
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ DEĞERLENDİRMELERİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Yunus EROĞLU

yaz
yayınları

Endüstri Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Yunus EROĞLU

yaz
yayınları

2025

Endüstri Mühendisliği Değerlendirmeleri

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Yunus EROğLU

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-82-7

Ekim 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

A Comparative Analysis of Traditional and Smart Storage Systems	1
<i>Sinan ÖZTAŞ</i>	
Yönetim Sistemi Olgunluğu İle Süreç Performansı İlişkisi: Mühendislik Perspektifi.....	22
<i>Yasemin DİLBER</i>	
Hedef Programlama Yöntemi İle Etkin Şirket İçi Proje Lideri Ataması	41
<i>Nisanur KÖLEOĞLU, Yunus EROĞLU</i>	
Neuroergonomics and Mental Workload: A Bibliometric Analysis With a Bert Topic Modeling	61
<i>Nazmiye ELİGÜZEL</i>	
Zihinsel İş Yüğü Ölçümünün Önemi ve Nasa-Tlx Yöntemi.....	81
<i>Özge MUCUK, Bahar ÖZYÖRÜK</i>	
Artificial Intelligence Transforming Energy Systems: a Conceptual and Interdisciplinary Perspective	91
<i>Kübra Nur ŞAHİN</i>	
From Graph Measures to Explainable Summaries	106
<i>Sena AYDOĞAN, Fatma ŞENER FİDAN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

A COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND SMART STORAGE SYSTEMS

Sinan ÖZTAŞ¹

1. INTRODUCTION

The rise of globalization, digitalization, and e-commerce has made logistics and storage processes one of the strategic focal points of the business world. The increasing variety of products, shorter delivery times, and the transformation of customer expectations are driving companies to seek faster, more reliable, and more traceable storage solutions. In this context, the manual and limited operational structures offered by traditional storage systems are proving inadequate in the highly competitive market conditions; they are being replaced by smart systems equipped with high technology.

Traditional warehouse systems have formed the backbone of logistics operations for many years. These systems, operated with processes such as forklifts, fixed shelving structures, manual inventory counting, and paper-based order management, have provided convenience to businesses with low investment costs and simple organizational structures. However, these structures have high error rates, low data accuracy, and high labor dependency. Especially in high-volume order processes, time losses and lack of traceability lead to serious inefficiencies.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, sinanoztas@atauni.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9630-6586.

Smart warehouse systems, on the other hand, digitalize and automate warehouse operations thanks to the technological capabilities offered by Industry 4. 0. Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS), autonomous vehicles (AGV/UGV), IoT-based sensors, RFID systems, and AI-supported decision algorithms enable inventory tracking, order preparation, and shipping processes to be carried out more quickly and accurately with less human intervention. This transformation not only provides operational efficiency but also significant gains in data-driven decision-making, sustainability, and customer satisfaction.

The aim of this study is to compare traditional and smart storage systems in various dimensions, analyze the sectoral impacts of technology integrations, and reveal the strategic outcomes of transformation in the logistics field. Prepared in light of academic sources and sectoral applications, this article comprehensively addresses the performance criteria, risks, and future trends that businesses should consider when transforming their warehouse systems.

This transformation process is not limited to large-scale enterprises but also directly affects small and medium-sized enterprises (SMEs). SMEs that want to maintain their competitive advantage face various challenges in the process of adapting to the flexibility, speed, and data-driven management capabilities offered by smart systems. At this point, infrastructure investments, digital literacy, human resource training, and financial incentives play a critical role. In this study, the position of SMEs in the digitalization process is also addressed, and recommendations are developed for businesses of different scales (Genç & Tunalı, 2022).

2. CLASSIFICATION OF TRADITIONAL STORAGE SYSTEMS

Traditional storage systems have formed the foundation of the logistics sector for many years. These systems are operational structures developed entirely based on physical infrastructure and human resources without relying on technology. In these systems, where warehouse organization is determined by physical structure, product type, and transaction frequency, manual control is essential. Here are the main types of these systems:

2.1. Fixed Shelf Storage Systems

Fixed shelving systems are a traditional method where specific products are stored in fixed positions on shelves. Generally manufactured from steel or aluminum materials, the shelves are positioned at specific heights according to their load capacity. These systems are suitable for storing both boxed and palletized products.

Fixed shelves allow for the categorization of products and easy accessibility within the warehouse. However, since shelf spacing and arrangements are predetermined, flexibility is limited in structures with a wide variety of products. While forklifts or ladders are required for high shelves, in the case of small-diameter products, the shelves can turn into wasted spaces. Additionally, stock accuracy is generally dependent on visual inspection and manual records (Adıgüzel, 2022).

2.2. Block Stacking Storage System

Block stacking systems are methods where durable and homogeneous palletized products are stored directly on the floor, stacked on top of each other. In this structure, shelves are not used. Pallets are stacked in blocks, and the height limit

varies according to the type of product, its weight, and stacking safety.

In this system, space utilization is quite efficient because the gaps between the shelves are minimized. However, since the system operates on a LIFO (Last In First Out) basis, it is difficult to manage the products according to their priority order. Additionally, to access the bottom row pallet, the pallets above it need to be removed, which leads to time loss and potential product damage. This system is suitable for short-term storage, but it is limited in terms of inventory tracking and traceability.

2.3. Drive-In / Drive-Through Rack Systems

In these systems, forklifts enter the shelves to place or retrieve products. Drive-in systems allow for one-way access, while drive-through systems allow for two-way access. Shelves are supported on rails and a large number of pallets can be stacked on top of each other along the height.

This structure provides high-density storage. However, since forklift operators need to maneuver in the inner shelves, the risks to occupational safety increase. At the same time, since individual access to products is not possible, selectivity decreases. It is preferred in high-volume warehouse operations with limited product variety. The installation and maintenance of the system are more costly compared to fixed shelving systems.

2.4. Multi-Tier Racking Systems (Mezzanine Systems)

Mezzanine systems are based on the principle of creating extra floors by utilizing the height of the existing warehouse space. In these systems, second or third floors are built on steel structures, and access to these floors is provided by stairs or

freight elevators. The floors are usually equipped with light-duty racks.

This system is ideal for businesses that want to increase warehouse capacity but do not have the option for horizontal expansion. It also allows for physical separation between product categories. However, its high installation cost and structure that requires attention in terms of occupational safety can be considered disadvantages. Inter-floor material transfer can be time-consuming, which can extend the processing time.

2.5. Open Area Storage

Open area storage is used for storing products that are not affected by weather conditions or are only minimally affected in an open field. It is particularly preferred for storing materials such as pipes, concrete blocks, and steel profiles in the construction sector.

In this system, the investment cost is extremely low. However, security, product control, and traceability are quite limited. Products are exposed to natural conditions such as rain, sun, and wind. Additionally, the likelihood of product loss and confusion is high. Therefore, open area storage is generally used for supportive or temporary solutions.

2.6. Sequential Order Picking Systems

Sequential order picking systems are based on the sequential collection of products from the shelves within the warehouse. In this system, the operator manually collects the products from the shelves along a designated route with the help of a picking cart.

Thanks to the simplicity of the structure, it is efficient for low-volume orders. However, it falls short in systems with large and high-volume order flows. When the picking route is not optimized, the staff makes unnecessary walks, leading to a waste

of time and energy. Incorrect picking and product mix-ups can also frequently occur.

2.7. Manual Inventory Tracking and Document Management

In traditional storage systems, inventory tracking is mostly done manually. Excel spreadsheets, printed forms, and ledger entries are used in this process. This structure is low-cost and does not require technology investment.

However, data accuracy is entirely dependent on staff attention. Incorrect entries, stock discrepancies, and order mistakes occur frequently. Additionally, manual document management complicates audit processes and incurs document archiving costs. In the transition to digital transformation, these systems are generally considered the starting point (Sarı, Özveri & Şenyay, 2019).

2.8. Systems Based on Forklifts and Handling Equipment

Forklifts and other handling equipment are an indispensable part of traditional warehouse operations. Especially during the transportation, placement, and shipment of palletized products, forklifts are used effectively. Additionally, pallet jacks, stackers, and crane systems also support manual operations.

For these pieces of equipment to operate efficiently, a wide maneuvering area is required. Additionally, operator training and safety measures are of critical importance. High energy consumption and maintenance costs are disadvantages. However, these operator-controlled systems can form the basis of hybrid structures before transitioning to automation.

2.9. Shelf Layout According to FIFO and LIFO

Applications In warehouse organization, it is of great importance to arrange products according to their entry-exit sequence. In the FIFO (First-In-First-Out) system, products are arranged according to the principle of first in, first out, while in the LIFO (Last-In-First-Out) structure, the last product to enter is the first to exit.

While the FIFO structure is applied to perishable products such as food and pharmaceuticals, the LIFO system can be used for long-lasting products like building materials and chemicals. In traditional systems, the control of these structures is entirely dependent on the operators. While drive-through or rack systems are required for FIFO, block-stacked systems are more suitable for LIFO.

2.10. Low Cost – Low Technology Strategy

Traditional storage systems are mostly preferred due to their low cost and simple operational requirements. Especially for small and medium-sized enterprises, solutions based on human resources come to the forefront instead of technology investments.

Although this strategy provides an advantage initially, it falls short in terms of sustainability, efficiency, and competitiveness in the long run. Error rates, poor traceability, and limited analytical capacity are the main drawbacks of these systems. Therefore, as the first step of digitalization, it is recommended that these systems be gradually supported by automation and data management solutions.

The comparison of traditional storage strategies is presented below in Table 1 (Aylak & Oral, 2021).

Table 1. Comparison of Traditional Storage Systems

System Type	Basic Feature	Advantage	DisAdvantagee
Fixed Shelf System	Fixed rack arrangement, manual access	Low cost, easy installation	Low space efficiency
Block Stacked System	Palletized products, ground-level stacking	Intensive space utilization	LIFO structure, poor access
Drive-In/Drive-Through	Forklift enters the rack	High-density storage	Risk of accidents, poor selectivity
Multi-Tier Rack System	Vertical space utilization with a multi-tiered structure	Provides space efficiency	High installation cost
Open Area Storage	Outdoor, without infrastructure	Minimum investment	No data tracking
Sequential Order Picking	The order route is followed manually.	Suitable for low-volume operations	Inefficient, waste of time
Manual Inventory Tracking	Inventory with Paper/Excel	Does not require investment	High error risk
Forklift/Handling	Manually operated handling equipment	Widespread and simple use	Training needs, maintenance cost
FIFO/LIFO	Hand-controlled handling equipment	Product age control is ensured.	Limited flexibility
Low-Cost Storage	No investment in technology	Ease of application	Low efficiency

3. CLASSIFICATION OF SMART STORAGE SYSTEMS

IndustryWith the development of Industry 4. 0, digital technologies have also led to significant changes in the storage sector. Smart storage systems offer high speed, accuracy, flexibility, and efficiency through the integrated operation of automation, data analytics, artificial intelligence, sensor technologies, and autonomous vehicles. These systems are not only areas where stocks are stored but also centers of data-driven decision support mechanisms. Below, smart storage systems are classified under seven main categories, each explained in detail:

3.1. Automated Storage and Retrieval Systems

(AS/RS)AS/RS systems (Automated Storage and Retrieval Systems) are structures that enable the fast and accurate placement and retrieval of products in high-rack warehouse areas using automatic cranes, conveyors, and lifting systems. These systems are managed by central software and can perform stock placement, retrieval, and guidance operations without human intervention.

AS/RS systems are generally preferred in high-volume and high-speed warehouse operations. The system design can be customized according to the warehouse size and product variety. Additionally, these systems provide up to 80% efficiency in space utilization, effectively optimizing both horizontal and vertical areas. Despite being high-cost, it accelerates the return on investment in the long term due to the time savings and minimal error rate it provides.

3.2. Autonomous Mobile Robots

(AMR) and Shuttle SystemsAutonomous mobile robots (AMR) can move within a warehouse without the need for any

physical pathways, thanks to their advanced sensors and mapping systems. Shuttle systems, on the other hand, are systems that operate at shelf levels and perform fast and precise transportation. These two systems are generally used together or separately in order picking, transportation, and product placement operations.

AMR systems can work safely alongside humans in the same environment. In this respect, it offers flexible working environments. Shuttle systems enable fast processing on high shelves. Both systems reduce labor dependency, increase order picking speed, and provide operational ease during peak order periods, especially in e-commerce companies. These systems can also continuously optimize order routes with real-time routing algorithms.

3.3. RFID and IoT-Based Inventory Management

RFID (Radio Frequency Identification) is a system that transmits the identity of products to readers through chips placed on the products. This system enables the complete traceability of product movements within the warehouse. With the Internet of Things (IoT), RFID technology has strengthened to not only report the product's location but also environmental variables such as temperature and humidity.

This infrastructure allows businesses to exceed 99% inventory accuracy. At the same time, the tracking of products during the placement and retrieval process also facilitates inspection and quality control processes. It is widely used in sectors where traceability is critical, such as food, pharmaceuticals, and textiles. Thanks to this system, human error is minimized, and inventory costs and shipping delays are significantly reduced (Karabacak & Aras, 2017).

3.4. Artificial Intelligence Supported Decision Support Systems

Artificial intelligence algorithms facilitate strategic decision-making in warehouse operations through big data analytics. It can forecast demand from historical sales data, create the most suitable layout plans based on density analyses, and optimize order picking processes with routing algorithms. Additionally, it helps make more accurate decisions over time using machine learning techniques.

Decision support systems provide real-time data to warehouse managers to answer questions such as which order should be processed first, which product should be placed in which area, and which route is more efficient. These systems can optimize energy consumption, predict maintenance needs, and prevent bottlenecks. Especially in large-scale and high-volume warehouses, decision support systems have become the key to operational success.

3.5. Digital Twin-Based Warehouses

Digital twin technology is the creation of a virtual copy of a physical system that is synchronized with real-time data. When applied in warehouses, all in-warehouse processes can be simulated in a virtual environment. In this way, the operational impact of a change or system failure can be anticipated in advance.

With digital twin technology, managers can restructure warehouse design, identify bottleneck points, conduct capacity planning, and test different scenarios. This technology accelerates decision-making processes by conducting more accurate risk analyses, especially in systems that require high investment. Additionally, real-time data allows for instant performance tracking.

3.6. Swarm Robot Systems

Swarm robotics is a system developed by drawing inspiration from flocking behaviors in nature, enabling multiple robots to work in a coordinated manner without central control. In this system, each robot independently performs simple tasks while communicating with other robots to complete the overall task in the warehouse collaboratively.

Swarm systems stand out for their flexibility and resilience against failures. In the event of a robot malfunction, the task is automatically transferred to other robots. These systems significantly reduce processing time by distributing tasks in parallel during warehouse operations with high transaction volumes. They are particularly preferred in the e-commerce and fast-moving consumer goods (FMCG) sectors (Talih & Dönmez, 2024).

3.7. Integrated ERP-WMS Systems

The integration of enterprise resource planning (ERP) systems with warehouse management systems (WMS) enables the centralization of the entire logistics process. ERP systems manage orders, invoices, production, and supply chain management; WMS, on the other hand, controls in-warehouse stock movements. The integration of these two systems significantly increases corporate efficiency.

Thanks to this integration, products become traceable from order to delivery. Additionally, errors are reduced and inventory costs are optimized through automatic data transfer. Thanks to real-time data analyses, sales forecasts can be made, critical stock levels can be identified, and supply chain planning becomes dynamic. ERP-WMS integration forms the digital backbone of smart warehouses.

In Table 2 presented below, the features of smart storage systems are compared.

Table 2. Comparison of smart storage systems

<i>System Type</i>	Core Technology	Key Advantages	Application Areas
AS/RS	Mechanical Automation	High density, fast processing	Industrial production, e-commerce
AMR / Shuttle	Autonomous Robotics	Flexibility, low error rate, speed	E-commerce, distribution centers
RFID / IoT Inventory Tracking	Sensor / Automatic Monitoring	Real-time traceability	Food, pharmaceutical, textile sectors
Artificial Intelligence Systems	Predictive Analytics	Demand forecasting, route optimization	Large-scale enterprises
Digital Twin-Based System	Virtual Simulation + IoT	Simulation, analysis, risk mitigation	Smart factories
Swarm Robotics	Multi-Robot Coordination	Fault-tolerant, parallel task execution	E-commerce warehouse automation
ERP/WMS Integration	Software-Based Planning	Process integration, decision support	All sectors

4. COMPARISON OF TRADITIONAL AND SMART STORAGE SYSTEMS

Storage systems can be classified within the framework of various parameters such as technological infrastructure level, operational capability, investment requirement, flexibility, data management, and dependence on human resources. Traditional

and smart storage systems are distinctly differentiated from each other in terms of these parameters, and each offers advantages or disadvantages for specific operational conditions (Genç & Tunalı, 2022; Kamali, 2019). In this section, these two types of systems have been classified in detail according to different criteria and analyzed comparatively.

4.1. Classification According to Technological Infrastructure

Traditional storage systems primarily involve processes based on manual labor. The tools used in these systems are forklifts, shelves, paper forms, and manual data entry methods. Inventory tracking is carried out through manual counts, and order processing is often dependent on the staff's experience (Sarı, Özveri & Şenyay, 2019).

However, in smart storage systems, technological infrastructure is the determining factor. RFID tags, IoT sensors, autonomous robots, artificial intelligence algorithms, and integrated software platforms (ERP, WMS) are among the key components (Van Geest, Tekinerdogan & Catal, 2021). These systems provide a high level of automation and data-driven operations. A large portion of the processes is driven by software, and errors are minimized.

4.2. Classification Based on Labor Dependency in Traditional Systems, The Role of the Workforce Is Critical

Product placement, order picking, inventory tracking, and shipping operations are mostly carried out manually. This situation leads to personnel errors, physical fatigue, and loss of efficiency. Additionally, employee turnover directly affects the system's operation (Kamali, 2019).

In smart warehouses, human intervention has been significantly reduced. Robots carry products, sensors detect stock changes, and software determines routes and order sequences. The workforce is more involved in tasks such as supervision, system maintenance, and handling exceptional situations. Thus, the system becomes more stable and scalable (Azadeh, De Koster & Roy, 2017).

4.3. Classification By Investment Cost Traditional Systems Generally Require Low Initial Investment.

Warehouse operations can be initiated with simple shelving systems, handling equipment, and limited digital infrastructure. However, the efficiency of these systems is low, and as they grow, disproportionate cost increases occur.

Although smart systems require a high initial investment, they offer lower operating costs in the long run. Thanks to factors such as the reduction in labor needs, the elimination of losses caused by errors, and process optimization, the return on investment is shortened. Therefore, it is a more sustainable option for high-volume operations (Lee, 2018).

4.4. Classification by Flexibility and Scalability

Due to the fixed structure of traditional systems, their operational flexibility is limited. When the product range changes, the shelf layout, routes, or process steps must be redesigned. Additionally, adapting to sudden increases in business volume is difficult.

Smart systems, being software-based, are more easily scalable. When order volume increases, new robots can be added, and the system can automatically adapt to new regulations by updating the algorithms. Especially in sectors with fluctuating volumes like e-commerce, this flexibility

provides a significant advantage (Van Geest, Tekinerdogan & Catal, 2021).

4.5. Classification According to Data Management and Traceability

In traditional systems, data management is done manually. This leads to delays, erroneous records, and difficulties in analysis. Real-time monitoring is almost impossible, and inventory accuracy is generally low.

In smart warehouses, all processes are digitally monitored through sensors and software. Stock level, product location, processing time, and performance data can be analyzed in real-time. This situation both increases the speed of operational decisions and creates a data-driven infrastructure for strategic planning (Oğuz & Ağtaş, 2024).

4.6. Classification According to Risk Management and Business Continuity

In traditional systems, situations such as employee shortages, system failures, and document loss can directly halt operations. Business continuity is often disrupted by crises. Additionally, the risks to job safety are higher.

In smart systems, redundant designs are made for business continuity. In systems like swarm robot technology, even if one robot malfunctions, the others can continue their tasks. Additionally, system failures can be quickly addressed through remote monitoring and intervention. Thanks to preventive maintenance algorithms, the risks of interruptions are minimized (De Koster, 2018). In the following Table 3, a comparison of traditional and smart storage systems is presented.

Table 3. Comparison of traditional and smart storage systems

Criteria	Traditional Systems	Smart Systems
Technological Infrastructure	Low, manual systems	High, RFID, IoT, Artificial Intelligence, Robotics
Labor Dependency	High, based on physical labor	Low, automation-oriented
Initial Investment Cost	Low	High
Long-Term Efficiency	Low, increasing errors and slowness	High, continuous improvement and optimization
Flexibility and Scalability	Limited	High, adaptable via software updates
Data Management	Manual, limited	Digital, real-time
Traceability	Limited, paper forms	Full, real-time system tracking
Business Continuity	High-risk, labor dependent	Secure, high preventive system and fault tolerance

Thanks to this classification, businesses can more consciously determine the storage system that suits their own needs and resource structures. It should be noted that both systems have their own unique advantages and limitations. The correct system choice should be shaped by the scale of the operation, product diversity, order frequency, and future growth expectations.

5. CONCLUSION

In this study, traditional and smart storage systems have been comprehensively compared from structural, technological, operational, and strategic perspectives. It has been observed that traditional systems, with their low investment cost, simple

installation structure, and operation based on manual labor, still offer an attractive solution for many small and medium-sized enterprises. However, the high error rate, low traceability level, and inflexible structure of these systems pose significant limitations in the face of increasing customer expectations and speed requirements.

On the other hand, smart storage systems stand out as systems where digital technologies, automation, and AI-supported decision-making processes are used in an integrated manner. These systems not only enhance operational efficiency but also improve the strategic management capabilities of businesses. Thanks to modern components such as RFID, IoT, AS/RS, AMR, digital twin, and ERP-WMS integration, it is possible to transition to a data-driven structure while minimizing workforce dependency.

Comparative classification results reveal that choosing the right system is a critical decision based on business scale, product type, business volume, and digital transformation goals. Especially for businesses with high order volumes, the long-term return on investment of smart systems is much stronger. Traditional systems, on the other hand, still remain valid for operations with lower volumes and standard product structures.

Additionally, this study emphasizes that the parameters affecting system selection (investment cost, flexibility, data management, labor dependency, etc.) should be evaluated in a multidimensional manner. Businesses need to make decisions not only based on today's operational needs but also considering future growth potentials and competitive conditions. In this regard, the transition to smart systems is not only a technological transformation but also brings about a change in corporate strategy and culture.

As a result, in today's logistics world where digitalization and data-driven management approaches are at the forefront, smart storage systems have become an essential requirement for businesses to remain competitive. However, the transition process should be carefully planned and carried out gradually and strategically, taking into account the existing infrastructure, personnel competence, and resources of the business. In the future, it is expected that the more widespread use of AI-supported autonomous systems, solutions based on energy efficiency, and sustainable warehouse management will come to the forefront.

KAYNAKLAR

- Adıgüzel, S. (2022). Afet durumlarında yapay zekâ teknolojisi ile lojistik yönetimi örnekleri. *Akademik İz düşün Dergisi*, 7(1), 47-70.
- Aylak, B. L. & Oral, O. (2021). Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin lojistik sektöründe kullanımı. *El-Cezeri*, 8(1), 74-93.
- Azadeh, K., De Koster, R. & Roy, D. (2017). Robotized warehouse systems: Developments and research opportunities. ERIM report series research in management Erasmus *Research Institute of Management*, (ERS-2017-009-LIS).
- De Koster, R. (2018). Automated and robotic warehouses: Developments and research opportunities. *Logistics and Transport*, 38(2), 33-40.
- Genç, E. & Tunalı, İ. (2022). Endüstri 4. 0 Ve Lojistik 4. 0 Kapsamında Akıllı Depo Sistemleri. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 9(4), 194-215.
- Kamali, A. (2019). Smart warehouse vs. traditional warehouse. *CiiT International Journal of Automation and Autonomous System*, 11(1), 9-16.
- Karabacak, N. & Aras, N. (2017). KOBİ'lerin Malzeme Aktarma ve Depolama Sistemlerine Yönelik Endüstri 4. 0 uygulamalarında karşılaşılan güçlükler ve çözüm önerileri. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 17(2), 39-45.
- Lee, C. K. (2018). Development of an industrial Internet of Things (IIoT) based smart robotic warehouse management system.

- Oğuz, G. & Ağaş, E. (2024). Kurumsal Kaynak Planlanama (Erp) Sistemlerinde Yapay Zekâ Kullanımı. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(2), 345-360.
- Sarı, E. B., Özveri, O. & Şenyay, U. E. (2019). Endüstri 4. 0'ın iş süreçleri yönetimine etkisi: akıllı depolama sistemi uygulaması. *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, 2(2), 466-477.
- Talih, Ö. & Dönmez, E. (2024). Tedarik Zincirine Genel Bakış: Akıllı Tedarik Zincirinde Risk ve Güvenlik. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 836-854.
- Van Geest, M., Tekinerdogan, B. & Catal, C. (2021). Smart warehouses: Rationale, challenges and solution directions. *Applied sciences*, 12(1), 219.

YÖNETİM SİSTEMİ OLGUNLUĞU İLE SÜREÇ PERFORMANSI İLİŞKİSİ: MÜHENDİSLİK PERSPEKTİFİ

Yasemin DİLBER¹

1. GİRİŞ

Günümüz iş ortamında kalite kavramı, sadece rekabet avantajı elde etmek için değil, aynı zamanda sürdürülebilir başarı elde etmek için de bir gereklilik haline gelmiştir. Küreselleşme, pazarların küresel ölçekte genişlemesi, ulusal sınırların aşılması, tek bir küresel pazarın ortaya çıkması ve dünya çapında sosyal etkileşimlerin yoğunlaşması ile karakterizedir. Sonuç olarak, kapitalist sistemde var olan rekabet yoğunlaştı. Sektör sınırları bulanıklaştı ve müşteri talepleri giderek daha seçici hale geldi. Bu yeni küresel yapı, değişimi işletmeler için stratejik bir tercihten bir zorunluluğa dönüştürdü.

