX: Evaluation of its use in surgery. *ANZ Journal of Surgery*, 92(11), 3022–3028.
- Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2019). Industry 4.0 innovation ecosystems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(5), 837–859.
- Berka, C., Levendowski, D. J., Cvetinovic, M. M., Petrovic, M. M., Davis, G., Lumicao, M. N., ... & Olmstead, R. (2004). Real-time EEG analysis of alertness, cognition and memory. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(2), 151–170.
- Bıyıklı, Ö., & Kızılkaya Aydoğan, E. (2015). NÖROERGONOMİ VE TEMEL UYGULAMA ALANLARI. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 173-179.
- Brito, M. F., Oliveira, J. A., & Machado, J. (2019). Ergonomics in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 51, 1063–1070.
- Brouwer, A. M. (2021). Ethical challenges in neuroergonomics. *Current Opinion in Psychology*, 36, 49–54.
- Cain, B. (2007). A review of the mental workload literature. *Defence Research and Development Canada*.
- Caputo, F., Greco, A., & Nicola, S. (2017). Digital twins in industrial engineering. *IFAC PapersOnLine*, 50(1), 13823–13828.
- Chakraborty, S., & Zavadskas, E. K. (2014). Applications of WASPAS method in manufacturing decision making. *Informatica*, 25(1), 1-20.
- Charles, R. L., & Nixon, J. (2019). Physiological measures of mental workload. *Applied Ergonomics*, 74, 221–232.
- Cox, T., & Griffiths, A. (2005). Work-related stress: Theory and practice. In J. R. Wilson & N. Corlett (Eds.), *Evaluation of Human Work* (pp. 553–572). CRC Press.
- Cunha, L., Silva, D., & Maggioli, S. (2022). Exploring the status of the human operator in Industry 4.0: A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 13, 889129.
- Çakıt, E., Adem, A., & Dağdeviren, M. (2020). ENDÜSTRİ 4.0 ERGONOMİ İÇİN TEHDİT Mİ FIRSAT MI? *Verimlilik Dergisi*(3), 43-57.
- Dehais, F., Laforets, F., & Ayaz, H. (2020). Neuroergonomics in complex environments. *Current Opinion in Psychology*, 36, 1–6.
- Diarra, A., Durand, S., & Dehais, F. (2025). Multimodal cognitive load detection in Industry 4.0. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 55(1), 14–27.

- Dombrowski, U., & Wagner, T. (2014). Mental stress in ergonomic design. *Procedia CIRP*, 17, 100–105.
- Driessen, P., et al. (2010). Worker trust and physiological monitoring. *Safety Science*, 48(6), 812–818.
- EU-OSHA. (2019). Work-related stress: *Facts and figures*. <https://osha.europa.eu/>
- European Agency for Safety and Health at Work. (2019). New and emerging risks.
- Fernández, J., & Pérez, R. (2015). Ergonomic risks in manufacturing. *Safety Science*, 80, 163–172.
- Filho, P. A., da Silva, L., Pombeiro, A., Costa, N., Carneiro, P., & Arezes, P. (2023). Assessing mental workload in industrial environments: A review of applied studies. *Occupational and Environmental Safety and Health V*, 677-689.
- Giraudet, L., St-Louis, É., & Tremblay, S. (2015). Operator attention assessment. *Human Factors*, 57(2), 244–259.
- Gopher, D., & Donchin, E. (1986). Workload concept. In *Handbook of Perception and Human Performance*. Wiley.
- Gorecky, D., Schmitt, M., & Loskyll, M. (2014). Human–machine interaction in smart factories. *Procedia CIRP*, 25, 225–232.
- Gramann, K., Fairclough, S. H., & Zander, T. O. (2021). Mobile neuroimaging. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 18, 100271.
- Gramann, K., et al. (2017). Cognition in action. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 182.
- Hancock, P. A. (2017). Cognitive load and automation. *Human Factors*, 59(1), 33–45.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). NASA-TLX development. In *Human Mental Workload*, 139–183.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0. HICSS Conference.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing Industrie 4.0.
- Kahneman, D. (1973). Attention and effort. *Prentice-Hall*.
- Kosti, K., Papadelis, C., & Bamidis, P. (2018). EEG-based workload assessment. *Sensors*, 18(10), 3356.
- Kritikos, K., & Massonet, P. (2016). Security challenges in Industry 4.0. *IEEE Cloud Computing*, 3(5), 44–52.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
- León-García, F. E., et al. (2021). Barriers to Industry 4.0 adoption. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100224.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). CPS in manufacturing. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Ligarski, M. (2021). Human factor risks in Industry 4.0. *Production Engineering Archives*, 27(4), 180–189.
- Liu, Y., Ayaz, H., & Shewokis, P. A. (2017). Cognitive workload with fNIRS & EEG. *Neurophotonics*, 4(4), 041404.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0 review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 2(3), 175001.

- Makeig, S., Gramann, K., & Jung, T.-P. (2009). Mobile brain/body imaging. *Journal of Neuroscience Methods*, 190(2), 215–230.
- Müller, J. M. (2019). Barriers to Industry 4.0. *Technovation*, 84–85, 11–21.
- Öngel, V. (2020). Akademisyenlerin Yaşam Doyumları ve İş Doyumlarını Etkileyen İş Kaynaklı Faktörlerin İncelenmesi. *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 10(3), 461-473.
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics. *Human Factors*, 45(2), 145–158.
- Parasuraman, R., & Rizzo, M. (2007). Neuroergonomics: The Brain at Work. *Oxford University Press*.
- Rahardjo, M., et al. (2023). MCDM for Industry 4.0 adoption. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136381.
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). SWAT method. In *Human Mental Workload*, 185–218.
- Reiman, T., Oedewald, P., & Rollenhagen, C. (2021). Human factors in complex systems. *Safety Science*, 140, 105127.
- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). SWAT vs. NASA-TLX. *Applied Psychology*, 53(1), 61–86.
- Rubio-Valdehita, S., López-Núñez, M. I., López-Higes, R., & Díaz-Ramiro, E. M. (2017). CarMen-Q development. *Psicothema*, 29(4), 570–576.
- Sadeghi-Niaraki, A., et al. (2019). MCDM for Industry 4.0 priorities. *Technological Forecasting and Social Change*, 139, 297–305.
- Sheridan, T. B. (2016). Human–robot interaction. *Human Factors*, 58(4), 525–532.
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). Human factors methods. *CRC Press*.
- Sumrit, D. (2021). Industry 4.0 barrier analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 674–690.
- Tao, F., Zhang, H., & Liu, A. (2019). Digital twins and human–machine integration. *Engineering*, 5(5), 728–735.
- Topgül, S., & Alan, Ç. (2017). ÖĞRENCİLERİN İŞ GÜVENLİĞİ VE İŞ GÜVENLİĞİ EĞİTİMİ ALGISININ DEĞERLENDİRİLMESİ. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 587-598.
- Turpin, A., Shier, M. L., Nicholas, D., & Graham, J. R. (2021). İş yükü ve işyeri güvenliği. *Sosyal Hizmet Dergisi*, 21(3), 575–594.
- Vidhyatharan, R. (2024). AR/VR adoption and cognitive load. *Journal of Cognitive Engineering*, 18(2), 142–160.
- Wickens, C. D. (2002). Situation awareness in aviation. *Current Directions in Psychological Science*, 11(4), 128–133.
- Wickens, C. D., Helton, W. S., Hollands, J. G., & Banbury, S. (2021). Engineering psychology and human performance. *Routledge*.
- Witkowski, K. (2017). Cybersecurity in Industry 4.0. *Economics and Management Innovations*, 1(1), 1–8.
- Wollschlaeger, M., Sauter, T., & Jasperneite, J. (2017). Industrial communication future. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 17–27.
- Xie, B., & Salvendy, G. (2000). Modelling mental workload. *Work & Stress*, 14(1), 74–99.

- Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). Mental workload state-of-science. *Ergonomics*, 58(1), 1–17.
- Zayat, K., et al. (2023). Fuzzy MCDM for Industry 4.0 barriers. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 108–132.
- Zijlstra, F. R. H. (1995). Efficiency in work behaviour: A design approach for modern tools.

BÖLÜM 7

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ PERSPEKTİFİNDEN ZİHİNSEL İŞ YÜKÜ: ÖLÇÜM, DEĞERLENDİRME VE İŞ SAĞLIĞI AÇISINDAN YORUMLAR

SAMET TOSUN¹

Giriş

Küresel rekabetin giderek arttığı günümüz endüstriyel ortamlarında iş süreçlerinin yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda bilişsel gereklilikleri de dikkate alınması zorunlu hâle gelmiştir. Hizmet sektörünün genişlemesi, otomasyon sistemlerinin yaygınlaşması ve bilgi teknolojilerinin iş yaşamına entegrasyonu, çalışanların zihinsel kapasitelerini daha yoğun kullanmalarını gerektirmektedir (Young et al., 2015). Bu bağlamda zihinsel iş yükü, bireyin görevi yerine getirirken bilişsel kaynaklarını ne ölçüde kullandığını gösteren kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır (Hart & Staveland, 1988). Yükün artması yalnızca bireysel performansı değil; sistem güvenliğini, verimliliği ve iş kazalarını da doğrudan etkilemektedir (Xie & Salvendy, 2000).

Endüstri mühendisliği disiplini, insan faktörünü göz ardı etmeden sistemlerin verimli ve güvenli çalışmasını sağlamaya yönelik çok boyutlu bir yaklaşım sunar. Bu disiplin, ergonomi, iş etüdü, sistem analizi ve üretim yönetimi süreçlerinde bilişsel sınırların dikkate alınmasını zorunlu kılar (Wickens et al., 2021). Zihinsel iş yükü bu çerçevede yalnızca bireysel değil, aynı zamanda sistemsel düzeyde de ele alınması gereken bütüncül bir değişkendir. Özellikle yüksek dikkat, hızlı karar verme ve bilgi yoğunluğu gerektiren görevlerde bilişsel yükün artması, hata yapma olasılığını ve iş güvenliği risklerini yükseltmektedir (Cain, 2007).

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) bağlamında zihinsel iş yükü sıklıkla psikososyal risk etmeni olarak değerlendirilmektedir (European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA], 2019). Ancak bu kavramın yalnızca klasik ergonomi çerçevesinde değil, aynı zamanda ölçülebilir, yönetilebilir ve azaltılabilir bir boyutta ele alınması gereklidir. Bu yaklaşım, hem iş kazalarının önlenmesi hem de çalışan sağlığının korunması açısından kritik bir gereklilik sunar. Zihinsel iş yükünün yönetimi, yalnızca bireysel stresin azaltılması değil; aynı zamanda güvenli, sürdürülebilir ve üretken iş ortamlarının oluşturulmasının da temel bileşenidir (Turpin et al., 2021).

Bu kitap bölümü, zihinsel iş yükü kavramını endüstri mühendisliği perspektifiyle ele alarak iş sağlığı ve güvenliği açısından bütüncül bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır. Bölümde önce zihinsel iş yükünün kuramsal temelleri açıklanacak, ardından ölçüm yöntemleri tartışılacaktır. Devamında endüstri mühendisliği uygulamalarında zihinsel iş yükünün sistem tasarımı üzerindeki etkileri çok kriterli karar verme yaklaşımlarıyla ilişkilendirilecek; son olarak İSG bağlamında sahadan örneklerle kavramın etkileri değerlendirilecektir. Böylece hem geleneksel hem de yeni nesil

¹ Öğr. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Zile Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, ORCID: 0000-0002-5454-3057

mühendislik uygulamaları içinde zihinsel iş yükünün anlaşılması ve yönetimi için disiplinlerarası bir çerçeve sunulacaktır.

1. Zihinsel İş Yükünün Teorik Temelleri ve Tanımı

Zihinsel iş yükü, bireyin bir görevi yerine getirirken bilişsel kapasitesinin ne ölçüde kullanıldığını ifade eden çok boyutlu bir kavramdır. Bu kavram yalnızca bireysel performansla sınırlı olmayıp; sistem tasarımı, görev dağılımı ve iş güvenliği gibi pek çok faktörle de yakından ilişkilidir (Hart & Staveland, 1988). Özellikle karmaşık, zaman baskısı altında yürütülen ya da sürekli dikkat gerektiren görevlerde zihinsel iş yükü artmakta; bu durum hataların yanı sıra tükenmişlik ve stres gibi psikolojik sonuçlara da zemin hazırlamaktadır (Wickens et al., 2021).

Zihinsel iş yükünü açıklamaya yönelik kuramsal modellerden biri, Kahneman'ın (1973) geliştirdiği Kısıtlı Kaynak Modeli'dir. Bu modele göre bireyler sınırlı bir zihinsel enerji kaynağına sahiptir ve bu kaynak bilişsel görevler arasında paylaştırılır. Görevlerin karmaşıklığı veya dikkat gereksinimi arttıkça kaynak daha hızlı tükenir; bu da performans düşüşüne ve hata oranlarının artmasına yol açar. Özellikle çoklu görev ortamlarında kaynak paylaşımının karmaşıklığı, yükü artıran temel bir unsur hâline gelir.

Bir diğer önemli yaklaşım ise Wickens'in (2002) ortaya koyduğu Çoklu Kaynak Kuramı (Multiple Resource Theory)'dir. Bu kuram, zihinsel iş yükünün tek bir genel kapasiteden değil, farklı bilişsel kaynaklardan beslendiğini öne sürer. Örneğin görsel ve işitsel dikkat ayrı kaynaklara dayandığından, iki görsel görevin eşzamanlı yürütülmesi daha yüksek bilişsel çatışmaya neden olurken; görsel ve işitsel görevler daha uyumlu biçimde gerçekleştirilebilir. Bu kuram, görev tasarımı ve iş yerinde görev dağılımı yapılırken önemli ipuçları sunmaktadır.

Zihinsel iş yükü aynı zamanda öznel bir deneyimdir ve bireyden bireye farklılık gösterebilir. Aynı görev bazı çalışanlar tarafından zorlayıcı algılanırken, diğerleri için düşük yük anlamına gelebilir. Bu nedenle değerlendirmelerde yalnızca görev karakteristikleri değil, bireysel farklılıklar da göz önünde bulundurulmalıdır (Rubio et al., 2004). İş deneyimi, uzmanlık düzeyi, motivasyon ve kullanılan bilişsel stratejiler, yük algısını belirleyen temel faktörlerdendir.

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) bağlamında zihinsel iş yükü kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Yüksek zihinsel talepler; dikkat dağınıklığı, bilgi işlem hataları, riskli karar verme davranışları ve iş kazaları gibi olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir (Xie & Salvendy, 2000). Ayrıca uzun süreli yüksek bilişsel yüklenme, kronik stres, tükenmişlik ve uyku bozuklukları gibi psikososyal sorunlara da yol açabilmektedir. Dolayısıyla zihinsel iş yükü yalnızca bir performans göstergesi değil, aynı zamanda İSG kapsamında sistematik olarak dikkate alınması gereken önemli bir ergonomik parametredir.

2. Zihinsel İş Yükü Ölçüm Yöntemleri

Zihinsel iş yükü, bireylerin görev sırasında karşılaştıkları bilişsel taleplerin düzeyini ve bu taleplerin bireysel kapasiteleri üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlayan çok boyutlu bir kavramdır. Bu değerlendirme, çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde bu yöntemler genellikle üç ana grupta sınıflandırılır: performans odaklı ölçüm metotları, fizyolojik ölçüm metotları ve öznel ölçüm metotları (Rubio et al., 2004; Charles & Nixon, 2019). Aşağıda her bir kategori ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca zihinsel iş yükü ölçüm metotları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Zihinsel İş Yükü Ölçüm Metotları

Performans Odaklı Ölçüm Metotları	Fizyolojik Ölçüm Metotları	Öznel Ölçüm Metotları
1.Görev Analizi Metodu	1.Beyin Aktivitesi Ölçüm Metodu	1.Tek Boyutlu Ölçüm Metotları

2.Aktivite Ölçüm Metodu	2.Konuşma Ölçüm Metodu	a.Zihinsel Çabayı Değerlendirme Ölçüm Metodu
3.Hız ve Akıcılık Ölçüm Metodu	3.Göz Aktivitesi Ölçüm Metodu	b.Tüm İş yükü Ölçüm Metodu
4.Birincil Görev Performansı Ölçüm Metodu	4.Solunum Aktivitesi Ölçüm Metodu	c.Cooper-Harper Ölçüm Metodu
5.İkincil Görev Performansı Ölçüm Metodu	5.Kalp Aktivitesi Ölçüm Metodu	d.Modifiye Cooper-Harper Ölçüm Metodu
		e.Honeywell Cooper-Harper Ölçüm Metodu
		f.Zihinsel Aktivasyon Ölçüm Metodu
		2.Çok Boyutlu Ölçüm Metotları
		a.Öznel İş Yükü Değerlendirme Tekniği (SWAT)
		b.NASA-TLX
		c.CarMen-Q
		d.Diğer Çok Boyutlu Ölçekler
		-Analitik Hiyerarşi Prosesi
		-Çoklu Tanımlayıcı Ölçek
		-İş Yükü/Tazmin/Girişim/Teknik Etkinlik Ölçeği
		3.Diğer Öznel Ölçüm Metotları
		a.Öznel Sayısal Ölçüm Metotları
		-Modifiye Bedford İş Yükü Ölçeği
		-Bedford İş Yükü Ölçeği
		-Anlık Öz Değerlendirme Metodu
		b.Öznel Sayısal Ölçüm Metotları
		-Öznel İş Yükü Baskınlık Tekniği

2.1. Performans Odaklı Ölçüm Metotları

Performans temelli ölçüm yöntemleri, bireyin görev sırasında sergilediği davranışsal performansla dayalı olarak zihinsel iş yükünü değerlendirmeye çalışır. Bu yöntemler, özellikle görev başarımı, hata oranı, hız ve dikkat gibi değişkenleri dikkate alır.

2.1.1. Görev analizi metodu

Görev bileşenlerinin zorluk derecesi, ardışıklığı ve sürekliliği üzerinden analiz yapılır. Görev karmaşıklığı ne kadar fazlaysa, zihinsel iş yükü o ölçüde artar. Bu yaklaşım çoğunlukla iş etüdü ve ergonomi çalışmalarında tercih edilir.

2.1.2. Aktivite Ölçüm Metodu

Görev sırasında harcanan zaman, fiziksel hareketlilik ve bilişsel geçişler analiz edilerek yük derecelendirilir. Bu yöntem, üretim ve hizmet süreçlerinde sıklıkla kullanılır.

2.1.3. Hız ve Akıcılık Ölçüm Metodu

Görevlerin yerine getirilme süresi ve hata düzeyleri temel alınarak yük hesaplanır. Zihinsel yük arttıkça hız azalır, hata oranı yükselir.

2.1.4. Birincil Görev Performansı Ölçüm Metodu

Çalışanın asli görevi üzerindeki başarı düzeyi doğrudan değerlendirilir. Zihinsel yükün artması genellikle performans düşüklüğü ile sonuçlanır.

2.1.5. İkincil Görev Performansı Ölçüm Metodu

Birincil görev devam ederken verilen ikincil görevin başarı düzeyi değerlendirilir. Zihinsel yükün yüksek olduğu durumlarda ikincil görevde performans düşüşü beklenir (Gopher & Donchin, 1986).

2.2. Fizyolojik Ölçüm Metotları

Fizyolojik ölçüm yöntemleri, bireyin bilişsel çabası sonucu ortaya çıkan biyolojik değişimleri analiz ederek zihinsel yükü belirlemeye çalışır. Bu yöntemler, doğrudan ve gerçek zamanlı veri elde etme imkânı sunar.

2.2.1. Beyin Aktivitesi Ölçüm Metodu (EEG)

Elektroensefalografi (EEG), bireyin bilişsel aktivitesini ve dikkat düzeyini beyin dalgaları üzerinden ölçer. Zihinsel iş yükü arttıkça belirli EEG dalgalarının (örneğin, theta ve beta) yoğunluğu artar (Berka et al., 2007).

2.2.2. Konuşma Ölçüm Metodu

Konuşma hızı, kelime seçimi ve duraklama süreleri, bireyin zihinsel yüküne dair ipuçları verir. Özellikle çağrı merkezi ve pilot çalışmaları gibi görevlerde faydalıdır.

2.2.3. Göz Aktivitesi Ölçüm Metodu (Eye-tracking)

Göz hareketleri, bakış süresi ve pupillometri (göz bebeği çapı), zihinsel yükün belirteçleri olarak kabul edilir. Göz bebeği çapı arttıkça zihinsel yükün de arttığı düşünülür (Beatty, 1982).

2.2.4. Solunum Aktivitesi Ölçüm Metodu

Zihinsel stresle birlikte solunum derinliği ve hızı değişebilir. Bu değişimlerden yük düzeyi tahmin edilebilir.

2.2.5. Kalp Aktivitesi Ölçüm Metodu (HRV)

Kalp atım hızı ve değişkenliği (HRV), zihinsel iş yükünün fizyolojik etkilerini yansıtır. Özellikle stresli veya kritik karar alma süreçlerinde etkilidir.

2.3. Öznel Ölçüm Metotları

Öznel yöntemler, bireylerin zihinsel iş yükünü kendi algılarına göre derecelendirdiği araçlardır. Geniş uygulama alanı, düşük maliyet ve yüksek kullanıcı kabulü sayesinde oldukça yaygındır.

2.3.1. Tek Boyutlu Ölçüm Metotları

- Zihinsel Çabayı Değerlendirme Ölçeği (RSME): Görsel analog skala ile genel çaba algısı ölçülür (Zijlstra, 1995).
- Cooper-Harper Ölçeği: Görev zorluğu ve kontrol hissi birlikte değerlendirilir.
- Zihinsel Aktivasyon Ölçüm Metotları: Yük algısına dair tek boyutlu değerlendirme içerir.

2.3.2. Çok Boyutlu Ölçüm Metotları

- NASA-TLX: Zihinsel, fiziksel, zamansal talep; çaba, performans, hayal kırıklığı boyutlarında değerlendirme sağlar (Hart & Staveland, 1988).
- SWAT: Zaman baskısı, zihinsel çaba ve stres düzeyine göre üç boyutlu sınıflandırma yapılıdır (Reid & Nygren, 1988).
- CarMen-Q: Dikkat, belirsizlik, bilgi yükü, duygusal çaba gibi bilişsel alt boyutlarda ölçüm yapılıdır (Rubio et al., 2017).
- Diğer çok boyutlu ölçekler: İş yükü/teknik etkinlik/girişim gibi özel alanlarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

2.3.3. Özel Amaçlı Ölçekler ve Sayısal Yaklaşımlar

- Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP): Kriter ağırlıklandırmasına dayalı öznel değerlendirme.

- Özel Sayısal Ölçekler ve İş Yüğü Baskınlık Ölçekleri: Belirli karar süreçleri veya uzman değerlendirmeleri için geliştirilmiştir.

Öznel ölçüm yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirme tablosu Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Karşılaştırmalı Değerlendirme Tablosu: Öznel Ölçüm Yöntemlerinin Kıyaslanması

Yöntem	Boyut Sayısı	Temel Ölçüm Alanları	Avantajları	Sınırlılıkları	Kullanım Alanları
NASA-TLX	6	Zihinsel, fiziksel, zamansal talep; çaba, performans, stres	Yaygın, geçerli, ağırlıklı puanlama seçeneği	Ağırlıklandırma süreci karmaşık olabilir	Tüm sektörlerde yaygın kullanım
SWAT	3	Zaman baskısı, zihinsel çaba, psikolojik stres	Kuramsal sağlamlık, çoklu kombinasyon imkânı	Karmaşık kodlama, uygulaması zaman alıcı	Havacılık, savunma, yüksek dikkat görevleri
CarMen-Q	5+	Dikkat, bilgi işleme, belirsizlik, duygusal yük, iş karmaşıklığı	Görev bazlı detaylı değerlendirme, yüksek mesleki geçerlilik	Yeni bir ölçek; bazı dillerde geçerlik çalışmaları sınırlı	Akademi, sağlık, hizmet sektörü
RSME	1	Genel zihinsel çaba	Hızlı, görsel analog skala, kolay anlaşılır	Sadece tek boyutta ölçüm sunar	Eğitim, üretim, ofis görevleri
Cooper-Harper	1	Görev zorluğu + kontrol kabiliyeti	Havacılıkta kabul görmüş, uygulayıcı dostu	İnsan-makine sistemlerine özgü; diğer görev türleri için sınırlı olabilir	Havacılık, otonom sistemler
Workload Profile	8	Bilişsel kaynaklar, duyu-motor sistem, bellek, tepki zamanı	Çoklu kaynak kuramı ile uyumlu, kapsamlı analiz	Uygulaması zaman alabilir, detaylı eğitim gerekebilir	Ergonomi, sistem tasarımı, yazılım mühendisliği
ISA	1 (sürekli)	Zaman içinde iş yükü algısı	Dinamik görevlerde iş yükü değişimini izleme imkânı	Görev kesintisine yol açabilir, ölçüm sıklığı etki yaratabilir	Uçuş, simülasyon, askeri görevler
Diğer Ölçekler	Değişken	Göreve ve bağlama özel alanlar	Uyarlanabilir, bağlama özgü analiz olanağı	Standardizasyon eksikliği, karşılaştırılabilirlik düşük	Araştırma, mühendislik karar destek sistemleri

3. Endüstri Mühendisliği Uygulamalarında Zihinsel İş Yüğü

Endüstri mühendisliği, insan, makine, malzeme, enerji ve bilgi kaynaklarının koordinasyonunu sağlayarak sistemlerin verimliliğini ve güvenliğini optimize etmeye yönelik bir disiplindir. Bu çerçevede, insan-makine etkileşiminin sadece fiziksel değil, aynı zamanda bilişsel düzeyde de değerlendirilmesi gerekir. Zihinsel iş yükü, özellikle yüksek dikkat, bilgi işleme, karar verme ve problem çözme gibi bilişsel süreçlerin yoğun olduğu iş ortamlarında sistem performansını doğrudan etkileyen kritik bir değişkendir (Wickens et al., 2021). Bu nedenle, endüstri mühendisliği uygulamalarında zihinsel iş yükünün tasarım, analiz ve iyileştirme süreçlerine entegrasyonu büyük önem taşımaktadır.

3.1. İş Tasarımı ve Ergonomi Perspektifi

Endüstri mühendisliğinin temel uygulama alanlarından biri olan iş tasarımı, çalışanların görevlerini fiziksel ve bilişsel kapasitelerine uygun şekilde düzenlemeyi amaçlar. Bu bağlamda, bilişsel ergonomi yaklaşımları, görevlerin zihinsel talep düzeyine göre yeniden yapılandırılmasına yardımcı olur. Örneğin, iş istasyonlarının tasarımında sadece fiziksel erişilebilirlik değil, aynı zamanda bilgi yoğunluğunun dengelenmesi, ekran düzeni, alarm sistemlerinin frekansı ve karar verme süreleri gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır (Stanton et al., 2017).

