

e-ISSN: 3023-6150

5.	1.	2026
Cilt (Volume)	Sayı (Issue)	Yıl (Year)

Journal of Smart Systems

AKILLI SİSTEMLER DERGİSİ

BAŞ EDITÖR

Prof. Dr. Handan UCUN ÖZEL

EDITÖRLER

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Doç. Dr. Ersin ALAYBEYOĞLU

Doç. Dr. Bayram DÜNDAR

YAYIN KURULU

Prof. Dr. Handan UCUN ÖZEL

Prof. Dr. Mustafa BAYRAM

Prof. Dr. Canan CENGİZ

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

Prof. Dr. Selçuk BAŞ

Prof. Dr. Ayhan İSTANBULLU

Prof. Dr. Resul KARA

Prof. Dr. Yusuf ÖZTÜRK

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Prof. Dr. Şükran ŞAHİN

Prof. Dr. Ali YAZICI

Doç. Dr. Ersin ALAYBEYOĞLU

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Doç. Dr. Bayram DÜNDAR

Dr. Öğr. Üyesi Ercan BERBERLER

Dr. Öğr. Üyesi Pelin KEÇECİOĞLU DAĞLI

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan SOLMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Müslüm KAPLAN

SEKRETERYA

Dr. Öğr. Üyesi Pelin KEÇECİOĞLU DAĞLI

Dr. Öğr. Üyesi Ercan BERBERLER

Arş. Gör. Mert TOK

Arş. Gör. Ali TEKDEMİR

İLETİŞİM

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN

Bartın Üniversitesi Kutlubeyyazıcılar Kampüsü

Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Oda:307

MERKEZ/BARTIN

E-posta: eyupburak@gmail.com

TEKNİK DESTEK

Doç. Dr. Eyüp Burak CEYHAN E-

posta: eyupburak@gmail.com

İÇİNDEKİLER

KENT İÇİ TOPLU TAŞIMA ARACI OLARAK ÇİFT KATLI OTOBÜSLER: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Araştırma Makalesi

Sayfa: 1-12 / Yazar: Serkan AYCİL

E-TİCARETTE OPERASYONEL VERİMLİLİK VE STRATEJİK AVANTAJ İÇİN YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ÜRÜN KATEGORİZASYONU

Araştırma Makalesi

Sayfa: 13-43 / Yazarlar: Mustafa MUHACIR, Gürkan IŞIK

YENİLİKÇİ VE YÜKSEK PERFORMANSLI MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE GELENEKSEL OLMAYAN İMALAT YÖNTEMLERİNİN UYGULAMALARI

Derleme Makalesi

Sayfa: 44-65 / Yazar: Emre ALTAŞ



AKILLI BİNA KONUSU LİSANSÜSTÜ TEZLERİN BİBLİYOMETRİK ANALİZİ

Derleme Makalesi

Sayfa: 66-90 / Yazarlar: Beyza TEKELİOĞLU, Esra KARABALIK, Hevjin AKIN, Yusuf Bera
SANLI, Tamer EREN

EDİTÖRDEN

Değerli Okurlarımız,

Akıllı Sistemler Dergisi'nin beşinci cilt birinci sayısını sizlerle buluşturmanın memnuniyetini yaşamaktayız. Bu sayımızda, hakem değerlendirme süreçleri başarıyla tamamlanan, farklı disiplinlerde yapay zekâ, mühendislik ve teknoloji odaklı dört nitelikli çalışma yer almaktadır.

Bu sayımızda yer alan ilk çalışmada, Serkan Aycil tarafından hazırlanan *"Kent İçi Toplu Taşıma Aracı Olarak Çift Katlı Otobüsler: İstanbul Örneği"* başlıklı araştırma makalesinde, kent içi ulaşım sistemlerinde çift katlı otobüslerin kullanımına yönelik değerlendirmeler sunulmuştur.

İkinci çalışmada, Mustafa Muhacır ve Gürkan Işık tarafından hazırlanan *"E-Ticarette Operasyonel Verimlilik ve Stratejik Avantaj İçin Yapay Zekâ Destekli Ürün Kategorizasyonu"* başlıklı araştırma makalesinde, yapay zekâ destekli ürün sınıflandırma yaklaşımlarının e-ticaret süreçlerine katkıları incelenmiştir.

Üçüncü çalışmada, Emre Altaş tarafından hazırlanan *"Yenilikçi ve Yüksek Performanslı Malzemelerin Şekillendirilmesinde Geleneksel Olmayan İmalat Yöntemlerinin Uygulamaları"* başlıklı derleme makalesinde, modern üretim süreçlerinde kullanılan yenilikçi imalat teknikleri kapsamlı biçimde ele alınmıştır.

Son çalışmada ise Beyza Tekelioğlu, Esra Karabalık, Hevjin Akın, Yusuf Bera Şanlı ve Tamer Eren tarafından hazırlanan *"Akıllı Bina Konulu Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi"* başlıklı derleme makalesinde, akıllı bina alanındaki lisansüstü tezler bibliyometrik yöntemlerle değerlendirilmiş ve alandaki bilimsel eğilimler ortaya konulmuştur.

Dergimize katkı sağlayan değerli yazarlarımıza ve makaleleri titizlikle değerlendiren hakemlerimize teşekkür ederiz. Akıllı Sistemler Dergisi'nin bilimsel üretime katkısını artırarak sürdüreceğine inanıyor, gelecek sayılarımızda da siz değerli araştırmacıların çalışmalarıyla desteklerinizi bekliyoruz.

Saygılarımızla,

EDİTÖR

Araştırma Makalesi

Kent İçi Toplu Taşıma Aracı Olarak Çift Katlı Otobüsler: İstanbul Örneği

Serkan AYÇİL* 

*Sorumlu yazar/Corresponding author, İstanbul PTT Başmüdürlüğü, İstanbul, TÜRKİYE. E-posta: sserkan.aycil@gmail.com

Istanbul Directorate General of PTT (Regional Office). E-mail: sserkan.aycil@gmail.com

Atıf: Aycil, S. (2026). Double Decker Buses as Urban Public Transportation Vehicles: The Case Of Istanbul. JOSS, 5(1), 1–12.

Makale Bilgisi	Özet
Makale Tarihçesi <u>Geliş Tarihi:</u> 14.06.2025 <u>Kabul Tarihi:</u> 09.01.2026 <u>Yayınlanma Tarihi:</u> 30.06.2026	Çalışmanın amacı, İstanbul'da toplu taşıma sistemine entegre edilen çift katlı otobüslerin gelişimini, hat sayısını, işletme biçimini ve filo büyüklüğünü incelemektir. Bu kapsamda, İETT öncesi ve sonrası dönemlerdeki performans karşılaştırması yapılarak, bu otobüslerin kent içi ulaşım sistemine sağladığı katkılar ve maliyet-performans ile karbon salınımı açısından sürdürülebilirliğe etkileri değerlendirilmiştir. Karma araştırma yöntemi kullanılarak yürütülen bu çalışmada veriler, doküman analiziyle toplanmıştır. İstanbul özelinde yapılan çalışmada, 1993-2025 yılları arasında toplu taşıma faaliyetlerinde kullanılan çift katlı otobüsler iki dönem hâlinde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, çift katlı ve ekspres hatlarda faaliyet gösteren (çift katlı) otobüslerin, toplu taşımada önemli bir boşluğu doldurduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra yıllar içinde hem araç hem de hat sayısında azalma eğilimi olduğu anlaşılmaktadır. Pandemi döneminde çift katlı otobüslerin solo otobüslere çevrildiği gerçeği, bu etkinin gelecekte artacağı varsayımını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla çift katlı otobüs işletmeciliğinde sürdürülebilir bir ivmenin yakalanabilmesi için kapsamlı istatistiksel verilerden faydalanılması ve sektör düzeyinde kârlılık analizlerinin yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.
Anahtar Sözcükler Kent içi toplu taşıma Çift katlı hat Ekspres hat Çift katlı otobüs İstanbul	

Double Decker Buses as Urban Public Transportation Vehicles: The Case of Istanbul

Article Information	Abstract
Article History <u>Received:</u> 14.06.2025 <u>Accepted:</u> 09.01.2026 <u>Published:</u> 30.06.2026	<i>The aim of this study is to examine the development, route coverage, operational patterns, and fleet size of double-decker buses integrated into Istanbul's public transportation system. Within this scope, a comparative analysis was conducted between the pre- and post-IETT periods to evaluate the contribution of these buses to urban mobility, as well as their sustainability in terms of cost-performance and carbon emissions. Employing a mixed-methods approach, the study collected data through document analysis. Specifically, double-decker buses used in Istanbul's public transport between 1993 and 2025 were analyzed in two distinct periods. The findings indicate that double-decker buses, particularly those operating on express and dedicated routes, address a significant gap in public transportation. However, a decreasing trend in both the number of vehicles and routes over the years was observed. The conversion of double-decker buses into single-deck vehicles during the pandemic suggests that this trend may continue in the future. Consequently, achieving sustainable operations in double-decker bus management requires the utilization of comprehensive statistical data and profitability analyses at the sectoral level.</i>
Keywords Urban public transportation Double-decker bus route Express route Double-decker bus Istanbul	

Giriş (Introduction)

İstanbul'da toplu taşıma hizmeti sunmak amacıyla ilk olarak 1993 yılında İngiltere'den DAF Optare SB-250 model 14 adet çift katlı otobüs alımı gerçekleştirilmiştir. Yeni alınan ve 69 yolcu taşıma kapasitesi bulunan çift katlı otobüsler için öncelikle çift bilet tarifesi ve biletçi uygulamasına geçilmiştir (İETT, t.y.a.). Bir yıl aradan sonra 1994 yılında 12 adet DAF Optare SB-250 model çift katlı otobüs daha alınmıştır. Yaklaşık olarak 18 yıl hizmet sunması öngörülen otobüsler için 200 numaralı seri altında hatlar açılmıştır (Kurtoğlu, 2012). İETT'nin yaptığı 1996 tarihli ihalenin ardından 128 adet çift katlı özel otobüsün yönetim, işletme ve denetimi İETT'ye geçmiştir (İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2012). Bir sonraki alım 2007 yılında gerçekleştirilmiştir. Buna göre 1,8 milyar Euro yatırım yapma kararı alınarak Macaristan merkezli VDL Bus firmasından 95 yolcu (74 oturan, 21 ayakta) taşıma kapasitesi bulunan 50 adet DAF MJT model kırmızı renkli çift katlı otobüs alınarak İETT filosuna dâhil edilmiştir (Tarnai, 2007). Sonraki yıl metrobüs hattında çalıştırılmak üzere ek olarak DAF MJT model iki adet çift katlı kırmızı otobüs daha alınmıştır (İETT, t.y.c.; Orhon, 2022). Yaklaşık olarak altı yıl boyunca hizmet sunması öngörülen çift katlı DAF MJT model otobüslerin filodaki en düşük giriş yüksekliğine sahip olması, yolcular açısından otobüse biniş ve inişi kolaylaştırmaktaydı (Akar, 2010; İETT, t.y.e.).

1 Aralık 2010 tarihli ihalenin ardından İETT filosunda bulunan DAF MJT model 52 adet çift katlı otobüs envanterden çıkarılarak 2011 yılı Mart ayında 10 yıllığına Özel Halk Otobüsü olarak kiralanmıştır. Kiralanan çift katlı otobüslerden 51 adedi İstanbul'un kent içi ulaşımında hizmet sunmak üzere ihaleyi kazanan işletmecilere

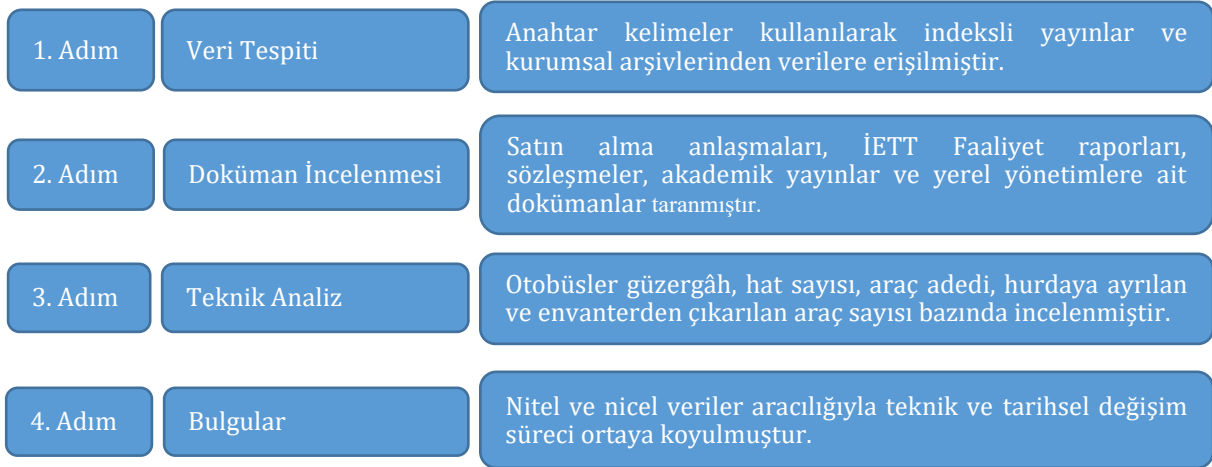
teslim edilmiştir. İlk nesil DAF Optare SB-250 model çift katlı otobüsler ise 2008 yılından itibaren kademeli olarak seferden çekilerek hurdaya ayrılmıştır (Kurtoğlu & Noyan, 2015). 2012 yılı itibarıyla İstanbul'da ulaşım faaliyeti sunan çift katlı otobüs sayısı 144'e çıkmıştır (İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2012). Çift katlı otobüsler 2012 yılına kadar İETT filosunda hizmet sunmuştur. Alınan karara istinaden İETT filosundaki çift katlı otobüslerin önce kiralama, sonra satış yoluyla özel sektöre devri sağlanmıştır (Orhon, 2022).

Buna göre İstanbul'un iki yakası arasında sefer yapan hatlar; çift katlı hatlar olarak adlandırılırken, Boęaz geçişi bulunmayan hatlar ekspres hatlar olarak adlandırılmaktadır (İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2022). Bugün itibarıyla İstanbul'da 3.041 adet özel halk otobüsü 3.000 adet İETT'nin kendi otobüsü faaliyette bulunmaktadır. Özel Halk Otobüsü uygulaması kapsamında ise beş şirket, üç kooperatif ve iki çift katlı otobüs yönetimi hizmet sunmaktadır (Aslanhan, 2024). Pandemi sürecinde 27 adet çift katlı otobüs solo otobüse çevrilmiştir. Yine aynı süreçte bir adet çift katlı otobüsün fiyatı 190 bin Euro iken bugün bu rakam 270 bin Euro seviyesine çıkmıştır (Kent İçi Toplu Taşıma, 2021). Solo otobüslere göre maliyetli olması nedeniyle çift katlı otobüsler, işletmeciler tarafından daha az tercih edilmektedir. Fakat ift katlı otobüsler diğer solo otobüslere göre 74 koltukluk daha fazla yolcu almakta ve kişi başına iki bilet tahsil etmektedir. Çift katlı otobüsler ayakta yolcu taşımak için tasarlanmamıştır. Bu nedenle uygulamanın başladığı ilk yıllarda ayakta yolcu alınması tamamen yasaktı. Fakat günümüzde hem alt hem de üst katta ayakta yolcu taşınmasına izin verilmektedir. Bu durum sefer başına daha fazla yolcu ve gelir sağlama anlamına gelmektedir. Buna göre sağlıklı bir maliyet analizi yapıldığında çift katlı otobüslerin daha fazla kâr etme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır (Akar, 2010; Boduç, 2024).

Çalışmanın amacı, İstanbul'da toplu taşıma sistemine entegre edilen çift katlı otobüslerin 1993-2025 yılları arasındaki gelişimini, hat sayısını, işletme biçimini ve filo büyüklüğünü incelemek; İETT öncesi ve sonrası dönemlerdeki performansını değerlendirerek kent içi ulaşım sistemine ve sürdürülebilirliğe etkisini ortaya koymaktır. Literatürde İstanbul'un kent içi ulaşımında kullanılan çift katlı otobüsleri hat sayısı, otobüs adedi, hurdaya ayrılan ve envanterden çıkarılan araç bilgisi bazında ele alan herhangi bir çalışmaya ulaşılmamıştır. Mevcut önemiyle öne çıkan çalışmanın, konuya ilişkin araştırmalarda bulunanlara katkı sağlaması beklenmektedir.

Materyal ve Metod (Material and Method)

Karma araştırma yöntemi kullanılarak oluşturulan çalışmada veriler, doküman analizi ve belge inceleme yöntemiyle toplanmıştır. Karma araştırma, nitel ve nicel araştırma yöntemlerini bir arada kullanarak araştırma problemini kapsamlı bir anlayışla analiz etmeyi öngören bir yaklaşımdır (Leech & Onwuegbuzie, 2009). Doküman analizinde, araştırma kapsamına dâhil edilen bilgi ve belgeler önce belirli bir akış içerisinde tasnif edilmekte, ardından gruplandırılarak sentezlenmektedir (Bowen, 2009).



Şekil 1: Blok diyagram (Block diagram).

Araştırma Sorusu (Research Question)

İstanbul'da toplu taşıma sisteminde kullanılan çift katlı otobüslerin İETT öncesi ve sonrası dönemlerdeki gelişimi; hat sayısı, işletme biçimi ve filo büyüklüğü nasıl bir gelişim göstermiştir? Bu değişimin, kent içi toplu taşıma sistemine yansımaları ve sürdürülebilirliğe etkileri nelerdir?

Hedef ve Araştırma Basamakları (Goals and Research Steps)

Araştırmanın hedefi, 1993 yılı itibarıyla İstanbul'un toplu taşıma sistemine entegre edilen çift katlı otobüslerin zaman içindeki değişimini, hat sayısını, İETT öncesi ve sonraki dönemdeki performansını ortaya koymak ve kent içi ulaşım sistemine sunduğu katkıları değerlendirmektir.

Tablo 1: Araştırma basamakları (Research steps)

Basamaklar	Açıklama
Literatür Taraması	Çift katlı kent içi toplu taşıma araçları ile ilgili kaynakların araştırılması
Tarihsel ve Teknik İnceleme	1993-2025 yılları arasında kent içi toplu taşımada kullanılan otobüsler güzergâh, hat sayısı, araç adedi, hurdaya ayrılan ve envanterden çıkarılan araç sayısı bazında ele alındı
Verilerin Toplanması	Araştırma verileri; kurumsal faaliyet raporları başta olmak üzere satın alma anlaşmaları, akademik kaynaklar, arşiv belgeleri, popüler yayınlar ve teknik raporlardan ulaşılan içerikler üzerinden derlendi
Durum Analizi	2025 yılı itibarıyla güzergâh, aktif olarak kullanılan hatlar, durak sayısı, toplam mesafe, sefer sıklığı ve süreler incelendi
Karşılaştırmalı Değerlendirme	Filo büyüklüğü ve hat sayısındaki artış/azalış oranları dönemsel olarak hesaplandı. Pandeminin sektöre etkisi değerlendirildi
Ekonomik ve İşletme Bazlı Yorumlama	Çift katlı otobüslerin solo otobüslere göre maliyet ve gelir farklılıkları değerlendirildi. Sektör analizinin yapılması gerekliliği ortaya kondu
Sonuç ve Tartışma	Nitel ve nicel veriler aracılığıyla araştırma sorusuna cevap arandı ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri bağlamında sektörün geleceğine yönelik çıkarımda bulunuldu

Araştırmanın Örneklem ve Sınırlılığı (Sample and Limitations of the Study)

İstanbul özelinde yapılan bu çalışmada 1993-2025 yılları arasında toplu taşıma faaliyetlerinde kullanılan çift katlı otobüsler incelenmiştir. Bu bağlamda, İstanbul Ulaşım AŞ tarafından turistik güzergâhlarda kullanılan çift katlı otobüsler çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Araştırma Verileri ve Veri Toplama Araçları (Research Data and Data Collection Tools)

“Kent içi toplu taşıma, çift katlı hat, ekspres hat, çift katlı otobüs” anahtar kelimeleri kullanılarak basılı ve internet tabanlı indeksler (Araştırmaz, Asos Index, Sobiad Atıf Dizini, Cambridge Scientific Abstracts, Türkiye Kaynakçası, EBSCO ve ERIH PLUS) üzerinden taramalar yapılarak veriler toplanmıştır. Gerek Türkçe gerekse yabancı dildeki metinler incelendikten sonra elde edilen bulgular doğrultusunda çalışmanın literatürü oluşturulmuştur. Araştırma sürecinde, çift katlı otobüslerin 1993-2011 yılları arasında İETT tarafından, sonraki süreçte ise Özel Halk Otobüsü statüsünde hizmet sunduğu görülmüştür. Bu nedenle, çalışma İETT öncesi ve sonrası olacak biçimde iki ayrı dönem olarak incelenmiştir.

Bu bağlamda, araştırma verilerinin birincil kaynaklarına İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü (İETT) tarafından yayınlanan faaliyet raporlarından; ikincil kaynaklarına ise kitap, tez, dergi, kitap bölümü gibi akademik kaynaklardan ve gazete kupürü, popüler yayın ve ulaşım portallarında yer alan web sayfalarından ulaşılmıştır.

Verilerin Analizi (Data Analysis)

Araştırma sürecinde kent içi ulaşımında hizmet sunan çift katlı otobüslerle ilgili birtakım verilere ulaşılmıştır. Olayların zamansal akışını ortaya koymak amacıyla bu veriler kronolojik olarak sıralanmıştır. Sonraki aşamada, tematik analiz yöntemi kullanılarak veriler belirlenen kuramsal çerçeveye göre kodlanmış ve bu doğrultuda anlamlı temalar oluşturulmuştur. Ulaşılan verilerin önemli bir kısmı, yalnızca bir yılla sınırlı bir dönem hakkında bilgiler içerdiği için çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Bu nedenle araştırma verileri; güzergâh, hat sayısı, araç adedi, hurdaya ayrılan araç bilgisi ve envanterden çıkarılan araç sayısı gibi değişkenler temelinde sıralanarak araştırmacı tarafından yorumlanmıştır.

Literatür Taraması/Kuramsal Arka Plan (Literature Review/Theoretical Background)

Erkol (2004), çalışmasında İETT otobüslerinin kaptan kabinini ergonomik açıdan incelemiştir. Bu kapsamda, 46 otobüs kaptanına anket uygulanarak kaptan koltuğu, yan aynalar, akbil kutusunun konumu, butonların kullanımı, ortam ısısı, havalandırma, ışık sistemi, görüş açısı, gürültü, kapı kontrolü, direksiyon simidi ve gösterge panelinin fonksiyonelliğine ilişkin problemlere çözüm aranmıştır. Özellikle çift katlı otobüslerle ilgili yapılan analizler bu tür araçlarda güvenliğin artırılması gerektiğine işaret etmektedir. Buna göre özel olarak tasarlanan kaptan kabinlerinin hem sürüş hem de toplu taşıma güvenliği açısından önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Uysal 2009), çalışmasında İstanbul'un Avrupa Yakası'ndaki ulaşım sistemini incelemiştir. Bu doğrultuda ulaşım sistemleri deniz, kara ve raylı sistemler olarak sınıflandırılmış Avrupa Yakası'ndaki sistem ise otobüs odaklı olarak değerlendirilmiştir. Veriler doküman incelemesi yöntemiyle toplanmış, ulaşım sistemi hat ve durak sayısı bağlamında analiz edilmiştir. Bu kapsamda, turistik ve ekspres hatlarda hizmet sunan çift katlı otobüslere değinilerek bu otobüslerin tercih edilme nedenleri incelenmiştir. Elde edilen bulgular kent içi ulaşımında deniz taşımacılığının yanı sıra raylı sistemlerin de önemsendiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle kara ulaşım araçları içerisindeki otobüslerin kent içi ulaşım hizmetlerinde tamamlayıcı bir unsur olarak görülmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kurtoğlu (2012), çalışmasında İstanbul'un toplu taşıma sistemindeki tarihsel değişimi incelemiştir. Bu doğrultuda omnibüslerden günümüz toplu ulaşım araçlarına kadar uzanan süreç ele almıştır. İETT arşivlerinden elde ettiği dokümanlarla derlenen çalışmada, İstanbul'da hizmet sunan otobüsler teknik detay, sayı ve güzergâh bilgisi bakımından özetlemiştir. Bu kapsamda çalışmanın birkaç sayfasında 1993 yılında İETT filosuna dâhil edilen çift katlı otobüslere yer vermiştir. Buradaki çift katlı otobüslerin özellikle yolcu kapasitesini artırma ve ana arterlerdeki verimliliği sağlama amacıyla tercih edildiği görülmektedir. Sonuç olarak çalışma, İstanbul'daki otobüslere dair teknik ve tarihsel bir bakış açısı sunmaktadır.

Kurtoğlu & Noyan (2015), çalışmasında İstanbul'da toplu taşıma hizmeti sunan araçları kapsamlı bir biçimde incelemiştir. Bu doğrultuda ilk otobüs işletmeciliğinden günümüze denk uzanan otobüslere değinilerek araçların alım sürecine dair teknik bilgilere yer verilmiştir. Çalışmanın bir bölümünde çift katlı otobüslerin alım sürecine değinilmiş ve uygulamanın kent açısından önemi vurgulanmıştır. Buna göre yolcu yoğununun yüksek olduğu güzergâhlarda çift katlı otobüslerin işlevsel bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur. Ancak yapılan bunca iyileştirme ve ihalelere rağmen İstanbul'daki kent içi ulaşım araçlarının beklenen hizmet yeterliliğine ulaşamadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çelikyay, Emecan & Kadiroğlu (2017), çalışmasında toplu taşımada kullanılan akıllı ulaşım sistemlerini incelemiştir. Bu kapsamda, İETT tarafından geliştirilen "karakutu" uygulaması ele alınmış ve bu uygulamanın toplu taşımadaki etkileri araştırılmıştır. Çalışma çift katlı otobüsleri de analiz etmiş ve söz konusu uygulamanın güvenli, ekonomik ve konforlu sürüş üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Buna göre, bu tür akıllı sistemlerin araç üreticileri, kaptanlar, yolcular ve hizmet sağlayıcıların karşılaştığı çeşitli problemleri modellediği ve toplu taşımada sürdürülebilirliği artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Orhon (2022), çalışmasında İETT'nin 1927 yılından günümüze değin kullandığı otobüsleri teknik açıdan detaylı olarak incelemiştir. Bu doğrultuda İstanbul özelinde bir araştırma yapılmış ve ulaşılan verileri kronolojik olarak sıralamıştır. Bunun için İETT, özel işletme ve özel halk otobüsü hizmeti bazında analizler yapılmıştır. Çalışmanın bir bölümünde çift katlı otobüslere de yer verilmiştir. Buna göre 1939 yılı itibarıyla çift katlı

otobüsler de dâhil olmak üzere İstanbul'da 24 marka ve 64 farklı model otobüsün hizmet sunduğu sonucuna ulaşılmıştır.

İbik (2024), çalışmasında İstanbul'da karayolu emisyonundan kaynaklanan CO₂ salınımını hesaplamıştır. Buna göre CO₂ salınımı 2010-2022 döneminde %52,72'lik bir artış göstermiştir. Bu bulgu, kişi başına taşınan yolcu kapasitesinin artırılmasının emisyon azaltımı için kritik olduğunu göstermektedir. İstanbul'da en fazla dizel yakıtın kullanımı otomobillerde görülmektedir. Bunun yanı sıra toplu taşımada etkin olarak kullanılan otobüslerde elektrikli araç kullanımına bağlı olarak CO₂ salınımı önemli ölçüde azalmıştır.

Çalışmanın Literatüre Sunacağı Özgün Katkı (The Original Contribution of the Study to the Literature)

Bu çalışma İstanbul'da toplu taşıma faaliyeti sunan çift katlı otobüslerin 1993-2025 yılları arasındaki gelişimini kapsamlı olarak inceleyen ilk araştırma olarak ortaya çıkmıştır. Kent içi ulaşımında kullanılan çift katlı otobüsler; hat sayısı, mesafe, tahmini seyahat süresi, durak sayısı, envanter durumu ve hurdaya ayrılan araç sayısı bazında ele alınarak analiz edilmiştir. Ayrıca İETT ile özel sektör işletmeciliği arasındaki farklılıklar ortaya konmuş ve sistemin sürdürülebilirliği değerlendirilmiştir.

Bulgular (Findings)

İstanbul'da kent içi toplu taşımada kullanılan çift katlı otobüslerin gelişiminin ele alındığı bu çalışmada hat sayıları, güzergâh özellikleri, filo büyüklüğü ile araçların hizmete giriş ve çıkış süreçleri incelenmiştir. Elde edilen veriler tablolar aracılığıyla sunulurken yılları bağlı değişimler analiz edilmiştir. İETT dönemi ile Özel Halk Otobüsü statüsündeki dönem karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, bu doğrultuda çift katlı otobüslerin İstanbul toplu taşıma sistemi içerisindeki konumu ve zaman içinde geçirdiği dönüşüm somut verilerle ortaya konulmuştur.

Tablo 2: 1993 yılında İstanbul'da toplu taşıma hizmeti sunan çift katlı otobüs hatları (Double-decker bus routes providing public transportation services in Istanbul in 1993)

Hat Numarası	Güzergâh Bilgisi
71T-1	Taksim-Ataköy 9.-10. Kısım
200	Taksim-Bostancı
221	Taksim-Beykoz
304	Sultanahmet- Emirgan (Güncel hat numarası 210)

Kaynak: (Kurtoğlu, 2012; Orhon, 2022).

Tablo 2'de 1993 yılındaki çift katlı otobüs hatları görülmektedir. Buna göre dört adet olduğu görülen çift katlı otobüs hatlarından ikisinin Anadolu ve Avrupa yakaları arasında olduğu anlaşılmaktadır. Hizmete başladıktan yaklaşık iki ay sonra Sultanahmet-Emirgan hattının numarası ise 210 olarak güncellenmiştir.

Tablo 3: 1993-2011 yılları arasında İETT filosunda bulunan çift katlı otobüsler (Double-decker buses in the İETT fleet between 1993 and 2011)

Marka/Model	Alım Tarihi	Alım Adedi
DAF Optare SB-250	1993	14

DAF Optare SB-250	1994	12
DAF MJT	2007	50
DAF MJT	2008	2

Kaynak: (Orhon, 2022).

Tablo 3'te 1993-2011 yılları arasında İETT filosunda bulunan çift katlı otobüs sayısı görülmektedir. Buna göre, 1993 ve 1994 yıllarında toplam 26 adet (sırasıyla 14 ve 12 adet) DAF Optare SB-250 model çift katlı otobüs satın alınırken, 2007 ve 2008 yıllarında toplam 52 adet (sırasıyla 50 ve 2 adet) DAF MJT model otobüs satın alınmıştır.

Tablo 4: İETT filosundaki hurdaya ayrılan ve envanterden çıkarılan çift katlı otobüsler (Double-decker buses in the İETT fleet that were scrapped and removed from the inventory)

Marka/Model	Kullanım Durumu	2008	2009	2010	2011
DAF Optare SB-250	Hurdaya Ayrılan	1	3	22	-
DAF MJT	Hurdaya Ayrılan	-	-	-	1
DAF MJT	Envanterden Çıkarılan	-	-	51	-

Kaynak: (Orhon, 2022).

Tablo 4'te İETT filosundaki çift katlı otobüslerin filodan çıkarılma ve envanter durumları görülmektedir. Buna göre iki farklı marka ve modelde aracın bulunduğu görülmekle birlikte DAF Optare SB-250 model araçların 2008-2010 yılları arasında, DAF MJT model 1 adet aracın ise 2011 yılında hurdaya ayrıldığı anlaşılmaktadır. Yine 51 adet DAF MJT model araç 2010 yılında envanterden çıkarılmıştır.

Tablo 5: 2025 yılı itibarıyla İstanbul'da toplu taşıma hizmeti sunan çift katlı otobüs hatları ve özellikleri (Double-decker bus routes and features that provide public transportation services in Istanbul as of 2025)

Bölge	Güzergâh	Durak	Mesafe	Sıklık(dk)	Süre(dk)
Avrupa Yakası	E56 İspartakule / Bizimevler / Taksim	28	34	30-60	80
	E59 Boğazköy / Bahçeşehir-Taksim	47	42	30-50	98
	E58 Esenkent Bahçeşehir / Mecidiyeköy	37	34	25-35	96
	E57 Esenkent Bahçeşehir / Bakırköy	43	34	50-58	84
	145M Yeşilkent / Beykent / Taksim	42	45	Tek sefer	114
	145T Beylikdüzü / Taksim	39	53	71-80	75
	76D Bahçeşehir / Esenkent / Taksim	63	76	7-15	95
Anadolu Yakası	18D Sultanbeyli / Kadıköy	32	-	7-37	74
	16D Alt Kaynarca / Pendik / Kadıköy	68	-	8-10	71
	256 Yeditepe Üniv. Ataşehir / Taksim	48	26	76	71
	251 Pendik / Mecidiyeköy / Şişli	48	35	35-50	88
	252 Kartal / Mecidiyeköy / Şişli	56	33	540	90

Kaynak: (İETT, t.y.a.; İETT, t.y.b.; Moovit, 2025; Orhon, 2022).

Tablo 5'te 2025 yılı itibarıyla İstanbul'daki çift katlı otobüs hatları görülmektedir. Buna göre İstanbul'un her iki yakasındaki çift katlı otobüs hat sayısının 12 olduğu anlaşılmaktadır. Bu hatlardan yedisi Avrupa Yakası'nda, beşi ise Anadolu Yakası'nda bulunmaktadır. Hatlardaki durak sayısı 28 ile 68 arasında değişkenlik gösterirken güzergâh uzunluğu 26 kilometreden 76 kilometreye kadar farklılık göstermektedir. Sefer sıklığı 7 dakika gibi kısa bir süreden başlayıp 540 dakikaya kadar çıkabilmektedir. Sefer süresi ise 71 dakika ile 114 dakika arasında farklılık göstermektedir.

Tablo 6: 1993-2025 yılları arasında İstanbul'da toplu taşıma hizmeti sunan çift katlı otobüs hat sayısı (Number of double-decker bus routes providing public transportation services in Istanbul between 1993 and 2025)

Yıl Aralığı	1993-2011	2012-2021	2022-2024	2025
Hat Sayısı	4	13	9	12

Kaynak: (İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2017; İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2022).

Tablo 6'da 1993-2025 yılları arasındaki çift katlı otobüs hatları görülmektedir. Buna göre ilk başladığı dönemde dört olan çift katlı otobüs hat sayısının 2012 yılından itibaren 13'e çıktığı 2022'de ise 9'a düşürüldüğü anlaşılmaktadır. 2025 yılı itibarıyla İstanbul'daki çift katlı hat sayısı 12 olarak güncellenmiştir.

Tablo 7: İstanbul'da 1993-2025 yılları arasında toplu taşıma hizmeti sunan çift katlı otobüs sayısı (Number of double-decker buses providing public transportation services in Istanbul between 1993 and 2025)

Yıllar	1993	1994-2006	2007	2008-2010	2011	2012-2020	2021	2022-2024	2025
Otobüs Sayısı	14	26	76	78	128	144	117	111	104

Kaynak: (Boduç, 2024; Halk Ulaşım, 2011; İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2017; İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2022; İETT, t.y.d.; Mimdaporg, 2010).

Tablo 7'de 1993-2025 yılları arasındaki İstanbul'da hizmet sunan çift katlı otobüs sayısı görülmektedir. Buna göre ilk başladığı dönemde 14 olan çift katlı otobüs sayısı 1994 yılında 26'ya, 2007 yılında 76'ya, 2008 yılında 78'e, 2011 yılında 128'e, 2012 yılında ise 144'e çıkmıştır. 2020 yılına kadar sabit sayıda kaldığı görülen çift katlı otobüslerin 2021 yılında 27, 2022 yılında 6 ve 2025 yılında 7 araç azaldığı görülmektedir.

İstanbul'da kent içi toplu taşımada, sınırlı sayıda hatta işletilen çift katlı otobüslerin özellikle uzun mesafeli yolculuklar ile merkezi ve çeper bölgeler arasındaki güzergâhlarda etkin olduğu görülmektedir. İncelenen süreçte hat sayısı ve filo büyüklüğünde dalgalanmalar gözlenmiş; 2012 sonrasındaki artış eğilimi ise pandemi süreciyle tersine dönerek belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Bu kapsamda, İETT işletmeciliğinden özel sektör ağırlıklı bir yapıya geçişle birlikte çift katlı otobüslerin kullanım biçimi ve yaygınlığı değişmiş; bu durum, sistemin sürekliliği ve sürdürülebilirliği bağlamında yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmıştır.

Tartışma ve Sonuç (Discussion and Results)

İETT çift katlı otobüs işletmeciliğini yürüttüğü süreçte dört adet hattı hizmete açmıştır. Yaklaşık 18 yıllık süreçte turistik amaçlı hizmet sunması planlanan 304 numaralı Sultanahmet-Emirgan hattı, sonraki süreçte 210 olarak güncellenmiştir (Orhon, 2022). Buna rağmen turistler tarafından bu hat, solo otobüsler faaliyete girinceye kadar Tarihi Yarımada'dan Boğaziçi civarındaki semtlere ulaşımında yaygın olarak kullanılmıştır. Çift katlı otobüslerin Özel Halk Otobüsü olarak kiralanmasının ardından ise dört olan hat sayısı 2012 yılında 13'e çıkmıştır. 2012 yılından itibaren yaklaşık 10 yıl boyunca sabit kalan hat sayısı, 2022 yılında 9'a düşürülmüş ve son olarak 2025 yılında 12'ye çıkarılmıştır.