Küreselleşmeye bağlı olarak üretimde standardizasyonun yükselmesi ile ürün bazlı rekabetin önemi azalırken, sunulan hizmetlerin bütünlüğü ve kalitesi ön plana çıkmıştır. Talep gücünün üreticilerden tüketicilere geçtiği bu ortamda, rekabet artık fiyat üzerinden değil, müşteri memnuniyeti ve algılanan değer ile şekilleniyor. Bu nedenle, rekabetçi pazarlarda hayatta kalabilmek ve başarılı olmak için işletmeler, ürün ve hizmetlerini yüksek kalite, hız ve müşteri odaklı bir yaklaşımla teslim etmek zorundadır.

Müşteri odaklı bir yaklaşım, yöneticilerin geleneksel değer zinciri zihniyetini tersine çevirmesini ve müşteri

¹ Öğr. Gör., Selçuk Üniversitesi, Huğlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, yasemin.dilber@selcuk.edu.tr, ORCID: 0009-0004-0055-0966.

beklentilerini merkeze yerleştiren stratejiler geliştirmesini gerektirir. Kalıcı başarı arayan şirketler, müşteri beklentilerini karşılamalı ve yüksek düzeyde memnuniyet sağlamalıdır. Memnuniyet, sırayla, zaman içinde güçlü bir kurumsal imaja dönüşen müşteri sadakatine yol açar. Güçlü bir imaj, şirketlere rekabetin yüksek olduğu ortamlarda stratejik avantajlar sağlar. Ayrıca müşteri memnuniyeti, hedef kitle ile duygusal bir bağ kurma yeteneğini de geliştirir. Pazarda sürdürülebilir başarıyı hedefleyen şirketler, mevcut müşterilerini elde tutmayı temel bir strateji olarak önceliklendirmelidir.

Bu bağlamda, kalite sadece stratejik bir avantaj değil, aynı zamanda çağdaş iş dünyasında rekabet için temel bir ön koşul haline gelmiştir. Son yıllarda, kaliteyi iyileştirme çabalarının artması, birçok işletmenin geleneksel yönetim yaklaşımlarını terk etmesine ve kalite ve müşteri odaklı yönetim sistemlerini benimsemesine yol açmıştır. Günümüzde rekabet gücünün birincil belirleyicisi, müşteri taleplerini karşılayabilme ve müşteri memnuniyetini sağlayabilme yeteneğidir.

Bu bölümde, farklı sektörlerde faaliyet gösteren işletmelerde yönetim sistemi olgunluğu ile süreç performansı arasındaki ilişkinin mühendislik bakışıyla sınanmasına odaklanır. Özellikle kalite yönetim sisteminin süreç temelli yapısı ile dokümantasyon hiyerarşi yapısı ve üretim süreç yeteneğine (ör. Cpk), istatistiksel yaklaşım çıktıları üzerindeki etkileri incelenir.

2. SÜREÇ YÖNETİMİ

Süreç, bir hedefe ulaşmak veya bir görevi yerine getirmek için insan, makine ve malzeme gibi kaynakları işleyen, değer katan ve müşteri taleplerini karşılayan çıktılar üreten bir dizi operasyondur. Süreç, kuruluşun kalite politikasına ve stratejik yönüne göre istenen sonuçları elde etmek için

süreçlerin sistematik olarak tanımlanmasını, yönetilmesini ve etkileşimini içerir. Süreç, tanımlanabilir, ölçülebilir, tekrarlanabilir, kontrol edilebilir, katma değerli ve geri döndürülebilir olma özelliklerine sahiptir.

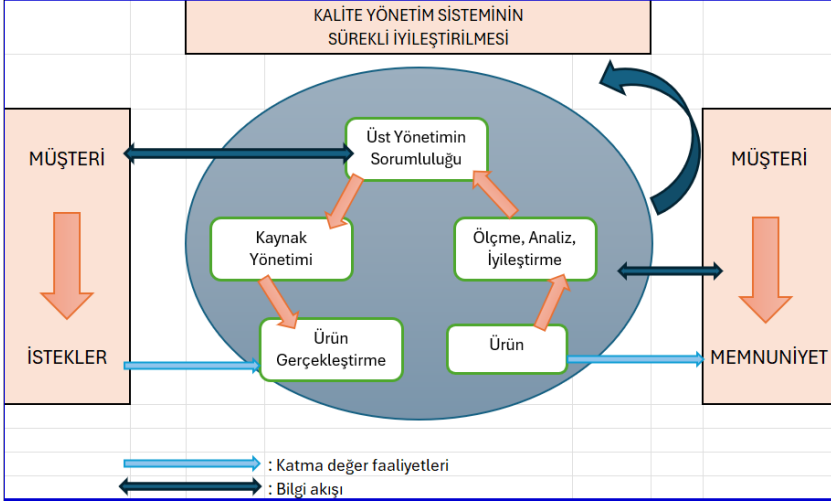
Süreç yönetimi, girdileri çıktılara dönüştüren sistematik faaliyetler zincirinin verimli ve etkin bir şekilde kontrol edilmesini ifade eder (Evans ve Lindsay, 2020; Oakland, 2014). Süreç yönetimi, organizasyon içinde tanımlanan iş süreçlerinin sistematik olarak planlanması, izlenmesi, analiz edilmesi ve iyileştirilmesidir. Bu kavram, süreçlerle yönetim yaklaşımının temel bir bileşeni olarak kabul edilir. Süreçlerle yönetim, tüm yönetim faaliyetlerinin geleneksel fonksiyonel yönetim anlayışının dışına çıkılarak süreç odaklı bir yapı içerisinde yürütülmesi anlamına gelmektedir. Süreç yönetiminin temel amaçları arasında kaliteli ürün üretimi, doğru miktarda ve zamanında teslimat, düşük maliyetle üretim gibi parametreler yer almaktadır. Bu parametrelerin sağlanması müşteri memnuniyetinin artmasına doğrudan katkı sağlar.

Günümüz iş ortamında yöneticiler, müşteri beklentilerini karşılamak ve sürdürülebilir müşteri memnuniyetini sağlamak için Kalite Yönetim Sistemlerinin (KYS) etkin bir şekilde uygulanmasına, sürekli iyileştirilmesine ve performansın artırılmasına giderek daha fazla odaklanmaktadır. Bu bağlamda yöneticiler, kalite ile ilgili süreçleri daha sistematik ve bütüncül bir şekilde ele almak için süreç yaklaşımını benimsemektedir.

2.1. Süreç Yaklaşımı

Süreç yaklaşımı, birbiriyle ilişkili faaliyetlerin girdilerden çıktılara dönüştürülmesi için sistematik bir yapı kurulmasının yanı sıra süreçler arasındaki etkileşimlerin anlaşılması ve yönetilmesine dayanır. Kalite yönetimi bağlamında bu yaklaşım, her bir sürecin çıktısının bir sonraki için girdi görevi gördüğü ve müşteri ihtiyaçlarına göre

şekillenen bir süreçler zinciri oluşturan bir yapıyı temsil eder. Bu, süreçler arasında uyum sağlar ve kalite hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırarak kalite kontrol ve sürekli iyileştirme ortamı yaratır.



Şekil 1. Süreç Bazlı "Kalite Yönetim Sistemi" Modeli

Şekil 1'de etkili bir süreç haritası gösterilmektedir. Bu süreç haritası sadece teknik yeterlilik ile değil, aynı zamanda organizasyonun iş yapış şekli ve yapısal modeli ile de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, verimli ve etkin bir süreç haritalaması ancak iyi yapılandırılmış bir organizasyon modeli ve sürekli gelişime açık bir süreç anlayışı ile mümkündür. Süreç yönetimi genel olarak fonksiyonel yönetim ve süreç bazlı yönetim olmak üzere iki temel biçimde sınıflandırılır.

2.1.1. Fonksiyonel Yönetim

Fonksiyonel yönetim anlayışında organizasyon yapısı geleneksel hiyerarşik düzene göre şekillenir ve iş bölümü esasına dayanır. Bu yönetim biçimindeki temel kavramlar hiyerarşi ve iş bölümüdür. Çalışanlar belirli fonksiyonlara (örneğin üretim, pazarlama, muhasebe vb.) göre özelleştirilir ve

sorumluluk alanları açıkça tanımlanır. Bu yapı, çalışanlardan ne beklendiğini açıkça ortaya koyar ve organizasyon yapısının anlaşılmasını, yönetilmesini ve kontrol edilmesini kolaylaştırır.

2.1.2. Süreç Bazlı Yönetim

Süreç bazlı yönetimi kapsamında, etkili bir süreç akış şemasının oluşturulabilmesi için belirli adımların sistematik bir şekilde takip edilmesi gerekir. Bu bağlamda, Şekil 15'te gösterilen adımlar, süreçlerin tanımlanması, analiz edilmesi, iyileştirilmesi ve kontrol edilmesi açısından temel yol haritasını oluşturmaktadır. Süreçlerin modellenmesinde izlenen etkileşimde olan matrisler Tablo 1'de gösterilmiştir. Süreç akış diyagramlarının oluşturulması sürecinde bu birimler takip edilerek, süreçlerin daha anlaşılır, izlenebilir ve yönetilebilir olmasını sağlar. İşlemlerin sırasını ve ilişkilerini göstermek için diyagramlar çizilir. Bu şemalar çizilirken semboller kullanılır. Karar noktalarında hangi kriterlerin, standartların ve normların olduğu belirtilir.

2.2. Süreç Sınıflandırılması

İşlevsel bir yapının avantajları arasında görev tanımlarının belirginliği, uzmanlaşmanın sağladığı verimlilik ve rollerin belirginliği yer alırken, süreçler arası geçişlerin zor olması ve departmanlar arası koordinasyon eksikliği gibi dezavantajları da vardır. Süreçler yapılarına, seviyelerine ve özelliklerine göre üç şekilde sınıflandırılır.

Yapılarına göre: İş/temel süreç ve destek süreci. İş/Temel süreçler, kuruluşun misyonu (varoluş nedeni) ile doğrudan ilişkili olan, dış müşterilerden gelen talep üzerine başlayan ve bir ürün veya hizmetin dış müşteriye sunulmasını sağlayan süreçlerdir. Örnekler arasında temel üretim süreçleri yer alır. Destek süreçleri, işletmeyi/temel süreci destekleyen, performansını etkileyen ve kaynakların optimum kullanımını

sağlayan şirket içi faaliyetlere yönelik süreçlerdir. Örnekler, çalışan seçme ve yerleştirme alt süreçlerini içerir.

Seviyelerine göre: Üst süreçler, organizasyonun aynı kapsamındaki süreçleri entegre eden süreçlerdir. Üst süreçler, tüm değer zincirini kapsayan şirketler arası süreçler olabilir. Örnek: İnsan kaynakları yönetimi süreci. Alt süreçler, süreçleri oluşturan ve bir departman içinde başlayıp biten süreçlerdir. Örnek: Kişisel gelişim alt süreci. Süreçler, iki veya daha fazla departmanın faaliyetlerini kapsayan, üst süreçleri oluşturan ve birbirleri ile etkileşim halinde olan süreçlerdir. Örnek: Üretim planlama süreci.

Özelliklerine göre: Anahtar süreçler, kuruluşun politika ve stratejilerinin uygulanması için belirlenen stratejik amaç ve hedefleri gerçekleştirecek üst süreçler olan anahtar süreçler olarak adlandırılır. Kritik süreçler, kuruluşun kritik başarı faktörleri üzerinde yüksek etkiye sahip olan ve yüksek düzeyde iyileştirilmesi gereken süreçlerdir. Anahtar olmayan bir işlem de kritik bir süreç olabilir.

2.3. Kalite Yönetim Sistemi

Kalite yönetim sistemi işletmenin standartlara uygun bir sistem kurmasını belgeler, uygular ve sürekliliğini sağlayan birimdir. Buna ek olarak, sistemin etkinliğini sürekli olarak iyileştirmeyi ve tüm KYS gereksinimlerinin organizasyon genelinde tam olarak karşılanmasını sağlamayı taahhüt eden birimdir.

Tablo 1'de Kalite Yönetim Sistemi'nin zorunlu kıldığı süreçlerin temel gereklilikleri, bu süreçlerin iç uygulamaları ve aralarındaki etkileşimler detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 1. Süreç Etkileşim Matrisi

Süreç	Alt Süreçler	Etkileşimli Süreçler
Satış	Satış, Müşteri Memnuniyeti, Müşteri İlişkileri	Tedarik, Üretim ve Planlama, Depo ve Sevkiyat
Planlama	Planlama	Satış, Üretim, Tedarik
Tedarik	Satınalma, Alt Yüklenici Değerlendirmesi	Satış, Üretim, Depo
Üretim	Standart Üretim, Özel Parça Üretimi, Dış Kaynaklı Süreçler	Planlama, Satınalma, Kalite Kontrol, Makine Bakımı, Depo ve Sevkiyat
Kalite kontrol	Kalite kontrol	Üretim, Makine Bakımı, Kalibrasyon
Depolama ve Sevkiyat	Sevkiyat Deposu	Üretim, Planlama, Satış
Muhasebe	Faturalama	Satış, Tedarik
İnsan Kaynakları	Personel Yönetimi, Eğitim ve Yetkinlik Değerlendirme	Tüm Birimler
Makine Bakımı	Kalibrasyon, Makine Bakımı	Üretim, Satınalma, İnsan Kaynakları
Kalite Yönetimi	Doküman Kontrolü, İç Denetimler, Müşteri Şikayetleri, Müşteri İlişkileri	Tüm Birimler
Yönetim İncelemesi (MRM)	Girişleri ve Çıktıları İnceleyin	Tüm Birimler

İşletme, kalite yönetim gerekliliklerine uygun bir dokümantasyon yapısı kurmalıdır ve bu yapıyı etkin bir şekilde uygulamalıdır. Dokümantasyonun hiyerarşik yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Dokümantasyon Hiyerarşi Yapısı

Şekil 2’de verilen doküman hiyerarşi yapısına göre, dokümanların uygunluğunda şu hususlar dikkate alınmaktadır:

- Nitelikler açısından onay verilmesi,
- Gözden geçirilmiş, güncellenmiş ve yeniden onaylanmış,
- Değişiklik ve revizyonların takibi,
- Yürürlükte olan revizyonların ilgili birimlerde bulunması,
- Dış kaynaklı dokümanların tanımlanması, dağıtımların kontrolü,
- Güncelliğini yitirmiş belgelerin kullanımının önüne geçilmesi,

2.4. Kalite El Kitabı

İşletmede, standarda uygun olarak dokümante edilmiş kalite yönetim prosedürleri oluşturur ve etkin bir şekilde uygulamaktadır. Bu dokümante edilmiş Kalite Yönetim Sistemi (KYS), sadece müşteri gereksinimlerinin karşılanmasını ve müşteri memnuniyetinin sağlanmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda şirketin kalite politikasının ve kalite hedeflerinin sistematik olarak uygulanmasını da sağlar. Bu nedenle KYS, kuruluşun kaliteye olan bağlılığını ve bu yöndeki uygulamalarını açıkça gösteren bütüncül bir yapıyı temsil eder.

Kalite El Kitabı, kalite yönetim sistemi kapsamında kabul kriterlerini net bir şekilde tanımlamış ve anlaşılır hale getirmiştir. Bu kriterlere uygunluğun sağlanması amacı ile standardın gerekliliklerine uygun kalite kayıtları oluşturulmuş ve sistematik bir şekilde uygulanmaktadır. Bu kayıtlar hem kalite performansının izlenmesini hem de süreçlerin doğrulanabilirliğini sağlar.

Kalite Yönetim Standardı gereklilikleri doğrultusunda oluşturulan dokümanlar ve bu dokümanların hazırlanması, gözden geçirilmesi, onaylanması ve dağıtılması süreçleri "Doküman Kontrol Prosedürü" kapsamında tanımlanmıştır. Kalite El Kitabı'nda yer almayan detaylara ilişkin açıklamalar, ilgili prosedürlere, talimatlara veya ek dokümanlara başvuru olarak yönlendirilir. Bu sayede belgelendirme yapısı içerisinde bütünlük, izlenebilirlik ve erişilebilirlik sağlanmış olmaktadır.

Kalite kayıtlarının yönetimi, standart kapsamında izlenebilirliği ve doğrulanabilirliği sağlamak için sistematik olarak yapılmaktadır. Kayıtların ilgili birimlerde saklanma süresi, arşivde saklanma süresi, sorumlu personel ve ilgili birimlere dağıtımını gibi hususlar ilgili bölüm sorumlusu tarafından belirlenir. Tanımlanan bu periyot ve sorumluluklara uygun olarak kalite kayıtları düzenli olarak tutulmakta, bu sayede kayıt yönetimi sürecinde tutarlılık ve erişilebilirlik sağlanmaktadır.

2.5. Yönetim Sorumluluğu

Şirket yöneticileri, Kalite Yönetim Sistemi'nin (KYS) etkin bir şekilde kurulması, sürdürülmesi ve sürekli iyileştirilmesi için gerekli kaynakların sağlanmasını sağlar. Yeni ürün geliştirme, mevcut ürün ve süreçlerin iyileştirilmesi, personel performansının artırılması, üretim kapasitesinin ve ürün çeşitliliğinin artırılması, müşteri talep ve beklentilerinin karşılanması, mevzuat ve yasal gerekliliklerin yerine getirilmesi gibi temel faktörler doğrultusunda kaynak ihtiyacı belirlenmektedir. Yöneticiler, bu ihtiyaçların önemini tüm çalışanlara net bir şekilde aktararak kalite bilincinin kurumsal düzeyde benimsenmesini sağlarlar. Bu çerçevede kalite politikası ve kalite hedefleri oluşturulmaktadır. Bu amaçların gerçekleştirilmesi için gerekli kaynaklar sağlanmakta ve yönetimin gözden geçirme toplantıları ile sistemin etkinliği düzenli olarak değerlendirilmektedir.

Kuruluşun üst yönetimi, müşteri istek, beklenti ve memnuniyet düzeylerinin karşılanması gerektiğini kalite politikasında açıkça belirtmektedir. Müşteri şikayetleri başta olmak üzere müşteri geri bildirimleri, değerlendirilmek üzere Yönetim Gözden Geçirme (MR) toplantılarında sistematik olarak toplanır ve tartışılır. Bu toplantılar sayesinde müşteri odaklı yaklaşımın etkinliği gözden geçirilmekte ve gerekli iyileştirme kararları alınmaktadır.

Kalite politikası kuruluş yöneticisi tarafından belirlenir ve eğitimler ve bilinçlendirme toplantıları ile tüm çalışanlara iletilir. Politika, değişen koşullara veya ihtiyaçlara bağlı olarak Yönetim Gözden Geçirme (YGG) toplantılarında değerlendirilir ve gerektiğinde güncellenir.

Kalite hedefleri, kalite politikası doğrultusunda ölçülebilir, izlenebilir ve süreç bazında oluşturulur. Bu hedefler yıllık planlama çerçevesinde her yılın ilk ayında belirlenir ve üst yönetim tarafından onaylanır. Yöneticiler, kalite yönetim sisteminin gerekliliklerini karşılamak ve belirlenen kalite hedeflerine ulaşmak için sistematik bir planlama süreci yürütürler. Planlanan faaliyetlerin etkin bir şekilde uygulanabilmesi için aksiyonlar, sorumlu taraflar ve son teslim tarihleri detaylandırılarak bir veri analiz tablosu oluşturulur. Ayrıca, hedeflerin gerçekleşme seviyeleri bir kıyaslama tablosu aracılığıyla takip edilmekte ve bu veriler YGG toplantılarında düzenli olarak değerlendirilerek sürekli iyileştirme sürecine katkı sağlanmaktadır.

Yöneticiler belirli aralıklarla düzenli olarak iç iletişim kurarlar. Bu kapsamda, duyuru panoları, iç yazışmalar ve şirket içi bilgi sistemleri (örn. intranet) aktif olarak kullanılmaktadır. Günlük operasyonel iletişim telefon, e-posta ve bilgisayar ağı üzerinden gerçekleştirilir. Bu iletişim süreleri aşağıdaki gibidir:

- Yönetimin Gözden Geçirmesi (YGG) toplantıları: Kuruluşun kalite yönetim sisteminin etkinliğini değerlendirmek ve sürekli iyileştirmeyi sağlamak amacıyla düzenlenir. Yönetimin Gözden Geçirme (YGG) toplantıları, kuruluşun kalite yönetim sisteminin etkinliğini değerlendirmek ve sürekli iyileştirmeyi sağlamak için düzenlenmektedir. Bu toplantılar, her altı aylık dönemin sonunda, iç denetimlerin tamamlanmasını takip eden ayın son günü olmak üzere yılda iki kez yapılır. Toplantıya üst yönetici, birim yöneticileri ve kalite yönetim temsilcisi katılır. Katılımcılar, kalite yönetim temsilcisi tarafından iç yazışmalar ile bilgilendirilir ve toplantıya davet edilir. Kalite yönetim temsilcisi toplantı raportörü olarak görev yapar ve tartışılan konular ve alınan kararlar sistematik olarak kayıt altına alınır.
- *Operasyonel Toplantılar:* Bu toplantılar, kurum içindeki operasyonel süreçleri değerlendirmek, ani durumları yönetmek ve karar alma süreçlerini hızlandırmak için yapılır. Bu toplantılar üst yönetici ve birim yöneticileri tarafından ihtiyaç duyulan her an ve her yerde planlanır ve gerçekleştirilir.
- *Kalite Yönetim Toplantıları:* Bu toplantılar, kuruluşun kalite yönetim sistemi kapsamında gerçekleştirilen faaliyetlerin değerlendirilmesi, iyileştirme fırsatlarının belirlenmesi ve birimler arası koordinasyonun sağlanması amacıyla düzenlenmektedir. Bu toplantılar kalite yönetim temsilcisi ve birim yöneticilerinin gerekli gördüğü her zaman yapılır.
- Genel Toplantılar: Kurum içinde gündeme, katılımcı profiline ve süresine bağlı olarak farklı konuların tartışıldığı, önceden belirlenmiş bir düzene bağlı olmayan toplantılardır. Katılımcılar ve toplantı süresi

toplantının kapsamına göre değişiklik gösterebilir. Bu toplantılar şirket içi bilgilendirme, organizasyonel gelişmelerin paylaşılması, duyurular, çalışan geri bildirimlerinin alınması ve genel değerlendirme amaçlarıyla düzenlenmektedir. Toplantının içeriği gündem maddeleri doğrultusunda şekillendirilir, alınan kararlar ve tartışmalar ilgili taraflara yazılı olarak iletilir.

3. İSTATİSTİKSEL MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMI

Kalite, hatasız ve müşteri beklentilerini karşılayacak veya aşacak niteliklere sahip doğruluktur. Kalitenin etkileri Tablo 2'de verilmiştir. İstatistiksel süreç kontrolü (SPC), süreç değişkenliğini ölçmek ve yönetmek için kullanılan ana araçlardan biridir (Montgomery, 2020). Cpk değeri, sürecin spesifikasyon limitlerine uygunluğunu nicel olarak ortaya koymaktadır (Gitlow ve diğerleri, 2015).

Tablo 2. Kalitenin Etkileri

	Müşteri Üzerindeki Etkisi	Organizasyon Üzerindeki Etkisi	Masraf
Doğru Nitelikler	Artan memnuniyet	Daha yüksek gelir	Yüksek
Hatasız	Azalan memnuniyet	Daha düşük maliyet	İndirmek

Kalite yönetiminde üç temel süreç vardır: kalite planlaması, kalite kontrol ve kalite iyileştirme. Her üç sürecin de ortak bir özelliği, ölçüm ve verilere güvenme gerekliliğidir. Müşteri beklentilerini karşılayacak bir ürün ve hizmet yaratmak ve bu sürecin istenen nitelikler dışında bir çıktı vermemesini sağlayacak düzenlemelerin yapılması ve gerekiyorsa önlem alınması ancak somut ölçüm sonuçlarına göre mümkün olabilir.

Ham olarak alınan ölçüm sonuçları kendi başlarına bir sayı yığımindan başka bir şey değildir. Onları anlamlı kılmak, yani verilerin söylediklerini tercüme etmek gerekir. Bu da ancak

ölçümün belirli araçlar kullanılarak sistematik olarak değerlendirilmesi ve ölçüm sonuçları arasındaki ilişkinin veya ilişkisizliğin belirlenmesi ile mümkündür. Bu noktada her türlü üretim sürecinin kontrolü için kullanılan istatistik ve "istatistiksel süreç kontrol" kavramları karşımıza çıkmaktadır.

İstatistik kavramı bir ürünün tamamını kontrol etmek yerine, üründen örnek almak ve sonuçlarına göre ürün hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılan araçtır.

Kontrol kavramı, gerçek performansın ölçülmesini ve aradaki farka göre alınan önlem ile standart ile karşılaştırılmasını sağlayan geri besleme döngüsüdür.

İstatistiksel süreç kontrolü, süreçteki değişikliklerin ölçülmesi ve analizinde istatistiksel tekniklerin uygulanmasıdır.

İstatistiksel kalite kontrol proses kalitesinin ölçülmesi ve geliştirilmesinde istatistiksel tekniklerin uygulanmasıdır. Bu uygulama, istatistiksel süreç kontrolünü, tespit araçlarını, örnekleme planlarını ve diğer istatistiksel teknikleri içerir.

Hiçbir ürün veya özellik birbirinin aynısı olamaz. İşlenmiş ürünlerin boyutları/özellikleri arasında küçük bir fark olsa bile birbirleri ile kıyaslandığında mutlaka bir fark vardır. Bu, spesifikasyonların neden sınırları olduğunu açıklar.