Zihinsel iş yükü yüksek olan sistemlerde aşırı bilgi yüklemesi, dikkat dağınıklığı, gecikmiş tepkiler ve hata olasılığında artış gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu durum yalnızca çalışan sağlığını değil, aynı zamanda üretkenliği ve sistem güvenliğini de riske atar (Cain, 2007). Bu nedenle iş tasarımı süreçlerinde zihinsel yük analizi, önleyici bir İSG stratejisi olarak ele alınmalıdır.

3.2. Süreç İyileştirme ve Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları

Endüstri mühendisliği disiplininde, süreçlerin iyileştirilmesi genellikle çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarına dayalıdır. Bu yöntemler sayesinde bir sürecin performansı sadece maliyet, kalite ve zaman gibi objektif kriterlere göre değil, aynı zamanda çalışan memnuniyeti, iş yükü, hata riski gibi subjektif kriterlerle de bütüncül biçimde değerlendirilebilir.

Zihinsel iş yükü değerlendirmesinde bulanık mantık tabanlı modeller sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR ve q-Rung Orthopair Hesitant Fuzzy Best-Worst Method (q-ROHF-BWM) gibi yöntemler, görevlerin ya da iş istasyonlarının zihinsel yük düzeyine göre sıralanmasına olanak tanır (Chakraborty & Zavadskas, 2014; Bell et al., 2022). Bu modellerde uzman görüşleriyle görevler arasında ikili karşılaştırmalar yapılır ve göreceli önem ağırlıkları belirlenir. Böylece, bilişsel yükü optimize edecek süreç tasarımları mümkün olur.

3.3. Üretim ve Hizmet Sektörlerinde Uygulama Örnekleri

Üretim sektöründe, operatörlerin aynı anda birden fazla makineyi izlediği ya da çok adımlı görevler yürüttüğü iş ortamlarında, zihinsel yük kritik düzeyde artabilir. Bu durumda, görsel sinyal sistemleri, karar destek yazılımları veya görev rotasyonları gibi ergonomik müdahalelerle yük dengelenebilir (Filho et al., 2023).

Hizmet sektöründe, özellikle sağlık, eğitim ve müşteri hizmetleri gibi alanlarda zihinsel iş yükü doğrudan insan etkileşimi ve karar verme süreçleriyle ilişkilidir. Örneğin, hemşirelerin çoklu hasta takibi yaptığı vardiyalı sistemlerde, zihinsel yük düzeyi doğrudan hata olasılığına yansımaktadır. Bu nedenle vardiya planlaması, bilgi akışı düzeni ve görev çeşitliliği gibi faktörler endüstri mühendisliği bakış açısıyla yeniden yapılandırılmalıdır.

Ayrıca, üniversite düzeyindeki öğretim elemanlarında yürütülen çalışmalar, akademik görev yoğunluğunun zihinsel iş yükünü artırarak iş tatmini ve sağlık üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir (Öngel, 2020). Bu gibi veriler, akademik personelin görev dağılımlarında ÇKKV destekli optimizasyonların kullanılabileceğini göstermektedir.

3.4. Zihinsel İş Yükü Azaltımına Yönelik Tasarım İlkeleri

Endüstri mühendisliği yaklaşımıyla zihinsel iş yükünü azaltmak amacıyla bazı temel tasarım ilkeleri uygulanabilir:

- **Görev Dağılımı:** Bilişsel açıdan yoğun görevler, çalışanlar arasında dengeli biçimde paylaştırılmalıdır.
- **Bilgi Sunumu:** Bilgi akışı sadeleştirilmeli, kritik bilgiler önceliklendirilmelidir.

- İkincil Görevlerin Azaltılması: Zihinsel yükü artıran ikincil görevler otomatikleştirilebilir.
- Süreç Standartlaştırması: Karar verme belirsizliği azaltılarak çalışanların zihinsel çabası düşürülebilir.
- Geribildirim Sistemleri: Çalışanlara anlık geribildirim sağlayan sistemler yük dengelemesi sağlar.

4. İş Sağlığı ve Güvenliği Bağlamında Zihinsel İş Yükü

Zihinsel iş yükü, geleneksel iş sağlığı ve güvenliği (İSG) değerlendirmelerinde çoğu zaman göz ardı edilen ancak çalışan sağlığı, güvenliği ve sistem bütünlüğü açısından oldukça kritik bir etkidir. Fiziksel risklerin açıkça tanımlanabildiği iş ortamlarında dahi, zihinsel yorgunluk, dikkat dağınıklığı, bilişsel çatışma ve bilgi aşırı yüklenmesi gibi faktörler, ciddi iş kazalarına ve mesleki tükenmişliğe yol açabilir (EU-OSHA, 2019). Bu nedenle zihinsel iş yükünün, fiziksel ve kimyasal risk etmenleri kadar sistematik biçimde izlenmesi ve yönetilmesi gereklidir.

4.1. Zihinsel İş Yükü ve Psikososyal Risk Etmenleri

İSG kapsamında zihinsel iş yükü çoğunlukla psikososyal risk etmeni olarak değerlendirilir. Psikososyal riskler; işin organizasyonu, iş talepleri, rol belirsizlikleri, sosyal destek eksikliği ve karar verme yükü gibi unsurlardan kaynaklanır (Cox & Griffiths, 2005). Bu unsurlar, çalışanlarda zihinsel yükün kronikleşmesine, stres bozukluklarına, iş tatminsizliğine ve performans düşüklüğüne yol açabilir.

Yüksek zihinsel iş yükü özellikle bilişsel kararların sürekli verildiği ve hatanın büyük sonuçlar doğurabileceği işlerde kritik bir risk faktörüdür. Havacılık, sağlık, ulaşım, enerji ve eğitim sektörlerinde yapılan çalışmalarda, zihinsel yük düzeylerinin arttığı ortamlarda hata oranının da anlamlı biçimde yükseldiği ortaya konmuştur (Turpin et al., 2021). Bu durum yalnızca bireysel refahı değil, sistem güvenliğini de tehdit eden bir faktördür.

4.2. Zihinsel İş Yükünün İSG Yönetim Sistemlerine Entegrasyonu

Zihinsel iş yükünün İSG yönetim sistemlerine entegre edilmesi, risk değerlendirme süreçlerinin daha bütüncül hâle getirilmesini sağlar. ISO 45001 standardında psikososyal risklerin tanımlanması ve yönetilmesi gerekliliği açıkça belirtilmiştir. Bu bağlamda zihinsel iş yükünün;

- Görev analizlerine entegre edilmesi,
- Risk değerlendirme formlarında “bilişsel yük” kategorisinin tanımlanması,
- Sürekli izleme ve değerlendirme süreçlerinde fizyolojik ve öznel ölçümlerin birlikte kullanılması,

gibi uygulamalar, çalışan sağlığının korunması ve iş kazalarının önlenmesinde etkili olabilir.

Ayrıca, zihinsel yükün erken uyarı sistemleri ile izlenmesi, kritik görevlerde görev rotasyonları, mola düzenlemeleri, görev zenginleştirme ve karar destek sistemleri ile desteklenmesi gibi stratejiler, bilişsel yükü dengeleyici önlemler arasında yer alır (Charles & Nixon, 2019).

4.3. Meslek Gruplarına Göre Zihinsel İş Yükü Farklılıkları

Zihinsel iş yükü, görev türüne, meslek grubuna ve organizasyon yapısına göre büyük farklılıklar gösterir. Örneğin, üretim sektöründe çalışan bir operatörün zihinsel yükü, sürekli dikkat gerektiren bir dizi izleme görevinden kaynaklanırken; bir akademisyenin zihinsel yükü ise karar verme, içerik üretimi, öğrenci etkileşimi ve çoklu görev yürütme gibi faktörlerle şekillenir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, öğretim elemanlarının ve sağlık çalışanlarının zihinsel iş yükü düzeylerinin ortalamasının üzerinde olduğu, özellikle zaman baskısı ve belirsizlik kaynaklı yüklerin yoğunlaştığı belirlenmiştir (Topgül & Alan, 2017; Öngel, 2020). Bu durum, tükenmişlik sendromu, uyku bozuklukları, dikkat dağınıklığı ve hata olasılığının artması gibi sonuçlara yol açmaktadır.

4.4. Kurumsal Düzeyde Önleyici Uygulamalar

Kurumsal düzeyde zihinsel iş yükünü azaltmaya yönelik atılabilecek adımlar şunlardır:

- Eğitim ve Farkındalık: Psikososyal riskler ve zihinsel yük hakkında çalışanların bilgilendirilmesi.
- Görev Rotasyonu ve Zenginleştirme: Monoton görevlerin değiştirilmesi, çok yönlü beceri kullanımı.
- Geri Bildirim Mekanizmaları: Çalışanların görev zorlukları ve bilişsel yükleri hakkında görüş bildirmeleri.
- Dijital Destek Sistemleri: Karar verme süreçlerini kolaylaştıracak yazılım ve otomasyon çözümleri.

Bu tür önlemler, sadece iş kazalarının değil, aynı zamanda çalışan memnuniyetsizliğinin ve iş gücü kaybının da önüne geçilmesini sağlar.

Sonuç ve Değerlendirme

Zihinsel iş yükü, günümüz iş ortamlarında giderek daha fazla önem kazanan ve sadece bireysel performansı değil, aynı zamanda sistem güvenliğini, üretkenliği ve çalışan sağlığını etkileyen kritik bir faktördür. Bu kitap bölümünde zihinsel iş yükü kavramı; teorik temelleri, ölçüm yöntemleri, endüstri mühendisliği uygulamaları ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) bağlamı çerçevesinde çok boyutlu bir yaklaşımla ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, zihinsel iş yükünün yalnızca ergonomik veya psikolojik bir unsur olarak değil, aynı zamanda sistem düzeyinde stratejik bir tasarım ve yönetim bileşeni olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Zihinsel iş yükünün doğru ve geçerli biçimde ölçülmesi, bu yükün azaltılmasına yönelik etkili müdahalelerin ilk adımıdır. Öznel, fizyolojik ve performans temelli yöntemler bu bağlamda birbirini tamamlayıcı nitelikte olup, özellikle çok boyutlu değerlendirme gerektiren ortamlarda hibrit yaklaşımların kullanılması önerilmektedir. NASA-TLX, CarMen-Q, EEG, göz izleme ve ikincil görev performansı gibi araçlar, farklı sektörlerde güvenliğin ve verimliliğin artırılması amacıyla etkin biçimde kullanılabilir.

Endüstri mühendisliği perspektifinden bakıldığında, zihinsel iş yükü analizi; iş tasarımı, süreç iyileştirme, sistem modelleme ve karar verme süreçlerinde giderek daha belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ile zihinsel iş yükü unsurlarının ağırlıklandırılması ve bu doğrultuda iş süreçlerinin yeniden yapılandırılması mümkündür. Bu durum, üretim hatlarından hizmet sektörüne kadar geniş bir uygulama yelpazesinde, çalışan sağlığı ve sistem etkinliği arasında denge kurmayı sağlamaktadır.

İSG çerçevesinde zihinsel iş yükü, artık sadece bireysel stresin bir sonucu değil, aynı zamanda kurumsal risk yönetiminin ayrılmaz bir bileşeni olarak kabul edilmelidir. ISO 45001 gibi uluslararası standartlar çerçevesinde psikososyal risklerin tanımlanması, zihinsel yük unsurlarının da risk değerlendirme süreçlerine entegrasyonunu gerektirmektedir. Bu kapsamda, bilişsel yük izleme sistemlerinin geliştirilmesi, görev rotasyonlarının yeniden tasarımı, dijital karar destek sistemlerinin kullanımı ve çalışanların psikososyal farkındalık düzeylerinin artırılması önerilmektedir.

Bu çalışmanın bulguları doğrultusunda aşağıdaki temel öneriler sunulmaktadır:

- Zihinsel iş yükü, ergonomi ve İSG değerlendirme süreçlerine sistematik olarak entegre edilmelidir.
- Ölçüm yöntemlerinin seçiminde bağlamsal uygunluk dikkate alınarak çoklu değerlendirme araçları birlikte kullanılmalıdır.
- Endüstri mühendisliği uygulamalarında ÇKKV yöntemleri ile zihinsel yük parametreleri optimize edilmelidir.
- Kurumsal düzeyde eğitim, görev çeşitlendirme ve teknolojik destek sistemleriyle zihinsel yük dengelemesi sağlanmalıdır.
- İleriye dönük olarak yapay zekâ tabanlı zihinsel iş yükü tahmin sistemleri geliştirilerek proaktif önlemler alınmalıdır.

Zihinsel iş yükü sadece bireyin değil, tüm sistemin performansını etkileyen kritik bir bileşendir. Endüstri mühendisliğinin sistematik yaklaşımı ile iş sağlığı ve güvenliğinin insan odaklı vizyonu, bu alanda sürdürülebilir ve yenilikçi çözümlerin temelini oluşturmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların, bilişsel ergonomi, nöroergonomi ve yapay zekâ destekli analiz yöntemleri ile zenginleştirilmesi, hem akademik literatüre hem de uygulama sahasına değerli katkılar sunacaktır.

KAYNAKÇA

- Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276–292. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>
- Berka, C., Levendowski, D. J., Cvetinovic, M. M., Petrovic, M. M., Davis, G., Lumicao, M. N., ... & Olmstead, R. (2004). Real-time analysis of EEG indexes of alertness, cognition, and memory acquired with a wireless EEG headset. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(2), 151-170.
- Cain, B. (2007). A review of the mental workload literature. *Defence Research and Development Canada*.
- Chakraborty, S., & Zavadskas, E. K. (2014). Applications of WASPAS method in manufacturing decision making. *Informatica*, 25(1), 1–20.
- Charles, R. L., & Nixon, J. (2019). Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Applied Ergonomics*, 74, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.028>
- Cox, T., & Griffiths, A. (2005). The nature and measurement of work-related stress: Theory and practice. In J. R. Wilson & N. Corlett (Eds.), *Evaluation of Human Work* (3rd ed., pp. 553–572). CRC Press.
- European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2019). *Work-related stress: Facts and figures*. <https://osha.europa.eu/>
- Bell, S. W., Kong, J. C., Clark, D. A., Carne, P., Skinner, S., Pillinger, S., ... & Brown, W. (2022). The National Aeronautics and Space Administration-task load index: NASA-TLX: evaluation of its use in surgery. *ANZ journal of surgery*, 92(11), 3022-3028.
- Gopher, D., & Donchin, E. (1986). Workload: An examination of the concept. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance* (Vol. 2). John Wiley & Sons.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (pp. 139–183). North-Holland.
- Filho, P. A., da Silva, L., Pombeiro, A., Costa, N., Carneiro, P., & Arezes, P. (2023). Assessing mental workload in industrial environments: A review of applied studies. *Occupational and Environmental Safety and Health V*, 677-689.
- Kahneman, D. (1973). Attention and effort. *Prentice-Hall*.
- Turpin, A., Shier, ML, Nicholas, D. ve Graham, JR (2021). Sosyal hizmet kuruluşlarında iş yükü ve işyeri güvenliği. *Sosyal hizmet dergisi*, 21 (3), 575-594.
- Reid, G. B., & Nygren, T. E. (1988). The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Human Mental Workload* (pp. 185–218). North-Holland.
- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile methods. *Applied Psychology*, 53(1), 61–86. <https://doi.org/10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x>
- Rubio-Valdehita, S., López-Núñez, M. I., López-Higes, R., & Díaz-Ramiro, E. M. (2017). Development of the CarMen-Q Questionnaire for mental workload assessment. *Psicothema*, 29(4), 570-576.
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). Human factors methods: a practical guide for engineering and design. CRC Press.

- Topgul, S., & Alan, C. (2017). Ogrencilerin Is Guvenligi Ve Is Guvenligi Egitimi Algisinin Degerlendirilmesi. *Suleyman Demirel University Journal Of Faculty Of Economics & Administrative Sciences*, 22 (2).
- Öngel, V. (2020). Akademisyenlerin yaşam doyumları ve iş doyumlarını etkileyen iş kaynaklı faktörlerin incelenmesi. *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 10(3), 461-473.
- Wickens, C. D. (2002). Situation awareness and workload in aviation. *Current directions in psychological science*, 11(4), 128-133.
- Wickens, C. D., Helton, W. S., Hollands, J. G., & Banbury, S. (2021). Engineering psychology and human performance. *Routledge*.
- Xie, B., & Salvendy, G. (2000). Review and reappraisal of modelling and predicting mental workload in single- and multi-task environments. *Work & Stress*, 14(1), 74-99.
- Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: Mental workload in ergonomics. *Ergonomics*, 58(1), 1-17.
- Zijlstra, F. R. H. (1995). Efficiency in work behaviour: A design approach for modern tools.

BÖLÜM 8

BİR TEKSTİL FABRİKASINDA BOYAHANE BÖLÜMÜNDE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMASI

GAMZE CEYLAN¹
TÜLAY KORKUSUZ POLAT²

Giriş

Tekstil ve hazır giyim sektörü dünyadaki birçok ülke için olduğu gibi Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için de oldukça önemlidir. Son yıllarda uluslararası tekstil üretimi rekabetine yeni ülkeler de katılmaktadır ve bunun bir dezavantajı olarak Türkiye'deki tekstil işletmeleri giderek zayıflamaktadır. Bu durumda pazardaki güçlü ve yeni rakipler ile rekabet edebilmek için verimlilik ve etkinliğe

¹ Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0009-0004-2674-4689

² Doç. Dr. Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-6693-7873

önemin artması ve elde olan kaynakların en iyi şekilde kullanılmasına özen gösterilmesi gerekmektedir. Sahip olunan kaynakların etkin kullanılmaması ve üretim hatlarında oluşan dar boğazların veya dengesiz iş akışlarının oluşması başlıca üretim süreci sorunlarından. Bu sorunlar kalite ve verimliliği düşürmenin yanı sıra müşteri memnuniyetini de düşürmektedir (Takcı, 2013).

Yıllar geçtikçe işletmelerin üretim alanlarında gittikçe artan makine, insan ve üretim ekipmanlarının olduğu, müşteri tercihlerinin hızlı değişkenliği, rakiplerin baskı oluşturduğu bir ortamda üretim sistemleri daha zor ve karmaşık problemlerle karşılaşmaktadır. Karşılaşılan bu karmaşık problemlerin çözülmesi için pek çok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden bir tanesi de modelleme yaklaşımıdır (Yiğit, 2015).

Simülasyon ile modelleme, üretim işletmelerinde bulunan üretim hatlarının verimi hakkında bilgi edinme ve bu verimi arttıracak çalışmaların yapılması düşünüldüğünde yeni yapılacak olan yatırımların karlı olup olmayacağı hakkında işletme sahibine fikir vermesi, yol göstermesi açısından kullanılabilecek en uygun tekniklerdendir. Bu teknik karmaşık olan üretim sistemlerinin barındırdığı bütün elamanları ve üretim sürecini basitleştirerek sistemin çalışmasını iyileştirmeye çalışan ve karar vermede destek sağlayan önemli bir araçtır (Bağ ve Aslan, 2016).

Modern teknolojilerin gelişmesi ve bilgi sistemlerinin ilerlemesiyle birlikte, üretim sistemleri ve organizasyonlar simülasyon modelleri ve araçları kullanmalıdır. Gerçek dünya testlerinin veya değişikliklerinin imkansız veya maliyetli olduğu bir endüstriyel üretim sisteminde, simülasyon modellemesi, yöneticilerin süreçleri bir üretim hattına uygulamadan önce genel sistemin performansını değerlendirmelerine yardımcı olacaktır (Mansoori Al-yasin, vd., 2025). Literatürde simülasyon uygulamalarının yer aldığı çalışmalar bulunmaktadır. YılmazYalçiner ve Can (2019) çalışmalarında, gıda ambalajı üreten bir Firmanın yarı mamul deposunun kapasitesinin

artırılması ve üretilen ürünlerin boyutlarına göre raf yerleştirme optimizasyonu gerçekleştirilmesi kapsamında Sırt Çantası modeli ile raf optimizasyonu yapılmış ve ProModel simülasyon programı ile firmanın mevcut ve önerilen sistemi de simüle edilmiştir. Akkağıt ve Tekin (2012) çalışmalarında ortaöğretim öğrencilerinin temel elektronik ve ölçme dersindeki başarılarında simülasyonun etkisini ölçmüşlerdir.

İşletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri, değişen müşteri ihtiyaç ve beklentilerini uyum sağlayabilmeleri için bazı zamanlarda yönetim ve üretim süreçlerinde değişiklikler yapılması gerekebilmektedir. Kısalan ürün ömürleri, değişen müşteri ihtiyaç ve beklentileri, yeni rakiplerin pazara daha hızlı giriş yapmaları ve elektronik ticaret rekabetçi piyasanın temel belirleyicileridir. Ve bu belirleyiciler işletmelerin süreç iyileştirme yapmasına neden olmaktadır (Kaygusuz ve Kaygusuz, 2014). Süreç iyileştirmede süreç içinde yer alan darboğazların elimine edilmesi veya mevcut süreç akışındaki işlemlerin daha iyi yapılmasına yönelik çalışmalardır. (Yıldız, 2021). Süreç iyileştirme çalışmaları kapsamında simülasyon, istatistiksel analiz yöntemleri, balık kılçığı diyagramı, pareto analizi gibi tekniklere başvurulmaktadır (GünerGören ve Tosun, 2024). Süreç iyileştirme ile ilgili olarak yapılan pek çok literatür çalışmasına rastlamak mümkündür. Yıldız ve Arslan (2013) çalışmalarında ağaç işleri atölyesinin kesim hattı için süreç iyileştirme uygulaması anlatmışlardır. Tuzkaya ve Aksu (2013) ise çalışmalarında üretimde ara stok yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi yönünde bir uygulama yapmışlardır. Gülmez ve KorkusuzPolat (2024) çalışmalarında otomotiv firmasının depo alanı için saha yerleşiminde iyileştirme çalışması yapmışlardır. YılmazYalçın vd. (2023) müşteriden gelen şikayetler doğrultusunda hataların düzeltilerek sürecin iyileştirilmesi için 5 neden analizi kullanarak hatalara çözüm üretmişlerdir.

Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı: İki değişken arasındaki bağımlılığın ölçüsü olarak kullanılan parametrik olmayan istatistik

ölçüsüdür. Veri dağılımı normal olmadığında ve test örneğinin veri sayısı 30'dan az olan istatistiksel kütlelerde kullanılması uygundur.

Test sonucunda bulunan korelasyon kat sayısı r_s olarak ifade edilir. r_s değeri iki değişken arasındaki bağıın yönünü ve şiddetini verir. r_s değeri pozitif ise artan negatif ise azalan bir ilişki olduğu yorumu yapılmaktadır. r_s değeri -1 ile +1 değeri arasında bir değer olarak 1 e yaklaştıkça değişkenler arasındaki ilişki gücü artar. Test istatistiği sonucu bulunan p anlamlılık düzeni belirlenen anlamlılık düzeyi α 'dan küçük ($p < \alpha$) ise kurulan H_0 hipotezi ret edilir ve H_1 hipotezi kabul edilerek iki değişken arasında anlamlı bir ilişki olduğuna karar verilmektedir.

Bu çalışmada mevcut durum sisteminde karşılaşılan problemleri görmek ve bu problemlere geliştirilen iyileştirme senaryolarını hızlı ve maliyetsiz olarak uygulamak amacıyla simülasyon yöntemine başvurulmuş ve ARENA simülasyon programı kullanılmıştır. Ayrıca istatistiksel hipotez testlerinden Spearman Rank Korelasyon Katsayısı kullanılarak geçerlilik testi yapılacaktır. Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı uygulaması SPSS istatistik programı kullanılarak uygulanacaktır.

UYGULAMA

Bu çalışma Sakarya ilinde 80,000m² kapalı alanı ile bünyesinde 540 kişiye istihdam sağlayan ve tül perde, perdelik kumaş, tergal, elastik, dantel, polyester iplik, ev tekstil üretim ve pazarlama ile iç ve dış pazarlara satış ve mağazacılık konularında faaliyet göstermekte olan bir fabrikada yapılmıştır. Fabrika haftalık 6 gün 3 vardiya sistemiyle çalışmaktadır. Günlük 8 saatlik mesaide yarım saat mola verilmektedir.

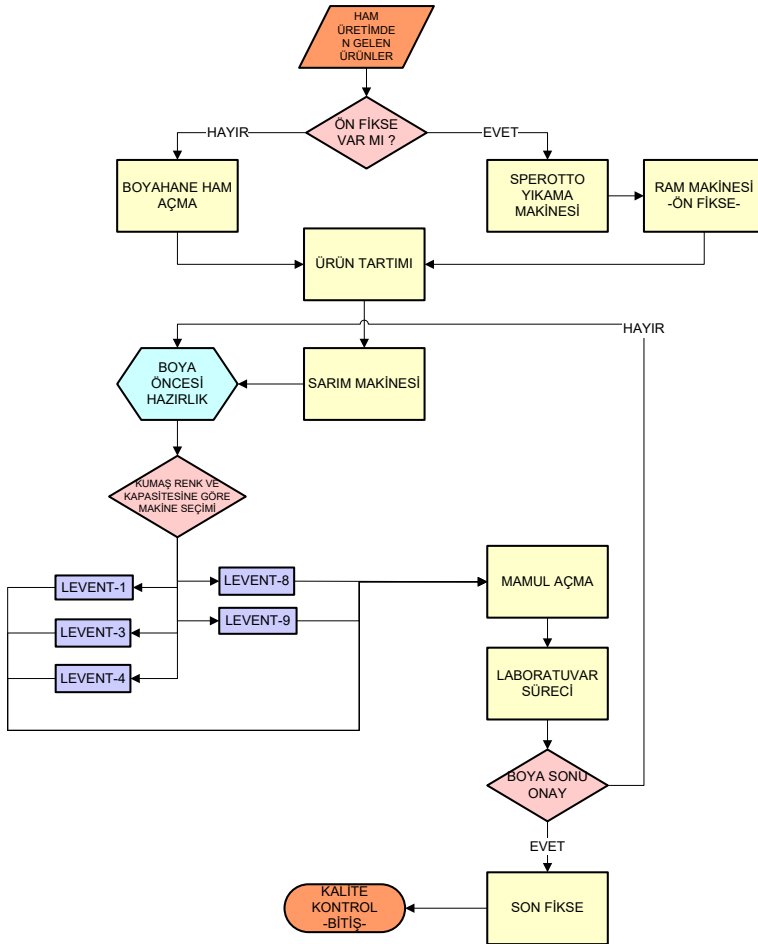
Günümüzde giyim ve ev tekstiline bağlı olarak artan tüketimle oluşan talebin karşılanması için çalışmanın yapıldığı fabrikada geliştirme ve iyileştirme çalışmaları yapılmak istenmektedir. Bu doğrultuda fabrikada boyahane bölümü incelenmektedir ve boyahane sürecinin çevrim süresinin uzun olduğu, makinelerin önünde oluşan kuyrukların olduğu ve operatörlerin bazı proseslerde yetersiz kaldığı olduğu görülmektedir. Böylece boyahane bölümünde yaşanan bu gecikme diğer bölümleri de etkileyerek talebe vaktinde cevap vermesi güçleşmektedir.