İETT tarafından iki farklı marka ve modelde (DAF Optare SB-250 ve DAF MJT) çift katlı otobüs alımı gerçekleştirilmiştir. Alınan araç sayısının ise yaklaşık 18 yıllık süreçte 78'e ulaştığı görülmektedir. 1994 yılındaki alımdan sonra, yaklaşık 13 yıl boyunca yalnızca 26 araç ile hizmet verilmiş, 2007 yılında ise 50 araçlık yeni bir alım yapılmıştır.

İETT filosunda bulunan çift katlı otobüslerin envanteri incelendiğinde filoda iki farklı marka ve modelde aracın bulunduğu görülmektedir. Buna göre faydalı kullanım ömrünü tamamlayan DAF Optare SB-250 model araçların tamamı (sırasıyla 1, 3 ve 22 adet) 2008, 2009 ve 2010 yıllarında, DAF MJT model (1 adet) aracın ise 2011 yılında hurdaya ayrıldığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda aktif olarak kullanılan 52 adet DAF MJT model aracın da 2010 yılında envanterden çıkarıldığı görülmektedir. Dolayısıyla 1993, 1994, 2007 ve 2008 yıllarında satın alınan 78 adet çift katlı otobüsün tamamı 2011 yılı itibarıyla envanterden çıkarılmıştır.

İstanbul'da 2025 yılı itibarıyla 12 adet çift katlı otobüs hattı bulunmaktadır. Çift katlı otobüs hatlarının yedisi Avrupa Yakası'nda yer alırken beşi Anadolu Yakası'nda yer almaktadır. Mevcut hatlardan üçünde (256 Yeditepe Üniv. Ataşehir / Taksim, 251 Pendik / Mecidiyeköy / Şişli, 252 Kartal / Mecidiyeköy / Şişli) çalışan çift katlı otobüsler ise her iki yaka arasında hizmet sunmaktadır. Hatların önemli bir kısmı kentin çeper bölgelerinden (Bahçeşehir, Esenkent, Beylikdüzü, Sultanbeyli ve Pendik) merkezi ulaşım noktalarına (Taksim, Kadıköy, Mecidiyeköy ve Şişli) doğru bir akış göstermektedir. Bu yapı, çift katlı otobüslerin özellikle uzun mesafeli ve yolcu yoğunluğunun fazla olduğu hatlarda tercih edildiğini ortaya koymaktadır. Hatlara ait sefer sıklığı ve süreleri incelendiğinde, 76D ve 16D gibi hatların gün içerisinde sık aralıklarla hizmet verdiği anlaşılmakta olup 145M ve 252 numaralı hatların tek sefer ya da uzun aralıklarla çalıştığı anlaşılmaktadır. Sefer süreleri ise genellikle 70 ila 114 dakika arasında değişkenlik göstermekle birlikte güzergâh uzunluğu ve trafik yoğunluğunun, hizmet süresi üzerinde doğrudan belirleyici etkisi olduğu görülmektedir.

İlk dönemde 14 adet çift katlı otobüs hizmete başlamıştır. Bir yıl aradan sonra 1994 yılında araç sayısında %85,7'lik bir artış yaşanmış ve araç sayısı 26'ya çıkmıştır. 1996 yılında yapılan yeni alımlarla birlikte araç sayısı %192,4'lük bir artış göstererek 76'ya çıkmıştır. Bir yıl sonraki yaşanan %2,6'lık artışın ardından araç sayısı 78'e, 2011 yılındaki %64,1'lik artıştan sonra 128'e çıkmıştır. 2012 yılında ise filodaki araç sayısında %12,3'lük bir artış görülmüş ve araç sayısı 144 olarak güncellenmiştir. Pandemiye rastlayan 2021 yılında filodaki araç sayısında ilk düşüş yaşanmıştır Buna göre yaşanan %18,75'lik azalışla birlikte araç sayısı 117'ye düşmüştür. Bir sonraki yıl yaşanan %5,2'lik azalıştan sonra araç sayısı 111'e gerilemiştir. Son olarak 2025 yılındaki %6,3'lük düşüşün ardından araç sayısı 7 adet azalarak 104'e gerilemiştir.

Çift katlı otobüslerin sürdürülebilirlik açısından fayda ve maliyet etkileri ele alındığında, maliyet-performans açısından net bir karşılaştırma yapılması zor olmakla birlikte literatürde yapılan bazı çalışmalar, bu tür analizlerin ciddi bir boşluğu doldurduğunu göstermektedir. İstanbul özelinde bu karşılaştırmayı doğrudan

yapabilecek kapsamlı bir veri seti mevcut olmamakla birlikte Topal & Nakir (2018), tarafından yapılan “Total Cost of Ownership” analizinde, İETT filosundaki dizel, CNG ve elektrikli otobüsler karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada, elektrikli otobüslerin uzun vadede daha düşük emisyon ve maliyet avantajı sağladığı görülmüştür.

İstanbul özelinde yapılan çalışmalar karayolu ulaşımından kaynaklanan CO₂ emisyonunun 2010-2022 döneminde %52,72 arttığını göstermektedir (İbik, 2024). Bu bağlamda, çift katlı otobüslerin yerine solo otobüslerin kullanılması durumunda, ek kapasite kullanımı sağlama avantajı nedeniyle kişi başına karbon salınımı ve yakıt tüketimi açısından potansiyel bir azalma ya da artış modellemesi mümkün olabilirdi. Fakat mevcut çalışmada bu tür kantitatif karşılaştırmalar yapılmadığından, sonuçlar yalnızca eğilimlerin niteliksel olarak tartışılmasıyla sınırlı kalmıştır. Bu nedenle, geleceğe dönük bir öneri olarak, sektörel kârlılık ve karbon-etki analizlerinin kapsamlı bir biçimde yapılması gerekmektedir.

İstanbul’daki çift katlı ve ekspres hatlarda faaliyette bulunan çift katlı otobüslerinin toplu taşımada oluşan önemli bir boşluğu doldurduğu görülmekle birlikte yıllar içerisinde gerek araç, gerekse hat sayısında azalış eğilimi olduğu anlaşılmaktadır. Pandemi döneminde çift katlı otobüslerin solo otobüslere çevrildiği gerçeği göz önüne bulundurulduğunda bu etkinin giderek artacağına yönelik varsayımlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle çift katlı otobüs işletmeciliğinde sürdürülebilir bir ivmenin yakalanabilmesi için çift katlı otobüs yönetiminden istatistiksel veriler alınarak sektör düzeyinde kârlılık analizlerinin yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yazarlık Katkısı

Serkan Aycil: Fikir/Kavram, Kavramsal Arka Plan, Metodoloji, Veri Analizi, Veri Görselleştirme, Yazım, Değerlendirme ve İnceleme, Finansman Sağlama

Yazar Çatışması

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça (References)

- Akar, A. (2010). *İstanbul şehir içi belediye otobüslerinin yolcu odaklı iç mekân analizi ve değerlendirmesi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Aslanhan, N. (2024, 4 Kasım). *Halk otobüslerinde değişim zamanı geldi*. <https://www.halkulasim.com/makale/halk-otobuslerinde-degisim-zamani-geldi-4383>
- Boduç, A. (2024, 29 Nisan). *İsmet Aktürk: Trafiğe çare çift katlı otobüsler*. <https://www.gazetebirlik.com/istanbul-haberleri/ismet-akturk-trafige-care-cift-katli-otobusler/101127>
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27-40. <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
- Çelikyay, H., Emecan, A., & Kadiroğlu, R. (2017). Akıllı ulaşım sistemi olarak toplu taşımada karakutu uygulaması ve şoför performans sonuçları: İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri (İETT) karakutu projesi örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(Kayfor 15 Özel Sayısı), 2055-2071. <https://izlik.org/JA39GK53GT>

- Erkol, B. (2004). *Şehiriçi yolcu otobüsleri ve şoför mahali tasarımı konusunda bir araştırma: Mercedes-Benz örneği* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Halk Ulaşım. (2011, 3 Ocak). *İETT ihalelerine sektör ilgi göstermedi*. <https://www.halkulasim.com/haber/iett-ihalelerine-sektor-ilgi-gostermedi-384>
- İbik, T. (2024). Sürdürülebilir kent içi ulaşım ve CO₂ emisyonu: İstanbul ili örneği. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 31(3), 597-622. <https://doi.org/10.18657/yonveek.1482257>
- İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2012). *2012 İETT faaliyet raporu*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2017). *Stratejik plan 2013-2017*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2022). *Stratejik plan 2018-2022*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- İETT. (t.y.a). *Çift katlı ulaşım ücret tarifesi*. <https://iett.istanbul/icerik/cift-Katli-Ulasim-ucret-Tarifesi>
- İETT. (t.y.b). *E-56 Ispartakule-Taksim*. <https://iett.istanbul/RouteDetail?hkod=E-56&routename=ISPARTAKULE%20-%20TAKSIM>
- İETT. (t.y.c). *Kronolojik tarihçe*. <https://iett.istanbul/icerik/kronolojik-tarihce>
- İETT. (t.y.d). *Özel taşımacılık*. <https://iett.istanbul/icerik/ozel-tasimacilik>
- İETT. (t.y.e). *Tarihçe*. <https://iett.istanbul/icerik/kisa-tarihce>
- Kent İçi Toplu Taşıma. (2021, 9 Ekim). *Çift katlı umutlu*. <https://www.kenticitoplutasima.com.tr/teknoloji/cift-katli-umutlu/>
- Kurtoğlu, A. (Haz.). (2012). *Omnibüsten metrobüse*. İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü.
- Kurtoğlu, A., & Noyan, M. (2015). *İstanbul'un 100 ulaşım aracı*. İstanbul Büyükşehir Belediyesi (Kültür A.Ş.) Yayınları.
- Leech, N. L., & Onwuegbuzie, A. J., (2009). A Typology of mixed methods research designs. *Qual Quant*, 43, 265-275. <https://doi.org/10.1007/s11135-007-9105-3>
- Mimdaporg. (2010, 1 Aralık). *İETT'den feribot yolcusunu uçağa yetiştirecek yeni hizmet: Havabüs*. <https://mimdap.org/haberler/yettiden-feribot-yolcusunu-ucadha-yetithtirecek-yeni-hizmet-havabus/>
- Moovit. (2025, 6 Temmuz). *İETT çift katlı hatlar - saatler, güzergâhlar ve duraklar*. https://moovitapp.com/index/tr/toplu_ta%C5%9F%C4%B1ma-lines-Istanbul-1563-2836459#google_vignette
- Orhon, O. (2022). *İstanbul İETT otobüsleri*. İkinci Adam Yayınları.
- Tarnai, S. (2007). *Istanbul transport to invest in new infrastructure*. <https://www.mjt-zrt.eu/sajto/Ujabb/Voith.pdf>
- Topal, O., & Nakir, İ. (2018). Total cost of ownership based economic analysis of diesel, CNG and electric bus concepts for the public transport in Istanbul city. *Energies*, 11(9), 2369. <https://doi.org/10.3390/en11092369>
- Uysal, A. (2009). *İstanbul'un Avrupa Yakası'nda İETT ulaşımı* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.

Araştırma Makalesi

E-Ticarette Operasyonel Verimlilik ve Stratejik Avantaj İçin Yapay Zekâ Destekli Ürün Kategorizasyonu

Mustafa Muhacır* , Gürkan Işık** 

* Bursa Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye
Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, Bursa, Türkiye

**Sorumlu yazar/Corresponding author, Bursa Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye
Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, Bursa, Türkiye. E-posta: gurkan.isik@btu.edu.tr

Atıf: Muhacır, M., & Işık, G. (2026). AI-Powered Product Categorization for Operational Efficiency and Strategic Advantage in E-Commerce. *JOSS*, 5(1), 13-43

Makale Bilgisi

Makale Tarihiçesi

Geliş Tarihi:

22.09.2025

Kabul Tarihi:

21.01.2026

Yayınlanma Tarihi:

30.06.2026

Anahtar Sözcükler

E-ticaret

Ürün Kategorizasyonu

Doğal Dil İşleme

BERT

Hiyerarşik Sınıflandırma

Makine Öğrenmesi

Otomasyon

Özet

E-ticaret ekosisteminde milyonlarca ürün, dinamik envanterler ve çoklu satış kanalları nedeniyle manuel ürün kategorizasyonu sürdürülemez hale gelmiştir. Bu çalışma, operasyonel verimsizlikler, bilişsel önyargılar ve ölçeklenememe gibi kısıtları aşmak için yapay zekâ tabanlı otonom bir kategorizasyon sistemi geliştirmektedir. Çalışmanın kapsamını, aktif satış yapılan iki farklı pazar yerinden toplanan 51.000'in üzerinde ürün verisi ve toplam 860 farklı hiyerarşik kategori düğümü oluşturmaktadır. Problem alt başlıklara ayrılarak kavramsallaştırılmış ve çekirdekte dönüştürücü mimarisine dayalı hibrit bir model kullanılmıştır. Türkçe metinler için önceden eğitilmiş BERT modeli, hiyerarşik sınıflandırmaya uyarlanmış; ayrıca metinsel eşleşmenin olmadığı durumlarda Sentence-BERT (SBERT) tabanlı anlamsal arama modeli, ontoloji eşleştirme görevini üstlenmiştir. İki e-ticaret platformundan elde edilen gerçek verilerle yapılan deneylerde model, daha önce görmediği test verisinde %88,51 doğruluk sağlamış ve manuel sürece kıyasla adam-saat maliyetini %99 azaltmıştır. Sonuçlar, sistemin operasyonel verimlilik, maliyet avantajı ve sürdürülebilir rekabet gücü sunduğunu göstermektedir.

AI-Powered Product Categorization for Operational Efficiency and Strategic Advantage in E-Commerce

Article Information	Abstract
Article History <u>Received:</u> 22.09.2025 <u>Accepted:</u> 21.01.2026 <u>Published:</u> 30.06.2026	<i>In the e-commerce ecosystem, with millions of products, dynamic inventories, and multiple sales channels, manual product categorization has become unsustainable. This study develops an AI-based autonomous categorization system to overcome limitations such as operational inefficiencies, cognitive biases, and lack of scalability. The study encompasses over 51,000 product data points collected from two different marketplaces with active sales, comprising a total of 860 different hierarchical category nodes. The problem is conceptualized into sub-tasks, with a hybrid model based on transformer architecture at its core. A pre-trained BERT model for Turkish texts is fine-tuned for hierarchical classification, while a Sentence-BERT (SBERT) based semantic search model handles ontology matching when direct text matches are absent. Experiments using real data from two e-commerce platforms show the model achieved 88.51% accuracy on unseen test data and reduced manual categorization labor costs by 99%. Results demonstrate the system not only improves efficiency and cost savings but also offers sustainable competitive advantage for e-commerce businesses.</i>
Keywords E-commerce Product Categorization Natural Language Processing BERT Hierarchical Classification Machine Learning Automation	

Giriş (Introduction)

2024 yılı itibarıyla Türkiye’de e-ticaret hacmi %61,7’lik artışla 3 trilyon TL’ye ulaşırken, genel ticaret içindeki payı %20’yi aşmıştır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2025). Küresel ölçekte ise perakende e-ticaret satışlarının 2024’te 6 trilyon ABD dolarını aştığı ve bu rakamın 2027 yılına kadar 8 trilyon doları geçeceği öngörülmektedir (Keenan, 2024). Ancak bu baş döndürücü büyüme, Anderson’ın (Anderson, 2006) “Uzun Kuyruk” teorisiyle de ortaya koyduğu gibi, niş ürünlerin de popüler ürünler kadar erişilebilir hale geldiği neredeyse sonsuz bir ürün evreni yaratmıştır. Bu durum, işletmeler için ürün yönetimi ve keşfedilebilirlik kritik ve çok katmanlı bir operasyonel zorluğu oluşturmaktadır.

Her bir platformun kendine özgü, katı ve sürekli güncellenen bir kategori ağacı ve nitelik setine sahip olması, satıcıları aynı ürünü her platform için ayrı ayrı, sınıflandırmaya zorlamaktadır. Kategori yapısının iyi belirlenmemesi, operasyonel verimsizlik ve maliyet yaratmanın yanında kanallar arası tutarsızlıklara yol açarak marka imajını ve müşteri deneyimini de zedelemektedir (Verhoef vd., 2015). Yapılan araştırmalar, zayıf kategori yapıları ve yetersiz filtreleme seçeneklerinin, kullanıcıların istedikleri ürünleri bulamamasına ve siteyi terk etmesine neden olan başlıca kullanılabilirlik sorunları arasında olduğunu göstermektedir (Kumar, 2023). Dolayısıyla, bu operasyonel darboğaz, yalnızca yüksek hemen çıkma oranlarına ve müşteri memnuniyetsizliğine yol açmaktadır. Aynı zamanda hatalı sınıflandırmadan kaynaklanan terk edilmiş sepetler, başarısız arama sorguları ve doğrudan satış kayıpları yoluyla işletmenin stratejik rekabet avantajını da tehdit etmektedir.

Manuel kategorizasyon süreçlerinin ölçeklenebilirlik eksikliği, yüksek maliyetleri ve insan hatasına bağlı tutarsızlıkları, işletmeleri bu dinamik pazarda rekabette geri düşme riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır. Bu süreçler, kategorizasyonu yapan personelin bilişsel önyargılarına ve öznelliğine de açıktır (Kahneman, 2011), bu da platform genelinde tutarsız bir kullanıcı deneyimine neden olmaktadır. İşte bu noktada Yapay Zekâ (YZ) teknolojileri, bu soruna radikal bir çözüm sunma potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Özellikle Doğal Dil İşleme (NLP) alanı, bu dönüşümün merkezinde yer almaktadır. NLP, ürün başlıklarını ve açıklamalarını, Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) gibi dönüştürücü tabanlı modeller aracılığıyla anlamsal bağlam içinde analiz ederek basit anahtar kelime eşleştirmesinin çok ötesine geçmektedir (Devlin vd., 2019). Çok kanallı satıcılar için bu, bir ürünü merkezi olarak analiz edip, her pazar yerinin kendine özgü taksonomisine uygun kategoriye otomatik olarak atayabilen, böylece operasyonel verimliliği artıran bir yetenek anlamına gelmektedir. Bu otomasyon, işletmeler için maliyetleri düşürmenin yanı sıra müşteri deneyimini kişiselleştirmekte ve pazara yeni ürün sunma hızını artırarak işletmelere sürdürülebilir bir rekabet avantajı kazandırmaktadır.

Bu çalışma, e-ticaretin dinamik yapısı içinde YZ tabanlı ürün kategorizasyon modelinin geliştirilmesini ve bu modelin işletmelere sağlayabileceği somut faydaların analiz edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın önemi, e-ticaretin büyümesiyle ortaya çıkan operasyonel sorunlara hem teorik bir çerçeve hem de uygulanabilir bir model sunarak, akademi ve sektör için yenilikçi bir çözüm önermesinde yatmaktadır. Bu çalışmanın literatüre en özgün katkısı, e-ticaret sınıflandırma problemlerinde sıklıkla ayrı ayrı ele alınan hiyerarşik tutarlılık ve çoklu platform ontoloji eşleştirme sorunlarını, BERT ve SBERT tabanlı hibrit bir mimari ile tekil bir iş akışında bütünleşik olarak çözmesidir. Mevcut literatür genellikle bu iki problemi bağımsız araştırma konuları olarak incelerken, bu çalışma endüstriyel uygulanabilirliği yüksek, uçtan uca bir otomasyon modeli sunarak teorik yaklaşımı pratik saha uygulamasıyla birleştirmektedir.

E-Ticaret Ekosistemi ve Ürün Kategorizasyonu (E-Commerce Ecosystem and Product Categorization)

Elektronik ticaret, tarafların kimliğine ve aralarındaki ticari ilişkinin doğasına göre farklılaşan çeşitli iş modelleri etrafında şekillenmektedir. Bu modeller, bir işletmenin pazara giriş stratejisini, gelir modelini, müşteri ilişkilerini ve operasyonel süreçlerini temelden belirlemektedir (Laudon & Laudon, 2021). Her ne kadar çok sayıda alt model bulunsa da ekosistemin temel dinamiklerini anlamak için en yaygın üç model bulunmaktadır: İşletmeden tüketiciye (B2C), işletmeden işletmeye (B2B), tüketiciden tüketiciye (C2C).

Bu üç iş modelinin kesişiminde yer alan temel gerçeklik, satış kanallarını milyonlarca yeni ve farklı beklentilere sahip tüketiciyle buluşturmasıdır. Bu devasa kullanıcı kitlesi, ürünleri keşfetmek için tek bir yol izlememekte; bazı kullanıcılar anahtar kelime aramasıyla doğrudan hedeflerine ulaşmaya çalışırken, önemli bir kısmı

da kategori ağaçları arasında gezinerek ilham arar veya seçeneklerini daraltmaktadır (Häubl & Trifts, 2000). Bu çift yönlü keşif davranışı, işletmeler için hayati bir zorunluluk doğurmaktadır. Zorunluluğun temelinde hem anahtar kelime aramalarına doğru sonuçlar döndürebilmek hem de sezgisel bir kategori navigasyonu sunabilmek bulunmaktadır. İşte bu noktada, iyi yapılandırılmış bir ürün veri temeli, yalnızca temel bir kullanılabilirlik gereksinimi olmaktan çıkıp, stratejik bir rekabet aracına dönüşmektedir.

E-Ticarette Keşfedilebilirliğin Omurgası Olarak Ürün Taksonomisi (Product Taxonomy as the Backbone of Discoverability in E-Commerce)

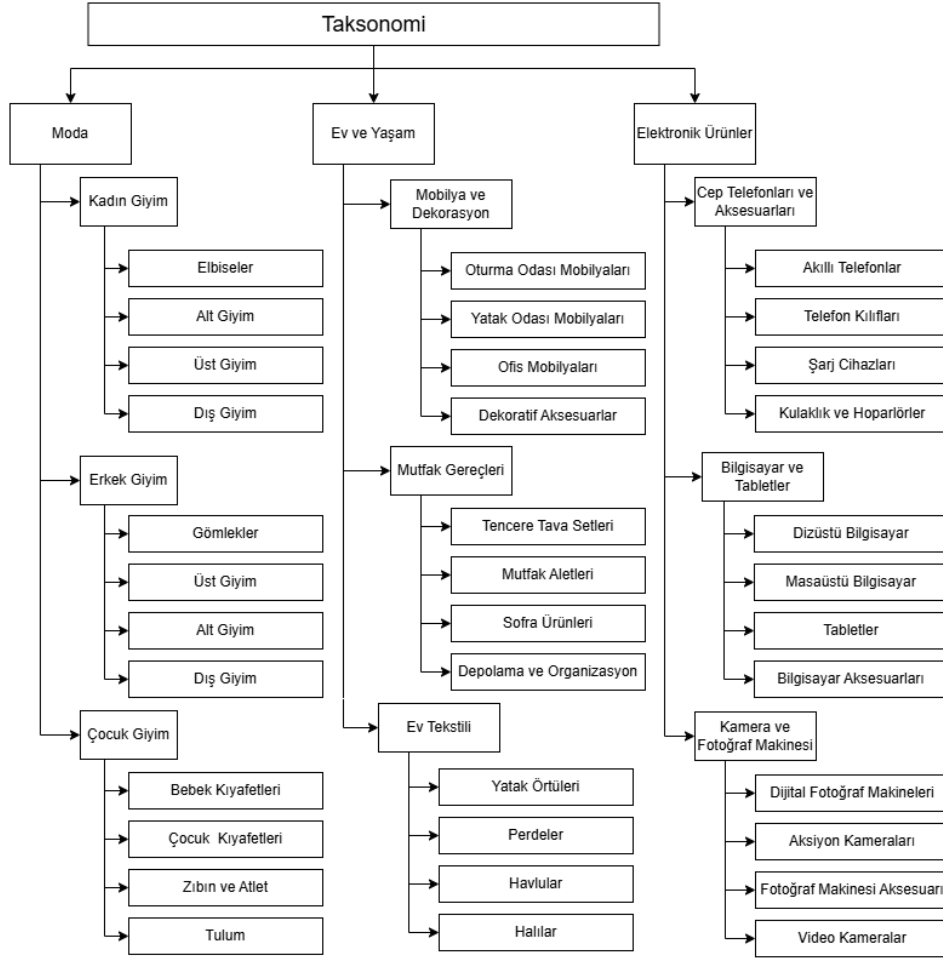
Taksonomi, en genel tanımıyla, “ürünleri, kullanıcıların arama ve gezinme davranışlarına uygun, hiyerarşik bir yapı içinde sınıflandırma ve düzenleme bilimi ve sanatıdır” (Kwasnik, 1999). Etkin bir ürün taksonomisi, ürünleri organize etmekle birlikte bir sitenin kullanılabilirliği, dönüşüm oranları ve hatta arama motoru optimizasyonu performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. İyi yapılandırılmış bir taksonominin temel bileşenleri; (i) hiyerarşik yapı, (ii) nitelikler ve yönlendirmeli arama, (iii) tutarlılık, yönetim ve ölçeklenebilirliktir.

Taksonominin temelini oluşturan hiyerarşik yapı, ürünlerin, genelden özele doğru ilerleyen, mantıksal ve sezgisel bir ağaç yapısı içinde düzenlenmesidir (Örn: Moda → Kadın Giyim → Elbise). Bu yapı, bilişsel psikolojideki Bilgi Arama Teorisi ile yakından ilişkilidir. Bu teoriye göre, kullanıcılar dijital bir ortamda, hedeflerine ulaşacaklarına inandıkları “bilgi kokusunu” takip etmektedir (Pirolli & Card, 1999). İyi tasarlanmış bir hiyerarşi, her bir kategori isminin bir sonraki adıma dair güçlü bir “koku” yaydığı, net bir patika sunmaktadır. Kullanıcılar, “moda” kategorisine tıkladıklarında “elbiseler” kategorisine ulaşacaklarına dair güçlü bir beklenti içine girmektedir. Örnek bir taksonomi ile hiyerarşik kategori yapısı Şekil 1’de gösterilmektedir.

Detaya inme süreci, kullanıcıların arama uzayını sistematik olarak daraltarak hedeflerine ulaşmalarını sağlamaktadır. Ancak bu yapının tasarımında, genişlik ve derinlik arasında kritik bir denge kurulması gerekmektedir. 8-10 seviyedeki çok derin bir hiyerarşi kullanıcıyı aşırı tıklama yapmaya zorlayarak tıklama yorgunluğuna neden olabilirken, çok geniş bir hiyerarşi yani çok fazla kategorinin yer alması kullanıcıyı Hick Yasasında belirtildiği gibi seçim paradoksu ve bilişsel yük ile karşı karşıya bırakmakta ve karar verme süresi artmaktadır (Hick, 1952; Landauer & Nachbar, 1985). Ayrıca, “site.com/giyim/kadin/elbise” gibi mantıksal bir yapı hem insan tarafından okunabilirliği yüksek hem de arama motorlarının sitenin yapısını daha iyi anlamasını sağlayan Arama Motoru Optimizasyonu (SEO) dostu Tekdüzen Kaynak Bulucu (URL)’lar oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Hiyerarşik yapı, kullanıcıya genel bir yol sunarken, yönlendirmeli arama, bu yol üzerinde hassas manevralar yapma imkânı tanımaktadır.

Kategorilerin ötesinde, bir ürünü tanımlayan renk, beden, marka, malzeme gibi daha spesifik ve ayrıştırıcı özelliklere nitelik denir. Yönlendirmeli arama, kullanıcıların bu nitelikleri birer filtre olarak dinamik bir şekilde birleştirerek on binlerce üründen

oluşan bir sonuç setini saniyeler içinde yönetilebilir bir sayıya indirmesini sağlayan güçlü bir bilgi süzme ara yüzüdür (Hearst, 2009; Tunkelang, 2009). Bu arayüz, kullanıcıyı sıfır sonuç gibi durumların önüne geçerek hayal kırıklığından korumakta ve onlara arama uzayını kendi zihinsel modellerine göre keşfetme esnekliği sunmaktadır. Yönlendirmeli arama, özellikle geniş ürün kataloğuna sahip sitelerde kullanıcıların ürünleri verimli bir şekilde keşfetmesi için en kritik araçtır (Koren vd., 2008).



Şekil 1: Örnek bir taksonomi ile hiyerarşik kategori yapısı (Hierarchical category structure with an example taxonomy)

Taksonomi, tek seferlik bir proje değil, sürekli evrimleşen yaşayan bir varlıktır. Özellikle moda, elektronik, süpermarket gibi birbirinden tamamen farklı sektörlerden binlerce satıcıyı barındıran büyük pazar yerleri için kritik bir zorluktur. İyi bir yönetim çerçevesi olmadan bu durum, zamanla yönetilemez hale gelen bir taksonomi şişmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle, taksonominin evrimini yöneten, yeni kategori ve nitelik taleplerini değerlendiren ve veri bütünlüğünü sağlayan sağlam bir veri yönetimi elzemdir (Weber vd., 2009). Bu süreç, taksonominin hem mevcut ihtiyaçları karşılayacak kadar sağlam hem de gelecekteki fırsatlara uyum sağlayacak kadar esnek kalmasını sağlamaktadır.

Taksonomiden Operasyona Ürün Bilgi Değer Zinciri (Product Information Value Chain from Taxonomy to Operation)

Teoride mükemmel bir taksonomiye sahip olmak, bu yapının operasyonel gerçeklikle buluştuğu noktada değerini yitirebilmektedir. E-ticaret operasyonları, bir ürünün tedarikçiden alınıp son kullanıcının ekranında satışa sunulmasına kadar uzanan karmaşık bir Ürün Bilgi Değer Zinciri (ÜBDZ) yapısını içermektedir (Loshin, 2013). Bu zincir, ürün verisinin yaratıldığı, zenginleştirildiği ve dağıtıldığı adımlardan yani ürünün satışa açılması için gerekli ön işlemlerden oluşmakta ve her bir halkası, kendine özgü operasyonel süreçler barındırmaktadır.

Süreç, ürünlerin tedarikçilerden fiziksel olarak kabulü ve dijital “ikizlerinin” sanal ortamda oluşturulmasıyla başlamaktadır. Bu aşamada temel görev, tedarikçilerden gelen ürün verisinin alınmasıdır. Ancak bu veri genellikle eksik, tutarsız veya standart dışı olduğu için, işletmeler bu ham veriyi zenginleştirmek zorundadır. Bu amaçla kurulan Ürün Bilgi Yönetimi sistemleri, bu dağınık veriyi merkezi bir yerde toplamayı hedeflemektedir (Abraham, 2014). Bu aşamadaki operasyonel süreçler arasında ürünlerin stüdyoda fotoğraf çekimleri, pazarlama metinlerinin yazılması, teknik özelliklerin doğrulanması ve temel bilgilerin stok kartlarına işlenmesi gibi adımlar yer almaktadır. Bu adımlar veri toplama ve zenginleştirme çatısı altında toplanarak değerlendirilebilmektedir. Elde edilen zenginleştirilmiş ürün bilgisi, satışa sunulacağı farklı kanallara dağıtmaya hazırdır. Bu, ürünün bir veya daha e-ticaret kanalına yüklenmesi anlamına gelmektedir. Bu aşamanın temel operasyonel adımı, her bir ürün için hedef platformun taksonomisindeki doğru kategori yolunu seçmek ve o kategoriye özgü zorunlu nitelikleri doldurmaktır. Örneğin, tişört ürünü için bir platformda; Moda → Erkek Giyim → Tişörtler yolu seçilirken, diğerinde, Erkek → Giyim → Tişört yolu seçilebilmektedir. Ardından, her platformun talep ettiği “kumaş türü”, “yaka tipi”, “kalıp” gibi niteliklerin, o platformun standartlarına uygun değerlerle doldurulması gerekmektedir. Bu tekrar eden taksonomi haritalama ve nitelik atama işlemi, bu değer zincirinin en yoğun emek gerektiren ve en kritik halkasını oluşturmaktadır.

Manuel ürün kategorizasyonu, ölçeklenemeyen yapısı ve hataya açıklığı nedeniyle önemli bir operasyonel yük ve doğrudan maliyet kalemi oluşturmaktadır. Ancak bu sürecin stratejik analizi, sorunun daha derin ve ölçülmesi zor bir fırsat maliyeti yarattığını ortaya koymaktadır (Kumar, 2018).

Manuel Süreçlerin Kırılganlığına Sebep Olan Operasyonel ve Bilişsel Kısıtlar (Operational and Cognitive Constraints That Cause Fragility of Manual Processes)

ÜBDZ'nin operasyonel etkinliği büyük ölçüde bu zincirin halkalarını yürüten süreçlerin verimliliğine bağlıdır. Çoğu işletmede bu zincir manuel olarak yönetilmektedir. Ancak e-ticaretin temel dinamikleri olan hız, ölçek ve karmaşıklık, bu insan-merkezli yaklaşımı sürdürülemez kılmakta ve bir dizi temel kısıt ve verimsizlik yaratmaktadır.

Büyük bir pazar yerine günde binlerce yeni ürün eklenebilmektedir. Bu ürün bombardımanı, özellikle moda gibi ürün yaşam döngülerinin son derece kısa olduğu

sektörlerde, işletmeleri sürekli bir veri girişi baskısı altında bırakmaktadır. Bu ürün akışı karşısında, manuel sınıflandırma için gereken insan kaynağı sayısı doğrusal olarak artmaktadır. Dahası, bu süreçte yapılan her bir hata veya tutarsızlık, gelecekte düzeltilmesi gereken bir veri borcu yaratarak, görünmez ancak önemli bir teknik ve finansal yük biriktirmektedir. Araştırmalar, düşük kaliteli verinin işletmelere olan maliyetinin, yıllık gelirlerinin %15-%25'ine ulaşabildiğini göstermektedir (Haug vd., 2011). Operasyonel yavaşlık ise en kritik rekabet avantajlarından biri olan pazara yeni ürün sunma hızını doğrudan baltalamaktadır. Bir ürünün rakip platformlarda satışa çıktıktan haftalar sonra listelenebilmesi, ilk hamle avantajının kaybedilmesi ve önemli satış fırsatlarının kaçırılması anlamına gelmektedir (Stalk & Hout, 1990).

Manuel sınıflandırma, doğası gereği öznedir ve insan bilişselliğinin getirdiği sınırlılıklara tabidir. Davranışsal ekonomi alanının öncülerinden Kahneman (2011)'ın da detaylandığı gibi, insanlar sistematik düşünce hataları olan bilişsel önyargılardan muzdariptir. Bu durum, ürün kategorizasyonu gibi tekrarlayan ve yargıya dayalı görevlerde kendini belirgin bir şekilde göstermektedir. Örneğin, bir veri giriş uzmanı, ürün başlığında ilk gördüğü kelimeye aşırı odaklanarak çıpalama etkisine maruz kalabilmektedir ve bir “deri ceket”i, ürünün aslında “motosiklet ceket”, olduğunu belirten diğer ipuçlarını göz ardı ederek genel “ceket” kategorisine atayabilmektedir. Benzer şekilde, bir çalışan, bir ürünü olabileceğini düşündüğü ilk kategoriye dair kanıtlar arayarak teyit önyargısı gösterebilmektedir. Bu öznel yargılar, farklı çalışanların aynı ürünü farklı şekilde sınıflandırmasına neden olmaktadır. Bu durum, sosyal bilimlerde ve içerik analizinde, farklı değerlendiricilerin aynı olguyu ne kadar tutarlı bir şekilde kodladığını ölçen ve değerlendiriciler arası güvenilirlik olarak bilinen metrikte ciddi düşüslere yol açmaktadır (Lombard vd., 2002). Düşük güvenilirlik, platform genelinde tutarsız, öngörülemez ve dolayısıyla son kullanıcı için kafa karıştırıcı bir katalog yapısı yaratmaktadır; bu da filtreleme ve gezinme gibi temel fonksiyonları işlevsiz kılarak doğrudan kullanıcı deneyimini zedelemektedir.

Günümüzde birçok satıcı, ürünlerini birden fazla dijital kanalda aynı anda satarak daha geniş bir müşteri kitlesine ulaşmayı hedeflemektedir. Ancak bu strateji, işletmeleri veri entegrasyonu ve senkronizasyonu alanında ciddi bir karmaşıklıkla karşı karşıya bırakmaktadır (Liao vd., 2024). Bu kanalların her biri, kendi ticari hedefleri ve teknik altyapıları doğrultusunda geliştirilmiş, birbirinden bağımsız ve heterojen veri siloları olarak işlev görmektedir. Her platformun kendine özgü bir taksonomisi ve zorunlu kıldığı nitelik setleri vardır. Bu durum, derin bir semantik uyumluluk problemi yaratmaktadır. Örneğin, bir platformda Elektronik → Bilgisayar → Dizüstü Bilgisayar olarak tanımlanan bir kategori, diğerinde Bilgisayar ve Tablet → Notebook olarak isimlendirilebilmektedir. Daha da karmaşık olanı, bir platform “elbise” için “desen” niteliğini zorunlu kılarken, diğerinin “motif” niteliğini talep etmesi ve kabul edilen değer setlerinin tamamen farklı olmasıdır. Manuel süreçlerde bu durum, bir veri uzmanının aynı ürün için her bir platforma özel, bilişsel olarak yorucu ve hataya son derece açık bir “veri çevirisi” ve “şema haritalama” yapması anlamına gelmektedir (Rahm & Bernstein, 2001). Bu tekrar eden ve ölçeklenemeyen süreç, müşteriye tüm kanallarda kesintisiz ve

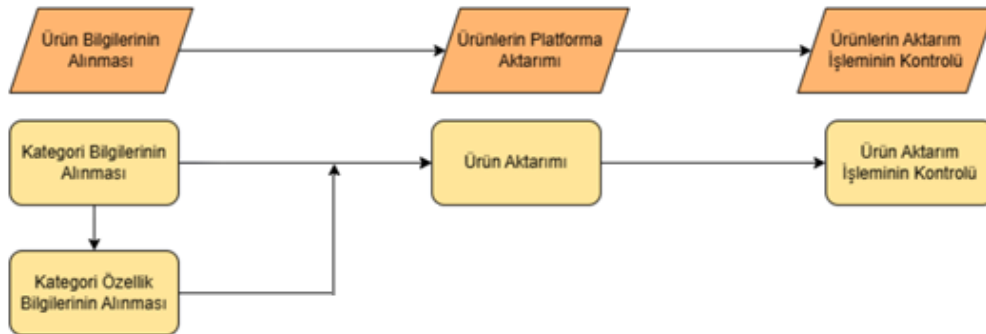
tutarlı bir deneyim sunmayı hedefleyen bütünleşik kanallı perakendeciliğe geçişin önündeki en büyük operasyonel engellerden biridir (Verhoef vd., 2015).