Değişkenlik nedenleri birçok küçük kaynaktan oluşan ve her süreçte tesadüfen farklı düzeylerde mevcut olan bu değişimlerin tespit edilmesi ve düzeltilmesi zordur. Ancak süreçteki özel nedenler ortadan kaldırıldıktan sonra genel nedenler zaman içinde stabil bir dağılım gösterdiği için bu nedenlerin azaltılması gerekir. Değişikliğin genel nedenlerine örnek olarak; titreşim, sıcaklık, nem, voltaj dalgalanması vb. Gösterilebilir. Değişimin spesifik nedenleri belirsiz bir kökene sahip, öngörülemeyen ve düzensizdir. Önlem alınmadığı sürece tekrarlarlar. Belirli nedenlerin ne zaman ortaya çıktığı bilinirse, bunlar kolayca tanımlanabilir ve düzeltilebilir. Değişkenliğin

belirli nedenlerine bir örnek olarak; takım kırılması, takım aşınması, gevşeme korelasyonları, makine boşlukları, rulman aşınması, malzeme sertliği, yetersiz eğitilmiş operatör vb.

İstatistiksel kontrol, değişkenliğin belirli nedenlerini ortadan kaldırarak süreci kontrol altında tutmayı amaçlar. Kontrollü bir süreç, değişkenliğin belirli nedenleri ortadan kaldırıldığında sürekli olarak doğal sınırları içinde ürünler üretir. Proses istatistiksel olarak kontrol ediliyorsa ve sürekli olarak doğal sınırları içinde ürünler üretiyorsa, prosesin yeterliliğini belirlemek için doğal limitler spesifikasyon limitleri ile karşılaştırılmalıdır.

3.1. İstatistiksel Veri Toplama ve Analizi

İstatistiksel veriler, üretimde iş sürecinin veya ürünün mevcut durumu hakkında bilgi sahibi olmak, sorunun kritik noktasını belirlemek, alternatif çözümler bulmak, öngörülen çözümün etkin bir şekilde çalışıp çalışmadığını belirlemek için kullanılır. Veriler iki gruba ayrılır:

- *Nicel veriler:* kalınlık, uzunluk, sıcaklık, sertlik gibi ölçülebilir veriler.
- *Nitel veriler:* belirli bir özelliğin varlığı veya numaralandırılmasıyla toplanan veriler. Örnek: iyi – kötü, geçti – geçmedi, çatlak, kırık, çizik vb.

Uygun yöntemlerle toplanan veriler, toplandığı gibi kalırsa, sayı yığınlarının dışına çıkamaz ve süreçteki değişimler anlaşılabilir. Bu nedenle toplanan verilerin amaca uygun olarak sınıflandırılması, değerlendirilmesi ve ifade edilmesi gerekmektedir. Çeşitli istatistiksel teknikler mevcut durumu anlamayı, karşılaştırmalar yapmayı ve gelişmeleri takip etmeyi kolaylaştırmaktadır. Bunlardan biri frekans diyagramıdır.

Frekans diyagramı, verilerin birbirleri ile olan ilişkilerini ve eğilimlerini göstermek için kullanılır. Belirli bir özellik ile ilgili dağılımı kolayca görmemizi ve yorumlamamızı sağlar. Toplanan

veri sayısı arttıkça frekans diyagramları çizmek, okumak ve yorumlamak zorlaşır. Bu durumda, frekans diyagramlarını bir çubuk diyagrama (histogram) dönüştürmek gerekir. Histogramlar, tüm ölçüm setini, her ölçümün meydana gelme sıklığını ve veri setinin değişkenliğini gösteren çubuk grafiklerdir. Prosesten sınıflandırılmamış veriler toplandığında, bu verilerin nasıl dağıldığını ve ortalamanın nerede olduğunu görmek ve süreci spesifikasyonlarla karşılaştırmak için kullanılır.

3.2. İstatiksel Süreç Yöntemi (SPC)

SPC yöntemi, farklı sektörlerde faaliyet gösteren birçok işletmede uygulanan ve Kalite Yönetim Sistemi (KYS) süreçlerini inceleyen nicel ve uygulamalı bir araştırmadır. Araştırma kapsamında kalite yönetim sisteminin süreç temelli yapısı, belgelendirme şeması, iç tetkik uygulamaları ve yönetsel karar mekanizmaları gözlem yoluyla analiz edilmektedir.

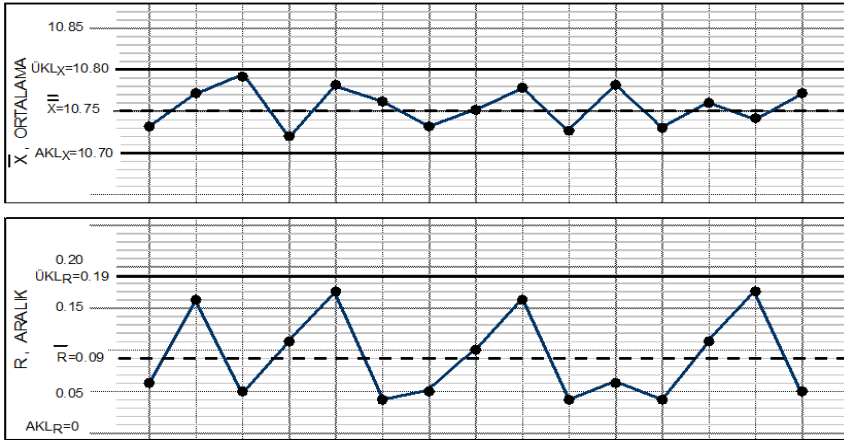
Süreç akışları, sahada doğrudan gözlemler yoluyla çıkarılmaktadır ve her işletmede kalite yönetim sistemi ile ilişkili süreçler; girdi-süreç-çıkıtı-kontrol kriterleri mantığı ile modellenmektedir. Bu süreçler, standardın tüm maddeleri referans alınarak değerlendirilir ve işletmelerin uyum düzeyleri karşılaştırmalı olarak analiz edilir.

Ayrıca işletmelerden elde edilen İstatistiksel Proses Kontrol (SPC) verileri doğrultusunda, kritik üretim süreçleri için proses yeterlilik katsayıları (Cpk) hesaplanır. Böylece proses performansları ölçülebilir kalite göstergeleri ile desteklenmektedir. Süreç kontrol çizelgelerinin şirket içinde başarılı ve etkin bir şekilde uygulanabilmesi için istatistiksel süreç kontrolü için uygun ortam yaratılarak ilgili personelin eğitilmesi gerekmektedir. İşleyişi, malzemesi, işleme yöntemleri ve makinesi iyi bilinmelidir. Kontrol edilecek özellikler çok iyi seçilmelidir.

3.3. Üretim Süreçlerinin İzleme ve Ölçümü

İşletmeler, istatistiksel olarak yeterli olmayan veya kararsız olan karakteristikler için kontrol planında belirtilen reaksiyon planını başlatmalı ve spesifikasyonlara uyumu üzerindeki etkisini değerlendirilmelidir. Bu reaksiyon planları, uygun olduğunda, ürünün tutulmasını ve yüzde yüz muayenesini içermelidir. Kuruluş tarafından, sürecin kararlı ve istatistiksel olarak yeterli hale gelmesini sağlayacak bir düzeltici faaliyet planı; özel faaliyetler, zamanlamayı ve atanmış sorumlulukları içerecek şekilde; geliştirmeli ve uygulanmalıdır. Gerektiği durumlarda, planlar müşteri ile gözden geçirilmeli ve müşteri tarafından onaylanmalıdır. İşletmeler, süreç değişikliklerinin geçerlilik tarihlerinin kayıtlarını muhafaza etmelidir. Önemli proses olayları; örneğin, takım değişikliği veya makine tamiri; kaydedilmeli ve belgelenmiş olarak bilgi muhafaza edilmelidir.

İstatistiksel proses kontrol (SPC) yöntemi, kontrol kartları ve süreç yeterlilik katsayılarının periyodik izlenmesiyle kullanılır. Periyodik olarak toplanan veriler excelde girilerek Şekil 3'te verilen normal dağılım eğrileri oluşturulur.



Şekil 3. Kontrol Çizelgesi

Şekil 3'te kontrol çizelge yorumlanırken kontrol limitleri dışında işaretli hiçbir nokta bulunmamaktadır; yalnızca limit çizgisi üzerindeki işaretli noktalar hariç tutulmuştur. Merkez çizgisi üzerindeki noktaların toplam sayısı, merkez çizgisinin altında yer alan noktaların sayısına yakındır ve işaretli noktalar, merkez çizgisinin üstünde ve altında rastgele bir dağılım göstermektedir. Ayrıca merkez çizgisinin herhangi bir tarafında yedi veya daha fazla noktanın ardışık olarak devam etmesi söz konusu değildir. Kontrol limitlerine doğru giden yedi veya daha fazla noktanın yukarı veya aşağı yönlü trend oluşturmadığı görülmektedir. Noktaların yalnızca çok az bir kısmı kontrol limitlerine yakın konumlanmış olup büyük çoğunluğu merkez çizgi etrafında dağılmıştır. İşaretli noktaların önemli bir kısmı merkez çizgisine yakın şekilde toplanmış ve düz bir hat yapısı gözlemlenmemiştir. Bu bulguların hepsine olumlu yanıt verilirse proses kusursuzdur. En az birine olumsuz yanıt veriliyorsa proseste iyileştirmeler yapılması gerektiği görülmektedir.

SONUÇ

İşletmede süreç yönetimi ve performans iyileştirmesine yönelik mühendislik yaklaşımlarını inceleyerek kalite yönetim sistemlerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Süreçlerin yalnızca standartların gereklerini yerine getirmek amacıyla değil, aynı zamanda işletmenin stratejik hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacak şekilde yapılandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Araştırma kapsamında süreç bazlı yönetim yaklaşımının, fonksiyonel yönetim anlayışına kıyasla müşteri memnuniyetini artırmada ve rekabet avantajı sağlamada daha etkin olduğu görülmüştür. İstatistiksel süreç kontrol yöntemlerin uygulanması, işletmelerin değişkenlik kaynaklarını daha net tanımlamasına ve süreçlerini kontrol altında tutmasına imkân

vermektedir. Bu durum hem maliyetlerin düşürülmesine hem de ürün/hizmet kalitesinin artırılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

Süreç yönetimi ve istatistiksel mühendislik yaklaşımlarının entegrasyonunun bir işletmeye önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Özellikle endüstri ve makine perspektifinden bakıldığında, kalite yönetim sistemleri yalnızca bir belgelendirme aracı değil, aynı zamanda sürekli iyileştirme kültürünün yaygınlaştırılmasını sağlayan stratejik bir mekanizma olarak değerlendirilmelidir. SPC, veri yönetimi ve önleyici faaliyetlerin etkinliği açısından iyileştirme için yer olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, üretim süreçlerinde, ölçüm sistemlerinde, eğitim seviyesinde ve bakım planlamasında kullanılan makinelerin kalite çıktıları üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, işletmelerin sürdürülebilir rekabet gücü elde edebilmeleri için süreç yönetimi ve performans ölçümünde mühendislik temelli yaklaşımları sistematik bir şekilde kullanmaları gerekmektedir. Bu yaklaşım, müşteri beklentilerinin daha etkin karşılanmasını, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve uzun vadede kurumsal başarıya katkı sağlayacak sürekli iyileştirme kültürünün oluşmasını desteklemektedir ve kalite yönetim sistemlerinin sadece belgelendirme odaklı olmadığı aynı zamanda veri odaklı ve sürekli iyileştirme odaklı bir yaklaşımla ele alınması gerektiği bilinmektedir.

KAYNAKLAR

- Deming, W. E. (1986). Krizden çıktık. Basın ile.
- Evans, J. R. ve Lindsay, W. M. (2020). Kalite ve performans mükemmelliği için yönetim (11. baskı). Cengage Öğrenme.
- Gitlow, H., Oppenheim, A., Oppenheim, R. ve Levine, D. (2015). Kalite yönetimi: İyileştirme için araçlar ve yöntemler (4. baskı). McGraw-Tepesi.
- Hoyle, Ö. (2017). ISO 9001:2015 Denetim kılavuzu ve kontrol listesi. Taylor ve Francis.
- ISO. (2015). ISO 9001:2015 Kalite yönetim sistemleri — Gereksinimler. Uluslararası Standardizasyon Örgütü.
- Jorgensen, T. H., Remmen, A. ve Mellado, M. D. (2006). Entegre yönetim sistemleri: Üç farklı entegrasyon seviyesi. *Temiz Üretim Dergisi* 14(8), 713–722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.04.005>
- Juran, J. M. ve Godfrey, A. B. (1999). Juran'ın kalite el kitabı (5. baskı). McGraw-Tepesi.
- Montgomery, DC (2020). İstatistiksel kalite kontrolüne giriş (8. baskı). John Wiley ve Oğulları.
- Oakland, J. S. (2014). Toplam kalite yönetimi ve operasyonel mükemmellik: Vakalı metin (4. baskı). Routledge.

HEDEF PROGRAMLAMA YÖNTEMİ İLE ETKİN ŞİRKET İÇİ PROJE LİDERİ ATAMASI¹

Nisanur KÖLEOĞLU²

Yunus EROĞLU³

1. GİRİŞ

Modern şirketler, rekabet avantajı elde etmek ve sürekliliği sağlamak için projelerini etkin bir şekilde yönetmek zorundadır. Bu bağlamda, doğru liderlerin projelere atanması kritik bir öneme sahiptir. Ancak, lider seçimi ve görevlendirme süreçlerinde birçok faktörün dikkate alınması gerektiği için bu süreç karmaşık bir karar problemine dönüşebilir. Lider seçimi, sadece bireysel yetkinliklerin değerlendirilmesi değil, aynı zamanda bu yetkinliklerin projelerin spesifik gereksinimleriyle uyumlu hale getirilmesini gerektirir. Proje liderleri, organizasyonun genel hedeflerine katkıda bulunacak stratejik kararlar alırken aynı zamanda ekip üyelerini etkin bir şekilde yönlendirmelidir. Bu gereklilikler, lider seçim süreçlerini daha karmaşık hale getirmiştir.

Bu çalışma, liderlerin bireysel yetkinliklerini projelerin gereklilikleriyle eşleştirerek yenilikçi bir hedef programlama modeli önermektedir. Hedef programlama, birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesini sağlayan etkili bir matematiksel

¹ Bu çalışma İskenderun Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmış olan yüksek lisan tezinden üretilmiştir.

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, nisa.koleoglu01@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9724-0782.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, eroglu@gantep.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8354-6783.

yöntemdir. Bu yöntem, projelerin gereksinimlerine uygun liderlerin seçimini ve atanmasını sistematik bir yapıya oturtarak karar verme süreçlerinde önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Ayrıca, literatürde yer alan liderlik kriterlerini ve projelerin gereksinimlerini sistematik bir şekilde ele alarak, şirketlerin proje yönetimi performansını arttırmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, organizasyonel hedeflere daha hızlı ulaşmayı ve iş süreçlerini optimize etmeyi mümkün kılmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Liderlik ve Proje Yönetimi

Günümüzde liderlerin projelerdeki başarıya katkıları, yalnızca teknik yeterlilikleriyle sınırlı kalmamaktadır. Liderlerin ekip içindeki sosyal dinamikleri yönetme, çatışma çözme ve farklı bakış açılarını bir araya getirerek ortak hedeflere yönlendirme gibi becerileri de giderek önem kazanmaktadır. Örneğin, yapılan bir çalışmada, liderlerin kriz yönetimi becerilerinin, özellikle belirsizlik içeren proje ortamlarında proje başarısını artırmada belirleyici olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, liderlerin esnekliğinin ve adaptasyon yeteneklerinin, değişken gereksinimlere sahip projelerde kilit rol oynadığı vurgulanmıştır (Zheng, Yuan, van Dijke, De Cremer, & Van Hiel, 2020). Liderlerin stratejik düşünme becerileri de son dönemde literatürde öne çıkan bir diğer önemli unsurdur. Stratejik düşünme yeteneği yüksek liderlerin, proje süreçlerini daha iyi yöneterek ekiplerini başarıya yönlendirme konusunda üstün performans sergilediği bulunmuştur. Stratejik düşünebilme yeteneği, liderlerin yalnızca mevcut sorunları çözmekle kalmayıp, aynı zamanda gelecekte ortaya çıkabilecek zorlukları öngörmelerine ve bu doğrultuda proaktif stratejiler geliştirmelerine olanak tanır (Y. Yang, Li, Liang, & Zhang, 2021). Ekip motivasyonu üzerine yapılan araştırmalar da, liderlerin projelerdeki başarıya olan katkılarını

açıklamak için önemli bir dayanak oluşturmaktadır. Ekip üyelerinin motivasyon seviyelerini yükseltmek, proje hedeflerine ulaşmada kritik bir faktördür. Bu bağlamda, bir çalışmada, motivasyon odaklı liderlik tarzlarının, ekip performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve liderlerin empati, şeffaflık ve takdir mekanizmalarını etkili bir şekilde kullanmasının ekip içinde güçlü bir bağlılık oluşturduğu ortaya konmuştur (Hardeman, Homan, Chantarat, Davis, & Brown, 2022).

Liderlik becerilerinin KOBİ performansı üzerindeki etkisine odaklanan bir çalışmada, liderlik becerilerinin geliştirilmesinin hem finansal hem de finansal olmayan performansın artırılmasında kritik bir rol oynadığı ortaya konulmuştur. Araştırmaya göre, liderlik tarzı, KOBİ'lerin başarısını doğrudan etkileyen önemli bir faktör olup, liderlerin paydaşlara duyarlı olması, ekip içinde birlik oluşturması ve çalışanlara yetki devretmesi gibi özelliklerin KOBİ performansına olumlu katkı sağladığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, etik liderlik uygulamalarının benimsenmesi, özellikle borç yönetimi gibi iş operasyonlarında, KOBİ'lerin sürdürülebilir başarısına katkı sağlamaktadır. Etik davranışın, dürüstlük, adalet, şeffaflık ve etik değerlere uyum gibi unsurları içerdiği vurgulanmıştır (Kuan, 2021). Liderlerin iletişim becerileri ise, proje yönetiminde başarıyı etkileyen bir diğer temel faktördür. Etkili iletişimin ekip üyeleri arasındaki koordinasyonu güçlendirdiğini, bilgi akışını hızlandırdığını ve yanlış anlamaları azalttığını vurgulamaktadır. Bu çalışmada, liderlerin açık ve net bir iletişim stratejisi benimsemelerinin, ekip üyelerinin hedeflere yönelik uyum içinde çalışmasını sağladığı ve proje sonuçlarını iyileştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, liderlerin dinleme becerileri, ekip üyelerinin görüş ve önerilerini dikkate alarak karar süreçlerine dahil edilmesini kolaylaştırmakta ve bu da proje süreçlerine katılımı artırmaktadır (Ngo, Trinh, & Nguyen, 2022).

Karmaşık projelerde liderlerin adaptasyon yetenekleri, değişen koşullara hızla uyum sağlamayı gerektirir. Yapılan bir araştırma, adaptasyon yetenekleri yüksek olan liderlerin, hızlı değişim gösteren proje gereksinimlerine ve beklenmeyen zorluklara karşı daha etkili çözümler geliştirdiğini ortaya koymuştur. Bu liderlerin esneklikleri, ekiplerin moralini yüksek tutarken, proje performansını artırıcı bir etki yaratmaktadır (N. Yang, Chen, & (Frank) Wang, 2024). Ayrıca, liderlerin karar verme süreçlerindeki etkileri de son yıllarda detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Liderlerin veriye dayalı karar verme becerilerinin, projelerin planlanması ve uygulanmasında daha az hata yapılmasını sağladığı bulunmuştur. Bu tür liderlerin hem teknik hem de insani boyutları dikkate alarak dengeli kararlar aldığı ve bu kararların ekiplerin genel performansına olumlu katkı sağladığı belirtilmiştir (Kaur & Singh, 2024).

2.2. Hedef Programlama

Çok amaçlı karar verme süreçlerinde, alınması gereken kararlar çoğunlukla birden fazla amaca yönelik olma niteliği taşır. Bazı amaçlar birbiriyle uyumlu olabilirken, diğerleri arasında çelişkiler ortaya çıkabilir. Bu tür durumlarda, tüm hedeflerin eş zamanlı olarak sağlanabilmesi için çok amaçlı karar verme problemlerine uygun programlama modellerinin kullanılması gerekmektedir. Bu modellerden biri olan Hedef Programlama, özellikle çok amaçlı karar verme problemlerinin çözümünde yaygın bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Tamiz & Jones, 1997). Hedef programlama yaklaşımında, amaç kriteri doğrudan maksimizasyon veya minimizasyon şeklinde ele alınmaz. Bunun yerine, belirlenen hedeflerden olan sapmaların minimize edilmesi hedeflenir. Doğrusal programlamada bu tür sapmalar "aylak değişkenler" olarak adlandırılırken, hedef programlama bağlamında bu değişkenler daha anlamlı bir rol üstlenir. Sapma değişkenleri, hedeflerden pozitif ve negatif yönde gerçekleşen sapmaları temsil edecek şekilde iki boyutta

modellenir. Hedef programlamada amaç fonksiyonu, yalnızca bu sapma değişkenlerine dayanarak oluşturulur ve karar verme sürecinde bu sapmaların minimize edilmesi esas alınır. Bu yaklaşım, birden fazla amacın eş zamanlı olarak optimize edilmesi gereken durumlarda etkin bir çözüm yöntemidir (E. H. Özder, 2015).

Hedef programlama, karar vericilerin istek ve beklentilerini açık bir şekilde ifade eden amaçların matematiksel bir model içerisinde ele alınmasını sağlayan bir yaklaşımdır. Hedef, bu amaçların somutlaştırılarak sayısal değerlere dönüştürülmüş halidir. Modelde yer alan karar değişkenleri, karar vericilerin belirli bir problemi çözmek için değerini bulmak istedikleri bilinmeyenleri ifade eder ve genellikle x_j sembolüyle gösterilir. Amaç fonksiyonu, belirlenen hedeflerden sapmaların minimize edilmesine yönelik oluşturulan matematiksel bir ifadedir. Hedef kısıtları, ulaşılması istenen hedef değerlerini temsil eder ve bu kısıtlar esnek kısıtlar olarak adlandırılır; çünkü hedeflerden sapmalar olabilmektedir. Buna karşılık, sistem kısıtları, sapmaya izin verilmeyen, kesin ve mutlak olarak sağlanması gereken kısıtları ifade eder. Bu kısıtlar, modelin çözüm sürecinde öncelikli olarak dikkate alınmalıdır.

Modelde kullanılan sapma değişkenleri, $di+$ ve $di-$ sembolleriyle gösterilir ve belirli hedeflerin ne ölçüde başarıldığını temsil eder. Bu değişkenler, gerçekleşen değer ile hedeflenen değer arasındaki farkı ifade eder ve hedeflerin ne kadar sapma ile yerine getirildiğini analiz etmek için kullanılır (B. Uçakcıoğlu, 2017). Bu yaklaşım, birden fazla hedefin optimize edilmesi gereken karar verme problemlerinde etkin ve esnek bir çözüm yöntemi sunar. Ayrıca, hedef programlama ile Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi diğer karar destek yöntemlerinin birlikte kullanımı, lider seçimi süreçlerinde yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Özellikle, liderlerin yetkinliklerinin farklı ağırlıklarla değerlendirilmesi gerektiğinde,

bu iki yöntem arasındaki entegrasyon, karar verme sürecini daha güçlü hale getirmektedir (Rocco, Morris, & Poell, 2024). Bulanık AHP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, beş aday arasından en uygun akademik personelin seçimi optimize edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, adaylar hem akademik hem de bireysel faktörler temelinde detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, değerlendirilen kriterler doğrultusunda ikinci adayın en uygun seçim olduğu belirlenmiştir (Erkan & Erdebilli, 2012).

3. METODOLOJİ

Bu model, liderlerin yalnızca teknik becerilerini değil, projelerin başarısı için kritik olan diğer niteliklerini de dikkate almayı amaçlamaktadır. Model, varsayımsal olarak 5 proje ve 10 lider adayı üzerine kurgulanmıştır. Her bir liderin, projelerdeki başarıyı etkileyen kişisel ve profesyonel nitelikleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Liderlerin değerlendirilmesinde şu temel kriterler kullanılmıştır:

Liderlik Özellikleri: Lider adayının, ekip yönlendirme, karar alma ve stratejik hedeflere ulaşma konusundaki yetkinliklerini ifade eder. Liderlik becerileri, projelerin başarıya ulaşmasında temel belirleyicilerden biridir.

Kişisel Özellikler: Liderin güvenilirlik, öz disiplin, kararlılık ve stresle başa çıkma gibi özelliklerini içerir. Bu özellikler, özellikle karmaşık ve uzun vadeli projelerde liderin etkisini artırmaktadır.

Ekip Çalışması Deneyimi: Lider adayının ekip üyeleriyle etkili bir iş birliği içinde çalışabilme ve takım dinamiklerini yönetebilme becerisini ölçer. Bu kriter, projelerin uyum içinde ilerlemesini sağlamak için önemlidir.

Acil Durum Kriteri: Kriz anlarında hızlı ve doğru kararlar alabilme kapasitesini ifade eder. Bu, liderin değişen koşullara uyum sağlayabilmesi ve beklenmedik durumları yönetebilmesi açısından kritik bir özelliktir.

İletişim Becerisi: Liderin, proje ekipleri, paydaşlar ve üst yönetimle etkili bir iletişim kurabilme yeteneğini değerlendirir. İletişim becerisi, bilgi akışını hızlandırarak yanlış anlamaların önüne geçer ve proje hedeflerine odaklanmayı kolaylaştırır.