Boyahane bölümünde yaşanan bu sıkıntıların giderilmesi ve iyileştirme çalışmalarının uygulanmadan önce sonuçlarının görülmesi ve değerlendirilmesi istenmektedir. Oluşturulan iyileşme senaryolarının gerçekte denenmesi zaman alıcı ve maliyetli olduğundan simülasyon yöntemine başvurarak bilgisayar ortamında mevcut işlem akışı ve iyileştirme senaryoları denenmek istenmektedir. Bu çalışmada boyahane planlama bölümünden alınan

veriler kullanılarak boyahane bölümü süreci simülasyon ile modellenmiştir.

Mevcut İş Akış Sürecinin İncelenmesi ve Akış Şemasının Çıkarılması

İşletmenin boyahane bölümünün iş akış süreci, göreve hâkim bir operatör yardımı ile alanda gözlem yapılarak gerçekçi şekilde oluşturulmuştur. Mevcut iş akış şeması Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Mevcut iş akış şeması

Şekil 1’de verilen akış şemasının detayları şu şekilde sıralanabilir: Ham üretimden rulo halinde gelen kumaşlar, kumaş türlerine göre ön fikse işleminden geçip geçmeyeceğine göre ayrışır. Ön fikse işleminden geçecek olan kumaş türleri ilk olarak speretto yıkama makinesine gelir. Burada kumaş ham üretimde oluşabilecek yağ toz vs. yabancı maddelerden arındırılıp boyamaya hazır hale getirilir. Daha sonra rulolar dog yardımıyla Ram makinesinin önüne getirilir. Ram makinesinde ön fikse işlemi gerçekleştirilir. Ön fikse işlemi, kumaşın ısı altında yapısal eşitliğini sağlar. Ön fikse işleminden geçmeyecek ürünler ise boyahane ham açma makinesine gider. Açma makinesinde kumaşta olan fiziksel bozulmalar giderilerek boyama makinelerine hazırlanır. Daha sonra ürün dog ile kantara götürülerek tartma işlemi gerçekleştirilir. Kumaşların ham üretimden geldikleri ağırlığı ile işlemlerden sonraki ağırlığı aynı olmadığından boya makinelerine mevcut ağırlıklarıyla girmeleri için tartım yapılır. Bu aşamalardan geçmiş olan kumaşlar sarım makinesine gelir. Sarım makinesinde boyama makinelerine girebilecek şekilde kumaşlar rulolara sarılarak hazırlanır. Boyama makinelerine girmeye hazır olan rollingler makine ağırlık kapasitelerine göre makinelere yerleştirilir. Boyama makinelerine kumaşlar yerleştirilirken ayrıca kumaş rengi dikkate alınır. Koyu renkten sonra açık renk, açık renkten sonra koyu renk konulacaksa boya öncesi hazırlık işleminde makineler temizlenir. Boyama işlemi biten kumaşlar sıralarıyla açma makinesine mamul açma işlemi için getirilir. Mamul açma işlemi, kumaşı açar kurutur. Mamul açma işlemi tamamlandıktan sonra kumaştan numune bir parça alınarak renk kontrolü için laboratuvar sürecinden geçirilir. Laboratuvar sonucu sonrası renk onayı var ise son fikse işlemine gider eğer onay verilmezse boyama işlemi tekrardan yapılır. Son fikse işlemi de ön fikse işlemi ile aynı makinede daha düşük ısı altında yapılır. Tüm bu

işlemlerden geçen kumaşlar kalite kontrol bölümüne gider. Ürün için boyahane bölümü süreci bitmiş olur.

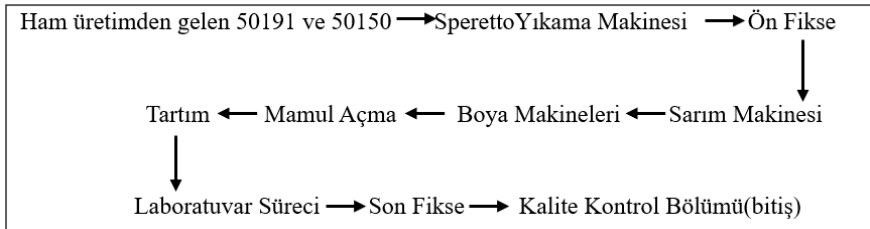
Uygulamada Kullanılacak Ürünlerin ve Rotalarının Belirlenmesi

İşletmede üretilen ürünlerin sezonun modasına göre şekillenmesi ve giyim ev tekstili gibi birçok alanda kullanılması sebebiyle ürün çeşitliliği çok fazladır. Bu çalışmada işletmede en çok üretilen üç ürünün her sezon en yüksek üretim hacmi olan ve modadan etkilenmeyen siyah ve beyaz rengi incelenmektedir. Tablo 1’de işletmede en çok üretilen üç ürün ve aylık üretim hacimleri oranları verilmektedir.

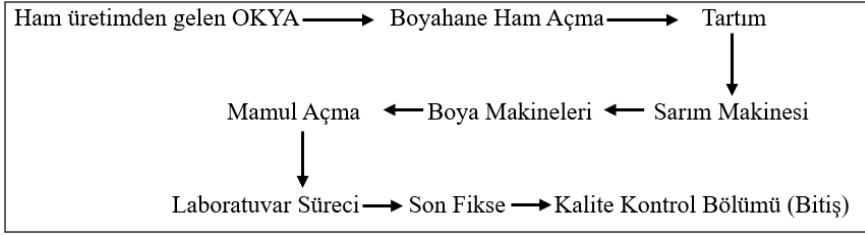
Tablo 1. İşletmede en çok üretilen üç ürün ve üretim hacimleri

Ürün Adı	Üretim Miktarı (kg)	Üretim Oranı (%)
50191 (Mayoluk kumaş)	30917	53,75
OKYA (Güneşlik Saten)	16286	28,31
50150 (İç Giyim)	10320	17,94

Tablo 1’de verilen ürünlerin akış şemaları alanda gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bilgilere göre 50191 ve 50150 ürününün rotalarının aynı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2’de 50191 ve 50150 ürünlerinin rotası, Şekil 3’te ise OKYA ürününün rotası belirtilmektedir.



Şekil 2. 50191 ve 50150 ürünlerinin rotası



Şekil 3. OKYA ürününün rotası

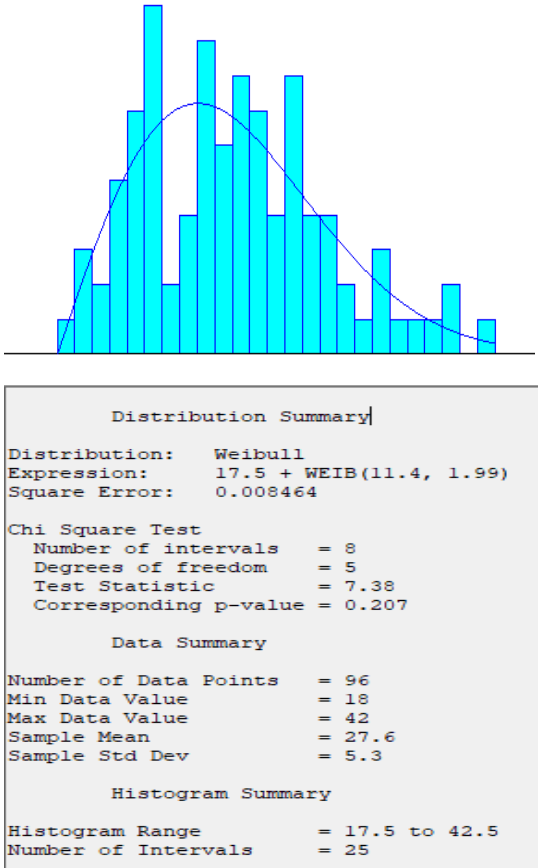
Simülasyon Modelinde Kullanılacak Veri Dağılımlarının Belirlenmesi

Simülasyon modelinde kullanılacak veriler, çalışmanın yapıldığı tekstil fabrikasının boyahane planlama departmanından alınan bilgiler neticesinde 1 aylık (26 gün) üretim verilerinden oluşturulmuştur. Boyahane bölümüne günlük gelen dogların ürün kodu, metresi, ağırlığı, rengi ve ilk makine önüne geliş süreleri gözlemlenmiştir. Daha sonra bu ürünlerin makinelerdeki işlem süreleri takip edilen programda izlenmiş ve excel tablolarında tutulmuştur. Yapılan gözlemlerden elde edilen veriler ile Input Analyzer programı ile değerlendirilmiş ve modelde kullanılmak üzere veri gruplarını temsil eden en iyi çeşitli olasılık dağılımları elde edilmiştir.

Modelde bulunan karar modüllerinin olasılık değerleri gözlemlenen değerler baz alınarak bulunmuştur. Örneğin gözlemlenen 96 ürünün 42'si beyaz renkli, 54'ü siyah renklidir. Bu verilere göre modelde %43,75 beyaz kumaş, %56,25 siyah kumaş işlem görmektedir.

Şekil 4 ve Şekil 5'te sarım makinesi işlem süresi dağılımının ve son fikse işlem süresinin Input Analyzer ile veri dağılımının bulunması örnek olarak verilmektedir. Diğer dağılımlarda benzer şekilde hesaplanmış ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

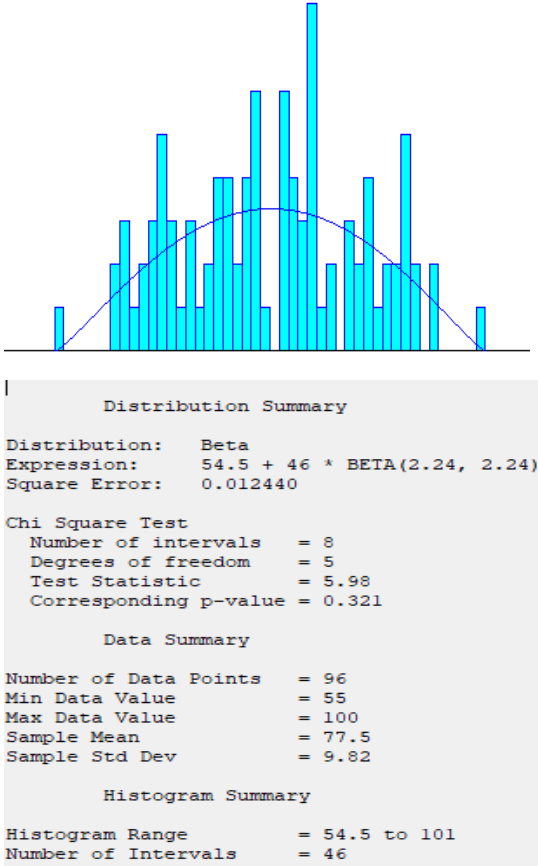
Boyahane bölümüne gelen her bir ürünün son fikse işleminde geçirdiği süreler gözlemlenmiş ve excel tablolarında tutulmuştur. Tutulan veriler Input Analyzer programında işlenmiş ve son fikse işleminin işlem süresi için en iyi olasılık dağılımının Beta dağılımı olduğu Şekil 4’te görülmektedir.



Şekil 4. Sarım makinesinin işlem süresinin dağılımı

Boyahane bölümüne gelen her bir ürünün sarım makinesinde geçirdiği süreler gözlemlenmiş ve Excel tablolarında tutulmuştur. Tutulan veriler Input Analyzer programında işlenmiş ve sarım

makinesinin işlem süresi için en iyi olasılık dağılımının Weibull dağılımı olduğu Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Son fikse işlem süresinin dağılımı

Mevcut Durumun Simülasyon Modeli

Tüm mevcut durum verilerine uygun dağılımlar belirlendikten sonra süreç ARENA simülasyon programı kullanılarak modellenmiştir. Mevcut durum modeli Şekil 6'da gösterilmektedir.

Total Time Kumaşlar	12,6141
Number In Kumaşlar	11,700
Number Out Kumaşlar	2,1000

Çalışmada kurulan modelde varlık ismi kumaşlar olarak belirlenmiştir. Tablo 2’de yer alan “Total Time”, kumaşların boyahane bölümünde geçirdikleri toplam süreyi göstermektedir. Aynı zamanda bu süre çevrim süresidir. “Wait time” kumaşların kuyrukta bekledikleri süreyi, “VA Time” katma değer eklenen süreyi, “NVA Time” katma değeri olmayan süreyi göstermektedir.

“Number In” simülasyon süresince boyahane bölümüne gelen ürün sayısını “Number Out” ise ayrılan ürün sayısını göstermektedir. Bu verilere göre simülasyon sonlandığı anda sistemde 3 ürün işlem görmektedir.

Yapılan analiz sonucu çevrim süresi ortalama 12,6141 saat, kumaşların kuyrukta ortalama bekleme süresi 2,6386 saat, katma değerli süre 9,8583 saat ve katma değersiz süre 0,1172 saat olduğu görülmektedir. Çevrim süresi ve katma değersiz bekleme sürelerini iyileştirme hedeflenmektedir.

Tablo 3’de çıktı raporunun “Queue” bölümünde kumaşların kuyruk bilgileri ile ilgili istatistikler gösterilmektedir.

Tablo 3. Mevcut durum raporunun QUEUE bölümüne ait sonuçları

QUEUE	Average
Waiting Time	
Boya öncesi hazırlık	2,8855
Boyahane ham açma	0
Laboratuvar süreci	0
Levent 1	1,0163
Levent 3	0,5918
Levent 4	1,0163
Levent 8	1,1979
Levent 9	3,0443

Mamül açma	0
Ön fikse	0
Sarım makinesi	0,0239
Son fikse	0
Speretto yıkama makinesi	1,3872
Ürün tartımı	0

Tablo 3’te yer alan “Waiting Time”, bir kumaşın sistem proseslerinin kuyruğunda beklediği ortalama süreyi göstermektedir. ”Number Waiting” ise kuyrukta bekleyen ortalama kumaş sayısını göstermektedir.

Yapılan analiz sonucu en çok kuyrukta bekleme süresi ortalama 3,0443 saat ile levent 9 boya makinesi prosesinde daha sonra 2,8855 saat ile boya öncesi hazırlık prosesinde daha sonra speretto yıkama makinesi 1,3872 saat olarak görülmektedir. Bekleme süresini azaltıcı yönde iyileştirmeler yapılması hedeflenmektedir.

Tablo 4’te çıktı raporunun “Resource” bölümünde modelde yer alan kaynaklar ile ilgili istatistikler gösterilmektedir.

Tablo 4. Mevcut durum raporunun RESOURCE bölümüne ait sonuçları

RESOURCE – USAGE	Average
Instantaneous Utilization	
Boya operatörü	0,8523
Ham açma operatörü	0,0020
Laboratuvar operatörü	0,0065
Laboratuvar operatörü 2	0,0065
Laboratuvar operatörü 3	0,0065
Mamül açma operatörü	0,1202
Mamül açma operatörü 2	0.1202
Ön fikse operatörü	0,3171
Ön fikse operatörü 2	0,3171
Ön fikse operatörü 3	0,3171
Sarım operatörü	0,2002
Son fikse operatörü	0,1291
Son fikse operatörü 2	0,1291

Son fıkse operatörü 3	0,1291
Speretto operatörü	0,8243
Tartım operatörü	0,0072

Tablo 4’te yer alan “Instantaneous Utilization”, makinelerde çalışan operatörlerin yani kaynakların kullanım oranlarını göstermektedir.

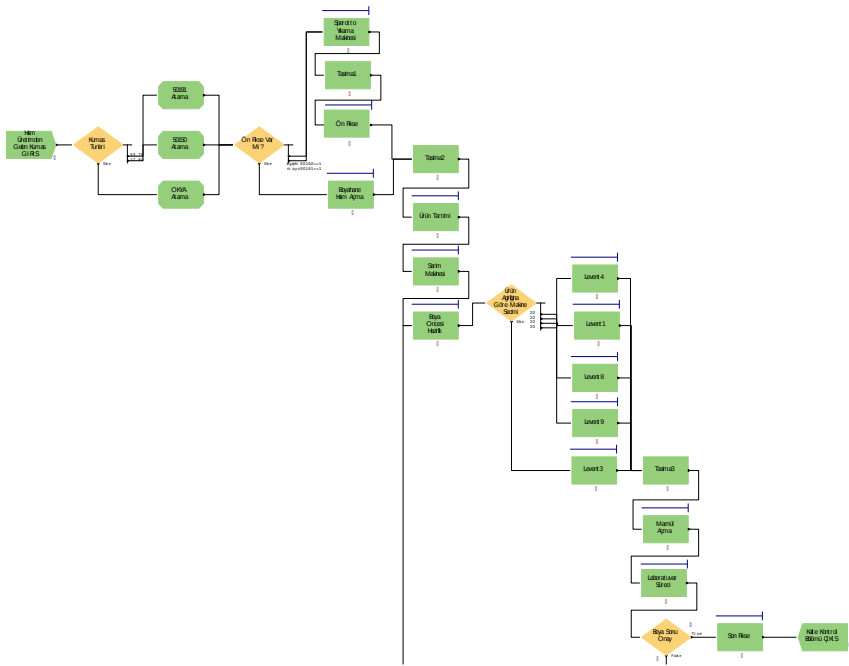
Yapılan analiz sonucunda en çok kaynak kullanım oranı %85,23 olarak görülen speretto operatörü olarak görülmektedir. Daha sonra %82,43 olarak boya operatöründe görülmektedir. Her iki operatöründe iş yükünün çok ağır olması sonucunda Tablo 3’te görüldüğü gibi ortalama kuyruk bekleme süreleri de yüksektir. İyileştirme çalışmaları speretto operatörünün ve boya operatörünün iş gücünü azaltıcı şekilde olması hedeflenmektedir.

Gelecek Durum İçin Önerilen İyileştirme Senaryoları

Mevcut durum simülasyon modelinden elde edilen analiz sonuçlarına göre çözüm önerisi niteliğinde dört farklı alternatif iyileştirme senaryosu oluşturulmuştur.

Birinci İyileştirme Senaryosu

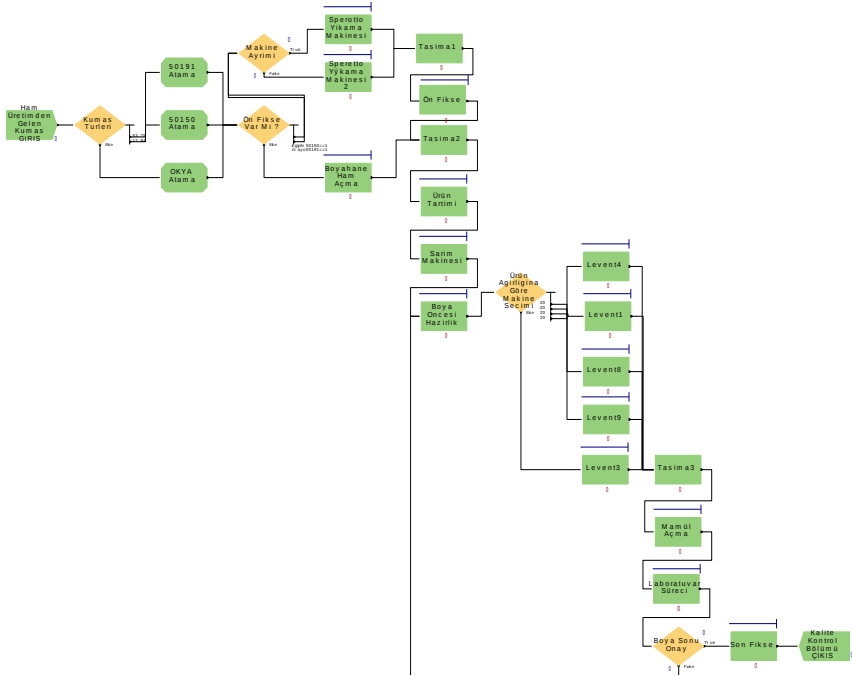
Bu senaryo mevcut durum için yapılan simülasyon modelinin Tablo 3 ve Tablo 4’teki verilerden hareketle ortalama kuyruk süresi ve kaynak kullanım oranları yüksek olan prosesler incelendiğinde kaynak sayısının yetersiz olduğu düşünülmüştür. Tek bir boya operatörünün gerçekleştirmiş olduğu boya öncesi hazırlık ve levent boyama makineleri proseslerine operatör eklenerek kaynak artırımı yapılmıştır. Bu doğrultuda levent 1 ve levent 4 makinelerine boya operatörü 1 kaynağı, levent 8 ve levent 9’a boya operatörü 2 kaynağı, levent 3 ve boya hazırlık proseslerine boya operatörü 3 kaynağı atanmıştır. Böylece kaynakların iş yükü azaltılmış kuyruk oluşumunun azaltılması hedeflenmektedir. Birinci İyileştirme senaryosunun simülasyon modeli Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 9. Üçüncü İyileştirme senaryosu simülasyon modeli

Dördüncü İyileştirme Senaryosu

Bu senaryoda mevcut durum için yapılan simülasyon modelinin çıktı sonuçlarından Tablo 3 ve Tablo 4'teki veriler incelendiğinde speretto yıkama makinesi prosesinin ortalama kuyrukta bekleme süresi ve kaynak kullanım oranları yüksek olduğu darboğaz oluşturduğu görüldüğünden bu değerlerin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda bir adet speretto makinesi ve bu makineye operatör kaynağı alınması öngörülmüştür. Dördüncü İyileştirme senaryosunun simülasyon modeli Şekil 10'da gösterilmektedir.



İyileştirme senaryoları veri analizi ve mevcut durum simülasyon modeli ile karşılaştırılması

Simülasyon mevcut durum sistemindeki olduğu gibi 10 kez çalıştırılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Sistem 1 günlük çalışma saatlerinde 10 kez çalıştırıldığında sistemden çıkan ortalama varlık sayısı 3 olarak bulunmuştur.

Tablo 5'te mevcut durum rapor verileri ile 1. iyileştirme senaryosu rapor verileri karşılaştırılmaktadır.

Tablo 5. Mevcut durum verileri iyileştirme senaryolarının sonuçlarının karşılaştırılması

Mevcut Durum	Ort.	Birinci İyileştirme Senaryosu	Ort.
Çevrim süresi (total time)	12,6141	Çevrim süresi (total time)	12,5906
Bekleme süresi (wait time)	2,6386	Bekleme süresi (wait time)	1,5471
Boya öncesi hazırlık kuyrukta bekleme süresi	2,8855	Boya öncesi hazırlık kuyruk bekleme süresi	0,6988

Boya operatörü kaynağı kullanım oranı	0,8523	Boya operatörü kaynağı kullanım oranı	0,4877
		Boya operatörü 2 kaynağı kullanım oranı	0,3731
		Boya operatörü 3 kaynağı kullanım oranı	0,4552
Mevcut Durum	Ort.	İkinci İyileştirme Senaryosu	Ort.
Çevrim süresi (total time)	12,6141	Çevrim süresi (total time)	11,3861
Bekleme süresi (wait time)	2,6386	Bekleme süresi (wait time)	1,6420
Boya öncesi hazırlık kuyruk bekleme süresi	2,8855	Boya öncesi hazırlık kuyruk bekleme süresi	0
Levent 1 kuyrukta bekleme süresi	1,0649	Levent 1 kuyrukta bekleme süresi	0,9979
Levent 3 kuyrukta bekleme süresi	0,5918	Levent 3 kuyrukta bekleme süresi	0,6088
Levent 4 kuyrukta bekleme süresi	1,0163	Levent 4 kuyrukta bekleme süresi	1,5964
Levent 8 kuyrukta bekleme süresi	1,1979	Levent 8 kuyrukta bekleme süresi	1,1781
Levent 9 kuyrukta bekleme süresi	3,0443	Levent 9 kuyrukta bekleme süresi	0,7600
Mevcut Durum	Ort.	Üçüncü İyileştirme Senaryosu	Ort.
Çevrim süresi (total time)	12,6141	Çevrim süresi (total time)	10,7682
NVA Time	0,1172	NVA Time	0
Mevcut Durum	Ort.	Dördüncü İyileştirme Senaryosu	Ort.
Çevrim süresi (total time)	12,6141	Çevrim süresi (total time)	11,2380
Bekleme süresi (wait time)	2,6386	Bekleme süresi (wait time)	1,7596
Speretto makinesi kuyrukta bekleme süresi	1,3872	Speretto makinesi kuyrukta bekleme süresi	0,2021
		Speretto makinesi 2 kuyrukta bekleme süresi	0,2158
Speretto makinesi operatörü kaynağı kullanım oranı	0,8243	Speretto makinesi operatörü kaynağı kullanım oranı	0,5119
		Speretto makinesi operatörü 2 kaynağı kullanım oranı	0,4653

Tablo 5'te gösterilen verilere göre birinci iyileştirme senaryosu ile sistemde yapılan iyileştirme değişimlerinin olumlu etkiler oluşturmıştır. Çevrim süresi 12,6141 saatten 12,5906 saate düşmüştür. Senaryonun hedeflenen faydalarından kuyruk bekleme sürelerinin düşüşü de sağlanmıştır. Boya öncesi hazırlık prosesinin de kuyruk bekleme süresi 2,8855 saatten 0,6988 saate düşürülerek %75,78 oranında bir iyileştirme sağlanmıştır. Senaryonun hedeflenen bir diğer faydası ise kaynak kullanım oranlarının düşüşü

de sağlanmıştır. Boya operat6r6 kaynağının %85,23 kullanım oranı diğer operat6rler kaynaklarının sisteme eklenmesi ile birlikte %48,77 kullanım oranına d6ř6r6lerek, %36,46 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Ayrıca sistemden çıkan ortalama varlık sayısı 2’den 3’e çıkmıştır.

İkinci iyileştirme senaryosu ile sistemde yapılan değişimlerin olumlu etkileri olmuştur. Mevcut durumdaki boya 6ncesi hazırlık prosesi kaldırıldığında çevrim s6resi 12,6141 saatten 11,3861 saate d6ř6r6lerek çevrim s6resinde %9,76 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Kuyruk bekleme s6resi verilerine baktığımızda boya 6ncesi hazırlık prosesi kaldırıldığından buradaki bekleme s6resi 0 olmuştur. En iyi iyileşme levant 9 makinesindeki ortalama kuyruk bekleme s6resi 3,0443 saatten 0,7600 saate d6ř6r6lerek %75,04 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Bekleme s6relerinin azalmasıyla varlıkların(kumaşların) sistemde ortalama bekleme s6resi 2,6386 saatten 1,6420 saate d6ř6r6lerek %37,77 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Ayrıca sistemden çıkan ortalama varlık sayısı 2’den 4’e çıkmıştır.