Bu kısıtlar, geleneksel ürün kategorizasyon paradigmasının modern e-ticaretin hızına, ölçeğine ve karmaşıklığına yanıt veremediğini ortaya koymaktadır. Bu operasyonel ve bilişsel darboğazlar, teorik bir problem olmanın ötesinde, pratik olarak çözülmesi gereken bir dizi birbiriyle bağlantılı teknik soruna dönüşmektedir.

Bahsedilen tüm negatif etkiler, en nihayetinde tek bir kritik metrikte birleşir ve müşteri yaşam boyu değerini oluşturmaktadır. Bu terim, bir müşterinin işletmeyle olan ilişkisi boyunca yaratması beklenen toplam net karı ifade etmektedir ve sürdürülebilir büyümenin en önemli göstergelerinden biridir (Fader vd., 2005). Hatalı kategorizasyonun tetiklediği alakasız öneriler, isabetsiz pazarlama kampanyaları ve kafa karıştırıcı site deneyimi, müşteri memnuniyetini ve sadakatini doğrudan azaltmaktadır. Memnuniyetsiz müşteri daha az satın alma yapmakta, daha düşük sepet ortalamasına sahip olmakta ve markayı daha erken terk etmektedir. Her bir olumsuz deneyim, müşterinin potansiyel yaşam boyu değerinden bir parça koparmaktadır. Dolayısıyla, ürün kategorizasyonu müşteri deneyiminin temelini atan ve Müşteri yaşam boyu değerini doğrudan şekillendiren stratejik bir fonksiyondur.

Operasyonel Kategorizasyon Süreci ve Temel Problemler (Operational Categorization Process and Basic Problems)

Satıcılar, ürünlerini birden fazla dijital kanalda entegrasyon yazılımları ile organize etmektedir. Şekil 2’de sunulan akış, API tabanlı bir entegrasyonun e-ticaret platformuna ürün aktarım sürecini detaylandırmaktadır.



Şekil 2: Entegrasyon sistemlerinde ürünün satışa açılma işlem protokolü (The transaction protocol for opening the product to sale in integration systems)

Süreç, ilk olarak ilgili ürün için “Kategori Bilgilerinin Alınması” adımıyla başlamaktadır ve buradan elde edilen kategori kimlik bilgileri hem ürünün hangi kategoriye ekleneceğini hem de o kategoriye özgü niteliklerin ve değerlerin getirilmesi için kullanılmaktadır. Toplanan tüm bu kategori ve özellik verileri, “Ürün Aktarımı” adımıyla bir araya getirilerek ürünün platforma doğru bilgilerle gönderilmesini sağlamaktadır. Bu transfer işlemi sonucunda, sürecin takibi için benzersiz bir işlem istek kimliği oluşturulmakta ve bu kimlik kullanılarak “İşlem Kontrolü” yapılmaktadır. İşlemin başarı durumu teyit edilmektedir.

Bu çalışma, önceki bölümlerde sunulan kısıtlardan yola çıkarak, ürün listeleme otomasyonu problemini, her biri kendi akademik ve teknik zorluklarını barındıran iki temel alt probleme ayrıştırarak kavramsallaştırmaktadır:

- *Ürün Kategori Eşleştirme*: Gelen ürün verisini analiz ederek, platformun mevcut kategori ağacındaki (taksonomi) en uygun yaprağa atama problemidir.
- *Özellik Eşleştirme*: Ürün kategorisi belirlendikten sonra, o kategori için zorunlu olan veya beklenen özelliklerin (renk, beden, malzeme vb.) ürün verisinden çıkarılarak ilgili alanlara atanması problemidir.

Bu iki problemin ayrı ayrı incelenmesinin temel nedeni, aralarındaki sıralı bağımlılıktır. Tam otomasyon için öncelikle kategori doğru bir şekilde atanmalıdır, zira doldurulması gereken özellik setini belirleyen bizzat kategorinin kendisidir. Bu çalışmada öncelikle, bu iki temel adımdan ilki olan ürün kategorizasyonu problemine odaklanılmıştır. Ürün kategorizasyon problemleri 5 alt başlık altında ele alınabilir (Tablo 1):

Tablo 1: Kategorizasyon problemleri ve tanımları (*Categorization problems and definitions*)

Problem	Tanımı
Çıkarım Problemi	Dağıntık ürün verisinden (metin, görsel) yapılandırılmış özellikler (marka, ürün tipi vb.) çıkarmak.
Çok Etiketli Sınıflandırma Problemi	Bir ürünün, mantıksal olarak ait olabileceği birden fazla kategoriye (Örn: akıllı saatin hem elektronik hem spor saati olması) aynı anda atanması.
Taksonomi Evrimi ve Semantik Kayma Problemi	Zamanla yeni kategorilerin eklenmesi, mevcutların değişmesi veya anlamlarının kayması (kavram kayması) nedeniyle, sınıflandırma modelinin güncelliğini yitirmesi.
Hiyerarşik Tutarlılık Problemi	Ürünü, bir sitenin Giyim → Erkek Giyim gibi katmanlı (hiyerarşik) kategori ağacına, mantıksal bir hata yapmadan, tam ve doğru yola yerleştirmek.
Ontoloji ve Şema Eşleştirme Problemi	Farklı e-ticaret platformlarının kendilerine özgü kategori yapıları arasında otomatik olarak anlamsal çeviri veya eşleştirme yapmak.

Çıkarım Problemi (Inference Problem)

Otomatik kategorizasyonun ilk ve en temel adımı, modele girdi olarak sunulacak anlamlı “sinyalleri” veya “özellikleri” ham ürün verisinden çıkarmaktır. E-ticarette ürün verisi genellikle yapılandırılmamış veya yarı yapılandırılmış durumdadır. Bu ham verinin, bir sınıflandırma algoritmasının işleyebileceği temiz ve bilgilendirici bir formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu süreç, sadece gürültüyü temizlemek değil aynı zamanda ürünün hangi kategoriye ait olduğuna dair en güçlü ipuçlarını keşfetmektir. Metinsel veriden bu tür yapılandırılmış bilgileri çıkarma süreci, Doğal Dil İşleme alanında Adlandırılmış Varlık Tanıma ve İlişki Çıkarımı gibi görevlerle ele alınmaktadır (Nadeau & Sekine, 2007).

Bu adımdaki temel problem, satıcılar tarafından girilen verinin standart olmamasıdır. Hayati bilgilerin, uzun bir açıklama metnine gömülmesi, bu sinyallerin çıkarılmasını zorlaştırmaktadır. Eğer bu sinyaller başarılı bir şekilde çıkarılamazsa, en gelişmiş sınıflandırma algoritması bile yetersiz kalacaktır, çünkü modelin öğreneceği

anlamalı bir girdi bulunmayacaktır. Dolayısıyla, yüksek kaliteli çıkarım, tüm kategorizasyon zincirinin temelini oluşturmaktadır ve veri kalitesinin, model performansını doğrudan etkilediği gerçeğini doğrulamaktadır (Batini vd., 2009). Bu problem bazen problem sinyal yokluğudur. Bu gibi durumlarda, metinsel veri tek başına ürünü sınıflandırmak için tamamen yetersiz kalmaktadır. İşte bu noktada, görsel verinin önemi katlanarak artmaktadır. Bir elbisenin “V yaka” olduğu gibi kritik görsel ipuçları, kategoriye belirlemede metinden daha güçlü bir sinyal olabilmektedir. Bu nedenle, literatürdeki ileri düzey yaklaşımlar, metin ve görsel veriyi birlikte işleyen multimodal modellere odaklanmaktadır. Bu modeller, metinden ve görselden çıkarılan özellikleri birleştirerek, özellikle tek bir modalitenin zayıf veya eksik olduğu durumlarda daha sağlam ve doğru kategori tahminleri yapmayı hedeflemektedir (He & McAuley, 2016; Zahavy vd., 2018).

Çok Etiketli Sınıflandırma Problemi (Multi-Label Classification Problem)

Geleneksel sınıflandırma yaklaşımları, genellikle bir ögenin, karşılıklı olarak birbirini dışlayan bir dizi kategoriden yalnızca birine ait olabileceğini varsaymaktadır. Ancak e-ticaret ürünlerinin doğası, bu varsayımı sıklıkla geçersiz kılmaktadır. Birçok ürün, birden fazla kategoriye aynı anda ve mantıksal olarak tutarlı bir şekilde ait olabilmektedir. Örneğin, “su geçirmez, GPS özellikli, nabız ölçerli bir akıllı saat”, ürünü Elektronik → Giyilebilir Teknoloji → Akıllı Saatler kategorisine ait olduğu gibi, aynı zamanda Spor & Outdoor → Spor Elektroniği → Koşu Saatleri ve hatta Sağlık & Kişisel Bakım → Sağlık Takip Cihazları kategorilerine de rahatlıkla dâhil edilebilmektedir.

Bu durum, literatürde çok etiketli sınıflandırma olarak bilinen, kendine özgü zorlukları olan bir problemdir. E-ticaret platformlarının çoğu, katı ağaç yapıları nedeniyle bir ürünü teknik olarak yalnızca tek bir kategori yoluna yerleştirmeye izin vermektedir. Bu, çok yönlü bir ürünün keşfedilebilirliğini ciddi şekilde sınırlamaktadır. “akıllı saat” örneğinde, ürün yalnızca Elektronik kategorisine atanırsa, “koşu saati” arayan bir sporcu bu ürünü asla bulamayabilir. Bu durum, potansiyel satış kayıplarına ve müşteri memnuniyetsizliğine yol açmaktadır.

Taksonomi Evrimi ve Semantik Kayma Problemi (Taxonomy Evolution and the Problem of Semantic Shift)

E-ticaret taksonomileri, pazar dinamikleri ve tüketici davranışlarındaki değişimlerle sürekli evrimleşen yapılardır. Literatürde kavram kayması (concept drift) olarak bilinen bu durum (Gama vd., 2014), taksonomilerde üç temel biçimde gözlemlenmektedir: (i) İnovasyon sonucu airfryer veya akıllı bileklik gibi yeni kategorilerin doğuşu; (ii) Pazarın olgunlaşmasıyla spor ayakkabının koşu ve yürüyüş gibi alt kırılımlara ayrılarak granüleritenin artması; (iii) Drone gibi ürünlerin zamanla oyuncak kategorisinden profesyonel kamera ekipmanlarına taşınması örneğinde olduğu gibi semantik kayma.

Bu dinamik yapı, statik verilerle eğitilmiş YZ modellerinin zamanla güncelliğini yitirerek hatalı tahminler üretmesine neden olmakta ve modelin adaptasyon yeteneğini zorunlu kılmaktadır (Teece, 2007). Dolayısıyla modern bir kategorizasyon sistemi,

sadece mevcut taksonomiye doğru tahminler yapmakla kalmamalı, aynı zamanda bu taksonomi evrimine uyum sağlayabilecek çevik ve adaptif bir yapıya da sahip olmalıdır.

Hiyerarşik Tutarlılık Problemi (The Hierarchical Consistency Problem)

Nitelikler çıkarıldıktan sonraki adım, ürün için en uygun kategoriye tahmin etmektir. Ancak e-ticaret taksonomileri, daha önce de belirtildiği gibi, basit bir liste değil, derin bir hiyerarşik yapıya sahiptirler. Bu durum, problemi standart bir düz sınıflandırmadan, literatürde hiyerarşik sınıflandırma olarak bilinen, kendine özgü zorlukları olan daha karmaşık bir probleme dönüştürmektedir (Silla & Freitas, 2011). Bir modelin sadece en alt seviyedeki “Klasik Gömlek” kategorisini tahmin etmesi yeterli değildir. Taksonomi ağacında geçerli olan tam ve tutarlı bir yol olan “Giyim → Erkek Giyim → Gömlek → Klasik Gömlek” patikasını üretebilmesi gerekmektedir. Bu süreçteki ana zorluk, hiyerarşik kısıta uymaktır. Bu kısıt, bir örneğin bir alt kategoriye aitse, o kategorinin tüm üst kategorilerine de mantıksal olarak ait olması gerektiğini zorunlu kılmaktadır (Koller & Sahami, 1997). Bu kısıtın ihlali, örneğin bir ürünün “Giyim” kategorisine ait olmadan “Erkek Giyim” kategorisine atanması gibi, anlamsal olarak tutarsız ve operasyonel olarak geçersiz bir çıktı üretmektedir. Literatürde bu problemi çözmek için temel olarak iki yaklaşım öne çıkmaktadır:

- **Yerel Sınıflandırıcılar:** Bu yaklaşımda, hiyerarşinin her bir düğümü için ayrı ayrı sınıflandırıcılar eğitilir. Örneğin, bir “kök” sınıflandırıcı, ürünün giyim, elektronik veya ev & yaşam mı olduğuna karar verir. Eğer giyim olarak sınıflandırırsa, bu kez sadece giyim düğümüne bağlı olan ve kadın giyim, erkek giyim, çocuk giyim arasında ayırım yapan ikinci bir sınıflandırıcı devreye girer. Bu “yukarıdan aşağıya” yaklaşım, her bir kararın daha küçük ve daha yönetilebilir bir problem uzayında verilmesi nedeniyle sezgiseldir (Cerri vd., 2014). Ancak en büyük dezavantajı, hata yayılımı riskidir. Hiyerarşinin üst seviyelerinde yapılan bir hata, alt seviyelerdeki tüm tahminleri otomatik olarak anlamsız kılar ve bu hatadan geri dönülemez.
- **Global Sınıflandırıcı:** Büyük patlama olarak bilinen bu yaklaşım, tüm kategori hiyerarşisini tek bir model olarak ele alır ve bir ürünün tüm kategorilere olan aidiyetini aynı anda tahmin eder. Bu yöntem, hiyerarşik ilişkileri ve bağımlılıkları modelin öğrenme sürecine dâhil ederek hata yayılımı sorununu teoride ortadan kaldırır (Talukdar & Crammer, 2009). Ancak bu yaklaşım, özellikle binlerce kategorinin olduğu büyük taksonomilerde, çok daha karmaşık bir model mimarisi ve çok daha yüksek bir hesaplama maliyeti gerektirir.

Bu iki yaklaşım arasındaki dengeyi bulmak, hiyerarşik sınıflandırma araştırmalarının temel odak noktalarından biridir. Bu çalışmada geliştirilecek olan modelin, bu hiyerarşik tutarlılığı sağlaması ve geçersiz kategori yolları üretmemesi, pratik kullanılabilirliği açısından en kritik başarı metriklerinden biri olacaktır.

Ontoloji ve Şema Eşleştirme Problemi (Ontology and Schema Matching Problem)

Çok kanallı e-ticaret, satıcıları her biri kendi ontolojisine, yani kendine özgü kavramlar (kategoriler, nitelikler) ve bu kavramlar arasındaki ilişkilere sahip platformlarda faaliyet göstermeye zorlamaktadır. Bir platformda Elektronik → Bilgisayar → Dizüstü Bilgisayar olarak tanımlanan bir kategori, diğerinde Bilgisayar & Tablet → Notebook olarak isimlendirilebilmektedir. Bu semantik heterojenlik, otomasyon sistemleri için bir taksonomi eşleştirme veya akademik literatürdeki daha geniş tanımıyla bir ontoloji/şema eşleştirme problemi yaratmaktadır (Euzenat & Shvaiko, 2013).

Bu problem, aynı zamanda yapısal farklılıkları da ele almayı gerektirmektedir. Örneğin, bir taksonomide “spor ayakkabı” tek bir kategori iken, diğerinde “koşu”, “basketbol”, “tenis” gibi alt kategorilere ayrılmış olabilmektedir. Buradaki temel zorluk, farklı taksonomiler arasında anlamsal bir çeviri veya haritalama yapmaktır. Bu, yalnızca kategori isimlerinin metinsel benzerliğine dayalı basit bir eşleştirmeden çok daha karmaşıktır. İki taksonomi arasındaki yapısal ilişkileri (ebeveyn-çocuk bağları), her bir kategorinin kapsadığı ürünlerin özelliklerini ve hatta kategori tanımlarını anlamayı gerektirmektedir (Rahm & Bernstein, 2001). Geliştirilecek bir YZ sistemi, bir ürün için kendi iç mantığıyla ürettiği bir kategori tahminini, hedef platformların her birinin özgün taksonomi yapısına doğru bir şekilde tercüme edebilmelidir. Bu problemin çözülmemesi, çok kanallı satıcılar için otomasyonun değerini büyük ölçüde azaltmaktadır, çünkü her platform için ayrı modeller geliştirmek veya bu karmaşık ve hataya açık eşleştirme işlemini manuel olarak yapmaya devam etmek zorunda kalmaktadır.

YZ Destekli Ürün Kategorizasyonu: Problemlere Yönelik Çözüm Yaklaşımları (AI-Powered Product Categorization: Solution Approaches to Problems)

E-ticaret ürün sınıflandırması alanında YZ uygulamaları, geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarıyla başlamış ve zamanla daha karmaşık derin öğrenme mimarilerine doğru evrilmiştir.

Geleneksel Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yaklaşımları (Traditional Machine Learning and Deep Learning Approaches)

YZ uygulamaları, e-ticaret ürün sınıflandırması alanına ilk olarak geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları ile girmiştir. Bu algoritmalar, genellikle iyi yapılandırılmış ve özenle hazırlanmış özellik setleri ile etkili sonuçlar vermiştir. Ancak bu geleneksel yöntemlerin en büyük sorunu, özellik mühendisliğine olan yoğun bağımlılıklarıdır. Ham veriden otomatik olarak anlamlı özellikler öğrenemezler. Bu durum, süreci zahmetli hale getirmekte ve modelin performansını sınırlamaktadır. Bu nedenle, karmaşık ve yapılandırılmamış verilerden otomatik özellik öğrenme ihtiyacı, derin öğrenmeye geçişi tetiklemiştir.

Metin sınıflandırması başlangıçta, kelime sırasını ve bağlamı göz ardı eden “kelime torbası” yaklaşımına dayanmaktaydı (Manning vd., 2008). Terim Frekansı – Ters Belge Frekansı yöntemi (TF-IDF) bu yaklaşımı geliştirse de, “pamuklu gömlek” ile “keten gömlek” gibi kelimeler arasındaki anlamsal ilişkileri anlayamamaktaydı. Word2Vec (Mikolov vd., 2013) ve GloVe (Pennington vd., 2014) gibi kelime yerleştirme modelleri bir devrim yaratmıştır. Bu modeller, kelimeleri anlamsal olarak benzer kelimelerin birbirine yakın konumlandığı vektörlere dönüştürmüştür. Böylece “pamuk” ve “keten” kelimelerinin aynı kategoriye ait olduğunu öğrenebilmişlerdir. Ancak bu modellerin en büyük kısıtı, bağlamdan bağımsız olmalarıdır. “Gül” kelimesi gibi çok anlamlı kelimeler, farklı bağlamlarda aynı vektörle temsil edilmektedir. Bu da ürün başlıklarında sıkça rastlanan çok anlamlı kelimeler için bir sorun teşkil etmektedir.

Bağlama Dayalı Dönüştürücü Modeller (Context-Based Transformative Models)

Doğal dil işleme (NLP) alanındaki modern devrim, uzun yıllardır hâkim olan sıralı veri işlemeye dayalı mimarilerin temel kısıtlamalarına bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu mimariler, metni kelime kelime işleyerek bir sonraki kelimeyi tahmin etmeye veya cümlelerin anlamını bir “hafıza” durumunda saklamaya çalışmaktaydı. Ancak bu sıralı doğa, uzun metinlerdeki bağlamsal bilgiyi korumada zorluklar ve paralel işlemeyi engelleyerek hesaplama verimsizlikleri gibi ciddi sorunları beraberinde getiriyordu.

Bu zorlukların aşılması, Dönüştürücü (Transformer) mimarisi doğuşuyla mümkün olmuştur. Vaswani ve diğerlerinin (Vaswani vd., 2017) sunduğu bu yapı, tekrarlayan katmanları tamamen terk ederek, tamamen dikkat mekanizmalarına dayalı bir model önermiştir. Bu, modelin bir kelimenin anlamını çıkarırken cümlelerin herhangi bir yerindeki diğer kelimelerle doğrudan bağlantı kurabilmesini sağlayarak NLP’de bir paradigma kayması yaratmıştır. Bu sağlam temel üzerine inşa edilen BERT (Devlin vd., 2019) ise, Dönüştürücü Mimarisi’nin bu gücünü alıp, dilin sadece soldan sağa veya sağdan sola değil, aynı anda her iki yönden de derinlemesine anlaşılmasını sağlayan bir ön eğitim yöntemi geliştirerek bu devrimi bir adım öteye taşımış ve NLP alanında yeni bir çağ başlatmıştır.

BERT: Dönüştürücü Tabanlı Çift Yönlü Kodlayıcı (BERT: Transformer-Based Bidirectional Encoder)

Dönüştürücü mimarisinin getirdiği gücü, dil modellemede köklü bir sorunu çözerek bir üst seviyeye taşımıştır. Metni yalnızca soldan sağa tek bir yönde işleyen standart dil modelleri, özellikle belirli görevlerde cümlelerin tamamındaki bağlamın anlaşılmasını kısıtlamıştır. BERT’in temel yeniliği, bu kısıtlamayı ortadan kaldırarak derin çift yönlü bir temsil öğrenmektir (Devlin vd., 2019).

Bu sayede model, bir kelimenin anlamını sadece kendisinden önceki kelimelere veya sadece kendisinden sonraki kelimelere göre değil, tüm cümlelerin bağlamını aynı anda dikkate alarak öğrenmektedir. BERT, bunu Dönüştürücü’nün yalnızca kodlayıcı (encoder) katmanlarını kullanarak ve yeni ön eğitim hedefleri tanımlayarak başarmaktadır.

Orijinal Dönüştürücü modelindeki gibi bir kodlayıcı-kod çözücü yapısı yerine BERT, yalnızca Dönüştürücü kodlayıcı katmanlarını üst üste yığmaktadır. Bunun sebebi, BERT'in bir diziden başka bir dizi üretmek yerine, bir girdi metninin derinlemesine ve bağlamsal olarak zengin bir temsilini oluşturmayı hedeflemesidir. Model, metni anlama görevine odaklandığı için bir kod çözücüye ihtiyaç duymamaktadır. Modelin sınıflandırma (fine-tuning) aşamasındaki başarısı, ham metni ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır. Ham metin şu tip bir yapıdadır:

- *Ürün Adı*: Çizgili %100 Keten Relaxed Fit Logo Detaylı Gömlek Erkek GÖMLEK
- *Ürün Açıklaması*: Model: Gömlek, Giyim Tarzı: Günlük/Casual, Desen: Çizgili, Materyal: %100 Keten, Yaka Bilgisi: Düz Yaka, Kapama Bilgisi: Düğmeli, Kol Bilgisi: Uzun Kol, Kalıp Bilgisi: Relaxed Fit, Üretim Yeri: Türkiye

DistilBERT halihazırda önceden eğitilmiş (pre-trained) bir model olsa da bu çalışmada kullanılan e-ticaret verisindeki spesifik terimleri (Marka, Kalıp, Materyal) nasıl işlediğinin ve birbirleriyle ilişkilendirdiğinin gösterilmesi, metodolojinin temelini oluşturmaktadır. Şekil 3, modelin henüz sınıflandırma kararı vermeden önce, veri kümesindeki “Keten Relaxed Fit Uzun Kol Gömlek Erkek” girdisini içsel olarak nasıl analiz ettiğini ve anlamsal belirsizlikleri (Örn: Fit kelimesinin fiil değil kalıp adı olması) nasıl çözdüğünü göstermektedir.

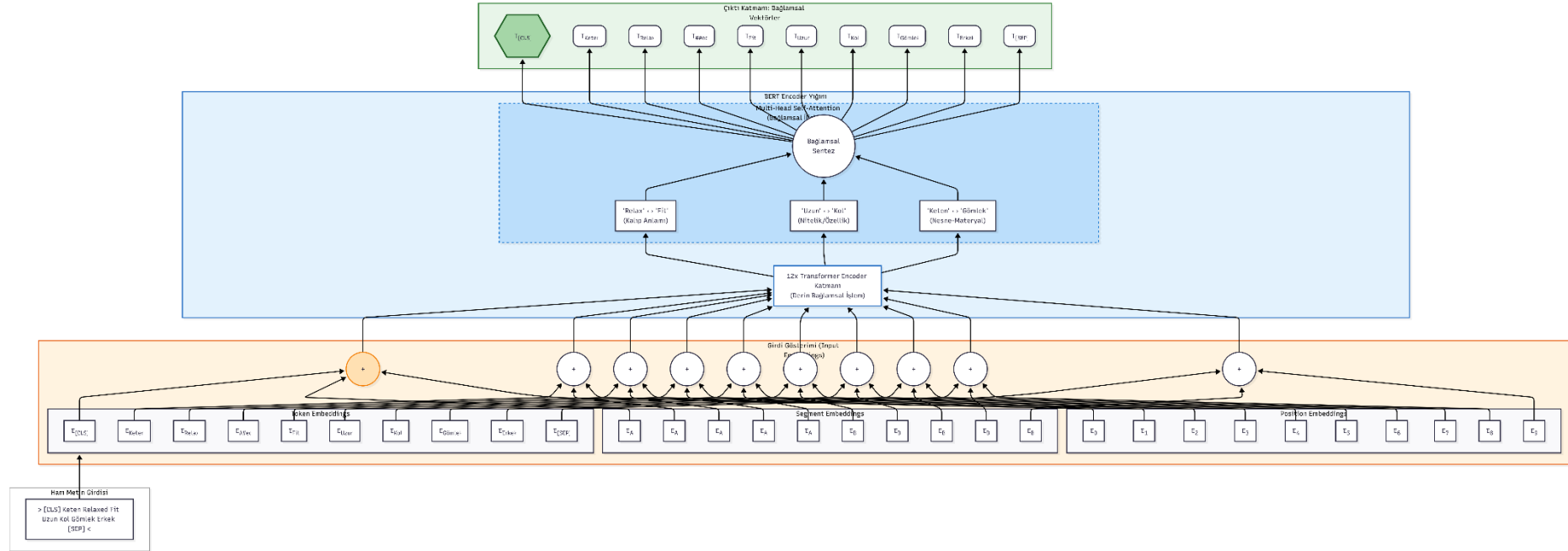
Geleneksel anahtar kelime tabanlı sistemler bu metni sadece Gömlek veya Keten kelimeleri üzerinden yüzeysel eşleştirirken, BERT tabanlı mimari şu derinlemesine süreci izlemektedir:

- *Girdi Gösterimi (Input Representation)*: Model, ham metni doğrudan işlemez; onu gömme (embedding) katmanlarının toplamı olarak temsil eder:
 - *Token Embeddings*: WordPiece algoritması ile kelimeler kök ve eklere ayrılır. Örneğin “Relaxed”, sözlükte yoksa Relax (kök) ve ##ed (ek) olarak parçalanır. Bu, modelin türetilmiş kelimeleri tanımasını sağlar.
 - *Position Embeddings*: BERT, kelimelerin sırasını (1., 2., 3. vb.) kodlayarak “Relaxed Fit” ile “Fit Relaxed” arasındaki farkı ayırt eder. “Relaxed” gibi modelin sözlüğünde nadir bulunabilecek terimler veya “Casual” gibi yabancı kökenli kelimeler, alt birimlerine bölünerek işlenir. Başlık ve açıklama arasına özel ayırıcı ([SEP]) tokenler eklenerek modelin iki farklı metin bloğunu ayırt etmesi sağlanır.
- *Bağlamsal Analiz (Contextual Analysis)*: Model, “Relaxed Fit” ifadesinin bir renk veya desen değil, bir kalıp bilgisi olduğunu anlar. “%100 Keten” ifadesinin ürünün materyal niteliği olduğunu, “Çizgili” ifadesinin desen, “Günlük/Casual” ifadesinin ise kullanım alanı olduğunu çözer. Açıklama kısmındaki “Düğmeli” ve “Uzun Kol” gibi detaylar, başlıkta geçmese bile modelin ürünü “Tişört” veya “Kazak” yerine “Gömlek” kategorisine daha yüksek güvenle atamasını sağlar. Şekil 3'teki Self-Attention bloğunda görüldüğü üzere; model “Relax” tokenini işlerken, sadece kendisine değil; yanındaki “##ed” ekine, “Fit” kalıbına ve “Gömlek” nesnesine dikkat kesilir.

Bu mekanizma, kelimelerin sözlük anlamlarını değil, o cümledeki bağlamsal rollerini vektörlere kodlar.

Bu aşamada, BERT'in çıkışına özelleştirilmiş bir Sınıflandırma Başlığı (Classification Head) eklenmiş ve model şu şekilde ince ayara tabi tutulmuştur:

- *Vektör Temsili*: Cümlelerin anlamsal özeti olan $T_{[CLS]}$ vektörü alınır.



Şekil 3: BERT modelinin iç mekanizması ve örnek ürün verisi üzerinden bağlamsal öznitelik çıkarım süreci (Internal mechanism of the BERT model and contextual feature extraction process from sample product dData)

- *Sınıflandırıcı Katman*: Vektör, projedeki kategori sayısına indirgenir. (Logits = $W \times T_{[CLS]} + b$)
- *Eğitim Süreci*: Modelin tahminleri ile gerçek etiketler arasındaki hata (Loss) hesaplanarak, DistilBERT'in ağırlıkları bu özel görevi daha iyi yapacak şekilde güncellenir.

Böylece, “Keten” ve “Gömlek” kelimelerini genel olarak bilen model, bu kelimelerin “Erkek Giyim” kategorisi için güçlü bir sinyal olduğunu öğrenmiş olur.

Eğitim süreci sonrasında gerçekleştirilen testlerde, modelin bazı karmaşık veya nadir ürünlerde hatalı tahminler üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu problemi aşmak ve sistemin gürbüzlüğünü artırmak amacıyla, mimariye bir Güven Skoru (Confidence Score) mekanizması entegre edilmiştir. Bu mekanizmaya göre süreç; öncelikle belirlenen eşik değerin (τ) altında kalan düşük güvenli tahminlerin doğrudan kabul edilmeyerek filtrelenmesiyle başlamaktadır. Çoklu platform yapısının avantajı kullanılarak, diğer platformlar arasında en yüksek güven skoruna sahip olan tahmin Çapa (Anchor) olarak belirlenmektedir. Ardından, bu güvenilir çapa bilgisini referans alan ve Reimers ve Gurevych (2019) tarafından önerilen Sentence-BERT (SBERT) mimarisi üzerine kurulu bir Anlamsal Arama Motoru (Semantic Search) devreye girmektedir. SBERT, metinleri yoğun vektör uzayında temsil ederek, kelime çakışması olmasa dahi anlamsal yakınlığı Kosinüs Benzerliği (Cosine Similarity) metriği ile ölçmektedir. Bu sayede sistem, düşük güvenli platformdaki en uygun kategori karşılığını sadece etiket eşleşmesiyle değil, vektörel anlam yakınlığıyla tespit etmektedir. Çalışmanın bel kemiğini oluşturan hibrit yaklaşım, Şekil 4’te verilmiştir. Bu sayede model tek başına emin olamadığı durumlarda dahi bağlamsal destek sağlayarak sistemin genel doğruluğunu arttırmaktadır.

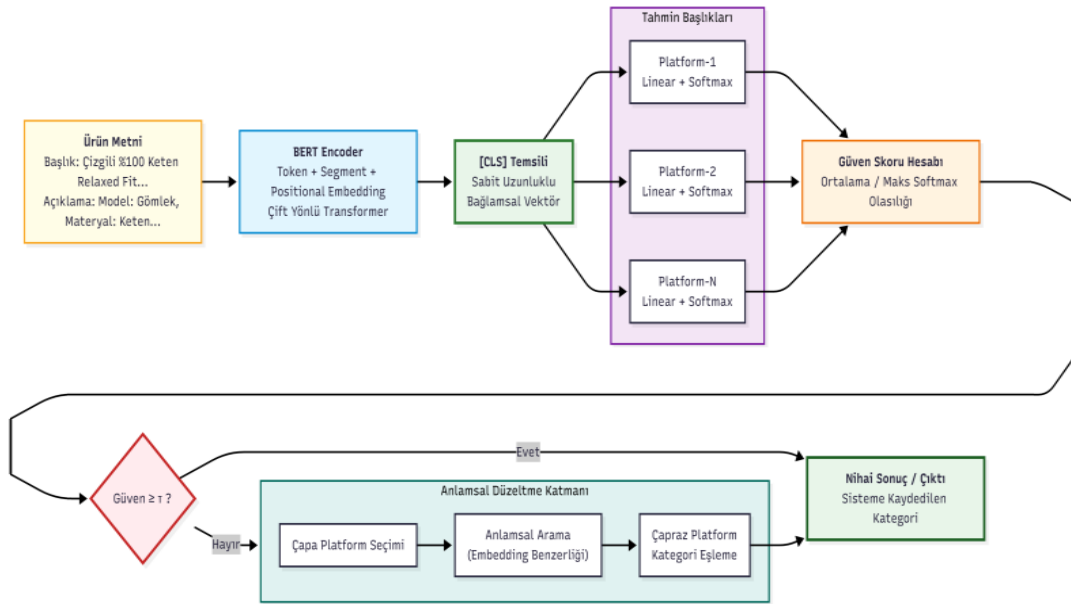
Geliştirilen Sistem Mimarisi ve Metodolojisi (Developed System Architecture and Methodology)

Literatürdeki en ileri çalışmaların, metin ve görsel veriyi birleştiren multimodal modellere yöneldiği bir gerçektir. Contrastive Language–Image Pretraining (CLIP) (Radford vd., 2021) gibi multimodal modeller, metin ve görselleri aynı anlamsal vektör uzayında temsil ederek, özellikle metin verisinin eksik veya belirsiz olduğu durumlarda kategorizasyon doğruluğunu önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, akademik olarak “en iyi” olan bir yaklaşım, pratik iş dünyası uygulamalarında her zaman “en uygun” olmayabilmektedir.

Bu çalışma, bilinçli ve stratejik bir kararla, multimodal sistemler yerine, sadece metin tabanlı veriye dayanan BERT mimarisini benimsemektedir. Gerçek dünyadaki birçok e-ticaret operasyonunda, en güvenilir, en zengin ve en kolay erişilebilir veri türü metindir. Ürün başlıkları, açıklamaları ve özellikleri, Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemlerinde genellikle yapılandırılmış bir şekilde bulunmaktadır. Görsel veriyi büyük ölçekte işlemek ve etiketlemek, metin verisine kıyasla çok daha maliyetli ve karmaşıktır. Büyük multimodal modellerin eğitilmesi ve canlı ortamlarda hizmet vermesi, son derece

yüksek hesaplama maliyetleri gerektirmektedir. Bu durum, özellikle KOBİ'ler ve orta ölçekli işletmeler için bu teknolojilerin benimsenmesinin önünde büyük bir engel teşkil etmektedir (Thompson vd., 2020). Bu çalışma, daha erişilebilir kaynaklarla dahi yüksek başarımlar elde edebilecek, daha pragmatik ve uygulanabilir bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Birçok e-ticaret sınıflandırma probleminde, sadece metin verisi kullanılarak dahi %95'in üzerinde doğruluk oranlarına ulaşmak mümkündür (Pawłowski, 2022). Görsel verinin eklenmesiyle elde edilecek %1-2'lik bir doğruluk artışının, getireceği ek maliyet ve karmaşıklığı haklı çıkarmadığı durumlar oldukça yaygındır.

Bu çalışma, metin tabanlı sinyallerin potansiyelini sonuna kadar kullanarak, maliyet-etkin bir en iyi nokta çözümü geliştirmeye odaklanmaktadır. Multimodal bir sistemin karmaşıklığına dalmak yerine, e-ticaretin temel ve çözülmemiş problemlerine odaklanmaktadır. Özellikle, önceki bölümlerde tanımlanan problemler, sadece modelin kendisinden çok, modelin ürettiği çıktının iş süreçlerine nasıl entegre edileceğiyle ilgilidir. Bu çalışma, BERT gibi güçlü bir metin anlama modelini temel alarak, bu pratik ve kritik operasyonel problemlere çözüm geliştirmeye öncelik vermektedir. Geliştirilen sistem, birbiriyle entegre çalışan üç temel katmandan oluşmaktadır: Veri katmanı, model katmanı ve uygulama ve iş akışı katmanı.