Modelin kurgusunda, her bir projenin farklı gereksinimleri göz önüne alınarak, liderlerin bu kriterlerdeki yetkinlikleri bir uygunluk matrisi üzerinden değerlendirilmiştir. Projelerin liderlerden beklentileri şu şekilde özetlenmiştir:

Yeni Ürün Geliştirme Projesi: Yüksek liderlik özellikleri ve kişisel özellikler gerektirir.

Pazarlama Stratejisi Projesi: İletişim becerilerine ve ekip çalışması deneyimine öncelik verir.

İnsan Kaynakları İyileştirme Projesi: Liderlik, kişisel özellikler ve iletişim becerilerinde yüksek seviyede yetkinlik talep eder.

Finansal Planlama Projesi: Acil durum kriteri ve ekip çalışması deneyimine odaklanır.

Dijital Dönüşüm Projesi: Teknik bilgi ile liderlik ve iletişim becerilerinde denge sağlar.

Her bir liderin yetkinlikleri ve projelerin ihtiyaçları arasındaki uyum, bir uygunluk matrisi aracılığıyla değerlendirilmiş ve lider-proje eşleştirmeleri bu matris temel alınarak yapılmıştır. Bu yaklaşım, projelerin gereksinimlerini en iyi karşılayan liderlerin atanmasını sağlayarak, projelerin başarı oranını artırmayı hedeflemektedir.

3.1. Kullanılan Veriler

Bu çalışma kapsamında, liderlerin projelere atanmasında kullanılacak karar verme sürecinin bilimsel ve sistematik bir yaklaşımla yürütülmesi amaçlanmıştır. Liderlerin, projelerdeki başarısını etkileyen farklı niteliklerin analiz edilmesi ve her bir liderin belirli kriterler üzerinden değerlendirilmesi için bir Tablo 1 oluşturulmuştur. Bu tablo, liderlerin sahip olduğu yetkinliklerin sayısal olarak ifade edilmesine ve projelerin gereksinimlerine uygun liderlerin seçilmesine olanak sağlamaktadır. Liderlerin liderlik özellikleri (LÖ), kişisel özellikleri (KÖ), ekip çalışması deneyimi (ÇD), kriz yönetimi becerisi (KYB), iletişim becerisi (İB) ve ortalama puan (OP) gibi önemli faktörler, projelerin başarı oranını artıran temel unsurlar olarak belirlenmiştir.

Tabloda yer alan her bir lider, bu kriterler açısından sistematik bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Projelerin gereksinimleri doğrultusunda liderlerin yetkinlik düzeylerinin ölçülmesi, projelerde ihtiyaç duyulan liderlik özelliklerinin en iyi şekilde karşılanmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle farklı projelerin gerektirdiği niteliklerin çeşitliliği, lider-proje uyumunun sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, oluşturulan tablo hem projelerin ihtiyaçlarının hem de liderlerin yetkinliklerinin analitik bir çerçevede ele alınmasını mümkün kılmaktadır.

Tablo 1. Lidere ait özellik değerlendirmesi

	LÖ	KÖ	ÇD	KYB	İB	OP
L1	4	4	5	7	2	4,4
L2	3	4	5	2	6	5,6
L3	7	2	3	4	3	3,8
L4	2	2	3	5	3	3,0
L5	1	4	4	5	3	3,4
L6	5	5	3	3	3	3,8
L7	6	7	9	7	5	6,8
L8	3	3	2	2	3	3,0
L9	4	5	5	5	5	4,8
L10	3	2	4	7	4	4,0

Projelerin başarı oranını artırmak ve projelere en uygun liderlerin atanmasını sağlamak amacıyla, her bir projenin belirli kriterlere olan ihtiyaç düzeylerini sistematik bir şekilde değerlendirmek için Tablo 2 oluşturulmuştur. Bu tablo, projelerin gereksinim duyduğu liderlik niteliklerini analitik bir yaklaşımla değerlendirmek için bir temel sağlamaktadır. Her bir proje, içerik ve hedefleri doğrultusunda farklı liderlik yetkinliklerini önceliklendirmektedir. Tablonun hazırlanmasında, projelerin başarıyla yürütülmesi için gerekli olan lider özellikleri ve yetkinlikler titizlikle analiz edilmiştir. Bu tablo, projelerin gereksinimlerini bütüncül bir yaklaşımla ele almakta ve liderlerin bu ihtiyaçlara uyum düzeylerini analiz etmeye olanak tanımaktadır. Lider-proje eşleştirmesinde kullanılan bu sistematik yaklaşım, projelerin gereksinimlerini en uygun lider yetkinlikleriyle eşleştirerek başarı oranını artırmayı hedeflemektedir.

Tablo 2. Projelerin kriterlere göre ihtiyaçları

	LÖ	KÖ	EÇD	KYB	İB
Yeni Ürün Geliştirme (P1)	7	7	5	5	3
Pazarlama Stratejisi (P2)	5	3	6	9	7
Finansal Planlama (P3)	5	5	3	9	3
İnsan Kaynakları (P4)	9	8	7	5	9
Dijital Dönüşüm (P5)	7	3	5	7	3

Liderlerin projelere uygunluk tablosunu oluştururken, her liderin sahip olduğu yetkinlikler ile projelerin gereksinimleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu süreçte, kriterlerin projeler üzerindeki önemi dikkate alınarak ağırlıklandırılmış bir puanlama yöntemi kullanılmıştır. Liderlik Özellikleri kriteri, projelerin başarıya ulaşmasında önemli bir rol oynadığı için en yüksek ağırlığa sahip olup, toplam değerlendirme içerisinde %30 oranında etkili olarak belirlenmiştir. Kişisel Özellikler, bir

liderin bireysel kapasitesini ve projenin gereksinimlerini karşılayabilme potansiyelini yansıttığı için %20'lik bir ağırlığa sahiptir. Benzer şekilde, bir liderin Ekip Çalışması Deneyimi de projelerin takım dinamiklerine uyum sağlaması açısından %20 oranında önemli kabul edilmiştir. Kriz Yönetimi Becerisi, kriz yönetimi ve hızlı karar almayı gerektiren durumlar için yine %20 ağırlığında değerlendirilmiştir. Son olarak, liderlerin İletişim Becerisi, projelerde etkin bir bilgi akışı ve koordinasyon sağlama açısından %10'luk bir ağırlık ile modele dahil edilmiştir. Liderlerin projelere uygunluğu, liderlerin bireysel beceri puanları ile projelerin kriter gereksinimlerinin bir çarpan etkisiyle birleştirilmesi sonucu hesaplanmıştır (**Denklem 1**).

$$U_{ij} = \sum_{k=1}^5 (L_{ik} * P_{jk}) \quad (1)$$

Burada: U_{ij} : i . lider ile j . proje arasındaki uygunluk skoru, L_{ik} : i . liderin k . kriterdeki puanı, P_{jk} : j . projenin kriterdeki ağırlığı ve $k = 1, 2, 3, 4, 5$ değerlendirme kriterlerini temsil etmektedir.

Liderlerin projelere genel uyumu ise denklem (2)'de görüleceği üzere 1-9 arasında ölçeklendirmek amacıyla normalize edilmiştir.

$$N_{ij} = \frac{U_{ij}}{\max(U_{ij})} * 9 \quad (2)$$

Burada: N_{ij} : i . lider j . proje çifti için normalize edilmiş skoru, U_{ij} , uygunluk skorunu, $\max(U_{ij})$ tüm uygunluk skorları arasındaki en yüksek değeri, Katsayı 9 ise ölçeklendirme amacıyla kullanılan değeri temsil etmektedir. Böylece normalize aralık 0–9 ölçeğine dönüştürülmüştür.

Liderlerin projelere uygunluğunu Tablo 3'te gösterilmiştir. Puanlar, liderlerin yetkinliklerinin projelerin gereksinimleriyle eşleşme düzeyini ifade etmektedir. Bu sayede, projelere en uygun liderlerin atanması hedeflenmektedir.

Tablo 3. Liderlerin projelere uygunlukları

	P1	P2	P3	P4	P5
L1	7.0	7.4	7.6	5.2	7.8
L2	6.3	6.5	6.1	5.1	6.3
L3	7.4	6.2	6.8	5.6	7.8
L4	6.1	6.1	6.7	4.3	6.5
L5	6.0	5.6	6.2	4.2	6.0
L6	7.2	6.4	7.8	5.4	6.8
L7	7.3	6.7	6.5	6.7	6.9
L8	6.0	6.8	7.4	4.2	7.2
L9	7.5	7.1	7.3	6.1	7.1
L10	6.1	7.1	7.1	4.5	7.3

Kurumsal projelerin başarısı, yalnızca teknik gereksinimlerin karşılanmasıyla değil, aynı zamanda doğru liderlerin doğru projelere atanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu doğrultuda, projelerin stratejik önemine, organizasyona katkısına ve gerektirdiği liderlik yetkinliklerine göre bir değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmada, Tablo 4’te görüleceği üzere her proje için 1-10 arasında bir önem derecesi belirlenmiş ve projelerin önceliklendirilmesi sağlanmıştır. Projelerin önceliklendirilmesi, sınırlı liderlik kaynaklarının en verimli şekilde dağıtılmasını sağlamak, organizasyonel hedeflere ulaşmayı hızlandırmak ve stratejik öneme sahip projelere doğru liderleri yönlendirmek için kritik bir adımdır. Bu önceliklendirme yaklaşımı, proje liderlerinin atama sürecini optimize etmeye ve organizasyonun stratejik hedeflerine en uygun liderleri yönlendirmeye yardımcı olacaktır.

Tablo 4. Projelerin önceliklendirmeleri

	Puan	Gereken Yetkinlikler
Yeni Ürün Geliştirme (P1)	9	Yüksek liderlik özellikleri, kişisel özellikler
Pazarlama Stratejisi (P2)	8	İletişim becerileri, ekip çalışması deneyimi
Finansal Planlama (P3)	8	Liderlik, kişisel özellikler, iletişim becerileri
İnsan Kaynakları (P4)	7	Acil durum kriteri, ekip çalışması deneyimi
Dijital Dönüşüm (P5)	7	Teknik bilgi, liderlik ve iletişim becerileri

3.2. Matematiksel Model

Bu çalışmada, liderlerin farklı projelere en uygun şekilde atanmasını amaçlayan çok kriterli bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Model, hem projelerin belirli yeterlilik düzeylerini sağlama gereksinimini, hem de liderlerin iş yüklerinin dengeli dağılımını dikkate almaktadır.

Modelde aşağıdaki karar değişkenleri tanımlanmıştır:

$X_{ij} \in \{0,1\}$: Eğer lider i , proje j 'ye atanmışsa 1, atanmadıysa 0 olur.

$Penalty_{ij} \geq 0$: Lider i 'nin proje j 'nin gereksinimlerini karşılayamaması durumunda uygulanan ceza değeridir.

$d_{i+}, d_{i-} \geq 0$: Lider i 'nin iş yükünün ortalama iş yükünden fazla (d_{i+}) veya az (d_{i-}) olma durumlarını ifade eder.

Bu değişkenler, liderlerin atanma durumlarını, yeterlilik sapmalarını ve iş yükü dengesizliklerini sayısal olarak temsil etmektedir.

Çalışmada kullanılan parametreler ise aşağıdaki gibidir;

S_{ij} : Lider i 'nin proje j için sahip olduğu toplam yeterlilik puanı.

T_{jk} : Proje j 'nin k kriterindeki minimum gereksinim düzeyi.

w_k : Kriter k 'nin ağırlığıdır; örneğin, liderlik veya iletişim becerisi gibi.

L^- : Ortalama lider başına düşen proje sayısıdır. Bu modelde toplam 5 proje ve 10 lider bulunduğundan $L^- = 0.5$ olarak alınmıştır.

α, β, γ : Sırasıyla, uygunluk farkı, iş yükü sapması ve yeterlilik cezasına verilen ağırlıklardır. Bu katsayılar, karar vericilerin hangi amacı ne kadar önemsediklerini ifade eder.

Amaç, liderlerin projelere atanmasındaki toplam uyumsuzluğun minimize edilmesidir. Bu uyumsuzluk, her liderin sahip olduğu yetkinliklerin, projelerin gereksinimleriyle ne kadar örtüştüğü ile ölçülür. Bu uyumsuzluk, her lider-proje eşleşmesi için bir uyumsuzluk değeri hesaplanarak toplamda minimize edilir. Bu amaç Denklem (3)'te ifade edilmiştir.

$$\min Z = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^5 w_k \cdot |T_k - S_{ij}| \cdot X_{ij} + \beta \sum_{i=1}^{10} (d_i^+ + d_i^-) + \gamma \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^5 \text{Penalty}_{ij} \quad (3)$$

Amaç fonksiyonundaki bileşenler aşağıdaki şekilde şekildedir:

Uygunluk Farkı: İlk terim, liderin proje gereksinimlerinden ne kadar sapma gösterdiğini ölçer. Sapma ne kadar azsa, atama o kadar isabetlidir. Bu farklar mutlak değer biçiminde hesaplanır ve kriter ağırlıkları ile çarpılarak önem sırasına göre katkıları belirlenir.

İş Yükü Dengesizliği: İkinci terim, her bir liderin proje dağılımında ortalamadan ne kadar saptığını gösterir. Burada amaç, bazı liderlere çok fazla, bazılarına ise çok az görev verilmesini engelleyerek dengeli bir iş yükü dağılımı sağlamaktır.

Yeterlilik Cezası: Üçüncü terim, bir liderin proje için gereken toplam kriter puanının altında kalması durumunda modelin ceza uygulamasını temsil eder. Bu ceza sayesinde, sistem yetersiz eşleşmeleri caydırır.

Modelin kısıtları ise aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\sum_{i=1}^{10} X_{ij} = 1, \quad \forall j \in \{1, \dots, 5\} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^5 X_{ij} \leq 3, \quad \forall i \in \{1, \dots, 10\} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^5 X_{ij} - L^- = d_i^+ - d_i^- \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^5 w_k \cdot S_{ij} \cdot X_{ij} + \text{Penalty}_{ij} \geq \sum_{k=1}^5 w_k \cdot T_{jk} \cdot X_{ij} \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \text{Penalty}_{ij} \geq 0, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad (8)$$

Her proje için sadece bir lider atanabilir. Her projenin yalnızca bir lideri olmalıdır, bu da her projenin yalnızca bir liderle eşleştirilmesi gerektiğini belirtmektedir. Formülasyonu Denklem (4)'de verilmiştir.

Liderlerin toplam çalışma yükü dengelenir. Liderler arasında adil bir iş yükü dağılımı sağlanmalıdır. Her liderin aynı anda en fazla üç projede görev alabilmesi sağlanır. Bu, liderlerin aşırı iş yüküne maruz kalmasını engeller. Formülasyonu Denklem (5)'te verilmiştir.

Denklem (6), her bir liderin toplam proje yükünün ortalama değerden sapmasını pozitif ve negatif bileşenlerine ayırır. Böylece model iş yükü dağılımını dengeli tutmaya çalışır.

Denklem (7), her liderin belirli bir projeye atanabilmesi için gerekli minimum yetkinlik seviyesini karşılamasını sağlar. Kısıt, liderin bir projeye atanıp atanamayacağını belirlerken, liderin yetkinliklerinin bu minimum seviyeyi sağlayıp sağlamadığını kontrol eder.

Modelin değişkenleri ikili (atanmış/atanmamış) ve sürekli (ceza, sapma) değişkenlerdir. Denklem (8)'de belirlenen tanım kümeleri bu türleri netleştirir.

Bu yapı, karar vericilere hem projenin ihtiyaç duyduğu liderlik kriterlerinin karşılanmasını hem de liderlerin adil bir şekilde görevlendirilmesini sağlayacak biçimde esnek ve güçlü bir karar destek sistemi sunmaktadır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, liderlerin projelere atanmasını çok kriterli karar verme yapısında ele alan matematiksel bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Model, liderlerin projelere atanmasında üç temel hedefi birlikte optimize etmeyi amaçlamaktadır. Yetkinlik gereksinimleri ile lider uygunluğu arasındaki farkı minimize etmek, iş yükünü liderler arasında dengeli dağıtmak ve minimum yetkinlik koşulunu sağlamayan atamalar için ceza tanımlamak. Geliştirilen model, 10 lider ve 5 projeden oluşan bir veri kümesinde test edilmiş ve tüm projelere birer lider ataması başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Hedef programlama yöntemi ile geliştirilen model, birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesini sağlayarak, liderlerin projelere atanmasının sadece uyumluluğunu değil, aynı zamanda projelerin gereksinimlerini karşılayan en verimli

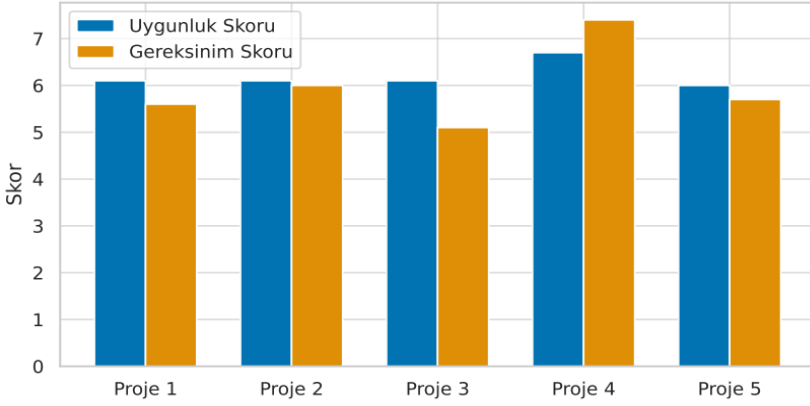
çözümün bulunmasını da sağlamaktadır. Model, liderlerin belirli projelerdeki potansiyel performansını ve proje gereksinimlerinin karşılanabilirliğini ölçerek, şirketlerin karar alma süreçlerini daha nesnel ve hesaplanabilir bir temele dayandırmıştır. Bu tür bir optimizasyon, proje yönetimindeki karmaşıklıkları ve belirsizlikleri azaltarak, organizasyonların daha stratejik ve bilinçli seçimler yapmalarına olanak tanımaktadır. Optimizasyon sonucunda elde edilen lider-proje eşleşmeleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Projelere lider atanma durumu

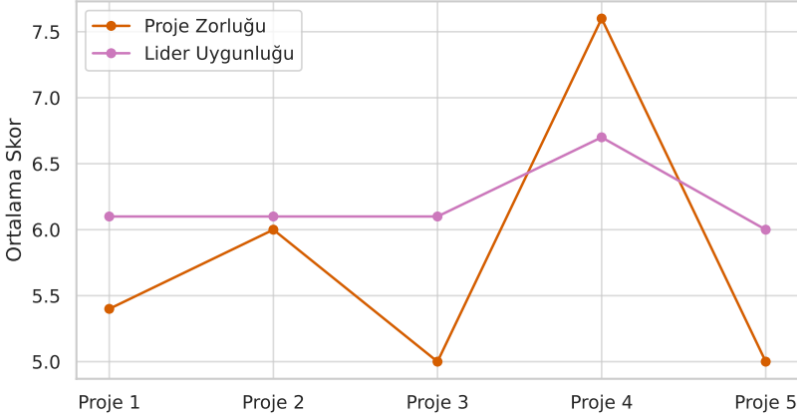
Projeler	Atanan Liderler
Yeni Ürün Geliştirme (P1)	Lider 10
Pazarlama Stratejisi (P2)	Lider 4
Finansal Planlama (P3)	Lider2
İnsan Kaynakları (P4)	Lider 7
Dijital Dönüşüm (P5)	Lider 5

Her proje için sadece bir lider atanmış ve bu kısıt tam olarak sağlanmıştır. Model, 10 lider arasından yalnızca 5’ini atamış, kalanları atamamıştır. Bu durum, çözümün yalnızca uygunluk puanına değil, aynı zamanda yetkinlik seviyesini sağlama ve iş yükü dengesine dayandığını gösterir.

Şekil 1’de her bir liderin atandığı projedeki toplam ağırlıklı uygunluk puanı ile projenin gerektirdiği yetkinlik seviyesi arasındaki farkı göstermektedir. Bu şekil, modelin nasıl çalıştığını açıklamak açısından önemlidir; zira bazı projelerde (mesela Proje 4), gereksinimler çok yüksek olmasına rağmen lider havuzundaki seçenekler sınırlı kalmış ve model bu durumda en az cezayı verecek atamayı tercih etmiştir.



Şekil 1. Uygunluk ve gereksinim karşılaması



Şekil 2. Proje zorluğu ve lider uygunluğu

Şekil 2’de, projelerin zorluk düzeyleri ile atanan liderlerin uygunluk skorları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu analiz, özellikle yüksek zorluk seviyesine sahip projelere en yüksek uygunlukta liderlerin atanması yönündeki model eğilimini göstermektedir. Korelasyonun genel olarak pozitif yönlü olması, modelin temel hedef fonksiyonlarıyla tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak geliştirilen model, yalnızca her projeye lider atanmasını garanti altına almakla kalmamış, aynı zamanda

çok boyutlu karar kriterlerini dikkate alan esnek ve gerçekçi bir yapı sunmuştur. Atamalar hem liderin bireysel yeterliliği hem de proje gereksinimlerinin toplam dengesi göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Model, farklı lider havuzları veya değişen proje gereksinimlerine uyarlanabilecek şekilde genellenebilir yapıdadır.

KAYNAKLAR

- B. Uçakcıoğlu. (2017). Hava savunma sanayisinde yatırım projeleri seçiminin çok ölçütlü karar verme ve hedef programlama ile yapılması (M.Sc.). Kırıkkale Üniversitesi.
- E. H. Özder. (2015). Tedarikçi seçiminde analitik ağ süreci ve hedef programlama tekniklerinin entegrasyonu: Örnek olay çalışması (M.Sc.). Kırıkkale Üniversitesi.
- Erkan, T., & Erdebilli, B. (2012). Selection of academic staff using the fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP): A pilot study. *Tehnicki Vjesnik*, 19.
- Hardeman, R. R., Homan, P. A., Chantarat, T., Davis, B. A. & Brown, T. H. (2022). Improving The Measurement Of Structural Racism To Achieve Antiracist Health Policy. *Health Affairs*, 41(2), 179–186. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2021.01489>
- Kaur, J. & Singh, S. (2024). Investigating Work-Life Balance of STEM Leaders in Academia: A Study of Engineering Colleges in Delhi, India. *IASSI Quarterly*, 43(3), 630. Retrieved from <https://openurl.ebsco.com/contentitem/gcd:180874231?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:gcd:180874231>
- Kuan, C. H. (2021). Leadership, SME and Corona Virus Covid-19 Pandemic in Malaysia. *Universiti Tun Abdul Razak*.
- Ngo, Q. V., Trinh, L. N. & Nguyen, C. X.-T. (2022, February 20). Fostering employee loyalty: Role of empowerment leadership, trust, commitment and satisfaction. 9–17, <https://doi.org/10.15439/2021KM89>
- Rocco, T. S., Morris, M. L. & Poell, R. F. (2024). *The Sage Handbook of Human Resource Development*. SAGE Publications.

- Tamiz, M., & Jones, D. F. (1997). Interactive Frameworks for Investigation of Goal Programming Models: Theory and Practice. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(1), 52–60. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199701\)6:1%253C52::AID-MCDA124%253E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199701)6:1%253C52::AID-MCDA124%253E3.0.CO;2-3)
- Yang, N., Chen, H., & (Frank) Wang, X.-H. (2024). Paradoxical Leadership Behavior and Employee Creative Deviance: The Role of Paradox Mindset and Leader–Member Exchange. *Journal of Business and Psychology*, 39(3), 697–713. <https://doi.org/10.1007/s10869-023-09902-x>
- Yang, Y., Li, Z., Liang, L., & Zhang, X. (2021). Why and when paradoxical leader behavior impact employee creativity: Thriving at work and psychological safety. *Current Psychology*, 40(4), 1911–1922. <https://doi.org/10.1007/s12144-018-0095-1>
- Zheng, M. X., Yuan, Y., van Dijke, M., De Cremer, D., & Van Hiel, A. (2020). The Interactive Effect of a Leader’s Sense of Uniqueness and Sense of Belongingness on Followers’ Perceptions of Leader Authenticity. *Journal of Business Ethics*, 164(3), 515–533. <https://doi.org/10.1007/s10551-018-4070-4>

NEUROERGONOMICS AND MENTAL WORKLOAD: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS WITH A BERT TOPIC MODELING

Nazmiye ELİGÜZEL¹

1. INTRODUCTION

Contemporary work environment, marked by rising automation and intricate human-machine interactions, has highlighted the issue of cognitive overload, emphasizing its vital role in maintaining safety and efficiency in modern workplaces. Although being a young science, Human Factors and Ergonomics has experienced rapid conceptual and methodological advancement. The "cognitive revolution," a term that emerged in the United States during the peak of behaviorism, underscores how a succession of pivotal cognitive studies from the 1950s profoundly influenced ergonomics and other disciplines (Miller, 2003). This cognitive shift subsequently facilitated the emergence of neuroergonomics, a field that integrates neuroscience methodologies with ergonomic concepts. Neuroergonomics, characterized as the study of brain function and behavior in occupational settings (Parasuraman, 2003), is improbable to trigger a comprehensive "neuroscience revolution" that displaces conventional human factors and ergonomics ideas and methodologies. Neuroscience is a scientific field that encompasses the anatomy, physiology, biochemistry, and molecular biology of the nervous system, with particular emphasis on the interplay between the

¹ Asst. Prof. Dr., Gaziantep Islam Science and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, nazmiye.eliguzel@gibtu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6354-8215.

neurological system, behavior, and learning. It is a branch of biology that focuses on the brain and the central nervous system. Neuroergonomics examines the brain, the paramount element of the nervous system, and endeavors to apply insights and advancements from neuroscience to the work environment (Bıyıklı & Kızılkaya Aydoğan, 2015). Neurophysiological instruments, such as electroencephalography and magnetic resonance imaging along with associated conceptual understandings, are anticipated to refine and elucidate critical yet ambiguous concepts, including mental workload (Cegarra et al., 2017). These approaches enhance our comprehension of cognitive processes and provide avenues for the development of adaptive, brain-inspired human-machine systems. Human mental workload is arguably one of the most commonly referenced multidimensional concepts in Human Factors and Ergonomics, receiving increasing attention in both Neuroscience and Neuroergonomics (Longo et al., 2022). It is a multifaceted, dynamic, and individual-specific phenomenon, reflecting the complex interaction between task demands, cognitive resources, and environmental factors. Although neuroergonomics and mental workload have gained growing scientific attention, a comprehensive understanding of how these research streams have evolved conceptually, thematically, and collaboratively remains limited. Previous works have largely concentrated on experimental studies or domain-specific applications without examining the overall intellectual structure of the field. To fill this gap, the present study employs a bibliometric analysis to explore the scholarly landscape of neuroergonomics and mental workload. Using the Bibliometrix package in R, the analysis identifies key contributors, influential journals, collaboration patterns, and thematic evolution within the field. This systematic approach provides a comprehensive understanding of how research in neuroergonomics and mental workload has developed conceptually and collaboratively over time. In a

complementary step, we also applied BERTopic (using Sentence-BERT embeddings, UMAP dimensionality reduction, and class-based TF-IDF) to extract latent topics and keyword clusters at the document level, thereby revealing coherent thematic structures, such as EEG-based performance modeling, vigilance under environmental demands, and fNIRS-based prefrontal workload assessment and enabling triangulation between network-level bibliometric patterns and text-level themes. Together, the bibliometric indicators and BERTopic results clarify who contributes, how research networks are structured, which themes dominate the literature, and where emerging directions and conceptual intersections lie within the neuroergonomics–mental workload nexus. Before presenting the results, we briefly outline the theoretical underpinnings of neuroergonomics and mental workload, highlighting how their integration shapes contemporary human factors research.