66nc6 iyileştirme senaryosu ile mevcut sistemin çevrim s6resi 12,6141 saatten yapılan iyileştirmeler sonucu 10,7682 saate d6ř6r6lerek %17,14 oranında iyileşme sağlanmıştır. Mevcut sistemde geçirilen katma değerersiz s6re ise taşıma faaliyetlerinin kaldırılmasıyla 0’a d6ř6r6lm6řt6r.

D6rd6nc6 iyileştirme senaryosu ile mevcut sistemin çevrim s6resi 12,6141 saatten yapılan iyileştirmeler sonucu 11,2380 saate d6ř6r6lerek %10,91 oranında iyileşme sağlanmıştır. Speretto makinesi kuyrukta ortalama bekleme s6resi 1,3872 saat iken speretto yıkama makine sayısı ikiye çıkarıldığında speretto yıkama makinesi ortalama bekleme s6resi 0,2021 saat, speretto yıkama makine 2 için 0 ortalama bekleme s6resi, 2158 saat olduğu g6r6lm6řt6r. 6nerilen senaryonun kuyrukta ortalama bekleme s6resini iyileştirdiği g6r6lmektedir. Speretto makinesi operat6r6 kaynağı kullanım oranı

%82,43 ten prosese alınan diğ er bir operatör ile bu oran d    r  l p bir operatör başına d   en i  yükü azaltılmıştır. Ayrıca mevcut sistemde varlıkların (kumaşların) bekleme süresi 2,6386 saatten 1,7596 saate d    r  l rek %33,31 oranında iyileşme sağlanmıştır.

ANALİZ

Modelin Doğrulanması ve Geçerliliğinin Test Edilmesi

Kurulan modeldeki kumaşların sisteme girişlerinde kalite kontrol bölümüne gidip sistemden çıkana kadar sistemde var olan tüm süreçler adım adım izlenmiş ve kumaşların sistemdeki var olan tüm adımlardan sırayla geçtiklerinin gözlemlenmesi sonucu kurulan modelin gerçek sistemi yeterinde temsil ettiği kabul edilmiştir.

Simülasyon sisteminden elde edilen çıktılar ile gerçek sisteme ait çıktılara uygun olan istatistiksel test seçimi yapılmıştır. Yapılan analize göre sonuç değişkeninin normal dağılıma sahip olmadığı ve veri setinin 30'dan küçük olması durumunda Spearman Rank Korelasyon Katsayısı istatistiksel test yöntemi seçilmiştir. Modelin geçerlilik testi uygulamasında performans  l t  olarak “Sistemden çıkan  r n Sayısı” alınmış ve bir aylık günlük veriler kar ıla tırılmı tır.

Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı

Günlük üretilen ürün sayısı verileri SPSS istatistik programına aktararak Spearman Rank Korelasyon Katsayısı testi

uygulanmıştır. Spearman Rank Korelasyonu için test edilecek hipotezler;

H0: Gerçek Sisteme Ait Sistemden Çıkan Ürün Sayısı ile Simülasyon Modeline Ait Sistemden Çıkan Ürün Sayısı arasındaki ilişki anlamsızdır. ($r_s=0$)

H1: Gerçek Sisteme Ait Sistemden Çıkan Ürün Sayısı ile Simülasyon Modeline Ait Sistemden Çıkan Ürün Sayısı arasındaki ilişki anlamlıdır. ($r_s \neq 0$)

SPSS ile yapılan istatistiksel analizin sonuçları Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 10. SPSS Spearman Rank Korelasyon Katsayısı test sonuçları

		Gerçek Ürün Sayısı	Simülasyon Ürün Sayısı
Gerçek Ürün Sayısı	Korelasyon Katsayısı	1,000	0,557**
	Anlamlılık düzeyi(p)	.	0,003
	N	26	26
Simülasyon Ürün Sayısı	Korelasyon Katsayısı	0,557**	1,000
	Anlamlılık düzeyi	0,003	.
	N	26	26
**, Korelasyon katsayısı 0,01 düzeyinde anlamlıdır. (α)			

Tablo 6'ya göre Gerçek Sisteme Ait Sistemden Çıkan Ürün Sayısı ile Simülasyon Modeline Ait Sistemden Çıkan Ürün Sayısı arasındaki Spearman korelasyon katsayısı $r_s=0,557$ dir. $r_s > 0$ ve 0,50-0,69 korelasyon katsayıları arasında olduğundan aynı yönde ve orta kuvvette bir ilişki vardır. Üstelik $p=0,003$ olup $\alpha=0,01$ iken $p < \alpha$ olduğundan H0 hipotezi ret edilir H1 hipotezi kabul edilir ve böylece

gerçek sisteme ait sistemden çıkan ürün sayısı ile simülasyon modeline ait sistemden çıkan ürün sayısı arasında anlamlı bir ilişki vardır.

SONUÇ

Yapılan çalışma sonucunda fabrikanın boyahane bölümünün süreç akışı gerçekçi bir şekilde simülasyon programı yardımıyla modellenmiş ve mevcut iş akışının bilgisayar ortamında izlenmesi sağlanmıştır. Mevcut iş akış sistemi incelendiğinde öngörülen sorunlar simülasyonda daha iyi görülmüş ve tespit edilmiştir. Tespit edilen sorunları iyileştirmeye ve ortadan kaldırmaya yönelik alternatif iyileştirme senaryoları geliştirilerek fabrikanın elde edeceği kazanımlar analiz edilerek süreç iyileştirme çalışmalarında fabrikaya yol haritası sunulmuştur.

Yapılan çalışmada simülasyon uygulaması için fabrikada aynı ürün grubuna ait en çok üretilen üç ürün seçilmiştir. Bu ürünlerin işlem gördükleri makineler, işlem süreleri ve bölüme giren ürün miktarları gibi değerler fabrika içerisinde tutulan gerçeğe yakın değerler ile ARENA simülasyon programına aktarılmıştır. Modellenen sistem bir gün için fabrikanın mesai saatleri baz alınarak çalıştırılmış ve 10 kez tekrarlanarak raporda çıktı olarak verilen ortalama sonuçlar ile değerlendirilmiştir.

Gerçek sisteme ait sistemden çıkan ürün sayısı ile simülasyon modeline ait sistemden çıkan ürün sayısı Spearman Rank

Korelasyon Katsayısı istatistiksel test yöntemi ile test edilmiş ve modelin doğruluğu ve geçerliliği kabul edilmiştir.

Mevcut simülasyon sistemi incelendiğinde sistemden ortalama çıkan kumaş sayısının 2, çevrim süresinin 12,6141 saat, sistemde ortalama kuyrukta bekleme süresi 2,6386 saat olduğu görülmüştür. Ortalama kuyrukta bekleme süreleri raporu incelendiğinde kuyrukta ortalama bekleme süresi en çok olan prosesin levent 9 boyama makinesinde 2,8855 saat olduğu görülmüştür. Bunun yanında boya öncesi hazırlık prosesindeki ortalama bekleme süresi 2,8855 saat ve speretto yıkama makinesi prosesindeki ortalama bekleme süresi 1,3872 saat olduğu görülmüş bu proseslerdeki bekleme süreleri de dikkate alınacak yükseklikte olduğu görülmüştür. Ortalama kaynak kullanım oranları raporu incelendiğinde kaynak kullanım oranı en yüksek olan operatörün boya öncesi hazırlık prosesindeki kaynak olduğu ve kaynak kullanım oranının %85,23 olduğu görülmüştür. Bunun yanında kaynak kullanım oranı yüksek olan bir diğer proses ise %82,43 oranında speretto makinesi olduğu tespit edilmiştir.

Mevcut durumda tespit edilen sorunlara yönelik uygulaması maliyetli, zaman gerektiren veya zor olan iyileştirme senaryoları oluşturulmuş ve simülasyon yardımıyla denenerek çevrim süresi, sistemden çıkan ortalama ürün sayısı, kuyrukta bekleme süreleri, kaynak kullanım oranları gibi değişkenler azaltılmaya çalışılmıştır.

Mevcut durumda tespit edilen boya öncesi hazırlık operatörünün yüksek ortalama kaynak kullanım oranının düşürülmesine yönelik birinci iyileştirme senaryosu geliştirilmiştir. Oluşturulan senaryonun simülasyon sonuçları incelendiğinde kumaşların sistemde ortalama kuyrukta bekleme süresi %41,37 oranında, boya öncesi hazırlık prosesinde ortalama kuyrukta bekleme oranında ise %75,78 oranında iyileşme sağlanmıştır. Prosese eklenen yeni iki boya operatörüyle birlikte mevcut boya operatörünün kaynak kullanım oranı %36,46 iyileştirilmiş operatörlerin kaynak kullanım oranları

dengelenmiştir. Sistemden çıkan ortalama kumaş sayısı 3'e yükseltilmiştir.

Mevcut durumda tespit edilen katma değersiz boya öncesi hazırlık prosesinin kaldırılmasıyla çevrim süresinin düşürülmesine yönelik ikinci iyileştirme senaryosu geliştirilmiştir. Oluşturulan senaryonun simülasyon sonuçları incelendiğinde sistemden çıkan ortalama kumaş sayısı 4'e yükseltilmiştir. Çevrim süresi %9,76 oranında, sistemde ortalama kuyrukta bekleme süresi %37,77 oranında iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca ortalama kuyrukta bekleme süresi en çok olan levent 9 boyama makinesi prosesinde bekleme süresinde %75,04 oranında iyileşme sağlanmıştır.

Mevcut durumda tespit edilen katma değersiz taşıma faaliyetlerinin kaldırıp çevrim süresinin düşürülmesine yönelik üçüncü iyileştirme senaryosu geliştirilmiştir. Oluşturulan senaryonun simülasyon sonuçları incelendiğinde sistemden çıkan ortalama kumaş sayısı 4'e yükseltilmiştir. Çevrim süresi %17,14 oranında iyileşme sağlanmıştır.

Mevcut durumda tespit edilen ortalama kuyrukta bekleme süresi ve kaynak kullanım oranı yüksek olan speretto yıkama prosesinde bu değişkenlerin düşürülmesine yönelik dördüncü iyileştirme senaryosu geliştirilmiştir. Oluşturulan senaryonun simülasyon sonuçları incelendiğinde sistemden çıkan ortalama kumaş sayısı aynı kalmıştır. Çevrim süresi %10,91 oranında, sistemde ortalama kuyrukta bekleme oranı %33,31 oranında iyileşme sağlanmıştır.

Uygulanan senaryolar sonucunda her senaryonun kendine özgü sisteme sağladığı faydalar olduğu görülmektedir. Çevrim süresinde en iyi iyileşmeyi üçüncü iyileştirme senaryosu, sistemde ortalama kuyrukta bekleme süresinde en iyi iyileşmeyi birinci iyileştirme senaryosu, sistemden çıkan ortalama kumaş sayısında en yüksek 4 ile ikinci iyileştirme senaryosu olduğu görülmüştür. İyileştirme

senaryolarının fabrikanın iyileşme beklentileri ve yapılabilirliği doğrultusunda değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Takcı, E., Bir İmalat İşletmesinde Simülasyon Yardımıyla Süreç İyileştirme Uygulaması: Kayseri Gürkar Tekstil Örneği, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [2] Yiğit, A.M., Parti Tipi Üretim Yapan Bir İmalat Sisteminin Simülasyon Yöntemi ile Analizi, Akademik Bakış Dergisi, 47, 212-229, 2015.
- [3] Bağ, M.E., Aslan, E., Bir Tekstil Fabrikasında Simülasyon Uygulaması, Journal of International Management, Educational and Economics Perspectives, 4 (1), 38-54, 2016.
- [4] Mansoori Al-yasin S.A., Gheibi M., Montazeri H., Khaksar R.Y., Akrami M., Fathollahi-Fard A.M., Wong K.Y., (2025). A smart industrial information system using a business process model, discrete events simulation, optimization, and machine learning algorithms, Journal of Industrial Information Integration, Volume 47, 2025, 100896, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100896>.
- [5] YılmazYalçın, A., Can, B. (2019). Tam Sayılı Programlama ve Simülasyon ile Raf Alanı Optimizasyonu: Bir Ambalaj Firmasında Uygulama. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Özel Sayı), 375-388.
- [6] Akkağıt, Ş. F., Tekin, A. (2012). Simülasyon Tabanlı Öğrenmenin Ortaöğretim Öğrencilerinin Temel Elektronik ve Ölçme Dersindeki Başarılarına Etkisi. Ege Eğitim Dergisi, 13(2), 1-12.
- [7] Kaygusuz Y., Kaygusuz S., (2014). Süreç iyileştirmenin işletme performansına etkileri. PARADOKS: Ekonomi,

Sosyoloji ve Politika Dergisi, Temmuz 2014, cilt: 10, sayı: 02, sayfa: 31-50

- [8] Yıldız D., (2021) İş süreçlerinin modellenmesi, iyileştirilmesi, performansının ölçülmesi ve yönetilmesinin işletme verimliliğine katkısı: Bir uygulama. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, sayı 59, mayıs-ağustos
- [9] GünerGören H., Tosun D., (2024). Hazır Giyim Sektöründe Simülasyon ile Üretim Hattı Süreç İyileştirme Çalışması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi; 7(3): 1242-1260.
- [10] Yıldız M.S., Arslan H.M., (2013). Bir ağaç işleri atölyesinin kesim hattında süreç iyileştirme ve tasarruf sağlanması. 13. Üretim Araştırmaları Sempozyumu – ÜAS 2013, 25-27 Eylül 2013, Sakarya, Türkiye
- [11] Tuzkaya U.R., Aksu İ., (2013). Üretimde ara stok yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi ve bir uygulama. Beykoz Akademi Dergisi, 1(2), sayfa: 47-75, doi: 10.14514/BYK.m.21478082.2013.1/2.47-75
- [12] Gülmez K.İ., KorkusuzPolat T. (2024). Bir otomotiv firmasında saha yerleşim iyileştirme çalışması. 4.Bilsel International World Science and Research Congress
- [13] YılmazYalçın A., ÖverÖzçelik T., Yılmazoğlu M., (2023). Müşteriden gelen hataların 5 neden analizi ile çözümlenmesi. Bıltek-VII 7. International Symposium On Current Developments In Science, Technology And Social Sciences, Yayınevi: İKSAD Yayınları, ISBN: 978-625-367-125-9 Sayfa: 10

BÖLÜM 9

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ YAŞAM DÖNGÜSÜ VE E-ATIK YÖNETİMİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE ZORLUKLAR

HEDİYE KIRLI AKIN¹

1. Giriş: Elektrikli Araçlar ve Batarya Atıklarının Yükselişi

İklim değişikliğiyle mücadele, enerji dönüşümü politikaları ve ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılmasına yönelik küresel hedefler doğrultusunda elektrikli araçların (EA) son yıllarda hızla yaygınlaştığı görülmektedir. Birçok ülkede uygulamaya konulan emisyon düzenlemeleri, karbon nötr hedefleri ve teşvik mekanizmaları, elektrikli araç pazarının küresel ölçekte büyümesine önemli katkı sağlamıştır (IEA, 2023; European Commission, 2020). Bu gelişme, ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından olumlu bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, elektrikli araç teknolojilerinin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkabilecek yeni çevresel ve yönetsel sorunların da dikkate alınması gerekmektedir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-4862-9054

Elektrikli araçların çevresel performansı çoğu zaman kullanım aşamasındaki düşük emisyon değerleri üzerinden değerlendirilmektedir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar, özellikle batarya üretimi ve kullanım ömrü sonu aşamalarının çevresel etkilerinin bütüncül bir yaşam döngüsü yaklaşımıyla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Dunn et al., 2015; Hao et al., 2017). Bu bağlamda elektrikli araç bataryaları, enerji dönüşümünün temel bileşenlerinden biri olmanın yanı sıra potansiyel bir e-atık kaynağı olarak da literatürde giderek artan bir ilgi odağı hâline gelmiştir.

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun kullanım ömrü sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir (Uydur, 2025). Bununla birlikte, bu bataryalar kullanım ömürlerinin sonunda önemli miktarda atık üretme potansiyeline sahiptir. Batarya atıklarının içerdiği lityum, kobalt, nikel ve mangan gibi kritik ham maddeler, bu atıkları yalnızca çevresel risk unsuru değil, aynı zamanda stratejik ekonomik kaynaklar hâline getirmektedir (Gaines, 2014; Harper et al., 2019). Bu ikili yapı, elektrikli araç bataryalarının e-atık yönetimi bağlamında özel olarak ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Batarya atıkları, geleneksel elektrikli ve elektronik atıklardan bazı yönleriyle ayrılmaktadır. Yüksek enerji içeriği, kimyasal bileşimi ve güvenlik riskleri, batarya atıklarının toplanması, depolanması ve işlenmesi süreçlerinde ek önlemler gerektirmektedir (Winslow et al., 2018). Özellikle uygun olmayan geri dönüşüm veya bertaraf uygulamaları, çevresel kirlilik ve insan sağlığı açısından ciddi riskler doğurabilmektedir. Bu nedenle, batarya atıkları e-atık literatüründe giderek daha fazla “özel akış” olarak tanımlanmaktadır.

Erken dönem çalışmalar, elektrikli araç bataryalarını ağırlıklı olarak tehlikeli atık yönetimi perspektifinden ele almış ve bertaraf süreçlerine odaklanmıştır. Ancak son yıllarda bu yaklaşımın sınırlılıkları daha görünür hâle gelmiştir. Batarya üretiminde

kullanılan kritik ham maddelerin tedarik riskleri ve çevresel maliyetleri, batarya atıklarının yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir problem olarak ele alınmasının sürdürülebilir olmadığını göstermektedir (Harper et al., 2019; IEA, 2023). Bu durum, batarya atıklarının yaşam döngüsü boyunca yeniden değerlendirilmesini gündeme getirmiştir.

Yaşam döngüsü yaklaşımı, elektrikli araç bataryalarının üretim, kullanım ve kullanım sonrası aşamalarını bütüncül bir sistem içinde ele almaktadır. Bu yaklaşım, batarya atıklarının ortaya çıkışını yalnızca son aşamaya özgü bir sorun olarak değil, ürün tasarımı, kullanım stratejileri ve geri kazanım sistemleriyle doğrudan ilişkili bir çıktı olarak değerlendirmektedir (Dunn et al., 2015). Dolayısıyla batarya e-atıkları, sistem düzeyinde alınan kararların bir sonucu olarak ele alınmakta ve döngüsel ekonomi temelli stratejilerle ilişkilendirilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsünü e-atık yönetimi bağlamında ele alarak, güncel yaklaşımları ve alandaki temel zorlukları bütüncül bir bakış açısıyla incelemektir. Bölümde, batarya atıklarının çevresel ve sağlık boyutları ile döngüsel ekonomi temelli yönetim stratejileri literatür temelli bir sentez aracılığıyla değerlendirilmektedir. Ayrıca, endüstri mühendisliği perspektifinden sistem tasarımı, karar verme ve politika çıkarımları tartışılarak, batarya e-atıklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik analitik bir çerçeve sunulması amaçlanmaktadır.

2. Elektrikli Araç Bataryalarının Yaşam Döngüsü

Elektrikli araç bataryalarının çevresel, ekonomik ve yönetsel etkilerinin doğru biçimde değerlendirilebilmesi için bu sistemlerin bütüncül bir bakış açısıyla ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle bataryaların yalnızca kullanım aşamasına odaklanan değerlendirmeler yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, batarya teknolojilerinin üretimden kullanım sonrası

aşamalara kadar uzanan bütüncül bir yaşam döngüsü perspektifiyle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Dunn et al., 2015; Hao et al., 2017). Bu yaklaşım, batarya e-atıklarının ortaya çıkışını nihai bir problemden ziyade, sistem düzeyinde alınan kararların bir sonucu olarak ele almaktadır.

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bataryaların yaşam döngüsü, hammadde çıkarımından başlayarak batarya üretimi, araç içi kullanım, kullanım sonrası değerlendirme ve geri dönüşüm aşamalarını kapsamaktadır. Her bir aşama, farklı çevresel etkiler ve yönetim zorlukları barındırmakta olup, batarya e-atıklarının sürdürülebilir yönetimi bu aşamaların bütüncül biçimde ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, bataryaların yaşam döngüsü boyunca karşılaşılan kritik aşamalar ve bu aşamalara ilişkin temel karar noktaları Şekil 1.'de bütüncül bir çerçeve içinde özetlenmiştir.

Şekil 1. Elektrikli Araç Bataryalarının Yaşam Döngüsü ve E-Atık Yönetimi Açısından Kritik Aşamalar



Kaynak: Dunn et al., 2015; Gaines, 2014; Harper et al. 2019

Elektrikli araç bataryalarının ham madde çıkarımından batarya üretimine, araç içi kullanım aşamasından kullanım sonrası ikinci ömür ve geri dönüşüm süreçlerine uzanan yaşam döngüsünü göstermektedir. Şekilde yer alan her bir aşama, e-atık yönetimi

açısından farklı çevresel riskler, ekonomik fırsatlar ve yönetsel karar noktaları içermektedir. Batarya yaşam döngüsünün ilk aşamasını oluşturan ham madde çıkarımı, özellikle lityum, kobalt ve nikel gibi kritik minerallerin madenciliğini kapsamaktadır. Bu aşama, yüksek su kullanımı, arazi tahribatı ve sosyal etkiler nedeniyle literatürde en fazla eleştirilen süreçler arasında yer almaktadır (Gaines, 2014; Harper et al., 2019). Batarya üretim aşaması ise enerji yoğun süreçler içermekte ve üretim kaynaklı karbon ayak izi açısından önemli bir paya sahiptir (Dunn et al., 2015).

Araç içi kullanım aşamasında bataryalar, genellikle çevresel etkilerin görece düşük olduğu bir dönem olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte bataryaların zamanla kapasite kaybına uğraması, potansiyel güvenlik riskleri ve kullanım süresi sonunda ortaya çıkan yönetim gereksinimleri, araç içi kullanım aşamasının da e-atık perspektifinden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Kullanım süresi sonunda bataryaların doğrudan atık haline gelmesi yerine, ikinci ömür uygulamalarıyla yeniden değerlendirilmesi son yıllarda literatürde giderek daha fazla tartışılmaktadır (Winslow et al., 2018).

Batarya yaşam döngüsünün her bir aşaması, farklı çevresel riskler ve yönetim zorlukları barındırmaktadır. Bu riskler ve zorluklar, batarya e-atıklarının yalnızca geri dönüşüm aşamasında değil, tüm yaşam döngüsü boyunca ele alınması gerektiğini göstermektedir. Yaşam döngüsünün farklı aşamalarında ortaya çıkan temel faaliyetler, çevresel riskler ve bu risklere eşlik eden yönetim zorlukları, karşılaştırmalı bir bakış açısıyla Tablo 1.'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Elektrikli Araç Bataryalarının Yaşam Döngüsü Aşamaları, Çevresel Riskler ve Yönetim Zorlukları

Yaşam Döngüsü Aşamaları	Temel Faaliyetler	Başlıca Çevresel Riskler	Yönetim Zorlukları
--------------------------------	--------------------------	---------------------------------	---------------------------

Ham madde çıkarımı	Lityum, kobalt, nikel madenciliği	Ekosistem tahribatı, su kullanımı	Tedarik riski, sosyal etkiler
Batarya üretimi	Hücre ve paket üretimi	Yüksek enerji tüketimi, emisyonlar	Karbon ayak izi azaltımı
Araç içi kullanım	Enerji depolama ve deşarj	Güvenlik riskleri, kapasite kaybı	Performans izleme
Kullanım sonrası	İkinci ömür değerlendirmesi	Güvenlik ve stabilite riskleri	Teknik uygunluk
Geri dönüşüm	Malzeme geri kazanımı	Kimyasal atıklar	Ekonomik fizibilite

Kaynak: Tablo, elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsüne ilişkin literatürde raporlanan bulguların sentezlenmesiyle oluşturulmuştur.

Yaşam döngüsü yaklaşımı, elektrikli araç bataryalarının e-atık yönetiminin yalnızca teknik bir geri dönüşüm problemi olmadığını ortaya koymaktadır. Batarya e-atıkları, aynı zamanda ürün tasarımı, kullanım stratejileri ve politika kararlarıyla doğrudan ilişkili bir sistem problemi olarak değerlendirilmelidir. Bu bütüncül bakış açısı, batarya e-atıklarının döngüsel ekonomi perspektifinden ele alınmasının temelini oluşturmakta ve sonraki bölümlerde tartışılacak olan çevresel, sağlık ve yönetim stratejilerine zemin hazırlamaktadır.

3. Batarya Atıklarının Çevresel ve Sağlık Boyutları

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan atıklar, sahip oldukları kimyasal içerik ve fiziksel özellikler nedeniyle çevresel ve sağlık açısından özel riskler barındırmaktadır. Lityum-iyon bataryalar ağır metaller, elektrolitler ve çeşitli kimyasal bileşenler içermektedir. Uygun olmayan depolama, geri dönüşüm veya bertaraf uygulamaları durumunda bu bileşenler ciddi çevresel kirlilik ve insan sağlığı risklerine yol açabilmektedir (Winslow et al., 2018; Harper et al., 2019). Bu nedenle batarya atıkları, e-atık

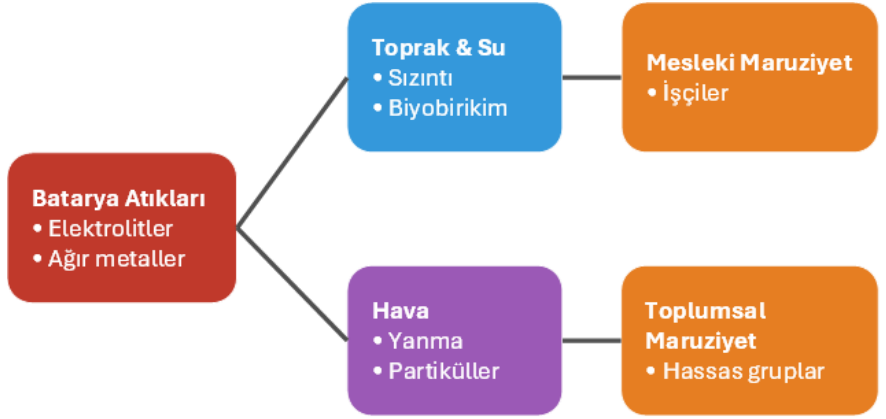
literatüründe giderek daha fazla “yüksek riskli atık akışı” olarak değerlendirilmektedir.