Şekil 4: Hibrit karar destek mekanizması ve çoklu platform kategori eşleme akış şeması (Hybrid decision support mechanism and multi-platform category mapping flowchart)

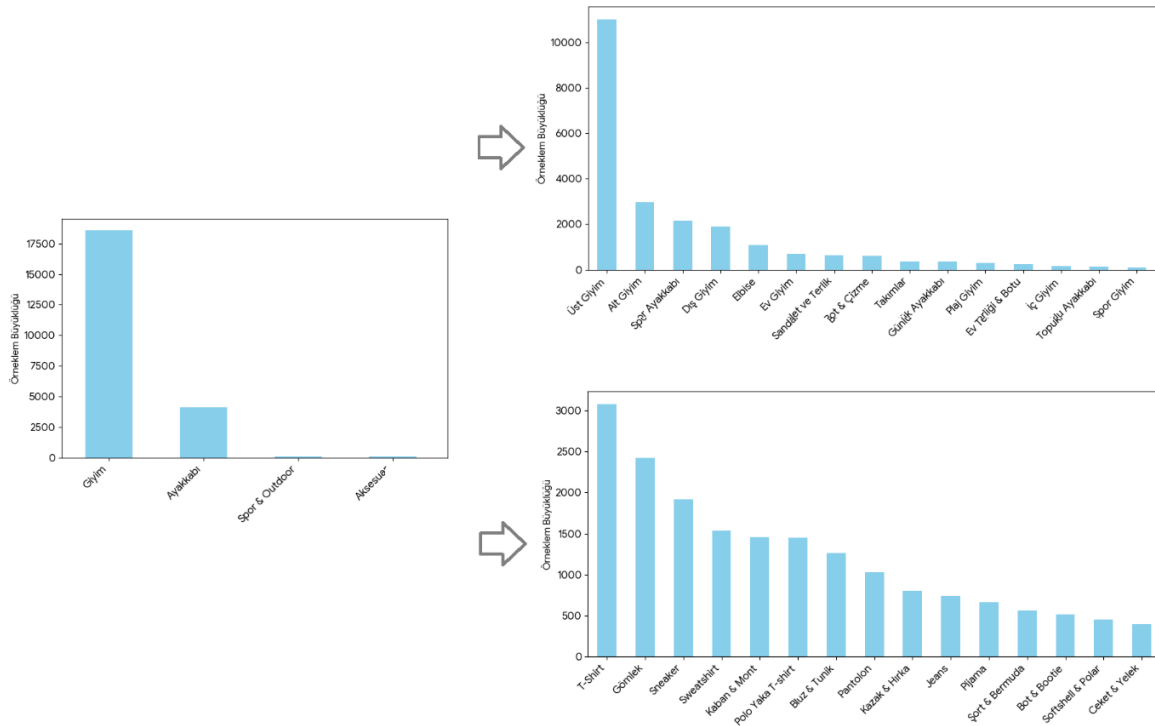
Veri Katmanı: Sistemin Temeli (Data Layer: The Foundation of the System)

Veri katmanı, projenin tüm ham maddesini, yani ürün verilerini, platform taksonomilerini ve model çıktılarının kaydedildiği yapıları barındıran temeldir.

Veri kaynağı ve yapısı (Data source and structure)

Çalışmada kullanılan veri seti Mayıs 2025 dönemine ait 25.969 ve 25.751 olmak üzere firmanın aktif olarak satış yaptığı iki farklı büyük pazar yerindeki ürün kataloglarından

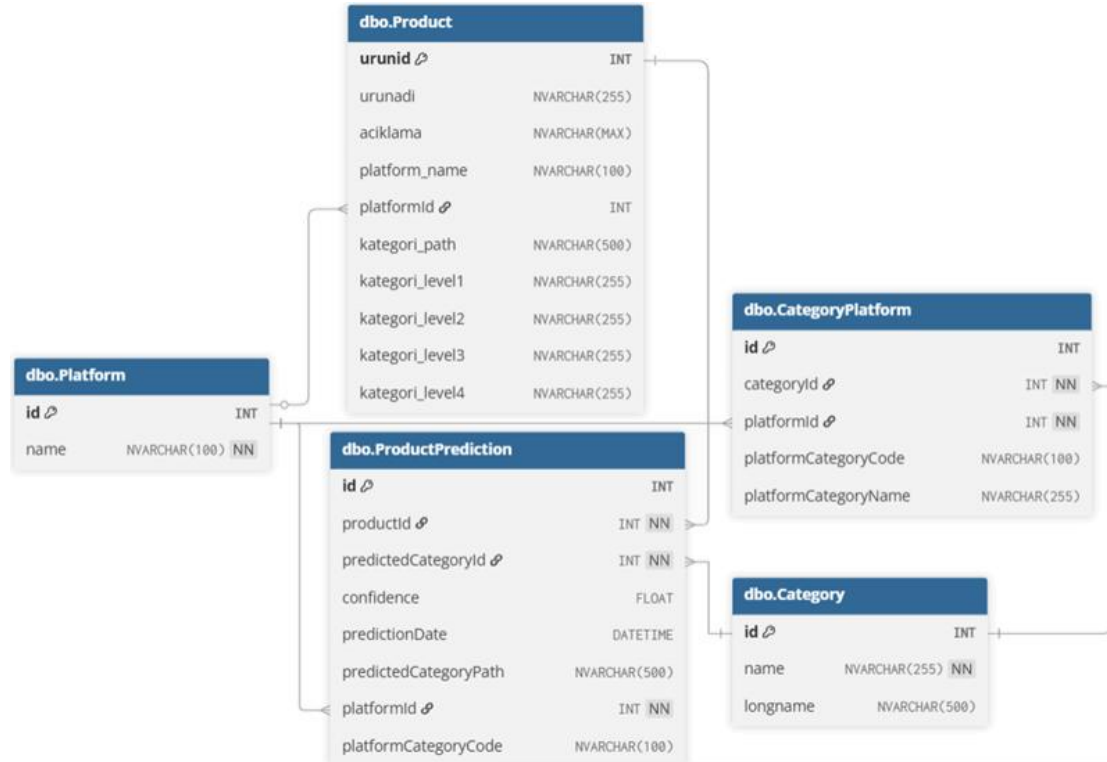
derlenmiştir. Sistemin eriştiği merkezi ürün tablosu, her ürün için metinsel tanımlayıcıların yanı sıra, hiyerarşik kategori yolunu hem birleşik bir metin hem de kategori hiyerarşik seviyelerinin ayrı sütunlara ayrıştırılmış bir şekilde barındırmaktadır. Bu veri seti, iki farklı platform için 308 ve 552 olmak üzere 860 alt kategori seviyelerini kapsamaktadır. Moda ve tekstil alanında satış faaliyetleri gösteren işletmeden alınan veri seti e-ticarette karşılaşılan sınıf dengesizliği özelliklerini taşımaktadır. Şekil 5'te kategorilerin örneklem büyüklüklerini göstermektedir.



Şekil 5: Kategorilerin örneklem büyüklükleri (Sample sizes of categories)

Bu seviyeli veri modeli, hiyerarşik sınıflandırma probleminin doğasından kaynaklanan temel zorluklara karşı geliştirilmiş bir stratejidir. Hiyerarşik bir problemi, her bir tam kategori yolunu (Örn: “Kadın Giyim → Elbise → Abiye Elbise”) tek bir “düz” etiket olarak ele alarak çözmeye çalışmak, teorik ve pratik engeller yaratmaktadır. Öncelikle, on binlerce benzersiz kategori yolu, modelin öğrenmesi gereken sınıf sayısını yönetilemez boyutlara taşıyarak bir çıktı uzayı patlamasına neden olmaktadır. Bu durum, veri setini son derece seyrek hale getirmektedir. Yani, modelin her bir benzersiz yol için yeterli sayıda örnek görmesi imkansızlaşmaktadır. Daha da önemlisi, bu yaklaşım, taksonominin içerdiği en değerli bilgiyi, yani hiyerarşik ilişkiyi yok etmektedir. Model, “Kadın Giyim → Elbise” ile “Kadın Giyim → Pantolon” arasındaki yapısal ilişkiyi anlayamamakta ve bu iki etiketi, “Elektronik → Cep Telefonu” kadar birbirinden bağımsız ve alakasız görmektedir. Bu zorlukları aşmak için bu çalışmada, hiyerarşik sınıflandırma literatüründe yaygın olarak kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış bir yaklaşım olan seviye bazlı yerel sınıflandırıcılar stratejisi benimsenmiştir. Bu strateji, tek bir karmaşık problemi, yönetilmesi daha kolay olan bir dizi basit sınıflandırma problemine ayırmakta ve bu çalışmadaki hem veri tabanı tasarımı hem de model mimarisi bu stratejiyi desteklemektedir.

Veriler, herhangi bir ön temizlik veya yapılandırma işleminden geçirilmeden, doğrudan firma veri tabanından ham haliyle alınmıştır. Bu durum, modelin gerçek dünya verisinin gürültülü ve standart dışı yapısıyla başa çıkma yeteneğini test etmek için önemli bir fırsat sunmaktadır. Veri setindeki bazı ürünler sadece bir platformda listelenirken, önemli bir kısmı her iki platform için de eşleştirilmiş ve her iki platformdaki kategori bilgileriyle birlikte kaydedilmiştir. Şekil 6'da gösterilen veri tabanı tarafında veriler, ürünlerin bulunduğu ana tablodan, her bir ürün için metinsel tanımlayıcıları ve her iki platformdaki hiyerarşik kategori yollarını içerecek şekilde yapılandırılmıştır.



Şekil 6: Veri yapısı model katmanı (Data structure model layer)

Sistemin bilişsel çekirdeğini oluşturan model katmanı, bu çalışmanın belirttiğimiz temel problemlerine çözüm üretmek üzere tasarlanmış hibrit bir mimariye sahiptir. Bu mimari, iki temel bileşenden oluşmaktadır: metinsel veriden derin anlamsal temsiller çıkaran bir ana sınıflandırma modeli ve bu modelin tahminlerini veri tabanındaki resmi kategorilerle eşleştiren bir anlamsal arama modeli.

- **Ana Sınıflandırma Modeli (BERT):** Modelin temelini, transfer öğrenimi paradigmasından faydalanan, Türkçe metinler için önceden eğitilmiş Dönüştürücü tabanlı bir dil modeli oluşturmaktadır. Model, Devlin (2019) tarafından popülerleştirilen BERT yaklaşımını benimseyerek, devasa bir Türkçe metin külliyatı üzerinde dilin gramerini, söz dizimini ve anlamsal yapılarını öğrenmiştir. Bu önceden kazanılmış bilgi, daha küçük ve probleme özgü bir veri setiyle ince ayar ürün sınıflandırma görevine aktarılmaktadır. Bu, sıfırdan model eğitmenin gerektireceği muazzam veri ve hesaplama maliyetini ortadan kaldırmaktadır. Önceden eğitilmiş bu modelin üzerine, bu çalışmanın

spesifik problemini çözmek üzere yenilikçi bir yapı inşa edilmiştir. Bu yapının en kritik yönü, hiyerarşik sınıflandırma problemini çözmek için benimsediği seviye bazlı yerel sınıflandırıcılar yaklaşımıdır (Silla & Freitas, 2011). Model, tek bir karmaşık çıktı katmanını yerine, Her platformun her bir kategori seviyesi için ayrı ve bağımsız bir karar mekanizması olan dağıtık başlıklar içermektedir. Bu tasarım, her platform ve seviyeyi ayrı bir görev olarak ele alan bir çoklu görev öğrenmesi yapısı kurmaktadır. Dönüştürücü omurgası tarafından üretilen zengin anlam temsili, hedeflenen platformun tüm seviye başlıklarına paralel olarak beslenmektedir. Bu paralel işleme, bir seviyedeki hatanın sonraki seviyelere yayılmasını önlemektedir. Böylece farklı platformların taksonomilerinin öğrenme sürecinde birbirini olumsuz etkilemesinin önüne geçmektedir.

- *Anlamsal Arama Modeli:* Sınıflandırma modelini desteklemek amacıyla, tahmin iş akışında BERT'in temel mimari ve dikkat mekanizmasını kullanan bir anlamsal arama modeli kullanılmaktadır. Sistemin görevi, ana model tarafından üretilen bir kategori yolu tahmini ile veritabanındaki resmi kategori isimleri arasında birebir metinsel eşleşme olmadığında devreye girmektir. Bu durumda model, üretilen tahminin ve aday kategorilerin işleme alarak metinlerin anlamsal olarak ne kadar yakın olduğunu belirlemektedir. Eğer iki metnin anlamı birbirine çok yakınsa bu metinleri temsil eden vektörler anlamları farklı olan metinlerden ayıklanacaktır. Sistem, en yüksek benzerlik skoruna sahip kategoriyi bularak en mantıklı eşleştirmeyi yapmaktadır.

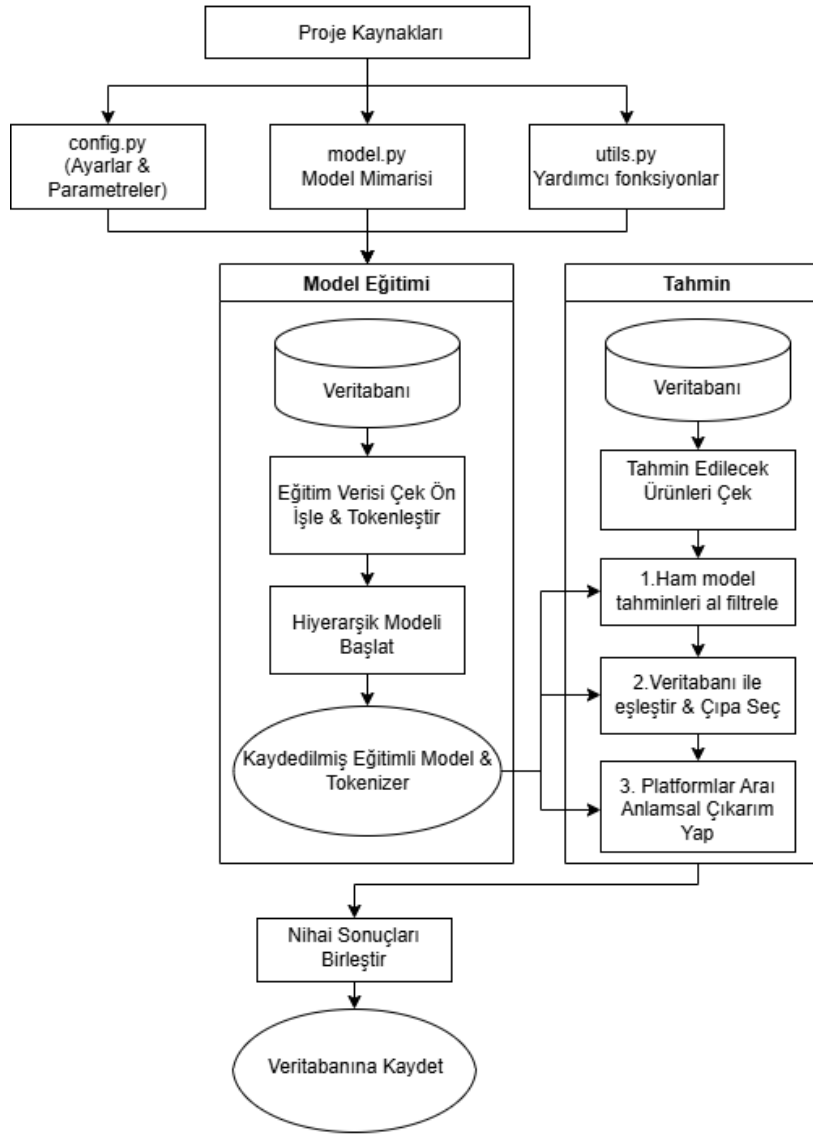
Uygulama ve İş Katmanı (Application and Business Layer)

Modelin ve verinin potansiyelini hayata geçiren bu katman aracılığıyla tüm öğrenme ve tahmin süreçlerini yönetmekteir. Projenin işletildiği akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.

Eğitim iş akışı (Training workflow)

Modelin veri üzerinden öğrenmesini sağlayan bu süreç birkaç ardışık adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, veri tabanından alınan ham veriler, modelin genelleme yeteneğini yansıyan bir şekilde ölçebilmek amacıyla, eğitim ve doğrulama setlerine ayrılmaktadır. Ardından, modelin hangi platformun taksonomisine göre hareket edeceğini anlaması için her ürünün metinsel girdisine platformu belirten özel bir ön ek eklenmektedir. Bu adım, modelin dikkat mekanizmasını doğru göreve koşullandırmaktadır.

Eğitim süreci, kütüphanesinin standart sınıfından türetilen ve bu projenin ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş sınıfı tarafından yürütülmektedir. Bu özel sınıfın en önemli görevi, çoklu görev öğrenmesi yapısına uygun bir seçici kayıp hesaplama mekanizması uygulamaktır. Bir platforma ait ürün işlenirken, sadece o platformun karar başlıkları için kayıp hesaplanmakta ve gradyanlar güncellenmektedir.



Şekil 7: İş akışı (Workflow)

Bu yapı, farklı ve heterojen taksonomilerin öğrenme sürecinde birbirini olumsuz etkilemesini engelleyerek eğitimin stabilitesini ve etkinliğini artırmaktadır. Modelin eğitimi sırasında kullanılan temel hiper parametreler Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2: Eğitim hiper-parametreleri (Training hyperparameters)

Parametre	Değer
Temel Model	dbmdz/distilbert-base-turkish-cased
Devir (Epoch) Sayısı	5
Batch Büyüklüğü (Eğitim)	16
Batch Büyüklüğü (Değerlendirme)	32
Öğrenme Oranı	2e-5
Maksimum Dizi Uzunluğu	256

5.2.2. Tahmin ve eşleştirme (Guessing and matching)

Bu süreç, eğitilmiş modelin pratik değer ürettiği bu sofistike süreç birkaç kritik aşamadan oluşmaktadır ve basit bir tahminden daha fazlasını içermektedir.

Kategorize edilecek bir ürün verildiğinde, ana sınıflandırma modeli, o platform için hiyerarşinin her bir seviyesinde en olası kategoriye tahmin etmektedir. Model, her bir seviye için yaptığı tahminin olasılık dağılımını da üretmektedir. Bir tahminin genel güven skoru, hiyerarşinin her bir seviyesindeki en olası kategoriye atanan olasılık değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

Model, kendinden emin olmadığı durumlarda bile bir tahmin üretme eğilimindedir. Sistemin bütününe gürültülü ve muhtemelen yanlış olan verilerin girmesini önlemek amacıyla bir kalite kontrol mekanizması uygulanmıştır. Bu çalışmada, %60'lık bir güven eşiği belirlenmiştir. Güven eşiğinin seçilmesi, operasyonel kapsam ile veri doğruluğu arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılan testlerde, %60'ın üzerindeki eşik değerlerinin doğruluğu artırmasına rağmen, ürünlerin büyük bir kısmını “belirsiz” olarak işaretleyip manuel incelemeye yönlendirerek operasyonel yükü artırdığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, %60'ın altındaki değerlerin ise kategorizasyon kalitesinde kabul edilemez sapmalara yol açtığı saptanmıştır. %60 eşiği, sistemin hem yüksek hacimli veriyi otonom işlemesini sağlamakta hem de yanlış kategorizasyon riskini minimize ederek manuel kontrol gereksinimini makul bir seviyede tutmaktadır. Eğer bir tahminin hesaplanan ortalama güven skoru bu eşiğin altındaysa, o tahmin “düşük kaliteli” olarak kabul edilmekte ve sonraki adımlara geçmeden doğrudan reddedilmektedir. Bu yaklaşım, hem anlamsal eşleştirme gibi daha maliyetli hesaplama adımlarının gereksiz yere çalışmasını engelleyerek sistem verimliliğini artırmakta, hem de iş mantığı açısından hatalı bir kategorizasyon yapmaktansa hiç yapmamanın daha güvenli olduğu durumları yönetmektedir.

Güven eşiğini geçen tahminler, bir sonraki aşama olan hibrit eşleştirmeye yönlendirilmektedir. Bu akıllı eşleştirme fonksiyonu, önce birebir metin uyumu aramaktadır. Eğer bulamazsa, Anlamsal Eşleştirme Modelini devreye sokarak, ürünün metinsel tanımı ile resmi kategori isimleri arasındaki anlam yakınlığını ölçmekte ve en mantıklı adayı seçmektedir. Ardından başlayan kayıt işlemleri ile başarılı tahminler, tüm detaylarıyla birlikte analiz ve kullanım için kaydedilmektedir.

Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme (Experimental Results and Evaluation)

Bu bölümde, önceki bölümlerde detaylandırılan metodoloji ile eğitilen modelin, test verisi üzerindeki performansı sunulmakta ve analiz edilmektedir. Sonuçlar, modelin her bir platform ve her bir hiyerarşi seviyesi için gösterdiği başarıyı detaylı olarak ortaya koymaktadır. Modelin performansını hiyerarşik ve çok platformlu yapının gerektirdiği hassasiyetle ölçmek için birden fazla metrik kullanılmıştır. Bu metriklerin seçimi, modelin farklı yönlerden ve özellikle sınıf dengesizliği gibi gerçek dünya verilerinde sıkça rastlanan zorluklar karşısındaki davranışını anlamayı hedeflemektedir:

- *Doğruluk*: Doğru tahmin edilen örnek sayısının toplam örnek sayısına oranıdır. En sezgisel performans ölçütü olmasına rağmen, özellikle e-ticaret katalogları gibi sınıf dağılımının dengesiz olduğu durumlarda yanıltıcı

olabilmektedir. Model, sadece çoğunluk sınıfını sürekli tahmin ederek yüksek bir doğruluk oranına ulaşabilirken, azınlıkta kalan ancak ticari olarak önemli olan niş kategorileri tamamen göz ardı edebilir. Bu nedenle, doğruluğun diğer metriklerle birlikte değerlendirilmesi esastır.

- **F1-Skoru:** Bu metrik, modelin sınıflandırma performansını daha dengeli bir şekilde ölçmek için Kesinlik ve Duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasını almaktadır.
- **Kesinlik:** Modelin bir kategoriye atadığı ürünlerin ne kadarının gerçekten o kategoriye ait olduğunu ölçmektedir. Yüksek kesinlik, modelin hatalı pozitif sonuçlarının az olduğunu göstermektedir.
- **Duyarlılık:** Bir kategoriye ait olan tüm ürünlerin ne kadarının model tarafından doğru bir şekilde bulunduğunu ölçmektedir. Yüksek duyarlılık, modelin hatalı negatif sonuçlarının az olduğunu göstermektedir. F1-Skoru, bu iki metrik arasında bir denge kurarak, özellikle azınlık sınıflardaki performansı daha iyi yansıtmaktadır ve bu nedenle sınıf dengesizliği olan veri setleri için doğruluktan daha güvenilir bir ölçüttür (Manning vd., 2008). Bu çalışmada, hem her bir örneği eşit tartan Micro F1 hem de her bir sınıfı eşit tartan Macro F1 skorları raporlanarak, modelin hem genel performansı hem de nadir kategorilerdeki başarısı ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Nicel Performans Sonuçları (Quantitative Performance Results)

Model, önceki bölümlerde detaylandırılan metodoloji ve hiper-parametreler kullanılarak 5 devir boyunca eğitilmiştir. Her bir platform ve hiyerarşi seviyesi için kayıp değerini ayrı ayrı hesaplayarak, modelin heterojen taksonomileri birbirine karıştırmadan öğrenmesini sağlamıştır. Eğitimin her devri sonunda, modelin daha önce görmediği doğrulama seti üzerindeki performansı, kapsamlı metrikler kullanılarak ölçülmüştür. Bu değerlendirme sonucunda elde edilen genel performans göstergeleri Tablo 3'te platform bazlı sonuçlar ise Tablo 4-5'te verilmiştir.

Tablo 3: Genel model performansı (Overall model performance)

Metrik	Performans Değeri
Genel Kayıp (Eval Loss)	0,6026
% Genel Doğruluk (Overall Accuracy)	%88,51
% Genel F1 Skoru (Overall F1 Micro)	%88,51

Tablo 4: İlk platform performansı (First platform performance)

Metrik	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Genel
% F1 Micro	%99,48	%94,23	%84,64	%94,05	%93,10
% F1 Macro	%49,92	%50,61	%47,43	%77,54	-

Tablo 5: İkinci platform performansı (Second platform performance)

Metrik	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Genel
% F1 Micro	%82,11	%90,79	%74,25	%82,38
% F1 Macro	%46,92	%26,55	%29,86	-

Sonuçların Analizi ve Değerlendirilmesi (Analysis and Evaluation of Results)

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen hibrit modelin çok kanallı ve hiyerarşik ürün kategorizasyonu görevinde başarı sergilediğini göstermektedir. Modelin, tüm platformlar ve seviyeler genelinde %88,51'lik bir genel doğruluk oranına ulaşması, metinsel veriden yola çıkarak ürünleri doğru hiyerarşik yola atama konusunda yetkin olduğunu göstermektedir. Bu oran, sistemin pratik uygulamalarda operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Model, ilk platform üzerinde %93,10 gibi tatminkâr bir doğruluk sergilerken, ikinci üzerinde %82,38'lik daha mütevazı bir başarı göstermiştir. Bu durum, modelin performansının, hedef platformun taksonomi yapısının karmaşıklığına ve eğitim verisindeki veri kalitesine ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir.

Sonuçlardaki en dikkat çekici bulgulardan biri, her iki platformda da F1 Micro ve F1 Macro skorları arasındaki büyük farktır. F1 Micro, her bir ürün tahminine eşit ağırlık vermekte ve bu nedenle genel doğruluğu yansıtmaktadır. F1 Macro, her bir kategoriye eşit ağırlık vermektedir. Macro skorlarının düşük olması, veri setinde bir sınıf dengesizliği olduğunu göstermektedir. Bölüm 5.1.1'de sunulan veri dağılım grafiği incelendiğinde, veri setinin dengesiz bir yapıya sahip olduğu bazı kategorilerin çok yoğun, bazılarının ise daha az veriye sahip olduğu görülmektedir. Hiyerarşik yapının derinliklerine inildiğinde ve sınıflar arası dengesizlikler (class imbalance) gözetildiğinde, Macro F1 skorlarında varyasyonlar gözlemlenmiştir. Özellikle bazı alt hiyerarşilerde Macro F1 skorlarının %26 ile %50 bandına düştüğü tespit edilmiştir. Nicel verilerin derinlemesine analizi, bu düşük performansın rastgele olmadığını, belirli kategori gruplarında kümelandığını göstermektedir. “Otomobil Aksesuarları” ve “Motosiklet Aksesuarları” gibi sınıflarda F1 skorları %42 seviyelerine gerilemiştir. Bunun temel nedeni, ürün başlıklarında yer alan “evrensel uyumlu”, “karbon görünüm” veya “su geçirmez” gibi ortak niteleyicilerin, modelin ayırt edici özelliklere (attention weights) odaklanmasını zorlaştırmasıdır. “Akıllı Saatler” ve “Aktivite Bileklikleri” gibi ürünler, hem “Elektronik” hem de “Spor ve Outdoor” ana hiyerarşileri altında yer alabildiği için model %35-48 aralığında F1 skoru üretmiştir. Bu durum, hiyerarşik tutarlılık (hierarchical consistency) problemini tetiklemekte ve modelin üst seviye düğümlerde kararsız kalmasına yol açmaktadır. Veri setinde sınırlı sayıda veya eğitim setinde hiç bulunmayan sınıflarda Macro F1 skorları %26'ya kadar düşmüştür. Bu durum, derin öğrenme modellerinin düşük frekanslı veya modelin eğitim aşamasında karşılaşmadığı sınıfları genelleştirme zorluğunu teyit etmektedir. Elde edilen bulgular, e-ticarette otonom kategorizasyonun sadece teknik bir sınıflandırma problemi değil, aynı zamanda bir ontoloji yönetimi sorunu olduğunu kanıtlamaktadır. %26-%50 bandındaki düşük skorların tartışılması, modelin geliştirilmeye açık yönlerini ortaya koymaktadır.

Operatörler tarafından girilen “Lüks”, “Hediye”, “Fırsat” gibi kategori ayırt ediciliği olmayan ifadelerin, modelin metin gömme (embedding) uzayında gürültü yarattığı görülmüştür. Bu durum, 2.3. no'lu bölümde tartışılan bilişsel önyargıların veri setine yansımaları olarak değerlendirilebilir.

Geliştirilen model, e-ticaret ürün kategorizasyonunu otomatikleştirmek için bir temel oluşturmaktadır. Modelin genel doğruluğu yüksek olsa da F1 skorları, sınıf dengesizliği probleminin ele alınması gerektiğini göstermektedir. Gelecekte, ağırlıklı kayıp fonksiyonları veya veri artırma gibi yöntemlerle modelin niş kategorilerdeki performansı iyileştirilebilir.

Model Kullanılarak Yapılan Kategorizasyon ile Manuel Eşleştirme Karşılaştırmalı Analizi (Comparative Analysis of Categorization Using Model and Manual Matching)

Bu bölümde, işletme bünyesinde yürütülen kategori eşleştirme operasyonlarının otomasyonu amacıyla geliştirilen YZ modelinin uygulanması öncesi ve sonrası durumlar, maliyet ve verimlilik metrikleri temelinde mukayeseli olarak analiz edilmiştir. Analiz, elde edilen nicel verilerin yorumlanması ve projenin kuruma sağladığı stratejik etkilerin değerlendirilmesini kapsamaktadır.

Problemin tanımlanması, kapsamı ve araştırma yöntemi (Definition of the problem, its scope and research method)

Problem oluşturulurken ve model mimarisi kurgulanırken e-ticaret sektörü standartlarına uygun şu temel varsayımlar yapılmıştır Gerçek verilerden yola çıkılarak oluşturulan örnek senaryo için aylık 731 ürün kategorizasyonu yapılmaktadır. Giriş verisi olarak sağlanan ürün başlıklarının, ürünün temel fonksiyonunu ve kategorik kimliğini yansıtan en az bir anahtar kelime içerdiği varsayılmıştır. Modelin eğitimi ve testi süresince hedef pazar yeri kategori ağaçlarının (taksonomilerin) yapısının sabit kaldığı, düğümler arası hiyerarşik ilişkilerin değişmediği kabul edilmiştir. Veri setinin ana dilinin Türkçe olduğu, ancak e-ticaret jargonuna yerleşmiş global terimlerin (örneğin: “Slim Fit”, “Bluetooth”, “Hard Drive”) model tarafından birer varlık (entity) olarak tanınabileceği ve bu hibrit dilin anlamsal bütünlüğü bozmayacağı öngörülmüştür. Deneylerde doğru kabul edilen manuel etiketlenmiş verilerin (ground truth) hatasız olduğu varsayılmıştır. Gerçek operasyonlarda %3-5 oranında insan hatası payı bulunsa da modelin bu veriyi mutlak doğru olarak öğrenmesi sistemin standartizasyonu için gerekli bir kabul olarak görülmüştür.

Bu veriler ışığında toplam adam-saat ve operasyonel maliyet hesaplanmıştır. Geliştirilen YZ modeli aynı görev kapsamında çalıştırılmıştır. Modelin 731 kategoriye işleme süresi ölçülmüş ve çalışan bir personel tarafından tek tek kontrol edilmiştir. Personelin, modelin çıktısını onayladığı eşleşme sayısı tespit edilerek modelin “Personel Teyitli Başarı Oranı” hesaplanmıştır. Bu iki analizden elde edilen veriler karşılaştırılarak potansiyel avantajlar ortaya konulmuştur.

Süreçlerin karşılaştırmalı analizi (Comparative analysis of processes)

Mevcut manuel süreç ile YZ destekli yeni sürecin iş gücü, maliyet ve performans açısından temel farkları Tablo 6’da bütünsel olarak sunulmuştur. İddia edilen %99’luk adam-saat tasarrufu, sektörel iş etüdü (time motion study) standartlarına dayanan

aşağıdaki parametreler üzerinden hesaplanmıştır: Deneyimli bir veri operatörünün, derin hiyerarşiye (4+ seviye) sahip bir taksonomide tek bir ürünü doğru kategorize etmesi için gereken ortalama süre 15-20 saniye olarak belirlenmiştir. Bu süre; ürün başlığının okunması, uygun kategorinin hiyerarşik ağaçta bulunması ve seçim işlemini kapsamaktadır.

Geliştirilen hibrit modelin CPU tabanlı bir sunucuda tekil ürün için çıkarım (inference) süresi ortalama 45-60 milisaniyedir. Modelin düşük güven skorlu tahminleri için öngörülen manuel kontrol süresi hesaba katıldığında dahi; 100.000 ürünlük bir envanterin kategorizasyonu manuel süreçte yaklaşık 555 adam-saat sürerken, yapay zekâ destekli sistemde (kontrol süreçleri dâhil) bu süre 5 adam-saat altına inmektedir.

Tablo 6: Mevcut ve YZ destekli süreçlerin karşılaştırmalı analizi (Mevcut ve YZ destekli süreçlerin karşılaştırmalı analizi)

Metrik	Değerlendirme Kriteri	Mevcut Sistem (Manuel)	YZ Destekli Sistem (Kontrol Dâhil)
İş Gücü & Zaman	İlgili Personel Sayısı	7 Kişi	1 Kişi
	Aylık Toplam (Adam-Saat)	280 Saat	2 Saat
	Yıllık Toplam (Adam-Saat)	3.360 Saat	24 Saat
Maliyet	Aylık Toplam Maliyet	49.778,40 TL	355,56 TL
	Yıllık Toplam Maliyet	597.340,80 TL	4.266,72 TL
Performans	Ölçülebilir Başarı Oranı	Bilinmiyor	%78 (Personel Teyitli)

Bu dramatik düşüşün temel nedeni, iş akışının doğasının değişmesidir; manuel süreçte personel kategoriyi hiyerarşik ağaç içinde arayıp bulma (search & retrieve) yükü altındayken, YZ destekli süreçte sadece sunulan öneriyi doğrulama (verify) rolünü üstlenmektedir. Doğrulama işlemi, arama işlemine göre bilişsel olarak çok daha az maliyetli ve hızlıdır.

Yapay zekâ sisteminin enerji ve sunucu maliyetleri, yüksek hacimli işlemlerde marjinal kaldığı için adam-saat tasarrufu doğrudan operasyonel kaldıraç olarak nitelendirilmiştir. Analiz, modelin geliştirme ve eğitim maliyetlerini (ilk yatırım maliyeti) hariç tutarak, sistemin canlıya alındıktan sonraki sürdürülebilir operasyonel maliyetlerini (OpEx) temel almaktadır. Sunucu ve bakım maliyetleri eklendiğinde dahi, insan iş gücü maliyetindeki tasarrufun büyüklüğü, yatırımın geri dönüş süresini (ROI) son derece kısa kılmaktadır.

Sonuç ve Yorum (Conclusion and Comment)

Bu çalışma, dijital ticaretin katlanarak artan hacmi ve karmaşıklığı karşısında, manuel ürün kategorizasyon süreçlerinin yarattığı operasyonel, bilişsel ve stratejik darboğazları aşmak amacıyla YZ tabanlı otonom bir çözüm geliştirme hedefiyle yola çıkmıştır. Yirminci yüzyılın son çeyreğinde başlayan dijital devrimin ticareti dönüştürdüğü gerçeğinden hareketle, bu dönüşümün yarattığı “seçim paradoksu” ve çok kanallı ticaretin getirdiği “veri siloları” gibi modern problemlerin kökenine inilmiştir. Çalışmanın teorik altyapısı, manuel süreçlerin maliyetinin yanı sıra, bilişsel önyargılara

açık, ölçeklenemeyen ve markanın stratejik rekabet avantajını tehdit eden bir zafiyet olduğu temel argümanı üzerine inşa edilmiştir.

Bu bağlamda geliştirilen ve bu bölümde sonuçları analiz edilen hibrit YZ modeli, söz konusu problemlere hem teorik hem de pratik düzeyde somut çözümler sunma potansiyelini ortaya koymuştur. Deneysel sonuçlar, geliştirilen modelin temel görev olan metin tabanlı ürün verisinden hiyerarşik kategori ataması yapma konusunda yetkinliğe sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Modelin, daha önce görmediği test verisi üzerinde elde ettiği %88,51'lik genel doğruluk oranı, anlamsal anlama gücünün, Türkçe e-ticaret verisinin karmaşık ve gürültülü yapısı üzerinde dahi ne denli etkili olduğunun bir göstergesidir. Platformlar arası performans farklılıkları (%93,10'a karşı %82,38), modelin başarısının hedef platform taksonomisinin tutarlılığına ve veri kalitesine duyarlılığını vurgulamaktadır. Bununla birlikte, F1 Micro ve F1 Macro skorları arasındaki belirgin fark, e-ticaret kataloglarının doğasında var olan sınıf dengesizliği problemini gözler önüne sermektedir. Model, popüler kategorilerde üstün bir performans sergilerken, ticari değeri yüksek olabilecek niş kategorilerde zorlanmaktadır. Bu bulgu, gelecekteki çalışmalar için ağırlıklı kayıp fonksiyonları veya veri artırma gibi tekniklerin entegrasyonunun, modelin genelleme kabiliyetini daha da artırabileceğine işaret etmektedir. Bu çalışmanın en kritik çıktılarından biri, teorik model performansının, gerçek dünya iş akışlarına entegre edildiğinde yarattığı somut değer ölçülmesidir. Modelin bir personel denetiminde kullanıldığı karşılaştırmalı analiz senaryosu, kategorizasyon sürecinde harcanan aylık adam-saat maliyetini 280 saatten 2 saate düşürerek %99'luk bir verimlilik artışı ve operasyonel maliyette %99'un üzerinde bir tasarruf sağladığını ortaya koymuştur. %78'lik personel teyitli başarı oranı, modelin laboratuvar ortamındaki nicel metriklerinin ötesinde, pratik olarak ne kadar güvenilir ve kullanılabilir bir çıktı ürettiğini göstermektedir. Bu sonuç, otomatik kategorizasyona yapılan yatırımın bir maliyet kalemi değil, doğrudan kârlılığa ve rekabet avantajına dönüşen stratejik bir yatırım olduğu argümanını güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Kavramsallaştırılan beş temel kategorizasyon problemine bu çalışma çerçevesinde getirilen çözümlerin başarısını problem başlıkları özelinde değerlendirecek olursak; modelin yüksek doğruluk oranı, yapılandırılmamış ürün metinlerinden kategoriye işaret eden anlamsal sinyalleri başarılı bir şekilde çıkardığını ve seviye bazlı yerel sınıflandırıcılar yaklaşımıyla büyük ölçüde hiyerarşik olarak tutarlı yollar ürettiğini göstermektedir. Ayrıca modelin ürettiği ham tahminlerin, anlamsal arama modeliyle veri tabanındaki resmi kategorilerle eşleştirilmesi, ontoloji eşleştirme gibi karmaşık bir probleme pragmatik ve etkili bir çözüm sunmuştur. Bu hibrit yaklaşım, farklı platformların semantik heterojenliği arasında bir "çeviri" katmanı görevi görerek çok kanallı otomasyonun önünü açmıştır. Böylece çalışma, literatürde genellikle ayrı ayrı araştırma konuları olarak ele alınan hiyerarşik sınıflandırma ve ontoloji eşleştirme problemlerini tek bir hibrit mimaride birleştirerek, teorik doğruluğu endüstriyel uygulanabilirlikle buluşturan özgün bir metodoloji ortaya koymuştur.