1. THEORETICAL FRAMEWORK

To thoroughly understand the conceptual framework and thematic evolution of neuroergonomics and mental workload literature, a robust comprehension of the theoretical foundations of these interconnected concepts is essential. This section is initially explore the foundational principles and methodologies of neuroergonomics, then addressing different aspects of mental workload. Ultimately, it is examine the synergy generated at the intersection of these two fields and how this combination influences contemporary human factors research.

2.1 Foundation Principles of Neuroergonomics

Neuroergonomics is the examination of brain and behavioral functions within occupational settings, emphasizing

the comprehension of neural mechanisms that govern perceptual and cognitive processes including perception, attention, memory, decision-making, and planning in relation to practical technologies and environments (Hardy, 2021). It combines principles from ergonomics, neuroscience, and human factors to produce significant insights into brain activity and human behavior in real-world contexts (Mehta & Parasuraman, 2013). Neuroergonomic measurement approaches are fundamentally dependent on brain imaging techniques. Commonly utilized brain imaging techniques in the literature are Electroencephalography (EEG), Positron Emission Tomography (PET), functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI), and functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) (Adem et al., 2019). EEG records neural activity through voltage fluctuations on the scalp and can monitor continuous brain wave patterns, or oscillations, across different frequency bands that reflect mental states, as well as event-related potentials generated in response to external stimuli (Brandt-Rauf & Ayaz, 2024). The PET approach provides active brain areas by assessing neuronal metabolic activity (Adem et al., 2019). fMRI measures brain blood flow and elucidates the regions engaged during cognitive tasks (Adem et al., 2019). fNIRS is a technique that yields insights into brain activity by detecting the concentrations of oxyhemoglobin and deoxyhemoglobin in tissues (Bıyıklı & Kızılkaya Aydoğan, 2015). These neuroimaging techniques collectively offer significant insights into the brain systems that underpin human cognition and performance, establishing the empirical basis of neuroergonomic research.

2.2 Mental Workload

Mental workload is typically described as the amount of cognitive effort necessary to accomplish a task (Babaei et al.,

2025). The concept of mental workload emerges when operators encounter intricate activities necessitating split or continuous concentration, whereby minor mistakes can yield significant repercussions. It is similarly pertinent in repetitive tasks, when diminished stimulus impairs alertness and performance. Consequently, optimal, not minimal, cognitive workload levels are crucial for attaining peak human performance (Prasetyo & Iridiastadi, 2025). Mental workload significantly influences performance in high-risk sectors such as aviation, transportation, medicine, and construction (Diarra et al., 2025). In the medical field, increased mental workload among physicians has been correlated with heightened error rates (Byrne, 2013; Mazur et al., 2014). In the construction sector, mental workload functions as a psychological stressor (Umer, 2022) that may lead to accidents caused by inattentive blindness (Chen et al., 2016). Similarly, in extensively automated industrial environments, the intricacy of tasks and the existence of several human-machine interactions significantly increase mental workload and perceived stress among operators (Kumar & Lee, 2022). Maintaining an optimal level of mental workload is therefore essential not only for minimizing human error but also for enhancing situational awareness, decision-making, and overall system reliability.

2.3 Interrelation of Neuroergonomics and Mental Workload

Mental workload has long been linked to ergonomics and human factors research focused on performance in safety-critical environments (Young et al., 2015). All human activities involve cognitive processing and therefore entail some level of mental workload (Longo et al., 2022). Mental workload in human factors research has two primary functions: evaluating

the relationship between humans and task or system demands, and forecasting performance deterioration in safety-critical scenarios. However, the discipline encounters difficulties in establishing a reliable correlation between workload metrics and performance results due to the intricate dynamics of human-task interaction. A further challenge is in the persistent dependence on resource models with limited capacity to elucidate these linkages (Dehais et al., 2020). Over the past three decades, significant progress has enhanced our comprehension of the brain systems that govern attention and human performance. This advancement has been primarily driven by the emergence of advanced and portable neuroimaging technologies that provide non-invasive monitoring of the "brain at work." Neuroergonomics has emerged as a multidisciplinary discipline that investigates the correlation between brain function and human performance in both occupational and everyday contexts, stemming from these technological advancements. The main aim is to integrate theories and principles from ergonomics, neurology, and human factors to enhance our comprehension of how neurological processes affect behavior and performance in everyday environments (Dehais et al., 2020; Parasuraman, 2008). The intersection of neuroergonomics and mental workload provides a comprehensive framework for examining the cognitive mechanisms underlying human performance. This synergy enables the conversion of neural insights into practical ergonomic applications, bridging the gap between brain research and real-world task design.

2. METHODOLOGY

This research maps the academic field of neuroergonomics and mental workload using a bibliometric

analysis utilizing the Bibliometrix package in R, identifying principal contributors, prominent publications, collaborative networks, and topic progression. In conjunction, we utilize BERTopic, employing Sentence-BERT embeddings, UMAP, and class-based TF-IDF to extract document-level latent topics and keyword clusters, therefore uncovering cohesive thematic structures.

3.1 Bibliometric Analysis

A Scopus query run on October 05, 2025 with the targeted terms “neuroergonomics” and “mental workload” generated a dataset of 102 items. Using the open-source Bibliometrix package in R and its Biblioshiny frontend (Aria & Cuccurullo, 2017), we carried out all bibliometric and network analyses to provide a reproducible and comprehensive portrayal of the literature. Figures 1–6 depict yearly publication output, average citations per year, most relevant words, emerging trend topics, keyword co-occurrence networks, and the major thematic structures in the field.

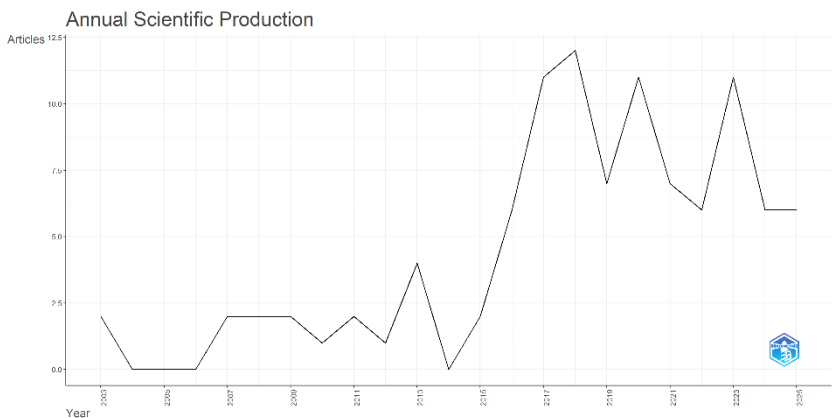


Figure 1 Documents per year in the field

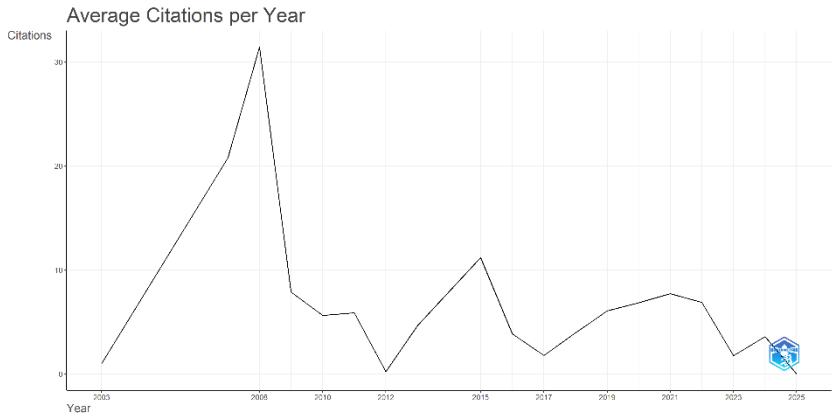


Figure 2 Average citations per year

Figure 1 and Figure 2 delineate the evolution of the field from its inception to its maturity. The output consists of three phases: Formative (2003–2014) characterized by few and irregular publications (<3 papers/year); Growth (2015–2018) marked by a significant increase to over 12 papers by 2018; and Mature (2018–present) exhibiting consistent although fluctuating high output influenced by conferences, special issues, and funding cycles. Citations exhibit a Lifecycle of Impact: an initial peak around 2008, influenced by some key works during a period of low volume, followed by normalization and maturity (2009–present) as publication counts increase and average impact stabilizes. A recent minor decline probably indicates a citation lag for more recent publications. The field transitioned from a niche driven by a few important publications to a stable, well-established community characterized by high, consistent output and moderated average citations.

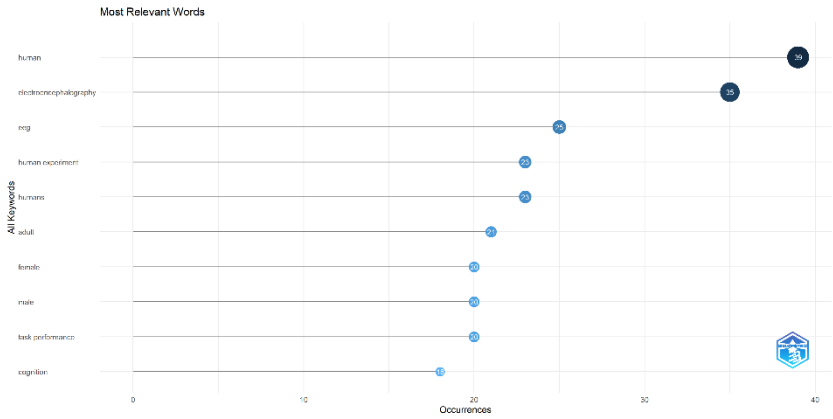


Figure 3 Most relevant words in the field

Figure 3 presents the dot plot of the top 10 keywords in neuroergonomics and mental workload shows a clear hierarchy consistent with prior analyses. (1) Human-centric focus: “human” (39) leads, supported by “human experiment” (23), “humans” (23), “adult” (21), “female” (20), and “male” (20), indicating participant-based studies. (2) Methodological core: “electroencephalography” (35) and “EEG” (25) total 60 mentions, confirming EEG as the dominant neurophysiological tool. (3) Outcomes of interest: “task performance” (20) and “cognition” (18) underscore performance and cognitive states as primary dependent variables. Overall, the field centers on EEG applied to human subjects to assess cognition and task performance, defining the domain’s core structure.

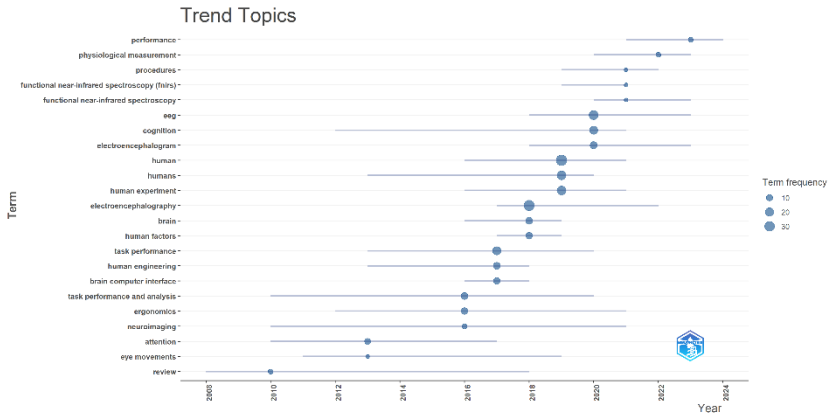


Figure 4 Trend topics over time in the field

Figure 4 indicates trend topics (2008–present) by plotting keywords against time: dot position = average publication year, size = frequency, and horizontal line = span of use. Three phases emerge. (1) Early foundations (pre-2016): “review” (~2010) and “eye movements” (~2013) dominate, reflecting consolidation via behavioral measures before widespread neurophysiology. (2) Mature core (~2016–2019): large, frequent terms, human/humans/human experiment and electroencephalography/EEG cluster here, alongside the maturation of task performance, ergonomics, and brain-computer interface. (3) Recent/emerging (2020–present): right-shifted terms—performance, physiological measurement, procedures—(avg. >2022) signal broader performance constructs, multimodal physiology, and more standardized protocols. Notably, fNIRS peaks around 2021, indicating rising adoption relative to the slightly earlier EEG peak. Overall, the field progresses from foundational synthesis, through EEG-centered consolidation, to methodological expansion.

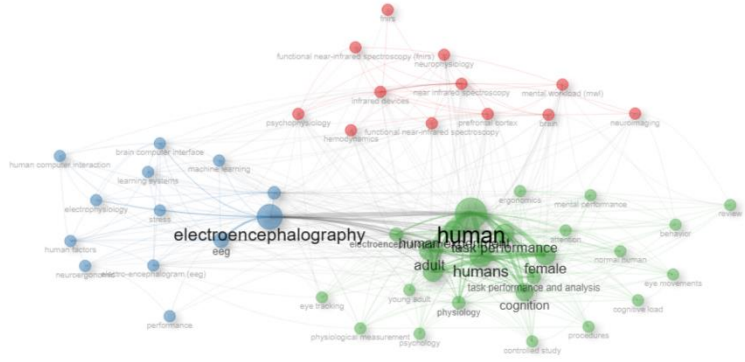


Figure 5 Keyword co-occurrence network in the field

Network analysis indicates a three-cluster organization of the field. The Human Performance and Cognition cluster (green) forms the conceptual core, represented by terms such as human, task performance, cognition, mental performance, and eye tracking, and it maintains strong ties to the other clusters, underscoring the ultimate focus on evaluating the human element. The EEG-Based Methods and Applications cluster (blue) is centered on electroencephalography (EEG) and connects to brain–computer interface, machine learning, human–computer interaction, and stress, highlighting computational approaches that classify states such as stress and cognitive load from EEG data. The fNIRS and Neuroimaging cluster (red) focuses on functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), closely associated with neuroimaging, prefrontal cortex, neurophysiology, and hemodynamics, and emphasizes hemodynamic responses—particularly in the prefrontal cortex—relevant to executive functions and workload assessment. Collectively, this structure shows that two primary neurophysiological measurement technologies, EEG and fNIRS, are applied to a shared conceptual core of human performance

and cognition, with human task performance operating as a critical bridge between methodological advances and practical applications—evidence of the field’s strongly interdisciplinary integration of engineering and neuroscience within human factors.

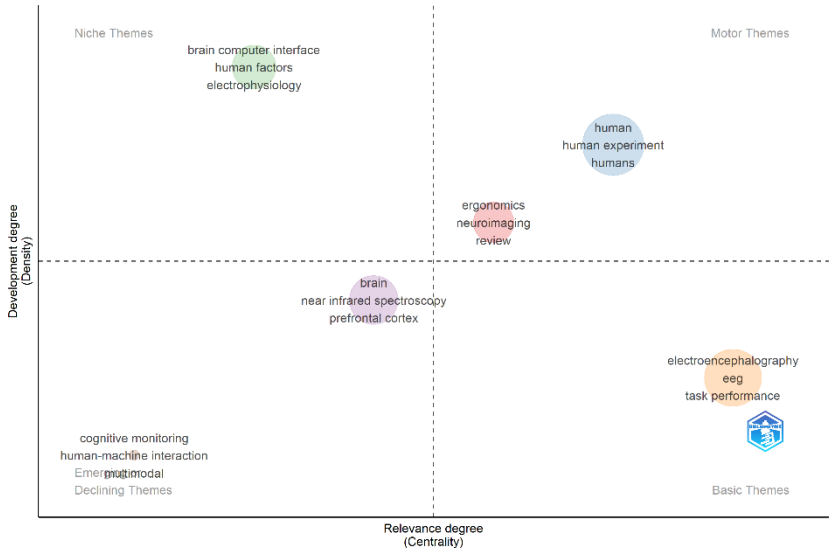


Figure 6 Thematic map in the field

Figure 6 displays a thematic map positioning research themes by Relevance (Centrality) on the x-axis and Development (Density) on the y-axis. Higher centrality denotes themes that are more integral and connective; higher density indicates stronger internal coherence. Four quadrants emerge. Motor Themes (upper-right) are both central and well developed: clusters such as human/human experiment/humans and ergonomics/neuroimaging confirm a mature, human-centered experimental core. Basic Themes (lower-right) are important but less cohesive, with electroencephalography/EEG/task performance functioning as foundational, cross-cutting tools. Niche Themes (upper-left) are

specialized yet well developed, e.g., brain–computer interface/human factors/electrophysiology coherent but more peripheral. Emerging/Declining Themes (lower-left) are weakly developed and marginal; clusters like cognitive monitoring/human–machine interaction/multimodal likely indicate emerging fronts, while the fNIRS cluster (brain/near-infrared spectroscopy) appears as an emerging or less integrated methodology relative to EEG. Overall, the map depicts a mature, human-subject core grounded in EEG and task-performance analysis, alongside specialized niches (e.g., BCI) and nascent multimodal directions.

3.2 BERT Topic Modeling

BERT, introduced by Devlin et al. (2018) in 2018, is a transformer-based model consisting of stacked encoder blocks that utilize attention mechanisms to capture linguistic context. The text undergoes tokenization, with each token being assigned a contextualized vector in BERT's output. Utilizing Sentence-BERT embeddings, UMAP for dimensionality reduction, and BERTopic with class-based TF-IDF, our analysis decomposed the corpus into three primary topics: EEG-based modeling of cognitive function, vigilance and task performance under environmental constraints, and fNIRS-based evaluations of prefrontal workload.

First topic — EEG Markers of Cognitive Workload and Performance in Applied Settings: Framed as “EEG Markers of Cognitive Workload and Performance in Applied Settings,” this stream uses EEG to quantify cognitive processing and task performance in realistic or semi-ecological, “work-like” environments. The research focuses on task demands, attentional allocation, learning outcomes, and performance prediction, typically extracting power-spectral indices (e.g., alpha–theta

dynamics), event-related potentials, and connectivity measures, then mapping these features to performance with supervised models. Applications encompass operator state monitoring, evaluating training efficacy, designing adaptive human-machine interactions, and forecasting performance in safety-critical contexts.

Second topic — Vigilance and Task Performance under Environmental Constraints: The topic can be summed up as "vigilance and task performance under environmental constraints," focusing on sustained attention paradigms where environmental factors, such as noise, complexity, or multitasking affect vigilance, speed-accuracy trade-offs, and fatigue. This approach methodologically integrates psychometric vigilance assessments with reaction-time and accuracy measurements, as well as oculomotor indicators (e.g., saccade latency, fixation metrics), occasionally in conjunction with physiological signals. The insights guide control room operations, flight simulation, and surveillance duties, directing rest break design and adaptive interface regulations.

Third topic — fNIRS-Based Evaluations of Prefrontal Workload: The topic titled “fNIRS-based evaluations of prefrontal workload” measures prefrontal cortex activation during cognitive activities, focusing on working memory, situational awareness, and the impacts of display modality. The resulting applications encompass real-time workload monitoring for human-machine interaction design, training evaluation, and dual-task assessment in environments conducive to motion-tolerant sensing.

In summary, the combined bibliometric and topic modeling analyses reveal that research on neuroergonomics and mental workload has evolved into a mature, multidisciplinary domain grounded in the integration of neuroscience and human

factors. The bibliometric results highlight a human-centered experimental foundation, dominated by EEG and increasingly supported by fNIRS, while the topic modeling findings demonstrate three coherent research streams addressing cognitive workload measurement, vigilance under environmental constraints, and prefrontal activation patterns. Collectively, these results underscore a clear way toward multimodal, context-aware, and data-driven approaches that advance the understanding of how neural activity and cognitive performance interact in complex operational settings. This convergence of neurophysiological measurement and applied ergonomics not only enriches theoretical insight but also lays the groundwork for adaptive, brain-informed system design in future human–machine interaction research.

3. CONCLUSION

This study provided a comprehensive mapping of the neuroergonomics and mental workload research domain utilizing a combined bibliometric and topic modeling methodology. The bibliometric study delineated the intellectual, collaborative, and thematic framework of the area, uncovering a robust human-centered basis supported by neurophysiological techniques such as EEG and fNIRS. The results demonstrate that research has evolved from initial behavioral studies to a developed, interdisciplinary field connecting neuroscience, human factors, and ergonomics. The topic modeling analysis clarified the conceptual structure of the literature by revealing three predominant research directions: EEG-based modeling of cognitive workload and task performance, vigilance and attention within environmental constraints, and fNIRS-based assessments of prefrontal activation and workload. These topics collectively demonstrate the increasing transition towards

multimodal, ecologically valid, and data-driven methodologies for comprehending cognitive processes in everyday environments.

Overall, the results emphasize that neuroergonomics serves as a bridge between neuroscience and applied ergonomics, providing methodologies and structures for evaluating and enhancing human performance in complex systems. Subsequent research should further this integration by utilizing artificial intelligence and real-time neurophysiological data to create adaptive, brain-informed systems that improve safety, productivity, and well-being in more automated workplaces.

KAYNAKLAR

- Adem, A., Çakıt, E., & Dağdeviren, M. (2019). Nöroergonomi Çalışmalarına Yönelik Bir Literatür Araştırması. *Ergonomi*, 2(2), 131–136. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.483197>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Babaei, E., Dingler, T., Tag, B., & Velloso, E. (2025). Should we use the NASA-TLX in HCI? A review of theoretical and methodological issues around Mental Workload Measurement. *International Journal of Human Computer Studies*, 201(June 2024), 103515. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2025.103515>
- Bıyıklı, Ö., & Kızılkaya Aydoğan, E. (2015). Nöroergonomi ve Temel Uygulama Alanları. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 173–179. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jesd/issue/20874/224017>
- Brandt-Rauf, P. W., & Ayaz, H. (2024). Occupational Health and Neuroergonomics: The Future of Wearable Neurotechnologies at the Workplace. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 66(6), 456–460. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000003080>
- Byrne, A. (2013). Mental workload as a key factor in clinical decision making. *Advances in Health Sciences Education*, 18(3), 537–545. <https://doi.org/10.1007/s10459-012-9360-5>
- Cegarra, J., Baracat, B., Calmettes, C., Matton, N., & Capa, R. L. (2017). A Neuroergonomics perspective on mental workload predictions in Jens Rasmussen's SRK

- framework. *Travail Humain*, 80(1), 7–22.
<https://doi.org/10.3917/th.801.0007>
- Chen, J., Song, X., & Lin, Z. (2016). Revealing the “invisible Gorilla” in construction: Estimating construction safety through mental workload assessment. *Automation in Construction*, 63, 173–183.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.018>
- Dehais, F., Lafont, A., Roy, R., & Fairclough, S. (2020). A Neuroergonomics Approach to Mental Workload, Engagement and Human Performance. *Frontiers in Neuroscience*, 14(April), 1–17.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00268>
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Google, K. T., & Language, A. I. (2018). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Naacl-Hlt 2019, Mlm*, 4171–4186. <https://aclanthology.org/N19-1423.pdf>
- Diarra, M., Theurel, J., & Paty, B. (2025). Systematic review of neurophysiological assessment techniques and metrics for mental workload evaluation in real-world settings. *Frontiers in Neuroergonomics*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fnrgo.2025.1584736>
- Hardy, D. J. (2021). Neuroergonomics: A perspective from neuropsychology, with a proposal about workload. *Brain Sciences*, 11(5).
<https://doi.org/10.3390/brainsci11050647>
- Kumar, N., & Lee, S. C. (2022). Human-machine interface in smart factory: A systematic literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, 174(February 2021), 121284.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121284>

- Longo, L., Wickens, C. D., Hancock, P. A., & Hancock, G. M. (2022). Human Mental Workload: A Survey and a Novel Inclusive Definition. *Frontiers in Psychology, 13*(June), 1–26. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.883321>
- Mazur, L. M., Mosaly, P. R., Hoyle, L. M., Jones, E. L., Chera, B. S., & Marks, L. B. (2014). Relating physician's workload with errors during radiation therapy planning. *Practical Radiation Oncology, 4*(2), 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2013.05.010>
- Mehta, R. K., & Parasuraman, R. (2013). Neuroergonomics: A review of applications to physical and cognitive work. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*(DEC), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00889>
- Miller, G. A. (2003). The cognitive revolution: A historical perspective. *Trends in Cognitive Sciences, 7*(3), 141–144. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00029-9)
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: Research and practice. *Theoretical Issues in Ergonomics Science, 4*(1–2), 5–20. <https://doi.org/10.1080/14639220210199753>
- Parasuraman, R. (2008). Neuroergonomics Analyzing Brain Function to Enhance Human Performance in Complex Systems Raja Parasuraman. *Security, May*.
- Prasetyo, R. A. B., & Iridiastadi, H. (2025). Mental Workload: Definition and Measurement Review. *International Journal of Technology, 16*(5), 1854–1876. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v16i5.7072>
- Umer, W. (2022). Simultaneous monitoring of physical and mental stress for construction tasks using physiological measures. *Journal of Building Engineering, 46*(August 2021), 103777. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103777>

Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: mental workload in ergonomics. In *Ergonomics* (Vol. 58, Issue 1, pp. 1–17). Taylor & Francis.
<https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151>

ZİHİNSEL İŞ YÜKÜ ÖLÇÜMÜNÜN ÖNEMİ VE NASA-TLX YÖNTEMİ

Özge MUCUK¹

Bahar ÖZYÖRÜK²

1. GİRİŞ

Günümüz çalışma ortamında iş yükü tanımı, hem çalışanların refahını hem de iş verimliliğini etkileyen ana unsurlardan biri haline gelmiştir. Eskiden iş yükü denildiğinde genellikle fiziksel güç, enerji harcaması ve bedensel çaba akla gelirdi fakat sanayi devriminin getirdiği teknolojik değişim ile birlikte, makineler insanların fiziksel yükünü önemli ve büyük ölçüde azaltmıştır. Bu gelişme, iş yükü kavramının akışını fiziksel çabadan zihinsel çabaya doğru evirmiştir.