Batarya atıklarının çevresel etkileri, çoğunlukla kimyasal bileşenlerin çevresel ortamlara yayılımı üzerinden incelenmektedir. Uygun olmayan geri dönüşüm veya söküm süreçlerinde, batarya hücrelerinden açığa çıkan maddeler toprak ve su ortamlarına karışabilmekte; yanma veya kontrolsüz işlemler sonucunda ise hava emisyonları ortaya çıkabilmektedir (Zeng et al., 2014; Winslow et al., 2018). Bu yayılım süreçleri, batarya atıklarının çevresel etkilerinin doğrusal olmayan ve çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır; çünkü farklı çevresel ortamlar ve etkileşim mekanizmaları eş zamanlı olarak devreye girmektedir.

Bu çevresel yayılımın insan sağlığı üzerindeki etkileri ise hem mesleki hem de toplumsal maruziyet bağlamında ele alınmaktadır. Batarya geri dönüşüm tesislerinde çalışan işçiler, ağır metaller ve toksik kimyasallara doğrudan maruz kalma riski taşırken; uygun olmayan atık yönetimi uygulamalarının yaygın olduğu bölgelerde yaşayan topluluklar dolaylı maruziyetlerle karşı karşıya kalabilmektedir (Harper et al., 2019; Winslow et al., 2018). Bu durum, batarya atıklarının yalnızca çevresel bir sorun olarak değil, aynı zamanda önemli bir halk sağlığı meselesi olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Batarya atıklarının çevresel ve sağlık boyutları arasındaki ilişkiler, tek yönlü neden-sonuç ilişkileriyle açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapı sergilemektedir. Kimyasal içerik, çevresel ortamlar ve maruziyet biçimleri arasındaki etkileşimler, batarya atıklarının etkilerinin sistematik ve bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çoklu etki yolları ve maruziyet biçimleri, batarya atıklarının çevresel ve sağlık boyutları arasındaki karmaşık ilişkileri gösterecek şekilde Şekil 2’de kavramsal olarak sunulmuştur.

Şekil 2. Elektrikli Araç Bataryası Atıklarının Çevresel ve Sağlık Etki Yolları



Kaynak: Zeng et al., 2014; Winslow et al., 2018; Harper et al., 2019

Şekil 2, elektrikli araç bataryası atıklarının kimyasal bileşenlerinin toprak, su ve hava ortamları üzerinden yayılımını ve bu yayılımın mesleki ve toplumsal maruziyet yoluyla insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini göstermektedir. Çevresel ortamlar ile maruziyet biçimleri arasındaki etkileşimler oklar aracılığıyla ilişkilendirilerek, batarya atıklarının karmaşık ve çok boyutlu etki yapısı vurgulanmaktadır.

Batarya atıklarının çevresel ve sağlık risklerinin önemli bir boyutunu, bu atıklarda yer alan kritik ham maddeler oluşturmaktadır. Lityum, kobalt, nikel ve mangan gibi metaller, batarya performansı açısından vazgeçilmez olmakla birlikte, çevresel ve toksikolojik etkileri nedeniyle dikkatle yönetilmesi gereken bileşenlerdir (Gaines, 2014; Harper et al., 2019). Bu ham maddelerin kontrolsüz biçimde çevreye yayılması, uzun vadeli çevresel kirlilik ve sağlık sorunlarına yol açabilmektedir.

Batarya atıklarının içerdiği kritik ham maddeler ve bu ham maddelere ilişkin temel çevresel ve sağlık riskleri Tablo 2’de

özetlenmiştir. Tablo, döngüsel ekonomi ve politika tartışmaları açısından açıklayıcı bir çerçeve sunmaktadır.

Tablo 2. Elektrikli Araç Bataryalarında Kullanılan Kritik Ham maddeler ve Temel Riskler

Ham madde	Bataryadaki Kullanım Amacı	Başlıca Çevresel ve Sağlık Riskleri	Yönetim Açısından Öne Çıkan Zorluklar
Lityum	Enerji depolama	Su kaynakları üzerindeki baskı	Sürdürülebilir madencilik
Kobalt	Stabilite ve enerji yoğunluğu	Toksisite, sosyal etkiler	Etik tedarik
Nikel	Kapasite artırımı	Ekotoksisite	Geri kazanım verimliliği
Mangan	Yapısal destek	Toprak kirliliği	Atık yönetimi

Kaynak: Tablo, elektrikli araç bataryalarının kimyasal bileşimine ilişkin literatürde raporlanan bulguların sentezlenmesiyle oluşturulmuştur.

Batarya atıklarının çevresel ve sağlık boyutları, e-atık yönetiminin yalnızca teknik bir geri dönüşüm süreci olarak ele alınamayacağını açıkça ortaya koymaktadır. Bu risklerin azaltılması, batarya tasarımından kullanım sonrası yönetim stratejilerine kadar uzanan bütüncül ve sistem temelli yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, batarya atıklarının döngüsel ekonomi perspektifinden ele alınması, çevresel risklerin azaltılmasının yanı sıra kaynak verimliliğinin artırılması açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşımlar, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

4. E-Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi Yaklaşımları

Elektrikli araç bataryalarının e-atık yönetimi, geleneksel bertaraf odaklı yaklaşımların ötesinde, kaynak verimliliğini ve uzun vadeli sürdürülebilirliği hedefleyen stratejilerin geliştirilmesini gerektirmektedir. Lineer ekonomi anlayışında batarya atıkları, kullanım ömrü sonunda sistem dışına çıkarılan bir çıktı olarak ele alınırken; döngüsel ekonomi yaklaşımı bu atıkları yeniden değer yaratma potansiyeline sahip stratejik girdiler olarak

konumlandırmaktadır (European Commission, 2020; Forti et al., 2020). Bu perspektif değişimi, batarya e-atıklarının yönetiminde önemli bir paradigma dönüşümüne işaret etmektedir.

Lineer e-atık yönetim yaklaşımlarında temel amaç, batarya atıklarının güvenli biçimde toplanması ve bertaraf edilmesidir. Ancak bu yaklaşım, bataryaların içerdiği kritik ham maddelerin geri kazanım potansiyelini büyük ölçüde göz ardı etmektedir. Ayrıca artan elektrikli araç penetrasyonu, lineer sistemlerin hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir olmadığını ortaya koymaktadır (Gaines, 2014; Harper et al., 2019). Bu durum, batarya e-atıklarının döngüsel ekonomi çerçevesinde yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Döngüsel ekonomi yaklaşımı, batarya e-atık yönetimini ürün yaşam döngüsünün erken aşamalarına entegre etmeyi hedeflemektedir. Ürün tasarımında geri dönüştürülebilirlik, söküm kolaylığı ve modülerlik gibi unsurların dikkate alınması, bataryaların kullanım ömrü sonunda daha etkin biçimde geri kazanılmasını mümkün kılmaktadır (European Commission, 2020). Bu yaklaşım, e-atık yönetimini reaktif bir süreçten proaktif bir sistem tasarım problemine dönüştürmektedir.

Batarya e-atıklarının döngüsel yönetimi, yalnızca teknik geri dönüşüm süreçlerini değil, aynı zamanda ikinci ömür uygulamalarını da kapsamaktadır. Kullanım ömrünü araç içinde tamamlayan bataryaların enerji depolama gibi farklı uygulamalarda yeniden kullanılması, hem atık miktarını azaltmakta hem de kaynak verimliliğini artırmaktadır (Winslow et al., 2018; Harper et al., 2019). Bu bağlamda döngüsel ekonomi, batarya e-atıklarını çok aşamalı bir değer zinciri içerisinde ele almaktadır.

Lineer ve döngüsel e-atık yönetim yaklaşımları arasındaki temel farklar, sistem hedefleri, kaynak kullanımı ve uzun vadeli etkiler açısından belirgin biçimde ayrılmaktadır. Bu farklılıklar,

batarya e-atık yönetiminin neden döngüsel ekonomi perspektifiyle ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Döngüsel ekonomi perspektifi doğrultusunda geliştirilen batarya e-atık yönetim stratejileri, farklı amaçlara ve uygulama alanlarına sahip çeşitli yaklaşımları içermektedir. Bu stratejiler; ürün tasarımından tersine lojistiğe, ikinci ömür uygulamalarından geri dönüşüm teknolojilerine kadar uzanan geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Ancak bu stratejilerin uygulanması, teknik, ekonomik ve yönetsel pek çok zorlukla birlikte değerlendirilmektedir.

Batarya e-atık yönetiminde öne çıkan döngüsel stratejiler ve bu stratejilere ilişkin temel zorluklar Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo, döngüsel ekonomi yaklaşımının potansiyel faydalarının yanı sıra, uygulama aşamasında karşılaşılan sınırlılıkları da bütüncül biçimde ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Elektrikli Araç Bataryası E-Atık Yönetiminde Döngüsel Stratejiler ve Karşılaşılan Zorluklar

Döngüsel Strateji	Temel Amaç	Potansiyel Faydalar	Karşılaşılan Zorluklar
Tasarımda döngüsellik	Atık azaltımı	Geri kazanım kolaylığı	Standart eksikliği
İkinci ömür uygulamaları	Kullanım süresini uzatma	Kaynak verimliliği	Güvenlik ve performans
Geri dönüşüm teknolojileri	Malzeme geri kazanımı	Kritik ham madde arzı	Ekonomik fizibilite
Tersine lojistik	Etkin toplama	Sistem verimliliği	Altyapı gereksinimi

Kaynak: Tablo, döngüsel ekonomi ve batarya e-atık yönetimi literatüründe raporlanan yaklaşımların sentezlenmesiyle oluşturulmuştur.

Döngüsel ekonomi temelli yaklaşımlar, elektrikli araç bataryalarının e-atık yönetimini yalnızca çevresel bir sorumluluk

olarak değil, aynı zamanda stratejik bir kaynak yönetimi problemi olarak ele almaktadır. Ancak bu yaklaşımların etkin biçimde uygulanabilmesi, teknoloji, politika ve yönetim boyutlarının uyumlu biçimde ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, batarya e-atıklarının ikinci ömür ve geri dönüşüm aşamalarında karşılaşılan sistem zorlukları, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

5. İkinci Ömür, Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Sistem Zorlukları

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sonunda doğrudan atık haline gelmesi hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli kayıplara yol açmaktadır. Bu nedenle son yıllarda literatürde, batarya e-atıklarının yönetiminde ikinci ömür (second-life) uygulamaları ve ileri geri dönüşüm teknolojileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yaklaşımlar, bataryaların değer zincirindeki kullanım süresini uzatmayı ve kaynak verimliliğini artırmayı hedeflemektedir (Winslow et al., 2018; Harper et al., 2019).

İkinci ömür uygulamaları, elektrikli araçlarda kapasite kaybı nedeniyle performans açısından yetersiz hale gelen bataryaların, daha düşük enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda yeniden kullanılmasını kapsamaktadır. Özellikle sabit enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve yedek güç uygulamaları, ikinci ömür bataryalar için öne çıkan kullanım alanlarıdır (Gaines, 2014). Bu yaklaşım, batarya atıklarının oluşumunu geciktirerek çevresel yükleri azaltmakta ve ekonomik değer yaratmaktadır.

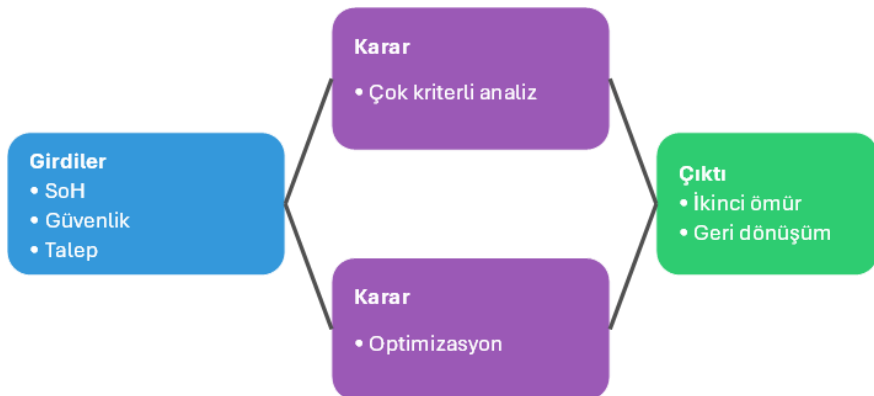
Bununla birlikte, ikinci ömür uygulamalarının yaygınlaşması çeşitli teknik ve yönetsel zorlukları beraberinde getirmektedir. Bataryaların sağlık durumu (state of health), güvenlik riskleri ve performans belirsizlikleri, bu bataryaların yeniden kullanımına

ilişkin karar süreçlerini karmaşık hale getirmektedir (Winslow et al., 2018). Bu noktada, bataryaların ikinci ömre mi yoksa doğrudan geri dönüşüme mi yönlendirileceğine ilişkin kararların sistematik ve analitik bir çerçevede ele alınması gerekmektedir.

İkinci ömür uygulamalarına ek olarak, geri dönüşüm teknolojileri de batarya e-atık yönetiminin temel bileşenlerinden biridir. Mekanik, pirometalurjik ve hidrometalurjik geri dönüşüm yöntemleri, bataryalarda yer alan kritik ham maddelerin geri kazanılmasına olanak sağlamaktadır (Zeng et al., 2014; Harper et al., 2019). Ancak bu teknolojilerin çevresel etkileri, enerji gereksinimleri ve ekonomik fizibiliteleri arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır.

İkinci ömür ve geri dönüşüm seçenekleri arasındaki karar süreci, çok sayıda teknik, ekonomik ve çevresel kriterin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu çok kriterli yapı, batarya e-atık yönetiminin klasik tek aşamalı karar problemlerinin ötesinde, sistem düzeyinde ele alınması gerektiğini göstermektedir. İkinci ömür ve geri dönüşüm karar sürecinin temel bileşenleri Şekil 3'te sunulmuştur.

Şekil 3. Elektrikli Araç Bataryaları için İkinci Ömür ve Geri Dönüşüm Karar Süreci



Kaynak: Winslow et al., 2018; Harper et al., 2019

Şekil 3., elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sonunda ikinci ömür uygulamalarına veya doğrudan geri dönüşüm süreçlerine yönlendirilmesine ilişkin karar sürecini göstermektedir. Teknik uygunluk, ekonomik fizibilite ve güvenlik kriterleri, karar sürecinin temel belirleyicileri olarak sunulmaktadır.

Batarya kullanım sonu yönetiminde (ikinci ömür-geri dönüşüm) karar verme, çok kriterli ve belirsizlik içeren bir yapı sergilediğinden, kriter ağırlıklandırma ve çoklu karar verme tekniklerinin birlikte kullanıldığı karar destek yaklaşımları öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda bulanık AHP ile kriter ağırlıklandırmanın, ardından GRA/WASPAS/VIKOR gibi MCDM yöntemleriyle alternatiflerin sıralanmasının bütünselik kullanımı literatürde uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır (Fedai, 2023).

Batarya e-atık yönetiminde karşılaşılan sistem zorlukları yalnızca teknik boyutla sınırlı değildir. Tersine lojistik altyapısının yetersizliği, standart eksikliği, veri paylaşım sorunları ve mevzuat belirsizlikleri, ikinci ömür ve geri dönüşüm uygulamalarının yaygınlaşmasını sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır (European Commission, 2020). Bu durum, batarya e-atık yönetiminin disiplinlerarası ve çok aktörlü bir sistem problemi olarak ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

6. Tartışma, Politika Çıkarımları ve Gelecek Araştırma Alanları

Elektrikli araç bataryalarının e-atık yönetimi, yalnızca teknik bir geri dönüşüm veya atık bertaraf problemi olarak değerlendirilemeyecek kadar çok boyutlu bir yapıya sahiptir. Bu çalışmada ele alınan bulgular, batarya e-atıklarının ürün tasarımıyla kullanım sonrası yönetim stratejilerine kadar uzanan bütüncül bir yaşam döngüsü çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, batarya e-atıklarının

yönetimi, sürdürülebilirlik hedefleriyle doğrudan ilişkili stratejik bir sistem tasarım problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Politika yapıcılar açısından, batarya e-atık yönetiminde döngüsel ekonomi temelli yaklaşımların desteklenmesi kritik bir öneme sahiptir. Genişletilmiş üretici sorumluluğu, ekotasarım ilkeleri ve geri kazanım hedefleri, batarya e-atıklarının etkin biçimde yönetilmesine katkı sağlayabilecek politika araçları arasında yer almaktadır (European Commission, 2020). Ancak bu politikaların etkili olabilmesi, teknik altyapı, piyasa mekanizmaları ve paydaş katılımıyla uyumlu biçimde uygulanmalarını gerektirmektedir. Endüstri mühendisliği perspektifinden bakıldığında, batarya e-atık yönetimi çok kriterli karar verme, optimizasyon ve sistem modelleme yaklaşımlarının uygulanabileceği önemli bir araştırma alanı sunmaktadır. İkinci ömür ve geri dönüşüm seçenekleri arasındaki karar süreçleri, belirsizlikler ve dinamik koşullar altında ele alınması gereken karmaşık problemler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, analitik yöntemlerin ve veri temelli karar destek sistemlerinin önemini artırmaktadır. Benzer şekilde çok yanıtli performans hedeflerinin tek bir karar metriğine indirgenmesi için gri ilişkisel analiz gibi teknikler de çok amaçlı optimizasyon bağlamında uygulanabilmektedir (Fedai et al., 2022).

Gelecek araştırmalar açısından, batarya e-atıklarının çevresel ve sağlık etkilerinin nicel olarak değerlendirilmesine yönelik yaşam döngüsü analizlerinin geliştirilmesi önemli bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, ikinci ömür uygulamalarının uzun vadeli performansı, güvenliği ve ekonomik etkileri üzerine yapılacak çalışmalar, bu yaklaşımların yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır. Politika, teknoloji ve sistem tasarımı boyutlarını bütünleştiren disiplinlerarası araştırmaların, batarya e-atık yönetiminin sürdürülebilirliğine yönelik önemli çıktılar sunması beklenmektedir.

Sonuç olarak, elektrikli araç bataryalarının e-atık yönetimi, çevresel risklerin azaltılması, kaynak verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu alışma, batarya e-atıklarının yaşam dgs boyunca ele alınmasının önemini vurgulayarak, dgsel ekonomi temelli ve sistem odaklı yaklaşımların bu alandaki temel yönlendirici ereve olduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynakça

Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8(1), 158–168. <https://doi.org/10.1039/C4EE03029J>

European Commission. (2020). *A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Publications Office of the European Union.

Fedai, Y. (2023). Optimization of drilling parameters in drilling of MWCNT-reinforced GFRP nanocomposites using fuzzy AHP-weighted Taguchi-based MCDM methods. *Processes*, 11(10), 2872. <https://doi.org/10.3390/pr11102872>

Fedai, Y., Basar, G., & Kirli Akin, H. (2022). Multi-response optimization in drilling of MWCNTs reinforced GFRP using grey relational analysis. *Tehnički vjesnik*, 29(3), 742-751.

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), & International Solid Waste Association (ISWA).

Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1–2, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001>

Hao, H., Mu, Z., Jiang, S., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). GHG emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 119, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.028>

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

International Energy Agency (IEA). (2023). *Global EV outlook 2023*. IEA Publications.

Uydur, C. Ç. (2025). Elektrikli Araç Tasarımında Batarya Teknolojileri: Yapı, Performans ve Entegrasyon Stratejileri.

Winslow, K. M., Laux, S. J., & Townsend, T. G. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 263–277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.001>

Zeng, X., Li, J., & Singh, N. (2014). Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(10), 1129–1165. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578>

BÖLÜM 10

E-TİCARET KULLANICI YORUMLARININ DOĞAL DİL İŞLEMEYLE SINIFLANDIRILMASI VE KATEGORİ YÖNETİMİ KARARLARINA ETKİSİ

**Selaynur DEMİREL
Ayten YILMAZ YALÇINER**

Giriş

Dijitalleşme ile birlikte tüketici davranışlarında önemli bir dönüşüm yaşanmış, alışveriş süreçleri giderek fiziksel ortamlardan çevrimiçi platformlara kaymıştır. İnternet ve mobil teknolojilerin yaygınlaşmasıyla tüketiciler, ürünlere her an erişebilme, fiyat karşılaştırması yapabilme ve farklı satıcılardan alışveriş yapabilme imkânına kavuşmuştur. Bu dönüşüm, tüketici-tüketici etkileşiminin dijitalleşmesini de beraberinde getirmiştir (Demir, Chawai & Doğan, 2019). E-ticaret siteleri, tüketicilerin yalnızca ürünlere erişebildiği satış kanalları olmaktan çıkmış; kullanıcıların deneyimlerini, memnuniyet düzeylerini, beklentilerini ve satın alma motivasyonlarını paylaştıkları etkileşimli dijital ekosistemlere dönüşmüştür. Kullanıcıların, özellikle belirsizlik içeren kozmetik, kişisel bakım ve sağlıkla ilişkilendirilen ürün kategorilerinde karar

verme sürecinde diğ er tüketicilerin deneyimlerinden etkilendikleri gösterilmiştir (Tuzcu, 2020).

Bu bağlamda  evrimi i müşteri yorumları, yalnızca ürün değerlendirmesi yapılan metinler değil; tüketicilerin algı, niyet ve satın alma eğilimlerini yansıtan çok boyutlu değerlendirme kaynaklarıdır. Aynı zamanda tüketicilerin markaya yönelik algılarını ve tutumlarını da yansıttığı için, marka algısının doğru biçimde analiz edilmesi de kritik öneme sahiptir. Pazarlama 4.0 yaklaşımı çerçevesinde marka algısının veri temelli yöntemlerle incelenmesine yönelik çalışmalar da literatürde yer almaktadır; bu kapsamda Yasar ve Korkusuz Polat (2022), marka algısını anlamak amacıyla bulanık mantık temelli bir uygulama gerçekleştirmiştir.

Literatürde  evrimi i yorumların potansiyel müşterilere bilgi sağlamanın yanı sıra, işletmeler için doğrudan geri bildirim niteliği taşıdığı ve ürün yönetimi, ürün geliştirme ve kategori planlaması süreçlerini etkileyebildiği belirtilmektedir (Kayakuş & Yiğit Açıkgöz, 2025). Çevrimiçi yorumların metinsel yapısında yer alan ipuçları, tüketicilerin ürünlerin hangi özelliklerini  nemsemiği, memnuniyeti neye göre değerlendirdiği ve satın alma motivasyonlarının hangi unsurlarla tetiklendiğine dair yapısal bilgi taşımaktadır. Dolayısıyla diğital yorumlar, müşterilerin ifade ettiği açık beklentilerin yanı sıra örtük ihtiyaçlara ilişkin anlamlı i ğ r ler sunabilmekte, böylece veri odaklı kategori yönetimi ve satın alma stratejilerinde kullanılabilecek değerli bir veri kaynağı olarak konumlanmaktadır.

Bununla birlikte, e-ticaret platformlarında günlük olarak büyük hacimde kullanıcı yorumu oluşmakta ve bu yorumların manuel biçimde analiz edilmesi mümkün olmamaktadır (Kılıçer S, & şamlı R.,2023). Bu nedenle son yıllarda  evrimi i yorumların otomatik işlenmesi ve anlamlandırılması amacıyla doğal dil işleme (NLP) yöntemlerine yönelik ilgi artmıştır. NLP tabanlı yorum analizleri, tüketicilerin geri bildirimlerini sistematik biçimde

sınıflandırma, karşılaştırma ve yorumlama olanağı sunduğu için işletmelerin karar destek mekanizmalarında yerini almaya başlamıştır. Literatürde çevrimiçi kullanıcı yorumlarının metin madenciliği ve doğal dil işleme yöntemleriyle analiz edilmesine yönelik çalışmaların arttığı görülmektedir. Kayakuş ve Yiğit Açıkgöz (2025). Trendyol mobil uygulama yorumlarında duygu analizi ve konu madenciliği tekniklerini kullanarak müşteri memnuniyetine etki eden temel faktörleri belirlemiştir. Tuzcu (2020), çevrimiçi kitap satışı platformundaki yorumları Python tabanlı duygu analizi modelleriyle sınıflandırmış ve bu yaklaşımların tüketici eğilimlerinin ölçülmesindeki önemini vurgulamıştır. Benzer şekilde Kılıçer ve Samlı (2023), e-ticaret ürün yorumlarını makine öğrenmesi algoritmalarıyla duygu temelli olarak kategorize etmiş, Göçgün ve Onan (2021) ise Amazon yorumları üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerini karşılaştırarak video/sesli değerlendirmelerin otomatik analizinin işletmelere karar desteği sağlayabileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar, çevrimiçi yorumlardan anlamlı içgörü üretmenin işletmelerin ürün yönetimi, satın alma ve kategori planlama süreçleri açısından önemli bir veri kaynağı haline geldiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda yalnızca çevrimiçi müşteri yorumları değil, farklı dijital platformlarda üretilen metinsel veriler de karar destek süreçlerinde kullanılabilir nitelik taşımaktadır. Vatan ve KorkusuzPolat (2024) yaptıkları çalışmada çevrimiçi iş ilanlarını metin madenciliği ile analiz etmişlerdir.

Bu çalışma, e-ticaret ortamındaki müşteri yorumlarının doğal dil işleme yöntemleri kullanılarak sistematik biçimde analiz edilmesini ve yorumlarda yer alan ürün özelliklerinin otomatik olarak sınıflandırılmasını amaçlamaktadır. Çalışmada, web kazıma (web scraping) yoluyla elde edilen metinsel müşteri değerlendirmeleri, metin madenciliği ve kural tabanlı özellik çıkarımı yaklaşımlarıyla işlenmiş; böylece kullanıcıların ürünlere

ilişkin algılarının hangi fonksiyon, performans kriteri veya özellik kümeleri etrafında toplandığı bütüncül biçimde ortaya çıkarılmıştır.

Çalışmada tüketici algısı ve değerlendirmesinin hangi ürün özellikleri üzerinden kurulduğunu ortaya koymaya yönelik özellik tabanlı metin sınıflandırması yaklaşımı tercih edilmiştir. Tanımlanan özellik sözlükleri aracılığıyla ürün yorumları fonksiyonel kategorilere ayrılarak sınıflandırılmıştır. Böylece tüketicilerin söz konusu ürün bağlamında en çok hangi nitelikler üzerinden değerlendirme yaptığı, ürün algısını hangi kriterlerle oluşturduğu ve satın alma kararlarını hangi özelliklerin etkilediği analitik biçimde belirlenmiştir.

Çalışmanın özgün katkısı, müşteri yorumlarını kategori yönetimi bağlamında ele alması ve çevrimiçi tüketici görüşlerinin ürün stratejilerini yönlendirmede kullanılabilirliğini ortaya koymasındır. NLP tabanlı otomatik sınıflandırma sayesinde büyük hacimdeki yorum verisi işlenebilir bir yapıya dönüştürülmüş; bu yapı üzerinden kategori yöneticileri için ürün seçimi, tedarik planlaması, fiyatlandırma stratejileri ve stok optimizasyonu gibi karar süreçlerine entegre edilebilir nitelikte içgörüler elde edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, veri temelli kategori yönetimi yaklaşımını destekleyici ve işletmelerin müşteri odaklı karar mekanizmalarını güçlendirici bir çerçeveye sunmaktadır.