Sistem, mevcut taksonomiye göre eğitilmiştir ve yeni kategorilerin eklenmesi veya anlamların değişmesiyle ortaya çıkan taksonomi evrimi problemine karşı dinamik bir adaptasyon mekanizması içermemektedir. Bu alanlar, sistemin gelecekteki versiyonları için önemli araştırma ve geliştirme fırsatları sunmaktadır. Sonuç olarak çalışma, ürün kategorizasyonunun ilk ve en temel adımı olan doğru kategori yolunun atanması problemini otomatize etmede önemli bir başarıya ulaşmıştır. Ancak tam potansiyelin kilidini açmak için bir sonraki mantıksal adım, bu çalışmada çözülen problemin üzerine inşa edilecek olan Özellik Eşleştirmedir. Kategori doğru bir şekilde belirlendikten sonra, o kategoriye özgü niteliklerin ürün metninden otomatik olarak çıkarılması, yönlendirmeli arama ve filtreleme sistemlerinin temelini oluşturarak müşteri deneyimini ve kişiselleştirme motorlarının etkinliğini doğrudan iyileştirecektir. Sistemin gelecekte yüksek güvenli tahminleri otonom olarak onaylaması, personelin rutin işler yerine stratejik görevlere odaklanmasını sağlayacaktır. Bu çalışma, YZ'nin e-ticaretteki dönüştürücü potansiyelini kanıtlayarak gelecek araştırmalara temel oluşturmaktadır.

Yazarlık Katkısı

Mustafa Muhacır: Fikir/Kavram, Kavramsal Arka Plan, Metodoloji, Veri Analizi, Veri Görselleştirme, Yazım.

Gürkan Işık: Fikir/Kavram, Kavramsal Arka Plan, Yazım, Değerlendirme ve İnceleme.

Yazar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yapay Zekâ Kullanım Beyanı

Yazımda, dilbilgisi kontrolleri amaçlı yapay zekâ sistemlerinden destek alınmıştır.

Kaynakça

- Abraham, J. (2014). *Product information management*. Springer International Publishing.
- Anderson, C. (2006). *The long tail: Why the future of business is selling less of more*. Hyperion.
- Batini, C., Cappiello, C., Francalanci, C., & Maurino, A. (2009). Methodologies for data quality assessment and improvement. *ACM Computing Surveys*, 41(3), 1–52.
- Cerri, R., Barros, R. C., & De Carvalho, A. C. (2014). Hierarchical multi-label classification using local neural networks. *Journal of Computer and System Sciences*, 80(1), 39–56.
- Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies* (ss. 4171–4186).
- Euzenat, J., & Shvaiko, P. (2013). *Ontology matching* (2. Baskı). Springer.
- Fader, P. S., Hardie, B. G., & Lee, K. L. (2005). Counting your customers the easy way: An alternative to the Pareto/NBD model. *Marketing Science*, 24(2), 275–284.
- Gama, J., Žliobaitė, I., Bifet, A., Pechenizkiy, M., & Bouchachia, A. (2014). A survey on concept drift

- adaptation. *ACM Computing Surveys*, 46(4), 1–37.
- Häubl, G., & Trifts, V. (2000). Consumer decision making in online shopping environments: The effects of interactive decision aids. *Marketing Science*, 19(1), 4–21.
- Haug, A., Zachariassen, F., & Van Liempd, D. (2011). The costs of poor data quality. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(2), 168–193.
- He, R., & McAuley, J. (2016). VBPR: Visual Bayesian personalized ranking from implicit feedback. In *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence* (ss. 144–150).
- Hearst, M. A. (2009). *Search user interfaces*. Cambridge University Press.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4(1), 11–26.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Farrar, Straus and Giroux.
- Keenan, M. (2024, 10 Eylül). *Global ecommerce statistics: Trends to guide your store in 2025*. Shopify. <https://www.shopify.com/enterprise/blog/global-ecommerce-statistics>
- Koller, D., & Sahami, M. (1997). Hierarchically classifying documents using very few words. In *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Machine Learning* (ss. 170–178).
- Koren, J., Zhang, Y., & Liu, X. (2008). Personalized interactive faceted search. In *Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web* (ss. 477–486).
- Kumar, B. (2023, 27 Kasım). *Ecommerce UX: Design strategies and best practices for 2024*. Shopify. <https://www.shopify.com/blog/ecommerce-ux>
- Kumar, V. (2018). A theory of customer valuation: Concepts, metrics, strategy, and implementation. *Journal of Marketing*, 82(1), 1–19.
- Kwasnik, B. H. (1999). The role of classification in knowledge representation and discovery. *Library Trends*, 48(1), 22–47.
- Landauer, T. K., & Nachbar, D. W. (1985). Selection from alphabetic and numeric menu trees using a touch screen: Breadth, depth, and width. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (ss. 73–78).
- Laudon, K. C., & Laudon, J. P. (2021). *Essentials of management information systems*. Pearson-Prentice Hall.
- Liao, S. H., Hu, D. C., & Liu, H. L. (2024). Influence of online to offline on a chain store: Two moderated mediation models investigation. *SAGE Open*, 14(2).
- Lombard, M., Snyder-Duch, J., & Bracken, C. C. (2002). Content analysis in mass communication: Assessment and reporting of intercoder reliability. *Human Communication Research*, 28(4), 587–604.
- Loshin, D. (2013). *Business intelligence: The savvy manager's guide*. Morgan Kaufmann.
- Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press. (Not: Kitabın orijinal yayıncısı ve yazar kadrosu eksikti, tamamlandı).
- Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. In *1st International Conference on Learning Representations (ICLR 2013)*.
- Nadeau, D., & Sekine, S. (2007). A survey of named entity recognition and classification. *Linguisticae Investigationes*, 30(1), 3–26.
- Pawłowski, M. (2022). Machine learning based product classification for ecommerce. *Journal of Computer Information Systems*, 62(4), 730–739.
- Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. D. (2014). GloVe: Global vectors for word representation. In

Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP) (ss. 1532–1543).

- Pirolli, P., & Card, S. (1999). Information foraging. *Psychological Review*, 106(4), 643–675.
- Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Aspell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I. (2021). Learning transferable visual models from natural language supervision. In *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning* (ss. 8748–8763). (Not: Literatürdeki OpenAI CLIP makalesinin eksik olan diğer yazarları ve sayfa sayıları eklendi).
- Rahm, E., & Bernstein, P. A. (2001). A survey of approaches to automatic schema matching. *The VLDB Journal*, 10(4), 334–350.
- Reimers, N., & Gurevych, I. (2019). Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. In *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)* (ss. 3982–3992).
- Silla, C. N., & Freitas, A. A. (2011). A survey of hierarchical classification across different application domains. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 22(1), 31–72.
- Stalk, G., & Hout, T. M. (1990). *Competing against time: How time-based competition is reshaping global markets*. Free Press.
- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2025, 1 Mayıs). *Türkiye’de e-ticaretin görünümü raporu*. T.C. Ticaret Bakanlığı. <https://ticaret.gov.tr/data/681a16de13b8762dd8da6b66/TİCARET%20BAKANLIĞI%20TÜRKİYE'DE%20E%20-%20TİCARETİN%20GÖRÜNÜMÜ%20RAPORU.pdf>
- Talukdar, P. P., & Crammer, K. (2009). New regularized algorithms for transductive learning. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases: European Conference, ECML PKDD 2009* (ss. 442–457). Springer.
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350.
- Thompson, N. C., Greenewald, K., Lee, K., & Manso, G. F. (2020). The computational limits of deep learning. *MIT Initiative on the Digital Economy Research Brief*, 4, 1–4.
- Tunkelang, D. (2009). *Faceted search*. Springer.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. (Not: Eksik yazar Łukasz Kaiser eklendi).
- Verhoef, P. C., Kannan, P. K., & Inman, J. J. (2015). From multi-channel retailing to omni-channel retailing: Introduction to the special issue on multi-channel retailing. *Journal of Retailing*, 91(2), 174–181.
- Weber, K., Otto, B., & Österle, H. (2009). One size does not fit all—A contingency approach to data governance. *Journal of Data and Information Quality*, 1(1), 1–27.
- Zahavy, T., Krishnan, A., Magnani, A., & Mannor, S. (2018). Is a picture worth a thousand words? A deep multi-modal architecture for product classification in e-commerce. In *Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence* (ss. 7533–7540).

Review Article

Applications Of Unconventional Manufacturing Methods in Shape Memory Alloys

Emre ALTAŞ* 

*Sorumlu yazar/Corresponding author, Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Makine Mühendisliği, Bartın, TÜRKİYE. E-posta: emrealtas@bartin.edu.tr

Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Mechanical Engineering, Bartın, Türkiye. E-mail: emrealtas@bartin.edu.tr

Atıf: Altas, E. (2026). Applications Of Unconventional Manufacturing Methods In Shape Memory Alloys. JOSS, 5(1), 44-65.

Article Information

Abstract

Article History

Received:

20.02.2026

Accepted:

12.03.2026

Published:

30.06.2026

Keywords

Smart Materials

Shape Memory Alloys

Abrasive Water Jet Method

Electro Erosion Method

Laser Method

Wire Electrical Discharge

Machining

In this review study, it is aimed to determine the gains and shortcomings of the unconventional manufacturing methods used in the machining of smart materials by making a detailed analysis. Among these methods, abrasive water jet machining, laser, electro discharge and wire discharge machining are the most used. Abrasive water jet machining is frequently preferred because it has some superior properties compared to other methods. Compared to other unconventional manufacturing methods, abrasive water jet machining does not create a white layer and thermal damage on the workpiece, has no or low heat affected zone, has a higher material removal rate than wire erosion machining, and has a higher material removal rate than laser machining. It stands out with its positive results such as providing good surface integrity. The advantages of electro-erosion and wire erosion machining processes can be listed as being able to process electrically conductive materials with very complex geometry that are difficult to manufacture, less physical deformation due to no contact between the tool and the workpiece, and fewer areas affected by heat treatment. Shape memory alloys (SMAs) have been the subject of many researchers from the past to present. Many studies have been done in this field. The studies that are carried out and will be carried out in the future will help us to have more information about SMAs and will enable the discovery of new technological products that will benefit humanity. In this study, the applications of unconventional manufacturing methods on innovative and high-performance smart materials are explained and the results of previous research on this subject are summarized. It is thought that this study will be a guide for future studies.

Şekil Hafızalı Alaşımlarda Geleneksel Olmayan İmalat Yöntemlerinin Uygulamaları

Makale Bilgisi	Özet
Makale Tarihçesi <u>Geliş Tarihi:</u> 20.02.2026 <u>Kabul Tarihi:</u> 12.03.2026 <u>Yayınlanma Tarihi:</u> 30.06.2026	<i>Bu derleme çalışmasında, akıllı malzemelerin işlenmesinde kullanılan geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin kazanımları ve eksikliklerinin detaylı bir analiz yapılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemler arasında aşındırıcı su jeti ile işleme, lazer, elektro erezyon ve tel erezyon işleme en çok kullanılanlar arasındadır. Aşındırıcı su jeti ile işleme, diğer yöntemlere göre bazı üstün özelliklere sahip olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Diğer geleneksel olmayan imalat yöntemlerine kıyasla aşındırıcı su jeti ile işleme, iş parçası üzerinde beyaz tabaka ve termal hasar oluşturmaması, ısıdan etkilenen bölgesinin olmaması veya düşük olması, tel erezyon işlemeye göre daha yüksek malzeme kaldırma oranına sahip olması ve lazer işlemeye göre iyi yüzey bütünlüğü sağlaması gibi olumlu sonuçlarıyla öne çıkmaktadır. Elektro erezyon ve tel erezyon işleme proseslerinin avantajları, imalatı zor olan çok karmaşık geometriye sahip elektriksel iletken malzemeleri işleyebilmesi, takım ile iş parçası arasında temas olmaması nedeniyle daha az fiziksel deformasyon oluşması ve ısıl işleminden etkilenen bölgelerin daha az olması olarak sıralanabilir. Şekil hafızalı alaşımlar (SMA'lar) geçmişten günümüze birçok araştırmacının konusu olmuştur. Bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilen ve gelecekte gerçekleştirilecek olan çalışmalar, SMA'lar hakkında daha fazla bilgiye sahip olmamıza yardımcı olacak ve insanlığa fayda sağlayacak yeni teknolojik ürünlerin keşfedilmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin yenilikçi ve yüksek performanslı akıllı malzemeler üzerindeki uygulamaları açıklanmakta ve bu konudaki önceki araştırmaların sonuçları özetlenmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmanın gelecekteki çalışmalara rehberlik edeceği düşünülmektedir.</i>
Anahtar Sözcükler Akıllı Malzemeler Şekil Hafızalı Alaşımlar Aşındırıcı Su Jeti ile İşleme Elektro Erezyon İşleme Lazer İşleme Tel Elektro Erezyon İşleme (WEDM)	

Introduction

With developing technology, the demand for metal alloys (advanced materials) with functional properties is increasing in sectors such as automotive, electronics, aviation, construction and biomedical. Smart materials, which are one of the most important representatives of advanced materials, have many usage areas. Smart materials, whose structures change due to external influence (light, force, heat, moisture), provide scientists with new ideas due to high technological developments. In recent years, a lot of research has been done on smart materials that twist, shrink, expand or contract under external influence (Bahl, Nagar, Singh, & Sehgal, 2020; Dezfali & Alam, 2013; Seelecke & Muller, 2004).

With the developments in today's technology, new material groups come into play at points where metals and metal alloys cannot provide the desired properties. The most important of these material groups are alloys with a shape memory effect (Altas, Altin Karatas, Gokkaya, & Akinay, 2021). SMAs, with their superior properties such as superelasticity and shape memory effect, are widely used in various application areas in the industry that require low density, high ductility, strength and impact resistance, superior corrosion and wear resistance and fatigue life. These alloys are used to obtain economically suitable and technically suitable special products. Additionally, they are preferred over all other metallurgical materials in high-temperature applications. This is due to their excellent performance at high temperatures, superior creep and fatigue resistance under heavy loading, and fewer microstructural defects that occur during the production phase (Acar, Saedi, & Karaca, 2023; Altas, Erkan, Ozkan, & Gokkaya, 2022).

SMAs are smart materials that have the ability to return their structure, which is damaged when exposed to external factors, to their original shape, thanks to the application of appropriate heat. These special materials have the ability to change shape thanks to martensite and austenite phase transformations in their crystal structures. SMAs, which are very difficult to machine due to their superior mechanical and physical properties, are very difficult to machine using traditional (usual) methods due to high electrode wear rate and low surface quality. For this reason, non-traditional (unusual) manufacturing methods are used in the processing (machining processes) of SMAs (Altas, Gokkaya, Karatas, & Ozkan, 2020; Guo, Klink, Fu, & Snyder, 2013; Velmurugan, Senthilkumar, Dinesh, & Arulkirubakaran, 2018).

Another issue in the processing of SMAs is determining the most suitable method in terms of processing efficiency and sustainability. Research is being carried out on mathematical modeling to determine the most suitable processing method, parameters affecting yield and their impact ratios, and estimation of processability indicators (Cismasiu, 2010). In these studies, unconventional manufacturing methods applied in the processing of SMAs are generally used, as well as experimental design and analysis methods such as the Taguchi method and surface response method. These methods also enable obtaining results that are very close to the truth with fewer experiments. Thus, savings in terms of both processing time and economy increase. On the other hand, since a small change in individual parameters affects the machining performance in a complex way due to the complex mechanism of material removal in unconventional manufacturing methods, it is of great importance to improve these methods with multivariate optimization processes (Alagha, Hussain, & Zaki, 2021). In this context, it is seen that some studies have been carried out on the simultaneous optimization of processability indicators using techniques such as Taguchi-Gray relational analysis (GRA), response surface methodology (RSM), and particle swarm optimization (Chaudhari et al., 2019; Demers, Brailovski, Prokoshkin, & Inaekyan, 2009; Rathi et al., 2020).

Commonly used SMAs are nickel-titanium (NiTi), titanium nickel zirconium (TiNiZr), nickel aluminum iron (NiAlFe), iron manganese silicon (FeMnSi), iron manganese silicon chromium (FeMnSiCr) and nickel manganese gallium (NiMnGa) (Costanza & Tata, 2020; Wang & Jiang, 2008). The most commonly used SMA material group in the aerospace and defense industry and in the biomedical field is NiTi SMAs. NiTi SMAs show superior mechanical properties such as high elastic deformation of 20-25%, of which approximately 8% is recoverable, high strength and ductility of 200-250 MPa and hardness of 220-275 HV (Altas, Khosravi, et al., 2022). These properties make NiTi SMA a difficult material to machine. Unconventional manufacturing methods such as laser machining method (Al-Ahmari, Rasheed, Mohammed, & Saleh, 2016; Mohammed & Al-Ahmari, 2020), electro-discharge machining (EDM) method (Vinayak N Kulkarni, Gaitonde, Karnik, Manjaiah, & Davim, 2020; Rasheed, Al-Ahmari, El-Tamimi, & Abidi, 2012), electrochemical polishing and abrasive water jet machining method (M. Kong, Axinte, & Voice, 2011; Zadafiya, Kumari, Chatterjee, & Abhishek, 2021) are used for shaping NiTi alloy. In laser and EDM machining, thermal damage caused by high temperatures occurs on the machined surface, and these damages significantly reduce the fatigue life of the machined part. Additional finishing is often required to meet part requirements and remove the heat-affected zone. For this reason, NiTi SMAs, which are widely used especially in the healthcare sector, must be processed at appropriate parameter values. The subject of SMAs has been the subject of many researchers from the past to present. Many studies have been done in this field. This study and future studies will help us gain more information about SMAs and will enable new discoveries to be made to the advantage of technology and humanity (Al-Ahmari et al., 2016; Obeidi et al., 2021).

In this study, previous studies on the processing of SMAs with unconventional manufacturing methods are explained in detail, and their aims and obtained results are stated. Then, by evaluating the results obtained, the differences between the studies are explained and the shortcomings and strengths of the unconventional manufacturing method applications are stated. The main purpose of the study is to express all aspects of the unusual manufacturing method and properties of smart materials, thus helping future studies. At the end of the study, suggestions were explained and new research topics and areas were stated.

Processing Of Innovative and High-Performance Materials With Unconventional Methods

Smart materials are engineering materials that are constantly being developed. Interest in smart materials and manufacturing methods is increasing day by day, especially in industrially developed or developing countries. Difficulties in shaping smart materials with traditional machining methods have led to the development of unconventional manufacturing methods and the emergence of new processing approaches. In this section, studies on unconventional manufacturing methods that are widely used industrially are evaluated.

Studies on the Processing of Smart Materials Using the Abrasive Water Jet Method (AWJ)

Conventional machining of NiTi alloys is quite difficult due to their inherent high cutting forces and wear resistance. The low thermal conductivity, high elasticity, and severe strain hardening of NiTi alloys result in rapid tool wear, heat accumulation in the cutting zone, and poor surface quality, making conventional methods such as turning and milling inadequate for precision machining of these alloys (Altas et al., 2020). Therefore, in recent years, non-traditional machining methods have been used in the machining of these alloys (Zadafiya et al., 2021). Abrasive water jet (AWJ) is widely used in manufacturing industries for machining many metal and non-metal materials. Reasons for choosing the AWJ processing method include: producing a very small amount of heat in the cutting zone, being able to cut and process all kinds of metal or non-metal materials, providing a higher material removal rate than the wire erosion machining (WEDM) method and better surface integrity than the laser processing method, being able to cut materials up to 250 mm thick, and the absence of thermal deterioration in work materials. In addition, the ability to shape complex geometries by cutting, creating minimum cutting force on the workpiece and providing better dimensional accuracy due to very low deformation are the reasons for preference (M. C. Kong et al., 2013; Vora et al., 2022).

By transferring the kinetic energy of the high-speed water jet to the abrasive particles, the abrasive water jet method enables the needed amount of material to be removed or a certain form or geometry to be created on the workpiece. The abrasive water jet method offers many advantages such as minimized material waste, a heat-affected zone, low environmental pollution and no cutting fluid requirement (Mehta, Gupta, Mehta, & Gupta, 2019). It has been reported that in abrasive water jet machining of the surface of NiTi alloys, there are no thermal effects during the process, such as phase changes and microstructures, that can negatively affect the surface integrity. Compared to other unconventional manufacturing methods, abrasive waterjet machining provides positive results such as no thermal degradation on the workpiece, high machining versatility for cutting almost any material, high flexibility for cutting in any direction and low cutting forces (Frotscher, Kahleyss, Simon, Biermann, & Eggeler, 2011; Velmurugan et al., 2018).

Kong et al.(M. C. Kong et al., 2013), investigated the impact of processing parameters, accounting for secondary temperature and mechanical effect-induced transformations, on the surface integrity and geometric precision during multi-stage AWJ (cutting, countersinking, and milling) machining of the NiTi SMA (Figure 1). The researchers concluded from their experiments that cutting NiTi SMAs in straight notch geometry with AWJ is challenging because of their unique characteristics, which include high ductility and deformed twinned martensite transformation. However, they were able to accomplish this by lowering the AWJ's abrasive flow rate until surface integrity was acceptable. According to the researchers, these alloys could be used in the production

of parts for the aviation industry if the AWJ machining method is managed optimally. Surfaces that can meet the quality requirements (cut surface: roughness $<4\ \mu\text{m}$; countersink: circularity $<0.04\ \text{mm}$, concentricity <0.15 ; milled surface: roughness $<5\ \mu\text{m}$) can be created.

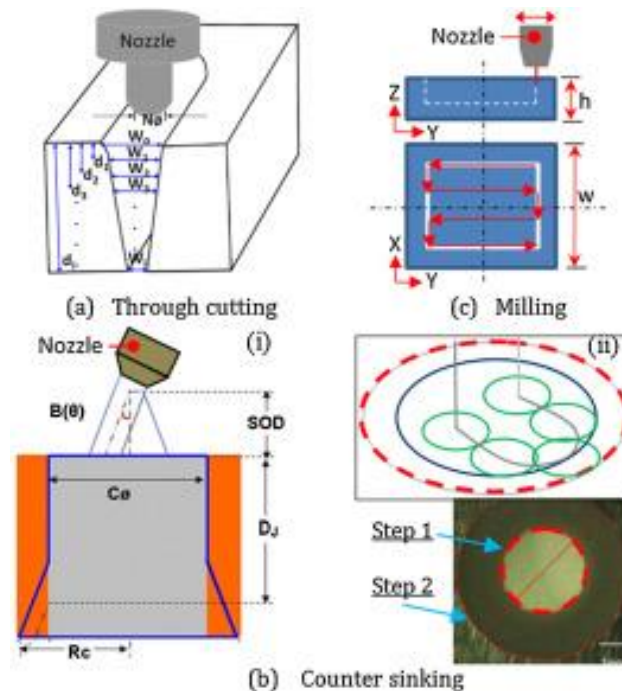


Figure 1. Schematic representation of cutting operations with multi-option AWJ; (a) Cutting (b) Countersinking (c) Milling (M. C. Kong et al., 2013)

Kong et al. (M. Kong et al., 2011) studied the mechanical and metallurgical properties of three different alloys (100% martensite, austenite and martensite mixture, 100% austenite) using AWJ and abrasive-free (plain) water jet (WJ) cutting processes. Some images of the surfaces milled with AWJ in their work are given in Figure 2. Researchers stated that in AWJ machining, high-speed abrasive particles create melts and sparks at some points, where the phase change of the NiTi crystal structure from martensite to austenite occurs. They stated that although the AWJ milling approach can provide a more controllable penetration depth, the sample surface integrity may decrease due to abrasive embedment, and this may negatively affect the fatigue life of the part. Researchers stated that although the problem of abrasive embedding occurs in the AWJ milling process, WJ milling can be considered to remove the embedded particles and this method can be an effective method for milling NiTi alloy.

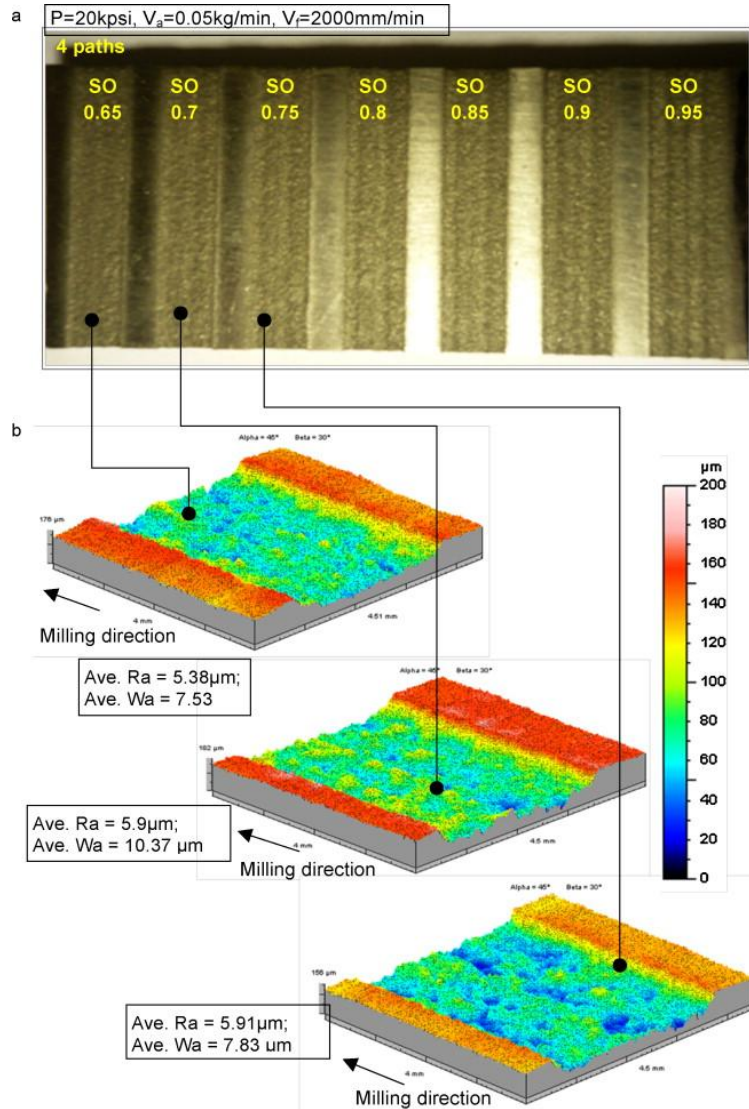


Figure 2. (a) Image of AWJ milled surfaces created with different steps at a feed rate of 2000 mm/min; (b) Images of the quality of AWJ milled surfaces in steps of 0.65 mm, 0.7 mm, and 0.75 mm (M. Kong et al., 2011).

Machining of NiTi SMA with abrasive water jet method provides minimized material waste, low cutting forces, very low heat affected zone compared to other machining zones, no thermal distortion, low environmental pollution and no cutting fluid requirements, flexibility and versatility. It offers many advantages such as being a processing process (Frotscher et al., 2011; Zadafiya et al., 2021).

Machining with the abrasive water jet method, compared to other unconventional manufacturing methods, does not create a white layer and thermal damage on the workpiece, has no or low level of heat-affected zone, high machining versatility for shaping difficult-to-machine materials, high flexibility in cutting operations and low shear (M. Kong & Axinte, 2012). It stands out with its positive results such as strength. In this respect, researchers use the abrasive water jet machining method in the machining of materials that are difficult to machine, such as NiTi alloys; they stated that it can be

preferred in applications where good surface quality, low kerf angle, and low surface and subsurface defects are desired (Elahinia, Hashemi, Tabesh, & Bhaduri, 2012).

Studies on Processing of Smart Materials with Electro Erosion Method (EDM)

Electro discharge machining (EDM) method is one of the unconventional manufacturing methods widely used in the processing of NiTi SMAs. In this method, which is used to shape hard, brittle, and complex geometry materials, if the machining parameters are not determined correctly, high electrode wear rate, poor surface quality, as well as heat-affected zones under the machined surfaces may occur. This situation negatively affects the shape memory effect and superelastic behavior of NiTi SMAs and also brings about defects that reduce corrosion resistance and fatigue life (Manjaiah, Narendranath, Basavarajappa, & Gaitonde, 2014; W Theisen & A Schuermann, 2004).

Although electro discharge machining processes provide high machining accuracy in the machining of NiTi SMAs, oxides and contaminants dissolved in the dielectric liquid medium during machining can form a layer on the material surface. For this reason, NiTi SMAs, which are widely used especially in the healthcare sector, must be processed at appropriate parameter values (Manjaiah et al., 2014).

Daneshmand et al. (Daneshmand, Monfared, & Lotfi Neyestanak, 2017), investigated the effects of current, voltage, pulse on time, pulse off time, Al_2O_3 powder and electrode rotation speed on the metal removal rate, electrode wear rate and ambient surface roughness in the EDM cutting process of NiTi₆₀ SMA using the Taguchi technique. In cutting experiments, they employed copper electrodes as instruments. To lower the electrode wear rate and raise the rate of metal removal, they mixed 3 g/l of Al_2O_3 powder with ionized water. The rotation of the tool produced a centrifugal force, and Al_2O_3 powder increased the size of the gap and the metal removal rate. The researchers' experiments revealed that these factors increased the metal removal rate with increases in current density, pulse on time, and voltage (Figure 3). They saw that the Al_2O_3 powder filled the space between the tool and the sample and that the tool's rotation around its axis stopped the plasma channel from spreading. It has been observed by researchers that decreasing current density, voltage, and pulse on time while increasing pulse off time can lower average surface roughness (Figure 4).

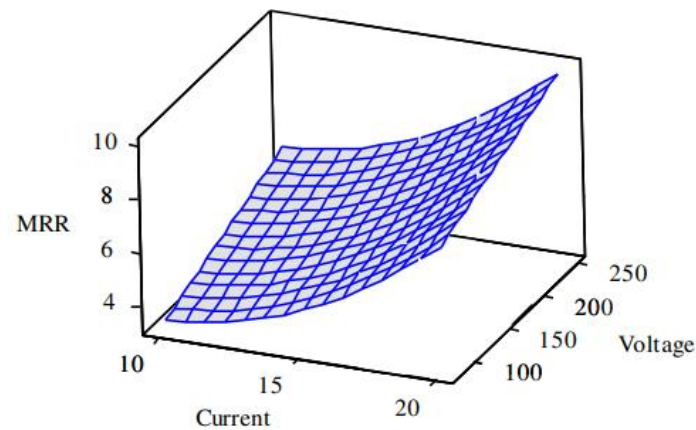


Figure 3. Graph showing the effect of current and voltage on the metal removal rate (Daneshmand et al., 2017).

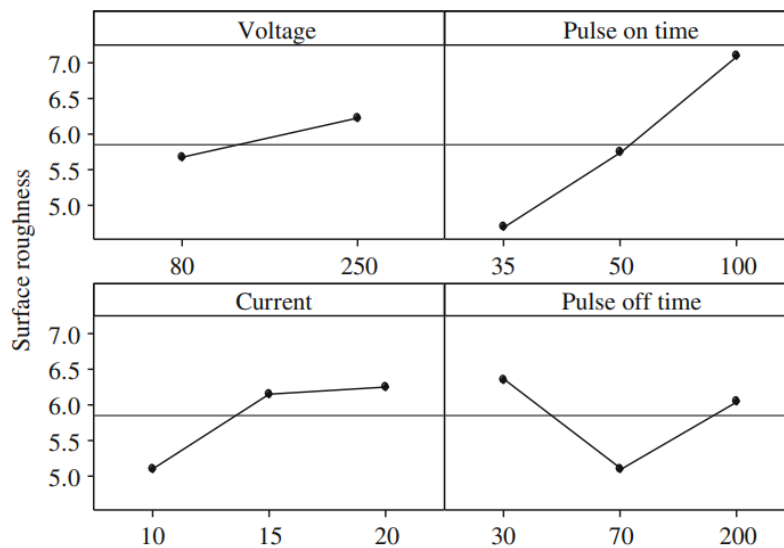


Figure 4. Graph showing the effect of current and voltage on the metal removal rate (Daneshmand et al., 2017).

Theisen and Schuermann (W. Theisen & A. Schuermann, 2004), examined the average surface roughness, molten zone thickness and metal removal rate in EDM machining of NiTi SMA. Researchers stated that there are cavities, cracks and precipitations in the microstructure of the melting zone during EDM processing (Figure 5), cracks form on the surface as a result of random and locally overlapping thermal shocks, and the cracks start from the surface and grow vertically into the sample. They found that the metal removal rate increased approximately linearly with the discharge energy, while the molten zone thickness increased with the operating current and decreased with the frequency. They reported that the average surface roughness tended to increase with the operating current.

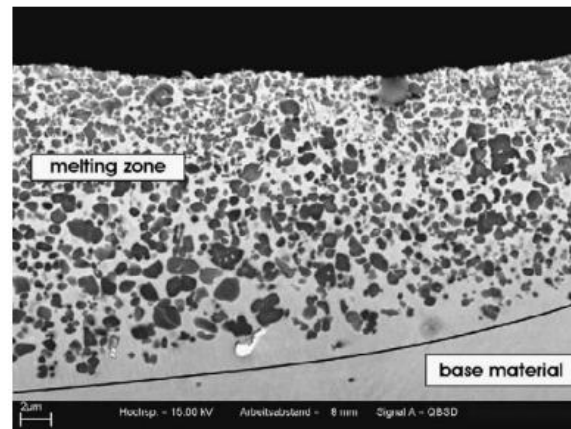


Figure 5. Image of TiC precipitates in the melting zone of the processed NiTi alloy (W. Theisen & A. Schuermann, 2004).

Gaikwad and Jatti (Gaikwad & Jatti, 2016), investigated the process parameter optimization of the electro discharge machining method to enhance the metal removal rate during the NiTi SMA machining process. They conducted the trials using the L36 orthogonal array proposed by Taguchi. They concluded from their investigation that the metal removal rate is significantly influenced by the workpiece's electrical conductivity, gap current, and pulse open time. The best metal removal rate was found to be 7.08 mm³/min at workpiece electrical conductivity of 4219 S/m, gap current of 16 A, and pulse open time of 38 μs.

Chen et al. (Chen, Hsieh, Lin, Lin, & Huang, 2007), studied the effect of processing parameters on TiNiCr and TiNiZr ternary SMAs using the electro discharge machining method. In the experiments, Ti₅₀Ni_{49.5}Cr_{0.5} and Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr₁₅ alloys produced by the conventional tungsten arc melting technique were used as workpieces. Researchers have stated that TiNiCr and TiNiZr alloys in the EDM process show an inverse relationship to the melting temperature and thermal conductivity of the alloy. The average surface roughness of EDM processed TiNiX alloys obeys the empirical equation $R_a = \beta(IP \times \tau_P)^\alpha$; the TiNiCr alloy with a low $T_0 \times K_T$ value obtains larger average surface roughness values than the TiNiZr alloy after EDM, TiNiX SMAs are produced by EDM. They stated that in order to be able to process precisely, low discharge current I_P and short pulse duration τ_P should be selected. For EDM processed TiNiX alloys, the hardening effect near the outer surface is due to the melting and re-solidifying layer, the impact duration varies depending on the layer thickness, and minimum values are selected for the maximum metal removal rate.

Soni et al. (Soni, Sannayellappa, & Rangarasaiah, 2017), examined the effects of machining parameters on the average surface roughness, metal removal rate, microstructure, melting and solidifying layer thickness and microhardness of Ti₅₀Ni₄₀Co₁₀ SMA during EDM machining. As a result of their experiments, the researchers found that pulse on time, pulse off time and servo voltage were the most effective process

parameters on average surface roughness and metal removal rate; they found that the average surface roughness and metal removal rate increased with increasing pulse on time, but decreased with increasing pulse off time and servo voltage. They stated that at a high pulse on time of 125 μ s and low servo voltage of 20 V, the formation of microcracks, microdroplets and microvoids was greater, and therefore the quality of the machined surface deteriorated. They observed that the melted and solidified layer thickness was higher at 125 μ s pulse on time and 20 V low servo voltage. Abidi et al. (Abidi et al., 2017), reported that circularity errors could be reduced and good surface quality could be achieved in machining NiTi SMAs with optimized EDM parameters. Jatti and Singh (Jatti & Singh, 2014), touched upon the points where electrical conductivity is important in the processing of NiTi SMAs using the EDM process. In their study, they increased the electrical conductivity of the workpiece by around 29% through cryogenic processes, ensuring that the thermal vibration of the atoms in the metal was weaker. They aimed to facilitate the movement of electrons on their path with these vibrations. As a result, they reported significant increases in the metal removal rate.