Modern çalışma ortamlarında çalışanlar artık fiziksel güçten çok dikkat, hafıza, problem çözme ve karar verme gibi becerilerini geliştirmek zorunda kalmaktadır. Bu sebeple iş yükünün değerlendirilmesi sadece yapılan işin ölçüsüyle miktarıyla değil, çalışan kişinin zihinsel kapasitesine olan etkisiyle de ilişkilendirilmektedir. (Young & Stanton, 2002).

İşletmeler verimliliği artırmaya, çalışanlar ise üstlerindeki iş yükünü azaltarak daha dengeli ve çalışılabilir bir düzen kurmaya çabalamaktadır. Bu nedenle, iş yükünün doğru ölçülmesi hem üretkenliği yükseltmek hem de çalışanların

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Bölümü, ozgekurunn@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5163-0342.

² Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırgızistan-Türkiye Manas Üniv., Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, bahar@gazi.edu.tr, baharozyoruk@manas.edu.kg, ORCID: 0000-0001-5434-6697.

tükenmişlik, stres ve hata riskini azaltmak açısından büyük önem taşır. (Hart & Staveland, 1988).

Zihinsel iş yükü, çalışanın bir görevi yerine getirirken harcadığı bilişsel çabanın, mevcut zihinsel kapasitesiyle olan ilişkisini tanımlar. Başka bir deyişle, çalışanın dikkat, hafıza, karar verme ve problem çözme becerilerini hangi ölçüde kullandığıyla ilgilidir. (Emeç & Akkaya, 2018). Zihinsel iş yükünün yüksek olması, performansın düşmesine, hata oranlarının artmasına ve tükenmişlik hissine yol açabilirken; düşük düzeyde olması da motivasyon kaybı ve dikkatin dağılması gibi kötü sonuçlar doğurabildiği görülmektedir. (Gönen Ocaktan, Karaoğlan & Akça, 2021).

Bu sebeple, zihinsel iş yükünün ölçülmesi hem çalışan verimliliğini artırmak hem de iş güvenliği ve refahını sağlamak açısından büyük öneme sahiptir. Literatürde zihinsel çalışma yükünü değerlendirmek amacıyla fazlası ile yöntem geliştirilmiş olsa bile, NASA-Task Load Index (NASA-TLX) yöntemi, pratikliği ve çok boyutlu yapısı nedeniyle en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. (Hart & Staveland, 1988; Tosun & Yılmaz, 2023).

NASA-TLX yöntemi çalışanın bir işi yerine getirirken hissettiği yükü altı boyutta değerlendirir: zihinsel talep, fiziksel talep, zamansal talep, performans, çaba ve rahatsızlık. Bu boyutlar, çalışanın işe ilişkin öznel algısını yansıtır ve zihinsel iş yükünün farklı yönlerini derin bir şekilde analiz etmeyi sağlar. (Çolak & Esen, 2023).

Ülkemizde yapılan değişik araştırmalarda NASA-TLX yöntemi havacılık, sağlık, mühendislik ve yazılım alanlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Örneğin; sağlık sektöründe yapılan bir çalışmada, doktorların zihinsel iş yükü düzeylerinin özellikle “zaman baskısı” ve “performans beklentisi” alt boyutlarında yüksek olduğu görülmüştür. (Tosun & Yılmaz, 2023).

Bu kitap bölümünde iş yükü kavramı ve zihinsel iş yükünün önemine binaen ölçüm yöntemlerine değinilerek NASA-TLX yönteminin diğer zihinsel iş yükü ölçüm yöntemlerinden belirgin farklarından bahsedilecektir.

2. İŞ YÜKÜ NEDİR?

İş yükü, basit bir tanımla çalışanın işini yaparken harcadığı fiziksel, zihinsel ve duygusal çabaların toplamıdır. Ancak bu kavram sadece yapılan işin miktarını değil, kişinin o işi nasıl algıladığını da kapsamaktadır. (Çakıcı, 2013) Günümüzde ise gelişen teknoloji ve dijitalleşmenin etkisiyle iş yükü fiziksel çabadan çok zihinsel çabaya evrilmiştir.

Turhan'a (2001) göre iş yükü; çalışana verilen görevlerin sayısı, zorluğu, süresi ve karmaşıklığı gibi etmenlerle belirlenir. Görevlerin bu yönlerden yoğunlaşması, çalışanın algıladığı yükü artırır. Uysal (2015) bu durumu iki boyutta açıklar: niceliksel iş yükü, yapılması gereken iş miktarını; niteliksel iş yükü ise işin zorluk derecesi ve bilişsel çaba düzeyini ifade eder.

Her çalışan aslında aynı olan işleri farklı şekilde anlayabilir. Deneyim, bilgi, stresle başa çıkabilme, ilgi alanı ve motivasyon gibi kişisel faktörler iş yükü hissini direk etkiler. (Kanbur, 2016). Bu sebeple iş yükü sadece görevlerin sayısıyla değil, çalışanın psikolojik ve bilişsel becerileriyle de ilgilidir.

Aşırı iş yükünün olması çalışanda yorgunluk, hata oranı ve stres düzeyini fazlasıyla artırırken, çok düşük iş yükü de sıradanlık ve işte motivasyon kaybına neden olabilir. (Tatlı & Akin, 2017). Bundan dolayı iş yükünün çalışanın kapasitesine göre dengelenmesi hem çalışan refahı hem de iş verimliliği açısından oldukça önemlidir.

3. ZİHİNSEL İŞ YÜKÜ ÖLÇÜM METODOLOJİLERİ

Zihinsel iş yükünün doğru bir şekilde ölçülmesi hem çalışan performansının hem de sistemin doğru analiz edilebilmesi için çok önemlidir. Günümüzde zihinsel iş yükünü belirlemek için kullanılan yöntemler genel olarak üç ana grupta toplanır: öznel (subjektif) yöntemler, fizyolojik yöntemler ve performans temelli yöntemler. (Çolak & Esen, 2023; Emeç & Akkaya, 2018).

3.1. Öznel Yöntemler

Öznel yöntemler ile çalışanın kendisinde hissettiği iş yükünü değerlendirir. Bu yöntemler çalışanların deneyimlerini doğrudan ölçer bu sebeple hızlı ve uygulaması kolaydır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri NASA-TLX yöntemidir. NASA-TLX; zihinsel, fiziksel ve zamansal boyutların yanı sıra performans, çaba ve rahatsızlık boyutlarını da değerlendirir. Ankete katılanlar bu boyutlara 0 ile 100 arasında puan verir ve sonuçta genel zihinsel iş yükünün puanı elde edilmiş olur. (Hart & Staveland, 1988).

3.2. Fizyolojik Yöntemler

Fizyolojik yöntemler, çalışanın görevi yaparken gösterdiği bedensel tepkileri ve uğraşını ölçerek zihinsel iş yükünü dolaylı biçimde hesaplamayı amaçlar. Kalp atış hızı, deri iletkenliği, göz hareketleri, beyin dalgaları (EEG) ve kan basıncı gibi biyolojik bulguları kullanır. Keleş (2022) tarafından yapılan çalışmada, cerrahların zihinsel iş yükü düzeyleri işlevsel beyin görüntüleme (fNIRS) yöntemiyle değerlendirilmiş ve operasyon süresince artan bilişsel çabanın beyin aktivitesine döndüğü görülmüştür. Bu tür yöntemler bize yüksek doğruluk sağlar fakat uygulama süreci karmaşık ve oldukça maliyetlidir.

3.3. Performans Temelli Yöntemler

Performans temelli ölçümler, çalışanın görevi tamamlama süresi, hata oranı veya tepki süresi gibi sonuçlara odaklanır. Temel olarak iş yükü arttıkça performansın düşeceğini savunur. Elbette bu ilişki her zaman doğrusal değildir. Bazı durumlarda deneyimli bir çalışanın yoğun geçen iş temposunda bile istikrarlı bir şekilde çalışabildiğini gösterebilmektedir. Bu nedenle, performans temelli yöntemler genellikle öznel veya fizyolojik yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır ki bizlere doğru sonuç versin. (Gönen Ocaktan, Karaoğlan & Akça, 2021)

4. NASA-TLX YÖNTEMİNİN DİĞER YÖNTEMLERDEN EN BELİRGİN FARKLARI

Zihinsel iş yükünü ölçmek için kullanılan değişik yöntemler olmasına rağmen **NASA-TLX (Task Load Index)** bu yöntemler arasında en kapsamlı ve uygulanabilir olanıdır. Bu yöntemin en önemli farkı ise iş yükünü tek bir boyutta değil, birbirinden farklı altı bileşenden değerlendirmesidir: zihinsel talep, fiziksel talep, zamansal talep, performans, çaba ve rahatsızlık. Bir den fazla boyutlu yaklaşım, iş yükünü yalnızca “ne kadar zorlayıcıydı?” şeklinde değil, “hangi yönüyle zorlayıcıydı?” biçiminde analiz etmeyi sağlar. Bu yönüyle NASA-TLX, diğer tek boyutlu ya da genel değerlendirme yöntemlerinden farklıdır. (Hart & Staveland, 1988).

Bir diğer önemli fark ise NASA-TLX yönteminin katılımcı merkezli bir değerlendirme yapısına sahip olmasıdır. Katılımcılar, her altı boyutu da hem önem derecesine hem de kendi algılarına göre puanlar. Bu özellik sayesinde bu yöntem diğer yöntemlere göre daha öznel ve kişiseldir. Her çalışanın iş yükünü farklı algılayabileceği gerçeği göz önüne alındığında, bu

yaklaşım ölçümün güvenilirliğini artırmaktadır. (Emeç & Akkaya, 2018).

NASA-TLX yöntemini uygulamakta oldukça kolaydır. Fizyolojik yöntemler (örneğin EEG, kalp atım hızı ya da göz hareketi ölçümleri) yüksek doğruluk sunsa da, laboratuvar koşulları ve maliyet açısından zorluklar barındırır. NASA-TLX yöntemi ise kısa sürede uygulanabilen, düşük maliyetli ve geniş katılımcı gruplarında bile kullanılabilir. Bu yönleri ile hem akademik çalışmalarda hem de saha uygulamalarında tercih edilmektedir. (Çolak & Esen, 2023).

Yöntemin bir diğer belirgin farkı ise veri analizine olan esnekliğidir. NASA-TLX verileri, yalnızca ortalama puanlarla değil; ağırlıklandırılmış skorlarla da analiz edilebilir. Güncel çalışmalarda bu veriler, bulanık mantık ve çok kriterli karar verme yaklaşımlarıyla birleştirilerek yorumlanmaktadır. Böylece, klasik öznel ölçüm yöntemlerinden çok daha analitik bir yapı ortaya çıkmaktadır. (Gönen Ocaktan, Karaoğlan & Akça, 2021; Çolak & Esen, 2023).

Özetleyecek olursak NASA-TLX yönteminin diğer yöntemlerden temel farkları; çok boyutlu yapısı, öznel katılımı esas alması, uygulama kolaylığı, analitik esnekliği, düşük maliyete sahip olması ve sonuçları ile iş tasarımına katkı sağlayan yönleridir.

5. SONUÇ

Zihinsel, fiziksel ve zamansal taleplerin yanı sıra performans, çaba ve rahatsızlık gibi altı boyutu içeren NASA-TLX yöntemi çalışmada oluşan iş yükünü kolaylıkla ölçebilmektedir. Güçlü yönü farklı meslek gruplarında kolaylıkla uyarlanabilmesidir. Sağlık, üretim, havacılık, yazılım ve mühendislik gibi alanlarda bir çok çalışma yapılmıştır.

Bunun yanı sıra, NASA-TLX verilerinin çok kriterli karar verme ve bulanık mantık gibi analitik yöntemlerle birleştirilebilmesi, yöntemi güncel veri analiziyle de uyumlu hale getirmiştir. (Gönen Ocaktan, Karaoğlan & Akça, 2021).

Zihinsel iş yükünün doğru olarak ölçülmesi, modern iş ortamlarında sadece bir araştırma konusu değil, aynı zamanda insan verimliliğini ve iş güvenliğini korumanın temel koşuludur. Çünkü her görev, çalışan üzerinde farklı düzeylerde zihinsel baskı oluşturur ve bu baskının ölçülememesi, hem performans kaybına hem de tükenmişliğe yol açabilmektedir.

Bu bağlamda **NASA-TLX** yöntemi, zihinsel iş yükünü değerlendirmede en etkili araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Yöntem; zihinsel, fiziksel, zamansal talep, performans, çaba ve rahatsızlık gibi altı farklı açıdan analiz yaptığı için sadece “darboğaz var mı?” sorusunu değil, “darboğaz nereden kaynaklanıyor?” sorusunu da yanıtlar. Böylece araştırmacılara ve yöneticilere yalnızca bir ölçüm sonucu değil, karar verme ve iyileştirme fırsatı da sunar.

NASA-TLX yönteminin en değerli yanı ise ölçümü insanın algısına göre sonuçlandırmasıdır. Çalışanların kendi deneyimlerini yansıtmalarına imkan tanıyarak, iş yükünün kişisel boyutlarını görünür kılar. Bu sayede, aynı görevin farklı çalışanlar için farklı zorluk seviyesine sahip olduğunu ortaya çıkarır. Bu sonuç görev dağılımı, vardiya planlaması ve iş tasarımı gibi süreçlerde önemli bir yol gösterici olur.

Sonuç olarak NASA-TLX yöntemi zihinsel iş yükünü ölçmekten öte, insanı merkeze alan bir değerlendirme yapar. Çalışanın zihinsel kapasitesiyle görevleri arasındaki dengeyi görünür hale getirir. Bu denge sağlandığında yalnızca üretkenlik değil, çalışan refahı ve kurumsal sürdürülebilirlik de artar. Kısacası, NASA-TLX yöntemi zihinsel yükün sayısal bir değerden ibaret olmadığını, doğru ölçüldüğünde iş yaşamını

daha sağlıklı ve verimli hale getirebilecek bir güç olduğunu bizlere göstermektedir.

KAYNAKLAR

Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002). Malleable attentional resources theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44(3), 365–375.

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). Amsterdam: North-Holland Press.

Gönen Ocaktan, D., Karaoğlan, A. D. & Akça, A. (2021). Tekrarlanan işlerde algılanan zihinsel iş yükü: NASA-TLX yöntemi ve bulanık önceliklendirme yaklaşımı. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 84-95.

Tosun, S. & Yılmaz, İ. (2023). Uzman ve pratisyen doktorların zihinsel iş yüklerinin NASA-TLX yöntemi ile karşılaştırılması. *ArcEng Mühendislik Dergisi*, 8(2), 45-53.

Çolak, M., & Esen, H. (2023). ARALIK tip-2 bulanık tabanlı NASA-TLX yöntemi kullanılarak zihinsel iş yükünün değerlendirilmesi: Otomotiv sektöründe bir uygulama. *Ergonomi*, 6(3), 157-169.

Çakıcı, A. (2013). İş yükü yoğunluğunun iş ve yaşam doyumuna etkisi: Otomotiv işletmelerinde bir araştırma. *Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(2), 1-15.

Turhan, M. (2001). İş yükü ve iş performansı arasındaki ilişki üzerine bir araştırma. *Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 55-68.

Kanbur, E. (2016). Aşırı iş yükünün iş ve yaşam doyumunu üzerindeki etkisi: İşe bağlı gerginliğin aracılık rolü. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 8(3), 220-237.

Tatlı, M., & Akin, H. B. (2017). Tükenmişlik ile iş yükü algısı arasındaki ilişki: Aksaray Defterdarlığı çalışanları örneği. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(4), 93-108.

Keleş, H. O. (2022). Cerrahların zihinsel iş yükü değerlendirilmesinde işlevsel beyin görüntüleme uygulamaları. *Türk Nöroşirürji Dergisi*, 32(2), 300-304.

Emeç, Ş., & Akkaya, G. (2018). Sağlık sektöründe zihinsel iş yükü değerlendirmesi ve bir uygulama. *Ergonomi*, 1(3), 156-162.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TRANSFORMING ENERGY SYSTEMS: A CONCEPTUAL AND INTERDISCIPLINARY PERSPECTIVE

Kübra Nur ŞAHİN¹

1. INTRODUCTION

The global energy transition, climate action initiatives, and the digitalization of infrastructure are key forces reshaping conventional energy systems. In recent years, population growth, industrialization and the widespread adoption of technology have substantially increased global energy demand. The rising energy demand has intensified the environmental burden of fossil fuel-dominated energy production, accelerating greenhouse gas emissions thereby amplifying the risks linked to global climate change.

Technological advancements particularly the emergence of Internet of Things (IoT) based sensors and communication devices have enabled real-time, high-resolution monitoring of energy consumption and generation. The integration of IoT data with artificial intelligence (AI) and cloud computing technologies has facilitated the development of smart grids.

A smart grid is essentially an electricity distribution network that integrates operational, informational, and communication technologies into a unified system. It enables real-time, two-way information exchange at every stage, from

¹ Research Assistant Dr., Abdullah Gul University, Engineering Faculty, Department of Industrial Engineering, kubranur.sahin@agu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9786-6270.

energy production to consumption, thus creating a sustainable, secure, and energy-efficient network.

Smart grids utilize advanced information technology platforms such as IoT sensors, cloud analytics, and distributed control algorithms to transform the traditional transmission and distribution network into a network that can both be traced and controlled in real time. By measuring generation, storage, and consumption at every node continuously with high frequency, the network operator is able to monitor and also control the grid operations, thereby ensuring the reliability and resilience of the grid in spite of the inherent variability of renewable resources such as wind, solar, and biogas.

Their core functions include enabling the active participation of end-users, ensuring the full integration of distributed energy resources and storage units, and supporting wide-area communication infrastructure such as servers, gateways, and network systems.

To coordinate all their components simultaneously in real time, smart grids require comprehensive energy management systems which perform demand-response and dynamic pricing operations to optimizing both energy utilization and coordination.

In this context, IoT-enabled smart grids encourage the adoption of renewable energy technologies and contribute to reducing the carbon emission by enabling real time monitoring the grid operations. Decarbonizing energy networks not only accelerates progress toward climate objectives but also paves the way for a sustainable, intelligent, and resilient energy future.

Due to the constant flow of real-time data and the increasing complexity of decentralized energy systems, traditional control and optimization techniques are becoming more ineffective. Systems with the ability to learn, adapt, and

make decisions on their own are vital for managing such dynamic and stochastic environments. The IoT-enabled smart grids systems are enhanced by artificial intelligence (AI), that transforms massive data streams into practical information that facilitates autonomous, adaptive, and intelligent energy management.

2. CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF AI IN ENERGY SYSTEMS

2.1. From Automation to Intelligence

The development of energy systems demonstrates an ongoing transformation from rule-based and mechanical automation to intelligence that is adaptable and learning-based. Early electrification automation was mostly dependent on deterministic control rules and fixed control parameters, which were established to maintain grid efficiency and stability under clearly defined and quite predictable circumstances. Traditional optimization methods, programmable logic controllers (PLCs), and supervisory control and data acquisition (SCADA) systems were developed to react to disruptions or variations in demand using pre-programmed responses. Despite being effective in the context of centralized energy generation and unidirectional power transmission, these traditional techniques offered limited flexibility in addressing the stochastic variability introduced by the intrinsic characteristics of renewable energy sources.

Power systems nowadays operate in a completely different environment due to the growing use of distributed energy resources (DERs), prosumer engagement, and bidirectional energy flows. These advancements resulted in environments that are more complex than those that can be handled by classic energy management frameworks, with high data intensity, frequent uncertainty, and real-time decision

requirements. The consequence is a shift from classic automated architectures to intelligent architectures in energy management systems. Data-driven decision-making has been made possible by the digital transformation of the energy sector, which has been fueled by advancements in computational power, communication protocols, and sensing technologies (Wang, 2011).

In this regard, AI based approaches serves as the enabling approach for reaching the next level of adaptability. Artificial intelligence, through the use of perception, reasoning, and learning, radically changes energy management beyond what is possible with deterministic control logic approaches. The evolution of a system from automation to intelligent management is essentially the expansion of the energy networks which are resilient, adaptive, and robust and can, therefore, achieve the technical, environmental, and economic goals of future energy systems simultaneously. In fact, the use of AI in energy systems is a paradigm shift that takes them out of their traditional static, rule-based frameworks and turns them into dynamic, evolving ecosystems which continuously improve their efficiency by employing intelligence for data analysis.

2.2. Dimensions of Artificial Intelligence in Energy Systems

Perception, reasoning, and action are three interconnected elements that can be used to conceptualize AI in energy systems. These factors combine to create the framework for intelligent behavior in sophisticated data driven systems (Russell & Norvig, 2022).

Perception is a term which refers the ability of the system to sense and comprehend its working environment. With the real time data of the grid infrastructure gathered through IoT sensors and communication devices enable

perception in smart grids (Davis, 2008). Effective perception provides the informational foundation for adaptive management by bridging the digital and physical layers of grids.

Reasoning refers to the analytical and cognitive processes by which AI systems convert raw data into usable knowledge. ML, DL, and RL models are widely used to uncover hidden patterns, detect causal linkages, and produce forecasting (Ghahramani, 2015). Forecasting, anomaly detection, optimal power scheduling, and real-time decision support mechanisms are all developed with reasoning in energy systems.

Perception and reasoning insights are translated into in action that represents the decision and control functions of AI. Intelligent controllers convert analytical findings into adaptive actions such as demand response, distributed power generation coordination, or storage planning using optimization-based decision systems. This process functions independently in comprehensive AI-based systems, guaranteeing effective performance in both decentralized and complex systems.

These dimensions are connected by feedback loops, which is referred as cognitive loop (Albus, 1991). Through continuous learning and engagement, the system can improve its performance and evolve in time. As a result, AI builds a foundation for resilient, sustainable, and self-optimizing energy systems.

AI in smart grids redefines the concepts of optimization and control by integrating cognitive processes into energy management. In that way, these systems become proactive and responsive instead than reactive, striking a balance between sustainability goals and operational efficiency. As discussed in the next section, this conceptual framework provides the

foundation for comprehending how AI changes traditional decision and optimization paradigms.

3. DECISION AND OPTIMIZATION FRAMEWORKS

3.1. Classical Decision Paradigm

Traditional energy management systems have mainly employed rule-based and deterministic optimization techniques for decision-making. The purpose of these traditional paradigms was to provide grid reliability, cost reduction, and stability in comparatively anticipated circumstances. Decision-making processes in centralized power systems were usually focused on single-objective optimization, which aims to minimize loss or cost while meeting operational and physical requirements (Conejo, Carrión, & Morales, 2010). Methods including rule-based control logic, dynamic programming, linear programming, and mixed-integer linear programming (MILP) comprised the analytical foundation of energy management systems. Based on static demand and generation projections, deterministic algorithms carried out scheduling and dispatch while Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) platforms acquired data.

Despite their success in traditional, centrally coordinated grids, these methods were created with the fundamental assumptions of perfect knowledge, limited uncertainty, and fixed decision windows (Bertsimas & Tsitsiklis, 1997). These assumptions limit system flexibility when addressing distributed generation, prosumer engagement, and variations in renewable energy generation. The inability of deterministic optimization to dynamically incorporate uncertainty makes it challenging to handle stochastic inputs, including wind speed, solar irradiance, and changing market pricing (Morales et al., 2014). The

significance of these limits increases as energy systems move toward decentralization.

With the introduction of stochastic and robust optimization frameworks, which incorporated worst-case scenarios or probabilistic distributions into decision-making processes, uncertainty was partially addressed (Ben-Tal & Nemirovski, 2002). Although the flexibility of these models was increased, they are still dependent on pre-established statistical structures and are unable to instantly adjust to changing conditions. Similarly, although rule-based control systems are straightforward to establish, they rely mostly on specific knowledge and need to be adjusted frequently when grid circumstances change. Therefore, rather than anticipating changes through learning or predictive intelligence, classical decision models typically function in a reactive manner, responding to changes after they occurred.