Ayrıca önerilen yöntem ölçeklenebilir bir yapıya sahiptir. Çalışmada kullanılan yöntem aynı biçimde farklı kategorilerden çok satan ürünlere uygulanmak üzere genişletilebilir niteliktedir. Bu kapsamda çalışma yalnızca mevcut ürün özelinde mikro düzey içgörüler sunmamakta, aynı zamanda kategori yönetimi ve satın alma stratejilerine makro düzeyde uygulanabilir, kuramsal ve pratik açıdan değer taşıyan bir yöntemsel çerçeve önermektedir.

Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada, çevrimiçi müşteri yorumlarının kategori yönetimi kararlarına nasıl bilgi sağlayabileceği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, iki farklı ürün kategorisi seçilmiş ve her iki kategoride yer alan yüksek talep gören birer ürünün kullanıcı yorumları analiz edilmiştir. Seçilen ürünler, cilt bakım kategorisinden X ürünü ile makyaj kategorisinden Y ürünüdür.

Bu ürünlerin seçilme nedeni, geniş kullanıcı kitlesine hitap etmeleri, düzenli satış hacmine sahip olmaları ve yorum içeriklerinin zengin olmasıdır. Çalışmada kullanılan yöntem, metinsel veri toplama, temizleme, özellik (aspect) temelli sınıflandırma ve sayısal analiz adımlarından oluşmaktadır.

Veri Toplama Süreci

Müşteri yorumları çevrimiçi mağaza sayfalarından web scraping yöntemiyle toplanmıştır. Web scraping, çevrimiçi ortamlarda yer alan web sayfalarındaki içeriklerin otomatik yollarla toplanması sürecidir. Bu teknik, insan müdahalesi olmadan yapılandırılmış ya da yarı-yapılandırılmış verilerin HTML belgelerinden ayrıştırılarak analiz edilebilir biçime dönüştürülmesini sağlar (Liu, 2020). Bu çalışmada, web sayfalarının içeriği dinamik olması sebebiyle veri toplama işlemi Selenium tabanlı bir Python programı ile otomatikleştirilmiştir. Program, sayfalar arasında kendiliğinden gezinerek her iki ürün için 300'ü aşkın gerçek kullanıcı yorumunu toplamıştır.

Veri setleri yalnızca yorum cümlelerini içermektedir; isim, kullanıcı kimlik bilgisi veya sipariş bilgisi kaydedilmemiştir. Bu yöntem, araştırmanın etik çerçevede yürütülmesini sağlamıştır.

Tablo 1. Örnek Veri Seti

Kullanıcı Yorumları
Güzel bir ürün indirimde stokluyorum. Sivilce yapmadı.
harika bir nemlendirici yüzümü yumuşacık yapıyor üstelik çok güzel bir parlaklık veriyor
Kokusu muhteşem nemlendirme özelliğininide beğendimmm
lekelerimde açılma ve azalma yaptı
sivilcelenme yapmadı gerçekten indirimde girdikçe stokluyorum.

Metin Temizleme Ve Ön İşleme

Toplanan ham yorumlar anlamsal analiz için doğrudan uygun değildir. Bu nedenle Python ortamında bir dizi metin normalizasyonu uygulanmıştır. Bu süreç, doğal dil işlemede sık kullanılan standart temizleme adımlarını kapsamaktadır:

- Tüm karakterlerin küçük harfe dönüştürülmesi
- Noktalama işaretlerinin, özel sembollerin ve emoji karakterlerinin kaldırılması
- Fazladan boşlukların sadeleştirilmesi
- Sayısal ifadelerin temizlenmesi
- Türkçe durak kelimelerin (stopwords) elenmesi
- “Ürünü aldım, geliyor, sipariş, tavsiye ederim” gibi semantik yük taşımayan kelimelerin dışlanması

Bu aşamada amaç, incelemede kullanılacak metinlerin yapısını olabildiğince sadeleştirerek anlamlı öğeleri korumaktır. Ön işleme sonrası her yorum tokenize edilmiş ve kelime listelerine dönüştürülmüştür.

Sözlük Tabanlı Ürün Özelliği (Aspect) Tanımlama

Çevrimiçi kullanıcı yorumları, doğası gereği serbest metin yapısındadır ve ürün performansına ilişkin çeşitli boyutları aynı paragraf içinde birden fazla kavramla ifade edebilir. Bu nedenle

yorumların yalnızca duygu yönelimlerinin belirlenmesi yeterli olmamakta; kullanıcıların hangi ürün özelliklerine odaklandığının sistematik biçimde ortaya çıkarılması gerekmektedir. Çalışmada bu amaç doğrultusunda, ürün performansına ilişkin kavramsal alanları temsil eden bir özellik sözlüğü (aspect lexicon) geliştirilmiştir.

Sözlük tabanlı yaklaşım, metin içindeki anahtar kelime veya kelime köklerinin, araştırmacı tarafından önceden belirlenen anlam kategorilerine (özellik kümelerine) eşlenmesi esasına dayanır.

Çalışma kapsamında her iki ürün grubu için ayrı sözlükler oluşturulmuştur. Bu sözlüklerde yer alan kavramlar literatürde yer alan ürün performansı boyutları, sektörel ürün değerlendirme kriterleri ve örnek müşteri ifadelerinden hareketle belirlenmiştir. Ayrıca, sözlüklerin kapsayıcılığını artırmak amacıyla Türkçe karakter ve yazım farklılıkları, türev kelimeler ve bölümlü kelime kökleri de dikkate alınmıştır.

Bir yorumun bir özelliğe ait olup olmadığı, sözlükte yer alan kavramların yorum metni içinde geçip geçmediğine göre belirlenmiştir. Örneğin, X ürünü yorumunda “nemlendiriyor”, “kuru cildime iyi geldi” veya “çatlaklar azaldı” gibi ifadelerin bulunması durumunda bu yorum, nemlendirme özelliği altında sınıflandırılmıştır. Benzer biçimde Y ürününde “akma”, “bulaşma”, ya da “dayanıklılık” ifadeleri geçen yorumlar ilgili performans özellikleri ile eşleştirilmiştir.

Bu işlem sonucunda, her yorumun içerdiği özellikler belirlenmiş, ardından özellik kümeleri yorum düzeyinde frekans analizine tabi tutularak kullanıcıların hangi performans alanlarını daha fazla değerlendirdikleri ortaya konmuştur. Böylelikle sözlük tabanlı yöntem, nitel müşteri geribildirimlerinin nicel hale getirilmesini sağlayarak veri odaklı kategori yönetimi değerlendirmesine olanak sunmuştur.

X Ürünü İçin Uygulama

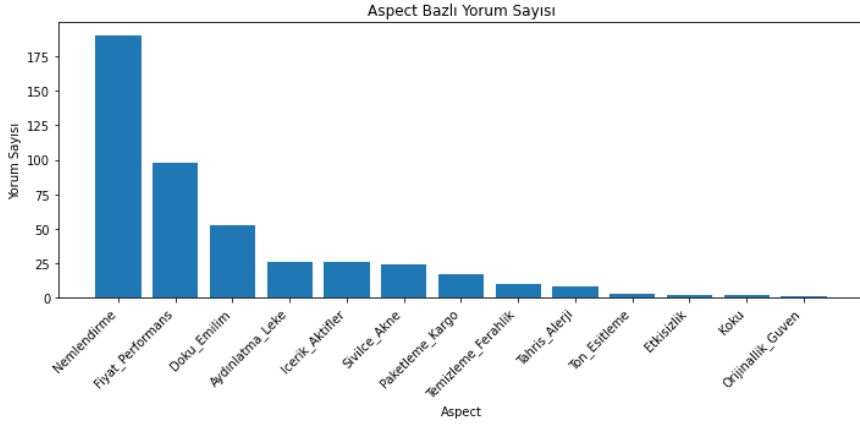
X ürününe ilişkin veri seti toplam 315 müşteri yorumundan oluşmaktadır. Temizleme ve ön işleme adımlarının ardından, yorumlar sözlük tabanlı ürün özellikleriyle eşleştirilmiş ve bu eşleştirme sonucunda 258 yorumda en az bir ürün özelliğinin geçtiği belirlenmiştir. Bu durum, kullanıcıların büyük çoğunluğunun deneyimlerini yalnızca genel memnuniyet ifadeleriyle değil, belirli ürün performansı boyutları üzerinden aktardığını göstermektedir. Özellik eşleştirmesinin ardından, her bir özellik kategorisinin kaç yorumda geçtiği hesaplanmış ve kullanıcı değerlendirmelerinin hangi boyutlarda yoğunlaştığı sayısal olarak ortaya konmuştur. X ürününe ilişkin özellik bazlı yorum frekansları Tablo 2’de sunulmuştur. Bu tablo, kullanıcı geri bildirimlerinin ağırlıklı olarak nemlendirme etkisi, fiyat–performans algısı ve ürünün doku-emilim özellikleri etrafında yoğunlaştığını göstermekte; bunun kategori yönetimi ve ürün değerlendirme süreçlerinde dikkate alınması gereken temel kriterler olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2. X Ürünü İçin Özellik Bazlı Yorum Sayısı

Özellik Bazlı Yorum Sayıları	
Nemlendirme	190
Fiyat_Performans	98
Doku_Emilim	53
Aydınlatma_Leke	26
Icerik_Aktifler	26
Sivilce_Akne	24
Paketleme_Kargo	17
Temizleme_Ferahlik	10
Tahris_Alerji	8
Ton_Esitleme	3
Etkisizlik	2
Koku	2
Orijinallik_Guven	1

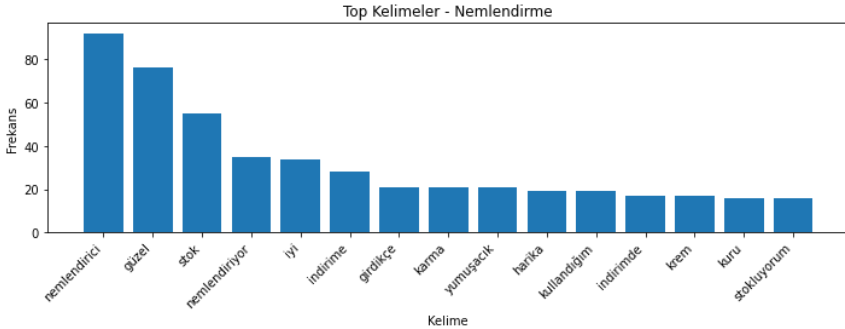
Tablo 2’de X ürününe ait müşteri yorumlarının, tanımlanan ürün özellikleri (aspect/özellik kümeleri) temelinde dağılımı gösterilmektedir. Her bir satır, ilgili özelliğin en az bir kez geçtiği yorum sayısını ifade etmektedir.

Grafik 1. X Ürünü İçin Özellik Dağılım Grafiği



Grafik 1’de, X ürününe ait yorumlarda en sık bahsedilen ürün özellikleri görselleştirilmiştir. Sütunların yüksekliği, her bir özellik kategorisinin kaç farklı yorumda geçtiğini göstermektedir.

Grafik 2. X ürünü İçin Nemlendirme Kategorisinde Top Kelimeler Dağılım Grafiği



Grafik-2, nemlendirme kategorisi altında yer alan yorumlarda en çok tekrar eden kelimeleri ve bunların frekanslarını göstermektedir. Böylece kullanıcıların nemlendirme beklentilerini hangi alt konular üzerinden ifade ettikleri ortaya çıkarılmıştır.

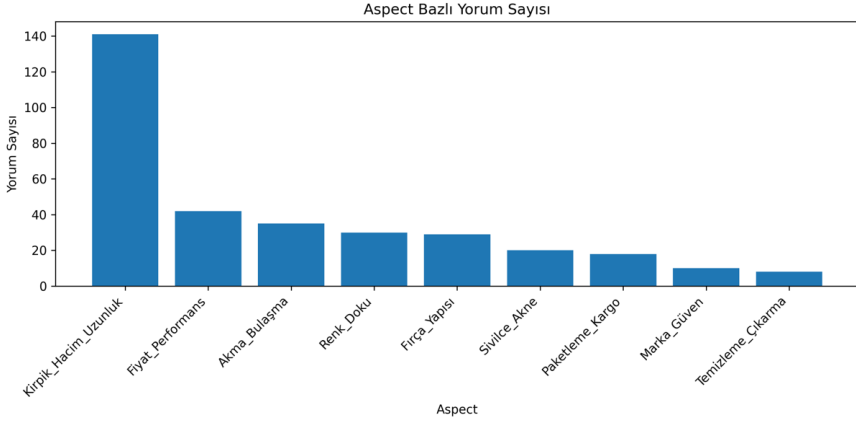
Y ürünü İçin Uygulama

Kozmetik kategorisinde yer alan Y ürünü için 312 kullanıcı yorumu analiz edilmiştir. Aynı yöntemsel adımlar Y ürünü için de uygulanmış ve sözlük tabanlı eşleştirme sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Y ürünü İçin Özellik Bazlı Yorum Sayısı

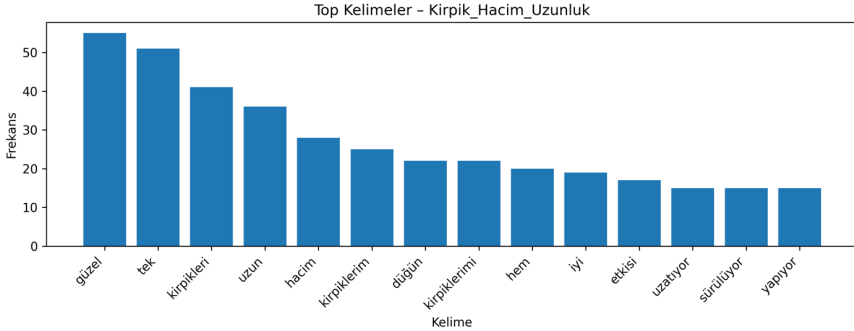
Özellik Bazlı Yorum Sayıları	
Kırpık_Hacim_Uzunluk	141
Fiyat_Performans	42
Akma_Bulaşma	35
Renk_Doku	30
Firca_Yapisi	29
Sivilce_Akne	20
Paketleme_Kargo	18
Marka_Guven	10
Temizleme_Cikarma	8

Grafik 3. Y ürünü İçin Özellik Dağılım Grafiği



Y ürününe ait yorumlarda en sık bahsedilen ürün özellikleri Grafik 3'te görselleştirilmiştir

Grafik 4. Y ürünü İçin Kirpik-Hacim-Uzunluk Kategorisinde Top Kelimeler Dağılım Grafiği



Grafik-4, Kirpik-Hacim-Uzunluk kategorisi altında yer alan yorumlarda en çok tekrar eden kelimeleri ve bunların frekanslarını göstermektedir.

Her iki ürün grubuna ait analiz çıktıları, kullanıcı yorumlarının belirli ürün boyutlarında yoğunlaştığını ortaya koymuş olup tablo ve grafikler karşılaştırmalı değerlendirmeye imkân tanımaktadır.

Kategori Yönetimi Açısından Yorumlanması

Bu çalışmada elde edilen bulgular, analiz edilen X ve Y ürünlerine özgü sonuçlar sunmanın ötesinde, çevrimiçi müşteri yorumlarının doğal dil işleme yöntemleriyle sistematik biçimde analiz edilmesi durumunda herhangi bir ürün ya da kategori için anlamlı içgörüler üretilebileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, belirli bir krem ya da makyaj ürünü özelinde değerlendirme yapmaktan ziyade, müşteri yorumlarının ürün ve kategori yönetimi kararlarına nasıl entegre edilebileceğine yönelik genellenebilir bir yöntemsel çerçeve sunmaktadır.

Özellik (aspect) tabanlı sınıflandırma sonuçları, kullanıcıların ürünleri değerlendirirken ağırlıklı olarak belirli fonksiyonel ve performans kriterlerine odaklandığını ortaya koymuştur. X ürünü için yapılan analizde, kullanıcı yorumlarının özellikle nemlendirme etkisi, fiyat–performans algısı ve ürünün doku–emilim özellikleri etrafında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum, tüketicilerin söz konusu ürün kategorisinde temel beklentilerini bu performans boyutları üzerinden şekillendirdiğini göstermektedir. Benzer şekilde Y ürünü analizinde, hacim–uzunluk etkisi, akma–bulaşma durumu ve fiyat–performans değerlendirmelerinin ön plana çıktığı belirlenmiştir. Bu bulgular, farklı kategorilerde kullanıcıların karar verme süreçlerinde hangi kriterleri daha belirleyici gördüğünü açık biçimde ortaya koymaktadır.

Kategori yönetimi açısından değerlendirildiğinde, bu tür bir analiz yaklaşımı ürün portföyünün yapılandırılması, raf ve filtreleme sistemlerinin tasarımı ve ürün açıklamalarının optimize edilmesi süreçlerine doğrudan katkı sağlayabilir. Örneğin, kullanıcıların yoğun biçimde değerlendirdiği özelliklerin kategori sayfalarında filtreleme kriteri olarak öne çıkarılması, tüketicilerin aradıkları ürünlere daha hızlı ulaşmalarını sağlayarak kullanıcı deneyimini iyileştirebilir. Aynı zamanda ürün detay sayfalarında kullanılan dilin,

müşteri yorumlarında sık tekrar eden kavramlarla uyumlu hale getirilmesi, algılanan ürün değerini artırabilir.

Elde edilen bulgular, yalnızca mevcut ürünlerin değerlendirilmesinde değil, aynı zamanda yeni ürün geliştirme ve pazar genişletme stratejilerinde de yol gösterici niteliktedir. Kullanıcı yorumlarında öne çıkan özellik kümeleri, firmaların yeni ürün varyantları geliştirirken hangi fonksiyonel alanlara odaklanması gerektiğine dair veri temelli sinyaller sunmaktadır. Bu sayede işletmeler, müşteri beklentileriyle uyumlu ürün konumlandırmaları yaparak pazara giriş riskini azaltabilir.

Buna ek olarak, doğal dil işleme yöntemleriyle analiz edilen müşteri yorumları, fiyatlandırma ve kampanya stratejilerinin şekillendirilmesinde de kullanılabilir. Fiyat–performans vurgusunun yüksek olduğu ürün gruplarında, indirim ve kampanya dönemlerinin daha stratejik biçimde planlanması, değer algısını güçlendiren bir yaklaşım sağlayabilir. Aynı zamanda bu tür analizler, hangi ürünlerin fiyat hassasiyeti yüksek müşteri segmentlerine hitap ettiğini ortaya koyarak kategori içi segmentasyon çalışmalarına katkı sunabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında uygulanan sözlük tabanlı özellik analizi, tüketici algısının hangi fonksiyonel boyutlar üzerinden şekillendiğini nicel olarak ortaya koymaktadır. Doğal dil işleme tekniklerinin bu şekilde kullanılması, işletmelerin kategori yönetimi, ürün geliştirme, strateji oluşturma ve yeni müşteri ya da pazar fırsatlarını değerlendirme süreçlerinde veri temelli kararlar almasına olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, müşteri yorumlarının stratejik bir karar destek aracına dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Doğal Dil İşleme Yöntemlerinin Genişletilmesine Yönelik Öneriler

Bu çalışmada, e-ticaret platformlarında yer alan müşteri yorumları sözlük tabanlı özellik (aspect) analizi yaklaşımıyla

incelenmiş; kullanıcıların ürün deneyimini hangi fonksiyonel boyutlar üzerinden değerlendirdiği (örneğin performans, kullanım deneyimi, fiyat-performans gibi) yorumlanabilir ve kategori yönetimine aktarılabilir çıktılarla ortaya konmuştur. Sözlük tabanlı yaklaşımın temel avantajı, oluşturulan kategori ve özellik seti sayesinde elde edilen sonuçların karar vericiler tarafından kolaylıkla izlenebilmesi ve stratejik aksiyonlara dönüştürülebilmesidir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın bağlamsal anlamların yakalanması, aynı özellik için olumlu ve olumsuz değerlendirmelerin nicel olarak ayrıştırılması ve önceden tanımlanmamış yeni temaların otomatik biçimde keşfedilmesi gibi alanlarda farklı doğal dil işleme yöntemleriyle desteklenmesi mümkündür.

Bu doğrultuda, çalışmanın devamında sözlük tabanlı aspect yapısının modern konu modelleme teknikleriyle birlikte ele alınması önerilmektedir. Özellikle BERTopic gibi güncel konu modelleme yaklaşımları, önceden konu sayısı belirleme gereksinimi olmaksızın metinleri anlamsal temsiller üzerinden gruplandırarak yeni ve örtük temaların keşfedilmesine olanak tanımaktadır. Koruyan (2022), müşteri şikâyetleri üzerinde BERTopic kullanarak şikâyetlerin konu dağılımını belirlemiş ve dinamik konu modelleme yaklaşımıyla bu konuların zaman içerisindeki değişimini incelemiştir. Bu tür bir yaklaşım, mevcut çalışmada tanımlanan sözlük tabanlı özellik setinin ötesinde, müşteri geri bildirimlerinde zamanla ortaya çıkan yeni değerlendirme alanlarının erken aşamada tespit edilmesini ve kategori risklerinin daha proaktif biçimde yönetilmesini mümkün kılmaktadır.

Öte yandan, mevcut çalışmada “hangi ürün özelliklerinin daha sık değerlendirildiği” sorusu güçlü biçimde yanıtlanabilmekteyken, kategori yönetimi kararlarını daha ayrıntılı biçimde desteklemek amacıyla bu özelliklerin kullanıcılar tarafından nasıl algılandığının da analiz edilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda BERT ve Türkçe için uyarlanmış BERTurk modelleri ile

gerçekleştirilen duygu analizi uygulamaları, metnin bağlamını dikkate alarak daha hassas sınıflandırmalar sunmaktadır. Gazaz ve Ayvaz (2024), Türkçe tweet’ler üzerinde BERT tabanlı duygu analizi uygulayarak duygu eğilimlerini dönemsel olarak incelemiş ve bağlam temelli modellerin etkinliğini ortaya koymuştur. E-ticaret alanında ise Teke ve arkadaşları (2025), Trendyol’dan elde edilen çok alanlı ürün yorumları üzerinde farklı modelleri karşılaştırmış ve BERTurk modelinin geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla daha yüksek doğruluk değerleri sağladığını raporlamıştır. Benzer şekilde Göçgün ve Onan (2021), Amazon ürün değerlendirmeleri üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı duygu analizi yaklaşımlarını ele alarak bu tür modellerin uygulanabilirliğini göstermiştir.

Bu tür bir genişletme, yalnızca en sık değerlendirilen ürün özelliklerinin belirlenmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda hangi özelliklerin daha çok olumlu ya da olumsuz algılandığının ayrıştırılmasına da olanak tanımaktadır. Böylece kampanya, konumlandırma ve ürün geliştirme kararlarında değerlendirme sıklığı ile duygu yöneliminin birlikte ele alınması mümkün hale gelmektedir.

Çalışmanın yöntemsel olarak en doğal devamı ise özellik bazlı duygu analizi (Aspect-Based Sentiment Analysis, ABSA) yaklaşımının uygulanmasıdır. ABSA, duygu analizini tüm yorum için tek bir skor üretmek yerine, her bir ürün özelliği için ayrı duygu skorları hesaplamayı amaçlamaktadır. Chris ve arkadaşları (2024), e-ticaret müşteri yorumları üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada ABSA yaklaşımının ürün kalitesi, fiyat, kargo gibi spesifik boyutlara yönelik daha ayrıntılı ve granüler içgörüler sunduğunu; bu sayede ürün iyileştirme, müşteri memnuniyetinin artırılması ve pazarlama optimizasyonu gibi alanlarda daha aksiyon alınabilir sonuçlar üretildiğini vurgulamıştır. Mevcut çalışmada ürün özellikleri zaten tanımlandığı için, ABSA yaklaşımı pratikte sözlük tabanlı yöntemle

aspect yakalanması ve BERT/BERTurk modelleriyle yorum-özellik düzeyinde duygu sınıflandırmasının yapılması şeklinde uygulanabilir. Bu sayede her bir ürün özelliği için pozitif, negatif ve nötr duygu dağılımlarını gösteren, kategori yönetimine doğrudan girdi sağlayan metrikler elde edilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada uygulanan sözlük tabanlı özellik analizi, müşteri yorumlarının kategori yönetimi açısından yorumlanmasında güçlü ve uygulanabilir bir temel sunmaktadır. Bu temelin BERTopic, BERT/BERTurk tabanlı duygu analizi ve özellik bazlı duygu analizi yaklaşımlarıyla desteklenmesi halinde, müşteri algılarının yalnızca hangi özellikler etrafında şekillendiği değil; bu özelliklere yönelik bağlamsal, duygusal ve zamansal değerlendirmeler de analiz edilebilir hale gelecektir. Bu tür bir yöntemsel zenginleştirme, işletmelerin ürün stratejileri, kategori planlaması ve yeni pazar fırsatlarının belirlenmesi süreçlerinde daha derin ve veri temelli içgörüler elde etmesine olanak sağlayacaktır.

Ayrıca veri odaklı pazarlama ve kategori yönetimi yaklaşımlarında müşteri segmentasyonu da önemli rol oynamaktadır. Korkusuz Polat (2024), k-means ve bulanık c-means kümeleme algoritmalarını kullanarak bir süpermarket için müşteri segmentasyonu uygulaması gerçekleştirmiştir; benzer yaklaşımlar, gelecekte müşteri yorumlarının davranışsal özelliklere göre sınıflandırılmasında da kullanılabilir.

Sonuç

Bu çalışmada, e-ticaret platformlarında yer alan kullanıcı yorumları doğal dil işleme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve müşteri değerlendirmelerinin kategori yönetimi kararlarına nasıl bilgi sağlayabileceği incelenmiştir. Çalışma kapsamında, web scraping yöntemiyle elde edilen metinsel müşteri yorumları ön işleme aşamalarından geçirilmiş; ardından sözlük tabanlı özellik (aspect) çıkarımı yaklaşımıyla kullanıcıların ürünleri hangi

performans ve fonksiyonel kriterler üzerinden değerlendirdiği sistematik biçimde ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular, kullanıcı yorumlarının yalnızca genel memnuniyet ifadelerinden ibaret olmadığını; aksine belirli ürün özellikleri etrafında yoğunlaşan değerlendirmeler içerdini göstermektedir. Analiz edilen ürün gruplarında, kullanıcıların satın alma kararlarını etkileyen temel kriterlerin ürünün işlevsel performansı, kullanım deneyimi ve fiyat–performans algısı olduğu belirlenmiştir. Bu durum, müşteri yorumlarının doğru yöntemlerle analiz edilmesi halinde, işletmeler için değerli ve doğrudan uygulanabilir içgörüler sunduğunu ortaya koymaktadır.