In addition to achieving good surface quality and low circularity error, the electro discharge machining process can result in the formation of a thick white layer on the surface of NiTi SMAs (W Theisen & A Schuermann, 2004).

Studies on Processing Smart Materials with Laser Method

Laser machining is an unconventional manufacturing method that uses thermal energy based on a high-energy beam, removing material from the workpiece's surface by melting and evaporation (Krishna, Bose, & Bandyopadhyay, 2007). As a result of processing, a thermally affected zone under the surface and, accordingly, a residual tensile stress occurs. Due to the progression of the laser beam on the workpiece, machining lines, high surface roughness and burr formation are observed on the machined surfaces. The main disadvantage of laser processing is the reshaping of the surface layer resulting from the thermal nature of the process, microstructural changes such as the heat-affected zone, localized cracks and contamination. All these defects can generally lead to loss of material properties and reduction of geometric quality near the kerf. For this reason, studies investigating the effects of processing conditions on the surface integrity of NiTi alloys using laser processing methods are of great importance (Mehrpooya, Gisario, & Elahinia, 2018; Saedi et al., 2018).

Fu et al. (C. H. Fu, Guo, & Sealy, 2014), they developed a three-dimensional finite element model of the temperature distribution, stress formation and heat-affected zone formation in the laser pulse cutting process of NiTi SMA. They used ABAQUS/Standard software for modeling studies. In addition, they included a material subprogram they created with DFLUX software in the model to model the superelasticity and shape memory feature of the SMA. They stated that after the modeling studies, the characteristics of the notch width and taper were predicted and that they were in acceptable agreement with the experimental data. They stated that the kerf width can be

narrowed by increasing the cutting speed and decreasing the maximum power, and on the other hand, the taper can be reduced by increasing the cutting speed and maximum power. They stated that high cutting speed and low maximum power not only cause an excessive temperature change near the material subsurface, but also shift the maximum effective stress from the top surface to the subsurface. Pulse width only affects stress distribution near the subsurface. They concluded that laser cutting speed is a more effective factor on the heat-affected zone thickness than pulse power and pulse width (Figure 6).

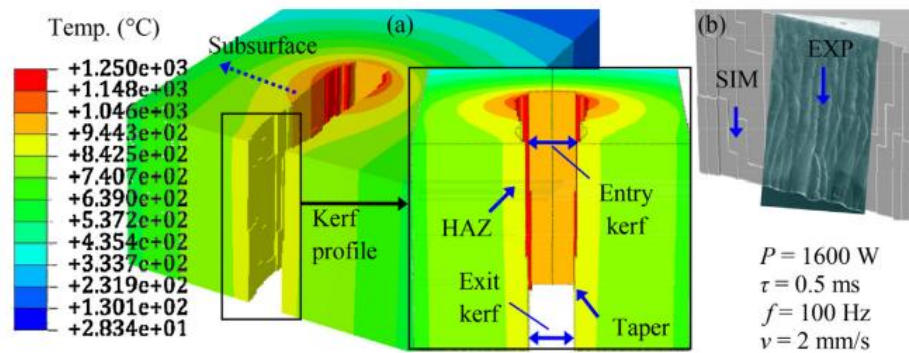


Figure 6. (a) An image of the model of the notch formed during laser cutting, (b) Images of the laser-cut surfaces predicted by modeling and measured after the experiment (C. H. Fu et al., 2014).

Pfeifer et al. (Pfeifer, Herzog, Hustedt, & Barcikowski, 2010), investigated the cutting of 1 mm thick NiTi SMA used for medical applications with a pulsed Nd:YAG laser and the effects of pulse energy, pulse width, cutting speed and overlapping of the laser spot during cutting on the cutting geometry, roughness and heat-affected zone (Figure 7). They achieved sufficient cutting quality ($R_z = 10\text{-}30\text{ }\mu\text{m}$) for short and ultra-short laser processing of SMA using high cutting speeds ($v=2\text{-}12\text{ mm/s}$). They stated that the heat-affected zone was small due to regional energy input and shape memory properties continued.

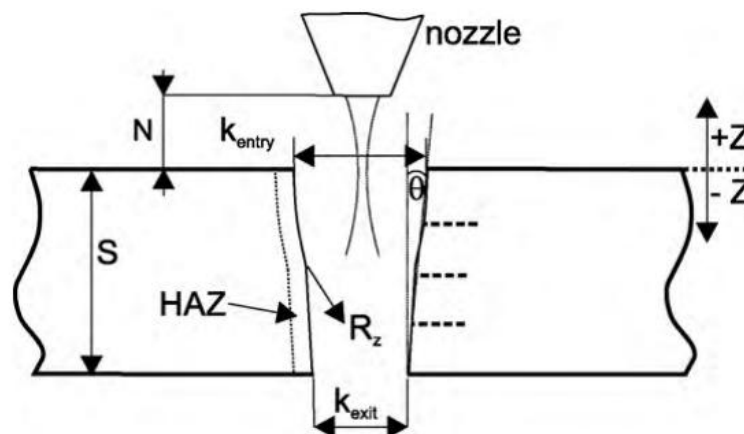


Figure 7. Schematic illustration showing various laser cutting quality features: k_{input} : kerf entry (top) width, k_{output} : kerf exit (bottom) width, Z : focus position, N : nozzle distance, θ : taper angle, HAZ: heat affected zone, R_z : surface roughness, S : material thickness (Pfeifer et al., 2010).

Fu et al. (C. H. Fu, Liu, Guo, & Zhao, 2016), compared the average surface roughness and hardness properties of the white layer (resolidified layer) formed during laser cutting and EDM cutting processes of Ni_{50.8}Ti_{49.2} SMA. In laser cutting tests, two different laser powers, low energy (600 W) and high energy (1200 W), constant cutting speed (200 mm/tooth), pulse width (0.75 ms) and frequency (100 Hz) were used as processing parameters. In EDM cutting tests, two different discharge voltages (42 and 57 V), pulse interval time (1 and 8 μ s), electrode advance rate (3.3 and 6.6 mm/tooth), pulse frequency (8 and 12 kHz) were used as processing parameters. They used constant power density (6) and wire movement speed (12 mm/tooth). Researchers stated that the white layer formed during laser cutting is distributed more uniformly on the surface than that obtained with EDM. They observed that while laser cutting resulted in an average surface roughness of approximately 7 μ m on the white layer, this value decreased to approximately 1 μ m with EDM. They stated that while the hardness of the white layer obtained during laser cutting was lower than that of the unprocessed sample, this hardness was higher in EDM processing. Fu et al. (C. Fu, Liu, & Guo, 2015), in their study titled "Surface Integrity Characteristics of Nitinol Vascular Stents with Fiber Laser Cutting," used a high beam quality fiber laser cutting process to process Ni_{50.8}Ti_{49.2} SMA and determined the notch geometry, surface roughness, microstructure and hardness. As a result of their experiments, the researchers stated that a narrow (notch width $\sim$ 100 μ m) and uniform notch (taper angle $\sim$ 0.1°) were obtained due to the special beam quality of the fiber laser. They found that a non-uniform resolidification layer formed on the laser cutting surface and the hardness of this layer was lower than that of the untreated alloy. Researchers observed that cutting speed increases the average surface roughness. They reported that the smallest average surface roughness (4 μ m) was obtained at medium cutting speed and the highest laser power. When the effect of cutting speed on the microstructure of NiTi SMA was examined, they stated that increasing cutting speed caused the formation of a re-solidified layer.

Studies On Processing Of Smart Materials Using Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Method

The wire erosion method has a wide range of applications in industrial applications because it has many advantages over traditional cutting methods. Cutting conductive materials to precise dimensions by means of a wire charged with high-intensity electric current is called wire erosion cutting. The cutting process is based on the principle of removing particles as a result of the partial melting of the metal caused by the heat generated by the electrical discharge that occurs when the electrode attached to different electrical poles is brought closer to the part to be cut. The removal of particles depends on the amount of energy in each spark and the elapsed time of each spark. Processing of

SMA by wire erosion causes some surface defects such as reshaping of the surface layer, air bubbles, molten droplets, debris and microcracks, resulting in a decrease in surface quality and therefore an increase in the resulting surface roughness.

For this reason, studies investigating the effects of machining conditions on the surface integrity of NiTi alloys using wire erosion machining methods are of great importance (Bisaria & Shandilya, 2019; Majumder & Maity, 2018). Bisaria and Shandilya (Himanshu & Pragma, 2018), examined the effects of processing parameters on wire wear and dimensional deviation rates in wire erosion processing of NiTi SMA. Researchers' experimental studies were carried out at five different pulse duration (18, 20, 22, 24, 26 μ s), pulse interval times (48, 49, 50, 51, 52 μ s) and current (160, 170, 180, 190, 200 A) values. Machining operations were carried out on a four-axis computer numerically controlled (CNC) wire erosion bench using a Ni55.7Ti SHA sample, rich in Ni and measuring 10x10x6 mm. The dimensional deviation value was measured with the "Mitutoyo" digital micrometer device. As a result of experimental studies, it was stated that by increasing the pulse duration (18 $\rightarrow$ 26 μ s) and current (160 $\rightarrow$ 200 A) values, electrode wear rate values increased by 52% and 100%, and dimensional deviation values increased by 14% and 14.3% (Figure 8). It was also stated that by increasing the pulse interval time to (48 $\rightarrow$ 52 μ s), electrode wear rate and dimensional deviation values decreased by 58% and 12.5% [53].

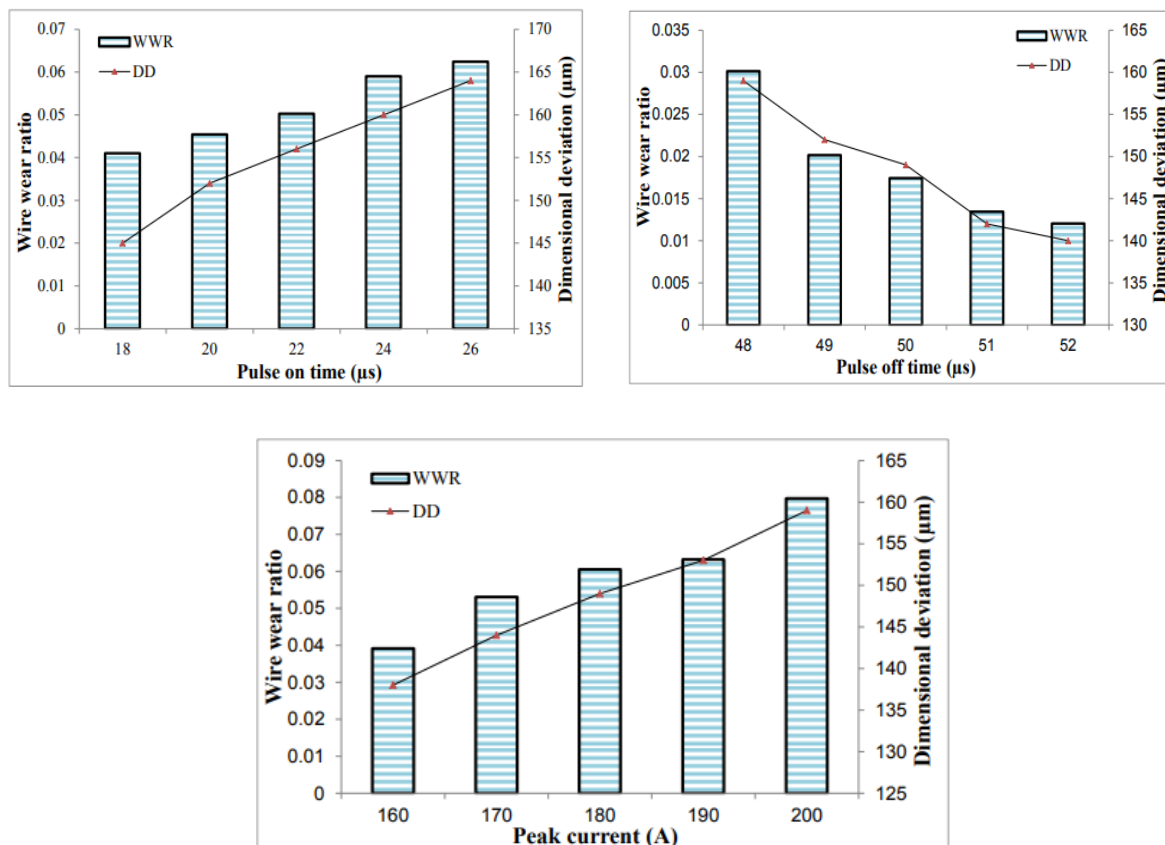


Figure 8. Electrode wear rate and dimensional deviation rate values obtained at different machining parameter values (Himanshu & Pragma, 2018).

Abhinaba and Roy (Roy & Narendranath, 2018), examined the effect of wire erosion cutting parameters of TiNiCu alloys on kerf width, the thickness of the rejoined layer and microhardness values of the cut surfaces. They stated that the optimum value for obtaining low kerf width, where the kerf width decreases with the increase in servo voltage, is 60 volts. In the study, they stated that the thickness of the resolidified layer increased with the increase of pulse interval time. They also stated that the hardness values of the cut surfaces increased due to the presence of oxides formed on the surface due to higher energy discharge processing, and the surface hardness of the cut samples was considerably higher (560 HV) than the untreated samples due to the nickel-rich phases γ -CuTi precipitate phases formed as a result of phase transformations. It has been reported that the most effective parameter on the hardness values is the pulse interval time, and the servo voltage duration is a minor factor, but the effect of other parameters is negligible. Soni, Narendranath and Ramesh (Soni & MR, 2018), in their study on the wire erosion cutting parameters of TiNiCo SMAs, stated that in the case of processing these alloys with traditional methods, losses in their properties may occur, in addition to low surface quality being obtained and that wire erosion or water jet shaping in these alloys may cause losses in their properties. They stated that it was more suitable. In their study, they examined the effects of Ti50Ni45Co5 alloy on microstructure, surface topography, microhardness, XRD analysis and residual stresses depending on wire erosion parameters and used the Taguchi method. They determined that the process parameters for optimum surface roughness were pulse duration 125 μ s, pulse interval time 35 μ s and servo voltage 40 V. They stated that higher hardness values occurred under the resolidified region and the presence of TiNiO₃ and TiO₂ oxide formations in this region. They also stated that there were residual stresses on the cut surfaces.

During wire erosion machining of NiTi SMAs, Kulkarni et al.(Vinayak N. Kulkarni, Gaitonde, Hadimani, & Aiholi, 2018), he studied how machining settings affected the average surface roughness and metal removal rate. The researchers concluded from their trials that the two main determinants lowering average surface roughness were pulse on time and voltage, which also enhanced the rate of metal removal. According to their findings, the average surface roughness rose as the pulse on time grew and dropped as the voltage and pulse off time increased. According to their findings, the metal removal rate rose as the pulse open time grew and fell as the pulse closed time increased. They came to the conclusion that although the metal removal rate rose when the voltage was raised to 40 V, it decreased as the voltage was raised further. Kulkarni et al.(Vinayak N. Kulkarni, Gaitonde, Aiholi, & Hadimani, 2018) optimized the machining parameters to increase the metal removal rate and reduce the average surface roughness during wire erosion machining of Ni_{55.74}Ti_{44.26} SMA. They performed multiple performance characteristic optimizations using the Taguchi technique and quality loss function. In the cutting tests, a brass wire electrode was used as a tool, three different wire feed rates (4, 6 and 8 mm/tooth), pulse on time (105, 115, 125 μ s), pulse off time (25, 40 and 40 mm) were used as processing parameters. 55 μ s) and voltage (20, 40 and 60 V). Researchers determined that the optimum parameters to obtain the highest metal removal rate and

the smallest average surface roughness are 115 μs pulse on time, 25 μs pulse off time, 6 mm/wire feed rate and 40 V voltage. They stated that the wire feed rate is the most important parameter affecting the average surface roughness and metal removal rate. Manjaiah et al. (Manjaiah, Narendranath, Basavarajappa, & Gaitonde, 2015), evaluated the surface roughness results obtained when the SMA $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{Cu}_x$ workpiece material was processed with different types of electrodes. They found that the surface roughness values obtained when processing with zinc-coated wire were lower than the surface roughness values obtained with brass wire. They also investigated the effect of machining parameters on surface roughness. Based on the results obtained, they found that the surface roughness worsened as the pulse duration increased. Liu et al. (Liu, Li, & Guo, 2014), conducted a study on the surface roughness resulting from the processing of SMAs by wire electro-erosion.

Studies on the Processing of Smart Materials with Other Unconventional Manufacturing Methods

Apart from the methods described, there are many different unconventional manufacturing methods depending on the materials used and the desired properties. Each method has advantages and disadvantages over the other. Determining the correct method depends on machining outputs such as material type and properties, desired dimensions and tolerances. Related research using other unconventional manufacturing methods of smart materials is given below.

Ma et al. (Liu et al., 2014), used the ultrasonic nano-crystal surface modification method to reduce the Ni ion release in NiTi samples produced by the selective laser melting method. The researchers found that the ultrasonic nano-crystal surface modification method significantly improved the surface quality thanks to simultaneous ultrasonic pulses and polishing. They stated that it can heal and reduce surface porosity. The average surface roughness was reduced from 12.1 μm to 9.0 μm , and the subsurface porosity ratio was obtained as 11:1 for before and after ultrasonic treatment. They also stated that the ultrasonic nano-crystal surface modification method causes plastic strain and thus hardening of the surface layer. A surface layer with a thickness of 125 μm and a hardness increase of 34.2% was obtained. They stated that these changes provided high wear and corrosion resistance. The corrosion current decreased from 157 nA to 53 nA. The wear volume decreased from 92137 μm^3 to 64011 μm^3 in 6000 cycles. Shiva et al. (Shiva, Palani, Mishra, Paul, & Kukreja, 2015), produced ring-shaped NiTi SMA in three different compositions (45%Ni-55%Ti; 50%Ni-50%Ti; 55%Ni-45%Ti) by laser-based additive manufacturing method using Ni and Ti powders. Researchers stated that SMA can be produced by laser-based additive manufacturing process, and the properties of Ni₅₀Ti₅₀ alloy produced by laser-based additive manufacturing method are close to the properties of conventionally produced NiTi alloy.

Lee and Shin (Lee & Shin, 2011), examined the application of electrochemical polishing in the processing of NiTi SMA. They examined the effect of each parameter on

the machined surface quality and determined the most suitable electrochemical processing condition for NiTi alloy. In their comparison of the use of acidic and neutral electrodes, the researchers stated that electrochemical machining with the neutral electrode caused the formation of many ultra-microscopic holes on the NiTi material surface, but the process was fast and therefore the neutral electrode was suitable when the chip removal was of primary importance. They stated that electrochemical machining with an acidic electrode is suitable for slow machining and can be preferred for precision machining. They stated that the surface roughness is generally better when a high current is applied, but the machining process becomes unstable when excessive current is applied. They stated that the surface roughness is generally better if the inter-electrode gap is small, but using an excessively close inter-electrode gap causes uneven machining, which results in the formation of bubble marks on the NiTi alloy. They stated that they reduced the surface roughness of a NiTi alloy with 1 μm roughness to 0.31 μm with an acid electrode, 18 A current, 800 μs /200 μs pulse on/off time, 0.5 mm inter-electrode gap distance and 300 seconds processing time.

Zhu et al. (Zhu et al., 2020), investigated corrosion forms that could result in allergy and poisoning in humans in their investigation of the surface modification features of NiTi SMAs processed with micro EDM utilizing a concentration of titanium carbide (TiC) powder. The objective of the study was to examine how the concentration of TiC powder and the parameters of the EDM processing affect the surface characteristics and processing of NiTi SMA. They found that the rate of metal removal, the roughness of the surface, and the thickness of the layers that formed after processing all increased with hitting time. According to the researchers, the addition of TiC powder increased the frequency of electro-discharges and the rate at which material was removed, as well as decreased surface roughness. The lowest surface roughness and greatest metal removal rate were seen at a mixed powder concentration of 5 g/L. They also discovered that, as a result of metallurgical bonding, the newly created layer on the surface following milling had strong adhesion and high hardness. The machined surface's microhardness increased from 258.5 HV to 438.7 HV after processing, according to XRD analyses, and the surface contained phases of copper dioxide (CuO_2), titanium dioxide (TiO_2), and TiC. These findings may be helpful for wear resistance in biomedical orthodontic applications. Jamaluddin et al. (Jamaluddin, Tan, Hamidon, Mansor, & Azmi, 2021), in their study titled "Electrical discharge coating of NiTi alloy in the deionized liquid environment," examined the developability of the titanium oxide layer on the NiTi alloy surface by electro-erosion coating. They aimed to improve the biocompatibility of the NiTi alloy and to minimize the harmful effects of the Ni ions in the alloy on the human body. They determined that high-level voltage provides titanium oxide structure on the surface of NiTi alloy. Researchers also found that polarity and voltage show a significant effect on average surface roughness. They stated that the spark energy increased as a result of the interaction between high voltage and polarity, and this caused the formation of deep and wide craters on the machined surfaces.

Rasheed et al.(Rasheed et al., 2012), carried out experimental studies to determine the optimum processing parameters for micro-EDM machining of NiTi SMAs. In their study, they examined the effects of capacitance and voltage parameters on the metal removal rate, electrode wear rate and average surface roughness value. Using Ni_{55.8}Ti_{44.2} superelastic SMAs in their experimental studies, the researchers planned to examine different capacitance (155, 475 pF) and voltage (80, 100 V) values during the machining processes. Researchers carried out machining operations in deionized liquid with a brass electrode in the form of a cylindrical rod at the capacitance and voltage parameters determined according to the Taguchi L24 orthogonal array. As a result of the experimental studies, the maximum metal removal rate in metal removal operations using brass electrodes is (0.000953832 mm³/min); they found that it performed at high capacitance (475 pF) and voltage (100 V) values.

Conclusions

In this study, the research done to date on the processing of smart materials with unconventional manufacturing methods has been evaluated. The results obtained as a result of the examination and evaluations are summarized below.

- In recent years, NiTi SMAs have been used in fields such as automotive, aerospace, biomedical and medicine due to their important properties such as shape memory effect, superelasticity, high corrosion resistance, fatigue life and biocompatibility. In addition to their superior mechanical properties, their low thermal conductivity causes high stresses and electrode wear rate on the material surface during processing. For this reason, unconventional manufacturing methods are often preferred in the processing of NiTi SMAs. Advanced non-traditional manufacturing methods based on thermal, mechanical energy and electrochemical; it supports corrosion, material deterioration, irregular surfaces and, as a result, the formation of a quality surface form. Scientific studies related to machinability in the literature; it is seen that it is aimed at determining the maximum metal removal rate, minimum electrode wear rate and average surface roughness values.
- The studies carried out were generally aimed at improving the machinability feature. In addition, it is seen that the studies carried out in recent years are on the development of systems used in unconventional manufacturing methods, optimizing the parameters affecting processing efficiency and modeling machinability indicators such as surface roughness and processing speed. In these studies, mostly Taguchi method experimental design and analysis techniques were widely used and the effective parameters in the processing method were determined by analysis of variance. Current studies have revealed that the surface quality and the protective oxide layer formed on the surface have a significant impact potential in terms of improving corrosion resistance and increasing fatigue life. It was concluded that the data obtained revealed important results showing

that the unconventional manufacturing method is preferable in the processing of SMAs.

- The subject of SMA has been the subject of many researchers from the past to the present. Many studies have been done in this field. This study and future studies will help us gain more information about SMAs and will enable new discoveries to be made to the advantage of technology and humanity.

ABBREVIATIONS

SMA	: Shape memory alloy
NiTi	: Nickel-titanium
TiNiZr	: Titanium nickel zirconium
NiAlFe	: Nickel aluminum iron
FeMnSi	: Iron manganese silicon
FeMnSiCr	: Iron manganese silicon chromium
NiMnGa	: Nickel manganese gallium
EDM	: Electro-discharge machining
AWJ	: Abrasive water jet
WJ	: Water jet
WEDM	: Wire erosion machining
CNC	: Computer numerically controlled

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The author acknowledge that there is no known conflict of interest or common interest with any institution/organization or person.

REFERENCES

- Abidi, M. H., Al-Ahmari, A. M., Siddiquee, A. N., Mian, S. H., Mohammed, M. K., & Rasheed, M. S. (2017). An investigation of the micro-electrical discharge machining of nickel-titanium shape memory alloy using grey relations coupled with principal component analysis. *Metals*, 7(11), 486.
- Acar, E., Saedi, S., & Karaca, H. E. (2023). Experimental Analysis of Ultra-High Strength NiTiHfPd Shape Memory Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-7.
- Al-Ahmari, A., Rasheed, M. S., Mohammed, M. K., & Saleh, T. (2016). A hybrid machining process combining micro-EDM and laser beam machining of nickel-titanium-based shape memory alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(4), 447-455.

- Alagha, A. N., Hussain, S., & Zaki, W. (2021). Additive manufacturing of shape memory alloys: A review with emphasis on powder bed systems. *Materials & Design*, 204, 109654.
- Altas, E., Altin Karatas, M., Gokkaya, H., & Akinay, Y. (2021). Surface Integrity of NiTi Shape Memory Alloy in Milling with Cryogenic Heat Treated Cutting Tools under Different Cutting Conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*. doi:10.1007/s11665-021-06095-3
- Altas, E., Erkan, O., Ozkan, D., & Gokkaya, H. (2022). Optimization of Cutting Conditions, Parameters, and Cryogenic Heat Treatment for Surface Roughness in Milling of NiTi Shape Memory Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-13.
- Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M. A., & Ozkan, D. (2020). Analysis of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi Method in Milling of NiTi Shape Memory Alloy with Uncoated Tools. *Coatings*, 10(12), 1259.
- Altas, E., Khosravi, F., Gokkaya, H., Maleki, V. A., Akinay, Y., Ozdemir, O., . . . Kandas, H. (2022). Finite element simulation and experimental investigation on the effect of temperature on pseudoelastic behavior of perforated Ni-Ti shape memory alloy strips. *Smart Materials and Structures*, 31(2), 025031.
- Bahl, S., Nagar, H., Singh, I., & Sehgal, S. (2020). Smart materials types, properties and applications: a review. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1302-1306.
- Bisaria, H., & Shandilya, P. (2019). Processing of curved profiles on Ni-rich nickel-titanium shape memory alloy by WEDM. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(12), 1333-1341.
- Chaudhari, R., Vora, J. J., Mani Prabu, S., Palani, I., Patel, V. K., Parikh, D., & de Lacalle, L. N. L. (2019). Multi-response optimization of WEDM process parameters for machining of superelastic nitinol shape-memory alloy using a heat-transfer search algorithm. *Materials*, 12(8), 1277.
- Chen, S. L., Hsieh, S. F., Lin, H. C., Lin, M. H., & Huang, J. S. (2007). Electrical discharge machining of TiNiCr and TiNiZr ternary shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 445-446, 486-492. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.109>
- Cismasiu, C. (2010). *Shape memory alloys*: BoD-Books on Demand.
- Costanza, G., & Tata, M. E. (2020). Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. *Materials*, 13(8), 1856.
- Daneshmand, S., Monfared, V., & Lotfi Neyestanak, A. A. (2017). Effect of Tool Rotational and Al2O3 Powder in Electro Discharge Machining Characteristics of NiTi-60 Shape Memory Alloy. *Silicon*, 9(2), 273-283. doi:10.1007/s12633-016-9412-1
- Demers, V., Brailovski, V., Prokoshkin, S., & Inaekyan, K. (2009). Optimization of the cold rolling processing for continuous manufacturing of nanostructured Ti-Ni shape memory alloys. *Journal of materials processing Technology*, 209(6), 3096-3105.
- Dezfuli, F. H., & Alam, M. S. (2013). Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing. *Smart Materials and Structures*, 22(4), 045013.
- Elahinia, M. H., Hashemi, M., Tabesh, M., & Bhaduri, S. B. (2012). Manufacturing and processing of NiTi implants: A review. *Progress in materials science*, 57(5), 911-946.
- Frotscher, M., Kahleyss, F., Simon, T., Biermann, D., & Eggeler, G. (2011). Achieving small structures in thin NiTi sheets for medical applications with water jet and micro machining: a comparison. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20, 776-782.
- Fu, C., Liu, J., & Guo, A. (2015). Statistical characteristics of surface integrity by fiber laser cutting of Nitinol vascular stents. *Applied Surface Science*, 353, 291-299.
- Fu, C. H., Guo, Y. B., & Sealy, M. P. (2014). A predictive model and validation of laser cutting of nitinol with a novel moving volumetric pulsed heat flux. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2926-2934. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.010>
- Fu, C. H., Liu, J. F., Guo, Y. B., & Zhao, Q. Z. (2016). A Comparative Study on White Layer Properties by Laser Cutting vs. Electrical Discharge Machining of Nitinol Shape Memory Alloy. *Procedia CIRP*, 42(Supplement C), 246-251. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.280>
- Gaikwad, V., & Jatti, V. S. (2016). Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.04.003>
- Guo, Y., Klink, A., Fu, C., & Snyder, J. (2013). Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. *CIRP Annals*, 62(1), 83-86.
- Himanshu, B., & Pragya, S. (2018). Experimental study on Response Parameters of Ni-rich NiTi Shape Memory Alloy during Wire Electric Discharge Machining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330(1), 1-6.
- Jamaluddin, R., Tan, C. L., Hamidon, R., Mansor, A. F., & Azmi, A. I. (2021). Electrical discharge coating of NiTi alloy in deionized water. *Materials Today: Proceedings*, 41, 109-115.

- Jatti, V. S., & Singh, T. (2014). Effect of deep cryogenic treatment on machinability of NiTi shape memory alloys in electro discharge machining. *Applied Mechanics and Materials*, 592, 197-201.
- Kong, M., & Axinte, D. (2012). Capability of advanced abrasive waterjet machining and its applications. *Applied Mechanics and Materials*, 110, 1674-1682.
- Kong, M., Axinte, D., & Voice, W. (2011). Challenges in using waterjet machining of NiTi shape memory alloys: An analysis of controlled-depth milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 959-971.
- Kong, M. C., Srinivasu, D., Axinte, D., Voice, W., McGourlay, J., & Hon, B. (2013). On geometrical accuracy and integrity of surfaces in multi-mode abrasive waterjet machining of NiTi shape memory alloys. *CIRP Annals*, 62(1), 555-558.
- Krishna, B. V., Bose, S., & Bandyopadhyay, A. (2007). Laser processing of net-shape NiTi shape memory alloy. *Metallurgical and Materials transactions A*, 38, 1096-1103.
- Kulkarni, V. N., Gaitonde, V., Karnik, S., Manjaiah, M., & Davim, J. P. (2020). Machinability analysis and optimization in wire EDM of medical grade NiTiNOL memory alloy. *Materials*, 13(9), 2184.
- Kulkarni, V. N., Gaitonde, V. N., Aiholi, V., & Hadimani, V. (2018). Multi Performance Characteristics Optimization in Wire Electric Discharge Machining of Nitinol Superelastic Alloy. *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 3), 18857-18866. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.233>
- Kulkarni, V. N., Gaitonde, V. N., Hadimani, V., & Aiholi, V. (2018). Analysis of Wire EDM Process Parameters in Machining of NiTi Superelastic Alloy. *Materials Today: Proceedings*, 5(9, Part 3), 19303-19312. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.289>
- Lee, E. S., & Shin, T. H. (2011). An evaluation of the machinability of nitinol shape memory alloy by electrochemical polishing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(4), 963. doi:10.1007/s12206-011-0209-2
- Liu, J., Li, L., & Guo, Y. (2014). Surface integrity evolution from main cut to finish trim cut in W-EDM of shape memory alloy. *Procedia CIRP*, 13, 137-142.
- Majumder, H., & Maity, K. (2018). Application of GRNN and multivariate hybrid approach to predict and optimize WEDM responses for Ni-Ti shape memory alloy. *Applied Soft Computing*, 70, 665-679.
- Manjaiah, M., Narendranath, S., Basavarajappa, S., & Gaitonde, V. (2014). Wire electric discharge machining characteristics of titanium nickel shape memory alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3201-3209.
- Manjaiah, M., Narendranath, S., Basavarajappa, S., & Gaitonde, V. (2015). Effect of electrode material in wire electro discharge machining characteristics of Ti50Ni50- xCu shape memory alloy. *Precision Engineering*, 41, 68-77.
- Mehrpouya, M., Gisario, A., & Elahinia, M. (2018). Laser welding of NiTi shape memory alloy: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 162-186.
- Mehta, K., Gupta, K., Mehta, K., & Gupta, K. (2019). Machining of shape memory alloys. *Fabrication and Processing of Shape Memory Alloys*, 9-37.
- Mohammed, M. K., & Al-Ahmari, A. (2020). Laser-machining of microchannels in NiTi-based shape-memory alloys: Experimental analysis and process optimization. *Materials*, 13(13), 2945.
- Obeidi, M. A., Monu, M., Hughes, C., Bourke, D., Dogu, M. N., Francis, J., . . . Brabazon, D. (2021). Laser beam powder bed fusion of nitinol shape memory alloy (SMA). *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 2554-2570.
- Pfeifer, R., Herzog, D., Hustedt, M., & Barcikowski, S. (2010). Pulsed Nd:YAG laser cutting of NiTi shape memory alloys—Influence of process parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(14), 1918-1925. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.004>
- Rasheed, M. S., Al-Ahmari, A., El-Tamimi, A., & Abidi, M. H. (2012). Analysis of influence of micro-EDM parameters on MRR, TWR and Ra in machining Ni-Ti shape memory alloy. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 1(4), 32-37.
- Rathi, P., Ghiya, R., Shah, H., Srivastava, P., Patel, S., Chaudhari, R., & Vora, J. (2020). Multi-response optimization of Ni55.8Ti shape memory alloy using taguchi-grey relational analysis approach. Paper presented at the Recent Advances in Mechanical Infrastructure: Proceedings of ICRAM 2019.
- Roy, A., & Narendranath, S. (2018). Impact of variation in wire electro discharge machining responses of homologous TiNiCu shape memory alloys for smart applications: An experimental investigation. *Materials Research Express*, 5(12), 125701.
- Saedi, S., Saghaian, S. E., Jahadakbar, A., Shayesteh Moghaddam, N., Taheri Andani, M., Saghaian, S. M., . . . Karaca, H. E. (2018). Shape memory response of porous NiTi shape memory alloys fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 29, 1-12.
- Seelecke, S., & Müller, I. (2004). Shape memory alloy actuators in smart structures: Modeling and simulation. *Appl. Mech. Rev.*, 57(1), 23-46.

- Shiva, S., Palani, I. A., Mishra, S. K., Paul, C. P., & Kukreja, L. M. (2015). Investigations on the influence of composition in the development of Ni-Ti shape memory alloy using laser based additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, 69(Supplement C), 44-51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.014>
- Soni, H., & MR, R. (2018). Experimental investigation on effects of wire electro discharge machining of Ti 50 Ni 45 Co 5 shape memory alloys. *Silicon*, 10, 2483-2490.
- Soni, H., Sannayellappa, N., & Rangarasaiah, R. M. (2017). An experimental study of influence of wire electro discharge machining parameters on surface integrity of TiNiCo shape memory alloy. *Journal of Materials Research*, 32(16), 3100-3108. doi:10.1557/jmr.2017.137
- Theisen, W., & Schuermann, A. (2004). Electro discharge machining of nickel-titanium shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 378(1), 200-204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.09.115>
- Velmurugan, C., Senthilkumar, V., Dinesh, S., & Arulkirubakaran, D. (2018). Machining of NiTi-shape memory alloys-A review. *Machining Science and Technology*, 22(3), 355-401.
- Vora, J., Jain, A., Sheth, M., Gajjar, K., Abhishek, K., & Chaudhari, R. (2022). A review on machining aspects of shape memory alloys. *Recent Advances in Mechanical Infrastructure: Proceedings of ICRAM 2021*, 449-458.
- Wang, J., & Jiang, C. (2008). Single-crystal growth of NiMnGa magnetic shape memory alloys. *Journal of crystal growth*, 310(4), 865-869.
- Zadafiya, K., Kumari, S., Chatterjee, S., & Abhishek, K. (2021). Recent trends in non-traditional machining of shape memory alloys (SMAs): A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 217-227.
- Zhu, Z., Guo, D., Xu, J., Lin, J., Lei, J., Xu, B., . . . Wang, X. (2020). Processing characteristics of micro electrical discharge machining for surface modification of TiNi shape memory alloys using a TiC powder dielectric. *Micromachines*, 11(11), 1018.

Derleme Makalesi

Akıllı Bina Konulu Lisansüstü Tezlerin Bibliyometrik Analizi

Beyza TEKELİOĞLU* , Esra KARABALIK** , Hevjin AKIN*** , Yusuf BERA SANLI**** , Tamer EREN***** 

*Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye. E-posta: beyzatekelioglu023@gmail.com

Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye. E-mail: beyzatekelioglu023@gmail.com

**Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye. E-posta: iesrakarabalik@gmail.com

Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye. E-mail: iesrakarabalik@gmail.com

***Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye. E-posta: hevjinakn@gmail.com

Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye. E-mail: hevjinakn@gmail.com

****Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye. E-posta: beraasanli@gmail.com

Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye. E-mail: beraasanli@gmail.com

*******Sorumlu yazar/Corresponding author**, Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye. E-posta: tamereren@gmail.com

Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, Türkiye. E-mail: tamereren@gmail.com

Atıf: Tekelioğlu, B., Karabalık, E., Akın, H., Sanlı, Y. B., & Eren, T. (2026). Bibliometric analysis of graduate theses on smart buildings. *JOSS*, 5(1), 66-90.