In conclusion, classical optimization and control techniques have a solid mathematical basis but are inevitably restricted in terms of responsiveness, scalability, and flexibility. They are unable to effectively manage distributed and data-intensive modern energy ecosystems due to their reliance on centralized processing and assumptions. These limitations underscore the need for cognitive and adaptive decision systems, where learning and real-time adaption capabilities are added to classical models by AI, an evolution discussed in the following section.

3.2. Cognitive and Adaptive Decision Systems

The drawbacks of traditional decision framework require the use of cognitive and adaptive decision systems as energy systems evolve toward increased decentralization, unpredictability, and interactivity. Such installations combine statistical analysis, AI, and feedback elements with energy

management systems in a way that allows them to learn from past instances, adjust to new circumstances, and also make decisions by themselves in real-time (Siano, 2014). Cognitive decision frameworks interactively revise their internal models through perpetual data acquisition and learning, thereby, they are able to improve the quality of their choices over a period of time as compared to deterministic optimization that is dependent on preset parameters.

A major component of decision-making in dynamic scenarios is not knowing the precise details beforehand and having to acquire the knowledge through experience. These are circumstances where the strategies of the algorithms keep changing based on the outcomes they receive.. Among these, deep reinforcement learning (DRL) and reinforcement learning (RL) have become powerful models for energy management in real time. Reinforcement learning (RL) systems work by interacting with their surroundings, getting feedback in terms of rewards or penalties, and then adjusting control policies as necessary (Mnih et al., 2015; Wei, Wang, & Zhu, 2017). RL and DRL methods have been used in smart grids to control demand response, manage battery energy storage systems, improve energy dispatch, and coordinate distributed generation (Glavic, Fonteneau, & Ernst, 2017). Energy systems with integration of these techniques can shift from reactive control to proactive intelligence.

Human-in-the-loop mechanisms is another characteristic that can be integrated in AI-driven decision-making frameworks. Complicated and highly sensitive operations can be enhanced by human expertise, which may help to ensure moral alignment, precision, and accountability). For real-world implementation in energy infrastructure, trust and accountability are fostered by this mutually beneficial interaction between human judgment and machine learning.

Essentially, cognitive and adaptive decision systems represent the fusion of decentralized optimization, supervision by humans, and artificial intelligence. Such systems reinterpret the concepts of control and coordination in modern energy management by facilitating cooperation among autonomous entities and learning from ongoing feedback. They provide a substantial advancement over the constraints of traditional optimization frameworks through providing the theoretical and technological basis to develop resilient, sustainable, and reliable energy ecosystems.

3.3. Integration of AI with Energy Management Systems (EMS)

Energy Management Systems (EMS) typically refers to a system in charge of the monitoring, coordination, and control of the smart grid operations such as generation, storage, and demand-side operations. The EMS is the agent that remotely controls the whole network. Therefore, it is directly responsible for the decision-making of operational scheduling, dispatch, and demand response to ensure stability and efficiency over the entire grid. Traditionally, EMSs have relied on centralized optimization and rule-based control methods for performing these main functions only.

However, the increasing integration of renewable energy sources, distributed generation units, and the active participation of prosumers that have raised issues that need comprehensive and proactive real-time management strategies. The growing decentralization and data-intensiveness of the modern smart grids require continuous learning and adaptation of decision-making skills. To address these challenges, AI based EMSs carry out in real-time the functions of forecasting, optimization, anomaly detection, and autonomous control that are crucial in maintaining grid reliability, flexibility, and resilience.

The rise in energy demand coupled with distributed energy sources may require costly and community-disrupting infrastructure upgrades. Modern EMSs equipped with AI-driven analytics and predictive capabilities can optimize existing assets in a more effective way. Thus, they can reduce the need for major infrastructure upgrade and investments.

Supervised, unsupervised ML and reinforcement learning (RL) algorithms have distinct but supportive roles in AI-based EMS designs. Supervised and unsupervised ML approaches are frequently used for load prediction, where models analyze historical consumption data to provide accurate short and long-term demand profiles. Managing supply and demand equilibrium, minimizing operating expenses, and storage needs all depend on precise load forecasting. On the other hand, reinforcement learning based adaptive scheduling enables EMSs to continuously interact with their surroundings and learn the best control strategies (Mnih et al., 2015). RL based systems achieve dynamic optimization under uncertainty by iteratively improving dispatch and demand-response methods through feedback obtained from the environment. This feedback can be reward or penalty. In contemporary smart grids, ML and RL work together to provide the analytical foundations for predictive and autonomous energy management.

To improve scalability and coordination across several decision layers, AI based EMSs typically build in a distributed, hierarchical structure. At the local level, energy management systems for residential or commercial properties optimize demand, schedule appliances, and predict loads to reduce expenses and increase efficiency. Through multi-agent communication frameworks, AI enables prosumers to share energy, trade with one another, and coordinate distributed resources at the community level. This concept known as peer-to-peer trading. (Zhao, Lv, Gao, Tang, & Zhou, 2024). Higher-

order intelligence integrates feedback from local and community systems to manage stability, frequency regulation, and system-wide balancing at the grid level. Distributed intelligence is supported by this hierarchical design, in which independent agents cooperate to preserve grid stability and maximize efficiency.

AI driven EMSs can be used for a variety of essential tasks. AI based models can forecast consumption patterns and initiates real time pricing mechanisms to balance generation and load in demand response). They can predict output of renewable energy sources and dynamically optimizes power distribution to minimize effect of renewable integration. Algorithms are instrumental in forecasting charging and discharging cycles in energy storage management thus, optimizing battery life and efficiency. Identifying anomalies and performing predictive maintenance are some of the ways by which AI enhances fault detection, thus, preventing failures that eventually threaten the stability of the grid. AI driven agents are also very essential in decentralized market design and energy trading where they can independently coordinate trades in peer to peer networks or negotiate deals.

The integration of artificial intelligence (AI) in an energy management system (EMS) has a very significant positive effect on the system. EMS becomes a system for effective decentralized resource management, since it improves flexibility, adaptability, and resilience. AI based EMSs optimize power flows and reduce losses to make energy more affordable for community and the system more energy efficient. Moreover, after allowing some degree of functional independence, and ensuring human control via human-in-the-loop techniques, AI powered EMSs are also instrumental in minimizing fluctuations in the grid that result from the variable nature of renewables, thus stabilizing the grid.

However, there are several challenges to overcome while using AI in EMSs. Maintaining data standardization and quality across the grid remains a challenge for these systems. Since the distributed systems share confidential information via public networks data privacy and security are important concerns. Moreover, the energy and computational complexity of AI models may restrict their scalability. Finally, to retain interpretability and transparency in the AI-based decision-making models, explainable AI (XAI) strategies should be implemented (Luo, Wu, Zhou, & Wang, 2024).

4. CONCLUSION

One of the major paradigm shifts in modern engineering and sustainability research is the deployment of AI to revolutionize energy systems. The chapter has elaborated the progression of the next generation smart energy systems that utilize AI from being automated to having cognitive and adaptive intelligence capabilities. It is emphasized how AI helps in the evolution of smart energy systems from the traditional, unchanging, centralized models to dynamic, decentralized, and learning-driven structures that exist in real-time.

In terms of technical aspects, AI driven models improve forecasting, scheduling, and decision-making in energy management systems. These intelligent energy management frameworks preserve grid flexibility, efficiency, and reliability while optimizing generation, storage, and demand operations in real-time. Additionally, decentralized decision-making at the household and community levels is made possible by hierarchical and multi-agent designs, which facilitate peer-to-peer (P2P) energy trading and distributed resource coordination. AI models offer the computational and analytical foundation for developing robust, effective, and sustainable energy systems through these methods.

In addition to their technological advantages, AI based energy systems show how engineering, data science, and social intelligence are interconnected. Social intelligence brings about ethical awareness, human involvement, and societal trust; data science intelligence facilitates learning, prediction, and adaptation; and engineering intelligence guarantees system stability and control. These elements work together to create the framework for energy systems that are human centered, transparent, and morally consistent while maintaining a balance between social and environmental responsibility and technical growth.

The development of intelligent energy management in the future relies on AI ecosystems that are transparent, cooperative, and ethically driven. New avenues for development include explainable AI (XAI) for traceability and interpretability, edge and federated learning for decentralized operation, and hybrid human–AI collaboration. At the same time, ethical governance and policy co-design will be essential to ensure AI-driven accomplishments support long-term sustainability, equality, and integration throughout the global energy landscape.

The integration of artificial intelligence, data science, and human understanding ultimately represents a systemic shift toward robust, sustainable, and resilient energy infrastructures rather than only a technological breakthrough. These intelligent systems will shape the energy landscape of the future and further the shared goal of a more intelligent and sustainable energy future by balancing social principles with computational accuracy.

KAYNAKLAR

- Albus, J. S. (1991). Outline for a theory of intelligence. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 21(3), 473–509. <https://doi.org/10.1109/21.97471>
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2002). Robust optimization - Methodology and applications. *Mathematical Programming, Series B*, 92(3), 453–480. <https://doi.org/10.1007/S101070100286/METRICS>
- Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. (1997). Introduction to Linear Optimization (Athena Scientific Series in Optimization and Neural Computation, 6). *Book*, 608.
- Davis, D. N. (2008). Linking perception and action through motivation and affect. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 20(1), 37–60. <https://doi.org/10.1080/09528130701472424>
- Ghahramani, Z. (2015). Probabilistic machine learning and artificial intelligence. *Nature*, 521(7553), 452–459. <https://doi.org/10.1038/NATURE14541;SUBJMETA>
- Glavic, M., Fonteneau, R., & Ernst, D. (2017). Reinforcement Learning for Electric Power System Decision and Control: Past Considerations and Perspectives. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 6918–6927. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2017.08.1217>
- Luo, B., Wu, Z., Zhou, F., & Wang, B. C. (2024). Human-in-the-Loop Reinforcement Learning in Continuous-Action Space. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 35(11), 15735–15744. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3289315>
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., ... Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*,

518(7540), 529–533.

<https://doi.org/10.1038/NATURE14236>;TECHMETA

Morales, J. M., Conejo, A. J., Madsen, H., Pinson, P., & Zugno, M. (2014). Integrating renewables in electricity markets - Operational problems. *Springer*, 205, 429. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9411-9>

Russell, S., & Norvig, P. (2022). Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4/E. *Pearson Series in Artificial Intelligence*, 19–21.

Siano, P. (2014). Demand response and smart grids—A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 461–478. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.10.022>

Wang, Y. (2011). sSCADA: securing SCADA infrastructure communications. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 6(1), 59–78. <https://doi.org/10.1504/IJCNDS.2011.037328>

Wei, T., Wang, Y., & Zhu, Q. (2017). Deep reinforcement learning for building HVAC control. *Design Automation Conference*, Part 128280. <https://doi.org/10.1145/3061639.3062224>

Zhao, N., Lv, J., Gao, Y., Tang, J., & Zhou, F. (2024). Real-time pricing for smart grid with multiple energy coexistence on the user side. *IET Renewable Power Generation*, 18(13), 2162–2176. <https://doi.org/10.1049/RPG2.13051>

FROM GRAPH MEASURES TO EXPLAINABLE SUMMARIES

Sena AYDOĞAN¹

Fatma ŞENER FİDAN²

1. INTRODUCTION

With the spread of information technologies, the volume and variety of data increase exponentially (Vercellis, 2009). Sole data is not useful anyway, thus it should be transformed into useful information. Data holds great importance due to its capacity to store valuable information. Extracting useful information from the data, also known as knowledge discovery, is a popular research domain in the information era. Knowledge discovery methods are categorized into two primary groups: descriptive techniques and predictive techniques. The most basic descriptive technique is summarization. Essentially, statistical summarization yields limited measures, such as the mean, standard deviation, or mode, related to the data. Linguistic summarization is proposed by Yager (1982) as a novel tool for summarizing data in a human-friendly manner.

The raw data can be in the form of a matrix, a network, or a time series. A network holds more information than a matrix or a time series because of its data structure, which consists of the relationships between objects. Therefore, network data is a complicated research domain for knowledge discovery

¹ Asst. Prof., Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, senaaydogan@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1267-1779.

² Asst. Prof., Abdullah Gül University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, fatma.senerfidan@agu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2397-3628.

studies. Data in various domains, including social networks, financial markets, information technology, and biological systems, is not only composed of discrete components; rather, it encompasses intricate and significant relationships between these components. It is becoming increasingly crucial to analyze these relationships in order to understand how systems operate and identify key components. In this context, network analysis techniques are particularly effective for identifying communities and key players, modeling relationships, and examining information flows (Barabasi, 2016).

Many systems in the real world reflect the complex network definition, as they consist of objects and relationships among them. According to the application area, objects can be humans, products, biological cells, or animals, while the relationship among them can be friendship, product flow, biological net, or relatedness. These networks are the subject of graph theory (Bondy & Murty, 1976). By analyzing the structures composed of nodes and the connections between them, both theoretically and visually, network analysis makes complex interactions visible and quantifiable (Newman, 2010). However, platforms like Gephi (Bastian et al., 2009), one of the most popular analysis tools, often produce outputs that are difficult for non-technical users to fully comprehend due to their complex graphs and technical jargon. As a result, the potential advantages of network analysis are not fully understood.

Through the use of linguistic summarization techniques, this study seeks to make network analysis results more accessible and technical outputs more comprehensible. This will enable decision-makers and subject-matter experts to quickly and accurately analyze critical data on network architectures. Before discussing the difficulties of directly interpreting Gephi findings, this study will first cover the basic concepts and application domains of network analysis

techniques. Lastly, it will demonstrate how the linguistic summarization technique can be utilized to enhance the comprehensibility and accessibility of network analysis results.

The remaining sections of the study are organized as follows: The second section presents the related works from the literature about network analysis and linguistic summarization in explainability studies. The third section defines measures in network analysis and proposes a linguistic summarization framework. The fourth section presents the results from Gephi outputs and their application to linguistic summarization, along with a brief discussion on technical outputs and human-friendly summaries. The final section concludes the study by presenting the findings and offering suggestions for future research.

2. RELATED WORKS

Network analysis, a method that examines node and link structures, is crucial for understanding complex relationships in various domains, ranging from biological networks to social networks (Newman, 2010). A multitude of measures and technical outputs are produced by the investigation of huge and complex networks, such as social networks. However, these outputs make sense only to domain experts, which makes network analysis hard to understand for decision-makers from various domains. In this regard, linguistic summarization methods contribute to more interpretable results by expressing technical measures in a human-friendly way. Although there are limited studies on direct linguistic summarization of network data, related works are described in this section.

Ngo et al. (2005) presented an approach to analyzing videos using graph modeling. In their study, each video segment is modeled as a node, and scene structure is inferred based on the similarities between nodes. Unlike traditional time-series

analysis, Ngo et al. (2005)'s model provides content-based summarization. The generation of figurative explanations and topological narratives is still behind the linguistic summarization of scene transitions.

Community structures and central nodes in social networks are summarized in Riondato et al. (2017)'s study, which aims to minimize information loss while summarizing graphs. The authors present quality guarantees statistically after the summarization. These summaries can serve as the basis for conveying information to users; however, they still lack linguistic expression.

Containing millions of nodes and links, large-scale networks are hard to visualize, summarize, and analyze. Rodrigues et al. (2013) proposed the GMine system to analyze large networks, which uses a multi-level hierarchical graph representation, graph partitioning, subgraph extraction, and visualization tools. The proposed system is tested efficiently on social networks. Even if it exports meaningful information from the networks, the method does not present linguistic summaries.

Yong et al. (2021) proposed a new method based on weighted locality sensitive hashing to efficiently summarize billion-scale graphs. Nodes are grouped based on their similarity, and the summarization process is made computationally cost-effective. This method paves the way for practical usability of social network analysis outputs; however, it does not focus on the interpretability or human-friendly output generation from the network.

Alamsyah et al. (2016) use graph-based text analysis to summarize telecommunication data. This study is in the intersection of social network analysis and natural language generation. Telecommunication data is represented in a network structure, and communications are analyzed through network

analysis. However, the study's outputs are not transformed into natural language phrases and are not easily understood by non-technical users.

Social role mining is one of the important topics for understanding the operation of the network. In Abnar et al. (2015)'s research, social roles (i.e., leader, bridge, etc.) in a network are dynamically extracted based on their structural features. The method follows the social roles in a timely manner and supports a better understanding of the network. Even if the study consists of interpretable components, the paper does not study the linguistic definition of the social roles.

Lin et al. (2008) contribute to the summarization of dynamic social networks, particularly in terms of the relationships among actors, actions, and concepts. It has been successfully applied in e-mail traffic, social networks, and communication networks. However, the authors do not merge their study with text generation from the outputs.

Alamsyah et al. (2017) proposed a graph pruning method based on the K-core, a density-related measure. Relatively less important nodes are eliminated quickly, and the remainder of the network is the core. The summarization of the core ensures computational effectiveness and is tested on large social network scenarios. However, it does not present the summarization results to the user in text reports.

Pouzols et al. (2008) proposed to linguistically summarize network traffic data, which has a large volume of complex data. The technical measures, such as bandwidth and packet density, are not easily understandable to non-technical users. Using fuzzy rules, linguistic summaries are generated about network traffic flow. It helps non-technical users to understand technical measures of the network. Although it summarizes the technical metrics of the network flow, it does

not provide information about the statistical metrics of the network itself.

Social and economic networks contain some uncertainty, and the obtained results should present linguistic phrases which is easy to understand for decision-makers. Genç et al. (2020) is a rare study that transforms technical network analysis into natural language. The authors have tested their methodology on an international trade network, with a particular focus on trade links between trading countries. As in the previous study, it lacks information about statistical measures of the network itself.

In another study, supply chain networks are investigated, since they are multi-dimensional and contain uncertain information. Aydoğan et al. (2021) utilize linguistic summaries as a support tool for decision-makers prior to strategic decisions. The paper generates human-friendly summaries for different supply network designs. Thus, decision makers see the possible results of each design. The study demonstrates that the linguistic summary results serve not only as an explanation but also as a decision support tool. As in the previous study, it lacks information about statistical measures of the network itself.

The concept of explainability is becoming increasingly significant in data analysis and artificial intelligence systems. The system's dependability is increased, and the accuracy of the decisions made is supported when users comprehend the reasons behind and methods by which the model or analysis results were produced (Doshi-Velez & Kim, 2017). Explainability research can be viewed as a supplementary field in this regard, as a greater variety of consumers can comprehend and interpret complex and technical results when they are explained in natural language.

According to a survey of the literature, network analysis tools are quite effective at creating technical outputs; however, little effort has been made to make these outputs accessible to a wider audience. In comparison, the majority of linguistic summarization research has focused on tabular or statistically based data; however, there remains a dearth of thorough investigations into the linguistic summarization of network analysis results.

The purpose of this study is to add to the body of knowledge on linguistic summarization strategies for explaining network analysis results. Thus, both technical and non-technical users will be able to comprehend and interpret complicated network architectures more easily.

3. METHODOLOGY

This study aimed to make network analysis outputs explainable using linguistic summarization techniques. The methods are discussed in three stages: data source selection, network analysis, and the proposed linguistic summarization framework.

3.1. Data Source

The dataset used in this study features a network structure commonly employed in social network analysis. The graph dolphins contains an undirected social network of frequent associations between 62 dolphins in a community living off Doubtful Sound, New Zealand, as compiled by Lusseau et al. (2003). The dataset contains a total of 62 nodes and 159 links. Nodes represent dolphins in the relevant system, while links represent the relationships between dolphins observed together. In other words, if two dolphins are observed in the same social group, in the same area, or during the same

time period, a connection has been identified between them. It is undirected, meaning it indicates a reciprocal relationship; if dolphin A and dolphin B are observed together, there is a link between them.

The dolphin dataset is one of the most widely cited network examples in the network analysis literature. The dataset's basic properties are as follows. The network type is defined as a social network, since it is based on the relationships between dolphins observed together. There are 62 dolphins and 159 undirected links, indicating a reciprocal relationship between the dolphins. Most nodes can reach each other on the network, so that the network structure is a connected component. Since each dolphin is not connected to all the other dolphins, the network density is relatively sparse. As for community structure, there are distinct groups between male and female dolphin communities.

Upon examining the structure and properties of the network, the dataset is suitable for analysis using graph theory and social network analysis methods. In our study, this dataset is used both to extract structural features and to interpret the resulting metrics.

3.2. Network Analysis

A network is a figurative representation of a system, where nodes represent the objects within the system, and links represent the relationships among them (Estrada, 2011). Network analysis examines the elements (nodes) in complex systems and the relationships (links) between them. This approach allows us to understand not only the components of a system but also the structure and dynamics of the interactions between these components. Used in a wide range of fields, from social sciences to engineering, from biology to computer science, network analysis reveals the structural properties of

networks through measures such as centrality, density, and community structure (Wasserman & Faust, 1994; Newman, 2003).

Technically, a network $G = (N, L)$ is defined as an ordered pair of nodes N , and links L defined on nodes set. n is the number of nodes ($i = 1, \dots, n$) and l is the number of links (i, j). If the direction of the relationship from one node to another is specified, it is called a directed graph; otherwise, it is called an undirected graph. Since the subject of this study is undirected graphs, the definitions will be applied to undirected graphs. The maximum number of links in undirected graphs is $n(n - 1)/2$. If there is a link between two nodes, then these two nodes are referred to as neighbors. Graphs can be represented by an adjacency matrix $A_{n \times n}$. The adjacency matrix $A_{n \times n}$ is a matrix consisting of a_{ij} elements that take the value 1 if there is a link between nodes i and j , and 0 otherwise.

Given a network, the goal is generally to identify the central node, determine the widespread interactions between nodes, and recognize similar nodes. For these purposes, statistical measures used in network analysis can be grouped under two headings: node-level and network-level (Wasserman & Faust, 1994). Degree, betweenness, closeness, and eigenvector centrality measures are measured at the node level, while diameter, radius, average shortest path distance, average degree, and density are network-level measures.

Degree is a centrality measure that indicates the number of neighbors to which a node is connected, as defined in Eq. (1). The more neighbors a node has, the more important that node is within the network.

$$\text{deg}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, 0 \leq \text{deg}_i \leq n \quad 1)$$

Betweenness is a measure of how well a node lies between other pairs of nodes, which is calculated as Eq. (2). It aims to determine the role of a node in transferring information across the network.

$$b_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{(\sigma_{st}(i))}{\sigma_{st}} \quad 2)$$

where σ_{st} represents the number of shortest paths between nodes s and t , and $\sigma_{st}(i)$ represents the number of shortest paths between nodes s and t , passing through i .

Closeness is a measure of the average distance from a node to other nodes, calculated as in Eq. (3). It aims to identify the node with the potential to spread information most rapidly throughout the network.

$$C_i = \frac{n - 1}{\sum_j d(j, i)} \quad 3)$$

where $d(j, i)$ represents the shortest path length between nodes j and i .

The degree is based on the principle that every link connecting a node is equally important, and the more neighbors a node has, the more important it is considered. However, nodes with strong relationships should be considered more important. Eigenvector centrality defines a node as important if it is connected to other important nodes and is calculated using Eq.

(4). It aims to determine the degree of influence a node has on the network.

$$e_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n a_{ij} e_j \quad (4)$$

where e_i is the centrality of node i , and λ represents the largest eigenvalue of the adjacency matrix.

The node with the largest eccentricity value determines the network's diameter, while the node with the smallest eccentricity value determines the radius. The diameter and radius can be calculated using Eq. (5) and Eq. (6).

$$D = \max\{\epsilon_i : i \in N\} \quad (5)$$

$$R = \min\{\epsilon_i : i \in N\} \quad (6)$$

where ϵ_i is the largest distance between a node and others, namely eccentricity value, and calculated as Eq. (7).

$$\epsilon_i = \max_{i \neq j} d(i, j) \quad (7)$$

The average shortest path distance is calculated by averaging the shortest path distances between all pairs of nodes in the network and can be calculated using Eq. (8).

$$\bar{d} = \frac{1}{\frac{n(n-1)}{2}} \sum_{i \geq j} d(i, j) \quad (8)$$

The average degree is calculated as the average of the degrees of all nodes in the network, as shown in Eq. (9).

$$\overline{\text{deg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{deg}_i \quad 9)$$

Density is defined as the ratio of the number of available links ($m(G)$) in the network to the maximum number of possible links ($m_{\max}(G)$), and is calculated as Eq. (10).

$$\rho(G) = \frac{m(G)}{m_{\max}(G)}, 0 < \rho < 1 \quad 10)$$

where $m_{\max}(G)$ takes the value $n(n-1)/2$ in undirected networks.

When nodes and links are directly displayed with numerical outputs, complex network architectures often become unintelligible. As a result, visualization tools enable users to rapidly understand the network structure by visually presenting linkages and structural aspects. Gephi is an effective tool that enables users to group nodes, examine network structure, and identify key players (Bastian et al., 2009). Nonetheless, research in the field highlights that these types of visualizations necessitate technical expertise and often require specific interpretation (Mishra et al., 2025). As a result, more strategies are required to reach a larger audience and highlight the potential advantages of network analysis.