Kategori yönetimi açısından değerlendirildiğinde, sözlük tabanlı özellik analizi yaklaşımı; ürün portföyünün yapılandırılması, dijital raf ve filtreleme sistemlerinin tasarlanması, ürün açıklamalarının müşteri diliyle uyumlu hale getirilmesi ve kampanya stratejilerinin belirlenmesi gibi birçok alanda karar destek aracı olarak kullanılabilir niteliktedir. Özellikle kullanıcıların yoğun biçimde değerlendirdiği ürün özelliklerinin belirlenmesi, kategori yöneticilerinin müşteri beklentilerine daha duyarlı ve veri temelli stratejiler geliştirmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada uygulanan sözlük tabanlı özellik analizi, müşteri yorumlarının kategori yönetimi açısından yorumlanmasında güçlü ve uygulanabilir bir temel sunmaktadır. Bununla birlikte, kullanılan yöntemin bağlamsal anlamları ve örtük duygu ifadelerini yakalama konusunda sınırlı olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu doğrultuda, Turkish BERT gibi derin öğrenme tabanlı doğal dil işleme modellerinin bu yapıya entegre edilmesiyle, müşteri algılarının yalnızca hangi ürün özellikleri üzerinden şekillendiği değil, aynı zamanda bu özelliklere yönelik duygusal ve bağlamsal değerlendirmelerin de analiz edilmesi mümkün hale gelecektir.

Bu tür bir yöntemsel genişletme, işletmelerin ürün stratejileri, kategori planlaması ve yeni pazar fırsatlarının belirlenmesi süreçlerinde çok daha derin ve veri temelli içgörüler elde etmesine olanak sağlayacaktır. Sonuç olarak, çevrimiçi müşteri yorumlarının doğal dil işleme teknikleriyle sistematik biçimde analiz edilmesi, işletmelerin müşteri odaklı karar alma süreçlerini güçlendiren ve rekabet avantajı sağlayan stratejik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Demir Ö, Chawai, A.I.B., Doğan, B. 2019. Türkçe Metinlerde Sözlük Tabanlı Yaklaşımla Duygu Analizi Ve Görselleştirme. International Periodical Of Recent Technologies In Applied Engineering, 1(2), 58-66.

Göçgün, Ö. F. & Onan, A. (2021). Amazon Ürün Değerlendirmeleri Üzerinde Derin Öğrenme/Makine Öğrenmesi Tabanlı Duygu Analizi Yapılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (24), 445-448.

Gülmez, K.İ., KorkusuzPolat, T., (2024), "Bir Süpermarkette Müşteri Segmentasyonu Çalışması", 4. Bilsel International World Science and Research Congress, 22-23June, 2024, İstanbul, Türkiye

Kayakuş M, Yiğit Açıkgöz F. Classification of news texts by categories using machine learning methods. Alphanumeric J 2022; 10(2): 155-166.

Kılıçer S, Şamlı R. E-ticaret sitelerindeki Türkçe ürün yorumları üzerine makine öğrenmesi algoritmaları ile duygu analizi Veri Bilimi 2023; 6(2): 15-23

Koruyan, K. (2022). BERTopic Konu Modelleme Tekniği Kullanılarak Müşteri Şikayetlerinin Sınıflandırılması. İzmir Sosyal Bilimler Dergisi, 4(2), 66-79.

Liu, B. (2020). Sentiment Analysis: Mining Opinions, Sentiments, and Emotions. Cambridge University Press.

Olusegun, J., Chris, E., Favor, B., & Ramon, T. (2024). Aspect-based sentiment analysis of customer reviews in e-commerce. ResearchGate.

Teke, B., Yazıcı, S. N., Zamir, G., Budak, A. B., & Karabey Aksakallı, I. (2025). BERTurk-Based Sentiment Analysis on E-

Commerce Multi Domain Product Reviews. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(3), 497–509

Tuzcu, S. (2020). Çevrimiçi Kullanıcı Yorumlarının Duygu Analizi ile Sınıflandırılması. Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi, 1(2), 1-5.

Vatan N.A., KorkusuzPolat T., (2024), "Çevrimiçi iş ilanlarının metin madenciliği ile analizi", Latin America 9th International Conference on Scientific Researches , August 9-11 2024, Mexico City, ISBN NR. : 978-625-6283-58-9

Yasar, O., & KorkusuzPolat, T. (2022). A Fuzzy-Based Application for Marketing 4.0 Brand Perception in the COVID-19 Process. Sustainability, 14(24), 16407.

BÖLÜM 11

YAPAY ZEKA ODAKLI AĞ YÖNETİMİ VE HİZMET DÜZEYİ SÖZLEŞMESİNDE YZ-MODEL BAĞLAM PROTOKOLÜ KARAR DESTEK SİSTEMİ

Emin TARAKÇI¹

Özet

AI destekli ağ yönetimi, telemetri, analitik ve politika motorlarının sıkı Hizmet Seviyesi Anlaşmaları karşılamak için ağ davranışını sürekli olarak optimize ettiği kapalı döngü otomasyonuna doğru hızla gelişmektedir. Ancak, Büyük Dil Modelleri ve çoklu ajan AI düzenleyicileri operasyon destek sistemlerine entegre edildikçe, özellikle model bağlamı değişimi, token işleme, hızlı enjeksiyon ve politika yanlış yapılandırması gibi konularda yeni güvenlik ve yönetim riskleri ortaya çıkmaktadır. Buna paralel olarak, uçtan uca gecikme ve kullanılabilirlik gibi telekomünikasyon SLA (Service Level Agreement) hedefleri, yalnızca doğru değil, aynı zamanda açıklanabilir, denetime hazır ve tasarım açısından güvenli risk kararları gerektirir. Telekomünikasyon ortamları için Fonksiyonel Rezonans Analiz Yöntemi (FRAM) kullanarak sistemik süreç modellemesini, FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) kullanarak hata modu yapılandırmasını ve CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) metodu ağırlıklı VIKOR yöntemi sıralaması yoluyla çok kriterli risk optimizasyonunu birleştirirken, sıfır güven MCP (Model Context Protocol) güvenlik mimarisini (geçişsiz token basımı, ABAC politika uygulaması, oturum/bağlam bağlama, menşe etiketleme ve değiştirilemez denetim günlükleri) uygular. AI odaklı ağ yönetimi ve SLA riski üzerine vaka çalışması, riskler, gecikme ve kullanılabilirliğe odaklanan nicel bir karar matrisi ile sunulmaktadır. Sonuçlar, hesaplanan VIKOR Q-indeksi değerlerini ve MCP ağ geçidi, AI düzenleyici ve risk motoru katmanları genelinde doğrudan hafifletme önlemlerine karşılık gelen yorumlanabilir bir risk önceliklendirmesini içermektedir.

Anahtar kelimeler: AI-MCP, AI Ajanları, Karar Destek Sistemi, Risk Analizi, Bulanık Mantık, 3GPP

¹ Kıdemli Ar-Ge Uzmanı, Türk Telekom, Ar-Ge İş birlikleri, Orcid: 0000-0002-0926-3152

Abstract

AI-driven network management is rapidly evolving toward closed-loop automation, where telemetry, analytics, and policy engines continuously optimize network behavior to meet stringent Service Level Agreements (SLAs). However, as Large Language Models (LLMs) and multi-agent “AI orchestrators” are integrated into operations support systems (OSS), new classes of security and governance risks emerge—especially around model-context exchange, token handling, prompt injection, and policy misconfiguration. In parallel, telecom SLA objectives such as end-to-end latency and availability require risk decisions that are not only accurate but also explainable, audit-ready, and secure by design.

This approach proposes a Secure AI-MCP (Model Context Protocol)-driven Decision Support System (DSS) for telecom environments that unifies systemic process modeling using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM), failure mode structuring using FMEA, and multi-criteria risk optimization via CRITIC-weighted VIKOR method ranking, while enforcing a zero-trust MCP (Model Context Protocol) security architecture (token minting without passthrough, ABAC policy enforcement, session/context binding, provenance tagging, and immutable audit logs). A telecom case study on AI-driven network management & SLA risk is provided with risks and a quantified decision matrix focused on latency and availability. Results include computed VIKOR Q-index values and an interpretable risk prioritization that directly maps to mitigations across the MCP gateway, AI orchestrator, and risk engine layers.

Keywords: AI-MCP, AI Agents, Decision Support System, Risk Analysis, Fuzzy Logic, 3GPP

1. Giriş

Telekomünikasyon ağları, manuel, bilet tabanlı işlemlerden, izleme, analiz, planlama ve yürütmenin hizmet hedeflerini karşılamak için ağ yapılandırmasını sürekli olarak uyardığı, yapay zeka destekli ve yapay zeka odaklı kapalı döngü yönetimine geçmektedir. Modern 5G ve ötesindeki ağlar, giderek daha katı hale gelen SLA'lar ile heterojen hizmetleri (eMBB, URLLC benzeri gereksinimler, kurumsal dilimleme) desteklemeli ve bunu hızla değişen trafik, topoloji ve arıza koşulları altında yapmalıdır. Sıfır dokunuşlu otomasyonun stratejik yönü, uçtan uca orkestrasyon, etki alanları arası güvence ve politika odaklı otomasyonu vurgulayan endüstri ve standardizasyon çabalarına yansımaktadır [1-2].

Aynı zamanda, ortaya çıkan 6G yönelimleri, hizmet olarak yapay zeka ve uç noktalar ile ağ arasında hizmet performansının dinamik olarak müzakere edilmesi/garanti edilmesini öngörmektedir. Örnek gereksinimler arasında, hizmet performansının müzakere edilmesi ve AI çıkarım hizmetleri sunulurken bu performansı garanti altına alacak mekanizmalar açıkça yer almaktadır [1]. Bu gelişme, SLA uyumluluğunu tehlikeye atan operasyonel ve güvenlik risklerini önceliklendirebilen, risk farkındalığına sahip karar destek sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Ancak, Büyük dil modellerinin (LLM) ve çoklu ajan AI bileşenlerinin operasyon destek sistemine entegrasyonu yeni zorluklar getirmektedir [2]:

1. *Güvenli olmayan bağlam değişimi:* Çoklu model iş akışları, AI modülleri ve araçları arasında telemetri, politika ve durumun aktarılmasını gerektirir; kontrolsüz bağlam değişimi, hassas verilerin sızmasına veya bağlam kaçırılmasına neden olabilir.

2. *Hızlı enjeksiyon ve "karışık vekil" davranışları:* LLM'ler, araç kullanımını veya karar mantığını değiştiren özel olarak hazırlanmış girdilerle manipüle edilebilir ve bu da yetkisiz eylemler veya güvenli olmayan operasyonel komutlara yol açabilir.
3. *Token geçişi ve yönetim boşlukları:* Ayrıcalıklı tokenleri veya kapsam dışı kimlik bilgilerini ileten araç konektörleri, güvenliği ihlal edilmiş bir model adımının aşırı ayrıcalıklı eylemler gerçekleştirmesine izin verebilir.
4. *Açıklanabilirlik ve denetim ihtiyaçları:* Karar iş akışları, özellikle AI müşteri deneyimini ve SLA sonuçlarını etkileyen eylemleri tetiklediğinde, izlenebilir gerekçelendirme gerektirir.

Bu boşlukları gidermek için, AI-MCP Karar Destek Sistemi (KDS) önerilmektedir: bağlam değişimini sıfır güven yolu olarak ele alan ve bunu FRAM-FMEA ve CRITIC ağırlıklı VIKOR metotlarına dayalı risk motoruyla birleştiren katmanlı bir mimari sunulmaktadır.

1.1 Amaç ve kapsam

Çalışmanın amacı, aşağıdakileri gerçekleştiren uçtan uca bir yaklaşım sunmaktır. Telekomünikasyon ağ yönetimi süreçlerini ve bağlantılarını FRAM ile modellemek, risk alternatiflerini ve bunların operasyonel etkilerini FMEA ile yapılandırmak, çelişkili kriterler altında risk önceliklendirmesini optimize etmek için CRITIC-VIKOR metotlarını kullanmak ve MCP uyumlu yönetim kontrolleri kullanarak güvenli çoklu ajan düzenlemesini uygulamaktır.

1.2 Katkılar

Katkılar aşağıda sıralanmıştır:

1. Telekomünikasyon güvenlik ağ geçidi için risk kararları, AI düzenleyici/bağlam yöneticisi ve risk motorunu entegre eden güvenli bir AI-MCP Karar Destek Sistemi mimarisi önerilmiştir.
2. Gecikme/kullanılabilirlik bozulması ve yönetim başarısızlıklarına SLA merkezli risk modeli sunulmuştur.
3. Risk önceliklendirme için açık VIKOR Q-indeksi değerleri üreten çok kriterli değerlendirme yapılmıştır.
4. Sıfır güven ilkeleriyle uyumlu denetlenebilirliğe sahip, mimari katmanlara yönelik, kullanıma hazır bir risk azaltma önlemleri eşlemesi sağlanmıştır.

2.Arka Plan ve İlgili Çalışmalar

2.1 AI destekli ağ yönetimi ve sıfır dokunmatik otomasyon

5G ve ötesindeki ağlar için kapalı döngü otomasyonu, çeşitli ve katı QoS/SLA gereksinimlerini karşılamak için temel bir mekanizma olarak konumlandırılmıştır ve genellikle izleme, analiz, planlama ve yürütme için MAPE (Ortalama mutlak yüzde hatası) benzeri döngüler olarak modellenmiştir [3]. Daha geniş kapsamlı sıfır dokunuşlu ağ ve hizmet yönetimi vizyonu, çok satıcılı, çok alanlı ortamlarda uçtan uca otomasyonu vurgulamaktadır [4].

5G ve ötesine yönelik yapay zeka kullanım alanları, otomasyon, alanlar arası yaşam döngüsü yönetimi ve güvenlik unsurlarını merkezi temalar olarak daha da vurgulamaktadır [1]. Standardizasyon ayrıca, AI/ML yeteneklerinin 5G sistem yönetimi ve mimari tartışmalarına giderek daha fazla entegre edildiğini de belirtmektedir [5].

2.2 Sistemik risk modellemesi için FRAM ve FMEA

FRAM, sistem işlevlerinin sosyo-teknik sistemlerdeki değişken bağlantılar aracılığıyla nasıl yankılandığını modeller ve doğrusal olmayan risk yayılma yollarının tanımlanmasını sağlar [6]. FMEA, mühendislik sistemlerinde hata/arıza modlarını, bunların etkilerini ve tespit/azaltma hususlarını belirlemek için yapılandırılmış bir yöntem sunar ve uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Hibrit yaklaşımlar, karmaşık risk zincirlerini analiz etmek ve eylemleri önceliklendirmek için FRAM ve FMEA'yı birleştirmiştir; bulanık mantık ile güçlendirilmiş entegre FRAM-FMEA, karmaşık risk ortamlarında etkili olduğu gösterilmiştir [8].

2.3 Belirsizlik altında çok kriterli karar verme

CRITIC yöntemi, standart sapma ve kriterler arası korelasyon kullanarak kriter ağırlıklarını objektif olarak belirler ve daha fazla bilgi ve daha az yinleme içeren kriterleri vurgular [9]. VIKOR, çelişkili ortamlarda çok kriterli optimizasyon için bir uzlaşma sıralama yöntemidir ve S, R ve Q ölçümleri ile nihai bir uzlaşma çözümü sıralaması üretir [10]. Belirsiz değerlendirmeler için, bulanık küme setleri (Pisagor bulanık kümeleri) üyelik/üyelik olmaması ve belirsizliği daha zengin bir şekilde temsil eder [11-12]. Pisagor bulanık temsilleri, güncel çalışmalarda risk değerlendirmesinin sağlamlığını artırmak için başarıyla kullanılmıştır [8-12].

2.4 LLM tarafından koordine edilen karar iş akışlarındaki güvenlik riskleri

Hızlı enjeksiyon, içeriğe veya bağlama gömülü kötü niyetli talimatlar aracılığıyla LLM davranışını manipüle edebilir ve potansiyel olarak araç çağrılarını veya karar mantığını değiştirebilir [13]. "Kafası karışık yardımcı" sorunu klasik bir çerçeve sunar: ayrıcalıklı bir bileşen, bir saldırgan adına yetkisini kötüye kullanmak için kandırılabilir [14]. Savunma rehberliği, güvenli mimariyi, ayrıcalıkları en aza indirmeyi, belirteçleri izole etmeyi, eylemleri doğrulamayı ve izlemeyi vurgular; sıfır güven mimarisi ilkeleri ve ABAC modelleri, en az ayrıcalık ve bağlam farkında yetkilendirmeyi uygulamak için resmi temeller sağlar [15-16]. OWASP, güvenli dağıtımlara rehberlik etmek için LLM'ye özgü risk sınıflandırmaları yayınlamıştır [17].

2.5 Model Bağlam Protokolü (MCP) ve güvenli bağlam değişimi

MCP, modelden araca ve modelden modele bağlam değişimini yapılandırılmış bir şekilde standartlaştırmayı amaçlayan yeni bir açık spesifikasyondur [18]. MCP, birlikte çalışabilirliği iyileştirirken, güvenliğini otomatik olarak garanti etmez: güvenli bir KDS, MCP akışları etrafında jeton izolasyonu, politika kontrolleri, menşe etiketleme ve denetim günlüğü tutmayı uygulamalıdır.

3. Önerilen Güvenli AI-MCP Karar Destek Sistemi Çerçevesi

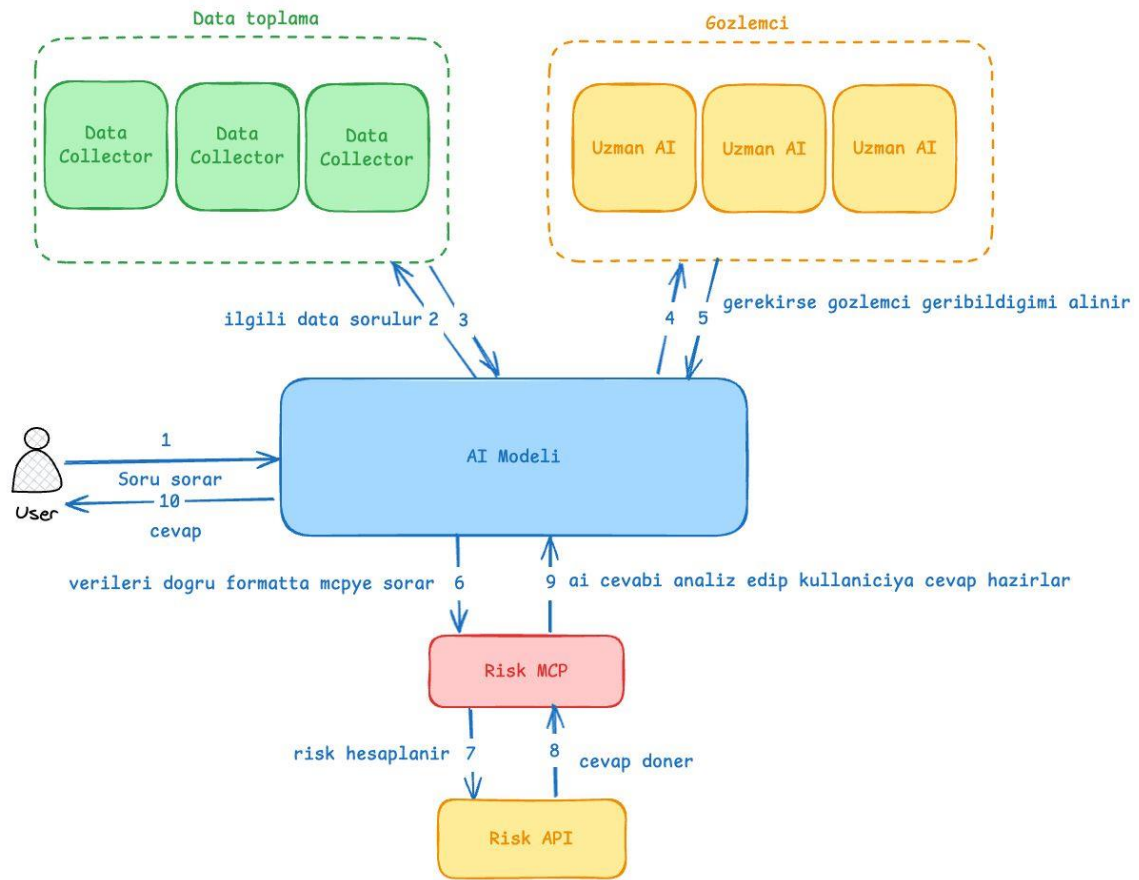
3.1 Genel kavram

Önerilen çerçeve, risk karar verme sürecini güvenli, açıklanabilir bir süreç olarak ele alır:

- **Müşteri/Kullanıcı katmanı**, bağlam (hizmet, dilim, bölge, KPI hedefleri) ile birlikte bir risk sorgusu gönderir. uygulamalar, kapsamlı tokenlar oluşturur, oturumları bağlar ve hassas alanları maskeler.

- **AI Orkestratörü/Bağlam Yöneticisi** istemleri temizler, kaynağı etiketler, isteğe bağlı olarak gözlemci AI'ları salt okunur modda çağırır ve yapılandırılmış bir karar paketi oluşturur.
- **Risk MCP Motoru**, FRAM-FMEA yapılandırması ve CRITIC ağırlıklı VIKOR optimizasyonu gerçekleştirerek sıralı riskler ve Q puanları üretir.
- **Karar ve Açıklanabilirlik katmanı**, insan tarafından okunabilir açıklamalar ve eylem önerileri üretir; Denetim katmanı, değiştirilemez günlükleri ve KPI izlerini depolar.

Şekil 1. Risk karar desteği için uçtan uca AI-MCP iş akışı

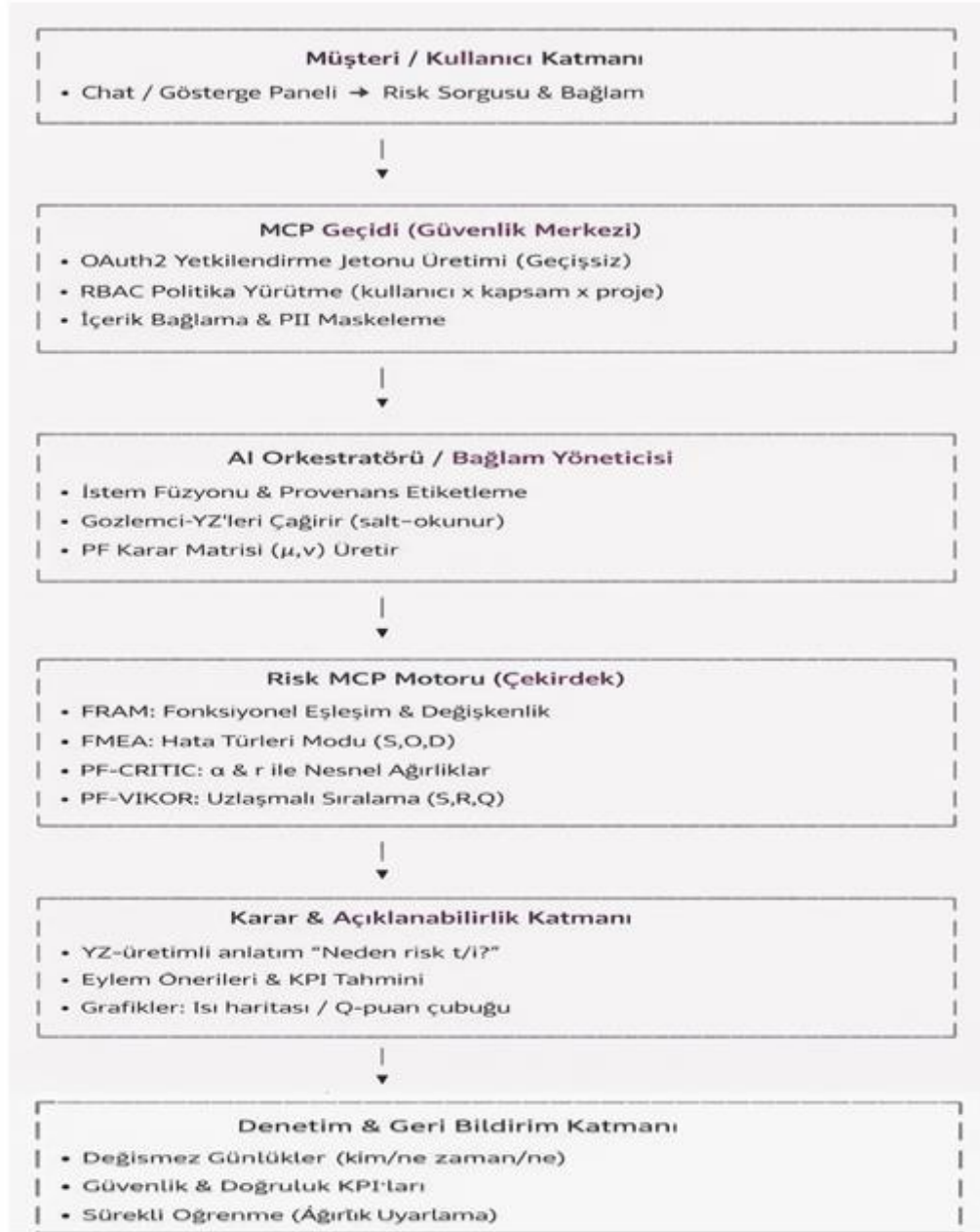


3.2 Önerilen çerçeve akışı:

1. Kullanıcı bir risk/SLA sorusu sorar.
Gerektiğinde, AI modeli, yapılandırılmış uzman sinyalleri elde etmek için salt okunur modda Gözlemci AI'ları (alan uzmanı ajanlar) sorgular.
2. AI modeli, Risk MCP motoruna yapılandırılmış bir risk sorgusu (kriterler, alternatifler, bağlam, kısıtlamalar) oluşturur.
3. Risk MCP, Risk API (veya gömülü hesaplama) aracılığıyla risk hesaplamasını tetikler ve nicel risk ölçümleri üretir.
4. Risk API, hesaplanan sonuçları (puanlar, belirsizlik tahminleri, Q değerleri) döndürür.

5. AI modeli sonuçları analiz eder, açıklamalar ve önerilen eylemler üretir.
6. Kullanıcı, SLA merkezli bir risk yanıtı alır.

Şekil 2. AI-MCP Karar Destek Sistemi için katmanlı güvenli mimari



- **MCP Ağ Geçidi:** Geçişsiz OAuth2 jeton basımı, ABAC politika uygulaması, bağlam bağlama, PII maskeleye yapılır.
- **AI Orchestrator:** istem temizleme, kaynak etiketleme, salt okunur gözlemci çağrılar ve karar matrislerinin oluşturulması sağlanır.