Makale Bilgisi	Özet
Makale Tarihçesi Geliş Tarihi: 01.12.2025 Kabul Tarihi: 20.05.2026 Yayımlanma Tarihi: 30.06.2026	Günümüzde artan nüfusla birlikte enerji ihtiyacı, iklim değişikliği ve kentsel sürdürülebilirlik gibi sorunlar ön plana çıkmış, bu durum akıllı bina ve akıllı şehir kavramlarının önemini artırmıştır. Akıllı şehirler, insanların karşılaştığı kentsel sorunlara yenilikçi çözümler üretmeyi ve yaşam kalitesini yükseltmeyi amaçlarken, bu hizmetlerin etkin şekilde sunulması bilgi ve iletişim teknolojilerinin entegrasyonunu zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda mimari ve teknolojik bir çözüm olarak ortaya çıkan “akıllı bina” kavramı üzerine yürütülen akademik çalışmalar da giderek artmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de akıllı bina konulu lisansüstü tezlerin bibliyometrik özelliklerini analitik bir yaklaşımla incelemektir. Araştırma kapsamında YÖKTEZ veri tabanında yayımlanan ve “akıllı bina” veya “smart building” terimlerini içeren 202 lisansüstü tez değerlendirilmiştir. Bulgular, tezlerin büyük çoğunluğunun yüksek lisans düzeyinde ve fen bilimleri enstitülerinde hazırlandığını, kurumsal olarak ise en fazla çalışmanın İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde yürütüldüğünü göstermektedir. Disipliner açıdan çalışmaların ağırlıklı olarak mimarlık alanında yoğunlaştığı tespit edilmiş olup, akıllı bina konusunun Türkiye’deki lisansüstü yazınında öncelikle mekânsal bir tasarım organizasyonu çerçevesinde ele alındığı sonucuna varılmıştır.
Anahtar Sözcükler Akıllı Bina, Akıllı Şehir, Enerji Verimliliği, Sürdürülebilirlik, Bibliyometri.	

BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF GRADUATE THESES ON SMART BUILDINGS

Article Information	Abstract
Article History <i>Received:</i> 01.12.2025 <i>Accepted:</i> 20.05.2026 <i>Published:</i> 30.06.2026	<i>With today's rapid population growth, issues such as energy demand, climate change, and urban sustainability have become highly critical, thereby increasing the significance of smart building and smart city concepts. While smart cities aim to provide innovative solutions to urban challenges and enhance the quality of life, the effective delivery of these services necessitates the integration of information and communication technologies. Consequently, academic research focusing on "smart buildings" as an architectural and technological solution has gained substantial momentum. The objective of this study is to analytically examine the bibliometric characteristics of graduate theses on smart buildings in Turkey. Within the scope of the research, a total of 202 graduate theses containing the terms "smart building" or "akıllı bina" indexed in the YÖKTEZ database were analyzed using bibliometric methods. The findings reveal that the vast majority of the theses were conducted at the master's level and within institutes of science, with Istanbul Technical University producing the highest number of studies. Furthermore, the research is predominantly concentrated in the field of architecture, indicating that the concept is primarily addressed as a spatial design and organizational phenomenon in the Turkish academic literature.</i>
Keywords Smart Building, Smart City, Energy Efficiency, Sustainability, Bibliometrics.	

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akıllı kent kavramı, hükümetler, şirketler, üniversiteler ve enstitüler de dahil olmak üzere dünya çapında ilgi görmüştür, ilk kez 1990'ların başında ortaya çıkmış ve araştırmacılar kentleşme sürecinde teknoloji, inovasyon ve küreselleşmeye vurgu yapmışlardır. Kavramın ilk net tanımlarından biri, Caragliu, Del Bo ve bilgi teknolojilerini bir araya getirerek ekonomik büyüme ve yaşam kalitesini artıran şehirler olarak Nijkamp tarafından yapılmış, akıllı kentleri insan sermayesini, sosyal sermayeyi ve tanımlamışlardır (Bakır & Öztürk, 2025).

Günümüz dünyasında yaşanan hızlı değişim ve gelişmeler, kentlerin de bu sürece uyum sağlayarak dönüşmesini zorunlu hâle getirmektedir. Bilgi ve iletişim teknolojilerinin etkisiyle şekillenen bu yeni kent yapısı; sürdürülebilirlik, yenilenebilirlik ve verimlilik gibi temel ilkelere dayanmaktadır. Bu doğrultuda, kaynakların akılcı biçimde kullanıldığı, insanı merkeze alan, çevresel duyarlılığı yüksek, sağlık, güvenlik ve konfor standartlarını karşılayan; kentsel sorunlara etkin ve mantıklı çözümler sunan modern yaşam alanlarının oluşturulması hedeflenmektedir. "Akıllı Kentler" olarak adlandırılan bu yeni kentsel model, tam da bu dönüşümün somut bir sonucu niteliğindedir (Akpınar & Atak, 2020).

Kentlerde yaşanan çeşitli problemlere çözüm bulmak ve daha yaşanabilir yaşam alanları ortaya koymak adına, şehirlerin bilişim teknolojilerini kapsamlı şekilde kullanan "akıllı" bir dönüşüm sürecine ihtiyaç duyulmuştur. Bu gereksinim doğrultusunda, gelişmiş

bilgi teknolojilerinin kentsel yapılarla bütünleşmesi sonucu “akıllı şehir” kavramı ortaya çıkmıştır (Akpınar & Atak, 2020).

Bu dönüşüm gereksinimi doğrultusunda; gelişmiş bilgi teknolojilerinden akıllı cihazlara, yenilikçi düşünce yaklaşımlarından akıllı binalara, güvenlikten teşhise, kaynak yönetiminden iletişim sistemlerine, finansal uygulamalardan altyapı çözümlerine ve ulaşım ağlarına kadar pek çok alanda “akıllı” sistemlerin geliştirilmesiyle daha akıllı bir dünyanın oluşturulması hedeflenmiştir. Günümüzde giderek daha fazla önem kazanan “Akıllı Şehir” uygulamaları, kentlerin karşılaştığı sorunlara çözüm üretmeyi ve şehirde yaşayan bireylerin yaşam standartlarını yükseltmeyi amaçlamakta olup, dünya genelinde birçok ülkede hızla hayata geçirilmeye çalışılmaktadır (Akpınar & Atak, 2020).

Akıllı şehir gelişiminin arkasındaki amaç, vatandaşlara, ekonomik faaliyetlere, kurumlara ve ayrıca ziyaretçilere nitelikli ve yenilikçi hizmetler sunmak ve güvenli, keyifli ve son derece kapsayıcı bir kentsel çevre üretmektir (Akpınar & Atak, 2020).

Akıllı şehirler; gelişmiş teknoloji sistemleri, veri odaklı analiz yöntemleri ve dijitalleşmiş kentsel hizmetlerden yararlanarak kentlerin daha verimli, sürdürülebilir ve çevre dostu bir yapıya kavuşmasını amaçlayan yapılardır (Koçar Uzan, 2024).

Günümüzde kentler, toplumun değişen gereksinimleri ve teknolojik ilerlemelerin etkisiyle dönüşüm geçirerek daha sürdürülebilir, etkin ve yaşama elverişli yapılar oluşturma yönünde ciddi bir gelişim göstermektedir (Koçar Uzan, 2024).

Bu çalışmada Akıllı Bina konusunda Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi (YÖKTEZ) veri tabanında bulunan çalışmalar göz önüne alınarak bibliyometrik analiz yapılmıştır. Mevcut literatürde akıllı şehirler ve binalar üzerine genel değerlendirmeler bulunmakla birlikte, Türkiye'deki lisansüstü çalışmaların disiplinler ve yapısal eğilimlerini inceleyen analitik bir çerçeveye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın amacı yalnızca betimsel bir veri sunmak değil, aynı zamanda aşağıdaki temel araştırma sorularına analitik yanıtlar aramaktır:

1. Türkiye'deki lisansüstü araştırmalarda akıllı bina kavramı hangi ana bilim dalları ve kurumsal yapılar etrafında kümelenmektedir ve bu disiplinler dağılımı, konunun Türkiye akademisinde salt bir teknolojik donanım meselesinden ziyade mekânsal bir tasarım problemi olarak algılandığını desteklemekte midir?

2. 1994-2025 yılları arasında akıllı bina araştırmalarının dönemsel üretim eğilimleri nasıldır ve özellikle dışsal krizlerin (pandemi, enerji krizleri vb.) bu alandaki ivmelenmeye etkisi nedir?
3. Gelecekteki araştırmalar için mevcut lisansüstü literatürdeki disiplinler boşluklar nelerdir? Çalışmanın devamında, ikinci bölümde literatür taraması ele alınmış, üçüncü bölümde araştırma yöntemine yer verilmiş, dördüncü bölümde elde edilen bulgular incelenmiş, beşinci bölümde sonuç kısmına yer verilmiştir.

LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Akıllı Bina (Smart Building)

Mordoğan (2000), teknolojik gelişmelerin konut sistemlerine etkisini ve bu süreçte ortaya çıkan Akıllı Konut (Intelligent Home) kavramını incelemiştir. Çalışma, konuta eklenen teknolojik sistemlerin getirdiği koordinasyonsuzluk ve yüksek elektrik yüklenmesi gibi sorunları analiz ederek, merkezi denetim sistemi ile enerji akışını optimize etmeyi hedefleyen akıllı konutun yeni tasarım süreçlerini gerektirdiğini vurgulamıştır.

Özler (2003), Akıllı binalarda enerji etkin tasarım parametreleri konusu ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, akıllı binalarda sürdürülebilirlik için kritik bir unsur olan enerji korunumu sağlamak üzere enerji etkin tasarım parametrelerini incelemektir. Araştırmada akıllı binaların teknoloji ile desteklenerek çevreye daha az zarar veren sistemler haline gelmesi vurgulanmış, enerji verimliliği ve çevre bilinci açısından mimari tasarımın önemi ortaya konulmuştur.

Mangan (2006), Akıllı binalarda alt sistem değerlendirmesinde İstanbul örneği adlı konu ele alınmıştır. Çalışmada İstanbul'da seçilen 20 akıllı binada anket uygulanarak pasif ve aktif bina alt sistemleri değerlendirilmiştir. Bulgular, akıllı binaların “akıllılık düzeyinin” gelişmiş elektromekanik sistemlerle sağlandığını göstermiştir. Çalışma, enerji ve maliyet etkinliğinin sağlanabilmesi için pasif ve aktif sistemlerin entegrasyonu, disiplinler arası çalışma ve kullanıcı kontrolünün önemine dikkat çekmektedir.

Oğuz (2007), Literatürdeki bu farklı yaklaşımlara rağmen, akıllı binaların verimlilik ve zeka seviyesini bütüncül olarak değerlendiren sistematik bir model eksikliği bulunmaktadır. Bu nedenle, mevcut modellerin bilgi teknolojileri perspektifinden elde edilen bulgularla sınırlı kalmasını ele alarak, mimari ve bilgi teknolojileri gerekliliklerini entegre eden yeni bir değerlendirme modeli geliştirmeyi hedeflemektedir.

Erkek (2017), artan şehir nüfusu ve kaynakların optimum kullanımı ihtiyacı karşısında, Akıllı Şehircilik anlayışını ve belediyelerin teknoloji destekli hizmetlerini incelemiştir. Çalışma, teknolojiyi etkin kullanan 'akıllı belediyelerin', ulaşım, altyapı ve enerji gibi yerel hizmetlerde minimum kaynak tüketimiyle maksimum fayda sağladığını vurgulamıştır.

Gunagwera (2017), çalışmasında akıllı binalarda bina içi ve akıllı yol bulma sistemlerini ele almış ve hibrit fingerprinting ile dead-reckoning yöntemlerini kullanarak düşük maliyetli, bağlama duyarlı bir kapalı alan navigasyon sistemi önermiştir; sistem, görme veya bedensel engelliler de dâhil tüm kullanıcılar için uygun rota ve dinamik yol gösterimi sağlamaktadır.

Varol (2017), Sürdürülebilir gelişme, nüfus, kaynak, çevre ve kalkınmanın dengeli yönetilmesini gerektirir ve akıllı kentler bu sürecin önemli araçlarındandır. Akıllı kentler, gelişmiş bilgi sistemleriyle vatandaşların dijital hizmetlere erişimini sağlayan bütünleşik kent yapılarıdır. Bu çalışma, Ankara örneği üzerinden Türkiye'deki akıllı kent uygulamalarını ve belediyelerin uygulama düzeyini analiz etmektedir

Açıksarı ve Karasu (2018), Akıllı camlar ve teknolojik gelişimleri konusunu ele almıştır. Akıllı bina teknolojilerinin bir bileşeni olan malzemeler üzerine yapılan bir derlemede, akıllı camların tarihçesini, türlerini ve kullanım alanlarını ele almıştır. Makale, bu görünümü değiştirilebilen camların binalar, araçlar ve tıbbi uygulamalar gibi çok çeşitli alanlarda kullanıldığını ve görme engellilerin hayatını kolaylaştırma potansiyelini vurgulamıştır.

Çalışma mekânlarının yeniden kurgulanması bağlamında, Göçer vd. (2018) Türkiye özelinde esnek çalışma mekânları, akıllı binalar ve çalışan memnuniyeti arasındaki ilişkiyi incelemiştir. İstanbul'da yer alan LEED sertifikalı bir binada anket ve görüşmelerle yapılan çalışma, mekânsal tasarım ve esnek düzenin çalışan memnuniyetine etkilerini değerlendirmiştir.

Sönmez ve Kıasf (2018), Çalışmada akıllı bina kavramı ve özellikle akıllı bina cepheleri ele alınmıştır. Cephelelerin doğru tasarım bileşenleriyle enerji verimliliği, konfor koşulları ve sürdürülebilirlik açısından kritik rol oynadığı vurgulanmış; fotovoltaik paneller, rüzgâr türbinleri, yeşil duvar teknolojileri ve su toplama sistemleri gibi uygulamaların çevresel, sosyal ve ekonomik katkılar sağlayabileceği ortaya konulmuştur.

Diğer yandan, gayrimenkul değerlemesi alanında yapılan bir çalışmada Baknaklı (2019), akıllı bina sistemlerinin taşınmaz değeri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma,

maliyet yöntemi ve saha görüşmeleri ile akıllı binaların maliyetlerine rağmen gayrimenkul değerini olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşmıştır.

Mevcut yapıların enerji verimliliğini artırmaya odaklanan projelerden biri olan Gürsel Dino vd. (2019), SİSER adında paydaş temelli akıllı bir retrofit ve karar verme sistemi geliştirmiştir. Çalışma, bilgisayarlı görü kullanarak otomatik enerji modellemesi yapmış ve paydaşların iş birliğiyle enerji tüketimini azaltan etkili iyileştirme planlaması yapılabileceğini göstermiştir.

Son dönem çalışmalardan bir diğeri ise Üstün (2020), imzasıyla yapay zekânın mimarlık alanındaki konumunu ve akıllı bina endüstrisine etkilerini mercek altına almıştır. Tez çalışması, akıllı binaların gelecekteki değerlendirme kriterlerini inceleyerek, bu yapıların sürdürülebilir, kullanıcı dostu ve yapay zekâ destekli teknik altyapıya sahip olması gerektiğini vurgulamıştır.

Sur (2020), akıllı konut teknolojilerinin mevcut yapıların yenilenmesi sürecine katkısını irdelenmiştir. Çalışma, BIM enerji analizleri ile mevcut yapıların akıllı sisteme geçişinin sürdürülebilirliği artırdığını ve EKB sınıfını yükselttiğini göstermiştir.

Karayılmaz ve Özker (2020), kentlerin yenilikçi altyapı çalışmalarına odaklanmış ve Akıllı Şehirler olgusunun küresel çapta bir değişim sürecindeki konumunu irdelenmiştir. Çalışmada, gelişmiş ülkelerdeki kamu-özel ortaklıkların sosyo-ekonomik refahı artırdığı belirtilirken, Türkiye’de henüz tam bir Akıllı Şehir uygulamasının olmadığı; bu kavramın kentsel dönüşüm projelerinde yer bulmasının hedeflendiği sonucuna varılmıştır.

Kent düzeyinde sürdürülebilirlik çalışmaları incelendiğinde, Cömertler ve Cömertler (2021), akıllı kent teknolojilerini sürdürülebilirliğin bir aracı olarak kullanan Kopenhag örneğini analiz etmiştir. Araştırma, uygulanan akıllı çözümlerin çevresel, sosyal ve ekonomik faydalar yaratarak kentin sürdürülebilirlik dengesini sağladığını ortaya koymuştur.

Sinoplu ve Ceyhan (2023), Akıllı binalarda yapay zekâ destekli enerji yönetimi konusunu ele almıştır. Çalışmada akıllı binalarda yapay zekâ destekli enerji yönetimi üzerine literatürde yer alan 32 çalışma incelenmiştir. Veri tabanlarından elde edilen araştırmalar tablolastırılarak amaç, yöntem ve sınırlılıklar açısından değerlendirilmiş; çoğu çalışmanın elektrik enerjisi yönetimine odaklandığı ve büyük oranda Hindistan’da gerçekleştirildiği görülmüştür.

Şahin ve Yılmaz (2019), Kentsel alanlar sürekli sosyo-ekonomik değişim içindedir ve hızlı kentleşme birçok sorunu beraberinde getirir; teknoloji, sürdürülebilirlik ve yaşam

kalitesini artırmak için akıllı kentlerde kullanılır. Akıllı kentlerde insan, ekonomi, çevre, yönetim, yaşam ve hareketlilik gibi bileşenler planlama ve yönetimde dikkate alınır. Çalışmada Stockholm ve Bursa örnek alınmış, Stockholm'ün öncü kent olduğu; Bursa için çıkarımlar ve akıllı kent önerileri geliştirilmiştir.

Esgil ve Yamaçlı (2023), akıllı cephelerin binanın iç sistemlerinden bağımsız olarak sürdürülebilirliğe ne ölçüde katkı sağladığı sorusuna cevap bulmayı amaçlamıştır. Çalışma, dünyadaki ve Türkiye'deki örnekleri inceleyerek sadece akıllı cephelerin sürdürülebilirliği sağlayabileceğini; ancak Türkiye'deki sistemlerin enerji üretimi konusunda geliştirilmesi gerektiğini tespit etmiştir.

Erbey (2025), Literatürde akıllı şehirleri, teknolojik yeniliklerle sürdürülebilir, verimli ve yaşanabilir kent yaşamı amaçlayan bir model olarak tanımlamıştır. Büyük veri, yapay zekâ ve nesnelerin interneti gibi teknolojiler, ulaşım, enerji ve çevre yönetimi alanlarında dönüşümler yaratmakta ve katılımcı, veri odaklı yönetimle ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan sürdürülebilir kentler oluşmasını sağlamaktadır.

Bibliyometrik Analiz (Bibliometric Analysis)

Köseoglu ve Demirci (2018), artan kent nüfusu ve talepler karşısında Akıllı Şehir uygulamalarının arkasındaki büyük veri temelli yenilikçi teknolojilere odaklanmıştır. Çalışma, Nesnelerin İnterneti (IoT), Büyük Veri ve Yapay Zekâ gibi akıllı teknolojiler ile ulaşım, su yönetimi ve enerji verimliliği alanlarındaki Akıllı Şehir uygulamaları arasındaki ilişkiyi incelemeyi amaçlamıştır.

Savrun ve Mutlu (2019), ISI Web of Science (WoS) ve Scopus veri tabanları üzerinden "city logistics" (kent lojistiği) konulu yayınların bibliyometrik analizini yapmıştır. Çalışma, bu alandaki araştırma eğilimlerini ve literatür boşluklarını tespit etmeyi amaçlamıştır.

Özispa ve Akdaş (2019), 2009-2019 yılları arasında YÖK ve ProQuest veri tabanlarındaki dijital dönüşüm konulu lisansüstü tezleri bibliyometrik analizle incelemiştir. Çalışma, tez sayısının son iki yılda arttığını, ağırlıklı olarak Sosyal Bilimler alanında ve nitel yöntemlerle çalışıldığını tespit ederek gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler sunmuştur.

Zeren ve Kaya (2020), dijital pazarlama alanında ulusal yazını bibliyometrik analizle incelemiş; TR Dizin ve YÖKTEZ'deki 334 çalışma değerlendirilerek yayın eğilimleri, anahtar kelimeler ve kullanılan araştırma yöntemleri tespit edilmiştir. Çalışma, dijital pazarlama araştırmalarındaki artış ve alanın gelişimi hakkında bilgi sunmaktadır.

Akın ve Kurutkan (2021), hasta memnuniyeti alanında 1975-2019 yılları arasında WoS Core Collection veri tabanından elde edilen 2,434 çalışmayı bibliyometrik analizle incelemiş; kelime madenciliği, ortak atıf ve atıf analizleriyle alanın temel eğilimleri ve öne çıkan çalışmalar tespit edilmiştir. Analiz, politika yapıcılar ve akademisyenler için hasta memnuniyeti alanındaki araştırma yönelimlerine ışık tutmaktadır.

Tekin vd. (2021), tersine lojistik alanında 2016-2020 yılları arasında yapılan 182 makaleyi WoS veritabanından bibliyometrik analizle incelemiş; çalışmaların yoğunlaştığı konular, coğrafya, araştırmacılar ve anahtar kelimeler tespit edilmiştir. Analiz, alandaki yayın eğilimleri ve sürdürülebilirlik odaklı araştırma yönelimleri hakkında bilgi sunmaktadır.

Deringöz vd. (2022), Covid-19 uzaktan hasta takibinde kullanılacak Giyilebilir Sağlık Teknolojisi (GST) ürünlerinin seçim problemini ele almıştır. Çalışmada, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), zenginleştirilmiş değerlendirmeler için tercih sıralama organizasyonu yöntemi (PROMETHEE) ve ideal çözüme benzerliğe göre tercih sırası tekniği (TOPSIS) gibi çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak 6 GST ürünü değerlendirilmiş ve her iki yöntemde de giyilebilir sağlık takip cihazı (BioButton) ürünü birinci öncelikli olarak belirlenmiştir.

Desticioğlu ve Asiloğulları Ayan (2022), savunma tedariki alanında WoS veri tabanındaki çalışmaları bibliyometrik analizle incelemiş; anahtar kelimeler, yayınlar, dergiler ve araştırma eğilimleri belirlenerek alandaki gelecek çalışmalara rehberlik edilmiştir.

Baysal ve Yangil (2023), sürdürülebilirliğin sağlanmasında başat rol oynayan sürdürülebilir liderlik kavramını analiz ederek kavramsal çerçevesini çizmek amacıyla WoS veri tabanı üzerinden bibliyometrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Analizler sonucunda yayın ve atıf performansında artış eğilimi olduğu; yazarlar arası iş birliği düşüken, ülke ve üniversiteler arasında kuvvetli iş birlikleri olduğu tespit edilmiştir.

Çil Koçyiğit vd. (2023), sürdürülebilirlik muhasebesi alanında 2000-2022 yılları arasında WoS ile yayımlanan 5,532 makaleyi bibliyometrik analizle incelemiş; atıf, eş dizimlilik ve ortak atıf analizleri ile alandaki gelişim ve eğilimler belirlenmiştir.

Abay vd. (2024), talep tahmini konulu 360 lisansüstü tezi YÖKTEZ veri tabanından bibliyometrik analizle incelemiş; tezlerin dağılımı, üniversite ve alan bazındaki eğilimler belirlenmiştir. Analiz, alandaki akademik gelişmeleri ve araştırmacılara yol gösterici verileri sunmaktadır.

Bozer vd. (2024), akıllı şehir alanında 2015-2024 yılları arasında yazılan 128 lisansüstü tezi YÖKTEZ veri tabanından bibliyometrik analizle incelemiş; tezlerin dağılımı, üniversite ve alan bazındaki eğilimler, araştırma yöntemleri ve anahtar kelimeler belirlenmiştir. Analiz, alandaki akademik eğilimler ve araştırmacılara rehberlik edecek bilgiler sunmaktadır.

Dirican (2024), 1975-2022 yılları arasında WoS veri tabanından elde edilen 651 veri üzerinden Çocuklar İçin Felsefe konusunun bibliyometrik analizini yapmıştır. Çalışma, en çok yayın yapan ülkenin İngiltere, en çok yayın türünün makale ve en sık kullanılan anahtar kelimenin "philosophy for children" olduğunu tespit ederek alandaki mevcut durumu betimlemiştir.

Pınarcı vd. (2024), ekip çizelgeleme alanında 1991-2024 yılları arasında YÖKTEZ’te yer alan 30 lisansüstü tezi bibliyometrik analizle incelemiş; tezlerin dağılımı, konu başlıkları ve en sık çalışılan temalar belirlenmiştir. Analiz, alandaki akademik eğilimler ve araştırma konularına ışık tutmaktadır.

Yılmaz vd. (2024), YÖKTEZ veri tabanında yer alan Afet Yönetimi konulu 2000-2023 yılları arasındaki lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Analizler, tezlerin çoğunlukla yüksek lisans düzeyinde, devlet üniversitelerinde ve sosyal bilimler enstitüsü/işletme anabilim dalında yoğunlaştığını göstermiştir.

Karabalık vd. (2025), 1997-2024 yılları arasında YÖKTEZ veri tabanında yayımlanan sürdürülebilir su kaynakları konulu 97 lisansüstü tezi bibliyometrik olarak incelemiştir. Analizler, İstanbul Teknik Üniversitesi'nin en fazla katkıda bulunan üniversite olduğunu ve tezlerin çoğunlukla çevre mühendisliği konularında, nicel yöntemlerle hazırlandığını göstermiştir.

Kara vd. (2025), sürdürülebilir tarım konusundaki lisansüstü tezleri bibliyometrik yöntemle analiz etmeyi ve mevcut durumu ortaya koymayı amaçlamıştır. Çalışmada, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi'nin en fazla tez hazırlayan kurum olduğu, tezlerin çoğunlukla ziraat alanına odaklandığı ve nicel yöntemlerle (anket) yürütüldüğü tespit edilmiştir.

Sanlı vd. (2024), siber güvenlik çalışmaları üzerine bibliyometrik analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, YÖKTEZ’de yer alan siber güvenlik konulu lisansüstü tezleri bibliyometrik açıdan analiz ederek, bu alandaki akademik çalışmaların yıllara göre dağılımını, en fazla çalışma yapılan üniversite ve akademik birimleri, tercih edilen araştırma yöntemlerini ve konu başlıklarını ortaya koymaktır. Ayrıca, siber güvenlik alanındaki çalışmaların hangi

enstitülerde ve ana bilim dallarında yoğunlaştığını inceleyerek, gelecekte bu konuda yapılacak akademik araştırmalara yol göstermeyi hedeflemektedir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

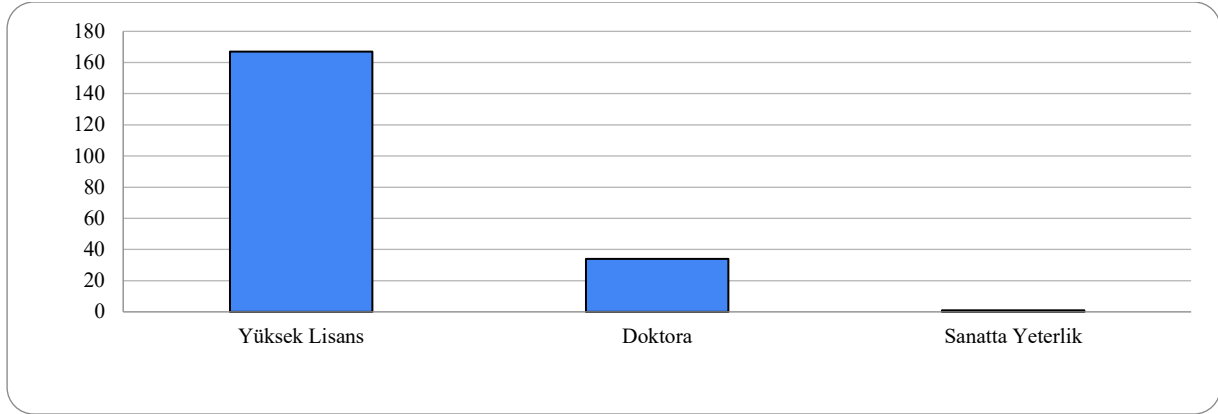
Bu araştırmada, 1994-2025 yılları arasında "akıllı bina" başlığı altında yer alan lisansüstü tezler bibliyometrik analiz yöntemi ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 06.10.2025 tarihinde Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi (YÖKTEZ) veri tabanına erişim sağlanmıştır. Veri toplama sürecinde; anahtar kelime alanına “akıllı bina”, “akıllı şehir” ve “smart building” ifadeleri girilmiş, arama alanı “tümü” olarak seçilmiş ve herhangi bir yıl kısıtlaması uygulanmamıştır. Yapılan tarama sonucunda toplam 202 lisansüstü tez araştırma kapsamına dahil edilmiştir.

Araştırma süreci; veri toplama, veri düzenleme ve analiz olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada elde edilen tez verileri manuel olarak incelenmiş; tekrar eden ve araştırma kapsamı ile doğrudan ilişkili olmayan kayıtlar veri setinden çıkarılmıştır. İkinci aşamada veriler; Microsoft Excel programı kullanılarak tez türü, tez yılı, yayımlandığı üniversite, üniversite türü, enstitü, tez konusu, ana bilim dalı, araştırma yöntemi ve anahtar kelimeler gibi kriterlere göre manuel olarak sistematik bir şekilde sınıflandırılmıştır.

Bibliyometrik analiz kapsamında, çalışmada ağırlıklı olarak betimsel analiz tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu doğrultuda; Microsoft Excel üzerinden gerçekleştirilen hesaplamalarla tezlerin yıllara göre dağılımı, üniversitelere göre üretkenlik düzeyleri, enstitü ve ana bilim dalına göre yoğunlaşma alanları ile anahtar kelime kullanımları frekans ve yüzde değerleri üzerinden analiz edilmiştir. Tematik eğilimleri görselleştirmek amacıyla wordcloud.online sitesi üzerinden bir kelime bulutu oluşturulmuştur. Bu analizler sayesinde, akıllı bina alanındaki akademik çalışmaların zaman içerisindeki gelişimi, yoğunlaştığı dönemler ve öne çıkan araştırma alanları ortaya konmuştur.

BULGULAR (FINDINGS)

Lisansüstü Tezlerin Türüne Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by Type)
İncelenen lisansüstü tezlerin türüne göre dağılımı Şekil 1 ‘de verilmiştir



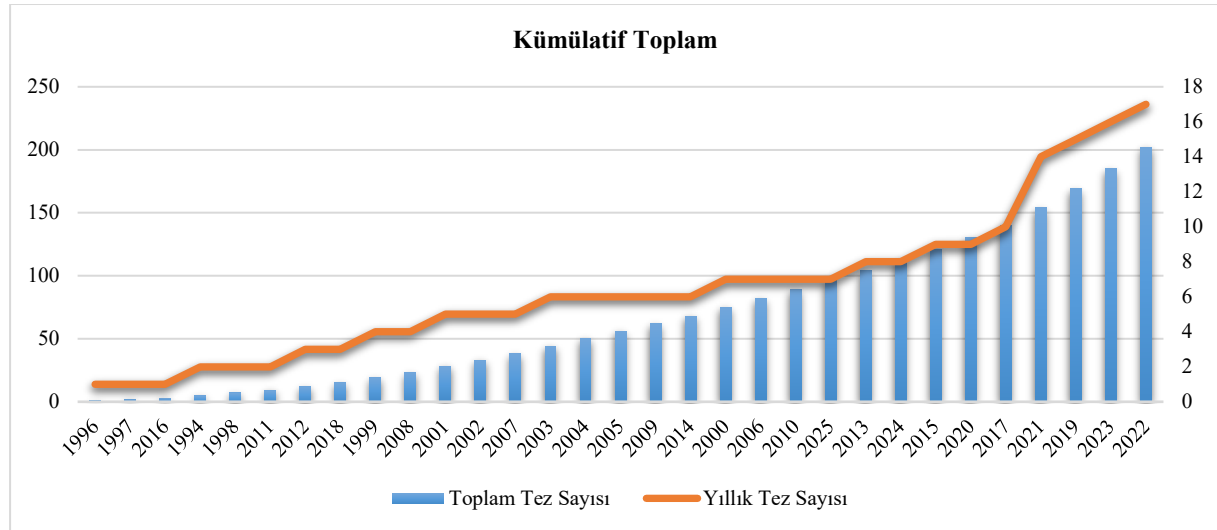
Şekil 1. Lisansüstü tezlerin türüne göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of postgraduate theses by type)

Şekil 1’de sunulan veriler doğrultusunda, araştırma kapsamındaki 202 lisansüstü tezin %82,67’sinin (167 tez) yüksek lisans, %16,84’ünün (34 tez) doktora ve %0,49’unun (1 tez) sanatta yeterlik çalışmalarından oluştuğu saptanmıştır. Bu istatistiksel dağılım, akıllı bina konusunun yüksek lisans düzeyinde akademik yazına kazandırılma eğiliminin doktora düzeyine göre çok daha yüksek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu tercih önceliğinin temel akademik gerekçesi, akıllı bina gibi dinamik, teknik ve doğrudan uygulamaya dönük konuların, yüksek lisans programlarının proje tabanlı ve sonuç odaklı yapısıyla sergilediği yüksek uyumdur. Doktora çalışmaları, genellikle uzun soluklu bir teorik derinlik, kuramsal özgünlük ve geniş kapsamlı literatür katkısı gerektirirken; yüksek lisans tezleri, teknik bir problemin çözümü veya mevcut bir teknolojinin belirli bir örneklem üzerinde uygulanması (vaka analizi) için daha elverişli bir zemin sunmaktadır. Özellikle akıllı bina teknolojilerinin hızla güncellenmesi, yüksek lisans eğitiminin görece kısa süreli yapısını, bu dinamizme ayak uydurmak adına stratejik bir avantaja dönüştürmektedir. Ayrıca, yöntemsel çeşitliliğin (benzetim çalışmaları, saha ölçümleri, anketler vb.) yüksek lisans düzeyindeki araştırmalarda daha hızlı ve esnek bir şekilde uygulanabilmesi, adayların bu alana yönelmesindeki ana motivasyon kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Sakallı Doğru vd., 2024).

Lisansüstü Tezlerin Yıllara Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by Year)

İncelenen lisansüstü tezlerin yıllara göre dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.

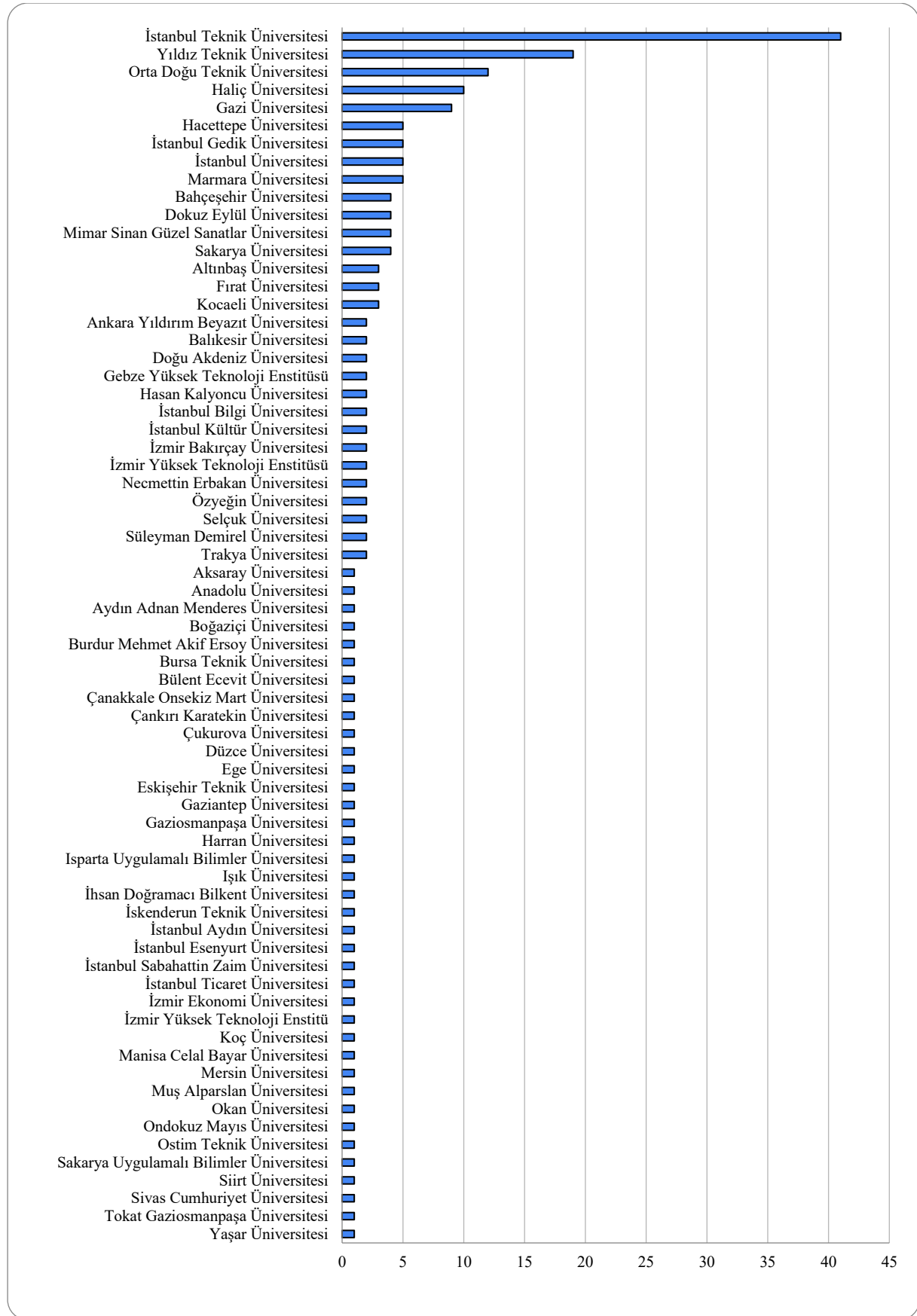


Şekil 2. Lisansüstü tezlerin yıllara göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of postgraduate theses by year)

Şekil 2’de sunulan veriler doğrultusunda, akıllı bina konusundaki lisansüstü tezlerin özellikle 2019 (%7,42), 2022 (%8,41) ve 2023 (%7,92) yıllarında yoğunlaştığı saptanmıştır. 2019 yılındaki ivmelenme, Türkiye’de dijital dönüşüm ve akıllı şehir uygulamalarına yönelik stratejik yönelimlerin artmasıyla paralellik göstermektedir. Bu kapsamda, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayımlanan strateji belgeleri, akıllı şehir ve dijitalleşme konularına verilen önemi artırmış ve akademik çalışmaları teşvik etmiştir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2019). 2022 ve 2023 yıllarındaki artışların temelinde ise; 2021 yılı sonunda Türkiye Büyük Millet Meclisi tarafından onaylanan Paris İklim Anlaşması ve bu doğrultuda binalarda enerji verimliliğine yönelik yasal düzenlemelerin akademik çalışmaları bu yöne sevk etmesi yer almaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021a). Ayrıca, COVID-19 pandemisi sonrası yapı sağlığı, iç mekân hava kalitesi ve bina otomasyon sistemlerinin kullanıcı sağlığı üzerindeki kritik rolünün daha fazla önem kazanması, araştırmacıların akıllı bina teknolojilerine yönelmesini sağlamıştır (Akgül & Kaya, 2021). Bu dönemde Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Yapay Zekâ tabanlı sistemlerin inşaat sektörüne entegrasyonu, akademik çalışmaların teorik yaklaşımlardan uygulamaya yönelmesini hızlandırmıştır (Yıldız & Arslan, 2020).