3.3. Proposed Linguistic Summarization Framework

Linguistic summarization, proposed by Yager (1982), is a descriptive technique and is based on Zadeh (1975)'s fuzzy quantifiers. The aim of linguistic summarization of a dataset is

to extract precise and easy-to-understand information from it. Generally, two sentence structures are used in linguistic summarization based on absolute and relative quantifiers proposed by Zadeh (1983). The first one is a type-I quantified sentence structure: “Q Y A [TD]”. Here, Q is the quantifier, Y is the object, A is the summarizer, and TD is the truth degree of the sentence. The second one is a type-II quantified sentence structure: “Q B Y A [TD]”. Here, B is the pre-summarizer in addition to the definitions of the type-I quantified sentence. The truth degree is calculated by Eq. (11) and Eq. (12) for type-I quantified sentences and type-II quantified sentences, respectively.

$$TD = \mu_Q \left(\sum_{m=1}^M \mu_A(v_k^m) \right) \quad (11)$$

$$TD = \mu_Q \left(\frac{\sum_{m=1}^M \mu_A(v_{k_1}^m) \otimes \mu_B(v_{k_2}^m)}{\sum_{m=1}^M \mu_B(v_{k_2}^m)} \right) \quad (12)$$

where v_k^m is the value for k. attribute of m. object. μ_A is the membership degree of summarizer A, μ_Q is the membership degree of quantifier Q. Since there is a pre-summarizer B in addition to the summarizer A, in type-II quantified sentences, there are two attributes related k_1 and k_2 . \otimes is a t-norm operator used for the intersection of two fuzzy sets. The minimum operator is used in this study as a t-norm operator.

A linguistic summarization framework is developed to explain the outputs from network analysis. Primarily, the outputs of the network analysis are directed to domain experts. By using linguistic summarization, numerical outputs are transformed into easy-to-understand summaries. Thus, a bridge

is established between complex network measures and explainable information. The framework consists of two main components: quantified sentences and templates for the top node. The quantified sentences summarize the dataset in a generic way by using fuzzy sets defined over numerical outputs of the network analysis. Templates provide a summary text about the top node. For example, “the most central node in the network is Dolphin X, has a total of Y links, and belongs to the community Z.”

This framework ensures that technical network analysis outputs are converted into human-friendly natural language texts. In the application phase of the study, all results from the network analysis will be summarized in natural language using the developed quantified sentences and templates for the top node.

4. RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the results of the analyses performed on the network analysis and the linguistic summarization approach.

4.1. Outputs from the Network Analysis

In the context of social networks, nodes represent persons or actors, while links reflect their interactions. Thus, network analysis reveals macro-scale structural patterns in systems while also enabling us to assess the value of nodes or actors at the micro-level. The data is imported into Gephi, and various measurements are taken to expose the network's structural features. The network representation of the dolphin dataset is presented in Figure 1.

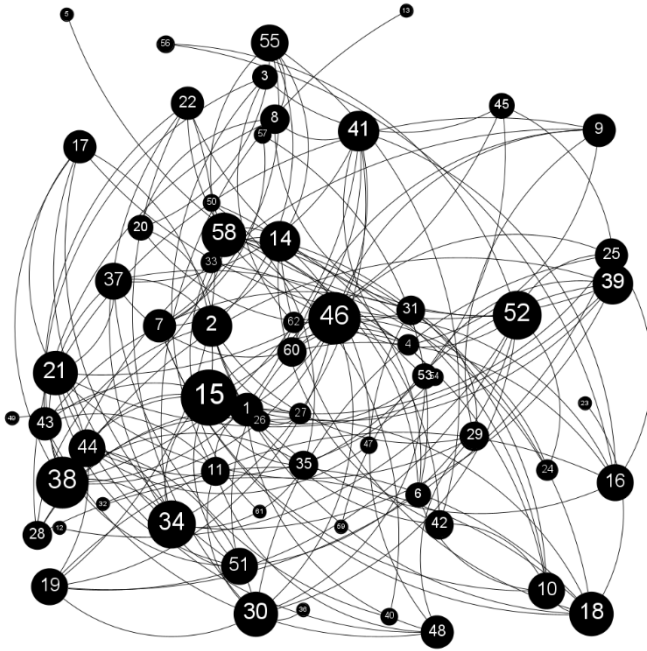


Figure 1. The network representation of the dolphin dataset

Network-level summary statistics of the dolphin dataset are calculated using Gephi and presented in Table 1.

Table 1. Summary statistics of the dolphin dataset

Measure	Value
Number of nodes	62
Number of links	159
Average degree	5.129
Diameter	8
Average Path Length	3.357
Reciprocity	1
Density	0.084
Average Clustering Coefficient	0.303

According to the summary statistics, the average degree indicates that a node is connected to approximately 5 other nodes on average, which suggests that the network is highly connected and has diverse communication channels. The density value 0.084 indicates that approximately 8% of all possible connections have occurred. There is a moderate level of connectedness. Based on the diameter value, it can be said that the shortest path between the two farthest nodes in the network is 8 steps. Reflecting the small-world characteristic, the average path length is 3.357, which means that it takes approximately 3 steps to reach any two nodes on average. Since the network is undirected, the reciprocity value equals 1. The average clustering coefficient indicates a moderate probability that the nodes' neighbors are also connected. This suggests the existence of community structures.

Within the scope of node-level network analysis, basic measures such as degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality, and eigenvector centrality are calculated using the Gephi software. Table 2 presents the centrality measures for the dolphin dataset sample.

Table 2. Node-level centrality measures of the dolphin dataset (sample table)

i	deg_i	C_i	b_i	e_i
1	6	0.347	34.921	0.443
2	7	0.252	38.237	0.330
3	5	0.313	29.448	0.276
4	1	0.249	0.000	0.093
5	1	0.269	0.000	0.120
6	8	0.271	96.709	0.377
7	12	0.377	113.409	1.000
8	7	0.339	60.925	0.533
...
62	6	0.363	40.929	0.478

Based on Table 2, the degree measure varies from 1 to 12. Dolphin 7 has the highest degree in the network. The highest closeness is found in Dolphin 7. Lower closeness values, i.e., dolphin 2, signify far points in the network. Dolphin 7 has a high betweenness value, which means it is a bridge on the network. In contrast, Dolphins 4 and 5 have a betweenness value of 0, indicating that these dolphins are not on the critical path. Eigenvector centrality also confirms that Dolphin 7 is the most important node in the network.

To examine the structural features of the dolphin network, the authority, PageRank, community classes, clustering coefficients, and triangle numbers of nodes are calculated using Gephi and presented in Table 3 for a sample dataset.

Table 3. Structural features of the dolphin dataset (sample table)

i	Authority	PageRank	Modularity Class	Clustering Coefficient	Number of Triangles
1	0.129	0.017	0	0.333	5
2	0.012	0.024	1	0.524	11
3	0.075	0.015	0	0.400	4
4	0.029	0.005	3	0.000	0
5	0.039	0.005	2	0.000	0
6	0.015	0.026	1	0.500	14
7	0.316	0.032	2	0.258	17
8	0.164	0.020	3	0.238	5
...
62	0.143	0.017	4	0.267	4

In Table 3, authority and PageRank reflect the importance of nodes. Dolphin 7 has the highest authority and PageRank values, indicating it is an authority node in the network and has the highest probability of being visited according to the random walk model. The modularity class reflects community memberships. There are different

communities in the network. For example, Dolphin 5 and Dolphin 7 are in the same community (class 2). The clustering coefficient and the number of triangles reflect the local density of nodes in the dolphin dataset. Dolphin 2 and Dolphin 6 have the highest clustering coefficients, which means their neighbors are also frequently connected to each other. As for Dolphins 4 and 5, their neighbors do not form a triangle, so the clustering coefficients are zero. The full versions of Tables 2 and 3 are given in Appendix 1.

Community classes in the network are summarized in Table 4. As a result of the community detection of the dolphin dataset, there are 5 communities. Among these communities, the smallest is class 0, comprising 7 nodes, while the largest is class 2, comprising 17 nodes. There are no communities that are too large or too small. Thus, it can be said that the communities are evenly distributed in terms of the number of members.

Table 4. Communities and their members of the dolphin dataset

<i>Class</i>	<i>Nodes</i>	<i>Number of Members</i>
0	Dolphin 1, Dolphin 3, Dolphin 23, Dolphin 38, Dolphin 43, Dolphin 50, Dolphin 59.	7
1	Dolphin 2, Dolphin 6, Dolphin 10, Dolphin 16, Dolphin 26, Dolphin 27, Dolphin 35, Dolphin 37, Dolphin 44, Dolphin 51, Dolphin 53, Dolphin 54, Dolphin 56, Dolphin 58, Dolphin 60.	15
2	Dolphin 5, Dolphin 7, Dolphin 9, Dolphin 14, Dolphin 28, Dolphin 29, Dolphin 31, Dolphin 32, Dolphin 33, Dolphin 36, Dolphin 39, Dolphin 40, Dolphin 42, Dolphin 46, Dolphin 47, Dolphin 49, Dolphin 55.	17
3	Dolphin 4, Dolphin 8, Dolphin 11, Dolphin 15, Dolphin 17, Dolphin 18, Dolphin 24, Dolphin 30, Dolphin 41, Dolphin 45, Dolphin 48, Dolphin 52.	12
4	Dolphin 12, Dolphin 13, Dolphin 19, Dolphin 20, Dolphin 21, Dolphin 22, Dolphin 25, Dolphin 34, Dolphin 57, Dolphin 61, Dolphin 62.	11

4.2. Linguistic Summaries of the Network Analysis Outputs

Quantifier is defined with ‘few’ trapezoidal fuzzy number $\text{few} = (0,0,0.25,0.5)$, ‘about half’ triangular fuzzy number $\text{about_half} = (0.25,0.5,0.75)$ and ‘most’ trapezoidal fuzzy number $\text{most} = (0.5,0.75,1,1)$.

Degree is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$\text{deg}_{\text{low}} = (1,1,5.129),$$

$$\text{deg}_{\text{medium}} = (1,5.129,12) \text{ and}$$

$$\text{deg}_{\text{high}} = (5.129,12,12).$$

Eigenvector centrality is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$e_{\text{low}} = (0,0,0.5),$$

$$e_{\text{medium}} = (0,0.5,1) \text{ and}$$

$$e_{\text{high}} = (0.5,1,1).$$

Closeness centrality is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$C_{\text{low}} = (0.178,0.178,0.307),$$

$$C_{\text{medium}} = (0.178,0.307,0.418) \text{ and}$$

$$C_{\text{high}} = (0.307,0.418,0.418).$$

Betweenness centrality is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$b_{\text{low}} = (0,0,71.887),$$

$$b_{\text{medium}} = (0,71.887,454.274) \text{ and}$$

$$b_{\text{high}} = (71.887,454.274,454,274).$$

Authority is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$\text{authority}_{\text{low}} = (0.002, 0.002, 0.099),$$

$$\text{authority}_{\text{medium}} = (0.002, 0.099, 0.536) \text{ and}$$

$$\text{authority}_{\text{high}} = (0.099, 0.536, 0.536).$$

PageRank is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$\text{PageRank}_{\text{low}} = (0.005, 0.005, 0.016),$$

$$\text{PageRank}_{\text{medium}} = (0.005, 0.016, 0.032) \text{ and}$$

$$\text{PageRank}_{\text{high}} = (0.016, 0.032, 0.032).$$

Clustering coefficient is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$\text{clustering}_{\text{low}} = (0, 0, 0.259)$$

$$\text{clustering}_{\text{medium}} = (0, 0.259, 0.667) \text{ and}$$

$$\text{clustering}_{\text{high}} = (0.259, 0.667, 0.667).$$

Number of triangles is defined with three triangular fuzzy numbers as;

$$\text{triangle}_{\text{low}} = (0, 0, 4.597),$$

$$\text{triangle}_{\text{medium}} = (0, 4.597, 17) \text{ and}$$

$$\text{triangle}_{\text{high}} = (4.597, 17, 17).$$

Using these fuzzy summarizers and fuzzy quantifiers, all the possible summaries that can be generated from type-I sentence structures are generated, and their truth degrees are calculated using Eq. (11). The linguistic summaries having a truth degree greater than 0.70 are listed in Table 5.

Table 5. Linguistic Summary Results of the Network Statistics of the Dolphin Dataset

Linguistic Summary	TD
A few of the dolphins have a low degree of centrality	0.822
A few of the dolphins have a high degree of centrality	1.000
Most of the dolphins have a medium degree of centrality	0.886
A few of the dolphins have a high eigenvector centrality	1.000
About half of the dolphins have a medium eigenvector centrality	0.933
A few of the dolphins have a low closeness centrality	1.000
A few of the dolphins have a high closeness centrality	1.000
A few of the dolphins have a high betweenness centrality	1.000
About half of the dolphins have a low betweenness centrality	0.850
About half of the dolphins have a medium betweenness centrality	0.802
A few of the dolphins have a high authority	1.000
About half of the dolphins have a low authority	0.726
About half of the dolphins have a medium authority	0.887
A few of the dolphins have a low PageRank	0.868
A few of the dolphins have a high PageRank	1.000
Most of the dolphins have a medium PageRank	0.938
A few of the dolphins have a low clustering coefficient	0.757
A few of the dolphins have a high clustering coefficient	1.000
About half of the dolphins have a medium clustering coefficient	0.968
A few of the dolphins have a high number of triangles	1.000
About half of the dolphins have a medium number of triangles	0.740

Table 5 shows linguistic summaries and their truth degrees for various centrality and structural measures on the dolphin dataset. Truth degree values above 0.7 indicate that the summaries accurately reflect the dataset. Based on degree centrality, most dolphins in the network have a moderate degree of links. Conversely, a small number of dolphins are the focal point of the network. Eigenvector centrality also confirms that a small number of dolphins stand out not only in terms of the number of links but also in terms of their relationships to important nodes. Closeness centrality reveals that there are a few nodes at the edges of the network, either highly central (high closeness) or highly peripheral (low closeness). Betweenness centrality results indicate that a significant portion of the network does not share the role of transferring node, with only a small number of dolphins acting as bridges. We can conclude from that that there are more clustered communities in the network. Authority-related summaries suggest that a small number of nodes hold an authority position in terms of information flow. PageRank-related summaries support the fact that most dolphins are of moderate importance, with only a few dolphins having high visibility. Both low and high clustering coefficient indicates that some parts of the network have very tight triangular ties, while others have almost no ties, which is also confirmed by triangle-related summaries.

Based on degree centrality and eigenvector centrality, the most central node in the network is Dolphin 7, which has a total of 12 links and belongs to community 2. Based on betweenness and closeness centrality, the most central node in the network is Dolphin 31, which has a total of 7 links and belongs to community 2. Based on the PageRank measure, the most visited node in the network is node 7, also known as Dolphin 7. In summary, Dolphin 7 is the most central node in terms of degree, eigenvector, and PageRank measures. Dolphin 31 is the most

significant node in measures of betweenness and closeness, which eases the accessibility of inter-nodes.

4.3. Discussion

The technical table on network analysis contains numerical measures, such as degree, betweenness, authority, and clustering coefficient. A technical table shows the exact value for each node, i.e., Node 2, degree 7, eigenvector centrality 0.330, closeness centrality 0.252, authority 0.012, PageRank 0.024, modularity class 1, clustering coefficient 0.524, and number of triangles 11. The advantage of a technical table is that its having sensitive and detailed information. The disadvantage of this approach is that it requires expert knowledge to interpret the values of the measures.

Natural linguistic summaries of network analysis results transform numerical values to categorical values using fuzzy sets as low, medium, and high. For example, “most of the dolphins have a medium PageRank [0.938]”. The advantage of a linguistic summary is that it is accessible, understandable, and interpretable. The disadvantage of it is that it loses the sensitivity of numerical findings.

While technical outputs present the network's structure numerically, linguistic summaries provide the same information in a human-friendly format. For non-expert users, linguistic summary results convey information in a more understandable format. For expert users, technical tables should be supported by linguistic summaries.

5. CONCLUSION

This study proposes a framework for transforming technical network analysis measures into human-friendly, linguistically accessible summaries. First, network analysis

measures are explained. Second, a brief description of linguistic summarization techniques is provided. Lastly, a well-known public dataset is used to show the effect of the proposed framework. Technical results and linguistic summary results are compared to each other. Their advantages and disadvantages are discussed. The results of the study confirm that while technical tables are extremely useful for domain experts, they might be difficult to understand for non-technical users. Linguistic summaries, on the other hand, present complex network structures in an intelligible manner, thereby increasing the reach of network research to a broader audience.

This study shows that linguistic summarization not only describes current technical outcomes but also provides an equitable approach to information access. As a result, network analysis is not only useful for researchers and technical users; it may also help legislators, educators, and administrators make decisions. For example, examining social networks in an educational domain can be explained to a wider audience, i.e., students or faculty members, through human-friendly summaries.

In summary, this study shows how network analysis can be made more accessible from both academic and applied viewpoints. The linguistic summarization approach reduces obstacles to information access by democratizing complex data, making it a valuable tool for application in various industries. Future research can broaden the suggested framework's application area by evaluating its scalability and performance across various network types.

KAYNAKLAR

- Abnar, A., Takaffoli, M., Rabbany, R., & Zaiane, O. R. (2015). SSRM: structural social role mining for dynamic social networks. *Social Network Analysis and Mining*, 5(1), 1–18.
- Alamsyah, A., Paryasto, M., Putra, F. J., & Himmawan, R. (2016). Network text analysis to summarize online conversations for marketing intelligence efforts in telecommunication industry. In 2016 4th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT) (pp. 1–6). IEEE.
- Alamsyah, A., Priyana, Y., Rahardjo, B., & Kuspriyanto. (2017). Fast summarization of large-scale social network using graph pruning based on K-core property. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 95(16), 3749–3757.
- Aydoğan, S., Okudan Kremer, G. E., & Akay, D. (2021). Linguistic summarization to support supply network decisions. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1573–1586.
- Barabasi, A. L. (2016). *Network science personal introduction*. United Kingdom: Cambridge University Press, 42-160.
- Bastian M., Heymann S., Jacomy M. (2009). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*.
- Bondy, J. A. & Murty, U. S. R. (1976). *Graph theory with applications*. Britain: The Macmillan Press, 1-31.
- Doshi-Velez, F., & Kim, B. (2017). Towards a rigorous science of interpretable machine learning. arXiv preprint arXiv:1702.08608.

- Estrada, E. (2011). The structure of complex networks: Theory and applications. Oxford: Oxford University Press, 27-30.
- Genç, S., Akay, D., Boran, F. E., & Yager, R. R. (2020). Linguistic summarization of fuzzy social and economic networks: an application on the international trade network. *Soft Computing*, 24(2), 1511–1527.
- Lin, Y.-R., Sundaram, H., & Kelliher, A. (2008). Summarization of social activity over time: People, actions and concepts in dynamic networks. In *Proceedings of the 17th ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM)* (pp. 1379–1380). ACM.
- Lusseau, D., Schneider, K., Boisseau, O. J., Haase, P., Slooten, E. and Dawson, S. M. (2003) The bottlenose dolphin community of Doubtful Sound features a large proportion of long-lasting associations, *Behavioral Ecology and Sociobiology* 54, 396-405.
- Mishra, R., Tripathi, P. & Jha, V. (2025). Advanced Visualization Techniques in Soft Computing Results in Book: Intelligent Business Analytics, Auerbach Publications, New York.
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 45(2), 167–256.
- Newman, M. (2010). *Networks: An introduction*. USA: Oxford University Press, 17-106.
- Ngo, C.-W., Ma, Y.-F., & Zhang, H.-J. (2005). Video summarization and scene detection by graph modeling. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 15(2), 296–304.
- Pouzols, F. M., Barriga, A., Lopez, D. R., & Sánchez-Solano, S. (2008). Linguistic summarization of network traffic

- flows. In 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (pp. 619–624). IEEE.
- Riondato, M., García-Soriano, D., & Bonchi, F. (2017). Graph summarization with quality guarantees. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 31(2), 314–349.
- Rodrigues, J. F., Tong, H., Pan, J.-Y., Faloutsos, C., & Traina, C. (2013). Large graph analysis in the GMine system. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 25(1), 106–118.
- Vercellis, C. (2009). *Business intelligence*. United Kingdom: John Wiley & Sons, 3-4.
- Wasserman, S. & Faust, K. (1994). *Social network analysis: Methods and applications*. USA: Cambridge University Press, 177-192.
- Yager, R. R. (1982). A new approach to the summarization of data. *Information Sciences*, 28 (1), 69-86.
- Yong, Q., Hajiabadi, M., Srinivasan, V., & Thomo, A. (2021). Efficient graph summarization using weighted LSH at billion-scale. In *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data* (pp. 2357–2365). ACM.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—i. *Information Sciences*, 8 (3), 199-249.
- Zadeh, L. A. (1983). A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. In *Computational linguistics* (pp. 149-184). Pergamon.

Appendix 1

<i>id</i>	<i>deg_i</i>	<i>C_i</i>	<i>b_i</i>	<i>e_i</i>	<i>Authority</i>	<i>PageRank</i>	<i>Modularity Class</i>	<i>Clustering Coefficient</i>	<i>Number of Triangles</i>
1	6	0.347	34.921	0.443	0.129	0.017	0	0.333	5
2	7	0.252	38.237	0.330	0.012	0.024	1	0.524	11
3	5	0.313	29.448	0.276	0.075	0.015	0	0.400	4
4	1	0.249	0.000	0.093	0.029	0.005	3	0.000	0
5	1	0.269	0.000	0.120	0.039	0.005	2	0.000	0
6	8	0.271	96.709	0.377	0.015	0.026	1	0.500	14
7	12	0.377	113.409	1.000	0.316	0.032	2	0.258	17
8	7	0.339	60.925	0.533	0.164	0.020	3	0.238	5
9	6	0.330	6.048	0.658	0.208	0.017	2	0.600	9
10	9	0.310	209.169	0.357	0.018	0.032	1	0.222	8
11	7	0.337	27.184	0.646	0.202	0.019	3	0.524	11
12	8	0.372	390.384	0.357	0.042	0.025	4	0.143	4
13	4	0.316	24.365	0.185	0.021	0.013	4	0.500	3
14	9	0.391	187.842	0.627	0.184	0.025	2	0.139	5
15	6	0.333	23.242	0.650	0.207	0.017	3	0.533	8
16	1	0.237	0.000	0.059	0.002	0.005	1	0.000	0
17	3	0.333	77.194	0.287	0.087	0.010	3	0.333	1
18	6	0.313	13.511	0.610	0.193	0.017	3	0.533	8
19	3	0.255	3.009	0.111	0.006	0.012	4	0.667	2
20	3	0.277	7.983	0.109	0.009	0.011	4	0.667	2
21	5	0.316	53.503	0.193	0.016	0.017	4	0.400	4
22	5	0.365	122.165	0.295	0.068	0.015	4	0.300	3
23	4	0.282	16.603	0.152	0.040	0.013	0	0.167	1
24	9	0.323	119.919	0.673	0.212	0.026	3	0.250	9
25	5	0.323	60.482	0.209	0.041	0.015	4	0.300	3
26	1	0.237	0.000	0.059	0.002	0.005	1	0.000	0
27	3	0.216	60.000	0.119	0.004	0.013	1	0.333	1
28	10	0.365	104.615	0.882	0.281	0.028	2	0.333	15
29	5	0.316	59.831	0.438	0.139	0.016	2	0.300	3
30	1	0.245	0.000	0.093	0.029	0.005	3	0.000	0
31	7	0.418	454.274	0.486	0.133	0.021	2	0.048	1

Endüstri Mühendisliği Değerlendirmeleri

<i>id</i>	<i>deg_i</i>	<i>C_i</i>	<i>b_i</i>	<i>e_i</i>	<i>Authority</i>	<i>PageRank</i>	<i>Modularity Class</i>	<i>Clustering Coefficient</i>	<i>Number of Triangles</i>
32	11	0.399	253.583	0.959	0.301	0.030	2	0.236	13
33	8	0.330	82.995	0.624	0.197	0.024	2	0.286	8
34	3	0.308	4.344	0.256	0.079	0.010	4	0.333	1
35	2	0.335	129.046	0.132	0.021	0.008	1	0.000	0
36	8	0.404	261.964	0.690	0.208	0.022	2	0.250	7
37	5	0.298	42.550	0.289	0.015	0.016	1	0.600	6
38	6	0.330	53.359	0.308	0.081	0.018	0	0.333	5
39	7	0.337	114.980	0.598	0.190	0.022	2	0.238	5
40	4	0.311	22.029	0.260	0.078	0.013	2	0.167	1
41	11	0.347	74.427	0.908	0.285	0.029	3	0.309	17
42	2	0.256	5.505	0.095	0.030	0.009	2	0.000	0
43	6	0.339	42.459	0.319	0.080	0.017	0	0.400	6
44	1	0.233	0.000	0.063	0.002	0.005	1	0.000	0
45	1	0.249	0.000	0.093	0.029	0.005	3	0.000	0
46	2	0.247	1.700	0.076	0.023	0.009	2	0.000	0
47	7	0.351	61.142	0.698	0.218	0.019	2	0.238	5
48	10	0.330	154.959	0.667	0.211	0.031	3	0.244	11
49	4	0.343	35.199	0.411	0.130	0.012	2	0.333	2
50	2	0.260	2.183	0.108	0.034	0.008	0	0.000	0
51	7	0.324	181.393	0.345	0.023	0.022	1	0.381	8
52	2	0.271	1.606	0.167	0.052	0.007	3	0.000	0
53	2	0.213	0.250	0.081	0.003	0.008	1	0.000	0
54	9	0.302	154.095	0.387	0.017	0.030	1	0.361	13
55	1	0.249	0.000	0.086	0.027	0.005	2	0.000	0
56	4	0.238	8.016	0.191	0.007	0.014	1	0.500	3
57	5	0.343	37.209	0.371	0.112	0.015	4	0.300	3
58	1	0.178	0.000	0.021	0.536	0.006	1	0.000	0
59	3	0.302	25.977	0.172	0.052	0.011	0	0.000	0
60	6	0.268	53.752	0.305	0.012	0.020	1	0.533	8
61	5	0.365	216.377	0.247	0.043	0.016	4	0.200	2
62	6	0.363	40.929	0.478	0.143	0.017	4	0.267	4

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ
DEĞERLENDİRMELERİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com