- **Risk Engine:** yapılandırma için FRAM-FMEA; objektif ağırlıklandırma için CRITIC, uzlaşma sıralaması için VIKOR yöntemleri kullanılır.
- **Denetim ve Geri Bildirim:** değiştirilemez günlükler (kim/ne/ne zaman), güvenlik ve doğruluk KPI'ları, ağırlık uyumu için sürekli öğrenme sağlanır.

4. Metodoloji

Bu çalışmada, Yapay zeka destekli telekomünikasyon ağ yönetiminde SLA odaklı risk önceliklendirmesi için AI-MCP tabanlı bir karar destek metodolojisi sunulmaktadır. Metodoloji, uçtan uca operasyon döngüsü boyunca işlevler arası bağlantırlığı ve performans değişkenliğini yakalamak amacıyla FRAM yaklaşımını, risk alternatiflerini hata türleri, nedenler, etkiler, tespit edilebilirlik ve iyileştirme/önlem maliyeti açısından somut ve sistematik biçimde yapılandırmak amacıyla ise FMEA yaklaşımını bütünleşik olarak kullanmaktadır. Bu yapılandırılmış risk temsili üzerine, gecikme ve erişilebilirlik SLA kaygıları altında açıklanabilir ve denetlenebilir bir sıralama üreten iki aşamalı çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı uygulanmaktadır.

Birinci aşamada, CRITIC yöntemi; SLA odaklı değerlendirme kriterleri arasındaki korelasyonu dikkate alarak nesnel kriter ağırlıklarını hesaplamak için kullanılmaktadır. İkinci aşamada ise tanımlanan risk alternatifleri, VIKOR uzlaşma sıralama yöntemi ile önceliklendirilmektedir.

Adım 1: AI odaklı yönetim için FRAM işlevsel modelleme, ağ yönetim sürecini etkileşimli işlevler olarak temsil eder; bir işlevdeki değişkenlik, bağlantılar aracılığıyla yankılanabilir ve SLA bozulmasını artırabilir [19]. Tablo 1, AI odaklı bir SLA güvence döngüsü için minimum FRAM işlev setini sunar.

Tablo 1. Yapay zeka odaklı ağ yönetimi ve SLA güvencesi için FRAM işlev seti

FRAM Fonksiyonu	Girdi	Çıktı	Ön Koşullar	Kaynaklar	Kontrol	Zaman
F1 Telemetri Toplama	Sayaçlar, günlükler, izler	Normalize edilmiş KPI akışı	İzleme etkin	Toplayıcılar, ajanlar	Örnekleme politikası	Gerçek zamana yakın
F2 KPI/SLA Değerlendirmesi	KPI akışı + SLA hedefleri	SLA sapma olayları	SLA tanımları mevcut	KPI motoru	Eşik kuralları	ms-s
F3 Kök-neden Analizi	Olaylar + topoloji	Varsayımlar (nedensel grafik)	Veri bütünlüğü	Analitik/NWDAF	Model politikası	s-dk

F4 Karar Önerisi	Varsayımlar + politikalar	Aday eylemler	Güvenlik kısıtları	Bilgi tabanı	Değişiklik politikası	dk
F5 Değişiklik Uygulama	Aday eylemler	Yapılandırma/durum değişiklikleri	Yetkilendirme	Orkestratör	ABAC + onay	dk
F6 Değişiklik Sonrası Doğrulama	KPI akışı	Etki doğrulama	Kararlı pencere	Gözlemlenebilirlik	Geri alma kuralları	dk
F7 Denetim & Raporlama	Tüm artefaktlar	Kanıt paketi	Günlüklenme etkin	Denetim deposu	Uyum politikası	sürekli

Değişkenlik kaynakları arasında eksik telemetri, veri sapması, gecikmeli olay korelasyonu veya güvenli olmayan AI çıktıları bulunur; bunlar bir sonraki adımda risk alternatiflerine eşlenir.

Adım 2: Risk alternatiflerinin FMEA ile yapılandırılması FMEA, olası hata modlarını (sosyo-teknik, siber-AI riskleri) belirler ve bunları gecikme ve kullanılabilirlik üzerindeki etkilere, ayrıca tespit edilebilirlik ve hafifletme yüküne eşler [8].

Adım 3: Kriterlerin tanımlanması

SLA risklerinin önceliklendirilmesi için beş karar kriteri kullanılır:

- C1 Olasılık: hedef ortamda meydana gelme olasılığı.
- C2 Gecikme etkisi: gerçekleşmesi durumunda E2E gecikme SLA'sında beklenen bozulma.
- C3 Kullanılabilirlik etkisi: gerçekleşmesi durumunda hizmet kullanılabilirliği SLA'sında beklenen bozulma.
- C4 Algılama zorluğu: SLA ihlali öncesinde algılama/tanımlama zorluğu.
- C5 Azaltma maliyeti: etkili kontroller uygulamak için gereken göreceli çaba/maliyet.

Adım 4: CRITIC [9] metodu kullanarak objektif ağırlıklandırma, değişkenlik ve korelasyon kullanarak kriter ağırlıkları hesaplanır. Normalleştirilmiş karar x'_{ij} , kriter standart sapması σ_j ve korelasyon r_{jk} :

$$c_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{jt}) , w_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (\text{Formül 1-2})$$

Bu, öznel önyargıları azaltır ve gereksiz kriterleri optimize eder.

Adım 5: VIKOR [10] metodu kullanarak sıralamada uzlaşma

f_{ij} Kriter (j) üzerinde alternatif (i) performansını temsil etsin. Maliyet kriterleri için;

$$f_j^* = \min_i f_{ij}, \text{ worst } f_j^- = \max_i f_{ij}.$$

Tanım

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \frac{f_{ij} - f_j^*}{f_j^- - f_j^*}, \quad R_i = \max_j \left(w_j \frac{f_{ij} - f_j^*}{f_j^- - f_j^*} \right)$$

(Formül 3-4)

VIKOR Q-indeksi

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}$$

(Formül 5-6)

$S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^* = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$, ve v değerleri karar stratejisini ifade eder ($v=0,5$).

Adım 6: AI-MCP akışında güvenlik uygulaması

Güvenlik, geçerli karar desteği için bir ön koşul olarak ele alınır:

- Sıfır güven bağlamı değişimi (ihlal olduğunu varsay; her adımı doğrula) [20].
- Geçişsiz token basımı: her konektör kapsamlı tokenler alır; tokenler aşağı akış ajanlarına iletilmez.
- Konu/kaynak/eylem/kapsam için ABAC politika uygulaması [16].
- Menşe etiketleme: her bağlam ögesi menşe ve güven düzeyi ile etiketlenir [21].
- Değiştirilemez denetim günlükleri: kim/ne/ne zaman + uyumluluk için karar artefaktları [2].
- Hızlı enjeksiyon savunmaları: girdi temizleme, araç çağırma izin listeleri, çıktı doğrulama [2-4].
- Karışık vekil önleme: en az ayrıcalık + açık yetkilendirme sınırları [2-4].

5. Vaka Çalışması

Telekomünikasyon operatörleri, bir dizi hizmet (kurumsal dilimleme, gerçek zamanlı uygulamalar) için gecikme ve kullanılabilirlik SLA'larını korumak amacıyla AI destekli bir ağ yönetimi iş akışı kullanır. Sistem, çok kaynaklı telemetriyi güvenli bir şekilde kullanmalı ve yetkilendirildiğinde operasyonel eylemleri (politika güncellemeleri, yeniden yönlendirmeler, işlevlerin ölçeklendirilmesi) önermeli veya gerçekleştirmelidir.

Gelecekteki 6G yönelimleri, AI çıkarım hizmetleri sağlarken gecikme gibi hizmet performansının müzakeresini ve garantisini açıkça dikkate almakta [1] ve SLA'ya duyarlı kontrolün merkezi hale geldiğini pekiştirmektedir.

Tablo 2. Yapay Zeka Odaklı Ağ Yönetimi ve SLA Güvencesi için Risk Kayıtları.

Risk ID	Risk (Hata Türü)	Tipik Neden / Saldırı Vektörü	Birincil SLA Etkisi	İkincil Etkiler	Tipik Kontrol Noktaları
R1	Dolaylı prompt enjeksiyonu ile güvensiz operasyonel kararlar alınması	Modelin işlediği biletlerde, bilgi tabanı makalelerinde, günlüklerde veya telemetri alanlarında gömülü kötü niyetli talimatlar [10,12]	Gecikme ↑ / Erişilebilirlik ↓	Yetkisiz araç çağrıları; güvensiz yapılandırma önerileri	Prompt temizleme, araç izin listeleri, köken doğrulama kontrolleri
R2	Token/kişisel veri sızıntısı veya aşırı yetkili bağlayıcı erişimi	Token geçişi, geniş erişim kapsamı, zayıf oturum bağlama; veri sızdırma	Erişilebilirlik ↓ (olay sınırlama), Gecikme ↑ (önleme eylemleri)	Uyumluluk ihlali; otomasyonun zorla kapatılması	Token üretimi (geçiş yok), ABAC, KVK (PII) maskeleyme [8]
R3	Uydurma çözüm eylemi nedeniyle SLA bozulması	Modelin mantıklı görünen ancak hatalı eylemler üretmesi; zayıf güvenlik önlemleri	Gecikme ↑ (yanlış yönlendirme, sınırlama)	Zincirleme kesintiler; kullanıcı kaybı	İnsan onay mekanizması; eylem doğrulama; geri alma süreçleri
R4	Telemetri kayması / veri kalitesi hatası risk motorunu yanıltıyor	Eksik sayaçlar, örnekleme yanlışlığı, veri kayması; zayıf korelasyon	Erişilebilirlik ↓ / Gecikme ↑	Geç algılama; yanlış önceliklendirme	Veri doğrulama, kayma tespiti, yedeklilik
R5	ABAC/politika yanlış yapılandırması ile “karışık vekil” (confused deputy) davranışları	Hatalı kapsamlanmış politikalar; ayrıcalık yükseltme; belirsiz yetki sınırları [11]	Erişilebilirlik ↓ (yetkisiz değişiklikler), Gecikme ↑ (kararsızlık)	Denetim hatası; sistematik güvenlik açığı	ABAC hassasiyeti, politika testi, en az ayrıcalık ilkesi [8,11]

5.1 Vaka Sonuçları

CRITIC ağırlıklı VIKOR kullanılarak SLA merkezli risk önceliklendirmesi ($v = 0,5$) yapılmıştır.

Tablo 3. Karar matrisi (Maliyet türü kriterleri)

Risk	C1 Olasılık	C2 Gecikme Etkisi	C3 Erişilebilirlik Etkisi	C4 Tespit Zorluğu	C5 Önleme Maliyeti
R1 Prompt enjeksiyonu	6	8	7	8	6
R2 Token/PII sızıntısı	5	6	8	9	7
R3 Uydurma eylem	7	9	5	6	5
R4 Telemetri kayması	8	6	6	7	4
R5 ABAC yanlış yapılandırma	4	7	9	8	8

Olasılık (C1): Riskin gerçekleşme ihtimali

Gecikme Etkisi (C2): SLA üzerindeki gecikme yükü

Erişilebilirlik Etkisi (C3): Sistem erişiminde yaratacağı olumsuzluk

Tespit Zorluğu (C4): Riskin fark edilmesinin zorluk derecesi

Önleme Maliyeti (C5): Riski azaltmak için gereken kaynak/maliyet

Kriter ağırlıkları (normalleştirilmiş matris varyansı + korelasyondan) Formül 1-2 ‘deki denklemler ile bilgisayar yazılımı [22] üzerinden hesaplanmıştır.

$w(C1) = 0.309$, $w(C2) = 0.251$, $w(C3) = 0.163$, $w(C4) = 0.140$, $w(C5) = 0.137$.

Tablo 4. VIKOR ölçümleri ve Q-indeksi

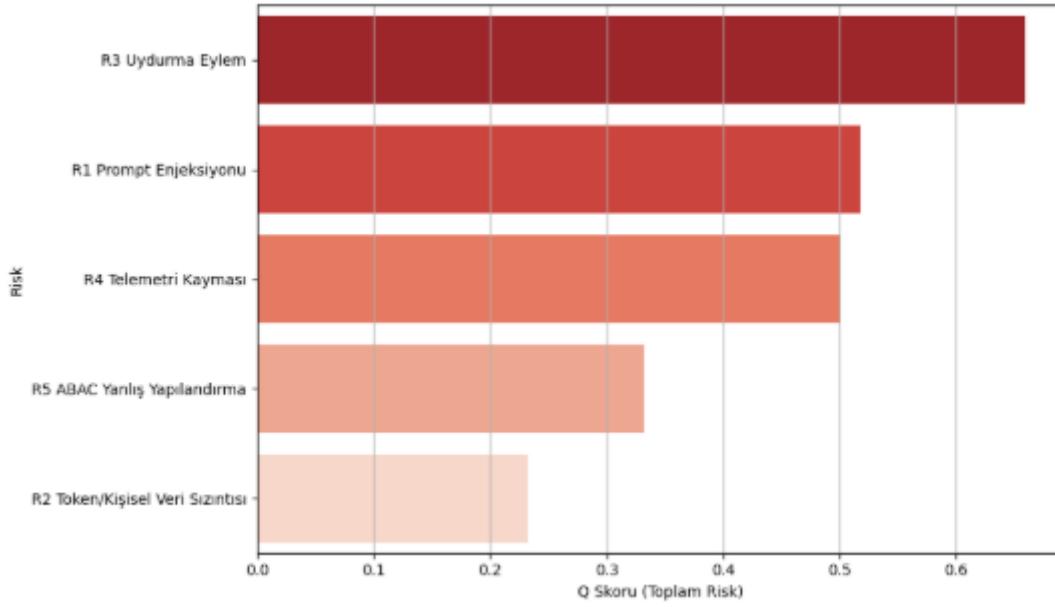
Riskler	S	R	Q
R2 Token/Kişisel Veri Sızıntısı	0.481	0.163	0.232
R5 ABAC Yanlış Yapılandırma	0.420	0.251	0.332
R4 Telemetri Kayması	0.514	0.309	0.500

R1 Prompt Enjeksiyonu	0.599	0.309	0.518
------------------------------	-------	-------	--------------

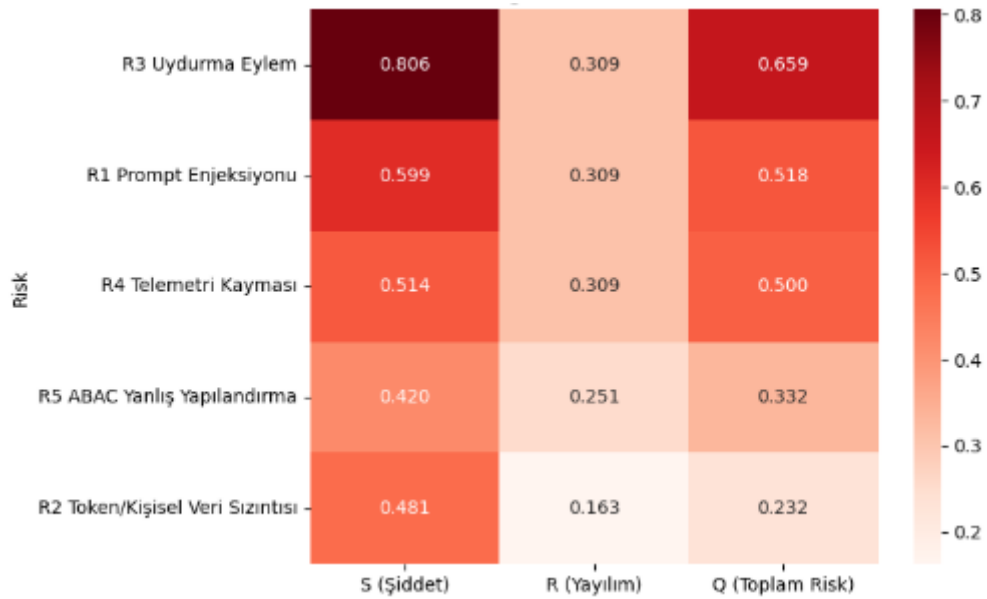
R3 Uydurma Eylem	0.806	0.309	0.659
-------------------------	-------	-------	--------------

Daha düşük Q değeri, uzlaşma stratejisi kapsamında daha yüksek öncelik anlamına gelir.

Şekil.3 Q skoruna göre risk önceliklendirmesi



Şekil.4 Risk Isı Haritası



6. Tartışma

Tablo 4 ve Şekil 3'teki sonuçlar, token/PII sızıntısı ve aşırı ayrıcalıklı bağlayıcı erişiminin R2 en öncelikli risk olduğunu göstermektedir ($Q=0,232$). Bu sonuç, Şekil 2'deki güvenlik mimarisiyle tutarlıdır. Bu mimaride, MCP ağ geçidi, geçiş yapmadan token basımı, ABAC uygulaması ve PII maskeleyme işlemlerinden sorumludur. Bu kontroller, R2'nin olasılığını ve patlama yarıçapını doğrudan azaltır. Telekom operasyonlarında, bir konektörün güvenliği ihlal edildiğinde genellikle sınırlama prosedürleri (otomasyonun devre dışı bırakılması, erişimin kısıtlanması) devreye girer ve bu da dolaylı olarak kullanılabilirliği düşürebilir ve gecikmeli düzeltme nedeniyle gecikmeyi artırabilir; bu nedenle R2, SLA riskinin baskın etkeni olmaya devam eder.

İkinci sırada yer alan R5 riski (ABAC yanlış yapılandırması; $Q=0,332$), klasik karışık vekil çerçevesine [2-4] uygundur. AI düzenleyicisi ile araç yürütücüleri arasındaki yetki sınırları belirsizse, düzenleyici istemeden saldırgan veya hatalı bağlam adına ayrıcalıklı eylemler gerçekleştirebilir. Bu nedenle, ABAC politika mühendisliği ve testi, NIST ABAC kılavuzu [16] ve sıfır güven ilkeleri [15] ile tutarlı olarak birinci sınıf bir operasyonel gereklilik haline gelir. Şekil 2'de, politika uygulaması bağlam risk motoruna ulaşmadan önce gerçekleşir ve yalnızca yetkili eylemlerin önerilebilmesini/yürütülebilmesini sağlar.

Telemetri sapması (R4; $Q=0,500$) ve hızlı enjeksiyon (R1; $Q=0,518$) "orta katmanı" oluşturur ve önemli bir sosyo-teknik içgörü sunar: güçlü güvenlik olsa bile, veri temeli istikrarsızsa karar kalitesi çökebilir. Şekil 1'de, adımlar veri toplama ve AI analizi veri bütünlüğüne ve kaynağına duyarlıdır. Sapma algılama ve kaynak etiketleme olmadan, AI düzenleyicisi kısmi veya önyargılı sinyalleri amplifiye edebilir ve yanlış önceliklendirme yoluyla SLA ihlallerini artırabilir. Hızlı enjeksiyon, "veri" ve "talimatlar" arasındaki sınırı istismar ettiği için kritik öneme sahiptir; hafifletici önlemler, LLM güvenlik taksonomileriyle [17] tutarlı olarak sıkı bağlam etiketleme, temizleme, izin verilen araç kullanımı ve doğrulama kontrollerini içermelidir.

Son olarak, halüsinasyonu düzeltme eylemleri (R3; $Q=0,659$) veri setinde son sırada yer almaktadır, ancak bu düşük ciddiyet olarak yanlış yorumlanmamalıdır. Bunun yerine, bu durum, algılama ve yönetim kapıları mevcut olduğunda (insan onayı, geri alma), beklenen SLA zararı azaltılabileceğini gösterir. Tamamen otonom döngüler hedefleyen dağıtımlarda, R3 keskin bir şekilde artabilir; bu nedenle, Tablo 2'de önerilen kontroller yüksek otomasyonlu ortamlar için zorunlu olarak değerlendirilmelidir.

Çok kriterli karar verme ve karmaşık risk ortamlarında etkili olduğu kanıtlanmış bütünleşik FRAM-FMEA ile entegre bulanık mantık yöntemi [8] MCP uyumlu bir karar destek sistemi sağlar. Çalışmada, risk farkındalığına sahip orkestrasyonun vazgeçilmez hale geldiği, ağ genelinde AI hizmet performansını müzakere eden ve garanti eden gelecekteki sistemlerin yönelimi ile de uyumludur.

Tablo 5. AI-MCP Karar Destek Sistemi katmanlarına eşlenen kontrollörler

Katman	Azaltılan Birincil Riskler	Zorunlu Kontrollörler	Kanıt / Denetim Artefaktları
MCP Geçidi (Güvenlik Merkezi)	R2, R5	Token üretimi (geçişsiz), ABAC uygulanması, oturum bağlama, kişisel veri (PII) maskeleyme	Politika günlükleri, token kapsamaları, erişim kararları
AI Orkestratör / Bağlam Yöneticisi	R1, R3, R4	Prompt temizleme, köken etiketleme, salt-okunur gözlemci çağrılar, araç izin listeleri, çıktı doğrulama	Köken grafiği, araç çağrı izleri, doğrulama raporları
Risk MCP Motoru (Çekirdek)	R4, riskler arası	FRAM-FMEA yapısı, CRITIC ağırlıkları, VIKOR Q skorları, duyarlılık analizi	Karar matrisleri, ağırlık vektörleri, Q skoru geçmişi
Karar & Açıklanabilirlik	Tümü	Tablo 2/3/4 ve Şekil 3 ile bağlantılı okunabilir mantık ve gerekçeler	Açıklama şablonları, “neden” anlatıları
Denetim & Geri Bildirim	Tümü	Değiştirilemez günlükler, KPI kayma izleme, ağırlıkların sürekli öğrenilmesi	Kim/ne zaman/neyi yaptı günlükleri, KPI panoları

7. Sonuç

SLA baskısı altında AI odaklı telekomünikasyon ağ yönetimini desteklemek için, gecikme ve kullanılabilirlik risklerini açıkça hedefleyen AI-MCP Karar Destek Sistemi önerilmiştir. Bu yaklaşım, sistemik süreç anlayışı (FRAM), yapılandırılmış hata/arıza modelleme (FMEA), objektif ağırlıklandırma (CRITIC) ve uzlaşma sıralaması (VIKOR) yöntemlerini, sıfır güven ve ABAC yönetişimi ile uyumlu bir güvenlik odaklı tasarım mimarisinde birleştirir.

Vaka çalışması, VIKOR Q-indeksi değerleri (Tablo 4, Şekil 3) ve beş riskin açıklanabilir ve denetlenebilir bir şekilde önceliklendirilmesini sağlamıştır. Sonuçlar, AI orkestrasyonu uygulandığında token yönetişimi ve politika doğruluğunun SLA riskini domine ettiğini vurgulamakta ve güvenli bağlam değişimi ile en az ayrıcalığın güvenilir AI destekli operasyonlar için ön koşul olduğunu pekiştirmektedir.

Gelecekteki çalışmalar, veri setleri artırılarak, operatör telemetrisine genişletmeli, uzman belirsizliği için bulanık mantık değerlendirmeleri uygulamalı ve ağırlıkların gelişen arıza modlarına ve tehdit ortamlarına uyum sağlaması için çevrimiçi öğrenmeyi entegre etmelidir.

Referanslar

[1] 3GPP. (2025). *Potential new requirements to support AI service performance negotiation and guarantee for 6G AI services*. Retrieved from <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=4374>

- [2] National Institute of Standards and Technology. (2023). *AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0)*. <https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1>
- [3] 3GPP. (2025). *Release 20*. Retrieved from <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-20>
- [4] 3GPP. (2025). *System Architecture and Services*. Retrieved from <https://www.3gpp.org/3gpp-groups/service-system-aspects-sa/sa-wg2>
- [5] 3GPP. (n.d.). *TR 23.700-80: Study on 5G system support for AI/ML-based services*. Retrieved from <https://www.3gpp.org/dynareport/23700-80.htm>
- [6] Hollnagel, E. (2012). *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method – Modelling Complex Socio-Technical Systems*. <https://doi.org/10.1201/9781315255071>
- [7] Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. ASQ Quality Press.
- [8] Can, E., Ayvaz, B., & Tarakci, E. (2025). Integrated FRAM-FMEA based on PF-CRITIC and PF-WASPAS for Pandemic Disaster Risk Assessment. *Contemporary Mathematics*, 6(5). <https://doi.org/10.37256/cm.6520257406>
- [9] Haktanır, E., & Kahraman, C. (2022). A novel picture fuzzy CRITIC & REGIME methodology: Wearable health technology application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104942>
- [10] Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- [11] Yager, R. R., & Abbasov, A. M. (2013). Pythagorean membership grades, complex numbers, and decision making. *International Journal of Intelligent Systems*, 28(5), 436–452. <https://doi.org/10.1002/int.21584>
- [12] Yager, R. R. (2016). Properties and applications of Pythagorean fuzzy sets. In *Imprecision and Uncertainty in Information Representation and Processing* (pp. 119–136). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23513-5_8
- [13] ITP. (2025). *NCSC issues urgent warning over growing AI prompt injection risks*. Retrieved from <https://www.itpro.com/security/ncsc-issues-urgent-warning-over-growing-ai-prompt-injection-risks-heres-what-you-need-to-know>
- [14] Hardy, N. (1988). The confused deputy (classic formulation). *ACM SIGOPS Operating Systems Review*. <https://doi.org/10.1145/54289.871709>
- [15] National Institute of Standards and Technology. (2020). *SP 800-207: Zero Trust Architecture*. Retrieved from <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/207/final>
- [16] National Institute of Standards and Technology. (2014). *SP 800-162: Guide to Attribute Based Access Control (ABAC) Definition and Considerations*. Retrieved from <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/162/final>
- [17] OWASP. (n.d.). *Top 10 for Large Language Model Applications*. Retrieved from <https://owasp.org/www-project-top-10-for-large-language-model-applications/>
- [18] Model Context Protocol. (n.d.). *MCP Specification (Official Repository)*. Retrieved from <https://github.com/modelcontextprotocol>

- [19] Boutaba, R., Shahriar, N., Salahuddin, M. A., et al. (2021). AI-driven closed-loop automation in 5G and beyond mobile networks. *ACM FlexNets*. <https://doi.org/10.1145/3472735.3474458>
- [20] Liyanage, M., Pham, Q.-V., Dev, K., et al. (2022). A survey on Zero touch network and Service Management (ZSM) for 5G and beyond networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 203, 103362. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103362>
- [21] OpenAI. (n.d.). *Agents SDK Documentation – MCP*. Retrieved from <https://openai.github.io/openai-agents-python/mcp/>
- [22] JetBrains. (2023). *PyCharm Community Edition (Version 2023.1.1)* [Bilgisayar yazılımı].

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*