Lisansüstü Tezlerin Üniversitelere Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by University)

İncelenen lisansüstü tezlerin üniversitelere göre dağılımı Şekil 3’te verilmiştir.

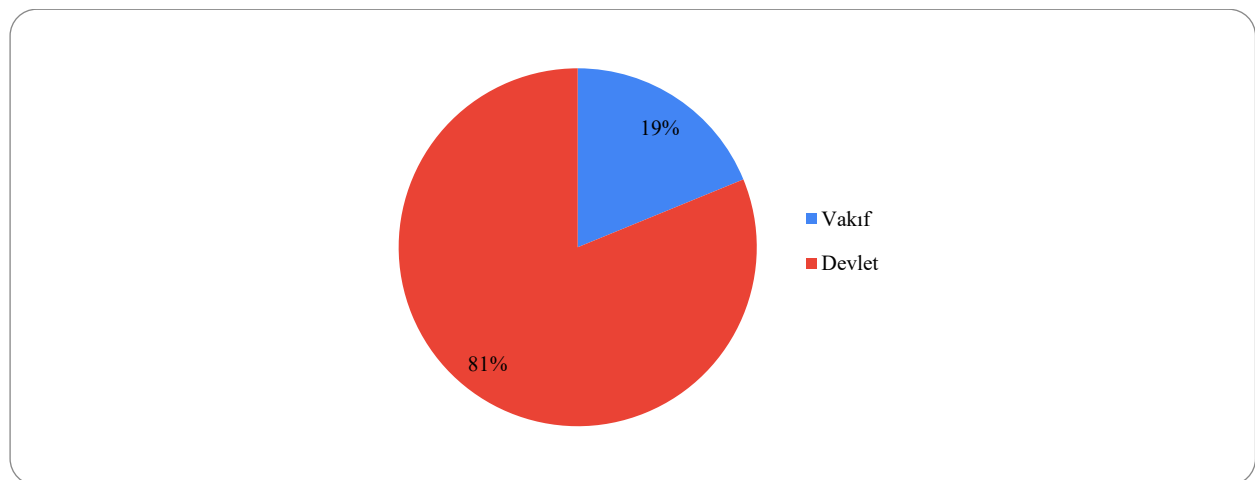


Şekil 3. Lisansüstü tezlerin üniversitelere göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of postgraduate theses by university)

Lisansüstü tezlerin üniversiteler bazındaki dağılımı tetkik edildiğinde; İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) %20,2'lik (41 tez) pay ile bu alanda en yüksek akademik üretkenliğe sahip kurum olarak öne çıkmaktadır. İTÜ'yü sırasıyla Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) %9 (19 tez) ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) %5 (12 tez) ile izlemektedir. Geriye kalan %65,8'lik dilim ise diğer yükseköğretim kurumları arasında dağılım göstermektedir (Şekil 3). İstanbul Teknik Üniversitesinin bu alandaki belirgin liderliği, kurumun stratejik yapılanması ve disiplinlerarası araştırma kültürüyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle bünyesinde barındırdığı Enerji Enstitüsü ve Sürdürülebilirlik Ofisi aracılığıyla; akıllı bina teknolojileri, enerji verimliliği ve çevresel performans optimizasyonu konularında kapsamlı bir koordinasyon sağlanmaktadır (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2023b). Üniversitenin “yaşayan laboratuvar” (living lab) vizyonu çerçevesinde yürüttüğü araştırma ve uygulama faaliyetleri, kuramsal bilginin teknolojik çıktılara dönüşmesini hızlandırarak İTÜ'nün bu alanda öncü bir konuma erişmesini sağlamıştır. Akıllı bina teknolojilerinin mühendislik ve mimarlık disiplinlerinin kesişim noktasında yer alan yüksek teknoloji odaklı yapısı, söz konusu teknik üniversitelerin bu alandaki literatürde öne çıkmasının temel gerekçesi olarak değerlendirilmektedir (Yıldız & Arslan, 2020).

1.1. Lisansüstü Tezlerin Yazıldığı Üniversitelerin Türüne Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by Type of University)

İncelenen lisansüstü tezlerin yazıldığı üniversitelerin türüne göre dağılımı Şekil 4'te verilmiştir



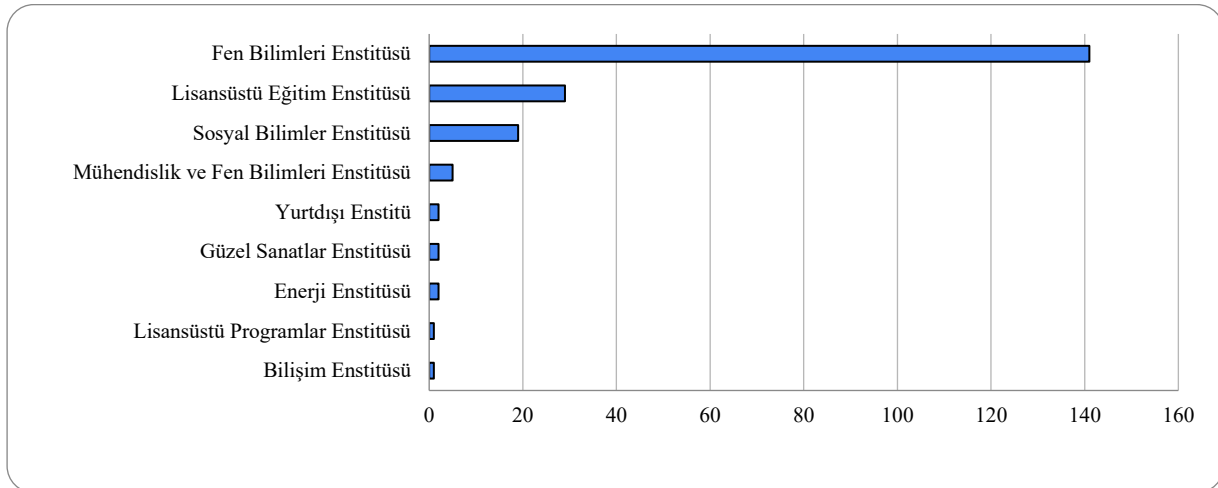
Şekil 4. Lisansüstü tezlerin yazıldığı üniversitelerin türüne göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of graduate theses by type at universities)

İncelenen 202 lisansüstü tezin %81'inin (164 tez) devlet üniversitelerinde, %19'unun (38 tez) ise vakıf üniversitelerinde hazırlandığı saptanmıştır. Devlet üniversitelerinin bu alandaki niceliksel üstünlüğü; köklü araştırma kültürü, teknik altyapı imkânları ve kamu

destekli (TÜBİTAK, AB vb.) fonlara erişim tecrübesiyle ilişkilidir (TÜBİTAK, 2022; Yükseköğretim Kurulu, 2023). Kurumsal bazda İstanbul Teknik Üniversitesi %20,2'lik pay ile lider konumdayken; bu başarıyı %9 ile Yıldız Teknik ve %5 ile ODTÜ takip etmektedir. İTÜ'nün öncü konumu, bünyesindeki Enerji Enstitüsü ve Sürdürülebilirlik Ofisi gibi birimlerin yürüttüğü multidisipliner koordinasyonun bir sonucudur (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2023a). Tezlerin kronolojik dağılımında ise 2019 (%7,42), 2022 (%8,41) ve 2023 (%7,92) yıllarında belirgin bir ivmelenme kaydedilmiştir. 2019'daki artış 'İnşaat 4.0' ve dijital dönüşüm stratejileriyle; 2022-2023 yıllarındaki rekor seviyeler ise Paris İklim Anlaşması sonrası artan enerji verimliliği zorunluluğu ve COVID-19 sonrası 'akıllı-sağlıklı bina' ihtiyacıyla gerekçelendirilmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021b). Özetle; teknolojik maliyetlerin düşmesi ve yasal mevzuatların sıkılaşması, akıllı bina literatürünün bu kritik yıllarda ve teknik odaklı devlet üniversitelerinde yoğunlaşmasını sağlamıştır (Arslan & Yılmaz, 2022).

Lisansüstü Tezlerin Enstitülere Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by Institute)

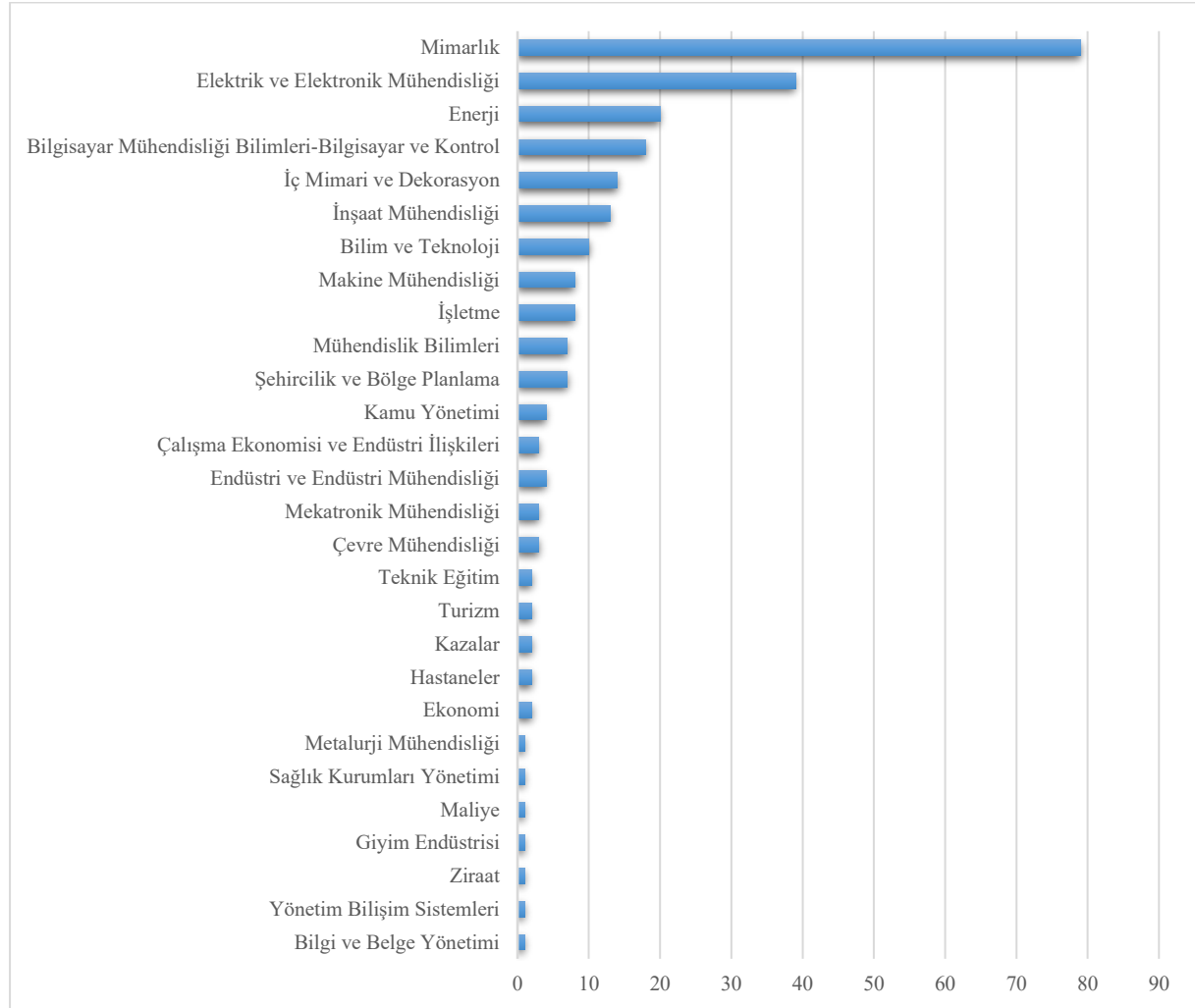
İncelenen lisansüstü tezlerin enstitülere göre dağılımı Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Lisansüstü tezlerin enstitülere göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of postgraduate theses by institute)

Araştırma kapsamında incelenen lisansüstü tezlerin enstitü bazlı dağılımı, akıllı bina konusunun %69,8'lik (141 tez) baskın bir oranla Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Fen bilimleri ve mühendislik disiplinlerinin bu alandaki ağırlığı, akıllı bina sistemlerinin hem mimari tasarım süreçlerine hem de karmaşık teknolojik altyapı gereksinimlerine doğrudan akademik katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu enstitülerin; enerji verimliliği optimizasyonu, ileri bina otomasyonu, sürdürülebilir yapı malzemeleri ve kullanıcı konforunu maksimize eden akıllı iklimlendirme sistemleri gibi

teknik alanlarda sunduğu derinlemesine araştırma olanakları, bu yoğunlaşmanın temel gerekçesini oluşturmaktadır (Dayangaç, 2005). Öte yandan, tezlerin %14,3'ü (29 tez) son yıllarda üniversitelerin lisansüstü yapılanmalarındaki dönüşümün bir yansıması olarak Lisansüstü Eğitim Enstitüleri bünyesinde hazırlanmış; kalan %15,9'luk (32 tez) bölüm ise sosyal bilimler veya bilişim gibi disiplinlerarası odaklı diğer enstitüler tarafından literatüre kazandırılmıştır. *Lisansüstü Tezlerin Konulara Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by Subject)* İncelenen lisansüstü tezlerin konulara göre dağılımı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Lisansüstü tezlerin konulara göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of postgraduate theses by subject)

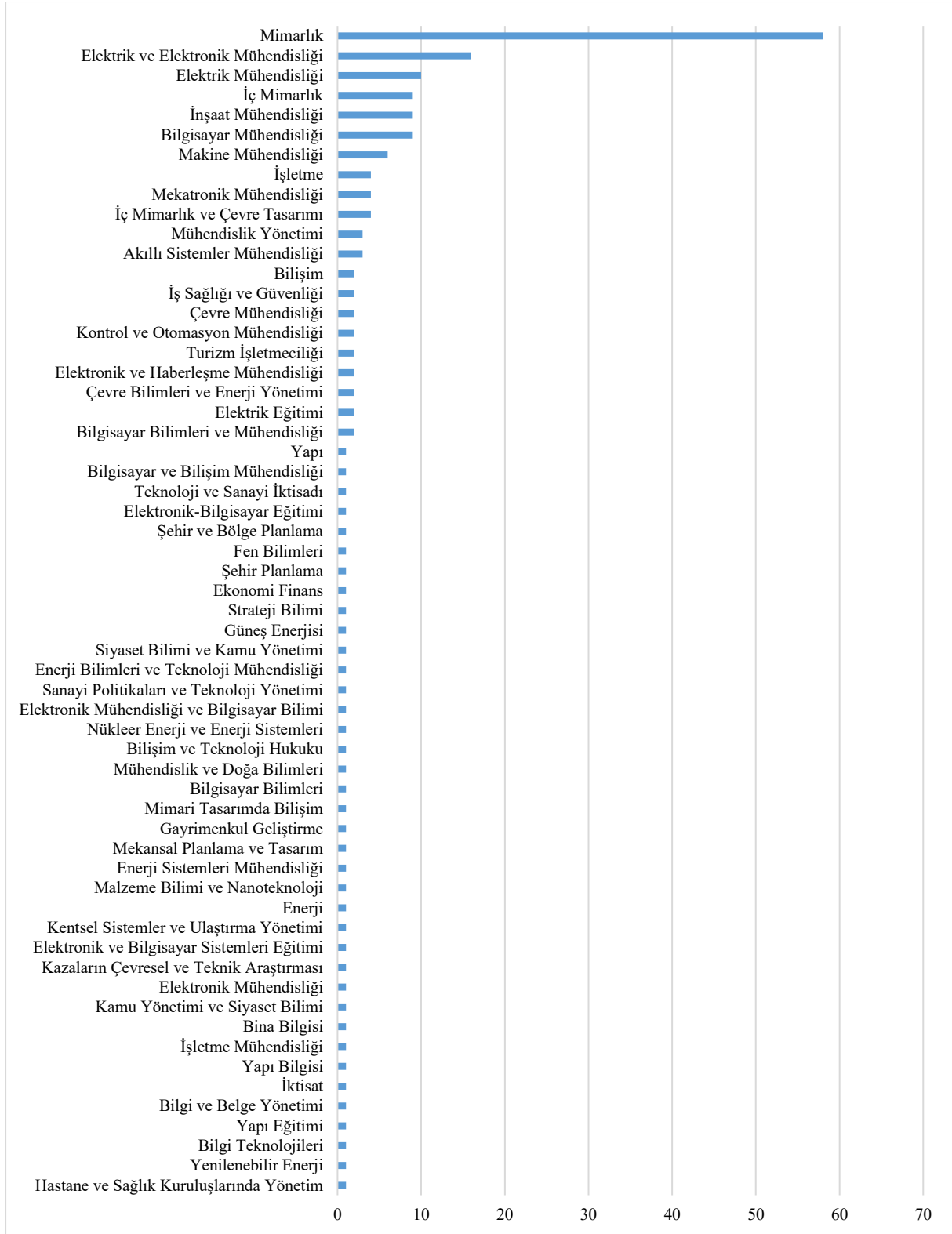
İncelenen lisansüstü tezlerin konu başlıklarına göre dağılımı analiz edildiğinde; mimarlık disiplininin %39,10 (79 tez) ile ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Akıllı bina ekosisteminde mimari tasarımın önemi; estetik kaygıların ötesinde, yapıların işlevsel ve sürdürülebilir bir morfolojiyle kurgulanmasından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda mimarlık çalışmaları; pasif tasarım stratejileri, doğal aydınlatma optimizasyonu ve çevresel etkilerin

minimizasyonu gibi sürdürülebilir kentleşme hedeflerini destekleyen temel parametreler üzerine yoğunlaşmaktadır. Akıllı bina projelerinde mimari süreç; sensör ağları, otomasyon teknolojileri ve ileri malzeme seçimleriyle entegre bir biçimde yürütülerek yapıların operasyonel performansını maksimize etmektedir (Erdede & Erdede, 2020).

İkinci sırada %18,31 (37 tez) oranıyla yer alan elektrik-elektronik alanı, binaların 'akıllı' sıfatını kazanmasını sağlayan teknolojik omurgayı oluşturmaktadır. Bu alandaki araştırmalar; Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı kontrol sistemleri, düşük enerji tüketimli sensör ağları ve yapay zeka destekli izleme algoritmalarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Elektrik-elektronik mühendisliği, binaların donanım ve yazılım altyapısını sağlayarak verilerin gerçek zamanlı analiz edilmesine ve sistemlerin uzaktan yönetilmesine olanak tanımaktadır (Koç, 2022). Üçüncü sırada yer alan enerji alanı ise %9,9 (20 tez) oranıyla; yenilenebilir enerji kaynaklarının bina entegrasyonu (BIPV), enerji depolama çözümleri ve karbon ayak izinin azaltılması gibi süreçlerin optimizasyonunu hedeflemektedir. Bu çalışmalar, akıllı binaların hem ekonomik verimliliğini artırmakta hem de küresel enerji krizine karşı teknik çözümler sunmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023). Geriye kalan %32,69'luk kısım ise makine mühendisliği, bilişim ve inşaat gibi akıllı bina konseptini tamamlayan diğer disiplinler tarafından literatüre kazandırılmıştır.

4.7 Lisansüstü Tezlerin Ana Bilim Dallarına Göre Dağılımı (Distribution of Graduate Theses by Major Field of Study)

İncelenen lisansüstü tezlerin ana bilim dallarına göre dağılımı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Lisansüstü tezlerin ana bilim dallarına göre dağılımını gösteren grafik (Graph showing the distribution of postgraduate theses according to major fields of science)

Çalışma kapsamında analiz edilen lisansüstü tezlerin ana bilim dalı (ABD) bazındaki dağılımı incelendiğinde; Mimarlık ABD'nin %28,7 (58 tez) ile literatürdeki en baskın çalışma alanı olduğu görülmektedir. Akıllı bina araştırmalarının mimarlık disipliniinde yoğunlaşması;

bu alanın yapı tasarımı, sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve kullanıcı konforu gibi multidisipliner parametreleri birincil tasarım girdisi olarak ele almasından kaynaklanmaktadır. Mimarlık disiplini, akıllı binaların kavramsal ve fiziksel üretim aşamalarında teknolojik sistemlerin estetik, işlevsel ve çevresel performansla bütünleşik bir biçimde kurgulanmasını sağlayarak akademik üretimin merkezinde konumlanmaktadır (Özden, 2000).

İkinci sırada %7,9 (16 tez) oranıyla yer alan Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD, binaların teknik omurgasını teşkil eden otomasyon sistemleri, sensör teknolojileri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı kontrol mekanizmalarına odaklanarak yapıların "akıllı" işlevsellik kazanmasına öncülük etmektedir. Üçüncü sırada ise %4,9 (10 tez) ile Elektrik Mühendisliği ABD yer almaktadır. Bu ana bilim dalında gerçekleştirilen çalışmalarda; enerji sistemlerinin optimizasyonu, akıllı şebeke (smart grid) entegrasyonu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bina ölçeğinde verimli kullanımı gibi makro enerji yönetimi konularının öne çıktığı saptanmıştır (Baysal, 2008). Geriye kalan %58,5'lik dilim ise inşaat, makine, bilgisayar ve endüstri mühendisliği gibi akıllı bina konseptinin teknolojik altyapısını ve yönetsel süreçlerini tamamlayan diğer ana bilim dalları arasında dağılım göstermektedir.

4.8. Kelime Bulutu (Word Cloud)

İncelenen lisansüstü tezlerde en çok tekrar eden kelimeler Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Kelime bulutu (Word cloud)

Yapılan bibliyometrik çalışmada, akıllı bina ve akıllı ev kelimeleri en çok tekrar edilen kelimeler olarak kullanılmıştır. Kelime bulutu wordcloud.online sitesinden yapılmıştır.

SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSIONS)

Bu araştırmada, YÖKTEZ veri tabanında yer alan akıllı bina konulu lisansüstü tezler, 1994-2025 yılları arasında bibliyometrik analiz yöntemiyle incelenmiştir. Tarama terimi olarak “akıllı bina, akıllı şehir ve smart building” ifadeleri kullanılmış, arama alanı olarak ise tümü kısmı seçilmiştir. Yapılan arama sonucunda toplam 202 lisansüstü teze ulaşılmıştır. Bu tezler; tez türü, yılı, yayımlandığı üniversite, üniversite türü, enstitü, konusu, ana bilim dalı ve anahtar kelimeler kategorilerine göre analiz edilmiştir. Çalışmada incelenen 202 lisansüstü tezin %16,84’ü (34 tez) doktora, %82,67’sini (167 tez) yüksek lisans tezleri, %0,49’unu (1 tez) ise sanatta yeterlilik tezi oluşturmaktadır. Bu dağılım, akıllı bina konusunun lisansüstü düzeyde daha çok yüksek lisans çalışmalarında ele alındığını ve doktora düzeyinde görece sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu durum, alanın daha çok uygulama odaklı ele alındığına ve ileri düzey teorik çalışmaların artırılmasına ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir. 1994-2025 yılları arasında hazırlanan tezler incelendiğinde, çalışmaların özellikle son yıllarda yoğunlaştığı görülmektedir. En fazla tezin %16 oranıyla 2022-2023 yıllarında (33 tez) yazıldığı tespit edilmiştir. Bu artış, akıllı şehirler, dijitalleşme ve sürdürülebilirlik gibi kavramların önem kazanmasıyla paralellik göstermektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, akıllı bina alanının zaman içerisinde gelişim gösterdiği ve özellikle 2020 sonrası dönemde ivme kazandığı söylenebilir. Üniversitelere göre dağılım incelendiğinde, en fazla çalışmanın %20,2 (41 tez) oranıyla İstanbul Teknik Üniversitesi’nde gerçekleştirildiği görülmektedir. Ayrıca tezlerin %81’inin (164 tez) devlet üniversitelerinde, %19’unun (38 tez) ise vakıf üniversitelerinde hazırlandığı belirlenmiştir. Enstitü bazında değerlendirildiğinde ise çalışmaların %69,8’inin fen bilimleri enstitüsünde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Bu durum, akıllı bina çalışmalarının teknik ve mühendislik temelli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Konu ve ana bilim dalı açısından incelendiğinde, en çok tercih edilen alanın %39 oranıyla (79 tez) mimarlık olduğu, ana bilim dalı bazında ise %28,7 oranıyla (58 tez) yine mimarlık alanının öne çıktığı görülmektedir. Anahtar kelime analizinde ise “akıllı bina” ve “akıllı ev” kavramlarının en sık kullanılan ifadeler olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, literatürde mimarlık ve teknik tasarım odaklı çalışmaların baskın olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular birlikte değerlendirildiğinde, akıllı bina alanındaki akademik çalışmaların zaman içerisinde önemli bir gelişim gösterdiği ve giderek artan bir ilgiyle karşılaştığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, çalışmaların büyük ölçüde belirli

disiplinlerde yoğunlaştığı, disiplinlerarası araştırmaların ise görece sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda, gelecekte yapılacak araştırmalarda akıllı bina konusunun daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınması önem arz etmektedir. Özellikle yapay zekâ uygulamaları, veri güvenliği, kullanıcı deneyimi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi konuların daha fazla araştırılması önerilmektedir. Ayrıca, yalnızca YÖKTEZ veri tabanı ile sınırlı kalınmayıp uluslararası veri tabanlarının da analize dahil edilmesi, atıf analizleri ve iş birliği ağları gibi yöntemlerin kullanılması, alanın gelişim dinamiklerinin daha kapsamlı bir şekilde ortaya konmasına katkı sağlayacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI REDDİ

Bu çalışma ile hiçbir şekilde çıkar elde edilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abay, A., Sarıdağ, K., Güven, E., & Eren, T. (2024). Talep tahmini konulu lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizi. *Düzce Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(2), 272-289.
- Açıksarı, C., & Karasu, B. (2018). Akıllı camlar ve teknolojik gelişimleri. *El-Cezeri*, 5(2), 437-457.
- Akgül, A., & Kaya, B. (2021). Pandemi sonrası yapı sağlığı ve iç mekân kalitesi üzerine bir değerlendirme. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 9(3), 873-884.
- Akın, S., & Kurutkan, M. N. (2021). Hasta memnuniyeti kavramının bibliyometrik analiz yöntemi ile incelenmesi. *Sağlık Akademisyenleri Dergisi*, 8(1), 71-84.
- Akpınar, M. T., & Atak, M. (2020). 1990'dan 2020'ye akıllı şehir çalışmalarının bibliyometrik analizi. *Uluslararası Global Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 85-100.
- Arslan, H., & Yılmaz, M. (2022). Pandemi sonrası akıllı bina tasarımlarında yeni yaklaşımlar ve teknolojik eğilimler. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 7(2), 445-460.
- Bakır, N., & Öztürk, E. (2025). Akıllı kentleşme araştırmaları: Bibliyometrik bir analiz. *Kırklareli Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 4(1), 17-34.
- Baknaklı, T. A. (2019). *İnşaat projelerinde akıllı bina sistemlerinin maliyet analizi ve taşınmaz değeri üzerindeki etkileri: Bir örnek olay incelemesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Baysal, C., & Yangil, F. (2023). Sürdürülebilir liderliğin dün, bugün ve geleceği: Web of Science'de taranan çalışmaların bibliyometrik analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (78), 111-134.
- Baysal, R. (2008). *Akıllı binalarda enerji yönetimi ve kontrolü* [Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Bozer, S. G., Tokatlı, D. D., Güven, E., & Eren, T. (2024). Akıllı şehirler alanında yayınlanan lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizi. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, 3(6), 71-118.
- Cömertler, S., & Cömertler, N. (2021). Akıllı kentlerde çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik, Kopenhag örneği. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 6(1), 317-333.
- Çil Koçyiğit, S., Temelli, F., & Derya Baskan, T. (2023). Sürdürülebilirlik muhasebesi konusunda yayınlanan makalelerin bibliyometrik analizi: Web of Science örneği. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(1), 241-264.
- Dayangaç, D. (2005). *Akıllı bina kavramının mimari tasarıma etkileri* [Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Deringöz, A., Danişan, T., & Eren, T. (2022). Covid-19 takibinde giyilebilir sağlık teknolojilerinin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(2), 533-543.
- Desticioğlu, B., & Asiloğulları Ayan, M. (2022). Savunma tedarik konusunda yapılan çalışmaların bibliyometrik analizi. *SAVSAD Savunma ve Savaş Araştırmaları Dergisi*, 32(1), 159-196.
- Dirican, R. (2024). Çocuklar için felsefenin bibliyometrik analizi. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 44(1), 771-800.

- Erbey, A. (2025). Akıllı şehirlerde teknoloji ve veri yönetimi: Geleceğin şehir yaşamı. *Yönetim bilişim sistemleri alanında yenilikçi çözümler ve güncel yaklaşımlar* içinde. Uşak Üniversitesi Yayınları.
- Erdede, S. B., & Erdede, S. (2020). Sürdürülebilir yerleşmeler ve akıllı binalar: Kavramsal bir yaklaşım. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(1), 112-125.
- Erkek, S. (2017). Akıllı şehircilik anlayışı ve belediyelerin inovatif uygulamaları. *Medeniyet ve Toplum Dergisi*, 1(1), 55-72.
- Esgil, M., & Yamaçlı, R. (2023). Akıllı cephelerin sürdürülebilirliğe etkisi: Türkiye ve dünyadaki örnekleri. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 6(1), 1-12.
- Göçer, Ö., Karahan, E., & Oygür İlhan, I. (2018). Esnek çalışma mekânlarının çalışan memnuniyetine etkisinin akıllı bir ofis binası örneğinde incelenmesi. *Megaron*, 13(1).
- Gunagwera, A. (2017). *Akıllı bina: Bina içi ve akıllı yol bulma* [Master's thesis, Istanbul Sabahattin Zaim University, Institute of Natural Sciences].
- Gürsel Dino, İ., Kalkan, S., & Alatan, A. A. (2019). Bina enerji retrofitti için paydaş-temelli bir akıllı sistem (SISER). 3. *Uluslararası İnşaat Mühendisliği Kongresi* içinde (ss. 178-188). Trabzon, Türkiye.
- İstanbul Teknik Üniversitesi. (2023a). *Sürdürülebilirlik ofisi faaliyet raporu ve enerji yönetimi stratejileri*.
- İstanbul Teknik Üniversitesi. (2023b). *Sürdürülebilirlik raporu: Kampüs yönetimi ve enerji verimliliği stratejileri*.
- Kara, A. P., Öztürk, S., Güven, E., & Eren, T. (2025). Sürdürülebilir tarım konulu tezlerin bibliyometrik analizi. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 7(1), 26-34.
- Karabalık, E., Güven, E., & Eren, T. (2025). Türkiye’de sürdürülebilir su kaynakları alanında yapılmış lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizi (1997-2024). *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 8(1), 1-16.
- Karayılmaz, C., & Özker, A. N. (2020). Kamusal nitelikli özel malların sunumunda akıllı şehirler olgusu: Akıllı şehir uygulamalarında küresel değişimler. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 22(38), 82-100.
- Koç, A. (2022). Akıllı bina teknolojilerinde nesnelerin interneti (IoT) ve sensör ağları: Mevcut durum ve gelecek projeksiyonları. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 15(3), 301-315.
- Koçar Uzan, H. (2024). Akıllı şehir ve yönetim temalı makaleler üzerine bibliyometrik analiz. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 22(53), 938-960.
- Köseoğlu, Ö., & Demirci, Y. (2018). Akıllı şehirler ve yerel sorunların çözümünde yenilikçi teknolojilerin kullanımı. *Uluslararası Politik Araştırmalar Dergisi*, 4(2), 40-57.
- Mangan, S. D. (2006). *Akıllı binalarda alt sistem değerlendirmesi: İstanbul örneği* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Mordoğan, D. (2000). *Akıllı konutların tasarımı ve sorunları* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Oğuz, O. (2007). *Akıllı bina kavramı ve akıllı bina değerlendirme metodları* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özden, G. (2000). *Akıllı binaların ve tasarım sorunlarının tanıtılması* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Özisp, N., & Akdaş, O. (2019). Dijital dönüşüm konusunda yapılmış çalışmaların lisansüstü tezlere dayalı bibliyometrik analizi. *Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 60-75.
- Özler, M. E. (2003). *Akıllı binalarda enerji etkin tasarım parametreleri* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Pınarcı, E. Ş., Vuruşkan, C. T., Güven, E., & Eren, T. (2024). Türkiye’de ekip çizelgeleme konulu lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 9(2), 118-130.
- Sakallı Doğru, E. C., Eroğlu, A., & Yazıcı, N. (2024). Türkiye’de ispat kavramı üzerine matematik eğitimi alanında hazırlanmış lisansüstü tezlerin yönelimlerinin incelenmesi: Bir araştırma sentezi çalışması. *Ulusal Eğitim Akademisi Dergisi*, 8(1), 29-53.
- Sanlı, Y. B., Baltacı, F., Güven, E., & Eren, T. (2024). Siber güvenlik çalışmaları üzerine bibliyometrik analiz. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 17(3), 223-229.
- Savrun, B., & Mutlu, H. M. (2019). Kent lojistiği üzerine bibliyometrik analiz. *Kent Akademisi*, 12(2), 364-386.
- Sinoplu, M., & Ceyhan, E. B. (2023). Akıllı binalarda yapay zekâ destekli enerji yönetimi: Bir inceleme. *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 39-63.
- Sönmez, B., & Kıasf, G. (2018). Çevresel, sosyal ve ekonomik bağlamda akıllı cephe sistemlerinin sürdürülebilir kalkınmaya etkileri. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 47-70.
- Sur, Y. (2020). BIM ve akıllı konut teknolojilerinin konut yenileme projelerinde kullanımına sürdürülebilirlik bağlamında yaklaşım. *Yapı Bilgi Modelleme*, 2(2), 66-78.
- Şahin, A., & Yılmaz, F. H. (2019). Akıllı kent uygulamaları: Stockholm ve Bursa üzerinden bir değerlendirme. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 6(43), 2897-2915.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021a). *Türkiye’nin iklim değişikliği stratejisi ve eylem planı*.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021b). *Türkiye’nin iklim değişikliği stratejisi ve Paris Anlaşması uyum süreci*.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Binalarda enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji uygulamaları strateji belgesi*.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2019). *2023 sanayi ve teknoloji stratejisi*.
- Tekin, M., Öztürk, D., & Bahar, İ. (2021). Tersine lojistiğin bibliyometrik analizi. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(3), 87-100.
- TÜBİTAK. (2022). *Akademik Ar-Ge destekleri (ARDEB) istatistiksel verileri*.

- Üstün, E. E. (2020). *Yapay zekâ çağında akıllı binaların yeniden değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Bilgi Üniversitesi, Lisansüstü Programlar Enstitüsü].
- Varol, Ç. (2017). Sürdürülebilir gelişmede akıllı kent yaklaşımı: Ankara'daki belediyelerin uygulamaları. *Çağdaş Yerel Yönetimler*, 26(1), 43-58.
- Yıldız, T., & Arslan, M. (2020). Nesnelerin interneti ve akıllı bina uygulamaları: Türkiye'de mevcut durum ve gelecek perspektifi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(2), 161-172.
- Yılmaz, A., Gökalp, S., Güven, E., & Eren, T. (2024). Afet yönetimi konulu lisansüstü tezlerin bibliyometrik analizi. *Resilience*, 8(2), 223-234.
- Yükseköğretim Kurulu. (2023). *Üniversite izleme ve değerlendirme genel raporu*.
- Zeren, D., & Kaya, N. (2020). Dijital pazarlama: Ulusal yazının bibliyometrik analizi. *Çağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 17(1), 35-52.